AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE 2025

COSTRUZIONI





Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
1974-2024

AGRA

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

Airi – Associazione Italiana per la Ricerca Industriale, rappresenta da 50 anni un punto di riferimento per il sistema italiano della ricerca industriale.

Dal 1974 opera come associazione senza scopo di lucro con l'obiettivo di sostenere la ricerca, l'innovazione, lo sviluppo tecnologico e il relativo trasferimento di conoscenze e promuove un'innovazione che contemperi il valore economico, il valore ambientale e quello sociale.

Rappresenta e supporta un'ampia rete di soci tra Industrie, PMI, Enti di ricerca pubblici, Università, Organismi di ricerca e Società di consulenza, permettendo lo scambio di esperienze e di buone prassi nella ricerca industriale.

Questa significativa rappresentatività fa di Airi opinion leader e interlocutore autorevole per gli orientamenti tecnologici nelle politiche della ricerca, per l'adeguata gestione e attuazione del sostegno pubblico, e più in generale per la più ampia diffusione della cultura della ricerca industriale italiana.

www.airi.it

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO

XI EDIZIONE

UNA PUBBLICAZIONE DEL GRUPPO DI LAVORO AIRI TECNOLOGIE PRIORITARIE

COSTRUZIONI

PARTE 1: PROFILO DI SETTORE
PARTE 2: SCENARI TECNOLOGICI

AIRI - ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE

LE INNOVAZIONI DEL PROSSIMO FUTURO
XI edizione Settore: Costruzioni

ISBN Isbn 978-88-98935-72-7
copyright © 2025 Airi
Associazione Italiana per la Ricerca Industriale
viale Aventino, 102 00153 Roma tel +39 068848831 e-mail info@airi.it www.airi.it

finito di stampare
nel mese di aprile 2025
Realizzazione editoriale
Airi
progetto grafico
Goodlab srl (www.goodlab.it)



Edizioni:
Agra Editrice srl, Roma (www.agraeditrice.it)



Disponibile in versione online su
www.airi.it



Attribuzione-Non Commerciale-Non Opere Derivate 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

indice - profilo di settore

PREFAZIONE 9

INTRODUZIONE 10

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO profilo di settore 15

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO scenari tecnologici 17

INTRODUZIONE 21

LA FILIERA ITALIANA DEL CEMENTO E DEL CALCESTRUZZO 23

MERCATO E IMPATTI SOCIOECONOMICI 25

I POSSIBILI APPROCCI ALLA SOSTENIBILITÀ 29

INDIRIZZI E TEMI TECNOLOGICI 33

GLI SCENARI TECNOLOGICI 35

indice - scenari tecnologici

NUOVA MODALITÀ D'USO DELLE RISORSE NATURALI (MATERIALI/ENERGIA) E RIDUZIONE DELLA CO_2 **43**

1 Materiali e/o combustibili alternativi e/o a ridotto contenuto di carbonio per la produzione di clinker 45

2 Idrogeno verde - Uso di idrogeno verde per la produzione di cemento 47

3 Materiali secondari - Sottoprodotti industriali o di riciclo, nella produzione di cemento 49

4 Aggregati di riciclo/artificiali a base di sottoprodotti industriali in sostituzione di aggregati naturali per calcestruzzo 53

5 Energie rinnovabili nella produzione di cemento e nella fase di realizzazione dell'opera 57

6 Stoccaggio geologico - Tecnologie CSS (Carbon Capture Storage) specifiche per cementifici 61

7 Durabiità - Progettazione della durabilità delle strutture su base prestazionale 65

NUOVI MATERIALI E PRESTAZIONI **69**

8 Calcestruzzi innovativi e/o ad altre prestazioni 71

9 Altre tipologie di calcestruzzo con prestazioni e/o costituenti innovativi 81

10 Calcestruzzi fibrorinforzati (FRC, UHPFRC) 85

11 Materiali ad attivazione alcalina/geopolimeri 89

12 Altri materiali innovativi: fotocatalitici e cool 93

NUOVE TECNICHE COSTRUTTIVE **95**

13 Manifattura avanzata - Stampa 3D di materiali strutturali a base cementizia 97

14 Materiali per strade - Pavimentazioni stradali in calcestruzzo in galleria 101

indice - scenari tecnologici

NUOVE MODALITÀ PROGETTUALI **105**

15 Strumenti di valutazione della sostenibilità (LCA/EPD) 107

16 Modularità, disassemblaggio e sostenibilità del calcestruzzo 111

17 Massa termica e reti intelligenti 113

18 Resilienza strutturale - Strutture (di calcestruzzo) resistenti a fuoco, vento, allagamenti, sisma 115

19 Digitalizzazione - Applicazione alle costruzioni di tecnologie informatiche avanzate 119

20 Intelligenza artificiale nelle costruzioni 123

RACCOLTA DI CASI STUDIO 129

Rapporto di sostenibilità Federbeton 2023 132

Progetti italiani Concrete Sustainability Council 133

Progetto DIHCUBE 133

Decarbonizzazione cementeria di Rezzato-Mazzano 133

Esempio applicativo di strade di calcestruzzo 134

Progetti di ricerca nell'ambito dei materiali ad attivazione alcalina/geopolimeri 134

Altri casi studio suddivisi per argomenti 135

GLOSSARIO **154**

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI **156**

Prefazione

Da oltre 25 anni, Airi coinvolge manager e ricercatori provenienti da alcune delle principali imprese, centri di ricerca e università Italiane per discutere su quali siano le tecnologie ad alto impatto socioeconomico destinate a trasformare il sistema paese.

Giunto alla XI edizione, il lavoro Airi "Le Innovazioni del Prossimo Futuro" è uno studio di *technology assessment* e *foresight* unico a livello nazionale: un quadro aggiornato degli scenari tecnologici che contribuiranno, nel breve-medio periodo e in maniera trasversale e abilitante, all'innovazione nei principali settori produttivi nazionali.
Dieci settori e 130 scenari tecnologici che fotografano la ricerca industriale italiana, che da sempre ha una significativa vocazione all'esportazione della propria tecnologia nel mondo.
Il presente volume monografico è dedicato al settore delle costruzioni.

Lo studio si propone come una guida per i decision-maker di istituzioni, industrie, investitori per anticipare e comprendere quale sara il nostro futuro tecnologico e gli impatti piu significativi attesi su tutta la nostra societa.
La filiera delle costruzioni riveste un ruolo di primaria importanza per l'economia nazionale e, negli ultimi anni, è stato oggetto di forti investimenti rivolti a trasformare e innovare il modo di progettare e costruire, in un'ottica di produttività, competitività e uso ottimale delle risorse. Airi ha quindi scelto di inserire il settore delle costruzioni nello studio, concentrandosi in questa prima occasione sulla filiera del cemento e del calcestruzzo
Molte le tecnologie ad alto impatto identificate nel tempo dalla analisi Airi nei diversi settori applicativi considerati. Ad esempio Internet of Things, sensoristica e Intelligenza Artificiale per il monitoraggio e gestione dei sistemi, le tecnologie di riciclo delle materie prime, gli impieghi avanzati delle biomasse per uso industriale ed energetico, le tecnologie di conversione e valorizzazione della CO_2, già presenti a partire dal 2012 e che si ritrovano anche in questa edizione, in forma più avanzata e diversificata.

Le scelte di oggi determineranno la posizione del sistema paese nelle diverse catene del valore globali per i prossimi anni (leader o follower). L'obiettivo è stimolare una riflessione puntuale sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico. Per un futuro tecnologico significativo è necessario lavorare insieme - istituzioni, imprese e ricerca pubblica – per comprendere e condividere gli asset e le risorse su cui investire.

In conclusione, vorrei fare un sentito ringraziamento ai coordinatori di settore, ai numerosi esperti, ai soci e non soci, ed allo staff Airi, che hanno messo a disposizione il loro tempo e le loro competenze. Senza di loro, la loro apertura e le loro intuizioni non sarebbe stato possibile realizzare questo studio.

Andrea Bairati, Presidente Airi

Introduzione

Il Rapporto «Le Innovazioni del prossimo futuro», giunto all'undicesima edizione, riporta a cadenza regolare dal 1995 le previsioni tecnologiche che Airi elabora grazie al contributo delle imprese, degli enti di ricerca, delle istituzioni finanziare associati, in collaborazione con qualificati partner pubblici e privati. È uno studio di *technology assessment* e di f*oresight* che svolge un'analisi di tecnologie e famiglie di tecnologie ad alto impatto socioeconomico su dieci settori produttivi di rilievo per l'economia nazionale. L'analisi di tipo verticale (per settore) viene poi integrata da una valutazione complessiva (orizzontale) delle sinergie, convergenze e trasversalità delle tecnologie selezionate lungo tutti i settori produttivi.

Come nella precedente edizione, pur mantenendo la tradizionale impostazione per settori produttivi, abbiamo diviso il rapporto in due parti: nella prima analizziamo la posizione della ricerca industriale italiana rispetto alla competitività globale e la relazione tra sviluppo tecnologico e sostenibilità; nella seconda illustriamo le azioni e gli investimenti che il nostro sistema industriale sta definendo, anche in collaborazione con gli attori più significativi della ricerca pubblica.

I settori che analizziamo in questa edizione sono dieci: Ambiente e transizione circolare, Costruzioni, Chimica e Materiali, Energia e Decarbonizzazione, Farmaceutica, Meccatronica, Microelettronica e semiconduttori, Tecnologie Digitali, Trasporti e Mobilita, Spazio.

Per ogni settore, sono riportati il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sui quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche e intellettuali nel breve-medio periodo.

La definizione di tecnologie prioritarie

Le tecnologie prioritarie sono definite come tecnologie ad alto impatto socioeconomico per il tessuto imprenditoriale e l'economia nazionale. Sono tecnologie abilitanti e sistemiche su catene del valore legate a uno o più settori produttivi, caratterizzate da un rilevante impatto rispetto a una o più delle seguenti dimensioni:

industriale (investimenti, capacità abilitante), politico ed economico (es. competitività, lavoro, politiche di investimento), sostenibilità etico, sociale e ambientale, implicazioni legali (es. necessità o capacità di rispondere a sfide e driver normativi).

I criteri di selezione

Abbiamo individuato oltre 130 tecnologie su dieci settori produttivi analizzati , quasi sempre presentate e raggruppate in scenari tecnologici che fungono da famiglia di riferimento o cluster, attraverso i seguenti criteri:

- Impatto politico ed economico
- Impatto industriale
- Innovatività e time to market
- Impatto etico, legale, sociale e ambientale

Il nostro obiettivo è stato di identificare tecnologie e famiglie di tecnologie con un carattere abilitante per una o più catene del valore e sistemi dell'innovazione. L'orizzonte applicativo o di lancio della ricerca che mette a punto la tecnologia è nel breve medio termine (indicativamente 1 -3 anni, anche a seconda delle caratteristiche del settore), pur non trascurando eventuali tecnologie dirompenti con un ciclo di sviluppo più lungo.

Le tecnologie individuate nelle precedenti edizioni sono state utilizzate come uno dei riferimenti iniziali dello studio, riconoscendo il valore che hanno i dati storici nella validità e affidabilità degli studi *foresight* (la presenza di un ambito tecnologico nel corso di più edizioni dello studio, nelle sue diverse declinazioni e livelli di sviluppo, ne conferma l'importanza).

A chi è rivolto lo studio?

La pubblicazione è rivolta a direttori e manager della ricerca pubblici e privati, ricercatori, istituzioni, investitori, *opinion leader*. Il nostro obiettivo è fornire una guida per le strategie e gli investimenti privati e pubblici in ricerca e innovazione e stimolare una riflessione sulle priorità, le risorse, gli strumenti più opportuni per promuovere uno sviluppo sostenibile a livello sociale, ambientale ed economico.

La metodologia

Lo studio è realizzato mediante l'impegno diretto di esperti della rete Airi, soci e non soci, che nel loro insieme hanno competenze approfondite e riconosciute in relazione

sia ai settori produttivi sia alle diverse tecnologie trattate.
Le attività iniziano con la scelta dei coordinatori dello studio, indicativamente due per settore, nominati in accordo con il Consiglio Direttivo di Airi. Viene costituito quindi il Board dei coordinatori settoriali, che rappresenta il primo nucleo del Gruppo di Lavoro (GdL) Tecnologie Prioritarie. Il coordinamento del GdL è a cura di Airi.
Prima fase: Gruppo di Lavoro e selezione delle tecnologie
Il Gruppo di Lavoro, composto inizialmente dai coordinatori, svolge una prima analisi delle tecnologie da trattare. Vengono considerate diverse fonti, quali piani strategici di sviluppo a livello industriale e politiche per la ricerca e innovazione europee e nazionali. Come dato storico si utilizza il catalogo delle tecnologie trattate nell'edizione precedente (2020). Il coinvolgimento della compagine associativa permette di raccogliere suggerimenti per definire il nuovo catalogo delle tecnologie e gli esperti da coinvolgere.
Vengono riviste le definizioni, la struttura, i modelli da utilizzare per lo svolgimento dello studio.
I risultati della prima fase sono un primo catalogo di tecnologie suddivise per settore, un elenco di esperti collegati a tali tecnologie e settori, delle linee guida condivise per la preparazione dello studio.
Seconda fase: Elaborazione dei profili di settore e degli scenari tecnologici.
I lavori vengono svolti principalmente a livello settoriale. Sulla base del catalogo di tecnologie selezionate nella prima fase, coordinatori ed esperti di ciascun settore si incontrano ed elaborano una versione sintetica degli scenari tecnologici. Il Board dei coordinatori supervisiona regolarmente il programma di attività e fornisce eventuali suggerimenti sulle scelte prese a livello settoriale. Il processo è iterativo, durante l'analisi è possibile rivedere, eliminare o aggiungere tecnologie ed includere, ove necessario, altri esperti.
Il risultato della seconda fase è una prima versione del profilo di settore e degli scenari tecnologici.
Terza fase: Revisione ed integrazione
Il GdL svolge un'attività di revisione complessiva dal punto di vista sia tecnico-scientifico sia editoriale. L'obiettivo è di arricchire ed integrare i singoli scenari e

valutare sovrapposizioni e sinergie tra i diversi settori. Si cerca inoltre, per quanto possibile data la diversità dei temi affrontati e le diverse esigenze settoriali in termini di granularità e di tempi, di dare uniformità al lavoro nel suo complesso.
Il profilo di settore e gli scenari tecnologici vengono rivisti e finalizzati. Il risultato sono le bozze finali del lavoro. Viene infine svolta una revisione editoriale dei singoli capitoli e preparato l'impaginato finale.
Il processo sopra riportato è indicativo e alcune fasi del lavoro sono svolte in parallelo. I lavori di preparazione dell'intero volume, comprensivo dei dieci settori produttivi, si svolgono in un periodo di circa due anni.
Questa edizione dello studio Airi ha coinvolto oltre 180 esperti, tra coordinatori e membri dei gruppi di lavoro settoriali, che sono riportati nelle prime pagine dei capitoli relativi a ciascuno dei diversi settori.
Per la presente edizione, si è scelto di pubblicare in anteprima alcuni dei settori nella forma di volume monografico.

Le limitazioni dello studio

Il lavoro è il risultato delle competenze e della visione di Airi e degli esperti coinvolti nello studio, che determina la tipologia e ampiezza degli ambiti trattati, tra cui in particolare la scelta dei settori e degli scenari tecnologici.
A titolo di esempio, in questa edizione non viene trattato in maniera approfondita il settore agroalimentare (se non come ricaduta di alcune tecnologie settoriali), che invece è di evidente rilievo per l'economia nazionale.
L'approfondimento dei temi trattati è limitato dalla necessità di contenere sia la lunghezza sia l'impegno richiesti dallo studio, anche considerata la partecipazione a carattere volontario di tutti gli esperti coinvolti.
Sono utilizzati dati provenienti da un numero selezionato e limitato di fonti bibliografiche, sia pubbliche sia provenienti da dati interni delle aziende e centri di ricerca coinvolti, che coprono l'intero spettro dei settori selezionati ma che non si possono considerare esaustive.
I contenuti e le opinioni espresse sui possibili scenari di sviluppo tecnologico per il sistema paese rimangono un esercizio di analisi, deduzione e previsione, come tale soggetto a variabilità ed imprecisioni.

I contenuti

Lo studio analizza una parte rilevante del portafoglio tecnologico del sistema paese. Per ogni settore, viene riportato il quadro o profilo generale che lo caratterizza (imprese, mercato, occupazione, tendenze e criticità, impatti socioeconomici, investimenti in R&S) e gli scenari tecnologici (descrizione, motivazioni per lo sviluppo, stato dell'arte, risorse economiche necessarie) sulle quali il sistema della ricerca industriale italiana intende concentrare risorse economiche ed intellettuali nel breve-medio periodo.

È prevista la pubblicazione delle analisi dei dieci settori sia in forma integrale in due volumi (volume 1, profilo di settore; volume 2, scenari tecnologici), sia in pubblicazioni monografiche (per settore).

Il presente volume rappresenta la pubblicazione settoriale dello studio relativa al settore Costruzioni.

COSTRUZIONI

PROFILO DI SETTORE

MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

HEIDELBERG MATERIALS ITALIA CEMENTI S.P.A.	**Antonio Princigallo**
UNIVERSITÀ DI BRESCIA	**Giovanni Plizzari**

ESPERTI

FEDERBETON	**Laura Negri, Michela Pola**

COSTRUZIONI

SCENARI TECNOLOGICI

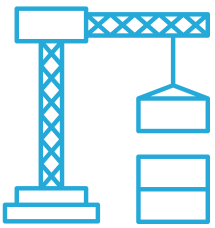
MEMBRI DEL GRUPPO DI LAVORO

COORDINATORI

HEIDELBERG MATERIALS ITALIA CEMENTI S.P.A.	**Antonio Princigallo**
UNIVERSITÀ DI BRESCIA	**Giovanni Plizzari**

ESPERTI

ANCE Lombardia (Associazione Regionale dei Costruttori Edili Lombardi)	**Andrea Pastori, Sara Grassi, Valentina Rossi**
CERTIMAC	**Luca Laghi, Eleonora Sangiorgi**
CETMA	**Alessandro Marseglia, Vito Tarantino**
ENEA	**Antonella Luciano, Claudia Brunori**
FEDERBETON	**Laura Negri, Michela Pola**
POLITECNICO DI MILANO	**Monica Lavagna**
STRESS-S.c.a.r.l.	**Alberto Zinno, Adriana Pacifico**
WEBUILD INNOVATIONS	**Riccardo Angiuli**



SETTORE

COSTRUZIONI

PROFILO DI SETTORE

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si osserva una sempre maggiore attenzione e crescenti investimenti da parte di istituzioni e industrie nazionali ed europee riguardo all'innovazione tecnologica nel settore delle costruzioni.

Le tecnologie emergenti e abilitanti promettono di avere un impatto lungo tutta filiera costruttiva, con un ruolo unico per portare elementi di innovazione in prodotti, materiali e tecnologie che contribuiranno al miglioramento delle prestazioni, allo sviluppo sostenibile e al risparmio delle risorse naturali impiegate.

Il settore è caratterizzato da una propensione all'innovazione importante ma spesso limitata dalle risorse rese disponibili. Cambiamenti significativi del modo di progettare e costruire, come quelli che possono essere indotti dallo sviluppo tecnologico, sono infatti complessi, in quanto richiedono investimenti rilevanti, sono soggetti ad un quadro normativo stringente e possono avere un impatto sia di breve sia di medio e lungo periodo su molteplici attori lungo la filiera.

Un continuo processo di trasformazione e adattamento della filiera delle costruzioni è sempre più importante per il mantenimento della produttività e competitività e per un uso ottimale delle risorse impiegate.

Per questi motivi Airi ha scelto di inserire, per la prima volta, il settore delle costruzioni nell'analisi realizzata con la XI edizione de "Le Innovazioni del prossimo futuro".

Data l'ampiezza dei temi trattati in questo primo studio si è scelto di dedicarsi ad un ambito specifico, quella della filiera del cemento e del calcestruzzo.

LA FILIERA ITALIANA DEL CEMENTO E DEL CALCESTRUZZO

Il settore delle costruzioni è tra le forze trainanti per l'economia europea e la Commissione Europea sta lavorando per orientarne lo sviluppo secondo i principi dell'economia circolare. Il mondo della ricerca si sta adoperando sempre di più per sviluppare materiali sostenibili, prevedendo il riutilizzo di materiali di scarto.

La filiera del cemento e del calcestruzzo svolge da sempre un ruolo strategico per lo sviluppo socioeconomico del Paese, essendo il primo anello della catena che consente la realizzazione di infrastrutture e edifici sicuri e affidabili. Il valore della produzione di questa filiera è di 13 B€, con più di 2700 aziende e circa 35 mila addetti nei vari comparti -cemento, calcestruzzo preconfezionato e i suoi additivi, travi reticolari, calce e gesso e aggregati da riciclo.

Nel seguito saranno messi in luce alcuni aspetti della tecnologia del calcestruzzo che sono considerati con elevate potenzialità di sviluppo nel medio termine sulla base delle proprietà intrinseche del materiale e ben in relazione agli obiettivi della sostenibilità definiti dalla EC. Infatti i materiali con prestazioni elevate e/o a carattere innovativo, possono fornire particolari vantaggi nel senso della sostenibilità. In particolare, le tecnologie selezionate sono orientate al prossimo futuro e conseguentemente sono connaturate ad un certo grado di innovatività di grado differente caso per caso. Seppure alcune già disponibili in qualche forma, esse richiedono ulteriori sforzi sia per quanto riguarda lo sviluppo tecnologico in senso stretto, sia per quanto concerne la diffusione. Tale sforzo di carattere scientifico/tecnico/normativo sarà possibile solo rendendo disponibili risorse adeguate.

MERCATO E IMPATTI SOCIOECONOMICI

La sostenibilità come principale obiettivo industriale del settore Cemento

La produzione, ad alto consumo di energia, con consumi della sola componente elettrica pari a circa 1,9 TWh all'anno, con l'impiego di circa 116 KWh per la produzione di una tonnellata di cemento è tra le principali caratteristiche della filiera.

Consapevoli del proprio ruolo rilevante nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità nazionali e delle implicazioni di costo e competitività industriale, le imprese del comparto hanno promosso l'adozione di una Strategia di decarbonizzazione ad hoc per il settore del cemento.

Le imprese della filiera stanno investendo ingenti risorse economiche per il raggiungimento di un processo produttivo più sostenibile e per la realizzazione di prodotti con una minore impronta carbonica. Al contempo, tuttavia, la grave crisi energetica ancora parzialmente in corso e il fenomeno dell'aumento dei costi delle materie prime hanno gravemente impattato il settore, rendendo necessario il potenziamento a livello nazionale di misure di supporto alle imprese del comparto, al fine di assicurarne la competitività e tenuta. Gli interventi come il credito d'imposta hanno consentito alle imprese di superare uno dei periodi più difficili della storia recente, scongiurando il rischio di vedere scomparire un intero settore industriale come quello del cemento.

Il costo dell'energia ha iniziato a scendere dopo aver toccato picchi mai registrati prima. Secondo i dati elaborati da Federbeton, nel biennio 2022-23 il costo di produzione è cresciuto enormemente soprattutto a causa dei rincari energetici. L'energia, sia elettrica che termica, impiegata nel processo rappresenta infatti oltre il 50% dei costi variabili di produzione. Il prezzo d'acquisto medio dell'energia elettrica dopo aver raggiunto i 500 €/MWh durante l'estate 2022 si è poi stabilizzato su valori più bassi (92 €/MWh il valore medio del primo trimestre 2024). Rimangono, tuttavia, valori ancora non confrontabili con quello del 2019 di poco più di 50 €/MWh o del 2020 di circa 40 €/MWh (fonte GME); un prezzo dell'energia

che ha, peraltro, oscillazioni giornaliere rende molto difficile la programmazione della produzione del cemento. All'aumento dei costi di produzione ha contribuito anche il prezzo del petcoke, il combustibile utilizzato nel settore (ad esempio, nel 2024 più che triplicato rispetto alla media dei valori registrati nel 2019).

Nonostante questo, l'attenzione nei confronti dell'industria nazionale deve rimanere alta. Permane, infatti, il rischio di una perdita di competitività nei confronti dei Paesi extra-EU che hanno standard ambientali e di conseguenza costi, più bassi. Non va dimenticato che l'industria italiana del cemento (insieme a quella europea) ha di fronte una sfida ambiziosa: raggiungere la carbon neutrality nel 2050. Ai costi di produzione comunque più alti che in passato ed al valore dei diritti di emissione (quotazione media del primo trimestre 2024 pari a 60 € a tonnellata; valore elevatissimo se confrontato con i 25 € registrati in media nel 2019), si aggiungono gli investimenti che le imprese dovranno mettere in campo per la decarbonizzazione: 4,2 B€, oltre a extra-costi operativi pari a circa 1,4 B€ annui (dati emersi dalla Strategia di decarbonizzazione del settore cemento, elaborata nel 2021 con il supporto di Kpmg[1]).

La sfida della sostenibilità per l'Italia e l'Europa

La sostenibilità è però più impegnativa che per altri comparti. Nella produzione di cemento, infatti, il 60-70% delle emissioni dirette di CO_2 deriva dalle stesse reazioni chimiche di processo ed è quindi incomprimibile (seppure, limitatamente a tale quota, siano possibili assorbimenti di CO_2 atmosferica con la carbonatazione del calcestruzzo). Ciò rende necessario il ricorso alla cattura della CO_2, finalizzata allo stoccaggio geologico (e/o uso), tecnologia legata a investimenti ben superiori rispetto a quelli di altri settori energivori. Questo pone le imprese europee in posizione di svantaggio rispetto a quelle extra-EU che non condividono gli stessi obiettivi di decarbonizzazione e le stesse normative ambientali. In Italia, peraltro, la situazione è più critica rispetto al resto dell'Europa perché il cemento è un materiale facilmente trasportabile via mare e il nostro Paese, per questioni geografiche, è particolarmente esposto all'importazione. L'Italia ha 8.000 km

di coste ed è circondata da Paesi sul Mediterraneo che hanno una capacità produttiva in esubero e una struttura di costo più competitiva, tale da riuscire a consegnare cemento sul territorio a un prezzo inferiore rispetto al prezzo medio nazionale (-25% secondo le rilevazioni ISTAT). Un aumento delle importazioni si è già registrato negli ultimi anni a seguito dell'aumento del costo dei diritti di emissione. Conseguentemente è stato generato un extra-profitto per l'importazione da Paesi non aderenti all'Unione Europea (non sottoposti al sistema ETS); è prevedibile un peggioramento a seguito dell'incremento dei costi dell'energia e degli sforzi che l'industria dovrà sostenere per la decarbonizzazione. Il settore sta quindi attraversando un momento di grande difficoltà e rischia una delocalizzazione senza possibilità di ritorno. Il rischio è dunque concreto e si manifesta in un momento storico che vede il cemento indispensabile per la ripartenza. Non si tratta di un problema limitato al comparto del cemento; la ricaduta negativa interesserebbe un ampio contesto economico e sociale. Il cemento e il calcestruzzo sono, infatti, materiali necessari per la vita quotidiana, la mobilità, la sicurezza e la stessa crescita economica del Paese. Perdita di competitività dell'industria nazionale significherebbe legare l'approvvigionamento alle importazioni, rendendo più instabili i flussi ed i livelli di costo; questo metterebbe in difficoltà l'intera filiera delle costruzioni, rallentando i cantieri pubblici in una fase positiva in cui le costruzioni stanno trainandone un'importante ripresa economica. Dal punto di vista ambientale, inoltre, si assisterebbe alla "delocalizzazione" delle emissioni in altri Paesi con normative meno stringenti rispetto a quelle europee, con un impatto globale maggiore, anche a causa delle più ampie distanze di trasporto. Non meno importante, si perderebbe infine la garanzia sulla qualità dei materiali, i cui controlli sarebbero in parte demandati ai Paesi importatori, con possibili ricadute sulla sicurezza delle opere. Diversamente, l'attuale contesto di emergenza infrastrutturale necessita di materiali affidabili ed opere sicure e sostenibili. Dopo la fase emergenziale legata all'incremento del costo dell'energia, servono ora misure strutturali di sostegno e tutela delle imprese italiane[2,3].

I POSSIBILI APPROCCI ALLA SOSTENIBILITÀ

Supportare le imprese nello sviluppo di infrastrutture "breakthrough", strategiche per la decarbonizzazione (cattura, stoccaggio e utilizzo della CO_2, utilizzo di idrogeno nel processo di produzione di cemento, etc.) per non delegare a Paesi extra-EU la sicurezza delle costruzioni e delle infrastrutture italiane e valorizzare e tutelare la filiera italiana del cemento e del calcestruzzo (Federbeton, 2022)[4].

Preservare la competitività delle imprese nazionali. A livello europeo, il meccanismo di adeguamento CBAM (*Carbon Border Adjustment*) prevede misure per proteggere la competitività dell'industria nazionale del cemento dalle importazioni da Paesi extra-UE. Purtroppo, però, i tempi previsti per l'entrata in vigore non sono abbastanza tempestivi e potrebbero arrivare addirittura troppo tardi. Fino al 2026 infatti non è previsto alcun pagamento e la partenza pianificata risulta debole ed insufficiente a livellare il piano competitivo con i produttori dei paesi terzi (si paga solo il 2,5% nel 2026; si arriva al 100% solo nel 2034). Il settore del cemento ha, inoltre, a disposizione ampi spazi, costituiti dalle porzioni di aree estrattive già sfruttate, che rientrano già tra le aree idonee per lo sviluppo della produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

L'uso dei combustibili alternativi in sostituzione di quelli fossili è un'opportunità per l'ambiente, la collettività e l'indipendenza energetica del Paese. Si tratta, infatti, di una risorsa energetica a km0, immediatamente applicabile e che può portare una riduzione delle emissioni di CO_2 del 12%. I combustibili alternativi derivano dai rifiuti non riciclabili né riutilizzabili in altro modo e che vengono così sottratti al conferimento in discarica, all'incenerimento o all'export. Le cementerie rappresentano così un tassello del ciclo virtuoso dell'economia circolare. L'Europa ha fissato, inoltre, l'obiettivo di riduzione al 10% per il conferimento in discarica dei rifiuti urbani entro il 2035. I combustibili alternativi sono ampiamente utilizzati in Europa, proprio perché sicuri, convenienti e vantaggiosi anche in termini ambientali. I Paesi europei più avanzati arrivano a oltre il 70% (la media europea è 53%) mentre in Italia la sostituzione dei prodotti petroliferi tramite CSS è limi-

tata al 22,5%. Un tasso di sostituzione del 66% in Italia porterebbe al taglio di 6,8 milioni di tonnellate di CO_2 emesse in atmosfera, grazie al mancato conferimento in discarica di questo materiale (stima elaborata dal Laboratorio REF Ricerche)[5]. Occorre quindi sostenere **semplificazioni amministrative** che equiparano l'utilizzo del CSS-Combustibile[1] a quello dei combustibili "tradizionali", rendendo più rapido l'iter burocratico pur mantenendo inalterate le garanzie di controllo e la trasparenza. Ad oggi non c'è un'applicazione omogenea sul territorio, a discapito di una soluzione che rappresenta un'opportunità per l'ambiente, la collettività e l'indipendenza energetica del Paese.

Ridurre l'utilizzo di pet-coke per ridurre anche l'impatto del trasporto di un combustibile, di derivazione petrolifera, importato principalmente dal Golfo del Messico. Attualmente consumiamo 1,1 milioni di tonnellate di pet-coke all'anno a un costo medio di 150€/t (dati 2022)[6]. La spesa totale è di 165 M€. Ipotizzando un utilizzo di combustibili alternativi con un tasso di sostituzione dell'80%, così come nella strategia di decarbonizzazione del settore, si risparmierebbero 130 M€, (corrispondenti al 7% del fatturato). La carenza di quote gratuite di emissione, del sistema ETS, ed il loro costo stabilizzatosi tra i 70 e gli 80 €/ton sta avendo un impatto estremamente negativo sulle produzioni nazionali di cemento per effetto dei flussi di importazione che crescono a un ritmo esponenziale negli ultimi 4 anni. Se non si pone un freno a questo fenomeno il nostro paese rischia di rimanere legato alle importazioni di cemento da paesi terzi.

Valutazione estesa al ciclo di vita del prodotto edilizio, considerando gli impatti ambientali legati alle fasi di produzione dei materiali e componenti, all'uso e al fine vita, nonché i benefici attesi dalle attività potenziali di riuso e riciclo dei materiali al termine della vita utile (Life Cycle Assessment). Infatti, l'uso di Environmental Product Declaration (EPD) per confrontare materiali al di fuori del contesto applicativo (soluzione costruttiva, edificio) dovrebbe essere evitato, essendo rilevante la funzione che il materiale svolge in uso. Inoltre, nelle valutazioni di soste-

[1] Il combustibile solido secondario (CSS) è un tipo di combustibile derivato dalla lavorazione dei rifiuti urbani non pericolosi e speciali non pericolosi. Può essere suddiviso in due principali tipologie: il CSS e il CSS-combustibile, che differiscono per le loro caratteristiche chimico/ fisiche e per la normativa applicabile. Il CSS-combustibile è materiale che ha cessato la qualifica di "rifiuto" e che pertanto viene considerato un nuovo prodotto.

nibilità, è necessario fare opportuno riferimento alla proprietà del calcestruzzo di ricarbonatare, ossia di riassorbire la CO_2. Adeguate scelte progettuali favoriscono la sostenibilità e un uso ottimale dei materiali in relazione alle rispettive proprietà, ottimizzando la geometria degli elementi costruttivi e strutturali, economizzando la quantità di materiale impiegato, scelta tra soluzioni costruttive alternative a parità di prestazione. Si citano, a titolo esemplificativo: la norma tecnica UNI EN 15978:2011 Sostenibilità delle costruzioni - Valutazione della prestazione ambientale degli edifici - Metodo di calcolo e il framework europeo Level(s) per la valutazione della sostenibilità degli edifici; i protocolli LEED, BREEAM, Casaclima, ITACA, WELL; i CAM edilizia; i criteri DNSH. Si deve osservare che la sostenibilità è descritta da indicatori di impatto non omogenei; pertanto, la costituzione di indicatori cumulativi a partire dai singoli e la maturazione di una valutazione complessiva di sostenibilità, così come una classificazione complessiva quantitativa, seppure complessa, è di estrema importanza. Un'adeguata evoluzione delle normative potrà consentire una più profonda comprensione di tutti gli aspetti della sostenibilità delle costruzioni.

SOSTENIBILITÀ DELLA FILIERA PRODUTTIVA DEL CALCESTRUZZO

A livello globale, lo schema di certificazione CSC attesta la gestione responsabile di una filiera produttiva da sempre impegnata per la sostenibilità, nel senso più ampio del termine. CSC è approda in Italia grazie all'iniziativa di Federbeton che, nel 2017, assume il ruolo di RSO – Regional System Operator –, ovvero di interfaccia nazionale con il gestore dello schema livello globale (CSC – Concrete Sustainability Council). La scelta è dettata dalla volontà di mettere a disposizione degli stakeholder uno strumento concreto per misurare il ruolo del settore nella sostenibilità delle costruzioni. Lo schema riguarda direttamente il calcestruzzo (preconfezionato e prefabbricato), ma coinvolge tutta la filiera attraverso la certificazione dei fornitori di cemento e di aggregati.

Lo schema prevede anche moduli aggiuntivi che riguardano aspetti specifici. Primo fra tutti il modulo CO2 che misura la riduzione di emissioni rispetto a un riferimento nazionale. A livello italiano tale riferimento è in fase di definizione, in coerenza con la revisione della UNI 11104 (attualmente in corso in ambito UNI).

Risulta pertanto essenziale identificare specifiche caratteristiche tecniche e classificare i relativi livelli di prestazione al fine di individuare i prodotti come sostenibili, evitando pertanto il ricorso a dichiarazioni generiche e/o non tecnicamente validate. In tale contesto, il ruolo delle tecnologie innovative, strettamente connesso allo sviluppo di materiali innovativi per l'ottenimento di prestazioni migliorative nelle costruzioni, assume una particolare rilevanza e può consentire di porre solide basi per uno sviluppo sostenibile delle costruzioni.

Al riguardo si segnala il nuovo regolamento sui prodotti da costruzione (nuovo CPR[7]) ed il regolamento europeo (ESPR)[8] che definisce i requisiti di progettazione ecocompatibile per prodotti sostenibili.

INDIRIZZI E TEMI TECNOLOGICI

Le criticità evidenziate possono essere superate per la parte tecnologica perseguendo uno sviluppo, di prodotto e di processo, supportato da un coerente sviluppo normativo/regolamentare utile a favorire l'evoluzione del settore in senso sostenibile. L'innovazione tecnologica dovrà essere prioritariamente orientata alla decarbonizzazione in senso ampio, cogliendo aspetti di prodotto/processo e relativi alla costruzione nel suo insieme. Gli aspetti da approfondire sono relativi ai seguenti ambiti:

- Efficienza energetica in prospettiva rinnovabile;
- Ottimizzazione delle risorse nell'ottica dell'economia circolare e progressiva riduzione dei rifiuti;
- Sviluppo di nuovi materiali e caratteristiche/prestazioni;
- Adozione di nuove modalità progettuali e tecniche costruttive che possano favorire la sostenibilità.

Il percorso nel senso della sostenibilità include varie dimensioni, tra cui biodiversità, salute, sicurezza ed in generale fattori socioeconomici.

Si osserva un certo grado di sovrapposizione tra diversi ambiti. Una data tecnologia può infatti principalmente basarsi su un una data proprietà determinando potenzialmente particolari vantaggi tecnici in una data applicazione; la mancata diffusione in quella applicazione (es. calcestruzzi per strade) giustificherebbe di per sé maggiore dedizione e risorse.

La trasversalità riguarda sia gli ambiti prima descritti e parallelamente la progettazione. Ad esempio, l'idea, sottesa in uno dei casi descritti negli scenari tecnologici proposti in questo studio, è di utilizzare la massa termica (proprietà) come proprietà di base della tecnologia. Il calcestruzzo ha intrinsecamente una capacità termica notevole, ma l'impiego di costituenti non tradizionali potrebbe ottenerne incrementi ulteriori con effetto ultimo vantaggioso in termini di sostituzione delle fonti fossili utilizzate maggiormente per le fasi di fabbisogno energetico di

picco. Si tratta quindi di scelte non esclusivamente inerenti alla progettazione strutturale, ma di interfaccia tra lo sviluppo di materiali innovativi e/o la progettazione microstrutturale dei materiali stessi.

Infine, lo stretto rapporto tra progettazione e dati sperimentali emerge prepotentemente da una lettura del quadro presentato negli scenari tecnologici, in relazione in particolare agli sviluppi delle tecnologie digitali e all'intelligenza artificiale. Nel caso specifico dell'intelligenza artificiale, solo una stretta sinergia tra e metodiche legate alla progettazione e all'analisi dei dati sperimentali (deduttiva nel primo caso ed induttiva nel secondo) consentirà di orientare al meglio lo sviluppo futuro impedendo derive tecnologiche, possibili in entrambi gli ambiti se considerati come entità indipendenti. Si pensi ad esempio all'inutilità pratica e/o oneri associati alla produzione di dati sperimentali se non inseriti in un quadro razionale complessivamente orientato alla sostenibilità della costruzione o d'altra parte ai rischi associati all'uso di modelli non validati sperimentalmente, anche se per tramite di sistemi di intelligenza artificiale.



Figura 1: Viadotto Genova San Giorgio (foto concessa da Heidelberg Materials)

Il potenziale che questi nuovi materiali potrebbero avere su differenti settori industriali appare strategico non solo da un punto di vista ambientale, ma anche economico e sociale. Infatti, la possibilità di utilizzare materiali di scarto, che diversamente sarebbero destinati ad essere smaltiti in discarica, potrebbe spingere diversi settori industriali ad investire nel recupero dei residui industriali o scarti di produzione in favore di una proficua collaborazione con il settore delle costruzioni auspicando, in tal modo, nuove opportunità di crescita industriale, generazione di nuovi posti di lavoro e contribuire allo sviluppo di nuovi prodotti sostenibili che, in linea con i principi e gli obiettivi dell'UE, risultino a bassa impronta di CO_2. In aggiunta la conseguente riduzione dei rifiuti avrebbe una valenza positiva sotto il profilo ambientale, economico e sociale.

GLI SCENARI TECNOLOGICI

Le tecnologie identificate per lo sviluppo del settore edilizia e costruzioni inerenti alla filiera del cemento e calcestruzzo ritenute particolarmente rilevanti sono riportate in Tabella 1. Tali tecnologie saranno descritte brevemente negli aspetti tecnici essenziali. Per semplicità descrittiva, le tecnologie sono raggruppate in relazione alla caratteristica innovativa identificata come prevalente (uso di risorse naturali/CO_2; caratteristiche prestazionali; regole progettuali; tecniche costruttive). Sono identificati anche i relativi SDG[II].

Gli scenari tecnologici per lo sviluppo del settore edilizia e costruzioni inerenti al calcestruzzo presentati in questo volume sono:

A. Nuova modalità d'uso delle risorse naturali (materiali /energia) e CO2

1. Combustibili e/o materiali alternativi
2. Uso di idrogeno verde per la produzione di cemento
3. Materiali secondari
4. Aggregati di riciclo /artificiali
5. Energie rinnovabili nella produzione di cemento e nella fase di realizzazione dell'opera

[II] https://sdgs.un.org/goals

6. Stoccaggio geologico
7. Progettazione della durabilità delle strutture su base prestazionale

B. Nuovi materiali e prestazioni

8. Calcestruzzi innovativi e/o alte prestazioni
9. Altre tipologie di calcestruzzo con prestazioni e/costituenti innovativi
10. Calcestruzzi fibrorinforzati (FRC, UHPFRC)
11. Altri materiali innovativi: Materiali ad attivazione alcalina/geopolimeri
12. Altri materiali innovativi: fotocatalitici e cool

C. Nuovo tecniche costruttive

13. Manifattura avanzata - Stampa 3D di materiali strutturali a base cementizia
14. Materiali per strade - Pavimentazioni stradali in calcestruzzo in galleria

D. Nuove modalità progettuali

15. Strumenti di valutazione della sostenibilità (LCA/EPD)
16. Modularità, disassemblaggio e sostenibilità del calcestruzzo
17. Massa termica e reti intelligenti
18. Resilienza strutturale - Strutture (di calcestruzzo) resistenti a fuoco, vento, allagamenti, sisma
19. Digitalizzazione - Applicazione alle costruzioni di tecnologie informatiche avanzate
20. Intelligenza artificiale nelle costruzioni

Impatto e risorse necessarie

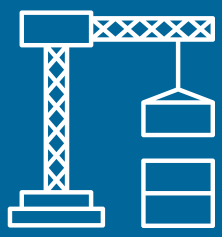
La Tabella 1 segnala le aree su cui concentrare le risorse e le principali aree di impatto connesse agli scenari tecnologici selezionati. Le tecnologie identificate necessitano auspicabilmente ed in grado specifico adeguate risorse nello sviluppo industriale, scientifico-tecnologico, normativo-regolamentare. In particolare, è essenziale un'attività di ricerca, sviluppo ed innovazione, sia di prodotto che di processo in linea con le esigenze dell'industria delle costruzioni.

[III] *Indicatore qualitativo (applicabile solo per riga): alto (***), medio (**), basso (*), applicabile per confronto qualitativo di ogni tecnologia identificata (non utilizzabile per confrontare tecnologie differenti).*

[IV] *Indicato Gli SDGs rilevanti: 1 (no poverty) - 1.5; 2 (zero hunger) – 2.1, 2.2, 2.3, 2.4; 3 (Good Health and Well-being) - 3.6; 4 (Quality Education) -4.4; 5 (Gender Equality); 6 (Clean Water and Sanitation) - 6.1, 6.2, 6.3, 6.5, 6.6; 7 (Affordable and Clean Energy) - 7.1, 7.2, 7.3; 8 (Decent Work and Economic Growth); 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) - 9.2, 9.5; 10 (Reduced Inequalities); 11 (Sustainable Cities and Communities); 12 (Responsible Consumption and Production) - 12.2, 12.4 12.5; 13 (Climate Action) - 13.1; 14 (Life Below Water) - 14.1, 14.2 14.3. Si veda https://gccassociation.org/sustainability-innovation/the-un-sustainable-development-goals/.*

Tabella 1 Principali aree di impatto connesse agli scenari tecnologici selezionati

Tecnologie per il settore Edilizia e Costruzioni (filiera del calcestruzzo)	Impegno qualitativo di risorse[III]			impatti sociali
	sviluppo industriale	scientifico/ tecnologico	normativo/ regolamentare	Sustainable Development Goals (SDG)[IV] rilevanti per il calcestruzzo
Combustibili e/o materiali alternativi	*	*	***	√ Durabilità, resilienza ai disastri naturali, √ sostenibilità, innovatività, √ disponibilità, accessibilità, √ resistenza meccanica, al fuoco, √ assorbimento CO_2 atmosferica, √ uso di rifiuti (solo in filiera a monte), riciclo (EoW), materiali e combustibili alternativi, √ riuso, disassemblaggio, √ efficienza energetica, massa termica, riduzione "isola di calore", √ compatibilità ambientale, √ promozione di sviluppo economico ed urbanistico √ conformità a normative e regolamenti nazionali ed europei √ collaborazioni pubbliche /private.
Idrogeno verde	***	**	*	
Materiali secondari	**	**	**	
Aggregati di riciclo / artificiali	**	**	**	
Energie rinnovabili	***	**	-	
Stoccaggio geologico	***	**	**	
Durabilità	*	***	***	
Calcestruzzi innovativi e/o alte prestazioni	***	***	***	
Calcestruzzi fibrorinforzati	*	*	**	
Altri materiali innovativi	***	***	***	
Manifattura avanzata	***	***	***	
Materiali per strade	-	-	*	
Strumenti di valutazione della sostenibilità	-	***	***	
Modularità e disassemblaggio	*	*	*	
Massa termica e reti intelligenti	*	***	*	
Resilienza strutturale	*	*	*	
Digitalizzazione	***	***	***	
Intelligenza Artificiale	***	***	***	



SETTORE

COSTRUZIONI

SCENARI TECNOLOGICI

indice - scenari tecnologici

NUOVA MODALITÀ D'USO DELLE RISORSE NATURALI (MATERIALI/ENERGIA) E RIDUZIONE DELLA CO_2 **43**

1 Materiali e/o combustibili alternativi e/o a ridotto contenuto di carbonio per la produzione di clinker 45

2 Idrogeno verde - Uso di idrogeno verde per la produzione di cemento 47

3 Materiali secondari - Sottoprodotti industriali o di riciclo, nella produzione di cemento 49

4 Aggregati di riciclo/artificiali a base di sottoprodotti industriali in sostituzione di aggregati naturali per calcestruzzo 53

5 Energie rinnovabili nella produzione di cemento e nella fase di realizzazione dell'opera 57

6 Stoccaggio geologico - Tecnologie CSS (Carbon Capture Storage) specifiche per cementifici 61

7 Durabiità - Progettazione della durabilità delle strutture su base prestazionale 65

NUOVI MATERIALI E PRESTAZIONI **69**

8 Calcestruzzi innovativi e/o ad altre prestazioni 71

9 Altre tipologie di calcestruzzo con prestazioni e/o costituenti innovativi 81

10 Calcestruzzi fibrorinforzati (FRC, UHPFRC) 85

11 Materiali ad attivazione alcalina/geopolimeri 89

12 Altri materiali innovativi: fotocatalitici e cool 93

NUOVE TECNICHE COSTRUTTIVE **95**

13 Manifattura avanzata - Stampa 3D di materiali strutturali a base cementizia 97

14 Materiali per strade - Pavimentazioni stradali in calcestruzzo in galleria 101

indice - scenari tecnologici

NUOVE MODALITÀ PROGETTUALI **105**

15 Strumenti di valutazione della sostenibilità (LCA/EPD) 107

16 Modularità, disassemblaggio e sostenibilità del calcestruzzo 111

17 Massa termica e reti intelligenti 113

18 Resilienza strutturale - Strutture (di calcestruzzo) resistenti a fuoco, vento, allagamenti, sisma 115

19 Digitalizzazione - Applicazione alle costruzioni di tecnologie informatiche avanzate 119

20 Intelligenza artificiale nelle costruzioni 123

RACCOLTA DI CASI STUDIO 129

Rapporto di sostenibilità Federbeton 2023 132

Progetti italiani Concrete Sustainability Council 133

Progetto DIHCUBE 133

Decarbonizzazione cementeria di Rezzato-Mazzano 133

Esempio applicativo di strade di calcestruzzo 134

Progetti di ricerca nell'ambito dei materiali ad attivazione alcalina/geopolimeri 134

Altri casi studio suddivisi per argomenti 135

GLOSSARIO **154**

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI **156**

NUOVA MODALITÀ D'USO DELLE RISORSE NATURALI (MATERIALI/ENERGIA) E RIDUZIONE DELLA CO_2

MATERIALI E/O COMBUSTIBILI ALTERNATIVI E/O A RIDOTTO CONTENUTO DI CARBONIO PER LA PRODUZIONE DI CLINKER

Favorendo la sostituzione di materiali naturali con sottoprodotti industriali[9,10], si può ottenere un beneficio in termini di circolarità (riduzione rifiuti e sfruttamento di risorse naturali).

L'uso di scarti industriali contenenti calcio, ma con ridotto contenuto di carbonio (es. derivanti da aggregati fini di riciclo di calcestruzzo; loppe e ceneri industriali; scarti di lavorazione di rocce), in sostituzione di calcare per la produzione di clinker, può consentire un'ulteriore riduzione dell'impronta di carbonio del cemento.

L'utilizzo dei combustibili alternativi, derivanti dai rifiuti non pericolosi, non riciclabili, in parziale sostituzione dei combustibili fossili, grazie alla biomassa in essi contenuta, è una delle leve di decarbonizzazione immediatamente disponibili per l'industria del cemento.

L'utilizzo dei rifiuti non riciclabili per la produzione di combustibili alternativi, come il CSS (Combustibile Solido Secondario) rappresenta un'alternativa ambientalmente sostenibile al conferimento in discarica, all'export e all'incenerimento.

Stato dell'arte

La produzione di clinker parte da una miscela adeguatamente proporzionata, ottenibile da una vasta gamma di materiali, sia naturali che di riciclo o industriali[11].

Sono note[12] fonti di materiali per aggregati da calcestruzzo con esperienza d'uso o potenzialmente disponibili per un utilizzo futuro allorché ne sia stabilita idoneità d'uso in calcestruzzo.
Combustibili solidi secondari sono specificati in normative internazionali[13,14], oltre che dalla normativa nazionale[15,16,17].

La strategia nazionale di decarbonizzazione del settore cemento[18] elaborata da Federbeton, ha mostrato che, raggiungendo un tasso di sostituzione calorica dei combustibili fossili con combustibili alternativi del 47% nel 2030 e dell'80% nel 2050, le emissioni di CO_2 del comparto del cemento si ridurrebbero del 12% rispetto ad uno scenario *Business As Usual*.

Motivazione per lo sviluppo

L'uso di materiali di recupero, ove disponibili già in forma granulare[19], può favorire risparmi energetici per la ridotta necessità di macinazione di materie prime naturali. In prospettiva è auspicabile l'ampliamento dell'uso di materiali innovativi, e/o a modalità nuove di utilizzo di materiali tradizionali che possano favorevolmente orientare il settore costruzioni alla sostenibilità.
In caso di materiali di recupero con eventualmente combinato sufficiente potere calorifico, alla sostituzione di materiali naturali si affianca la possibilità di sostituzione di parte dei combustibili fossili utilizzati nella produzione di cemento, con benefici sull'impronta di carbonio del cemento. La possibilità di recupero combinato di materie prime ed energia[20,21] è una caratteristica particolarmente vantaggiosa ottenibile in cementeria, favorendo l'efficienza energetica e il recupero di risorse naturali, riducendo allo stesso tempo i rifiuti ed evitando corrispettive emissioni di CO_2 in atmosfera per processi di degrado di materiali non diversamente utilizzati (es. biomasse). Si deve infine considerare un possibile recupero integrale di questi materiali come combustibile alternativo, senza produzione di ulteriori rifiuti (es. ceneri di combustione).

È auspicabile che condizioni tecnico economiche adeguate possano consentire nel complesso il recupero ottimale dei materiali disponibili non ancora utilizzabili. Allo scopo è necessario un progresso tecnologico ma anche normativo, accompagnato da uno snellimento dell'iter burocratico e di adeguate risorse, in particolare a supporto del superamento degli ostacoli al primo ingresso sul mercato di materiali innovativi.

IDROGENO VERDE - USO DI IDROGENO VERDE PER LA PRODUZIONE DI CEMENTO[V]

L'idrogeno è un combustibile con capacità di produrre energia per ossidazione; reagisce facilmente con ossigeno producendo acqua. La reazione può essere favorita evitando la produzione collaterale di specie nocive per la salute, ad esempio come avviene nel caso di residui incombusti da combustibili fossili. Per tale ragione l'uso di idrogeno in sostituzione di altre tipologie di combustibile fossile può favorire un circolo virtuoso con effetti benefici per la sostenibilità, in particolare dal punto di vista sociale.

L'efficienza energetica di processo sarebbe favorita dall'elevato potere calorifico dell'idrogeno, se confrontato con altri combustibili.

Peraltro, l'idrogeno non è una fonte energetica, ossia non esiste in natura (sulla Terra) un giacimento di idrogeno da cui spillare il combustibile ambendo ad una sostituzione ad esempio di gas naturale. Per gli usi cui può essere destinato, l'idrogeno deve essere pertanto preliminarmente prodotto, partendo da una certa fonte energetica ed applicando un certo processo produttivo.

L'introduzione di tali tecnologie comporterebbe necessità di notevoli variazioni impiantistiche, con effetto ultimo di rendere il processo di produzione del cemento più sostenibile.

Stato dell'arte

L'uso di idrogeno è previsto dalla strategia nazionale sull'idrogeno[VI]. Per i cementifici, l'uso di idrogeno può essere particolarmente vantaggioso rispetto ad altri utilizzi in ragione delle elevate temperature cui il processo di produzione del clinker di cemento si svolge. In tali condizioni, sono possibili vantaggi anche rispetto all'elettrificazione, seppure in assenza di ammodernamenti infrastrutturali di particolare rilievo.

Esempi di uso di idrogeno per la produzione di cemento sono già disponibili[22].

[V] Si noti che il tema della produzione di idrogeno è trattato in maniera estesa nell'ambito del volume "Le Innovazioni del Prossimo futuro: energia e decarbonizzazione"

[VI] Si veda https://www.mimit.gov.it/images/stories/documenti/Strategia_Nazionale_Idrogeno_Linee_guida_preliminari_nov20.pdf (accesso 10/05/2024)

Motivazione per lo sviluppo

L'uso di idrogeno verde (prodotto a partire da fonti energetiche rinnovabili) può consentire la riduzione alla fonte delle emissioni di CO_2 connesse alla produzione di cemento, non essendo la CO_2 un prodotto di combustione dell'idrogeno.

L'uso di idrogeno, seppure prodotto da fonti non rinnovabili, come combustibile potrebbe consentire una decarbonizzazione del combustibile prima del suo utilizzo in cementificio, spostando le emissioni di CO_2 verso processi dedicati di produzione di idrogeno, possibili con maggiore efficienza energetica (es. produzione elettrochimica di idrogeno), in definitiva riducendo complessivamente le emissioni di CO_2.

Auspicabilmente (idrogeno verde) la fonte energetica utilizzata per produrre idrogeno dovrebbe essere rinnovabile (ad esempio solare/eolico). In ragione della tipologia di processo di produzione di idrogeno, potrebbe essere necessario un quantitativo di energia inferiore per l'ottenimento dello stesso quantitativo di idrogeno, nel caso di processo più efficiente. Tipicamente processi ad alta efficienza sono quelli elettrochimici (se confrontati con quelli chimici).

Nella fattispecie del processo di produzione del cemento, la sostituzione di combustibili fossili con idrogeno equivarrebbe ad una decarbonizzazione a monte del processo produttivo, con l'effetto di ridurre le emissioni di produzione per la quota non diversamente assorbibile naturalmente attraverso la carbonatazione del calcestruzzo a valle. Maggiori dettagli sul processo di carbonatazione sono forniti in un contributo dedicato.

MATERIALI SECONDARI - SOTTOPRODOTTI INDUSTRIALI O DI RICICLO, NELLA PRODUZIONE DI CEMENTO

L'uso di materiali secondari riflette l'indirizzo delle normative europee[23] e nazionali[24] mirate a favorire l'integrazione di materie prime seconde (sottoprodotti industriali e/o scarti industriali non diversamente utilizzati) nei materiali da costruzione nell'ottica di un'economia circolare. Questa tecnologia può contribuire alla realizzazione di costruzioni sostenibili ed efficienti, coerenti con una gestione responsabile delle risorse e la riduzione dell'impatto ambientale complessivo delle costruzioni.

La presente tecnologia consente un approccio *"win-win"*, convertendo potenzialmente una criticità (accumulo di rifiuti), in un'opportunità (valorizzazione di materiali nei prodotti da costruzione), allorché siano identificati i campi applicativi e definite le relative specifiche tecniche dei materiali per la qualifica dei materiali di ingresso e la valutazione prestazionale del prodotto finale.

La riduzione della quantità di materiali smaltiti in discarica contribuisce a semplificare la gestione dei rifiuti abbassandone i costi relativi a conferimento e trattamento. È pertanto auspicabile un uso più efficiente delle risorse naturali, ottimizzando il ciclo di vita dei materiali, mirando ad una riduzione dell'impronta di carbonio ed in generale ambientale per costruzioni più ecologiche e sostenibili.

Il cemento consente di avere come costituenti, in aggiunta al *clinker*, anche materiali derivanti da processi industriali o di riciclo (cementi di miscela), ottenendo prestazioni adeguate all'uso strutturale, seppure differenti da quelle ottenibili con cemento portland (costituito essenzialmente da clinker). La normativa europea del cemento (EN 197-1)[25] ammette ad esempio l'uso di loppe d'altoforno granulate macinate, ceneri volanti, fumi di silice, in opportune proporzioni con il clinker. Sono anche normati l'uso di materiali da costruzione riciclati (EN 197-6)[26] e/o nuove proporzioni di costituenti (EN 197-5)[27] allo scopo di raggiungere gli obiettivi di sostenibilità per le costruzioni. La nuova EN 197-6 è stata considerata anche

dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica nella nuova versione del Regolamento End of Waste (EoW) sui rifiuti inerti, al fine di ottenere aggregati di recupero per produrre cemento. Nella revisione[32] è stato inserito anche il possibile utilizzo nel ciclo (a caldo) di produzione del clinker.



Figura 2: Scarti di legno (a sinistra) e di scorie industriali (a destra) (Concessione Certimac)

Stato dell'arte

Il blocco nell'iter di revisione della normativa europea dei cementi EN 197-1 (norma armonizzata) intervenuto per motivi legali collegati al CPR (*Construction Products Regulation*)[33], dovrebbe essere superato a breve; allo scopo è in corso la revisione dell'iter di revisione delle norme armonizzate (Acquis), mentre il nuovo CPR è stato recentemente pubblicato[224].

Attualmente, la regolamentazione End of Waste (EoW) è limitata a specifiche tipologie di materiale, ad esempio rifiuti inerti da costruzione e demolizione o altri rifiuti inerti di origine minerale[34]; non è pertanto disponibile per la generalità dei casi di residui industriali. Per i nuovi materiali possono inoltre risultare carenti le relative specifiche tecniche; possono risultare disponibili anche materiali che, pur potendo contribuire alla circolarità, non hanno ancora trovato potenziali nuove applicazioni per carenza di sviluppo tecnico. Si deve infine osservare che la disponibilità di materiali di sostituzione tradizionali, come le ceneri volanti o loppe d'altoforno granulate, è in prevedibile declino come conseguenza della decarbonizzazione dei settori acciaio e di generazione di potenza elettrica.

Motivazione per lo sviluppo

L'uso di cementi di miscela consente pertanto vantaggi sull'impronta di carbonio ed efficienza energetica (per minore contenuto di *clinker*), consentendo la riduzione di rifiuti (es. attraverso attività di recupero di scarti industriali altrimenti destinati a discarica) a favore delle risorse naturali (in corrispondente quota, non più necessarie).

L'uso di sostituti di clinker consente la riduzione dell'impronta di carbonio del cemento (*cradle-to-gate*) essendo il clinker il costituente a maggiore impronta di carbonio. L'uso di cementi di miscela può consentire la riduzione dell'impronta di carbonio, risultando pertanto favorevoli per la sostenibilità, avendo cura di preservarne le prestazioni in relazione all'uso specifico ed alla durabilità.

La sostituzione di clinker con altri materiali, comportando una variazione delle proprietà del cemento, deve essere accompagnata da valutazioni tecniche inerenti ad esempio alle prestazioni meccaniche, in particolare alle brevi stagionature ed alla durabilità. Tale onere dovrebbe essere supportato, per quanto possibile, con adeguati strumenti tecnico /economici /normativi /autorizzatori.

L'utilizzo di materie di recupero e sottoprodotti di altri cicli industriali in sostituzione delle materie prime di miniera e cava, come il calcare, e in parziale sostituzione del *clinker*, rappresenta pertanto una leva di decarbonizzazione immediatamente disponibile per il settore del cemento indicata dalla strategia di decarbonizzazione nazionale. La norma europea sul cemento EN 197-1 include il calcare tra i costituenti del cemento. L'industria del cemento ha già un buon tasso di utilizzo di tali materiali di sostituzione, ma è necessario ampliare ulteriormente la gamma delle tipologie utilizzate, annoverando prodotti già decarbonatati.
In parallelo è possibile l'attribuzione di specifiche connotazioni alla prestazione del cemento (es. durabilità elevata in specifici ambienti); ad esempio, in am-

biente solfatico si utilizzano cementi resistenti ai solfati (SR) secondo la norma europea (EN 197-1) e italiana[35].

La gamma di materiali secondari/riciclo e rispettive composizioni cementizie utilizzabili per applicazioni in strutture di calcestruzzo dovrebbe pertanto essere estesa, per quanto tecnicamente fattibile, sulla base di studi, ricerche e sperimentazioni [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86].

La definizione di specifiche tecniche condivise, a partire dalle evidenze sperimentali, richiede un ulteriore sforzo per l'identificazione di eventuali necessità sperimentali non sufficientemente investigate, e/o per identificare le caratteristiche tecniche essenziali ai fini applicativi per il prodotto specifico. Sarà eventualmente possibile la definizione di specifiche tecniche a livello nazionale/europeo, per definire le prestazioni di prodotto, presupposto essenziale per conservare una diffusione ampia della tecnologia nel settore delle costruzioni. Allo scopo sono necessari gli approfondimenti tecnici ed eventuali sperimentazioni pilota, sia per la produzione industriale dei nuovi materiali che per la loro applicazione.

L'allocazione di risorse a copertura di questo gap tecnologico/applicativo potrebbe consentire un ampliamento delle possibilità attuali nell'ottica della sostenibilità permettendo, per materiali non tradizionali, un bilanciamento accurato tra le varie prestazioni di prodotto (tecniche, ambientali etc.) in relazione alle esigenze applicative.

AGGREGATI DI RICICLO/ARTIFICIALI A BASE DI SOTTOPRODOTTI INDUSTRIALI IN SOSTITUZIONE DI AGGREGATI NATURALI PER CALCESTRUZZO

Gli aggregati di riciclo rispondono al modello di economia circolare per i materiali da costruzione. Anche materiali derivati come sottoprodotto (es. loppe d'altoforno raffreddate in aria) o residui di processi industriali una volta superato lo stato di rifiuto (EoW), possono essere utilizzati per la produzione di aggregati per calcestruzzo.

In tal modo si offre la possibilità di ottenere una riduzione della quantità di materiali smaltiti in discarica congiuntamente ad un ridotto sfruttamento delle risorse naturali nelle cave. In particolare, l'uso in calcestruzzo di sabbie e ghiaie potrebbe, in prospettiva, essere ridotto allorché siano identificate valide alternative, il cui uso sia opportunamente regolato, contribuendo ad affrontare in tal modo le moderne sfide ambientali. Su tali basi, l'uso di aggregati di riciclo e/o industriali in sostituzione di quelli naturali dovrebbe essere favorito, per quanto tecnicamente fattibile, attraverso l'adozione di adeguati strumenti tecnico/ economici/ normativi/ autorizzatori.

Stato dell'arte

Requisiti tecnici e regole d'uso per aggregati di riciclo da costruzione e demolizione di calcestruzzo e per alcuni aggregati industriali sono già fissati dalle norme,[12,87,88,89] e dalle Norme Tecniche nazionali (NTC2018)[90], rendendosi disponibile anche la regolamentazione End of Waste (EoW)[91], profilandosi pertanto un uso incrementale nel prossimo futuro. La produzione ed introduzione sul mercato di nuovi prodotti secondo la presente tecnologia, per quanto tecnicamente possibile in sostituzione del materiale naturale di cava, potrà consentire di rispondere agli specifici criteri del CAM Edilizia[VII] riguardanti la composizione dei "calcestruzzi confezionati in cantiere e preconfezionati" e dei "prodotti prefabbricati in calcestruzzo, in calcestruzzo aerato autoclavato e in calcestruzzo vibrocompresso".

[VII] *Ministero della Transizione Ecologica, Decreto 23 giugno 2022. Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi.*

Considerata la varietà di materiali di origine industriale disponibili[94], risulta che l'esperienza nazionale ed europea per il loro uso nel calcestruzzo sia limitata rispetto alle potenzialità[95].

Per altri materiali, normative europee e/o nazionali e relative regole d'uso possono risultare ancora mancanti (seppure possano essere disponibili ETA per produzioni specifiche[96]); ciò richiede risorse per colmare il gap tecnologico di carattere tecnico-scientifico, regolamentare e/o nella mancanza di diffusa pratica d'utilizzo.



Figura 3: Scarti di conchiglie (Concessione Certimac)

Motivazione per lo sviluppo

Nell'ottica dell'efficienza nell'utilizzo delle risorse naturali e della promozione dell'economia circolare è pertanto auspicabile incrementare, per quanto tecnicamente fattibile, l'impiego degli aggregati di riciclo e artificiali per la produzione di calcestruzzo. Per quanto riguarda gli aggregati riciclati, la scarsa diffusione di pratiche di demolizione selettiva ne limita la possibilità d'uso in calcestruzzi strutturali, nonostante le previsioni sul contenuto minimo di riciclato/recuperato e sottoprodotto nel calcestruzzo contenute nei Criteri Ambientali Minimi per l'edilizia. Dall'utilizzo degli aggregati riciclati nel calcestruzzo deriverebbero significativi benefici ambientali, ad esempio: la sostituzione fino al 30% dell'aggregato naturale con aggregato riciclato consentirebbe di risparmiare fino 500/600 tonnellate di aggregato naturale per ogni metro cubo di calcestruzzo prodotto. Peraltro, ad oggi questo materiale è in produzione in quantitativi limitati; su tali basi si considera una filiera industriale ad alto potenziale di crescita quella della produzione di aggregati riciclati per calcestruzzo, anche avvalendosi della separazione automatica di materiale derivante da demolizioni non selettive.

La possibilità d'uso di tali materiali resta strettamente vincolata alla composizione, preferendo fonti più omogenee, ad esempio derivate da solo calcestruzzo, per ridurre il gap di resistenza rispetto al calcestruzzo con aggregati naturali. Il tema è rilevante anche per gli aggregati artificiali, essendo ogni residuo di specifica origine industriale caratterizzato da proprie specifiche caratteristiche. In tal senso, per nuovi materiali, restano da definirsi anche quali caratteristiche di prodotto siano da considerarsi essenziali per l'uso nelle costruzioni, tipicamente oggetto di norme armonizzate di prodotto. Pertanto, resta da approfondire il tema della valorizzazione ottimale di aggregati di riciclo ed artificiali, in dipendenza delle specifiche composizioni (nel caso di origine costituita da materiali non omogenei); conseguentemente si aprirebbe il tema dell'opportunità di una progettazione che consideri anche il riciclo a fine vita della costruzione, limitando per quanto possibile la necessità di processi industriali di separazione a valle.

Flussi di aggregati di origine industriale non diversamente utilizzati, potrebbero ambire a trovare sbocco nel calcestruzzo, previa qualifica supportata da prove sperimentali (anche di lungo termine per verificare la durabilità) e/o per tramite di preparazioni preliminari di tipo meccanico e/o diverse (es. carbonatazione artificiale), finalizzate a ricondurne le caratteristiche tecniche a livelli compatibili e/o migliorativi rispetto ai costituenti tradizionali.

Per quanto concerne gli effetti relativi al rapporto tra riciclo e CO_2, per gli aggregati di riciclo e/o industriali prodotti a partire da rifiuti di calcestruzzo, a loro volta generati da strutture di calcestruzzo su cui non siano stati a tempo debito computati completamente gli effetti della carbonatazione (es. calcestruzzo qualificato cradle-to-gate), nota puntualmente la storia/composizione dei calcestruzzi in uso (ossia che include gli aggregati di riciclo) e del calcestruzzo che ha originato gli aggregati di riciclo, dovrebbe potersi annoverare un corrispettivo credito di carbonio per l'aggregato di riciclo (modulo D), da valorizzare potenzialmente nel ciclo di vita del calcestruzzo in uso, o successivamente. In tal modo sarebbe possibile chiudere il bilancio di massa del carbonio.

La gamma di aggregati di riciclo ed industriali, e le composizioni dei calcestruzzi utilizzabili per applicazioni in strutture di calcestruzzo, dovrebbe pertanto essere estesa, per quanto tecnicamente fattibile, sulla base di studi, ricerche e sperimentazioni [97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114,] che tengono in particolare considerazione la durabilità.

Peraltro, le valutazioni di prodotto di fine vita necessitano ipotesi di scenario che possono non essere definibili all'atto dell'immissione del prodotto sul mercato, data la varietà di applicazioni possibili per uno stesso prodotto. Il tema è tutt'oggi aperto. Al riguardo, possono risultare studi e ricerche sulle cinetiche di carbonatazione degli aggregati di riciclo, [115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137,] in relazione agli specifici scenari. Per la definizione di specifiche tecniche nazionali o europee, a partire dalle evidenze sperimentali, possono essere necessari approfondimenti tecnici.

L'allocazione di risorse a copertura di questo gap tecnologico/applicativo potrebbe consentire, per tipologie di aggregato di riciclo/industriale di uso non tradizionale, un'applicazione in costruzioni sostenibili.

ENERGIE RINNOVABILI NELLA PRODUZIONE DI CEMENTO E NELLA FASE DI REALIZZAZIONE DELL'OPERA

Le Energie rinnovabili possono essere utilizzate in fase di costruzione di edifici al fine di ridurre l'impatto della quota fossile ed in definitiva ridurre l'impronta di carbonio della costruzione (es. consumi elettrici di cantiere in fase esecutiva).

Gli obiettivi derivanti dal pacchetto di riforme e regolamenti economici e sociali promulgati dall'UE, incentrati sulla lotta al cambiamento climatico e alla riduzione delle emissioni di gas serra, ovvero gli obiettivi del pacchetto *Fit for 55* di riduzione del 55% al 2030 delle emissioni di gas serra in Europa e del 100% al 2050 (rispetto al 1990), necessitano di uno sforzo da parte di tutti i settori, tra i quali anche quello delle costruzioni[138].

Da recenti studi è emerso che le principali sorgenti di emissione toccano principalmente la catena di fornitura del settore.[139] La fase di esecuzione può risultare una fonte di secondaria importanza su ciclo di vita, ma alcuni aspetti dell'esecuzione della struttura, ad esempio la velocità di esecuzione, possono avere dei risvolti indiretti sulla sostenibilità, quali ad esempio intensificazione del traffico veicolare (in strade secondarie) causato da un cantiere stradale, o altri impatti sociali dovuti a rallentamento nei lavori di costruzione di infrastrutture stradali. Pertanto, materiali con rapido sviluppo delle resistenze meccaniche, benché più dispendiosi per unità di volume, sono solitamente favorevoli sotto questo profilo della sostenibilità a parità di altre condizioni.

Per quanto riguarda la produzione del cemento, l'uso di energie rinnovabili può contribuire alla riduzione della sua impronta di carbonio; in tal modo risulta peraltro ridotta proprio la quota di carbonio emesso in fase di produzione che non è riassorbibile per carbonatazione del calcestruzzo.

Per il calcestruzzo, le fonti energetiche rinnovabili potrebbero invece essere utilizzate nelle attività di frantumazione degli aggregati (naturali, artificiali o di riciclo).

In ambito di cava (attive, esaurite o dismesse), si sta diffondendo l'installazione di impianti fotovoltaici avviando importanti processi di decarbonizzazione nei cosiddetti settori *Hard to Abate*.

L'installazione di impianti fotovoltaici in tali aree garantirebbe un risparmio potenziale in termini di emissioni di oltre il 5%, contribuendo a rendere l'attività autonoma dal punto di vista dell'approvvigionamento energetico, proteggendo le aziende dalle variazioni di costi dell'energia come quelli verificatesi negli ultimi due anni.

È infine utile evidenziare che le energie rinnovabili applicate ai consumi elettrici di cantiere in fase esecutiva rappresentano una piccola parte di abbattimento delle emissioni, essendo le medesime determinate da una serie di azioni che coinvolgono l'intera filiera del settore, partendo dalla catena di fornitura, estendendosi con la vita utile dell'edificio[140] e terminando con il fine vita dei materiali (discarica o riciclo).

Stato dell'arte

Si riportano di seguito due iniziative del sistema ANCE:
strumento per il calcolo della carbon *footprint* delle imprese: è stato elaborato dalla società *Boston Consulting Group* un *tool* in grado di definire l'impronta carbonica della propria azienda e delineare la propria strategia di sviluppo *Net zero*.
"CIS – cantiere impatto sostenibile": è stato elaborato un codice di condotta volontario che impegna le imprese a comportamenti concreti e misurabili rispetto a tematiche quali la decarbonizzazione, la tutela dell'ambiente, la legalità, la regolarità del lavoro, la sicurezza, il sociale e la catena di fornitura. L'obiettivo è quello di promuovere a livello aziendale la gestione della fase di cantiere in ottica ESG *compliant* [141].

Motivazione per lo sviluppo

Queste tecnologie permettono alle imprese di avvicinarsi alla transizione ecologica ed energetica. Dal punto di vista aziendale, le nuove dinamiche politiche europee/mondiali hanno condotto le imprese a diversificare le proprie fonti energetiche. A livello generale, l'energia rinnovabile nella produzione aziendale (materiali, componenti ed edifici) comporta un approccio innovativo da parte di tutta la filiera edilizia con benefici ambientali diretti e riscontrabili.

Le imprese hanno necessità di essere supportate in questa transizione, sia da un punto di vista economico/finanziario, sia da un punto di vista normativo/burocratico. Ad esempio, l'installazione di impianti per la produzione di energia a fonte rinnovabile presuppone un importante investimento economico iniziale.

STOCCAGGIO GEOLOGICO - TECNOLOGIE CCS (CARBON CAPTURE STORAGE) SPECIFICHE PER CEMENTIFICI

Una delle tecnologie disponibili per il futuro del settore costruzioni è quella dello stoccaggio geologico. Per stoccaggio geologico si intende l'iniezione, accompagnata dal confinamento, di flussi di CO_2 in formazioni geologiche sotterranee prive di scambio di fluidi con altre formazioni.
Peraltro, è essenziale che lo sviluppo tecnologico sia correlato da quello normativo/regolamentare, onde scongiurarne usi sregolati/impropri[142].

Allo scopo di avere uno stoccaggio efficiente è necessario avere flussi di CO_2 per quanto possibile concentrati. Diversamente, nei processi di combustione, origine tipica della CO_2, è ottenuta in flussi diluiti dalla presenza di altre sostanze, ad esempio originariamente presenti nel comburente (es. azoto). Specificatamente, nell'ambito dei cementifici, il flusso di CO_2, se confrontato con quanto atteso sulla base della sola combustione del combustibile, è naturalmente arricchito dalla calcinazione, che trasforma in CO_2 (ed ossido di calcio) il carbonato di calcio originariamente presente nelle materie prime. Su tali basi lo stoccaggio geologico di effluenti di cementificio è vantaggioso rispetto a processi industriali (es. di sola combustione) in cui la calcinazione è assente.

Stato dell'arte

In Europa, la tecnologia CCS potrebbe essere utile nell'ambito del Green Deal[143] e della European Climate Law[144], che istituisce un quadro per la riduzione delle emissioni antropogeniche di gas ad effetto serra[145].
Lo stoccaggio geologico di biossido di carbonio è regolato in Europa dalla direttiva europea 2009/31/CE[146] recepita in Italia[147]. In tal modo è stabilito un quadro di misure volte a garantire lo stoccaggio geologico di CO_2 in formazioni geologiche idonee al fine di contribuire alla lotta al cambiamento climatico attraverso la riduzione delle emissioni in atmosfera di gas a effetto serra, da conseguirsi con il massimo livello possibile di efficienza e sostenibilità ambientale nonché di sicurezza e tutela della salute della popolazione.

Lo stoccaggio geologico è consentito nel territorio italiano, nell'ambito della piattaforma continentale, vietandolo pertanto nella colonna d'acqua[148]. È escluso anche lo stoccaggio in formazioni geologiche interessate da falde acquifere ed in comuni ad alta pericolosità sismica (zona1). Limiti alla concentrazione minima di CO_2 ammessa per lo stoccaggio, considerando le altre sostanze presenti, sono definiti nell'autorizzazione allo stoccaggio; sono anche definiti piani di monitoraggio e relazioni annuali da parte del gestore del sito di stoccaggio.



Figura 4: Impianto Brevik (foto concessa da Heidelberg Materials)

Sono regolate anche le attività di chiusura del sito di stoccaggio, ovvero a seguito di soddisfacimento delle condizioni previste dall'autorizzazione, su richiesta motivata del gestore o in seguito a revoca di autorizzazione. È anche regolato il trasferimento della responsabilità, dopo la chiusura del sito di stoccaggio, al Ministero Imprese e Made in Italy. È istituito infine un registro (ed una banca dati) nazionale, che contiene le indicazioni riguardanti sia il sito di stoccaggio che le infrastrutture di trasporto, incluse informazioni di carattere tecnico e relative al rilascio di licenze di esplorazione ed autorizzazioni allo stoccaggio. Le informazioni ambientali concernenti lo stoccaggio geologico di CO_2 sono messe a diposizione del pubblico conformemente alla normativa nazionale e comunitaria applicabile.

Diverse tecnologie sono già disponibili o in fase di sviluppo per la concentrazione della CO_2 nei flussi di un cementificio, finalizzate a ridurre gli oneri di stoccaggio geologico. Alcuni processi prevedono la separazione della CO_2 dal flusso degli effluenti gassosi di combustione (es. tecnologia con ammine[149], ammoniaca[150], calcium-looping[151]) attraverso un assorbimento selettivo e successivo rilascio ottenendo complessivamente un flusso più concentrato. Altri processi (es. Leilaci[152]) prevedono che a monte avvenga un contatto indiretto tra effluenti di combustione e materie prime, consentendo a valle un flusso concentrato, seppure limitatamente alla quota di CO_2 derivata da calcinazione, senza necessità di processi di assorbimento/rilascio. Altre tecnologie, es. oxyfuelv[153], prevedono l'uso di comburenti "concentrati" (es. ossigeno invece che aria), ottenendo una naturale riduzione dei volumi degli effluenti e concentrazione degli stessi, seppure siano necessari ulteriori passaggi per separare prodotti di combustione diversi (es. acqua). La separazione criogenica di ossigeno è peraltro un processo complesso. Altre tecnologie prevedono la rimozione del carbonio dai combustibili pre-combustione (es. per reforming del metano, ossia della reazione tra metano ed acqua), favorita da nuove tecnologie (es. processi a membrana) per la separazione dei prodotti di reazione (CO_2, da mandare a stoccaggio e idrogeno, da utilizzare come combustibile invece del metano). In tecnologie particolarmente innovativevi[154], la CO_2 può essere iniettata con acqua in suoli idonei, per favorirne la rapida mineralizzazione in composti stabili.

Circa la stabilità del confinamento della CO_2, ci sono vari meccanismi che possono intervenire, in dipendenza della tipologia di formazione rocciosa, per impedire la migrazione verso la superficie, che passano da impedimenti di carattere idrodinamico/diffusivo a mineralizzazioni (ad es. formazione di carbonati in presenza di ambiente alcalino e ioni calcio o magnesio)[155].

I costi d'investimento riportati in letteratura variano in base alla tecnologia adot-

tata tra 124 e 317 €/tonnellata di CO_2, secondo dati dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (International Energy Agency – IEA). I costi operativi salgono fino a 120 €/tonnellata di CO_2[156].

Motivazione per lo sviluppo

L'applicazione di tali tecnologie può pertanto avere dei risvolti anche notevoli sui processi industriali, in particolare per l'integrazione in impianti già esistenti. Peraltro, l'applicazione in cementificio è risultata fattibile ed infatti alcuni progetti sono già in fase avanzata in alcuni paesi[157],[158]. A livello globale sono riportati[159]41 progetti CCS di livello commerciale (capacità di cattura complessiva di 49 Mtpa) e 351 in sviluppo (dati 2023). In Italia si cita il Progetto Ravenna CCS[160].

Le tecnologie CCS adeguatamente condotte possono rappresentare uno strumento valido per la riduzione delle emissioni in atmosfera di carbonio da un cementificio. Al riguardo, si consideri che il funzionamento della tecnologia CCS richiede in sé emissioni di CO_2, pertanto l'efficienza della tecnologia CCS diventa un fattore essenziale in relazione al vantaggio complessivo per l'ambiente derivabile dallo stoccaggio geologico.

La tecnologia risulta pertanto strettamente collegata alla specificità della formazione rocciosa in cui lo stoccaggio dovrà essere effettuato. Adeguate risorse sono necessarie non solo per la valutazione di fattibilità, anche in relazione allo specifico rapporto tra composizione dell'effluente gassoso e tipologia di substrato geologico oltre che per il monitoraggio nel lungo periodo.

DURABILITÀ - PROGETTAZIONE DELLA DURABILITÀ DELLE STRUTTURE SU BASE PRESTAZIONALE

Essendo la durabilità un prerequisito di sostenibilità, una valutazione e completa della prima non potrà che condurre a vantaggi per la seconda.
La durabilità del calcestruzzo è un tema ampio e riguarda aspetti di progettazione, qualifica del materiale, metodiche di valutazione e di prova, esecuzione, normativa tecnica e regolamenti, etc. Sviluppi in uno di tali ambiti possono avere potenziali risvolti sull'altro e in definitiva, sulla sostenibilità. Pertanto, adeguate risorse dovrebbero essere indirizzate a mantenere un quadro complessivamente coerente, particolarmente in seguito ad eventuali nuovi interventi in uno degli ambiti sopra menzionati.

Il calcestruzzo essendo naturalmente resistente all'aggressione dell'ambiente, offre la possibilità di strutture intrinsecamente durevoli, presupponendo una adeguata progettazione, costruzione e manutenzione. I fenomeni di degrado delle strutture[161],[162] di elementi in calcestruzzo riguardano spesso il rinforzo ferroso, cui il calcestruzzo offre protezione essendo materialmente interposto tra rinforzo ed ambiente (in presenza di un adeguato copriferro, come previsto dalla normativa).. Le strutture di calcestruzzo sono comunemente progettate per una vita di esercizio di 50, 100 anni o più.

La durabilità delle strutture, per quanto concerne la specifica del calcestruzzo[163], è solitamente progettata su base mista prescrittivo/prestazionale, essendo l'origine dei materiali utilizzati nei vari costituenti miscelati per fare calcestruzzo, per esperienza d'uso, garanzia di buon funzionamento del prodotto nel lungo termine, fatto salvo il soddisfacimento dei requisiti composizionali/prestazionali di norma.

La progettazione della durabilità su base puramente prestazionale, secondo le metodiche introdotte dai nuovi Eurocodice[164], potrebbe consentire nel prossimo futuro lo sviluppo del settore costruzioni in senso sostenibile. Allo scopo sarà necessario pervenire a compiuta maturazione delle tecnologie inerenti alla durabilità per quanto concerne la qualifica e controllo di produzione del calcestruzzo.

Stato dell'arte

Per garantire adeguato livello di sicurezza strutturale, la normativa corrente adotta tradizionalmente una progettazione su base mista prescrittivo/prestazionale. I costituenti del calcestruzzo devono essere conformi a norme armonizzate, come la EN 197-1 nel caso del cemento (nel caso di norma non-armonizzate sono necessari specifici iter autorizzatori; per es. Certificato di Valutazione Tecnica - CVT). Peraltro, tale approccio non consente di affinare oltre un certo limite le prestazioni di durabilità in relazione alle specifiche necessità progettuali. La condizione di soddisfacimento del requisito di durabilità su base prescrittiva è infatti del tipo "passa/non-passa" e può risultare in una prestazione di durabilità in eccesso rispetto alle strette necessità d'uso. Inoltre la metodica prescrittiva può entrare in difficoltà con materiali innovativi, in mancanza di storia d'uso. Un nuovo approccio alla progettazione della durabilità del calcestruzzo su base prestazionale è stata recentemente reso disponibile nell'ambito della nuova generazione degli Eurocodici ("ERC" - Exposure Resistance Classes"). Peraltro, la norma europea del calcestruzzo (EN 206) non include, allo stato attuale, provvedimenti tecnici adeguati a supporto di tale approccio. La progettazione di durabilità su base prestazionale resta pertanto un obiettivo del prossimo futuro, in particolare per quanto concerne gli aspetti di qualifica e controllo di produzione del calcestruzzo.

Materiali innovativi nelle costruzioni sono attualmente ammessi dalle NTC 2018, con iter autorizzativi ad hoc proprio in mancanza di procedure di qualifica standardizzate per materiali innovativi, basate su specifiche tecniche armonizzate, che possano offrire adeguata garanzia di efficienza e funzionalità indipendentemente dall'origine del materiale considerato.

Quanto detto assume particolare rilevo considerato che esigenze di circolarità indirizzano in misura sempre maggiore verso una valorizzazione di sottoprodotti industriali come costituente di cemento e/o calcestruzzo, ossia spesso rappresentati da materiali non tradizionali. In tali casi, una metodica di qualifica funzionale, accurata e validata sperimentalmente circa ad esempio gli effetti sulla durabilità derivanti dall'inclusione in calcestruzzo di costituenti non tradizionali,

non potrà che risultare garanzia dell'ottimale funzionalità dell'opera ed in definitiva di sostenibilità.



Figura 5: Banchine galleggianti - Vado Ligure - Savona (foto concessa da Heidelberg Materials)

Motivazione per lo sviluppo

I fenomeni di degrado del calcestruzzo, ove presenti, sono generalmente poco o affatto percepibili nel breve periodo e possono divenire apprezzabili solo per tempi molto lunghi. Questo aspetto, favorevole dal punto di vista pratico, può risultare oneroso dal punto di vista sperimentale ove si voglia prevedere accuratamente la prestazione a lungo termine della struttura, ad esempio dopo cento anni, magari applicando metodi di prova rapidi compatibilmente con il controllo di produzione del calcestruzzo.

Sui fenomeni di degrado del calcestruzzo la ricerca scientifica ha fatto passi notevoli; innumerevoli studi sono ormai disponibili che approfondiscono i vari meccanismi di degrado. Su tali basi, l'attività di messa a punto di metodi di prova europei è attiva, ad esempio nell'ambito del comitato europeo di normazione (CEN TC 51 e CEN TC 104) consentendo la pubblicazione di varie norme europee sui metodi di prova inerenti ad alcuni dei più comuni processi di degrado del calcestruzzo. Tuttavia, una metodica standardizzata, corroborata da dati sperimentali e modelli validati sperimentalmente, mirata a determinare con sufficiente grado

di accuratezza le prestazioni di durabilità del calcestruzzo su base prestazionale, al fine di prevederne il comportamento futuro di lungo termine, prescindendo pertanto dall'origine dei materiali costituenti, non è ancora disponibile. Tale difficoltà risiede nel collegare tecnicamente l'elevata complessità delle metodiche di prova (valutazione di interazioni lente con l'ambiente) con la complessità, non meno elevata, dei modelli di calcolo previsionali (valutazione di aspetti futuri). Tale complessità è incrementata anche in ragione delle possibili interazioni tra azioni concomitanti di degrado (es. carbonatazione e cloruri), tradizionalmente considerate individualmente. Resta peraltro attuale tema di ricerca, le interazioni tra diversi fenomeni di degrado cui una struttura reale è comunemente soggetta.

Un'attività di ricerca ed innovazione mirata a rendere disponibili metodiche complete ed accurate, in particolare idonee a materiali innovativi, per la progettazione esclusivamente prestazionale della durabilità risulta pertanto essenziale.

Attualmente una forte criticità è rappresentata dal blocco della revisione delle norme armonizzate cui i comitati tecnici del CEN hanno cercato di ovviare attraverso la pubblicazione di norme di prodotto non-armonizzate; ne sono un esempio le EN 197-5 e EN 197-6 per i nuovi cementi con diverse proporzioni e tipi di costituenti, particolarmente orientati alla sostenibilità. L'ostacolo alla revisione delle norme armonizzate è peraltro in via di rimozione con il nuovo CPR.

Una più approfondita conoscenza dei materiali consentita da un adeguato sviluppo tecnico-normativo non potrà che favorire un uso più efficiente dei materiali stessi. Per allargare la gamma delle possibilità attuali a nuovi materiali è pertanto necessario uno sviluppo tecnico scientifico, specifico per materiale, mirato e supportato da adeguate risorse e studi, oltre che un iter autorizzativo efficiente ed efficace. L'onere di qualifica potrebbe pertanto essere ridotto con supporto di adeguati strumenti tecnico/economici/normativi/autorizzatori.

NUOVI MATERIALI E PRESTAZIONI

CALCESTRUZZI INNOVATIVI E/O AD ALTE PRESTAZIONI

Nel campo delle strutture in c.a., l'evoluzione tecnologica ha raggiunto risultati straordinari, coniugando le eccezionali prestazioni meccaniche con un ridotto impatto ambientale. Ne sono un esempio i calcestruzzi ad alte prestazioni e quelli ultra-performanti (HPC, UHPC). Caratterizzati da una resistenza meccanica ben al di sopra dell'ordinario, contribuiscono ad ottenere elevate prestazioni strutturali con una ridotta quantità di materiale impiegato. Rispetto a un calcestruzzo ordinario permettono, infatti, di realizzare elementi strutturali particolarmente snelli, a parità di carico da sostenere. Calcestruzzi ad alte prestazioni[165] e alta resistenza[166], seppure con impronta di carbonio più elevata rispetto a quelli ordinari per unità di volume, possono favorire una riduzione dell'impronta di carbonio della struttura di calcestruzzo (es. a pari capacità portante), con un beneficio ambientale complessivo per la costruzione, derivante dalla riduzione dei volumi di calcestruzzo necessari. In aggiunta, vantaggi di durabilità derivanti da una matrice poco porosa possono consentire benefici in termini di impatti ambientali, a pari vita di servizio, rispetto a strutture meno durevoli (in cui sono necessari più onerosi interventi di manutenzione e/o ricostruzione), ottenendo in definitiva un'impronta di carbonio inferiore per unità di tempo a livello della costruzione nel suo complesso.

Materiali a base cementizia, in alcune tipologie applicative, possono integrare la funzione strutturale a quella dell'isolamento termico.

L'uso di costituenti non tradizionali può consentire nuove possibilità applicative e/o prestazioni per il calcestruzzo ed i materiali cementizi. La necessità di migliorare le prestazioni delle strutture, ad esempio la durabilità, ha spinto pertanto i ricercatori a studiare materiali capace di auto-ripararsi. Nella fattispecie, l'evoluzione delle fessurazioni in vario modo presenti nel calcestruzzo, ad esempio a seguito di sollecitazione meccanica e/o self-healing, può avere effetto sulle proprietà collegabili alla durabilità (es. permeabilità all'ossigeno[167]). Calcestruzzi "self-healing", consentendo di incrementare la naturale capacità del calcestruzzo di sigilla-

re le fessure (un'eccessiva entità di fenomeni fessurativi può condurre a prematuri fenomeni di degrado), possono condurre ad incrementi di durabilità con effetti benefici sulla sostenibilità (impronta di carbonio; uso di risorse naturali; efficienza energetica in fase di costruzione/demolizione; rifiuti etc.). Alcune soluzioni tecnologiche potrebbero anche consentire il ripristino delle caratteristiche meccaniche ridotte a seguito di un'eccessiva fessurazione. Calcestruzzi "self-sensing" possono contribuire ad informatizzare le strutture, rendendole digitalmente attive, ossia capaci di rispondere a stimoli esterni con informazioni relative, ad esempio, alla distribuzione degli sforzi nella struttura o all'entità dei fenomeni fessurativi o di degrado (es. carbonatazione, cloruri, gelo/disgelo), incrementando così il livello di consapevolezza e il conseguente livello di sicurezza.

Nell'ottica dell'efficienza nell'utilizzo delle risorse naturali e della promozione dell'economia circolare è auspicabile incrementare l'impiego di materiali di riciclo per la produzione di cemento e calcestruzzo. In tal senso, la carbonatazione accelerata apre nuove opportunità per la produzione di materiali sostenibili.

Calcestruzzi con costituenti innovativi

Costituenti non tradizionali possono riguardare nuove tipologie di cemento, aggregati, aggiunte, additivi, in particolare ottenuti come materiali secondari da processi industriali o di riciclo)[168]. Tale ambito è molto ampio ed è trattato in contributi dedicati per i materiali secondari e di riciclo. Si pensi inoltre, ad esempio non limitativo, a calcestruzzi che includano le nuove tipologie di cemento previste dalle norme europee UNI EN 197-5 ed UNI EN 197-6, con introduzione di composizioni cementizie a ridotto contenuto di clinker e uso di materiali di riciclo. L'evoluzione tecnologica del calcestruzzo dovrà infatti essere accompagnata da quello della normativa tecnica, in particolare per la specifica dei costituenti.

Calcestruzzi fibrorinforzati

I calcestruzzi fibrorinforzati (FRC, UHPFRC)[169]seppure ricadano nel novero dei materiali ad alte prestazioni e rivestano un elevato grado di innovazione tecnologica, sono trattati in un contributo dedicato inserito nel capitolo dei rinforzi strutturali per dare maggiore risalto alla capacità di tali materiali di sostituire i sistemi di rinforzo tradizionale.

Stato dell'arte

Calcestruzzi ad alte prestazioni

Nella letteratura internazionale, la categoria HPC[170,171,172,173] annovera materiali di prestazioni superiori rispetto al calcestruzzo ordinario, ad esempio in ragione di caratteristiche differenti dalla resistenza meccanica. Peraltro, specifiche prestazioni elevate (ad esempio la durabilità) possono tradursi in vantaggi di sostenibilità aggiuntivi rispetto a quelli prevedibili per la sola resistenza meccanica. I calcestruzzi UHPC[174], possono ottenere vantaggi di ordine pari o superiore agli HPC, in ragione dell'incremento di prestazioni ottenibili. Alcuni di questi materiali possono ad esempio fornire un valido supporto, con particolare riferimento alla durabilità, nel caso di ripristino di strutture ammalorate e/o per rinforzo strutturale.

Si segnala infine che il nuovo Eurocodice[175] include classi di resistenza fino a C100 e che il CEN è attivo per la standardizzazione di UHPFRC[176], ossia UHPF rinforzati con fibre.

Le norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018)[177] prescrivono procedure specifiche per tali materiali: per le classi di resistenza superiori a C45/55, la resistenza caratteristica e tutte le grandezze meccaniche e fisiche che hanno influenza sulla resistenza e durabilità del conglomerato devono essere accertate prima dell'inizio dei lavori tramite un'apposita sperimentazione preventiva e la produzione deve seguire specifiche procedure per il controllo di qualità. Per classi di resistenza superiore a C70/85 si rinvia a procedure ad hoc (caso C del § 11.1), ossia con uso

di ETA o CVT. Peraltro, lo sviluppo di regole tecniche condivise e correntemente applicabili, in particolare inerenti alla progettazione e produzione, potrebbe consentirne una maggiore diffusione della presente tecnologia con vantaggio ultimo sulla sostenibilità.

Calcestruzzi che assorbono CO_2 in fase di produzione e/o uso di costituenti carbonatati

Nella carbonatazione, la CO_2, di origine atmosferica o industriale, può essere fissata allo stato solido attraverso una reazione con gli ossidi basici presenti nella matrice cementizia. La reazione è mediata dalla fase liquida della soluzione di contato nei pori della matrice cementizia. Pertanto, in prima istanza la carbonatazione coinvolge gli idrossidi di calcio, prodotto naturale delle reazioni di idratazione del clinker. Con tali processi si agisce sulla quota parte del materiale costituita da CaO (che può essere trasformata in $CaCO_3$). Tale processo di carbonatazione può avvenire in condizioni atmosferiche (in modo naturale) o mediante trattamento industriale (carbonatazione accelerata).

Il calcestruzzo può assorbire CO_2 in varie fasi del suo ciclo di vita[178]; se ne riportano alcuni casi tipici.

- Il calcestruzzo fresco e/o in fase iniziale di maturazione può assorbire CO_2, pur sviluppando prodotti di idratazione sufficienti per la presa ed indurimento, ad esempio per uso in prefabbricati privi di rinforzo ferroso.
- Nel corso dell'uso della struttura, il calcestruzzo continuerà ad assorbire CO_2, seppure limitatamente a quanto previsto dalla progettazione strutturale per non esporre a corrosione il rinforzo ferroso.
- Il calcestruzzo di riciclo, dopo frantumazione, può essere ad esempio sottoposto a carbonatazione accelerata mirando ad un riassorbimento di CO_2 di incrementate proporzioni rispetto al caso di carbonatazione naturale (relativamente alla quota parte relativa al carbonio emesso in fase di calcinazione durante la produzione di clinker portland

o industriali). Peraltro, rifiuti da costruzione e demolizione di calcestruzzo, non diversamente utilizzati, continueranno nel tempo ad assorbire CO_2.

Fissando carbonio nella matrice cementizia, il calcestruzzo contribuisce positivamente alla propria impronta di carbonio, spesso modificando anche le prestazioni tecniche del costituente sottoposto a carbonatazione in senso migliorativo in tal modo fornendo inoltre leve alla sostituzione di materiali naturali.

La quota di CO_2 potenzialmente assorbibile dal calcestruzzo è limitata dal quantitativo di CO_2 emesso in atmosfera in fase di calcinazione (fase della produzione del cemento in cui il calcare si decompone a ossido di calcio rilasciando CO_2) per la produzione del quantitativo di cemento da cui il rifiuto di calcestruzzo era originariamente costituito. La normativa europea[179] indica ad esempio per il cemento portland (CEM I), un valore di assorbimento potenziale per carbonatazione (calcestruzzo completamente carbonatato) di 0,49 kg CO_2/kg cemento. La quota di CO_2 corrispondentemente emessa in fase di produzione attraverso uso di risorse energetiche non rinnovabili non è invece recuperabile per carbonatazione.

La CO_2 da utilizzarsi nel processo di carbonatazione accelerata può essere derivata da cementifici, auspicabilmente ma non necessariamente attraverso processi di separazione/concentrazione, riducendo pertanto il quantitativo di CO_2 effettivamente trasferita in atmosfera per una quota corrispondente a quella di carbonatazione.

Alcuni materiali secondari o di riciclo possono assorbire CO_2 per carbonatazione naturale e/o con processi accelerati[180],[181]. I materiali carbonatati possono variare le proprietà in senso migliorativo (es. aggregati di riciclo possono ridurre l'assorbimento d'acqua; loppe d'acciaieria possono, se nel caso, ridurre l'attitudine espansiva o di rilascio di sostanze[182]) per uso in calcestruzzo. Pertanto, di tali

materiali carbonatati, una volta appurate completamente le caratteristiche tecniche in relazione all'uso previsto, potrebbero fornire un contributo positivo per la sostenibilità derivante dall'effetto positivo sulla circolarità e impronta di carbonio.

Calcestruzzi per l'efficientamento energetico

La direttiva europea sull'efficienza energetica recentemente pubblicata[183], riporta che: "*Gli Stati membri garantiscono collettivamente una riduzione del consumo di energia pari almeno all'11,7 % nel 2030 rispetto alle proiezioni dello scenario di riferimento UE 2020 (omissis)*". Risulta pertanto di stringente attualità la necessità di materiali che permettano isolamento termico efficiente degli edifici, pur garantendo altri aspetti della sostenibilità (es. resistenza al fuoco).

Materiali a base cementizia integrano potenzialmente alla funzione di isolamento termico, quella strutturale, con vantaggi derivati dall'assenza di costituenti organici, che spesso limitano le prestazioni dell'edificio nei casi di incendio. Tali materiali, nel novero dei calcestruzzi ultraleggeri (ULWC), necessiterebbero di requisiti specifici e/o aggiuntivi rispetto a quelli previsti dalla normativa europea sul calcestruzzo[184], presentando densità inferiore al limite ivi previsto (800 kg/m^3).

Per l'applicazione della presente tecnologia, è necessario lo sviluppo di materiali con bassa conducibilità termica e con resistenza meccanica relativamente elevata in rapporto a tale conducibilità termica. Inoltre, dovrebbero essere sviluppate regole tecniche per tali tipologie di materiali, sia per la produzione che per l'uso e la progettazione strutturale. Infatti, secondo le norme tecniche italiane, l'uso di calcestruzzi leggeri con funzioni strutturali è consentito per materiali con caratteristiche di resistenza meccanica (≥LC16/18) e densità (>1400 kg/m^3) superiori a quelle dei materiali tipicamente utilizzabili nell'ambito dell'efficienza energetica.

Motivazione per lo sviluppo

In tutti i casi precedentemente descritti sono prevedibili vantaggi per la sostenibilità, secondo la declinazione ambientale, economica e sociale, dovute ad un minor sfruttamento delle risorse naturali, materiali o energetiche. Questo risultato è prevedibilmente ottenibile, a pari prestazione strutturale, in relazione all'incrementato livello prestazionale (es. resistenza meccanica), incrementata durata del ciclo di vita della struttura (elevata durabilità) o per introduzione di prestazioni innovative che consentano nuove metodiche per le costruzioni (es. incrementati livelli nelle caratteristiche elastiche-meccaniche; caratteristiche elettriche innovative; monitoraggi più efficaci; maggiore puntualità nella previsione dell'evoluzione del comportamento dei materiali nel senso della durabilità); valorizzazione prestazione di materiali secondari o di riciclo.

Il tema della durabilità, approfondito in un contributo dedicato, è trasversale a tutte le tecnologie considerate ed introduce una dimensione ulteriore in ordine alla complessità dello sviluppo tecnologico.

Il grado di innovazione introdotto può risultare anche molto ampio, interessando pertanto anche settori diversi da quello delle costruzioni. Gli effetti di tali innovazioni sul tessuto industriale e socio-economico sono peraltro difficilmente quantificabili, eppure inquadrabili in un percorso di crescita sostenibile.

Calcestruzzi ad alte prestazioni

Calcestruzzi con prestazioni elevate (ad es. di resistenza meccanica o durabilità), aprono la strada allo sviluppo tecnico, in particolare per l'ottenimento di vantaggi di sostenibilità utilizzando costituenti innovativi, ad esempio provenienti dai residui da altri processi industriali o dal riciclo. L'effettivo sviluppo in senso sostenibile dipenderà dal progresso tecnologico, sia del materiale sia delle metodiche di valutazione, in merito alla possibilità di prevederne accuratamente l'evoluzione nel tempo delle proprietà in relazione all'uso previsto. Entrambi questi aspetti,

di natura scientifico/sperimentale e normativo/regolamentare, potranno avere impatto notevole sul settore delle costruzioni nel prossimo futuro. Peraltro, soluzioni tecnicamente valevoli, anche già disponibili, potrebbero ambire a maggiore diffusione attraverso un'evoluzione regolamentare che miri ad elevare il generale livello prestazionale delle costruzioni. A supporto di questa evoluzione è necessaria anche un'azione di informazione e formazione di professionisti e tecnici responsabili della prescrizione delle opere, affinché nei capitolati e nei progetti siano inserite le soluzioni più efficaci disponibili. Un incremento di tale tipologia di materiali potrebbe infine condurre ad un miglioramento qualitativo del parco edilizio/infrastrutturale in relazione alla maggiore resistenza meccanica e durevolezza. Per confronto alla situazione corrente, si consideri che calcestruzzi di classe ≥ C35/45, tra cui rientrano anche i calcestruzzi ad alte prestazioni, rappresentano attualmente solo il 7,4% (Federbeton, 2022)[185].

Calcestruzzi che assorbono CO_2 in fase di produzione e/o uso di costituenti carbonatati

Per quanto concerne la carbonatazione, essa si trova ad uno snodo cruciale per la sostenibilità delle costruzioni, consentendo una molteplicità di vantaggi non diversamente ottenibili, anche contestualmente. Nella fattispecie, se ne richiamano di seguito i principali. L'assorbimento di carbonio dall'atmosfera nel calcestruzzo consente di fissare in forma stabile il carbonio in fase solida neutralizzandone il contributo GHG; l'integrazione di tali processi di carbonatazione accelerata con quelli dei cementifici, ad esempio congiuntamente a tecnologie per la concentrazione delle emissioni in flussi concentrati di CO_2, possono consentire una riduzione delle emissioni dirette di CO_2 in atmosfera. La carbonatazione con processo industriale di idonei residui ottenuti come sottoprodotto industriale, anche proveniente da altri settori, o materiali di riciclo (es. calcestruzzo di riciclo), può consentire un più agevole raggiungimento dell'EoW (End of Waste) e/o contribuire a ridurne impatto ambientale (es. neutralizzazione di rifiuti alcalini). Può ottenersi una valorizzazione prestazionale rispetto ai residui non carbonatati, con

l'effetto ultimo di rendere disponibili materiali con caratteristiche innovative, ad es. migliorative per uso in calcestruzzo, pertanto applicabili in senso più sostenibile, senza necessariamente far ricorso a materiali naturali.

Calcestruzzi per l'efficientamento energetico

La norma europea sugli aggregati leggeri già include una vasta gamma di materiali, anche di origine industriale, potenzialmente utilizzabili per la produzione di calcestruzzi ultraleggeri (ULWC). Tali materiali potrebbero contribuire alla sostenibilità delle strutture sotto il profilo dell'efficienza energetica. Nuove regole tecniche per il particolare campo di prestazioni identificato, potrebbero semplificarne l'uso consentendo un progresso nel percorso di efficientamento energetico degli edifici.

ALTRE TIPOLOGIE DI CALCESTRUZZO CON PRESTAZIONI E/O COSTITUENTI INNOVATIVI

Nel presente paragrafo si riportano alcuni cenni a materiali che potranno trovare pieno sviluppo e applicazione nel prossimo futuro, avendo grado di innovatività particolarmente elevato.

Calcestruzzi "self-healing"

Nella letteratura tecnica sono stati studiati vari meccanismi di azione del self-healing, peraltro tema di ricerca ancora aperto. Il clinker[187], ad esempio, se opportunamente reso disponibile in forma anidra nel calcestruzzo indurito, può contribuire al fenomeno del self-healing per idratazione in presenza di umidità in occasione di fenomeni fessurativi. Peraltro, calcestruzzi ad alte prestazioni, richiedendo bassi contenuti d'acqua in relazione al contenuto di cemento, presentano condizioni favorevoli in tal senso. Altri meccanismi sono possibili, ad esempio attraverso l'uso di additivi detti "cristallizzanti", con formazione di cristalli nella matrice cementizia[188]. Altri meccanismi possono basarsi sull'azione di batteri[189]. I vantaggi nell'uso di calcestruzzi self-healing sono annoverabili nell'abito della migliorata durabilità in senso generale. Peraltro, una reazione del materiale in risposta puntuale ad un evento fessurativo potrebbe ridurre il ricorso a sistemi di protezione generalizzata, probabilmente più onerosi. Seppure alcune tecnologie siano collegabili ad incrementi di resistenza causati dalle elevate prestazioni meccaniche dei costituenti attivi in senso self-healing (es. clinker), nel caso generale possono esserci delle riduzioni di resistenza meccanica dovute alle proprietà specifiche dei nuovi costituenti (es. nutrienti da introdurre per la crescita di batteri). Trattandosi di un ambito di ricerca ancora in fase precoce di sviluppo, l'effettivo impatto sul settore dipenderà da molti fattori, non ultimo l'entità degli investimenti disponibili alla rimozione degli ostacoli per lo sviluppo della tecnologia.

Calcestruzzi "self-sensing"

Nella concezione presente, l'uso di sensori tradizionali per il monitoraggio strutturale, può consentire un maggiore grado di consapevolezza sulla struttura monitorata, in particolare in caso siano applicati materiali innovativi. Allo scopo

sono necessari materiali innovativi[190] che rendano possibile un' integrazione dei sensori, congiuntamente alla funzione strutturale che sono chiamati a svolgere[191]. Le tecnologie di monitoraggio strutturale dovrebbero pertanto essere sviluppate congiuntamente al grado di innovazione introdotto nei materiali monitorati. Nel medio termine lo sviluppo dei materiali dovrebbe rendere possibile un'integrazione completa di sensori nella struttura, ad esempio sotto forma di nuovo costituente "smart"[192], per aumentare qualitativamente e quantitativamente le informazioni di ritorno nel ciclo di vita del materiale nella struttura. Nel lungo termine, lo sviluppo tecnologico potrà richiedere di superare la tradizionale logica di strumentare la struttura con sensori di vario grado di complessità, per arrivare ad una concezione della struttura stessa come sensore distribuito, note ad esempio le caratteristiche elettriche del calcestruzzo ed il contributo dei rispettivi costituenti per orientarne ad es. la prestazione self-sensing in senso incrementale. I vantaggi sono da ricercarsi nel novero dell'incrementato livello di sicurezza strutturale collegata alla significatività delle informazioni raccolte in tempo reale e storico. Gli interventi di manutenzione potranno essere in tal modo mirati accuratamente, con effetti attesi generalmente positivi sulla durabilità ed in senso più ampio sull'ottimizzazione delle risorse.

Calcestruzzi con aggregati a cambiamento di fase (PCM)[193,194]

L'uso di materiali a cambiamento di fase come aggregato per calcestruzzo, incrementando la capacità termica del calcestruzzo, potrebbe contribuire ad ottimizzare il bilancio energetico degli edifici, premesso un uso conforme ad una progettazione che tenga conto di aspetti dinamici dell'onda termica e/o della capacità di immagazzinare energia eventualmente prodotta generata in situ.

Calcestruzzi con aggregati fini carbonatati

Valorizzazione di aggregati di riciclo fini, derivati da calcestruzzo, per carbonatazione naturale/accelerata[195]. In questa tecnologia si congiungono sinergicamente varie dimensioni della sostenibilità (es. riciclo, CO2, risorse naturali, prestazioni).

Calcestruzzi con grafene

Tali materiali ambiscono a modificare radicalmente le proprietà del calcestruzzo nella sua concezione tipica, introducendo caratteristiche difficilmente immaginabili fino all'epoca della recente invenzione di tale costituente (es. elementi strutturali con capacità self-sensing, schermo elettromagnetico o riscaldamento/scongelamento). Un elenco non esaustivo delle proprietà potenzialmente affette include le proprietà meccaniche (es. tenacità) e di durabilità (es. diffusione ioni cloruro) oltre quelle elettriche (es. conducibilità elettrica). Peraltro, in relazione all'uso, ulteriori studi sono necessari per comprenderne completamente le interazioni con la matrice cementizia oltre che per regolarne l'uso nella pratica produttiva.

CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI (FRC, UHPFRC)

Il rinforzo metallico (es. armatura lenta o precompressa) è spesso il punto debole del calcestruzzo armato sotto il profilo della durabilità. Infatti, tra i fenomeni di degrado più frequenti e critici per il calcestruzzo armato rientra certamente la corrosione dell'armatura causata dalla carbonatazione del calcestruzzo o dalla presenza di cloruri nell'ambiente circostante la struttura. La carbonatazione può causare l'espulsione del copriferro di calcestruzzo a causa della formazione di prodotti espansivi in corrispondenza del rinforzo mentre ad esempio la corrosione da cloruri potrebbe avvenire maggiormente in corrispondenza delle fessure provocando una corrosione localizzata nella barra che comporta una significativa perdita di duttilità dell'armatura. La riparazione o il rinforzo delle strutture esistenti con calcestruzzi fibrorinforzati ad alte prestazioni consente di ottenere immediati vantaggi sulla durabilità della costruzione.

Il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC; Fiber Reinforced Concrete) rappresenta una tecnologia prioritaria perché garantisce una elevata protezione della struttura esistente grazie ad una ridotta porosità che consente una maggior resistenza alla penetrazione delle sostanze aggressive presenti nell'ambiente. La presenza delle fibre consente inoltre di ridurre in modo significativo l'ampiezza delle fessure grazie alla resistenza post-fessurativa garantita dal rinforzo fibroso. Un altro contributo fornito dalle fibre è rappresentato dall'incremento significativo della tenacità del calcestruzzo. Questa caratteristica permette, in diverse applicazioni (come, ad esempio, le pavimentazioni industriali), di sostituire o ridurre l'applicazione dei tradizionali rinforzi metallici con vantaggi aggiuntivi rappresentati dalla riduzione dei tempi di posa delle armature in termini di tempi (e costi), in aggiunta alla praticità di impiego, alla durabilità e alla riduzione delle emissioni di CO_2.

Le elevate prestazioni meccaniche dei calcestruzzi fibrorinforzati ad alte prestazioni (UHPFRC) possono favorire la riduzione dei volumi di calcestruzzo necessari per garantire la necessaria resistenza strutturale e migliorare la durabilità grazie alla ridotta porosità del materiale, con benefici diretti su varie dimensioni di sostenibilità.

Stato dell'arte

Il sistema FRC è stato oggetto di molte ricerche in tutto il mondo da qualche decennio, raggiungendo un significativo livello di conoscenza delle potenzialità del materiale. Le ricerche hanno riguardato diverse tipologie di rinforzo fibroso, a partire dalle fibre metalliche, continuando con le fibre sintetiche e di vetro. Sono anche stati oggetto di ricerca scientifica UHPFRC con costituenti innovativi come il grafene[196, 197].

Il FRC è anche stato oggetto di molte conferenze internazionali, tra le quali spicca la serie di conferenze BEFIB, HPFRCC e specifici workshops dedicati alle applicazioni strutturali del FRC.

Le conoscenze sul comportamento strutturale del FRC hanno consentito di sviluppare normative specifiche in diversi paesi del mondo, tra le quali si citano il Codice Modello 2010 e 2020 della Federazione Internazionale del Calcestruzzo Strutturale (fib) o l'Annesso L del nuovo Eurocodice n. 2 [164].
Tra le applicazioni più significative per il rinforzo strutturale si può citare:

- la sostituzione della parte superficiale degli impalcati da ponte, generalmente degradata dai cloruri presenti nei sali disgelanti utilizzati



Figura 6: Progetto MoSoRe (foto concesse da Heidelberg Materials).

nei periodi invernali, grazie i) all'elevatissima protezione garantita dalla ridotta porosità del materiale, ii) alla ridotta ampiezza delle fessure, iii) al minimo spessore richiesto che non necessita di un copriferro minimo data l'assenza dell'armatura;

- il rinforzo delle pile da ponte con un rivestimento di piccolo spessore che è in grado di conferire una maggior capacità portante, per adeguarla per esempio alle nuove esigenze di traffico o sismiche, in aggiunta ad una maggiore durabilità che allunga in modo significativo la vita utile della struttura esistente;
- il rinforzo di strutture in calcestruzzo armato o in muratura esistenti, progettate prima dell'entrata in vigore delle normative che imponevano una verifica sismica della struttura stessa, per renderle sicure;
- il rinforzo di impalcati di edifici esistenti con uno spessore ridotto (per non aumentare i carichi sulle fondazioni) grazie all'assenza di armatura tradizionale che imporrebbe spessori maggiori per ottenere il copriferro minimo richiesto dalla normativa;
- il rinforzo di strutture sensibili in calcestruzzo armato con un piccolo spessore di FRC ad alte presentazioni, per garantire una maggior resistenza all'impatto causato da possibili eventi accidentali.
- l'elevata duttilità, grazie alla quale il materiale riesce a garantire ottime prestazioni in termini di resistenza a trazione anche dopo la formazione di fessure.

Per la parte regolamentare, si segnala che sono state pubblicate le linee guida sugli FRC[198], per l'applicazione delle NTC2018. Il CEN/TC104 sta lavorando a specifiche per tecniche per prestazioni, produzione, conformità[199] di UHPFRC oltre che per l'esecuzione[200] di strutture di UHPFRC. Anche in questo ambito le possibilità di sviluppo sono importanti, in considerazione dell'effetto delle proprietà dei materiali costituenti le fibre e del contenuto delle stesse in relazione alle proprietà del calcestruzzo.

Motivazione per lo sviluppo

I miglioramenti nell'ambito della sostenibilità sono riscontrabili sia nel ciclo di produzione che nelle fasi di posa in opera. Inoltre, le fibre costituiscono un rinforzo presente in tutto il volume della matrice e, grazie alla loro azione di cucitura dei lembi della fessura (ovunque essa si formi), forniscono un importante contributo strutturale al calcestruzzo in termini di tenacità.

In sintesi, il sistema FRC può determinare: l'eliminazione o la riduzione delle armature tradizionali; il contenimento dei tempi e dei costi di cantiere; il miglioramento del comportamento fessurativo; una maggiore resistenza alla fatica e agli urti in aggiunta ad una maggiore resistenza all'abrasione. Tutti questi vantaggi, insieme, aumentano la durabilità dell'opera.

Il FRC può contribuire agli obiettivi 9, 11, 12 e 13 previsti dall'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile delle Nazione Unite.

MATERIALI AD ATTIVAZIONE ALCALINA/GEOPOLIMERI

Tra i materiali da costruzione emergenti vi sono i leganti ottenuti attivando con soluzioni o composti alcalini alcuni alluminosilicati, sia naturali (argille) che sottoprodotti industriali (loppa d'altoforno, ceneri volanti). Tali leganti possono presentare prestazioni meccaniche e durabilità in diversi ambienti (es. acidi, solfati) adeguate per alcuni usi nelle costruzioni. Per descrivere questi materiali si utilizzano, in genere, i termini "materiali ad attivazione alcalina" e "geopolimeri".

Mediante una rappresentazione semplificata, si può evidenziare con il supporto dalla letteratura scientifica[201] la distinzione tra materiali ad attivazione alcalina e geopolimeri (ricchi in silicio, alluminio e alcali) rispetto ai cementi di uso comune. Le proprietà fisiche e meccaniche di tali materiali tra cui la resistenza alla compressione, il tempo di presa e la lavorabilità del prodotto finale dipendono principalmente dal tipo e dalle proporzioni dei precursori, dal tipo di attivatore, dalle condizioni di miscelazione e di indurimento[202]. Inoltre, i geopolimeri appartenendo alla famiglia delle ceramiche, si comportano in modo fragile e alcuni studi si concentrano sul miglioramento della duttilità utilizzando le fibre di polipropilene e/o metalliche[203].

Tra gli ambiti e campi di applicazione troviamo quelli del restauro di beni culturali o per il recupero di architetture in calcestruzzo armato di rilevanza storico-artistica[204] o ancora per la produzione di malte per edifici in muratura[205]. Non mancano, inoltre, studi in cui il comportamento dei materiali ad attivazione alcalina è stato investigato in elementi strutturali[206] nelle traversine delle principali ferrovie australiane e per la riparazione del calcestruzzo degradato delle pavimentazioni rigide di alcune basi militari[207].

Nonostante lo sviluppo dei materiali ad attivazione alcalina non sia pienamente maturo il loro possibile impiego nel settore delle costruzioni appare promettente e a valle di ulteriori campagne sperimentali focalizzate sullo studio della durabilità

e prestazioni a lungo termine, potrebbero essere considerati materiali complementari e integrativi del cemento in specifici campi di applicazione. Tali materiali offrono importanti prospettive per il prossimo futuro delle costruzioni, in cui il cemento comune resta comunque il materiale di riferimento, avendo una serie di importanti vantaggi da considerare per soluzioni con nuove funzionalità dal punto di vista meccanico e della durabilità.

Stato dell'arte

Il settore delle costruzioni ha una sfida enorme da affrontare ovvero la riduzione degli impatti ambientali diventando sempre più sostenibile anche in termini di materiali utilizzati. Sin dagli inizi del '900 si evidenzia l'impiego dell'attivazione alcalina di precursori allumino-silicati; tuttavia, solo negli anni '50 gli studiosi iniziarono a parlare di cementi alcalini fino a giungere agli anni '70 quando, attraverso una serie di brevetti, si iniziò a parlare di "geopolimeri" indicando leganti ad attivazione alcalina a basso contenuto di calcio[208]. Sin dagli anni '50 l'Italia ha iniziato a interessarsi alla produzione di cementi sostenibili e sempre maggiore sensibilità sul tema è stata posta negli ultimi anni. Una innovazione, in tale contesto, sono i leganti ad attivazione alcalina (AAB), che comprendono anche i geopolimeri e che risultano molto interessanti per il modesto impatto ambientale come emissioni e consumo energetico (70% in media)[209].

In questo scenario, va evidenziato come molti tra i materiali riciclati utilizzabili per lo sviluppo di materiali da costruzione ad attivazione alcalina vengano ammessi dalle normative di settore come aggiunte per i calcestruzzi[210]. Seppure una certa attivazione dei costituenti sopra menzionati possa indirettamente avvenire nella matrice cementizia anche attraverso l'uso di costituenti previsti dalle norme in ragione della intrinseca basicità derivante dalle reazioni di idratazione del clinker, la normativa italiana, ad esempio, ancora non permette di utilizzare i materiali geopolimerici (per l'elevato quantitativo di attivatori necessario) nel settore delle costruzioni a causa della mancanza di esperienza nella pratica d'uso nelle costru-

zioni e di conoscenza approfondita su aspetti essenziali, quali la durabilità. Nonostante la validità di questa classe di materiali non risulti pienamente matura, la ricerca scientifica si sta muovendo al fine di mostrarne le prestazioni e peculiarità sotto tutti gli aspetti tecnici necessari, quali gli aspetti tecnologici di produzione e la loro validità in termini di prestazioni di resistenza e durabilità.

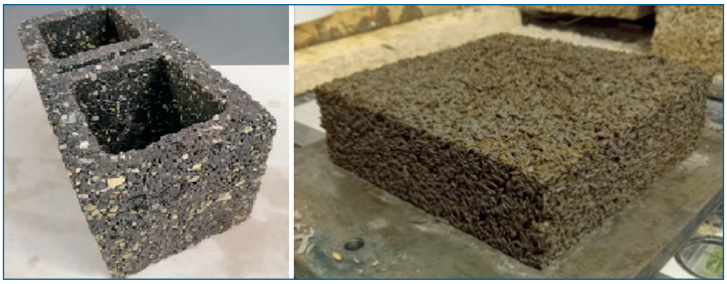


Figura 7: (a sinistra) **Prototipo di blocco sostenibile ed isolante realizzato al 100% con materiali riciclati – legante da sottoprodotti industriali combinato con plastiche riciclate (progetto SUS-CON);** (a destra) **Prototipo di pannello a base di geopolimeri e scarti vegetali (progetto METABUILDING. (foto concesse da CETMA)**

Motivazione per lo sviluppo

Investimenti di risorse economiche nel settore dei materiali ad attivazione alcalina/geopolimeri permetterebbe a questa tecnologia, ad oggi principalmente diffusa solo in scala di laboratorio con alcuni esempi di produzione industriale a livello globale, di affrontare i necessari approfondimenti tecnici dando ulteriori evidenze sperimentali delle prestazioni raggiungibili e sugli utilizzi nei materiali da costruzione. Questo consentirebbe, nel breve-medio termine, un maggiore riconoscimento delle potenzialità di questi materiali nel settore anche in relazione agli aspetti di sostenibilità; nel medio-lungo termine, esse potrebbero auspicabilmente essere considerati da normative di prodotto. Inoltre, va sottolineato il fatto che l'impiego dei materiali ad attivazione alcalina o geopolimerici potrebbe rappresentare un'opportunità per l'economia circolare basata su un approccio efficace per utilizzare valorizzandoli elevate quantità di scarti di diversa prove-

nienza. Fatta eccezione per alcuni specifici accorgimenti, la reologia di questi materiali può risultare simile a quella dei calcestruzzi tradizionali e una eventuale immissione sul mercato, potrebbe essere agevolata dal fatto che il processo di produzione possa avvenire con tecnologie simili a quelle previste per gli impianti di betonaggio tradizionali, fatto salvo ad esempio la necessità di gestire quantitativi massivi di attivatore in forma di soluzione alcalina. Peraltro, i materiali ad attivazione alcalina/geopolimeri soffrono tipicamente di un lento sviluppo delle resistenze meccaniche se confrontati ai materiali cementizi tradizionali. Questo comporterebbe un inevitabile allungamento dei tempi di realizzazione delle opere se confrontati con le tecnologie tradizionali con considerazioni complessive sulla sostenibilità da valutare caso per caso.

ALTRI MATERIALI INNOVATIVI: FOTOCATALITICI E COOL

Materiali fotocatalitici

Materiali cementizi fotocatalitici[211] possono trovare applicazione per migliorare la qualità dell'aria in aree urbane molto interessate dal traffico veicolare, ad esempio in cui sia elevata la concentrazione di NOx o altri agenti inquinanti (e.g. SO_X, CO, NH_3, CH_3OH; C_2H_5OH, CH_2Cl_2, $CHCl_3$, clorobenzene, clorofenolo, toluene, etilbenzene; etc.); per il corretto funzionamento sono necessarie condizioni di adeguata illuminazione (per consentire l'azione fotocatalitica) e risciacquo (per rimuovere i prodotti di reazione quali nitrati e carbonati).

Materiali "cool"

Materiali cementizi cool[212], con elevata riflettanza solare, possono contribuire a ridurre l'effetto isola di calore, migliorando la sostenibilità del contesto urbano.

NUOVE TECNICHE COSTRUTTIVE

MANIFATTURA AVANZATA - STAMPA 3D DI MATERIALI STRUTTURALI A BASE CEMENTIZIA

Le tecnologie di stampa digitale di materiali a base cementizia possono favorire un uso efficiente delle risorse naturali nelle costruzioni. Tali tecnologie possono aprire nuove prospettive alla progettazione in virtù dei più ampi gradi di libertà e possibilità di integrazione con altre tecnologie digitali (es. BIM), offrendo la possibilità di realizzare strutture difficilmente realizzabili con le tecnologie tradizionali.

L'efficienza del processo costruttivo deriva dalla possibilità di collocare il materiale nella struttura solo "dove serve", evitandone "sprechi" (ad es. in zone scariche o con minori livelli di carico). Sono quindi possibili risparmi in termini di volume di materiale una certa funzione strutturale.

L'elevata automazione di processo costruttivo raggiungibile con tale tecnologia può offrire inoltre vantaggi in fase di realizzazione in opera, aumentandone conseguentemente il livello di sicurezza di cantiere in relazione al ridotto ricorso a manodopera.

Lo sviluppo normativo dovrà essere collegato allo sviluppo tecnologico dei materiali, allo stato attuale ancora in fase iniziale, in relazione agli specifici processi di stampa, anch'essi in continua evoluzione. Infatti, le prestazioni ottenute in situ hanno una componente rilevante collegata alle caratteristiche dalla specifica tecnologia di stampa potendo essere le proprietà del materiale a monte (quali che siano le prestazioni dell'elemento finito) anche differenti da quelle dal materiale a valle del processo di stampa.

Stato dell'arte

La rilevanza delle tecnologie di stampa digitale nel settore costruzioni sta progressivamente crescendo, essendo ad oggi disponibili diverse applicazioni. L'applicazione diffusa di tale tecnologia non potrà che passare dallo sviluppo della normativa tecnica, che a propria volta poggia sullo sviluppo tecnologico

dei materiali. In tal modo sarà possibile superare gli attuali principali ostacoli alla diffusione di tale tecnologia.

Per la tecnologia di stampa digitale del calcestruzzo non sono infatti ancora disponibili normative nazionali/europee. In relazione alla stampa 3D specificatamente, risultano mancanti delle specifiche tecniche italiane e/o europee per la progettazione strutturale, produzione, qualifica e metodi di prova per la caratterizzazione dei materiali, che siano rappresentativi delle prestazioni strutturali. L'immediata conseguenza è la carenza di informazioni necessarie a garantire l'uso ordinario di tali tecnologie costruttive e materiali in conformità ai criteri di sicurezza stabiliti dalla NTC 2018, fatta salva la possibilità, più complessa, di autorizzazioni ad hoc per la specifica opera/tecnologia di stampa/materiale.

Allo scopo di colmare questa lacuna, il comitato tecnico europeo sul calcestruzzo, CEN/TC 104 ha avviato l'attività di standardizzazione in tale ambito[213]. Le nuove specifiche tecniche si prevede possano essere disponibili (2027) come nuova parte della norma europea del calcestruzzo (Parte 4 – Requisiti addizionali per specifica e conformità del calcestruzzo per fabbricazione digitale). Il focus sarà su tecnologie di produzione additiva e stampa 3D con alto livello di maturità tecnologica (TRL>6).

Uno stato dell'arte a livello internazionale è fornito dai rapporti tecnici dei comitati RILEM pertinenti tale ambito di attività[214,215,216].

Motivazioni per lo sviluppo

Lo sviluppo di tale tecnologia finalizzato ad un'applicazione strutturale diffusa necessiterà studi sui materiali in relazione alle prestazioni essenziali per le costruzioni, ivi inclusa la durabilità e/o ulteriori prestazioni di particolare rilevo per questa tecnologia (es. modulo elastico e scorrimento viscoso), solitamente indirettamente garantite nel calcestruzzo ordinario una volta soddisfatti i requisiti di

resistenza meccanica, ma che possono risultare caratterizzate da regole tecniche differenti nelle fattispecie dei materiali per stampa digitale (ad esempio collegati alla tipica sostanziale assenza di aggregato grosso), e/o in dipendenza della specifica tipologia del processo di stampa.

Per una diffusione della tecnologia di stampa digitale nella pratica d'uso corrente in ambito strutturale risultano pertanto necessari studi scientifici mirati allo sviluppo di materiali e tecnologie di stampa innovative, nonché un'attività normativa e regolamentare allo scopo mirata ed un iter autorizzatorio snello ed efficace. Infine, a differenza di altre tecnologie, la normazione del materiale non potrà prescindere dalla normazione delle macchine che lo mettono in opera.

L'applicazione delle tecnologie di stampa 3D di materiali cementizi nelle costruzioni non è limitata all'ambito strutturale. Ad es. una delle possibilità offerte è la stampa di casseri permanenti ad hoc, con funzioni di per sé di tipo non-strutturale (ma ad esempio architettonico), per l'esecuzione del getto strutturale. In tal modo, oltre a ridursi l'uso di materiali incoerenti con quelli a base cementizia (es. casseri in legno), condizione questa sfavorevole al riciclo, spesso pertanto destinati a rifiuto, può contribuire a ridurre l'onere complessivo della manodopera, riducendo in ultimo la necessità di intere fasi del processo costruttivo (rimozione dei casseri, finitura, smaltimento se nel caso). A fine vita della costruzione, i materiali stampati, in contatto intimo con la struttura di calcestruzzo e ad essa affini (essendo in entrambi i casi la matrice a base cementizia), potranno essere riciclati congiuntamente alla struttura con minori oneri ad es. rispetto alla necessità, tradizionalmente, di rimozione/separazione selettiva.

MATERIALI PER STRADE - PAVIMENTAZIONI STRADALI IN CALCESTRUZZO IN GALLERIA

L'applicazione del calcestruzzo come materiale per la costruzione di strade offre importanti prospettive sotto il profilo della sostenibilità. In particolare, un'interessante applicazione del calcestruzzo per pavimentazione, dal punto di vista sia della sicurezza sia della riduzione dei costi di gestione, è nelle gallerie stradali, soprattutto in quelle di maggior lunghezza: l'elevata resistenza al fuoco costituisce un evidente vantaggio per la sicurezza, il colore chiaro permette un'importante riduzione dei costi di illuminazione e la ridotta manutenzione un limitato impegno di risorse durante tutta la vita di servizio. Quest'ultimo aspetto ha inoltre delle ripercussioni positive anche sulla sicurezza stradale per la limitata presenza di cantieri e quindi di interruzioni al traffico.

Un materiale ignifugo e atossico è sinonimo di sicurezza, soprattutto in galleria dove le conseguenze di un incendio possono assumere dimensioni importanti.

Scegliere il calcestruzzo per la pavimentazione di una galleria stradale significa far sì che essa non contribuisca al carico d'incendio e non si deformi per effetto del calore, agevolando le operazioni di soccorso e la messa in sicurezza degli utenti. Allo stesso tempo non vengono compromesse le caratteristiche e le prestazioni del manto stradale, consentendo un rapido ripristino della funzionalità della galleria.

I vantaggi per la sicurezza in caso di incendio sarebbero già sufficienti per considerare il calcestruzzo una valida alternativa alle soluzioni più tradizionali nelle gallerie stradali. Non sono però i soli da valutare, soprattutto nell'attuale contesto che vede gli obiettivi di sostenibilità al centro delle scelte progettuali.

Durabilità e colore chiaro sono due caratteristiche intrinseche che in galleria consentono al calcestruzzo di esprimere al massimo le proprie potenzialità.

Un materiale durabile richiede, infatti, minori interventi di manutenzione e quindi, anche al di là di eventi di particolare entità, riduce il rischio di incidenti e il disagio conseguenti alle interruzioni del traffico dovute ai cantieri. Grazie al colore chiaro, inoltre, aumenta la visibilità e quindi la sicurezza degli utenti.

Stato dell'arte

La realizzazione di pavimentazioni in calcestruzzo costituisce una tecnologia ampiamente sperimentata e applicata all'estero, ma non ancora diffusa in Italia. Se si considera che l'Italia è tra le nazioni che ospitano il maggior numero di gallerie al mondo, si può meglio comprendere l'effetto delle scelte costruttive legate alle pavimentazioni.

Dopo il 1999 - anno dell'incendio all'interno del traforo del Monte Bianco e di quello del tunnel austriaco Tauren - sono state avviate in Europa numerose iniziative, sia in ambito tecnico-scientifico che a livello normativo per accrescere la sicurezza in galleria. In particolare, la normativa europea[217], stabilisce misure aggiuntive per l'innalzamento della sicurezza nelle gallerie di lunghezza superiore a 500 metri, presenti lungo la rete stradale transeuropea (TERN). Le indicazioni europee sono state recepite in Italia[218] e hanno avuto un importante impatto sui gestori italiani della rete TERN, considerando che l'Italia è di gran lunga la Nazione che ha il maggior numero di gallerie, circa il 50% del totale delle gallerie dell'Europa.

Nonostante ciò, l'Italia fatica ad allinearsi a una scelta costruttiva che, in diversi Paesi al mondo, è quella prevalente da tempo. Le ragioni hanno una duplice matrice, culturale e normativa. La poca consapevolezza dei vantaggi e la consuetudine all'utilizzo di soluzioni più tradizionali si aggiungono a una normativa che non tiene nella dovuta considerazione il contributo della pavimentazione alla sicurezza complessiva della galleria.

Motivazioni per lo sviluppo

Le stesse proprietà che migliorano la sicurezza, durabilità e colore chiaro, apportano interessanti vantaggi anche in termini di sostenibilità ambientale ed

Esempio di pavimentazioni in calcestruzzo



Figura 8: Darsena di Pescherecci (Cagliari) - (foto concessa da Heidelberg Materials)

economica.
Due studi del Dipartimento Ingegneria Civile Edile e Ambientale della Sapienza Università di Roma[219], [220] hanno quantificato questi vantaggi esaminando gli impatti delle diverse soluzioni nel contesto della rete stradale italiana.

Sono state analizzate nel dettaglio le fasi di costruzione, manutenzione, gestione della pavimentazione e dell'impianto di illuminazione, nell'arco della vita utile, considerando diversi livelli di traffico rappresentativi di tronchi extraurbani secondari nazionali.

Il dimensionamento e la progettazione sono stati condotti sulla base delle normative di riferimento vigenti, tenendo conto delle soluzioni e delle procedure adottate in Italia dai principali gestori stradali e delle migliori soluzioni disponibili. Per la pavimentazione in calcestruzzo è stata scelta la tipologia costruttiva a lastre non armate (*Jointed Plain Concrete Pavement*), applicata nelle più recenti esperienze sul territorio nazionale (galleria di Laives (BZ) e gallerie del Quadrilatero Umbria-Marche).

È emerso che il colore chiaro della pavimentazione consente un risparmio considerevole sull'illuminazione che, unito alla maggiore durabilità del materiale, porta vantaggi ambientali e economici non trascurabili.

Dal punto di vista ambientale, i risultati ottenuti con la metodologia LCA, hanno evidenziato una riduzione media degli impatti, che sono di seguito dettagliati, pari al 30% conseguente alla scelta di una pavimentazione rigida (calcestruzzo).

Il vantaggio economico oscilla, invece, tra il 20 e il 26% a seconda della lunghezza della galleria e della vita utile di progetto (20 o 30 anni).

Riportando questi dati a una galleria di 2000 m di lunghezza, considerando una vita utile di 30 anni, si ha un costo complessivo attualizzato di 5,7 milioni di euro nel caso di pavimentazione in calcestruzzo e di 7,4 milioni di euro nel caso di pavimentazione in conglomerato bituminoso. Il vantaggio economico è, quindi, quantificato in circa 1,7 milioni di euro.

Per mostrare un quadro più concreto, a partire dai risultati emersi dagli studi, Federbeton ha stimato l'impatto che si avrebbe se si utilizzasse il calcestruzzo nella pavimentazione di 2.000 gallerie italiane. In 20 anni si eviterebbe l'emissione in atmosfera di 3.500.000 tonnellate di CO_2, che equivale a togliere dalla circolazione 140.000 automobili o azzerare le emissioni generate in 20 anni da città delle dimensioni di Aosta o Vibo Valentia. La stessa quantità di emissioni può essere assorbita in 20 anni da un'area verde estesa come 6 volte Parco Sempione a Milano o 3 volte Villa Borghese a Roma.
Dal punto di vista economico ciò consentirebbe un risparmio pari a 1,3 miliardi di euro, sempre in 20 anni, in termini di minori costi sociali (spesa sanitaria, ospedaliera, per interventi di ripristino ambientale, per minore produttività, soprattutto nella filiera agricola, ecc.) e 2,1 miliardi di euro di risparmio dovuto ai minori costi legati all'illuminazione e alla manutenzione delle gallerie.

NUOVE MODALITÀ PROGETTUALI

STRUMENTI DI VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ (LCA/EPD)

La sostenibilità ambientale, economica e sociale è un tema complesso e un obiettivo difficile da valutare. Per questo è necessario analizzare la filiera di un materiale o la realizzazione di un intervento edilizio, con un approccio al ciclo di vita, che tenga conto delle fasi che si collocano a monte e a valle della fase "core" (fase di produzione in stabilimento per i prodotti edilizi, fase d'uso per gli edifici). La valutazione del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment* – LCA) è riconosciuta a livello internazionale come metodologia in grado di quantificare gli impatti ambientali associati a un prodotto o un servizio, di indirizzare le scelte produttive e progettuali e di supportare gli indirizzi politici. In edilizia, gli "oggetti" della valutazione LCA sono due: i prodotti edilizi/materiali e l'edificio/intervento edilizio. La valutazione LCA dei prodotti edilizi (e le conseguenti ottimizzazioni di scelte produttive) è di interesse e responsabilità dei produttori. Essi possono usare i risultati della valutazione LCA sia per migliorare il profilo ambientale dei propri prodotti e della filiera di produzione, sia per comunicare i risultati ambientali dei propri prodotti tramite certificazioni ambientali di prodotto, in particolare tramite le EPD (*Environmental Product Declaration*). Lo scopo della valutazione LCA è di consentire di identificare, tramite l'interpretazione dei risultati e le *hotspot analysis*, quali sono i processi, le fasi, le sostanze/materiali che determinano il maggior impatto ambientale, al fine di trovare soluzioni migliorative/sostitutive. Una valutazione LCA può far emergere i vantaggi ambientali derivanti dall'uso di materiali riciclati (quantificando l'entità del beneficio, permettendo di identificare i limiti per esempio associati alla distanza di trasporto, ecc.). Le EPD sono un input importante per le valutazioni LCA di edificio, poiché evitano l'uso di dati secondari da banca dati consentendo pertanto una valutazione più accurata. Essendo i prodotti edilizi assimilabili a "prodotti intermedi" (considerando l'edificio come "prodotto finale"), valutazioni comparative di sostenibilità tra materiali/prodotti non possono essere tecnicamente valevoli senza prendere come riferimento l'edificio nel suo complesso (e le prestazioni per cui il prodotto viene scelto/applicato).

La valutazione LCA di edificio (a supporto delle scelte costruttive e materiche) è di interesse e responsabilità dei progettisti e dei costruttori. Essi possono usare i risultati della valutazione LCA per identificare le soluzioni costruttive o le scelte materiche a minor impatto ambientale, considerando non solo l'impatto di produzione del materiale, ma anche il suo ruolo nell'intero ciclo di vita dell'edificio (costruzione, uso, manutenzione, demolizione), tenendo conto delle prestazioni e della durabilità.

Stato dell'arte

La valutazione LCA sta avendo una stagione di ampia diffusione nelle applicazioni sia alla scala del prodotto edilizio e della certificazione EPD, sia alla scala di edificio. In particolare, fungono da traino una serie di recenti direttive e regolamenti europei relativi alla sostenibilità in edilizia, sotto l'ombrello dell'European Green Deal e del piano di azione dell'Economia Circolare, come la Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR)[221] e la Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)[222].

A livello internazionale sempre più prodotti sono dotati di certificazione ambientale EPD, al fine di comunicare in maniera trasparente i risultati della valutazione LCA di prodotto e permettere a progettisti e costruttori di sviluppare valutazioni LCA alla scala di edificio, che consentano loro di scegliere soluzioni costruttive e materiali a minor impatto ambientale. Anche all'interno dello stesso comparto materico, la valutazione LCA di specifici prodotti può evidenziare vantaggi ottenibili, ad esempio grazie a miglioramenti nei processi produttivi, nell'uso di risorse, nella filiera di approvvigionamento.

A dicembre 2023, il Consiglio europeo e il Parlamento europeo hanno concordato di revisionare il Regolamento sui prodotti da costruzione (Construction Products Regulation - CPR) al fine di rimuovere gli ostacoli identificati[223], quali ostacoli nell'iter di revisione delle norme armonizzate spesso bloccato per aspetti legali; aspetti di implementazione nazionale del regolamento; necessità di sem-

plificazione regolamentare; integrare le politiche di transizione verde e digitale e di sicurezza di prodotto. Il nuovo CPR è stato recentemente pubblicato[224],. In tal modo sarà possibile creare un quadro coerente per la valutazione dell'impatto ambientale nel corso del ciclo di vita e della circolarità dei materiali da costruzione. Il nuovo contesto regolamentare relativo all'iter di revisione delle norme armonizzate legate al CPR (Aquis), a propria volta in fase di revisione, si prevede comporterà l'introduzione di nuove caratteristiche ambientali di prodotto (es. dati sul potenziale di riscaldamento globale (GWP) nell'ambito della marcatura CE.
La necessità di dati ambientali LCA di prodotto per supportare le scelte (e le valutazioni LCA) a scala di edificio ha determinato anche la spinta alla creazione di banche dati nazionali (che restituiscano valori di riferimento contestualizzati). Ad esempio, in Italia è disponibile la banca dati nazionale ARCADIA[225].

Alla scala di edificio, la valutazione LCA può concorrere all'ottenimento di certificazioni ambientali di edificio, nell'ambito dei *Green Building Rating Systems* (come LEED, BREEAM, DGNB) ed è considerata centrale nella struttura del *framework europeo* Level(s)[226], per la valutazione della sostenibilità degli edifici.

In Italia, la valutazione LCA è anche un criterio ambientale premiante all'interno dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'edilizia, che si applicano alle gare per l'affidamento della progettazione e dei lavori di costruzione, demolizione, recupero, ristrutturazione. Nella nuova versione dei CAM (2025) il tema LCA è stato ulteriormente reso centrale, anche a seguito dell'obbligatorietà introdotto dal Nuovo Codice Appalti nel 2023.

Motivazione per lo sviluppo

Per orientare il settore delle costruzioni verso la sostenibilità, occorre il supporto di strumenti di valutazione che rendano consapevoli gli operatori delle conseguenze ambientali delle scelte (produttive e progettuali), alla scala sia dei prodotti edilizi sia degli edifici.

Anche la promozione di soluzioni innovative (uso di aggregati da riciclo, uso di combustibili alternativi, ecc.) dovrebbe essere valutata tramite analisi LCA al fine di identificare potenziali criticità o *trade off* di impatti tra fasi o tipi di impatto.

Per permettere uno sviluppo degli studi LCA di prodotto e di edificio è necessario implementare la disponibilità di dati affidabili contestualizzati (nazionali) alla base delle valutazioni LCA.

La diffusione di dati a livello di prodotto consente di agevolare e rendere più affidabili gli studi LCA a livello di edificio e di supportare le scelte progettuali e costruttive. Anche rispetto alle fasi del ciclo di vita degli edifici occorre sviluppare dati medi di riferimento affidabili e contestualizzati (rispetto agli impatti della fase di cantiere, della fase d'uso energetica, dei processi di manutenzione e riqualificazione, della fase di decostruzione). Promuovere una conoscenza degli impatti correlati all'intero ciclo di vita di materiali e soluzioni costruttive, tenendo conto adeguatamente del contesto e delle specificità d'uso degli edifici (prestazioni attese), è necessario per evitare distorsioni rispetto alle scelte di materiali/soluzioni costruttive per la realizzazione di edifici sostenibili. La scelta di materiali ecologici deve derivare da una conoscenza attenta dell'effettivo bilancio ambientale nell'intero ciclo di vita; le scelte derivanti da studi che analizzino la sola fase di estrazione/produzione del prodotto forniscono solo un quadro parziale.

Rispetto alla complessità di lettura dei risultati di una valutazione LCA, che prevede la restituzione dei risultati attraverso la quantificazione di numerosi indicatori di impatto ambientale, e tenendo conto anche della necessità di contemplare aspetti di sostenibilità sociale ed economica, occorre sviluppare maggiore consapevolezza rispetto agli sviluppi metodologici attuati a livello internazionale di sostenibilità integrata (*Life Cycle Sustainability Assessment* – LCSA), attraverso procedure di "normalizzazione" che consentano di visualizzare i risultati in modo da evidenziare quali indicatori di impatto sono più rilevanti rispetto a un certo settore.

MODULARITÀ, DISASSEMBLAGGIO E SOSTENIBILITÀ DEL CALCESTRUZZO

La progettazione mirata alla modularità può favorire il riutilizzo di elementi prefabbricati di calcestruzzo, riducendo in questo modo per quanto possibile il ricorso a discarica e/o riciclo e/o altre pratiche di recupero ambientalmente più onerose.

In vista delle sfide di riqualificazione e di raggiungimento di elevate classi energetiche per un numero non indifferente di edifici, obiettivi derivanti dalla Nuova Direttiva EPBD, sta emergendo sempre più una nuova filosofia del costruire, diffusa principalmente nei Paesi del Nord Europa, ovvero l'Off-Site Construction. Lo scopo della nuova tecnologia è quello di accelerare i processi di riqualificazione del patrimonio immobiliare, partendo da una scarsità di risorse, in particolare della risorsa lavoro.

In Italia, da alcune analisi, emerge che si sta determinando un progressivo invecchiamento dei lavoratori iscritti in Cassa Edile con una conseguente riduzione dei giovani lavoratori appartenenti al settore, in particolare, alla fascia d'età fino a 30 anni. Per far fronte a questa problematica e in considerazione dei possibili apporti dal punto di vista ambientale (riduzione dei consumi, delle emissioni e dei rifiuti prodotti), sociale (minimizzazione dell'impatto delle attività di riqualificazione sugli abitanti dell'immobile, questione sicurezza per gli operatori del settore) ed economico (riduzione dei costi di cantiere e di produzione), ci si sta interrogando sulla possibile applicazione di questa nuova tecnologia anche nel nostro Paese. L'Off-Site Construction implica l'impiego di componenti prefabbricate e assemblate in cantiere che vanno ad incidere sul processo tradizionale di costruzione, spostando, in parte, alcune operazioni dal cantiere alla fabbrica.

Sarà necessario per il settore, dunque, prestare attenzione rispetto alla possibile diffusione sul mercato di questa tecnologia e come la medesima potrà cambiare la richiesta di competenze. Fondamentale sarà capire se la tecnologia potrà ridurre effettivamente i costi di cantiere e dunque di esecuzione lavori a fronte della peculiarità del territorio, della diversità del patrimonio edilizio italiano. Molti sono ancora gli interrogativi che sorgono tra le imprese, soprattutto PMI, le quali dovrebbero ristrutturarsi e riorganizzarsi a fronte di un investimento non indifferente.

La modularità è favorita in caso di calcestruzzi con elevate caratteristiche meccaniche e di durabilità, a causa del preservarsi di sufficienti prestazioni anche in cicli di vita successivi al primo oltre che alla capacità di tollerare cicli di costruzione/decostruzione senza perdita prestazionale.
Tale pratica virtuosa potrebbe essere favorita dallo sviluppo di materiali ad elevate prestazioni; da un'adeguata conoscenza delle proprietà dei materiali ed uso possibile nella progettazione strutturale; da una progettazione mirata a favorire decostruzione/ricostruzione senza ulteriore generazione di rifiuti.
In questa tecnologia rilevano anche aspetti di sviluppo, es. relativi al materiale/tecnica costruttiva, necessari a rendere il materiale particolarmente adatto alle operazioni di montaggio/smontaggio (es. per caratteristiche di tenacità). Stesso dicasi per la demolizione selettiva: alcuni materiali, ad es sviluppati allo scopo, potranno rendere tali operazioni più semplici ed efficaci rispetto ad altri materiali, facilitando infine il riutilizzo che potrà avvenire a partire da fonti più omogenee per composizione e proprietà.



Figura 9: Nuovo svincolo S.Giorgio C.se – Monolite a Spinta Autostrada Torino-Aosta (foco concessa da Heidelberg Materials)

MASSA TERMICA E RETI INTELLIGENTI

Uno dei limiti nell'utilizzo di energie rinnovabili è legato allo sfasamento tra disponibilità energetica, solitamente fissata da cicli naturali e richiesta energetica, dovuta ad esigenze specifiche da parte degli utilizzatori. Soluzioni tecnologiche per all'accumulo energetico potrebbero contribuire efficacemente a colmare in questo divario, rendendo pertanto meglio utilizzabili le fonti rinnovabili.
La massa termica dell'involucro garantita dai materiali cementizi contribuisce alla riduzione del fabbisogno energetico (grazie all'accumulo termico) e al mantenimento delle condizioni di comfort interno, favorendo il raffrescamento passivo estivo e migliorando l'efficienza energetica dell'edificio e riducendo i picchi di consumo energetico dell'edificio.
Materiali a base cementizia possono migliorare l'efficienza energetica dell'edificio fornendo prestazioni termiche (elevata massa termica) congiuntamente a prestazioni meccaniche e di durabilità.

La massa termica del calcestruzzo può essere utilizzata come accumulo termico per ridurre i picchi di fabbisogno energetico dell'edificio (solitamente coperti da una maggiore proporzione di fonti fossili), contribuendo potenzialmente ad una riduzione complessiva della quota di fabbisogno derivante dalle fonti energetiche non-rinnovabili.
Ad esempio, tetti con elevata massa termica accumulando calore durante il giorno (evitando l'ingresso completo dell'onda termica nell'involucro edilizio) e raffrescati di notte (es. per ventilazione naturale o artificiale) possono rendere più efficiente il condizionamento termico passivo dell'edificio durante la stagione estiva.
In tal modo è possibile ridurre gli oneri di raffrescamento ed i rischi di sovra riscaldamento.
Interconnessione digitale ed energetica tra edifici può consentire di utilizzare al meglio surplus energetici prodotti localmente, acculandoli pro tempore nella struttura, riducendo in ultimo la necessita di ricorrere a fonti fossili per alimentare i picchi di fabbisogno distrettuali.

La tecnologia, in prospettiva futura, si basa su:

- sviluppo di laboratorio/industriale di materiali con elevata massa termica, ad esempio calcestruzzi con aggregati a cambiamento di fase (PCM).

- collegamenti a livello distrettuale, supportati da tecnologie digitali e/o A.I., per consentire ottimizzazioni di carattere più generale, es. condividendo forniture energetiche autoprodotte e/o masse termiche non utilizzate completamente (es. accumulando nell'una struttura i surplus dell'altra).

- Progettazione adeguata ad una comprensione completa dei fenomeni di accumulo termico, ad esempio con impiego di analisi dinamica dell'onda termica.

In tal modo potranno essere utilizzate tipologie di fornitura energetica anche se non sincrone con lo sfasamento dell'onda termica, ad esempio permettendo di adottare rinnovabili nelle fasi fuori di sfasamento.

RESILIENZA STRUTTURALE - STRUTTURE (DI CALCESTRUZZO) RESISTENTI A FUOCO, VENTO, ALLAGAMENTI, SISMA

Le caratteristiche di resilienza strutturale sono principalmente garantite attraverso un'idonea progettazione di materiali e strutture, in linea con i regolamenti applicabili nel luogo d'impiego. Peraltro, strutture di calcestruzzo offrono l'opportunità di un'elevata potenzialità intrinseca di resistere ad eventi avversi quali forte vento o allagamenti, favorendo se possibile il pronto recupero delle attività a valle di tali eventi. Tale capacità intrinseca è legata all'elevata massa volumica del calcestruzzo, accompagnata dall'elevata resistenza meccanica ed all'urto con oggetti trasportati (es. dal vento)[227]; allo stesso tempo allo stesso tempo il calcestruzzo non è soggetto a forze di sollevamento (vento), carichi trasversali o galleggiamento (allagamenti) eccessivamente sproporzionati rispetto al peso proprio della struttura. Inoltre, al riguardo è notevole che il calcestruzzo non si degradi per contatto con acqua, essendo intrinsecamente resistente all'acqua.
Il calcestruzzo è inoltre un materiale che, nella generalità dei casi in virtù del basso contenuto di organici, è incombustibile e/o con caratteristiche di reazione al fuoco tali da non favorire la diffusione dell'incendio né di contribuire ad esso.

Circa la resistenza al sisma, moderni codici di calcolo consentono un uso razionale nelle strutture. Peraltro, tutti i temi qui affrontati sono oggetto di evoluzione continua in relazione allo sviluppo tecnologico dei materiali, in particolare per quelli innovativi. In tali casi le problematiche da affrontare sono simili a quelle già trattate in altri contributi dedicati (es. durabilità).

Stato dell'arte

L'Italia è risultata uno dei paesi europei più esposti a disastri naturali [228],[229],[230]. Strutture di calcestruzzo esposte a eventi estremi[231] quali forte vento o allagamenti, hanno potenzialità di resistere mantenendo le proprie funzionalità entro certi limiti, anche in virtù delle caratteristiche intrinseche del materiale. Il calcestruzzo esposto al fuoco, anche per tempi notevoli, può resistere senza bruciare, fondere o produrre gas tossici, agendo da barriera nel limitare la diffusione dell'incendio e/o agendo da isolante termico, senza necessità di materiali di riporto ignifughi.



Figura 10: Cassone MOSE - MOdulo Sperimentale Elettromeccanico - Venezia (foto concessa da Heidelberg Materials)

Motivazioni per lo sviluppo

Il calcestruzzo potrebbe in futuro essere pertanto progettato per migliorare ulteriormente la resistenza ad eventi avversi, ove applicabile, anche estremi, come vento, fuoco, allagamenti, sisma, ossia con prestazioni migliorative rispetto a quelle, già ragguardevoli, attuali.

Non di meno, la diffusione di strutture più resilienti può contribuire positivamente alla sostenibilità, offrendo maggiore sicurezza per gli utilizzatori della struttura (e/o per chi si trova nella sua prossimità) e più in generale per la società civile che potrà a propria volta essere garantita da un maggiore livello di resilienza (es. funzionamento di edifici, servizi di trasporto, assistenza sanitaria, istruzione etc.).

Investimenti nell'ottica del ripristino/rinforzo strutturale, ad esempio nel caso di strutture esistenti per fine di adeguarle alle più attuali normative e/o offrire maggiori margini di resilienza in caso di eventi di portata eccezionale, potrebbero

essere utili nel senso di migliorare la sostenibilità del settore costruzioni. Si pensi ad esempio ai ponti, alle scuole, alle infrastrutture stradali, alle opere idrauliche di manutenzione del territorio e/o di adeguamento a resistere ad eventi naturali che, seppure estremi, possono essere ragionevolmente prevedibili, etc., ma più in generale alle infrastrutture critiche.

Investire nella prevenzione dell'effetto di disastri naturali attraverso un aumento della resilienza delle infrastrutture risulta pertanto essenziale[232].

DIGITALIZZAZIONE - APPLICAZIONE ALLE COSTRUZIONI DI TECNOLOGIE INFORMATICHE AVANZATE

La digitalizzazione rappresenta uno degli strumenti di competitività dell'impresa all'interno del mercato odierno. Tra i vari aspetti della digitalizzazione il *Building Information Modeling* (BIM) è un tema di estrema attualità e sta assumendo da parte delle imprese del settore sempre più attenzione. Esso viene richiamato anche all'interno del nuovo Codice dei contratti pubblici (D.Lgs 36/2023) all'articolo 43 e all'allegato I.9 che ne dettagliano e circoscrivono l'utilizzo dei processi e delle metodologie di gestione informativa. L'argomento era già stato introdotto con la direttiva 2014/24/UE[233], mediante la quale gli Stati membri avrebbero avuto la possibilità di avvalersi della "modellazione informativa" (BIM) negli appalti pubblici. Recentemente il nuovo Codice dei contratti pubblici e le successive disposizioni integrative e correttive contenute nel Decreto Legislativo 31 dicembre 2024, n.209, hanno fissato al 1° gennaio 2025 l'obbligo di utilizzo di metodi e strumenti elettronici di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture per lavori di importo superiore a due milioni di euro[234].

I metodi e gli strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni (il cosiddetto processo BIM) costituiscono il linguaggio comune digitale per l'intera filiera delle costruzioni[235]. L'adozione del BIM nelle opere pubbliche è già una realtà e impone a tutti gli *stakeholder* un pieno allineamento, per far sì che la previsione non sia considerata un onere ma una vera opportunità, aperta agli sviluppi sempre nuovi della tecnica.

Stato dell'arte

Allo stato attuale non sono disponibili linee guida o regole tecniche generalmente condivise a livello europeo per il monitoraggio e controllo digitale della qualità del calcestruzzo con uso di intelligenza artificiale nel controllo di produzione di fabbrica (FPC digitale). Allo scopo, il comitato tecnico europeo di normazione sul calcestruzzo CEN/TC 104 ha avviato i lavori[236] per la standardizzazione in questo

ambito. In un primo tempo (2025) saranno considerati i principi sull'uso degli strumenti digitali e AI in FPC. Successivamente saranno proposte delle regole applicative (2026) per l'implementazione dei principi ed infine delle procedure standardizzate per l'uso di strumenti digitali e AI in FPC (2028) nell'ambito della norma europea del calcestruzzo. Allo scopo sarà necessario integrare i principi stabiliti dal regolamento europeo sull'intelligenza artificiale.

Di recente introduzione, il regolamento europeo (ESPR)[237] sui requisiti di progettazione ecocompatibile per prodotti sostenibili, istituisce il "passaporto digitale di prodotto" con informazioni ad esempio relative a identificazione univoca del prodotto, informazione e documentazione di conformità, manuali utente, istruzioni ed informazioni sulla sicurezza etc.

Motivazione per lo sviluppo

Con lo sviluppo della digitalizzazione si apre la possibilità di un monitoraggio strutturale profondo, collegato con informazioni di base su struttura, materiale ed ambiente, che consentiranno valutazioni migliorative ex-ante (con previsioni più accurate), ex-post (con analisi retrospettive più efficaci) ed in tempo reale (es. con generazione di allerte o altre reazioni strutturali) finalizzate ad un progressivo ed efficace sviluppo tecnologico delle costruzioni.

Tali tecnologie potrebbero consentire una valutazione della durabilità considerati puntualmente gli effetti delle azioni aggressive dell'ambiente sulla struttura e conseguentemente gli oneri associati alla manutenzione in relazione a specifici materiali e tecnologie.

Una delle possibilità prospettiche è quella di integrare le varie fasi del processo costruttivo a partire da progettazione, produzione e manutenzione, orientando in modo ottimizzato l'azione richiesta alle effettive esigenze tecnologiche. Tali fasi, tradizionalmente collocate in tempi diversi nel ciclo di vita della costruzione, po-

trebbero in prospettiva sovrapporsi parzialmente fino a consentire un rapporto dinamico con l'opera, in varie fasi del ciclo di vita, in cui pertanto gli oneri possano essere non solo previsti accuratamente in senso deterministico e/o probabilistico, ma anche valutati in tempo reale con la possibilità di ridurre il ricorso eccessivo a procedure di emergenza ed orientando al meglio la scelta del materiale alla prestazione richiesta. Es. capacità di valutare l'effetto sulla sostenibilità dell'opera derivante da un intervento di manutenzione tempestivo e contestualizzato al fine di allungare il ciclo di vita dell'opera e/o ridurre l'intensità degli interventi. Su una base prestazionale efficace per la durabilità potrebbero essere stimati eventuali oneri/benefici per ripristino e/o riciclo finalizzati a ridurre gli impatti sociali prevedibili nel ciclo di vita.

Lo sviluppo della digitalizzazione potrebbe consentire anche l'integrazione spinta tra le varie componenti della costruzione, permettendo di superare la tradizionale separazione funzionale (e.s. strutturale, isolamento, impianti etc.), ad esempio non esaustivo pensando all'uso di elementi strutturali per accumulo termico dinamico finalizzati a ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio e/o ad elementi strutturali con capacità di isolamento termico.

Altre forme di integrazione cui la digitalizzazione potrebbe aprire prospettive, possono riguardare le utenze interne all'edificio (es. computando in tempo reale gli assorbimenti dei vari impianti e/o componenti edilizi) per un'economia energetica ottimizzata dell'edificio.

Nel contesto urbano, l'integrazione con le reti energetiche, spinta da tecnologie digitali che consentano un'efficiente contestualizzazione dei vari fabbisogni energetici in spazi e tempi, potrebbe consentire una riduzione delle richieste energetiche di picco, solitamente alimentate da proporzioni maggiori di fonti fossili, ed in generale una riduzione di surplus energetici (difficili da gestire data la difficoltà tradizionale di accumulo).

Dal punto di vista infrastrutturale, un monitoraggio digitale attivo, ad es. del traffico veicolare su strade, potrebbe consentire un uso migliore dell'infrastruttura stessa e/o di un sistema di infrastrutture, con benefici complessivi anche di tipo non-strutturale (es. ottimizzazioni su consumo carburante; emissioni; impatti su benessere/salute etc.).

Altre prospettive digitali risultano strettamente connesse con lo sviluppo dei materiali, già approfondite nei contributi dedicati; peraltro, materiali dotati di tecnologie digitali potranno consentire ad esempio di raccogliere energia dai moti vibrazionali, ciclici e/o di altra natura (uso, vento/sisma/dilatazioni/gradienti termici etc.) della struttura, allo stesso tempo smorzandone gli effetti di disturbo eventuali. Alla stessa tipologia possono essere annoverate infrastrutture di ricarica elettrica integrate e/o collegate a sistemi di recupero energetico/frenata passiva di veicoli per induzione elettromagnetica.

Lo sviluppo della digitalizzazione potrà anche contribuire in senso generale ad una migliore comunicazione uomo/macchina, per quanto necessario al settore costruzioni, tema di urgente attualità nelle varie fasi del processo (costruzione, uso, decostruzione, riuso/riciclo). In tal senso, nuove prospettive del processo costruttivo, ad esempio basate sull'intelligenza artificiale, dovranno essere meglio comprese e sviluppate.

È dunque necessario assicurare al settore un adeguato supporto per l'acquisizione di strumenti e competenze inerenti alle tecnologie digitali. Per un'opera di "digitalizzazione di massa" è fondamentale che tutti gli attori coinvolti abbiano la dovuta preparazione tecnica.

INTELLIGENZA ARTIFICIALE NELLE COSTRUZIONI

L'intelligenza artificiale in edilizia viene considerata come in una prima fase di sviluppo. Già oggi è comunque possibile comprendere la portata dei cambiamenti che potranno realizzarsi in futuro sia in termini di revisione dei processi che di rivoluzione degli strumenti di utilizzo quotidiano.

Questa tecnologia contribuirà alla transizione digitale del settore introducendolo alla rivoluzione 5.0, ovvero digitale e sostenibile. I principali impatti che ne deriveranno riguarderanno:

- la produttività e la pianificazione dei lavori di costruzione;
- lo sviluppo dell'edilizia industrializzata;
- il miglioramento della sicurezza sui cantieri.

La tecnologia permetterà un efficientamento del processo dell'edilizia, in quanto all'interno di un progetto, solitamente, intervengono diversi soggetti e il coordinamento non è sempre del tutto immediato (previsione dei tempi di completamento delle fasi di costruzione, il consumo di risorse e le principali criticità che potrebbero verificarsi durante l'arco realizzativo del progetto, anche in ottica di sostenibilità e transizione ecologica, riduzione degli sprechi, ottimizzazione della logistica di cantiere e massimizzazione dell'efficienza complessiva del lavoro).

Nel campo delle costruzioni si sta inoltre consolidando una metodologia dedicata di gestione informativa digitale che presuppone un modello collaborativo integrato tra i diversi operatori, basato su piattaforme digitali interoperabili, ovvero il BIM. Tale metodologia consente di digitalizzare e informatizzare una infrastruttura o un edificio mediante la creazione di un "*digital twin*" il cosiddetto "gemello digitale" che presenta digitalmente le stesse caratteristiche dell'opera reale e che può quindi essere oggetto di simulazioni, monitoraggio in tempo reale, previsione del comportamento in funzione dell'utilizzo e dei fattori di stress. La stessa metodologia può dunque disporre di dati che analizzati forniscono tempistiche rispetto ad attività di manutenzione.
L'intelligenza artificiale è grado di potenziare le capacità di estrarre valore dai dati,

agevolando le committenze e gli enti gestori nelle fasi di progettazione e gestione dell'infrastruttura e migliorando la produttività delle imprese di costruzione.

Rispetto alla sicurezza sul cantiere, la tecnologia potrebbe aiutare nell'identificazione in tempo reale di potenziali rischi e prevenire incidenti identificando e segnalando comportamenti a rischio, non conformi o situazioni di emergenza; potrebbe dunque rappresentare un supporto per la predisposizione dei sistemi di prevenzione e protezione dei rischi.

Stato dell'arte[238,239]

Negli ultimi anni si è andato via via formandosi un linguaggio comune che viene utilizzato in edilizia, ovvero il BIM – *Building Information Modeling*, divenuto linguaggio standard dell'edilizia. Questo nuovo mondo del digitale all'interno dell'edilizia necessiterebbe di una visione più sistemica a livello nazionale rispetto alla gestione e trattamento di questi dati; servirebbe dunque come prima misura una base dati condivisa a livello nazionale, rispetto alla quale, tutti gli attori coinvolti inserirebbero i medesimi allo stesso modo.
Ad oggi, si sta lavorando anche nell'ottica di possibile utilizzo dell'intelligenza artificiale per la velocizzazione delle verifiche e delle autorizzazioni legate a ciascun progetto e che la Pubblica Amministrazione deve rilasciare. In quest'ottica è stato creato il DIHCUBE, polo italiano per l'innovazione nel mondo delle costruzioni coordinato da ANCE, in cui viene offerta formazione alle imprese e alle pubbliche amministrazioni; viene inoltre dato supporto alle *start-up* innovative e supporto a test di nuovi processi e procedure all'interno delle aziende.
Oltre al già citato DIHCUBE, oggi in pieno corso, dal 2018 al 2021, ANCE è stata partner del progetto Horizon 2020 "*DigiPlace*" che ha portato alla definizione di un'architettura informatica in grado di permettere a ogni stato membro una piattaforma nazionale digitale delle costruzioni che sia interoperabile a livello europeo.
In Italia esistono alcuni progetti che già mettono in pratica le tecnologie digitali

applicate al mondo delle infrastrutture. Un esempio è l'Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche (AINOP), che si può considerare la prima base di architettura informativa del patrimonio pubblico.

Altri esempi sono le iniziative "*Smart Road*" e "*Smart Mobility*" di ANAS, dove alcune strade italiane sono state già cablate con reti sensoristiche per dare avvio a una gestione intelligente dei flussi di traffico e delle attività manutentive delle opere.

A livello europeo è stato approvato il regolamento sull'intelligenza artificiale (Artificial Intelligence Act[240]) come parte della strategia digitale europea[241,242], con lo scopo di proteggere i diritti fondamentali, la democrazia, lo Stato di diritto e la sostenibilità ambientale da sistemi AI ad alto rischio[243].

Motivazione per lo sviluppo

Rispetto al settore delle costruzioni, l'intelligenza artificiale potrebbe ricadere in primo luogo all'interno della pianificazione territoriale; difatti, gli algoritmi, anche applicati ai *big data*, possono essere sfruttati per identificare le esigenze di una comunità a partire da una grande quantità di dati geospaziali, demografici ed economici, raccolti attraverso piattaforme, sensori, rilevatori.

Un esempio particolarmente evidente è il monitoraggio dei flussi del traffico veicolare lungo le strade di un agglomerato urbano, la cui rielaborazione, anche attraverso l'IA, permette di guidare i piani e le decisioni progettuali in funzione degli obiettivi urbanistici, ad esempio nel ridisegno delle mappe stradali.

Altro ambito in cui i dati e le tecnologie digitali rivestono un ruolo cruciale, e – auspicabilmente – sempre più rilevante, sono i modelli meteorologici e idrologici, attraverso cui è possibile conoscere in maniera sempre più precisa e affidabile i profili di rischio associati ai territori, e così intervenire con le opportune opere di prevenzione, mitigazione e adattamento.

Come già anticipato nei paragrafi precedenti, all'interno della progettazione, che è un altro ambito rispetto al quale l'IA si potrebbe sviluppare, si riportano due realtà a titolo di esempio: "*digital twin*" ovvero il "gemello digitale" che presenta le stesse caratteristiche dell'opera reale e che può quindi essere oggetto di simulazioni, monitoraggio in tempo reale, previsione del comportamento in funzione dell'utilizzo e dei fattori di stress. Ciò è reso possibile grazie anche all'uso di sensori applicati alle opere, che scambiano dati in tempo reale con i modelli digitali. Si potrebbe dunque ragionare di progettazione generativa, ovvero è l'intelligenza artificiale stessa che, sulla base di una serie di edifici analoghi, fornisce una base di lavoro al progettista, che è così in grado in breve tempo di visionare più opzioni dello stesso oggetto per poter dunque scegliere l'opzione più confacente al caso specifico. Si tratta dei PTFE – Progetti di fattibilità tecnica ed economica, che verrebbero generati con maggiori dettagli e in minore tempo.

Dall'utilizzo dell'intelligenza artificiale potrebbero inoltre derivare, in fase di costruzione, ulteriori benefici in termini di riduzione dei costi, di miglioramento della qualità e la rispondenza ai requisiti di progetto, all'accelerazione dei tempi di costruzione in un più efficace rispetto della sicurezza sul cantiere, nella sostenibilità di ogni singolo componente che viene a configurarsi all'interno dell'edificio.

L'IA potrebbe trovare altresì applicazione nella gestione, monitoraggio e manutenzione delle opere; difatti, la raccolta e la messa a fattor comune dei dati provenienti dai vari sensori applicati alle varie infrastrutture vengono analizzati utilizzando algoritmi, per individuare pattern e tendenze che possono indicare un possibile guasto o una degradazione delle prestazioni in un futuro più o meno prossimo dell'infrastruttura o dell'immobile. Sulla base dell'analisi dei dati, l'IA può generare previsioni rispetto al verificarsi di eventuali guasti alle infrastrutture. Le previsioni possono essere accompagnate analisi tecniche che aiutano a comprendere l'urgenza dell'intervento e a pianificare interventi di manutenzione

preventiva (ad esempio attraverso la sostituzione di componenti difettosi o la riparazione di parti critiche prima che si verifichi un guasto) minimizzando i tempi di inattività e i costi associati.

Tuttavia, così come le nuove tecnologie hanno indubbi benefici sulle differenti attività, creano anche nuovi rischi di cui è importante tenere conto. Di conseguenza, alle manovre legate all'innovazione è necessario affiancare iniziative riferite alla protezione di dati, alla sicurezza dei sistemi e ai principi dell'etica sociale.

In tal senso il Parlamento europeo ha approvato il Regolamento sull'Intelligenza Artificiale, che garantisce sicurezza e rispetto dei diritti fondamentali e promuove l'innovazione: "*1. lo scopo del presente regolamento è migliorare il funzionamento del mercato interno e promuovere la diffusione di un'intelligenza artificiale (IA) antropocentrica e affidabile, garantendo nel contempo un livello elevato di protezione della salute, della sicurezza e dei diritti fondamentali sanciti dalla Carta dei diritti fondamentali dell'Unione europea, compresi la democrazia, lo Stato di diritto e la protezione dell'ambiente, contro gli effetti nocivi dei sistemi di IA nell'Unione, e promuovendo l'innovazione*."

La base dati risulta essere la risorsa fondamentale e centrale per questa tecnologia. Tuttavia, il settore delle costruzioni è caratterizzato da una filiera molto lunga e che include una serie innumerevole di soggetti coinvolgendo l'86% di tutti i settori merceologici. Oltre a ciò, il prodotto finito in edilizia deve essere pensato, progettato e realizzato per una vita utile di almeno 50 anni. Generare dunque una base dati, su prodotti che hanno una vita così lunga e su tanti attori che influiscono a creare questo prodotto è importante che ci sia una base dati comune. La centralità del dato diventa dunque importante per il settore poiché diversamente si avrebbero tante banche dati diversificate e che tra loro non comunicherebbero e rispetto alle quali l'intelligenza artificiale non troverebbe applicazione in quanto il dato non sarebbe strutturato. Il dato dovrebbe comunque perdurare lungo tut-

ta la vita utile dell'edificio. Presupposto ciò è essenziale l'adozione di metodiche di calcolo e di valutazione dei materiali e strutture condivise a livello nazionale e/o europeo.

Diventa quindi necessaria una strategia nazionale, coerente a livello europeo che porti il settore ad una costruzione di un'unica piattaforma come base sulla quale l'intelligenza artificiale potrà poi agire. Servirebbero inoltre delle regole precise per creare sinergie tra gli attori della filiera chiamati ad interagire nella piattaforma ognuno per la propria parte di pertinenza.

Risulta essere fondamentale anche la continuità del flusso informativo per il facility management, difatti, il vero vantaggio sarà quello di potere gestire il bene nei prossimi 50 anni della sua vita utile e nelle fasi di fine vita /riciclo.

Queste azioni dovrebbero essere supportate da adeguate azioni formative a tutti i livelli necessari.

È auspicabile un'incentivazione per permettere alle imprese di dotarsi di macchinari, attrezzature e strumentazioni idonee, compresa la relativa formazione.

RACCOLTA DI CASI STUDIO

INDICE DEI CASI STUDIO

1. RAPPORTO DI SOSTENIBILITÀ FEDERBETON 2023

2. PROGETTI ITALIANI CONCRETE SUSTAINABILITY COUNCIL

3. PROGETTO DIHCUBE

4. DECARBONIZZAZIONE CEMENTERIA DI REZZATO-MAZZANO

5. ESEMPIO APPLICATIVO DI STRADE DI CALCESTRUZZO

6. PROGETTI DI RICERCA NELL'AMBITO DEI MATERIALI AD ATTIVAZIONE ALCALINA/GEOPOLIMERI

7. ALTRI CASI STUDIO SUDDIVISI PER ARGOMENTI
   a. Combustibile Solido Secondario
   b. Stoccaggio geologico di CO2
   c. Recupero materiali
   d. Cementi e calcestruzzi con nuove/alte prestazioni
   e. Calcestruzzo drenante
   f. Materiali fotoluminescenti e fotocatalitici
   g. Recupero acqua
   h. Energia rinnovabile
   e. Recupero energetico
   l. Carbonatazione
   m. Modularità
   n. Resilienza
   o. Biodiversità
   p. Aspetti sociali di sostenibilità

Si riportano di seguito alcuni casi studio senza ordine di priorità, rilevanza o completezza rispetto all'estensione degli argomenti oggetto del presente volume. I casi studio possono riguardare varie tecnologie contestualmente e sono suddivisi per argomento.

[244] *Federbeton – Confindustria, Rapporto di sostenibilità 2023 Rapporto_di_Sostenibilità_Federbeton_2023.pdf*

Rapporto di sostenibilità Federbeton 2023

Il rapporto[244], congiuntamente al rapporto di filiera (nota 185), raccoglie i principali indicatori economici, ambientali e sociali rappresentativi del comparto del cemento e del calcestruzzo. Il focus di questa edizione è dedicato ai cementi con materiali da costruzione riciclati della UNI EN 197-6; sono presenti esempi di buone pratiche realizzate dalle aziende della filiera nell'ambito della sostenibilità. Si riportano di seguito alcune risultanze di particolare rilievo presentate nel rapporto.

- Nel triennio 2021-2023, le aziende del settore hanno destinato oltre 254 milioni di euro per sostenere progetti e soluzioni per il miglioramento della sostenibilità e della sicurezza.
- Rispetto al 2022, segnali incoraggianti nell'ambito della strategia di decarbonizzazione: +6% nel recupero di materiali alternativi per la produzione di cemento e una riduzione del 2,6% delle emissioni specifiche di CO2 (per tonnellata di cemento).
- L'utilizzo di combustibili alternativi al posto dei fossili è cresciuto, raggiungendo un tasso di sostituzione del 25,5%.
- Solo nel 2023, grazie alla componente di biomassa contenuta nei combustibili alternativi, è stato possibile evitare 403 mila tonnellate di CO_2.
- Sull'utilizzo di combustibili alternativi, rispetto alla media europea del 57,6%, l'Italia è ancora indietro, a causa di ostacoli culturali e burocratici.
- Il tasso di utilizzo di aggregati riciclati in sostituzione di quelli naturali cresce lentamente, nonostante le grandi potenzialità ambientali principalmente a causa di barriere tecniche legate alla demolizione e un mercato degli aggregati da riciclo ancora poco sviluppato.

[245] https://italy.csc.eco/

[246] https://csc.eco/

[247] *DIHCUBE - Digital Italian Hub for Construction and Built Environment – è polo italiano per l'innovazione nel mondo delle costruzioni, coordinato da ANCE e che vede la collaborazione di Federcostruzioni, ITC – CNR, Ente Nazionale per il Microcredito, Officine Innovazione S.r.l., Politecnico di Milano, SMILE-DIH, STAM S.r.l., STRESS - Distretto Tecnologico Costruzioni Sostenibili, Università degli Studi di Brescia, Università degli Studi di Napoli Federico II, Università Politecnica delle Marche*

[248] *È stato analizzato anche un campione di amministrazioni comunali, da cui è emerso che lo stato di adeguamento ai processi di digitalizzazione variano in maniera sostanziale in funzione della comprensione del valore di tali processi. Particolare importanza nella PA è la mancanza di figure professionali specifiche, per passare da un utilizzo basico ad un uso "professionale" degli strumenti digitali funzionale al raggiungimento di obiettivi strategici dell'Amministrazione.*

Progetti italiani Concrete Sustainability Council

CSC[245] certifica la gestione responsabile della produzione del calcestruzzo. Tra gli scopi della certificazione si segnala particolare quello di migliorare le prestazioni di sostenibilità del settore. La certificazione è applicabile a livello globale con adattamenti a livello nazionale. In Italia sono attive 42 certificazioni CSC, di cui 7 per il cemento e 35 per il calcestruzzo preconfezionato. Le certificazioni sono suddivise per livello: "bronze" (9), "silver" (16) e "gold" (17). Il dettaglio delle denominazioni dei progetti è reperibile in internet[246].

Progetto DIHCUBE

Il progetto DIHCUBE[247] punta ad accrescere i livelli di digitalizzazione del settore attraverso servizi rivolti a tutta la filiera. Il progetto, cofinanziato dalla Commissione Europea, è composto da una squadra di 12 partner in grado di offrire servizi e consulenza a piccole e medie imprese, Pubblica Amministrazione, professionisti e produttori di materiali, con l'obiettivo di trasferire conoscenze e tecnologie innovative in un processo di trasformazione digitale del settore delle costruzioni. Tra le varie attività, si segnala il *Digital Maturity Assessment*, test di maturità digitale, un questionario ideato dalla Commissione Europea per rilevare il livello di digitalizzazione delle imprese e/o dei professionisti che operano in differenti campi di attività in Europa, compreso il settore delle costruzioni. Il questionario di valutazione oltre all'essere propedeutico all'accesso ai servizi offerti dal polo DIHCUBE, svolge al tempo stesso una funzione di monitoraggio rispetto al livello di digitalizzazione raggiunto dalle aziende nel tempo. Le imprese che sono state analizzate attraverso il test di maturità digitale mostrano di aver compreso il potenziale dei dati e delle tecnologie abilitanti per il settore, ma hanno difficoltà nel rinnovare i propri processi per la mancanza di una manovra sistemica nazionale e di prodotti di mercato dedicati, [248, 249].

Decarbonizzazione cementeria di Rezzato-Mazzano

[249] *Audizione ANCE nell'ambito dell'indagine conoscitiva sull'utilizzo delle tecnologie digitali e dell'intelligenza artificiale nella pianificazione, nella costruzione e nel monitoraggio delle infrastrutture stradali, autostradali, ferroviarie, portuali, aeroportuali e logistiche, presso la Commissione Ambiente del Senato, del 29 novembre 2023. Riferimento ai documenti dell'audizione al sito di ANCE: https://ance.it/2023/11/tecnologie-digitali-e-intelligenza-artificiale-nelle-infrastrutture-ance-serve-una-piattaforma-dati-nazionale-per-le-costruzioni/. Riferimento dell'audizione al sito del Senato della Repubblica: https://webtv.senato.it/4621?video_evento=244163 (da minuto 1.03.00).*

[250] *https://ccushub.ogci.com/focus_hubs/ravenna/*

Heidelberg Materials ha avviato lo studio di fattibilità del progetto di decarbonizzazione della cementeria di Rezzato-Mazzano (BS). Il completamento del processo di decarbonizzazione prevede l'utilizzo o lo stoccaggio della CO2 catturata. Nell'ambito delle opportunità di stoccaggio, una novità positiva e di rilievo è rappresentata dell'avvio della fase 1 del progetto "Ravenna CCS", realizzato da Eni e Snam[250].

Esempio applicativo di strade di calcestruzzo

Un esempio italiano che può fornire spunti di riflessione interessanti è il sistema di collegamenti viari rapidi tra l'Umbria e le Marche, noto come Quadrilatero Marche-Umbria. La SS 77 della Val di Chienti che, nell'ambito del Quadrilatero, mette in comunicazione Foligno (Umbria) e Civitanova Marche (Marche), conta circa 40 km di pavimentazione in calcestruzzo. In tutte le gallerie con lunghezza maggiore di 1.000 metri è stata scelta la soluzione *Jointed Plain Concrete Pavement* che prevede l'impiego di lastre in calcestruzzo non armato e di giunti longitudinali e trasversali armati, in modo da limitare le sollecitazioni meccaniche di origine termica e la conseguente formazione di fessure.

Progetti di ricerca nell'ambito dei materiali ad attivazione alcalina/geopolimeri

- SUS-CON (progetto EU) focalizzato sullo sviluppo di calcestruzzi sostenibili a base di leganti ad attivazione alcalina/geopolimeri e plastiche riciclate per prefabbricati;
- METABUILDING (progetto EU) focalizzato sullo sviluppo di un blocco innovativo da costruzione a base di geopolimeri e scarti di origine vegetale;
- MAREWIND (progetto EU) avente, tra le diverse tematiche di ricerca affrontate, un'attività dedicata a calcestruzzi cement-free e realizzazione di prototipi (fondazioni pale eoliche off-shore);
- EXPLOIT4INNOMAT (progetto EU) avente, tra le diverse tematiche di ricerca, un'attività specifica dedicata allo sviluppo di materiali e componenti cement-free e scarti di origine vegetale per isolamento termico di edifici;

[251] https://hcgroupnet.sharepoint.com/sites/unite-me-in-italy/SitePages/Al-via-progetto-di-decarbonizzazione-della-cementeria-di-Rezzato-Mazzano.aspx

• CIRCE (progetto Regione Puglia) focalizzato su materie prime seco

ALTRI CASI STUDIO SUDDIVISI PER ARGOMENTO

Combustibile Solido Secondario

Robilante e il CSS come opportunità – Buzzi Unicem Srl. Lo stabilimento Buzzi Unicem di Robilante è sinergicamente inserito nel piano di gestione del ciclo dei rifiuti della Provincia di Cuneo per l'utilizzo in co-combustione, nei propri forni, di un CSS (Combustibile Solido Secondario) derivato dal trattamento avanzato dei RSU Indifferenziati. Il CSS prima di essere valorizzato energeticamente, viene ridotto in quantità (biostabilizzazione) eliminando carica batterica e umidità (=maggiore potere calorifico), deferrizzato e ripulito da materiale inerte (=recupero materia), declorurato e finemente triturato (=migliore combustione e minori emissioni). Il risultato è un apporto calorico alle reazioni necessarie per la produzione di cemento, attraverso un'alternativa ambientalmente compatibile e quasi a km0, evitando l'utilizzo di combustibili fossili non rinnovabili (carbone, pet-coke), spesso provenienti da Paesi esteri.

Stoccaggio geologico di CO_2

Cemento net-zero – Heidelberg Materials. L'impianto Heidelberg Materials di Brevik, in Norvegia, sarà la prima cementeria a livello mondiale a produrre, nel corso del 2025, un cemento net-zero, grazie alla cattura dell'anidride carbonica attraverso la tecnologia delle ammine e al suo stoccaggio nelle profondità marine al largo della Norvegia[251].

Recupero materiali

Recupero di scarti di produzione di elementi in calcestruzzo e in calcestruzzo e laterizio – Essesolai Srl. Alcuni prodotti prefabbricati in calcestruzzo, come i solai alveolari e i pannelli in calcestruzzo e laterizio, generano, per la natura del processo produttivo, sfridi di produzione. L'aver acquistato un frantoio, consente all'azienda di frantumare gli sfridi di calcestruzzo per ottenere inerti di pezzatura massima di 2 cm e di frantumare gli sfridi di laterizio ottenendo un macinato di due diverse pezzature. Sia il macinato di calcestruzzo, che il macinato di laterizio vengono poi

riutilizzati nella produzione di lastre tralicciate in calcestruzzo e laterizio.
Recupero delle macerie all'interno del processo produttivo del cemento per chiudere il ciclo dei materiali – Holcim Italia Spa. La lavorazione degli scarti da demolizione consente di realizzare un reale processo di economia circolare nel settore delle costruzioni. Gli scarti vengono parzialmente pre-lavorati, per rimuovere eventuali residui quali legno, plastica e metalli, lasciando invece le frazioni in calcestruzzo (inerti, sabbia, pasta di cemento). Questo materiale viene quindi integrato direttamente nella materia prima in ingresso nel processo di produzione del cemento. Per ridurre ulteriormente l'utilizzo di materie prime naturali e le emissioni di CO_2 si stanno testando anche materiali decarbonatati.

Attività di riutilizzo dei materiali di scarto nella produzione di prefabbricati in cemento armato - MG Building Spa. È stato realizzato il progetto di Innovazione Tecnologica per la Transizione Ecologica, finalizzato ad aumentare le quantità di materiali riciclati utilizzati nella produzione dei prefabbricati in cemento armato così da garantire un prodotto più sostenibile con le medesime prestazioni ingegneristiche. Dagli obiettivi progettuali prefissati e dalle attività svolte con il progetto per la Transizione Ecologica sono emerse caratteristiche rilevanti al fine di perseguire l'introduzione di modelli finalizzati alla riconversione produttiva delle attività economiche nell'ambito dell'economia circolare, che sono nuovi per lo stato dell'arte aziendale. Prima dell'avvio delle attività relative al progetto, l'Azienda utilizzava solo inerti e sabbia di prima estrazione. Dal 2022 MG Building ha modificato le proprie miscele di calcestruzzo inserendo un materiale riciclato che proviene dalle scorie di fonderia, riducendo le quantità dei materiali inerti naturali (ghiaia, sabbia ecc.).
Esempio di simbiosi industriale in Val d'Elsa – Unibloc Srl. Fondazione Monte Paschi ha promosso e commissionato uno studio sui comparti produttivi della Val d'Elsa, per incentivare possibili soluzioni per il recupero di rifiuti generati da processi industriali, attivando percorsi di simbiosi industriale. Lo studio è stato realizzato con la collaborazione dei Comuni. L'analisi delle filiere produttive e degli scarti generati ha portato ad individuare il settore delle fonderie e vetrerie

e, come possibile utilizzatore degli scarti, il settore dei manufatti prefabbricati in calcestruzzo. Il progetto di integrazione fra filiere e di formazione degli addetti, senza oneri per le aziende, è realizzato da Fondimpresa, che fornirà consulenza, sia operativa che legale, per trasformare gli scarti in sottoprodotti e renderli materie prime per il produttore di manufatti in calcestruzzo. Gli interventi nelle aziende sono personalizzati, realizzati direttamente in azienda e prevedono, oltre alla consulenza di processo, la redazione della scheda sottoprodotti, l'innovazione digitale e la formazione degli addetti.

Progetto R.A.D.A.R. – Unibloc Srl. Il Progetto RADAR (acronimo di Recupero Aggregati e bitume Da Asfalto Rimosso) è stato finanziato da POR CreO, fondo europeo di sviluppo regionale 2014/2020 della Toscana. Il partenariato è costituito da Unibloc, azienda di manufatti in calcestruzzo, come capofila del progetto, da OMP, produttrice di macchine industriali ed impianti, da Conglomerati Valdelsa, produttrice di conglomerati bituminosi, che gestisce già una piattaforma di smaltimento del fresato e da CPTM, centro di ricerca specializzato in sviluppo di processi chimici industriali. Il progetto mira a realizzare un macchinario che possa separare gli aggregati dal bitume del cosiddetto "fresato" d'asfalto al fine di poterli sia reimpiegare in nuovi asfalti al pari dei materiali vergini, sia di commercializzarli in altri mercati (prodotti per edilizia).

Cementi e calcestruzzi con nuove/alte prestazioni

Cementi e calcestruzzi sostenibili per ridurre le emissioni di CO_2 e il consumo di risorse naturali – Holcim. Per la realizzazione del grattacielo Gioia 22 a Milano, edificio simbolo di sostenibilità, sono stati utilizzati calcestruzzi che coniugano elevate prestazioni e ridotto impatto ambientale. Per questa famiglia di prodotti adatti a tutte le applicazioni, dalle fondazioni alle strutture verticali fino alle coperture, vengono utilizzati cementi pozzolanici a basso contenuto di clinker. Inoltre, l'utilizzo di pozzolana naturale calcinata consente di produrre un cemento altamente performante che, grazie anche alla riduzione del fattore clinker, riduce le emissioni di CO_2. Per chiudere il ciclo dei materiali, il clinker viene prodotto con un

significativo ricorso a materiale inerte riciclato proveniente dalla demolizione del calcestruzzo stesso, in ottica di economia circolare basata sul risparmio di risorse naturali, sul riutilizzo di materia e sulla minimizzazione delle emissioni di CO_2.

Calcestruzzi green per la costruzione del nuovo ospedale del Sud-Est barese Monopoli-Fasano -Heidelberg Materials Calcestruzzi. La crescente richiesta di prodotti sostenibili, di qualità e a km0, dettata anche dal contesto normativo e dai sistemi di rating ambientali per le costruzioni, ha portato a sviluppare una gamma di cementi e calcestruzzi a bassa impronta ambientale e con materie prime seconde provenienti da altri settori industriali e dal settore edile. In questo contesto, nella realizzazione del nuovo ospedale del Sud-Est barese Monopoli-Fasano sono stati utilizzati calcestruzzi strutturali e non strutturali conformi ai Criteri Ambientali Minimi per l'Edilizia con percentuale di riciclato migliorativa (>= 8%) ed utilizzo per la quasi totalità di materie prima di provenienza regionale (distanza dal cantiere < 150km) con Dichiarazione Ambientale di Prodotto - EPD certificata. Sono state riutilizzate materie prime seconde all'interno del calcestruzzo sia derivanti dal cemento, sia derivanti dall'utilizzo di aggregati riciclati. I calcestruzzi impiegati consentono il contenimento delle emissioni di CO_2 rispetto a un prodotto tradizionale, verificato attraverso uno studio del ciclo di vita dei prodotti "cradle to gate". Sono state sostituite circa 4500 tonnellate di aggregati naturali di cava con aggregati riciclati.

Gamma di cementi e calcestruzzi sostenibili per utilizzo strutturale e non strutturale, in grado di soddisfare i requisiti dei CAM e di altri protocolli volontari di edilizia sostenibile (LEED, ITACA, BREEAM) – Heidelberg Materials Calcestruzzi. Questa gamma di prodotti risponde a pieno alle esigenze di sostenibilità del mercato. La sostituzione delle materie prime naturali provenienti dalle attività estrattive in cave e miniere con materiali di recupero e l'utilizzo nel mix design dei calcestruzzi di materiali da costruzione e demolizione – tutti sottoposti a rigidi tracciamenti – consentiranno una importante riduzione nell'utilizzo di risorse naturali. Un recente esempio di applicazione è la realizzazione di un importante progetto di

trasformazione urbana ossia il Waterfront di Genova su progetto di Renzo Piano. In questo contesto sono stati utilizzati calcestruzzi strutturali e non strutturali in conformità al protocollo LEED con percentuale di riciclato ≥ 7% ed utilizzo per la quasi totalità di materie prime di provenienza regionale (distanza dal cantiere < 150 km). Sono state riutilizzate materie prime seconde per la produzione del calcestruzzo derivanti da cementi ad alto contenuto di riciclato, a basso sviluppo di calore (Low heat) e a bassa impronta di carbonio. I calcestruzzi impiegati consentono il contenimento delle emissioni di CO_2 di oltre il 20% rispetto a un prodotto tradizionale, verificato attraverso uno studio del ciclo di vita dei prodotti "cradle to gate".

Il calcestruzzo a basso impatto ambientale per l'innovativa cantina Sequerciani, in Toscana – Unical. Per la realizzazione della suggestiva e innovativa cantina Sequerciani in provincia di Grosseto, è stato impiegato calcestruzzo Unical a ridotto carbon footprint. Sia i calcestruzzi strutturali, sia quelli ornamentali, utilizzati per la galleria della barricaia, sono stati messi a punto con una riduzione superiore al 50% della CO_2 emessa in atmosfera, rispetto a calcestruzzi prodotti con tecnologie tradizionali. Le emissioni di anidride carbonica valutate in funzione della resistenza sono risultate estremamente basse, prossime ai 3 kg CO_2/MPa. La "cantina Sequerciani" ha rappresentato un progetto sfidante per Unical che, grazie al suo know-how tecnico e alla comprovata esperienza, è riuscita a garantire performance in linea con le richieste, aprendo la strada ad un nuovo modo di operare e perseguendo l'intento di affiancare i propri clienti nella migliore selezione delle soluzioni costruttive, con l'approccio innovativo che i nuovi standard ambientali richiedono.

Sostegni sostenibili: calcestruzzo green ed economia circolare per pali in c.a.c. (cemento armato centrifugato) – S.I.P.A. Spa. In sinergia con la strategia di sviluppo sostenibile della committenza, è stato portato a termine un progetto R&S per la realizzazione di pali in c.a.c. per linee elettriche aeree MT-BT, grazie alla partnership con Tesis S.r.l., uno spin-off accademico dell'Università di Salerno. L'obiettivo

è stato di impiegare inerti recuperati dalla demolizione di pali analoghi dismessi, mettendo a punto diverse miscele sperimentali e realizzando calcestruzzo con aggregati riciclati per il 20, 50 e 100% della quantità totale prevista. I prototipi così ottenuti sono stati sottoposti a prove di tipo con risultati che, specialmente con l'uso di aggregati di riciclo al 100%, sono stati più che soddisfacenti rispetto ai requisiti indicati dalle Specifiche Tecniche di prodotto. Il calcolo di LCA (Life Cycle Assessment) comparato tra palo in c.a.c. ordinario e green ha permesso di evidenziare importanti riduzioni dei parametri di impatto ambientale: esito che può prefigurare scenari ancor più efficaci ed efficienti – sia nella gestione del rifiuto di calcestruzzo, che nei livelli di sostenibilità – laddove la committenza rendesse effettiva una filiera logistica di economia circolare chiusa.

Materiali contenuti in sacco degradabile – Holcim Italia Spa. Utilizza pozzolana naturale calcinata in sostituzione di altri componenti per ottenere una riduzione del contenuto di clinker, quindi minori emissioni di CO_2; packaging completamente degradabile. Il sacco del cemento si disgrega all'interno dell'impasto senza alterare la qualità del prodotto; questo perché l'imballo è privo di plastica, caratteristica che va a ridurre ulteriormente l'impatto ambientale del packaging. Ciò si traduce in diversi vantaggi per il cantiere, in particolar modo in relazione al risparmio di accumuli di carta di confezionamento in cantiere (rifiuti) che diversamente andrebbero smaltiti negli appositi centri di raccolta.

Sostenibilità e innovazione per i materiali del nuovo stabilimento di Vetropack – Holcim. Materiali innovativi e sostenibili sono protagonisti nella realizzazione del nuovo stabilimento Vetropack, azienda familiare autonoma con sede centrale in Svizzera e leader europea nella produzione dei contenitori in vetro. Per l'impianto sito a Boffalora sopra (MI) è stato impiegato un calcestruzzo green prodotto con un cemento studiato per garantire elevata durabilità in strutture esposte ad ambienti aggressivi o in situazioni che necessitino di basso sviluppo di calore. In particolare, sono stati forniti circa 11.000 mc di calcestruzzo realizzato con cemento a ridotto contenuto di clinker a base di argilla calcinata, per la realizzazione delle

fondazioni dell'edificio e per muri particolarmente elevati, con caratteristiche di impermeabilità e faccia a vista. Come dichiarato dalla stessa Vetropack, «La costruzione della nuova unità produttiva nasce dalla volontà di Vetropack Italia di innovarsi attraverso una struttura conforme ai propri obiettivi di sostenibilità delineati nella Strategia 2030 del Gruppo, che si inserisce nei piani di sviluppo dell'Unione Europea indirizzati ad aumentare la percentuale di vetro riciclato, materia prima secondaria, usato nella produzione».

Calcestruzzo a basso calore di idratazione impiegando promotori di cristallizzazione – Colabeton. Nella realizzazione di un edificio a torre, nelle immediate vicinanze del centro di Milano, al fine di ridurre il contenuto di cemento per le platee di fondazione con elevati spessori, si è fatto ricorso ai promotori di cristallizzazione. Il peculiare meccanismo d'azione di questi additivi innovativi è quello di promuove la formazione di prodotti di idratazione sulla superficie dei granuli di cemento, attivando la formazione di silicati di calcio idrati che contribuiscono ad un rapido sviluppo delle resistenze meccaniche a breve (24 ore), ma al tempo stesso riesce a migliorare la qualità della microstruttura della pasta cementizia in modo che anche alle medie e lunghe stagionature si evidenzi un sensibile aumento delle resistenze meccaniche a compressione (14 e 28 giorni). In abbinamento al promotore di cristallizzazione è stato impiegato un cemento a basso calore di idratazione con caratteristiche di sostenibilità elevate, in quanto al suo interno sono presenti materiali di pre-consumo come le ceneri volanti.

Calcestruzzo drenante

Calcestruzzo drenante per la riqualificazione nel comune di Cortemaggiore (PC) – Betonrossi. Il calcestruzzo drenante è stato scelto per la riqualificazione del centro storico del Comune di Cortemaggiore (PC) nella zona antistante Palazzo Pallavicino. La matrice aperta del materiale associa al miglior drenaggio, il continuo riciclo d'aria che in inverno accelera il processo di scioglimento di ghiaccio e neve e in estate riduce l'effetto "isola di calore" (effetto "albedo"). L'intero spessore della pavimentazione è stato pigmentato con ossidi metallici di colore giallo, per

la migliore integrazione nel contesto architettonico dei giardini.

Calcestruzzo drenante per il borgo storico di Grazzano Visconti – Betonrossi. Il calcestruzzo drenante è stato utilizzato per la riqualificazione della pavimentazione di Strada della Cà Matta a Grazzano Visconti, il villaggio dall'atmosfera medievale riconosciuto "Città d'arte" dalla Regione Emilia-Romagna nel 1986. Oltre alle spiccate caratteristiche di permeabilità, la pavimentazione così realizzata è in grado di assicurare ottime resistenze ai carichi statici e dinamici. La capacità drenante risulta equivalente a quella di una superficie non pavimentata, consentendo così di ridurre l'accumulo delle acque meteoriche e quindi il volume incanalato verso la rete fognaria. Si ha, inoltre, un miglioramento delle condizioni di percorribilità automobilistica e pedonale. La qualità delle acque, migliore rispetto a quelle dilavate da una pavimentazione tradizionale, ne consente il riutilizzo, qualora raccolte, per scopi irrigui. Ulteriore vantaggio è la riduzione dell'effetto "isola di calore", grazie anche alla colorazione chiara maggiormente riflettente la luce solare.

Calcestruzzo drenante per il parco biblioteca degli alberi di Milano – Heidelberg Materials Calcestruzzi. Una porzione del parco è stata pavimentata utilizzando il calcestruzzo drenante, materiale innovativo in grado di diminuire sensibilmente la temperatura della pavimentazione anche nelle afose giornate estive. Il colore chiaro del calcestruzzo, unito alla capacità di mantenere il naturale flusso dell'acqua nel terreno, contribuisce in maniera importante a ridurre l'effetto "isola di calore" negli ambienti urbani. Un beneficio che va oltre la porzione di terreno pavimentata con questo materiale, ma che si estende anche all'area immediatamente circostante.

Calcestruzzo drenante per dare forma e colore agli spazi urbani – Heidelberg Materials Calcestruzzi. Il "Giardino della Gioia e della Gentilezza", realizzato nella riqualificazione dell'area Ex Fillattice di Muggiò (MB), è un esempio di utilizzo del calcestruzzo per dare forma e colore a uno spazio polifunzionale fruibile, distante dal rigore delle geometrie più quotidiane. Il calcestruzzo drenante ha permesso

di preservare la permeabilità del suolo e di integrarsi perfettamente nell'ambiente naturale. Tutti i percorsi, sia quelli che costeggiano la piazza e il campo da basket, sia quelli che si snodano nel verde sono stati realizzati in calcestruzzo drenante ovvero con un'alta percentuale di vuoti, che consente di restituire l'acqua alla falda e scongiura la formazione di lastre di ghiaccio, particolarmente insidiose sui percorsi pedonali.

Materiali fotoluminescenti e fotocatalitici

Calcestruzzo fotoluminescente per la pista ciclo pedonale di Caravate e la pista ciclabile di Peccioli – Colabeton. Nei comuni di Peccioli (PI) e di Caravate (VA), sono state recentemente realizzate due piste ciclabili che aggiungono alla sostenibilità intrinseca della mobilità lenta, il contributo di un materiale durabile e di una fonte di energia pulita, rinnovabile e sicura per gli esseri umani e per l'ambiente circostante. Grazie alla stretta collaborazione fra l'amministrazione e il fornitore, per la pavimentazione è stato scelto il calcestruzzo fotoluminescente capace di assorbire energia solare e riemetterla come fonte luminosa di notte.

Cemento fotocatalitico per il complesso residenziale di via Ampère a Milano – Heidelberg Materials Cementi. Nel nuovo progetto residenziale di nòvAmpère, nel cuore di Città Studi a Milano, è stato utilizzato il cemento fotocatalitico che, riproducendo il naturale processo di fotocatalisi, è in grado di accelerare i processi di ossidazione, favorendo una più rapida decomposizione degli inquinanti. Il cemento, utilizzato su 2.700 metri quadrati di pareti esterne, è in grado di neutralizzare le emissioni di circa 54 auto a benzina (euro 6) o 40 auto diesel (euro 6) e, da studi scientifici realizzati da Italcementi, il contributo alla qualità dell'aria urbana equivale a piantare circa 243 alberi.

Recupero acqua

Ridurre il consumo d'acqua monitorando il lavaggio delle betoniere – Betonrossi. Negli impianti di produzione di calcestruzzo esistono punti di erogazione d'acqua per il lavaggio del tamburo delle betoniere, ove si trovano valvole manuali

utilizzate a discrezione degli autisti. Al fine di evitare sprechi, si sta provvedendo a sensibilizzare gli addetti e a monitorare i consumi. Un dispositivo in fase di sperimentazione eroga acqua solo dopo aver inserito un codice abilitato e memorizza su un micro-controllore la quantità d'acqua erogata e la targa del mezzo che l'ha utilizzata. Dopo la sperimentazione, se i risultati saranno soddisfacenti, saranno sostituite le valvole manuali in tutti gli impianti.

Nuovo impianto per il riciclo delle acque provenienti dalla lavorazione dei pannelli in calcestruzzo e marmo, prodotti dall'azienda – MC Prefabbricati. I reflui derivanti dalle operazioni di levigatura, spazzolatura e bocciardatura dei pannelli vengono raccolti e convogliati verso l'impianto di chiarificazione delle acque e di disidratazione dei fanghi. L'acqua pulita viene poi utilizzata nel processo di finitura dei pannelli di tamponamento o inviata alle centrali di betonaggio, mentre i fanghi depositati, una volta disidratati, vengono opportunamente smaltiti. Il dimensionamento dell'impianto è stato verificato per garantire il trattamento in ciclo continuo di 1.500 lt/minuto di acqua di processo.

Progetto INFRAROB – Nuova Tesi System. In questo progetto Nuova Tesi System ha sviluppato un elemento prefabbricato per cantieri stradali costituito da un new jersey accoppiato ad un elemento che raccoglie le acque piovane e gli impianti che solitamente vengono posti direttamente in trincea, dentro ad un tubo corrugato. L'obiettivo è ridurre sia la manodopera per la posa, sia la successiva manutenzione. Inoltre, il mix design del calcestruzzo prevede l'impiego di inerti provenienti dagli scarti dell'industria siderurgica in sostituzione del 50% in peso di inerti naturali. La società Brussi Costruzioni svilupperà, con il partner Rina Consulting, un sistema a fibra ottica utile a monitorare, in continuo, il degrado dell'asfalto nel tempo.

Ottimizzazione del processo di recupero delle acque di lavaggio – Truzzi prefabbricati. La soluzione studiata consente di ridurre i passaggi che portano al recupero dell'acqua utilizzata per il lavaggio di mescolatori e mezzi di trasporto

del calcestruzzo e, nel contempo, di diminuire la produzione di rifiuti. Il progetto prevede il riutilizzo della frazione liquida risultante dal Beton Wash direttamente per la produzione di calcestruzzo, senza dover effettuare i passaggi successivi, ovvero la filtrazione tramite filtropressa, per separare la frazione solida fine dall'acqua, operazione che porta alla produzione del rifiuto, ovvero i fanghi composti da sabbia e cemento. I benefici sono l'annullamento dei consumi di energia elettrica per la filtrazione dell'acqua e l'eliminazione della produzione dei rifiuti derivanti dal processo di filtrazione, dal momento che la frazione solida fine viene reimmessa nel ciclo di produzione del calcestruzzo insieme all'acqua.

Progetto per il recupero delle acque di lavaggio in impianto – Unical. Il trattamento delle acque di lavaggio dei mezzi negli impianti di calcestruzzo è sempre stata un'attività delicata e dispendiosa, soprattutto in impianti con spazi limitati. In Unical è stato avviato un progetto che prevede l'introduzione di una filtropressa mobile che possa così garantire il trattamento di acque di lavaggio su più impianti. L'utilizzo della filtropressa è uno dei migliori metodi di trattamento di queste acque in quanto consente di separare l'acqua dallo scarto industriale asciutto, riutilizzando la prima nel processo produttivo e rendendo il secondo meno ingombrante e trasportabile da subito. I vantaggi quindi, anche in impianti a bassa e media intensità produttiva che non giustificherebbero la dotazione di una filtropressa stanziale, sono molteplici e vanno dalla stabilità prestazionale dei calcestruzzi prodotti fino alla maggiore quantità di acque di lavaggio recuperate e alla più semplice ed efficiente gestione degli scarti.

Energia rinnovabile

Energia rinnovabile per ridurre la CO_2 e affrontare i nuovi scenari energetici. Buzzi Unicem, nell'ambito della Roadmap di gruppo per la decarbonizzazione delle proprie produzioni, con l'obiettivo net zero al 2050, ha varato un ambizioso piano di investimenti connesso alle principali leve per la riduzione delle emissioni di anidride carbonica. In particolare, per contenere le emissioni indirette di CO2 relative ai consumi energetici delle proprie produzioni, sono in corso di autorizzazione e

realizzazione impianti fotovoltaici presso molteplici siti produttivi italiani e all'interno di cave di proprietà già recuperate o in corso di ripristino. L'ambizioso piano di investimento, da almeno 100Meur, prevede di installare oltre 100MW di potenza nei prossimi anni per soddisfare oltre il 30% dei consumi energetici italiani.

Produzione di energia rinnovabile con impianti fotovoltaici – Xella. L'impianto fotovoltaico, di circa 5.000 mc, installato sulla copertura dello stabilimento produttivo di Atella (PZ), produce il 60 - 65% dell'energia utilizzata nell'impianto produttivo. Unitamente a misure di efficientamento degli impianti di produzione e all'utilizzo di LED per l'illuminazione, l'utilizzo dell'energia generata dall'impianto fotovoltaico ha consentito una riduzione della CO_2 stimata in 865.760 kg/anno.

Progetto SolarLAB – Baraclit. Nato nel 2009 come progetto pilota, SolarLAB non è un comune impianto fotovoltaico, bensì è il laboratorio solare di studio e ricerca di nuove tecnologie fotovoltaiche nell'architettura industriale della divisione BEST Baraclit. Il primo impianto è stato realizzato sui tetti della propria sede di Bibbiena (Arezzo) e consta di 1500 moduli fotovoltaici distribuiti su 5.800 m^2 per una potenza complessiva di 272 kWp, energia elettrica equivalente necessaria a soddisfare oltre 100 utenze domestiche. SolarLAB 2 raggiunge una potenza pari a 2.458 kWp con oltre 11.000 pannelli fotovoltaici e una superficie captante netta di 17.000 m^2. Il sistema sviluppa un output di produzione energetica annuale di 2.900.000 kWh. Per SolarLAB3 è stata scelta una soluzione retrofit che integra i moduli fotovoltaici su un edificio non più recente. SolarLAB4, realizzata nel giugno 2012, ha previsto un potenziamento dell'impianto di circa 1 MW facendo ricorso all'innovativa soluzione fotovoltaica BEST in facciata verticale, con 420 pannelli a film sottile con tecnologia CIS per una potenza di 58 kW, primo sistema documentato al mondo per facciate con moduli CIS di Solar Frontier con un orientamento pari a 90°. Nel SolarLAB 5 ci si è cimentati per la prima volta con la tecnologia dei laminati in silicio amorfo tripla-giunzione. L'impianto ha una potenza di 35 kW ed è totalmente integrato nella copertura. Nel complesso tutto il SolarLAB è coperto da 4.157 kWp di potenza installata con una produzione media annua di 5.000.000 di kWh.

[253] *V.M. Maestre, A. Ortiz, I. Ortiz, Sustainable and self-sufficient social home through a combined PV-hydrogen pilot, Applied Energy, Volume 363, 2024, 123061, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123061*

Di tale autoproduzione, Baraclit impiega circa il 60% di energia elettrica per la produzione dei propri manufatti prefabbricati in calcestruzzo armato.
Uso di idrogeno per accumulare surplus di energia rinnovabile in edifici con impianti fotovoltaici[253].

Recupero energetico

Produzione di energia elettrica sfruttando il calore residuo dei gas dell'impianto di cottura del clinker – Cementirossi. La produzione di clinker sviluppa gas caldi che lasciano l'impianto di cottura fra i 300 ed i 400°C e che vengono in parte riutilizzati. La quota eccedente viene raffreddata con un dispendio energetico che può essere notevolmente ridotto sfruttano il calore eccedente per produrre energia elettrica. L'impianto sfrutta tale calore attraverso un ciclo Rankine organico (ORC) ottenendo così la riduzione di energia elettrica acquistata dalla rete e delle relative emissioni di CO_2, dei prelievi di acqua dalla falda, dei consumi di gas naturale per il riscaldamento dell'olio diatermico, con conseguente ulteriore riduzione della emissione di CO_2.

Progetto per impianto WHRS (Waste Heat Recovery System) – Colacem. Nel corso del 2022 è stato firmato un accordo bilaterale con le società EnelX e Cogenio, per la realizzazione di un sistema WHRS (Waste Heat Recovery System), con il quale si potrà recuperare il calore in esubero della linea di cottura, che altrimenti andrebbe perso, per la produzione di energia elettrica per autoconsumo, senza emettere CO2 in atmosfera. Questa soluzione consente anche di ridurre i costi energetici dello stabilimento. Il sistema prevede di utilizzare tale calore conferendolo a un innovativo sistema a turbina di tipo ORC (Organic Rankine Cycle) con il quale si potranno produrre da 2 a 3 MW elettrici. A regime si arriverà a produrre energia elettrica per circa 14 GWh l'anno, evitando l'immissione in atmosfera di 5.700 tonnellate di CO2. Nel 2023 si è avviato l'iter autorizzativo per l'ottenimento dei permessi necessari alla realizzazione dell'impianto.

Uso razionale del vapore per la maturazione artificiale dei manufatti – Truzzi. Nei

periodi più freddi dell'anno, gli stabilimenti di prefabbricazione che operano su cicli quotidiani hanno necessità di forzare l'inizio e il successivo evolversi della reazione di presa del calcestruzzo. La temperatura necessaria viene raggiunta riscaldando le casseforme attraverso generatori di vapore. Applicando ai generatori delle speciali valvole è possibile regolare e modulare in continuo i flussi di vapore, riducendoli. Nel periodo invernale, un ulteriore step di riduzione dei consumi è stato fatto progettando e realizzando una nuova tipologia di calcestruzzo in grado di sviluppare alte resistenze in brevi stagionature con un minimo di apporto termico dall'esterno. Il miglioramento energetico dell'impianto di riscaldamento delle casseforme insieme alla messa in opera di un calcestruzzo più performante ha permesso di ridurre il volume di gas metano utilizzato, a parità di produzione, fino all'80% rispetto all'anno precedente.

Carbonatazione

Progetto Carbone Cure – Colabeton. Intrappolare la CO_2 è una delle soluzioni a cui il mondo sta pensando per la decarbonizzazione. Colabeton ha installato presso l'impianto di Cernusco sul Naviglio il sistema Carbon Cure, frutto della collaborazione con la canadese CarbonCure Technologies Inc. che lo ha ideato. Grazie a una particolare tecnologia sarà possibile introdurre CO_2 riciclata nel calcestruzzo fresco, riducendo così le emissioni di CO_2 senza alcun impatto sulle prestazioni. Una volta iniettata, infatti, la CO_2 subisce un processo di mineralizzazione e viene permanentemente incorporata, con un duplice vantaggio: migliorare la resistenza alla compressione e al contempo ridurre l'impronta carbonica del prodotto. In media, i produttori che hanno adottato il sistema Carbon Cure nel proprio mix design hanno ridotto il contenuto di cemento del 4-6% e le emissioni di CO2 di 15-21 kg al metro cubo, senza compromettere la qualità e le prestazioni del calcestruzzo.

Modularità

Tecnologia avanzata per una galleria a "spinta" sulla A5 Torino-Aosta – Coop Viridia. Per quanto riguarda il sottopasso autostradale, l'impresa Coop Viridia ha

[254] https://www.heidelbergmaterials.it/it/galleria-a-spinta-torino-aosta-in-calcestruzzo

proposto la tecnica dello spingi-manufatto, ovvero la struttura costituente il sottopasso è stata realizzata tutta in opera in posizione esterna alla sede autostradale e, mediante martinetti idraulici, spinta lungo una soletta provvisoria di varo nella posizione di progetto. Il tutto senza inibire il traffico autostradale durante le fasi di spinta, apportando solo modeste limitazioni alla viabilità secondaria. Questa soluzione ha comportato, inoltre, una sensibile riduzione dei tempi dell'appalto. Complessivamente, l'opera ha uno sviluppo di 51,00 m. Il monolite realizzato in calcestruzzo è costituito dalle seguenti parti:

- solettone dello spessore di 80 cm su due campate;
- due pareti laterali contro-terra dello spessore di 80 cm;
- un setto centrale finestrato dello spessore di 40 cm;
- una platea di fondazione dello spessore di 90 cm su due campate;
- muri andatori "a mensola", prosecuzione all'esterno dei ritti, dello spessore di 80 cm;
- muri andatori "a mensola", prosecuzione all'esterno del setto centrale, dello spessore di 40 cm.

Tutti i calcestruzzi sono stati forniti da Calcestruzzi che ha messo a punto le miscele grazie alle proprie risorse tecnologiche. I due aspetti più sfidanti dal punto di vista tecnologico sono stati la costanza della reologia del calcestruzzo e l'omogeneità dei prodotti con aria aggiunta per soddisfare la classe di esposizione XF4[254].

Resilienza

MOSE, MOdulo Sperimentale Elettromeccanico, sistema di dighe mobili collocate su quattro filari alle bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia tra il mar Adriatico e la Laguna veneta. Passaggi che, quando la marea si alza oltre il limite stabilito, vengono chiusi attivando le 78 paratoie mobili delle barriere a scomparsa, mantenendo quindi all'asciutto calli, campi e campielli della Serenissima[255].
La società Calcestruzzi è intervenuta nei lavori con la fornitura di calcestruzzi per applicazioni specifiche appositamente sviluppati per l'uso in ambienti marini o esposti a condizioni ambientali soggette all'azione corrosiva del mare o dell'aria.

[255] https://blog.heidelbergmaterials.it/it/unopera-unica-al-mondo-per-una-citta-unica-al-mondo-il-mose-di-venezia

[256] https://www.heidelbergmaterials.it/it/calcestruzzi-marini-mose-venezia

Pur immerso nell'acqua di mare il prodotto è in grado di resistere a diverse azioni corrosive quali quelle esercitate dai cloruri e dai solfati, dall'azione meccanica esercitata dalle onde e dalla conseguente azione del bagnasciuga. Nella sua formulazione specifica per il Mose, è in grado di garantire una vita di esercizio dell'opera di oltre 100 anni[256].

Biodiversità

L'impegno per la biodiversità - Heidelberg Materials Cementi. Lo sviluppo sostenibile di Heidelberg Materials Cementi Spa si concretizza anche nel costante impegno per raggiungere un corretto equilibrio tra l'utilizzo delle risorse naturali e una crescita economica a lungo termine, garantendo – al tempo stesso – una qualità di vita migliore per le generazioni presenti e future. Il recupero delle aree estrattive e la conservazione della biodiversità si inseriscono nelle azioni adottate per raggiungere questo ambizioso obiettivo. L'attività estrattiva è sempre accompagnata dallo studio delle tecniche di ripristino e recupero paesaggistico. Le aree recuperate possono essere destinate ad attività agricole, alla riedificazione di ecosistemi attraverso il rinverdimento e il rimboschimento, alla creazione di aree faunistiche, ricreative, parchi naturali o giardini, all'insediamento di nuove aree di sviluppo industriale o commerciale. Nell'ambito di questo importante impegno Italcementi ha organizzato in Italia due edizioni (2018-2021) del Quarry Life Award, il concorso internazionale ideato dalla capo gruppo Heidelberg Materials per la tutela, valorizzazione e ripristino della biodiversità nei siti estrattivi. Ogni Paese del Gruppo è chiamato a partecipare con idee e progetti riguardanti alcuni siti estrattivi locali, realizzati con il coinvolgimento attivo delle comunità locali e scientifiche. L'obiettivo è di sensibilizzare ulteriormente sul tema del rispetto ambientale e coinvolgere attivamente i proprio stakeholder di riferimento.

Piantiamo gli alberi, sosteniamo il pianeta – Colacem. In occasione delle Festività 2019 a ogni dipendente è stato dato in dono un albero da piantare, per compiere insieme un piccolo gesto per il futuro del pianeta, arricchendo i territori con tante specie di piante autoctone, ma anche sensibilizzando i propri stakeholder a

praticare e diffondere uno stile di vita sostenibile. Gli alberi producono ossigeno, catturano CO_2 migliorando la qualità dell'aria, proteggono l'ambiente dal dissesto idrogeologico, favoriscono la salvaguardia delle biodiversità animali e vegetali, contribuiscono al fabbisogno alimentare, rendono più gradevole il paesaggio agevolando anche il benessere psico-fisico dell'uomo.

Aspetti sociali di sostenibilità

Borse di studio agli studenti meritevoli – Heidelberg Materials Cementi. La Consulta delle Associazioni è la "holding" di una trentina di associazioni sportive, culturali e sociali che operano sul territolo di Calusco d'Adda (BG) dove Italcementi è presente dal 1907 con un importante impianto produttivo. Tra le iniziative promosse dalla Consulta c'è la consegna di Borse di Studio per il merito scolastico. Il 25 settembre 2021 si è tenuta nella piazza centrale del Paese la cerimonia di consegna di 35 borse di studio ai ragazzi che hanno conseguito il diploma della scuola secondaria di primo grado e di ulteriori 10 borse di studio da parte del Comune ad altrettanti diplomati particolarmente meritevoli. Questo si è reso possibile anche grazie al contributo offerto dalla cementeria Italcementi, che permette alla Consulta di promuovere e sostenere diversi progetti in ambito sociale, giovanile, sportivo e culturale. Il gesto ha assunto un significato particolare in un periodo caratterizzato dalla pandemia e dalla didattica a distanza nelle scuole e che ha richiesto importanti sacrifici e cambi di abitudini proprio ai ragazzi.

Supporto delle comunità locali – Holcim. Nell'ambito della Corporate Social Responsibility, l'Azienda ha focalizzato le sue attività prevalentemente sull'erogazione di contributi orientati all'acquisto di strutture a sostegno delle comunità in cui opera, con particolare attenzione alle iniziative implementate nell'ambito della salute e sicurezza. L'acquisto di defibrillatori a beneficio della cittadinanza di Ternate e di un veicolo attrezzato per il trasporto disabili per la Comunità di Erba e Comuni limitrofi, sono un esempio dell'impegno dell'azienda in tal senso.
Progettazione culturale e relazione arte-industria a beneficio dell'innovazione – Buzzi Unicem. Dalla collaborazione di Buzzi Unicem con l'artista Alfredo Pirri,

nasce una iniziativa che mette in relazione arte e cultura industriale per attivare spazi di riflessione e sviluppare nuove sensibilità, fornendo spunti di miglioramento operativo e occasioni di innovazione. Il progetto, che ha origine al Castello Maniace di Siracusa durante l'esposizione "Passi", coinvolge i collaboratori dello stabilimento Buzzi Unicem di Augusta, che dopo aver ospitato una lectio magistralis dedicata alla reinvenzione della realtà attraverso l'arte contemporanea, si sposta all'interno della suggestiva Sala Ipostila del Maniace per prendere parte ad una performance sotto la guida dell'artista Alfredo Pirri, interagendo con le superfici, gli spazi, la memoria del luogo. I suoni e le immagini trovano così una corrispondenza imprevista con quelle dello stabilimento di Augusta, dando vita a un'opera nell'opera, Vice Versa, un'installazione audio-video, presentata in occasione dell'avvio del progetto di recupero funzionale del Paraboloide di Casale Monferrato, dove i due teatri – castello e stabilimento – raccontano della trasformazione delle cose, diventando drammaturgia dei processi, degli oggetti, delle relazioni umane e fornendo una prospettiva nuova, inaspettata, in continuo «passaggio dal sapere, al comprendere, al sentire e viceversa dal sentire, al comprendere, al sapere» (A.Gramsci).

Percorsi di inserimento socio-lavorativo – Buzzi Unicem. La valorizzazione della diversità e l'inclusione ricoprono un ruolo progressivamente più importante nella crescita culturale e dialogica delle aziende e sono elementi fondamentali nella costruzione di società evolute e accoglienti. Ne sono un esempio i progetti di tirocinio o reinserimento lavorativo finalizzati alla riabilitazione e all'inclusione sociale a favore di beneficiari in condizioni di svantaggio e di giovani migranti non accompagnati, sostenuti dall'Azienda in collaborazione con Organizzazioni Umanitarie e Aziende Sanitarie Locali.
Progetto "100 Mattoni" di Pizzaut – Betonrossi. Betonrossi ha contribuito alla realizzazione di un innovativo modello di inclusione sociale che permette a molti ragazzi autistici di guadagnare dignità e autonomia attraverso il lavoro. In occasione della Giornata mondiale per la consapevolezza sull'autismo è stata inaugurata la nuova pizzeria con sede a Monza, dove è intervenuto all'inaugurazione il Presidente Mattarella e le altre aziende che hanno contribuito.

Sostegno alle associazioni locali – Alpacem. L'azienda sostiene stabilmente due associazioni comunali sportive infantili, l'associazione alpini e alcuni eventi sportivi locali. La collaborazione è una dimostrazione di gratitudine nei confronti della comunità che accoglie le nostre aziende ma anche un modo per rendere orgogliose le maestranze, generalmente residenti nei pressi degli stabilimenti e quindi interessate al benessere delle associazioni locali che promuovono iniziative sportive e culturali per i giovani e i meno giovani.

Ridurre i rischi migliorando le caratteristiche di sicurezza dei mezzi – Unical. È stato messo a punto un programma di sicurezza dedicato, che ha previsto l'installazione di videocamere, laterali e posteriori, sulle autobetoniere e autobetonpompe, per garantire una visibilità a 360 gradi e sensori che allertano il conducente della presenza o dell'avvicinamento di altri mezzi o persone.

Una foresta di Paulownia – Truzzi S.p.A. L'azienda ha creato una foresta composta da 100 alberi di Paulownia, situata nella provincia di Verona, come simbolo del proprio impegno e della responsabilità sociale verso l'ambiente.

Stop Work Policy – Sicep. Con l'implementazione del proprio sistema di gestione sicurezza ai sensi dello standard ISO 45001, l'azienda ha deciso di implementare una specifica politica in materia di sicurezza sul lavoro denominata "Stop Work Autorithy" che attribuisce a ciascun lavoratore il potere di interrompere le attività lavorative quando, a suo giudizio, siano svolte in maniera non sicura. La Direzione della SICEP S.p.A. invita tutto il suo personale di ogni ordine, grado e anzianità a voler mettere la cultura della salute e della sicurezza al primo posto; essa attribuisce a ciascun lavoratore il diritto ed il dovere di intervenire e interrompere qualsiasi attività che ritenga possa mettere a rischio la salute e la sicurezza propria e quella dei colleghi. Lo scopo fondamentale di questa politica è quello di prevenire il verificarsi di ogni tipologia di incidente (infortuni, malattie professionali, danni a beni materiali o all'ambiente). La politica dello Stop Work Authority si identifica come un processo strutturato e suddiviso in fasi operative consecutive.

GLOSSARIO

Clinker
fused materials from the kiln in cement manufacturing that are interground with calcium sulfate to make cement.
ISO 10426-2:2003(en), 3.1.14

Cemento
materiale inorganico finemente macinato che, a seguito della miscelazione con acqua, forma una pasta che fa presa ed indurisce mediante reazione i processi di idratazione e che, dopo indurimento, mantiene la sua resistenza e stabilità anche sott'acqua.
UNI EN 206:2021 (3.1.2.8)

Calcestruzzo
materiale formato mescolando cemento, aggregato grosso e fine ed acqua, con o senza l'introduzione di additivi, aggiunte o fibre, che sviluppa le sue proprietà mediante idratazione.
UNI EN 206:2021 (3.1.1.1)

Legante
binder
cement or combinations of cement and additions of type II
ISO 19596:2017(en), 3.1.9

Geopolimeri
geopolymer
inorganic polymeric ceramics formed from both aluminium and silicon sources
ISO 20507:2022(en), 3.1.38

[257] *(PDF) Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: Alkali activated cements or geopolymers (researchgate.net)*

NOTA: Il termine "materiali ad attivazione alcalina" comprende tutti i leganti che realizzano la loro funzione mediante reazione tra una polvere silicatica (precursore solido), che può essere ricca in calcio (es. loppa d'altoforno) o povera in calcio e ricca in silice (es. cenere volante), e un attivatore alcalino (solido solubile) che fornisce ioni metallici accelerando il processo di dissoluzione del precursore solido. La reazione è solitamente mediata dallo ione ossidrile. Possono ricadere in questa categoria anche alcuni cementi che contengono un materiale precursore come costituente (es. loppa granulata d'altoforno) essendo la funzione di attivatore svolta dai prodotti di idratazione del clinker o da altri composti alcalini eventualmente presenti in piccola quantità. In termine "geopolimeri" si riferisce ad un gruppo più ristretto di materiali ad attivazione alcalina come, ad esempio, quelli ottenuti da precursori quali cenere volante a basso contenuto di calcio ed argille calcinate (es. metacaolino)[257].

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1 https://www.federbeton.it/Portals/0/pubdoc/pubblicazioni/Rapporti/La_strategia_di_decarbonizzazione_del_settore_del_cemento_relazione.pdf?ver=2021-10-18-100142-197#:~:text=La%20strategia%20di%20decarbonizzazione%20del%20settore%20prevede%20un%20ambizioso%20percorso,quanto%20previsto%20dal%20Green%20Deal

2 https://blog.federbeton.it/costruire-un-futuro-sostenibile-il-contributo-della-filiera-del-cemento-alla-decarbonizzazione-e-alla-ripartenza-del-paese/

3 https://www.ingenio-web.it/articoli/federbeton-160-mln-in-tecnologie-per-sostenibilita-e-sicurezza-nel-triennio-2019-21/

4 Rapporto di Sostenibilità Federbeton 2022, https://www.federbeton.it/Portals/0/PubDoc/Pubblicazioni/Rapporti/Rapporto_di_Sostenibilit%C3%A0_Federbeton_2022.pdf?ver=vYljb-NFw4rwRo1j-D72z5Q%3d%3d

5 https://www.italiacircolare.it/it-it/i-rifiuti-non-riciclabili-come-risorsa-energetica.aspx

6 https://www.ingenio-web.it/articoli/crisi-energetica-e-settore-del-cemento-i-css-una-soluzione-per-abbattere-i-costi-per-l-energia/

7 REGOLAMENTO (UE) 2024/3110 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 27 novembre 2024 che fissa norme armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e abroga il regolamento (UE) n. 305/2011].

8 2024/1781 REGOLAMENTO (UE) 2024/1781 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 13 giugno 2024 che stabilisce il quadro per la definizione dei requisiti di progettazione ecocompatibile per prodotti sostenibili, modifica la direttiva (UE) 2020/1828 e il regolamento (UE) 2023/1542 e abroga la direttiva 2009/125/CE

9 UNI EN 15167-1:2006 Loppa d'altoforno granulata macinata per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità

10 UNI EN 13263-1:2009 Fumi di silice per calcestruzzo - Parte 1: Definizioni, requisiti e criteri di conformità

11 Gazzetta Ufficiale n. 88 del 16-04-1998 SUPPLEMENTO ORDINARIO N. 72 Ministero dell'ambiente DECRETO MINISTERIALE 5 febbraio 1998. Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22.

12 UNI 8520-1:2022 Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione e criteri di conformità

13 UNI EN ISO 21640:2021 Combustibili solidi secondari - Classificazione e specifiche

14 UNI CEN/TR 15508:2008 Proprietà chiave dei combustibili solidi secondari da utilizzare per definire un sistema di classificazione

15 UNI/TR 11581:2015 Combustibili solidi secondari - Linee guida applicative delle norme UNI EN 15359 e UNI EN 15358

16 UNI/TS 11553:2014 Combustibili solidi secondari - Specifiche dei CSS ottenuti dal trattamento meccanico dei rifiuti non pericolosi

17 UNI/TS 11597:2015 Caratterizzazione dei rifiuti e dei CSS in termini di contenuto di biomassa ed energetico

18 La strategia di decarbonizzazione del settore del cemento, Federbeton, giugno 2020. https://www.federbeton.it/Portals/0/pubdoc/pubblicazioni/Rapporti/La_strategia_di_decarbonizzazione_del_settore_del_cemento_relazione.pdf?ver=2021-10-18-100142-197

19 UNI EN 450-1:2012 Ceneri volanti per calcestruzzo - Parte 1: Definizione, specificazioni e criteri di conformità

20 European Commission - JRC REFERENCE REPORTS: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), Frauke Schorcht, Ioanna Kourti, Bianca Maria Scalet, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho 2013. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf, https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/production-cement-lime-and-magnesium-oxide

21 La recente UNI EN ISO 4349:2024 consente di determinare la proporzione di recupero materiali nel caso di recupero energetico di combustibili solidi di recupero, ad esempio in un forno di cementeria. UNI EN ISO 4349:2024, Combustibili solidi secondari- Determinazione dell'indice di recupero in processi di co-combustione. Data disponibilità: 01 agosto 2024

22 https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-01-10-2021

23 Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance) Directive - 2008/98 - EN - Waste framework directive - EUR-Lex (europa.eu)

24 Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novemnre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive. Official publication: Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana; Number: 288; Publication date: 10/12/2010

25 UNI EN 197-1:2011 Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni

26 UNI EN 197-6:2023 Cemento - Parte 6: Cemento con materiali da costruzione riciclati

27 UNI EN 197-5:2021 Cemento - Parte 5: cemento Portland composito CEM II/C-M e cemento composito CEM VI

32 Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, Decreto 28 giugno 2024, n. 127

33 Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC Text with EEA relevance: Regulation - 305/2011 - EN - EUR-Lex

34 DECRETO 28 giugno 2024, n. 127 Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione, altri rifiuti inerti di origine minerale, ai sensi dell'articolo 184-ter, comma 2, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152/2006. (24G00144) (GU Serie Generale n.213 del 11-09-2024).

35 UNI 9156:2015 Cementi resistenti ai solfati - Classificazione e composizione

36 Antonija Ocelić, Ana Baričević, Marina Frančić Smrkić, Synergistic integration of waste fibres and supplementary cementitious materials to enhance sustainability of ultra-high-performance concrete (UHPC), Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02772, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02772.

37 Bo Qiao, Khalil Ullah, Zhongxian Wu, Chaogang Yang, Meixia Zhang, Dongping Tao, Mechanism and property optimization of stainless steel slag for preparation of cementitious materials, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134645, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134645.

38 Jihui Zhao, Jie Liu, Yi Wu, Zirui Cheng, Yuqi Mi, Jiaxiao Zheng, Yuke Zhu, Weiru Zhu, Haoran Zhu, Jinwei Yi,Application of an industrialized ultrafine composite powder in cement-based materials: Hydration characteristics, microstructure, and corrosion resistance, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134629, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134629.
39 Mengjun Hou, Zhongrui Li, Victor C. Li,Green and durable engineered cementitious composites (GD-ECC) with recycled PE fiber, desert sand, and carbonation curing: Mixture design, durability performance, and life-cycle analysis, Construction and Building Materials, Volume 414, 2024, 134984, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134984.

40 avad Sabzi, M. Reza Esfahani, Togay Ozbakkaloglu, Aliakbar Gholampour, Amir R. Masoodi, Rehabilitation of reinforced concrete beam: Sustainable restoration mortar with waste materials, Case Studies in Construction Materials,Volume 20, 2024, e02827, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02827.

41 Rohit Kumar Sharma, Dharamveer Singh, Satyanarayana Murty Dasaka, Investigating supple-

mentary cementitious materials' effects on stabilized aggregate performance, behaviour, and design aspects, Construction and Building Materials,Volume 411, 2024, 134564, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134564.

42 Hongrui Ma, Luxin Ji, Sheng Wang, Xiaoyu Huang, Yinong Shen, Mingfang Ba, Optimum design of eco-friendly high-strength cementitious matrix incorporating pottery sand derived from sintered heavy metal sludge, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134440, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134440.

43 Zhonghu Wu, Zheng Feng, Shaoyun Pu, Chi Zeng, Yong Zhao, Chao Chen, Huailei Song, Xiaohui Feng, Mechanical properties and environmental characteristics of the synergistic preparation of cementitious materials using electrolytic manganese residue, steel slag, and blast furnace slag, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134480, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134480

44 Liuyi Chen, Muwang Wei, Nengzhong Lei, Huawei Li, Effect of chemical–thermal activation on the properties of recycled fine powder cementitious materials, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02956,ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02956.

45 Boyu Chen, Guang Ye, The role of water-treated municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash in microstructure formation and strength development of blended cement pastes, Cement and Concrete Research, Volume 178, 2024, 107440,ISSN 0008-8846, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107440.

46 H.G. Tural, B. Ozarisoy, S. Derogar, C. Ince, Investigating the governing factors influencing the pozzolanic activity through a database approach for the development of sustainable cementitious materials, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134253, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134253.

47 Daniela Oliveira de Lima, Douglas Sadalla de Lira, Moisés Frías Rojas, Holmer Savastano Junior, Assessment of the potential use of construction and demolition waste (CDW) fines as eco-pozzolan in binary and ternary cements, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134320, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134320.

48 Anuj Parashar, Shashank Bishnoi, Influence of the availability of calcium hydroxide, sulphates, and alkalis on hydration of supplementary cementitious materials, Cement and Concrete Research, Volume 175, 2024, 107388, ISSN 0008-8846, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107388.

49 Geuntae Hong, Jiyoung Kim, Chiwon Song, Jung Heum Yeon, Seongcheol Choi, Effect of internal curing by superabsorbent polymers on the densification and microstructural development of cementitious materials exposed to different environmental conditions, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134778, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134778.

50 Yu Xiao, Yunzhi Tan, Changlin Zhou, Wenjing Sun, De'an Sun, Hang Yuan, Dongliang Xing, Utilisation of silica-rich waste in eco phosphogypsum-based cementitious materials: Strength, microstructure, thermodynamics and CO2 sequestration, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134469, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134469.

51 G.G.O. Rodrigues, A.B. Rohden, V.R. Wiggers, M.R. Garcez, Reactivity of flash-calcined illitic clays, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134578, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134578.

52 Yuhan Yao, Yali Wang, Penghao Xin, Hui Wang, Jikun Ma, Suping Cui, Effects of the heterogeneous hydration of alkaline-earth aluminosilicate glasses on phase evolution in hardened blended cement paste, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134020, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134020.

53 Sikandar Ali Khokhar, Touqeer Ahmed, Rao Arsalan Khushnood, Muhammad Umer Basit, Shahnawaz, Sofia Javed,Development of low carbon engineered cementitious composite (ECC) using nano lime calcined clay cement (nLC3) based matrix, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02669, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02669.

54 Huang Li, Nima Farzadnia, Yifan Zhao, Xiang Hu, Caijun Shi,Effects of SCMs on chloride binding capacity of ultra-low water-to-binder ratio cement paste with internally introduced chloride, Construction and Building Materials, Volume 413, 2024, 134725, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134725.

55 Honglei Zhang, Mingli Cao, Zhandong Xing, Early-age properties of cement paste with mechanically ground Yellow River sediment, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134635, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134635.

56 Mohammad Almokdad, Rachid Zentar, Flash-calcined sediments versus raw sediments: A comparative life cycle assessment of SCMs, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134550, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134550.

57 Victor Poussardin, William Wilson, Michael Paris, Arezki Tagnit-Hamou, Dimitri Deneele, Calcined clays as supplementary cementitious materials: A comparison between palygorskite and kaolinite, Construction and Building Materials, Volume 416, 2024, 135180, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135180.

58 Xiaowei Gu, Hongyu Wang, Jianping Liu, Zhenguo Zhu, Shenyu Wang, Xiaochuan Xu, Synergistic effects of steel slag and metakaolin in cementitious systems: Packing properties, strength, and microstructure, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024,134395, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134395.

59 Wenhuan Liu, Yongfeng Wan, Fan Lei, Xinyi Liu, Siying Wang, Zhongzhong Zhao, Hui Li, Hongqi Wang, Innovation and performance of lead smelting slag-based multi-solid waste pavement concrete materials: Ratio design, mechanical properties, hydration products, heavy metal leaching, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134824, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134824.

60 Tiao Wang, Satya Medepalli, Yuqian Zheng, Wei Zhang, Tetsuya Ishida, Shashank Bishnoi, Dongshuai Hou, Zhenguo Shi, Retardation effect of the pozzolanic reaction of low-calcium supplementary

cementitious materials on clinker hydration at later age: Effects of pore solution, foreign ions, and pH, Cement and Concrete Research, Volume 177, 2024, 107416, ISSN 0008-8846, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107416.

61 Haoran Zhu, Jihui Zhao, Zhangheng Li, Investigations on the hydration characteristics of blended ferroaluminate cement containing granulated blast furnace slag, Construction and Building Materials, Volume 417, 2024, 135243, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135243.

62 Maciej Zajac, Jiayi Song, Patrick Ullrich, Jan Skocek, Mohsen Ben Haha, Jørgen Skibsted, High early pozzolanic reactivity of alumina-silica gel: A study of the hydration of composite cements with carbonated recycled concrete paste, Cement and Concrete Research, Volume 175, 2024, 107345, ISSN 0008-8846, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107345.

63 Wesam Salah Alaloul, Marsail Al Salaheen, Khalid Alzubi, Muhammad Ali Musarat, Utilizing calcined and raw fly oil shale ash in the carbonation process of OPC cement-paste and mortar, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02945, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02945.

64 Xiaomeng Ma, Li Xu, Jingming Cai, Zhuoyang Zhang, Yuqin Sun, Weiwei Zhu, Jinlong Pan, Feasible use of titanium slag in improving properties of low carbon fire-resistive cementitious composites at elevated temperatures, Construction and Building Materials, Volume 416, 2024, 135272, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135272.

65 Anitha Krishnan, Senthil Selvan Subramanian, Effect of green gram pod ash (GGPA) as supplementary cementitious material (SCM) in mechanical and durability properties of concrete, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134663, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134663.

66 Jun Jiang, Zhengmao Ye, Jiaming Wu, Qingchun Yang, Quanliang Li, Xiangming Kong, Impact of triethanolamine on the hydration of Portland cement in the presence of high pozzolanic activity supplementary cementitious materials, Cement and Concrete Composites, Volume 147, 2024, 105435, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105435.
67 Zihan Zhou, Jianzhuang Xiao, Taohua Ye, Jun Wang, Donguk Choi, Influence of recycled concrete powder and CO2 curing on the properties of thermal insulation mortars, Construction and Building Materials, Volume 414, 2024, 134907, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134907.

68 Yongzhen Cheng, Guohua Gao, Lijun Chen, Wenjie Du, Weiye Mu, Yulu Yan, Huasheng Sun, Physical and mechanical study of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash with different particle size distribution, Construction and Building Materials, Volume 416, 2024, 135137, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135137.

69 Haijie He, Pengfei Ren, Junding Liu, Ji Yuan, Xinyu Shen, Facile preparation of vaterite dominated incineration fly ash (IFA) by slurry carbonation and its performance as supplementary cementitious material, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02775, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02775.

70 Linlin Zhu, Mulian Zheng, Wei Zhang, Guanglei Qu, Chen Chen, Erlei Cheng, Zhongwen Ou, Investigation on crack resistance of full aeolian sand high-performance concrete synergistically modified by supplementary cementitious materials and superabsorbent polymer, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134681, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134681.

71 Naraindas Bheel, Imran Mir Chohan, Asghar Ali Ghoto, Suhail Ahmed Abbasi, Elsayed Mohamed Tag-eldin, Hamad R. Almujibah, Mahmood Ahmad, Omrane Benjeddou, Roberto Alonso Gonzalez-Lezcano, Synergistic effect of recycling waste coconut shell ash, metakaolin, and calcined clay as supplementary cementitious material on hardened properties and embodied carbon of high strength concrete, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02980, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02980.

72 Floyd Rey P. Plando, Joel T. Maquiling, Construction potential of rice husk ash as eco-friendly cementitious material in a low-water demand for self-compacting concrete, Construction and Building Materials, Volume 418, 2024, 135407, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135407.

73 Tong Li, Qinghe Wang, Qingxin Ren, Compressive behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composites incorporating steel slag as aggregate, Construction and Building Materials, Volume 413, 2024, 134878, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134878.

74 Jia Yan, Zhijing Zhu, Rentai Liu, Mengjun Chen, Changzhi Shao, Chunyu Zhang, Xiuhao Li, A multi-perspective study on the influence of physical and chemical properties of 5 types of fly ash on the performance of high-volume blended fly ash cementitious slurry, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134301, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134301.

75 P. Sargent, M. Sandanayake, D.W. Law, D.J. Hughes, F. Shifa, B. Borthwick, P. Scott, Strength, mineralogical, microstructural and CO2 emission assessment of waste mortars comprising excavated soil, scallop shells and blast furnace slag, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134425, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134425.

76 Vineet Shah, Performance evaluation of carbonated cement paste derived from hydrated Portland cement based binders as supplementary cementitious material, CEMENT, Volume 15, 2024, 100091, ISSN 2666-5492, https://doi.org/10.1016/j.cement.2024.100091.

77 Qiaorui Wang, Yu Yan, Zhe Zhang, Xin Wen, Chunli Zheng, Guoqing Geng, An LC3-type binder produced with marine clay and municipal waste incineration fly ash, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134182, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134182.

78 Jshrat Baki Borno, Nithya Nair, Warda Ashraf, Alkali thermal fusion: A prospective route to enhance the reactivity of low-grade clay and utilize as supplementary cementitious material (SCM), Cement and Concrete Composites, Volume 147, 2024, 105417, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105417.

79 Fukai Ye, Qiong Feng, Hongxia Qiao, Xiangchen Zhu, Li Su, Cuizhen Xue, Hui Cao, Lei Zhang, Study on multi-objective matching ratio optimization and strength development law of basalt stone

powder composite cementitious materials, Construction and Building Materials, Volume 417, 2024, 135088, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135088.

80 A. Sadoon, O.M. Hosny, M.T. Bassuoni, G. Minhas, A. Ghazy, Use of cellulose nanomaterials in cementitious composites reinforced with basalt/polymer pellets for repair of concrete, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134682, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134682.

81 Deqiang Sun, Xujiang Wang, Jianyong Wang, Jingwei Li, Yanpeng Mao, Zhijuan Hu, Yuzhong Li, Zhanlong Song, Wenlong Wang, Properties and hydration characteristics of cementitious blends with two kinds of solid waste-based sulfoaluminate cement, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134482, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134482.

82 Xiawoei Gu, Xiaowei Ge, Jianping Liu, Ge Song, Shenyu Wang, Ziyang Hu, Hao Wang, Study on the synergistic effect of calcium carbide residue -fly ash enhanced desulphurisation gypsum under high temperature maintenance condition, Construction and Building Materials, Volume 412, 2024, 134706, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134706.

83 Manikanta Devarangadi, Srikanth Vuppala, M. Uma Shankar, Mavinakere Eshwaraiah Raghunandan, Effect of collated fly ash, GGBS and silica fume on index and engineering properties of expansive clays as a sustainable landfill liner, Cleaner Materials, Volume 11, 2024, 100219, ISSN 2772-3976, https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100219.

84 Hyunuk Kang, Jingwei Yang, Seohyun Kim, Ahyeon Lim, Juhyuk Moon, Mechanochemical activation for transforming bottom ash to reactive supplementary cementitious material, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134523, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134523.

85 Mahyar Ramezani, Osman E. Ozbulut, Muhammad M. Sherif, Mechanical characterization of high-strength and ultra-high-performance engineered cementitious composites reinforced with polyvinyl alcohol and polyethylene fibers subjected to monotonic and cyclic loading, Cement and Concrete Composites, Volume 148, 2024, 105472, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105472.

86 Huu-Bang Tran, Vu To-Anh Phan, Potential usage of fly ash and nano silica in high-strength concrete: Laboratory experiment and application in rigid pavement, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02856, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02856.

87 UNI EN 12620:2008 Aggregati per calcestruzzo

88 UNI EN 13055-1:2003 Aggregati leggeri - Aggregati leggeri per calcestruzzo, malta e malta per iniezione

89 UNI 11104:2016 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206

90 Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle

«Norme tecniche per le costruzioni».

91 Decreto 27 settembre 2022, n. 152 – Regolamento che disciplina la cessazione della qualifica di rifiuto dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione e di altri rifiuti inerti di origine minerale, ai sensi dell'articolo 184-ter, comma 2, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n.152.

94 UNI 8520-2:2022 Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 2: Requisiti

95 UNI EN 206:2021 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità

96 https://www.eota.eu/

97 Qidong Wang, Hanbing Zhao, Zhiyu Luo, Shuguang Liu, Changshun Zhou, Hongxin Liu, Properties evaluation of concrete made with recycled coarse aggregate modified by graphene oxide, Journal of Building Engineering, Volume 84, 2024, 108546, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108546

98 Ana Mafalda Matos, Paula Milheiro-Oliveira, Mário Pimentel, Eco-efficient high performance white concrete incorporating waste glass powder, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134556, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134556

99 SM Arifur Rahman, Faiz Uddin Ahmed Shaikh, Prabir Kumar Sarker, Fresh, mechanical, and microstructural properties of lithium slag concretes, Cement and Concrete Composites, Volume 148, 2024, 105469, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105469

100 Esegbushota Josephine Foghi, Thanh Vo, Mohammad Rezania, Mohaddeseh Mousavi Nezhad, Liberato Ferrara, Early age hydration behaviour of foam concrete containing a coal mining waste: novel experimental procedures and effects of capillary pressure, Construction and Building Materials, Volume 414, 2024, 134811, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134811

101 Julie Devènes, Maléna Bastien-Masse, Corentin Fivet, Reusability assessment of reinforced concrete components prior to deconstruction from obsolete buildings, Journal of Building Engineering, Volume 84, 2024, 108584, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108584

102 Xuan Ling, Wei Chen, Katrin Schollbach, H.J.H. Brouwers, Low permeability sealing materials based on sewage, digestate and incineration industrial by-products in the final landfill cover system, Construction and Building Materials, Volume 412, 2024, 134889, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134889

103 M.H. Lai, Z.Y. Lu, Y.T. Luo, F.M. Ren, J. Cui, Z.R. Wu, J.C.M. Ho, Pre- and post-fire behaviour of glass concrete from wet packing density perspective, Journal of Building Engineering, Volume 86, 2024, 108758, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108758

104 Hamid Bayat, Rasoul Banar, Morteza Nikravan, Pedram Farnood, Amir Mohammad Ramezanianpour, Alireza Kashani, Durability, mechanical, workability, and environmental assessment of self-con-

solidating concrete containing blast furnace slag and natural zeolite, Journal of Building Engineering, Volume 86, 2024, 108737, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108737

105 Carolina Martínez-García, Belén González-Fonteboa, Diego Carro-López, Fernando Martínez-Abella, Mussel shell mortars durability: Study of aggregate replacement limit, Journal of Building Engineering, Volume 82, 2024, 108239, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108239

106 A. García-Díaz, P. Delgado-Plana, S. Bueno-Rodríguez, D. Eliche-Quesada, Investigation of waste clay brick (chamotte) addition and activator modulus in the properties of alkaline activation cements based on construction and demolition waste, Journal of Building Engineering, Volume 84, 2024, 108568, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108568

107 Yunan Li, Hanbing Zhao, Yong Hu, Fulin Qu, Dunming Zhu, Kejin Wang, Wengui Li, Effect of pore water pressure on mechanical performance of recycled aggregate concrete under triaxial compression, Cement and Concrete Composites, Volume 146, 2024, 105402, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105402

108 Jagadisha, K.Balakrishna Rao, Gopinatha Nayak, Muralidhar Kamath, Adithya Tantri, Synergetic effect of binary, ternary and quaternary binders on microstructural, mechanical and durability aspects of EAF aggregate HPC system, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134673, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134673

109 Amirhesam Mashayekhi, Reza Hassanli, Yan Zhuge, Xing Ma, Christopher W.K. Chow, Synergistic effects of fiber hybridization on the mechanical performance of seawater sea-sand concrete, Construction and Building Materials, Volume 416, 2024, 135087, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135087

110 Wenzhuo Ma, Bodong Lv, Yutong Wang, Liang Huang, Libo Yan, Bohumil Kasal, Freeze-thaw, chloride penetration and carbonation resistance of natural and recycled aggregate concrete containing rice husk ash as replacement of cement, Journal of Building Engineering, 2024, 108889, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108889

111 Ana Neves, João A.P.P. Almeida, Tiago Miranda, Vitor M.C.F. Cunha, Eduardo Pereira, Self-healing assessment and variability in plain and recycled tyre fiber reinforced concrete based on tensile splitting test, Journal of Building Engineering, Volume 84, 2024, 108567, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108567

112 Rishath Sabrin, Md. Shahjalal, Hasiba Afrin Eema Bachu, Mirza Md Lutful Habib, Tamanna Jerin, AHM Muntasir Billah, Recycling of different industrial wastes as supplement of cement for sustainable production of mortar, Journal of Building Engineering, Volume 86, 2024, 108765, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108765

113 Seo-Eun Oh, Sang-Yeop Chung, Kyuwon Kim, Soo-Ho Han, Comparative analysis of the effects of waste shell aggregates on the material properties of cement mortars, Construction and

Building Materials, Volume 412, 2024, 134887, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134887

114 Moisés Frías, Ana Guerrero, Manuel Monasterio, Ángela Insignares, María Isabel Sánchez de Rojas, Viability of using limestone concrete waste from CDW to produce ternary cements type LC3, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134362, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134362

115 Chuanqi Liu, Jilin Sun, Xingrui Tang, Yuanhao Ma, The durability of spray steel fiber-reinforced recycled coarse aggregate concrete, Construction and Building Materials, Volume 412, 2024, 134731, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134731

116 Viviana Letelier, Francisca Hott, Marión Bustamante, Bruno Wenzel, Effect of recycled coarse aggregate treated with recycled binder paste coating and accelerated carbonation on mechanical and physical properties of concrete, Journal of Building Engineering, Volume 82, 2024, 108311, ISSN 2352-7102, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108311

117 Jianhe Xie, Jianglin Li, Baifa Zhang, Wei Chen, Huaicheng Zhong, Jian Yang, Ting Yu, Yuan Feng, Effects of pretreated recycled fine aggregates on the mechanical properties and microstructure of alkali-activated mortar, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02819, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02819

118 Yongsheng Ma, Qiming You, Jinjun Li, Chaoqi Lu, Jiwei Yin, Hucheng Li, Wenhui Meng, Ziyi Liu, Yi Wang, Xiaojian Gao, Tiefeng Chen, Study on the use of CO2 to strengthen recycled aggregates and pervious concrete, Construction and Building Materials, Volume 418, 2024, 135372, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135372

119 Chuheng Zhong, Lijuan Zhang, Weiqi Mao, Sijia Xing, Jinhui Chen, Jinzhi Zhou, An investigation on mechanical properties and durability of metakaolin reinforced modified recycled concrete, Case Studies in Construction Materials, Volume 20, 2024, e02978, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02978

120 Xiaoyu Shang, Zhicheng Li, Jianlin Chang, Yuqi Chen, Jingwei Yang, Zhenhua Duan, Production, properties and life cycle assessment of artificial lightweight aggregates produced with corn straw ash (CSA) and concrete slurry waste (CSW), Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134274, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134274

121 Duy Dung Khuat, Shota Yamanaka, May Huu Nguyen, Kenichiro Nakarai, Combined effect of internal curing and hydration promotion on concrete performances: Contributions of roof-tile waste aggregate and chloride-based accelerator, Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134527, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134527

122 S. Kenai, M. Ghrici, J. Khatib, 5 - Natural pozzolan as hydraulic binder substitution in combination with recycled aggregates in concrete, Editor(s): Mehmet Serkan Kırgız, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Advance Upcycling of By-Products in Binder and Binder-Based Materials, Woodhead Publishing, 2024, Pages 101-121, ISBN 9780323907910, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90791-0.00009-3

123 Yuxiang Tang, Jianzhuang Xiao, Hanghua Zhang, Dianchao Wang, Mingzhong Zhang, Junhui Zhang, Effect of accelerated carbonation of fully recycled aggregates on fracture behaviour of concrete, Cement and Concrete Composites, Volume 148, 2024, 105442, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105442

124 Junlin Lyu, Shenglong Zhao, Chao Xing, Chao Wang, Guanrun Chu, Xiangfeng Xi, Changan Zhou, Lei Song, Kui Ma, Hairong Yue, The production of artificial aggregates with flue gas desulfurization ash: Development of a novel carbonation route, Journal of Cleaner Production, Volume 444, 2024, 141068, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141068

125 Bruno Wenzel, Viviana Letelier, Gonzalo Zambrano, Marión Bustamante, José Marcos Ortega, Maximizing the use of recycled aggregates from combined thermal/mechanical and accelerated carbonation treatment, Developments in the Built Environment, Volume 17, 2024, 100316, ISSN 2666-1659, https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100316

126 N. Vidal-De la Peña, S. Grigoletto, D. Toye, L. Courard, G. Léonard, Chapter 7 - CO2 capture by mineral carbonation of construction and industrial wastes, Editor(s): Francisco M. Baena-Moreno, Judith González-Arias, Tomás Ramírez-Reina, Laura Pastor-Pérez, In Woodhead Publishing Series on Carbon Capture and Storage, Circular Economy Processes for CO_2 Capture and Utilization, Woodhead Publishing, 2024, Pages 163-185, ISBN 9780323956680, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95668-0.00003-5

127 Ning Li, Cise Unluer, Enhancement of the wet carbonation of artificial recycled concrete aggregates in seawater, Cement and Concrete Research, Volume 175, 2024, 107387, ISSN 0008-8846, https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107387

128 Jun Liu, Guang Liu, Weizhuo Zhang, Zhenlin Li, Hesong Jin, Feng Xing, A new approach to CO2 capture and sequestration: A novel carbon capture artificial aggregates made from biochar and municipal waste incineration bottom ash, Construction and Building Materials, Volume 398, 2023, 132472, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132472

129 Jun Liu, Weizhuo Zhang, Hesong Jin, Zhenlin Li, Guang Liu, Feng Xing, Luping Tang, Exploring the carbon capture and sequestration performance of biochar-artificial aggregate using a new method, Science of The Total Environment, Volume 859, Part 2, 2023, 160423, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160423

130 Jun Liu, Canrong Zeng, Zhenlin Li, Guang Liu, Weizhuo Zhang, Guangming Xie, Feng Xing, Carbonation of steel slag at low CO2 concentrations: Novel biochar cold-bonded steel slag artificial aggregates, Science of The Total Environment, Volume 902, 2023, 166065, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166065

131 Yury Villagran-Zaccardi, Liesbeth Horckmans, Arne Peys, Performance of mortar and concrete containing artificial aggregate from cold-bonded sulphidic mine tailings, Construction and Building Materials, Volume 409, 2023, 134049, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuild-

mat.2023.134049
132 Maochun Xu, Yuyang Zhang, Shuo Yang, Liwu Mo, Peng Liu, Effects of internal CO2 curing provided by biochar on the carbonation and properties of steel slag-based artificial lightweight aggregates (SALAs), Cement and Concrete Composites, Volume 142, 2023, 105197, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105197

133 Junlin Lyu, Shenglong Zhao, Chao Xing, Chao Wang, Guanrun Chu, Xiangfeng Xi, Changan Zhou, Lei Song, Kui Ma, Hairong Yue, The production of artificial aggregates with flue gas desulfurization ash: Development of a novel carbonation route, Journal of Cleaner Production, Volume 444, 2024, 141068, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141068

134 Xiaoyu Shang, Zhicheng Li, Jianlin Chang, Yuqi Chen, Jingwei Yang, Zhenhua Duan, Production, properties and life cycle assessment of artificial lightweight aggregates produced with corn straw ash (CSA) and concrete slurry waste (CSW), Construction and Building Materials, Volume 411, 2024, 134274, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134274

135 Chen Dongyu, Chen Meizhu, Sun Yuanhang, Wu Shaopeng, Zhang Xintao, Wu Chen, Sustainable use of recycled cement concrete with gradation carbonation in artificial stone: Preparation and characterization, Construction and Building Materials, Volume 364, 2023, 129867, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129867

136 Jun Liu, Renjie Niu, Junjie Hu, Yuanrui Ren, Weizhuo Zhang, Guang Liu, Zhenlin Li, Feng Xing, Jie Ren, The performance and microstructure of alkali-activated artificial aggregates prepared from municipal solid waste incineration bottom ash, Construction and Building Materials, Volume 403, 2023, 133012, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133012
137 Z.X. Chen, N.T. Zhang, S.R. Yan, J. Fish, S.H. Chu, CO2 mineralization into waste-valorized lightweight artificial aggregate, Construction and Building Materials, Volume 409, 2023, 133861, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133861

138 https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/

139 Webinar: "Le linee guida per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni: dal carbon footprint all'abbattimento delle emissioni", ANCE, 3 maggio 2023 - https://ance.it/2023/05/ance-lancia-il-nuovo-servizio-sulla-decarbonizzazione-riservato-alle-imprese-associate/

140 Webinar: "Le linee guida per la decarbonizzazione del settore delle costruzioni: dal carbon footprint all'abbattimento delle emissioni", ANCE, 3 maggio 2023 - https://ance.it/2023/05/ance-lancia-il-nuovo-servizio-sulla-decarbonizzazione-riservato-alle-imprese-associate/

141 Cantiere Impatto Sostenibile, Assimpredil Ance Associazione delle Imprese edili e complementari delle province di Milano, Lodi, Monza e Brianza, anno 2023 - https://cantiereimpattosostenibile.it/

142 https://www.catf.us/it/2010/12/geological-co2-storage-risky-business-or-promising-solution/

143 https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it

144 Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')

145 (dalle fonti e un aumento degli assorbimenti dai pozzi)

146 Direttiva 2009/31/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 aprile 2009, relativa allo stoccaggio geologico di biossido di carbonio e recante modifica della direttiva 85/337/CEE del Consiglio, delle direttive del Parlamento europeo e del Consiglio 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE, 2008/1/CE e del regolamento (CE) n. 1013/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio

147 DECRETO LEGISLATIVO 14 settembre 2011, n. 162 Attuazione della direttiva 2009/31/CE in materia di stoccaggio geologico del biossido di carbonio, nonchè modifica delle direttive 85/337/CEE, 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE, 2008/1/CE e del Regolamento (CE) n. 1013/2006. (11G0207)

148 Per colonna d'acqua s'intende la massa d'acqua continua che si estende verticalmente tra la superficie e i sedimenti del fondo di un corpo idrico;

149 https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/carbon-capture-and-utilisation/amine-based-post-combustion-capture/

150 https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/carbon-capture-and-utilisation/ammonia-based-post-combustion-capture/

151 https://www.cleanker.eu/home-page-it

152 https://www.leilac.com/about-us/

153 https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/carbon-capture-and-utilisation/oxyfuel/

154 Sigurdur R. Gíslason, Hólmfrídur Sigurdardóttir, Edda Sif Aradóttir, Eric H. Oelkers, A brief history of CarbFix: Challenges and victories of the project's pilot phase, Energy Procedia, Volume 146, 2018, Pages 103-114, ISSN 1876-6102, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.014

155 Muhammad Ali, Nilesh Kumar Jha, Nilanjan Pal, Alireza Keshavarz, Hussein Hoteit, Mohammad Sarmadivaleh, Recent advances in carbon dioxide geological storage, experimental procedures, nfluencing parameters, and future outlook, Earth-Science Reviews, Volume 225, 2022, 103895, ISSN 0012-8252, https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103895

156 https://eccoclimate.org/it/cose-la-ccs-qa-sulla-cattura-e-stoccaggio-di-carbonio/#_ftnref11

157 https://www.heidelbergmaterials.com/en/sustainability/we-decarbonize-the-construction-industry/ccus

158 https://www.heidelbergmaterials.us/home/news/news-post/news/2023/08/14/heidelberg-materials-north-america-and-mhi-pilot-are-working-toward-first-full-scale-carbon-capture-utilization-and-storage-solution-for-cement-industry

159 https://www.carboncapturejournal.com/ViewNews.aspx?NewsID=5862#:~:text=The%2041%20CCS%20projects%20in,the%20highest%20jump%20since%202018

160 https://www.eni.com/ravenna-ccs/it-IT/progetto/ravenna-hub.html

161 UNI 11417-1:2022 Durabilità delle opere di calcestruzzo e degli elementi prefabbricati di calcestruzzo - Parte 1: Fenomeni di degrado, loro cause e misure di prevenzione

162 UNI 11417-2:2022 Durabilità delle opere di calcestruzzo e degli elementi prefabbricati di calcestruzzo - Parte 2: Indicazioni per prevenire la reazione alcali-silice

163 UNI EN 206:2021 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità

164 UNI EN 1992-1-1:2024 Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici, ponti e strutture di ingegneria civile

165 Presidenza del consiglio superiore dei lavori pubblici – servizio tecnico centrale, Linee guida sul calcestruzzo strutturale

166 Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Servizio Tecnico Centrale, Linee guida su Calcestruzzi Strutturali ad Alta Resistenza (75 N/mm2 < Rck ≤ 115 N/mm2)

167 A. Principigallo, Study on Permeability of Cracked Concrete, ACI Materials Journal, 117, 6 (2020)

168 LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE PRODUCTION OF NATURAL AND RECYCLED AGGREGATES FOR CONCRETE: A CASE STUDY IN THE PROVINCE OF BRESCIA, Andrea Piccinali, Irma Cavallotti, Giovanni Plizzari, Sabrina Sorlini (2023), Vol. 22, No. 10, 1767-1774 http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/; http://www.eemj.eu http://doi.org/10.30638/eemj.2023.152

169 Reggia, A., Chinosi, R., Lattarulo, P., Plizzari, G. (2023). Towards Reinforced Concrete Structures with Near-Zero Impact: New Reinforcement Solutions and Concretes. In: Ilki, A., Çavunt, D., Çavunt, Y.S. (eds) Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient. fib Symposium 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 350. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_118

170 SP-149: High-Performance Concrete - Proceedings, International Conference Singapore, 1994

171 SP-186: High-Performance Concrete: Performance and Quality of Concrete Structures

172 ACI PRC-363-10 Report on High-Strength Concrete

173 SP-159: International Workshop on High Performance Concrete

174 ACI PRC-239-18: Ultra-High Performance Concrete: An Emerging Technology Report

175 UNI EN 1992-1-1:2024 Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici, ponti e strutture di ingegneria civile

176 CEN/TC 104/SC 2/WG 7 Work programme (WI=00104449) UHPFRC – Part 2: Execution of structures or elements in UHPFRC

177 MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, DECRETO 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».

178 A. Principigallo, E. Borgarello, Il cemento circolare, Nuova Energia www.nuova-energia.com - Il cemento circolare.

179 UNI EN 16757:2023 Sostenibilità delle opere edili - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole per le Categorie di Prodotto per calcestruzzo ed elementi in calcestruzzo

180 Biava G, Zacco A, Zanoletti A, Sorrentino GP, Capone C, Principigallo A, Depero LE, Bontempi E. Accelerated Direct Carbonation of Steel Slag and Cement Kiln Dust: An Industrial Symbiosis Strategy Applied in the Bergamo-Brescia Area. Materials (Basel). 2023 May 29; 16(11):4055. doi: 10.3390/ma16114055; PMID: 37297187; PMCID: PMC10254272.

181 A. Principigallo, Effective Water in Concrete with Recycled Aggregate, ACI Materials Journal, 115, 6 (2018)

182 Wang, Y.-J.; Tao, M.-J.; Li, J.-G.; Zeng, Y.-N.; Qin, S.; Liu, S.-H. Carbonation of EAF Stainless Steel Slag and Its Effect on Chromium Leaching Characteristics. Crystals 2021, 11, 1498. https://doi.org/ 10.3390/cryst11121498

183 DIRETTIVA (UE) 2023/1791 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 13 settembre 2023 sull'efficienza energetica e che modifica il regolamento (UE) 2023/955 (rifusione)

184 UNI EN 206:2021 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità

185 Federbeton – Confindustria, Rapporto di filiera 2023 RAPPORTO DI FILIERA 2023 (federbeton.it)

186 UNI EN 13055:2016 Aggregati leggeri

187 A. Principigallo, Elastic and Self-Healing Properties of Concrete Including Graded Clinker, ACI Materials Journal, 115, 5 (2018)

188 Francesco Lo Monte, Liberato Ferrara, Self-healing characterization of UHPFRCC with crystalline admixture: Experimental assessment via multi-test/multi-parameter approach, Construction and Building Materials, Volume 283, 2021, 122579, ISSN 0950-0618, https://doi.org/10.1016/j.conbuild-

mat.2021.122579.

189 Mors, R. M., & Jonkers, H. M. (2020). Bacteria-based self-healing concrete: Evaluation of full scale demonstrator projects. RILEM Technical Letters, 4 (2019), 138-144. https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.93

190 Tadesse Natoli Abebe, Byeong-Hun Woo, Hong Gi Kim, Jae-Suk Ryou, Real-time monitoring of self-sensing cementitious composite incorporating hybrid silicon carbide and graphite for enhanced structural health monitoring, Cement and Concrete Composites, Volume 146, 2024, 105404, ISSN 0958-9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105404

191 Open Innovation - Infrastrutture e servizi per la Mobilità Sostenibile e Resiliente (regione.lombardia.it)

192 Sriparna Singh, A.K. Sachan, Rama Shanker, A review on smart aggregate based structural health monitoring, Materials Today: Proceedings, Volume 78, Part 1, 2023, Pages 28-35, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.246

193 Salimi, M., de Nardo, L., & Carvelli, V. (2023). Phase change materials embedded in expanded clay aggregates to develop energy storage concrete: A review. Science and Technology for the Built Environment, 29(10), 1050–1071. https://doi.org/10.1080/23744731.2023.2253089

194 Application of PCM in concrete: improvement of the indoor comfort and reducing energy demand van Haaren, M. A. J. (Author). 31 Aug 2012 Application of PCM in concrete — Eindhoven University of Technology research portal (tue.nl).

195 Zajac, M.; Skocek, J.; Skibsted, J.; Ben Haha, M. CO2 Mineralization of Demolished Concrete Wastes into a Supplementary Cementitious Material – a New CCU Approach for the Cement Industry. RILEM Tech Lett 2021, 6, 53-60.

196 Antonio Princigallo, Electrical Monitoring of Setting and Hardening of UHPC/UHPFRC with Graphene, Journal of Advanced Concrete Technology, 2024, Volume 22, Issue 10, Pages 650-663, Released on J-STAGE October 25, 2024, Online ISSN 1347-3913 https://doi.org/10.3151/jact.22.650, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jact/22/10/22_650/_article/-char/en

197 Antonio Princigallo, Surface electrical properties of UHPFRC with graphene, Journal of Building Engineering, Volume 98, 2024, 111057, ISSN 2352-7102 https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111057. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224026251

198 Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Servizio Tecnico Centrale, Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)

199 CEN TC 104 (WI=00104468) UHPFRC – Part 1: Specification, performance, production and conformity

200 CEN TC 104 (WI=00104449) UHPFRC – Part 2: Execution of structures or elements in UHPFRC

201 Nailia R. Rakhimova, Ravil Z. Rakhimov, Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials – a review, Journal of Materials Research and Technology, Volume 8, Issue 1, 2019, Pages 1522-1531, ISSN 2238-7854, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.006

202 Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review | Request PDF (researchgate.net)

203 Enhancement of ductility characteristics of fiber-reinforced ternary geopolymer mortar - ScienceDirect

204 (PDF) L'utilizzo dei geopolimeri nel ripristino delle strutture esistenti in calcestruzzo armato (researchgate.net)

205 Green geopolymer mortars for masonry buildings: effect of additives on their workability and mechanical properties (unipr.it)

206 Geopolymer concrete: A review of some recent developments - ScienceDirect

207 Advances in geopolymer materials: A comprehensive review - ScienceDirect

208 Resistenza delle malte a base di loppa attivata alcalinamente in ambienti aggressivi | Articoli | Ingenio (ingenio-web.it)

209 I calcestruzzi innovativi. L'impegno del settore per vincere la sfida della sostenibilità delle costruzioni – Blog Federbeton

210 https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf

211 L.Campanella, F.Borzetti, L.Cassar, Photocatalitic cement: a new approach to environmental protection, International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environmental and Construction Materials 8-9 October 2007, Florence Italy. https://www.rilem.net/images/publis/a17c780021193e-666d235ee22efe151c.pdf

212 Cool Cementitious Materials for a More Sustainable Urban Environment / Capone, C; Cacciatore, A; Principallo, A; Berardi, R; Muscio, A. - In: JOURNAL OF ARCHITECTURAL ENGINEERING. - ISSN 1076-0431. - 29:2(2023), pp. 1-12. [10.1061/JAEIED.AEENG-1415]

213 CEN TC104/SC1, "Concrete - specification, performance, production and conformity" - doc 1443

214 RILEM 276-DFC: Digital fabrication with cement-based materials https://www.rilem.net/grou-

pe/276-dfc-digital-fabrication-with-cement-based-materials-351

215 RILEM 303-PFC: Performance requirements and testing of fresh printable cement-based materials https://www.rilem.net/groupe/303-pfc-performance-requirements-and-testing-of-fresh-printable-cement-based-materials-427

216 RILEM 304-ADC: Assessment of Additively Manufactured Concrete Materials and Structures 304-ADC: Assessment of Additively Manufactured Concrete Materials and Structures (rilem.net)

217 Direttiva europea 2004/54/CE del parlamento europeo e del consiglio del 29 aprile 2004 relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della Rete stradale trans europea

218 Decreto legislativo n. 264 del 5/10/2006 Attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea

219 "Comparazione tecnica ed economica di pavimentazioni cementizie e bituminose in galleria" (Prof. Ing. Paola di Mascio, Prof. Ing. Laura Moretti – Sapienza Università di Roma – 2017)

220 "Analisi comparativa elaborata con Life Cycle Assessment (LCA) secondo la norma EN 15804 di pavimentazioni stradali flessibili e rigide in galleria" (Prof. Ing. Paola di Mascio, Prof. Ing. Laura Moretti – Sapienza Università di Roma – 2020)

221 2024/1275 8.5.2024 DIRETTIVA (UE) 2024/1275 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 24 aprile 2024 sulla prestazione energetica nell'edilizia

222 2024/1275 8.5.2024 DIRETTIVA (UE) 2024/1275 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 24 aprile 2024 sulla prestazione energetica nell'edilizia

223 https://ec.europa.eu/docsroom/documents/49315

224 Regolamento (UE) 2024/3110 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 27 novembre 2024, che fissa norme armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e abroga il regolamento (UE) n. 305/2011 (Testo rilevante ai fini del SEE) https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/3110/oj

225 https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html

226 https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en?prefLang=it

227 https://gagebrothers.com/wp-content/uploads/2022/11/Storm-Resistance-of-Precast-Concrete-Structures.pdf

228 https://lab24.ilsole24ore.com/disastri-naturali-italia-indice-vulnerabilita-alto/?refresh_ce=1 (accesso 06/05/2024)

229 https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/risk-data-hub/#/vulnerability-in-europe

230 https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/risk-data-hub/media/vulnerability/Vulnerability_Dashboard_Navigation.pdf

231 https://www.cement.org/docs/default-source/resiliency-2019/pca-disasters.pdf

232 https://www.undrr.org/publication/unisdr-strategic-framework-2016-2021

233 Recepito in Italia con DECRETO LEGISLATIVO 18 aprile 2016, n. 50 (GU n.91 del 19-04-2016 - Suppl. Ordinario n. 10). Disposizioni integrative e correttive sono riportate nel DECRETO LEGISLATIVO 31 marzo 2023, n. 36. Codice dei contratti pubblici in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici. (GU n.77 del 31-03-2023 - Suppl. Ordinario n. 12).

234 Decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36 - Codice dei contratti pubblici in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici (G.U. n. 77 del 31 marzo 2023 - S.O. n. 12).

235 Audizione ANCE nell'ambito dell'indagine conoscitiva sull'utilizzo delle tecnologie digitali e dell'intelligenza artificiale nella pianificazione, nella costruzione e nel monitoraggio delle infrastrutture stradali, autostradali, ferroviarie, portuali, aeroportuali e logistiche, presso la Commissione Ambiente del Senato, del 29 novembre 2023. Riferimento ai documenti dell'audizione al sito di ANCE: https://ance.it/2023/11/tecnologie-digitali-e-intelligenza-artificiale-nelle-infrastrutture-ance-serve-una-piattaforma-dati-nazionale-per-le-costruzioni/. Riferimento dell'audizione al sito del Senato della Repubblica: https://webtv.senato.it/4621?video_evento=244163 (da minuto 1.03.00)

236 CEN TC104/SC1 "Concrete - Specification, performance, production and conformity" - doc n°1444

237 2024/1781 REGOLAMENTO (UE) 2024/1781 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 13 giugno 2024 che stabilisce il quadro per la definizione dei requisiti di progettazione ecocompatibile per prodotti sostenibili, modifica la direttiva (UE) 2020/1828 e il regolamento (UE) 2023/1542 e abroga la direttiva 2009/125/CE

238 Audizione ANCE nell'ambito dell'indagine conoscitiva sull'utilizzo delle tecnologie digitali e dell'intelligenza artificiale nella pianificazione, nella costruzione e nel monitoraggio delle infrastrutture stradali, autostradali, ferroviarie, portuali, aeroportuali e logistiche, presso la Commissione Ambiente del Senato, del 29 novembre 2023.Riferimento ai documenti dell'audizione al sito di ANCE: https://ance.it/2023/11/tecnologie-digitali-e-intelligenza-artificiale-nelle-infrastrutture-ance-serve-una-piattaforma-dati-nazionale-per-le-costruzioni/. Riferimento dell'audizione al sito del Senato della Repubblica: https://webtv.senato.it/4621?video_evento=244163 (da minuto 1.03.00).

239 Audizione ANCE nell'ambito dell'indagine conoscitiva sul rapporto tra intelligenza artificiale e mondo del lavoro, presso la Commissione XI della Camera dei deputati Lavoro pubblico e privato, del 25 gennaio 2024. Riferimento ai documenti dell'audizione al sito di ANCE: https://ance.it/2024/01/intelligenza-artificiale-in-edilizia-ance-impatto-potenzialmente-dirompente-e-notevoli-benefici-a-pat-

to-che-la-transizione-sia-guidata-dal-fattore-umano-e-dalletica/ Riferimento dell'audizione al sito della Camera dei deputati: https://webtv.camera.it/evento/24393 (minuto 51.46).

240 REGULATION (EU) 2024/1689 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828 (Artificial Intelligence Act)

241 https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20210414STO02010/shaping-the-digital-transformation-eu-strategy-explained

242 https://oeil.secure.europarl.europa.eu/oeil/popups/printsummary.pdf?id=1663505&l=en&t=E

243 https://www.europarl.europa.eu/news/it/press-room/20240308IPR19015/il-parlamento-europeo-approva-la-legge-sull-intelligenza-artificiale

SOCI AIRI >

SOCI SOSTENITORI

BRACCO
CNR - CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
MAPEI
PIRELLI

ORGANIZZAZIONI DI IMPRESE

FARMINDUSTRIA
FEDERCHIMICA
UNIONCAMERE

ISTITUTI FINANZIARI

INTESA SANPAOLO

ENTI PUBBLICI DI RICERCA E UNIVERSITÀ

AREA SCIENCE PARK
CENTRO NAST
CSGI
ENEA
INAIL
POLITECNICO DI TORINO - CHILAB
SCUOLA NORMALE SUPERIORE DI PISA
UNIVERSITÀ DI PISA

INDUSTRIE E CENTRI DI RICERCA

BAIC AGRO ITALIA
BIOTECNOMED
BYRON'S HOLDING
BRACCO IMAGING
BREMBO
CAMOZZI AUTOMATION
CENTRO RICERCHE FIAT
CEREAL DOCKS
CERTIMAC
CONSORZIO ITALBIOTEC
CRSLAGHI
CETMA
CIRA
COLOROBBIA CONSULTING
COMSOL
DIASORIN
DOMPÉ
ECOR INTERNATIONAL
ELETTRA SINCROTRONE TRIESTE
E.M.A
ERICSSON TELECOMUNICAZIONI
FINCANTIERI
FONDAZIONE CAVALIERI OTTOLENGHI
FONDAZIONE BRUNO KESSLER
FONDAZIONE PIEMONTE INNOVA
GEWISS
GIUSTO FARAVELLI
INNOVHUB STAZIONI SPERIMENTALI PER L'INDUSTRIA
IVECO
LFOUNDRY
MECCANO
MEMC ELECTRONIC MATERIALS - GLOBALWAFERS COMPANY

**Situazione soci aggiornata a dicembre 2024*

MENARINI SILICON BIOSYSTEMS
METTLER TOLEDO
PIRELLI TYRE
PROGEST
SAES GETTERS
SAIPEM
SMILAB
SPEA
STMICROELECTRONICS
TECNOALIMENTI SOCIETA CONSORTILE PER AZIONI
THALES ALENIA SPACE ITALIA
TODARO INDUSTRY
TXT E-TECH

START UP INNOVATIVE

AIENG
ARCHA SRL
ASSING
COSBERG
ECOR INTERNATIONAL
ENERTECH SOLUTION
EPSILON
IUVO
JONIX
KLASTER
MARITIME TECHNOLOGY CLUSTER FVG
NATIVE TO WEAR
NEXT TECHNOLOGY TECNOTESSILE SRL
NICHE SRL
NVNOVA
PLASTICA ALFA
SULTAN
TECHNETIC ITALIA

SOCIETÀ DI CONSULENZA

AYMING ITALIA
BUGNION
FI GROUP ITALIA
FINSERVICE
LUNATI & MAZZONI
SERVICE GROUP R&D
STUDIO PROMOZIONI
STUDIO TRIBUTARIO E SOCIETARIO DELOITTE
TINEXTA INNOVATION HUB

Airi promuove la ricerca industriale e l'innovazione tecnologica in Italia e in Europa.
Previsioni tecnologiche, policy, networking e tecnologie emergenti.

Scopri di più su www.airi.it

Airi
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER LA RICERCA INDUSTRIALE
50
1974 2024





















Isbn 978-88-98935-72-7