

Concrete with secondary raw materials: from demolition waste to the reuse of industrial wastes

Calcestruzzo con materie prime seconde: dagli scarti di demolizione al riutilizzo degli scarti industriali

Estefania Cuenca¹, Marco Davolio², Marco Del Galdo³, Liberato Ferrara⁴

¹ *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

² *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

³ *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

⁴ *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

ABSTRACT: The "ReSHEALients" research group of the Department of Civil and Environmental Engineering (DICA) of Politecnico di Milano has been dealing in the last years with several possibilities for implementing circular economy concepts in the concrete construction industry. The research carried out ranges from the recycling of ultra-high performance concrete (UHPC), intended as construction and demolition waste using different fractions of recycled aggregate obtained from crushed concrete, in substitution of both natural aggregates and cement, to the recycling of Coal Mine Waste Geomaterials (CMWG) up to a special experience recycling polymeric microparticles, residues from the coating and paint industry. In fact, the fine particles of polymer resin, a waste product of the coatings industry, have been used as a partial replacement of the sand and binder particles being subjected to a gamma irradiation process similar to that used for the sanitization of containers in the food industry. This paper summarizes the results of the performed investigations addressing the feasibility of the proposed technologies also considering their overall impact / Il gruppo di ricerca "ReSHEALients" del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA) del Politecnico di Milano negli ultimi anni si è occupato di varie possibilità di implementazione di concetti di economia circolare nell'industria delle costruzioni in calcestruzzo. Le ricerche condotte spaziano dal riciclo del calcestruzzo ad altissime prestazioni (UHPC), inteso quale rifiuto di costruzione e demolizione utilizzando diverse frazioni di aggregato riciclato ottenuto da calcestruzzo frantumato, in sostituzione dell'aggregato naturale, al riciclo dei geomateriali di scarto delle miniere di carbone (Coal Mine Waste Geomaterials, CMWG) fino ad una speciale esperienza di riciclo di microparticelle polimeriche, residui dell'industria del coating e delle vernici. Infatti, le particelle fine di resina polimerica, un prodotto di scarto dell'industria dei rivestimenti, sono state utilizzate come parziale sostituzione delle particelle di sabbia e legante previo processo di irradiazione gamma simile a quello utilizzato per la sanificazione dei contenitori nell'industria alimentare. Quest'articolo riassume i risultati delle ricerche svolte affrontando la fattibilità delle tecnologie proposte anche considerando il loro impatto complessivo.

KEYWORDS: circular economy, recycled concrete; coal mine waste geomaterials / economia circolare; calcestruzzo riciclato; scarto delle miniere di carbone

1 INTRODUZIONE

Grazie alla sua convenienza economica (basso costo) e all'ottima termo-proprietà meccaniche tra cui resistenza, durata, resistenza al fuoco e elevata inerzia termica, il calcestruzzo è il materiale da costruzione più utilizzato e, in assoluto, il secondo materiale più utilizzato nel mondo dopo l'acqua (Schaefer et al., 2018).

È un dato di fatto che la produzione di enormi quantità di calcestruzzo ha un forte impatto ambientale sulle emissioni di CO₂ e sfruttamento delle risorse. Nel 2020 l'industria delle costruzioni ha rappresentato il 36% della domanda globale di energia e il 37% delle emissioni di CO₂ legate all'energia (8,7

Giga-tonnellate), il 10% di cui direttamente prodotto dalla manifattura di materiali per l'edilizia, principalmente cemento (Nazioni Unite, 2021). Nel dettaglio, per ciascuna tonnellata di cemento Portland ordinario prodotta, si stima che una quantità di circa 930 kg di CO₂ sono rilasciate alla atmosfera (Lehne e Preston, 2018). Questo paper riassume alcune delle ultime ricerche fatte dal nostro gruppo di ricerca consistenti alla implementazione di concetti di economia circolare legate al calcestruzzo. Le ricerche si occupano del riciclo del calcestruzzo ad altissime prestazioni e all'utilizzo di geomateriali di scarto delle miniere di carbone come sostituzione degli aggregati naturali. Infine si presenta anche una ricerca

dove parte della sabbia e del legante del calcestruzzo si sostituisce per particelle fine di resina polimerica.

2 SELF-HEALING DI CALCESTRUZZO AD ALTISSIME PRESTAZIONI RICICLATO (R-UHPC) E SOTTOPOSTO AD AMBIENTI RICCHI IN CLORURI

2.1 Introduzione

Le strutture possono trarre vantaggio dalle caratteristiche dei calcestruzzi ad altissime prestazioni (UHPC) per ottenere una durabilità a lungo termine senza una manutenzione sostanziale. Tuttavia in alcuni casi le suddette strutture potrebbero ancora necessitare di essere smantellate. Pertanto, la possibilità di riciclare l'UHPC può influenzare in modo significativo gli impatti ambientali associati all'uso di questa categoria di materiali, dato l'elevato contenuto di leganti e di energia incorporata. Questo studio ha studiato le prestazioni di autoriparazione di un UHPC realizzato con UHPC riciclato. Sono state studiate due diverse miscele, con sostituzione totale della sabbia e sostituzione parziale del cemento rispettivamente con aggregati UHPC riciclati e aggregati e fini UHPC riciclati. La capacità di autoriparazione delle miscele è stata valutata con test meccanici e di durabilità fino a sei mesi, con esposizione continua a una soluzione ricca di cloruri, simulando l'ambiente marino. Le particelle di cemento non idratate hanno preservato la capacità di autoriparazione dell'UHPC originale. Entrambe le miscele hanno dimostrato il loro potenziale di sigillatura delle fessure anche con ripetuti cicli di riparazione dei danni, mostrando una leggera diminuzione solo dopo sei mesi di esposizione e fessurazione. La chiusura della fessura ha consentito di ottenere prestazioni meccaniche costanti e mantenute nel tempo.

2.2 Materiali e metodi

Le miscele UHPC studiate sono state progettate a partire da una miscela UHPC di riferimento, riportata nella Tabella 1. Il materiale originario veniva frantumato in una parte grossolana e una fine e utilizzato in totale sostituzione della sabbia. Inoltre, il contenuto di cemento nelle due miscele analizzate è stato ridotto al 70% del contenuto iniziale e sostituito da fini riciclati UHPC per la Miscela 1 – CF (Coarse + Fine), e da ulteriori aggregati grossolani riciclati UHPC per la Miscela 2 – CO (Coarse only, solo grossolana).

I diversi contributi degli aggregati UHPC riciclati grossolani e fini alle prestazioni dell'UHPC riciclato a legante ridotto sono stati valutati da molteplici prospettive, mediante test fisici e meccanici in vari

momenti e in diversi modelli di danno. Sono stati eseguiti test di sorptività per caratterizzare le condizioni iniziali di ciascun campione. Per valutare le prestazioni meccaniche del materiale sono state svolte prove di flessione a 3 punti (EN 1015) e nove provini per miscela sono stati prefessurati. Dopo la fessura iniziale, la misurazione della sorptività è stata ripetuta insieme all'osservazione diretta della fessura con un microscopio digitale. L'ultimo passaggio è stata l'esposizione in una soluzione di NaCl al 3,3% per simulare l'ambiente marino. Al termine dei periodi fissati, 1, 2, 3 e 6 mesi, il processo è stato ripetuto valutando la condizione di guarigione con misurazioni della sorptività delle fessure. Parte dei campioni sono stati poi nuovamente rifessurati e misurati per impostare la condizione di riferimento prima del successivo ciclo di esposizione.

All'inizio della campagna sperimentale sono stati testati tre provini per miscela per stabilire la prestazione di riferimento. I rimanenti sono stati prefessurati fino ad un'apertura della fessura di 150 μm e poi divisi in tre diversi gruppi (Tabella 2), ciascuno costituito da tre campioni nominalmente identici. Il gruppo G-I è stato testato dopo tre mesi di cicli ripetuti di fessurazione e guarigione/healing, mentre i gruppi G-IIa e G-IIb sono stati testati dopo sei mesi, quest'ultimo sottoposto a ripetuti cicli di fessurazione-guarigione/healing per i primi tre mesi.

Table 1. Mix designs / Miscele

Constituents (kg/m ³)	Ref.	CF mix	CO mix
Cement 52.5R	700	490	490
Silica fume	400	400	400
Superplasticizer ACE 442	64	64	64
Water	231	231	231
Steel fibres (lf=22mm, df=0.2mm)	0	160	160
Crystalline admixtures	0	5.6	5.6
Sand	817	0	0
Recycled aggregate	0	817	1027
Recycled fines	0	210	0

Table 2. Experimental program / Programma sperimentale

ID	t=0	t=1 month	t=2 months	t=3 months	t=6 months
G-0	Rottura	-	-	-	-
G-I	Pre-fessura	Ri-fessura	Ri-fessura	Rottura	-
G-IIa	Pre-fessura	-	-	-	Rottura
G-IIb	Pre-fessura	Ri-fessura	Ri-fessura	Ri-fessura	Rottura

2.3 Risultati

2.3.1 Prove di sorptività

Le due diverse miscele si sono comportate in modo simile dopo i ripetuti cicli di re-fessurazione. In particolare, si può osservare che il recupero per la miscela 2 (CO mix), solo con aggregati grossolani, è stato più efficace, mostrando valori simili dopo ogni ciclo di esposizione (Figura 1a). Infatti, i fini riciclati presentano un maggiore assorbimento di acqua (water uptake) rispetto ai corrispondenti aggregati grossolani riciclati (Zhao, 2015). Ancora più notevole è che il divario significativo tra l'assorbimento di acqua prima e dopo la prefessurazione era già stato recuperato dopo il primo mese. Il danno ripetuto indotto dalla refessurazione è stato effettivamente recuperato da entrambe le miscele fino a tre mesi di esposizione (Figura 1b).

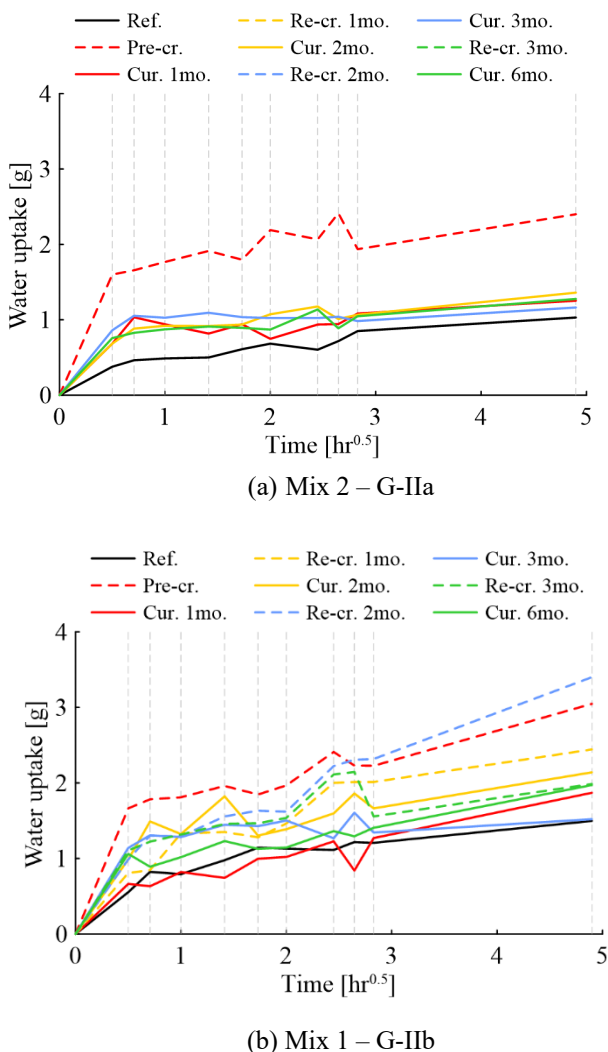


Figure 1. Sorptivity tests / Prove di sorptività

Durante il ciclo di esposizione finale, con il danno indotto a tre mesi e tre mesi aggiuntivi per la guarigione, il divario tra l'assorbimento di acqua iniziale e quello finale non è stato recuperato. Tuttavia, il va-

lore di assorbimento iniziale dopo il re-cracking è stato inferiore rispetto agli altri casi, riducendo così il margine per il recupero alla fine del periodo di esposizione. Risultati equivalenti sono stati ottenuti da Kannikachalam et al. (2023), confermando quindi la capacità di guarigione residua dell'UHPC quando riciclato in nuovo UHPC.

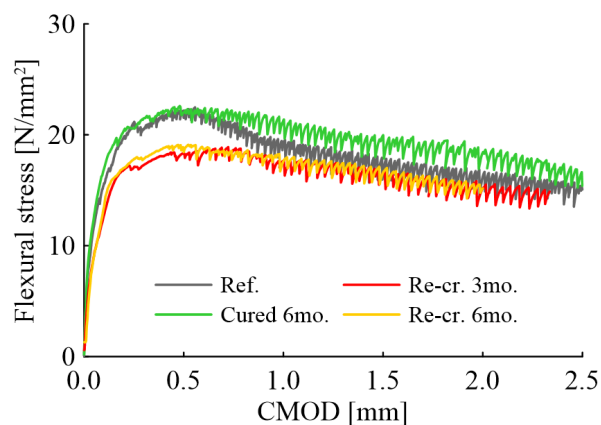
2.3.2 Prove di flessione

La prestazione flessionale dei due impasti è stata valutata mediante prove di flessione a 3 punti (EN 1015) al termine del periodo di esposizione. La Figura 2 mostra le curve sperimentali a rottura trascurando l'apertura residua della fessura risultante dai processi di pre-fessurazione e, dove applicato, re-fessurazione. La miscela con fini riciclati potrebbe recuperare completamente la resistenza alla flessione iniziale dopo il danno indotto dalla prefessurazione e sei mesi di esposizione continua nella soluzione di cloruro (Figura 2a). Inoltre, quando ai campioni sono stati applicati ripetuti cicli di fessurazione, le prestazioni sono state riacquistate solo parzialmente, con differenze minime tra tre e sei mesi. Anche il ramo iniziale elastico-indurente della risposta flessionale ha subito una leggera diminuzione della rigidità a causa del danneggiamento ripetuto. Al contrario, il mix con soli aggregati riciclati (CO mix) potrebbe preservare le sue prestazioni flessionali indipendentemente dalle condizioni di danneggiamento (Figura 2b). Inoltre, il ramo di indurimento della curva mostra un notevole aumento della rigidità, associato alle proprietà dei precipitati che sigillano le fessure durante il tempo di indurimento (Davolio, 2023). Gli effetti negativi dei fini riciclati sulle proprietà di frattura rispetto agli aggregati grossolani riciclati hanno confermato i risultati precedenti di Xiao et al. (2022).

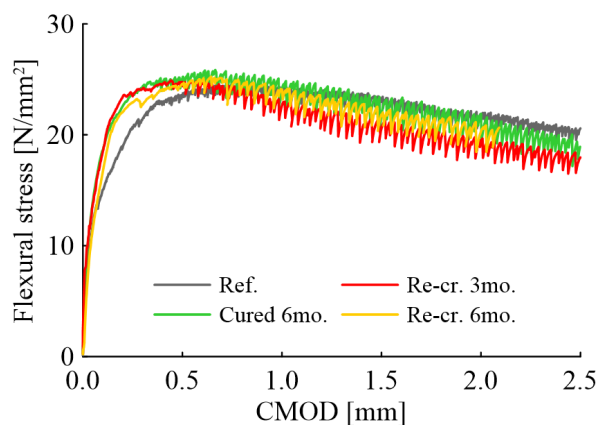
3 UTILIZZO DI GEOMATERIALI DI SCARTO DELLE MINIERE DI CARBONE (CMWG)

3.1 Materiali e metodi

In questo studio sono state svolte prove su calcestruzzi e malte in cui gli aggregati naturali sono stati sostituiti da aggregati monoriciclati o biriciclati provenienti dai siti minerari di Poltegor, Marcel (Polonia) e Subterra (Spagna). Gli aggregati monoriciclati sono scarti dell'attività di estrazione del carbone (Coal Mining Waste, CMW), mentre gli aggregati biriciclati provengono dalla frantumazione di calcestruzzo (Construction Demolition Waste, CDW) in cui sabbia e ghiaia sono state sostituite parzialmente con CMW (Figura 3).



(a) Miscela 1 (CF mix)



(b) Miscela 2 (CO mix)

Figure 2. Flexural strength tests / Prove a flessione



Figura 3. Scarti di miniere di carbone / Coal Mine Waste (CMW)

Il lavoro è stato svolto su scale differenti valutando la sostituzione in volume della sola frazione fine nella malta (FO mix), della frazione fine e grossolana (FC mix) e della sola frazione grossolana nel calcestruzzo (CO mix).

Nelle malte la sabbia è stata sostituita con la frazione fine di CMW per il 25%, 50% e 100%, mentre per il calcestruzzo sono state considerate le seguenti sostituzioni: (a) campione di riferimento; (b) sostituzione del 25% della frazione grossolana con CMW; (c) sostituzione del 13% della frazione fine e 13% grossolana con CMW; (d) sostituzione del 30% della frazione grossolana con aggregati bi-riciclati; (e) due mix sostituzione del 15% della frazione fine e 15% grossolana con aggregati bi-riciclati di diversa provenienza. Le Tabelle 3 e 4 mostrano i mix design

della malta e del calcestruzzo di riferimento rispettivamente.

3.2 Programma sperimentale

Per le malte le prove svolte sono state: prove a flessione e compressione su travette piccole 40x40x160mm secondo lo standard EN 12390-5 a 1, 7, 28 e 70 giorni di distanza dal getto. Inoltre sono state svolte prove di gelo e disgelo. Tre provini per ogni tipologia di getto sono stati sottoposti a cicli di gelo-disgelo all'interno di una camera climatica in cui si effettuano cicli di temperatura. I provini sono sottoposti per una settimana ad una umidità relativa non inferiore al 90% e ad una temperatura di $38 \pm 2^\circ\text{C}$ e successivamente a 20 cicli di gelo-disgelo.

Ciascun ciclo consiste di almeno 4 ore a $-18 \pm 1^\circ\text{C}$, seguite da 12 ore in una camera umida (umidità relativa non inferiore al 90%, temperatura $38 \pm 2^\circ\text{C}$).

Alla fine dei 20 cicli di gelo-disgelo, il campione viene controllato visivamente per riscontrare eventuali alterazioni superficiali, come erosioni, desquamazioni, fessurazioni e screpolature.

Dopo 21 giorni, i provini vengono prelevati dalla camera e successivamente provati a flessione e compressione. I campioni sono stati controllati visivamente e non si sono riscontrate alterazioni superficiali.

Le prove sono state effettuate contemporaneamente anche su campioni rimasti in camera di maturazione per 70 giorni e non sottoposti a ciclo di gelo e disgelo. Questo consente le variazioni di resistenza tra i provini che hanno subito cicli di temperatura e quelli che hanno continuato imperturbati il processo di maturazione.

Per quanto riguarda ai calcestruzzi, nella Tabella 5 si riportano le prove eseguite per ciascuno dei tre getti di calcestruzzo.

Table 3. Reference mortar mix design / Mix design della malta di riferimento

Constituents	kg/m ³
Cement	330
Sand	964
Filler	77
Water	158
Superplasticizer	1.98

Table 4. Reference concrete mix design / Mix design del calcestruzzo di riferimento

Constituents	kg/m ³
Cement	330
Sand	964
Coarse aggregate	896
Filler	77
Water	158
Superplasticizer	1.98

Table 5. Experimental program for FC and CO concrete mixes / Programma sperimentale per i calcestruzzi (FC and CO)

Test	Specimen type	Number	Testing ages
Compressive strength*	Cubes 100x100x100mm	15	1, 3, 7, 28, 60 days
Carbonation	Cubes 100x100x100mm	15	1, 3, 6, 9, 12 months
Chloride penetration	Cylinders (d100x100mm)	15	1, 3, 6, 9, 12 months
Rheometer	-		

*These tests were also performed for reference mix

3.3 Risultati sperimentali

3.3.1 Malte

Nella Figura 4 sono riportati i valori di resistenza a compressione delle malte per i calcestruzzi di riferimento e per le malte con diversi percentuali di sostituzione. Si può osservare che la resistenza a compressione dei campioni è inversamente proporzionale alla percentuale di sostituzione, con una diminuzione massima rispetto al riferimento REF del 23% per FO_50% a 28 e 70 giorni di maturazione e del 47% per il FO_100% a 1 e 3 giorni.

La Figura 5 riporta i valori di resistenza a flessione. Per quanto riguarda il confronto tra i getti con diverse percentuali di sostituzione, si può notare come la resistenza a flessione sia inversamente proporzionale alla quantità di CMW presenti, con una diminuzione massima delle resistenze rispetto al riferimento REF del 13% per FO_25% a 70 giorni di maturazione, del 25% per FO_50% a 7 e 70 giorni di maturazione e del 49% per FO_100% a 7 giorni.

A seguito dei cicli di gelo e disgelo per tutte le malte si assiste ad una diminuzione della resistenza a flessione, massima per FO_25%, mentre per la prova di compressione si osserva un incremento del valore di resistenza, ad eccezione di FO_100% (Tabella 6).

L'incremento di resistenza a compressione in seguito a cicli di temperatura è stato osservato anche da García-Giménez et al. (2018) e indica che, nonostante le condizioni avverse, il cemento ha continuato ad idratarsi. La maggiore porosità dell'aggregato CMW rispetto a quello naturale può aver determinato la formazione di microcamere d'aria mitigando così l'effetto dei cicli di temperatura e i conseguenti fenomeni espansivi sulla matrice cementizia.

La sostituzione ottimale per quanto riguarda la resistenza a cicli di temperatura si rivela essere quella al 50%, che ottiene il più alto incremento a compressione e la minore perdita di resistenza a flessione escludendo la malta FO_100%. Quest'ultima, infatti, parte da valori più bassi di resistenza e dunque risente meno dei cicli di temperatura.

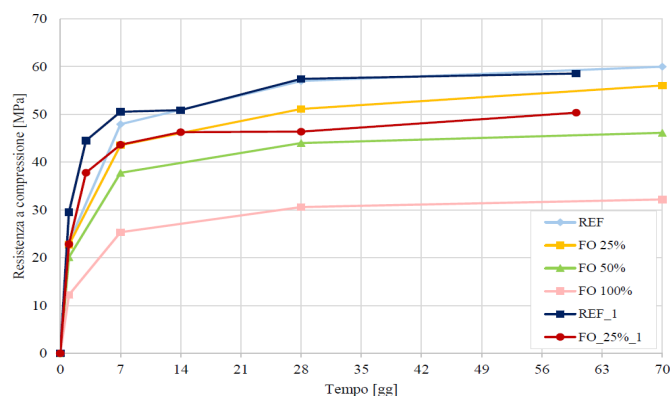


Figure 4. Compressive strength for mortars / Resistenza a compressione nei provini di malta

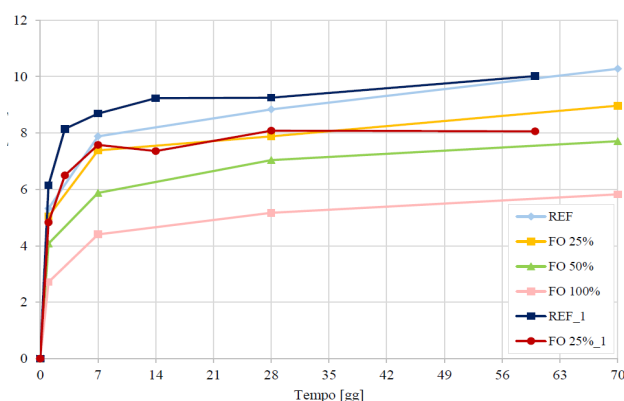


Figure 5. Flexure strength for mortars / Resistenza a flessione sui provini di malta

Table 6. Mechanical properties after freeze/thaw cycles / Proprietà meccaniche dopo cicli gelo-disgelo

Test		REF	25%	50%	100%
Comp. strength [MPa]	Senza cicli gelo-disgelo	59.98	56.05	46.14	32.19
	Con cicli gelo-disgelo	62.64	56.66	48.69	31.83
	Variazione (%)	+4.4%	+1.1%	+5.5%	-1.1%
Flexural strength [MPa]	Senza cicli gelo-disgelo	10.28	8.97	7.71	5.83
	Con cicli gelo-disgelo	9.07	7.52	7.05	5.42
	Variazione (%)	-11.8%	-16.2	-8.6%	-6.9%

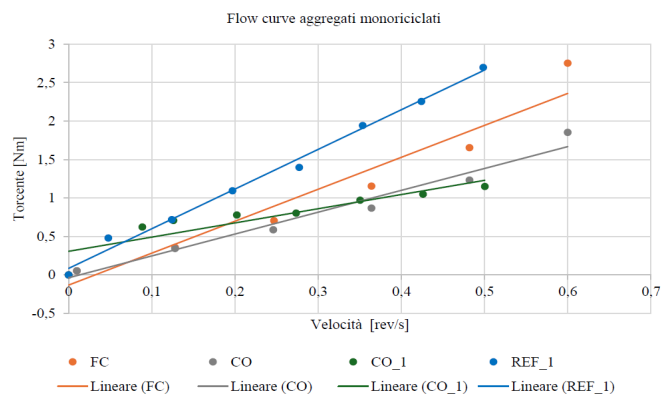


Figure 6. Flow curve / Curva torcente vs velocità

3.3.2 Calcestruzzi

Le prove reometriche sono state eseguite solo per le miscele con aggregati monoriciclati (FC e CO). Per il getto FC sia lo stress growth test che il flow curve test sono stati ripetuti due volte, ottenendo i risultati indicati con FC_a e FC_b. Per il getto CO, invece, sono stati eseguiti due stress growth test (CO_a e CO_b) e tre flow curve test (CO_a, CO_b e CO_c).

Nella Figura 6 si riporta la flow curve, ossia la serie di punti corrispondenti a velocità-momento torcente per i getti FC, CO, CO_1 e REF. Le rette sono ottenute tracciando una linea di tendenza per ciascuna successione di punti.

La viscosità plastica μ è rappresentata dalla pendenza delle linee di tendenza, mentre la tensione di snervamento τ_0 è data dall'intersezione delle rette con l'asse delle ordinate.

Le curve relative ai getti FC e REF_1 hanno pendenza simile ed è ragionevole concludere che i due getti siano caratterizzati da viscosità plastica confrontabile. La minore pendenza delle curve dei getti CO e CO_1 indica, invece, una migliore capacità delle miscele a fluire e a deformarsi sotto sforzo.

La tensione di scorrimento τ_0 per il getto con aggregato riciclato sia grossolano che fine (FC) è inferiore di quella ottenuta per i getti con solo aggregati riciclati grossolano (CO e CO_1).

La Fig. 7 mostra i valori di resistenza a compressione. I calcestruzzi con aggregati monoriciclati vengono identificati tramite la lettera (m), mentre quelli con aggregati biriciclati con la lettera (b).

Le resistenze a compressione sviluppate dai getti con aggregati monoriciclati parzialmente sostituiti da CMW (getti m_FC e m_CO) sono state confrontate con quelle dei getti m_FC_1, m_CO_1, m_CO_P1, m_CO_P2 con stessa tipologia e sostituzione dell'aggregato riciclato e con i getti b_FC_SUB, b_FC_POL, b_CO_SUB con aggregati biriciclati ottenuti dalla frantumazione di calcestruzzo con aggregati CMW (Fig. 7). I getti di riferimento vengono indicati con le sigle REF e REF_1. Della Fig. 7 sembra esserci una correlazione tra provenienza degli aggregati (sia mono che biriciclati) e granulometria dell'aggregato sostituito.

Complessivamente i provini con aggregati biriciclati hanno resistenze simili e mostrano prestazioni meccaniche intermedie rispetto alle miscele con aggregati monoriciclati da Subterra (limite superiore) e Poltegor (limite inferiore).

Per quanto riguarda ai risultati delle prove di carbonatazione (Figura 8) secondo la EN 13295, i risultati migliori si ottengono per calcestruzzi con aggregati bi-riciclati ottenuti dalla frantumazione di calcestruzzi con aggregati CMW da Subterra.

Per quanto riguarda alla penetrazione di cloruri (Figura 9) secondo la EN 9944 si osserva un miglioramento della resistenza (diffusione) ai cloruri per calcestruzzi in cui gli aggregati naturali sono stati

sostituiti da aggregati provenienti dagli scarti di miniere di carbone (CMW). Gli aggregati provenienti da Subterra rispetto a quelli provenienti da Poltegor, sembrano influire positivamente sulla resistenza ai cloruri oltre che sui valori di resistenza a compressione. Questo potrebbe essere dovuto ad un maggiore sviluppo dei prodotti di idratazione e dunque alla formazione di una porosità più affinata o ad una maggiore densità degli aggregati.

Inoltre l'immersione a 25 giorni di maturazione di b_CO_SUB ha influito positivamente sulla resistenza a diffusione (come ci si poteva aspettare) ma sembra influire di meno dopo i 6 mesi di immersione. A 6 mesi di immersione, infatti, i valori di area attaccata sono simili per tutti i provini, compresa la miscela b_FC_SUB immersa a 4 giorni di maturazione, ad eccezione di REF.

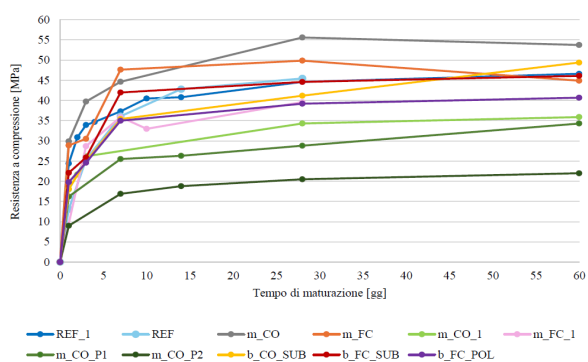


Figure 7. Compressive strength values for concretes / Resistenza a compressione su calcestruzzi

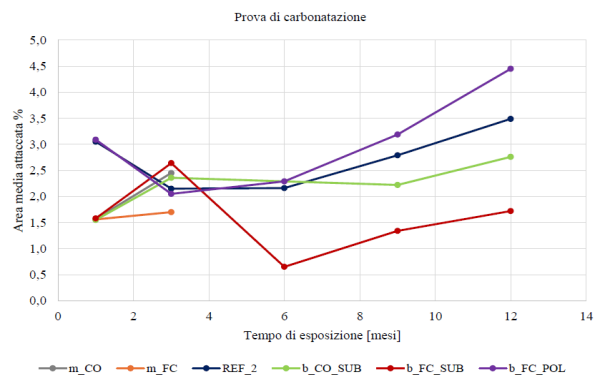


Figure 8. Results of natural carbonation tests in concrete specimens / Risultati prove di carbonatazione su calcestruzzi

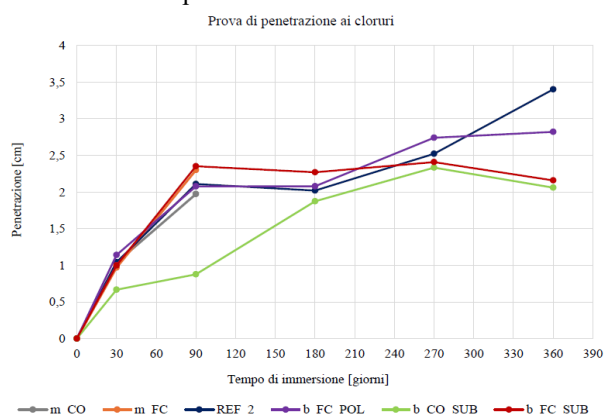


Figure 9. Chloride penetration tests / Prove di penetrazione di cloruri

4 RICICLO DI MICROPARTICELLE POLIMERICHE, RESIDUI DELL'INDUSTRIA DEL COATING E DELLE VERNICI

La ricerca sperimentale riportata in questa sezione ha l'obiettivo di verificare la fattibilità di un percorso in grado di utilizzare fine particelle polimeriche, nello specifico una resina poliestere (resina PE) che è un prodotto di scarto dell'industria dei rivestimenti, come sostituzione parziale della sabbia ed eventualmente delle particelle di legante, previo processo di irradiazione gamma simile a quello utilizzato per la sanificazione dei contenitori nell'industria alimentare, anche la loro efficacia nel fungere da semi del idratazione del cemento. Questa ricerca prende come spunto lo studio condotto dai ricercatori del MIT (Schaefer et al., 2018), in cui l'esposizione dei rifiuti PET particelle all'irradiazione gamma è stata studiata come metodo per migliorare le loro prestazioni meccaniche.

Nello specifico, nel nostro caso è stata studiata l'influenza di diversi dosaggi di irradiazione gamma (10 kGy o 100 kGy) sulle particelle di resina PE.

Tuttavia, i risultati hanno portato alla conclusione che, anche con una sostituzione di solo il 5% in volume del cemento calcareo Portland (PLC) nell'impasto, il processo non migliora significativamente le prestazioni meccaniche del cemento.

In una seconda fase, le particelle non irradiate sono state impiegate in sostituzione del legante e/o sabbia in diversi rapporti di sostituzione in volume (rispettivamente 10% e 20%) nell'impasto delle malte formulate a partire da tipiche miscele di calcestruzzo autocompattante (SCC). Infine, una volta individuata la tipologia più adeguata e livello di sostituzione come miglior compromesso tra mantenimento delle prestazioni e volume di particelle aggiunto, è stato eseguito lo sviluppo in scala fino alla progettazione della miscela di calcestruzzo.

Con un livello di sostituzione del cemento con particelle di resina PE del 20% in volume, i risultati hanno fornito una riduzione limitata delle proprietà meccaniche (Tabelle 7 e 8), evidenziando la possibilità di riutilizzare quantità economicamente sostenibili di resine PE nel calcestruzzo pur potendo utilizzare il materiale per applicazioni strutturali (Aravecchia et al., 2023).

Table 7. Compressive strength values for concretes / Programma sperimentale

Mix / Age	1 day	3 days	7 days	28 days	56 days
REF	22.58 (0.52)	34.85 (1.49)	38.93 (2.54)	46.63 (2.21)	47.42 (1.86)
REF-20%	17.44 (0.48)	26.87 (1.15)	30.86 (0.66)	35.26 (3.89)	37.27 (0.18)

*These tests were carried on cubics (100x100x100mm)

Table 8. Flexural strength values for concretes / Programma sperimentale

Mix / Age	7 days	28 days	56 days
REF	3.32 (0.04)	4.15 (0.12)	5.12 (0.17)
REF-20%	2.71 (0.14)	3.28 (0.49)	4.03 (0.17)

*These tests were carried on prismatic specimens (100x100x500 mm)

5 CONCLUSIONI

5.1 UHPC riciclato

- The water absorption that significantly increased after the pre-cracking process was efficiently reduced to values close to the reference at time zero owing to the self-healing process in the chloride solution.

- The mechanical performance was completely recovered after six months of continuous exposure for both mixes. Nonetheless, the repeated induced cracking was fully recovered only by the mix with recycled coarse aggregates, regardless of the exposure time.

- The healing process provided additional stiffness to both mixes.

- L'assorbimento d'acqua che aumentava significativamente dopo il processo di pre-fessurazione è stato efficacemente ridotto a valori prossimi al riferimento al tempo zero grazie al processo di autoriparazione nella soluzione di cloruro.

- Le prestazioni meccaniche sono state completamente recuperate dopo sei mesi di esposizione continua per entrambe le miscele. Tuttavia, la fessurazione ripetuta indotta è stata completamente recuperata solo dalla miscela con aggregati grossi riciclati, indipendentemente dal tempo di esposizione.

- Il processo di guarigione ha fornito ulteriore rigidità ad entrambe le miscele.

5.2 Utilizzo di geomateriali di scarto delle miniere di carbone

For concretes using CMW can be confirmed that:

- the presence of the mono-recycled aggregate increased the compressive strength compared to the reference mix;

- the replacement of both fine and coarse aggregates with mono- and bi-recycled ones increased the resistance to carbonation, obtaining better results compared to the reference mix;

- replacing the natural coarse aggregate with mono- and bi-recycled coarse aggregate increased

resistance to chlorides, obtaining better results than the reference.

Per i calcestruzzi si può affermare che:

- la presenza dell'aggregato monoriciclato ha incrementato la resistenza a compressione rispetto al riferimento;
- la sostituzione di aggregati sia fini sia grossolani con quelli mono e biriciclati aumenta la resistenza a carbonatazione, consentendo di ottenere risultati migliori del calcestruzzo di riferimento;
- la sostituzione della ghiaia con l'aggregato grossolano mono e biriciclato aumenta la resistenza alla diffusione dei cloruri, consentendo di ottenere risultati migliori del calcestruzzo di riferimento.

5.3 Riciclo di microparticelle polimeriche

The use of polyester resin plastic particles as partial replacement of natural constituents in cement-based materials has been possible. As a matter of fact is a valid application to reduce the carbon footprint of these materials since the amount of non-recycled plastic waste diminishes while an acceptable level of performance of the obtained cementitious composite is maintained.

Il presente studio ha dimostrato che l'uso di particelle plastiche di resina poliestere nei materiali a base di cemento come sostituzione parziale dei loro costituenti naturali, in particolare il cemento Portland ordinario, potrebbe essere una valida applicazione per ridurre l'impronta di carbonio di questi materiali e diminuire la quantità dei rifiuti plastici non riciclati, mantenendo un livello accettabile di prestazione del composito cementizio ottenuto.

RINGRAZIAMENTI

L'attività di ricerca riportata in questo documento è stata svolta all'interno dei seguenti progetti di ricerca: ReSHEALience (Rethinking Coastal Defence and Green-energy Service infrastructures through enHancEd-durAbiLity high-performance cement-based materials, GA 760824) e MINRESCUE (From Mining Waste to Valuable Resource: New Concepts for a Circular Economy, GA 899518) che hanno ricevuto finanziamenti dal Fondo Europeo Programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea. Si ringrazia anche al DG Joint Research Center (Ispira, Italia). In particolare la prosecuzione delle attività sul "doppio riciclo" di calcestruzzi con CMWGs è stata resa ed è possibile grazie al progetto NORMA: Naturally Occurring Radioactive Materials Activities. Attività per lo sviluppo di strategie tecnico-scientifiche e socioeconomiche per una efficace implementazione della normativa di radioprotezione, finanziato da INAIL(Bando BRiC, 2022).

Va inoltre un gentile ringraziamento per il supporto fornito durante l'esecuzione degli esperimenti, sig. Paolo Broglia e arch. Giuseppe Pappadà del Laboratorio Prove su Materiali, Costruzioni e Strutture (LPMSC) del Politecnico di Milano.

REFERENCES

- N. Aravecchia, J. Bañuls-Ciscar, A. Caverzan, G. Ceccone, E. Cuenca, L. Ferrara, K. Grigoriadis, P. Negro, M. Rodri-quens (2023), "On the feasibility of using Polyester (PE) waster particles from metal coating industry as a secondary raw materials in concrete" *Cleaner Materials*, vol. 9, no. 100193.
- M. Davolio, S. Al-Obaidi, M.Y. Altomare, F. Lo Monte, L. Ferrara, A methodology to assess the evolution of mechanical performance of UHPC as affected by autogenous healing under sustained loadings and aggressive exposure conditions, *Cem Concr Compos Submitted* 30/12/2022 (2023).
- R. García-Giménez, M. Frías, I. Arribas, I. Vegas, R. V. de la Villa, e V. Rubio, «Freeze-thaw effect on the durability of binary cements containing activated coal-mining waste», *Construction and Building Materials*, vol. 190, pp. 140–149, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.090.
- J. Lehne and F. Preston, "Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete," Chatham House, 2018.
- N.P. Kannikachalam, D. di Summa, R.P. Borg, E. Cuenca, M. Parpanesi, N. De Belie, L. Ferrara, Assessment of Sustainability and Self-Healing Performances of Recycled Ultra-High-Performance Concrete, *ACI Struct J* 120 (2023) 117–132. <https://doi.org/10.14359/51737336>.
- Schaefer, C.E., Kupwade-Patil, K., Ortega, M., Soriano, C., Büyük"oztürk, O., White, A.E., Short, M.P., 2018. Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint. *Waste Manag.* 71, 426–439.
- United Nations, 2021. "2021 Global Status Report for Buildings and Construction", UN Environ. Program.
- J. Xiao, Y. Tang, H. Chen, H. Zhang, B. Xia, Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete, *J Clean Prod* 366 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132895>.
- Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Xu, Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars, *Constr Build Mater* 81 (2015) 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>.