

Studio della corrosione da carbonatazione di armature in calcestruzzi con aggregati riciclati di asfalto da pavimentazioni (RAP)

M. Carsana, F. Lollini, E. Redaelli

A fronte della necessità di realizzare costruzioni ecosostenibili, aumenta l'interesse verso aggregati per calcestruzzo, alternativi a quelli naturali, tra cui il fresato derivante dalla manutenzione delle pavimentazioni (*Recycled Asphalt Pavement*, RAP). La sua disponibilità e la compatibilità con gli aggregati ordinari ne rendono l'impiego potenzialmente sostenibile, anche se il loro effetto sulla durabilità delle strutture in calcestruzzo armato non è ancora chiaro. Nell'ambito del progetto RAPCON, finanziato da Fondazione Cariplo, si è svolto uno studio sperimentale che ha considerato vari tipi di armature a contatto con calcestruzzi differenti per percentuale di RAP, tipo di cemento e rapporto acqua/cemento. Questa nota discute la resistenza alla carbonatazione dei calcestruzzi studiati e il comportamento a corrosione delle armature in essi inglobate, evidenziando l'importanza di progettare adeguatamente le miscele con RAP per realizzare strutture in calcestruzzo armato durevoli in funzione delle condizioni di aggressività ambientale.

PAROLE CHIAVE: ASFALTO RICICLATO DA PAVIMENTAZIONI (RAP), CALCESTRUZZO, ECONOMIA CIRCOLARE, CORROSIONE, CARBONATAZIONE;

INTRODUZIONE

Il calcestruzzo ha un forte impatto ambientale, legato sia alla produzione del cemento Portland sia al consumo di risorse naturali come acqua e aggregati. Per favorire uno sviluppo sostenibile nel settore delle costruzioni [1] è necessario valutare l'impiego di leganti alternativi (per esempio, cementi a basso contenuto di clinker o con composizione diversa dal Portland [2, 3]), oltre alla sostituzione dell'acqua di impasto, con acque reflue degli impianti di produzione del calcestruzzo o da altre fonti, o degli aggregati naturali con materiali provenienti da rifiuti da costruzione e demolizione (C&DW) [4]. Visto che gli aggregati occupano un volume di circa il 60-75% del calcestruzzo, è chiaro che la loro sostituzione con materiali di riciclo compatibili consentirebbe anche di far rientrare nel ciclo produttivo delle miscele cementizie notevoli quantità di materiali che altrimenti andrebbero smaltiti. Di conseguenza, aumenta l'interesse nei confronti di aggregati alternativi, grazie allo sfruttamento di scarti prodotti in altri processi; tra questi, anche il fresato derivante dalla manutenzione delle pavimentazioni in asfalto (*Recycled Asphalt Pavement*, RAP). Il RAP rappresenta un'interessante opportunità: è costituito da materiale lapideo o scorie naturali legate dall'asfalto ed è fresato dalle pavi-

**Maddalena Carsana, Federica Lollini,
Elena Redaelli**

Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria
Chimica "G. Natta", Milano, Italia

mentazioni stradali; pertanto, si presenta in granuli con forma e distribuzione granulometrica simili a quelle degli aggregati naturali. Considerato che solo una modesta quantità di tale prodotto è riutilizzata per realizzare pavimentazioni e la maggior parte è immagazzinata in impianti di produzione di asfalto o smaltita in discarica, la sua notevole disponibilità e la compatibilità con gli aggregati ordinari ne rendono l'impiego potenzialmente sostenibile nel settore delle costruzioni. In passato, diverse ricerche ne hanno indagato l'utilizzo in parziale sostituzione degli aggregati naturali nel calcestruzzo [5, 6]; tuttavia, alcuni aspetti devono ancora essere verificati, in particolare, per quanto riguarda la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato.

A livello normativo questo tipo di aggregato non è ancora ammesso per la realizzazione di calcestruzzo, di fatto, a causa della mancanza di queste informazioni e di esperienze d'uso.

Nell'ambito del progetto RAPCON, finanziato da Fondazione Cariplo per promuovere la circolarità nel settore dei materiali da costruzione, è stato svolto uno studio sperimentale con l'obiettivo di valutare l'uso di RAP per la realizzazione di strutture in calcestruzzo armato durevoli [7-10]. Sono state svolte prove sperimentali per studiare il comportamento alla corrosione di diversi tipi di armature (acciaio zincato, acciaio inossidabile – sia austenitico sia duplex – e, per confronto, acciaio al carbonio) inglobate in calcestruzzi differenti per percentuale di sostituzione dell'aggregato ordinario con RAP (60% e 100%), oltre che per tipo di cemento (un cemento Portland al calcare e un cemento pozzolanico) e rapporto acqua/cemento (0,45 e 0,65).

Questa nota discute i risultati di prove sperimentali a lungo termine volte a valutare la resistenza dei calcestruzzi studiati alla penetrazione dell'anidride carbonica (in condizioni di esposizione naturale e accelerata) e il comportamento a corrosione da carbonatazione delle armature in essi inglobate. Si evidenzia l'importanza di progettare adeguatamente le miscele con RAP per realizzare strutture in calcestruzzo armato durevoli tenendo conto delle condizioni di aggressività ambientale.

METODOLOGIA

Per le prove sperimentali sono stati confezionati vari calcestruzzi, che differiscono per la percentuale di sostit-

tuzione dell'aggregato naturale, con lo scarto prodotto dalla fresatura delle pavimentazioni di asfalto (RAP) negli interventi di manutenzione stradale. Il RAP è stato fornito da un'azienda italiana (Amplia Infrastructure S.p.A., Roma, Italia), proviene dal deposito di Anagni (FR) ed è stato utilizzato "tal quale" in sostituzione parziale (60%) e totale (100%) dell'aggregato naturale (calcare frantumato di Zandobbio con diametro massimo, D_{max} , pari a 15 mm). Il RAP è stato vagliato a un D_{max} confrontabile e presenta una distribuzione granulometrica simile alla Fuller. La caratterizzazione chimica effettuata su diversi campioni evidenzia che il RAP considerato ha un contenuto trascurabile di cloruri e di solfati, rispettivamente pari a 3,3 e 1,9 mg/L [7]. Per il confezionamento dei calcestruzzi sono stati considerati due rapporti acqua/cemento (a/c , pari a 0,45 e 0,65, di seguito indicati con le lettere a e b) e due tipi di cemento (CEM II/A-LL 42.5R e CEM IV/A (P-V) 42.5N-SR, entrambi forniti da Buzzi S.p.A., e rispettivamente indicati nel testo con L e P. A parità di volume di pasta cementizia, i calcestruzzi con rapporto a/c pari a 0,45 presentano 357 kg/m³ di cemento, 161 kg/m³ di acqua e 1980 kg/m³ di aggregato totale, mentre quelli con rapporto a/c superiore sono realizzati con 283 kg/m³ di cemento e 184 kg/m³ di acqua. È stato impiegato un additivo superfluidificante (SF) di tipo naftalene solfonato per raggiungere una classe di lavorabilità S4. Per ogni tipo di cemento e rapporto a/c sono stati realizzati anche calcestruzzi di riferimento con solo aggregato naturale (0% RAP). La tabella 1 riporta la composizione delle 12 miscele considerate per il seguente studio con relativa nomenclatura. Per ogni miscela sono stati confezionati un medesimo numero di provini, armati e non. Al fine di valutare armature alternative, più appropriate quando il calcestruzzo RAP è esposto ad ambienti aggressivi e/o si richiedono estese vite di servizio, ogni provino armato (Fig. 1) presenta all'interno quattro differenti tipi di armature: acciaio al carbonio (fornito da Feralpi Group e sabbiato successivamente in laboratorio), acciaio zincato (la cui zincatura è stata applicata da Nord Zinc), oltre agli acciai inossidabili di tipo 23-04 (austeno-ferritico) e 304 (austenitico) entrambi forniti da Acciaierie Valbruna. Le armature di acciaio zincato e quelle inossidabili, più resistenti alla corrosione, potrebbero costituire un'alternativa più economica e sostenibile per realizzare strutture armate con calcestruzzo RAP più durevoli.

Tab.1 - Composizione delle miscele di calcestruzzo / *Composition of concrete mixes.*

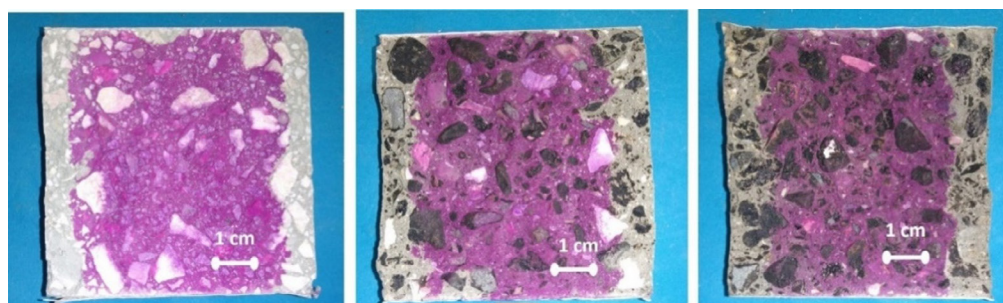
Calcestruzzo	Tipo cemento	Rapporto a/c	RAP (%)	Cemento (kg/m ³)	Acqua (kg/m ³)	Aggregati naturali (kg/m ³)	Aggregati RAP (kg/m ³)	Additivo SF (kg/m ³)
L-a-N	CEM II/A-LL 42.5R	0,45	0	357	161	1980	-	6,5
L-a-R60			60	357	161	756	1134	8,7
L-a-R			100	357	161	-	1826	10,6
L-b-N		0,65	0	283	184	1981	-	4,5
L-b-R60			60	283	184	755	1134	2,8
L-b-R			100	283	184	-	1827	4,7
P-a-N	CEM IV/A(P-V) 42.5N-SR	0,45	0	357	161	1980	-	9,8
P-a-R60			60	357	161	756	1134	9,9
P-a-R			100	357	161	-	1826	7,1
P-b-N		0,65	0	283	184	1981	-	3,8
P-b-R60			60	283	184	755	1134	4,1
P-b-R			100	283	184	-	1827	4,0



(a)



(b)

Fig.1 - Aspetto di un provino in calcestruzzo armato (a) e misura del potenziale e della velocità di corrosione durante le prove di bagnamento (b) / *Visual aspect of a reinforced concrete specimen (a) and measurement of corrosion potential and corrosion rate during wetting test (b).*

(a)

(b)

(c)

Fig.2 - Aspetto della superficie di frattura di provini in calcestruzzo P-a-N (a), P-a-R60 (b) e P-a-R (c) sottoposta alla prova alla fenoltaleina dopo 77 giorni di esposizione in condizioni di carbonatazione accelerata (3% CO₂) / *Visual aspect of the fracture surface of concrete specimens P-a-N (a), P-a-R60 (b) and P-a-R (c) subjected to phenolphthalein test after 77 days of exposure in accelerated carbonation conditions (3% CO₂).*

I provini armati sono stati opportunamente equipaggiati con elettrodi interni per poter effettuare misure di potenziale e velocità di corrosione (quest'ultima tramite il metodo della polarizzazione lineare). Le armature presentano un diametro di 16 mm e sono state posizionate nel provino in modo di avere uno spessore di copriferro di 15 mm.

Le prove sperimentali hanno lo scopo di determinare i parametri correlati alla durabilità e consentono di valutare il comportamento a lungo termine del calcestruzzo RAP armato, in condizioni di esposizione che simulino quelle reali. Per questo motivo i provini armati, realizzati con diversi tipi di acciaio e calcestruzzi (con e senza RAP), sono stati carbonatati ed esposti a varie condizioni termo-igrometriche ($T = 20^{\circ}\text{C}$, U.R. = 80% e 90%), oltre a cicli di bagnamento e asciugamento in laboratorio.

Inoltre, sono stati confezionati provini cubici (lato 100 mm) per misurare la profondità di carbonatazione, tramite la prova alla fenolfaleina (Fig. 2), sia in condizioni naturali (esterno non riparato nell'ambiente urbano di Milano) sia in condizioni accelerate (concentrazione di $\text{CO}_2 = 3\%$, $T = 20^{\circ}\text{C}$, U.R. = 65%). I provini (armati e non) sono stati stagionati a umido per sette giorni prima di essere esposti alle diverse condizioni.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Nel corso del progetto RAPCON è stato verificato che i calcestruzzi confezionati con aggregato RAP sono in gra-

do di passivare le armature e garantire nel tempo tali condizioni, dato il modesto contenuto di cloruri (pochi ppm) riscontrato nei campioni di fresato utilizzato per il confezionamento delle miscele [8]. Comunque, è stato evidenziato che la presenza di RAP nel calcestruzzo influenza il tempo di passivazione dell'acciaio al carbonio rallentandolo, anche se solo leggermente, rispetto a quanto accade in un calcestruzzo ordinario [8]. In relazione alla vita di servizio delle strutture in calcestruzzo armato, è necessario valutare, quindi, il comportamento a corrosione di armature inglobate in calcestruzzi con aggregato RAP qualora il calcestruzzo risulti esposto all'ambiente e subisca la carbonatazione. A tale scopo è importante valutare sia la resistenza alla carbonatazione di tali calcestruzzi sia le condizioni di corrosione delle armature inglobate una volta che questi calcestruzzi risultano carbonatati.

La figura 3 mostra l'interpolazione dei risultati sperimentali ottenuti in termini di profondità media di carbonatazione nel tempo per effetto dell'esposizione in condizioni esterne non riparate di diversi calcestruzzi, con e senza RAP, stagionati a umido per 7 giorni (a $T = 20^{\circ}\text{C}$ e U.R. > 95%).

I dati di penetrazione della carbonatazione sono stati misurati sui provini dopo sette mesi di esposizione naturale e interpolati secondo l'equazione (1):

$$s = K \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

dove s rappresenta la profondità di carbonatazione e t il tempo di esposizione.

In particolare, la figura 3a confronta l'avanzamento della carbonatazione di calcestruzzi realizzati con cemento al calcare (CEM II/A-LL 42,5R, linee continue), mentre la figura 3b si riferisce a quelli con cemento pozzolanico (CEM IV/A (P-V) 42,5N-SR, linee tratteggiate).

Si osserva che l'avanzamento della carbonatazione è inferiore nei provini confezionati con cemento al calcare rispetto a quelli con cemento pozzolanico, in cui la pozzolana potrebbe aver contribuito più lentamente alle reazioni di idratazione e, quindi, reso meno impervia la pasta cementizia. Anche il rapporto acqua/cemento influisce si-

gnificativamente sull'avanzamento della carbonatazione; a un maggiore rapporto a/c (pari a 0,65 e indicato mediante linee grigie) corrispondono spessori di carbonatazione superiori rispetto ad analoghi calcestruzzi con rapporto a/c pari a 0,45 e, quindi, meno porosi.

Come atteso, dopo quasi 2 anni (700 giorni) di esposizione all'esterno in condizioni naturali (Fig. 3), sono stati misurati comunque spessori carbonatati intorno alla decina di millimetri: in particolare, al circa 10 mm per i calcestruzzi con cemento al calcare e 15 mm per quelli con cemento pozzolanico.

I valori più elevati generalmente sono stati rilevati per i calcestruzzi con parziale o totale sostituzione degli ag-

gregati naturali, anche se non è possibile identificare una tendenza rispetto alla percentuale di RAP.

La resistenza all'avanzamento della carbonatazione dei materiali cementizi dipende dalla riserva di alcalinità, dalla permeabilità e dal contenuto di umidità della pasta cementizia [11]. Certamente la presenza di RAP nel calcestruzzo non modifica l'alcalinità della pasta cementizia; tuttavia, può influenzarne la porosità e l'umidità. Come eviden-

ziato in alcuni riferimenti bibliografici [5, 6], soprattutto la zona di transizione in prossimità degli aggregati RAP tende a presentare una maggiore porosità che potrebbe peggiorare la resistenza alla carbonatazione. Inoltre, la natura idrofobica degli aggregati RAP (riconducibile alla presenza di bitume sulla superficie stessa delle particelle) [12] potrebbe mantenere meno umida la pasta cementizia favorendo l'ingresso della CO_2 .

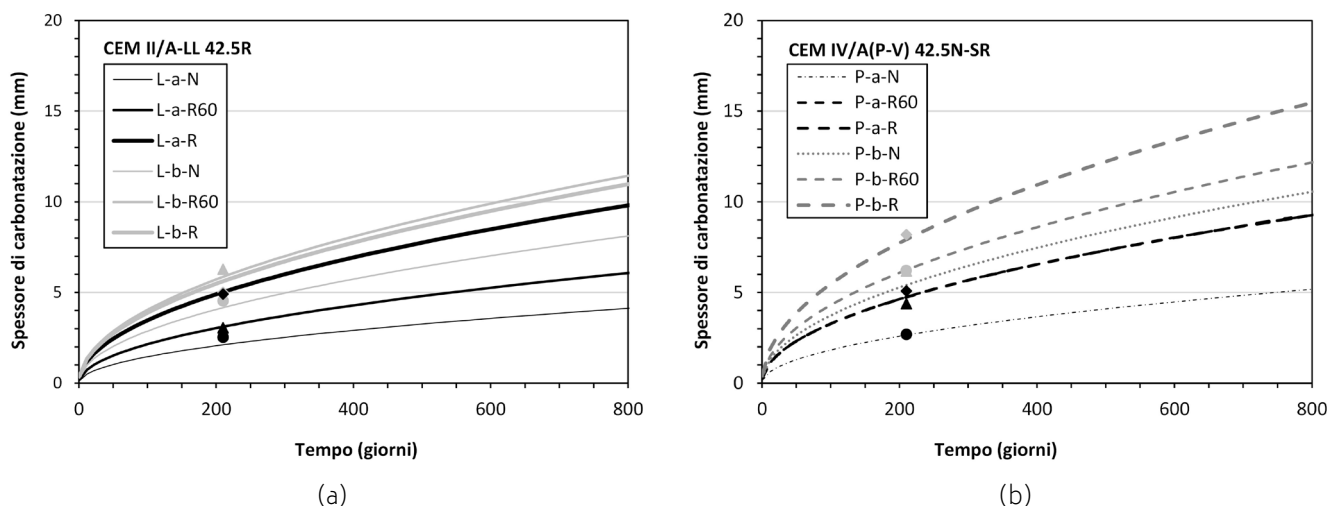


Fig.3 - Andamento della profondità di carbonatazione in condizioni valutate di esposizione naturali (esterno non riparato) di calcestruzzi confezionati con cemento CEM II/A-LL 42,5R (a) e CEM IV/A (P-V) 42,5N-SR (b) / *Trend of carbonation depth over time evaluated under natural exposure conditions (external unsheltered) on concretes made with cement CEM II/A-LL 42,5R (a) and CEM IV/A (P-V) 42,5N-SR (b).*

Per poter accelerare il processo di carbonatazione, analoghi provini di calcestruzzo sono stati esposti a una maggiore concentrazione di CO_2 , pari a 3% ($T = 20^\circ\text{C}$, U.R. = 65%). Dopo soli 77 giorni di esposizione in condizioni accelerate (Fig. 4a), per calcestruzzi con cemento al calcare e basso rapporto a/c (L-a-%RAP) sono stati misurati spessori medi di carbonatazione variabili fra 9 e 12 mm, mentre per i calcestruzzi con cemento pozzolanico e maggiore rapporto a/c (P-b-%RAP) si raggiungono spessori di carbonatazione di quasi 20 mm.

Per quantificare la resistenza alla carbonatazione e prevedere l'andamento della profondità della stessa, i dati ottenuti sono stati interpolati secondo l'equazione (1) ed è stato calcolato il coefficiente di carbonatazione dei diversi calcestruzzi, corrispondentemente alle diverse condizioni di esposizione.

La figura 4b mostra che i coefficienti di carbonatazione in condizioni di esposizione naturali (k_{nat} , variabili fra 2 e 12 $\text{mm}/\text{anno}^{0.5}$) e quelli in condizioni di esposizione accelerate (k_{acc} , decisamente superiori, con valori sino a 45 $\text{mm}/$

$\text{anno}^{0.5}$) sono correlati e principalmente influenzati dal rapporto a/c della pasta cementizia, piuttosto che dal contenuto di RAP.

La correlazione potrà essere sfruttata per determinare il comportamento a lungo termine del calcestruzzo esposto a un ambiente specifico, in funzione di quello in condizioni accelerate. Noto il k_{acc} dei diversi calcestruzzi, è stato possibile prevedere, e successivamente verificare tramite prelievi di carote di calcestruzzo, la completa carbonatazione dei provini armati esposti alle medesime condizioni accelerate.

Le prove di resistenza alla carbonatazione riportate in questa nota, insieme a quelle di assorbimento e di risalita capillare effettuate su analoghi calcestruzzi e discusse nel riferimento [12], non hanno evidenziato un significativo effetto del RAP con riferimento alla fase di innesco della corrosione. Tuttavia, le differenze riscontrate nella cinetica di passivazioni dell'acciaio al carbonio in calcestruzzo con RAP [8, 13] potrebbero influenzare la propagazione della corrosione da carbonatazione.

Una volta che il fronte di carbonatazione ha raggiunto le armature, i provini armati sono stati, quindi, esposti per giorni a vari cicli, differenti per condizioni di umidità relativa ($T = 20^\circ\text{C}$).

A titolo di esempio, la figura 5a mostra i risultati del monitoraggio effettuato in termini di potenziale di corrosione (in grigio) e velocità di corrosione (in nero) delle diverse armature inglobate nel calcestruzzo P-b-R60 durante l'esposizione alle seguenti condizioni: 80% U.R. e 20°C , 90% U.R. e 20°C , e ripetuti cicli di bagnamento (per 24 ore) e asciu-

gamento nei successivi sei giorni. Il dettaglio delle misure acquisite al termine dei cicli di bagnamento è riportato in figura 5b. Le figure 6-9 mostrano i valori medi e gli intervalli di variabilità del potenziale di corrosione (a) e della velocità di corrosione (b) ricavati a regime nelle diverse condizioni di esposizione a cui sono stati esposti i 12 provini in calcestruzzo armato dopo essere stati carbonatati, rispettivamente per le armature in acciaio al carbonio, acciaio zinca-

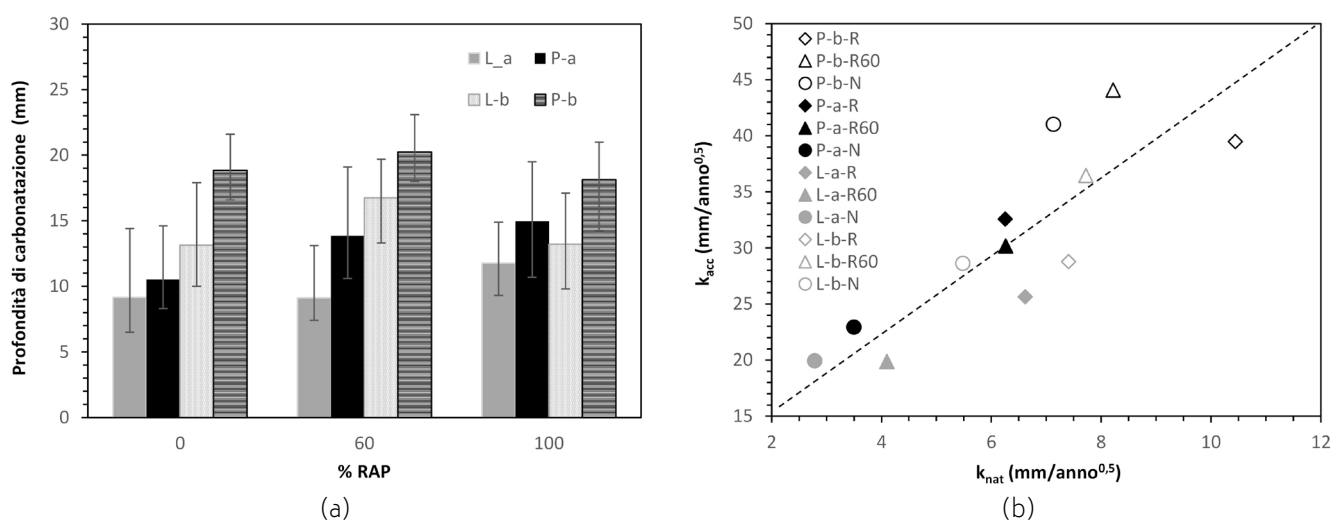


Fig.4 - Valori medi della profondità di carbonatazione e intervalli di variabilità misurati dopo 77 giorni in condizioni accelerate ($3\% \text{CO}_2$) in calcestruzzi differenti per %RAP, tipo di cemento e rapporto a/c (a). Correlazione fra coefficienti di carbonatazione naturale (k_{nat}) e accelerata (k_{acc}) dei calcestruzzi studiati (b) / Average values of carbonation depth and variability ranges measured after 77 days in accelerated conditions ($3\% \text{CO}_2$) for concretes different for %RAP, cement type and w/c ratio (a). Relationship between natural (k_{nat}) and accelerate (k_{acc}) carbonation coefficients for all concrete mixes (b).

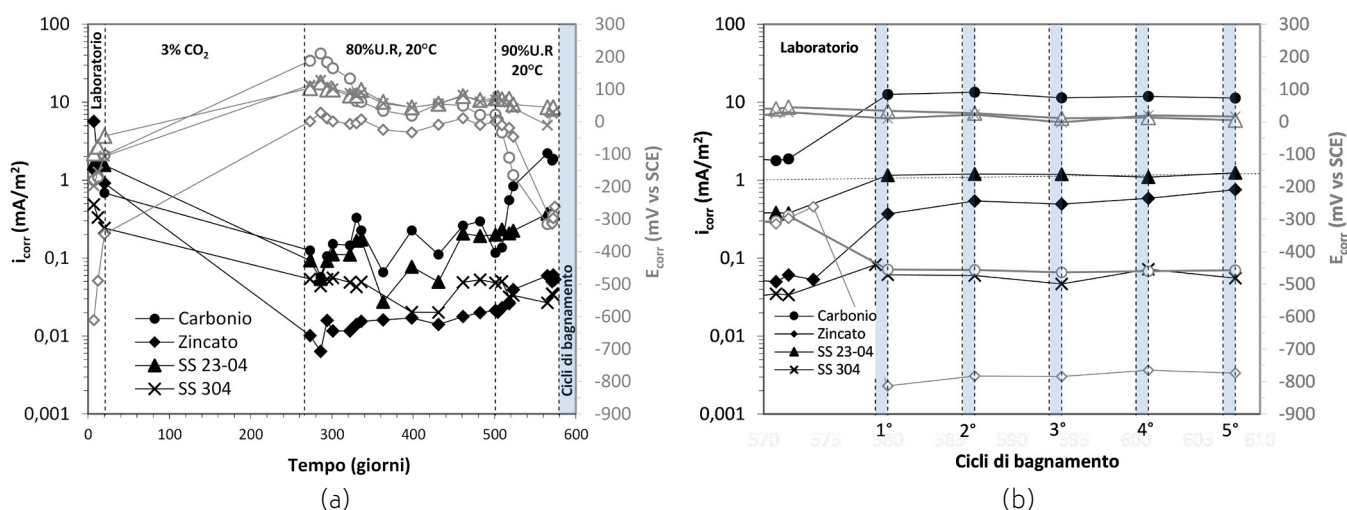
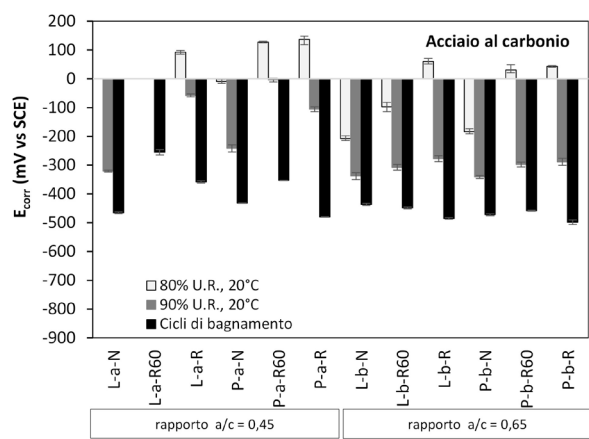
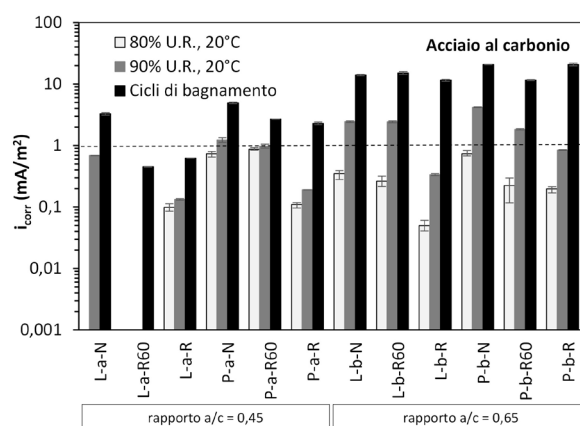


Fig.5 - Esempio di monitoraggio nel tempo del potenziale di corrosione (in grigio) e della velocità di corrosione (in nero) di diverse armature inglobate nel provino P-b-R60 esposto a differenti condizioni termo-igrometriche (a) e a cicli di bagnamento (b) / Example of monitoring over time of corrosion potential (grey) and corrosion rate (black) for different rebars embedded in specimen P-b-R60, exposed to several thermo-hygrometric conditions a) and to wetting cycles (b).

I provini armati L-a-N e L-a-R60 hanno richiesto un'esposizione prolungata al 3% CO₂, affinché il fronte di carbonatazione raggiungesse la profondità delle armature; per questo motivo il confronto fra questi provini e gli altri è stato limitato alle condizioni ambientali più aggressive (ai cicli di bagnamento e asciugamento, oltre a 90% U.R. e 20°C per il solo provino L-a-N).



(a)



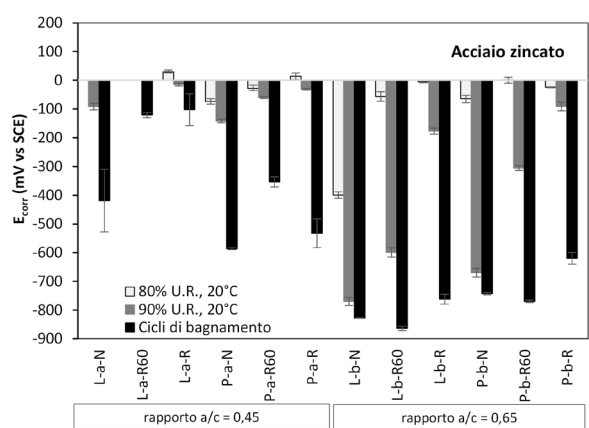
(b)

Fig.6 - Valori medi e barre di errore del potenziale di corrosione (a) e della velocità di corrosione (b) di armature in acciaio al carbonio in calcestruzzi carbonatati, diversi per tipo di cemento (CEM II, L e CEM IV, P), rapporto a/c (0,45 e 0,65) e %RAP (0, 60 e 100%), esposti a diverse condizioni ambientali / Average values and variability of corrosion potential (a) and corrosion rate (b) of carbon steel reinforcements in carbonated concretes, different for cement type (CEM II, L, and CEM IV, P), w/c ratio (0,45 and 0,65) and %RAP (0, 60 and 100%), exposed to different environmental conditions.

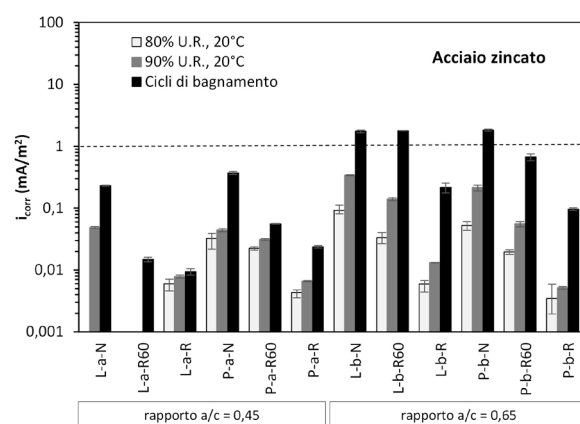
Per effetto del controllo ohmico resistivo, la velocità di corrosione è governata dalle condizioni di umidità e temperatura del calcestruzzo [10]. Si può osservare che, aumentando l'umidità del calcestruzzo, ovvero passando da 80 a 90% U.R. e all'immersione in acqua, la velocità di corrosione aumenta di diversi ordini di grandezza (da 0,1 mA/m² a 80% U.R., a 3-4 mA/m² per U.R. pari a 90%, sino a qualche decina di mA/m² in

condizioni di bagnamento).

Il controllo ohmico è più evidente per i calcestruzzi con maggior rapporto a/c (0,65) e, quindi, per quelli più porosi che maggiormente assorbono umidità (Fig. 6b). Non si nota nessun particolare effetto riconducibile alla presenza del RAP.



(a)



(b)

Fig.7 - Valori medi e barre di errore del potenziale di corrosione (a) e della velocità di corrosione (b) di armature in acciaio zincato in calcestruzzi carbonatati, diversi per tipo di cemento (CEM II, L e CEM IV, P), rapporto a/c (0,45 e 0,65) e %RAP (0, 60 e 100%), esposti a diverse condizioni ambientali / Average values and variability of corrosion potential (a) and corrosion rate (b) of galvanized steel in carbonated concretes, different for cement type (CEM II, L, and CEM IV, P), w/c ratio (0,45 and 0,65) and %RAP (0, 60 and 100%), exposed to different environmental conditions.

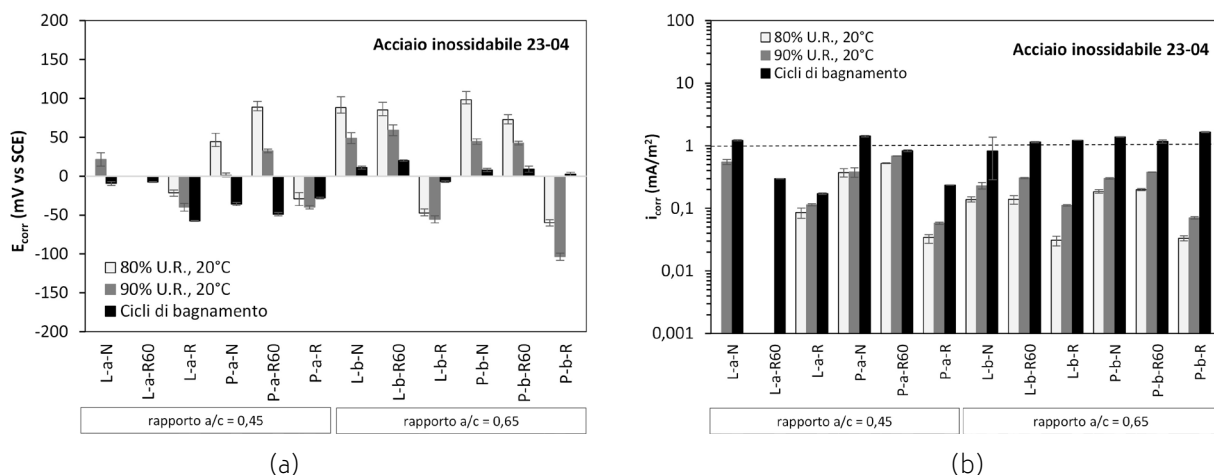


Fig.8 - Valori medi e barre di errore del potenziale di corrosione (a) e della velocità di corrosione (b) di armature in acciaio inossidabile 23-04 in calcestruzzi carbonatati, diversi per tipo di cemento (CEM II, L e CEM IV, P), rapporto a/c (0,45 e 0,65) e %RAP (0, 60 e 100%), esposti a diverse condizioni ambientali / Average values and variability of corrosion potential (a) and corrosion rate (b) of stainless steel 23-04 in carbonated concretes, different for cement type (CEM II, L, and CEM IV, P), w/c ratio (0,45 and 0,65) and %RAP (0, 60 and 100%), exposed to different environmental conditions.

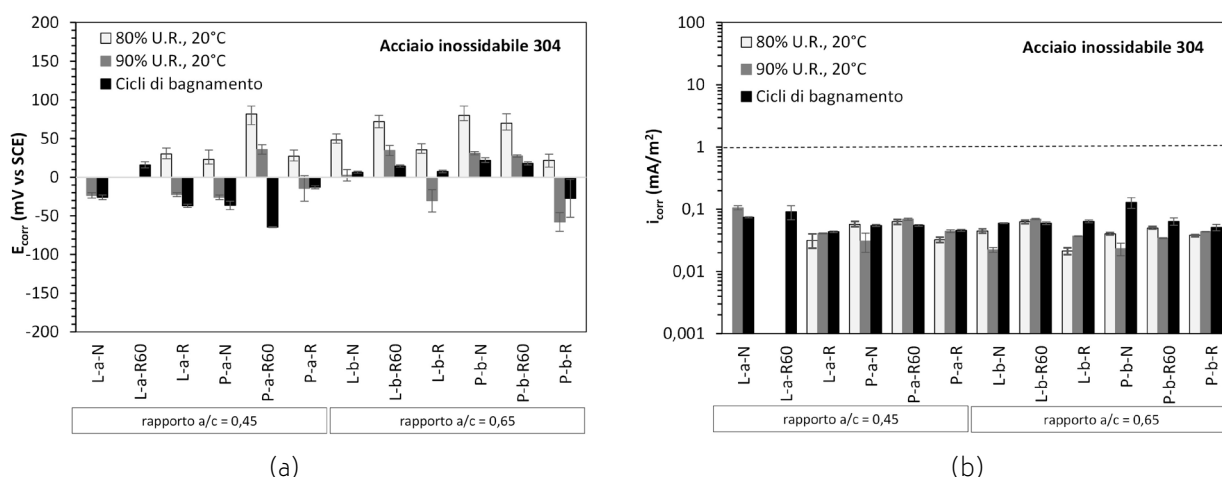


Fig.9 - Valori medi e barre di errore del potenziale di corrosione (a) e della velocità di corrosione (b) di armature in acciaio inossidabile 304 in calcestruzzi carbonatati, diversi per tipo di cemento (CEM II, L e CEM IV, P), rapporto a/c (0,45 e 0,65) e %RAP (0, 60 e 100%), esposti a diverse condizioni ambientali / Average values and variability of corrosion potential (a) and corrosion rate (b) of stainless steel 304 in carbonated concretes, different for cement type (CEM II, L, and CEM IV, P), w/c ratio (0,45 and 0,65) and %RAP (0, 60 and 100%), exposed to different environmental conditions.

Come atteso, le armature in acciaio zincato (Fig. 7) presentano potenziali di corrosione decisamente inferiori rispetto a quelli misurati sulle armature in acciaio al carbonio, raggiungendo anche valori di -800 mV vs SCE (Fig. 7a) soprattutto nelle condizioni più umide.

In realtà, in termini di velocità di corrosione si misurano valori dell'ordine di 0,1 e 0,01 mA/m² a 80 e 90% di U.R. e non si superano valori di 1-2 mA/m² durante i cicli di bagnamento, confermando che lo strato di passività dello

zinc si mantiene stabile in calcestruzzo carbonatato [10], anche in presenza di RAP (Fig. 7b).

Le armature in acciaio inossidabile 304 mostrano potenziali di corrosione compresi fra - 50 mV e + 100 mV vs SCE (più positivi quando esposti in ambiente asciutto) indipendentemente dal tipo di calcestruzzo; corrispondentemente, si misurano velocità di corrosione trascurabili (intorno a 0,1 mA/m²), a conferma delle loro condizioni di passività. Anche le armature di acciaio inossidabile

23-04 evidenziano potenziali di corrosione simili a quelli misurati sull'acciaio 304 mentre le velocità di corrosione sono leggermente superiori ma trascurabili; si attestano al massimo a 1-2 mA/m² evidenziando che, come atteso [13], non hanno subito in queste condizioni l'innesco della corrosione (anche nelle condizioni di esposizione di maggior aggressività).

CONCLUSIONI

Le prove di resistenza alla penetrazione dell'anidride carbonica (CO₂) hanno evidenziato che l'innesco della corrosione da carbonatazione di armature in acciaio al carbonio potrebbe avvenire più rapidamente nei calcestruzzi con aggiunta di fresato d'asfalto riciclato (RAP), anche se non è stato possibile identificare una correlazione rispetto alle percentuali impiegate in sostituzione dell'aggregato ordinario. Sicuramente, l'innesco potrà essere posticipato migliorando l'impervietà della pasta cementizia del calcestruzzo grazie all'adozione di un minore rapporto acqua/cemento (0,45) e/o di una stagionatura prolungata nel caso di impiego di cementi pozzolanici.

Diversamente, le prove di corrosione dell'acciaio al carbonio in calcestruzzo carbonatato non hanno evidenziato un effetto significativo della presenza di RAP in relazione alla propagazione della corrosione. Una volta innescata la corrosione delle armature in acciaio al carbonio, si riescono a garantire velocità di corrosione trascurabili (< 1 mA/m²) solo in ambienti con umidità relativa fino al 80% (T = 20°C). A parità di temperatura, aumentando

l'umidità a 90% si raggiungono velocità di corrosione di 3-4 mA/m². In assenza di contatto diretto con l'acqua, i calcestruzzi carbonatati risultano meno aggressivi nei confronti dell'acciaio al carbonio. Al contrario, le prove di bagnamento hanno mostrato che in tale condizione di esposizione il calcestruzzo induce un'elevata velocità di corrosione sull'acciaio al carbonio, soprattutto nel caso di maggior rapporto a/c (0,65 invece di 0,45), indipendentemente dalla presenza di RAP.

L'innesco della corrosione non si è manifestato né sulle armature in acciaio zincato né tanto meno su quelle in acciaio inossidabile (304 e 23-04), confermando la stabilità delle condizioni di passività anche in calcestruzzi con RAP ed evidenziando la possibilità di impiegare queste tipologie di armature in combinazione ai calcestruzzi con fresato nel caso si debbano garantire adeguate vite di servizio.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro sperimentale è stato svolto nell'ambito del bando "Circular Economy for a Sustainable Future" (Progetto RAPCON, rif. 2019-2286) finanziato da Fondazione Cariplo.

Gli autori desiderano ringraziare Amplia Infrastructure S.p.A. (Roma, Italia), come partner industriali del progetto, oltre a Buzzi S.p.A., Acciaierie Valbruna, Feralpi Group e Nord Zinc per la fornitura dei materiali. Gli autori ringraziano Andrea Filippi e Nicoletta Russo per il loro contributo al progetto RAPCON.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Meyer C. The greening of the concrete industry. *Cement & Concrete Composites*. 2009, 31(8):601-605.
- [2] Li W., Carsana M., Redaelli E., Canonico F. Properties of sustainable concrete made with low-clinker cements. *ICC 2024*:755-762.
- [3] Carsana M., Canonico F., Bertolini L. Corrosion resistance of steel embedded in sulfoaluminate-based binders. *Cement & Concrete Composites*. 2018, 88:211-219.
- [4] Corinaldesi V., Moriconi G. Reusing and Recycling C&D waste in Europe. *Sustainable Waste Management and Recycling: Proceedings of the International Conference on "Sustainable Waste Management and Recycling: Challenges and Opportunities"*, held at Kingston University, London, U.K., September 14-15, 2004.
- [5] Coppola L., Kara P., Lorenzi S. Concrete manufactured with crushed asphalt as partial replacement of natural aggregates. *Materiales de Construcción*. 2016, 66(324):1-7.
- [6] Abraham S. M., Ransinchung G. D. R. N. Strength and permeation characteristics of cement mortar with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates, *Construction and Building Materials*. 2018, 167:700-706.
- [7] Filippi A., Carsana M., Lollini F., Redaelli E., Characterization of Recycled Asphalt Pavement as Aggregate for Concrete, *Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues. Proceedings Fifteenth International Conference, Special Publication 355 (2022)*: 245-262
- [8] Filippi A., Carsana M., Lollini F., Redaelli E., Study of the passivation of steel in concrete made with RAP aggregate, *XVII Convegno nazionale AIMAT*. 2023.

- [9] Masi G., Michelacci A., Manzi S., Bignozzi M. C. Assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) as recycled aggregate for concrete, *Construction and Building Materials*. 2022.
- [10] Redaelli E., Carsana M., Filippi A., Lollini F. Effect of Composition on the Properties of Concrete Made with RAP Aggregate, *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024, 435:664–680.
- [11] Bertolini L., Elsener B., Pedersen P., Redaelli E., Polder R., *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*, Wiley. 2013.
- [12] Russo N., Filippi A., Carsana M., Lollini F., Redaelli E. Impact of RAP as recycled aggregate on durability-related parameters of structural concrete, *Materials and Structures*, 2025.
- [13] Carsana M., Lollini F., Redaelli E. Corrosion behaviour of steel in sustainable concrete made with recycled asphalt pavement aggregate (RAP), *Structural* 256, 2025.
- [14] Bertolini L., Gastaldi M. Corrosion resistance of low-nickel duplex stainless steel rebars, *Materials and Corrosion*, 2011.

Study of carbonation-induced corrosion of steel in concrete with Recycled Asphalt Pavement aggregates (RAP)

Given the need to make eco-sustainable buildings, the interest in alternatives to natural aggregates for concrete is increasing, including the milled material deriving from pavement maintenance (Recycled Asphalt Pavement, RAP). Availability of RAP and its compatibility with ordinary aggregates make its use potentially sustainable, even if its effects on the durability of reinforced concrete structures are not clear yet. As part of the RAPCON project, funded by Fondazione Cariplo, an experimental study was carried out by considering various types of reinforcement in contact with concretes different for percentage of RAP, type of cement and water/cement ratio. This note discusses carbonation resistance of studied concretes and corrosion behaviour of the reinforcements by highlighting the importance of designing adequately mixtures with RAP, in order to create durable reinforced concrete structures in function of environmental aggressiveness conditions.

KEYWORDS: RECYCLED ASPHALT PAVEMENT (RAP), CIRCULAR ECONOMY, CONCRETE, CORROSION, CARBONATION;

TORNA ALL'INDICE >