Effect of Pre-Treatment on the Performance
of Recycled Concrete Aggregate and Concrete Mixes

Petra Monaco
Università degli Studi di Udine - University of Windsor

Sintesi in Italiano

Lo scopo della tesi è stato approfondire e contribuire alla ricerca sui trattamenti volti a migliorare le proprietà degli aggregati di calcestruzzo riciclato (RCA), affinché possano essere utilizzati come sostituti degli aggregati naturali (NA) nella produzione di calcestruzzo.

Si sono identificati quattro obiettivi principali:

1. *Valutazione delle proprietà fisiche, meccaniche e chimiche dell'RCA prima del trattamento.* In particolare, la differenza di porosità, granulometria, composizione chimica, circolarità e quantità di fini. Sebbene ciò sia già stato fatto più volte in letteratura, l'RCA è un materiale variabile, perciò una preliminare analisi contribuisce ad aumentarne la sua comprensione.
2. *Valutazione dell'impatto dei trattamenti meccanici e chimici sulle proprietà dell'RCA.* Combinando trattamenti con acido acetico 0,2 mol, bicarbonato di sodio, seguito da una lavorazione meccanica (con Micro Deval) potrebbero portare ad un miglioramento degli aggregati andando a rimuovere la malta in eccesso.
3. *Introduzione di un nuovo trattamento volto a migliorare la forma degli aggregati per incrementare le prestazioni delle miscele di calcestruzzo*.
   Combinando un trattamento chimico con acido acetico e un trattamento meccanico (betoniera e bulloni).
4. *Confronto tra resistenza a compressione delle miscele di calcestruzzo realizzate con l'equivalent mortar volume method (EMV) e RCA non trattati con quelle realizzate con l'absolute volume method (AVM) e RCA pre-trattati.*
   La letteratura suggerisce che sia le miscele EMV con RCA non trattati sia le miscele AVM con RCA trattati hanno dimostrato una buona resistenza meccanica.

La tesi è stata sviluppata in cinque capitoli seguendo le linee guida dell'Università di Windsor insieme a quelle dell'Università di Udine. Per ciascun capitolo si riportano i temi trattati:

Il Capitolo 1 è il capitolo introduttivo, in cui vengono definiti lo scopo della ricerca, l'obiettivo e le lacune nella ricerca che hanno portato allo sviluppo della presente tesi. Si è notato che il calcestruzzo è ampiamente utilizzato per la sua resistenza e convenienza, ma non è un materiale sostenibile. La produzione di calcestruzzo comporta elevate emissioni di gas serra a causa dell'estrazione degli NA, mentre grandi quantità di calcestruzzo finiscono tra i rifiuti da demolizione. Sebbene gli RCA possano ridurre sia l'estrazione di nuove risorse che la produzione di rifiuti, il loro utilizzo è ancora limitato: in Canada solo il 7% degli aggregati vergini viene sostituito da RCA, rispetto all'85% del Giappone.
L'uso continuativo di NA comporta danni ambientali, come distruzione di habitat e aumento delle emissioni. Pertanto, l'integrazione dell'RCA è essenziale in un'ottica di economia circolare. Tuttavia, il loro impiego è ostacolato dalle prestazioni inferiori rispetto all'NA: l'RCA, infatti, presenta maggiore porosità, assorbimento e minore resistenza meccanica e durabilità, a causa della presenza di vecchia malta aderente e di un maggior numero di interfacce di transizione (ITZ). Questo porta a calcestruzzi meno performanti (RACM), che richiederebbero sezioni strutturali maggiori e più manutenzione, riducendo i benefici ambientali.

Numerosi trattamenti termici, chimici e/o meccanici sono stati studiati per migliorare gli RCA, ma nessuno ha dato risultati definitivi. I trattamenti termici pongono problemi di sostenibilità, quelli con acidi forti di sicurezza e possibile danneggiamento degli aggregati, mentre i trattamenti meccanici generano eccessivi fini. Tra le soluzioni più promettenti emerge la combinazione di acido acetico (acido debole) e trattamento meccanico leggero, che riduce la malta aderente senza compromettere eccessivamente l'aggregato. Tuttavia, questa procedura potrebbe alterare la forma degli aggregati influenzandone la compattazione, e solamente pochi in letteratura hanno studiato la variazione di forma degli aggregati.
Parallelamente, un approccio alternativo evita qualsiasi trattamento agli aggregati andando a riproporzionare gli elementi che costituiscono la miscela di calcestruzzo. Non è però ancora chiaro se, il calcestruzzo realizzando con questo nuovo metodo, chiamato metodo del volume equivalente (EMV), ed aggregati non trattati, sia più performante rispetto ad un calcestruzzo proporzionato con il metodo del volume assoluto (AVM) e aggregati trattati.

Nel Capitolo 2 è stata trattata la literature review approfondendo ciò che è stato anticipato nel Capitolo 1. Ci si è concentrati sullo stato attuale della ricerca, esaminando le lacune esistenti dalle proprietà fisiche degli aggregati fino alle proprietà delle miscele di calcestruzzo. Inoltre, in questo capitolo, sono stati descritti i trattamenti adottati e i risultati ottenuti da ricerche passate. Vengono illustrati i test trattati sui campioni riportando i dati presenti in letteratura: granulometria degli aggregati, forma, massa volumica, assorbimento e porosità, abrasione Micro Deval, valore di frantumazione, quantità di malta aderente, investigazione della superficie mediante microscopio elettronico e analisi ai raggi X, prestazioni delle miscele a compressione e metodi di proporzionamento.

Il Capitolo 3 delinea la metodologia di ricerca, riportando i protocolli adottati per analizzare la granulometria (AASHTO T 103), la forma (piatta e allungata), la massa volumica, l'assorbimento e la porosità (ASTM C127-15), la forma in termini di circolarità e rotondità (software ImageJ), e la stima della quantità di malta aderente (metodo proposto da Abbas et al.). Inoltre, viene spiegato come la superficie sia stata analizzata tramite microscopio ottico e microscopio elettronico a scansione (SEM). Successivamente, vengono descritte le procedure seguite per il trattamento degli aggregati. Per una chiara comprensione, è stato necessario suddividerle in:

1. **Procedura A**: in cui è stato eseguito un trattamento chimico-meccanico per tre diversi campioni di RCA (SRC - campione composto da soli aggregati di calcestruzzo riciclato, GRC – campione composto da circa il 60% di aggregati di calcestruzzo riciclato e anche altri rifiuti da costruzione, RCA-N – composto circa 95% di RCA ma con una qualità diversa dall'SRC) e per gli aggregati naturali (NA), immergendo gli aggregati una prima volta per 24 ore in una soluzione di acido acetico e una seconda volta per 24 ore in una soluzione di acido acetico e bicarbonato di sodio ipotizzando un aumento della bagnabilità della superficie e perciò una migliore penetrazione dell'acido nei pori più porosi della malta. Successivamente è stato effettuato un trattamento meccanico di 60 minuti con la macchina Micro Deval.
2. **Procedura B**: è stato eseguito un trattamento chimico-meccanico e tre trattamenti meccanici utilizzando esclusivamente l'RCA-N e l'NA. Il trattamento chimico-meccanico consiste nell'immersione degli aggregati per 24 ore in una soluzione di acido acetico prima del trattamento meccanico. Per il trattamento meccanico si è utilizzata una betoniera insieme o senza bulloni. Nel dettaglio alcuni campioni sono stati trattati insieme a bulloni di diametro 4,0 cm, altri insieme a bulloni di diametro 2,8 cm, e altri ancora senza.

L'ultima parte del capitolo spiega i calcoli effettuati per il proporzionamento di acqua, cemento, sabbia, NA e RCA per le miscele di calcestruzzo mediante l'EVM e l'AVM.

Nel Capitolo 4 sono stati riportati ed analizzati i risultati che hanno portato alle conclusioni sinteticamente riportate nel Capitolo 5, si sottolineano per importanza i 6 sottocapitoli:

Nella sezione 4.1 vengono riportati tutti i risultati ottenuti per gli aggregati prima di qualsiasi trattamento.

Nella sezione 4.2 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando la Procedura A,

Nella sezione 4.3 sono riportati i risultati ottenuti utilizzando la Procedura B, entrambi relativi ai trattamenti sugli aggregati.

La sezione 4.4 è dedicata alla spiegazione e correlazione di tutti i risultati ottenuti nelle sezioni precedenti.

Si è deciso di lasciare i risultati SEM nella sezione 4.5, poiché la superficie è stata analizzata solo prima e dopo il trattamento con acido acetico.

Nella sezione 4.6 vengono presentati i risultati della resistenza a compressione delle miscele di calcestruzzo tra miscele EMV e AVM.

Infine, nel Capitolo 5 sono riportate le conclusioni dedotte dai risultati al Capitolo 4.

1. In particolare, si è visto che gli aggregati di dimensioni maggiori hanno un assorbimento più elevato e una massa volumica inferiore (perciò la granulometria degli aggregati è di primaria importanza prima di confrontare massa volumica, assorbimento e porosità tra i campioni), inoltre gli RCA hanno un assorbimento maggiore e una massa volumica inferiore rispetto ai NA. Si è notato inoltre che non è solo la malta ad essere responsabile della porosità del materiale, ma nei vecchi aggregati possono essere presenti fenomeni di fessurazione. Inoltre, dai risultati dell'analisi spettroscopica si è visto che la malta può avere un diverso rapporto atomico (Ca/Si) rispetto ai vecchi aggregati, e i vecchi aggregati possono avere un diverso rapporto atomico (Ca/Si) rispetto ai NA. Per i motivi sopra citati si è voluto proporre per studi futuri l'uso del Machine Learning come metodo di correlazione tra proprietà di RCA.
2. Dopo aver sottoposto i tre diversi campioni di RCA a un trattamento chimico costituito da un bagno di acido acetico 0,2 mol, un bagno in soluzione di acido acetico 0,2 mol e bicarbonato di sodio, e 60 minuti di trattamento meccanico con Micro Deval, si è notato che il trattamento chimico non sempre comporta ad una riduzione dell'assorbimento e un aumento della massa volumica, poiché questi effetti dipendono dalla tipologia di vecchi aggregati presenti all'interno del singolo aggregato di RCA. Invece è il trattamento meccanico che porta principalmente ad una riduzione dell'assorbimento e a un aumento della massa volumica. Però questa riduzione di assorbimento potrebbe essere dovuta più all'aumento di circolarità degli aggregati che da una effettiva riduzione di malta aderente.
3. Valutando quattro diversi trattamenti degli RCA, costituiti da trattamenti meccanici con una betoniera con e senza diversi tipi di bulloni (77% in massa del totale inserito nella betoniera) e dal pretrattamento mediante immersione in soluzione di acido acetico, concentrandosi su circolarità, produzione di fini e costi. I risultati mostrano che la circolarità degli RCA varia in base alla durata del trattamento e all'uso dei bulloni. Non dipende molto dal tipo di aggregato (RCA o NA), dalle dimensioni dei bulloni e dall'uso dell'acido acetico. Il preammollo degli RCA in soluzione di acido acetico non porta a un'ottimizzazione efficace in termini di tempo, riduzione dei fini e aumento della circolarità se effettuato prima di un trattamento meccanico prolungato. Bulloni più grandi rimuovono la malta in meno tempo ma consumano maggiormente il vecchio aggregato. La produzione di fini è maggiore nei primi minuti e tende a stabilizzarsi negli ultimi 30 minuti di trattamento. L'aumento della circolarità influisce sulla riduzione dell'assorbimento negli aggregati riciclati di calcestruzzo. Questo trattamento riduce la quantità di malta aderente presente negli aggregati di calcestruzzo. Considerando quantità di

fini prodotti, circolarità, rotondità, assorbimento, quantità di malta persa e costi complessivi, il trattamento meccanico di 10 minuti con bulloni risulta il più promettente per migliorare le prestazioni degli RCA. Le conclusioni evidenziano inoltre un errore significativo nella stima della malta presente negli aggregati mediante il metodo di Abbas et al. che è stato possibile identificare solo tramite l'applicazione di una nuova formula.

4. Si è visto mediante SEM che il trattamento con acido acetico altera principalmente la malta, ma può influenzare anche gli aggregati originali. La malta risponde in modo più uniforme ai trattamenti con l'acido rispetto ai vecchi aggregati presenti nell'RCA il cui comportamento dipende dalla tipologia specifica dell'aggregato.
5. Si è notato che l'uso di EMV e di trattamenti chimico/meccanici sono metodi comparabili per migliorare la resistenza a compressione delle RACM, se i campioni non contengono ulteriori impurità da demolizioni. Mentre i trattamenti chimico/meccanici superano l'EMV nel migliorare la resistenza a compressione, soprattutto quando i campioni contengono una miscela di RCA e altre impurità da demolizione.