

## **CALCESTRUZZI CONFEZIONATI CON AGGREGATI RICICLATI E CENERE VOLANTE: RISULTATI DI UNA RECENTE CAMPAGNA SPERIMENTALE**

Antonio Caggiano, Ciro Faella, Carmine Lima, Enzo Martinelli, Marco Pepe, Roberto Realfonzo  
Dip. di Ingegneria Civile, Università di Salerno

Mauro Mele, Calcestruzzi Irpini SpA

Negli ultimi decenni il problema della salvaguardia dell'ambiente è diventato uno dei problemi più rilevanti e condiziona ormai quasi ogni tipo di attività antropica.

I processi industriali generalmente producono grandi quantità di rifiuti che talvolta richiedono complesse procedure di smaltimento e quindi rappresentano un grosso problema ambientale ed economico. In questa situazione risulta, ovviamente, coinvolto anche il settore delle costruzioni civili.

I lavori di manutenzione e le demolizioni delle costruzioni esistenti, come pure quelli di costruzione di nuove strutture, producono spesso grandi quantità di rifiuti, quelli che gli anglosassoni chiamano "*construction and demolition wastes*" (C&DWs). Diventa, pertanto, molto importante riuscire a riutilizzare la maggior quantità possibile di questi "rifiuti", reinserendoli nel ciclo produttivo per la costruzione di nuove opere.

Un modo interessante per riciclare i C&DWs, nonché i rifiuti provenienti da scarti della produzione industriale di elementi in calcestruzzo precompresso, consiste nel produrre aggregati da utilizzare in parziale sostituzione di quelli "naturali" per la produzione di nuovo calcestruzzo: i cosiddetti "**RCA**" dal termine anglosassone "*recycled concrete aggregate*".

La recente letteratura tecnica è ricca di contributi relativi a studi sui calcestruzzi prodotti con materiali riciclati di vario tipo, lavori che tendono a confrontare le performance meccaniche dei cosiddetti "*green concrete*" con quelle di calcestruzzi tradizionali (Caggiano et al., 2011).

Inoltre, numerose normative e linee guida internazionali (RILEM Recommendation, 1994; ACI Committee 555, 2002; EN 450, 1995; EN 206, 2006) e nazionali (NTC, 2008) sottolineano l'importanza e l'opportunità di utilizzare i RCA utilizzando solo la frazione di grosso diametro.

Un ulteriore materiale riciclato che viene utilmente adoperato sia come additivo che in sostituzione del cemento Portland è la cenere volante ("*fly ash*" - FA). L'impiego di fly ash nei calcestruzzi comporta molteplici vantaggi quali: il riciclo di una porzione dei rifiuti industriali provenienti da centrali termoelettriche ed inceneritori; la riduzione della domanda e, quindi, della produzione di cemento Portland con la conseguente riduzione di emissione di CO<sub>2</sub> in atmosfera.

Allo scopo di favorire il veloce sviluppo di calcestruzzi "eco-compatibili", presso il "Laboratorio di Prove Materiali e Strutture" dell'Università di Salerno è in corso un'estesa attività sperimentale tesa a determinare le caratteristiche meccaniche e di durabilità dei calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati ("*recycled aggregate concrete*" - RAC) e/o con cenere volante, aggiunta in parziale o totale sostituzione degli aggregati riciclati e del cemento.

Considerando che alcune proprietà degli aggregati provenienti da riciclo – per esempio la loro forma, la dimensione, l’assorbimento d’acqua – sono molto differenti rispetto a quelle degli aggregati naturali, il progetto delle miscele, finalizzato a valutare le proprietà allo stato fresco ed indurito del calcestruzzo è stato accuratamente studiato.

L’accurata selezione e caratterizzazione meccanica degli aggregati derivanti dal processo di riciclo ha rappresentato la fase preliminare per ottenere un RAC di buona qualità. Gli aggregati selezionati sono stati puliti e setacciati in laboratorio allo scopo di stabilirne la distribuzione granulometrica (figura 1). Sia gli aggregati naturali (comunemente pietre di cava) che gli aggregati riciclati (per lo più recuperati da demolizioni avvenute in Emilia Romagna) sono stati suddivisi nelle 4 classi seguenti:

- N3, con diametro nominale variabile tra 20 e 31.5 mm;
- N2, con diametro nominale variabile tra 10 e 20 mm;
- N1, con diametro nominale variabile tra 2 e 10 mm;
- Sabbia, con diametro nominale minore di 2 mm.



Figura 1. operazioni di setacciatura e aggregati setacciati

Una fase di notevole importanza è stata quella della stima della capacità di assorbimento dell’acqua sia degli inerti naturali che di quelli riciclati in accordo con le procedure proposte dalle ASTM Standards C127 (per aggregati grossi) e C128 (per aggregati fini).

I risultati dei test di assorbimento (tabella 1) hanno confermato che gli aggregati riciclati assorbono molta più acqua di quelli “naturali”.

Tabella 1. Assorbimento d’acqua (%) a 24 ore di aggregati naturali e riciclati.

Type	Sand (0-2 mm)	N1 (2-10 mm)	N2 (10-20 mm)	N3 (20-31.5 mm)
<i>Natural</i>	1.20	0.70	0.50	0.30
<i>Recycled</i>	12.20	6.00	3.00	1.80

La prima fase dello studio ha riguardato la realizzazione di provini in calcestruzzo ottenuti con 11 miscele diverse (si veda la tabella 2); questi campioni sono stati sottoposti a test per la determinazione delle caratteristiche meccaniche (fino a 60 giorni di stagionatura) e di permeabilità all’acqua per una valutazione delle caratteristiche di durabilità.

**Tabella 2. Proporzioni delle 11 miscele preliminari per m<sup>3</sup>**

Mix	CEM II 42.5 R	Fly Ash	Acqua	Aggregati naturali				Aggregati riciclati			
				Sabbia	N1	N2	N3	Sabbia	N1	N2	N3
	[kg]	[kg]	[litri]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
NAC	310	0	155	899	134	421	459	-	-	-	-
RAC30	310	0		904	134	308	-	-	-	101	406
RAC60				756	-	-	-	116	116	366	399
RAC100				-	-	-	-	772	115	362	394
RAC30+FA				310	60	824	134	307	-	-	-
RAC60+FA	120	748			-	-	-	-	118	372	406
RAC100+FA	240	-			-	-	-	524	118	372	406
NAC+FAsub	250	80		750	165	470	505	-	-	-	-
RAC30+FAsub	280	60		891	132	303	-	-	-	100	401
RAC60+FAsub		120		740	-	-	-	82	114	359	395
RAC100+FAsub		240		-	-	-	-	601	114	359	391

Successivamente sono stati prodotti campioni con ulteriori 16 miscele (con la sigla NAC si intende un calcestruzzo tradizionale) al fine di individuare tra queste quali forniscono le caratteristiche meccaniche e di durabilità desiderabili.

Le miscele sono state realizzate incrementando gradualmente la percentuale di RCA da utilizzare in sostituzione degli aggregati naturali, adoperando dapprima solo la frazione grossa (sostituzione al 30%, "RAC30" e al 60%, "RAC60"), per poi sostituire successivamente anche la frazione più fine (sostituzione del 100%, RAC 100).

**Tabella 3. Proporzioni delle 16 miscele per m<sup>3</sup>**

Mix	CEM I 42.5 R	Fly Ash	Acqua	a/c	Aggregati naturali				Aggregati riciclati			
					Sabbia	N1	N2	N3	Sabbia	N1	N2	N3
	[kg]	[kg]	[l]		[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
0	280	0	150	0.54	830	165	470	505	-	-	-	-
1	250	80		0.60	750	165	470	505	-	-	-	-
2				0.60	750	165	408	-	-	55	445	
3				0.60	750	-	-	-	-	145	415	445
4				0.60	-	-	-	-	660	145	415	445
5	250	220		0.60	500	170	490	545	-	-	-	-
6				0.60	500	170	490	35	-	-	-	450
7				0.60	500	185	-	-	-	-	450	455
8				0.60	-	-	-	-	595	130	375	400
9	200	255		0.75	500	170	490	545	-	-	-	-
10				0.75	500	170	490	35	-	-	-	450
11				0.75	500	175	-	-	-	-	445	450
12				0.75	-	-	-	-	595	130	375	400
13	425	0		0.35	-	-	-	-	640	135	400	440
14	300	250		0.50	-	-	-	-	450	135	400	440
15	300	300		0.50	-	-	-	-	-	190	560	620

Successivamente si è passati a produrre miscele con l'aggiunta di cenere volante (FA), incrementandone gradualmente il quantitativo e contemporaneamente riducendo il quantitativo di cemento (figura 2).

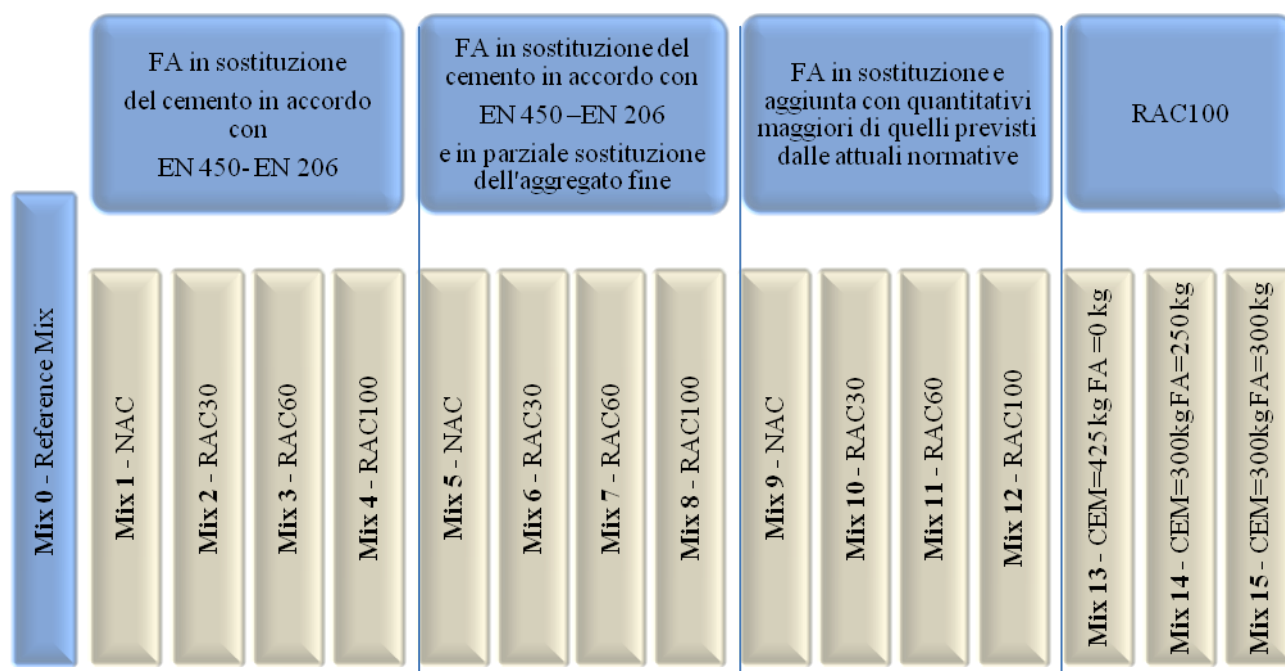


Figura 2. Matrice delle miscele

Al fine di avere campioni di controllo sono stati prodotti anche calcestruzzi con aggregati naturali e cenere volante (campioni "NAC+FA") ovvero senza cenere volante ("NAC").

Le tabelle 2 e 3 mostrano le varie miscele prodotte nelle due fasi successive dello studio (le prime 11 e le seconde 16 miscele).

Per ogni tipo di calcestruzzo sono stati prodotti 18 provini cubici standard (150x150x150 mm), adoperando casseforme di poliuretano (EN 12390-3: 2003), fatti maturare ad una temperatura di 22°C con circa il 100% di umidità.

Sono stati prodotti, inoltre, 4 campioni per ciascuna miscela aventi una barra di acciaio B450C del diametro da 10 mm, ad aderenza migliorata, annegata al loro interno, da sottoporre a test di aderenza.

Infine, sono stati confezionati numerosi provini cilindrici da sottoporre a prove di splitting e di resistenza ai cloruri. La tabella 4 mostra la matrice riepilogativa dei test.

Tabella 4. Experimental program.

Prova	Days					
	2	7	28	60	90	365
	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]
Compressione	2	1	6	2	1	2
Resistenza ai cloruri	-	-	-	-	-	-
Carbonatazione	-	-	-	-	1	1
Aderenza	-	-	4	-	-	-
Ultrasoniche	-	-	6	-	-	-
Splitting	-	-	2	-	-	-
Permeabilità	-	-	-	-	1	1

In figura 3 sono mostrati i primi risultati relativi ai test di compressione per alcune miscele, test effettuati a tempi di maturazione diversi.

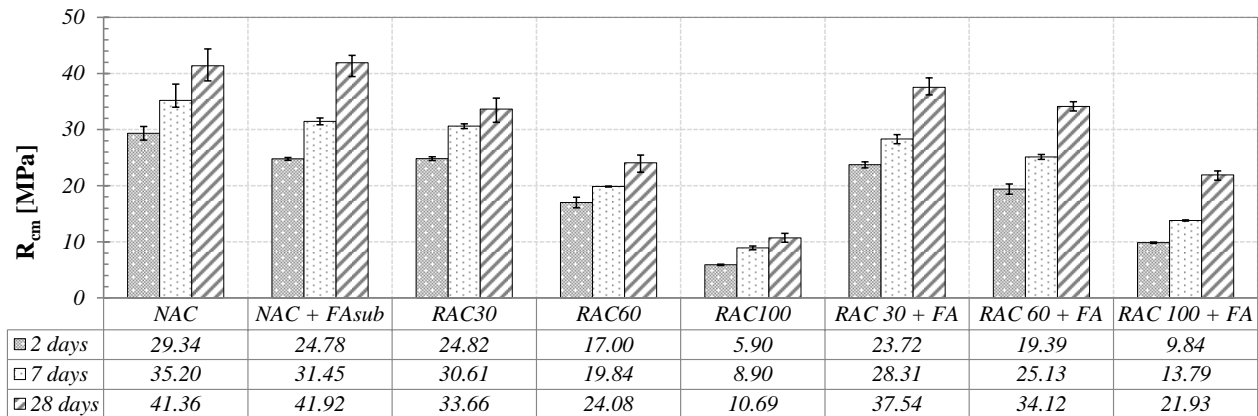


Figura 3. Resistenza a compressione a 2, 7, 28 giorni

I risultati ottenuti dimostrano che la sostituzione di aggregato naturale con RCA influenza significativamente la resistenza a compressione; maggiore è la percentuale di RCA, minore è la resistenza a compressione.

Inoltre, la resistenza a compressione delle miscele RAC può essere significativamente migliorata con la parziale sostituzione della frazione fine degli aggregati naturali con cenere volante; nel caso “RAC 100” l’incremento della resistenza a compressione dovuto alle ceneri volanti è notevole.

Le prove di compressione su provini realizzati con calcestruzzo ottenuto con aggregati naturali ed aggiunta di cenere volante, inserita in sostituzione di una porzione di cemento Portland (miscela “NAC+FA<sub>sub</sub>”), hanno dato luogo resistenze più basse a 2 e 7 giorni di maturazione rispetto ai campioni realizzati senza la fly ash (miscela “NAC”), mentre a 28 giorni di stagionatura sono stati raggiunti i valori di resistenza del NAC (questo molto probabilmente a causa del differente tempo di reazione della cenere volante rispetto al cemento).

I risultati sperimentali ad ora disponibili hanno confermato, infine, che l’uso di aggregati provenienti da C&DW di strutture in calcestruzzo in parziale sostituzione di aggregati “naturali” da luogo ad una produzione di calcestruzzi aventi minore resistenza a compressione ed una permeabilità maggiore. Tuttavia, aggiungendo la cenere volante alle miscele si ottengono RAC aventi buone proprietà fisiche e meccaniche; la fly ash, dunque, mitiga gli effetti negativi introdotti dagli aggregati riciclati.

I risultati delle prove ancora in corso potranno consentire di sviluppare miscele ottimali.