



UNIONE EUROPEA
Fondo europeo di sviluppo regionale



REPUBBLICA ITALIANA



REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA



SARDEGNA
RICERCHE

PROGETTO MEISAR

MATERIALI PER L'EDILIZIA E LE INFRASTRUTTURE SOSTENIBILI – GLI AGGREGATI RICICLATI

Responsabile Scientifico LUISA PANI

REPORT

ELEMENTI PREFABBRICATI IN CALCESTRUZZO RICICLATO NON ARMATO

I BLOCCHI DI CALCESTRUZZO

GRUPPO DI RICERCA:

Personale Strutturato: Ginevra Balletto, Antonio Cazzani, Roberto Fanutza, Stefano Naitza, Luisa Pani, Mauro Sassu, Monica Valdes, Corrado Zoppi

Collaboratori: Sebastiano Bandino, Lorena Francesconi, Giovanni Mei, Anania Mereu, Marta Salis, James Rombi

CLUSTER IMPRESE:

Aziende di Prefabbricazione: Componenti Vibrocemento Sardegna s.r.l., Fornaci Scanu s.p.a, Manufatti in Cemento di Roberto Farris.

Impianti di riciclaggio: Rifiuti Edili Recycle, Ecoinerti, S.M.T. di Angelo Massa, Eco Frantumazioni di Saba Roberto & C. s.n.c.

Produttori di calcestruzzo: Calcestruzzi s.p.a Italcementi, Calcestruzzi Sarda Torpé s.r.l.

Consulenze ambientali: Studio Professionale Ing. LUCA TUVERI.

Indagini strutturali: Secured Solutions s.r.l. Spin-Off UNICA.

Progetto finanziato con fondi POR FESR 2014/2020 - ASSE PRIORITARIO I
"RICERCA SCIENTIFICA, SVILUPPO TECNOLOGICO E INNOVAZIONE.

Blocchi prefabbricati confezionati con aggregati riciclati di solo calcestruzzo

I blocchi prefabbricati in calcestruzzo sono un prodotto diffusamente utilizzato in diversi ambiti delle costruzioni, caratterizzati da una bassa resistenza e da una metodologia di produzione molto semplice. Il loro mercato è molto competitivo, ma il margine di profitto derivante dalla loro commercializzazione è molto basso. La possibilità di utilizzare aggregati riciclati per confezionare blocchetti in calcestruzzo è una grande opportunità per la salvaguardia dell'ambiente e consentirebbe, inoltre, la riduzione dei costi di produzione, a causa del costo minore degli aggregati riciclati rispetto ai naturali.

Il progetto MEISAR in questa fase ha esaminato la fattibilità di utilizzo degli aggregati grossi riciclati, derivanti dalla frantumazione di solo calcestruzzo di alcuni blocchi di fondazione dello stadio Sant'Elia di Cagliari, in parziale sostituzione degli aggregati grossi naturali, per la produzione di blocchi forati prefabbricati in calcestruzzo riciclato.

In particolare, sono state preparate quattro miscele di calcestruzzo con differenti percentuali di sostituzione (20%, 50%, 70%) dell'aggregato grosso naturale, con l'aggregato grosso riciclato di solo calcestruzzo. In aggiunta, per confronto, è stata confezionata una miscela di calcestruzzo ordinario realizzata esclusivamente con aggregati naturali. Lo scopo di questa analisi è quella di studiare gli effetti della presenza degli aggregati riciclati sulla resistenza a compressione, sulla densità e sull'assorbimento d'acqua dei blocchi forati prefabbricati di calcestruzzo.

Il processo di produzione utilizzato nelle fabbriche, per la produzione su larga scala, prevede una procedura di getto e vibro-compattazione, utilizzando un conglomerato cementizio relativamente asciutto a basso contenuto di cemento ($100 \div 150 \text{ kg/m}^3$).

Proprietà degli aggregati naturali e riciclati

L'aggregato naturale (NA), utilizzato in questo studio, è costituito da calcare frantumato, ghiaia e sabbia provenienti da cave di estrazione operanti nel territorio regionale, e rappresenta il tipico aggregato naturale utilizzato in Sardegna nella produzione del calcestruzzo. Gli inerti grossi riciclati (RA) utilizzati in questo studio, provengono dalla demolizione di alcuni blocchi di fondazione dello Stadio Sant'Elia di Cagliari e sono stati prodotti a seguito di un processo di frantumazione e vagliatura, che ha consentito di ottenere una granulometria compresa tra 4 e 16 mm. La frantumazione e la vagliatura è stata eseguita presso l'impianto di riciclaggio Rifiuti Edili Recycle (Azienda aderente al Cluster).

La caratterizzazione degli aggregati naturali e riciclati è stata effettuata presso il Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Architettura dell'università di Cagliari e sono stati valutati: distribuzione granulometrica, massa volumica apparente (ρ_a), massa volumica in condizione di saturazione a superficie asciutta (ρ_{ssd}), assorbimento d'acqua (WA24), resistenza alla frammentazione (LA).

Analisi granulometrica - aggregati riciclati

L'analisi è stata effettuata sui campioni di materiale provenienti dalla demolizione di alcuni blocchi di fondazione dello Stadio Sant'Elia. I dati ottenuti sono stati successivamente confrontati con i dati

degli aggregati naturali utilizzati nell'impianto di fabbricazione dei blocchi. La procedura di prova si è ripetuta in modo identico per gli aggregati naturali e per quelli riciclati.

La porzione di prova è stata inserita all'interno di un recipiente, quindi ricoperta d'acqua e lasciata in questa condizione per 24 ore, in modo tale da facilitare lo scioglimento dei grumi e la completa separazione e successiva sospensione delle frazioni fini. Gli aggregati sono stati poi essiccati in stufa a una temperatura di 110°C fino al raggiungimento della massa costante e in seguito fatti raffreddare fino a temperatura ambiente. Il campione così ottenuto è stato pesato, indicando tale massa con M_2 .

Il materiale lavato ed essiccato è stato inserito in una serie di stacci sovrapposti, disposti in ordine decrescente di apertura di maglia, come specificato nella UNI EN 933-2 e conformi ai requisiti di cui alla ISO 3310-1 e ISO 3310-2. La colonna, inserita in un agitatore meccanico è stata sottoposta a scuotimento meccanico in senso roto-traslatorio per circa 10 minuti. Per evitare trattenute improprie di materiale i setacci della colonna sono stati separati e ulteriormente scossi a mano uno per uno. In questo modo è stato possibile suddividere gli aggregati in classi granulometriche. Ciascuna classe è stata pesata e i relativi valori registrati come $R_1, R_2 \dots R_{i+1}, R_N$. Il peso del materiale passante al setaccio di 0,063 mm, raccolto nel fondo della pila, è stato registrato con la sigla P. La Tabella 1 riporta le aperture dei vagli, previste dalla normativa, utilizzati nella prova.

Tabella 1. Suddivisione granulometrica

Apertura degli stacci [mm]	Massa del trattenuto R_i [kg]
22	R_1
16	R_2
8	R_3
4	R_4
2	R_5
1	R_6
0,5	R_7
0,25	R_8
0,125	R_9
0,063	R_{10}
Materiale del recipiente di fondo	P

Con i dati ottenuti è stata calcolata la percentuale di trattenuto e di passante su ciascuno setaccio, espresse entrambe come percentuali della massa essiccata d'origine. In Figura 1 si può osservare la curva granulometrica ottenuta, unitamente al confronto con la curva relativa agli aggregati naturali utilizzati.

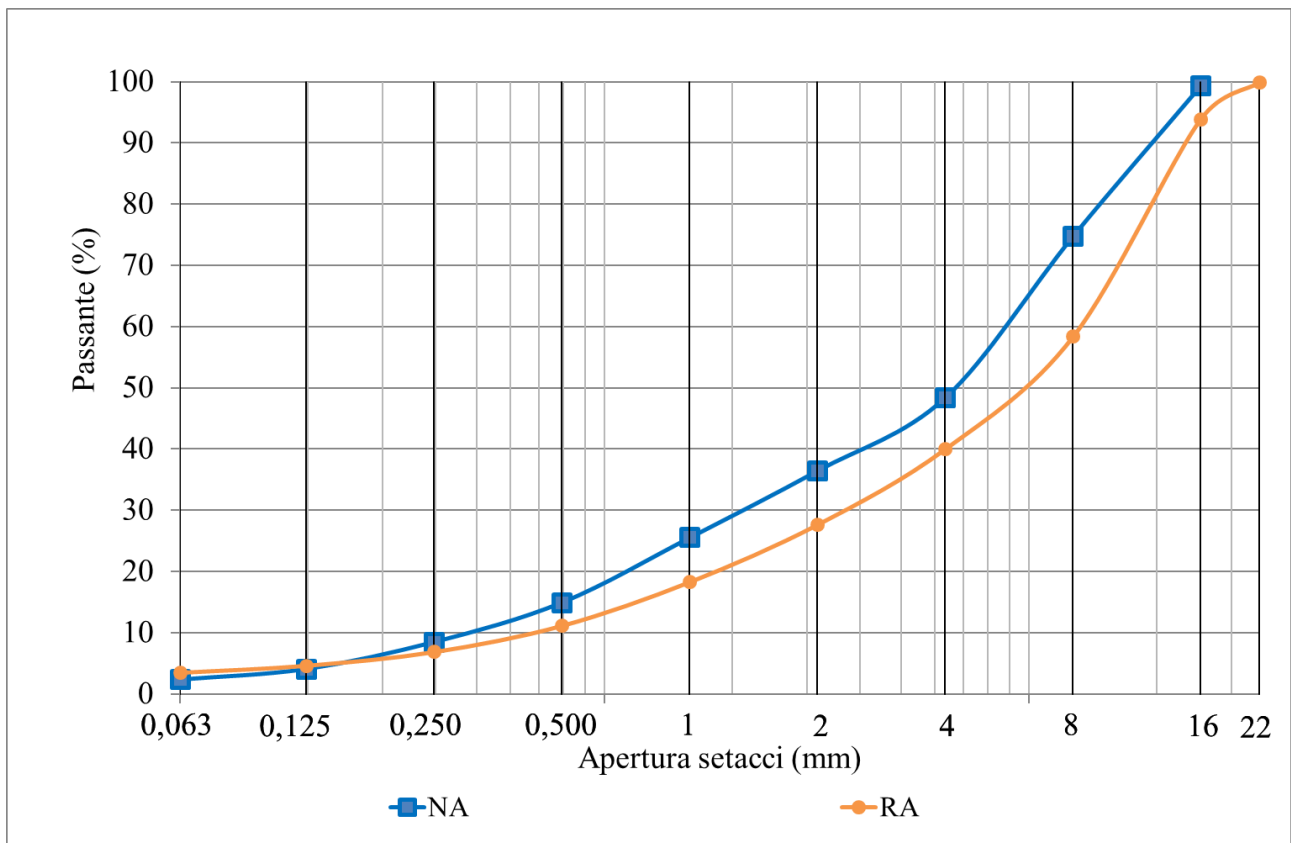


Fig. 1. *Distribuzione granulometrica.*

Massa volumica dei granuli e assorbimento d'acqua

La massa volumica e l'assorbimento degli aggregati sia naturali che riciclati, sono stati determinati seguendo le indicazioni della norma UNI EN 1097-6. Gli aggregati dopo essere stati adeguatamente lavati, sono stati suddivisi in cinque picnometri, in cui è stata inserita dell'acqua fino al loro ricoprimento. Successivamente i picnometri con dentro gli aggregati e l'acqua, sono stati immersi in un bagno termostatico alla temperatura di 22°C, per 24 ore (Figura 2). La procedura di prova si è ripetuta in modo identico per gli aggregati naturali e per quelli riciclati.

Al termine delle 24 ore i picnometri sono stati estratti dal bagno termostatico e quindi riempiti fino al traboccamento. In questo modo è stato valutato il peso totale dei picnometri contenenti gli aggregati e l'acqua (M_2). Successivamente gli stessi picnometri sono stati svuotati, quindi riempiti di solo acqua a 22°C, e nuovamente pesati. Il peso complessivo dei picnometri con l'acqua è stato indicato con M_3 . Gli aggregati estratti dai picnometri, completamente saturi d'acqua, sono stati riuniti a formare un unico cumulo e successivamente tamponati, utilizzando dei panni assorbenti, in modo tale da portarli nella condizione di "saturazione a superficie asciutta". In tale condizione è stato valutato il loro peso, indicato con M_1 .



Fig. 1. Prova di assorbimento

Il campione è stato infine rimesso in forno alla temperatura di 110°C fino al raggiungimento della massa costante. Di seguito è stato fatto raffreddare e successivamente pesato ottenendo la massa M_4 . Sono poi state calcolate le masse volumiche dei granuli in Mg/m^3 con le equazioni seguenti:

1. Massa volumica apparente dei granuli (kg/m^3)
$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

2. Massa volumica dei granuli preessiccati in stufa (kg/m^3)
$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

3. Massa volumica a superficie asciutta (kg/m^3)
$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

4. Assorbimento d'acqua (%)
$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4}$$

dove:

ρ_w è la massa volumica dell'acqua alla temperatura registrata all'atto della determinazione di M_2 ;

M_1 è la massa in aria dell'aggregato saturo a superficie asciutta, espressa in kg;

M_2 è la massa del picnometro contenente il campione di aggregato saturo e l'acqua, espressa in kg;

M_3 è la massa del picnometro riempito con sola acqua, espressa in kg;

M_4 è la massa in aria della porzione di prova essiccata in stufa, espressa in kg.

In Tabella 2 vengono riportati i risultati della prova. Per ogni campione è stata inserita: la massa volumica apparente, la massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta e l'assorbimento d'acqua.

Tabella 2. Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua

Id campione	Dimensione (mm)	Massa volumica apparente ρ_a (Kg/m ³)	Massa volumica a superficie asciutta ρ_{ssd} (Kg/m ³)	Assorbimento d'acqua WA ₂₄ (%)
NA	0-4	2,707	2,630	2,4
	4-16	2,412	2,625	1,407
RA	0-4	2,625	2,139	16,174
	4-16	2,709	2,382	8,683

Le masse volumiche degli aggregati sono risultate molto simili tra loro. Si è registrata invece una differenza significativa per quanto riguarda l'indice di assorbimento, che assume un valore molto elevato per gli aggregati fini riciclati. Questo risultato è in linea con i dati presenti nella letteratura internazionale e trova spiegazione nelle caratteristiche intrinseche e morfologiche relative alla composizione degli aggregati riciclati. In essi infatti la presenza della malta cementizia, che può essere aderente agli elementi lapidei ma anche formare dei granuli di cui risulta l'unico componente, conferisce agli aggregati riciclati una maggior porosità rispetto a quelli naturali. I valori della massa volumica in condizioni di saturazione a superficie asciutta sono minori per gli aggregati riciclati rispetto a quelli naturali.

Resistenza alla frammentazione

La prova di resistenza alla frammentazione degli aggregati grossi è stata eseguita seguendo le indicazioni della norma UNI EN 1097-2:2008, attraverso la prova Los Angeles. La prova è stata eseguita prima per gli aggregati naturali e successivamente per quelli riciclati. Di seguito si riporta la descrizione della procedura eseguita.

Mediante quartatura, sono stati selezionati 6 kg di aggregati passanti al setaccio con aperture 14 mm e trattenuti al setaccio con aperture 10 mm. Successivamente sono stati essiccati in forno a 110°C fino a massa costante. Per ottenere un campione rappresentativo, dai 6 kg di aggregati selezionati ed essiccati, sono stati prelevati 5 kg in modo del tutto casuale e la loro massa è stata registrata come massa M. In seguito, il campione unitamente a 12 sfere d'acciaio è stato inserito nella macchina Los Angeles, preliminarmente programmata per compiere 500 giri con velocità di 31 giri/min. Il cilindro cavo e rotante della macchina, ruotando in senso orario, assicura alle pesanti sfere d'acciaio la forza necessaria per infliggere continui urti al campione, determinandone la sua frantumazione.

Eseguiti i 500 giri, il materiale è stato prelevato dal cilindro, vagliato e lavato nel setaccio con apertura 1,6 mm. Il trattenuto è stato essiccato in stufa alla temperatura di 110°C, fino al raggiungimento della massa costante. Una volta raggiunta la temperatura ambiente è stata registrata la massa m. Il coefficiente Los Angeles si ottiene con la seguente relazione:

$$LA = \frac{M - m}{50}$$

In Tabella 3 sono riportati i dati ottenuti per la prova Los Angeles, sia per gli aggregati riciclati che per quelli naturali.

Il valore di LA è inversamente proporzionale alla resistenza alla frammentazione dell'aggregato. Minore è il valore di LA, migliore risulterà la qualità dell'aggregato. Gli aggregati riciclati presentano una resistenza alla frammentazione inferiore (quindi un valore di LA maggiore), rispetto a quella dell'aggregato naturale. Questa differenza è dovuta alla presenza malta cementizia presente negli aggregati riciclati, che è dotata di una resistenza alla frammentazione pressoché nulla.

Tabella 3. Determinazione della resistenza alla frammentazione

Campione	NA	RA
LA (%)	21	39

Forma dei granuli- indice di forma

La determinazione dell'indice di forma degli aggregati si esegue seguendo la UNI EN 933-4. La prova è stata eseguita prima per gli aggregati naturali e successivamente in modo identico, per quelli riciclati. Di seguito si riporta la descrizione della procedura eseguita.

Gli aggregati a seguito del processo di quartatura ed essiccazione in forno, sono stati vagliati con stacci da 16 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 4 mm. Utilizzando un calibro a corsoio (Figura 3) sono state individuate ed eliminate le particelle cubiche, ovvero quelle con un rapporto lunghezza L/spessore E minore o uguale a 3 ($L/E \leq 3$).



Fig. 3. Determinazione dell'indice di forma

Successivamente, per ogni classe granulometrica, sono stati pesati gli inerti non cubici ($L/E > 3$). L'indice di forma (SI) è stato calcolato con l'equazione seguente: .

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \cdot 100$$

dove:

M_{1i} : la massa della porzione di prova di ogni frazione granulometrica in grammi;

M_{2i} : la massa degli inerti non-cubici di ogni granulometria espressa in grammi.

In Tabella 4 vengono riportati i risultati ottenuti.

Tabella 4. *Indici di forma degli aggregati naturali e riciclati*

Campione	NA	RA
SI (%)	15,00	59

Forma dei granuli- Indice di appiattimento

La determinazione dell'indice di forma degli aggregati si esegue seguendo la UNI EN 933-3. La prova è stata eseguita prima per gli aggregati naturali e successivamente per quelli riciclati. Di seguito si riporta la descrizione della procedura eseguita.

La prova prevede due operazioni di vagliatura successive, la prima utilizzando i soliti setacci a maglie, la seconda con dei particolari setacci a barre. Il campione di riferimento è stato essiccato in stufa a 110°C fino al raggiungimento della massa costante e dopo opportuno raffreddamento è stata registrata la massa M_0 . Il materiale è stato quindi vagliato una prima volta, utilizzando i setacci a maglie con aperture in ordine decrescente: 16 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 - 4 mm. Successivamente il trattenuto di ciascuna classe granulometrica è stato vagliato ulteriormente, utilizzando i setacci a barre (Figura 4), di dimensioni da 10 - 8 - 6,3 - 5 - 4 - 3,15 e 2,5 mm, questo passaggio è stato eseguito con l'ausilio di una piastra vibrante.



Fig. 4. *Determinazione dell'indice di appiattimento*

In seguito, per ogni frazione granulometrica, sono state pesate le particelle passanti attraverso le barre parallele degli stacci, eliminando ciò che si era depositato nel fondo. L'indice di appiattimento FI (arrotondato al numero intero più prossimo) viene calcolato con la seguente formula:

$$FI = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100$$

dove:

M_1 : la somma delle masse dei granuli in ogni classe granulometrica $\frac{d_i}{D_i}$, espressa in grammi;

M_2 : la somma delle masse dei granuli di ogni classe granulometrica passante attraverso il corrispondente staccio a barre con apertura di larghezza pari a $\frac{D_i}{2}$, espressa in grammi.

In Tabella 5 sono riportati i risultati relativi all'indice di appiattimento.

Tabella 5. Risultati indici di appiattimento

Campione	NA	RA
FI (%)	6,80	4

Gli inerti riciclati presentano dunque un indice di appiattimento inferiore rispetto agli inerti naturali.

Produzione delle miscele di calcestruzzo

Complessivamente sono state realizzate quattro miscele di calcestruzzo con inerti riciclati con diverse percentuali di sostituzione (20%, 50%, 70% e 100%) inoltre come miscela di controllo è stato realizzato un calcestruzzo con soli inerti naturali (NC). Il cemento utilizzato è CEM 32,5 II A/L. In tabella 6 sono indicate le quantità di ogni singolo elemento introdotto nel mix design.

Tabella 6. Mix design delle miscele di calcestruzzo

MIX	Dosaggio di cemento (kg/m ³)	Acqua di impasto (litri)	Aggregati fini naturali 0-4 mm (kg/m ³)	Aggregati grossi naturali 4-12.5 mm (kg/m ³)	Aggregati grossi riciclati 4-16 mm (kg/m ³)
NA	140	40	200	900	-
20% RA	140	41	200	720	180
50% RA	140	46	200	503	503
70% RA	145	46	200	270	630

Produzione e caratterizzazione dei blocchi prefabbricati

Nell'impianto di produzione Manufatti in Cemento di Roberto Farris (azienda aderente al Cluster), gli aggregati sono stoccati all'aperto in alcune tramogge, mentre il cemento e i materiali sensibili, sono stoccati in appositi silos. Le fasi iniziali della produzione prevedono la miscelazione delle materie prime, che a questo scopo vengono scaricate in un dosatore a peso, che misura la loro corretta proporzione per il mix design. I materiali secchi sono stati mescolati per diversi minuti e solo successivamente è stata aggiunta l'acqua di impasto. Il blocco forato di calcestruzzo è prodotto con calcestruzzo a bassa resistenza, che richiede una ridotta quantità di acqua. Il dosaggio della miscela è accuratamente controllato da un computer munito di un software dedicato. Al termine della miscelazione, il lotto viene scaricato in una tramoggia e compattato in stampi. Ogni stampo è costituito da una cassetta per stampi riutilizzabile con rivestimenti sostituibili. Gli stampi vengono compattati esercitando azioni di pressione e vibrazione, per assicurare una distribuzione uniforme del calcestruzzo. Il blocco compattato viene spinto fuori dallo stampo su un nastro trasportatore in movimento e mediante una spazzola rotante vengono rimosse le particelle di aggregato sciolte dalla superficie superiore (Figura 5). I blocchi vengono scasserati dopo 24 ore, fatti asciugare all'aria per 2 giorni, essiccati all'aria per 28 giorni e conservati nell'impianto di prefabbricazione del calcestruzzo. Il prodotto finito ha la forma di parallelepipedo (base 400mm, spessore 300mm e altezza 250mm, (Figura 6).



Figura 5. *Produzione di blocchi forati di calcestruzzo*

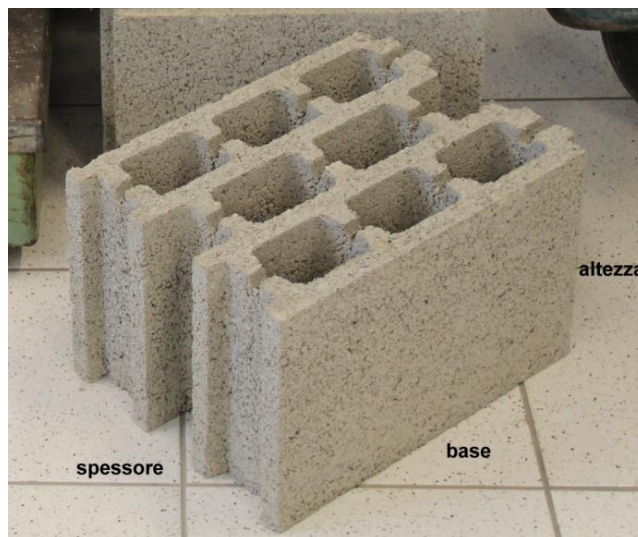


Figura 6. *Blocco forato di calcestruzzo*

Sui blocchetti confezionati sono state condotte le seguenti prove:

- Resistenza a compressione nella direzione dei fori (UNI EN 772);
- Massa volumica (UNI EN 772);
- Assorbimento (UNI EN 772).

Massa volumica

La densità del blocco di calcestruzzo è stata determinata con il metodo riportato nella UNI EN 772-13. Per valutare la densità sono stati testati sei blocchi di ogni miscela confezionati rispettivamente con 0%, 20 %, 50 % e 70 % di aggregati grossi riciclati in luogo di quelli naturali. Nelle Tabelle dalla 7 alla 10, vengono riportati tutti i parametri dei provini utilizzati nell'analisi. In tutto sono stati testati 30 campioni.

Tabella 7. Mix RA 0%

Provino	m _{dry,u} (Kg)	Lunghezza (m)	Larghezza (m)	Altezza (m)	Volume V _{tot} (m ³)	Volume vuoti	Volume V _{n,u} (m ³)	ρ _{n,u} (Kg/m ³)
1	31,7	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2108,063
2	30,6	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2034,913
3	31,1	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2068,163
4	31,1	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2068,163
5	31,7	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2108,063
6	30,5	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2028,263

Tabella 8. Mix RA 20%

Provino	m _{dry,u} (Kg)	Lunghezza (m)	Larghezza (m)	Altezza (m)	Volume V _{tot} (m ³)	Volume vuoti	Volume V _{n,u} (m ³)	ρ _{n,u} (Kg/m ³)
1	30	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	1995,012
2	30	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	1995,012
3	30,5	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2028,263
4	30,2	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2008,313
5	30,2	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2008,313
6	30,4	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014963	0,015038	2021,613

Tabella 9. Mix RA 50%

Provino	m _{dry,u} (Kg)	Lunghezza (m)	Larghezza (m)	Altezza (m)	Volume V _{tot} (m ³)	Volume vuoti	Volume V _{n,u} (m ³)	ρ _{n,u} (Kg/m ³)
1	33,5	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014625	0,015375	2178,862
2	29,8	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014625	0,015375	1938,211
3	33,5	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014625	0,015375	2178,862
4	33	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014625	0,015375	2146,341
5	29,7	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014625	0,015375	1931,707
6	33	0,4	0,3	0,25	0,03	0,014625	0,015375	2146,341

Tabella 10. Mix RA 70%

Provino	m _{dry,u} (Kg)	Lunghezza (m)	Larghezza (m)	Altezza (m)	Volume V _{tot} (m ³)	Volume vuoti	Volume V _{n,u} (m ³)	ρ _{n,u} (Kg/m ³)
1	29,2	0,395	0,3	0,245	0,029033	0,014663	0,014369	2032,117
2	29	0,395	0,3	0,245	0,029033	0,014663	0,014369	2018,199
3	29,8	0,395	0,3	0,245	0,029033	0,014663	0,014369	2073,873
4	28,9	0,395	0,3	0,245	0,029033	0,014663	0,014369	2011,239
5	29,1	0,395	0,3	0,245	0,029033	0,014663	0,014369	2025,158
6	29,8	0,395	0,3	0,245	0,029033	0,014663	0,014369	2073,873

La Figura 8 mostra l'andamento della massa volumica per le differenti percentuali di sostituzione di aggregato grosso riciclato in luogo del naturale.

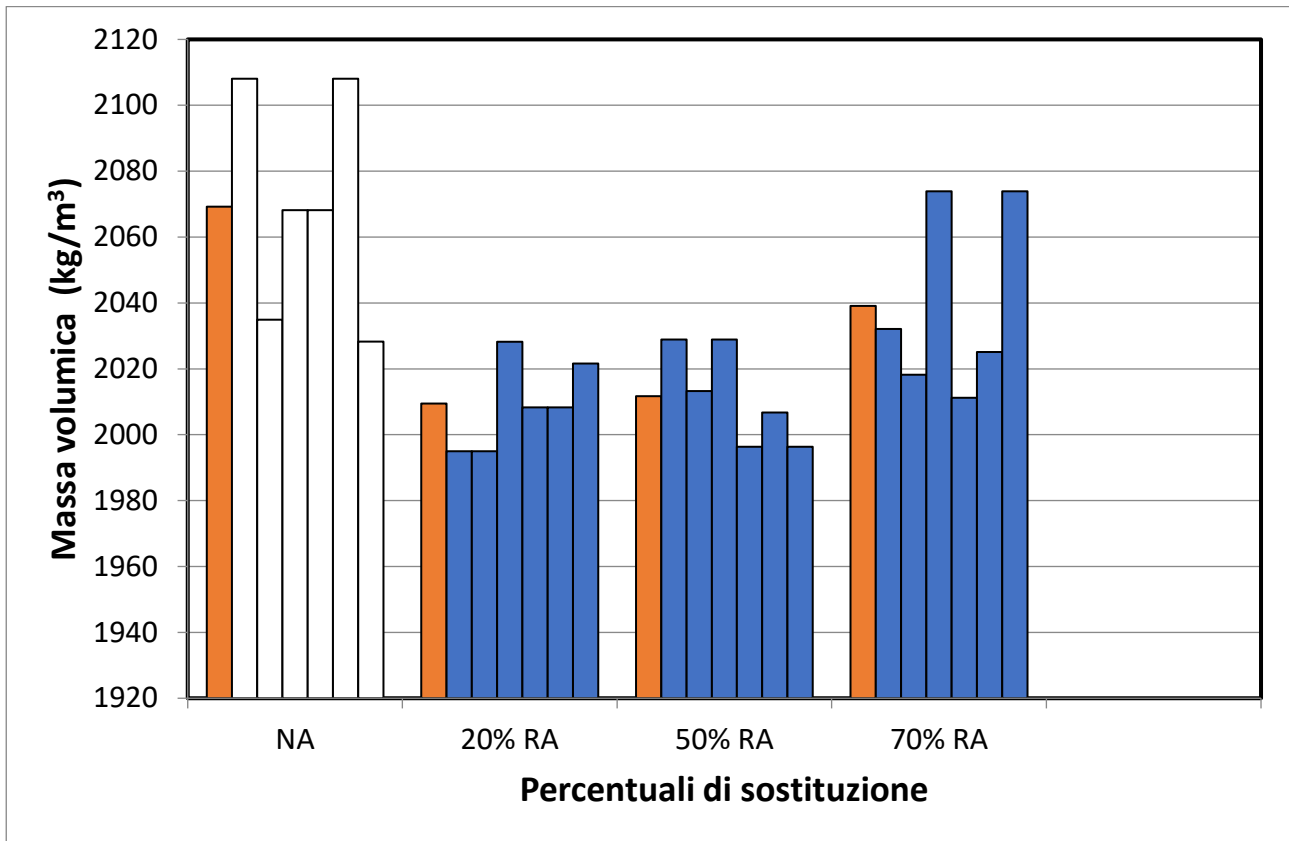


Figura 8. Massa volumica: in arancione viene rappresentato il valore medio per ciascun mix

Di seguito vengono riportati i dati relativi alla densità, il valore medio per ogni miscela e il valore di dispersione percentuale (Tabella 11).

Tabella 11. Densità dei blocchi di calcestruzzo (kg/m^3)

Mix	Campione 1	Campione 2	Campione 3	Campione 4	Campione 5	Campione 6	Densità media (kg/m^3)	Dispersione (%)
NA	2108	2035	2068	2068	2108	2028	2069	4%
RA 20%	1995	1995	2028	2008	2008	2022	2009	2%
RA 50%	2029	2013	2029	1996	2007	1996	2087	2%
RA 70%	2032	2018	2074	2011	2025	2074	2039	3%

La Figura 9 mostra l'andamento della massa volumica media al variare delle differenti percentuali di sostituzione di aggregato grosso riciclato in luogo del naturale.

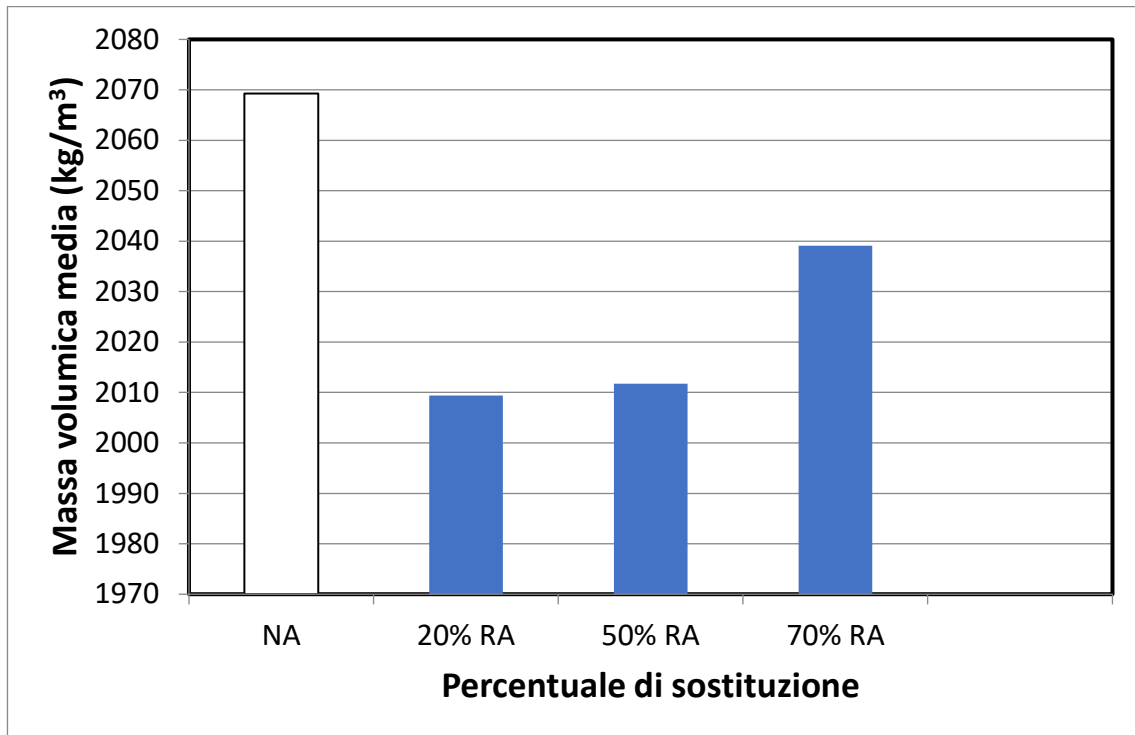


Figura 9. *Massa volumica media*

La densità dei blocchi di calcestruzzo riciclato risulta essere di poco inferiore a quella dei blocchi di calcestruzzo naturale. Essa si riduce mediamente del 3% in presenza di aggregati riciclati. Ciò è dovuto al fatto che gli aggregati grossi riciclati hanno una densità inferiore rispetto a quelli naturali. I risultati ottenuti mostrano che la dispersione è al massimo del 4% e che non ci sono differenze tangibili fra blocchi confezionati con aggregati naturali e blocchi confezionati con aggregati riciclati, per qualsiasi percentuale di sostituzione.

Assorbimento

L'assorbimento dei blocchi forati di calcestruzzo è stato determinato secondo le indicazioni della norma UNI EN 772 - 11. Sono stati testati tre blocchi per ogni miscela. La Figura 10 mostra uno dei campioni durante la prova di assorbimento



Figura 10. *Prova di assorbimento*

Nelle Tabella dalla 13 alla 16, vengono riportate le caratteristiche dei provini analizzati.

Tabella 12. Mix RA 0%

Provino	$m_{dry,s}$ (g)	Lunghezza faccia (mm)	Larghezza faccia (mm)	Area faccia A_S (mm ²)	t_{so} (s)	$m_{so,s}$ (g)	$C_{w,s}$ [g/(m ² *s ^{0,5})]
1	31700	400	250	100000	600	32000	122,5
2	30600	400	250	100000	600	30900	122,5
3	31100	400	250	100000	600	31300	81,6

Tabella 14. Mix RA 20%

Provino	$m_{dry,s}$ (g)	Lunghezza faccia (mm)	Larghezza faccia (mm)	Area faccia A_S (mm ²)	t_{so} (s)	$m_{so,s}$ (g)	$C_{w,s}$ [g/(m ² *s ^{0,5})]
1	33200	400	254	101600	10	33500	120,5
2	33600	400	254	101600	10	33800	80,3
3	33300	400	254	101600	10	33700	160,7

Tabella 15. Mix RA 50%

Provino	$m_{dry,s}$ (g)	Lunghezza faccia (mm)	Larghezza faccia (mm)	Area faccia A_S (mm ²)	t_{so} (s)	$m_{so,s}$ (g)	$C_{w,s}$ [g/(m ² *s ^{0,5})]
1	33350	400	300	120000	600	33500	51,3
2	29800	400	300	120000	600	30050	85,1
3	31300	400	300	120000	600	31500	68,0

Tabella 16. Mix RA 70%

Provino	$m_{dry,s}$ (g)	Lunghezza faccia (mm)	Larghezza faccia (mm)	Area faccia A_S (mm ²)	t_{so} (s)	$m_{so,s}$ (g)	$C_{w,s}$ [g/(m ² *s ^{0,5})]
1	29200	395	300	118500	600	29600	137,8
2	29000	395	300	118500	600	29400	137,8
3	29800	395	300	118500	600	30100	103,4

I valori di assorbimento misurati per ciascun provino vengono riportati in Figura 11 e nella Tabella 17.

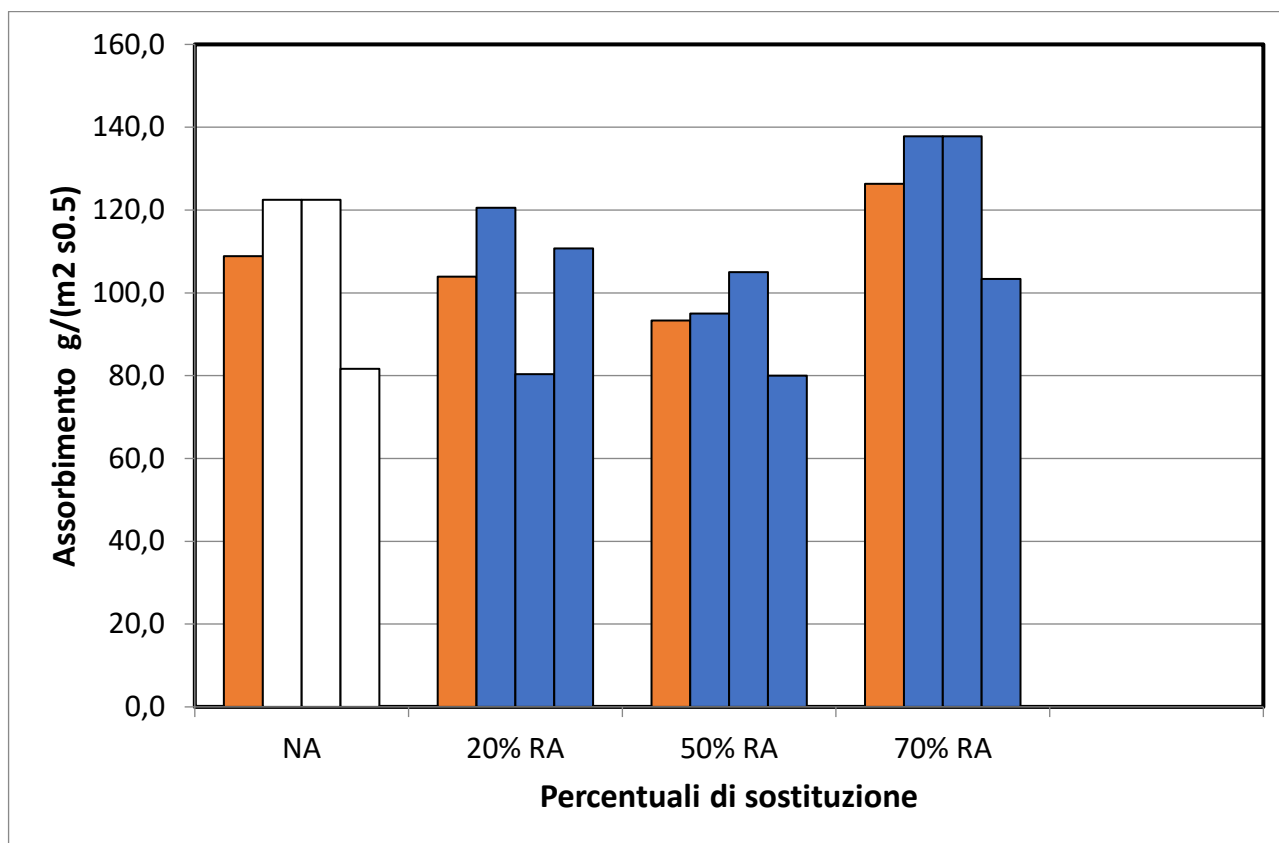


Figura 11. Valori di assorbimento - in arancione è rappresentato il valore medio per ciascun mix

Tabella 17. Valori assorbimento dei blocchi di calcestruzzo

Mix	Campione 1	Campione 2	Campione 3	Assorbimento medio (g/m ² s ^{0,5})	Dispersione %
NA	122,5	122,5	81,6	108,9	38%
20% RA	120,5	80,4	110,7	103,9	39%
50% RA	95,0	105,0	80,0	93,3	27%
70% RA	137,8	137,8	103,4	126,3	27%

La dispersione dei risultati rispetto al valore medio relativo a ciascun mix è risultata compresa fra il 27% ed il 39%. Anche nei blocchi confezionati con soli aggregati naturali la variabilità dei risultati è risultata pari al 38%. Prendendo in considerazione esclusivamente i valori medi, si ottiene il seguente l'andamento rappresentato in Figura 12.

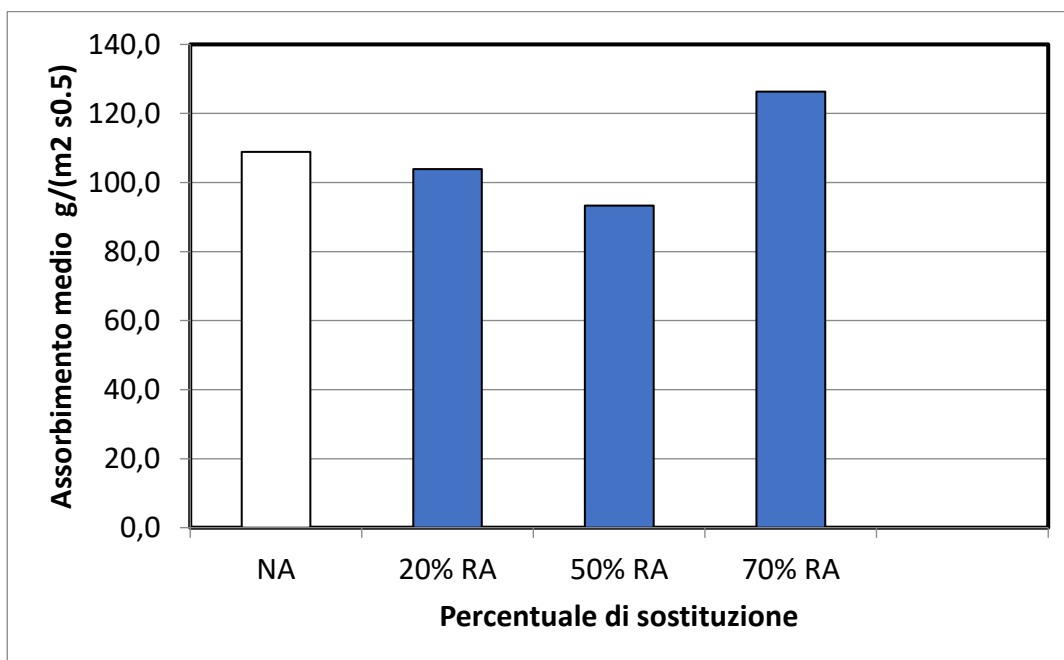


Figura 12. Prova di assorbimento

Il diagramma di Figura 12 mostra che per basse percentuali di sostituzione (20% e 50%) l'assorbimento non è influenzato dalla presenza di aggregati riciclati, anzi si osserva una riduzione rispetto all'assorbimento registrato nei blocchetti con soli aggregati naturali. Mentre per percentuali di sostituzione del 70%, si osservano valori di assorbimento maggiori.

Resistenza a compressione

La resistenza a compressione del blocco di calcestruzzo è stata determinata secondo le indicazioni della norma UNI EN 772-1, utilizzando una macchina per prove di compressione con una capacità massima di 3000 kN. Il carico è stato applicato sull'area nominale del blocco alla velocità di 450 kN/min, ad un tasso di 0,05 (N/mm²)/s. Al fine di ripartire il carico sono state disposte due lamine di piombo, una fra la superficie superiore del blocco e la parte superiore della pressa e l'altra fra la superficie inferiore del blocco ed il piano di appoggio della pressa (Figura 13). Sono stati testati complessivamente sei blocchi per ciascun mix.



Figura 13. Esecuzione prova di compressione

Nelle Tabelle dalla 17 alla 20, vengono riportati il peso e la resistenza per ciascun provino testato.

Tabella 17. Mix RA 0%

Provino	Peso (Kg)	Rc (N/mm ²)
1	31,8	4,4
2	31,1	3,6
3	30,7	3,2
4	31,1	3,7
5	31,7	4,5
6	30,5	3,2

Tabella 18. Mix RA 20%

Provino	Peso (Kg)	Rc (N/mm ²)
1	33,5	4
2	30	3,6
3	33,5	3,9
4	33	3,5
5	29,7	3,2
6	33	3,7

Tabella 19. Mix RA 50%

Provino	Peso (Kg)	Rc (N/mm ²)
1	33,5	4
2	30	3,6
3	33,5	3,9
4	33	3,5
5	29,7	3,2
6	33	3,7

Tabella 20. Mix RA 70%

Provino	Peso (Kg)	Rc (N/mm ²)
1	29,2	2,5
2	29	2,9
3	29,8	3
4	28,9	2,8
5	29,1	2,5
6	29,8	3,4

La Figura 14 mostra i risultati ottenuti, mentre nella tabella 21 vengono riportate le resistenze ottenute, unitamente alla dispersione dei risultati.

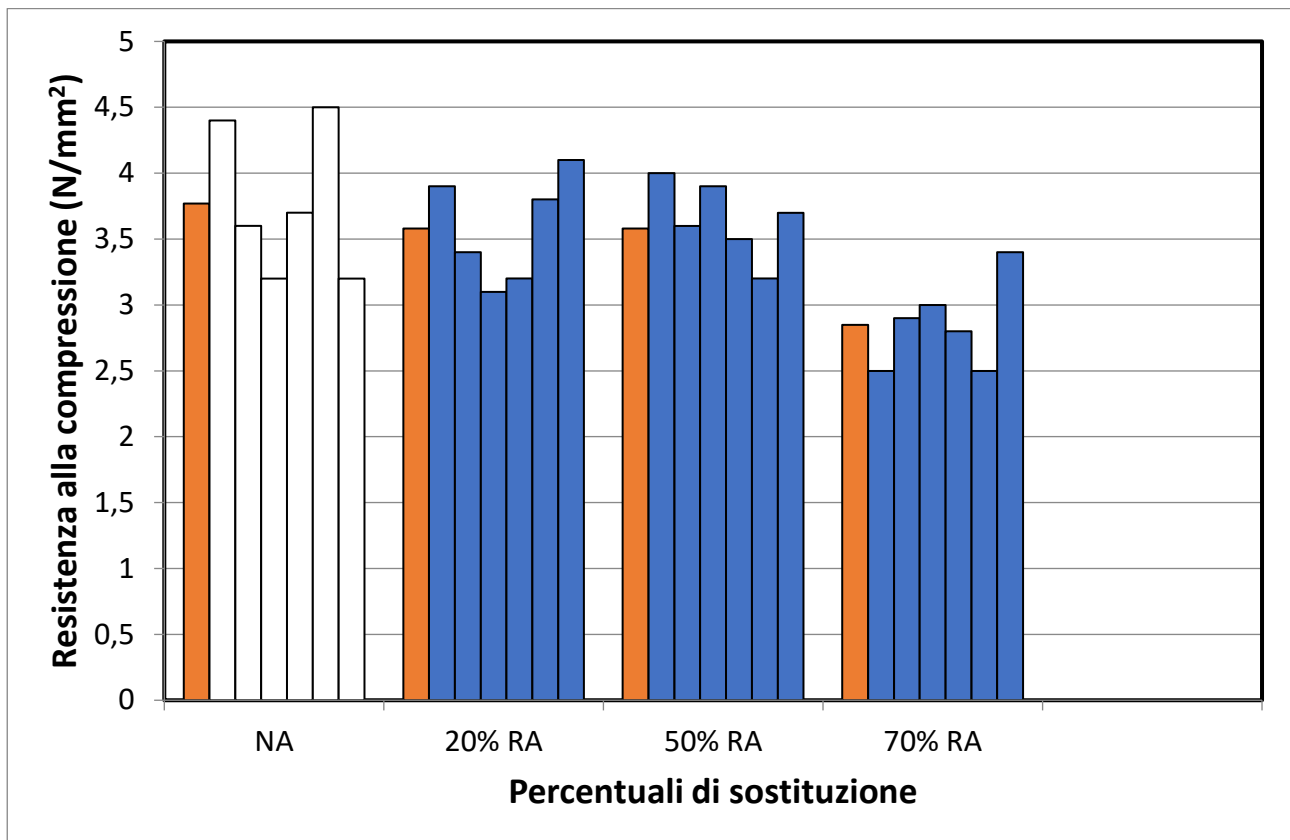


Figura 14. Resistenza a compressione: in arancione è rappresentato il valore medio

Tabella 21. Resistenza a compressione e dispersione

Mix	Campione 1	Campione 2	Campione 3	Campione 4	Campione 5	Campione 6	Resistenza media alla Compressione (N/mm ²)	Dispersione (%)
NA	4,4	3,6	3,2	3,7	4,5	3,2	3,77	35%
RA 20%	3,9	3,4	3,1	3,2	3,8	4,1	3,58	28%
RA 50%	4,0	3,6	3,9	3,5	3,2	3,7	3,58	20%
RA 70%	2,5	2,9	3,0	2,8	2,5	3,4	2,85	32%

La dispersione dei risultati rispetto al valor medio relativo a ciascun mix è risultata compresa fra il 20% ed il 35% nei blocchi con soli aggregati riciclati, mentre nei blocchi con soli aggregati naturali la variabilità dei risultati è pari al 35%.

In Figura 15 sono riportate le variazioni di resistenza media dei blocchi al variare della percentuale di sostituzione degli aggregati naturali.

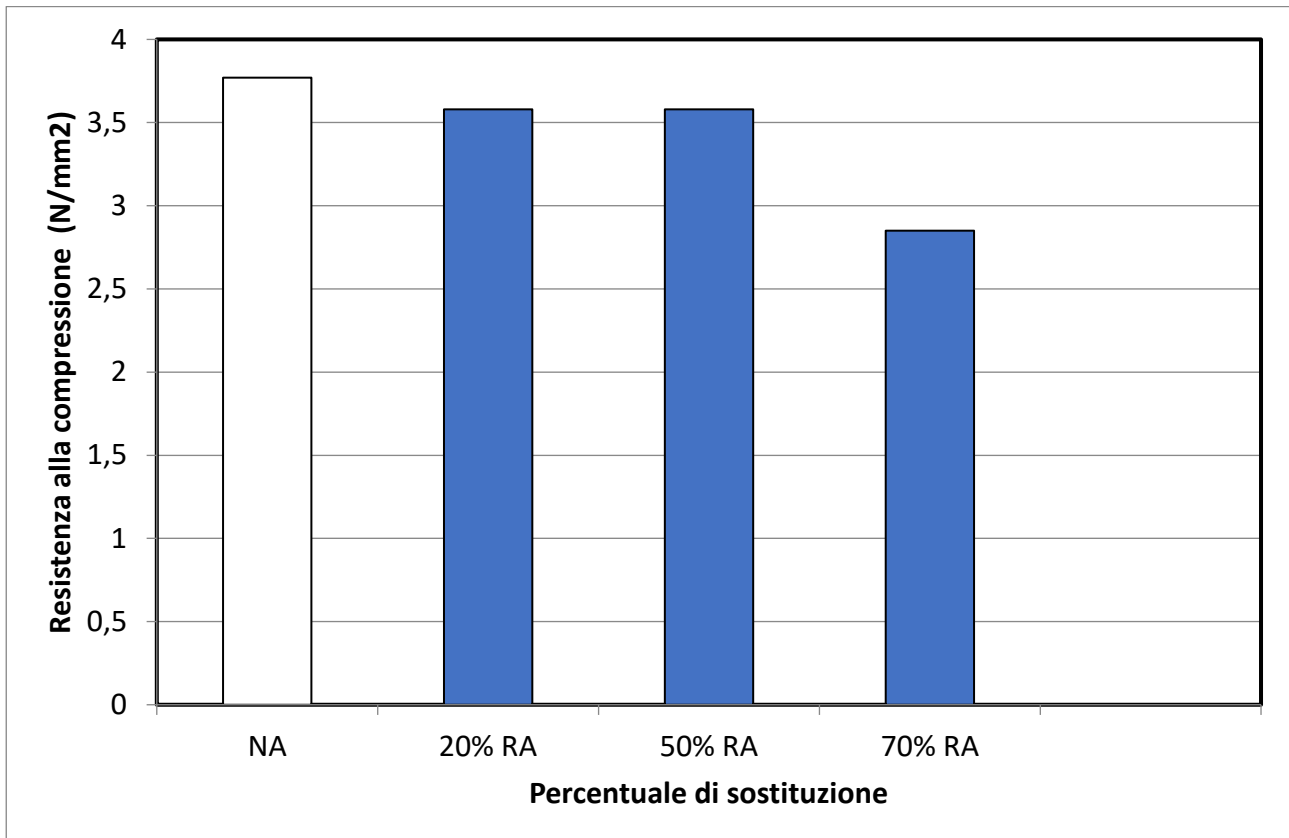


Figura 15. Resistenza a compressione dei blocchi di calcestruzzo (N/mm²)

La figura mostra come in caso di bassa percentuale di sostituzione di RA (20% e 50%) la resistenza a compressione non è influenzata dalla presenza di RA, ma rimane quasi costante rispetto ai blocchi di calcestruzzo naturale. Per percentuali di sostituzione del 70% è stata osservata una leggera diminuzione della resistenza a compressione dei blocchi di calcestruzzo riciclato rispetto a quelli naturali. I risultati mostrano una dispersione massima, variabile dal 20% al 35%.

Analisi della dispersione dei dati

In Figura 16 vengono confrontati i valori di dispersione, relativi alle miscele 20%, 50% e 70%, ricavati nelle prove eseguite per la determinazione della massa volumica, assorbimento e resistenza a compressione.

Per percentuali di sostituzione inferiori al 50% Per le prestazioni analizzate gli scarti risultano esigui e leggermente superiori per percentuali di sostituzione superiori al 50%. Le variazioni percentuali massime si registrano nella resistenza a compressione e raggiungono il 24% per una percentuale di sostituzione del 70%.

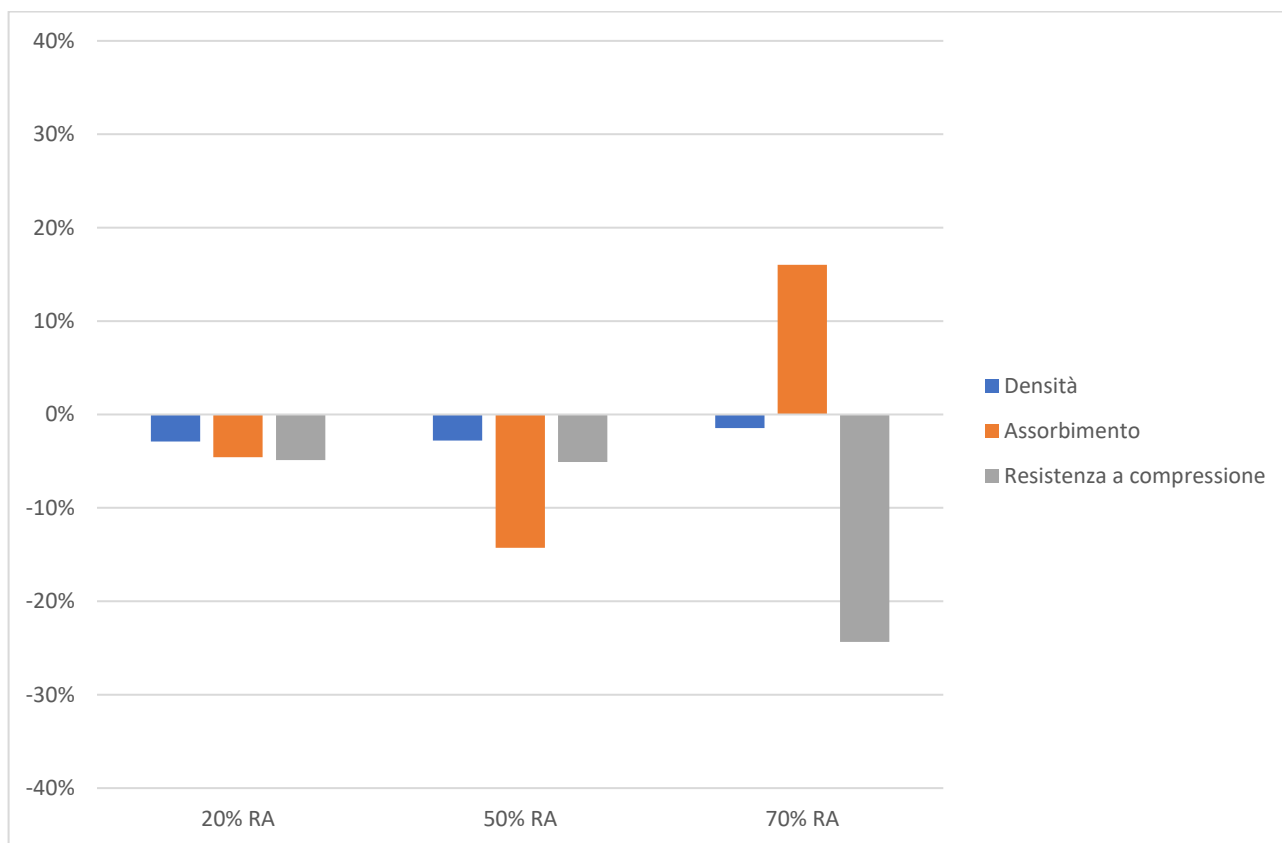


Figura 16. *Dispersione dei risultati*

Conclusioni

I risultati mostrano che le prestazioni dei blocchi forati di calcestruzzo prodotti con aggregati riciclati sono paragonabili a quelle ottenute su blocchi forati di calcestruzzo realizzati esclusivamente con aggregati naturali. Per percentuali di sostituzione fino al 50%, l'assorbimento e la resistenza a compressione non sono influenzati dalla presenza degli aggregati riciclati. Per percentuale di sostituzione variabile del 70% si osserva invece un leggero aumento dell'assorbimento e una leggera diminuzione della resistenza a compressione dei blocchi di calcestruzzo riciclato rispetto a quelli naturali. La densità dei blocchi diminuisce con l'aumento del contenuto di aggregato grosso riciclato, tuttavia questa riduzione è molto piccola rispetto alla densità dei normali blocchi di calcestruzzo, e questo per tutte le percentuali di sostituzione.