

Prospettive d'impiego dei calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati

L'articolo illustra uno studio delle possibilità d'impiego dei materiali provenienti dalle demolizioni nella realizzazione dei getti di completamento dei solai misti □ Giacomo Ferrari °, Andrea Morotti °°

Introduzione

L'attività di studio delle possibilità di impiego dei materiali provenienti dalle demolizioni di opere edili, tema della presente ricerca, ha preso l'avvio dalla non più recente emanazione della normativa nazionale di riferimento che disciplina l'utilizzo degli aggregati riciclati ottenuti da rifiuti inerti prodotti da demolizioni e trattati in impianti fissi o mobili dotati di apparecchiature idonee ad assicurarne la macinazione, la vagliatura, la selezione granulometrica ed infine la separazione delle frazioni indesiderate.

A tal proposito, relativamente al panorama normativo italiano concernente l'impiego di aggregati riciclati nelle opere di ingegneria civile e nelle costruzioni stradali, questo ha subito una notevole trasformazione dettata prevalentemente da scelte a carattere ambientale che hanno portato alla emanazione di una serie di provvedimenti legislativi di riferimento come:

A) Decreto 8 maggio 2003, n. 203 del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio - Norme affinché gli uffici pubblici e le società a prevalente capitale pubblico coprano il fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota di prodotti ottenuti da materiale riciclato nella misura non inferiore al 30% del fabbisogno medesimo.

B) Circolare n. 5205 del 15/07/2005; Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del decreto ministeriale 8 maggio

2003, n. 203; la Circolare impone alle Amministrazioni Statali l'obbligo di copertura del trenta per cento del fabbisogno annuale con aggregato riciclato e sancisce come dal punto legislativo vi sia un grande interesse a promuovere attività di riciclaggio; tale circolare, inoltre, definisce una serie di prodotti compatibili realizzati utilizzando rifiuti da demolizione individuando contemporaneamente le caratteristiche fisiche e prestazionali di sei categorie di prodotti riciclati; per gli impieghi strutturali è definita la categoria A6 che prevede la realizzazione di un aggregato riciclato conforme alla norma armonizzata UNI EN 12620:2004 idoneo al confezionamento di calcestruzzi con classe di resistenza $R_{ck} \leq 15$ Mpa secondo le indicazioni della norma UNI 8520-2.

C) Decreto Ministeriale 14 settembre 2005 - Norme Tecniche per le Costruzioni; il Decreto, al capitolo 11, tratta dei materiali e dei prodotti ad uso strutturale; per il calcestruzzo, le norme introducono importanti innovazioni di prodotto e di processo produttivo, in particolare, per i componenti del conglomerato cementizio (leganti, aggregati, additivi,



Figura 1 - Vagliatura degli aggregati da demolizione

acqua) il paragrafo 11.1.9 fa riferimento alle specifiche delle norme europee ed introduce per il confezionamento del calcestruzzo l'uso di aggregati grossi provenienti da riciclo secondo i limiti della Tabella 1 a condizione che la miscela di conglomerato cementizio confezionata con aggregati riciclati, venga preliminarmente qualificata e documentata attraverso idonee prove di laboratorio.

D) Decreto Ministeriale 11/04/2007 del Ministero delle Infrastrutture - Applicazione della direttiva n. 89/106/CE sui prodotti da costruzione, recepita con decreto del Presidente della Repubblica 21 aprile 1993, n. 246, relativa alla individuazione dei prodotti e dei relativi

Tabella 1 - Limiti di utilizzo degli aggregati riciclati secondo il D.M. 11/04/2007

Origine del materiale da riciclo	R_{ck} del calcestruzzo N/mm ²	Percentuale d'impiego
Demolizione di edifici (macerie)	15	fino al 100 %
Demolizione di solo calcestruzzo e c.a.	35	30 %
	25	fino al 60 %
Riutilizzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati	55	5%

metodi di controllo della conformità degli aggregati. Il decreto, e i relativi allegati recepiscono la normativa europea di riferimento degli inerti, per gli aggregati per calcestruzzi impone la conformità alla norma UNI EN 12620:2003. A questi provvedimenti va aggiunto il recente D.M. 14/01/2008 del Ministero delle Infrastrutture, pubblicato in G.U. il 4/02/2008.

Tenendo conto delle indicazioni sopra esposte e specificatamente i riferimenti del paragrafo 11.1.9.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni che definiscono le percentuali di aggregato riciclato da utilizzare in funzione della classe di resistenza del calcestruzzo che si vuole ottenere, nota la origine di provenienza del materiale da riciclo, la principale attività teorico sperimentale della ricerca si è focalizzata sullo studio delle prospettive d'impiego degli aggregati riciclati provenienti dal trattamento delle macerie ottenute dalla demolizione di edifici, aggregati idonei al confezionamento di calcestruzzi con classe di resistenza ≤ 15 Mpa anche in analogia con quanto previsto per la categoria A6 dei prodotti da riciclo della sopra indicata Circolare n. 5205 del 15/07/2005 del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio.

La formulazione dei calcestruzzi sperimentali con diverse percentuali di aggregato riciclato

Nella prima fase della ricerca, grazie alla disponibilità di un centro di produzione a tecnologia R.O.S.E. (Recupero Omogeneizzato degli Scarti dell'Edilizia), - tipologia d'impianto che concretamente realizza la possibilità di utilizzare i "rifiuti da costruzione e demolizione" come materiali da destinarsi alla successiva produzione di aggregati riciclati tramite il loro trattamento differenziato -, utilizzando l'inerte riciclato, prodotto dall'impianto a tecnologia R.O.S.E. nella frazione granulometrica (0 – 16 mm) più ampia, si sono ottenuti gli aggregati riciclati nelle due frazioni granulometriche 0 – 7 mm (media-fine)

MISCELA	TUTTO RIC	MISTO RIC-NAT	TUTTO NAT
Acqua/cemento	0,80	0,80	0,80
Rapporto dosatura parti in peso cemento/aggregati	1/7	1/7	1/7
DOSAGGIO		Kg/m ³	
Acqua	200	200	200
Cemento (CEM Tipo II 32,5R)	250	250	250
Aggregato Riciclato (0/7)	1225		
Aggregato Riciclato (8/16)	525	525	
Aggregato naturale (0/3)		788	998
Aggregato naturale (4/7)		437	390
Aggregato naturale (8/16)			467

Tabella 2 - Composizione delle miscele dei calcestruzzi studiati

e 8 – 16 mm (grossa).

Successivamente sono state valutate le caratteristiche dimensionali delle frazioni granulometriche e le composizioni ponderali degli inerti riciclati ottenuti e di quelli naturali disponibili al fine di giungere alle formulazioni del mix design dei calcestruzzi sperimentali caratterizzati da curve granulometriche equivalenti ottenute con differenti percentuali di inerti riciclati e naturali. Seguendo le indicazioni della norma UNI EN 206-1 relativamente alle specifiche (prestazione, composizione) del calcestruzzo ipotizzando preliminarmente una produzione e fornitura a composizione si sono specificati i requisiti di base ed aggiuntivi delle tre formulazioni delle ricette dei calcestruzzi sperimentali dei quali la composizione granulometrica è indicata in Tabella 3.

Conformemente alle indicazioni progettuali recepite per la formulazione dei calcestruzzi sperimentali confezionati rispettivamente con aggregati riciclati, misti e naturali, prima dell'utilizzo dei

diversi impasti prodotti per realizzare i getti di completamento dei travetti di riferimento delle tre formulazioni di calcestruzzo considerate, ogni tipologia d'impasto è stata caratterizzata tramite il confezionamento di quattro provini cubici 15x15x15 da sottoporre a prove di compressione.

Durante la realizzazione dei getti di completamento dei sei travetti di riferimento, previsti per la sperimentazione successiva, dove ogni coppia di elementi prodotti è rappresentativa di una singola ricetta di formulazione del calcestruzzo (normale, misto, riciclato) confezionato, i singoli impasti, relativamente alla lavorabilità dei getti, sono stati valutati, in termini di consistenza, tramite la determinazione dell'abbassamento al cono di Abrams (Slump secondo Uni 9418).

I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 4.

Come si può notare dai valori ottenuti il calcestruzzo confezionato con il 100% di aggregati riciclati da demolizione ha una lavorabilità S0 minore rispetto alle

Tabella 3 - Composizione granulometrica dei calcestruzzi studiati

1. Tutto Riciclato	(aggregati 0/7 R, 8/16 R)
2. Misto Riciclato/Naturale	(aggregati 0/3 N, 4/7 N, 8/16 R)
3. Tutto Naturale	(aggregati 0/3 N, 4/7 N, 8/16 R)

Miscela	Abbassamento al cono di Abrams (Slump) in mm
Tutto Riciclato	7
Misto Riciclato/Naturale	40
Tutto Naturale	30

Tabella 4 - Consistenza dei calcestruzzi studiati

altre due miscele, ciò può essere causato dalla presenza di una maggior quantità di inerti fini; nelle altre due miscele, composte rispettivamente da aggregato misto (riciclato grosso, naturale fine) e da aggregato tutto naturale, la lavorabilità è dello stesso ordine di grandezza essendo lo Slump nella stessa classe di consistenza.

I risultati delle prove di resistenza a compressione

Allo scopo di valutare le differenze prestazionali espresse in termini di valori sviluppati della resistenza a compressione da ognuna delle tre formulazioni di calcestruzzo considerate, dopo una maturazione a 28 giorni dei provini cubici (cm, 15x15x15) predisposti per il confronto, si sono eseguite le prove di determinazione della resistenza a compressione sui campioni predisposti per caratterizzare le miscele degli aggregati utilizzati nelle diverse formulazioni operando conformemente alla normativa di riferimento (UNI EN 12390-2-3).

Nel dettaglio i risultati delle prove di compressione sui provini di calcestruzzo confezionato con il 100% di inerte naturale espressi in termini di resistenza media a compressione, deviazione standard, resistenza cubica caratteristica ($K=2,14$, $n=10$), hanno assunto i seguenti valori:

Resistenza media R_m 85 daN/cm², deviazione standard 2,061 daN/cm², resistenza caratteristica a compressione $R_{bk} = 81$ daN/cm². Per i campioni

realizzati con una percentuale del 30% della massa degli aggregati composta da inerte riciclato grosso (calcestruzzo misto con inerte riciclato nella frazione granulometrica 8/16) i valori di R_m e R_{bk} risultano superiori a quelli ottenuti in precedenza (calcestruzzo con il 100% di inerte naturale) come indicato dai risultati di prova esposti in Tab. 5: Resistenza media R_m 103 daN/cm², deviazione standard 6,00 daN/cm², resistenza caratteristica a compressione $R_{bk} = 90$

Normale	Dosaggio cemento 227 kg/m ³	$R_{bk} = 81$ daN/cm ²
Riciclato	Dosaggio cemento 250 kg/m ³	$R_{bk} = 39$ daN/cm ²
Misto	Dosaggio cemento 250 kg/m ³	$R_{bk} = 90$ daN/cm ²

Tabella 6 - Resistenze caratteristiche a compressione delle diverse formulazioni del calcestruzzo

daN/cm². In conclusione i risultati più scadenti delle prove di rottura sono stati espressi dalla serie di provini rappresentativa del conglomerato cementizio confezionato con il 100% di inerte riciclato, per questa formulazione la resistenza a rottura a compressione è stata di gran lunga inferiore rispetto ai valori assunti dalle altre due formulazioni del mix design dei calcestruzzi considerati; più specificatamente, la resistenza media a compressione dei provini testati ha assunto il valore di 79 daN/cm², ma essendo i singoli risultati di prova più dispersi questi hanno determinato una deviazione standard di valore 18,82 daN/cm² che ha influenzato negativamente la determinazione del

valore assunto dalla resistenza cubica caratteristica a compressione espressa dal valore di 39 daN/cm².

Alcune considerazioni sull'impiego del calcestruzzo sperimentale prodotto per la realizzazione di elementi strutturali

Le prestazioni strutturali conseguibili, derivanti dalle basse resistenze caratteristiche ottenute dai campioni rappresentativi delle tre differenti formulazioni di calcestruzzo sperimentale sintetizzate nella sottostante Tabella 6, possono essere quantificate, per l'impiego previsto (realizzazione di tavolati per solai) valutando e confrontando i

singoli domini di resistenza sviluppati da ogni identica sezione dei tre travetti di riferimento (convenzionalmente indicati come travetti tralicciati di produzione nazionale) delle 3 tipologie di calcestruzzo utilizzato nella formazione dei campioni dei complessivi sei prototipi di elementi per solaio impiegati nella seconda fase sperimentale della



Prova flessione su un travetto confezionato con aggregato riciclato

Tabella 5 - Risultati delle prove di compressione a rottura dei cubetti 15x15x15

Tipo di inerte nelle formulazioni del calcestruzzo	Naturale	Misto	Riciclato
Resistenza media (daN/cm ²)	85	103	79
Deviazione standard (daN/cm ²)	2.061	6	18,82
Resistenza caratteristica (daN/cm ²)	81	90	39
Massa volumica media (Kg/m ³)	2091	2051	1970

ricerca che si è concretizzata con la realizzazione delle prove a flessione semplice sui sei travetti gettati in opera con i calcestruzzi di completamento studiati.

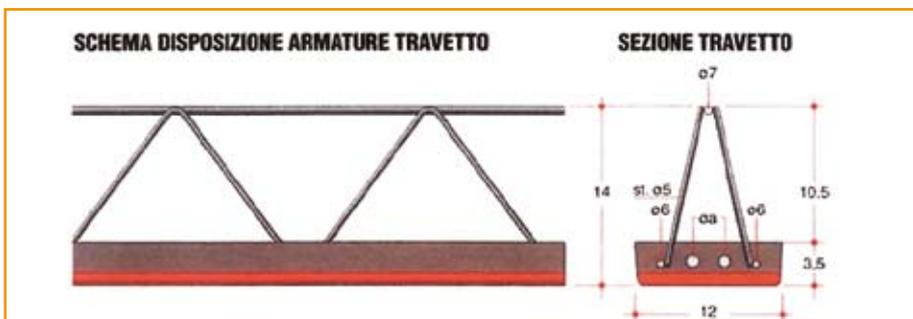


Figura 2 - Particolari di dettaglio dei travetti di riferimento

Noti gli elementi progettuali delle caratteristiche meccaniche e geometriche della sezione (Fig. 2) rappresentati rispettivamente da una armatura a traliccio, composta da 1 tondo ϕ 7 superiore e da 2 tondi ϕ 8 + 1 ϕ 10 inferiori di acciaio ad aderenza migliorata FeB44K, e da uno strato continuo inferiore di calcestruzzo e laterizio agglomerato con funzione portante e di cassatura dei getti di completamento eseguiti con i tre differenti tipi di calcestruzzo sperimentale, si è determinato il dominio resistente di progetto per la sezione modello diversificata negli specifici parametri progettuali

dalle differenti caratteristiche misurate sui campioni rappresentativi delle diverse formulazioni di calcestruzzo sperimentale e dall'indicato valore richiesto come inderogabile parametro qualitativo assunto dal produttore ($R_{bk} = 250 \text{ daN/cm}^2$) per il

corretto impiego ed utilizzo in sicurezza del travetto tralicciato. I risultati della valutazione analitica sono sintetizzati nei grafici 1, 2, 3, 4, dove vengono presentati puntualmente e graficamente i domini resistenti di progetto per la sezione del modello di Fig. 2 differenziata, questa, solo dai valori assunti dalle quattro diverse resistenze caratteristiche del calcestruzzo sperimentale prodotto per il confezionamento dei travetti di riferimento delle singole sezioni o dal valore indicato da produttore del travetto tralicciato quale inderogabile standard prestazionale minimo richiesto ($R_{bk} = 250 \text{ daN/cm}^2$), mentre nella ultima colonna della Tabella 7 sono riportati i valori sperimentali del momento di

Tabella 7 - Compendio dei valori delle sollecitazioni ultime di progetto N_{rd} , M_{rd} e di rottura M_{ru} della sezione del travetto con riferimento alle quattro tipologie (R_{bk}) del calcestruzzo studiato

	N_{rd} (daN)	M_{rd} (daNm)	R_{bk} (daN/cm ²)	M_{ru} (daNm)
PROS 3Q (d=8cm)	- 14231	1417	250	
NORM (d=8cm)	- 1101	802	81	699
MISTO (d=8cm)	- 1800	836	90	700
RICICL (d=8cm)	2162	650	39	639

Grafico 1

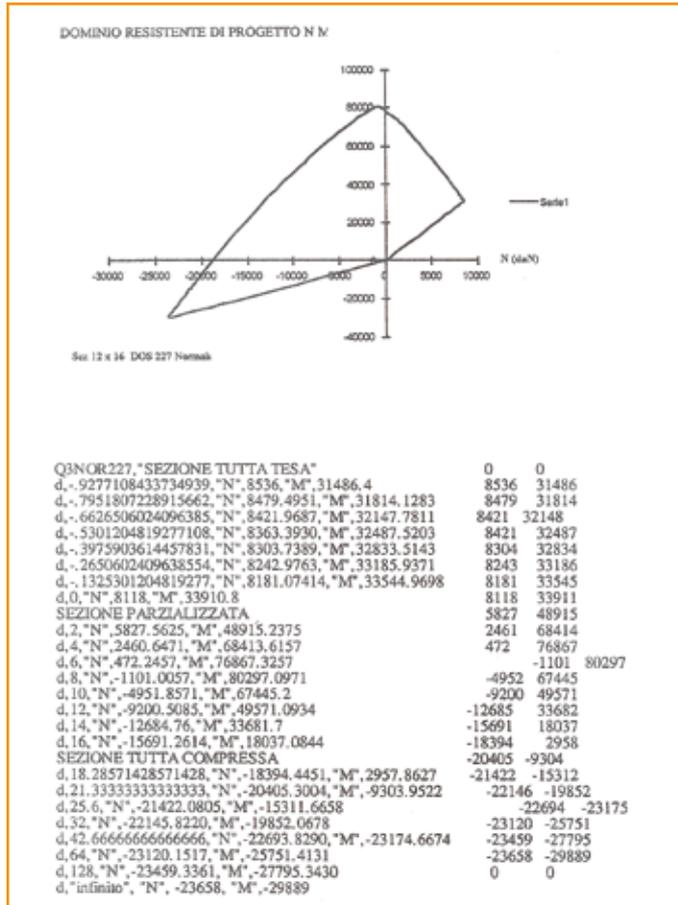


Grafico 2

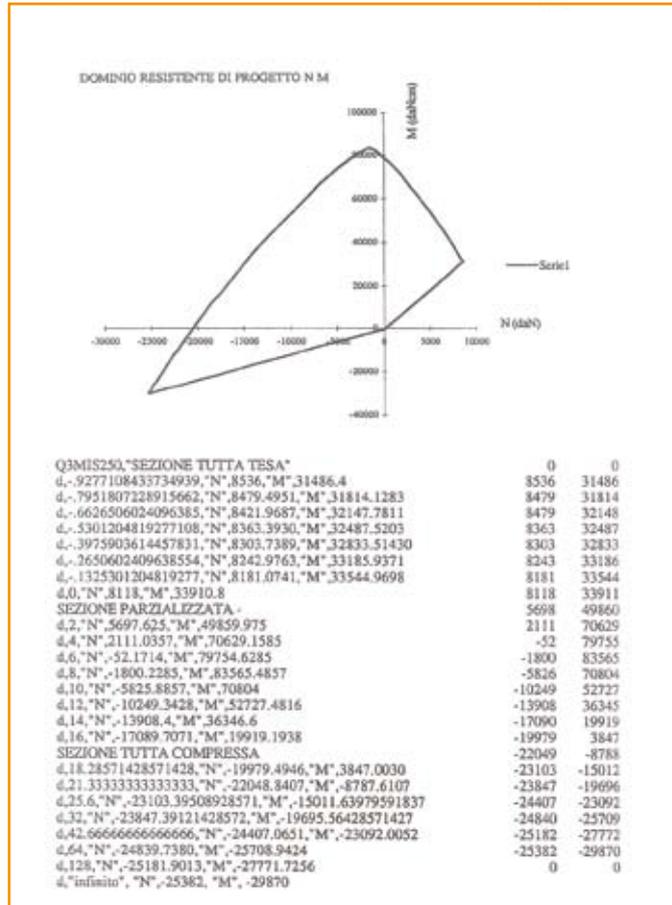


Grafico 3

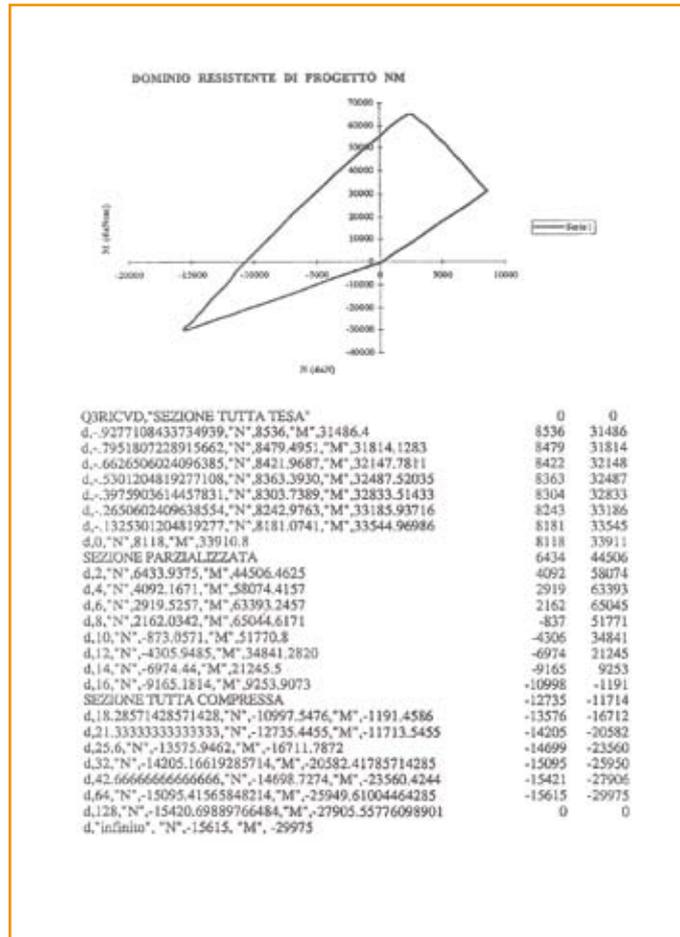
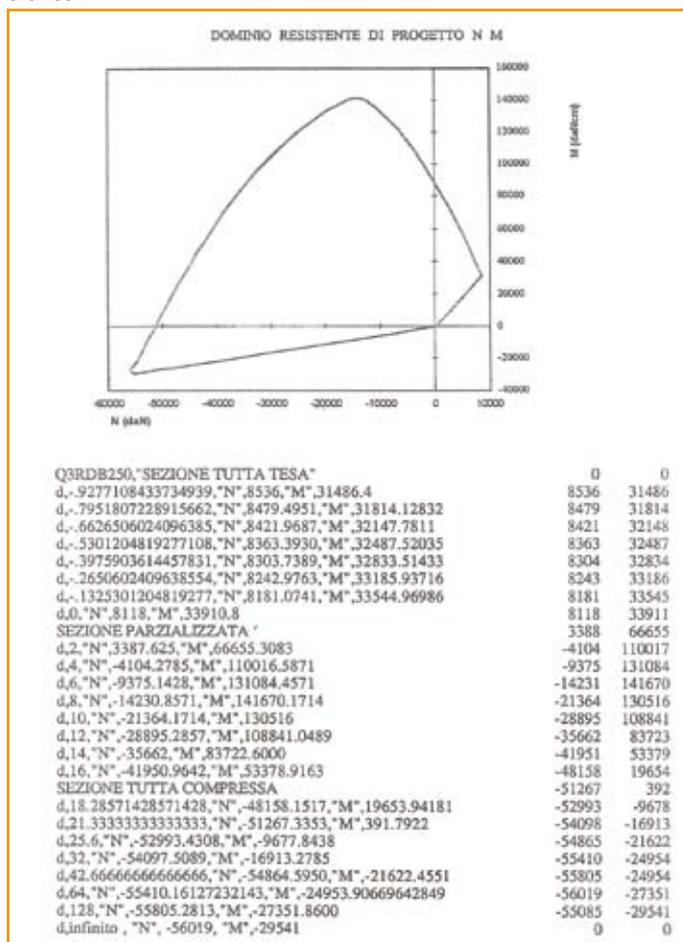


Grafico 4



rottura ultimo medio ottenuto con le prove di flessione in semplice appoggio con due carichi agenti ad un terzo della luce dal rispettivo appoggio, prove eseguite sui travetti sperimentali rappresentativi delle tre tipologie di calcestruzzo formulato per la sperimentazione. Analogamente, la massima capacità resistiva a compressione della sezione si ha per $d = \infty$ con l'assunzione dei sottorportati valori analitici dello sforzo di compressione in funzione delle differenti tipologie di calcestruzzo.

Conclusioni

I risultati analitico sperimentali, se si fa riferimento allo standard prestazionale richiesto dal produttore del travetto tra-

ciato ed imposto da questi tramite un vincolo assegnato alla resistenza caratteristica del calcestruzzo utilizzabile nei getti a cui corrispondono definiti valori della capacità di resistenza delle caratteristiche della sezione (essenzialmente M ed N), conducono ai sotto indicati parametri quantitativi di confronto fatto 100% il valore assunto da M_{rd} ed N_{rd} per la soluzione indicata dal produttore del travetto in riferimento ad un utilizzo ottimale dello stesso. Come emerge dai parametri di confronto assunti, in ogni caso l'impiego di calcestruzzo sperimentale riciclato, misto o normale ad alto rapporto A/C conduce a bassi valori delle resistenze caratteristiche che incidono negativamente, secondo le percentuali sopra indicate, sulle caratte-

ristiche prestazionali del travetto gettato in opera.

Tali diminuzioni delle caratteristiche di riferimento vanno dal 72% per la resistenza N_{rd} della sezione in calcestruzzo riciclato al 43% per il momento resistente della sezione in calcestruzzo normale ad alto rapporto A/C. I rilevanti valori percentuali in diminuzione delle caratteristiche di resistenza $M_r N_r$ nelle sezioni caratterizzanti i travetti confezionati, attualmente impongono un attento e ponderato studio del mix design delle differenti tipologie di calcestruzzo che si vorrà produrre per una eventuale formazione dei getti per solai. ♻️

° Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per le Tecnologie della Costruzione
 °° Controls Srl

	N_{rd} (daN)	R_{bk} (daN/cm ²)
PROS 3Q (d=§)	- 56019	250
NORM (d=§)	- 23459	81
MISTO (d=§)	- 25382	90
RICICL (d=§)	- 15615	39

Tabella 8 - Massima capacità di sforzo di compressione della sezione tutta reagente

	N_{rd}	M_{rd}	R_{bk} (daN/cm ²)	M_{ru} (daNm)
PROS 3Q	100%	100%	250	
NORM	41,87%	56,59%	81	49,32%
MISTO	45,30%	58,99%	90	49,40%
RICICL	27,87%	45,87%	39	45,09%

Tabella 9 - Valori percentuali di confronto dei parametri prestazionali N_{rd} ed M_{rd}