

Experimental study on cracking of reinforced recycled concrete slabs

Studio sperimentale sulla fessurazione di piastre armate in calcestruzzo riciclato

L. Pani¹, L. Francesconi¹, F. Stochino¹, F. Mistretta¹

¹ *Department of Civil, Environmental Engineering and Architecture, University of Cagliari, Cagliari, Italy*

ABSTRACT: This paper presents the results of an experimental investigation on cracking of fifteen reinforced recycled concrete slabs. Five recycled concrete mixes with different coarse recycled aggregates replacement percentage have been realized. The slab dimensions are 1100 · 1100 · 50 mm and flexural reinforcement of all specimens has been realized by using two 100 · 100 mm welded mesh layers and wire diameter of 5 mm. Tensile strength, cylindrical compressive strength and modulus of elasticity of the concrete mixes have been estimated experimentally. The simply supported reinforced recycled concrete slabs have been tested under the action of central patch load in order to evaluate the central deflection - load curve. The experimental cracking load is determined on the curve as the linear limit load. The recycled concrete slabs show a similar behaviour to those realized with ordinary concrete. The theoretical cracking loads are in good agreement with experimental results./ Questo lavoro presenta i risultati dell'indagine sperimentale relativa alla fessurazione di quindici piastre di calcestruzzo armato. Cinque miscele di calcestruzzo sono state realizzate variando la percentuale di sostituzione di aggregato grosso riciclato in luogo del naturale. Le dimensioni della piastra sono 1100 · 1100 · 50 mm e l'armatura flessionale di tutti i campioni è realizzata con due fogli di rete elettrosaldata diametro 5 mm e maglia 100 · 100 mm. La resistenza a trazione, la resistenza a compressione cilindrica ed il modulo elastico dei calcestruzzi confezionati sono stati determinate sperimentalmente. Le piastre, in condizione di semplice appoggio, sono state testate applicando un carico concentrato centrale verticale allo scopo di determinare la curva freccia - carico. Il carico di fessurazione sperimentale è determinato sulla curva come carico limite del campo lineare. Le piastre di calcestruzzo riciclato mostrano un comportamento simile a quelle realizzate con calcestruzzo ordinario. I carichi teorici di fessurazione sono in buon accordo con i risultati sperimentali.

KEYWORDS: Recycled concrete aggregate, Recycled concrete, Slab, Equivalent Frame Method, Cracking load/ Aggregato riciclato di calcestruzzo, Calcestruzzo riciclato; Piastra, Metodo del telaio equivalente, Carico di fessurazione.

1 INTRODUZIONE

Il calcestruzzo è il materiale da costruzione più impiegato nel mondo. Il suo comportamento in condizioni ordinarie ed estreme (Acito et al. 2011, Tattoni et al. 2013, Stochino & Carta 2014, Stochino 2016) rappresenta un argomento attuale e rilevante. Allo stesso modo l'uso di aggregati naturali per la sua produzione, presenta un importante problema per lo sviluppo sostenibile (Etxeberria et al. 2007, Kosmatka et al. 2003). L'impiego di aggregati naturali si ripercuote in un forte impatto nel territorio per la presenza di cave di estrazione, alcune delle quali sono in via di estinzione e pertanto diventa necessario aprire nuovi siti estrattivi.

Il mondo delle costruzioni, d'altro canto, produce una grandissima quantità di materiali di rifiuto. Le linee guida Europee (Report from the Commission to the European Parliament 2011) incoraggiano l'uso di materiale riciclato per la realizzazione di nuovi prodotti. Molti ricercatori nel mondo hanno focaliz-

zato i loro studi sull'uso di aggregati riciclati prodotti dalle macerie delle costruzioni per la produzione di calcestruzzo riciclato (Mália et al. 2013, Levy & Helene 2004, Hansen & Narud 1983, Xuping 2008, Xuping 2009, Corinaldesi & Moriconi 2006). L'utilizzo di materie prime di recupero, infatti, consente di ridurre lo sfruttamento di suolo e sottosuolo e di prolungare la durata delle cave e miniere, ritardando l'apertura di nuovi siti estrattivi e preservando così risorse naturali non rinnovabili.

I benefici dell'uso di aggregati riciclati per la produzione di calcestruzzo sono chiari. L'uso degli aggregati naturali può essere limitato ed il materiale depositato nelle discariche potrebbe essere significativamente ridotto, con considerevoli doppi vantaggi per l'ambiente.

Molte ricerche (Pani & Francesconi 2010, Rahal 2007, De Brito et al. 2016, Kenai et al. 2015, Evangelista & de Brito 2007, Poon et al. 2004) hanno avuto come obiettivo il valutare gli effetti dell'impiego di aggregati riciclati, prodotti dalla frantumazione

zione di calcestruzzo, sulle prestazioni del nuovo calcestruzzo con essi confezionato. Tutti gli studi presenti in letteratura hanno evidenziato che questo tipo di aggregati riciclati hanno differenti proprietà rispetto ai naturali (elevato valore di assorbimento, minore densità e più alto valore Los Angeles). Inoltre poiché il calcestruzzo originale impiegato per la loro produzione può essere fortemente differente, ne consegue che anche gli aggregati riciclati hanno una elevatissima dispersione nelle prestazioni. Per questo motivo ancora oggi, nonostante le politiche messe in atto in tutto il mondo, l'impiego di aggregati riciclati per la produzione di calcestruzzo strutturale è vista con sospetto. Molti paesi del mondo hanno definito Norme, Raccomandazioni e Linee Guida riguardanti proprietà ed impiego degli aggregati riciclati da calcestruzzo (ACI 555 2001, BRE 433 1998, BS 6543 1985, DIN 4226-100 2002, NTC 2008, Model Code 2010, ACI 318 2011).

Molti studi sono stati condotti sulle prestazioni di travi e pilastri in calcestruzzo riciclato armato (Pacheco et al. 2015, Mukai & Kikuchi 1988, Yagishita et al. 1993, Gonzalez-Fonteboa & Martinez-Abella 2007, Yang & Han 2006), ma ancora limitati sono quelli relativi al comportamento delle piastre (Sudarsana Rao et al. 2015, Reis et al. 2015).

Le piastre in calcestruzzo armato presentano diversi vantaggi come la riduzione di spessore, se rapportata alle dimensioni di un solaio latero-cementizio, semplicità di getto, versatilità nel partizionamento degli spazi, tale da considerare tale sistema strutturale economico ed efficiente. Anche se apparentemente semplice, il comportamento strutturale può risultare complesso. Il meccanismo di rottura taglio punzonamento è molto pericoloso a causa della sua natura fragile e perché può essere l'origine di un crollo progressivo. I primi modelli si basavano sul comportamento fisico delle piastre, ma le formule di progettazione relative risultano complicate per un uso pratico. Molti ricercatori hanno fornito modelli fisici e teorie innovative che portano a semplici espressioni di progetto che sono stati recepiti dai principali Codici Internazionali (Model Code 2010, EC2 2008, ACI 318 2011).

In questo lavoro, per meglio comprendere il comportamento di piastre in calcestruzzo riciclato armato, sono presentati nuovi dati sperimentali relativi alla fase di fessurazione. Sono state realizzate 15 piastre con differenti miscele di calcestruzzo riciclato. Le miscele sono divise in 5 gruppi: 0%, 30%, 50%, 80% e 100% di percentuale di sostituzione di aggregate grossi riciclati in sostituzione agli aggregati grossi naturali. Le piastre, di dimensione 1100 · 1100 · 50 mm ed armate con bassa percentuale di armatura ($\rho = 0,56\%$), sono state sollecitate, in condizione di semplice appoggio lungo i quattro lati, da un carico concentrato nella mezzeria, distribuito su una superficie di 200 · 200 mm. Il carico di fessurazione è stato inoltre confrontato con il carico teorico

di fessurazione, allo scopo di analizzare la possibilità di realizzare piastre in calcestruzzo riciclato armato con prestazioni strutturali adeguate, anche quando gli aggregati riciclati sono ottenuti da macerie di calcestruzzo, del quale non si conoscano né le proprietà meccaniche né lo stato di conservazione. Infatti gli aggregati riciclati impiegati nella presente campagna sperimentale sono stati prelevati in modo casuale nell'arco di un anno da tre discariche autorizzate con impianto di riciclaggio operanti nel territorio del sud Sardegna.

2 I MATERIALI

I calcestruzzi sono stati realizzati con cemento Portland CEM II/A-LL 42.5 R, gli aggregati naturali fini e grossi provengono da una cava di estrazione del sud Sardegna ed usualmente utilizzati in un impianto di preconfezionamento di calcestruzzo certificato. In tutte le miscele è stato impiegato un additivo superfluidificante in modo tale che la classe di consistenza fosse superiore o uguale ad S4. La rete elettrosaldata, impiegata per la realizzazione delle armature, è realizzata con acciaio B450A diametro dei fili 5 mm e maglia quadrata 100 · 100 mm. L'armatura è disposta all'intradosso e all'estradosso della piastra con un ricoprimento di calcestruzzo di 10 mm. Risulta una percentuale di armatura limitata, pari allo 0,56%.

Nella Tabella 1 sono riportate le principali proprietà degli aggregati naturali e riciclati (densità ρ , densità a superficie asciutta ρ_{ssd} , acqua di assorbimento WA_{24}).

Table 1. Properties of natural and recycled aggregates / Proprietà degli aggregate naturali e riciclati.

Aggregati	dimensione (mm)	ρ (kg/m ³)	ρ_{ssd} (kg/m ³)	WA_{24} (%)
Fini naturali	0 - 4	2707	2630	2.00
Grossi naturali	4 - 12	2691	2600	1.40
Grossi riciclati	4 - 12	2630	2360	7.54

Nella Tabella 2 è riportata la composizione delle miscele di calcestruzzo.

Le miscele sono divise in 5 gruppi, distinte in funzione della percentuale di sostituzione (Sost %) di aggregati riciclati grossi in luogo dei naturali. Il dosaggio del cemento, dell'acqua di impasto e degli aggregati fini naturali (0-4 mm) per m³ di impasto è rimasto costante per tutte le miscele di calcestruzzo confezionate (420 kg di cemento; 175 kg acqua; 827 kg aggregati fini naturali).

Allo scopo di caratterizzare il calcestruzzo sono stati confezionati per ciascuna miscela 3 provini cubici (lato 150 mm) per determinare la resistenza a trazione indiretta f_{ct} (N/mm²), e 3 provini cilindrici (diametro 150 mm ed altezza 300 mm). Questi ultimi

mi sono stati testati dapprima per determinare il modulo elastico secante stabilizzato E_c (N/mm^2) e poi portati a rottura per determinare la resistenza a compressione cilindrica f_c (N/mm^2).

Table 2. Concrete mix / Miscele di calcestruzzo ($1 m^3$).

Miscele	Sost%	Aggregati Grossi (4-16 mm)		
		Naturali kg	Riciclati kg	Additivo kg
NC0	0	897	0	4.87
RC1	30	628	229	4.90
RC2	50	449	381	5.54
RC3	80	179	610	4.44
RC4	100	0	763	4.96

Nella Tabella 3 sono riportati i valori medi (media dei risultati dei tre provini) a 28 gg della densità, f_c , f_{ct} ed E_c dei calcestruzzi realizzati per confezionare le piastre.

Table 3. Average mechanical properties of concrete / Proprietà meccaniche medie del calcestruzzo.

Miscele	Sost%	Densità (kg/m^3)	f_c	f_{ct}	E_c
			(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)
NC0	0	2403	71.1	4.20	42581
RC1	30	2343	63.6	4.40	40381
RC2	50	2329	62.0	3.94	37980
RC3	80	2260	56.3	3.83	28818
RC4	100	2257	50.8	3.65	31390

3 RISULTATI SPERIMENTALI

La prova di carico è stata condotta appoggiando la piastra lungo i quattro lati di bordo su travi in acciaio HEA 100. Il carico, introdotto da un piatto in acciaio avente dimensioni $200 \cdot 200 \cdot 5$ mm, è stato applicato nel baricentro geometrico della superficie di estradosso della piastra. All'intradosso, in corrispondenza del medesimo baricentro, è stato posto un estensimetro a filo per misurare la freccia. La Figura 1 mostra in dettaglio il setup della prova. Il carico verticale è stato applicato tramite martinetto idraulico da 500 kN.

L'acquisizione dei carichi e delle frecce è avvenuta in continuo tramite una centralina di acquisizione dati ad elevate prestazioni. Il carico applicato è stato incrementato monotonicamente fino al collasso per punzonamento della piastra. Nella Figura 2 sono riportate le curve sperimentali Carico – Freccia fino al collasso per punzonamento.

Per ciascuna miscela sono state realizzate 3 piastre e sono state ottenute tre curve sperimentali. Il carico di fessurazione coincide con il limite superiore del primo tratto del diagramma che ha andamento pressoché lineare.

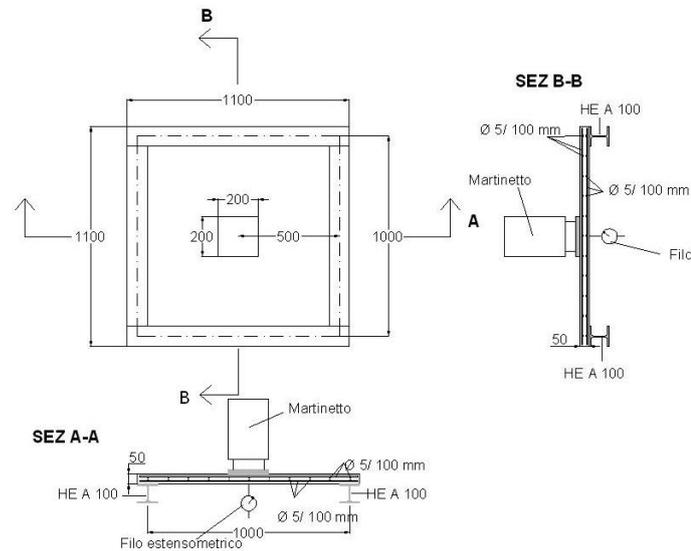


Figure 1. Geometry of the slab specimen and test setup / Geometria della piastra e setup di prova.

Nella Tabella 4 sono riportati i valori del carico di fessurazione e della relativa freccia.

Table 4. Deflection and Load of cracking / Carico di fessurazione F_{cr} e relativa freccia δ_{cr} .

Piastre	F_{cr} (kN)	$F_{cr,medio}$ (kN)	δ_{cr} (mm)	$\delta_{cr,max}$ (mm)
NC0-1	17.00		2.27	
NC0-2	21.53	18.80	1.76	2.27
NC0-3	17.87		0.58	
RC1-1	17.87		1.29	
RC1-2	23.50	19.74	2.30	2.35
RC1-3	17.87		2.35	
RC2-1	17.87		1.54	
RC2-2	21.53	20.31	2.49	2.49
RC2-3	21.53		1.82	
RC3-1	14.23		2.09	
RC3-2	17.87	16.66	2.77	2.77
RC3-3	17.87		2.33	
RC4-1	17.87		3.16	
RC4-2	21.53	19.09	2.83	3.16
RC4-3	17.87		0.14	

4 ANALISI TEORICA

Il comportamento sperimentale della piastra testata è molto simile al comportamento della piastra continua estesa sorretta puntualmente da pilastri, nell'intorno di un suo pilastro centrale. Il carico applicato rappresenta la reazione del pilastro centrale ed il momento flettente negativo in corrispondenza della colonna centrale coincide con il momento flettente nella piastra testata.

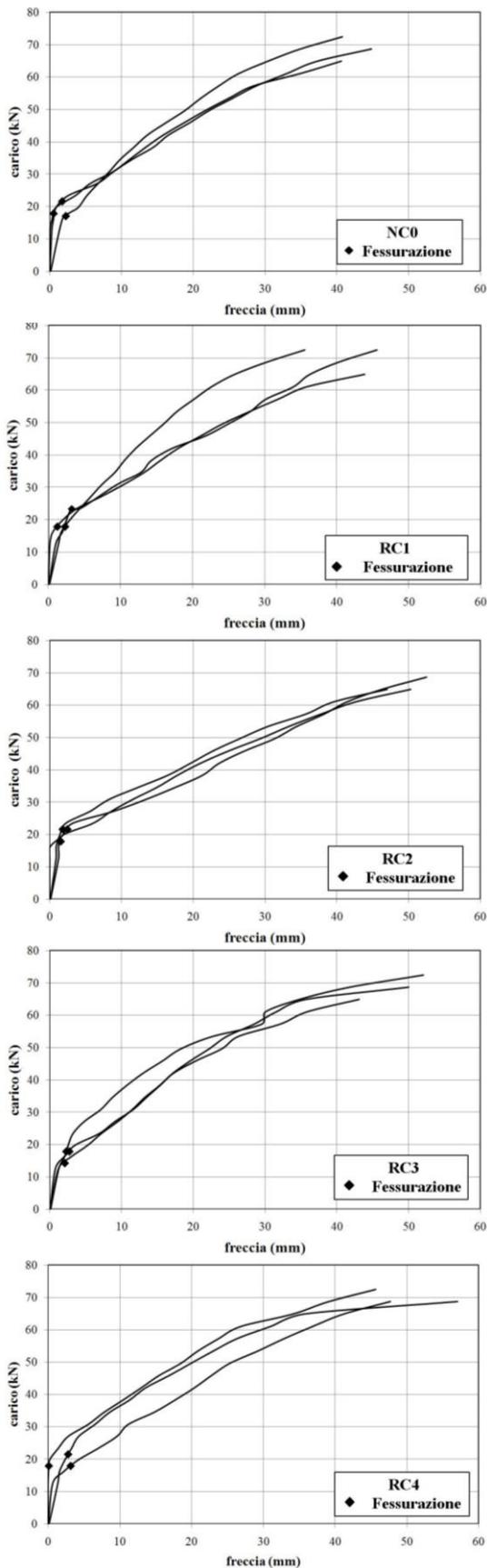


Figure 2. Load–deflection curves of slabs / Curve sperimentali Carico Freccia delle piastre.

Per valutare il momento sollecitante prodotto dal carico di fessurazione sperimentale si è impiegato il Metodo del Telaio Equivalente (Equivalent Frame Method EFM, riportato nel Cap. 13 dell'ACI 318 2011 e nell'Appendice I dell'EC2 2005), che consente di ottenere la soluzione elastica di una piastra

estesa, sorretta puntualmente in corrispondenza dei pilastri, con luci fra i pilastri L_x ed L_y , rispettivamente in direzione x ed y .

La piastra estesa corrispondente, poggiante su pilastri, ha campi di dimensione $L_x = L_y = 2386$ mm ed è sollecitata da un carico uniforme q (kN/m^2). Il momento massimo negativo nei nodi del Telaio Equivalente risulta pari a:

$$M^- = \frac{q \cdot L_y \cdot L_x^2}{12} \quad (1)$$

Considerando la striscia di colonna di larghezza $L_y/2$ e le due strisce di campo rispettivamente $L_y/4$, se si adotta una percentuale di ripartizione del 75% per la striscia di colonna e del 25% per quelle di campo, il momento flettente $m_{x, \text{striscia colonna}}$ assume il valore:

$$m_{x, \text{striscia colonna}} = \frac{1}{8} \cdot V \cdot \frac{L_x}{L_y} \quad (2)$$

dove $V = q \cdot L_y \cdot L_x$ (3)

La larghezza b_s della striscia di riferimento per il calcolo del momento flettente teorici di fessurazione $m_{cr, \text{teo}}$ e del momento flettente di fessurazione sperimentale sollecitante $m_{cr, \text{sp}}$ risulta pari a:

$$b_s = 1.5 \cdot \sqrt{r_{sx} \cdot r_{sy}} = 1.5 \cdot \frac{1050}{2} = 787.5 \text{ mm} \quad (4)$$

Per il calcolo del momento teorico di fessurazione, nell'ipotesi di conservazione delle sezioni piane e perfetta aderenza acciaio – calcestruzzo, si è considerata la sezione reagente di dimensione $b = b_s = 787.5$ mm, $h = 50$ mm. Le armature tese e compresse sono state realizzate con due fogli di rete elettrosaldata filo $\varnothing 5$ mm e maglia $100 \cdot 100$ mm disposte rispettivamente con un ricoprimento di calcestruzzo $c = 10$ mm rispetto all'intradosso ed all'estradosso, pertanto $A_s = A_s' = 154.6 \text{ mm}^2$.

La resistenza a trazione del calcestruzzo f_{ct} ed il modulo elastico del calcestruzzo in compressione E_c sono stati valutati sperimentalmente (vedi Tabella 3). Il modulo elastico dell'acciaio E_s vale 200000 N/mm^2 . Per quanto riguarda il modulo elastico in trazione è stata considerata la possibilità di considerarlo uguale a quello in compressione ovvero di considerarlo ridotto, ipotizzando che la deformazione del calcestruzzo teso a rottura possa risultare pari a $\epsilon_{ctu} = 0,00015$, da cui $E_{ct} = f_{ct}/\epsilon_{ctu}$. Pertanto è stato ottenuto un duplice valore del momento teorico di fessurazione $m_{cr, \text{teo1}}$ quando si considera $E_{ct} = E_c$ ed $m_{cr, \text{teo2}}$ quando $E_{ct} = f_{ct}/\epsilon_{ctu}$.

Nella Tabella 5 sono riportati i carichi di fessurazione teorici $F_{cr, \text{teo1}}$ ed $F_{cr, \text{teo2}}$, che possono essere confrontati con quelli ottenuti dalla campagna sperimentale riportati in Tabella 4.

Table 5. Theoretical cracking loads of slabs/ Carichi teorici di fessurazione delle piastre.

Piastre	$F_{cr,teor1}$ (kN)	$F_{cr,teor2}$ (kN)
NC0	14.25	15.89
RC1	14.94	16.25
RC2	13.39	14.76
RC3	13.10	13.54
RC4	12.46	13.35

5 ANALISI DEI RISULTATI

La resistenza media a compressione del calcestruzzo, f_{cm} (N/mm²), in presenza di aggregato grosso riciclato può essere correttamente stimata ($R^2 = 0,98$) dall'equazione:

$$f_{cm} = -19 \cdot \text{Sost\%} + 70 \quad (5)$$

dove Sost% varia fra 0 e 100%.

In presenza del 100% di aggregato grosso riciclato la riduzione di resistenza a compressione è pari al 29%.

La resistenza media a trazione sperimentale del calcestruzzo, f_{ctm} (N/mm²), in presenza di aggregato grosso riciclato può essere adeguatamente stimata ($R^2 = 0,74$) dall'equazione:

$$f_{ctm} = -0,65 \cdot \text{Sost\%} + 4,34 \quad (6)$$

dove Sost% varia fra 0 e 100%.

In presenza del 100% di aggregato grosso riciclato la riduzione di resistenza a trazione è pari al 13%.

Se si assume la resistenza a trazione semplice valutata in funzione della resistenza a compressione secondo la relazione proposta nelle NTC 2008:

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{per classi} \leq C50/60 \quad (7)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) \quad \text{per classi} > C50/60 \quad (8)$$

avendo posto $f_{ck} = f_{cm} + 8$, si ottengono resistenze a trazione del tutto simili a quelle valutate sperimentalmente, con differenze percentuali al massimo del 6% indipendentemente dalla percentuale di sostituzioni di aggregato grosso riciclato in luogo del naturale (vedi Tabella 6).

Questo risultato mostra che il calcestruzzo riciclato può essere trattato come calcestruzzo ordinario.

Il modulo elastico medio sperimentale del calcestruzzo, E_{cm} (N/mm²), in presenza di aggregato grosso riciclato può essere correttamente stimato ($R^2 = 0,86$) dall'equazione:

$$E_{cm} = -0,1419 \cdot \text{Sost\%} + 43400 \quad (9)$$

dove Sost% varia fra 0 e 100%.

Table 6. Theoretical and experimental tensile strength / Resistenza a trazione teorica e sperimentale.

Miscela	Sost%	$f_{ct,sperim}$ (N/mm ²)	$f_{ct,teo}$ (N/mm ²)
NC0	0	4.20	4.44
RC1	30	4.40	4.22
RC2	50	3.94	4.19
RC3	80	3.83	3.98
RC4	100	3.65	3.67

In presenza del 100% di aggregato grosso riciclato la riduzione del modulo elastico è pari al 26%. Se si assume il modulo elastico valutato in funzione della resistenza a compressione secondo la relazione proposta nelle NTC 2008:

$$E_{cm} = 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (10)$$

si ottengono valori del modulo elastico teorico che si discostano da quelli sperimentali, in maniera marcata per percentuali di sostituzione di aggregato grosso riciclato del 80% e del 100%, rispettivamente del 22% e del 12%. E' noto che il legame esistente fra la resistenza a compressione ed il modulo elastico è di tipo debole e pertanto tale risultato potrebbe essere atteso anche nell'ambito del calcestruzzi ordinari.

Nelle piastre il carico di fessurazione sperimentale non risulta dipendere dalla percentuale di sostituzione degli aggregati naturali con quelli riciclati. Ad esempio si ottiene che, in presenza del 100% di aggregati grossi riciclati, il carico di fessurazione è mediamente aumentato del 7% rispetto a quello della piastra realizzata con calcestruzzo ordinario.

Il confronto fra il carico di fessurazione sperimentale con i rispettivi valori teorici, considerando il caso del modulo elastico a trazione uguale a quello in compressione $F_{cr, teo1}$ ed il caso del modulo elastico in trazione inferiore a quello in compressione $F_{cr, teo2}$, ha evidenziato coefficienti di sicurezza compresi fra 1,08 e 1,37 nel caso della trattazione teorica Tipo 1, e compresi fra 1,18 e 1,53 nel caso della trattazione teorica Tipo 2 (vedi Figura 3).

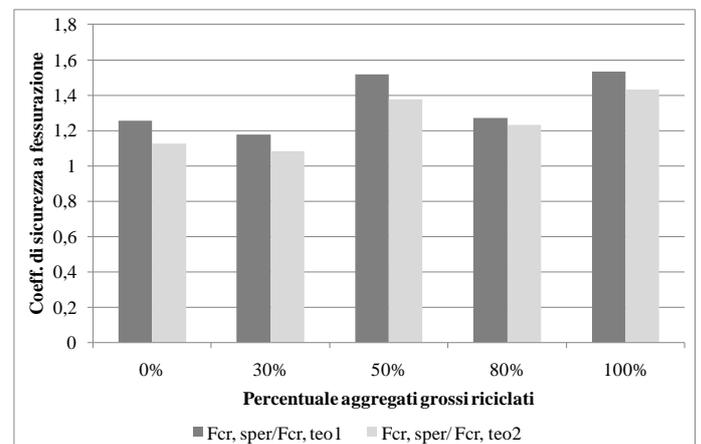


Figura 3. Safety factors of cracking / Coefficienti di sicurezza a fessurazione.

I risultati evidenziano che le piastre realizzate con aggregati grossi riciclati (percentuale di sostituzione del 100%) mostrano carichi di fessurazione sperimentali superiori al 30% rispetto ai valori teorici attesi (vedi Tabella 5).

Tale esito è di fondamentale importanza nei riguardi della durabilità delle strutture realizzate con calcestruzzi riciclati.

6 CONCLUSIONI

This paper presents the experimental investigation on flexural cracking behavior in simply supported reinforced recycled concrete slabs. The recycled concrete was made with fine natural aggregate and coarse recycled aggregate, produced by crushed concrete taken from authorized storage sites.

Five concrete mixes: 0%, 30%, 50%, 80% and 100% replacement percentage of coarse natural aggregate with coarse recycled aggregates have been realized.

Moreover a comparison between theoretical analysis and experimental results have been developed.

The following conclusions can be drawn:

- The use of coarse recycled aggregate produces a reduction in recycled concrete performance. Compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity decrease with increasing replacement percentage of coarse natural aggregate with coarse recycled aggregate.
- The compressive strength of recycled concrete with 100% replacement percentage is reduced of 29% of the corresponding values of normal concrete.
- The tensile strength of recycled concrete with 100% replacement percentage is reduced of 13% of the corresponding values of normal concrete. The estimate of tensile strength as a function of compressive strength, through NTC 2008 relationship, is very good (maximum difference 6%) regardless of the presence of coarse recycled aggregates (even with high replacement percentage).
- The modulus of elasticity of recycled concrete with 100% replacement percentage is reduced of 26% in comparison with the corresponding values of normal concrete. The estimate of modulus of elasticity as a function of compressive strength, through NTC 2008 relationship, produces results with a relative difference from the experimental values equal to 22% and 12%, taking into account replacement percentage of coarse recycled aggregate of 80% and 100% respectively. However, it is known that the link between compressive strength and modulus of elasticity is weak, and so this result even for normal concrete is expected.
- There is no evident reduction in the cracking load with increasing replacement percentage of coarse

natural aggregate with coarse recycled aggregate. The cracking load of slab with 100% replacement percentage is increased of 7% of the corresponding value of normal concrete.

- The theoretical analysis always determines cracking safety factor values (ratio between experimental and theoretical cracking load) greater than one and this value increases with increasing replacement percentage of coarse natural aggregate with coarse recycled aggregate.

In conclusion, this paper proves that the reinforced recycled concrete slabs show good cracking performances in comparison with those realized with reinforced ordinary concrete. So the use of recycled concrete in structural elements should be encouraged even with a high replacement percentage, greater than those ordered in NTC 2008.

Questo lavoro presenta i risultati di una indagine sperimentale sul comportamento a fessurazione di piastre in calcestruzzo riciclato armato. Il calcestruzzo riciclato è stato realizzato con aggregati fini naturali ed aggregati grossi riciclati, ottenuti dalla frantumazione di calcestruzzo prelevato da impianti di riciclaggio.

Sono state realizzate 5 miscele di calcestruzzo, con percentuale di sostituzione dell'aggregato grosso naturale con aggregato grosso riciclato pari a 0%, 30%, 50%, 80% e 100%.

E' stato inoltre effettuato un confronto fra i risultati sperimentali e l'analisi teorica.

Le seguenti conclusioni possono essere tratte:

- L'uso di aggregati grossi riciclati produce una riduzione nelle prestazioni del calcestruzzo. La resistenza a compressione, la resistenza a trazione ed il modulo elastico diminuiscono quando la percentuale di sostituzione di aggregato grosso naturale con aggregato grosso riciclato aumenta.
- La resistenza a compressione media del calcestruzzo si riduce del 29% quando la percentuale di sostituzione di aggregato grosso riciclato è pari al 100%, rispetto al calcestruzzo ordinario;
- La resistenza a trazione media del calcestruzzo sperimentale si riduce del 13% quando la percentuale di sostituzione di aggregato grosso riciclato è pari al 100%, rispetto al calcestruzzo ordinario. La stima della resistenza a trazione in funzione della resistenza a compressione, secondo le relazioni riportate nel NTC 2008, porta a dei valori che si discostano da quelli ottenuti sperimentalmente al massimo del 6%, indipendentemente dalla percentuale di sostituzione di aggregati naturali con aggregati riciclati.
- Il modulo elastico sperimentale medio del calcestruzzo si riduce del 26% quando la percentuale di sostituzione di aggregato grosso riciclato è pari al 100%, rispetto al calcestruzzo ordinario. La stima del modulo elastico in funzione della resistenza a compressione, secondo la relazione riportata nel NTC 2008, porta a dei valori che si di-

scostano in maniera marcata per percentuali di sostituzione di aggregato grosso riciclato del 80% e del 100%, rispettivamente del 22% e del 12%. Ma è noto che il legame esistente fra la resistenza a compressione ed il modulo elastico è di tipo debole e pertanto tale risultato potrebbe essere atteso anche nell'ambito del calcestruzzi ordinari.

- Non è evidente la riduzione del carico di fessurazione all'aumentare della percentuale di sostituzione degli aggregati naturali con quelli riciclati. Si è ottenuto ad esempio un incremento del carico di fessurazione del 7%, in presenza del 100% di aggregato grosso riciclato, rispetto a quello delle piastre realizzate con il 100% di aggregati naturali.
- L'analisi teorica condotta ha evidenziato che il coefficiente di sicurezza (rapporto fra il carico di fessurazione sperimentale e quello teorico) è sempre maggiore dell'unità ed appare aumentare con l'aumentare della percentuale di sostituzione di aggregato naturale grosso con quello riciclato.

In conclusione il lavoro condotto mostra che le piastre realizzate con calcestruzzo riciclato manifestano a fessurazione un comportamento ottimale, anche quando si confrontano con quelle realizzate con calcestruzzo ordinario. Pertanto l'uso di calcestruzzo riciclato in elementi strutturali va incoraggiato anche in presenza di percentuali di aggregati riciclati ben superiori a quelli stabiliti nelle NTC 2008.

RINGRAZIAMENTI

The present work is developed within a research project supported by Regione Autonoma della Sardegna, Legge Regionale 7 agosto 2007, n. 7. The authors would like to express their thanks to Italcementi Group (Sardinia, Italy) for providing natural aggregates and helping in samples making and curing, and Ecoinerti - Authorized storage site (Sardinia, Italy).

REFERENCES

ACI 318: 2011. Code requirements for reinforced concrete.
 ACI 555 R01 2001. Removal and reuse of hardened concrete *American Concrete Institute*.
 Acito M., Stochino F. & Tattoni S. 2011. Structural response and reliability analysis of RC beam subjected to explosive-loading. *Applied Mechanics and Materials*, 82: pp. 434-439.
 BS 6543: 1985 Guide to use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering.
 Building Research Establishment. Digest 433 1998 Recycled Aggregates WD2 7JR. Garston (Watford): BRE.
 Corinaldesi V. & Moriconi G. 2006. Riciclaggio dei materiali da demolizione nella produzione del calcestruzzo Parte II: Aggregati da calcestruzzo prefabbricato riciclato *Enco Journal* Anno XI N. 32.

De Brito J., Ferreira J., Pacheco J., Soares D. & Guerreiro M. 2016. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete *Journal of Building Engineering* vol. 6: pp. 1-16, doi:10.1016/j.job.2016.02.003.
 DIN 4226-100: 2002-2 Aggregates for Mortar and Concrete, Part 100: Recycled Aggregates.
 Etxeberria M., Marí A. R. & Vázquez E. 2007. Recycled aggregate concrete as structural material *Materials and Structures* vol. 40, issue 5: pp. 529-541, doi: 10.1617/s11527-006-9161-5.
 Eurocode 2 2008. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings EN-1992-1-1.
 Evangelista L. & de Brito J. 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates *Cement and Concrete Composites* vol. 29, issue 5: pp. 397-401, doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.
 Gonzalez-Fonteboa B. & Martinez-Abella F. 2007. Shear strength of recycled concrete beams" *Construction and Building Materials* vol. 21, issue 4: pp. 887-893, doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.12.018.
 Hansen T. C. & Narud H. 1983. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate *Concrete International* vol. 5, issue 1: pp. 79-83.
 Kenai S., Farid D. & Azzouz L. 2015. Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates *Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction*.
 Kosmatka S. H., Kerkhoff B. & Panarese W. C. 2003. Design and control of concrete mixtures" *Engineering Bulletin 001 Portland Cement Association*.
 Levy S. M. & Helene P. 2004. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development *Cement and Concrete Research* vol. 34, issue 11: pp. 1975-1980, doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.009.
 Mália M., de Brito J., Duarte Pinheiro M. & Bravo M. 2013. Construction and demolition waste indicators *Waste Management & Research* vol. 31, issue 3: pp. 241-255, doi:10.1177/0734242X12471707.
 Model Code 2010 Fib Bulletin N. 65 vol.1.
 Model Code 2010 Fib Bulletin N. 66 vol.2.
 Mukai T. & Kikuchi M. 1988. Properties of reinforced concrete beams consisting recycled aggregate Demolition and reuse of concrete and masonry, vol. 2 Reuse of demolition waste, Proceeding of Second International RILEM Symposium, Ed. Kasai, pp. 670-679.
 Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14.01.2008: Italian Ministry of Infrastructures and Transportation.
 Pacheco J., de Brito J., Ferreira J. & Soares D. 2015. Flexural load tests of full-scale recycled aggregates concrete structures *Construction and Building Materials* vol. 101, part 1: pp. 65-71, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.023.
 Pani L. & Francesconi L. 2010. Performance of Recycled Aggregates by Concrete and Property of Structural Recycled Concrete *First workshop The new boundaries of structural concrete*, ACI Italy Chapter: pp. 283-290.
 Poon C. S., Shui Z. H., Lam L., Fok H. & Kou S. C. 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete *Cement and Concrete Research* vol. 34, issue 1: pp. 31-36, doi:10.1016/S0008-8846(03)00186-8.
 Rahal K. 2007. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate *Building and Environment* vol. 42, issue 1: pp. 407-415, doi:10.1016/j.buildenv.2005.07.033.
 Reis N., de Brito J., Correia J. R. & Arruda M. R. T. 2015. Punching behavior of concrete slabs incorporating coarse recycled concrete aggregates *Engineering Structures* vol. 100: pp. 238-248, doi:10.1016/j.engstruct.2015.06.011.
 Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee

- and the Committee of the Regions on the Thematic Strategy on the Prevention and Recycling of Waste 2011. <http://ec.europa.eu/environment/waste>.
- Stochino F. 2016. RC beams under blastload: Reliability and sensitivity analysis *Engineering Failure Analysis*, 66: pp. 544-565.
- Stochino F. & Carta G. 2014. SDOF models for reinforced concrete beams under impulsive loads accounting for strain rate effects. *Nuclear Engineering and Design* 276: pp. 74–86.
- Sudarsana Rao H., Showjendra Kumar Reddy V. & Vaishali G. 2015. Influence of recycled coarse aggregate on punching behavior of recycled coarse aggregate concrete slabs *International Journal of Modern Engineering Research* vol. 2, issue 4: 2815-2820, doi=10.1.1.416.8390.
- Tattoni S., Stochino F. & Caldara F. 2013. A simplified approach to serviceability assessment of reinforced concrete structures in fire, *Proceedings of 14th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, 102.
- Xuping Li 2008. Recycling and reuse of waste concrete in China Part I. Material behavior of recycled aggregate concrete *Resources, Conservation and Recycling* vol. 53, issue 1-2: pp. 36–44, doi:10.1016/j.resconrec.2008.09.006.
- Xuping Li 2009. Recycling and reuse of waste concrete in China Part II. Structural behavior of recycled aggregate concrete and engineering applications *Resources, Conservation and Recycling* vol. 53, issue 3: pp. 107–112, doi:10.1016/j.resconrec.2008.11.005.
- Yagishita M., Sano M. & Yamada M. 1993. Behaviour of reinforced concrete beams containing recycled aggregate *Demolition and reuse of concrete masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium*, Ed. Lauritzen, pp. 331–343.
- Yang Y. F., Han L. H. "Experimental behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns" *Journal of Constructional Steel Research* (2006) vol. 62, issue 12: 1310–1324, doi:10.1016/j.jcsr.2006.02.010.