

Studio sperimentale sulle proprietà termo-meccaniche di calcestruzzi rinforzati con fibre di plastica da riciclo

di Fernando Fraternali, Vincenzo Giancia, Rosaria Chechile, Gianvittorio Rizzano, Luciano Feo, Loredana Incarnato

Abstract

Questo lavoro presenta uno studio sperimentale sulla conduttività termica, sulla resistenza alla compressione, sugli indici di duttilità e sulla resistenza alla prima fessurazione del calcestruzzo rinforzato con fibre di PET da riciclo ("Recycled PET Fiber Reinforced Concrete" o RPETFRC). Si esaminano filamenti di PET industrialmente estrusi da scaglie di bottiglie di PET riciclato con proprietà e profili meccanici variabili. Prendendo in esame un dosaggio volumetrico di fibre pari all'1%, si osservano significativi miglioramenti della resistenza termica, della resistenza meccanica e della duttilità del RPETFRC, rispetto ad un calcestruzzo non rinforzato. Uno studio comparativo con recenti risultati di letteratura evidenzia che il RPETFRC è altamente competitivo rispetto al calcestruzzo rinforzato con fibre di polipropilene, sia in termini di resistenza a compressione che in termini di resistenza alla fessurazione.

Introduzione

L'industria edile contribuisce notevolmente al degrado ambientale, anche più del traffico automobilistico e di altre rinomate attività inquinanti, ma gli imprenditori edili negli ultimi anni hanno fatto passi da gigante verso una significativa riduzione dell'impatto ambientale del processo di costruzione. Nel contesto di un crescente interesse verso il riciclo di materiali derivanti da rifiuti solidi urbani ed industriali e la cosiddetta architettura "sostenibile" o "verde", una sempre maggiore attenzione viene rivolta ai giorni nostri alla sperimentazione ed allo studio del rinforzo del cemento armato con

aggregati e/o fibre ottenuti dal riciclo di materiali recuperati dai rifiuti solidi urbani e/o industriali. Diversi materiali recuperabili dai rifiuti solidi, quali, ad esempio, le materie plastiche, il vetro, la cellulosa, il legno, ecc., sono dotati di estrema versatilità e/o peso contenuto, durabilità, resistenza agli attacchi chimici, eccellenti proprietà di isolamento termico ed elettrico. Tali proprietà possono essere utilmente sfruttate per costruire nuovi materiali compositi innovativi ed eco-sostenibili. Particolarmente interessante è il caso del rinforzo dei conglomerati cementizi (armati e non) con fibre ricavate da materiali da riciclo, che si configura come una

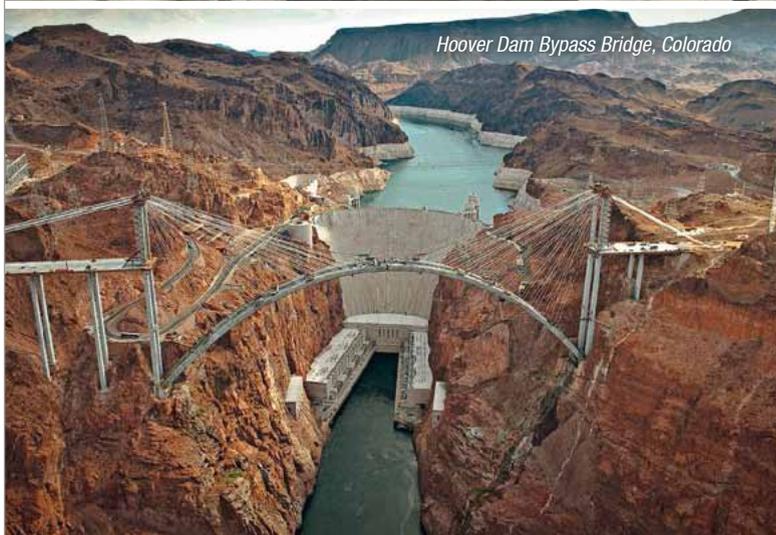
tecnica di rinforzo a basso costo in grado di migliorare significativamente la resistenza meccanica, la duttilità strutturale e l'isolamento termico della matrice cementizia. Il miglioramento della duttilità è particolarmente significativo nelle zone sismiche, dove gli edifici e le infrastrutture necessitano di avere a disposizione una notevole capacità di dissipazione di energia e di deformazione plastica, soprattutto in presenza di importanti eventi sismici. D'altra parte, la ridotta conduttività termica del calcestruzzo rinforzato con fibre plastiche da riciclo, rispetto ad un calcestruzzo non rinforzato, consente di produrre componenti strutturali in grado di ridurre l'impatto ambientale e migliorare il rendimento energetico degli edifici.

Fibre di rinforzo in materiale riciclato possono essere estratte, ad esempio, da scarti di polietilene tereftalato (PET), polipropilene (PP), polietilene, nylon, aramide, poliestere, vetro, gomma e cellulosa. Il crescente interesse della comunità scientifica internazionale verso il rinforzo del calcestruzzo con fibre di materie plastiche riciclate è illustrato nel recente articolo di Siddique et al. [1] e nei riferimenti ivi citati, che analizzano gli effetti di tale rinforzo in termini di un gran numero di proprietà del materiale, quali la densità, il contenuto d'aria, la lavorabilità, la resistenza a compressione, la resistenza a trazione, il modulo di elasticità, la resistenza all'urto, la permeabilità e la resistenza all'abrasione. L'effetto dell'aggiunta di fibre di cellulosa da riciclo sulle proprietà meccaniche e termiche della pasta di cemento è studiato invece in Bentchikou et al. [2].

Per quanto riguarda



Metropolitana di Parigi, 1933



Hoover Dam Bypass Bridge, Colorado

100 anni di durabilità

Dal Sika®-1 a Sika® ViscoCrete®



www.sika.it

Innovation & since
Consistency | 1910

specificamente il rinforzo del calcestruzzo mediante fibre di PET da riciclo, si distinguono, tra gli altri, i lavori [3-7]. Ochi et al. descrivono in [3] la tecnologia di produzione di fibre di rinforzo del calcestruzzo a partire da bottiglie PET da riciclo. Gli stessi autori analizzano anche gli effetti benefici derivanti dall'aggiunta di tali fibre al mix-design del conglomerato cementizio, in termini di duttilità, di resistenza a flessione e di resistenza a compressione del materiale. Nello studio di Kim et al. [4] fibre di PET di vario aspetto (lisce, ondulate e goffrate) sono impiegate per indagare sulla fessurazione da ritiro plastico in materiali compositi a base cementizia. Silva et al. analizzano in [5] la durabilità delle fibre di PET da riciclo incorporate in materiali dello stesso tipo, mentre Kim et al. esaminano in [6] il rinforzo del calcestruzzo con fibre di PET riciclate, esaminando diverse percentuali volumetriche delle fibre (0,5%, 0,75% e 1%). Le fibre di PET esaminate da questi ultimi autori sono realizzate attraverso macchine di taglio e di deformazione, partendo da bobine ricavate dalla lavorazione di bottiglie di PET da riciclo. Kim et al. misurano la resistenza a compressio-

ne ed il modulo elastico di provini di RPETFRC, nonché la resistenza a flessione di provini di calcestruzzo rinforzato con fibre di PET da riciclo e barre di acciaio. I risultati presentati in [6] mettono in luce aumenti significativi della resistenza a flessione e della duttilità del RPETFRC e, talvolta, a lievi diminuzioni della resistenza a compressione e del modulo elastico, rispetto al calcestruzzo non rinforzato ("Unreinforced Concrete" o UNRC). Foti esamina in [7] un processo economico di produzione di scarti di PET per il rinforzo del calcestruzzo, che si basa sul semplice taglio di bottiglie recuperate dai rifiuti.

In letteratura è anche ampiamente studiato il rinforzo del calcestruzzo con fibre sintetiche in materiale plastico allo stato vergine, con particolare riferimento al caso delle fibre in polipropilene e delle fibre ibride polipropilene-acciaio [8-16]. Una panoramica sullo stato attuale delle conoscenze in merito alla tecnologia del rinforzo con fibre del calcestruzzo ("Fiber Reinforced Concrete" o FRC) è presentato in Brandt [8]. Meddah e Bencheikhv studiano in [10] il rinforzo del calcestruzzo attraverso vari tipi di fibre di polipropilene e fibre metalli-

che, mentre Song et al. confrontano tra loro in [11] le proprietà di resistenza del calcestruzzo rinforzato con fibre di nylon e con fibre di polipropilene. Nello studio di Sukontasukkul [12] due diversi metodi di prova sono impiegati per misurare la resistenza a flessione di calcestruzzi rinforzati con fibre di polipropilene e di acciaio. Le proprietà di resistenza alla fessurazione del calcestruzzo rinforzato con fibre ibride di acciaio e di polipropilene sono studiati in Chunxiang e Piet. [13]. Hsie et al. investigano in [14] sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo rinforzato con fibre ibride di polipropilene, analizzando monofilamenti grezzi e fibre sagomate ad uncino. Calcestruzzi contenenti diversi tipi di fibre ibride alla stessa percentuale in volume (0,5%) sono confrontati in Yao et al. [15] in termini di resistenze a compressione, a trazione ed a flessione. Bencardino et al. esaminano in [16] le proprietà di resistenza alla frattura ed il comportamento a fessurazione del calcestruzzo rinforzato con l'1% e il 2% in volume di fibre in acciaio o in polipropilene. Un confronto tra le proprietà di resistenza a frattura ed a trazione di calcestruzzi rinforzati con fibre

sintetiche e con fibre di acciaio ad altissime prestazioni ("Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete" o UHPFRC) può essere svolto sulla base dei risultati presentati negli studi di cui sopra e dei risultati forniti da Kang et al. in [17] per l' UHPFRC. Questo lavoro presenta uno studio sperimentale sulla conducibilità termica, la resistenza meccanica e la duttilità di diversi tipi di calcestruzzo rinforzato con fibre di PET da riciclo. Si prendono in esame fibre PET lisce a bassa ed alta resistenza (PET/a e PET/b rispettivamente), nonché fibre PET ondulate con contenuta resistenza a trazione (PET/c) (Tabella 1), analizzando una percentuale in volume di fibre sempre pari all'1,0%. Tale dosaggio corrisponde al valore medio dei dosaggi analizzati da Ochi et al. in [3] (percentuali in volume di fibre PET variabili tra 0,5% e 1,5%). Si misurano per via sperimentale la conducibilità termica (secondo il metodo della piastra calda con anello di guardia), la resistenza a compressione (secondo la norma europea EN 12.990-1 [20]), la resistenza alla prima fessurazione e gli indici di duttilità (secondo la norma italiana UNI 110.390 [21, 22]) dei

calcestruzzi esaminati. Si determinano inoltre, numericamente, le tenacità degli stessi materiali, avvalendosi dei risultati sperimentali delle prove a flessione e di opportune formule analitiche di letteratura [13,23].

Lo studio presentato in questo lavoro arricchisce significativamente quelli precedenti di Ochi et al. [3] e Kim et al.[6], indagando specificamente sulla conducibilità termica del RPETFRC (non investigata in [3, 6]); analizzando fibre PET prodotte industrialmente (e non in laboratorio) con diverse proprietà e profili; studiando la duttilità del RPETFRC privo di barre di rinforzo in regime di grandi deformazioni e stabilendo opportuni confronti tra i risultati ottenuti per il RPETFRC, risultati analoghi presentati in [3] e risultati relativi a calcestruzzi rinforzati con fibre di polipropilene vergine (PPFRC) di produzione industriale [24]. I risultati del presente studio evidenziano grandi miglioramenti della resistenza termica, delle resistenze meccaniche a compressione ed a flessione, della tenacità e della duttilità del calcestruzzo, che derivano dall'aggiunta di fibre di PET al mix design. Diversamente da Ochi et al. [3] e Sung et al. [6],

che osservano lievi incrementi, fino al 13%, o talvolta addirittura decrementi, fino al -7%, della resistenza a compressione del RPETFRC rispetto all' UNRC, si segnalano in questo lavoro incrementi della stessa resistenza compresi nell'intervallo tra il 22% ed il 35%, con riferimento ad alcuni particolari tipi di RPETFRC (RPETFRC/a,b). Nel complesso, i risultati di questo studio indicano che il RPETFRC è altamente competitivo, sia rispetto all'UNRC che rispetto al PPFRC, in termini di resistenza meccanica. Il lavoro è organizzato come segue. Si inizia col descrivere i materiali analizzati nel paragrafo 2. Si prosegue con la descrizione delle prove sperimentali impiegate per misurare la conducibilità termica, la resistenza a compressione, la resistenza alla fessurazione e gli indici di duttilità (Paragrafo 3). Si determinano, quindi, i valori di riferimento della tenacità del RPETFRC e del PPFRC (Paragrafo 4) e si stabilisce un confronto tra i presenti risultati ed altri risultati analoghi disponibili in letteratura (Paragrafo 5). Il lavoro si conclude con una discussione critica dei risultati ottenuti e l'esame di possibili linee di ricerca future (Paragrafo 6).

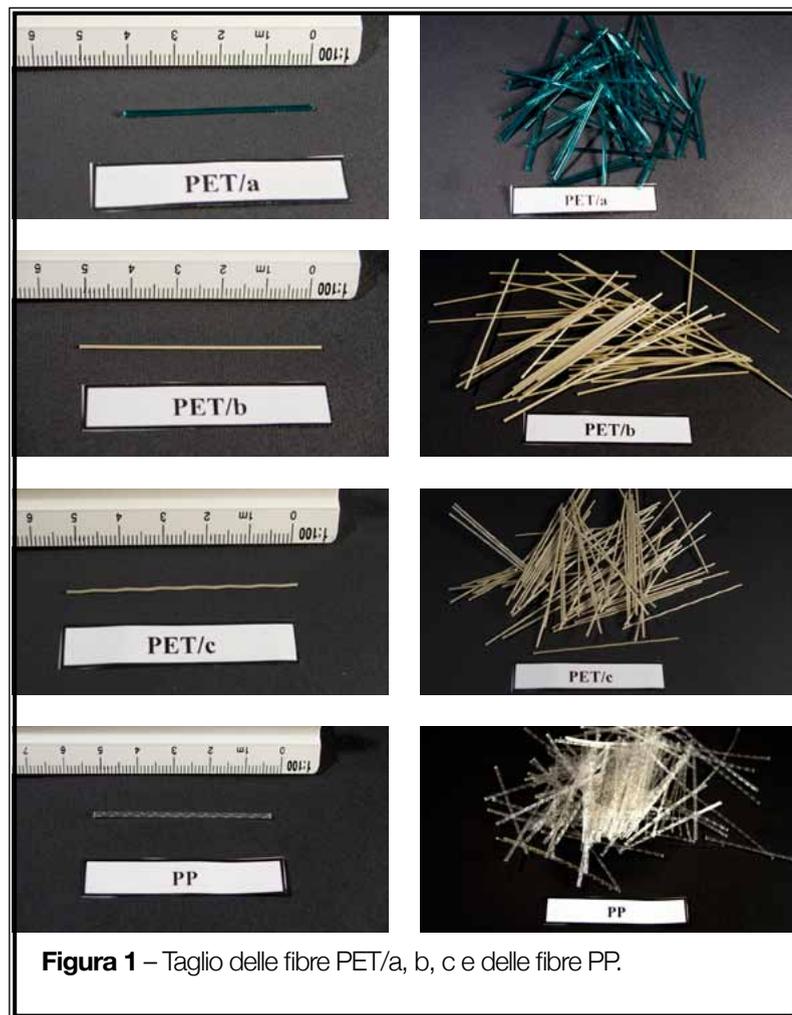


Figura 1 – Taglio delle fibre PET/a, b, c e delle fibre PP.

Tabella 1 – Principali proprietà delle fibre PP esaminate nel presente studio.

Proprietà	PET/a	PET/b	PET/c	PP
Gravità specifica	1.34	1.34	1.34	0.90
Sezione	Circolare	Circolare	Circolare	Ovale
Aspetto	Liscio	Liscio	Ondulato	Goffrato
Diametro (mm)	1.10	0.70	0.70	0.80 x 1.30
Lunghezza (mm)	40	52	52	47
Resistenza a trazione (MPa)	550.00	263.72	274.29	250.00
Deformazione ultima (%)	27	26	19	29

2. Materiali

2.1. Fibre in PET da riciclo e fibre PP

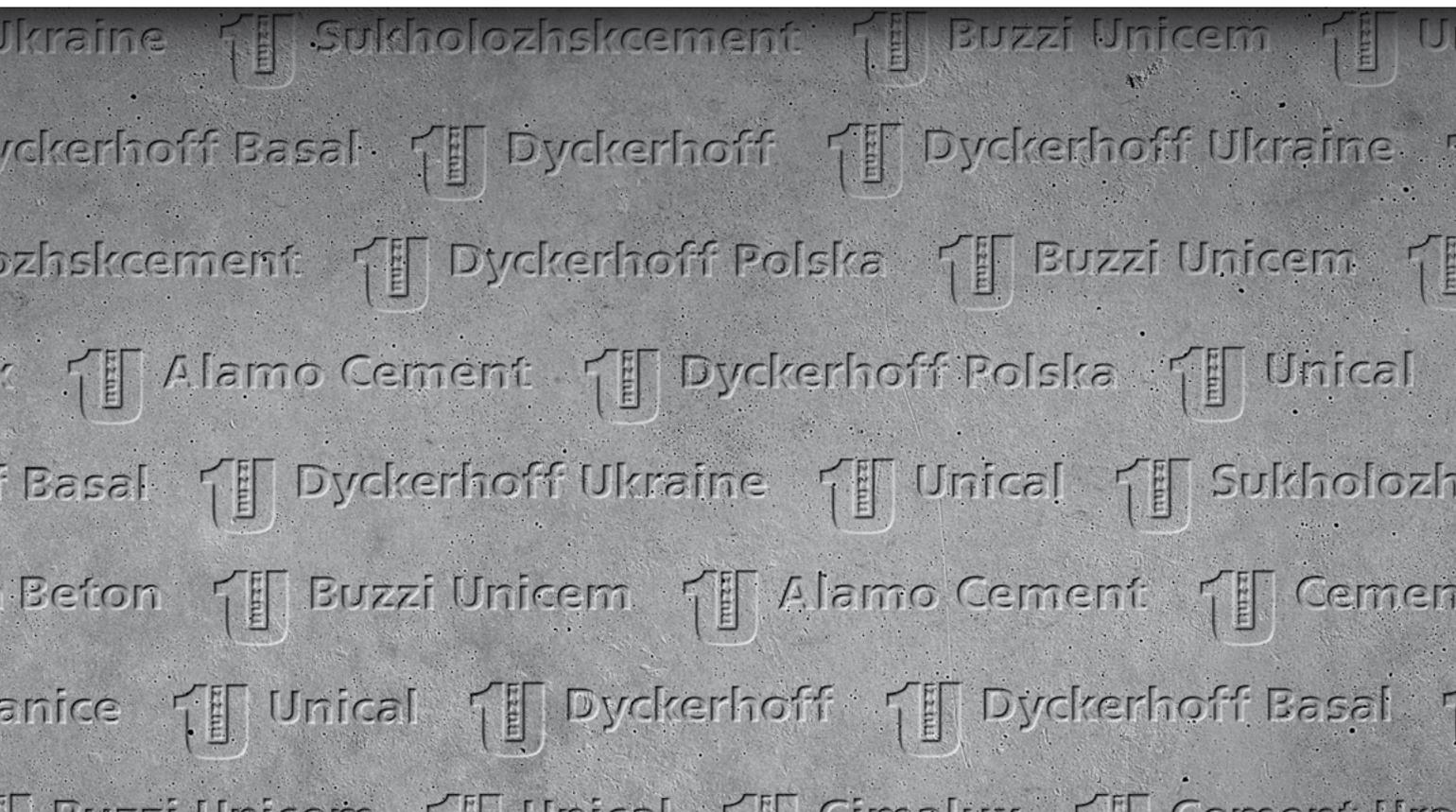
Si esaminiamo fibre di PET riciclato (PET/a b,c) e fibre in PP vergine prodotte negli stabilimenti della Techno Plastic (TP) S.r.l. di Castelfranco Emilia (Modena) e della FHP S.a.s. - Divisione Plastica di Roncello (Milano), due aziende leader mondiali nel settore estrusione di monofilamenti di plastica. La TP e la FHP producono filamenti PET da riciclo utilizzando scaglie di bottiglie PET riciclate, unitamente a fibre PP ed altri filamenti di plastica derivanti da materiale vergine. Il monofilo può essere piumabile o non piumabile, liscio o ondulato, con differenti tipi di sezioni. Il suo diametro dipende dalla materia prima e varia da 0,12 mm a 2,00 mm. Il processo produttivo dei monofilamenti comprende le seguenti fasi: cristallizzazione, essiccazione, trasporto pneumatico, dosaggio, estrusione, filtrazione, filatura, stiro, stabilizzazione, avvolgimento, imballaggio e taglio della fibra (vedi il sito web www.technoplactic.it per ulteriori dettagli). Le principali proprietà delle fibre in PET riciclato analizzate nel presente studio sono elencate in Tabella 1, insieme alle proprietà di alcune fibre in PP vergine, che sono state prese in esame per effettuare confronti. Il "taglio" delle fibre esaminate è illustrato in Figura1. Si evidenzia che le fibre PET /a PET /b sono lisce; le fibre PET/c sono goffrate e le fibre PP sono ondulate. Il particolare profilo delle fibre PET/c e delle fibre PP è orientato a migliorare l'adesione fibra-cemento.



nderstanding

Come gruppo condividiamo un unico logo. Come persone ci riconosciamo nella ricchezza delle nostre differenze.

 **Buzzi Unicem**



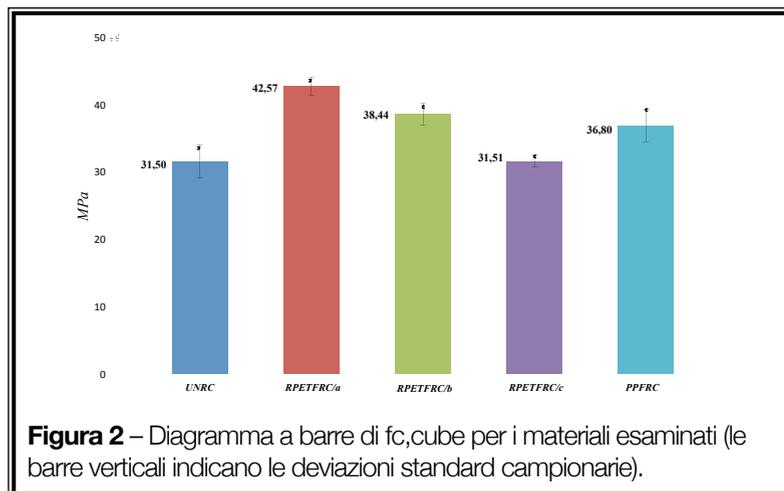


Figura 2 – Diagramma a barre di $f_{c,cube}$ per i materiali esaminati (le barre verticali indicano le deviazioni standard campionarie).

Tabella 2 – Mix Design del calcestruzzo impiegato.

Componenti	Dosaggio (kg/m ³)
Cemento Portland CEM IV/B 32.5 R (EN 197-1 [25])	340
Sabbia (0-4mm)	923
Aggregato medio (4-10 mm)	185
Aggregato grosso (10-20 mm)	743
Acqua	181
Rapporto acqua/cemento (%)	53
Additivo	2.4

Tabella 3 – Risultati dei test sulla conducibilità termica.

Miscela	k (W/mK)	95%CI (W/mK)	FRR
UNRC	0.967	0.284	0.0
RPETFRC/a	0.793	0.251	-18.0
PPFRC	0.756	0.139	-21.8

Tabella 4 – Risultati dei test di resistenza a compressione.

Materiale	Num. provini	Gravità specifica	Resistenza a compressione MPa		
			$f_{c,cube}$	95%CI	FRR(%)
UNRC	8	2.27	31.50	4.85	0.00
RPETFRC/a	6	2.32	42.57	2.72	+35.14
RPETFRC/b	6	2.31	38.44	3.16	+22.03
RPETFRC/c	6	2.28	31.51	1.69	+0.03
PPFRC	6	2.30	36.80	4.91	+16.83

2.2 Campioni di calcestruzzo fibro-rinforzato

Campioni di FRC cubici e prismatici sono stati preparati utilizzando il mix design illustrato in Tabella 2 ed utilizzando componenti gentilmente messi a disposizione da parte della Calcestruzzi Irpini SpA di Avellino, che ha partecipato attivamente a tutte le fasi di progettazione e produzione dei conglomerati cementizi analizzati nel presente studio.

Sono stati preparati sia campioni di calcestruzzo ordinario (non rinforzato con fibre), sia campioni di FRC realizzati con le fibre descritte in Tabella 1.

In tutto il seguito di questo lavoro si denominano con la sigla UNRC i calcestruzzi di cui al mix-design in Tabella 2 non rinforzati; con le sigle RPETFRC/a,b,c gli analoghi calcestruzzi rinforzati con fibre PET/a,b,c all'1% in volume ed infine con la sigla PPFRC il calcestruzzo di cui al mix-design in Tabella 2 rinforzato con le fibre in PP vergine indicate in Tabella 1 all'1% in volume.

Data un'arbitraria proprietà x di un campione di FRC, si indica la media campionaria di x con il simbolo \bar{x} . Si denomina

inoltre la quantità $\frac{\bar{x} - \bar{x}_0}{\bar{x}_0}$ come

“Fiber Reinforcement Ratio” (FRR) di x , essendo \bar{x}_0 la media campionaria di x riferita all'UNRC. Infine, per semplicità di notazione, l'intervallo di confidenza (CI) all' $\alpha\%$ della media di x si abbrevia come $\alpha\%$ CI di x .

3 Risultati sperimentali

3.1 Conducibilità termica

È stata misurata l'effettiva conducibilità termica di campioni di UNRC, di RPETFRC/a e di PPFRC attraverso l'apparato sperimentale descritto in Frattolillo et al. in [18] e Buonanno et al. in [19]. Le prove sono state eseguite misurando la conducibilità termica per confronto con piastre di riferimento a conducibilità nota in pyrex.

Sono stati testati tre campioni per ciascuna delle miscele di calcestruzzo esaminate (UNRC, RPETFRC/a e PPFRC) ad una temperatura ambiente di circa 20°C. La media campionaria ed il 95% CI della conducibilità termica k dei materiali sottoposti a prova sono riportati in Tabella 3. La stessa tabella illustra anche il FRR di k , che indica una diminuzione sensibile (pari a circa il 20%) della conduttività termica del RPETFRC e del PPFRC rispetto all' UNRC.

3.2 Resistenza a compressione

La Tabella 4 mostra i risultati delle prove di compressione eseguite su campioni di UNRC, di RPETFRC/a,b,c e di PPFRC. È stata determinata la media campionaria della gravità specifica e della resistenza cubica a compressione $f_{c,cube}$ per ciascun materiale esaminato, insieme al 95% CI ed al FRR di $f_{c,cube}$. Una rappresentazione grafica dei risultati ottenuti per $f_{c,cube}$ è mostrata in Figura 2. I risultati mostrati in Tabella 4 ed in Figura 2 evidenziano che i valori di $f_{c,cube}$ relativi agli RPETFRC/a,b,c sono più alti, nell'ordine, del 35.14%, del 22.03% e dello 0.03% rispetto al valore di

AUTOMAZIONI ANCHE PENSATE PER GESTIRE L'AZIENDA

...Simply Intelligent...

Le nostre automazioni non si limitano, a differenza di altre, al solo controllo del processo produttivo, ma permettono l'integrazione con prodotti innovativi che completano la gestione globale dell'azienda.

CONCENTER
gestione centralizzata
unità produttive, controllo remoto, gestione ordini

TOP MIX
creazione miscele e gestione del laboratorio

ISM
controllo sul trasporto del calcestruzzo

BETONSAT
logistica degli automezzi

**PROGEN®
CONCRETE**
gestione integrata
dei processi di business,
dalla copia commissione
al controllo di gestione



da sempre il punto di riferimento
per l'automazione di aziende
che producono il calcestruzzo migliore

ELETRONDATA s.r.l.
Via Del Canaletto, 77/79
41042 Spezzano di Fiorano (MO)



Telefono: +39 05361840500
Fax: +39 05361840501
Email: info@elettrondata.it

www.elettrondata.it

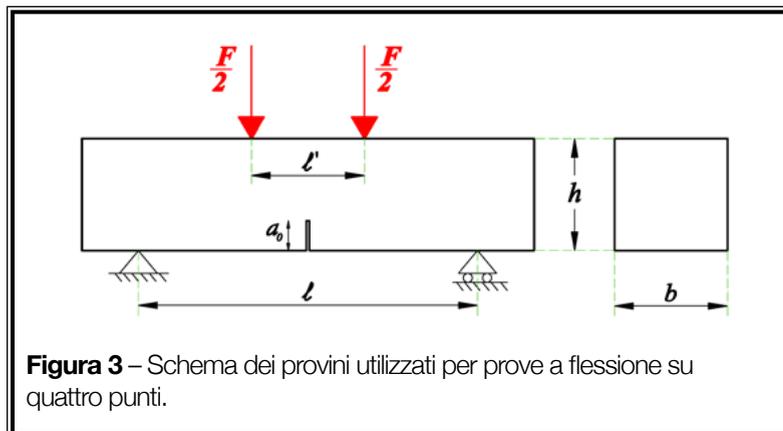


Figura 3 – Schema dei provini utilizzati per prove a flessione su quattro punti.



Figura 4 – Configurazione di collasso di un provino di RPETFRC/a soggetto a prova di flessione su quattro punti.

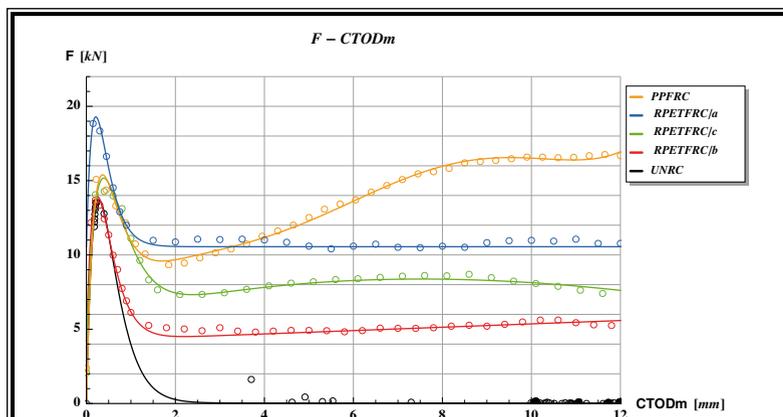


Figura 5 – Curve sperimentali medie F-CTODm (punti cerchiati) e corrispondenti fittaggi al modello esponenziale $F = k_1 k_2 \text{CTODm} e^{-k_2 \text{CTODm}} + k_3 + k_4 \text{CTODm}$ (linee a tratto intero) per UNRC, RPETFRC/a,b,c e PPFRC.

$f_{c,cube}$ relativo all'UNRC. Il valore di $f_{c,cube}$ per il PPFRC è invece più alto del 16.83% rispetto a $f_{c,cube}$.

È utile osservare che i marcati incrementi di resistenza degli RPETFRC/a,b e del PPFRC, rispetto all'UNRC, sono accompagnati da lievi incrementi della gravità specifica (cfr. Tabella 4).

3.3 Resistenza di prima fessurazione ed indici di duttilità

Prove di flessione su quattro punti sono state eseguite su campioni prismatici di dimensioni 150 mm x 150 mm x 600 mm, dopo 28 giorni di stagionatura, sulla base delle prescrizioni dettate dalle norme italiane UNI 11039-1 [21] e UNI 11039-2 [22]. I campioni testati presentano un intaglio centrale a forma di V avente 4 mm di larghezza alla base ed altezza (a_0) pari a 4 cm. La macchina di prova servoidraulica Schenck hydropuls 630 kN, operante in controllo dello spostamento di apertura della "bocca della fessura" ("Crack Mouth Opening Displacement" o CMOD), è stata impiegata per testare i campioni fino a rottura.

La velocità di crescita del CMOD è stata fissata pari a $00:05 \pm 00:01$ mm/min [22]. Lo spostamento di apertura della fessura all'apice ("Crack Tip Opening Displacement" o CTOD) è stato misurato attraverso due trasduttori di spostamento inseriti sulle facce opposte del provino, in corrispondenza della punta della fessura. Seguendo le specifiche della UNI 11039-1 [21], si è indicata con CTODm la media aritmetica dei valori di CTOD misurati attraverso tali trasduttori. Il CMOD è stato misurato attraverso un terzo trasduttore posto al bordo inferiore dell'intaglio.

I trasduttori adottati hanno capacità di 5 mm e sensibilità di 2,5 mV / mm. Una cella di carico da 60 kN è stata utilizzata per misurare il carico totale F applicato sulla faccia superiore del provino (Figura 4). Sulla base delle indicazioni fornite in merito dalla norma UNI 11.039-2 [22], la resistenza di prima fessurazione è stata definita come segue:

$$f_{1f} = \frac{P_{1f} \cdot l}{b(h - a_0)^2} \quad (1)$$

dove: P_{1f} è il carico di prima fessurazione [N] (carico totale sul provino corrispondente alla comparsa della prima fessura); l è la luce netta (distanza tra gli assi dei rulli inferiori), b è la larghezza [mm], e h è l'altezza provino [mm] (Figura 3). Due diversi indici di duttilità D_0 e D_1 sono stati definiti mediante le formule

$$D_0 = \frac{f_{eq}(0-0.6)}{f_{1f}} \quad D_1 = \frac{f_{eq}(0.6-3)}{f_{1f}} \quad (2)$$

dove si è posto:

$$f_{eq}(0-0.6) = \frac{U_1 \cdot l}{0.6b(h-a_0)^2} \quad f_{eq}(0.6-3) = \frac{U_2 \cdot l}{2.4b(h-a_0)^2} \quad (3)$$

In queste ultime relazioni, le quantità U_1 e U_2 denotano le energie assorbite dal provino (aree sottese alla curva F-CTODm) in corrispondenza degli intervalli di CTODm pari rispettivamente a [0,0.6] mm e [0.6,3.0] mm. Sulla base dei valori assunti da D_0 e D_1 , la UNI 11039-2 classifica il comportamento del materiale come "softening" (classi di duttilità D_{S0} , D_{S1} e D_{S2}), plastico (classe di duttilità D_P), o "hardening" (classi di duttilità D_{H0} , D_{H1} e D_{H2}), [22].

Le prove di flessione su quattro punti sono state eseguite su tre campioni per ciascun tipo di materiale esaminato.

Il modello esponenziale

$$F = k_1 k_2 \text{CTODm} e^{k_2 \text{CTODm}} + k_3 + k_4 \text{CTODm}$$

è stato fittato alla curva dei valori medi F-CTODm ottenuta per ciascun materiale (è stata calcolata la media aritmetica delle forze misurate per i differenti provini in corrispondenza di fissati valori di CDOTm), producendo i grafici mostrati in Figura 5.

I corrispondenti valori delle resistenze di prima fessurazione, degli indici di duttilità e delle classi di duttilità sono riportati nelle Tabelle 5 e 6.

La Figura 4 illustra la configurazione al collasso di un campione di RPETFRC/a e mette in evidenza che l'effetto "bridging" dovuto alla presenza delle fibre PET/a è stato tanto forte da evitare la completa separazione del campione in due parti, pur in presenza di una rilevante apertura della fessura. In tutti gli esperimenti a flessione effettuati nell'ambito di questo lavoro, la resistenza di prima fessurazione f_{1f} è stata rag-

giunta per valori di CTODm inferiori a 0,6 mm (Figura 5).

Si può quindi concludere che, nei casi in esame, D_0 misura la duttilità del materiale nel regime che segue immediatamente l'attivazione del primo crack (duttilità di prima fessurazione), mentre D_1 misura la duttilità in corrispondenza del regime di danneggiamento estremo del materiale (duttilità ultima).

I risultati riportati in Tabella 5 mettono in luce che i provini di RPETFRC/a,b,c mostrano nell'ordine incrementi di f_{1f} del 41%, del 2.06% e del 7.67% rispetto all' UNRC. Il valore di f_{1f} del PPFRC risulta invece 10.03% più grande di quello dell' UNRC. Per quanto riguarda gli indici di duttilità, dalla Tabella 6 si deduce che il massimo valore del FRR di D_0 è esibito dal RPETFRC/c (pari a +33.80%), mentre il valore massimo del FRR di D_1

Tabella 5 – Risultati dei test sulla resistenza di prima fessurazione f_{1f} e degli indici di duttilità D_0 e D_1 dei materiali analizzati (UNI 11039-2 [22]).

Materiale	Resistenza di prima fessurazione		D_0	D_1	Classe
	f_{1f} (MPa)	f_{1f} -FRR (%)			
UNRC	3.39	0	0.71	0.09	DS0
RPETFRC/a	4.78	+41.00	0.82	0.68	DS1
RPETFRC/b	3.46	+2.06	0.77	0.45	DS0
RPETFRC/c	3.65	+7.67	0.95	0.58	DS1
PPFRC	3.73	+10.03	0.92	0.73	DS2

Tabella 6 – Rapporti FRR per gli indici di duttilità D_0 e D_1 .

Materiale	D_0 -FRR (%)	D_1 -FRR (%)
RPETFRC/a	+15.49	+656
RPETFRC/b	+8.45	+400
RPETFRC/c	+33.80	+544
PPFRC	+29.58	+700

D1 è offerto dal PPFRC (pari a +700%). Svolgendo un confronto tra la duttilità dei calcestruzzi fibrorinforzati e quella dell'UNRC, si osserva che gli incrementi della duttilità ultima degli FRC rispetto all'UNRC sono notevolmente superiori dei corrispondenti incrementi in termini della duttilità di prima fessurazione. Ciò è dovuto al fatto che la duttilità ultima dell'UNRC è quasi zero, come si può osservare dall'analisi dei risultati mostrati in Figura 5.

Tra i vari RPETFRC qui esaminati, la maggiore duttilità ultima è offerta dal RPETFRC/a (+656% rispetto all'UNRC, cfr. Tabella 6 e Figura 5), che mostra anche il massimo rapporto FRR in termini della resistenza di prima fessurazione (+41.00%, cfr. Tabella 5). Il RPETFRC/c mostra invece la più grande duttilità di prima fessurazione, ragionevolmente a causa dell'aspetto gofrato delle fibre PET/c (Figura 1). Lo stesso RPETFRC/c mostra invece duttilità ultima minore rispetto al RPETFRC/a, probabilmente a causa del ridotto valore dell'allungamento percentuale a rottura delle fibre PET/c (19%, cfr. Tabella 1). Incrementi più ridotti della resistenza di prima fessurazione e degli indici di duttilità, sempre rispetto all'UNRC, sono offerti dal RPETFRC/b.

Per quanto riguarda, infine, il PPFRC, si osservano valori elevati di entrambi gli indici di duttilità (cfr. Figura 5, Tabelle 5 e 6), molto probabilmente a causa dell'elevato allungamento a rottura offerto dalle fibre PP qui esaminate, della rinomata efficacia di tali fibre in termini di crack bridging, anche nel regime "post-peak" [11,12], e del loro aspetto ondulato.

4 Tenacità

Si misura la tenacità dei materiali esaminati attraverso il fattore critico di intensificazione degli sforzi K'_c , ben noto dalla Meccanica della Frattura (cfr., ad esempio [12, 23]). Si utilizzano le seguenti formulazioni alternative di tale quantità:

$$K'_c = \sigma_f \sqrt{\pi a_0 \cdot F_I \left(\frac{a_0}{h} \right)} \quad (4)$$

$$K''_c = \sigma_f \sqrt{\pi a_0 \cdot Y \left(\frac{a_0}{h} \right)} \quad (5)$$

che corrispondono alle analisi presentate in Liedong et al. in [23] e Chunxiang e Piet in [13], rispettivamente.

Nelle (4) - (5) si è posto:

$$\sigma_f = \frac{3P_{ff}(\ell - \ell')}{2bh^2} \quad (6)$$

$$F_I \left(\frac{a_0}{h} \right) = 1.122 - 1.40 \left(\frac{a_0}{h} \right) + 7.33 \left(\frac{a_0}{h} \right)^2 - 13.08 \left(\frac{a_0}{h} \right)^3 + 14.00 \left(\frac{a_0}{h} \right)^4 \quad (7)$$

$$Y \left(\frac{a_0}{h} \right) = \sqrt{\frac{1}{\pi}} \left(1 - \frac{a_0}{h} \right)^2 [1.99 - 2.47 \left(\frac{a_0}{h} \right)] + 12.97 \left(\frac{a_0}{h} \right)^2 - 23.17 \left(\frac{a_0}{h} \right)^3 + 24.80 \left(\frac{a_0}{h} \right)^4 \quad (8)$$

Si mostrano in Tabella 7 i valori di k'_c e k''_c che si ottengono per i diversi materiali esaminati in questo lavoro, ponendo P_{ff} pari alla media aritmetica delle forze F di prima fessurazione determinate sperimentalmente. Si osserva dall'analisi della Tabella 7 che la più alta tenacità è offerta dal RPETFRC/a (56.04÷54.27 MPa m^{1/2}), che mostra un incremento di tale proprietà pari circa al 40% rispetto all'UNRC.

5 Confronti con studi precedenti

Si confrontano in questa sezione alcuni dei risultati ottenuti nel presente lavoro per il RPETFRC con altri risultati analoghi disponibili in

Tabella 7 – Fattori critici di intensificazione degli sforzi dei materiali esaminati (MPa m^{1/2}), predetti sulla base delle equazioni (4) e (5).

	UNRC	RPETFRC/a	RPETFRC/b	RPETFRC/c	PPFRC
K'_c (4)	39.76	56.04	40.50	44.06	44.70
K''_c (5)	38.50	54.27	39.22	39.23	43.29

Tabella 8 – Proprietà delle fibre Istrice [24].

Proprietà	Istrice No-Cracking	Istrice Ductile
Peso specifico	1.00	1.00
Sezione	Circolare	Circolare
Diametro (mm)	0.90	0.90
Lunghezza (mm)	50	50
Resistenza a trazione (MPa)	700	700

letteratura per lo stesso materiale e per il PPFRC. Si inizia mettendo a confronto la risposta flessionale osservata per il RPETFRC/a con quella analizzata da Ochi et al. in [3] per un differente tipo di RPETFRC, che sarà indicato nel seguito con l'acronimo RPETFRC/d. Quest'ultimo è stato ottenuto impiegando fibre di PET da riciclo con gravità specifica pari a 1,34, resistenza a trazione ≥ 450 MPa, superficie indentata e contenuto volumetrico pari all'1.0%. La Figura 6 confronta le curve carico (F) – spostamento in mezzzeria (v) del RPETFRC/a e del RPETFRC/d. La curva relativa al RPETFRC/a è stata ottenuta dalla curva F-CTODm rappresentata in Figura 5 avvalendosi della seguente relazione:

$$v = 0.7492 \cdot \text{CTODm} \quad (9)$$

per il calcolo dell'inflessione v . I grafici in Figura 6 evidenziano che il RPETFRC/a ed il RPETFRC/d, esibiscono un comportamento analogo nel regime di prima fessurazione e differenti comportamenti a rottura. In particolare, il RPETFRC/a mostra una duttilità di prima fessurazione leggermente superiore ed una duttilità ultima minore rispetto al RPETFRC/d. Utilizzando l'equazione (9), si può dedurre che le inflessioni corrispondenti ai valori massimi di CTODm osservabili in Figura 5 ($v_{\max} \sim 9$ mm) sono quasi due volte superiori a quelle registrate nelle prove di flessione (su tre punti) presentate da Ochi et al. in [3] ($v_{\max} = 5$ mm). Questo risultato dimostra come la presente analisi sulla resistenza a flessione del RPETFRC si estenda fino a deformazioni del materiale più grandi di quelle analizzate da Ochi et al. in [3].

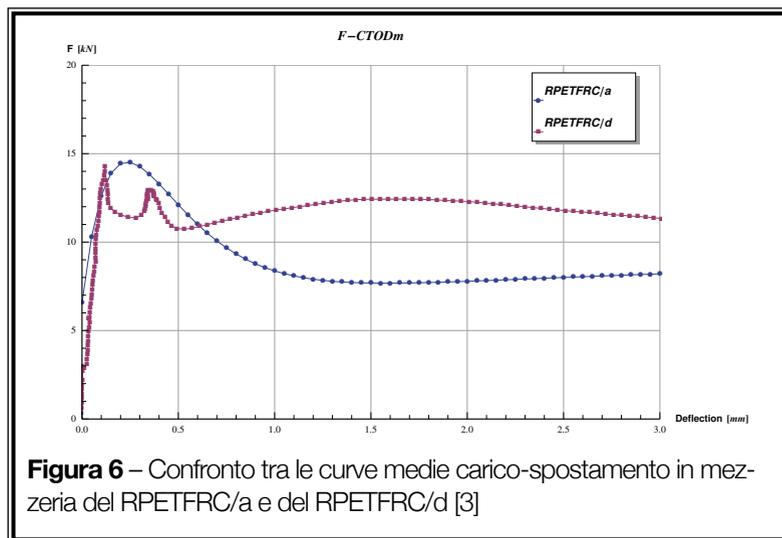


Figura 6 – Confronto tra le curve medie carico-spostamento in mezzzeria del RPETFRC/a e del RPETFRC/d [3]

Si passa ora a confrontare i risultati delle prove di flessione eseguite per gli RPETFRC/a,b,c con risultati analoghi presentati in [24] per calcestruzzi rinforzati con fibre commerciali PP in materiale vergine (fibre "Istrice", vedi <http://www.fibreistrice.com>).

Si esaminano, in particolare, calcestruzzi rinforzati con fibre "Istrice Ductile" (ID) e fibre "Istrice No-Cracking" (INC), che sono rispettivamente consigliate per usi non strutturali ed usi strutturali. Entrambe hanno gravità specifica circa pari a 1.00 e resistenza a trazione pari a 700 MPa (Tabella 8). Si indicano rispettivamente con gli acronimi IDFCR e INCFCR i calcestruzzi analizzati in [24] e rinforzati con fibre istrice

ID e INC con dosaggio pari a 10 kg/mc. Tale dosaggio corrisponde approssimativamente ad un contenuto volumetrico dell'1%. Confrontando tra loro i risultati riportati nelle Tabelle 5 e 9 si osserva che il RPETFRC/a mostra una più alta resistenza di prima fessurazione, sia rispetto all'IDFCR che rispetto all'INCFCR. Al contrario, gli RPETFRC/b e /c mostrano valori di f_{lf} sensibilmente più bassi dei calcestruzzi rinforzati con fibre Istrice. Gli indici di duttilità degli RPETFRC/a,b sono inferiori di quelli offerti dall'INCFCR e dall'IDFCR, mentre il valore di D_0 offerto dal RPETFRC/c è compreso tra quelli osservati per l'INCFCR e l'IDFCR. Per quanto riguarda la duttilità ultima,

Tabella 9 – Resistenza di prima fessurazione ed indici di duttilità dei calcestruzzi INCFCR e IDFCR, rinforzati rispettivamente con fibre Istrice "No-Cracking" e "Ductile" [24].

Materiale	Resistenza di prima fessurazione		D_0	D_1
	f_{lf} (MPa)	FRR (%)		
INCFCR	4.35	+28.32	0.92	1.50
IDFCR	4.24	+25.07	0.97	0.60

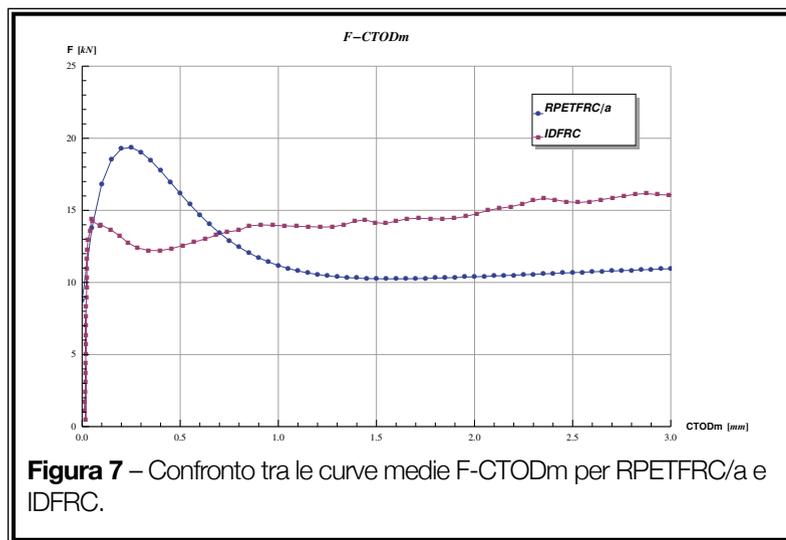


Figura 7 – Confronto tra le curve medie F-CTODm per RPETFR/a e IDFR.

si nota che il RPETFR/a presenta un valore di D_1 intermedio tra quelli osservati per l'INCFR e l>IDFR. Gli RPETFR/b,c, mostrano invece valori inferiori di D_1 , rispetto sia all'INCFR che all>IDFR. È utile osservare che l>IDFR ha una duttilità di prima fessurazione leggermente superiore ed una duttilità ultima nettamente inferiore rispetto all'INCFR [24]. La Figura 7 mostra un confronto tra le curve medie F-CTODm del RPETFR/a e dell>IDFR, evidenziando la notevole duttilità di questi materiali, l'elevata resistenza di picco del RPETFR/a e la circostanza che la duttilità di prima fessurazione offerta dall>IDFR sia leggermente più elevata di quella offerta dal RPETFR/a.

6 Considerazioni conclusive

Lo studio sperimentale e l'analisi comparativa presentati in questo lavoro conducono a concludere che il rinforzo del calcestruzzo con fibre di PET da riciclo rappresenta una tecnica competitiva di basso costo in grado di migiora-

re significativamente la resistenza termica, la resistenza a compressione, la resistenza a trazione e la duttilità del materiale base.

Il confronto tra i risultati qui presentati per differenti tipi di RPETFR e UNRC (in termini di medie campionarie) evidenzia i seguenti vantaggi del RPETFR rispetto all'UNRC (cfr. Tabelle 3-6 e Figura 4):

- RPETFR/a rispetto all'UNRC: riduzione del 18% della conducibilità termica k ; incremento del 35% della resistenza cubica a compressione $f_{c,cube}$; incremento del 41% della resistenza di prima fessurazione f_{ff} e della tenacità; incremento del 15% della duttilità di prima fessurazione D_0 ; incremento del 656% della duttilità ultima D_1 ;
- RPETFR/b rispetto all'UNRC: incremento del 22% di $f_{c,cube}$; incremento di circa il 2% di f_{ff} e di K_c ; incremento dell'8% di D_0 e del 400% di D_1 ;
- RPETFR/c rispetto all'UNRC: approssimativamente uguale valore di $f_{c,cube}$; incremento dell'8-12% di f_{ff} e di K_c , incremento del 34% di D_0 ; incremento del 544% di D_1 .

È utile osservare che i presenti risultati circa la resistenza a compressione degli RPETFR/a,b evidenziano uno scenario interessante, che è parzialmente differente da quello presentato da Ochi et al. in [3] e da Kim et al. in [6]. Questi ultimi studi riportano infatti lievi aumenti (fino al 13% per un contenuto in volume pari all'1%) o addirittura decrementi (fino al -7%; sempre per un contenuto in volume pari all'1%) della resistenza a compressione degli RPETFR esaminati rispetto all'UNRC. Il presente studio ha messo in evidenza invece che il rinforzo del calcestruzzo con opportune fibre PET da riciclo può portare incrementi anche notevoli della resistenza a compressione (fino a +35%). Confrontando i risultati di questo studio e risultati di letteratura relativi al RPETFR ed al PPFR si osserva quanto segue (cfr. Tabelle 3-9 e Figure 4-7):

- RPETFR/a rispetto al PPFR: resistenza termica leggermente più bassa; maggiori resistenze alla compressione e di prima fessurazione; duttilità ultima e di prima fessurazione leggermente più basse;
- RPETFR/b rispetto al PPFR: resistenza a compressione leggermente maggiore; resistenza di prima fessurazione leggermente inferiore; duttilità ultima e di prima fessurazione più basse;
- RPETFR/c rispetto al PPFR: resistenze a compressione e di prima fessurazione più basse; simile duttilità di prima fessurazione; duttilità ultima più bassa.

È opportuno sottolineare che le fibre PET ad alta resistenza qui esaminate (PET/a) sono in grado di produrre un incremento

significativo delle resistenze a compressione ed a flessione del RPETFRC, sia rispetto all'UNRC, che rispetto al PPFRC. D'altra parte, l'impiego di un profilo gofrato delle fibre PET (fibre PET/c) è risultato vantaggioso in termini di duttilità del materiale. Il RPETFRC è risultato decisamente più "performante" rispetto all'UNRC e competitivo rispetto al PPFRC in termini di incrementi di resistenza. Tale materiale è in grado di offrire, inoltre, una duttilità notevolmente maggiore rispetto ad un calcestruzzo ordinario, soprattutto in condizioni ultime. È anche notevole la riduzione della conducibilità termica osservata nel RPETFRC/a rispetto all'UNRC, circa uguale a quella che caratterizza il PPFRC ($\approx -20\%$). Nel complesso, il RPETFRC si qualifica come un materiale da costruzione vantaggioso e promettente, soprattutto in considerazione del risparmio sui costi e dei benefici ambientali, che derivano dall'utilizzo di plastica riciclata, in luogo di materie plastiche allo stato vergine, per la produzione delle fibre di rinforzo (cfr. anche Ochi et al. [3], Kim et al. [6], Foti [7]).

È opinione degli autori che il rinforzo del calcestruzzo attraverso fibre di PET da riciclo sia una tecnica meritevole di ulteriori analisi sperimentali e teoriche, nonché di una vasta sperimentazione di campo. Lo studio della combinazione ottimale delle dimensioni, aspetto, resistenza a trazione, deformazione ultima e contenuto in volume delle fibre di PET si configura, in particolare, come un interessante e stimolante argomento di ricerca, che potrebbe portare alla progettazione di calcestruzzi innovativi, che uniscano alte prestazioni e sostenibilità

ambientale. Tale studio potrebbe essere utilmente esteso a malte, intonaci ed altri materiali da costruzione suscettibili di rinforzo con fibre. Si affidano a lavori futuri ricerche indirizzate all'ottimizzazione delle fibre di PET da riciclo (RPET) per materiali da costruzione di varia natura, nonché studi teorici e sperimentali sulla durabilità e sulla resistenza al fuoco di tali materiali.

Ringraziamenti

Gli autori esprimono grande apprezzamento per il notevole sostegno ricevuto da parte della Calcestruzzi Iрпи SpA (CI), dalla Techno Plastic S.r.l. (TP) e dalla FHP S.A.S. nel corso del presente lavoro. Ringraziamenti speciali vanno a Mauro Mele (CI), Riccardo Guidi (TP) e Domenico Caccamo (FHP) per la loro preziosa collaborazione a tutti gli aspetti del presente studio che hanno riguardato il design e la produzione dei materiali impiegati.

Bibliografia

- [1] Siddique R, Khatib J, Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste Manage* 2008;28:1835-52.
- [2] Bentchikou M, Guidoum A, Scrivener KL, Sihadi K, Hanini S. Effect of cellulose fibre on the thermal and mechanical properties of cement paste. In: Vazquez E, Hendriks ChF, Janssen GMT, editors. *Proceedings of the international RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, 8-11 November 2004, Barcelona, Spain, vol. 2; 2004. p. 724-30. ISBN:2-912143-54-3.
- [3] Ochi T, Okubo S, Fukui K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cem Concr Compos* 2007;29:448-55.
- [4] Kim JJ, Park CG, Lee SiW, Lee SaW, Won JP. Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites Part B: Eng* 2007;39:442-50.
- [5] Silva DA, Betioli AM, Gleize PJP, Roman HR, Gómez LA, Ribeiro JLD. Degradation of recycled PET fibers in Portland cement-based materials. *Cem Concr Res* 2004;35:1741-6.
- [6] Kim SB, Yi NH, Kim HY, Kim J, Song Y. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cem Concr Compos* 2010;32:232-40.

- [7] Foti D. Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Constr Build Mater* 2011;25:1906-15.
- [8] Brandt AM. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after 40 years of development in building and civil engineering. *Compos Struct* 2008;86:3-9.
- [9] Zheng Z, Feldman D. Synthetic fibre-reinforced concrete. *Prog Polym Sci* 1995;20:185-210.
- [10] Meddah MS, Bencheikh M. Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Constr Build Mater* 2009;23:3196-205.
- [11] Song PS, Hwang S, Sheu BC. Strength properties of nylon- and polypropylene fiber-reinforced concretes. *Cem Concr Res* 2005;35:1546-50.
- [12] Sukontasukkul P. Toughness evaluation of steel and polypropylene fiber reinforced concrete beams under bending. *Thammasat Int J Sci Technol* 2004;9(3).
- [13] Chunxiang Q, Piet S. Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres. *Cem Concr Compos* 2000;22:343-51.
- [14] Hsie M, Tu C, Song PS. Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Mater Sci Eng A* 2008:153-7.
- [15] Yao W, Li J, Wu K. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cem Concr Res* 2003;33:27-30.
- [16] Bencardino F, Rizzuti L, Spadea G, Swamy RN. Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties. *Composites Part B: Eng* 2010;41:17-24.
- [17] Kang S, Lee Y, Park Y, Kim J. Tensile fracture properties of an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) with steel fiber. *Compos Struct* 2010;92:61-71.
- [18] Frattonillo A, Giovinco G, Mascolo MC, Vitale A. Effects of hydrophobic treatment on thermophysical properties of lightweight mortars. *Exp Therm Fluid Sci* 2005;29:733-41.
- [19] Buonanno G, Carotenuto A, Giovinco G, Massarotti N. Experimental and theoretical modelling of the effective thermal conductivity of rough steel spheroid packed beds. *J Heat Transf* 2003;125:693-702.
- [20] UNI EN 12390-3. Compressive strength of test specimens; 2009.
- [21] UNI 11039-1. Steel fibre reinforced concrete - definitions, classification and designation. Milan (Italy): UNI Editions; 2003.
- [22] UNI 11039-2. Steel fibre reinforced concrete - test method for determination of first crack strength and ductility indexes. Milan (Italy): UNI Editions; 2003.
- [23] Liedong F, Yukio M, Yoshiharu M. Fracture toughness of Si3N4/S45C joint with an interface crack. *Mater Sci Forum* 2005;7(1):47-52.
- [24] Istrice. Fibre Polimeriche per Calcestruzzi Fibrorinforzati. Technical report; 2009. <www.fibreistrice.com/relazione_italiano.pdf>.
- [25] EN 197-1 - cement - part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cement, 2000.