

## Il Rubbercrete: capacità di assorbimento dell'energia durante gli impatti

*prof. ing. Giuseppe Carlo Marano, Politecnico di Bari*

*dott. Ing. Claudia Capone, Italcementi Group – Laboratorio Italcementi di Brindisi*

*p.i. Marcello Molfetta, Italcementi Group – Laboratorio Italcementi di Brindisi*

*p.i. Salvatore Vendetta, Italcementi Group – Laboratorio Italcementi di Brindisi*

*dott. ing. Sara Falangone, Libero Professionista*

*dott. ing. Cesare Marti Ph. D. , Politecnico di Bari*

### ABSTRACT

Ogni anno in Europa sono 180 i milioni di pneumatici usati accumulati, i quali molto spesso vengono abbandonati in discariche a cielo aperto divenendo un problema di inquinamento ambientale sempre più ingente. Da tempo, pertanto, sono state messe a punto soluzioni innovative per risolvere il problema dello smaltimento dei Pneumatici Fuori Uso, PFU.

Un nuovo filone di ricerca, in particolare, colloca i PFU nelle miscele di calcestruzzo in parziale sostituzione degli aggregati, soddisfacendo ad un requisito di tutela delle risorse ambientali, al fine di ottenere un calcestruzzo leggero che prende il nome di "Rubbercrete".

Le particelle di gomma triturrata dei pneumatici dei veicoli, aggiunte al mix design del calcestruzzo, ne modificano ovviamente le proprietà fisico - meccaniche; in particolare la miscela di Rubbercrete assume una maggiore deformabilità e plasticità rispetto al calcestruzzo ordinario.

In buona sostanza il Rubbercrete rappresenta il giusto compromesso tra le proprietà meccaniche del calcestruzzo e quelle duttili della gomma, restituendo un materiale fruibile in campi dove è richiesto un rilevante assorbimento di energia e non necessariamente un'elevata resistenza meccanica, come ad esempio nel caso delle barriere stradali di tipo New Jersey.

Nel presente lavoro si analizzano le caratteristiche del Rubbercrete sia allo stato fresco che allo stato indurito, valutandone le caratteristiche al variare della percentuale di gomma usata in due distinti set di mix, diversi anche per pezzatura di pneumatico triturrato utilizzata. Nello specifico si è focalizzata l'attenzione sulle capacità della miscela calcestruzzo-gomma di assorbire energia, creando una "Prova d'impatto" pensata appositamente per questo scopo, al fine di valutarne l'eventuale applicabilità nella costruzione di barriere stradali di tipo New Jersey.

## INTRODUZIONE

Utilizzando pezzi di gomma ottenute dai PFU nei mix di calcestruzzo in parziale sostituzione degli aggregati “ordinari” si ottiene un calcestruzzo leggero, con specifiche caratteristiche reologiche, meccaniche ed isolanti.

Dall’aggiunta di particelle di gomma in sostituzione di aggregati “ordinari” nella miscela di calcestruzzo si possono trarre numerosi vantaggi, ad esempio:

- diminuisce l’onere dello smaltimento dei PFU: di conseguenza si opta per il riciclaggio di questi ultimi, favorendo la diminuzione delle discariche abusive;
- si ottiene una maggiore deformabilità e plasticità rispetto al calcestruzzo ordinario;
- diminuisce l’estrazione di materie prime: l’utilizzo delle particelle di PFU in sostituzione dei materiali naturali ha un impatto positivo dal punto di vista ambientale;
- possibile miglioramento di alcune proprietà del calcestruzzo: la duttilità, la durezza, lo smorzamento, e di conseguenza la resistenza agli urti e la capacità di assorbire energia dovuta ad azioni dinamiche;
- buona resistenza agli agenti atmosferici: il calcestruzzo alleggerito con gomma, in condizioni di gelo-disgelo, può produrre risultati migliori rispetto al calcestruzzo ordinario;
- riduzione della densità di massa, proporzionale all’aumento della quantità di gomma, rispetto al calcestruzzo ordinario;
- elevate prestazioni ingegneristiche offerte, grazie al basso peso specifico della gomma, alle proprietà di isolamento termico e acustico, alla mitigazione delle vibrazioni, in confronto agli aggregati tradizionali.

Gli svantaggi del calcestruzzo alleggerito con la gomma, rispetto a quello convenzionale, possono riguardare i seguenti aspetti:

- riduzione della resistenza a trazione, a compressione e a flessione, dovuta ad una minore coesione tra la superficie dell’aggregato in gomma, che è meno ruvida rispetto a quello tradizionale, e la miscela di calcestruzzo (peggioramento di adesione nella zona di transizione);
- maggiore contenuto di aria, rispetto alle miscele ordinarie. Questo può essere spiegato ricordando la natura non polare degli aggregati di gomma e il fatto che riescano a intrappolare aria nella loro struttura superficiale tagliuzzata. L’aumento del contenuto dei vuoti d’aria implica un peggioramento della resistenza caratteristica del calcestruzzo;
- impossibilità di uso in elementi strutturali, se sono pretese alte resistenze;
- diminuzione della lavorabilità, con l’aumento della dimensione o della percentuale di aggregati in gomma;
- debolezza delle particelle in gomma, che portano alla nascita di crepe nella zona di contatto tra la gomma e la matrice cementizia.

In questo lavoro si sono determinate le caratteristiche del Rubbercrete sia allo stato fresco che allo stato indurito, valutandone in particolare l’assorbimento di energia, caratteristica raramente indagata ed elaborata a livello sperimentale.

## LA SPERIMENTAZIONE

La sperimentazione ha riguardato l’analisi di due gruppi di miscele, il primo gruppo è caratterizzato da un diametro massimo dell’aggregato ( $D_{max}$ ) 4mm e il secondo da  $D_{max}$  20mm. In entrambi i gruppi è stata variata la quantità di gomma triturrata in sostituzione parziale dell’aggregato. Precisamente nelle miscele con  $D_{max}$  4 mm si è sostituito parte della sabbia

calcareo 0-4 mm di frantumazione con una frazione di gomma triturrata 2-4 mm denominata G1 (**Figura 1**), mentre nelle miscele con Dmax 20 mm sono state sostituite parte di sabbia calcarea 0-4mm, parte di pietrischetto calcarea 4-10 mm e parte di pietrisco calcarea 8-20mm con una frazione di gomma triturrata 3,6-16 mm denominata G2 (**Figura 2**).

Le miscele di riferimento per entrambi i gruppi di miscele Dmax 4mm e Dmax 20mm, sono denominati «mix TQ» e contengono percentuali nulle di aggregati di gomma, mentre le miscele denominate «mix “X” %» hanno percentuale in volume di gomma del 10%, 30%, 50% e 75% in sostituzione dell’aggregato ordinario.

Come legante è stato impiegato il cemento i.work Tecnocem 42,5 R II A/LL Italcementi di Matera.



**Figura 1** - Gomma G1:2-4 mm

**Figura 2** – Gomma G2:3.6-16 mm

Nelle miscele si è utilizzato l’additivo superfluidificante acrilico policarbossilico Creactive-Quattro K (Sika), indicato nelle tabelle come CRTV Quattro. Il superfluidificante ha il compito di favorire la lavorabilità del calcestruzzo, ridurre il quantitativo di acqua da utilizzare nell’impasto, migliorare la resa dell’impasto e abbassarne il contenuto di aria.

Il coadiuvante di miscelazione impiegato ha contribuito all’introduzione di microbolle di aria nel mix uniformemente distribuite.

Come aggiunta, solo in una tipologia di miscela, è stato utilizzato il filler calcarea Zandobbio. La composizione dei mix confezionati con le due pezzature di gomma è riportata nelle

Miscela	mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
Sabbia	1520	1345	969	662	276
G1-(2-4)	---	67	183	289	347
42.5R II-A/LL	310	380	380	380	380
Filler Zandobbio	185	---	---	---	---
CRTV-Quattro K	4	3.24	3.28	4	4
Coadiuvante di miscelazione	---	---	0.008	0.005	0.003
Acqua di progetto	190	195	180	160	155
Aria di progetto	55	105	160	200	300

**Tabella 1** - Composizione in [Kg/m<sup>3</sup>] delle miscele con D<sub>max</sub> 4mm

Miscela	mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
---------	--------	---------	---------	---------	---------

<b>Sabbia</b>	1078	1006	920	688	259
<b>Pietrischetto</b>	176	---	---	---	---
<b>Pietrisco</b>	537	501	153	---	---
<b>G2-(3.6-16)</b>	---	70	193	289	326
<b>42.5R II-A/LL</b>	350	400	400	400	400
<b>Filler Zandobbio</b>	---	---	---	---	---
<b>CRTV-Quattro K</b>	2.83	3.15	4.6	4.54	3.12
<b>Coadiuvante di miscelazione</b>	---	---	---	0.002	0.015

**Tabella 2** - Composizione in [Kg/m<sup>3</sup>] delle miscele con D<sub>max</sub> 20mm

## PROPRIETA' INDAGATE E RISULTATI OTTENUTI: LO STATO FRESCO

La lavorabilità è stata valutata attraverso l'abbassamento al cono di Abrams – Slump Test (UNI EN 12350-2), classificando la miscela nella relativa classe di consistenza in funzione della misura dell'abbassamento.

- Per il primo gruppo di mix (D<sub>max</sub> 4mm) i risultati sono riportati nella **Tabella 3**.

Miscela	mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
<b>Slump</b> Tempo 0 [cm]	19.5	25	23	23	23

**Tabella 3** - Valutazione dello slump per miscele Dmax 4mm

- Per il secondo gruppo di mix (Dmax 20mm) i risultati sono riportati nella **Tabella 4**.

Miscela	mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
<b>Slump</b> Tempo 0 [cm]	23.5	22.5	22.5	17	20

**Tabella 4** - Valutazione dello slump per miscele Dmax 20mm

Entrambe le miscele hanno una buona lavorabilità, superiore alla classe S4; le miscele con la pezzatura di gomma minore, cioè la G1 (2-4) hanno una lavorabilità di poco superiore a quelle con la gomma G2 (3.6-16). Questa circostanza è da imputarsi alla superficie meno appiattita che genera meno attrito tra le particelle di aggregato della gomma G1 (2-4) rispetto alla gomma G2 (3.6-16), pur avendo entrambe le gomme subito gli stessi processi di triturazione e granulazione.

La massa volumica fresca, M<sub>f</sub> (in Kg/m<sup>3</sup>), è determinata effettuando il rapporto tra la massa di un campione di miscela ed il volume del contenitore secondo UNI EN 12350-6 impiegato per la pesatura. I risultati per i due gruppi di mix sono stati riportati nelle **Tablelle 5 e 6**.

Miscela	mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
---------	--------	---------	---------	---------	---------

$M_f$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	2260	1962	1677	1453	1147
$M_t$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	2207	1990	1714	1493	1160
<i>Resa</i>	[-]	0.98	1.01	1.02	1.028	1.01

**Tabella 5** - Massa volumica fresca,  $M_f$ , massa volumica teorica,  $M_t$ , e resa per il 1° gruppo di mix ( $D_{max}$  4mm)

Miscele		mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
$M_f$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	2338	2123	1861	1523	1143
$M_t$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	2318	2154	1842	1553	1161
<i>Resa</i>	[-]	0.99	1.01	0.99	1.02	1.02

**Tabella 6** - Massa volumica fresca,  $M_f$ , massa volumica teorica,  $M_t$ , e resa per il 2° gruppo di mix ( $D_{max}$  20mm)

Appare evidente, dai risultati ottenuti, il bilanciamento della miscela; infatti, facendo il rapporto della massa volumica teorica sulla massa volumica fresca si ha un incremento o un decremento massimo del 3%, ossia si ottiene un risultato compreso tra 1.03 e 0.97. Si osserva, inoltre, il trend di decrescita della massa volumica fresca con l'aumento del quantitativo della gomma.

L'aria stabilizzata nella miscela influenza in modo diretto la lavorabilità dell'impasto, il peso di quest'ultimo e le resistenze meccaniche della miscela allo stato indurito. Per misurare il contenuto d'aria all'interno della miscela è stato usato il porosi metro secondo UNI EN 12350-7. I risultati per le due pezzature di gomma sono riportati nelle **Tabelle 7 e 8**.

Miscele	mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
Contenuto d'aria	5.4	13	20	23	35

**Tabella 7** - Contenuto d'aria per il 1° gruppo di mix ( $D_{max}$  4mm) [%]

Miscele	mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
Contenuto d'aria	2.3	7.9	11.5	23.3	35

**Tabella 8** - Contenuto d'aria per il 2° gruppo di mix ( $D_{max}$  20mm) [%]

Con l'aumento della quantità di gomma aumenta anche la percentuale di aria trattenuta nell'impasto.

I calcestruzzi confezionati con la gomma G1 (2-4) hanno un contenuto d'aria superiore a quelli confezionati con la gomma G2 (3.6-16), in accordo con la Regola di Lyse e con gli studi precedenti effettuati sul rubbercrete.

## PROPRIETA' INDAGATE E RISULTATI OTTENUTI: LO STATO INDURITO

La stima della Resistenza a compressione  $R_c$  è regolata dalla norma UNI EN 12390/3, che disciplina il metodo per la definizione della resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo indurito di forma cubica.

Nelle **Tabelle 9 e 10**, si riportano i risultati della prova a compressione, in funzione della percentuale di gomma, per tempi di maturazione pari a 7 giorni e a 28 giorni.

	Miscele	mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
<b><math>R_c</math></b>						
<b>1° gruppo di mix</b>	<b>7 gg</b>	34.2	28.4	10.8	5.0	2.4
	<b>28 gg</b>	37.34	30.5	12.8	6.5	2.6
<b>2° gruppo di mix</b>	<b>7 gg</b>	43.6	27.4	10.5	5.6	2.3
	<b>28 gg</b>	47.7	30.5	12.0	6.0	2.2

**Tabella 9** - Resistenza a compressione per i due gruppi di mix a 7 e 28 giorni [MPa]

	Miscele	mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
<b>Carico [KN]</b>						
<b>1° gruppo di mix</b>	<b>7 gg</b>	783	287	109	50	25
	<b>28 gg</b>	851	306	130	66	60
<b>2° gruppo di mix</b>	<b>7 gg</b>	989	633	242	128	51
	<b>28 gg</b>	1080	701	277	137	49

**Tabella 10** - Carico massimo a compressione per i due gruppi di mix a 7 e 28 giorni [KN]

Dai risultati ottenuti si osserva che la resistenza a compressione decresce all'aumentare del quantitativo di gomma, così come il carico massimo sopportabile.

Le resistenze a compressione dei due gruppi di mix sono assolutamente confrontabili.

Il Modulo Elastico Dinamico, MED, è valutato secondo la norma UNI 9524, basata sui rilievi microsismici mediante impulsi di onde vibrazionali ad alta frequenza. Il metodo ha lo scopo di rilevare i tempi e di calcolare la velocità virtuale di propagazione degli impulsi delle onde vibrazionali in campioni o strutture di calcestruzzo.

La formula utilizzata per ricavare il modulo di elasticità dinamico,  $E_d$ , è riportata nell'**Equazione 1**:

$$E_d = V_d \cdot \rho \cdot \frac{[(1 + \gamma_d) \cdot (1 - 2\gamma_d)]}{(1 - \gamma_d)} \quad (1)$$

dove:  $E_d$  = Modulo di elasticità dinamico del mezzo, in Pascal;  $V_d$  = Velocità di propagazione delle onde ultrasoniche, in m/s;  $\rho$  = Massa volumica apparente, in Kg/m<sup>3</sup>;  $\gamma_d$  = Coefficiente di Poisson dinamico del mezzo.

Nelle miscele di Rubbercrete questa prova consente di determinare il comportamento degli aggregati in gomma nella miscela; nel caso specifico si sono valutati i comportamenti delle due pezzature di gomma G1 (2-4) e G2 (3.6-16).

Si è studiata la variazione del MED all'aumentare della percentuale di gomma per i due gruppi di mix, per tempi di maturazione pari a 7 e 28 gg (**Tabella 11**). Con l'aumento della percentuale di gomma il modulo di elasticità dinamico si riduce fortemente. L'introduzione della gomma nelle miscele di calcestruzzo fa sì che questa si comporti come uno sbarramento nei confronti delle onde ultrasoniche unitamente alla presenza di aria, comportando un aumento del tempo di attraversamento del provino e quindi una riduzione del Modulo Elastico Dinamico.

Miscela		mix TQ	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
<b>MED</b>						
<b>1° gruppo di mix</b>	<b>7 gg</b>	41.10	26.17	14.89	9.86	4.06
	<b>28 gg</b>	37.48	25.73	14.34	9.09	4.28
<b>2° gruppo di mix</b>	<b>7 gg</b>	40.43	31.02	18.99	10.21	4.14
	<b>28 gg</b>	40.16	31.43	20.41	10.44	4.41

**Tabella 11** - Modulo Elastico Dinamico (MED) per i due gruppi di mix a 7 e 28 giorni [Pa]

## PROVA DI IMPATTO

Lo scopo della prova di impatto progettata è calcolare, al variare delle percentuali di gomma e delle due pezzature all'interno dei diversi provini, le seguenti caratteristiche:

- indice di rimbalzo;
- profondità e diametro dell'impronta lasciata;
- volume dell'impronta;
- energia per unità di volume.

Si è cercato di mettere a punto un metodo che potesse essere riproducibile per effettuare i vari confronti.

Con riferimento all'articolo pubblicato sulla rivista scientifica "Magazine of Concrete Research", nel Volume 65 Numero 4 dal titolo "Assorbimento di energia nel cemento espanso da impatti a bassa velocità", si è scelto di far cadere sonde con massa specifica nota su lastre campione, poste all'estremità inferiore del tubo verticale di **Figura 5**, contenenti le varie percentuali di gomma. Nel test sono state utilizzate due tipologie di sonda/proiettile:

- Sonda/proiettile con punta emisferico (**Figura 3**);
- Sonda/proiettile con punta conica (**Figura 4**).

Le sonde hanno massa rispettivamente di 2,2 Kg e 2 Kg e diametro di 6,8 cm; sono sostenute da un'asta di lunghezza 1 m, con diametro 0.8 mm e vi è un ulteriore peso aggiuntivo di 1,5 Kg, per poter variarne il peso iniziale.

Le sonde vengono fatte cadere all'interno di una tubazione in PVC, opportunamente fissata, di diametro di 7 cm e lunghezza di 4,4 m, come si vede in **Figura 5**.

Le sonde cadono sui provini di Rubbercrete aventi dimensione 300x300x100 mm e con stagionatura di 28 gg, posizionati su una base di calcestruzzo armato.



**Figura 3** - Proiettile emisferico



**Figura 4** - Proiettile con punta conica



**Figura 5** - Tubazione in PVC

Si sono svolte opportune prove per determinare l'ottimale posizione del provino, atta a garantire una buona ripetibilità dei risultati.

Si procede con il disporre un sottile strato di sabbia (quarzo) sulla base dove viene adagiato il provino (**Figura 6**). Successivamente si posiziona il provino, in modo che risulti perfettamente aderente alla base e si prosegue con il bloccaggio di quest'ultimo (**Figura 7**).

In particolare, il provino è fissato alla base con l'ausilio di due barre metalliche (**Figura 8**). La sonda è fatta cadere all'interno del tubo di PVC.



**Figura 6** - Quarzo per l'aderenza del provino **Figura 7** – Posizionamento del provino



**Figura 8** - Bloccaggio del provino

Con l'ausilio di un'asta metallica graduata, resa solidale alla tubazione in PVC e posta alla sua estremità inferiore, e la visione rallentata dell'impatto ripreso da una telecamera, si valuta l'indice di rimbalzo, inteso come altezza di risalita del provino dopo l'impatto.

Si misurano inoltre il diametro dell'impronta lasciata dalla sonda e la profondità del solco per ricavarne il volume dell'impronta. Lo stesso viene anche calcolato riempiendo l'impronta con filler di quarzo, che viene recuperato e pesato. Essendo la massa volumica in mucchio di tale quarzo nota, il volume del solco è implicitamente calcolato.

Su ogni tipologia di provino si effettuano quattro prove, due con le sole sonde di **Figura 3 e 4**, due aggiungendo ad ognuna il peso aggiuntivo di 1,5 Kg.

L'energia potenziale del proiettile è data dall'**equazione 2**:

$$E = mgh \quad (2)$$

nella quale: E: energia potenziale [J]; m: massa del proiettile [Kg]; g: accelerazione di gravità [9,81 m/s<sup>2</sup>]; h: altezza di caduta del proiettile [m].

Una volta calcolato il volume del solco, si può determinare l'energia per unità di volume tramite l'**equazione 3**:

$$E_v = \frac{E}{V} \quad (3)$$

dove: E<sub>v</sub>: energia assorbita [MJ/m<sup>3</sup>]; E: energia potenziale [J]; V: volume dell'impronta [m<sup>3</sup>]. La profondità del solco, h, può essere calcolata tramite la formula inversa per una calotta emisferica con l'**equazione 4**:

$$V_{calotta} = \frac{\pi h}{6} \cdot (3a^2 + h^2) \quad (4)$$

dove: V<sub>calotta</sub>: volume della calotta emisferica [m<sup>3</sup>]; h: profondità del solco [m], a: raggio del cerchio che circonda il solco [m].

I risultati per i due gruppi di mix sono riportati nelle **Tabelle da 12 a 15** e nelle **Figure 9 e 10**.

% G1	E		E/V		V	
<b>Pesi</b>	2.2	3.7	2.2	3.7	2.2	3.7
<b>TQ</b>	94	157	7.28 10 <sup>9</sup>	5.26 10 <sup>8</sup>	1.3 10 <sup>-8</sup>	2.98 10 <sup>-7</sup>
<b>10%</b>	94	157	2.97 10 <sup>8</sup>	2.92 10 <sup>8</sup>	3.18 10 <sup>-7</sup>	5.38 10 <sup>-7</sup>
<b>30%</b>	94	157	1.75 10 <sup>8</sup>	4.32 10 <sup>8</sup>	5.38 10 <sup>-7</sup>	3.63 10 <sup>-7</sup>
<b>50%</b>	94	157	3.31 10 <sup>8</sup>	2.28 10 <sup>8</sup>	2.85 10 <sup>-7</sup>	6.88 10 <sup>-7</sup>
<b>75%</b>	94	157	1.63 10 <sup>8</sup>	2.06 10 <sup>8</sup>	5.77 10 <sup>-7</sup>	7.63 10 <sup>-7</sup>

**Tabella 12** - Risultati della prova d'impatto per il 1° gruppo di mix [J, J/m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>]

	Pesi [Kg]	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
<b>Profondità impronta</b>	2.2	0.37	1.13	1.41	1.25
	3.7	0.92	1.28	1.34	1.53

**Tabella 13** - Profondità dell'impronta della sonda emisferica per la gomma G1 [mm]

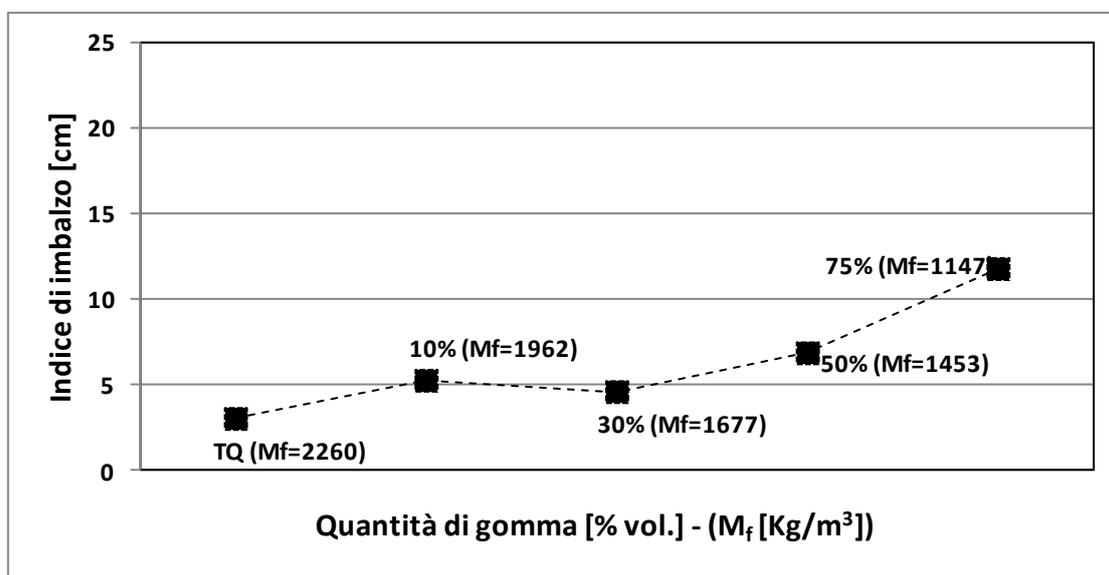
% G2	E		E/V		V	
<b>Pesi</b>	2	3.7	2.2	3.7	2.2	3.7
<b>TQ</b>	94	157	6.24 10 <sup>9</sup>	4.06 10 <sup>8</sup>	1.51 10 <sup>-8</sup>	3.87 10 <sup>-7</sup>

10%	94	157	$3.16 \cdot 10^8$	$3.84 \cdot 10^8$	$2.98 \cdot 10^{-7}$	$4.09 \cdot 10^{-7}$
30%	94	157	$4.55 \cdot 10^8$	$6.72 \cdot 10^8$	$2.08 \cdot 10^{-7}$	$2.34 \cdot 10^{-7}$
50%	94	157	$1.77 \cdot 10^8$	$2.02 \cdot 10^8$	$5.32 \cdot 10^{-7}$	$7.78 \cdot 10^{-7}$
75%	94	157	$8.9 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^7$	$1.07 \cdot 10^{-6}$	$1.74 \cdot 10^{-6}$

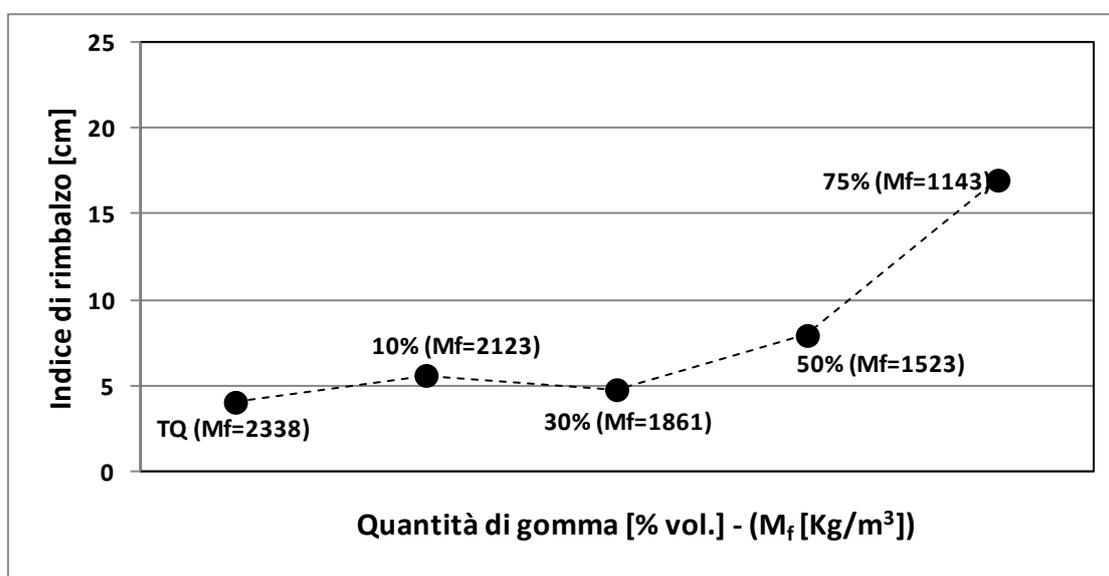
**Tabella 14** - Risultati della prova d'impatto per il 2° gruppo di mix [J, J/m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>]

	Pesi [Kg]	mix 10%	mix 30%	mix 50%	mix 75%
Profondità impronta	2.2	0.47	1.00	0.91	1.57
	3.7	1.14	1.13	1.09	1.76

**Tabella 15** - Profondità dell'impronta della sonda emisferica per la gomma G2 [mm]



**Figura 9** - Indici di rimbalzo per la sonda emisferica con peso aggiuntivo e gomma G1(2-4mm)



**Figura 10** - Indici di rimbalzo per la sonda emisferica con peso aggiuntivo e gomma G2(3.6-16mm)

Nelle **Figure 9 e 10** sono stati riportati solo i grafici relativi alle sonde con peso aggiuntivo, essi evidenziano in maniera più significativa le differenze del comportamento dei provini di Rubbercrete al variare della percentuali di gomma G1 e G2. La stessa scelta si è praticata anche per i risultati ottenuti con la sonda con punta conica.

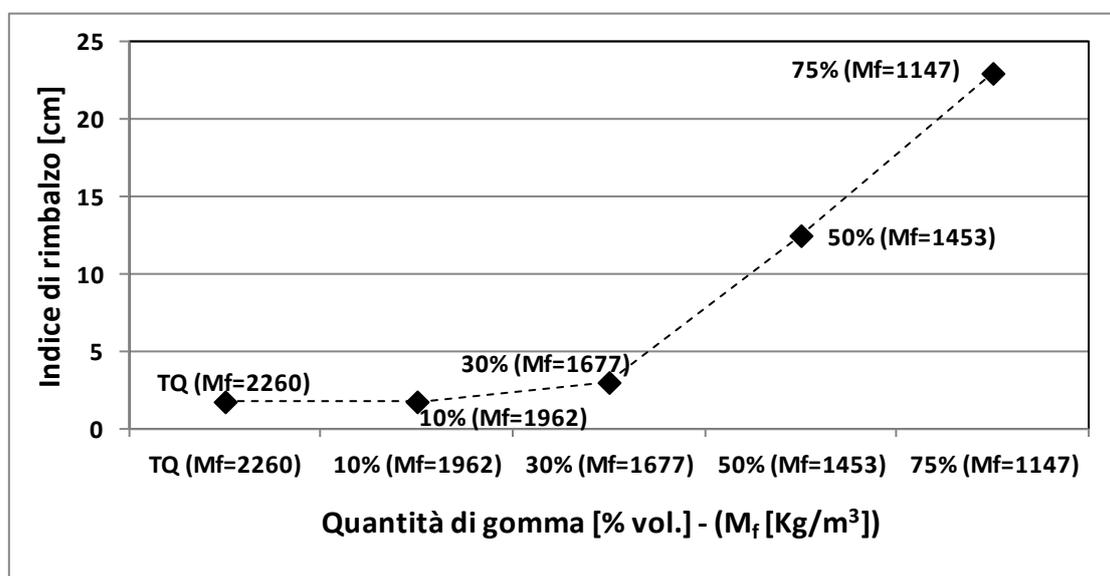
I risultati per i due gruppi di mix sono riportati nelle **Tablelle 16 e17** e nelle **Figure 11 e 12**. I risultati della profondità dell'impronta della sonda, per le due pezzature di gomma G1 e G2, sono tralasciati in quanto meno significativi.

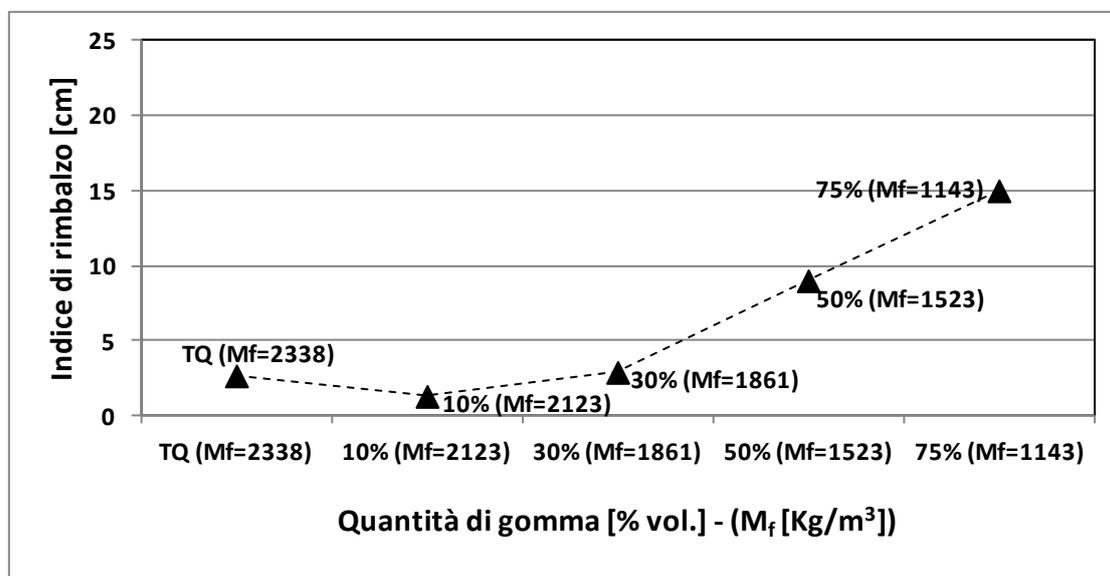
% G1	E		E/V		V	
	2.2	3.7	2.2	3.7	2.2	3.7
<b>Pesi</b>	2.2	3.7	2.2	3.7	2.2	3.7
<b>TQ</b>	86	148	1.66 10 <sup>8</sup>	2.36 10 <sup>8</sup>	5.19 10 <sup>-7</sup>	6.29 10 <sup>-7</sup>
<b>10%</b>	86	148	9.3 10 <sup>7</sup>	1.26 10 <sup>8</sup>	9.21 10 <sup>-7</sup>	1.17 10 <sup>-6</sup>
<b>30%</b>	86	148	5.2 10 <sup>7</sup>	8.5 10 <sup>7</sup>	1.65 10 <sup>-6</sup>	1.74 10 <sup>-6</sup>
<b>50%</b>	86	148	9.3 10 <sup>7</sup>	6.2 10 <sup>7</sup>	9.21 10 <sup>-7</sup>	2.38 10 <sup>-6</sup>
<b>75%</b>	86	148	6.8 10 <sup>7</sup>	8.1 10 <sup>7</sup>	1.26 10 <sup>-6</sup>	1.84 10 <sup>-6</sup>

**Tabella 16** - Risultati della prova d'impatto per il 1° gruppo di mix [J, J/m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>]

% G2	E		E/V		V	
	2.2	3.7	2.2	3.7	2.2	3.7
<b>Pesi</b>	2.2	3.7	2.2	3.7	2.2	3.7
<b>TQ</b>	86	148	1.69 10 <sup>8</sup>	1.61 10 <sup>8</sup>	5.08 10 <sup>-7</sup>	9.21 10 <sup>-7</sup>
<b>10%</b>	86	148	1.17 10 <sup>8</sup>	2.6 10 <sup>8</sup>	7.33 10 <sup>-7</sup>	5.71 10 <sup>-7</sup>
<b>30%</b>	86	148	1.1 10 <sup>8</sup>	1.3 10 <sup>8</sup>	7.78 10 <sup>-7</sup>	1.14 10 <sup>-6</sup>
<b>50%</b>	86	148	6.9 10 <sup>7</sup>	1.58 10 <sup>8</sup>	1.24 10 <sup>-6</sup>	9.41 10 <sup>-7</sup>
<b>75%</b>	86	148	6.8 10 <sup>7</sup>	7.7 10 <sup>7</sup>	1.27 10 <sup>-6</sup>	1.94 10 <sup>-6</sup>

**Tabella 17** - Risultati della prova d'impatto per il 2° gruppo di mix [J, J/m<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>]



**Figura 11** - Indici di rimbalzo per la sonda con punta conica, peso aggiuntivo e gomma G1 (2-4mm)**Figura 12** - Indici di rimbalzo per la sonda con punta conica, peso aggiuntivo e gomma G2 (3.6-16mm)

E' evidente che, per percentuali di G1 e G2 da 0% a 30%, nel caso della sonda a punta conica, i valori di rimbalzo sono inferiori a quelli dei test con sonda emisferica. Quest'anomalia è probabilmente dovuta al fatto che il proiettile con estremità conica, poiché da' luogo ad un impatto più "concentrato", dissipa una parte dell'energia di impatto nella rottura più o meno parziale del/dei granulo/i di aggregato colpito/i.

## CONCLUSIONI

Nello studio effettuato si esamina il Rubbercrete, valutando le caratteristiche del mix gomma-calcestruzzo sia allo stato fresco che a quello indurito e ponendo particolare attenzione alla capacità di questa miscela di assorbire energia in seguito ad impatto.

Le principali caratteristiche analizzate sono la lavorabilità, la massa volumica, il contenuto d'aria, la resistenza a compressione e il modulo elastico dinamico.

Inoltre sono presentate prove di rimbalzo per valutare l'energia dissipata in seguito all'impatto di due tipi di sonde, con punta emisferica e conica, lasciate cadere da un'altezza prefissata all'interno di una tubazione, su provini con varie percentuali di gomma (da 0% a 75%).

Da un esame critico dei risultati ottenuti dalle diverse prove effettuate, in riferimento allo stato fresco delle miscele, emerge che:

- la massa volumica fresca del Rubbercrete decresce con l'aumento del quantitativo di gomma, in virtù del minor peso specifico della gomma rispetto agli aggregati ordinari;

- la massa volumica fresca dei mix contenenti gli aggregati G1 è inferiore a quella dei mix con aggiunta di aggregati G2, in quanto sembra che i primi, avendo diametro massimo inferiore (e quindi maggiore superficie specifica a parità di dosaggio), contribuiscano a stabilizzare all'interno del Rubbercrete più aria;
- tutte le miscele di Rubbercrete testate hanno mostrato una buona lavorabilità;
- i mix con G1 hanno evidenziato lavorabilità superiore (anche se di poco) rispetto a quella dei mix con la gomma G2, in quanto i granuli di G1 hanno tendenzialmente una geometria sferoidale laddove G2 è costituita da granuli di forma tendenzialmente appiattita.

Per quanto riguarda lo stato indurito delle miscele, è risultato che:

- la resistenza a compressione dei mix decresce con l'aumento del quantitativo di gomma, mentre risulta essere totalmente paragonabile, se il parametro di riferimento è la diversa pezzatura della gomma;
- l'aumento della percentuale di gomma nel Rubbercrete determina una riduzione del modulo di elasticità dinamica (MED), che, in riferimento alle due pezzature di gomma investigate, risulta confrontabile;
- relativamente al test di impatto, l'indice di rimbalzo appare come funzione della percentuale di gomma del Rubbercrete. E'altresì emerso che, attraverso tale indice, si possano ottenere informazioni di tipo qualitativo sulla quantità di energia d'impatto assorbita dal provino, che risulta a sua volta dipendente dalla percentuale di gomma del mix.

Per percentuali di G1 e G2 da 0% fino al 30%, nel caso della sonda a punta conica, i valori di rimbalzo sono inferiori a quelli dei test con sonda emisferica. Quest'anomalia è probabilmente dovuta al fatto che il proiettile con estremità conica, poiché da' luogo ad un impatto più "concentrato", determina una dissipazione di energia per la rottura più o meno parziale del/dei granulo/i di aggregato "ordinario" colpito/i. D'altro canto, dai test con sonda con punta conica, sembrerebbe emergere una condizione di minimo indice di rimbalzo/massima energia assorbita in corrispondenza di percentuali di gomma tra il 10% ed il 30%. Occorrono pertanto ulteriori sperimentazioni per affinare la procedura di stima dell'energia di impatto al fine di valutare la composizione del Rubbercrete che massimizzi l'assorbimento di energia.

Comunque, dalle indicazioni emerse dalla sperimentazione oggetto del presente lavoro, si può affermare che particolari miscele di Rubbercrete possano essere utilizzate in dispositivi stradali e in generale al fine di assorbire energia a seguito di un impatto, in accoppiamento ad una resistenza meccanica non necessariamente elevata.

## RIFERIMENTI

Aiello, M. A., and Leuzzi, F. (2010), "Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state." *Journal of Waste Management*, ELSEVIER, 30, 1696-1704.

Batayneh, M. K., Marie, I., and Asi, I. (2008), "Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries." *Journal of Waste Management*, ELSEVIER, 28, 2171-2176.

Eldin, N. N., and Senouci, A. B. (1993), "Rubber-tire particles as concrete aggregate." *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, 5(4), 478-496.

Ganjian, E., Khorami, M., and Maghsoudi, A. A. (2009), "Scrap-tyre-replacement for aggregate and filler in concrete." *Construction and Building Materials Journal*, ELSEVIER, 23, 1828-1836.

Guneyisi, E., Gesoglu, M., and Ozturan, T. (2004), "Properties of rubberized concretes containing silica fume." *Journal of Cement and Concrete Research*, ELSEVIER, 34, 2309-2317.

Jones and Zeng, (2012), *Energy absorption of foamed concrete from low-velocity impacts*, Magazine of Concrete Research, Volume 65 num. 4, ICE publishing.

Khatib, Z. K., and Bayomy, F. M. (1999), "Rubberized Portland cement concrete" *Journal of Materials in civil engineering*, ASCE, 11(3), 206-213.

Najim, K. B., and Hall, M. R. (2010), "A review of the fresh/hardened properties and applications for plain-(PRC) and self-compacting rubberized concrete (SCRC)." *Journal of Construction and Building Materials*, ELSEVIER, 24, 2043-2051.

Siddique, R. and Naik, T. R. (2004), "Properties of concrete containing scrap-tire rubber – an overview" *Journal of Waste Management*, ELSEVIER, 24, 563-569.

Toutanji, H. A. (1996), "The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates." *Journal of Cement & Concrete Composites*, ELSEVIER, 18, 135-139.