

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Architettura

Ordinamento previgente D.M. 509/99 laurea quinquennale

Tesi di Laurea

MALTE PER MASSETTI CONTENENTI GOMMA DA PNEUMATICI FUORI USO



Relatore
Prof. Jean Marc Tulliani

Candidato
Lorenzo Rodighiero

Correlatori
Prof. Matteo Pavese
Dott. Luca Lavagna

Anno Accademico 2018/2019

Indice

1	<u>Introduzione</u>	6
1.1.	Normativa di riferimento sugli pneumatici fuori uso	7
1.1.1.	Articolo 228 D. Lgs. n.152/2006. Norme in materia ambientale	7
1.1.2.	Decreto Ministeriale 11 aprile 2011 n. 82	7
1.1.3.	Decreto Ministeriale 7 marzo 2012 n 44	7
1.2.	Gli Pneumatici	8
1.2.1.	Tipologie	8
1.2.2.	Struttura	8
1.2.3.	Composizione delle mescole di uno pneumatico	9
1.3.	Trattamento degli Pfu	10
1.3.1.	Riciclo Meccanico	10
1.3.2.	La devulcanizzazione della gomma	12
2	<u>Il cemento</u>	13
2.1.	Tipologia di Cementi	13
2.2.	Cemento Classe G HSR API SPEC. 10°	14
3	<u>La gomma riciclata in edilizia</u>	15
3.1.	Prodotti per l'isolamento acustico	15
3.2.	Il calcestruzzo contenente gomma da Pfu	15
4	<u>L'idea dei massetti con gomma da Pfu</u>	17
4.1.	Il brevetto Italcementi	17
4.2.	Classificazione dei massetti	19
4.3.	Classi di resistenza dei massetti	22
4.4.	I massetti pronti sul mercato	23
5	<u>Materiale e metodi</u>	26
5.1.	Materiali utilizzati	26
5.1.1.	Il cemento	26
5.1.2.	Gli inerti	26
5.1.3.	La gomma da Pfu	27
5.1.4.	L'acqua	29
5.1.5.	Il lattice adesivo	29
5.1.6.	Le fibre polimeriche	30

5.2.	Strumentazione scientifica utilizzata	31
5.2.1.	Microscopio angolo di contatto	31
5.2.2.	La macchina per prove statiche Zwick/Roell Z050	32
5.2.3.	La troncatrice con lama circolare con taglio a umido	33
5.2.4.	La bilancia elettronica.	34
5.2.5.	Il forno elettrico programmabile	35
5.3.	Prove meccaniche	36
5.3.1.	La prova a flessione e tenacità	36
6	<u>Fase sperimentale</u>	41
6.1.	Trattamenti sulla gomma da Pfu	41
6.1.1.	Stoccaggio in acqua	41
6.1.2.	Trattamenti chimici	42
6.1.2.1.	Trattamento basico con NaOH	42
6.1.2.2.	Trattamento acido con soluzione Piranha (3 H ₂ SO ₄ + 1 H ₂ O ₂)	43
6.1.2.3.	Trattamento acido con H ₂ SO ₄	45
6.1.3.	Trattamento con lattice adesivo	45
6.1.4.	Angolo di contatto	46
6.1.5.	Affondamento	49
6.2.	Risultati delle analisi sperimentali preliminari	51
6.2.1.	Stoccaggio in acqua della gomma da Pfu	51
6.2.2.	Trattamento con lattice adesivo	51
6.2.3.	Angolo di contatto	52
6.3.	La preparazione delle malte	53
6.3.1.	Il peso degli impasti	55
6.4.	La creazione dell'invito e la prova sulla macchina Zwick/Roell Z050	58
7	<u>Risultati dei test meccanici</u>	61
7.1.	Provini con cemento in classe G e gomma da Pfu in sostituzione della sabbia al 15% in volume	61
7.1.1.	Provini neutri senza gomma e massetti pronti; Nn, Ne, Mr81m, Cs, Cs-.	61
7.1.1.1.	L'influenza dell'invito su forza e tenacità; Ne_28, Ne_28_si.	62

7.1.2. Provini con granulato di gomma, fine e medio, non trattato;	
Fn, Fe, Fn6, Fn7, Mn, Me, FMe.	63
7.1.3. Provini con granulato di gomma fine e medio, stoccato in acqua;	
Fh'e, FH'e, Mh'e, MH'e, MHe	65
7.1.4. Provini con granulato di gomma fine e medio, trattato chimicamente;	
FPn, FPe, MPe, MSe.	66
7.1.5. Provini con granulato di gomma fine e medio, trattato con lattice adesivo;	
NLe, FLe, MLe, FL'e, ML'e, FL''e, ML''e.	68
7.1.6. Provini, con granulato di gomma medio non trattato, fibrorinforzati;	
Nfe, NFe, Mfe, MFe, Nce, Mce.	69
7.1.7. Provini con granulato di gomma fine e medio, trattamenti combinati;	
Fph'n, MPh'n, MPh'e, MSh'n, Mh'fe, MH'fe, Mp'h'fe, MPh'fe.	72
7.2. Provini con cemento in classe G e gomma da Pfu in sostituzione della sabbia al 30% in volume	74
7.2.1. Provini con granulato di gomma medio, trattamenti combinati;	
M'e, M'H'e, M'Pe, M'fe, M'H'fe, M'ce, M'Pce.	74
7.3. Provini con cemento Portland Tipo II/B-LL 32.5 R e gomma da Pfu in sostituzione della sabbia al 15%, 30%, 50% in volume	76
7.3.1. Provini con granulato di gomma medio, trattamenti combinati;	
Ne_28, Cs, MH'e_28, MPe_28, Mfe_28, Mhfe_28, Mh'fe_28, MH'fe_28, MPfe_28, MPhfe_28, MPh'fe_28, M'e_28, M'Pe_28, M'fe_28, M'Pfe_28, M'Ph'fe_28, M''e_28, M''fe_28, M''Pfe_28, M''Ph'fe_28.	76
7.4. Confronto generale tra tutte le malte realizzate, resistenza e tenacità	79
7.5. Confronto generale tra tutte le malte realizzate, resistenza	80
7.6. Confronto generale tra tutte le malte realizzate, tenacità	81
8 <u>La prova acustica</u>	82
8.1. Lo svolgimento della prova acustica	82
8.2. I risultati della prova acustica con il software Audacity	84
8.3. I risultati della prova acustica con il software Sound Meter Pro	88
8.4. I risultati della prova acustica per sovrapposizione di provini, con il software Sound Meter Pro	90
8.5. Considerazioni finali sulla prova acustica	91

9	<u>Analisi dei costi</u>	92
9.1.	Prezzi industriali di riferimento	92
9.2.	Costi industriali per i trattamenti della gomma da Pfu	92
9.3.	Costi industriali per le soluzioni utilizzate	93
9.4.	Costi delle malte per massetto; Mr81m_28, Cs, Ne_28, MH'e_28, MPe_28, Mfe_28, MPHfe_28, M'Pfe_28	93
9.5.	Stima del rapporto costi/prestazioni acustiche	93
10	<u>Riciclaggio del massetto contenente gomma da Pfu</u>	96
10.1.	Riciclaggio dei materiali edili	96
10.2.	Normativa italiana	96
10.3.	I rifiuti in edilizia e la loro classificazione	96
10.4.	Esempi di utilizzo di materiali riciclati	97
10.5.	Esempi di massetti pronti con aggregati riciclati	98
10.6.	Il riciclo del massetto cementizio contenete granulato di gomma da Pfu	99
11	<u>Conclusioni</u>	102
11.1.	Confronto tra diverse malte realizzate	102
11.1.1.	Confronto tra malte con cemento classe G; Ne, Cs, Me, MH'e, MHe, MPe, Mfe, MPH'e, MPH'fe, Mp'h'fe	102
11.1.2.	Confronto tra malte con cemento classe G e con cemento 32.5 R tipo II; Ne, Ne_28, MH'e, MH'e_28, MPe, MPe_28, Mfe, Mfe_28, MPH'fe, MPH'fe_28, M'e, M'e_28, M'fe, M'fe_28.	103
11.1.3.	Confronto tra malte fibrorinforzate; Me, M'e, Mfe, M'fe, Mfe_28, M'fe_28, M''fe_28.	104
11.1.4.	Confronto tra malte con gomma trattata con Piranha; Me, MPe, Mh'e, MPH'e, M'e, M'Pe, Mfe_28, MPfe_28, Mhfe_28, MPHfe_28, Mh'fe_28, MPH'fe_28, M'e_28, M'Pe_28, M'fe_28, M'Pfe_28.	105
11.1.5.	Confronto tra le malte con cemento in classe G con prestazioni di resistenza superiore alla classe F3 e F4; MHe, MH'e, MPe, Mfe, MPH'e, Mp'h'fe, MPH'fe.	106
11.1.6.	Confronto tra le malte con cemento 32.5 R tipo II con prestazioni di resistenza superiore alla classe di resistenza F3 e F4;	

	MH'e_28, Mhfe_28, Mh'fe_28, MH'fe_28, MPfe_28, MPhfe_28, MPh'fe_28, M'Pfe_28, MPe_28, Mfe_28.	. . . . .	107
11.2.	Confronto tra la resistenza meccanica delle malte Italcementi	. . . . .	108
11.3.	Conclusioni sulla tenacità	. . . . .	109
11.4.	Conclusioni sull'acustica	. . . . .	110
11.5.	Conclusioni sui costi	. . . . .	111
11.6.	Prospettive future	. . . . .	112
	<u>Legenda provini testati</u>	. . . . .	113
	Cemento classe G, maturazione 24h.	. . . . .	113
	Cemento portland 32.5 R tipo II, maturazione 28gg.	. . . . .	115
	<u>Ringraziamenti</u>	. . . . .	116
	<u>Bibliografia</u>	. . . . .	117

1 Introduzione

Uno pneumatico diventa “fuori uso” (Pfu) quando non può più fornire una prestazione efficiente e sicura.

In Europa si generano quasi quattro milioni di tonnellate di pneumatici usati. Solo in Italia, ci sono circa 380.000 tonnellate di pneumatici da smaltire, escludendo sia quelli ricostruiti sia quelli usati ma destinati ad essere venduti in paesi in via di sviluppo^[1].

L'elevata capacità della gomma da Pfu di mantenere stabili le proprie prestazioni nel tempo deriva dall'elevata qualità dei polimeri di cui è composta, che conferiscono alla gomma proprietà come elasticità, durabilità, sviluppo batterico rallentato, resistenza alla muffa, al caldo, all'umidità, all'esposizione alla luce del sole ed ai prodotti chimici.

Tutto questo costituisce un notevole vantaggio quando la gomma da Pfu viene utilizzata in un settore come quello stradale e edilizio, dove la durabilità nel tempo è un elemento primario^[2,3].

In effetti proprio in edilizia la gomma da Pfu si utilizza da svariati anni per realizzare, ad esempio, prodotti per l'isolamento acustico dal rumore e dalle vibrazioni e per la realizzazione di conglomerati cementizi (Rubbercrete) che sfruttino queste caratteristiche isolanti^[4].

Nel brevetto Italcementi del 2014 “Concrete screed with recycled rubber from discarded tyres” vengono testate malte per massetto contenenti gomma da Pfu dimostrando ottime capacità di isolare acusticamente dai rumori da calpestio.

Durante il mio lavoro di tesi abbiamo scelto di concentrarci proprio sulle malte per massetto, sia per verificare alcune affermazioni fatte nel brevetto Italcementi sia, successivamente, per cercare soluzioni innovative che potessero permettere di ottenere performance migliori anche aumentando la quantità di gomma nel massetto, senza un'eccessiva perdita della resistenza meccanica.

1.1 Normativa di riferimento sugli pneumatici fuori uso

1.1.1 Articolo 228 D. Lgs. n.152/2006. Norme in materia ambientale

A partire dal 29 aprile 2006, data di entrata in vigore dell'articolo 228 del Dlgs 3 aprile 2006, n. 152, i "pneumatici fuori uso" (Pfu) entrano a far parte delle "particolari categorie di rifiuti" in relazione alle quali il Legislatore ha ritenuto di dover dettare una apposita disciplina.

Si obbliga in sostanza i produttori e gli importatori di pneumatici (cioè i soggetti che immettono sul mercato il bene da cui si originerà il rifiuto) a provvedere, in maniera singola o associata, alla corretta gestione di un quantitativo di Pfu pari al quantitativo di pneumatici nuovi (di qualunque marca) immessi sul mercato nell'anno precedente.

Si introduce inoltre un contributo a carico dell'utente finale (che acquista gli pneumatici) versato allo scopo di coprire le spese future di smaltimento^[5].

1.1.2 Decreto Ministeriale 11 aprile 2011 n. 82

Con quasi 5 anni di ritardo sui tempi dettati dal "Codice ambientale", l'8 giugno 2011 è stato finalmente pubblicato sulla G.U. della Repubblica italiana il "Regolamento per la gestione degli pneumatici fuori uso" che in attuazione dell'articolo 228 del Dlgs 152/2006, detta tempi e modalità concrete di funzionamento del nuovo sistema di gestione nazionale di recupero dei Pfu.

Il decreto stabilisce le modalità operative e gestionali del nuovo sistema: chi sono i responsabili, come devono essere gestite le quantità di Pfu e i relativi contributi economici, chi sono gli organi deputati al controllo e quali sono le sanzioni in caso di inadempienze.

L'art. 1, comma 752, della Legge 30 dicembre 2018 n. 145, pubblicato in Gazzetta Ufficiale n.62/L del 31 dicembre 2018, ha abrogato il comma 4 dell'articolo 9 del DM 82/2011^[6].

1.1.3 Decreto Ministeriale 7 marzo 2012 n 44

Il Decreto Ministeriale 11 aprile 2011 n. 82 prevedeva l'istituzione, presso l'Autorità competente, di un Tavolo permanente di consultazione sulla gestione dei Pfu, la cui istituzione e composizione è stata definita con il Decreto Ministeriale 7 marzo 2012 n. 44 del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

1.2 Gli pneumatici

1.2.1 Tipologie

- con camera d'aria (Tube Type);
- senza camera d'aria (Tubeless);
- senza aria, non-Pneumatic Tires (NPT).

1.2.2 Struttura

Il **battistrada** è la parte a contatto con il terreno, deve resistere all'usura, garantire trazione e proteggere la carcassa sottostante. Inizialmente prodotto con gomma naturale, attualmente viene realizzato in gomma sintetica (copolimero stirene-butadiene o gomma SBR).

Il **pacco cinture** sono strati multipli di fili d'acciaio, nylon, poliestere o rayon messe tra la carcassa e il battistrada; aumentano la stabilità e la resistenza dello pneumatico, difendendolo contro urti e forature.

Il **fianco** o **spalla** sopporta le sollecitazioni di esercizio dello pneumatico e protegge le tele dagli agenti atmosferici e chimici.

La **carcassa** o **tela** trasmette tutte le forze tra la ruota e il terreno durante la fase di accelerazione, frenatura e sterzata; deve assicurare la resistenza alla pressione di gonfiaggio. La carcassa è composta da fili di Nylon affiancati (tela) che possono essere di diversa sezione; all'aumentare della sezione dei fili aumenta la rigidità strutturale dello pneumatico ma diminuisce la sua scorrevolezza.

Le **nervature** o **cerchietti** sono fasce d'acciaio posizionate nel tallone, mantengono in posizione lo pneumatico sul cerchione evitando un suo eventuale stallonamento.

Il **riempimento**, normalmente in gomma, è posto nella zona del tallone e del fianco, consente un passaggio graduale dalla zona flessibile del fianco a quella rigida del tallone.

Il **rivestimento interno** in gomma, nel caso degli pneumatici tubeless, serve per evitare perdite d'aria.

Il **tallone** o **incavo del tallone** è uno strato di tela gommata che evita l'usura per sfregamento tra il tallone ed il bordo del cerchio e garantisce l'attrito necessario per evitare la rotazione dello pneumatico rispetto al cerchio^[7] (Figura [1]).



Figura [1], sezione trasversale di uno pneumatico radiale: Battistrada (1), sotto battistrada (2), fianco o spalla (3), NOH rete nylon (4), cintura strato 1 e 2 (5), anello copri cintura (6), carcassa strato 2 (7), carcassa strato 1 (8), striscia di riempimento tallone (9), tallone (10), rivestimento interno (11), anello di bordo in gomma (12)^[7].

1.2.3 Composizione delle mescole di uno pneumatico

Le mescole di gomma contengono oltre 200 diverse materie prime (Figura [2]).

Fondamentalmente però si combinano **elastomeri** (termoplastici e termoindurenti), **polimeri** (*Stirene-Butadiene SBR*), additivi **rinforzanti** (nero fumo e silice) e **zolfo**; successivamente attraverso il processo di **vulcanizzazione**, inventato da C. Goodyear nel 1839, si conferisce al materiale coesione ed elasticità.

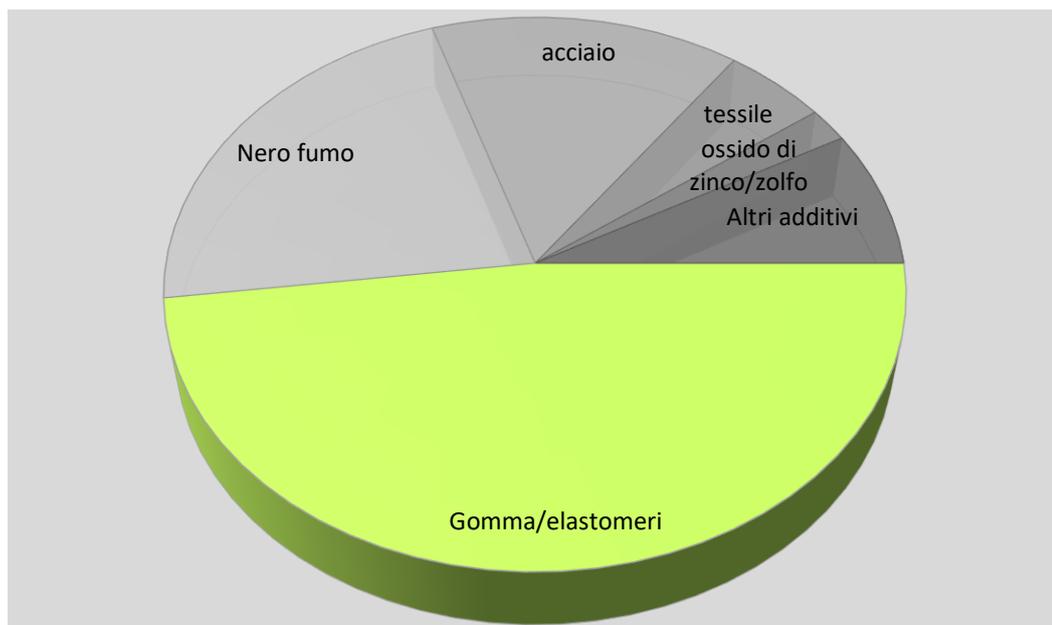


Figura [2], composizione degli pneumatici di un autoveicolo^[8].

1.3 Trattamento degli Pfu

Secondo la scala di priorità dell'articolo 183 del codice ambientale^[9,10], uno pneumatico a fine vita è destinato a:

- riutilizzo come usato, anche con ricostruzione, se non è ancora diventato rifiuto;
- ricostruzione e riutilizzo se è divenuto rifiuto;
- recupero di materia;
- recupero di energia;
- smaltimento in discarica.

1.3.1 Riciclo Meccanico

Per produrre uno pneumatico **viene impiegata da 3 a 5 volte più energia di quella recuperata** tramite la termovalorizzazione. Questo ci fa comprendere che l'energia incorporata nello pneumatico può essere recuperata in maniera più efficiente, ad esempio riutilizzando i materiali di cui è composto.

Attraverso il riciclo meccanico si recupera materia dagli Pfu. Durante i processi di taglio e granulazione si separano i componenti dello pneumatico (gomma, acciaio, fibra) ottenendo materiali utilizzabili nei più svariati settori.

Principalmente il riciclo meccanico consiste in:

- triturazione meccanica;
- processo criogenico;
- processo elettrotermico;
- macinazione attraverso rulli rotanti.

Il granulato di gomma ottenuto viene impiegato in:

- asfalti;
- accessori urbani;
- componenti per autoveicoli;
- aggregati nei calcestruzzi;
- drenaggio di superfici;
- pavimentazione di aree gioco e sportive;
- materiale per isolamenti.

L'azienda TerniEnergia, che ci ha fornito il granulato di gomma da Pfu per i nostri esperimenti, si avvale di un processo di macinazione meccanica a temperatura ambiente.

Gli pneumatici sono inizialmente frantumati in chips o ciabatte, delle dimensioni comprese tra 50 e 100 mm.

Negli stadi successivi si separano i materiali metallici e tessili dalla gomma, a mezzo di una pressa cubettatrice.

Il granulo è ottenuto dalla ciabatta utilizzando come tagliente il ferro in essa contenuto. Per effetto della compressione tra le ruote di cui è composta la pressa, la pressione produce un aumento di temperatura che porta la gomma a circa 100°C.

Alcuni competitor si servono di macchinari tipo trituratori in serie, che producono granuli con superfici molto nette e definite. Con la pressa cubettatrice si ottengono viceversa granuli che presentano superfici con forte porosità, che meglio si prestano a aderire alla pasta cementizia indurita.

1.3.2 La devulcanizzazione della gomma

Fino a questo momento, la vulcanizzazione era considerata una reazione irreversibile. Ma la società Watson Brown ha sviluppato una soluzione brevettata, la "devulcanizzazione HSM", che permetterebbe di invertire il processo di vulcanizzazione della gomma^[11].

2 Il cemento

Il cemento è un legante idraulico che si presenta sottoforma di una polvere finemente macinata, che, se mescolata con acqua, forma una pasta che fa presa e indurisce. Questo indurimento idraulico si deve soprattutto alla formazione di silicati idrati di calcio in seguito alla reazione tra l'acqua aggiunta per la miscela e i componenti del cemento. Il componente idraulicamente attivo di un cemento è il cosiddetto "Clinker Portland". Il cemento, prodotto in forma industriale dalla metà dell'800, rimane tuttora uno dei principali materiali da costruzione perché, grazie alle sue caratteristiche di flessibilità ed alta performance, trova applicazione in svariati settori dell'edilizia^[12].

2.1 Tipologia di Cementi

Secondo la norma EN/197-1 i cementi comuni sono suddivisi in cinque categorie:

- CEM I Cemento Portland;
- CEM II Cemento Portland composito;
- CEM III Cemento d'altoforno;
- CEM IV Cemento pozzolanico;
- CEM V Cemento composito.

Cementi Tipo I (CEM I)

I cementi Tipo I (CEM I) "Cementi Portland" sono composti almeno per il 95% da clinker e da composti secondari tra lo 0 ed il 5%. Si utilizzano normalmente nella prefabbricazione.

Cementi Tipo II (CEM II)

I cementi Tipo II (CEM II) "Cementi Portland Compositi", sono composti da clinker, in percentuale variabile dal 65% al 94%, da loppe granulate d'altoforno, da silica-fume, da pozzolane, da ceneri volanti, scisti calcinati e calcare. Hanno proprietà paragonabili a quelle dei cementi tipo I, sono idonei agli impieghi più comuni come calcestruzzi armati normali e precompressi gettati in opera e prefabbricati.

Cementi Tipo III (CEM III)

I cementi Tipo III (CEM III) "Cementi d'altoforno", sono composti da clinker fino al 64%, e loppa granulata basica d'alto forno. Rispetto al cemento Portland, i cementi di tipo III sono utilizzati quando il calcestruzzo è soggetto ad ambienti chimicamente aggressivi e per grandi opere.

Cementi tipo IV (CEM IV)

I cementi Tipo IV (CEM IV) "Cementi pozzolanici", sono composti da clinker in misura tra il 45% e il 89%, e materiale pozzolanico, naturale o artificiale, in misura variabile dal 11 e 55%. In base alla percentuale di materiale pozzolanico, sono articolati in due sottotipi. Presentano una particolare resistenza all'attacco chimico.

Cementi Tipo V (CEM V)

I cementi Tipo V (CEM V) "Cementi Compositi" sono composti da una miscela di clinker, loppa d'altoforno e pozzolana. Servono a realizzare calcestruzzi esposti ad ambienti aggressivi quali acqua di mare, acque acide, terreni solfatici, etc.

2.2 Cemento Classe G HSR API SPEC. 10°

Il cemento per pozzi petroliferi classe G, HSR (High Sulphate Resistant Grade), come è indicato dalla norma API SPEC 10 A, è ottenuto da un clinker ad altissima resistenza ai solfati (nel quale è praticamente nullo l'alluminato tricalcico) e dalla aggiunta di solfato di calcio; utilizzabile con molteplici additivi, che soddisfa un'ampia gamma di applicazioni a varie profondità e temperature diverse^[13] (Tabella [1]).

Abitualmente viene impiegato per:

- pozzi petroliferi;
- pozzi d'acqua;
- pozzi a gas;
- consolidamento delle basi d'appoggio delle piattaforme "offshore".

	Resistenza a compressione Rck 8 ore [MPa]		Tempo pompabilità [min]
	38° C	60° C	
Requisiti minimi	≥2,1	≥10,3	≥90 ≤120

Tabella [1], requisiti minimi classe G HSR API SPEC. 10° [8].

3 La gomma riciclata in edilizia

3.1 Prodotti per l'isolamento acustico

In ragione delle sopra citate proprietà della gomma riciclata, specialmente grazie alla sua intrinseca caratteristica di elasticità, questa viene utilizzata in edilizia soprattutto nel settore dell'isolamento acustico, tipicamente in pannelli o rotoli^[2] (Tabella [2]).

Campi di applicazione:

- l'isolamento acustico delle pareti di facciata;
- l'isolamento acustico delle pareti interne;
- l'isolamento acustico dei solai;
- l'isolamento acustico degli impianti;
- prodotti antivibranti.

destinazione d'uso	pareti e solai tra distinte unità immobiliari	facciate	calpestio	impianti a funzionamento discontinuo	impianti a funzionamento continuo
	$R'_w \geq$	$D_{2m,nT,w} \geq$	$L'_{n,w} \leq$	$L_{ASmax} \leq$	$L_{Aeq} \leq$
Ospedali, cliniche, case di cura (categoria D)	55	45	58	35	25
Residenze, alberghi e pensioni (categorie A, C)	50	40	63	35	35
Attività scolastiche a tutti i livelli (categoria E)	50	48	58	35	25
Uffici, attività ricreative o di culto, negozi (categorie B, F, G)	50	42	55	35	35

Tabella [2], i requisiti acustici passivi negli edifici^[14].

3.2 Il calcestruzzo contenente gomma da Pfu

L'impiego di gomma riciclata nel calcestruzzo (Rubbercrete) si è sviluppato molto negli ultimi anni^[15, 16, 17, 18].

Tra gli aspetti positivi del Rubbercrete possiamo citare una progressiva diminuzione del peso, infatti la densità della gomma è pari a circa 1200 kg/m³ contro circa 2200 kg/m³ del calcestruzzo. L'aggiunta di particelle di gomma al conglomerato cementizio limita l'assorbimento di acqua migliorando la protezione delle barre di armatura nei confronti della corrosione. Nel Rubbercrete, inoltre, è possibile ottenere un abbattimento del rumore e migliora la prestazione in termini di resistenza al fuoco^[19].

Il principale aspetto negativo del Rubbercrete è invece la progressiva perdita di resistenza meccanica all'aumentare della percentuale di gomma in sostituzione dell'inerte. Da una ricerca effettuata presso l'Università di Sheffield si evince che è più marcata la diminuzione di resistenza a compressione rispetto a quella a flessione, mentre viceversa migliora la tenacità intesa come energia complessiva assorbita prima della rottura^[20].

Si suggerisce l'impiego in manufatti non strutturali, barriere stradali New Jersey, smorzatori sismici negli edifici, sottofondazioni e fondazioni fonoassorbenti per sistemi ferroviari e stradali^[20,21].

La riduzione delle proprietà meccaniche del Rubbercrete può essere attribuita a due fattori:

- la gomma da Pfu risulta naturalmente idrofobica con conseguente ridotta capacità di adesione con la pasta cementizia;
- la gomma da Pfu nell'impasto influisce negativamente sulla omogeneità, consistenza e idratazione dell'impasto.

4 L'idea dei massetti con gomma da Pfu

Oltre a verificare alcune delle affermazioni contenute nel brevetto Italcementi^[22], abbiamo cercato soluzioni innovative che potessero portare ad un miglioramento delle proprietà meccaniche delle malte da massetto, anche aumentando la percentuale di gomma in esse contenuta^[23].

Il nodo principale su cui abbiamo lavorato è stato quello relativo all'interazione tra la superficie della gomma e la pasta cementizia. Abbiamo sperimentato diversi trattamenti sulla gomma, allo scopo di migliorarne l'adesione al cemento indurito, valutando questi effetti attraverso test di resistenza meccanica.

Al fine di esplorare un elevato numero di variabili si è scelto di realizzare provini di dimensioni contenute (20x20x75mm) che sono stati sottoposti al test di resistenza meccanica a flessione e tenacità.

In una prima fase del lavoro di tesi abbiamo utilizzato un cemento in classe G, che consentiva una completa maturazione dei provini in 24 ore alla temperatura di 85°C.

È stato così possibile realizzare e testare diverse tipologie di malte, valutando i risultati ottenuti e tentando nuove soluzioni sulla base delle migliori performance che via via si evidenziavano. Sono state complessivamente composte e testate 48 malte differenti con cemento in classe G oltre a 3 malte con massetti pronti.

A partire dai risultati più significativi emersi nella prima fase, si è passati ad utilizzare un normale cemento Portland 32.5 R tipo II (con maturazione a 28gg), realizzando ulteriori 20 malte.

4.1 Il brevetto Italcementi

Nel brevetto Italcementi: "Concrete screed with recycled rubber from discarded tyres"^[22] del 2014 vengono esposti i risultati di prove meccaniche ed acustiche realizzate su massetti cementizi con gomma proveniente da pneumatici fuori uso (Pfu).

La gomma da Pfu viene utilizzata in varie granulometrie (tra 0.1 e 20 mm), in sostituzione dell'inerte fino al 30% in peso, stoccata in acqua (tra 7 e 40 giorni) e trattata con lattice adesivo.

Nella comparazione (Tabella [3]), vengono confrontati:

- un massetto tradizionale in sabbia e cemento;
- la miscela 1, con un rapporto tra gomma e sabbia del 5.3% in peso (~ 10 % in vol.);
- la miscela 2, con un rapporto tra gomma e sabbia del 19.5% in peso (~ 37 % in vol.);
- un massetto commerciale additivato con plastica riciclata.

Si evidenzia che nelle miscele 1 e 2 è stato utilizzato un cemento 42.5R II-A/LL, gomma da Pfu con granulometria tra 3 e 5 mm, additivi fluidificanti, rapporto acqua-cemento 0,5.

Entrambe le miscele sono composte con gomma da Pfu stoccata precedentemente in acqua per 28 giorni.

In relazione al massetto in sabbia e cemento convenzionale si nota:

- un netto calo della resistenza a compressione della miscela 2 rispetto al miglioramento ottenuto dalla miscela 1;
- una diminuzione del peso e della conducibilità termica della sola miscela 2;
- una marcata e progressiva riduzione del rumore da calpestio ΔL_w (dB) delle miscele 1 e 2.

			Conventional Screed	Mixture 1	Mixture 2	Commercial Product
Slump-Flow θ'	UNI 11041	[cm]	60	60	60	60
Fresh Volumic Mass	UNI EN 12350-6	[Kg/m ³]	2100	1940	1680	1900
Rc to 7 days	UNI EN 12390-3	[MPa]	15	18	—	14
Rc to 28 days	UNI EN 12390-3	[MPa]	20	22	6	16
Dynamic Elastic Mod. to 28 days	UNI 9771	[GPa]	25	20	13	12
Hardened Volumic Mass to 28 days	UNI EN 12390-7	[Kg/m ³]	2100	1920	1640	1890
Thermal Conductivity	UNI EN 12664	[W/mK]	1.2	1.2	0.9	1.2
Noise Reduction from Footsteps ΔL_w	EN ISO 10140-1	[dB]	2-4	16	19	13

Tabella [3], i risultati del test condotto da Italcementi^[22].

Un altro aspetto evidenziato nel brevetto, in relazione al massetto con gomma da Pfu non trattata, riguarda il problema di perdita di resistenze a compressione e del modulo elastico che si manifestano dopo il 28° giorno di maturazione in condizioni di grande umidità.

I massetti realizzati con gomma da Pfu stoccata in acqua o trattata con lattice adesivo non risentono invece di questo problema.

4.2 Classificazione dei massetti

Il massetto è uno strato di materiale posato in opera in cantiere, realizzato allo scopo di sostenere una pavimentazione di finitura^[24]. Convenzionalmente esso è realizzato con cemento, acqua ed inerti (sabbia)^[25].

Le norme europee di riferimento sui massetti sono:

UNI EN 13318:2002 “Massetti e materiali per massetti: definizioni”

UNI EN 13813:2004 “Materiali per massetti: proprietà e requisiti”.

Il documento “Codice di buona pratica per i massetti di supporto interni ed esterni”, realizzato dalla CONPAVIPER (Associazione Italiana Sottofondi, Massetti e Pavimentazioni e Rivestimenti Continui) che fornisce indicazioni delle specifiche tecniche e procedure per la corretta progettazione, realizzazione e controllo di massetti di supporto per interni ed esterni, sintetizza efficacemente le prescrizioni delle norme sopra citate^[24].

I massetti si possono classificare in base alla:

- Posizione:

per interni;

per esterni.

- Tipologia costruttiva:

bistrato: se tra solaio portante e massetto vi è il sottofondo, ovvero uno strato solitamente alleggerito che ingloba e livella le tubazioni impiantistiche (figura [3]);

monostrato: se non è presente il sottofondo e il massetto deve svolgere anche la sua funzione (figura [4]);

aderenti: aderiscono al supporto sottostante per via dell'attrito, di ancoraggi meccanici (collaboranti) o di promotori di adesione;

non aderenti: sono desolidarizzati dal supporto tramite uno strato orizzontale sottile non comprimibile, come ad esempio una barriera al vapore;

galleggianti: sono massetti non aderenti poggiati su uno strato di isolante termico e/o acustico comprimibile. Il massetto dovrà essere realizzato tenendo conto di questo aspetto, utilizzando ad esempio apposita armatura;

per pavimenti radianti: sono generalmente massetti galleggianti nei quali sono annegate le tubazioni per il riscaldamento e/o raffrescamento.

- Finitura:

pavimentazione in ceramica (classe di res. UNI 11493 da 3 a 6 MPa-commerciale industr.);

pavimentazione in legno (classe di res. UNI 11371 5 MPa);

pavimentazione in resine;

pavimentazione in laminati e resilienti (classe di res. UNI 11515-1 da 4 a 6 MPa);

pavimentazione in materiali lapidei (classe di res. UNI 11322 da 4 a 6 MPa).

- Legante utilizzato:

a base cemento, tipicamente Portland,

a base solfato di calcio, anche detto Anidrite, un legante aereo;

a base calce, di tipo Nhl, utilizzati spesso nella bioedilizia;

a base bituminosa;

a secco, attraverso la costipazione di inerti appositamente selezionati e senza l'aggiunta di legante ed acqua.

- Consistenza:

terra umida, vanno manualmente stesi, costipati e livellati;

fluida, si stende e si livella con un limitato intervento manuale;

autolivellante, si stende e si livella autonomamente con un minimo intervento manuale.

- Confezionamento:

tradizionale, si miscelano i componenti (legante, inerti, acqua e additivi) in cantiere, prima della posa, con un procedimento non automatizzato;

preconfezionati, la miscelazione avviene in maniera automatizzata;

premiscelati, i componenti secchi vengono miscelati con la sola aggiunta di acqua prima della posa in opera;

predosati, i componenti forniti separati sono miscelati secondo le specifiche del produttore;

- Prestazioni:

livello fessurativo, le fessure devono essere in numero basso e di piccole dimensioni;

umidità residua, va commisurata in base al tipo di finitura prevista e misurata prima della posa della finitura con apposita strumentazione;

spessore, tenendo conto delle tipologie costruttive del massetto sopra descritte si dovrà prevedere uno spessore minimo che garantisca la durata nel tempo. Lo spessore minimo se è di 4 cm, ma può essere inferiore per massetti aderenti e/o autolivellanti;

quota e planarità, il massetto, considerando lo spessore della finitura, dovrà presentarsi in maniera precisa alla quota prestabilita. La tolleranza massima deve essere di ± 2 mm. Sulla planarità la tolleranza massima deve essere di ± 3 mm ogni due metri di lunghezza;

resistenza meccanica, devono essere prese in considerazione la resistenza a compressione e flessione (il quadro normativo di riferimento sono la norma europea UNI EN 13813 e norma UNI 13892), la forza di aderenza, la resistenza al carico dinamico, la durezza superficiale;

idoneità alle condizioni ambientali in esercizio, in riferimento ad esempio alle sollecitazioni che il massetto subirà tra la fase di posa e la fase di finitura o ai cicli gelo/disgelo per i massetti esterni.

- Materiali costituenti:

dovranno avere comprovata idoneità secondo la UNI EN 13813.

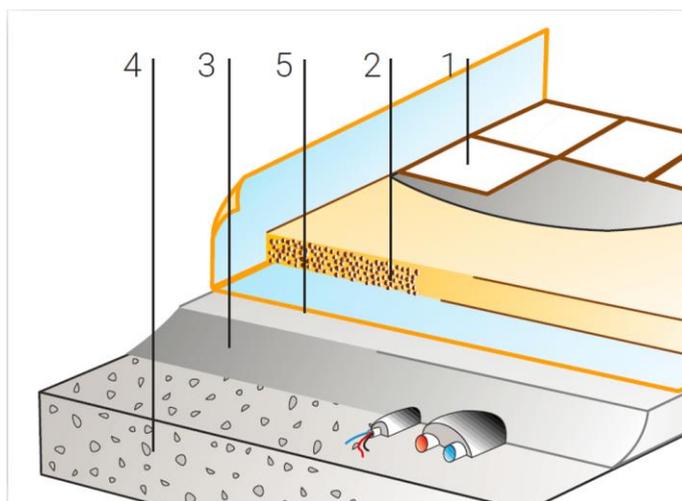


Figura [3], massetto galleggiante bistrato per interni (1- pavimentazione, 2-Massetto, 5- Isolante termo-acustico, 3-sottofondo alleggerito, 4- Soletta portante)^[26].

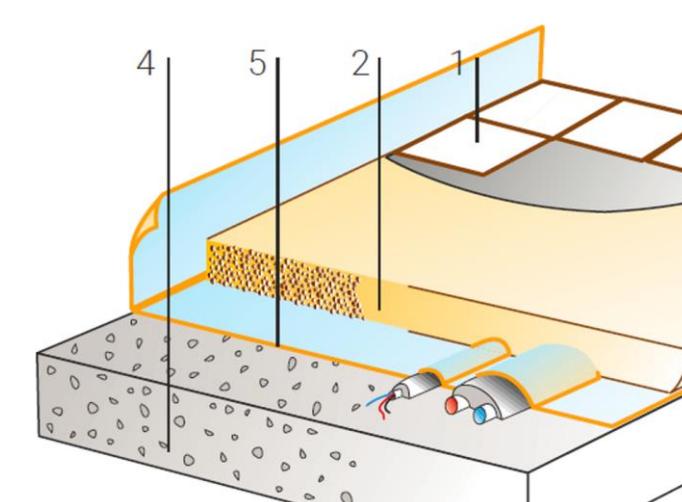


Figura [4], massetto galleggiante monostrato per interni (1- pavimentazione, 2-Massetto, 5- Isolante termo-acustico, 4- Soletta portante)^[27].

4.3 Classi di resistenza dei massetti

I valori di riferimento sulle resistenze meccaniche dei massetti cementizi possono essere considerati a partire dalla norma UNI EN 13813, che specifica le proprietà e requisiti di base per i massetti preconfezionati.

Vengono specificate la resistenza a compressione minima, secondo la EN13892-2, abbreviata “C”, in N/mm² (MPa), e la resistenza a flessione minima, secondo la EN13892-2, abbreviata “F”, in N/mm² (MPa).

Dal documento “Codice di buona pratica per i massetti di supporto interni ed esterni “, realizzato dalla CONPAVIPER^[24], si ricavano i seguenti valori:

Classi di resistenza a flessione “F”:

- UNI 11515-1. Massetti cementizi con rivestimenti resilienti e laminati: classe di resistenza F4 (nel caso di pavimentazioni flottanti soggette a carichi dinamici la classe sale a F6);
- UNI 11493. Massetti cementizi con rivestimenti ceramici: classe di resistenza F3 (per interni ad uso residenziale). Classe da F4 a F6 per pavimenti riscaldati ad uso commerciale ed industriale);
- UNI 11371 Massetti per parquet e pavimentazioni di legno: classe di resistenza F5;
- UNI 11322. Massetti cementizi con rivestimenti lapidei: classe di resistenza F4.

4.4 I massetti pronti sul mercato

Massetti premiscelati cementizi tradizionali:

- Weber Weber.plan **Mr 81 metal**, granulometria: ≤ 3 mm, densità in opera 2000 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 25 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 4.5 MPa;
- Novaedil **M1**, densità in opera 2000 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 14 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 3 MPa;
- Ferri Mix **FZ 130** massetto tradizionale, intervallo granulometrico $\approx 0 - 4$ mm, massa volumica apparente 1500 kg/m³, massa volumica dell’impasto 2050 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 16 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 4 MPa;
- Fassa Bortolo **sc420p**, granulometria: ≤ 3 mm, densità in sacco 1500 kg/m³, densità in opera 2050 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 25 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 5 MPa;

- Leca **Massetto mix pronto**, densità in sacco 1700 kg/m³, densità in opera 2000 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 30 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 5 MPa;
- Mapei **Topcem pronto**, massa volumica apparente 1700 kg/m³, massa volumica dell'impasto 2100 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 30 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 6 MPa;
- Keracem **Eco Pronto**, intervallo granulometrico ≈ 0 – 5 mm, massa volumica apparente 1650 kg/m³, massa volumica dell'impasto 1950 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 30 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 6 MPa;
- Keracem **Eco Pronto plus fibrorinforzato**, intervallo granulometrico ≈ 0 – 3 mm, massa volumica apparente 1590 kg/m³, massa volumica dell'impasto 2000 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 30 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 7 MPa.

Massetti premiscelati cementizi alleggeriti:

- Leca **Centro Storico**: densità in opera 1250 kg /m³, resistenza meccanica a compressione: 18 MPa, resistenza meccanica a flessione: 4 MPa;
- Weber **weber.plan light**: densità in opera 1100 kg /m³, resistenza meccanica a compressione: 12 MPa, resistenza meccanica a flessione: 2 MPa;
- Fassa Bortolo **Legeo mix**: densità in sacco 850 kg/m³, resistenza meccanica a compressione: 15 MPa, resistenza meccanica a flessione: 3.5 MPa.

Massetti premiscelati a base calce naturale NHL:

- Kerakoll **Biocalce massetto**, massa volumica apparente 1570 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 60 gg: 14 MPa, resistenza meccanica a flessione a 60gg: 3.5 MPa;
- Rofix **CalceClima massetto**, massa volumica apparente 1550 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 16 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 3 MPa;
- Grigolin **BS 90**, peso specifico determinato in caduta libera 1800 kg/m³, resistenza meccanica a compressione a 28 gg: 16 MPa, resistenza meccanica a flessione a 28 gg: 4 Mpa.

Si evidenzia il fatto che rispetto alle prescrizioni della UNI EN 13813 sulle resistenze meccaniche minime a compressione e flessione, queste non vengono completamente soddisfatte da alcuni prodotti presenti sul mercato.

A titolo di esempio il prodotto Leca Centro Storico dichiara una resistenza a flessione di 4 MPa (F 4). Sulla scheda tecnica viene riportato che il prodotto è “per interni ed esterni adatto a tutti i tipi di pavimenti”.

Il prodotto Weber Weber.plan Mr 81 metal (4.5 MPa, F 4.5) è dato specifico per la realizzazione di massetti idonei al ricoprimento di impianti di riscaldamento e raffrescamento a pavimento ed alla posa di ceramiche, cotto, pietre naturali, vinilici e parquet. Ma in base a quanto riportato sopra, la UNI 11371 prescrive per massetti per parquet e pavimentazioni di legno la classe di resistenza F5 (5 MPa).

5 Materiali e metodi

5.1 Materiali utilizzati

5.1.1 Il cemento

Inizialmente, al fine di poter testare un elevato numero di provini si è scelto di utilizzare un cemento petrolifero classe G HSR^[13] (High Sulphate Resistant Grade) API SPEC. 10°; questo ha la particolarità di raggiungere la sua resistenza massima dopo una maturazione di sole 24 ore in ambiente saturo di umidità ad una temperatura di circa 85°C.

In una seconda fase si è utilizzato un normale cemento Portland, il Buzzi Unicem Tipo II/B-LL 32.5 R^[29], con maturazione dei provini in ambiente saturo di umidità per 28 giorni.

5.1.2 Gli inerti

Viene utilizzata una sabbia normalizzata CEN EN 196 -1, (densità apparente in mucchio 1,63 gr/cm³) (Figura [5]); successivamente si è passato ad utilizzare una normale sabbia da edilizia (densità apparente in mucchio 1,52 gr/cm³) che, in base ai risultati ottenuti, si è rivelata migliore e facilmente reperibile (Figura [6]).



Figura [5], la sabbia normalizzata CEN EN 196 -1.



Figura [6], la sabbia comune da edilizia.

5.1.3 La gomma da Pfu

Il granulato da Pfu utilizzato per la realizzazione dei provini (fornito dall'azienda TerniEnergia^[29]) è arrivato in tre granulometrie:

- polverino, con granulometria da 0,2 a 0,8 mm (Figura [7]);
- granulato medio, con granulometria da 0,8 a 2,5 mm (Figura [8]);
- granulato medio, con granulometria da 2,5 a 4 mm (Figura [9]).

Si è ritenuto che utilizzare un granulato con maggiore dimensione del granello di gomma (granulato grosso, con granulometria da 2,5 a 4 mm) potesse dare problemi di eccessiva irregolarità superficiale del massetto in opera.



Figura [7], pulverino, con granulometria da 0,2 – 0,8 mm.

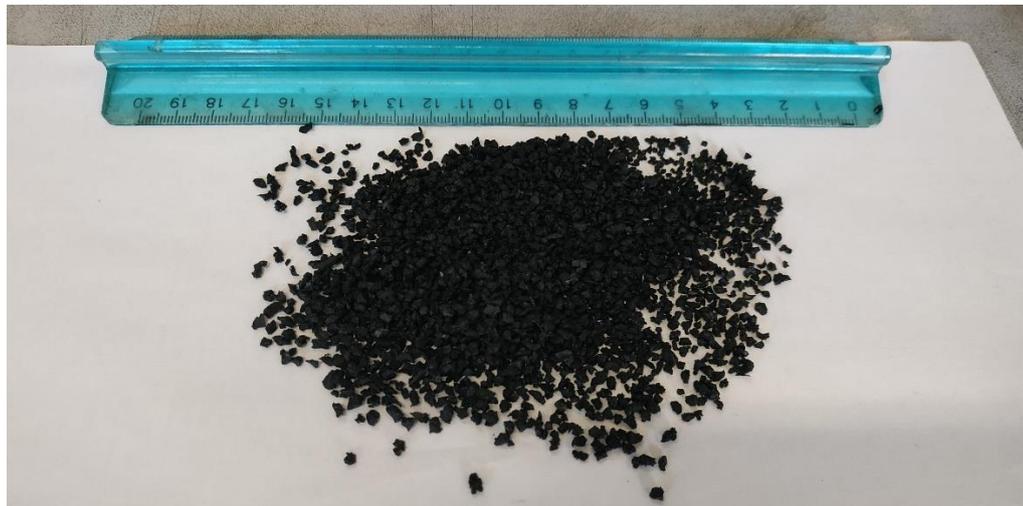


Figura [8], granulato medio, con granulometria da 0,8 a 2,5 mm.

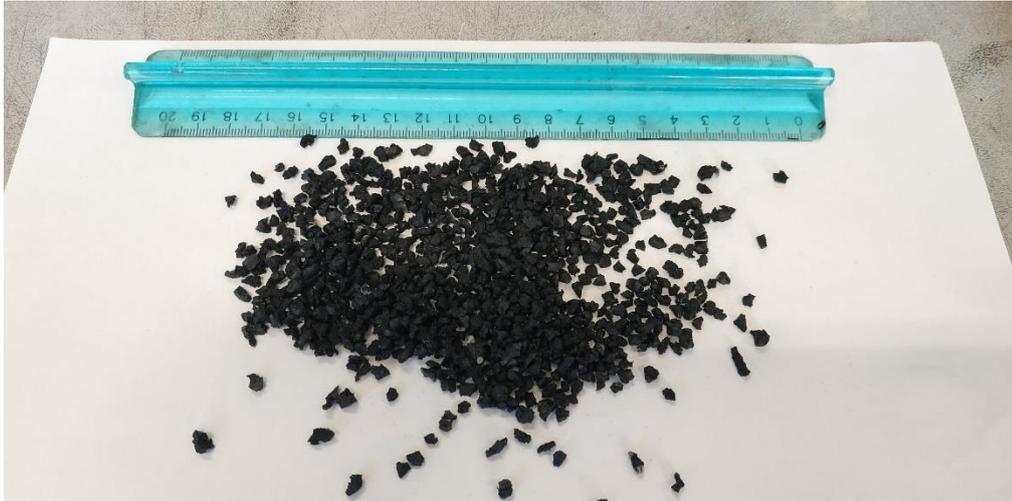


Figura [9], granulato grosso, con granulometria da 2,5 a 4 mm.

5.1.4 L'acqua

È stata utilizzata acqua del rubinetto.

5.1.5 Il lattice adesivo

Il lattice utilizzato è stato il lattice Mapei Planicrete a base stirene-butadiene (Figura [10]).



Figura [10], il lattice Mapei Planicrete.

5.1.6 Le fibre polimeriche

Sono fibre polimeriche di circa 20 mm di lunghezza, prelevate dal prodotto fibrorinforzato Leca Centro Storico (Figura [11]).



Figura [11], le fibre polimeriche.

5.2 Strumentazione scientifica utilizzata

5.2.1 Microscopio angolo di contatto

Lo strumento è composto da un supporto per il campione, da una sorgente luminosa, da una siringa di deposizione della goccia di liquido sul campione, da una videocamera ad alta risoluzione, il tutto collegato ad un personal computer per l'acquisizione delle immagini (Figura [12]).

Con questo strumento si determina il grado di bagnabilità di una superficie solida, che è dato dall'equilibrio tra le forze di adesione (attrazione tra le molecole del solido e del liquido) e le forze di coesione del liquido (attrazione tra le molecole del liquido stesso).



Figura [12], lo strumento per la misura dell'angolo di contatto.

Se si deposita dell'acqua, una superficie si può definire (Figura [13]):

- idrofilica quando $0 < \theta < 90^\circ$;
- idrofobica quando $90^\circ < \theta < 150^\circ$;
- superidrofobica quando $\theta > 150^\circ$.

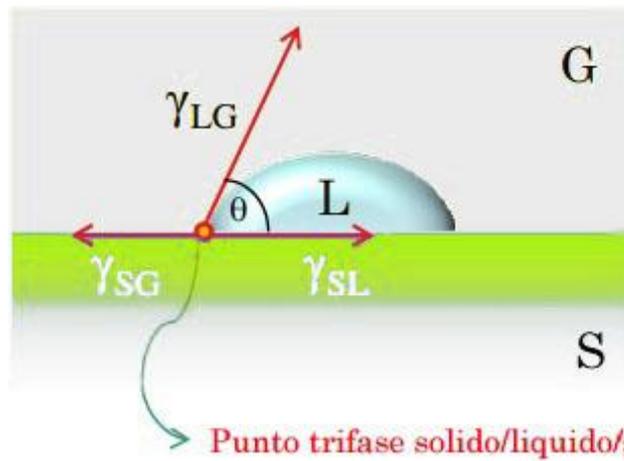


Figura [13], Rappresentazione grafica dell'angolo di contatto interno θ° .

5.2.2 La macchina per prove statiche Zwick/Roell Z050

Abbiamo utilizzato la macchina per prove statiche sui materiali Zwick/Roell Z050^[30] dotata del software di prova testXpert II ed elettronica testControl II (Figura [14]).

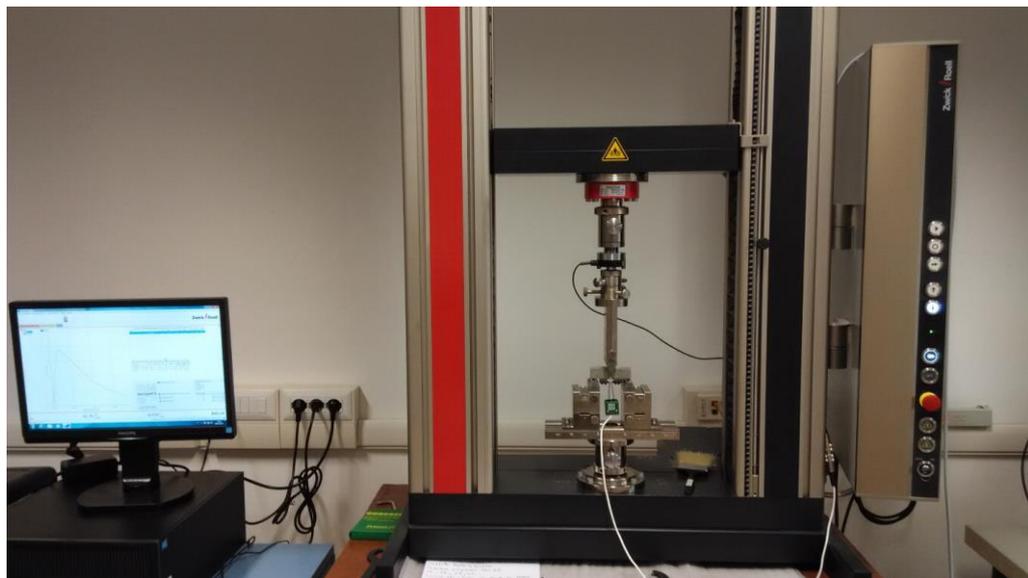


Figura [14], la macchina Zwick/Roell Z050.

5.2.3 La troncatrice con lama circolare con taglio a umido

Dotata di carter di protezione e controllo della velocità di rotazione (Figura [15]).



Figura [15], la troncatrice.

5.2.4 La bilancia elettronica

Ha una tolleranza del decimillesimo di grammo (Figura [16]).

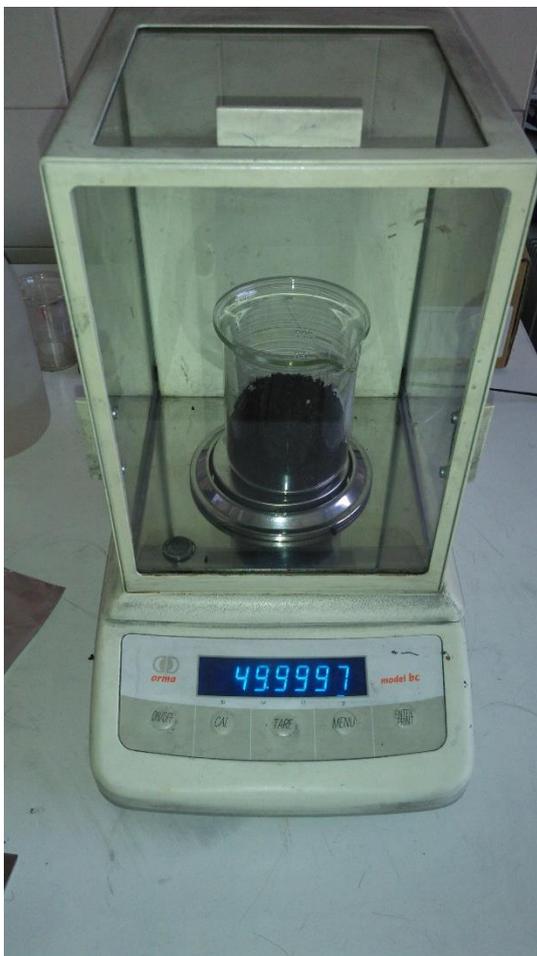


Figura [16], la bilancia con una pesata di 50g di granulato medio di gomma da Pfu.

5.2.5 Il forno elettrico programmabile

Si possono programmare temperature e tempi di trattamento dei campioni (Figura [17]).

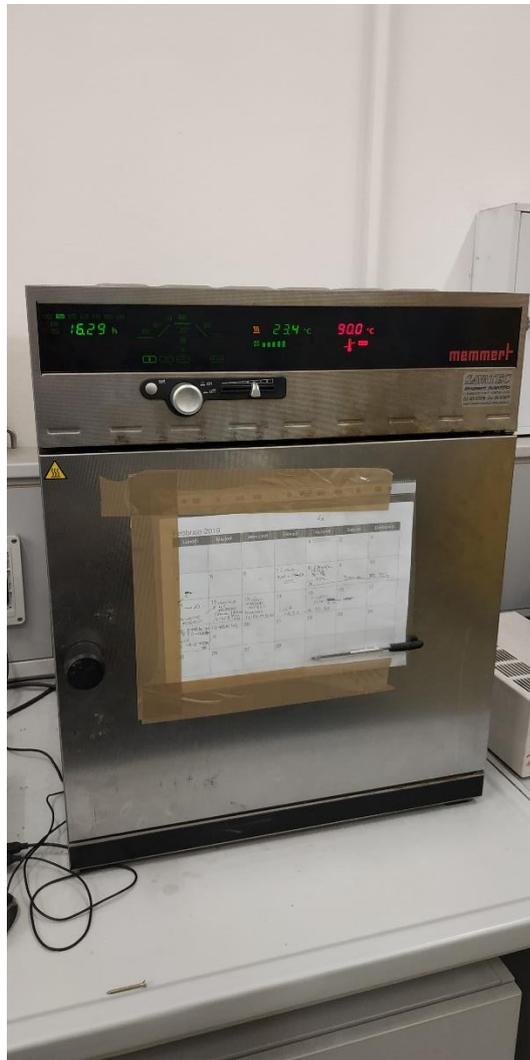


Figura [17], il forno elettrico.

5.3 Prove meccaniche

5.3.1 La prova a flessione e tenacità

La macchina Zwick/Roell Z050^[30], durante la prova, misura sia la forza massima espressa, in N, sopportata dal campione, sia la deformazione progressiva in apertura della cricca, misurata in mm.

La deformazione viene letta da un estensimetro, posizionato in zona tesa a cavallo di un invito, realizzato appositamente per fare innescare la cricca nel punto desiderato, ovvero alla metà della lunghezza del campione.

In un secondo momento i dati di forza e deformazione, trattati con un apposito software di calcolo, forniscono i valori di resistenza a flessione, espressi in MPa, e di tenacità, espressi in J.



Figura [18], i campioni con l'invito.

Si è scelto di non eseguire test meccanici a compressione. La motivazione di questa scelta risiede nel fatto che per campioni di piccole dimensioni si hanno risultati molto variabili e quindi di difficile interpretazione.

Il campione disponibile per il test a compressione risulta infatti di dimensioni 20x20x35 mm (corrisponde ad una delle due parti del campione rotto a flessione) (Figura [18]).

La **flessione**^[31] è uno degli sforzi o sollecitazioni elementari cui può essere soggetto un corpo, insieme alla compressione, la trazione, il taglio e la torsione. La sollecitazione che la provoca è detta momento flettente. Per semplicità, si può dire che un corpo è soggetto ad uno sforzo di flessione quando, per effetto dei vincoli cui è sottoposto, reagisce, opponendosi, ad un

sistema di forze ad esso applicate che tenderebbero a farlo ruotare attorno ad un proprio punto.

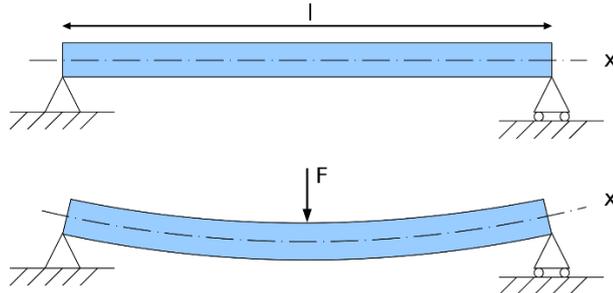


Figura [19], una trave prima e dopo l'applicazione di una forza^[31].

Nella trave sottoposta a flessione nascono delle tensioni unitarie di trazione e compressione, idealmente separate da uno strato di fibre detto "asse neutro" (x) che non subisce alcun allungamento o accorciamento (Figura [19]).

In una generica sezione di una trave soggetta a flessione la tensione unitaria si calcola con la seguente relazione detta formula di Navier:

$$\sigma_f = \frac{M_f}{J} y$$

- σ_f è la sollecitazione unitaria (MPa);
- M_f è il momento flettente (N mm);
- y è la distanza di un'area elementare dall'asse neutro (mm);
- J è il momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse neutro (mm⁴).

La **tenacità** è la capacità di assorbire energia di deformazione prima della rottura. È definita come l'area sottesa alla curva sforzo/deformazione di una prova di resistenza meccanica (Figura [20]).

La **tenacità a frattura** è la maggiore o minore facilità di propagazione di un difetto (o cricca) all'interno di un materiale, fino a portarlo a frattura.

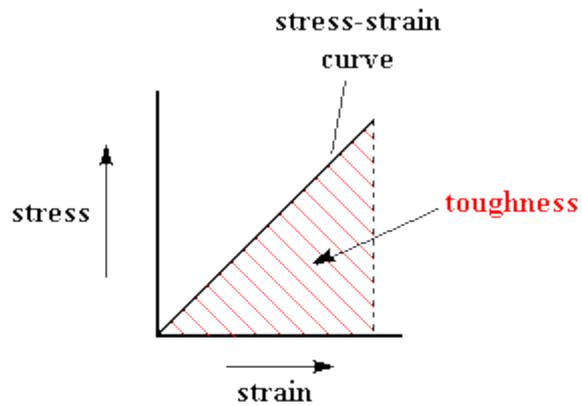


Figura [20], il diagramma sforzi-deformazioni^[32].

Alla **tenacità di un massetto** (qualità opposta alla **fragilità**), oltre alla capacità di contrastare e rallentare l'avanzamento delle cricche, si deve anche la capacità di **resistere agli urti**. Questa qualità è particolarmente importante sia nelle strutture sottoposte a sollecitazioni dinamiche ripetute (come i pavimenti industriali), sia durante la fase di cantiere, ovvero tra la fase di posa del massetto e la fase di finitura, viste le lavorazioni che vengono ancora svolte sul massetto grezzo (Tabella [4]).

Un materiale può aumentare la sua tenacità per aumento della:

- rigidità;
- resistenza;
- duttilità.

La figura [21] riporta i risultati di una prova meccanica comparativa tra un provino **fragile (A)** ed uno **tenace (B)**. Si nota come il provino tenace richieda una energia diverse volte maggiore di quello fragile per essere portato a rottura.

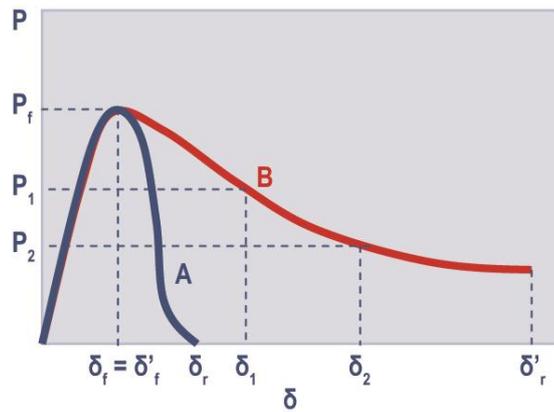


Figura [21], schematizzazione della curva P- δ in una prova di flessione senza intaglio per un calcestruzzo ordinario (O) e fibro-rinforzato (FRC)^[33].

Nella figura [22], due nostri provini a confronto: Ne1 (Massetto con sabbia da edilizia) e Nn1 (massetto con sabbia normalizzata): hanno pari resistenza meccanica ma la tenacità di Ne1 è quasi doppia rispetto a Nn1.

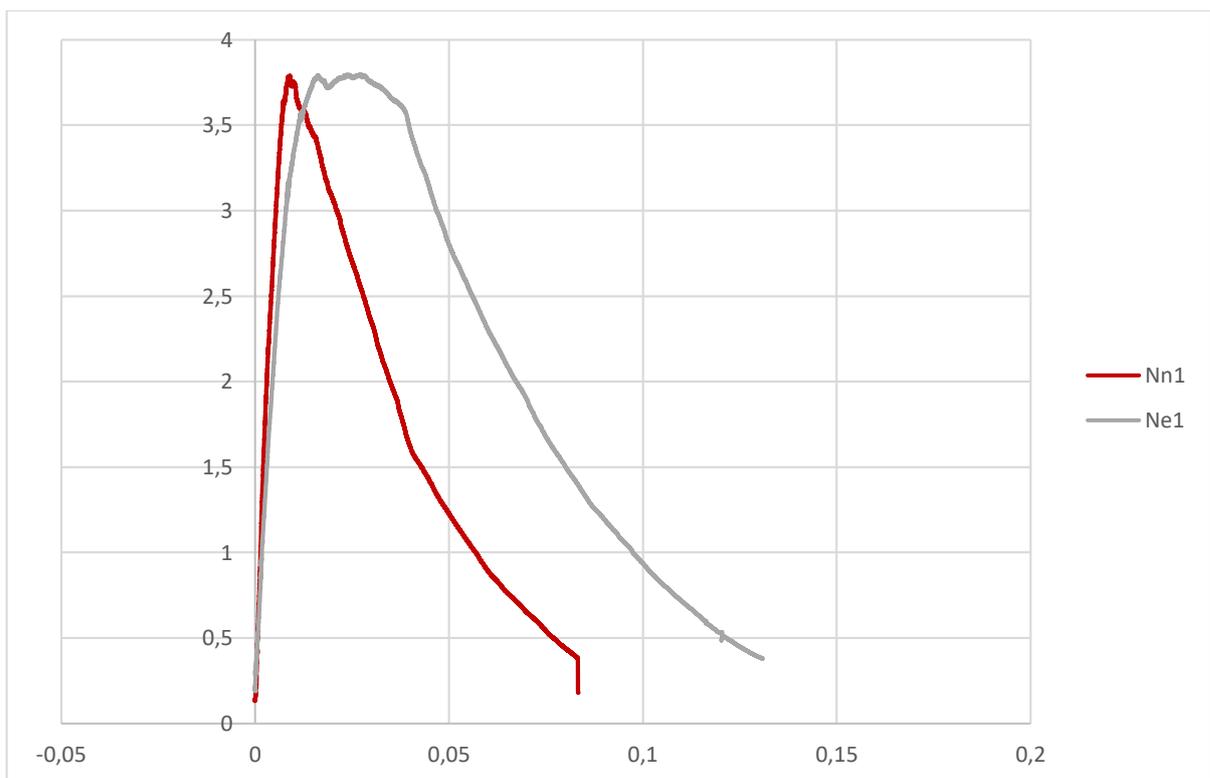


Figura [22], campioni Ne1 e Nn1.

Materiale	Rigidità E (GPa)	Resistenza σ_{sn} o σ_R (MPa)	Duttilità A (%)	Tenacità K_{Ic} (MPa√m)
Acciaio	200	300	30	60
Acciaio inossidabile	200	550	35	105
Alluminio	74	260	22	28
Rame	125	50	40	60
Polietilene PE	0,8	30	600	1,6
Polycarbonato PC	2,2	65	110	3,5
Calcestruzzo	20	2*	0	0,4
Vetro	70	30*	0,05	0,6
Composito fibre di vetro	22	150	0,9	15
Composito fibre carbonio	110	800	0,3	10
Legno massello	15	50	2	7
Gomma naturale	0,002	25	700	0,2

* a compressione

tabella 2_Valori di alcune proprietà meccaniche di dodici materiali significativi

Tabella [4], le caratteristiche meccaniche di alcuni materiali^[34].

6 Fase sperimentale

6.1 Trattamenti sulla gomma da Pfu

In diversi articoli scientifici sul Rubcrete, nel tentativo di migliorare la scarsa adesione tra pasta cementizia e superficie della gomma, vengono realizzati uno o più trattamenti superficiali^[35, 36].

I trattamenti sulla gomma realizzati in questa tesi sono stati scelti sulla scorta di queste esperienze^[37, 38, 39] ed in base ai risultati del lavoro sperimentale svolto in laboratorio.

6.1.1 Stoccaggio in acqua

Nel brevetto depositato “Concrete screed with recycled rubber from discarded tyres”^[22] si realizzano trattamenti della gomma da Pfu tramite stoccaggio in acqua per un periodo che va da 7 a 40 giorni (preferibilmente 28gg.) e trattamenti con lattice polimerico.

Nel mio lavoro di tesi si è deciso di trattare la gomma da Pfu, polverino fine 0,2 – 0,8 mm ed il granulato medio 0,8 – 2,5 mm, tramite lo stoccaggio in acqua (per 1, 6, 30, 133 giorni) (Figura [23]).



Figura [23], alcuni campioni di gomma da Pfu stoccati in acqua di rubinetto.

Inizialmente si è voluto determinare quanta acqua avesse assorbito la gomma nei tre periodi di immersione.

La gomma prima di essere pesata è stata asciugata in modo che non ci fosse acqua sulla superficie dei granuli.

6.1.2 Trattamenti chimici

Sulla scorta dei risultati delle prove eseguite in fase preliminare (affondamento ed angolo di contatto) trattamenti scelti sono stati:

- Trattamento con idrossido di sodio (NaOH)
- Trattamento con soluzione piranha (3 parti H₂SO₄, 1 parte H₂O₂ 30 vol.)

6.1.2.1 Trattamento basico con NaOH

Si realizza una soluzione acquosa satura, a temperatura ambiente, con perle di idrossido di sodio, NaOH (Figura [24]).

A seguito del trattamento si osserva l'idrolizzazione dei gruppi acidi e/o carbossilici.

In figura [20] si riporta e titolo di esempio la reazione di fusione alcalina che avviene però alla temperatura di 350°C (Figura [25]).



Figura [24], trattamento in idrossido di sodio.

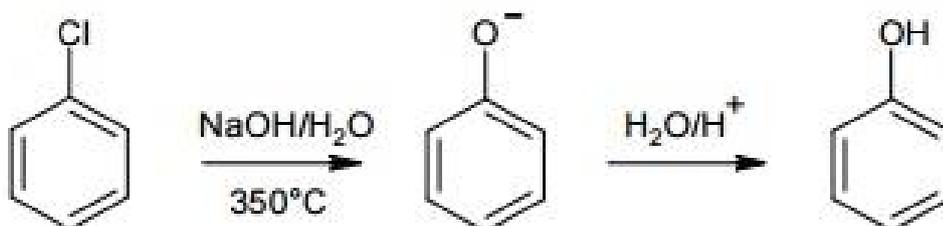


Figura [25], la fusione alcalina^[8].

6.1.2.2 Trattamento acido con soluzione Piranha (3 H₂SO₄ + 1 H₂O₂)

La soluzione, ottenuta nel rapporto 3:1 (3 parti H₂SO₄, 1 parte H₂O₂ 30 vol.), è formata da un acido forte e da un potente ossidante. Il perossido di idrogeno si decompone e di conseguenza questa va utilizzata rapidamente e non può essere conservata.

L'ossigeno estremamente reattivo presente nella soluzione attacca direttamente gli atomi di carbonio sulla superficie della gomma per formare un gruppo carbonilico. In sostanza vengono rotti alcuni dei legami superficiali della gomma creando nuove catene che ne aumentano l'idrofilia e quindi l'interazione con la pasta di cemento (Figura [26]).



Figura [26], formazione del gruppo carbonilico^[8].

Viene stata utilizzata la soluzione piranha diluita al 50% in acqua, durata del trattamento 5 minuti (piranha 50%, 5') (Figura [27]).

In un caso è stata utilizzata una soluzione al 15% per 30 minuti (piranha 15%, per 30') e al 1 % per 7 giorni (piranha 1 %, 7 giorni). Quest'ultima soluzione è stata utilizzata nel trattamento della gomma nella granulometria 0,2 – 0,8 mm, per la quale le altre diluizioni risultavano troppo aggressive (Figura [28]).

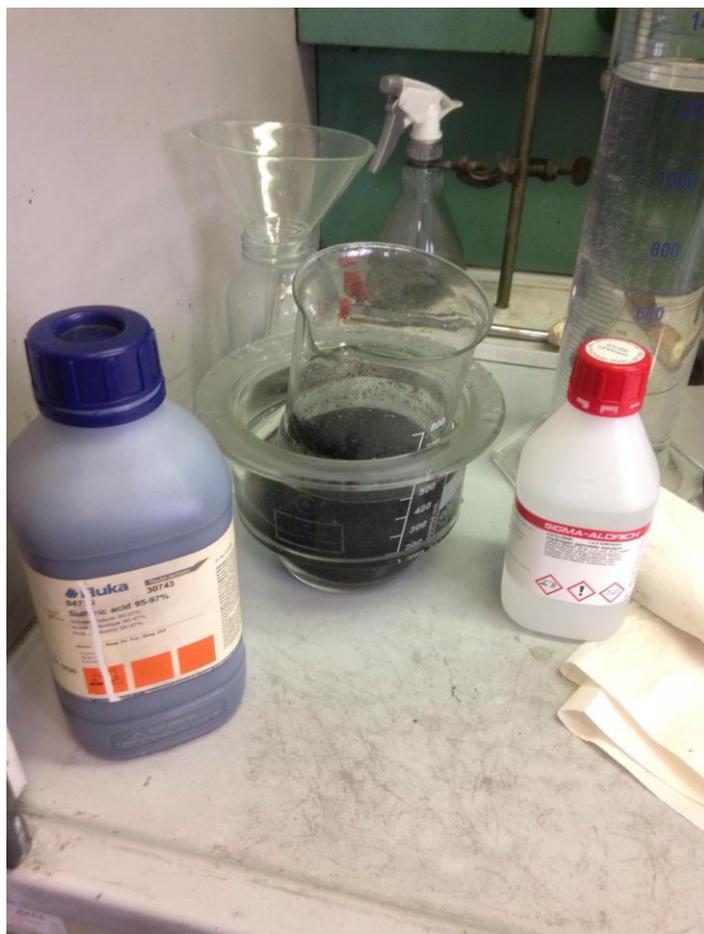


Figura [27], trattamento in soluzione Piranha sotto cappa aspirante.



Figura [28], trattamento in soluzione piranha al 1%.

6.1.2.3 Trattamento acido con H₂SO₄

L'acido solforico (H₂SO₄) attua una reazione organica detta di solfonazione: si introduce su di un composto organico, nel nostro caso lo stirene, gruppi solfonici SO₃H, provenienti dall'acido stesso^[8]:

$2 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightleftharpoons \text{SO}_3 + \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HSO}_4^-$ (Figura [29]).

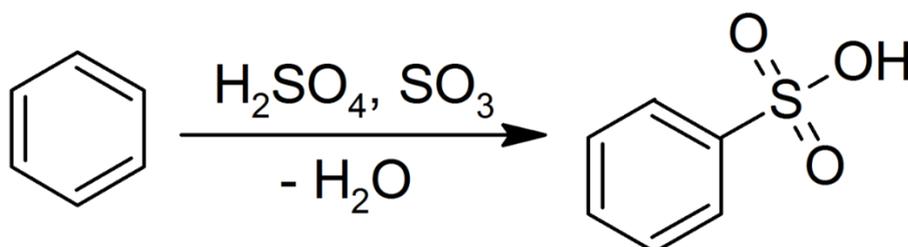


Figura [29], solfonazione del benzene^[40].

6.1.3 Trattamento con lattice adesivo

È stato effettuato un test misurando empiricamente l'adesione di pasta cementizia sulla superficie di quadrotti di pneumatico di scooter, misure 12 x 12mm, spessore 7mm.

Si è utilizzato un promotore di adesione commerciale, Mapei Planicrete, prodotto a base stirene-butadiene, ovvero lo stesso composto alla base della gomma da pneumatico.

La pasta cementizia è stata ottenuta impastando cemento rapido e acqua.

La pasta cementizia è stata usata per incollare tra loro due quadrotti, valutando dopo 7gg la forza necessaria per distaccarli.

Sono stati eseguiti sei test:

- 1 – quadrotti non trattati, incollati con pasta cementizia;
- 2 – quadrotti non trattati, incollati con pasta cementizia con Planicrete, rapporto acqua-Planicrete 1:1;
- 3 – quadrotti lasciati in immersione in una soluzione di Planicrete e acqua 1:1 per 30'', incollati con pasta cementizia fresco su fresco;
- 4 – quadrotti lasciati in immersione in una soluzione di Planicrete e acqua 1:1 per 30', incollati con pasta cementizia fresco su fresco;
- 5 – quadrotti lasciati in immersione in una soluzione di Planicrete e acqua 1:1 per 30', lasciati asciugare per 30', incollati con pasta cementizia;

6 – quadrotti lasciati in immersione in una soluzione di Planicrete e acqua 1:1 per 30", lasciati asciugare per 30', incollati con pasta cementizia.

6.1.4 Angolo di contatto

Si cerca di creare un'interazione chimica tra la gomma e la pasta cementizia attraverso trattamenti chimici effettuati su campioni di pneumatico.

Si è prelevato dallo pneumatico di uno scooter dei quadrotti di circa 12 mm di lato, spessore da 6 mm a 9 mm (Figura [30]).



Figura [30], i quadrotti di pneumatico.

I quadrotti sono stati trattati in soluzione Piranha (3 parti H_2SO_4 , 1 parte H_2O_2 30 vol.), soluzione di idrossido di sodio (NaOH), soluzione di acido solforico (H_2SO_4).

Sono stati utilizzati 3 diverse concentrazioni, al 15%, 50%, 100%; i campioni sono stati immersi in soluzione per 1 minuto, 5 minuti, 15 minuti.

Con il microscopio angolo di contatto è stato misurato l'angolo di contatto interno di una piccola goccia d'acqua depositata sulla superficie del campione di gomma (Figura [31], [32], [33], [34], [35]).

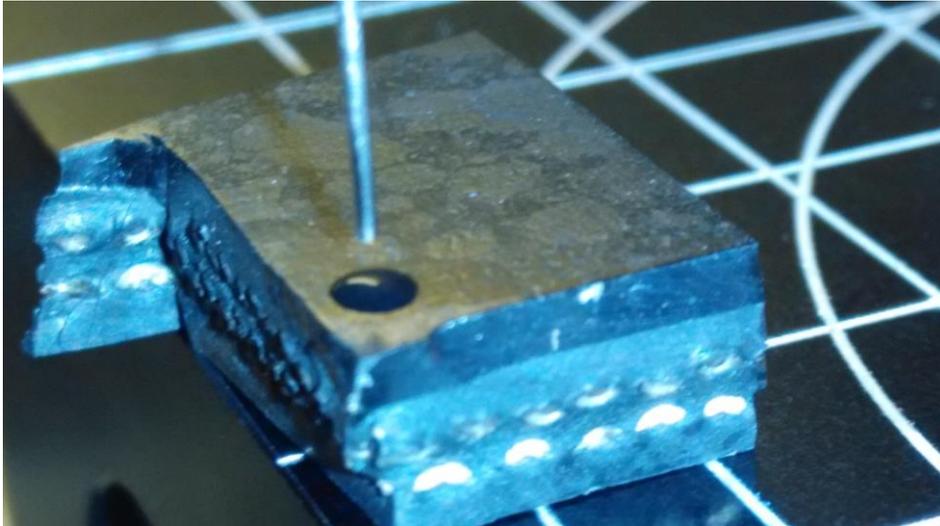


Figura [31], quadrotto di pneumatico durante la prova.

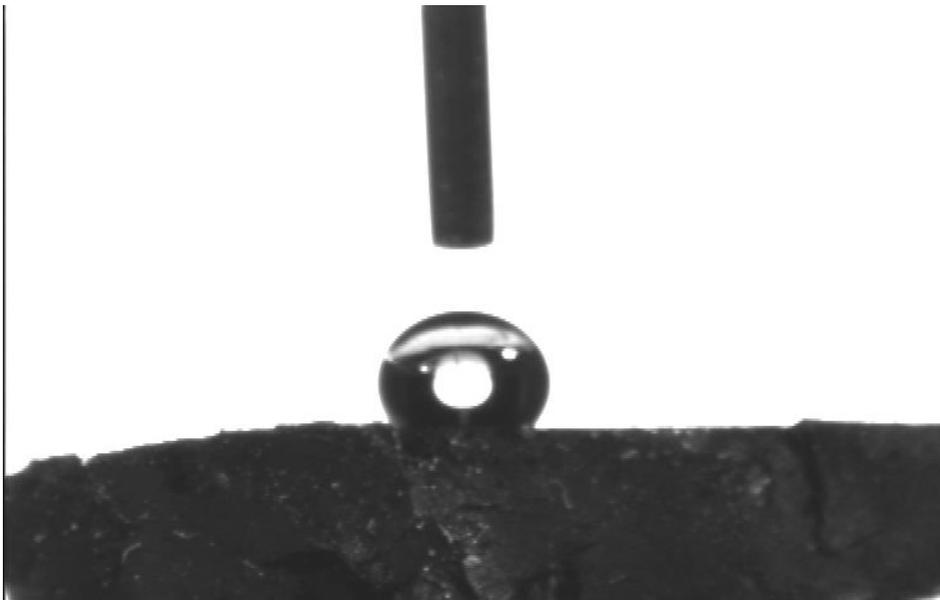


Figura [32], immagine rilevata dallo strumento, quadrotto neutro non trattato, angolo interno elevato, comportamento idrofobico.



Figura [33], immagine rilevata dallo strumento, quadretto trattato con idrossido di sodio, angolo interno basso, comportamento idrofilo.

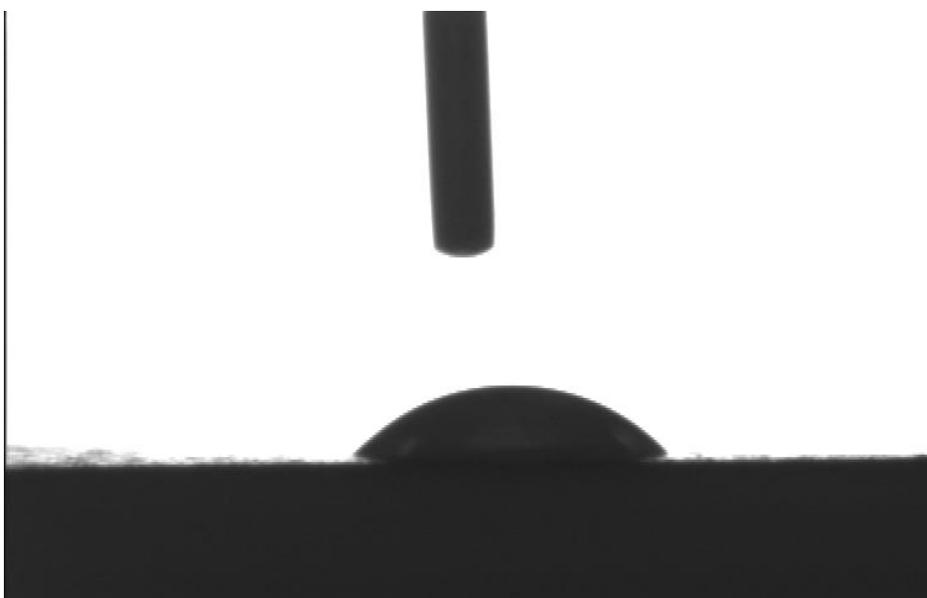


Figura [34], immagine rilevata dallo strumento, quadretto trattato con acido solforico, angolo interno basso, comportamento idrofilo.

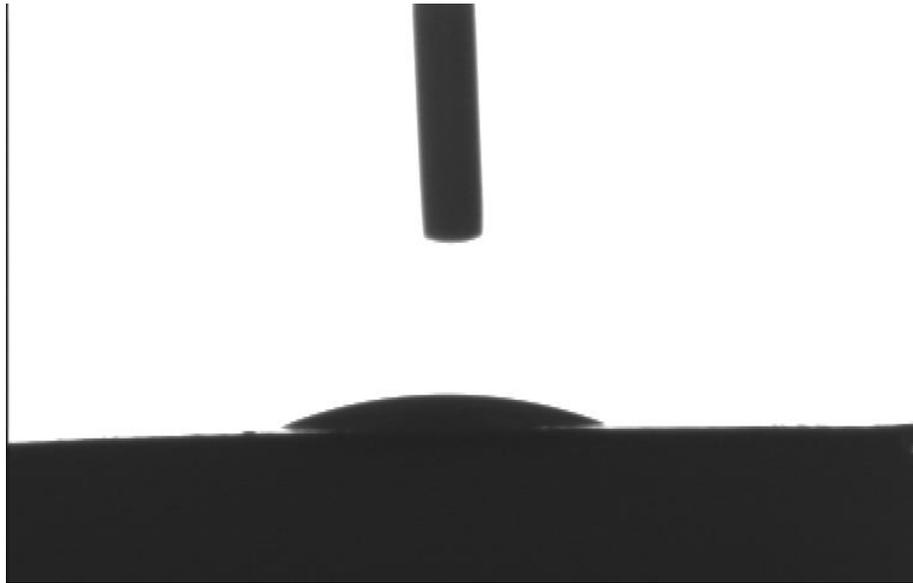


Figura [35], immagine rilevata dallo strumento, quadrotto trattato in soluzione Piranha, angolo interno molto basso, comportamento idrofilo.

6.1.5 Affondamento

Si valuta la percentuale di affondamento del granulato di gomma da PFU, fine 0,2 – 0,8 mm e medio 0,8 – 2,5 mm, in acqua demineralizzata e soluzione salina satura (Figura [36]).

Questo esperimento viene fatto per comprendere quanto il granulato di gomma da Pfu si imbibisce di acqua e quanto le bolle d'aria aderiscono sulla sua superficie impedendogli di affondare (anche a seguito di un trattamento realizzato).

Si determina inizialmente la densità apparente di:

- quadrotti da pneumatico scooter 1,153 g/cm³;
- granulato grosso da Pfu 1,149 g/cm³;
- soluzione salina satura, 1,106 g/cm³;
- acqua di rubinetto, 0,997 g/cm³ a 25 °C;
- acqua demineralizzata, 0,997 g/cm³ a 25 °C.

I test sono effettuati a temperatura ambiente di circa 25 °C.

Sono stati realizzati vari campioni con 4.6 g di acqua demineralizzata e con 4.6 g di soluzione salina satura, sulla cui superficie liquida sono stati depositati 0,05 g di Pfu, fine e medio, sia trattato sia no.



Figura [36], i test di assorbimento d'acqua in corso di svolgimento: i primi sette sono in acqua demineralizzata, gli ultimi tre in soluzione salina satura.

I trattamenti effettuati sul Pfu sono:

- immersione in soluzione di acido solforico (H_2SO_4 al 98%) diluito al 50% con acqua demineralizzata, per 5 minuti (identificativo: H_2SO_4 , 50%, 5');
- immersione in soluzione satura di idrossido di sodio (soda caustica) pura, per 15 minuti (identificativo: NaOH puro, 15');
- immersione in soluzione Piranha (3 parti H_2SO_4 al 98%, 1 parte H_2O_2 30 vol.) diluita al 50% con acqua demineralizzata, per 5 minuti (identificativo: Piranha, 50%, 5').

6.2 Risultati delle analisi sperimentali preliminari

6.2.1 Stoccaggio in acqua della gomma da Pfu

	1 ora	1 giorno	6 giorni	30 giorni	134 giorni
granulato 0,8-2,5 mm	2,40%	5,80%	10%	9%	11%
polverino 0,2-0,8 mm			34%		

Tabella [5], assorbimento della gomma da Pfu in acqua.

Considerazioni:

Si nota un marcato assorbimento del granulato fine rispetto al granulato medio, oltre il 30%, dovuto probabilmente al maggior rapporto tra superficie e volume del frammento.

Il granulato medio raggiunge valori di assorbimento d'acqua intorno al 10%; questo valore matura già al sesto giorno di immersione; anche dopo 30 e 133 giorni non si riscontrano ulteriori incrementi di assorbimento (Tabella [5]).

6.2.2 Trattamento con lattice adesivo

Come si evince dalla figura [37], i campioni di gomma 5 e 6 forniscono i migliori risultati di adesione dopo il trattamento.

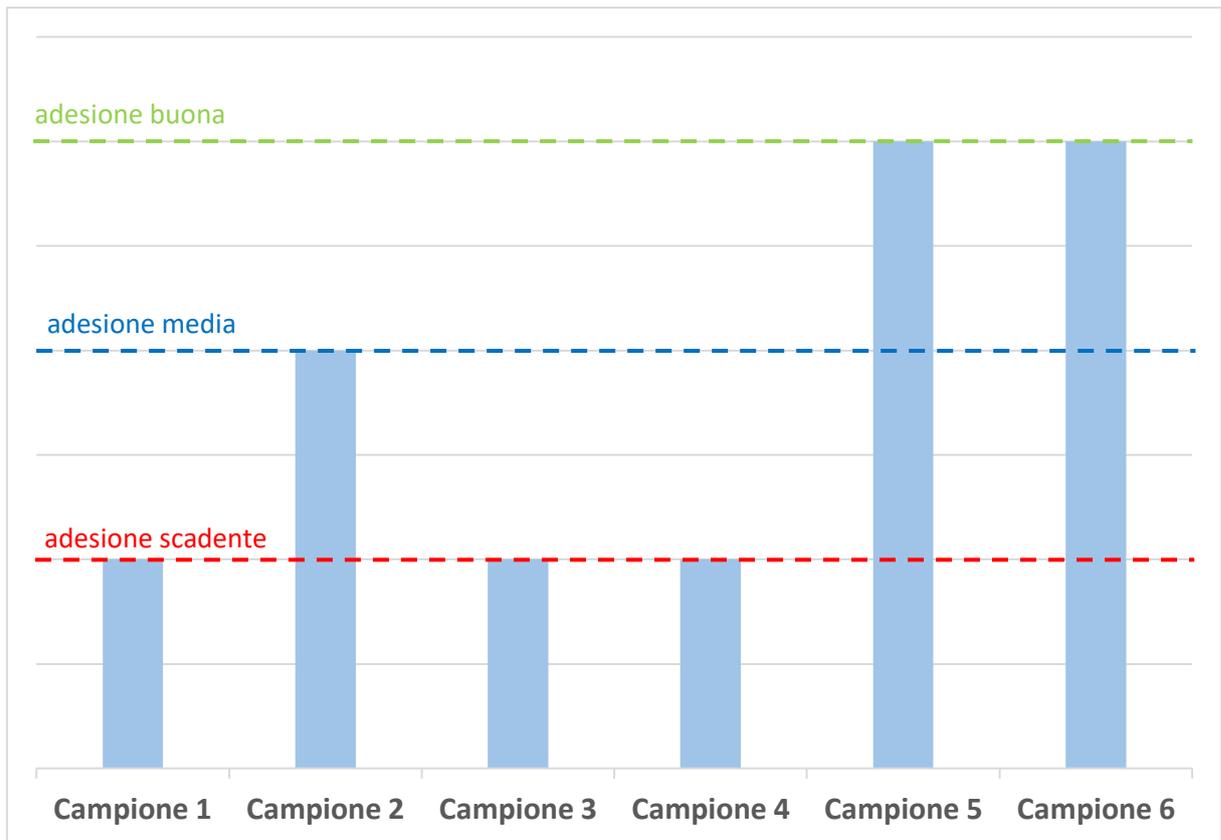


Figura [37], i risultati sull'adesione del test con lattice adesivo.

6.2.3 Angolo di contatto

Si è evidenziato un diverso comportamento tra la superficie interna ed esterna dello pneumatico, a dimostrazione del fatto che le mescole sono differenti tra loro. La mescola esterna ha mostrato un comportamento più idrofilo rispetto a quella interna probabilmente dovuto alla sua capacità di aderire in condizione di fondo bagnato.

I trattamenti con acido solforico non hanno dato risultati.

Gli angoli di contatto più bassi (che indicano maggiore idrofilia) sono stati quelli ottenuti attraverso il trattamento con soluzione piranha e a seguire con idrossido di sodio. Queste due soluzioni sono state perciò scelte per trattare chimicamente il granulato di gomma da utilizzare nella preparazione delle malte (Tabella [6]).

Soluzione	Concentraz	Tempo	Campione	angoli Deg°					Media	
Neutro	Neutro		0	Int.	130	150	130	135	130	135
				Ext.	95	98	95	90	95	95
neutro	neutro	/	gommino	/	130	125	115			123
NaOH	Puro	1	A	Int.	105					105
				Ext.	95					95
NaOH	Puro	5	B	Int.	90					90
				Ext.	110					110
NaOH	Puro	15	C	Int.	70	80	58			69
				Ext.	90	120	110			107
NaOH	50%	1	D	Int.	110					110
				Ext.	120					120
NaOH	50%	5	E	Int.	110		70	80		87
				Ext.	110	105	45	55	50	73
NaOH	50%	15	F	Int.	115					115
				Ext.	105					105
NaOH	15%	1	F	Int.	140	140				140
				Ext.	90	110				100
Piranha	Puro	1	L	Int.	120	140				130
				Ext. Black	35	45	55			45
				Ext. Grey	55					55
Piranha	Puro	5	M	Int.	35					35
				Ext.	15	30	25			23
Piranha	Puro	15	N	Int.	45					45
				Ext.	45	45				45
Piranha	50%	1	O	Int.	130					130
				Ext.	110					110
Piranha	50%	5	P	Int.	130	120				125
				Ext.	65					65
Piranha	50%	15	Q	Int.	105	90				98
				Ext.	100	60	70			77
Piranha	15%	1	R	Int.	135					135
				Ext.	110					110
Piranha	15%	5	S	Int.	135	70	90			98
				Ext.	110	90	75	85		90
Piranha	15%	15	T	Int.	135					135
				Ext.	85	80				83
H2SO4	15%	1	U	Int.	140	140				140
				Ext.	90	110				100
H2SO4	50%	5	V	Int.	115					115
				Ext.	110	120				115
H2SO4	100%	5	W	Int.	130	140				135
				Ext.	110	110				110
H2SO4	100%	15	Z	Int.	130					130
				Ext.	115	95				105

Tabella [6]: tutti i test realizzati.

6.3 La preparazione delle malte

Inizialmente, al fine di poter testare un elevato numero di provini si è scelto di utilizzare un cemento petrolifero classe G HSR^[13] (High Sulphate Resistant Grade) API SPEC. 10°; questo ha la particolarità di raggiungere la sua resistenza massima dopo una maturazione di sole 24 ore in ambiente saturo di umidità ad una temperatura di circa 85 °C.

In una seconda fase si è utilizzato un normale cemento Portland, il Buzzi Unicem Tipo II/B-LL 32.5 R^[28], con maturazione dei provini in ambiente saturo di umidità per 28 giorni.

La malta cementizia viene composta secondo le dosi:

- rapporto in peso acqua / cemento = 0.5
- rapporto in peso inerte / cemento = 3

È stata utilizzata acqua del rubinetto.

Quando si realizza la malta con aggiunta di gomma da Pfu, questa sostituisce in volume la sabbia (nei nostri test pari al 15% ,30% e 50%).

Il granulato da Pfu utilizzato per la realizzazione dei provini è stato:

- Polverino, con granulometria da 0,2 – 0,8 mm (utilizzato solo in una prima fase)
- Granulato medio, con granulometria da 0,8 – 2,5 mm

Si è ritenuto che utilizzare un granulato con una maggiore dimensione delle particelle di gomma potesse dare problemi di eccessiva irregolarità superficiale del massetto in opera.

Una volta pesati si miscelano i componenti, nelle precise proporzioni, utilizzando un miscelatore elettrico a velocità variabile (figura [38]).

Si miscelano i componenti nell'ordine:

- acqua
- cemento
- inerti
- gomma
- fibre

Utilizzando casseri in plexiglass realizzati appositamente a questo scopo, sono stati composti i provini parallelepipedi di massetto della dimensione di 20x20x75mm, da 3 a 6 provini per ogni qualità di miscela, ad esclusione di alcuni test di prova (figura [39]).



Figura [38], il miscelatore utilizzato nella composizione delle malte con i componenti pesati.

6.3.1 Il peso degli impasti

Il **peso degli impasti** con granulato di gomma in sostituzione dell'inerte diminuisce, ma non eccessivamente, questo a causa dell'elevato peso specifico della gomma, se rapportato agli inerti leggeri utilizzati in alcune tipologie di massetti alleggeriti (polistirene, argilla espansa ecc.).

La variazione di peso degli impasti rispetto alla malta senza gomma è:

- - 6 % per le malte con in 15% di gomma da Pfu in sostituzione della sabbia.
- - 11 % per le malte con in 30% di gomma da Pfu in sostituzione della sabbia.
- - 19 % per le malte con in 50% di gomma da Pfu in sostituzione della sabbia.



Figura [39], la stesura della malta nel cassero.

I casseri vengono messi in recipienti sigillati contenenti acqua alla base (facendo in modo che i provini non potessero venire in contatto con l'acqua), questo perché l'ambiente interno rimanesse sempre saturo di umidità.

Nel caso in cui è stato utilizzato cemento petrolifero, i contenitori con i provini sono stati messi in un forno elettrico per 24 ore alla temperatura costante di 85°C (figura [40]).



Figura [40], i recipienti posizionati nel forno.

Quando si è utilizzato cemento Portland Tipo II/B-LL 32.5 R, i contenitori sigillati con i provini sono stati lasciati a maturare per 28 giorni a temperatura ambiente (sempre in ambiente saturo di umidità) e subito testati meccanicamente (figura [41]).



Figura [41], i casseri con provini nei contenitori, prima di essere sigillati.

6.4 La creazione dell'invito e la prova sulla macchina Zwick/Roell Z050

Una volta disarmati, sui provini è stato praticato un "invito", un intaglio centrale di circa 5 mm di profondità, allo scopo di innescare la cricca precisamente in questo punto della sezione (figura [42]).

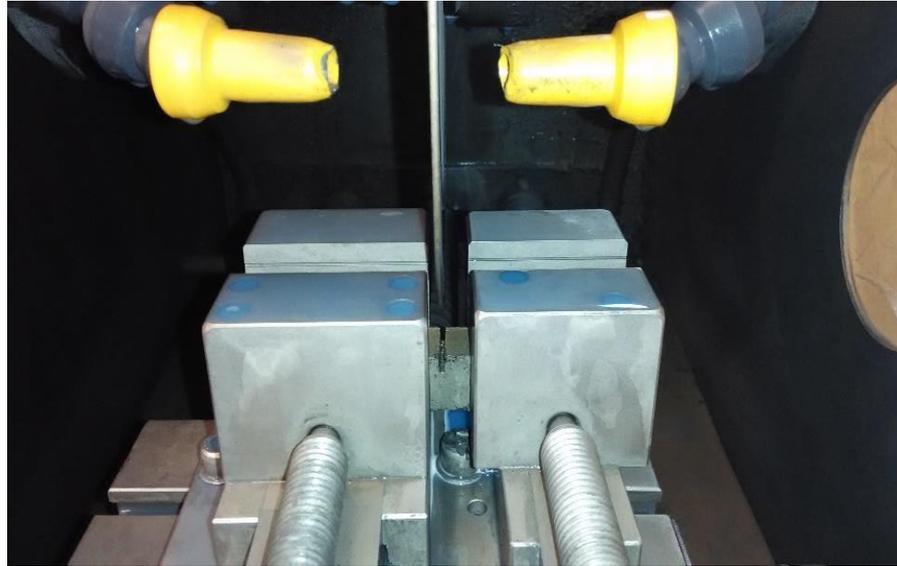


Figura [42], la troncatrice con un provino appena inciso.

In fase di test a flessione, infatti, l'estensimetro è stato applicato a cavallo dell'intaglio (figura [43]). Questo è stato fissato al provino incollando con un collante ciano acrilico due basette metalliche filettate sulle quali si erano fissati i supporti che contenevano l'estensimetro (figura [44]).

Ad ogni nuovo test occorreva ripetere l'operazione.

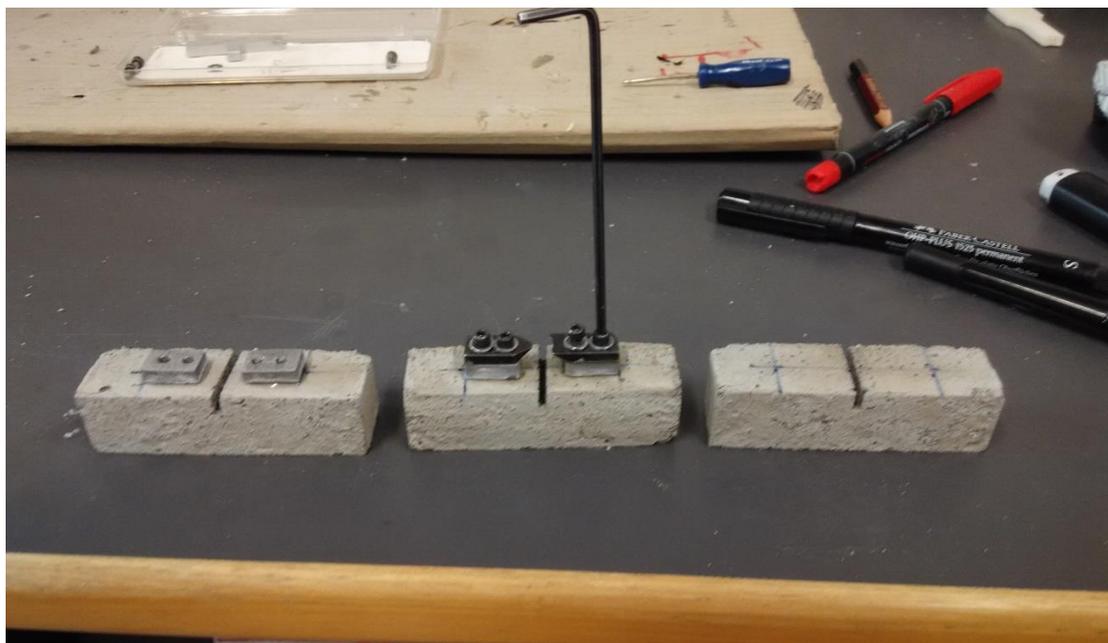


Figura [43], il provino con l'invito, a destra, con la bassetta, a sinistra. I supporti avvitati alla bassetta, in centro.

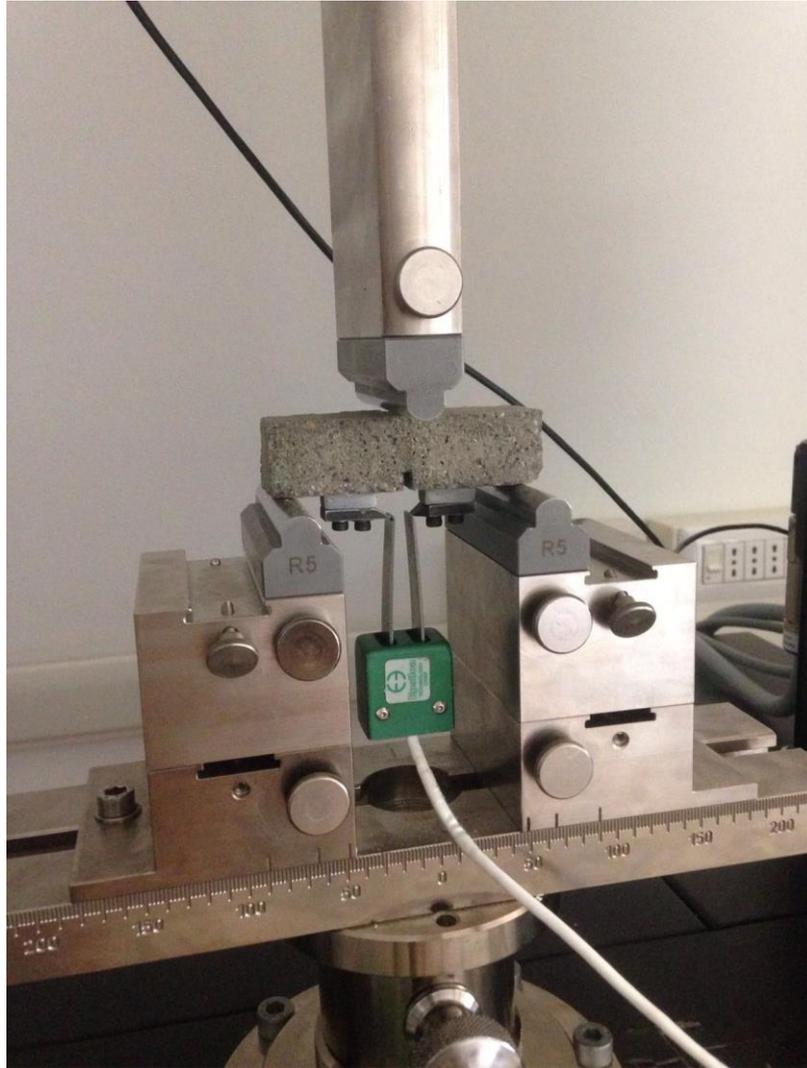


Figura [44], Il provino pronto per il test a flessione con l'estensimetro fissato per contrasto sui supporti^[30].

7 Risultati dei test meccanici

7.1 Provini con cemento in classe G e gomma da Pfu in sostituzione della sabbia al 15% in volume

7.1.1 Provini neutri senza gomma e massetti pronti; Nn, Ne, Mr81m, Cs, Cs-

Si realizzano cinque malte (figura [45]):

- massetto di cemento petrolifero con sabbia normalizzata, identificativo **Nn** (3.35 MPa – 8.25 J);
- massetto di cemento petrolifero con sabbia da edilizia, identificativo **Ne** (4.63 MPa – 12.51 J);
- massetto pronto Weber Mr 81 metal, stagionato 28 gg, identificativo **Mr81m_28** (4.25 MPa – 20.7 J);
- massetto pronto Leca Centro Storico, identificativo **Cs** (2.84 MPa – 5.32 J);
- massetto pronto Leca Centro Storico privato delle fibre, identificativo **Cs-** (2.69 MPa – 5.4 J).

Nel grafico, ed anche in quelli a seguire, abbiamo riportato la tenacità con un valore ridotto ad un quinto (**Tenacità/5**), per una migliore leggibilità del grafico.

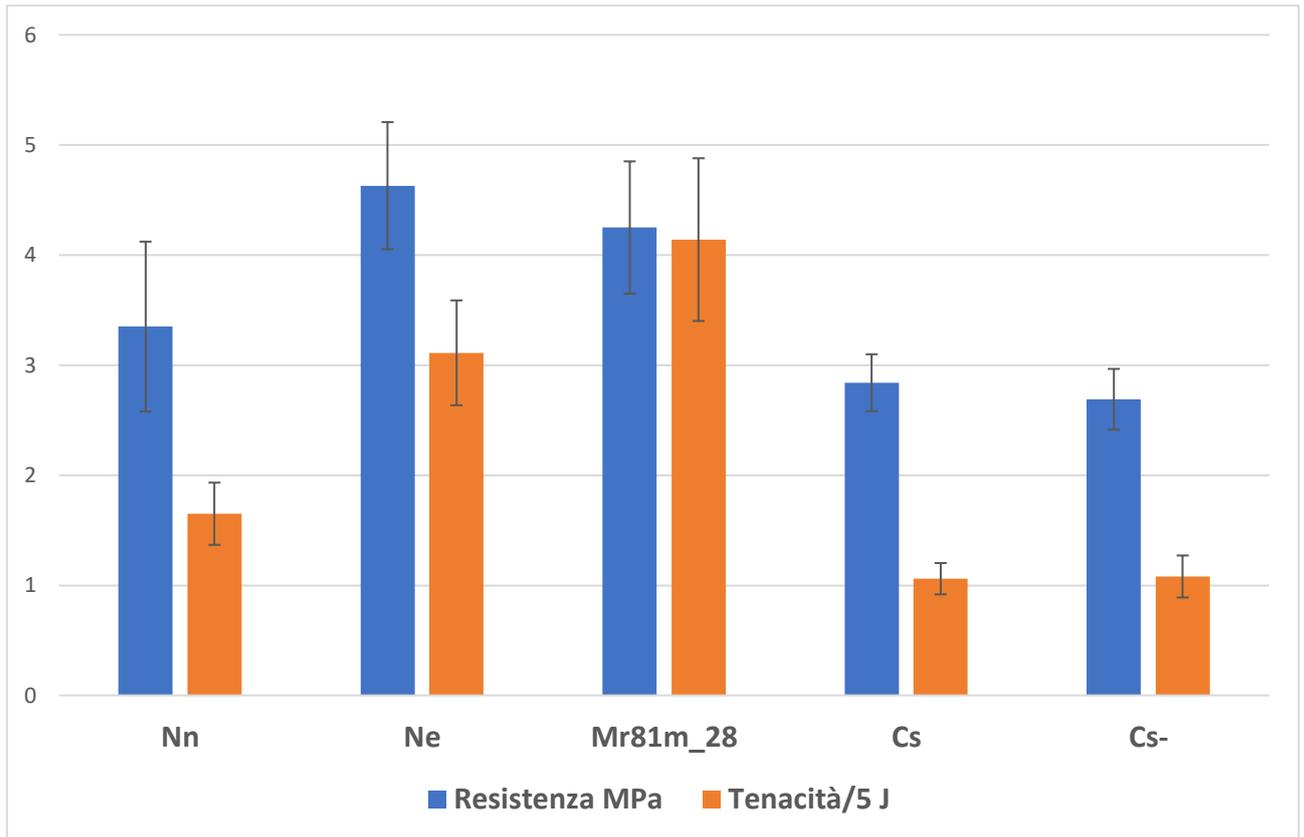


Figura [45], provini con cemento in classe G e gomma da Pfu in sostituzione della sabbia al 15% in volume.

Considerazioni:

Il campione neutro con sabbia da edilizia **Ne** è il test migliore per forza, ma il massetto pronto Weber **Mr81m_28** lo supera in tenacità grazie alle fibre metalliche presenti nella miscela.

Ne risulta migliore di **Nn**, quindi meglio la sabbia da edilizia rispetto alla sabbia normalizzata, probabilmente a causa della superficie più smussata dei grani di quest'ultima.

La sabbia da edilizia incrementa la tenacità del campione **Ne** rispetto a **Nn** del 52%.

Si determina che nel massetto pronto Leca **Cs** le fibre polimeriche sono aggiunte in ragione del 1/1000 in peso sul premiscelato secco.

Abbiamo deciso di prendere **Ne** e **Cs** come intervallo massimo e minimo di riferimento per le prestazioni di resistenza meccanica.

7.1.1.1 L'influenza dell'invito su resistenza a flessione e tenacità; Ne_28, Ne_28_si.

Questo test viene eseguito per comprendere quanto l'invito influisca sulle prestazioni meccaniche dei campioni.

Si confrontano due famiglie di campioni, con e senza invito (figura [46]):

- massetto di cemento portland 32.5 R con sabbia da edilizia, identificativo **Ne_28** (4.37 MPa – 16.25 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con sabbia da edilizia, provino senza intaglio, identificativo **Ne_28_si** (4.97 MPa – 51.42 J).

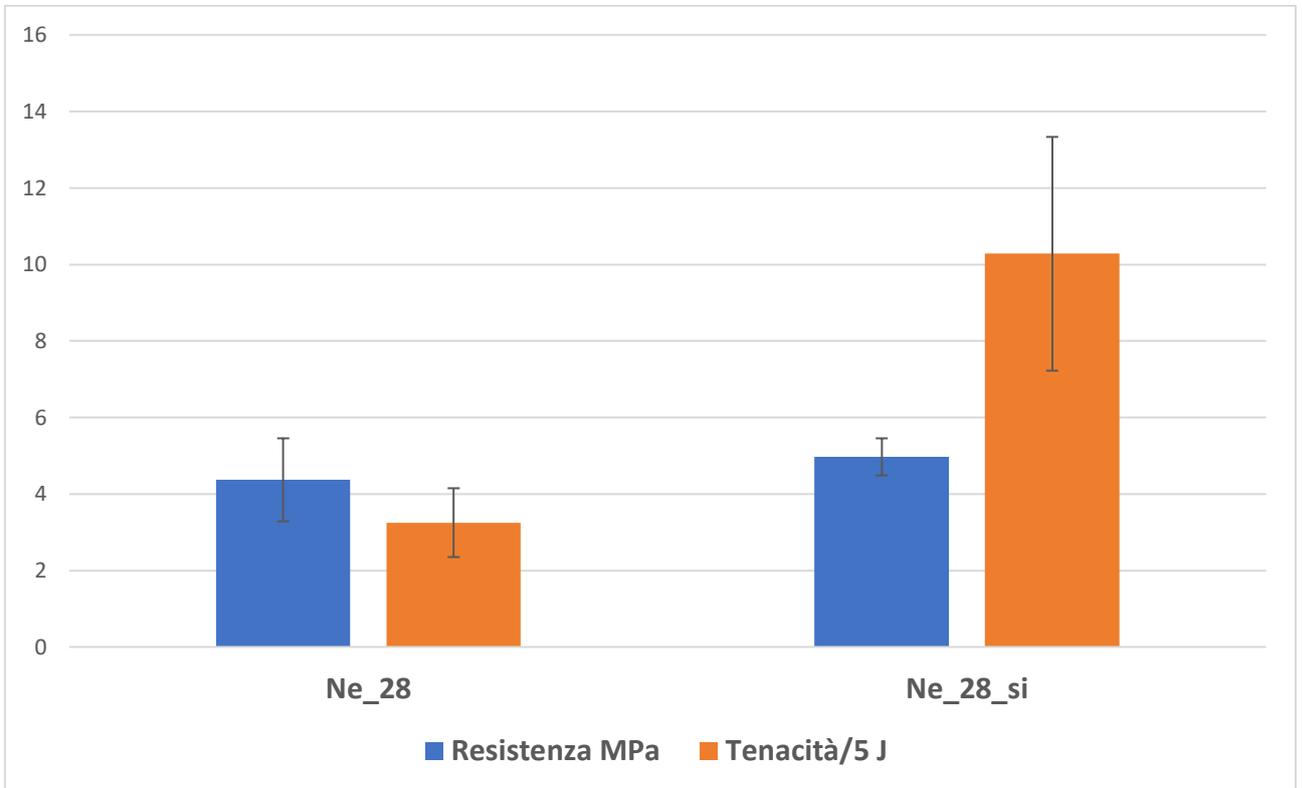


Figura [46]: l'influenza dell'invito su resistenza e tenacità.

Considerazioni:

Dall'analisi dei risultati si determina che l'invito causa una leggera diminuzione di forza (pari a circa il 9%) ma soprattutto un crollo della tenacità, pari a circa il 315%.

7.1.2 Provini con granulato di gomma, fine e medio, non trattato; Fn, Fe, Fn6, Fn7, Mn, Me, FMe.

Si realizzano sette malte (figura [47]):

- massetto con polverino 0,2 – 0,8 mm (15%), sabbia normalizzata, identificativo **Fn** (2.47 MPa – 5.89 J);

- massetto con polverino 0,2 – 0,8 mm (15%), sabbia edilizia, identificativo **Fe** (2.17 MPa – 4.53 J):
- massetto con polverino 0,2 – 0,8 mm (15%), rapporto acqua-cemento 0.6, sabbia normalizzata, identificativo **Fn6** (1.94 MPa – 3.6 J):
- massetto con polverino 0,2 – 0,8 mm (15%), rapporto acqua-cemento 0.7, sabbia normalizzata, identificativo **Fn7** (1.96 MPa – 5.24 J);
- massetto con granulato medio 0,8 – 2,5 mm (15%), sabbia normalizzata, identificativo **Mn** (2.60 MPa – 6.28 J);
- massetto con granulato medio 0,8 – 2,5 mm (15%), sabbia edilizia, identificativo **Me** (2.62 MPa – 7.18 J);
- massetto con mix di poverino (5%) e granulato medio (10%), sabbia edilizia, identificativo **FMe** (2.25 MPa – 5.47 J).

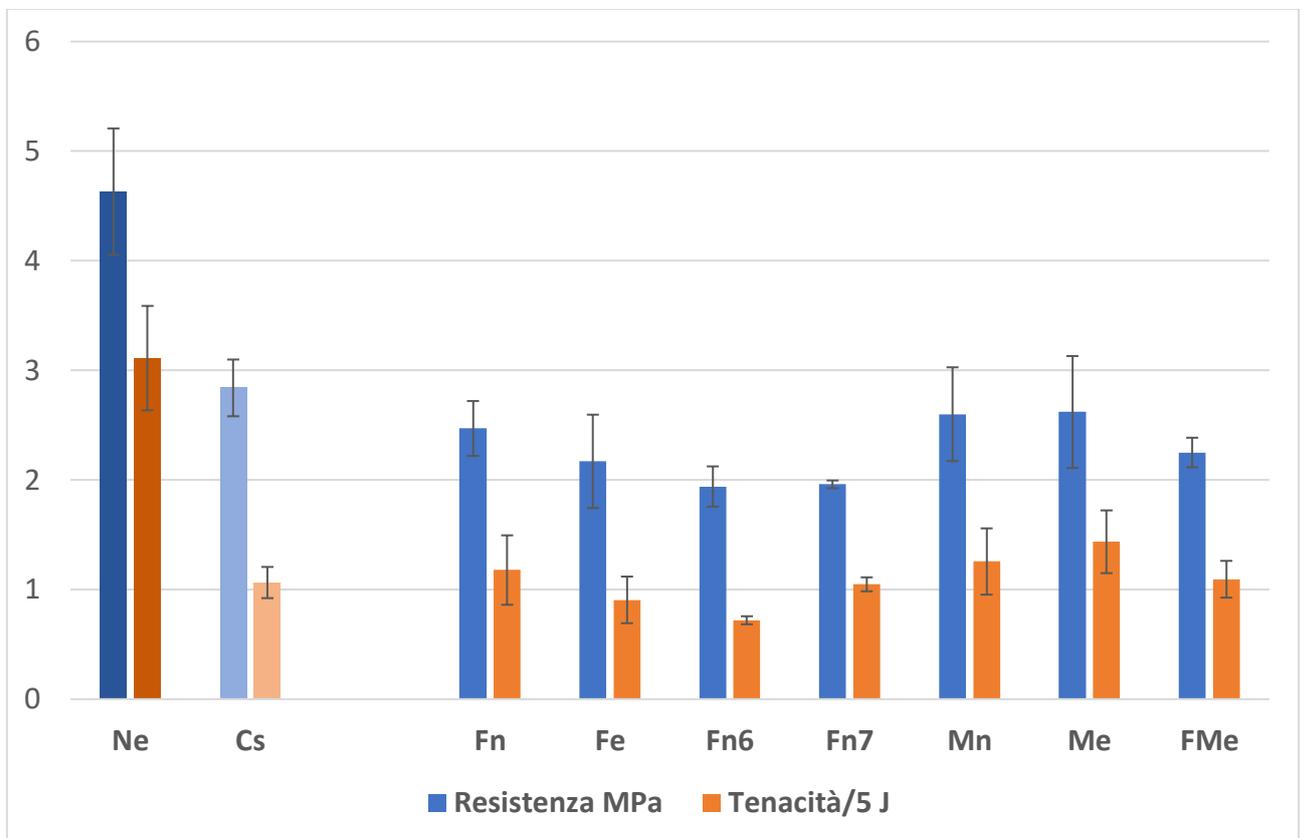


Figura [47]: resistenza e tenacità di provini con granulato di gomma, fine e medio, non trattato

Considerazioni:

Il campione con granulato medio al 15 % **Me**, è il migliore del gruppo; ha una prestazione simile al massetto pronto Centro Storico **Cs**.

Il confronto tra **Me** ed il campione senza gomma **Ne** vede **Me** inferiore rispettivamente del 77% sulla forza e del 74% sulla tenacità.

Il granulato medio si comporta meglio rispetto al polverino. Il campione misto **FMe** non dà risultati interessanti, così come **Fn6** e **Fn7**.

In questo grafico ed in quelli successivi i campioni **Ne** e **Cs** avranno una colorazione modificata per meglio evidenziare che sono presi come riferimento.

7.1.3 Provini con granulato di gomma fine e medio, stoccato in acqua; Fh'e, FH'e, Mh'e, MH'e, MHe.

Si realizzano cinque malte (figura [48]):

- massetto con polverino, stoccato in acqua per 6 giorni, sabbia edilizia, identificativo **Fh'e** (1.90 MPa – 5.6 J);
- massetto con polverino, stoccato in acqua per 133 giorni, sabbia edilizia, identificativo **FH'e** (2.04 MPa – 4.39 J);
- massetto con granulato medio (15%), stoccato in acqua per 6 giorni, sabbia edilizia, identificativo **Mh'e** (2.57 MPa – 7.27 J);
- massetto con granulato medio (15%), stoccato in acqua per 133 giorni, sabbia edilizia, identificativo **MH'e** (3.87 MPa – 12.34 J);
- massetto con granulato medio (15%), stoccato in acqua per 30 giorni, sabbia edilizia, identificativo **MHe** (3.19 MPa – 9.89 J).

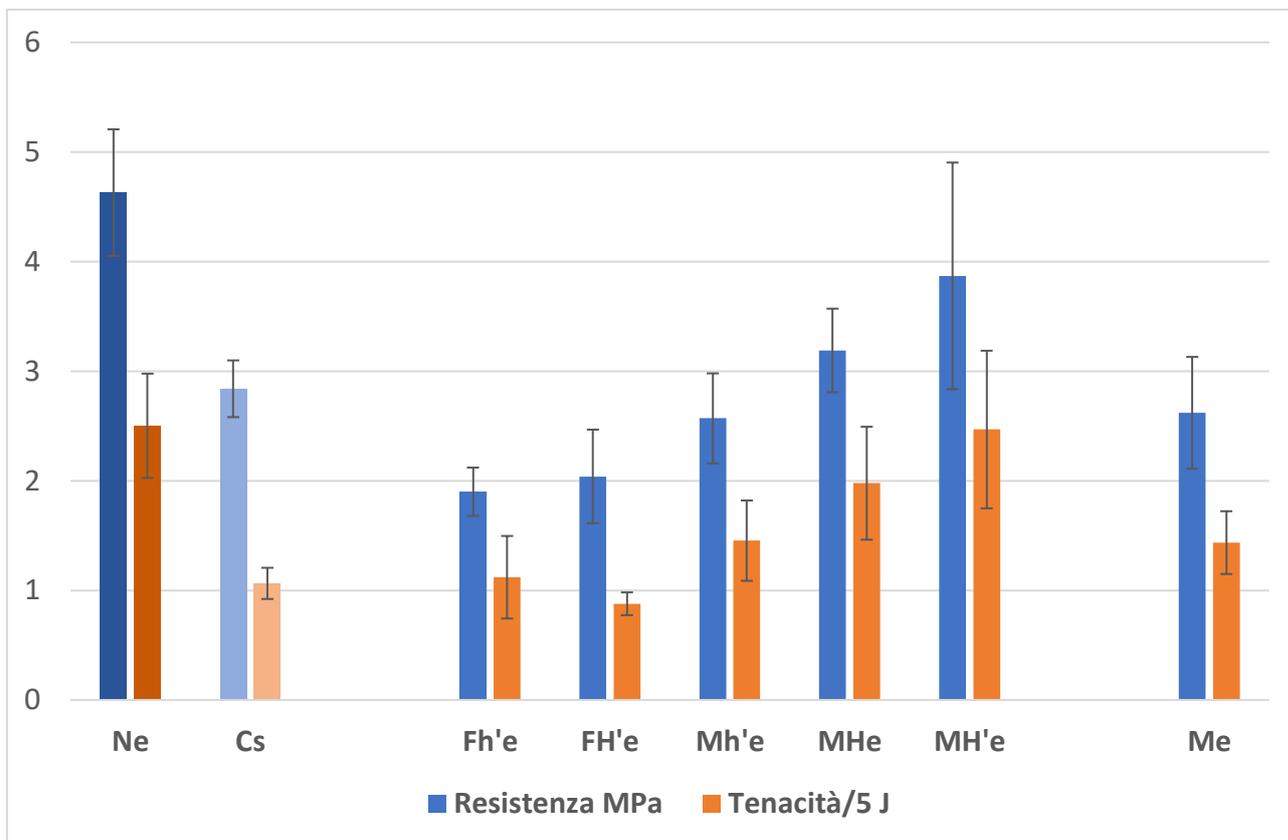


Figura [48]: resistenza e tenacità di provini con granulato di gomma fine e medio, in funzione del tempo di stoccaggio in acqua.

Considerazioni:

Lo stoccaggio in acqua del Pfu da risultati migliorativi alle malte solo per i campioni a 30 e 133 giorni.

MH'e (133 gg.) è il migliore del test: rispetto a **Me** abbiamo un incremento del 48% sulla forza e del 72% sulla tenacità.

Interessante anche **MHe** (30 gg.), che con **MH'e**, si pone nell'intervallo prestazionale tra **Ne** e **Cs**.

Anche qui il granulato medio si comporta meglio rispetto al polverino.

7.1.4 Provini con granulato di gomma fine e medio, trattato chimicamente; FPn, FPe, MPe, MSe.

Si realizzano quattro malte (figura [49]):

- massetto con polverino, trattato piranha (diluito 50%, per 5'), sabbia normalizzata, identificativo **FPn** (0.86 MPa – 1.18 J);

- massetto con polverino, trattato piranha (diluito 50%, per 5'), sabbia edilizia, identificativo **FPe** (0.92 MPa – 1.46 J);
- massetto con granulato medio (15%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), sabbia edilizia, identificativo **MPe** (3.26 MPa – 10.65 J),
- massetto con granulato medio (15%), trattato in NaOH (puro, per 15 minuti), sabbia edilizia, identificativo **MSe** (2.82 MPa – 8.64 J).

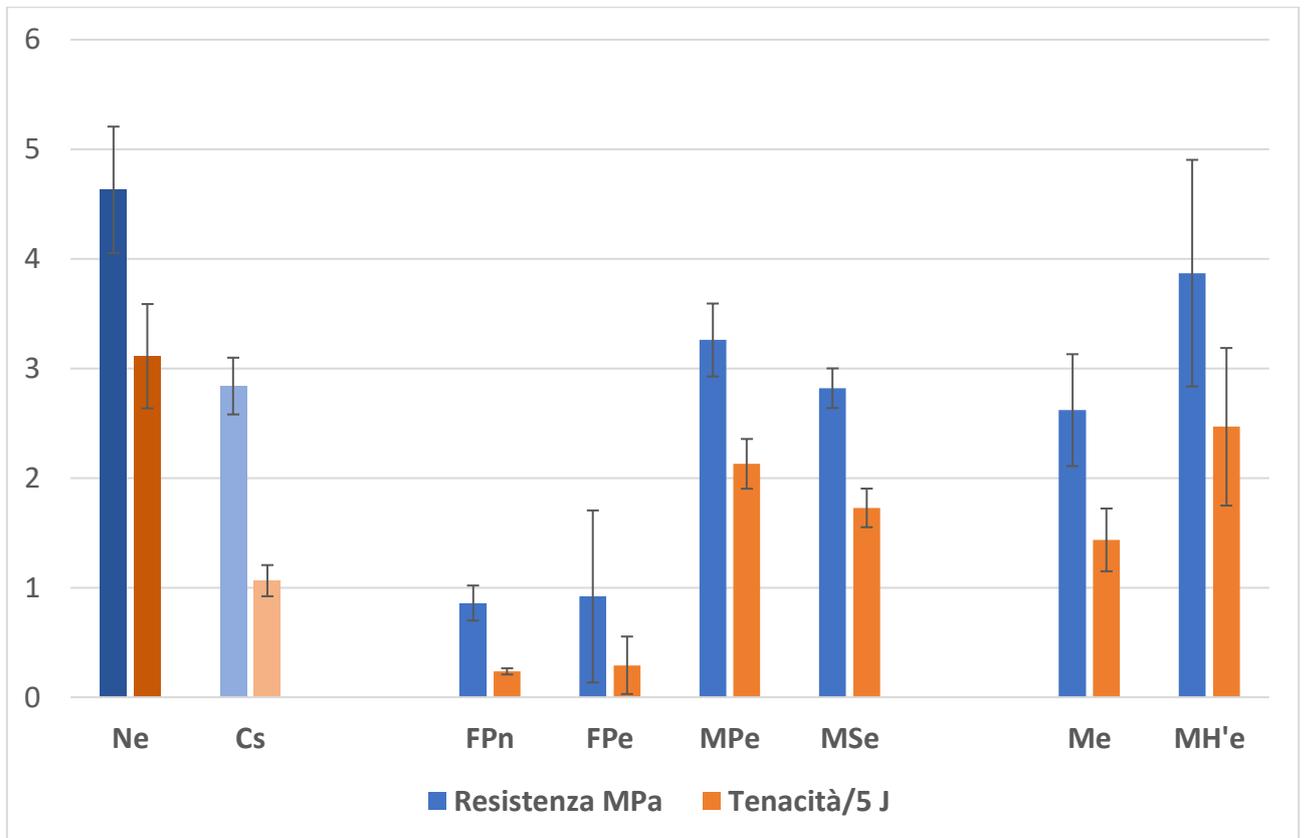


Figura [49], resistenza e tenacità di provini con granulato di gomma fine e medio, trattato chimicamente.

Considerazioni:

I trattamenti chimici sulla gomma danno un moderato incremento di forza e tenacità, segno che la superficie della gomma dopo il trattamento si interfaccia meglio con la pasta cementizia.

MPe, con gomma trattata piranha, è il migliore risultato. Interessante anche il campione **MSe**, trattato idrossido di sodio.

MH'e rimane migliore di **MPe**, anche considerando la semplicità di esecuzione.

I trattamenti del polverino 0,2 – 0,8 mm danno risultati pessimi, segno che l'attacco corrosivo della soluzione piranha è troppo forte per questo tipo di granulometria.

Il campione **MPe** (3.26 MPa – 10.65 J) non raggiunge **MH'e** (3.87 MPa – 12.34 J) ma migliora in modo apprezzabile **Me** (2.62 MPa – 7.18 J).

7.1.5 Provini con granulato di gomma fine e medio, trattato con lattice adesivo; NLe, FL'e, MLe, FL'e, ML'e, FL''e, ML''e.

Si realizzano sette malte (figura [50]):

- massetto con cemento, acqua, lattice, sabbia edilizia, (rapporto cemento/acqua/lattice: 10/4/1), identificativo **NLe** (2.91 MPa – 7.04 J).
- massetto con cemento, acqua, lattice, sabbia edilizia, (rapporto cemento/acqua/lattice: 10/4/1), polverino 0,2 – 0,8 mm (15%) non trattato, identificativo **FL'e** (1.49 MPa – 3.21 J);
- massetto con cemento, acqua, lattice, sabbia edilizia, (rapporto cemento/acqua/lattice: 10/4/1), granulato 0,8 – 2,5 mm (15%) non trattato, identificativo **MLe** (1.70 MPa – 3.66 J);
- massetto con cemento, acqua, lattice, sabbia edilizia, (rapporto cemento/acqua/lattice: 10/4/1), polverino 0,2 – 0,8 mm (15%), preventivamente immerso nella soluzione acqua/lattice per 3' prima di essere impastato, identificativo **FL'e** (1.11 MPa – 1.81 J);
- massetto con cemento, acqua, lattice, sabbia edilizia, (rapporto cemento/acqua/lattice: 10/4/1), granulato 0,8 – 2,5 mm (15%), preventivamente immerso nella soluzione acqua/lattice per 3' prima di essere impastato, identificativo **ML'e** (0.82 MPa – 1.54 J);
- massetto con cemento, acqua, lattice, sabbia edilizia, (rapporto cemento/acqua/lattice: 10/4/1), polverino 0,2 – 0,8 mm (15%), preventivamente immerso nella soluzione acqua/lattice per 3' e lasciato poi asciugare per 30', identificativo **FL''e** (1.13 MPa – 1.87 J);
- massetto con cemento, acqua, lattice, sabbia edilizia, (rapporto cemento/acqua/lattice: 10/4/1), granulato 0,8 – 2,5 mm (15%), preventivamente immerso nella soluzione acqua/lattice per 3' e lasciato poi asciugare per 30', identificativo **ML''e** (2.93 MPa – 7.08 J).

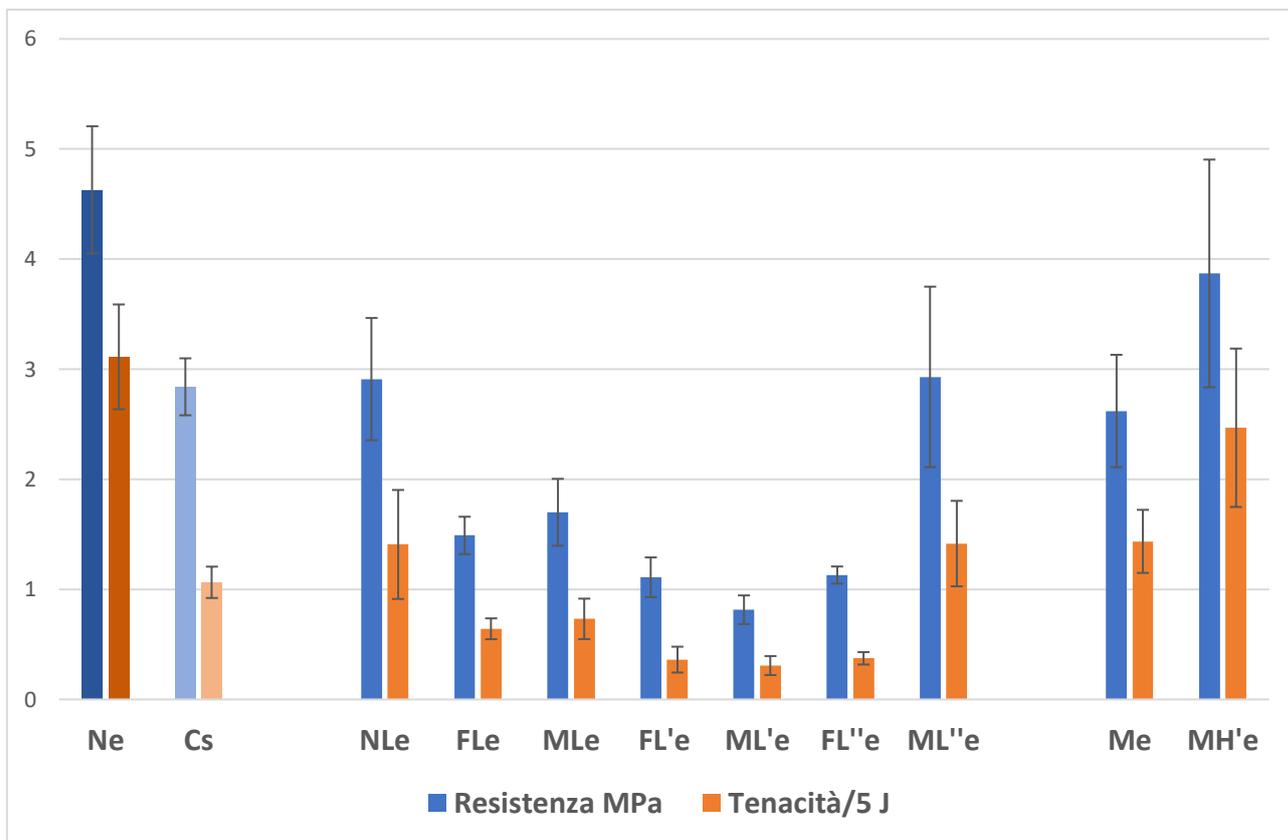


Figura [50], provini con granulato di gomma fine e medio, trattato con lattice adesivo.

Considerazioni:

L'aggiunta di lattice ai provini determina un generale peggioramento della resistenza a flessione e della tenacità.

Il miglior risultato è **ML''e** quasi analogo alla performance del provino con gomma non trattata **Me**.

Alla luce dei risultati peggiorativi del test, si decide di abbandonare l'uso del lattice nei provini di massetto.

7.1.6 Provini, con granulato di gomma medio non trattato, fibrorinforzati; Nfe, NFe, Mfe, MFe, Nce, Mce.

Visti i riscontri positivi nell'uso delle fibre nel calcestruzzo, si decide di utilizzarle nella composizione dei nostri provini di massetto.

Ben disperse nel manufatto e orientate un po' in tutte le direzioni, le fibre creano una specie di continuità strutturale, che contrasta la propagazione delle fessure dovute sia al ritiro igrometrico sia alle sollecitazioni di esercizio, dopo la prima fessurazione.

L'utilizzo di fibre già disperse nel massetto presenta dei benefici poiché può evitare la posa delle armature metalliche in acciaio.

Si decide di provare ad aggiungere fibre ai provini di massetto, utilizzando le medesime fibre che troviamo nel prodotto commerciale Leca Centro Storico, ovvero sia fibre polimeriche di 19 mm di lunghezza, sia fibre di Carbonio più corte, trattate in soluzione piranha.

Si realizzano sei malte (figura [51]):

- massetto con sabbia da edilizia e cemento, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, identificativo **Nfe** (5.51 MPa – 19.57 J);
- massetto con sabbia da edilizia e cemento, aggiunta di fibre polimeriche 2% in peso, identificativo **NFe** (4.53 MPa – 32.25 J);
- massetto con granulato medio (15%), non trattato, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **Mfe** (3.92 MPa – 14.90 J);
- massetto con granulato medio (15%), non trattato, aggiunta di fibre polimeriche 2% in peso, sabbia edilizia, identificativo **MFe** (3.64 MPa – 15.03 J). Di questa malta è stato testato un solo provino;
- massetto con sabbia da edilizia e cemento, aggiunta di fibre di carbonio trattate piranha (pura, per 30'), 1% in peso, identificativo **Nce** (3.15 MPa – 15.03 J);
- massetto con granulato medio (15%), non trattato, aggiunta di fibre carbonio trattate piranha (pura, per 30'), 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **Mce** (2.12 MPa – 7.13 J);

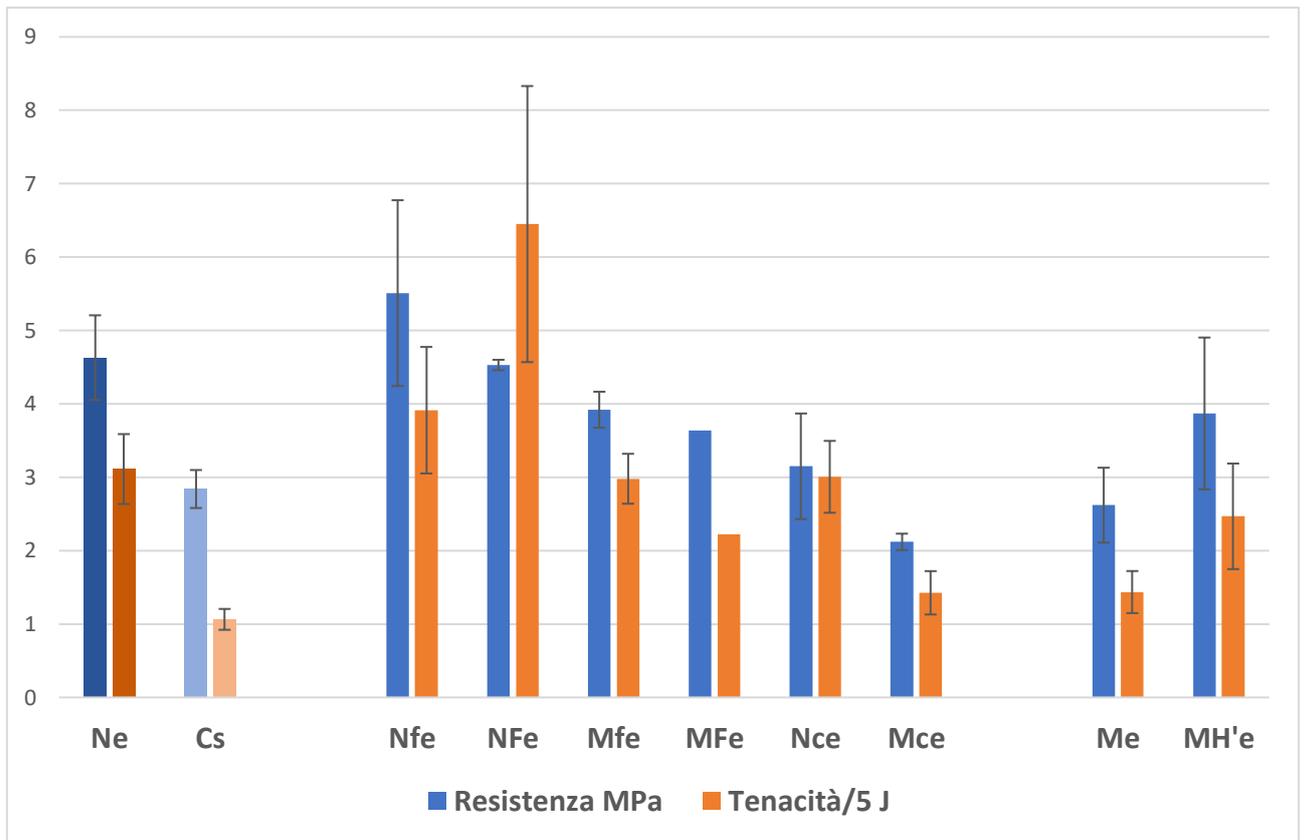


Figura [51], provini, con granulato di gomma medio non trattato, fibrorinforzati.

Considerazioni:

Aggiungere fibre polimeriche risulta molto vantaggioso sia in termini prestazionali sia per il rapporto costi/benefici.

La serie **Nfe** (fibre al 1%) vede incrementare, rispetto al neutro **Ne**, la resistenza a flessione del 19% e la tenacità del 56%.

In **Mfe** (3.92 MPa – 14.90 J) rispetto a **Me** (2.62 MPa – 7.18 J) aumenta la resistenza a flessione del 49% e la tenacità del 208%.

Mfe e **MH'e** sono simili ma il primo è migliore in funzione del rapporto costi/benefici.

Complessivamente sembra non significativo aumentare la percentuale di fibre dal 1% al 2%.

L'aggiunta di fibre di carbonio alla miscela, invece delle fibre polimeriche, porta ad un peggioramento dei risultati.

7.1.7 Provini con granulato di gomma fine e medio, trattamenti combinati; **Fph'n**, **MPh'n**, **MPh'e**, **MSh'n**, **Mh'fe**, **MH'fe**, **Mp'h'fe**, **MPh'fe**.

Si realizzano otto malte (figura [52]):

- massetto con polverino, trattato piranha (diluito 1%, per 7gg), stoccato in acqua per 6 gg, sabbia normalizzata, identificativo **Fph'n** (2.75 MPa – 4.79 J);
- massetto con granulato medio (15%), trattato piranha (50%, per 5'), stoccato in acqua per 6 giorni, sabbia normalizzata, identificativo **MPh'n** (3.09 MPa – 7.55J);
- massetto con granulato medio (15%), trattato piranha (50%, per 5'), stoccato in acqua per 6 giorni, sabbia edilizia, identificativo **MPh'e** (3.48 MPa – 11.16 J);
- massetto con granulato medio (15%), trattato NaOH (puro, per 15'), stoccato in acqua per 6 giorni, sabbia normalizzata, identificativo **MSh'n** (2.07 MPa – 5.89 J);
- massetto con granulato medio (15%), stoccato in acqua per 6 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **Mh'fe** (2.86 MPa – 7.27 J);
- massetto con granulato medio (15%), stoccato in acqua per 133 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **MH'fe** (2.68 MPa – 10.18 J);
- massetto con granulato medio trattato in soluzione piranha (15%, per 30') e successivamente stoccato in acqua per 6 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **Mp'h'fe** (3,94 MPa – 13.50 J);
- massetto con granulato medio (15%), trattato in soluzione piranha (50%, per 5') e successivamente stoccato in acqua per 6 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **MPh'fe** (4.77 MPa – 13.78 J).

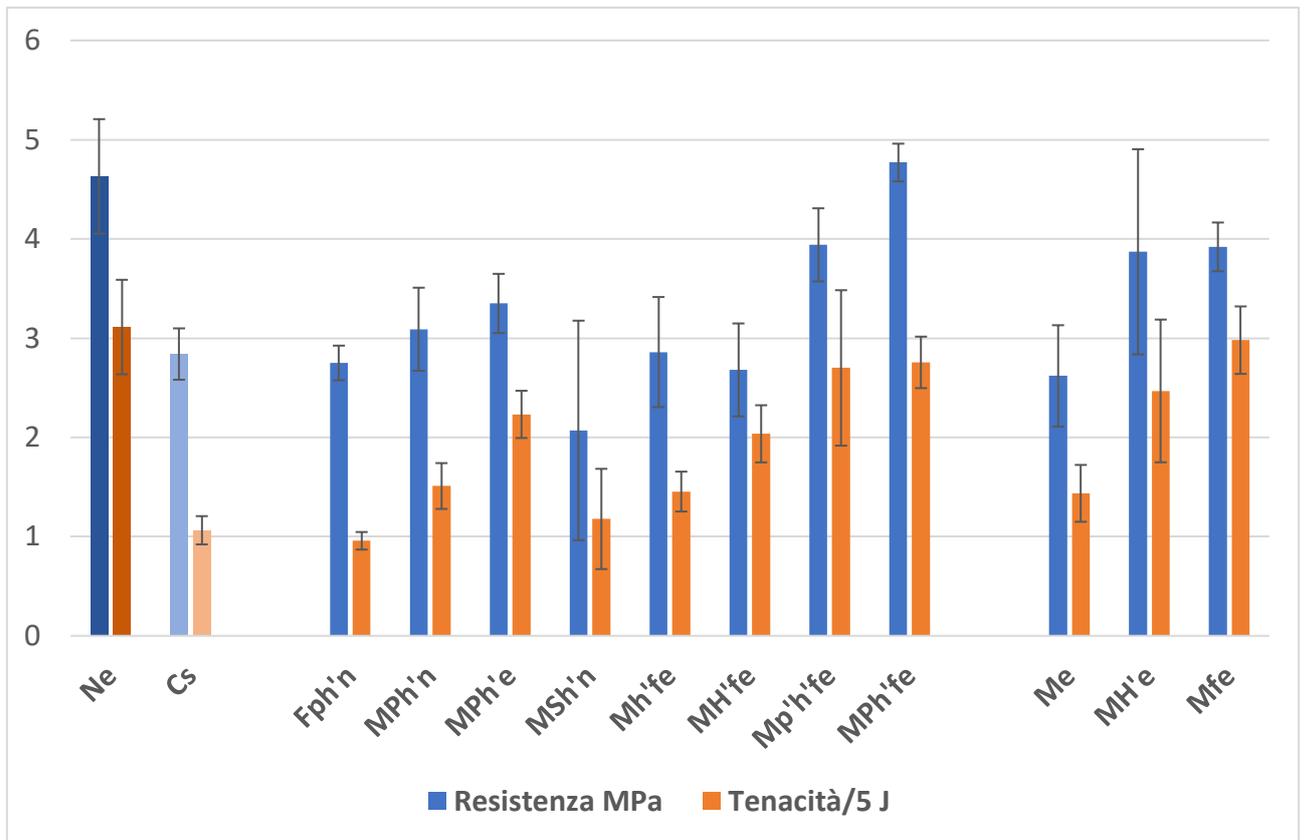


Figura [52], provini con granulato di gomma fine e medio, trattamenti combinati.

Considerazioni:

I trattamenti combinati, seppure complessi nella loro realizzazione, danno ottimi risultati dal punto di vista delle performance di resistenza e tenacità.

MPh'fe, in cui si sommano il trattamento piranha con quello in acqua e l'aggiunta di fibre, è il migliore del test; questa malta con i 15% di gomma da Pfu supera leggermente la prestazione del provino senza gomma **Ne**.

Solo con l'aggiunta delle fibre polimeriche si ottiene questa performance, infatti i trattamenti combinati senza fibre in **MPh'e** non gli consentono di superare il "più semplice" **Mfe**.

Anche il trattamento in acqua nei campioni **Mh'fe** e **MH'fe** peggiora il risultato rispetto a **Mfe**.

Il campione **MPh'e** non migliora i risultati di **MPe** ma solo di **Mh'e**.

I trattamenti combinati sul polverino 0,2 – 0,8 mm, tipo **FSh'e**, vedono incrementi poco significativi rispetto al campione non trattato **Fe**. Il confronto con il granulato medio 0,8 – 2,5 mm vede il polverino sempre meno performante. Si cessa di utilizzare il polverino fine 0,2 – 0,8 mm, utilizzando solo più granulato.

7.2 Provini con cemento in classe G e gomma da Pfu in sostituzione della sabbia al 30% in volume

7.2.1 Provini con granulato di gomma medio, trattamenti combinati; M'e, M'H'e, M'Pe, M'fe, M'H'fe, M'ce, M'Pce.

Si realizzano sette malte (figura [53]):

- massetto con granulato medio (30%), sabbia edilizia, identificativo **M'e** (1,59 MPa – 5.51 J);
- massetto con granulato medio (30%), stoccato in acqua per 133 giorni, sabbia edilizia, identificativo **M'H'e** (1,48 MPa – 4.07 J);
- massetto con granulato medio (30%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), sabbia edilizia, identificativo **M'Pe** (2,30 MPa – 8.29 J);
- massetto con granulato medio (30%), non trattato, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **M'fe** (2.33 MPa – 17.37 J);
- massetto con granulato medio (30%), stoccato in acqua per 133 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **M'H'fe** (1,89 MPa – 6.77 J);
- massetto con granulato medio (30%), non trattato, aggiunta di fibre carbonio trattate piranha (pura, per 30'), 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **M'ce** (2.14 MPa – 13.98 J);
- massetto con granulato medio (30%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), aggiunta di fibre carbonio trattate piranha (pura, per 30'), sabbia edilizia, identificativo **M'Pce** (2.47 MPa – 12.27 J).

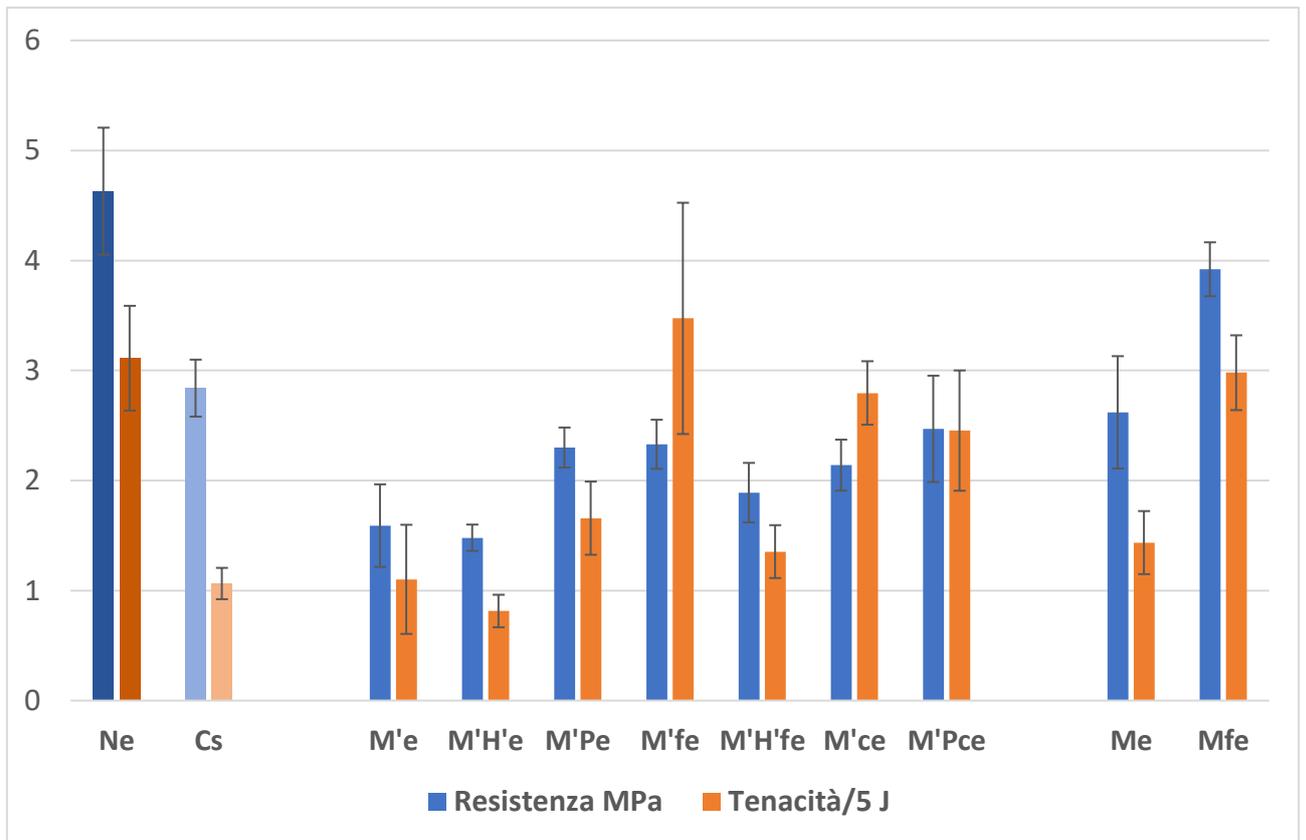


Figura [53], provini con granulato di gomma medio, trattamenti combinati.

Considerazioni:

Con il 30% di gomma le performance delle malte calano sensibilmente.

M'e rispetto a **Me** perde il 65% di forza e il 30% di tenacità.

Anche aggiungendo le fibre, **M'fe** (il migliore del test), possiede una tenacità elevata ma non raggiunge la forza né di **Cs** né di **Me**.

Il trattamento con soluzione piranha continua a dare riscontri positivi rispetto alla gomma non trattata. Le fibre di carbonio non danno vantaggi rispetto a quelle polimeriche.

Viene scelto di utilizzare, per i test successivi, solo le fibre polimeriche in rapporto 1% sul peso dell'impasto.

7.3 Provini con cemento Portland Tipo II/B-LL 32.5 R e gomma da Pfu in sostituzione della sabbia al 15%, 30%, 50% in volume

7.3.1 Provini con granulato di gomma medio, trattamenti combinati; **Ne_28**, **Cs**, **MH'e_28**, **MPe_28**, **Mfe_28**, **Mhfe_28**, **Mh'fe_28**, **MH'fe_28**, **MPfe_28**, **MPhfe_28**, **MPh'fe_28**, **M'e_28**, **M'Pe_28**, **M'fe_28**, **M'Pfe_28**, **M'Ph'fe_28**, **M''e_28**, **M''fe_28**, **M''Pfe_28**, **M''Ph'fe_28**.

Si realizzano nove malte con Pfu al 15% (figura [54]):

- Massetto di cemento portland 32.5 R con sabbia da edilizia, identificativo **Ne_28** (4.37 MPa – 16.25 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), stoccato in acqua per 6 giorni, sabbia edilizia, identificativo **MH'e_28** (3.43 MPa – 13.30 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), sabbia edilizia, identificativo **MPe_28** (4.41 MPa – 18.1 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), non trattato, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **Mfe_28** (4.11 MPa – 16.38 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), stoccato in acqua per 1 giorno, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **Mhfe_28** (3.33 MPa – 18.55 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), stoccato in acqua per 6 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **Mh'fe_28** (3.54 MPa – 20.35 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), stoccato in acqua per 133 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **MH'fe_28** (3.58 MPa – 16.3 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **MPfe_28** (3.60 MPa – 19.88 J);

- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), stoccato in acqua per 1 giorno, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **MPhfe_28** (3.33 MPa – 27.03 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), stoccato in acqua per 6 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **MPh'fe_28** (3.27 MPa – 25.27 J).

Si realizzano cinque malte con Pfu al 30% (figura [53]):

- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (30%), sabbia edilizia, identificativo **M'e_28** (2.41 MPa – 10.54 J),
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (30%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), sabbia edilizia, identificativo **M'Pe_28** (2,53 MPa – 16.4 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (30%), non trattato, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **M'fe_28** (2.28 MPa – 21.63 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (30%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **M'Pfe_28** (3.62 MPa – 29.85 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (30%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), stoccato in acqua per 6 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **M'Ph'fe_28** (2.86 MPa – 21.13 J).

Si realizzano quattro malte con Pfu al 50% (figura [53]):

- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (50%), sabbia edilizia, identificativo **M''e_28** (1.76 MPa – 18.23 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (50%), non trattato, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **M''fe_28** (0.61 MPa – 8.09 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (50%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **M''Pfe_28** (1.21 MPa – 20.1 J);
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (50%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), stoccato in acqua per 6 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **M''Ph'fe_28** (1.39 MPa – 12.03 J).

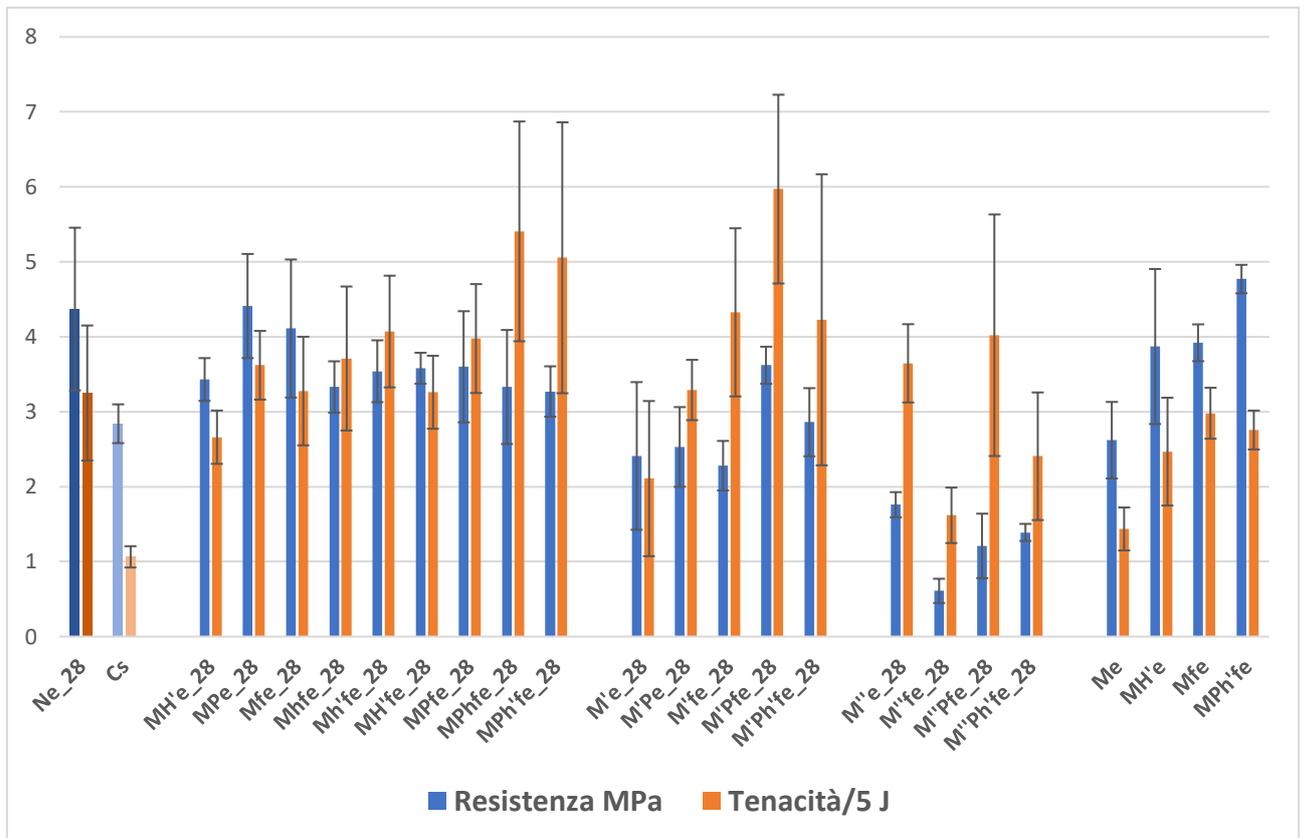


Figura [54], provini con cemento Portland Tipo II/B-LL 32.5 R e gomma da Pfu in sostituzione della sabbia al 15%, 30%, 50% in volume.

Considerazioni:

Si nota un progressivo calo delle prestazioni tra i tre gruppi all'aumentare della percentuale della gomma nell'impasto (15%, 30%, 50% in volume).

Il migliore del test è **MPe_28** (gomma trattata piranha) che supera leggermente la malta senza gomma **Ne_28**.

Nel gruppo "15%" si evidenzia anche **Mfe_28**, seguito da **MH'e_28**, per il rapporto costo/prestazioni e **MPh'fe_28** per la tenacità elevata.

In questo gruppo le differenze tra le malte non sono marcate, ad eccezione della tenacità di **M''Pfe_28** e **M''Ph'fe_28**.

Nel gruppo "30%" **M'Pfe_28** (trattamento piranha e fibre 1%) è il più significativo; la sua ottima prestazione lo pone in condizione di essere utilizzato per massetti interni con rivestimenti ceramici con una forza che si pone tra **Ne_28** e **Cs**, ma con una tenacità quasi doppia rispetto a **Ne_28**.

Nel gruppo "50%" nessuna malta raggiunge prestazioni accettabili.

In generale effettuare trattamenti combinati da risultati solo sulla tenacità.

7.4 Confronto generale tra tutte le malte realizzate, resistenza e tenacità

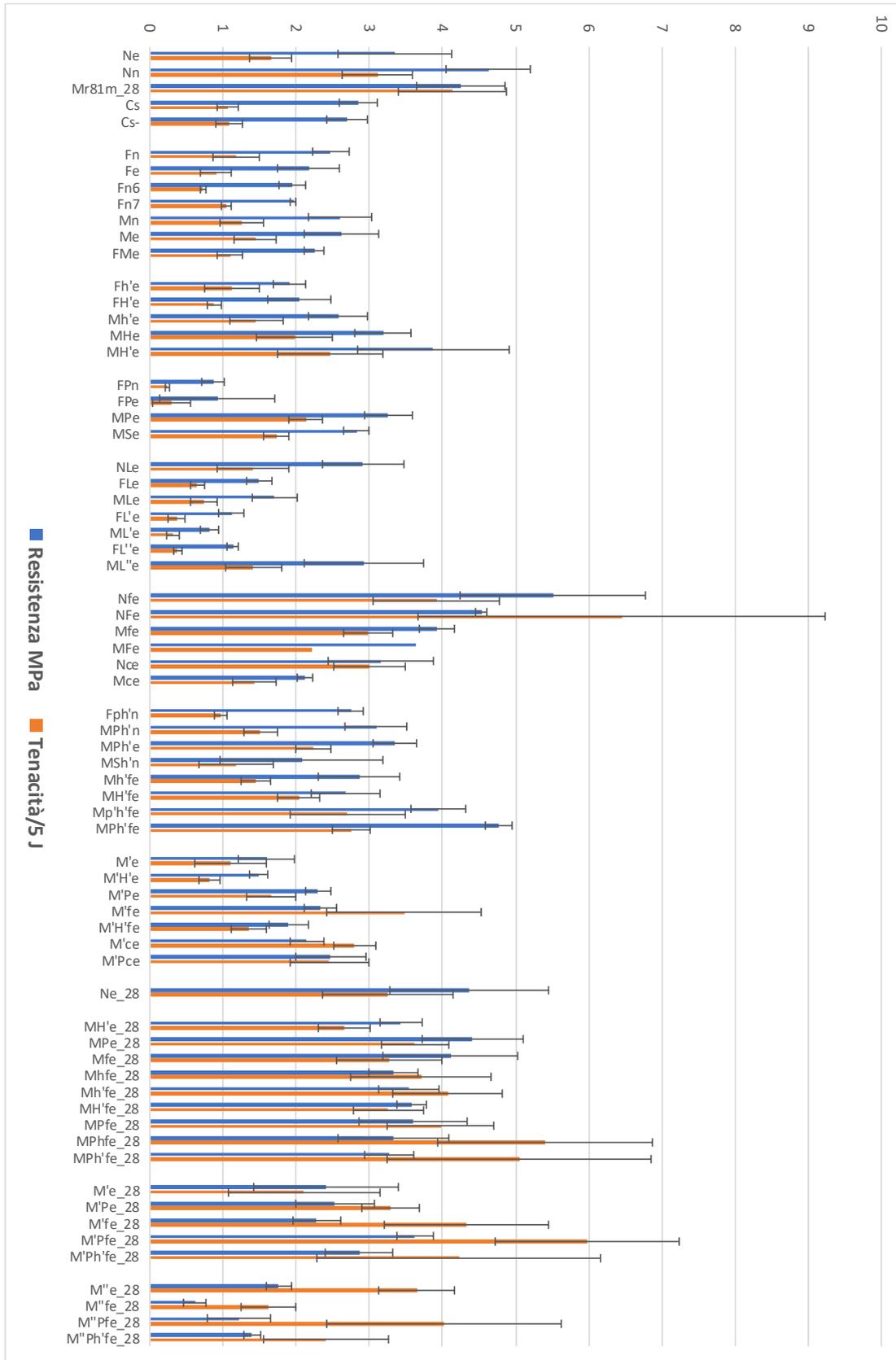


Figura [55], confronto generale tra tutte le malte realizzate, resistenza e tenacità.

7.5 Confronto generale tra tutte le malte realizzate, resistenza

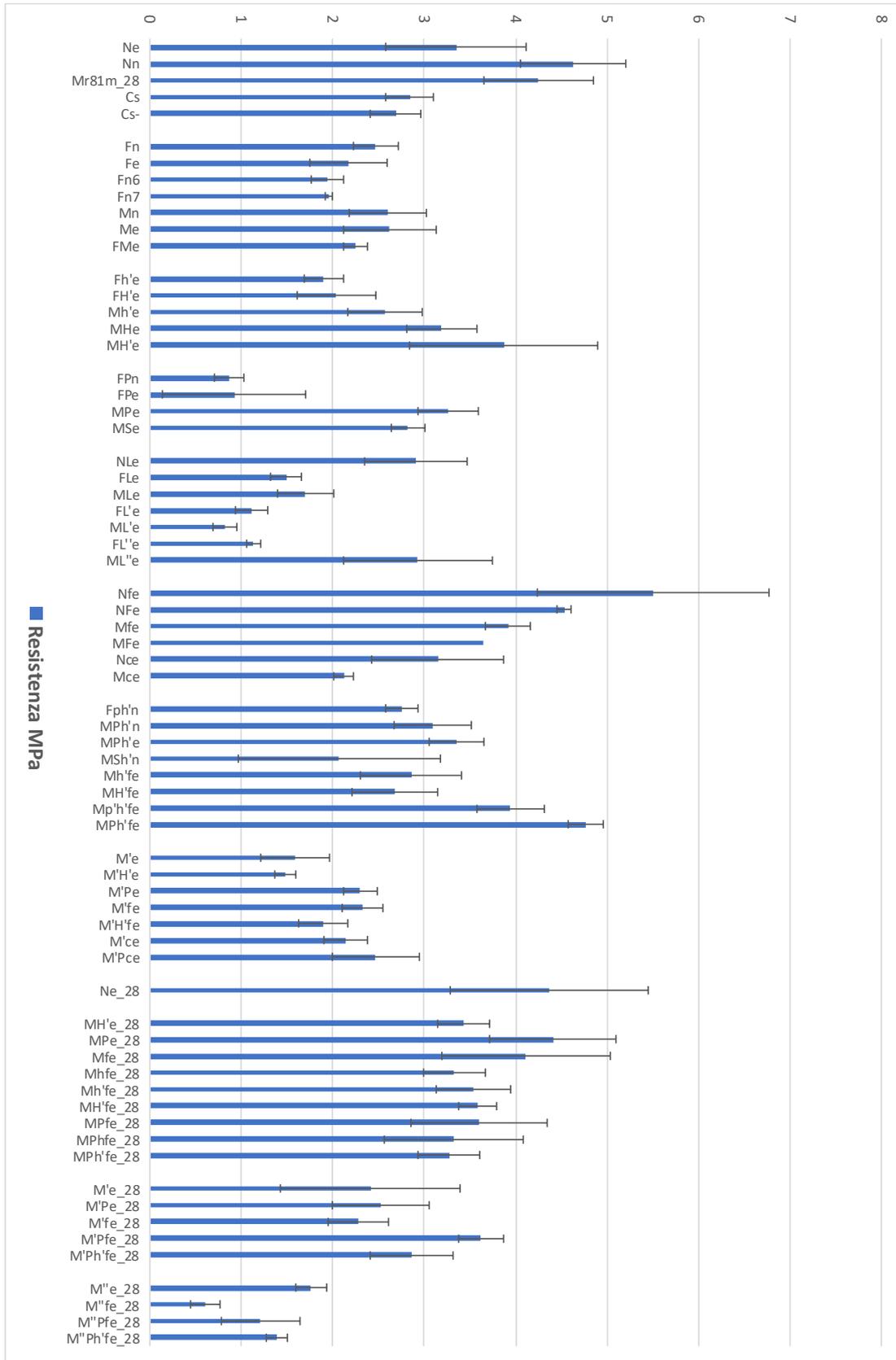


Figura [56], confronto generale tra tutte le malte realizzate, resistenza.

7.6 Confronto generale tra tutte le malte realizzate, tenacità

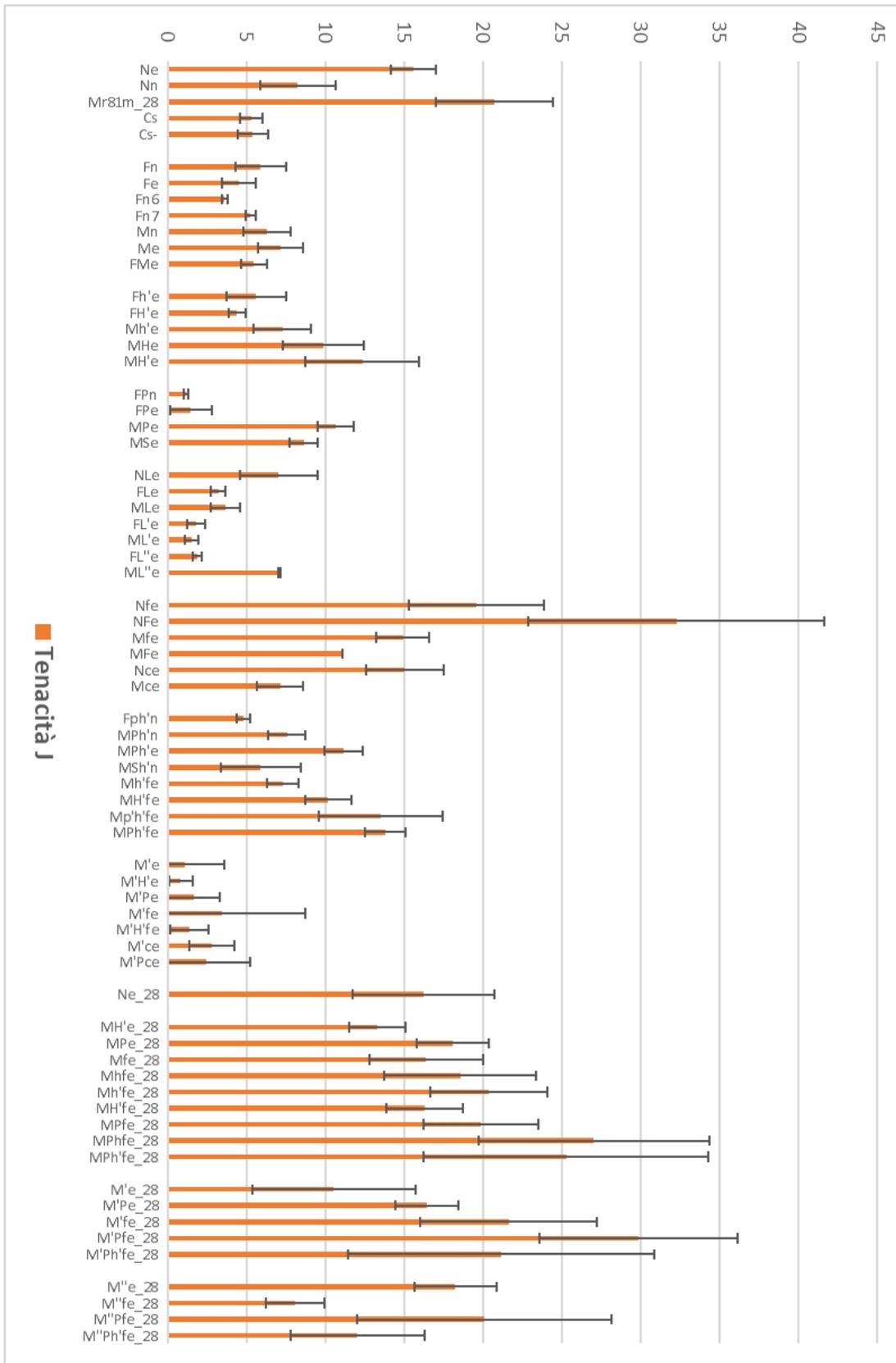


Figura [57], confronto generale tra tutte le malte realizzate, tenacità.

8 La prova acustica

Viene effettuato un tentativo per capire la performance acustica di alcune malte da massetto realizzate in questa tesi.

I provini di massetto testati sono:

- massetto di cemento portland 32.5 R con sabbia da edilizia, identificativo **Ne_28**;
- massetto pronto Weber Mr 81 metal, identificativo **Mr81m**;
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), trattato piranha (diluito 50 %, per 5'), stoccato in acqua per 6 giorni, aggiunta di fibre polimeriche 1% in peso, sabbia edilizia, identificativo **MPh'fe_28**;
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (15%), sabbia edilizia, identificativo **Me_28**;
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (30%), sabbia edilizia, identificativo **M'e_28**;
- massetto di cemento portland 32.5 R con granulato medio (50%), sabbia edilizia, identificativo **M''e_28**.

8.1 Lo svolgimento della prova acustica

Abbiamo realizzato un contenitore parallelepipedo in cartongesso, utilizzando una idro-lastra marca Knauff, densità 700 Kg/m^3 , spessa 13 mm, delle dimensioni di 34 x 25 x14 cm.

All'interno viene posizionato un telo in polietilene espanso Isoldrum N di Isolmant, spessore 1 mm circa, per disaccoppiare acusticamente il contenitore dal contenuto, in doppio strato.

Realizziamo quindi uno stato di circa 6 cm di massetto cementizio (con il prodotto Weber Mr81m, densità in opera 2000 Kg/m^3) intorno ad una camera ricavata appositamente al centro del contenitore (figura [58]).



Figura [58], il contenitore per la prova acustica e la camera interna con il microfono.

La camera è suddivisa in due parti: una parte inferiore, in cui è possibile alloggiare un microfono o uno smartphone, disaccoppiati dal fondo da uno strato di 5 mm circa di fibra di poliestere (Isolmant Perfetto TR); una parte superiore in cui si posiziona il provino di massetto da testare.

Il provino da testare (con dimensioni di 18 x 9 x 3 cm), si appoggia ad una piccola cornice interna, su cui è stato applicato del polietilene espanso allo scopo di evitare la trasmissione rigida delle vibrazioni sonore.

Posizionato il provino di massetto, si sigilla la fessura con della fibra di poliestere, pressata all'interno con una lama metallica (figura [59]).



Figura [59], il provino sigillato con la fibra di poliestere.

Il test acustico si svolge facendo cadere sul provino una biglia metallica (di 20 mm di diametro e del peso di 21 g), da un'altezza di circa 10 cm (figura [60]).

Il contenitore poggia su del polietilene espanso, spessore 5 mm.



Figura [60], il distanziale alto circa 10 cm con la biglia metallica.

Il rumore da impatto viene registrato sia con il programma per personal computer Audacity, sia con uno smartphone Android, utilizzando l'applicazione Sound meter Pro versione 2.5.8.

8.2 I risultati della prova acustica con il software Audacity

Nel primo esperimento, con il programma Audacity, si registra il rumore da impatto per mezzo del microfono posizionato nella camera interna, collegato ad un PC.

Nei grafici riportati si sottolinea che il primo picco corrisponde al primo impatto della biglia; gli impatti successivi corrispondono ai successivi rimbalzi della biglia (figura [61], [62], [63], [64], [65], [66]).

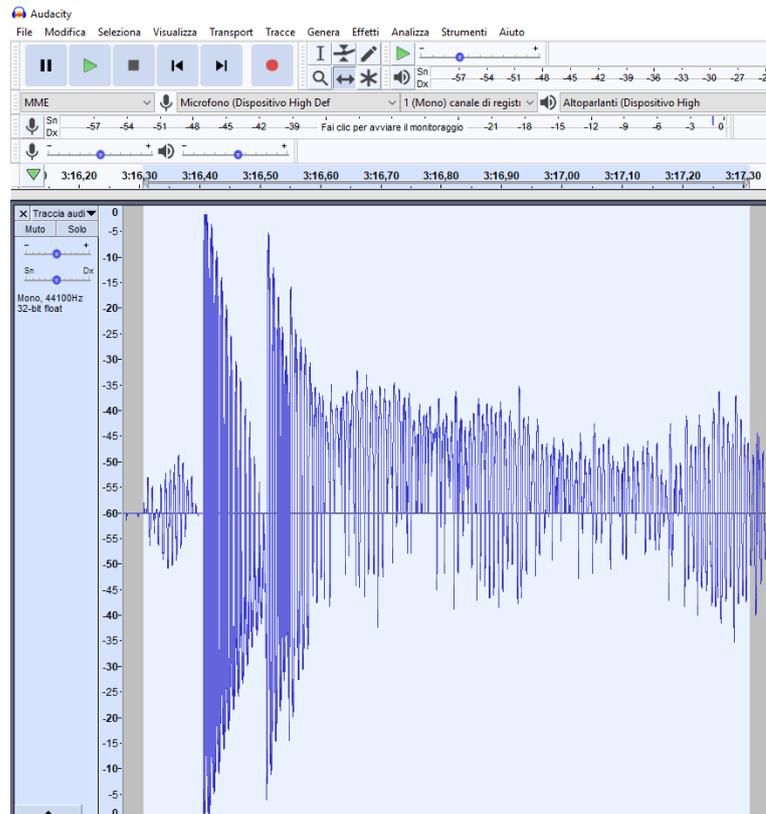


Figura [61], il risultato del test del provino Ne_28.

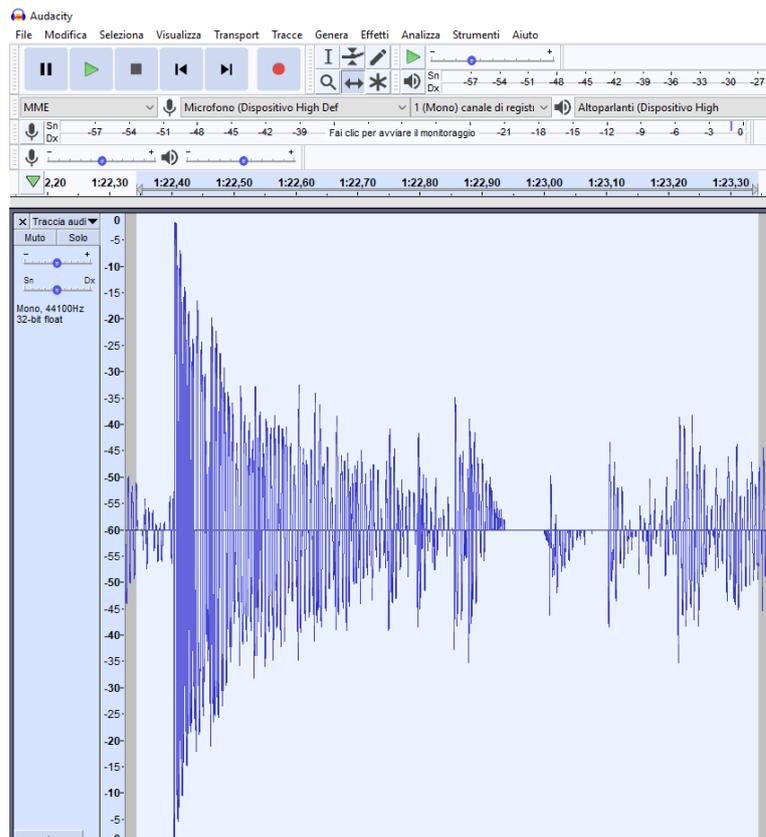


Figura [62], il risultato del test del provino Mr81m.

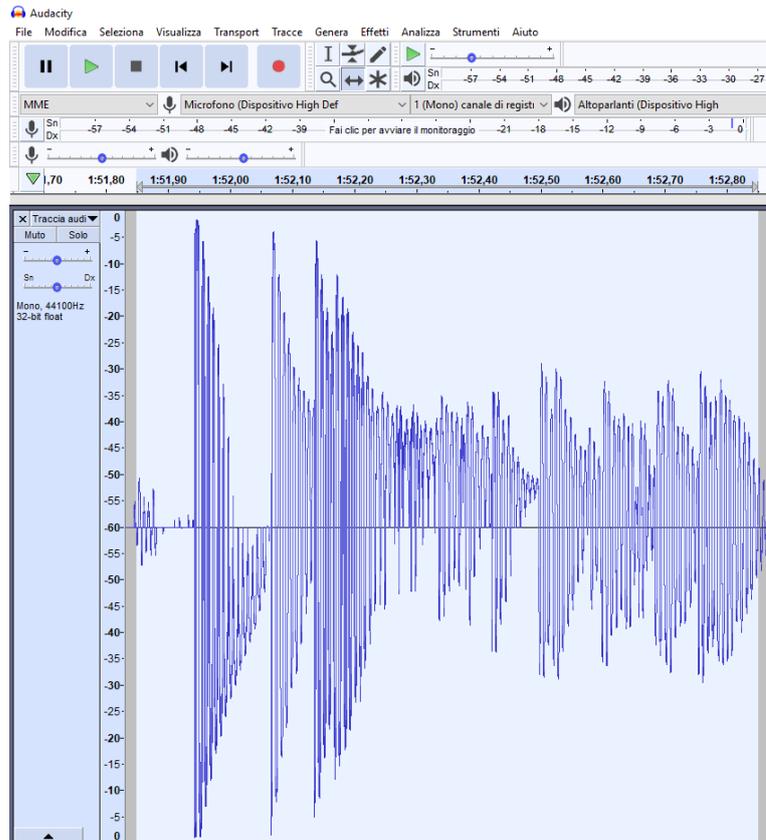


Figura [63], il risultato del test del provino MPh'e_28.

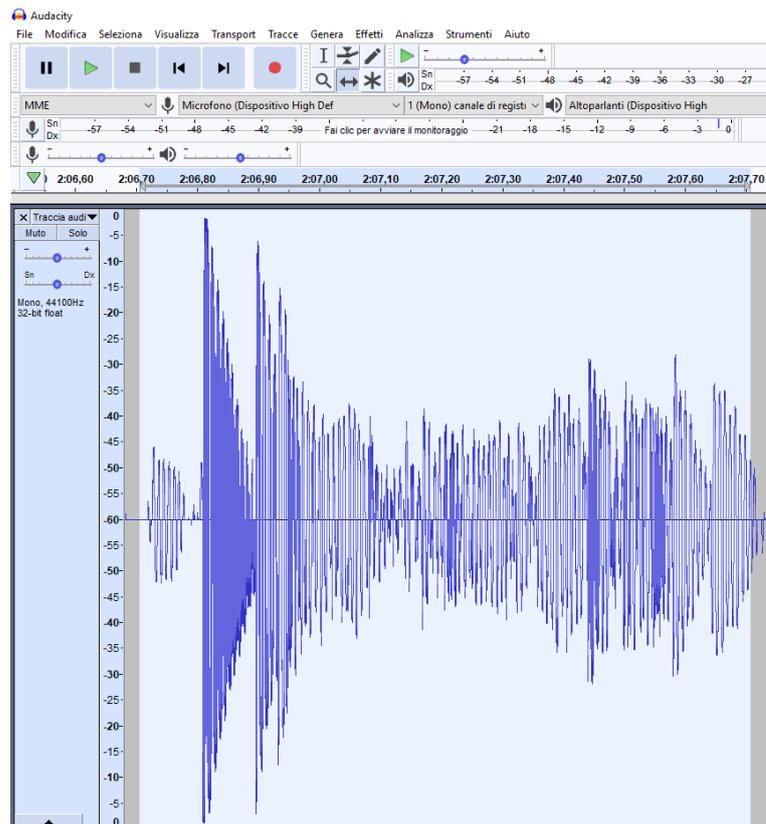


Figura [64], il risultato del test del provino M'e_28.

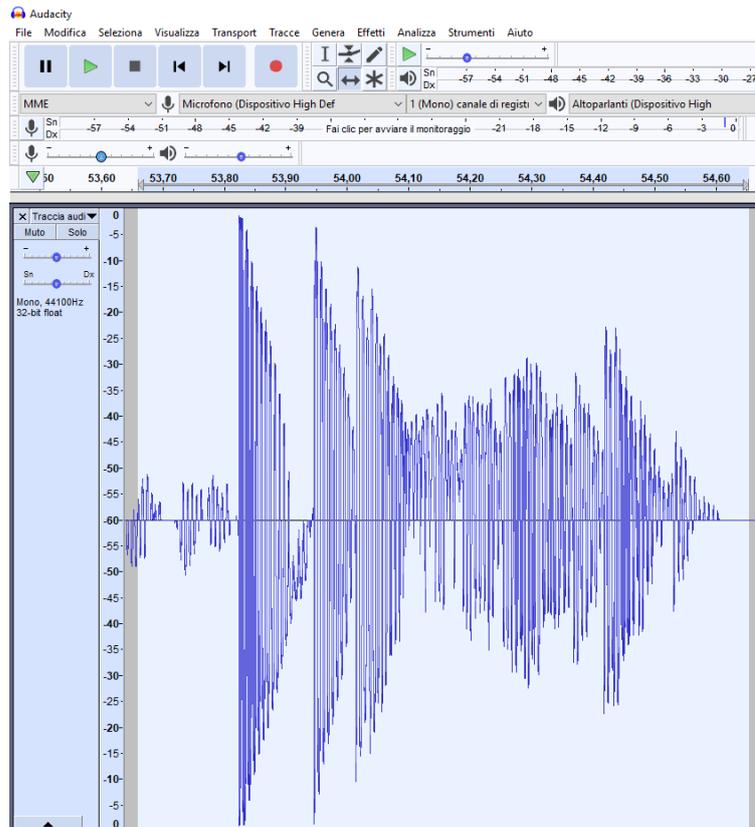


Figura [65], il risultato del test del provino Me_28.

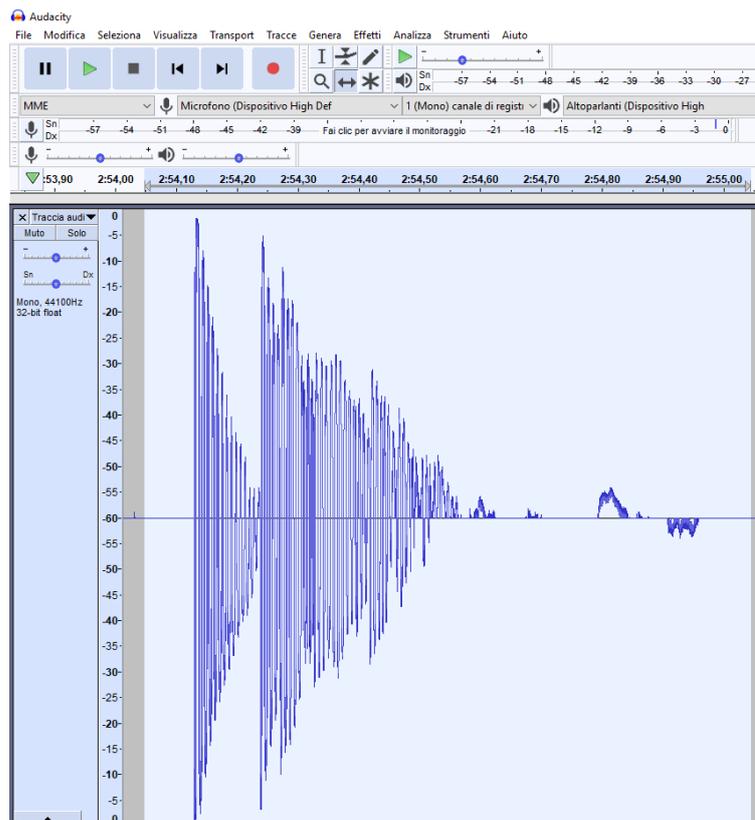


Figura [66], il risultato del test del provino M'e_28.

Considerazioni sul primo test:

non si evidenziano differenze tra i primi picchi dei vari test, tutti prossimi al valore 0 dB.

8.3 I risultati della prova acustica con il software Sound Meter Pro

Nel secondo esperimento si utilizza l'applicazione per smartphone Sound Meter Pro versione 2.5.8.

Si misurano tre impatti consecutivi per ogni campione, evidenziati nell'ovale grigio (figura [67], [68], [69], [70], [71], [72]).

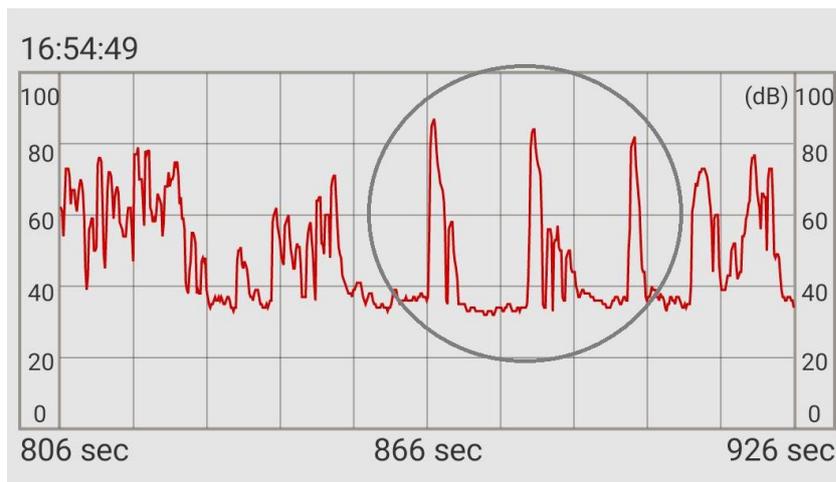


Figura [67], il risultato del test del provino **Ne_28**.

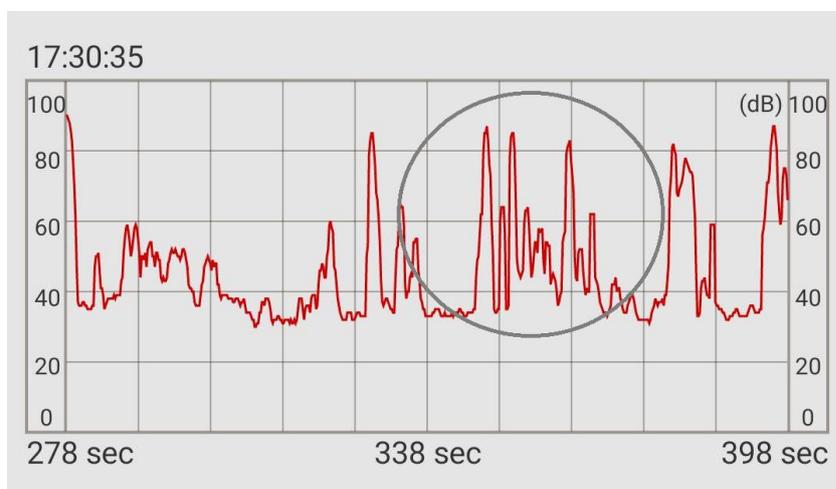


Figura [68], il risultato del test del provino **Mr81m**.

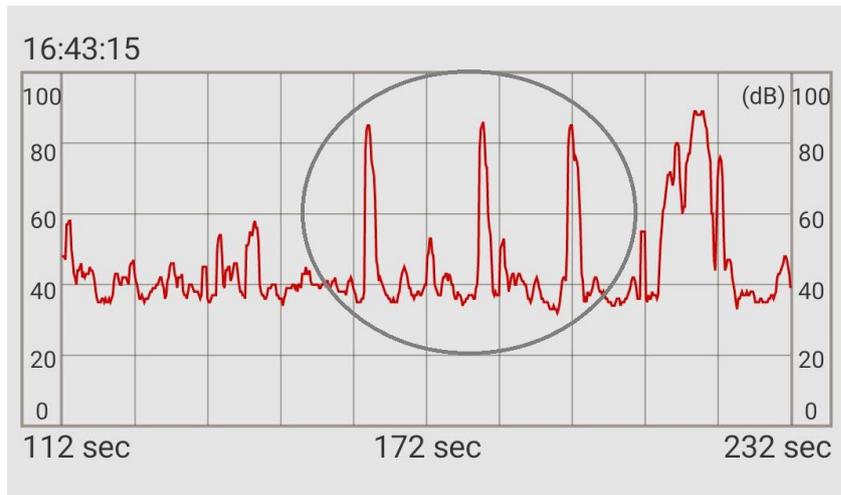


Figura [69], il risultato del test del provino **Me_28**.

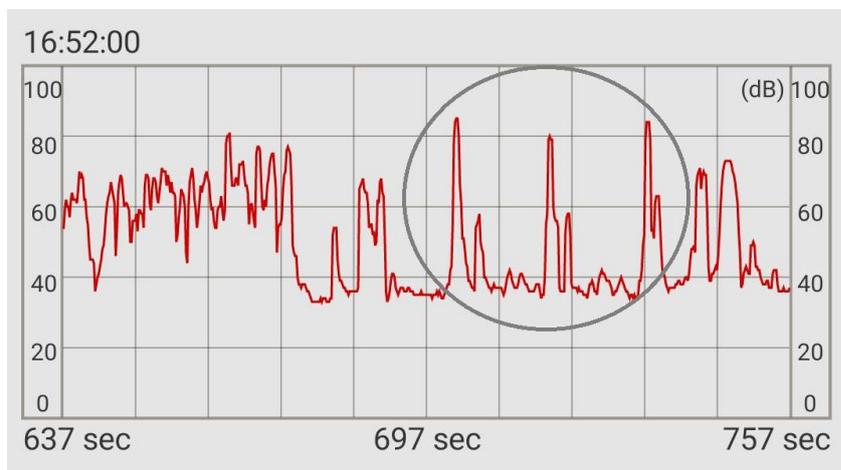


Figura [70], il risultato del test del provino **MPh'e_28**.

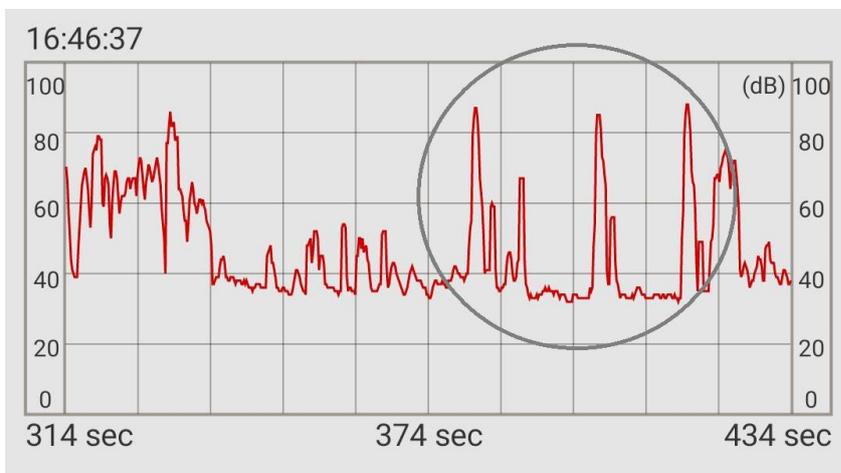


Figura [71], il risultato del test del provino **M'e_28**.

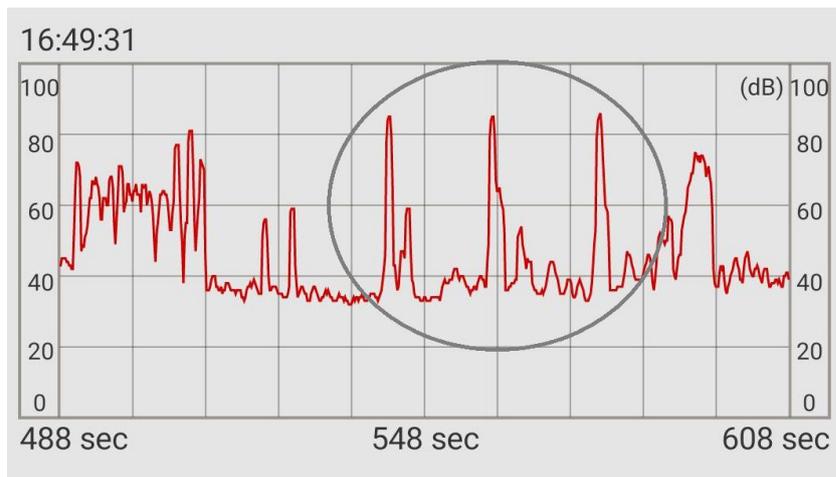


Figura [72], il risultato del test del provino **M''e_28**

Considerazioni:

anche in questo caso non si evidenziano differenze sostanziali. I picchi si posizionano tutti tra gli 80 ed i 90 dB.

8.4 I risultati della prova acustica per sovrapposizione di provini, con il software Sound Meter Pro

Viene effettuato un terzo test in cui si sovrappone il campione **M''e_28** al campione **Mr81m**.

Si realizza una comparazione dei risultati (due impatti consecutivi) (figura [73]):

- sul solo provino **Mr81m**;
- sul provino **Mr81m** con sovrapposizione del provino **M''e_28**, inserendo tra loro uno strato di 3 mm circa di fibra di poliestere.



Figura [73], **M''e_28** sopra **Mr81m**.

In figura [74] il confronto tra primi due impatti (ovale di sinistra) sono con il solo **Mr81m** e i secondi due impatti (ovale di destra) con **M''e_28** sovrapposto a **Mr81m**.

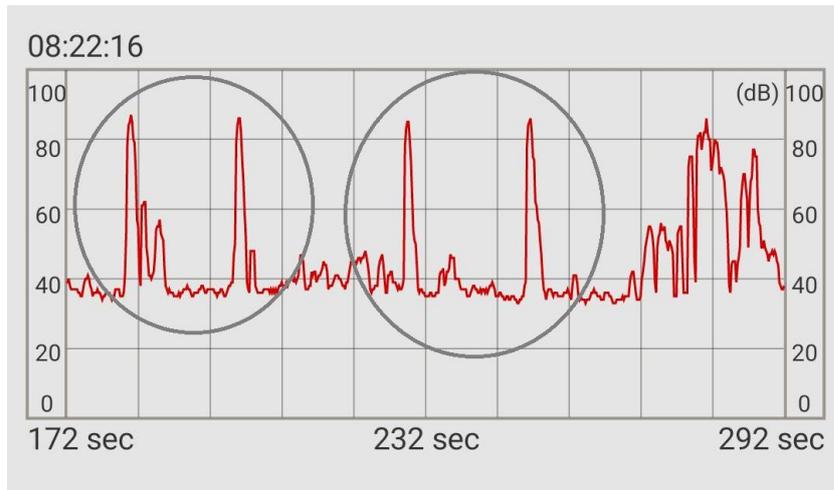


Figura [74], il risultato del test di sovrapposizione.

Considerazioni:

anche in questo caso non ci sono rilevanti differenze apprezzabili tra i due test.

8.5 Considerazioni finali sulla prova acustica

Come anche è accaduto nel lavoro “Lightweight screeds made of concrete and recycled polymers: acoustic, thermal, mechanical and chemical characterization”^[23], anche nel nostro caso la prova acustica su campioni di ridotte dimensioni non si rivela significativa, non evidenziando differenze tra i vari test.

9 Analisi dei costi

9.1 Prezzi industriali di riferimento

- **sabbia** da costruzione: 16 €/t^[41],
densità assoluta: 2600 kg/m³ ^[42], densità apparente in mucchio: 1520 kg/m³;
- **cemento** portland 32.5 R: 100 €/t^[42],
densità assoluta: 3150 kg/m³ ^[43], densità apparente in mucchio: 1400 kg/m³;

- **granulato da Pfu** 0.8 – 2.5 mm: 100 €/t^[29],
densità assoluta: 1150 kg/m³, densità apparente in mucchio: 707 kg/m³;
- **fibre polimeriche** da 20 mm: 10 €/kg^[44];
- **acido solforico** 98%: 200 €/t^[45];
- **perossido di idrogeno** 130 vol.: 500 €/t^[46];
- **idrossido di sodio**: 350 €/t^[47].

9.2 Costi industriali per i trattamenti della gomma da Pfu

A titolo puramente indicativo si ipotizza che i trattamenti sulla gomma, bagni in acqua o in soluzione chimica, possano incidere sul costo della materia prima del 20%, quindi 20 €/t.

A questo costo va sommato il costo dei reagenti chimici necessari. Il costo dell'acqua viene trascurato.

9.3 Costi industriali per le soluzioni utilizzate

Se per trattare 1 m³ di gomma da Pfu (circa 700 kg in mucchio) servono circa 2 m³ di soluzione, i costi ipotizzati per trattamenti sono:

- soluzione piranha diluita al 50%, costo 375 €/m³ o 535 €/t di gomma trattata;
- soluzione piranha diluita al 15%, costo 115 €/m³ o 165 €/t di gomma trattata;
- soluzione piranha diluita al 2%, costo 15 €/m³ o 21 €/t di gomma trattata;
- soluzione piranha diluita al 1%, costo 8 €/m³ o 11 €/t di gomma trattata;
- soluzione satura di idrossido di sodio, costo 140 €/ m³ o 200 €/t di gomma trattata.

Si considera che le soluzioni possono essere parzialmente recuperate e riutilizzate, abbattendo i costi della voce soluzioni del 50%.

9.4 Costi delle malte per massetto; Mr81m_28, Cs, Ne_28, MH'e_28, MPe_28, Mfe_28, MPhfe_28, M'Pfe_28.

Weber plan Mr 81 metal^[49] (Mr81m_28)

Densità in opera: 2000 kg/m³

Costo secco/t.: **115 €**

Leca Centro storico^[48] (Cs)

Densità secco in confezione: 1150 kg/m³.

Densità in opera: 1250 kg/m³

Costo secco/t.: **205 €**

Massetto tradizionale^[50, 51]

Densità secco: 1500-1650 kg/m³.

Densità in opera: 2000-2100 kg/m³

Dosaggio cemento/inerte in mucchio: 300kg/m³.

Dosaggio in peso cemento/inerte: 1:4.6 (350 g: 1600 g)

Costo secco/m³ inerte: Sabbia (1 m³, 1520 kg): 24.3 € + Cemento 300 kg: 30 € = 54.3 €

Costo secco /t.: **29 €**

Massetto Ne_28

Densità secco: 2400 kg/m³.

Dosaggio cemento/inerte: 533kg/m³ di inerte in mucchio

Dosaggio in peso cemento/inerte: 1:3 (96 g:288 g)

Costo secco/m³ inerte: Sabbia (1 m³, 1520 kg): 24.3 € + Cemento 533 kg: 53.3 € = 79.6 €/m³

Costo secco /t.: **39 €**

Massetto Me_28

(con il 15% di Pfu in sostituzione in volume della sabbia)

Densità secco: 2260 kg/m³.

Dosaggio cemento/inerte: 533 kg/m³

Costo secco/m³ inerte: Sabbia (0.85 m³, 1292 kg): 20.7 € + Pfu (0.15 m³, 106 kg): 10.6 € +

Cemento 533 kg: 53.3 € = 84.6 €/m³ inerte

Costo secco /t.: **44 €**

Massetto MH'e_28

(Massetto Me con gomma da Pfu trattata in acqua per 133 giorni)

Costo secco /t.: 44 € + 20 € trattamento = **64 €**

Massetto MPe_28

(Massetto Me con gomma da Pfu trattata in soluzione piranha al 50%)

Costo secco /t.: 44 € + 20 € trattamento + 57/2 € costo soluzione = **93 €**

Massetto Mfe_28

(Massetto Me con aggiunta fibre, 1% in peso)

Costo secco /t.: 44 € + 10 € fibre = **54 €**

Massetto MPhfe_28

(Massetto M'fe con gomma da Pfu trattata in soluzione piranha al 50%)

Costo secco /t.: 44 € + 20 € trattamento + 57/2 € costo soluzione + 10 € fibre = **103 €**

Massetto M'e_28

(con il 30% di Pfu in sostituzione in volume della sabbia)

Densità secco: 2133 kg/m³.

Dosaggio cemento/inerte: 533 kg/m³

Costo secco/m³ inerte: Sabbia (0.7 m³, 1064 kg): 17 € + Pfu (0.3 m³, 212 kg): 21.2€ + Cemento 533 kg: 53.3 € = 91.5 €/m³ inerte

Costo secco /t.: **51 €**

Massetto M'fe_28

(Massetto M'e con aggiunta fibre 1% in peso)

Costo secco /t.: 51 € + 10 € fibre = **61 €**

Massetto M'Pfe_28

(Massetto M'fe con gomma da Pfu trattata in soluzione piranha al 50%)

Costo secco /t.: 51 € + 10 € fibre + 20 € trattamento + 113/2 € costo soluzione = **134 €**

9.5 Stima del rapporto costi/prestazioni acustiche

Massetto tradizionale con tappeto acustico

- Tappetino acustico e fascia tagliamuro (prestazione dichiarata 34 dB), fornitura e posa, pari a 12 €/m²

- Massetto tradizionale sabbia e cemento, fornitura e posa, 16 €/m² (spessore 5-6 cm)

Costo complessivo, con miglioramento dichiarato della prestazione acustica di 34 dB, pari a 28 €/m².

Massetto con gomma da Pfu MH'e_28

- Massetto MH'e_28, fornitura e posa, costo stimato pari a 19 €/m² (spessore 5-6 cm)

- Fascia tagliamuro, fornitura e posa, pari a 1 €/m²

Costo complessivo, con miglioramento dichiarato della prestazione acustica di 18 dB (ipotizzato in base alla tabella [3]^[22], pari a 20 €/m².

10 Riciclaggio del massetto contenente gomma da Pfu

10.1 Riciclaggio dei materiali edili

Il riciclaggio di materiali edili è l'insieme di strategie volte a recuperare materiali provenienti da attività di costruzione e demolizione (C&D) e reimpiegarli nel settore delle costruzioni evitando di smaltirli in altro modo^[52, 53].

10.2 Normativa italiana

Il Decreto Ronchi del 1997 (D.L. 5/02/97 abrogato dall'art. 264, c. 1, lett. i del D.Lgs. n. 152 del 3 aprile 2006 che ne ricalca le linee), offre per la prima volta un quadro organico sulla normativa di questo settore, prevedendo precisi obblighi di indirizzo, di pianificazione e di attuazione della politica di gestione dei rifiuti. Con il Decreto Ronchi, che si muove in linea con le direttive dell'Unione Europea le ditte operatrici nel settore della demolizione sono obbligate a compilare formulari di identificazione dei rifiuti. Lo scopo è quello di prevenire e ridurre la produzione dei rifiuti, valorizzare gli scarti attraverso il recupero, diminuire la quantità dei rifiuti smaltiti in discarica ed incrementare la raccolta differenziata per garantire l'alta qualità del recupero.

La Direttiva 2008/98/CE, recepita a livello nazionale (il Decreto Legislativo n. 205/2010 ha recepito la Direttiva 2008/98/CE), che prevede che nel 2020 si raggiunga un obiettivo pari al 70% del riciclo dei rifiuti da costruzione e demolizione^[54].

10.3 I rifiuti in edilizia e la loro classificazione

Attraverso il trattamento dei rifiuti provenienti dalle attività di costruzione e demolizione si ottengono aggregati riciclati destinati ad essere nuovamente impiegati nel campo delle costruzioni. Tali prodotti devono rispondere ai requisiti di accettazione previsti dalle norme vigenti in materia tecnica, ambientale e di idoneità all'utilizzo, in base al tipo di prodotto e destinazione (opere edili e stradali, recuperi ambientali, materiali costituenti di altri prodotti).

Tra i principali rifiuti si annoverano le seguenti tipologie: calcestruzzo, metallo, legno, laterizi, plastica, materiali lapidei.

Nel Veneto nel 2015 la percentuale dei rifiuti da Costruzione e Demolizione non pericolosi (C&D NP) sul totale dei rifiuti speciali è stata pari al 36%.

In fase di demolizione la grande disomogeneità dei rifiuti è il motivo per cui una prima ed importantissima operazione – valida per qualsiasi scelta sulla metodologia di smaltimento e/o recupero di materiali – è quella di separare i diversi rifiuti, in quanto dovranno poi essere trattati e smaltiti in modi differenti. Ecco spiegato perché molte imprese addette alla demolizione, optano per un processo di demolizione selettiva, agevolando le operazioni successive.

La demolizione selettiva si realizza come un vero e proprio processo di decostruzione, inteso come l'attività inversa di quella che ha portato alla realizzazione del manufatto edilizio.

10.4 Esempi di utilizzo di materiali riciclati^[55]

– Autostrada del Brennero

L'intervento effettuato nei pressi di Rolo (RE) ha riguardato circa 8.000 metri quadrati. La tecnologia impiegata in questo caso è DRY, con un conglomerato di granulometria 0/14 mm, realizzato con bitume modificato con polimeri sbs e additivi per la riduzione delle temperature di produzione e stesa, non superiori a 165°C e 150°C rispettivamente ed aggiunta di polverino di gomma da Pfu di granulometria 0/4 mm a fine processo di muscolazione.

La pavimentazione sperimentale a bassa temperatura ha dimostrato di mantenere le caratteristiche tipiche di capacità drenante associando a queste ultime una buona riduzione del rumore generato dal rotolamento da traffico veicolare (-2db rispetto ad una pavimentazione tradizionale coeva) ed una riduzione degli spazi di arresto stimata del 25%.

– Juventus Stadium (TO)

Sono stati impiegati materiali dismessi del vecchio Stadio "Delle Alpi": risparmio economico stimato in circa due milioni di euro.

– Agenzia per l'Ambiente (Arlington – Virginia – USA)

Gli edifici contengono, in media, il 27% di materiale riciclato, come scorie aggregate ricavate dal cemento (circa 670.000 tonnellate utilizzate).

– **Rebrick (Danimarca)**

Il progetto danese “REBRICK” quasi dieci anni fa dall’idea di una gestione più efficiente dei rifiuti da demolizione e si basa sulla pulizia automatica di mattoni di argilla. Dal momento che la combustione dei nuovi mattoni è una pratica che richiede un elevato livello di consumi energetici e di risorse naturali, il riutilizzo di mattoni permette di evitare l’emissione in atmosfera di 2 Kg di CO₂ per mattone.

– **GRAB – Pista Ciclabile (Roma)**

Il tratto di pista ciclabile, in precedenza caratterizzato da una pavimentazione sconnessa, è stato sostituito con asfalti e additivi di ultima generazione, che hanno permesso di utilizzare per oltre metà materiale proveniente dal riciclo.

– **Mattoni riciclati (BZ)**

Tutti i laterizi prodotti in Italia dall’azienda Wienerberger contengono almeno il 10% di materiale riciclato sul peso del prodotto.

10.5 Esempi di massetti pronti con aggregati riciclati

- **GrasCalce Sabbiacementopiù^[56]**.

Massetto ecosostenibile per pavimento, composto da cemento e aggregati silicei. Cementi a basso contenuto di clinker, prodotto con energie rinnovabili e aggregati riciclati post-consumer concorrono all’abbattimento delle emissioni di agenti inquinanti nell’atmosfera e contribuiscono a preservare l’ambiente naturale.

- **Kerakoll Keracem Eco Pronto^[57]**.

Massetto pronto minerale certificato, eco-compatibile a ridotte emissioni di CO₂ e bassissime emissioni di sostanze organiche volatili, contiene materie prime riciclate. Riciclabile come inerte a fine vita.

10.6 Il riciclo del massetto cementizio contenete granulato di gomma da Pfu

Seguendo la logica sopra descritta della demolizione selettiva, si ritiene che i massetti di una costruzione possano essere facilmente demoliti e conferiti separatamente da altri materiali, ad un impianto di riciclo.

Qui i massetti subiscono una prima fase di frantumazione, che risulterà certamente meno gravosa di quella del calcestruzzo.

La frantumazione è la riduzione in piccoli pezzi mediante compressione o urto delle parti da rompere, essa viene attuata mediante frantoi che possono essere a mascelle, a cono, a rulli o a mulini a martelli⁵⁸ (figura [75]).

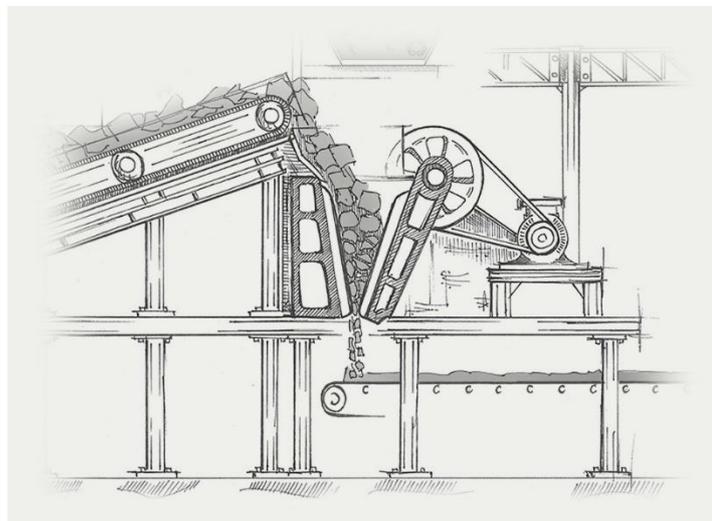


Figura [75], illustrazione di un frantoio a mascelle^[58].

In una seconda fase, utilizzando macchinari quali separatori per frazioni leggere, si potrà far emergere dalla massa frantumata la componente di Pfu, più leggera rispetto al conglomerato sabbia-cemento (figura [76]).

Si potrà così recuperare il granulato di gomma da Pfu per un nuovo utilizzo.

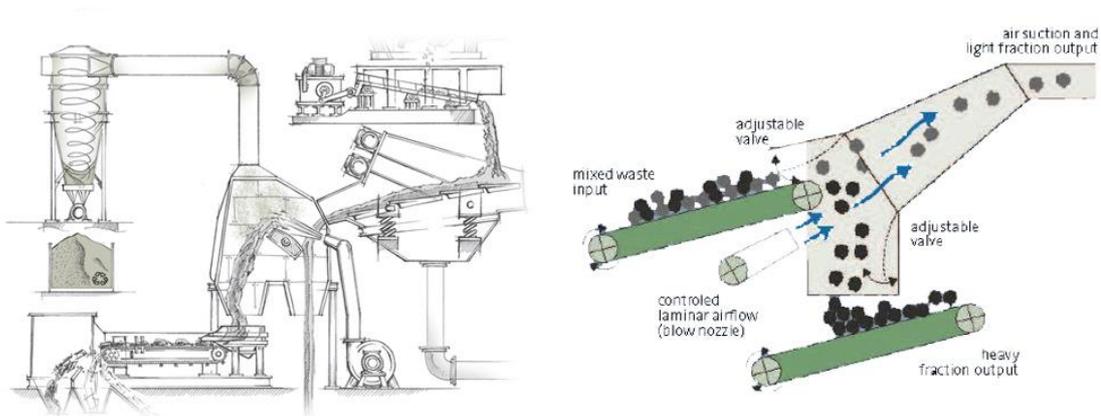


Figura [76], illustrazione di un impianto separatore per frazioni leggere^[58].

Di seguito alcuni macchinari separatori che potrebbero essere utilizzati per separare dal massetto frantumato la frazione di gomma da Pfu.

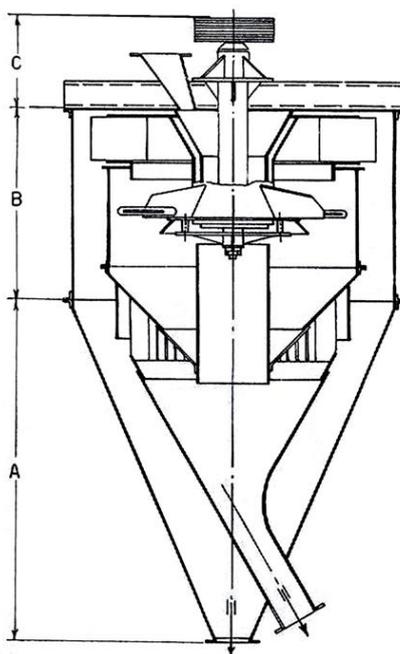


Figura [77], macchina separatrice a vento^[58].

Il Separatore a Vento (figura [77]) unisce la separazione in corrente d'aria a quella per forza centrifuga.

Esso può venire inserito in impianti di macinazione a secco con mulini di qualunque tipo e permette, variando la regolazione e l'assetto interno, di ottenere sia un prodotto fine esente da parti grossolane che un prodotto granulare senza polvere.



Figura [78], macchina idroseparatrice^[59].

La macchina idroseparatrice^[59] (figura [78]), grazie alla particolare azione di getti d'acqua in pressione, è in grado di pulire i materiali da tutte le frazioni leggere attraverso un sistema di separazione per differenza di densità.

11 Conclusioni

11.1 Confronto tra diverse malte realizzate

11.1.1 Confronto tra malte con cemento classe G; Ne, Cs, Me, MH'e, MHe, MPe, Mfe, MPh'e, MPh'fe, Mp'h'fe.

Si confronta la resistenza a flessione e la tenacità di **Me** (2.62 MPa – 7.18 J) con gli analoghi parametri delle malte che hanno superato le prestazioni del campione in esame (figura [79]):

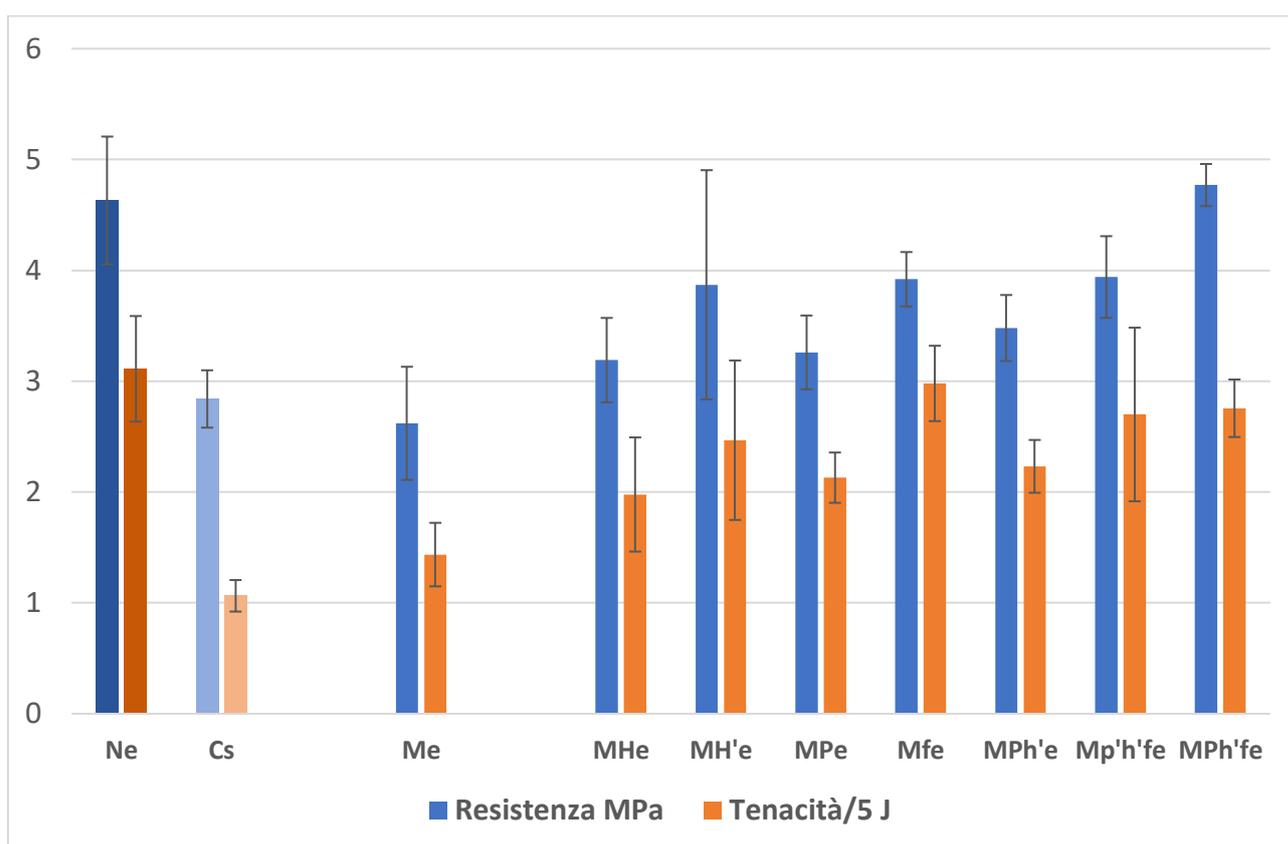


Figura [79], confronto tra malte con cemento classe G.

Considerazioni:

Mfe risulta ottimo in relazione alla semplicità ed economicità di realizzazione.

MPh'fe ha i valori migliori, ma richiede due trattamenti distinti che fanno aumentare i costi.

Un ottimo rapporto tra costi e prestazioni è quello di **MH'e**.

11.1.2 Confronto tra cemento classe G e cemento tipo II 32.5 R; Ne, Ne_28, MH'e, MH'e_28, MPe, MPe_28, Mfe, Mfe_28, MPh'fe, MPh'fe_28, M'e, M'e_28, M'fe, M'fe_28.

Si confrontano malte di uguale composizione con i due tipi di legante (figura [80]).

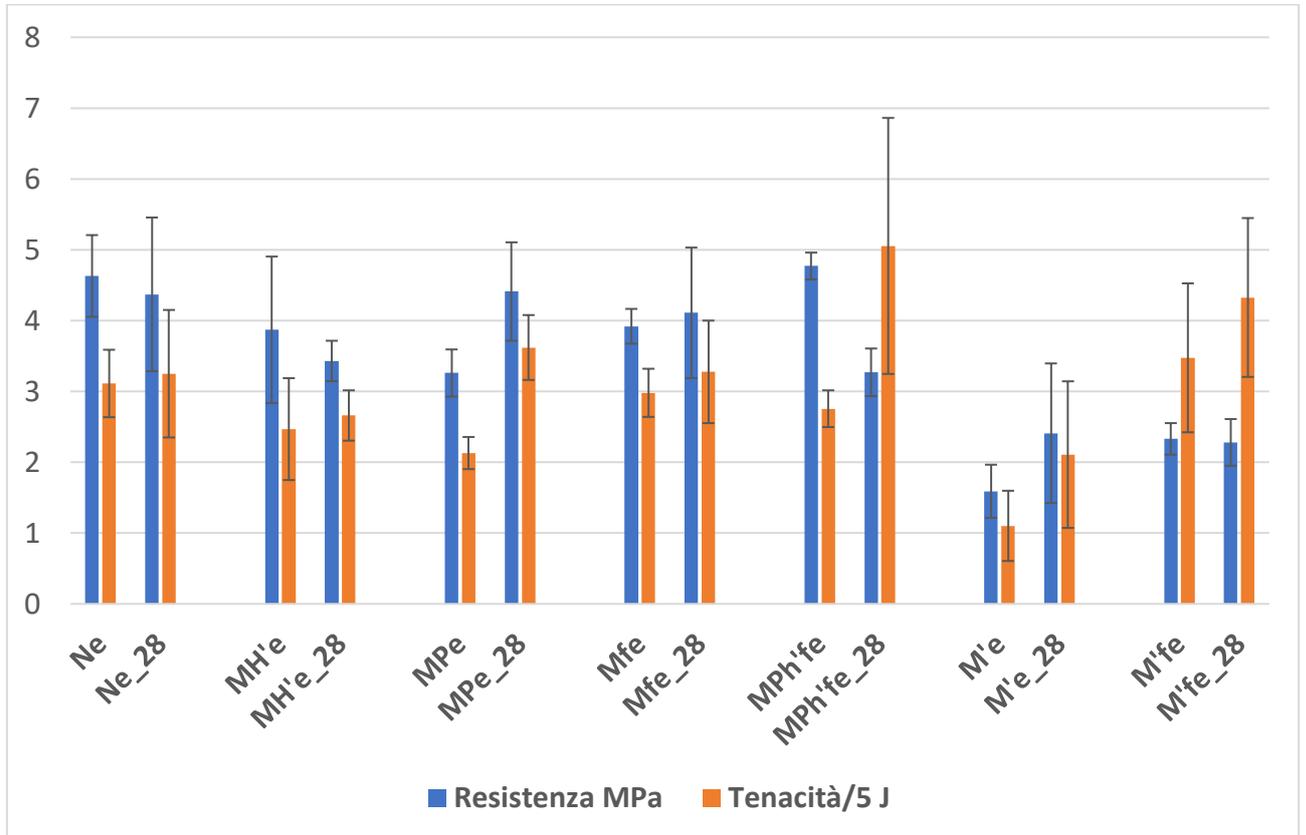


Figura [80], Confronto tra cemento classe G e cemento tipo II 32.5 R.

Considerazioni :

Mentre la resistenza varia in modo apparentemente casuale, la tenacità aumenta sempre nella maturazione a 28 giorni, segno che l'interfaccia gomma cemento viene in qualche modo indebolita dagli sbalzi termici dovuti alla maturazione (in forno a 85 °C), dei campioni con cemento in classe G.

11.1.3 Confronto tra malte fibrorinforzate; Ne, Nfe, Me, Mfe, M'e, M'fe, M'Pe_28, MPfe_28, MH'e_28, MH'fe_28, M'e_28, M'fe_28, M'Pe_28, M'Pfe_28, M''e_28, M''Fe_28.

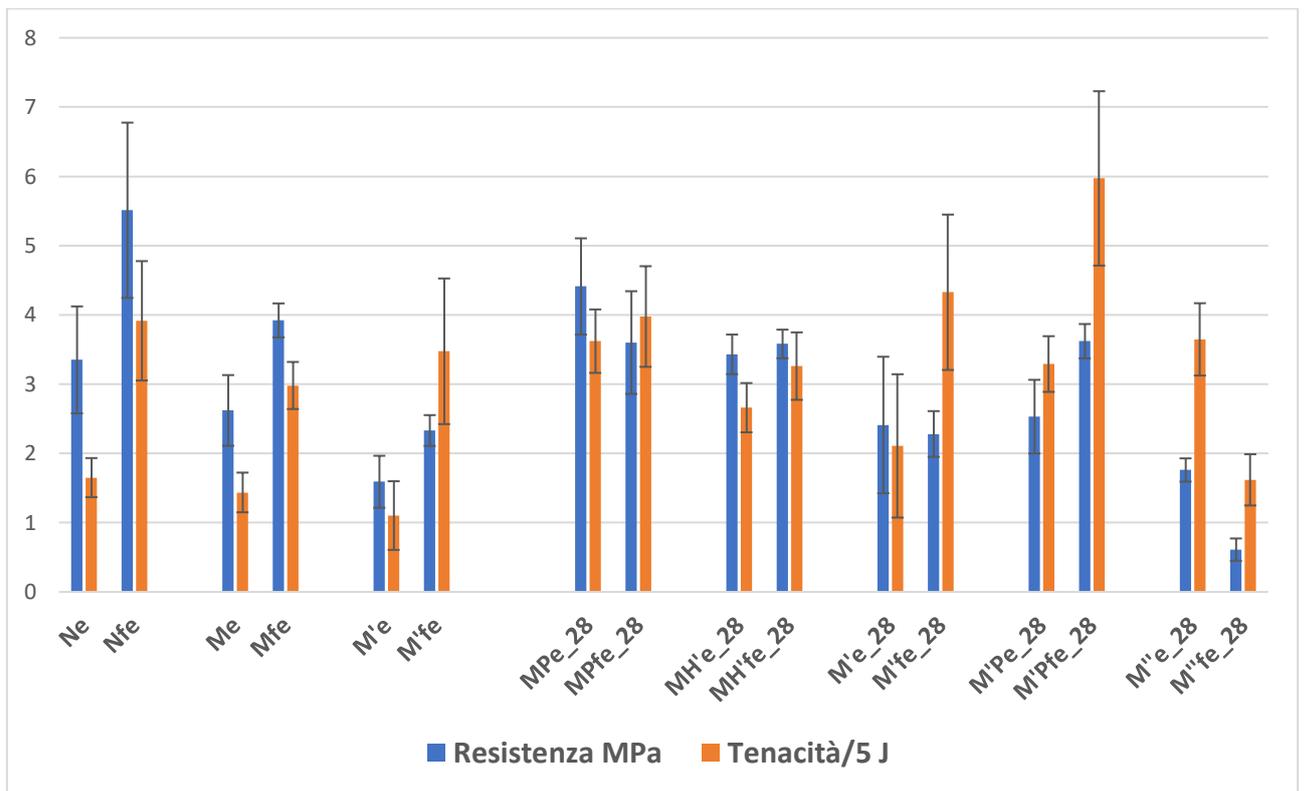


Figura [81], confronto tra malte fibrorinforzate.

Considerazioni :

La presenza delle fibre polimeriche nella malta sembra dare un risultato positivo sulla resistenza con il cemento in classe G, mentre per il 28 giorni l'effetto è meno chiaro.

Sulla tenacità (ad eccezione della malta con il 50% di gomma) aggiungere le fibre porta sempre ad un miglioramento delle prestazioni (figura [81]).

11.1.4 Confronto tra malte con gomma trattata con soluzione Piranha; Me, MPe, Mh'e, MPh'e, M'e, M'Pe, Mfe_28, MPfe_28, Mhfe_28, MPHfe_28, Mh'fe_28, MPH'fe_28, M'e_28, M'Pe_28, M'fe_28, M'Pfe_28.

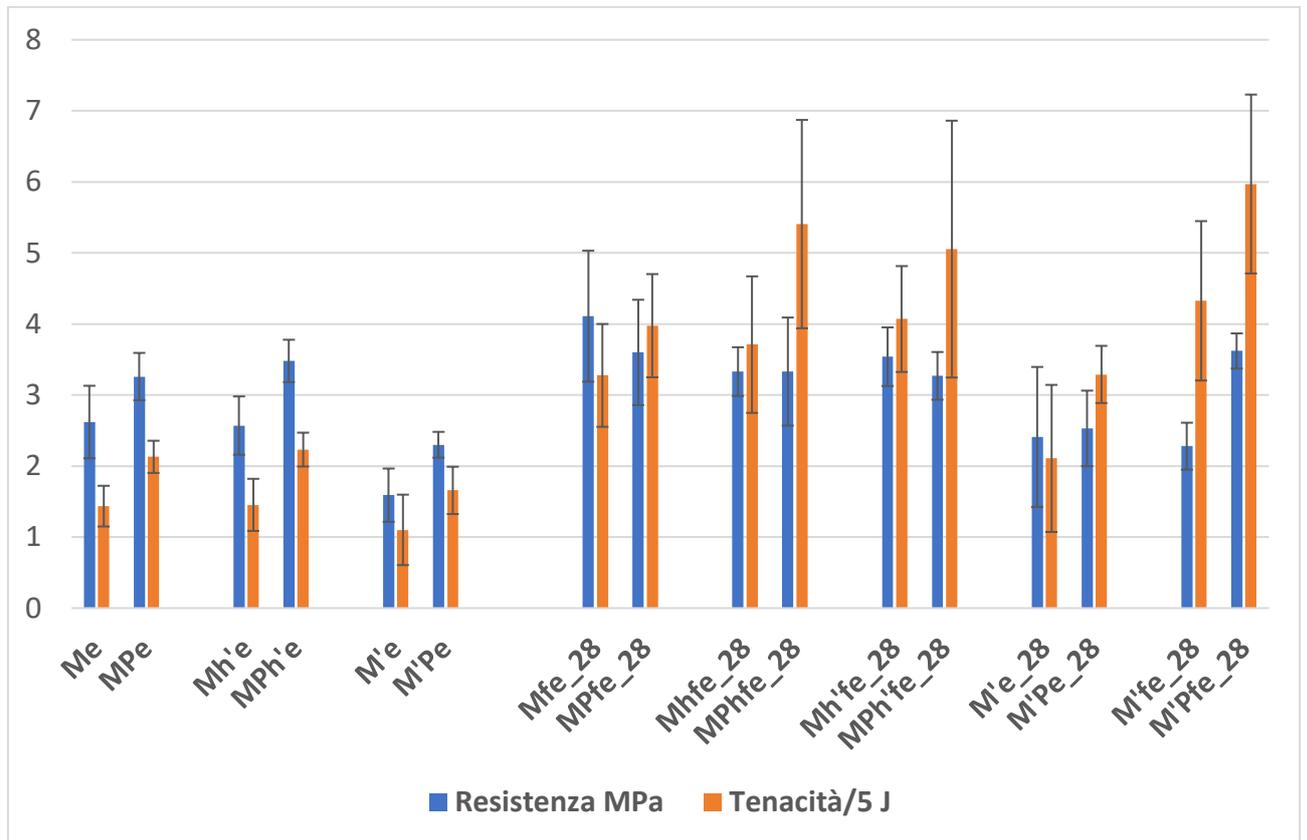


Figura [82], confronto tra malte con gomma trattata con soluzione Piranha.

Considerazioni :

Nelle malte con cemento classe G il trattamento con soluzione piranha della gomma aveva dato riscontri positivi su resistenza e tenacità. Con il cemento 32.5 R invece si hanno miglioramenti evidenti solo sulla tenacità; tali trattamenti chimici, inoltre, incidono sul costo finale, come esposto al capitolo costi (figura [82]).

11.1.5 Confronto tra le malte con cemento in classe G con prestazioni di resistenza superiore alla classe F3 e F4; MHe, MH'e, MPe, Mfe, MPh'e, Mp'h'fe, MPh'fe.

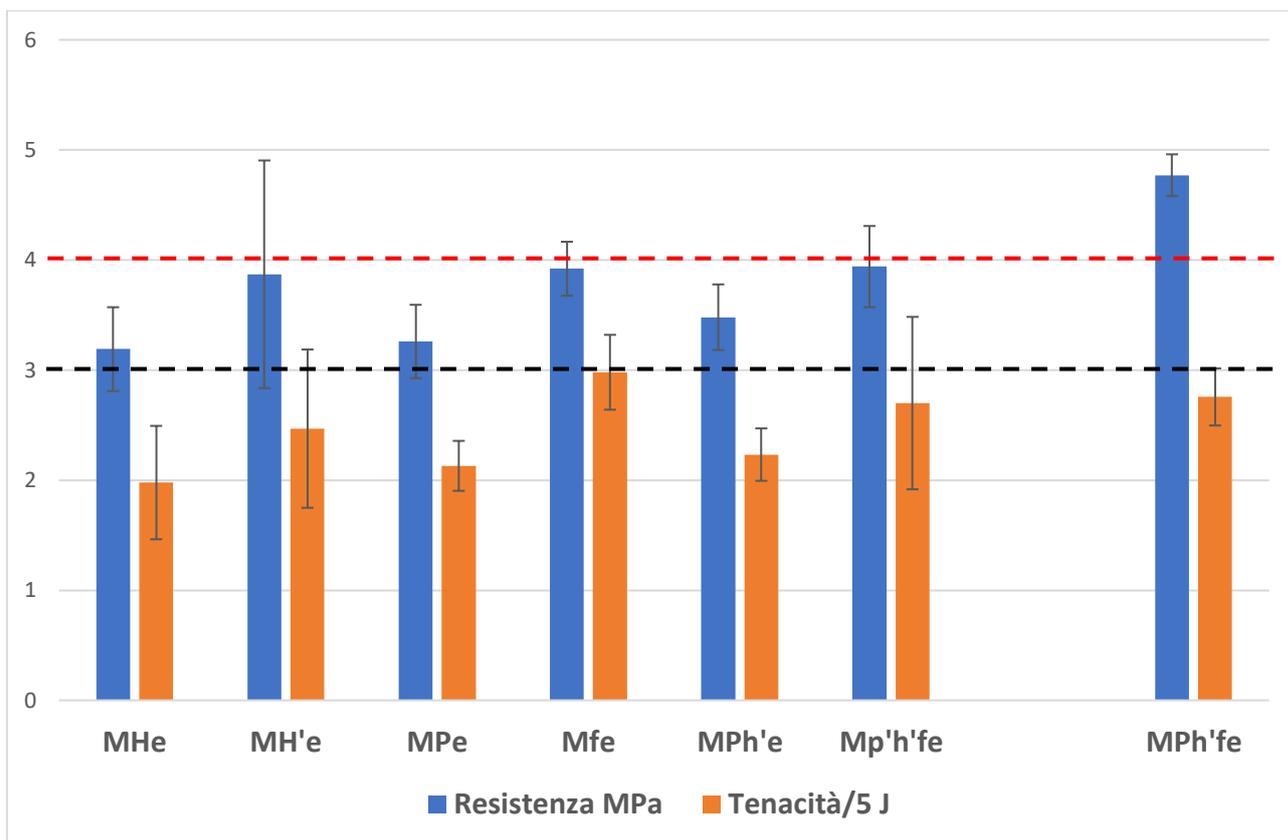


Figura [83], confronto tra le malte con cemento in classe G con prestazioni di resistenza superiore alla classe F3 e F4.

Considerazioni :

Sono sei le malte che rientrano nella classe **F3**, utilizzabili per massetti interni con rivestimenti ceramici. La malta **Mfe** risulta la migliore per rapporto costi/prestazioni.

MPh'fe, classe **F4**, è anche utilizzabile per massetti climatizzanti, per massetti con pavimentazioni laminate o resilienti e per tutti i tipi di massetto rivestito con materiale lapideo (figura [83]).

11.1.6 Confronto tra le malte con cemento 32.5 R tipo II con prestazioni di resistenza superiore alla classe F3 e F4; MH'e_28, Mhfe_28, Mh'fe_28, MH'fe_28, MPfe_28, MPhfe_28, MPh'fe_28, M'Pfe_28, MPe_28, Mfe_28.

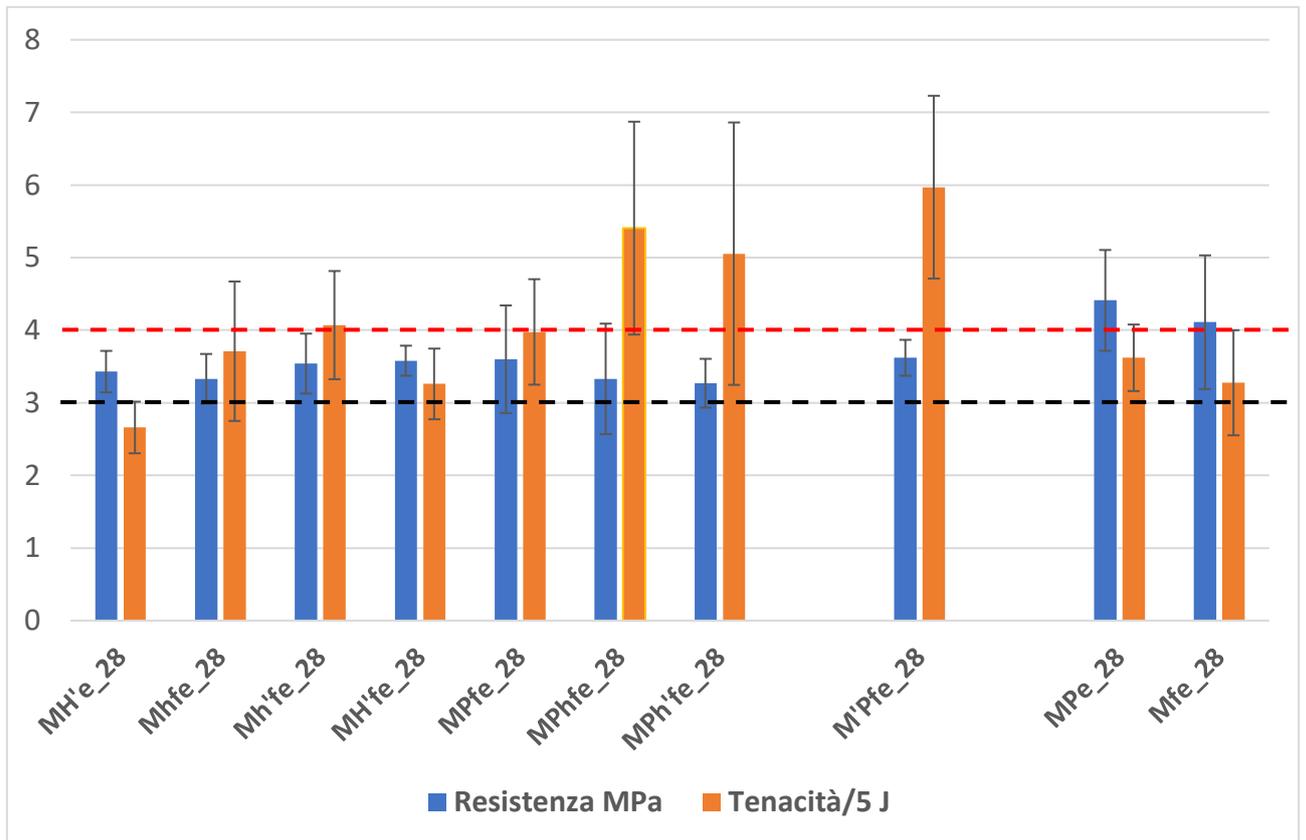


Figura [84], confronto tra le malte con cemento 32.5 R tipo II con prestazioni di resistenza superiore alla classe F3 e F4.

Considerazioni :

Otto malte rientrano in classe **F3** e due in classe **F4**.

M'Pfe_28, con il 30% di gomma, è una malta per massetti in classe **F3**, utilizzabile nel residenziale, per interni con rivestimenti ceramici.

MPe_28 e **Mfe_28** rientrano nella classe **F4**, ampliando così lo spettro di utilizzo ai rivestimenti resilienti e laminati, ai massetti con riscaldamento/raffrescamento ed a tutte le tipologie con rivestimenti lapidei (figura [84]).

11.2 Confronto con la resistenza meccanica delle malte Italcementi

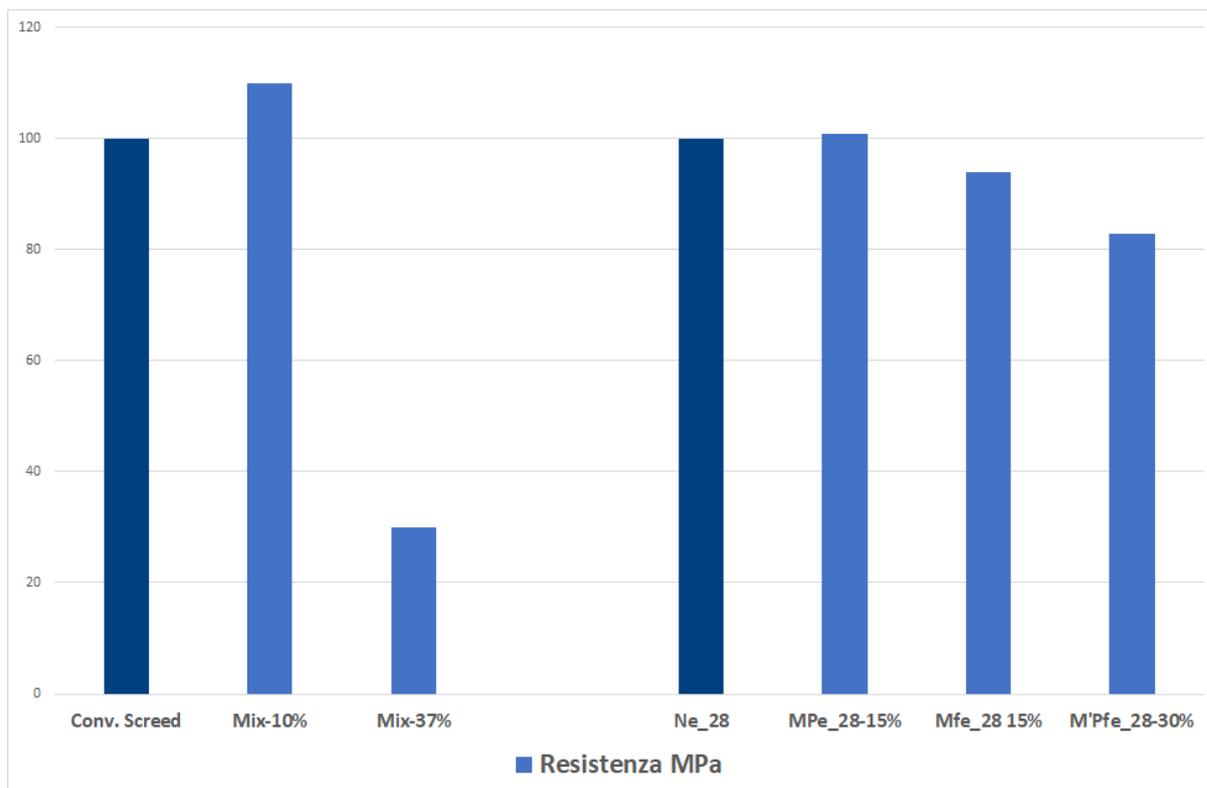


Figura [85], confronto con la resistenza meccanica delle malte Italcementi.

Considerazioni:

Come evidenziato nella figura [85], posta a cento la resistenza meccanica a compressione della malta senza gomma Italcementi (**Conv. Screed**), e posta a cento la resistenza meccanica a flessione della malta senza gomma (**Ne_28**), si nota:

- una diminuzione del 70% della prestazione della malta Italcementi con il 37% di gomma, **Mix-37%**;
- una prestazione sostanzialmente invariata della migliore malta con il 15% di gomma **MPe_28**;
- una piccola diminuzione, pari al 6%, della malta **Mfe_28**;
- una prestazione molto interessante della migliore malta con il 30% di gomma, **M'Pfe_28**, con una diminuzione del 17%;
- le malte migliori sono composte con gomma trattata con soluzione piranha.

Possiamo quindi affermare che l'obiettivo che ci eravamo posti, ovvero cercare di contenere la forte diminuzione della resistenza meccanica (nel nostro caso a flessione) all'aumentare della percentuale di gomma nella malta, è stato raggiunto.

11.3 Conclusioni sulla tenacità

La misura della tenacità, come variabile, è stata presa in considerazione nello studio dell'Università di Sheffield^[15] ma non in quello condotto da Italcementi^[22] né in quello dell'Università di Perugia^[23].

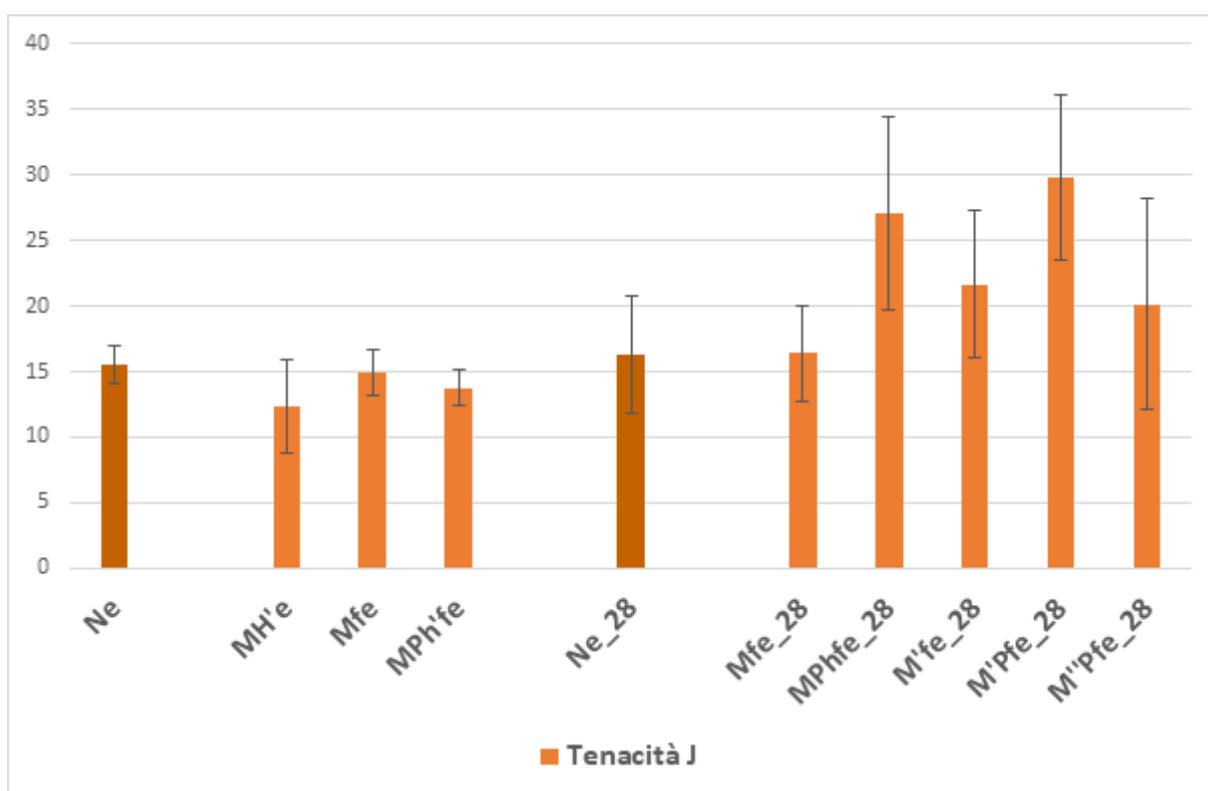


Figura [86], conclusioni sulla tenacità.

Considerazioni:

Nella figura [86] sono state riportate le malte con i migliori risultati di tenacità, sia con cemento classe G sia con cemento 32.5 R. Si può notare che:

- le malte senza gomma **Ne** e **Ne_28** hanno la stessa tenacità;
- le malte con cemento classe G sfiorano, senza superarla, la tenacità della malta senza gomma;

- le malte con cemento 32.5 R invece superano ampiamente la tenacità della corrispondente malta senza gomma;
- le malte **Mfe_28** e **M'Pfe_28**, che presentavano già un'ottima resistenza meccanica (grafico 38), presentano valori di tenacità rispettivamente pari e quasi doppio rispetto alla malta senza gomma **Ne_28**;
- la malta **M''Pfe_28** con il 50% di gomma ha una performance superiore a **Ne_28**, ma questo anche in funzione della sua bassa resistenza meccanica.

Contrariamente alla resistenza a flessione, in cui si verifica una leggera riduzione delle prestazioni, la tenacità delle nostre malte contenenti gomma trattata si rivela molto superiore a quella della malta senza gomma, in particolare nel caso delle malte che non hanno subito stress termici in forno.

Certamente l'uso delle fibre polimeriche apporta un valido contributo, ma sono i trattamenti combinati a fare la differenza.

11.4 Conclusioni sull'acustica

Per ottemperare alla normativa acustica italiana^[14] (tabella [2]) risulta indispensabile la presenza dei tappeti acustici sotto massetto, con i possibili problemi derivanti dalla loro posa non corretta.

Partendo dalle ottime performance acustiche evidenziate sia dalle malte testate nel brevetto Italcementi^[22] (tabella [3]) sia dal calcestruzzo Rubcrete, si è ipotizzato che un massetto cementizio con ottime proprietà di coibenza acustica possa arrivare anche a sostituire il tappeto acustico sottostante.

In virtù dei buoni risultati scaturiti dalle prove di resistenza meccanica fatte registrare dalle nostre malte, era atteso dai nostri test un miglioramento anche sul fronte acustico. Grazie ad una migliore adesione gomma-cemento, l'onda acustica avrebbe dovuto trasmettersi più facilmente tra i due materiali, consentendo di venire in parte dissipata dalla deformazione della gomma stessa.

Purtroppo, come riportato nelle conclusioni della prova acustica, i nostri test non si sono rivelati significativi; si rimanda quindi questo aspetto ad un prossimo lavoro dedicato.

11.5 Conclusioni sui costi

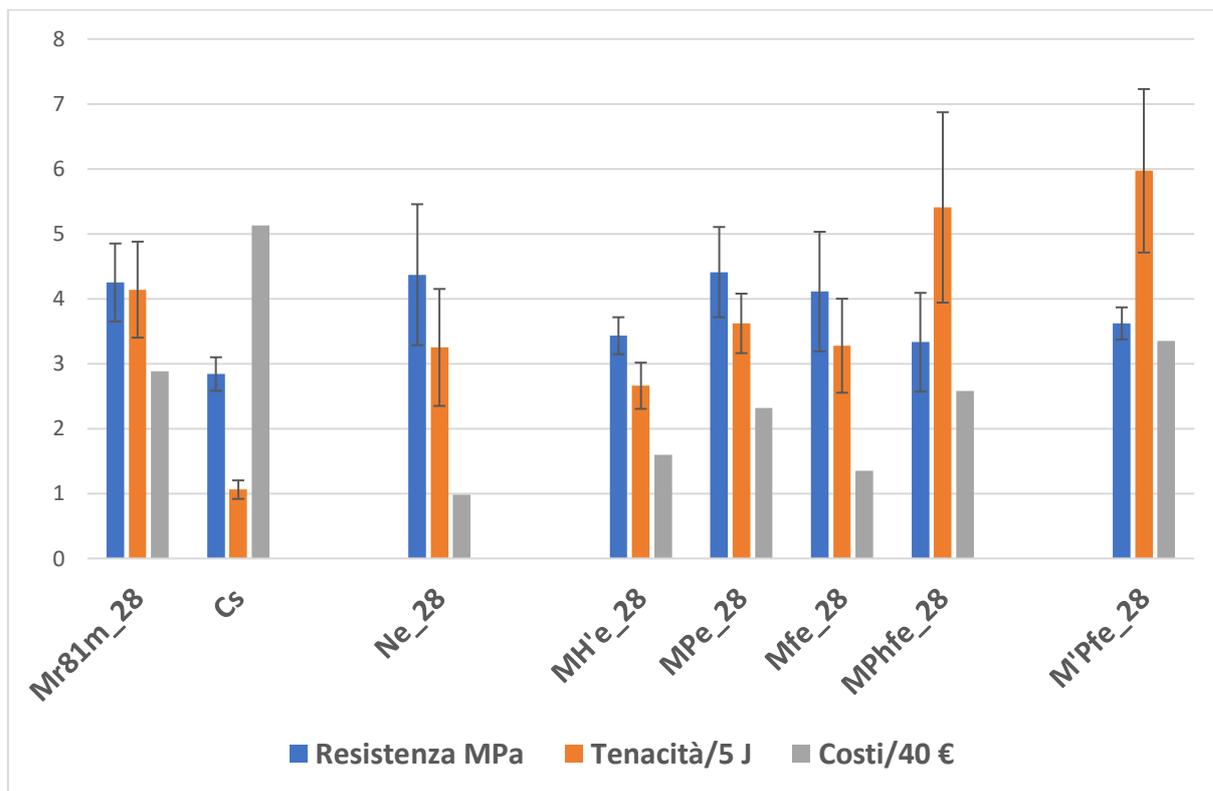


Figura [87], conclusioni sui costi.

Nella figura [87] sono riportati i valori di resistenza meccanica, tenacità e di costo delle malte analizzate al capitolo 9.

Per ragioni di leggibilità del grafico la colonna della tenacità è stata divisa per cinque e quella dei costi per quaranta.

A partire dal massetto tradizionale in sabbia e cemento **Ne_28**, che è il meno costoso in ragione delle sue economiche materie prime, possiamo subito notare che i massetti pronti **Mr81m_28** e **Cs** hanno costi molto più elevati. Questo in ragione della loro praticità d'uso e delle loro caratteristiche particolari, come l'elevata conducibilità termica e rapidità di asciugatura del primo e la leggerezza e rapidità di asciugatura del secondo.

Tra le nostre malte per massetto contenenti gomma al 15%, il migliore rapporto tra costi e prestazioni appartiene a **Mfe_28** seguito da **MH'e_28**.

Mfe_28 si potrebbe commercializzare come massetto pronto asciutto in sacco; **MH'e_28** invece, dovendo avere il granulato di gomma umido separato dalla parte secca, potrebbe risultare meno pratico e di conseguenza un po' più costoso.

Anche malte come **M'Pfe_28**, con il 30% di gomma, benché di costo elevato, potrebbero essere competitive sul mercato se riferite ai prezzi dei massetti pronti.

Non sono stati presi in considerazione gli eventuali costi di commercializzazione.

Si sottolinea che costi dei trattamenti chimici (capitolo 9) sono solo ipotizzati ed andrebbero approfonditi in una ricerca specifica.

11.6 Prospettive future

Si suggeriscono dei possibili approfondimenti:

- valutare nuovi trattamenti superficiali e studiarne l'effetto sulla gomma, al fine di migliorare l'adesione con la pasta di cemento;
- comprendere meglio quale è il contributo sull'interfaccia gomma-cemento che produce lo stoccaggio in acqua;
- variare i trattamenti con soluzione piranha diluita (intorno a 1%) per ottenere gli stessi risultati di uno stoccaggio molto prolungato in acqua con tempi ridotti;
- realizzare test, sia di flessione sia di compressione, su campioni di maggiori dimensioni, per ridurre la variabilità dei dati;
- indagare ulteriormente le prestazioni meccaniche delle malte con alta percentuale di gomma (30, 50%);
- valutare secondo normativa la performance acustica dei massetti più promettenti;
- comprendere il contributo dei trattamenti chimici della gomma sulle prestazioni acustiche affinché queste prestazioni possano essere valorizzate sul mercato.

Legenda provini testati

Cemento classe G, maturazione 24 h

- **Nn** (1,2,3,4,5): neutro, sabbia normalizzata (sn);
- **Ne** (1,2,3,4,5): neutro, sabbia edilizia (se);
- **Cs** (1,2,3,4,5): Leca centro storico fibrato;
- **Cs-** (1,2): Leca centro storico senza fibre;
- **Fn** (1,2,3,4): polverino 15% non trattato, sn.;
- **Fe** (1,2,3,4,5): polverino 15% non trattato, se.;
- **Fn6** (1,2): polverino 15% non trattato, a/c 0.6, s.n.;
- **Fn7** (1,2): polverino 15% non trattato, a/c 0.7, s.n.;
- **Mn** (1,2,3,4): granulato 15% non trattato, sn.;
- **Me** (1,2,3,1,2,3,4,5): granulato 15% non trattato, se.;
- **FMe** (1,2,3): polverino 5% + granulato 10%, non trattati, se.;
- **Fh'e** (1,2,3): polverino 15% non trattato, in H₂O per 133gg, se.;
- **FH'e** (1,2,3,4): polverino 15% non trattato, in H₂O per 6 gg, se.;
- **Mh'e** (1,2,3): granulato non trattato in H₂O per 6 gg, s.e.;
- **MH'e** (1,2,3,4,5,6): granulato 15% non trattato, in H₂O per 133gg, se.;
- **MHe** (1,2,3,4): granulato 15% in H₂O per 30gg, se.;
- **Fpn** (1,2): polverino 15% trattato piranha 50% 5', sn.;
- **Fpe** (1,2,4): polverino 15% trattato piranha 50% 5', se.;
- **Mpe** (1,2,3,4): granulato 15% in piranha 50% 5', se.;
- **Mse** (1,2,3,4): granulato 15% in NaOH puro 15', se.;
- **NLe** (1,2,3,4,5): neutro con lattice Planicrete (lattice 1/ H₂O 4/cemento 10), s.e.;
- **Fle** (1,2): polverino 15% non trattato, ordine: lattice Planicrete, H₂O, cem. (rapp. 1/4/10), se, Pfu.;
- **Mle** (1,2): granulato 15% non trattato, ordine: lattice Planicrete, H₂O, cem. (rapp. 1/4/10), se, Pfu.;
- **FL'e** (1,2): polverino 15% in lattice e H₂O per 3 min, poi cemento e se. (rapp: 1 lattice, 4 H₂O, 10 cem.);

- **ML'e** (1,2): granulato 15% in lattice e H₂O per 3 min, poi cemento e se. (rapp: 1 lattice, 4 H₂O, 10 cem.);
- **FL'e** (1,2): polverino 15% in lattice e H₂O 1:1 per 3 min, poi lasciato asciugare ed impastato, se.;
- **ML'e** (1,2,3,4): granulato 15% in lattice e H₂O 1:1 per 3 min, poi lasciato asciugare ed impastato, se.;
- **Nfe** (1,2,3): Neutro + fibre 1% in peso, se.;
- **NFe** (1,2): Neutro + fibre 2% in peso, se.;
- **Mfe** (1,2,3): Medio 15% non trattato + fibre 1% in peso, se.;
- **MFe** (1): granulato 15% non trattato + fibre 2% in peso, se.;
- **Nce** (1,2,3,4): Neutro + fibre di carbonio trattate piranha pura 30' 1% in peso, se.;
- **Mce** (1,2,3,4): granulato 15% non trattato + fibre di carbonio trattate piranha pura 30' 1% in peso, se.;
- **Fph'n** (1,2,3,5): polverino 15% in piranha 1% per 7 gg, in H₂O per 6gg, s.n.;
- **MPh'n** (1,2,3,4): granulato 15% in piranha 50% 5', in H₂O per 6 gg, s.n.;
- **MPh'e** (1,2,1,2,4): granulato 15% in piranha 50% 5', in H₂O per 6 gg, s.e.;
- **MSh'n** (1,2,4): granulato 15% in NaOH puro 15', in H₂O per 6 gg, s.n.;
- **Mh'fe** (1,2,3,4): granulato 15%, in H₂O per 6 gg + fibre 1% in peso, se.;
- **MH'fe** (1,2,3,4): granulato 15%, in H₂O per 133gg + fibre 1% in peso, se.;
- **Mp'h'fe** (1,2,3,4): granulato 15% in piranha 15% 30', in H₂O per 6 gg + fibre 1% in peso, se.;
- **MPh'fe** (1,2,3,4): granulato 15% in piranha 50% 5', in H₂O per 6 gg + fibre 1% in peso, se.;
- **M'e** (1,2,3,4): granulato 30% non trattato, se.;
- **M'Pe** (1,2,3): granulato 30% in piranha 50% 5', se.;
- **M'H'e** (1,2,3,4): granulato 30%, in h₂o per 133gg, se.;
- **M'fe** (1,2,3,4): granulato 30% non trattato + fibre 1% in peso, se.;
- **M'H'fe** (1,2,3,4): granulato 30%, in h₂o per 133gg + fibre 1% in peso, se.;
- **M'ce** (1,2,3,4): granulato 30% non trattato + fibre di carbonio trattate piranha pura 30' 1% in peso, se.;
- **M'Pce** (1,2,3,4): granulato 30% in piranha 50% 5' + fibre di carbonio trattate piranha pura 30' 1% in peso, se.;

Cemento portland 32.5 R tipo II, maturazione 28gg

- **Ne_28** (1,2,3,4): neutro, se.;
- **Ne_28_si** (1,2,3,5,6): neutro senza intaglio, se.;
- **Mr81m_28** (1,2,3,4,5): Weber Mr81 metal fibrato.;
- **MH'e_28** (1,2,3): granulato 15% non trattato, in H₂O per 133gg, se.;
- **MPe_28** (1,2,3,4): granulato 15% in piranha 50% 5', se.;
- **Mfe_28** (1,2,3,4): granulato 15% non trattato + fibre 1% in peso, se.;
- **Mhfe_28** (1,2,3,4): granulato 15%, in H₂O per 1 gg + fibre 1% in peso, se.;
- **Mh'fe_28** (1,2,3,4): granulato 15%, in H₂O per 6 gg + fibre 1% in peso, se.;
- **MH'fe_28** (1,2,3,4): granulato 15%, in H₂O per 133gg + fibre 1% in peso, se.;
- **MPfe_28** (1,2,3,4): granulato 15% in piranha 50% 5' + fibre 1% in peso, se.;
- **MPhfe_28** (1,2,3,4): granulato 15% in piranha 50% 5', in H₂O per 1 gg + fibre 1% in peso, se.;
- **MPh'fe_28** (1,2,3,4,5,6): granulato 15% in piranha 50% 5', in H₂O per 6 gg + fibre 1% in peso, se.;
- **M'e_28** (1,2,3,4): granulato 30% non trattato, se.;
- **M'Pe_28** (1,2,3,4): granulato 30% in piranha 50% 5', se.;
- **M'fe_28** (1,2,3,4): granulato 30% non trattato + fibre 1% in peso, se.;
- **M'Pfe_28** (1,2,3,4): granulato 30% in piranha 50% 5' + fibre 1% in peso, se.;
- **M'Ph'fe_28** (1,2,3,4,5,6): granulato 30% in piranha 50% 5', in H₂O per 6 gg + fibre 1% in peso, se.;
- **M''e_28** (1,2,3,4): granulato 50% non trattato, se.;
- **M''Pfe_28** (1,2,3,4): granulato 50% in piranha 50% 5' + fibre 1% in peso, se.;
- **M''Ph'fe_28** (1,2,3,4,5,6): granulato 50% in piranha 50% 5', in H₂O per 6 gg + fibre 1% in peso, se.

Ringraziamenti

Ringrazio la mia famiglia per il supporto e la fiducia.

Ringrazio l'azienda TerniEnergia per la fornitura del granulato di gomma da Pfu.

Ringrazio inoltre il Prof. Pavese ed il Dott. Lavagna per il supporto durante il lavoro sperimentale.

Bibliografia

- [1] “Gli pneumatici fuori uso che fine fanno?”
<<https://www.sicuraauto.it/news/gli-pneumatici-fuori-uso-che-fine-fanno/>>
- [2] “L’impiego della gomma riciclata in edilizia”
<https://www.ecopneus.it/_public-file/10.%20L_impiego%20della-gomma%20riciclata%20in%20edilizia_1.pdf>
- [3] “L’impiego di prodotti da Pneumatici Fuori Uso nelle pavimentazioni stradali”
<<http://www.ecopneus.it/wp-content/uploads/2018/06/06.-Dossier-strade-impiego-di-prodotti-da-pfu.pdf>>
- [4] “Pfu in edilizia”
<<https://www.ecopneus.it/riciclo-pfu/pneumatico-fuori-uso/materiali-per-edilizia/>>
- [5] “Normativa” <<https://www.ecopneus.it/normativa/legislazione/riferimenti-normativi/>>
- [6] Ficco P., “La gestione dei pneumatici fuori uso (Pfu)”, Milano; Edizioni Ambiente, 2013.
- [7] “Pneumatico” <<https://it.wikipedia.org/wiki/Pneumatico> >
- [8] Caimotti A., “Calcestruzzi contenenti gomma”, Politecnico di Torino, 2017.
- [9] “Riciclo Pfu”
<<https://www.ecopneus.it/riciclo-pfu/pneumatico-fuori-uso/riciclo-e-recupero-dei-pfu/>>
- [10] “Pneumatici fuori uso” <<http://www.reteambiente.it/Pneumatici/pneurecupero/>>
- [11] “La devulcanizzazione della gomma”
<https://www.ktradefair.it/cgi-bin/md_k/lib/pub/tt.cgi/La_devulcanizzazione_della_gomma.html?oid=48731&lang=4&ticket=g_u_e_s_t>
- [12] “Classificazione dei cementi”
<<https://www.aitecweb.com/Il-cemento/Classificazione-dei-cementi>>
- [13] “Cemento classe G”
<<https://www.infobuild.it/prodotti/cementi-per-pozzi-petroliferi/>>
- [14] “I requisiti acustici passivi degli edifici”
<<https://www.ingenio-web.it/22791-guida-al-calcolo-dei-requisiti-acustici-passivi-degli-edifici-e-al-dpcm-5-dicembre-1997>>
- [15] “Conglomerati cementizi ottenuti con materiale riciclato da pneumatici fuori uso (pfu)”
<<http://old.tekneco.it/bioedilizia//conglomerati-cementizi-ottenuti-con-materiale-riciclato-da-pneumatici-fuori-uso-pfu/>>

- [16] Sgobba S., Marano G., Borsa M., Molfetta M.A., “Use of Rubber Particles from Recycled Tires as Concrete Aggregate for Engineering Application”, Conference paper, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2010.
- [17] Nacif G., Panzera T., Strecker K., Christoforo A.; Paine K., “Investigations on cementitious composites based on rubber particle waste additions”, *Materials Research* 16(2):259-268, 2013.
- [18] Her-Yung Wang, Bo-Tsun Chen, Yu-Wu Wu, “A study of the fresh properties of controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC)”, *Construction and Building Materials* 41:526–531, 2013.
- [19] “Valutazione della Rc di calcestruzzi con aggregati in gomma da riciclo di pneumatici” <<https://www.inconcreto.net/4573-valutazione-della-rc-di-calcestruzzi-con-aggregati-in-gomma-da-riciclo-di-pneumatici>>
- [20] Giuseppe Carlo Marano, Cesare Marti, Marcello Molfetta, Valentina Sammarco; “Il rubbercrete Analisi delle proprietà fisico-meccaniche e durabilità”, <https://www.ingenio-web.it>, 2013.
- [21] Albano C., Camcho N., Hernandez M., Bravo A.J., Guevara H., Paricaguan B., “Properties of modified portland cement concrete with scrap rubber at different w/c ratios”, *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, Vol. 28, N° 1, pp. 97-114, 2013.
- [22] Morbi A., Molfetta M.A., Sgobba S., “Concrete screed with recycled rubber from discarded tyres”, United States patent US 2014/0308077 A1, 2014.
- [23] Asdrubali F., D’Alessandro F., Schiavoni S., Baldinelli G., “Lightweight screeds made of concrete and recycled polymers: acoustic, thermal, mechanical and chemical characterization”, Conference Paper, FORUM ACUSTICUM, 2011.
- [24] Ente Nazionale Conpaviper, “Codice di buona pratica per i massetti di supporto per interni ed esterni”, 2017.
- [25] “Il massetto come lo metto” <http://www.scuolaedilebg.eu/web/images2/DOCUMENTI/MATERIALE_DIDATTICO/USA_E_POA.pdf>
- [26] “Massetto bistrato” < <https://www.leca.it/prodotti/lecamix-forte/>>
- [27] “Massetto monostrato ” < <https://www.leca.it/prodotti/lecamix-forte/>>
- [28] “Cemento Portland, il Buzzi Unicem Tipo II/B-LL 32.5 R” < <https://www.buzziunicem.it/-/tipo-ii-b-ll-32-5-r>>

- [29] “TerniEnergia “ < <https://www.ternienergia.com/>>
- [30] “Macchine di prova ZwickRoell”
< <https://www.zwickroell.com/it-it/macchine-di-prova-universali/proline>>
- [31] “La flessione meccanica” <[https://it.wikipedia.org/wiki/Flessione_\(meccanica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Flessione_(meccanica))>
- [32] “Proprietà meccaniche dei polimeri” <<https://pslc.ws/italian/mech.htm>>
- [33] “Comportamento a flessione” < <http://www.encosrl.it/calcestruzzo-fibro-rinforzato/>>
- [34] “Tabella delle caratteristiche meccaniche di alcuni materiali”
<<https://www.weerg.com/it/c/tutorial/11-come-scegliere-i-materiali>>
- [35] Colom X., Cañavate J., Carrillo F, Velasco J.I., Pagès P., Mujal R., Nogués F., “Structural and mechanical studies on modified reused tyres composites”, *European Polymer Journal* 42(10):2369-2378, 2006.
- [36] J. Cañavate, P. Casas, F. Nogués, F. Carrillo, X. Colom., “Composites from ground tyre rubber effect of surface modification by wetting additives”, *Conference paper, 13th European Conference on Composite Materials*, 2007.
- [37] Colom X., Carrillo F., Cañavate J., “Composites reinforced with reused tyres: Surface oxidant treatment to improve the interfacial compatibility”, *Composites Part A Applied Science and Manufacturing* 38(1):44-50, 2007.
- [38] Liang-Hisng Chou, Chun-Nan Lin, Chun-Ku Lu, Cheng-Haw Lee, Maw-Tien Lee, “Improving rubber concrete by waste organic sulfur compounds”, *Waste Manag Res.* 28(1):29-35, 2010.
- [39] Yazdi M. A., Yang J., Yihui L., Su H., “A Review on Application of Waste Tire in Concrete”, *International Journal of Civil and Environmental Engineering* Vol:9, No:12, 2015.
- [40] “Solfonazione del benzene”
<Di V8rik di Wikipedia in inglese, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6078135>>
- [41] “Sabbia da costruzione” < https://www.giessesrl.com/images/pdf/listino_prezzi.pdf>
- [42] “Cemento Portland”
<http://www.al.camcom.gov.it/PriceListsCostruzioni/Pub/Item?id_level_2=5>
- [43] “Peso specifico” < https://it.wikipedia.org/wiki/Peso_specifico>
- [44] “Fibre polimeriche”
<<http://www.fassabortolo.it/it/prodotti/-/p/6/395/fondi-di-posa/fiber-mst-2-fibre-polimeriche-ad-alta-tenacita-per-il-rinforzo-di-massetti>>

[45] “Acido solforico”

<https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=sulfuric+acid>

[46] “Perossido di idrogeno”

<https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=hydrogen+peroxyde+50%25&viewtype=>

[47] “Soda caustica”

<https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=caustic+soda+flakes&viewtype=>

[48] “Leca cento storico” < <https://www.centrostorico.eu/prodotti/massetto/>>

[49] “Weber plan Mr 81 metal”

<<https://www.e-weber.it/sottofondi-colle-sigillanti/schede-prodotto/massetti/massetti-ad-essiccazione-rapida-e-medio-rapida/weberplan-mr81-metal.html>>

[50] “Massetto tradizionale” <<https://www.fratellipellizzari.it/blog/massetto-piastrelle>>

[51] “Costo massetto” < <http://www.edilnet.it/guida/costo-massetto-62>>

[52] “Riciclaggio dei materiali edili”

<https://it.wikipedia.org/wiki/Riciclaggio_dei_materiali_edili>

[53] “Riciclo dei rifiuti edili e smaltimento degli scarti da demolizione”

<<https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/smaltimento-e-riciclo/riciclo-rifiuti-edili-smaltimento-demolizione-220>>

[54] “Rifiuti e scarti edili: il corretto processo di smaltimento”

<<https://www.infobuild.it/approfondimenti/rifiuti-scatti-edili-corretto-processo-smaltimento/>>

[55] “Materiali riciclati in edilizia? Sei casi concreti”

<<https://www.teknoring.com/news/materiali-da-costruzione/materiali-riciclati-in-edilizia-sei-casi-concreti/>>

[56] “Sabbiacementopiù”

<<https://www.grascalce.it/prodotti/massetti/sabbiacementopiu-massetto-ecosostenibile-sabbia-cemento/>>

[57] “Kerakoll Keracem Eco Pronto”

<<http://products.kerakoll.com/gestione/immagini/prodotti/Keracem%20eco%20pronto%20I TA%202018.pdf>>

[58] “Riciclaggio e frantumazione”

<http://www.cavart.it/ita/impianti/01_riciclaggio_frantumazione.htm>

[59] “Separazione materiali leggeri”

<<https://www.europages.it/Separazione-materiali-leggeri/OFFICINE-CONTERNO-SRL/cpid-5331307.html>>