



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

INDICE

INTRODUZIONE.....	7
1 LA STORIA E L'EVOLUZIONE DELLA GOMMA	11
1.1 Gomma naturale o caucciù.....	12
1.2 Gomme sintetiche	15
1.3 La gomma e gli pneumatici.....	17
1.3.1 Lo pneumatico.....	19
1.3.1.1 Caratteristiche dello pneumatico.....	19
1.3.1.2 Gestione Pneumatici Fuori Uso (PFU)	24
1.3.1.3 Tracciabilità Pneumatici Fuori Uso (PFU)	27
1.4 Possibili tecnologie per il recupero degli pneumatici fuori uso	28
1.4.1 Ricostruzione dello pneumatico	28
1.4.2 Recupero di materia.....	28
1.4.3 De-vulcanizzazione	29
1.4.4 Recupero energetico	32
1.4.4.1 La combustione in cemeniera.....	33
1.4.4.2 La termovalorizzazione	34
1.4.4.3 La pirolisi	35
1.4.5 La granulazione a temperatura ambiente	36
1.4.6 La granulazione criogenica	37
1.4.7 I processi elettrotermici	38
1.4.8 Il water-jet.....	38
2 ASPETTI LEGISLATIVI.....	39
2.1 Il quadro normativo italiano.....	39
2.1.1 Decreto Legislativo 3 aprile 2006 n.152 - Norme in materia ambientale.....	41
2.1.2 Decreto Ministeriale 11 aprile 2011 n.82 - Regolamento per la gestione degli pneumatici fuori uso ...	43
2.1.3 Decreto Ministeriale 7 marzo 2012 n.44 - Decreto di nomina del Tavolo Permanente di Consultazione sulla gestione degli pneumatici a fine vita - PFU	43



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

2.1.4	Decreto Ministeriale 11 ottobre 2017 n.259 - Criteri Ambientali Minimi (CAM)	43
2.1.5	Divieto di smaltimento in discarica degli pneumatici fuori uso (pfu)	44
2.1.6	Incentivi e altre misure premianti per il recupero degli Pneumatici Fuori Uso (PFU)	45
2.2	Il contesto Europeo	47
3	POSSIBILI RIUTILIZZI IN ITALIA DEGLI PNEUMATICI FUORI USO (PFU)	54
3.1	Utilizzo del PFU per gli asfalti modificati (0 – 0,8mm polverino e 0,8 - 2mm granulato)	54
3.2	Materiali edilizia (0 - 20mm granulato e polverino deferrizzato).....	58
3.3	Arredo urbano, pavimenti e manufatti (0 - 15mm granulato e polverino)	59
3.4	Riutilizzo in mescola (0 - 0,4mm polverino)	59
3.5	Opere ingegneria civile (PFU interi 10 - 400mm ciabattato e cippato)	59
3.6	Superfici sportive (0,8 - 20mm granulato deferrizzato)	60
3.7	Materiale per pacciamatura (10 - 50mm cippato deferrizzato).....	61
4	POSSIBILI RECUPERI DEGLI PNEUMATICI FUORI USO NEL MONDO	62
4.1	Valutazione e sviluppo di fibre rinforzate ad alte prestazioni per calcestruzzo autocompattante leggero con briciole riciclate di gomma esposte a temperature elevate [1]. Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures.	62
4.2	Valutazione del modulo resiliente e della deformazione permanente delle miscele non legate di materiali granulari e di particelle di gomma dagli pneumatici di scarto da utilizzare negli strati di sottofondo dei binari ferroviari [2]. An Evaluation of the Resilient Modulus and Permanent Deformation of Unbound Mixtures of Granular Materials and Rubber Particles from Scrap Tyres to Be Used in Subballast Layers.	64
4.3	L'uso di pneumatici decostruiti come elementi elastici nei binari ferroviari [3] The use of deconstructed tyres as elastic elements in railways tracks	66
4.4	Idoneità ambientale e risparmio di impronta di carbonio del riciclaggio di polverino di gomma da pneumatici per applicazioni stradali [4] Environmental Suitability and Carbon Footprint Savings of Recycled Tyre Crumbs for Road Applications	68
4.5	Sviluppo e test di lisciviazione per terreni sintetici contenenti granuli di scarto da pneumatici usati [5] Development of Leaching Procedures for Synthetic Turf Systems Containing Scrap Tyre Granules.....	68



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.6 Nuovo sistema di protezione per motociclisti fatto con gomma riciclata [6]. New motorcyclists protection system made of recycled rubber	69
4.7 Riutilizzi delle fibre tessili degli pneumatici in composti plastici [7] Reuse of tires textile fibers in plastic compounds	71
4.8 Metodi di lavorazione, caratteristiche e comportamento adsorbente dei carboni derivanti da pneumatici [8] Processing methods, characteristics and adsorption behavior of tire derived carbons	72
4.9 Riutilizzo di fibra di polimero da pneumatico nella mitigazione al fuoco [9]. Reused tyre polymer fibre for fire-spalling mitigation	73
4.10 Ricerca sul processo di pirolisi del granulato di gomma da pneumatici nell'olio da cucina esausto [10] Research on the pyrolysis process of crumb tire rubber in waste cooking oil	74
4.11 Riciclaggio rifiuti di gomma attraverso la de-vulcanizzazione [11]. Recycling of rubber wastes by devulcanization	75
4.12 Stabilizzazione di suoli sabbiosi usando frammenti di gomma da pneumatici riciclata [12] Stabilization of sandy soil using recycle waste tire chips	76
4.13 Durata del calcestruzzo contenente pneumatici riutilizzati come parziale sostituzione dell'aggregato fine [13] The durability of concrete containing recycled tyres as a partial replacement of fine aggregate	78
4.14 Uso del gas proveniente da processo di pirolisi di pneumatici usati come carburante [14] Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel	80
4.15 Miglioramento del valore aggiunto del residuo pirolitico (PR) ottenuto da pneumatici usati trasformato in carbon black commerciale [15] Upgrading pyrolytic residue from waste tires to commercial carbon black	81
4.16 Utilizzo di pezzi di gomma per migliorare l'attenuazione degli strati di sub-ballast delle ferrovie costituiti da aggregati non legati [16] Use of rubber shreds to enhance attenuation of railway sub-ballast layers made of unbound aggregates	82
4.17 Ricerca e valorizzazione degli pneumatici usati come materiale innovativo in Algeria [17] Research and enhancement of used tyres such as material innovative in Algeria	82
4.18 Compositi con aggregati di gomma riciclata: proprietà e opportunità nelle costruzioni [18] Composites with recycled rubber aggregates: properties and opportunities in construction	84



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.19 Valutazione sperimentale di muri di sostegno rinforzati con frammenti di gomma riciclata [19] Experimental evaluation of mechanically stabilized earth walls with recycled crumb rubbers	85
4.20 Processo di co-pirolisi del gambo della pianta del cotone con i rifiuti da pneumatici con attenzione sulla quantità e qualità del liquido prodotto [20] Co-Pyrolysis of cotton stalk and waste tire with a focus on liquid yield quantity and quality	86
4.21 Comportamento delle gomme sottoposte al fuoco [21] Behaviour of tyres in fire	87
4.22 Conversione dei rifiuti ottenuti da pneumatici usati in adsorbenti in grado di rimuovere il blu di metilene, il metilarancio e le tetracicline dall'acqua [22] Conversion of waste tire rubber into a high capacity adsorbent for the removal of methylene blu, methyl orange and tetracycline from water ..	88
4.23 Co-pirolisi catalitica di semi d'uva e pneumatici fuori uso per la produzione di biocarburanti [23] Catalytic co-pyrolysis of grape seeds and waste tyres for the production of drop-in biofuel	90
4.24 Sviluppo e proprietà del compensato rinforzato con fibra di carbonio e polvere di gomma da pneumatici riciclati [24] Developmment and material properties of reinforced plywood using carbon fiber and waste rubber powder	90
4.25 Indagine sulla resa e sulla qualità di bio-olio ottenuto con l'aggiunta di scarti da pneumatici usati nel processo di pirolisi della canna da zucchero [25] Investigation on bio-oil yield and quality with scrap tire addition in sugarcane bagasse pyrolysis	92
4.26 Utilizzo sostenibile di geomateriali derivati da pneumatici usati per applicazioni geotecniche [26] Sustainable utilization of scrap tire derived geomaterials for geotechnical applications	93
4.27 Effetti delle particelle di gomma sul comportamento ciclico delle miscele composte da scorie d'altoforno e carbone [27] Effect of rubber crumbs on the cyclic behavior of steel furnace slag and coal wash mixtures	96
4.28 Proprietà meccaniche e termiche della malta leggera geopolimerica contenenti frammenti di gomma da pneumatici [28] Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber	96
4.29 Comportamento termico mi mattori e blocchi cavi fatti con calcestruzzo addizionato di gomma di scarto da pneumatici [29] Thermal behaviour of hollow blocks and bricks made of concrete doped with waste tyre rubber	98



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.30 Comportamento meccanico e capacità portante di un pavimento permeabile ad alta porosità ottenuto utilizzando aggregati di gomma da pneumatici [30] Mechanical behaviour and load bearing mechanism of high porosity permeable pavements utilizing recycled tire aggregates	100
5 CONCLUSIONI	101
BIBLIOGRAFIA	103
ALLEGATI	



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**

Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA

Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

INTRODUZIONE

Il presente studio è stato commissionato dalla società consortile Ges.Tyre Srl con la finalità di analizzare nel dettaglio, attraverso la consultazione di pubblicazioni scientifiche internazionali, lo stato dell'arte dei prodotti provenienti dai processi di trattamento degli pneumatici fuori uso (PFU). La società Ges.Tyre Srl, con sede a Brescia in via della Volta n.183, iscritta al Registro Imprese di Brescia con REA: 528882 è nata per riunire l'esperienza e la professionalità di un gruppo di importatori di pneumatici che si propongono di fornire alla comunità un efficiente servizio di raccolta e recupero degli pneumatici fuori uso nella più stretta osservanza delle normative e nel massimo rispetto per l'ambiente e la salute dei cittadini. Obiettivo dell'attività di ricerca è valutare il prodotto PFU (pneumatici fuori uso) nelle sue principali fasi gestionali: utilizzo, raccolta e stoccaggio, recupero e valorizzazione al fine di realizzare prodotti tecnici innovativi a basso impatto ambientale. In particolare, questo studio intende evidenziare gli attuali riutilizzi degli pneumatici fuori uso dopo essere stati raccolti e opportunamente trattati sia in Italia che nel Mondo. Tale ricerca si inserisce infatti in un contesto legislativo ben chiaro in quanto, con l'applicazione del nuovo Testo Unico Ambientale Decreto legislativo 152/2006 e del Decreto legislativo 36/2003 sulle discariche di rifiuti, non è più possibile smaltire gli PFU in discarica. Con tale divieto, e considerato che fino a poco tempo fa una percentuale molto elevata degli PFU aveva tale destinazione finale, si rende necessario e obbligatorio trovare idonee forme alternative di valorizzazioni delle ingenti quantità che ogni anno si producono. Solo attraverso un idoneo modello gestionale basato sul recupero e valorizzazione, supportato da un valido ed efficiente sistema di ricerca e sviluppo, è possibile riutilizzare lo PFU in nuove mescole che garantiscano l'ottenimento di nuovi prodotti eco-compatibili poco impattanti sull'ambiente. Occorre inoltre evidenziare che, come tutte le attività, al fine di riuscire ad inserire sul mercato nuovi prodotti, risulta di fondamentale importanza garantire sia elevati standard tecnici di qualità, affidabilità e rispondenza alle normative di settore ma, soprattutto, essere competitivi anche a livello



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

economico. L'avvio del processo di recupero avviene a partire dalla triturazione degli pneumatici, che consente di estrarre l'acciaio e di ridurre la parte in gomma in quello che comunemente viene chiamato ciabattato. In un secondo momento questo prodotto viene sottoposto ad un ulteriore processo di triturazione in granulometrie sempre più piccole che possono essere utilizzate in vari prodotti, fino a ottenere il cosiddetto polverino di gomma, caratterizzato da una grande versatilità.

Date le loro caratteristiche di materiale elastico, fonoassorbente e con elevata resistenza al calore e durabilità, i granuli e i polverini di polimero di gomma di PFU vengono utilizzati in diversi settori di mercato per realizzare numerosi prodotti finiti di qualità. In forma non legata, i granuli di PFU sono un ottimo materiale da intaso, ad esempio nella realizzazione di campi da calcio in erba sintetica. In forma legata con altri componenti, danno luogo a prodotti ad elevate prestazioni di utilizzo comune. Se aggiunti al bitume, si producono asfalti modificati con caratteristiche di resistenza alla fessurazione e all'usura delle intemperie superiori agli asfalti tradizionali. Legati in una matrice di resine polimerica, vengono utilizzati per la produzione di pannelli isolanti acustici, o superfici sportive per palestre, campi da tennis e da basket, piste per l'atletica leggera. In mescola con altri polimeri di gomma, vengono utilizzati per produrre manufatti e, in minima parte, vengono anche riutilizzati nella produzione di pneumatici nuovi. La diffusione progressiva dei prodotti da PFU nell'industria e la sempre più spiccata globalizzazione dei mercati, hanno reso necessaria la nascita di un "linguaggio comune" che possa costituire un tavolo di confronto tra settori merceologici anche radicalmente diversi. Uniformare, infatti, a livello europeo e nazionale standard tecnici specifici favorisce l'intera filiera, permettendo inoltre lo sviluppo di nuovi impieghi e nuovi mercati per i prodotti derivati da PFU. A questo scopo, in sede CEN (Comitato Europeo per la Standardizzazione) è stata messa a punto una *Specifica Tecnica riguardante i Materiali prodotti da PFU, la TS 14243*, sotto il coordinamento italiano dell'UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 - 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Categorie di prodotti da PFU – TS 14243

Categoria	Dimensioni min-max (mm)
Taglio primario	> 300 mm
Ciabatta	20 – 400 mm
Cippato	10 – 50 mm
Granulato	0,8 – 20 mm
Polverino	< 0,8 mm
Acciaio	n.d.
Tessile	n.d.

Gli PFU possono essere utilizzati interi, oppure frantumati in dimensioni variabili in funzione dell'impiego finale. La tabella sopra riportata presenta la distinzione che la *Technical Specification 14243* prescrive per i prodotti derivati da PFU a seconda della loro "pezzatura". Nel grafico seguente vengono evidenziati i dati riferiti al 2016 forniti dal Rapporto Sostenibilità Ecopneus in merito ai quantitativi degli pneumatici fuori uso riutilizzati in Italia, Europa e nel Mondo suddivisi per i diversi campi di applicazione.

Ciabattato



Cippato



Granulato



Polverino





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE

Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
 Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
 Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448

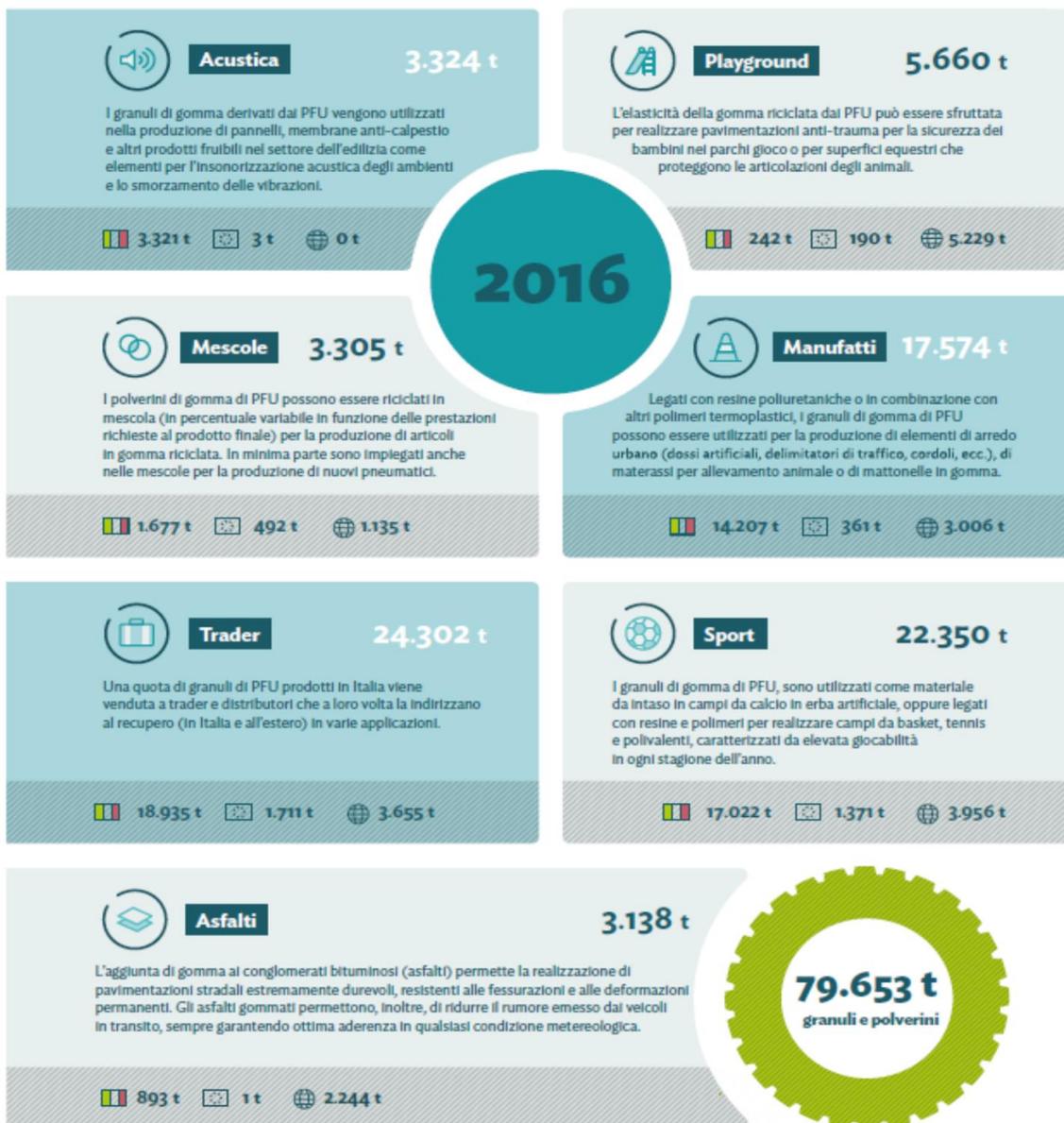


SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA

Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
 Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
 Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Quantitativi e tipologie di riutilizzo degli pneumatici fuori uso

fonte Rapporto Sostenibilità Ecopneus 2016





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

1 LA STORIA E L'EVOLUZIONE DELLA GOMMA

Per molto tempo il termine gomma è stato usato per indicare solo il prodotto naturale, ricavato dalla condensazione del lattice di una pianta comunemente chiamata "albero della gomma", appartenente alla famiglia delle Euphorbiaceae, comprendente una ventina di specie. Sebbene siano diffuse un po' in tutto il nuovo continente, risulta però essere migliore l'*Hevea brasiliensis*, presente nel Brasile settentrionale, specialmente nella regione dell'Amazzonia. L'albero della gomma è una pianta esigente: se il terreno è troppo sabbioso non cresce, se il clima è freddo o ha precipitazioni troppo stagionali non cresce, se gli alberi sono piantati troppo vicini diventano vulnerabili ad un fungo molto vorace chiamato *Microcyclus ulei* e muoiono. La produzione di gomma naturale nel mondo è oggi così ripartita: 92 per cento viene dall'Asia, il 5 per cento dall'Africa ed il 3 per cento dall'America meridionale; la produzione brasiliana, terra d'origine dell'albero della gomma, risente ancora oggi della presenza del fungo parassita. L'*Hevea brasiliensis* è una pianta alta una ventina di metri; le foglie sono alterne, ellittiche o lanceolate, lunghe da 5 a 60cm. Il ciclo di vita dura all'incirca 35 anni e la produzione di lattice, proveniente dai canali laticiferi della scorza, inizia solamente tra il quinto e il settimo anno d'età. Le piantagioni di alberi da gomma richiedono un utilizzo massiccio di capitali e la raccolta del lattice è molto complessa: normalmente, una pianta produce tre chili di gomma essiccata all'anno (alternando periodi di produzione a periodi di riposo), all'incirca una tonnellata per ettaro di piantagione e richiede l'impiego di personale specializzato. Le proprietà e le applicazioni della gomma, note già in epoca precolombiana alle popolazioni indigene del Sudamerica descritte da Colombo e da altri esploratori europei, rimasero pressoché ignorate per molto tempo. Nel 1736 il geografo e matematico francese Charles-Marie de La Condamine tornò da una spedizione geografica in Amazzonia con numerosi rotoli di gomma grezza e con la descrizione dei prodotti fabbricabili con essa. Ciò riaccese l'interesse scientifico per questa sostanza e



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

per le sue proprietà. Nel 1791 il fabbricante britannico Samuel Peal brevettò un metodo per impermeabilizzare gli abiti, trattandoli con una soluzione di gomma in acqua ragia. L'instabilità delle proprietà della gomma, in particolare la forte dipendenza delle caratteristiche meccaniche ed elastiche dalla temperatura e in generale dalle condizioni esterne, rappresentava comunque il principale svantaggio di questa sostanza. I manufatti in caucciù, infatti, diventavano rigidi e fragili in inverno e appiccicosi e maleodoranti in estate. Nel 1834 il chimico tedesco Friedrich Ludersdorf e il chimico statunitense Nathaniel Hayward scoprirono che l'aggiunta di zolfo alla gomma diminuiva sensibilmente la viscosità dei prodotti finiti. Partendo da questo presupposto, nel 1839 l'inventore statunitense Charles Goodyear scoprì che riscaldando una miscela di gomma e zolfo si eliminava il cattivo odore della sostanza, stabilizzandone al contempo le proprietà meccaniche; questo processo, detto "vulcanizzazione", rimane tuttora alla base della lavorazione della gomma. La gomma vulcanizzata presenta maggiore resistenza ai cambiamenti di temperatura, alle abrasioni, agli agenti chimici e all'elettricità rispetto alla sostanza non trattata. Quando si è conosciuta la struttura chimica della gomma naturale si è riusciti ad ottenere altre sostanze dotate delle stesse proprietà e il termine gomma è stato esteso a tutti i prodotti naturali e artificiali che hanno lo stesso comportamento elastico. Si tratta di macromolecole costituite da lunghe catene polimeriche, più o meno raggomitolate e distribuite casualmente le quali, se vengono distese riprendono la loro forma originaria. La gomma naturale e quelle sintetiche allo stato grezzo non sono impiegate, poiché le loro caratteristiche, sia meccaniche che elastiche, sono scadenti. Tuttavia, modificando la loro struttura, riunendo tra loro le catene si ottiene una struttura tridimensionale più stabile, che consente di conservarne l'elasticità entro limiti molto più ampi.

1.1 Gomma naturale o caucciù

La gomma naturale (Natural Rubber, NR) è un prodotto derivante dalla metamorfosi di alcuni costituenti delle cellule vegetali di diverse piante (se ne contano circa 300 esemplari) e principalmente si ricava dalla coagulazione del lattice che viene prodotto



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

dall'Hevea Brasiliensis, un albero originario del bacino amazzonico conosciuto come albero della gomma o caucciù. La grande domanda di gomma naturale ha portato ricchezza nelle regioni del Sud-Est asiatico, ma ha anche trasformato uno degli ecosistemi più variati del mondo in una vulnerabile monocoltura. In Cina, Laos, Thailandia, Cambogia e Myanmar, i contadini hanno tagliato o bruciato le foreste per piantare filari di Hevea Brasiliensis. C'è, inoltre, il problema del grande consumo di acqua che necessitano per produrre il lattice e che, in alcune regioni, ha molto ridotto i livelli di pozzi e fiumi montani. Per ottenere la gomma naturale inizialmente il lattice viene estratto dalle piante effettuando un'incisione sulla corteccia dell'albero e raccogliendo la linfa appiccicosa, color latte, che viene raffinata fino ad ottenere una gomma lavorabile.

Il lattice viene estratto praticando incisioni diagonali nella corteccia dell'albero della gomma



La forma purificata della gomma naturale è il poli-isoprene che può essere anche prodotto sinteticamente. Di solito è molto elastica, flessibile ed estremamente impermeabile. La gomma naturale viene spesso vulcanizzata, si tratta di un processo in cui la gomma viene riscaldata con l'aggiunta di vari tipi di additivi come zolfo, perossido o bisfenolo per migliorare la resistenza e l'elasticità e per prevenirne il deterioramento. Il nerofumo è spesso usato come additivo per migliorare la resistenza, specialmente nelle gomme usate per produrre pneumatici.

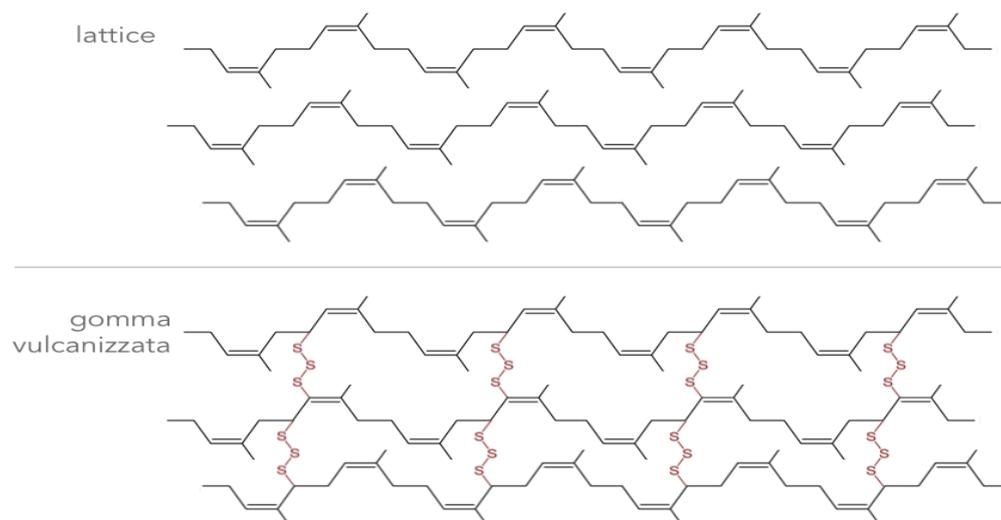


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Il processo di *vulcanizzazione* viene così chiamato in onore di Vulcano, dio romano del fuoco, e fa sì che tra le lunghe catene di poliisoprene si formino dei ponti, o *cross-link*, che le fissano una all'altra rendendo il materiale più elastico e meno deformabile. La gomma naturale è formata da polimeri di isoprene aggrovigliati ma non legati tra loro (nell'immagine sono distesi per chiarezza). Dopo la vulcanizzazione, si formano dei ponti di zolfo (-S-S-S-) tra una catena e l'altra che rendono la gomma più resistente alla trazione.



La gomma naturale vulcanizzata possiede ottime caratteristiche fisico-meccaniche ed elastiche tra cui un'ottima resistenza all'abrasione, una buona impermeabilità e resistenza alla fatica; funge benissimo da isolante elettrico e resiste pure ad alcuni solventi; purtroppo, non possiede una buona resistenza a contatto con oli e benzine. Con riferimento, ancora una volta, alle caratteristiche fisiche, la gomma naturale vulcanizzata può resistere a temperature limite che spaziano in un range tra i -50 e gli 80 gradi centigradi. Il 70 per cento della produzione mondiale di gomma naturale viene destinata prevalentemente al settore automotive per la costruzione degli pneumatici, grazie alla sua ottima resistenza allo strappo e al calore; il rimanente 30 per cento



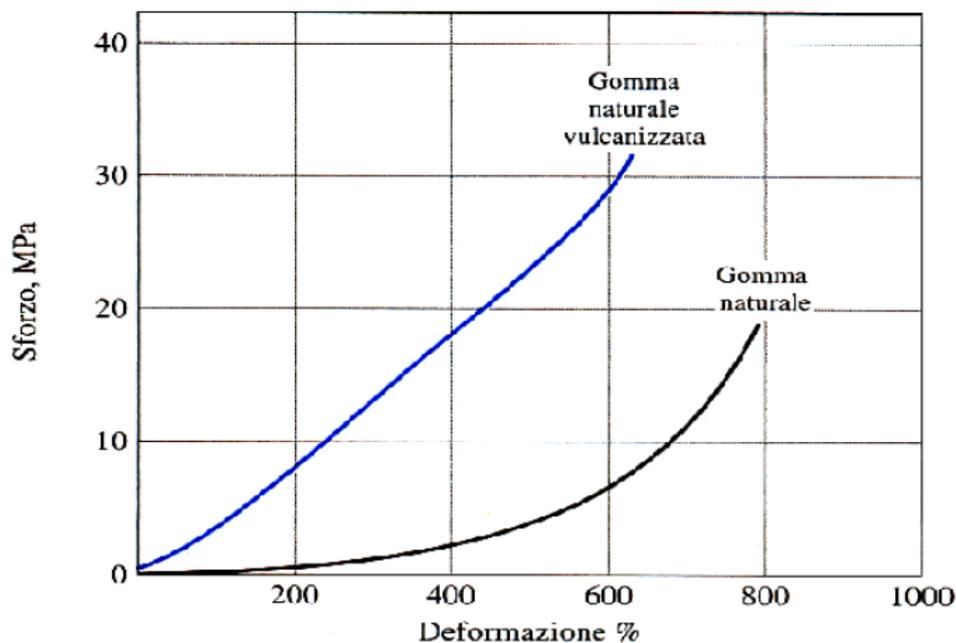
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

viene utilizzato in ambito industriale per la produzione di profili per porte e finestre, tubi, guarnizioni e rivestimenti industriali, nastri, adesivi e componentistica varia.

Diagramma sforzo/deformazione della gomma naturale prima e dopo la vulcanizzazione



1.2 Gomme sintetiche

Le gomme sintetiche utilizzate nel settore della gomma derivano dal petrolio. Sono sostanze ottenute attraverso processi di polimerizzazione di monomeri derivati dal petrolio che successivamente vengono fatti coagulare per formare la gomma sintetica stessa; pur presentando una struttura differente da quella della gomma naturale, hanno comportamento elastico analogo. Le difficoltà e il venir meno degli approvvigionamenti di gomma naturale durante il periodo bellico diedero impulso allo sviluppo della produzione di gomma sintetica la quale venne gradualmente perfezionata negli anni fino ad ottenere prodotti per vari aspetti superiori alla gomma naturale. La gomma sintetica è attualmente quella di gran lunga più importante e il suo consumo ha



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

largamente superato quello della gomma naturale grazie alla migliore modellabilità, alle caratteristiche fisico-meccaniche e tecniche e alla possibilità di conservarle più a lungo nei magazzini senza particolari precauzioni ambientali. Oltre che per alimentare una domanda crescente di elastomeri da parte delle industrie trasformatrici, la gomma sintetica si impose nell'utilizzo industriale poiché ad una minore capacità elastica rispetto al prodotto naturale accompagna alcune caratteristiche (resistenza ai solventi, agli oli ecc.) che la rendono preferibile in molti tipi di produzioni. Accanto a questi fattori vanno anche considerati la maggiore sicurezza e regolarità di approvvigionamento. Il mondo delle gomme sintetiche è molto ampio e variegato, tuttavia per la realizzazione della maggior parte dei prodotti finiti ne vengono utilizzate soltanto alcune. Le principali sono la Acrylonitrile Butadiene Rubber (NBR), la Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber (HNBR a idrogeno), la Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber (EPDM), la Styrene Butadiene Rubber (SBR), la Polybutadiene Rubber (BR) e la Chloroprene Rubber (CR). Per l'attività di ricerca in oggetto verrà presa in considerazione solamente la gomma sintetica SBR: un elastomero derivato dal petrolio, composto da due monomeri quali il butadiene e lo stirene, che, allo stesso modo di tutte le altre gomme sintetiche, vengono sottoposti al processo di polimerizzazione e successivamente fatti coagulare per ottenere la miscela sintetica. Durante il processo di polimerizzazione, lo stirene e il butadiene vengono dosati in quantità fisse in base ad un rapporto di 1 a 3. La gomma SBR viene prodotta in due formati: la ESBR, detta a emulsione, e la SSBR, che costituisce una soluzione più innovativa recentemente utilizzata per lo sviluppo di pneumatici più performanti. Le sue caratteristiche fisico-meccaniche e tecniche assomigliano molto a quelle della gomma naturale, con prestazioni migliorative in riferimento alla processabilità, durabilità, flessibilità e resistenza agli agenti atmosferici e all'abrasione. Durante il processo di vulcanizzazione a zolfo, svolto ad una temperatura di circa 100 gradi, la gomma grezza viene additivata con rinforzanti, acceleranti, attivanti e anti-invecchianti, che ne migliorano le prestazioni e ne diminuiscono il costo.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

1.3 La gomma e gli pneumatici

L'utilizzo principale della gomma è quello automobilistico: si stima che il 60% della produzione sia dedicato agli pneumatici e un altro 10% ad altri prodotti per l'industria dell'auto. Ma la gomma è presente anche in altri aspetti della nostra vita, sotto forma di fili elettrici, scarpe, pavimentazioni, guarnizioni e innumerevoli altri prodotti. Quella che troviamo negli oggetti è una miscela che deriva essenzialmente da due materiali: la gomma naturale e la gomma sintetica. La gomma naturale è una delle pochissime materie prime industriali la cui estrazione non ha gravi contropartite di impoverimento dell'ambiente: il "succo" degli alberi matura in 6/7 anni e la lavorazione richiede molta manodopera, costituendo quindi una buona fonte di lavoro e di reddito per paesi come Cambogia, Indonesia, Malaysia, Sri Lanka, Camerun, Costa d'Avorio, Nigeria, Brasile e Messico. La gomma sintetica viene prodotta da circa 50 multinazionali, partendo da materie prime derivate dalla distillazione del petrolio e modificate chimicamente.

➤ *Uno pneumatico per autovettura del peso di circa sei chili è composto per quasi la metà da elastomeri (la cosiddetta gomma), per 1/5 da nerofumo e per il rimanente da acciaio (attorno al 15%), oli, vulcanizzanti, ossidi di zinco e materiali tessili.*

Le diverse tipologie di pneumatico possono essere riunite in due categorie principali ed individuate nel settore autovetture e nel settore autocarri. Una specifica distinzione può anche esser fatta sul peso dei singoli pneumatici siano essi appartenenti ad una o all'altra categoria. La composizione, per i due settori autovetture ed autocarri, è determinata principalmente da gomma naturale e sintetica, la cui componente elastomerica è costituita dal copolimero di Stirene-Butadiene (SBR). Ciascun ingrediente della miscela (gomma/elastomeri, nerofumo, acciaio, tessile, ossido di zinco, zolfo e additivi chimici) contribuisce a dar allo pneumatico delle caratteristiche specifiche, al fine di favorirne una maggiore vita. Una gomma non trattata è relativamente debole, morbida, molto flessibile e non solubile in acqua, alcali ed acidi deboli, mentre è solubile nel benzene, gasolio, idrocarburi clorurati e nei composti carbonio-zolfo. Per attribuire alla gomma cruda delle caratteristiche di robustezza ed

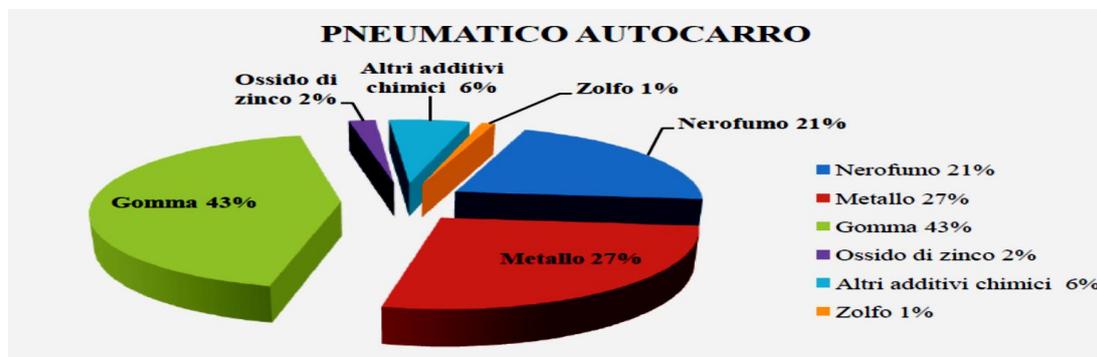
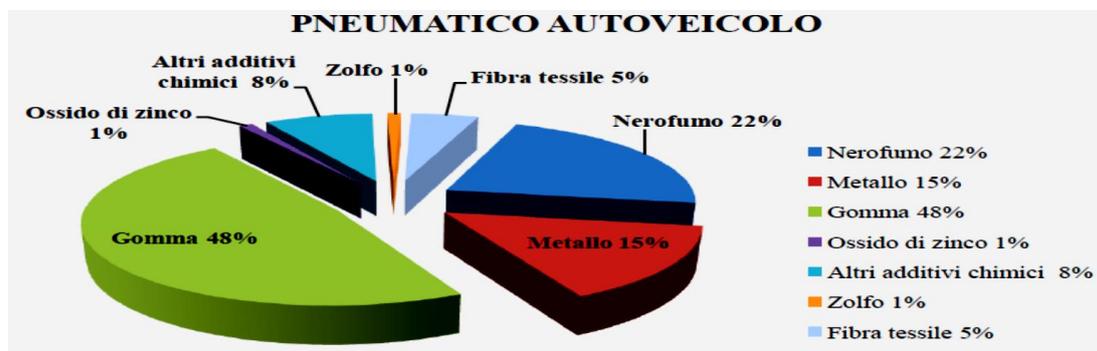


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

elasticità occorre sottoporla a processi che diano origine a legami tra le molecole che la compongono. Tali processi prendono il nome di vulcanizzazione. Una volta vulcanizzata la gomma diviene resistente alle abrasioni, impermeabile ai gas, alle azioni chimiche, al calore ed all'elettricità.



Nei grafici sopra riportati si evidenziano le diverse composizioni di uno pneumatico da autoveicolo rispetto a quello di un autocarro. Queste differenze non si esprimono solo in termini di dimensioni, di acciaio o tessile inclusi nella loro struttura, ma anche nei tipi e nelle proporzioni tra gomma naturale e sintetica, nerofumo e silice e gli altri ingredienti usati nelle mescole.



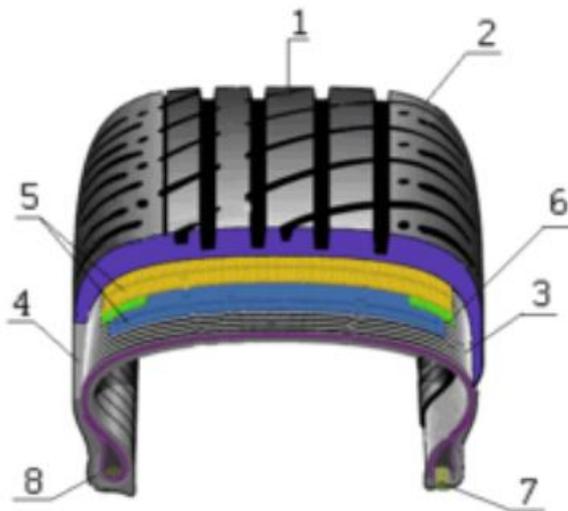
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

1.3.1 Lo pneumatico

Lo pneumatico è l'elemento che viene montato sulle ruote dell'auto e permette l'aderenza del veicolo alla strada. È un composito, cioè un assemblaggio di materiali con proprietà molto diverse il cui confezionamento richiede una grande precisione. Molto spesso si utilizza il termine “gomma” per indicare lo pneumatico: in realtà la gomma è una delle materie prime che lo compongono, mentre lo pneumatico è un suo prodotto. Principalmente è composto da: uno strato di gomma (naturale o sintetica a perfetta tenuta d'aria); una carcassa, costituita da sottili fili di tessuto incollati alla gomma; un'imbottitura nella zona bassa; un battistrada, che sarà la parte che aderirà al suolo (una volta composto di gomma naturale e ora principalmente di gomma sintetica). Tutti questi elementi contribuiranno a mantenere la direzione, sostenere il carico, ammortizzare, rotolare e influiranno sulla durata dello pneumatico.



- 1: Battistrada (di *gomma naturale* o *sintetica*)
- 2: Bordo del battistrada (di *gomma naturale* o *sintetica*)
- 3: Carcassa (fili di nylon)
- 4: Fianco dello pneumatico o spalla (tela)
- 5: Pacco cintura (strati di corde e fili di acciaio)
- 6: Rinforzi laterali del pacco cintura (nylon e poliestere)
- 7: Cerchietti (fasce d'acciaio)
- 8: Tallone (strato di tela di *gomma sintetica*)

1.3.1.1 Caratteristiche dello pneumatico

Inventato da Thomson nel 1846 e una seconda volta da John Boyd Dunlop nel 1888, equipaggia oggi la maggior parte dei mezzi di trasporto destinati ad un utilizzo su strada e, montato sulle ruote, permette l'aderenza del veicolo alla strada. Viene

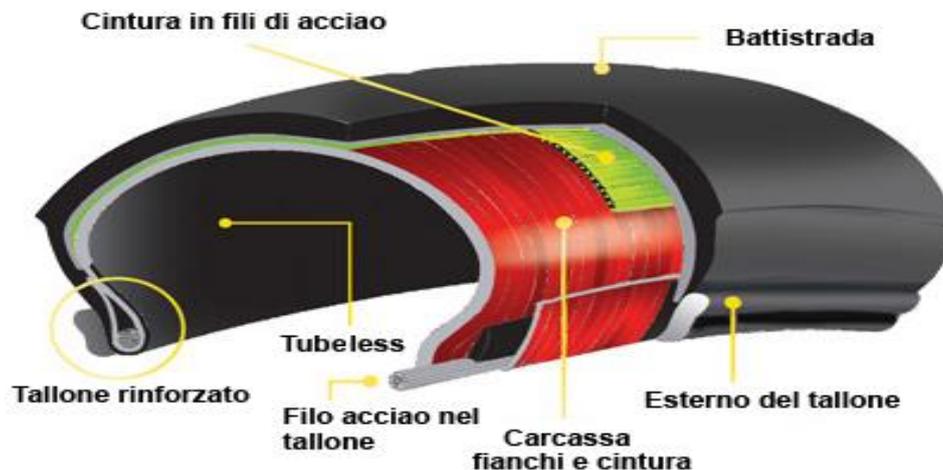


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

prodotto in molteplici tipi e misure per essere funzionali all'uso di biciclette, autovetture, autocarri, trattori, senza dimenticare l'utilizzo aeronautico nei carrelli d'atterraggio. Sono inoltre importanti gli utilizzi sportivi nelle varie competizioni motoristiche dove lo studio, alla ricerca delle migliori prestazioni, ha portato alla costruzione degli pneumatici con mescole molto differenziate e alla scoperta di soluzioni tecniche investite in un secondo momento nell'industria degli pneumatici.



Per pneumatico (a seconda del tipo) s'intende l'insieme di:

- ✚ **Tube Type**: una camera d'aria che racchiude l'aria compressa per ottenere un effetto di adattamento e sospensione del veicolo dal terreno. La copertura è costituita da gomma (in passato naturale, oggi sintetica), essenziale nel trasmettere e ricevere gli attriti radenti e volventi che si generano con il movimento, e tele di fibra o di metallo.
- ✚ **Tubeless**: la copertura è essenzialmente identica a quella tube type, ma possiede anche la funzione di camera d'aria (non ne richiede quindi l'utilizzo), se montata su una ruota appropriata.

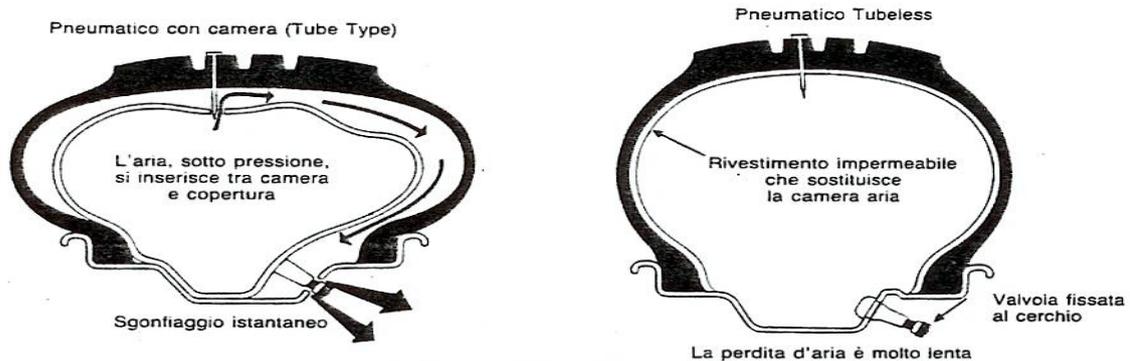


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

**Differenza qualitativa nella velocità di afflosciamento in caso di foratura
tra uno pneumatico Tube Type e uno Tubeless**



- 1) La composizione strutturale di uno pneumatico si identifica nei seguenti elementi:
 - a) *Il battistrada (tread)*: è la parte dello pneumatico destinata al contatto con il terreno per assicurare l'attrito. Il disegno del battistrada è importante soprattutto per le superfici bagnate. La prima parte del battistrada, che viene a contatto con la superficie bagnata, serve ad allontanare l'acqua permettendo alla restante superficie drenata di fornire attrito necessario alla stabilità del veicolo. I canali, che vanno dal centro al bordo del battistrada, servono per espellere l'acqua. Gli pneumatici invernali hanno una composizione più morbida e una profondità del battistrada tale da permettere una maggiore trazione.
 - b) *La carcassa (casing)*: è la parte strutturale dello pneumatico (comprendente la parte laterale) su cui è vulcanizzato il battistrada. La carcassa di uno pneumatico da autovettura include la componente tessile, non presente invece negli pneumatici per autocarri. Questi ultimi inglobano una percentuale maggiore di acciaio. Il materiale della carcassa è rayon o poliestere o aramide. La fittezza dei fili presenti nella carcassa è 80 fili/100 mm.
 - c) *La spalla (sidewall)*: è la parte laterale della carcassa e assolve due compiti diversi: è flessibile in senso verticale per minimizzare il trasferimento delle irregolarità del terreno sul veicolo, mentre è relativamente rigida



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

orizzontalmente per trasferire sul terreno i carichi dovuti a sottosterzo, frenata e accelerazione.

- d) *Le tele (belts)*: è il piano, o i piani, di materiale messo in posizione centrale tra la carcassa e il battistrada.
- 2) Le caratteristiche geometriche degli pneumatici influenzano fortemente il loro comportamento su strada, alcuni dei fattori fondamentali si possono rilevare nei seguenti elementi distintivi:
- a) *Il profilo dello pneumatico*: studiato a seconda delle esigenze a cui deve rispondere e al mezzo su cui va applicato, si può dividere in due tipi:
- ✓ normale, questi pneumatici sono studiati in modo da offrire la migliore guidabilità. Nel caso di pneumatici automobilistici, questi avranno un'unione tra spalla e battistrada arrotondato.
 - ✓ sportivo, questi pneumatici sono studiati in modo da offrire la migliore tenuta. Nel caso di pneumatici automobilistici, questi avranno un'unione netta tra spalla e battistrada, in modo da massimizzare l'impronta a terra, anche se come inconveniente l'inserimento in curva risulta meno lineare/graduale.
- b) *La larghezza del battistrada*: è un parametro che influisce in vari modi a seconda della tipologia di pneumatico:
- ✓ Motociclistico, maggiore sarà la sua larghezza, maggiore sarà la sua capacità di tenuta, ma si penalizzerà la velocità di cambio direzione e la tenuta su fondi bagnati.
 - ✓ Automobilistico, maggiore sarà la sua larghezza, maggiore sarà la sua capacità di tenuta, ma si penalizzerà la velocità di sterzata, di cambio direzione e la tenuta su fondi bagnati.
- c) *L'altezza spalla*: maggiore sarà l'altezza della spalla e maggiore sarà la distanza tra il manto stradale e il cerchione. Questa caratteristica permette una maggiore deformazione del profilo dello pneumatico, migliorando l'assorbimento di fondi irregolari, smorzando l'effetto delle masse non sospese e riducendo



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

l'intervento delle sospensioni/ ammortizzatori, ma sfavorevolmente riduce la propria reattività su fondi duri e regolari quali le strade.

- d) *La circonferenza della ruota*: maggiore sarà tale valore e minore sarà l'effetto delle irregolarità del terreno, determinando un passaggio più morbido da un livello all'altro.
- 3) Oltre alle caratteristiche geometriche occorre evidenziare le proprietà fisiche dello pneumatico che si distinguono in:
- a) *pressione dello pneumatico*: maggiore sarà la pressione e maggiore sarà la durezza dello pneumatico, questo valore deve essere regolato in base al peso del veicolo, al tipo di strada da percorrere e al tipo di pneumatico utilizzato: una pressione relativamente elevata è adatta a mezzi pesanti, strade lisce e dure e pneumatici con spalla bassa (come i tubolari delle bici da corsa).
- b) *aderenza degli pneumatici*: l'aderenza degli pneumatici, come descritto dalla legge della fisica sull'aderenza, non è definita dalla larghezza dello stesso ma dal coefficiente d'aderenza dello pneumatico, che viene definito in funzione della mescola. Il problema dell'aderenza degli pneumatici è dato dal fatto che il materiale a contatto con l'asfalto, tende a scaldarsi, soprattutto in condizioni d'utilizzo gravoso, come in curva e in frenata. Per questo motivo la larghezza dello pneumatico deve possedere un valore minimo, altrimenti si rischia di surriscaldare lo pneumatico e diminuire di conseguenza il coefficiente d'attrito. E' altrettanto vero che il pavimento stradale non ha sempre le stesse caratteristiche, quindi si possono avere delle zone di maggiore aderenza rispetto alle altre.

La composizione degli pneumatici da autovettura è diversa da quella degli pneumatici da autocarro. Queste differenze non si esprimono solo in termini di dimensioni, di acciaio o tessile inclusi nella loro struttura, ma anche nei tipi e nelle proporzioni degli ingredienti usati nelle mescole di base. In particolare, dette proporzioni sono date dal rapporto tra gomma naturale e sintetica nonché dal tipo di nerofumo o di silicio che



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

sono richiesti per ottenere differenti proprietà dello pneumatico. Gli elementi che caratterizzano uno pneumatico sono quattro:

- ✓ *il disegno del battistrada*
- ✓ *i codici di riconoscimento sui fianchi*
- ✓ *la struttura della carcassa e del battistrada*
- ✓ *la miscela della gomma con cui è fatto lo pneumatico*

Ciascun ingrediente della miscela (gomma/elastomeri, nerofumo, acciaio, tessile, ossido di zinco, zolfo e additivi chimici) contribuisce nel dare allo pneumatico delle caratteristiche specifiche, al fine di favorirne una maggiore vita. Ogni parte dello pneumatico è realizzata attraverso l'utilizzo di una particolare miscela. Il battistrada deve resistere all'usura e aderire al suolo, il fianco deve essere elastico, il tallone rigido, la carcassa deve sorreggere la struttura dello pneumatico e una speciale miscela all'interno lo impermeabilizza.

1.3.1.2 Gestione Pneumatici Fuori Uso (PFU)

Il rifiuto che si origina dalle attività di ricambio degli pneumatici o dalle attività di demolizione dei veicoli su cui gli pneumatici sono stati montati costituisce una risorsa preziosa e suscettibile di reimpiego in processi finalizzati alla produzione sia di energia sia di nuove materie prime, con importanti ed evidenti benefici ambientali, economici e sociali. Gli Pneumatici Fuori Uso (comunemente abbreviati in PFU) sono quei rifiuti generati quando gli pneumatici montati su auto, moto o mezzi pesanti giungono a fine vita e non possono essere più riutilizzati sui mezzi o rigenerati, ricoprendone il battistrada. Anche lo pneumatico, quindi, una volta esaurita la sua funzione primaria - ossia quella di "rivestimento esterno delle ruote dei veicoli" - diventa rifiuto speciale non pericoloso e viene classificato PFU, con relativo codice *CER (Catalogo Europeo dei Rifiuti) 160103* che ne definisce la categoria secondo la direttiva 75/442/CEE. Se raccolti e gestiti correttamente li PFU possono però diventare una risorsa perché al loro interno contengono gomma, acciaio e fibre tessili che attraverso un processo di riciclo



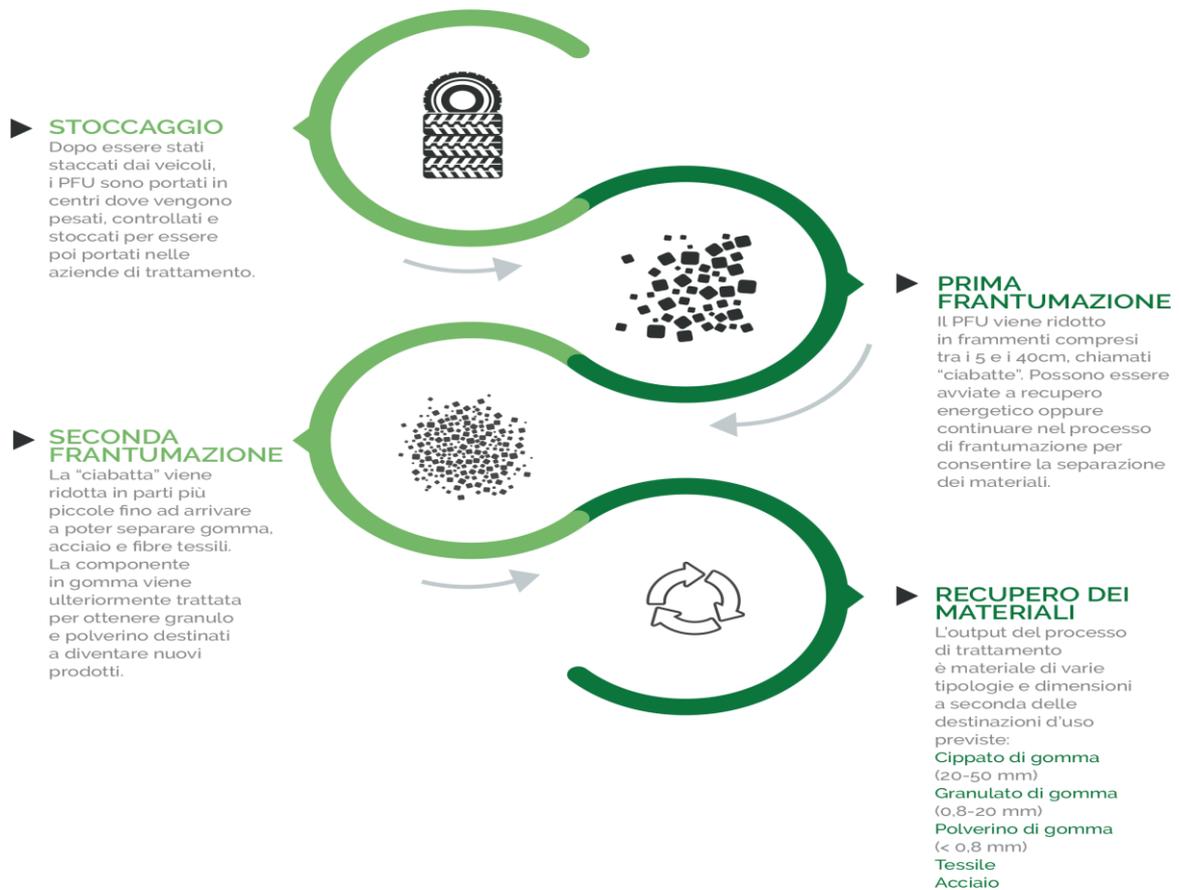
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

possono generare materie prime seconde. In alternativa gli PFU possono essere avviati al recupero energetico per alimentare termovalorizzatori o cementifici.

Gestione Pneumatici Fine Uso (PFU) – (grafico ottenuto da sito Ecopneus)



All'interno delle possibilità di recupero, non tutte le operazioni di gestione dei rifiuti hanno lo stesso valore. Il Codice Ambientale (e tutta la normativa in materia di rifiuti dettata dall'Europa) stabilisce precisi criteri di priorità, validi naturalmente anche per gli pneumatici fuori uso:

1. la *prevenzione* (che dobbiamo considerare al di sopra e al di fuori del recupero, pur essendo sempre l'opzione da privilegiare);



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

2. la *preparazione per il riutilizzo*: "operazioni di controllo, pulizia, smontaggio e riparazione attraverso cui prodotti o componenti di prodotti diventati rifiuti sono preparati in modo da poter essere reimpiegati senza altro pretrattamento";
3. il *riciclaggio*: "qualsiasi operazione attraverso cui i rifiuti sono trattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il trattamento di materiale organico ma non il recupero di energia né il ritrattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento";
4. recupero di altro tipo, per esempio il *recupero di energia*;
5. smaltimento (che è per sua natura al di fuori del recupero).

Sistema di recupero Pneumatici Fine Uso (PFU) – (grafico ottenuto da sito Refibre Life)



L'articolo 183 del Codice Ambientale definisce inoltre il riutilizzo come "qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti". Applicando tale gerarchia alla filiera degli pneumatici vengono fuori le seguenti priorità:



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

1. riutilizzo degli pneumatici usati anche con ricostruzione degli pneumatici non divenuti rifiuto (prevenzione);
2. ricostruzione di pneumatici divenuti rifiuti (preparazione per il riutilizzo);
3. recupero di materia da PFU (riciclaggio);
4. recupero di energia da PFU (recupero di altro tipo);
5. smaltimento in discarica di PFU (possibile solo per i PFU di largo diametro).

1.3.1.3 Tracciabilità Pneumatici Fuori Uso (PFU)

Con tracciabilità s'intende la capacità, da parte del soggetto incaricato della gestione degli PFU, di conoscere, nel dettaglio, le singole movimentazioni del rifiuto, sino al momento in cui lo stesso non risulti più tale. Conseguentemente, per poter affermare di disporre della completa tracciabilità degli PFU è necessario che:

- ✓ siano identificati e monitorati i punti di produzione, nonché siano conosciuti i quantitativi in giacenza presso gli stessi;
- ✓ siano, conseguentemente, programmati i ritiri degli PFU allorquando i quantitativi in giacenza lo richiedano;
- ✓ sia operativa ed efficiente una rete di trasportatori contrattualizzati, in grado di provvedere, nei tempi e nelle modalità concordate, al tempestivo ritiro degli PFU dai punti di produzione;
- ✓ i trasportatori, in tempo pressoché reale, confermino l'avvenuto ritiro nonché la rispondenza qualitativa e quantitativa del rifiuto, indi procedano al deposito temporaneo degli stessi o all'immediata consegna ai centri di recupero;
- ✓ sia contrattualizzata una rete di centri di recupero, altamente professionali e dotati di esperienza, in grado di informare, anch'essi in tempo reale, sia della ricezione delle singole spedizioni degli PFU, che del trattamento degli stessi, con certificazione dei prodotti ottenuti.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

1.4 Possibili tecnologie per il recupero degli pneumatici fuori uso

In modo sintetico è possibile asserire che le principali forme di recupero degli pneumatici usati sono mirate all'ottenimento di:

-  pneumatici ricostruiti;
-  materiali reimpiegabili in diversi cicli di produzione e/o di consumo;
-  energia.

1.4.1 Ricostruzione dello pneumatico

Al termine del ciclo di vita dello pneumatico, che salvo casi particolari, si verifica quando la profondità del battistrada induce l'utente alla sostituzione e che deve essere comunque fatta in ogni caso quando il battistrada raggiunge la minima profondità di legge, la carcassa può possedere ancora tutti i requisiti di sicurezza per essere reimpiegata per la stessa funzione per la quale è stata progettata, previa ricostruzione del battistrada. Non solo, anche dopo la prima ricostruzione, lo pneumatico usurato, soprattutto per applicazioni su veicoli industriali, può essere successivamente ricostruito. La ricostruzione è il metodo di recupero più nobile in quanto valorizza maggiormente lo pneumatico usato reintroducendolo nel medesimo ciclo di consumo allungandone così il proprio ciclo di vita. La ricostruzione è un processo che prevede la rigenerazione del battistrada dello pneumatico usurato. Il ciclo di lavorazione è composto dalle seguenti fasi: controllo di conformità della carcassa mediante ispezione visiva, eventuale riparazione, eventuale essiccazione, rimozione mediante rasatura del battistrada residuo, ricostruzione del nuovo battistrada che può avvenire con procedimenti a caldo con sistema di vulcanizzazione a stampo oppure con procedimento a freddo impiegando bande pre-vulcanizzate.

1.4.2 Recupero di materia

Gli pneumatici sono da considerarsi un'ottima risorsa, nell'ottica dello sviluppo sostenibile, poiché hanno una vita media superiore ai 50 anni e delle proprietà intrinseche da non sottovalutare, tra cui lo sviluppo batterico rallentato, la resistenza



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

alla muffa, al caldo e all'umidità, alla luce del sole o ai raggi ultravioletti come pure agli olii, agli acidi e ad altri prodotti chimici; hanno inoltre proprietà elastiche e resistono bene agli urti. A seconda della pezzatura ottenuta dagli PFU variano le materie prime secondarie derivate e di conseguenza il loro nuovo utilizzo. Quantità di materiali di granulometria maggiore, cioè pneumatici interi, triturati e chip, ben si prestano per applicazioni tipiche dell'ingegneria civile. Quantità di materiali più piccoli, cioè granulato e polverino, trovano applicazione nel mercato dell'autoricambio, nelle mescole per bitumi, vernici o altro. Il polverino ed il granulato di gomma sono due consolidati prodotti industriali e più precisamente due materie prime secondarie derivanti dall'attività di recupero di pneumatici fuori uso. La produzione di polverino e granulato di gomma nasce storicamente dallo stesso settore di lavorazione di manufatti in gomma, cui fornisce una vera e propria materia prima secondaria. Negli ultimi anni si è assistito ad un'espansione dei suoi impieghi in molteplici e svariati settori.

1.4.3 De-vulcanizzazione

La de-vulcanizzazione è il processo attraverso cui si cerca di scindere i legami chimici tra gomma e zolfo, creati grazie alla vulcanizzazione, e responsabili delle proprietà elastiche e di resistenza meccanica che fanno della gomma un materiale molto apprezzato. In particolare, tale processo può avvenire nelle seguenti modalità:

- a) chimica: viene aggiunto polverino di gomma a reagenti chimici a temperature e pressioni elevate specifiche. Una volta terminato il processo i residui vengono risciacquati, filtrati ed asciugati per eliminare le eventuali impurità chimiche indesiderate. Possono essere utilizzati diversi agenti de-vulcanizzanti e a seconda della tipologia scelta e delle caratteristiche della materia prima impiegata si otterranno delle diverse sostanze in uscita dal reattore. Ad esempio, utilizzando disolfuri nel processo si potrebbe ottenere la formazione di idrogeno solforato (H_2S), metile o altri tioli (composti organici assimilabili ad alcoli in cui l'atomo di ossigeno è stato sostituito da un atomo di zolfo, aventi quindi formula generale R-

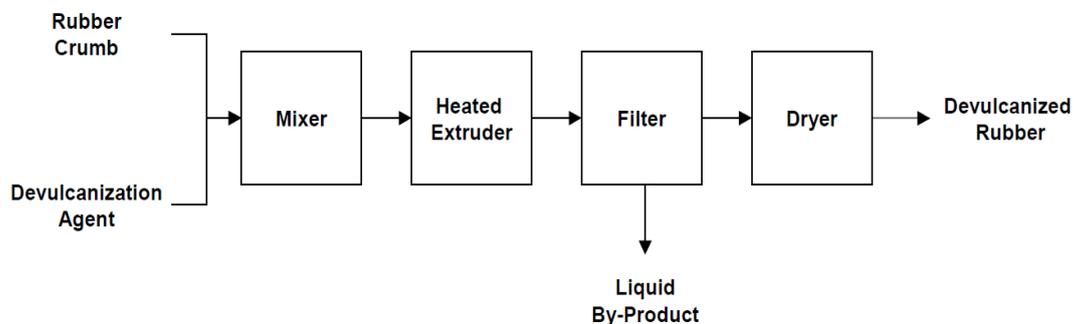


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448

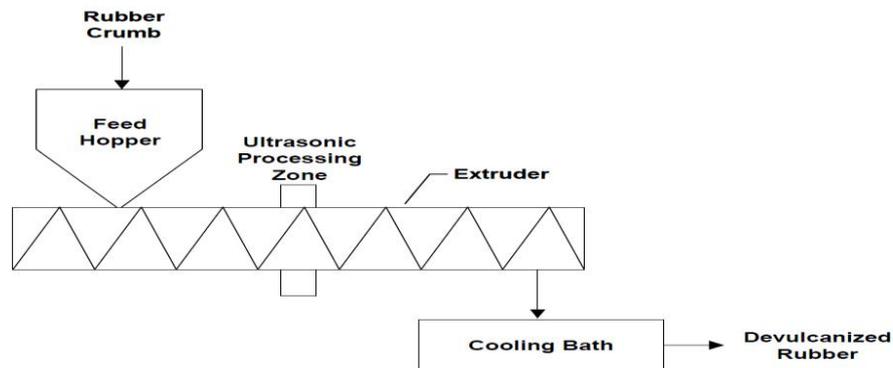


SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

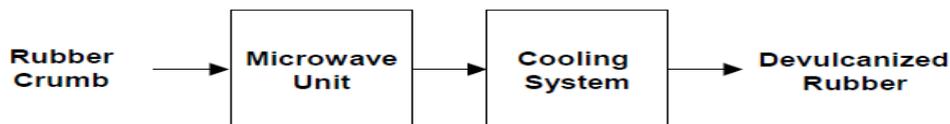
SH. Il gruppo funzionale SH viene denominato sia come gruppo tiolo o come gruppo solfanile). Poiché la produzione di pneumatici utilizza ossido di zinco e carbonato di zinco, la de-vulcanizzazione chimica potrebbe anche produrre particelle metalliche sospese nell'aria; pertanto prima del rilascio in atmosfera è necessario prevederne un trattamento specifico.



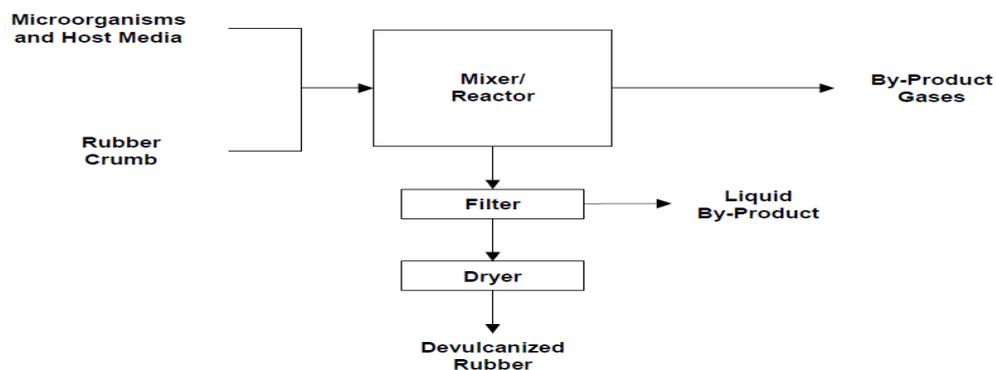
- b) ultrasuoni: in tale metodologia i residui vengono caricati in testa ad una tramoggia e successivamente introdotti in un estrusore che tramite un'azione meccanica riscalda ed ammorbidisce la gomma. Successivamente il materiale viene sottoposto all'azione di onde ultrasoniche con un'esposizione di pochi secondi. L'attività sinergica dell'energia ultrasonica, del calore, della pressione e dell'azione meccanica contribuisce alla de-vulcanizzazione della gomma. La temperatura raggiunta in questo processo è di circa 110°C quindi si genererà una minore emissione di vapore e dal momento che non vengono utilizzati additivi chimici per rompere i legami dello zolfo formati nella vulcanizzazione non si verificheranno nemmeno pericolose emissioni in atmosfera. Tuttavia, i residui gassosi verranno trattati con filtri a carboni attivi.



- c) microonde: questa metodologia utilizza l'energia controllata a microonde per devulcanizzare gli elastomeri contenenti zolfo. Il materiale da sottoporre a tale processo deve essere sufficientemente polare da poter accettare energia ad una velocità tale da poter generare il calore necessario per de-vulcanizzare la gomma.



- d) biologica: vengono utilizzati determinati microorganismi per attaccare i legami di zolfo formati durante la vulcanizzazione della gomma naturale. Il tempo di contatto biologico necessario per tale processo è variabile tra i 10 e poche centinaia di giorni. Un elemento essenziale per la de-vulcanizzazione biologica è la disponibilità di materia prima estremamente fine.





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

1.4.4 Recupero energetico

Anche il recupero energetico rappresenta, come il recupero di materia, una importante e valida forma di valorizzazione dello pneumatico. E' tuttavia da ritenere una forma di recupero di secondo ordine, in quanto occorre sempre privilegiare il recupero di materia; anch'esso è tuttavia strettamente legato alla minimizzazione dei rifiuti, degli impatti economici ed ambientali. Sia il riciclaggio di materiale che il recupero energetico offrono un'alternativa complementare per poter trarre i migliori benefici di sviluppo sostenibile dalle risorse naturali e dai loro rifiuti, permettendo una riduzione del consumo delle risorse naturali stesse. Circa il 25% degli pneumatici fuori uso in UE, e circa il 45% negli USA, sono utilizzati come combustibile alternativo in alcuni processi di recupero energetico, evitando così il consumo di combustibile fossile non rinnovabile. Tra le maggiori applicazioni: nei forni per la produzione del cemento o negli inceneritori per la produzione di energia elettrica, vapore, ecc. Il combustibile derivato dagli pneumatici TDF (Tyre Derived Fuel) abbraccia una serie di prodotti che vanno dallo pneumatico intero al tritato e ai chips. In Giappone e in USA, tra gli altri, il recupero energetico è il mezzo principale di valorizzazione dello pneumatico fuori uso e dei rifiuti industriali. Recentemente, grazie allo sviluppo ed al perfezionamento dei metodi di controllo delle emissioni ed alla disponibilità di installare le migliori tecnologie per l'abbattimento degli inquinanti, si è ribadito che l'incenerimento rappresenta una risorsa di energia percorribile e con limiti di emissioni di IPA al di sotto della soglia limite dannosa alla salute umana. Le opzioni di recupero sono riportate dall'allegato C alla Parte IV del "Codice ambientale". Per quanto riguarda gli pfu, nell'elenco – non esaustivo – dell'allegato troviamo i seguenti codici:

- ✓ **R1** (Utilizzazione principalmente come combustibile o come altro mezzo per produrre energia);
- ✓ **R3** (Riciclaggio/recupero delle sostanze organiche non utilizzate come solventi).

Inoltre, con il codice **R13** viene indicata la "messa in riserva di rifiuti per sottoporli a una delle operazioni indicate". Dunque, la messa in riserva è a tutti gli effetti una



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

operazione di recupero, che determina il cosiddetto *End of Waste*, l'uscita dalla condizione di rifiuto. Le caratteristiche che fanno di uno pneumatico un'ottima fonte di recupero energetico sono la facilità di combustione e l'alto potere calorifico (simile a quello del carbone). L'applicazione più utilizzata è quella di combustibile per i cementifici.

1.4.4.1 La combustione in cementeria

Sempre maggiore è l'utilizzo dello PFU (pneumatico intero, metà pneumatico, ciabattato, triturato e chips) quale valido combustibile alternativo nell'industria del cemento. I principali vantaggi che ne derivano sono sostanzialmente:

- ✓ un significativo risparmio di materia prima, elettricità e di combustibile fossile non rinnovabile
- ✓ una riduzione di emissione di CO generata dal processo di produzione industriale;
- ✓ una efficace soluzione al problema sollevato attraverso l'incenerimento dei rifiuti prodotti.

L'utilizzo dello pneumatico nel processo di produzione del cemento è particolarmente vantaggioso per la generazione di calore, purchè:

- ✓ l'energia recuperata dalla combustione degli pneumatici avvenga a temperature inferiori rispetto alla combustione del carbone (combustibile tradizionalmente più utilizzato);
- ✓ tutte le parti costituenti lo pneumatico vengano valorizzate;
- ✓ ci siano risparmi sia sulla materia prima che nel consumo di energia.

Fondamentalmente i forni possono operare attraverso due tipologie di processi: processo ad umido (wet) e processo a secco (dry). Alcuni dei più vecchi forni, spesso di piccola capacità impiantistica, utilizzano il processo wet, e affinché possano utilizzare lo pneumatico fuori uso come combustibile alternativo, dovrebbero conformare i propri impianti. Questi forni, sulla base della recente direttiva sull'incenerimento dei rifiuti, saranno inibiti dall'operare con gli pneumatici fuori uso. I forni nuovi utilizzano il processo dry e furono costruiti con l'obiettivo di poter accogliere



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

quantità elevate degli pneumatici o in generale combustibile miscelato con altre tipologie di rifiuto.

1.4.4.2 La termovalorizzazione

La termovalorizzazione degli pneumatici fuori uso è un trattamento termico che permette di:

- ✓ generare elettricità;
- ✓ generare vapore;
- ✓ minimizzare i rifiuti;
- ✓ recuperare materie prime quali fili di acciaio, ossido di zinco e solfato di sodio.

Per tali motivi nell'industria degli pneumatici trova un crescente consenso l'attività di smaltimento di questi rifiuti e degli scarti di produzione in appositi termovalorizzatori. Infatti, i produttori ed i ricostruttori degli pneumatici frequentemente ricorrono a questa operazione ottenendo un duplice vantaggio. Da una parte permette di avere a disposizione vapore necessario al processo di vulcanizzazione e dall'altra consente di operare una pratica di smaltimento e quindi di minimizzare le quantità di rifiuto. Gli pneumatici vengono bruciati in forni rotativi ed i gas provenienti dalla combustione sono recuperati in una caldaia a recupero la quale produce vapore surriscaldato o acqua. Nella caldaia vengono iniettati calce e calcare per rimuovere ossidi di zolfo dal flusso di gas. I fumi, dopo aver ceduto il loro contenuto entalpico all'interno della caldaia, sono inviati ad un sistema di filtrazione generalmente costituito da due gruppi di filtri a maniche: nel primo viene eseguito un trattamento di depolverazione da cui si ricavano ceneri ricche in ZnO (circa il 65%), mentre nel secondo gruppo di filtri, tramite reazione con bicarbonato di sodio, si effettua la desolforazione, quindi sono espulsi attraverso il camino. A valle del processo viene aggiunto un turbo generatore per la produzione di energia elettrica ed un sistema di nastri che permette l'estrazione e, attraverso l'utilizzo di un vibrovaglio, la pulizia dei fili di acciaio derivanti dalle carcasse. Il forno permette alla materia volatile di bruciare velocemente assicurando che il tempo di permanenza per lo pneumatico o la gomma sia sufficientemente lungo affinché il



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

nerofumo sia totalmente bruciato mentre il metallo venga trattenuto (impedendo allo pneumatico di passare nel forno senza essere distrutto).

1.4.4.3 La pirolisi

Il processo di pirolisi (ancora poco diffusa in Europa ma diffusa in paesi tecnologicamente avanzati come il Giappone e gli Stati Uniti) consiste in una degradazione termica in atmosfera inerte. Gli pneumatici subiscono un cracking termico a temperature intorno ai 500-600°C, scindendosi in una parte solida (char) ed una volatile, in parte condensabile; quest'ultima può subire raffreddamento e condensazione portando all'ottenimento di una frazione liquida e di una gassosa incondensabile. Il processo fornisce quindi come prodotti:

- ✓ una frazione gassosa, costituita essenzialmente da idrogeno, metano, etilene, etano, ossidi di carbonio ed altri gas combustibili;
- ✓ una frazione liquida, costituita da catrame, acqua ed una varietà di sostanze organiche (oli);
- ✓ una frazione solida, costituita dal residuo carbonioso, oltre che da ceneri, inerti, metalli, ecc.

Le percentuali delle tre frazioni dipendono dalla temperatura, dalla pressione e dal tempo di residenza del rifiuto nel reattore, nonché dalle temperature a cui viene operata la successiva fase di condensazione. La proporzione relativa tra i vari prodotti dipende dal modo in cui si realizza il processo e dai parametri di reazione. Sebbene la pirolisi risulti un'alternativa valida per il raggiungimento di un prodotto riutilizzabile attraverso la conversione del rifiuto pneumatico, essa deve risolvere alcune problematiche tecnologiche affinché si possano trovare applicazioni al trattamento dello pneumatico, non per ultimo la valorizzazione della frazione solida (char) generata da questo processo. Il char prodotto nel processo di pirolisi può aprire interessanti scenari per le future sperimentazioni tra le quali il recupero di quantità di zinco. Tale prodotto, dopo trattamento termico a 550 °C può essere utilizzato come materiale di partenza per test sperimentali. Il carbonio proveniente dal processo di pirolisi, infatti,



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

presenta delle caratteristiche simili all'analogo naturale previo trattamento dalla durata di due ore con un flusso di acido cloridrico concentrato. Tra i vari possibili procedimenti di riciclo, le tecnologie di trattamento termico, incenerimento, gassificazione e pirolisi, rappresentano una possibile alternativa alla discarica, favorendo il recupero di materia e/o energia dagli pneumatici fuori uso.

Tra le tecnologie di trattamento più diffuse in Italia abbiamo la granulazione a temperatura ambiente, ma anche la granulazione criogenica (o criogenia) sta cominciando ad affermarsi.

1.4.5 La granulazione a temperatura ambiente

In questa tecnologia tutte le fasi di triturazione e granulazione vengono effettuate a temperatura ambiente: è un processo di macinazione meccanica che avviene per fasi successive. Possono essere trattati indifferentemente pneumatici di autocarri, di auto e scarti di articoli in gomma ed il processo è normalmente finalizzato alla produzione di granulato e polverino con un trattamento differenziato, a seconda che si ottengano detti prodotti dagli pneumatici di auto o di autocarro. Durante le varie fasi di macinazione, man mano che si riduce la dimensione del prodotto, si provvede a separare ed asportare in uno o più momenti successivi il metallo e la fibra tessile. L'assenza di trattamenti chimici o termici mantiene inalterata la struttura molecolare del materiale polimerico. Le operazioni di taglio con lame metalliche sono predominanti e vengono effettuate a stadi successivi riducendo la dimensione della gomma di stadio in stadio. La vagliatura permette quindi di ottenere prodotti classificati in maniera diversa per corrispondere alle specifiche richieste dall'applicazione. La ruvidità della superficie è prevalentemente correlata allo stato di usura delle lame durante il processo produttivo. Lame nuove e affilate permettono di ridurre la ruvidità del granulato se paragonato a quello ottenuto con lame consumate. Nel caso di un prolungato utilizzo delle lame la vita dell'unità di granulazione si ridurrebbe notevolmente. La forma cubica di granulato facilita l'intasamento delle fibre dell'erba sintetica e fa sì che non si attacchi agli indumenti dei calciatori.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Frantumazione e granulazione degli pneumatici fuori uso – fonte Ecopneus



1.4.6 La granulazione criogenica

Il materiale in ingresso dalla fase di macinazione viene raffreddato a -80°C o più, utilizzando dell'azoto liquido e portando la gomma in fase vetrosa. Questa non è una transizione vera e propria transizione di fase ma con questo termine si indica che la gomma diviene fragile a tal punto da poter essere facilmente rotta ed esempio con mulini a pioli o a martelli. Le particelle di gomma, osservate al microscopio, hanno una superficie più uniforme se confrontate con quelle ottenute con la granulazione a temperatura ambiente. La superficie piana del granulato riduce la superficie totale facendo risultare più cubica la sua forma. La pezzatura del granulo rispetto alla lavorazione a temperatura ambiente risulta più fine, tendenzialmente più pulito e utilizzabile in applicazioni più sofisticate. Attualmente meno dell'1% di granulati di gomma per intasamento vengono prodotti con la tecnologia criogenica in Europa (esempio di mulini granulatori e polverizzatori). Le ragioni sono le seguenti: la tecnologia criogenica è molto più vantaggiosa economicamente per produrre granulati, o meglio polverini, di dimensioni inferiori a 0,4mm; l'azoto liquido è abbastanza costoso e deve essere usato in quantità notevoli durante il processo produttivo; il prezzo medio dei granulati da intasamento di dimensioni comprese tra 0,5 e 2,2mm è attualmente del 130% superiore a quello ottenuti con il processo a temperatura ambiente. Si tratta di due processi industriali che richiedono peraltro investimenti di rilievo e che vanno da



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

1,5 a 5 milioni di euro, impianti complessi e delicati, che incorporano tecnologia specifica ed esclusiva. Detti impianti, in caso di blocco dell'attività non sono riconvertibili verso altre produzioni e quindi devono essere dismessi, con rilevanti danni economici, perdita di posti di lavoro e negative conseguenze sulle aziende utilizzatrici.

1.4.7 I processi elettrotermici

Attraverso i processi elettrotermici lo pneumatico viene ridotto in pezzatura grossolana ed introdotto in un forno verticale ad induzione elettromagnetica. La parte metallica dello pneumatico, sottoposta al campo elettromagnetico, si riscalda rapidamente fino a temperature di circa 700°C. A queste temperature la gomma carbonizza all'interfaccia ed il metallo si distacca dalla gomma. Nella parte bassa del forno vengono raccolti separatamente il materiale metallico, la gomma inalterata e la gomma carbonizzata. Con i processi di de-vulcanizzazione e rigenerazione, la gomma, preventivamente triturata, viene riportata ad una struttura chimica vicina a quella dell'elastomero di partenza, in maniera tale da permetterne l'aggiunta alle normali mescole. La de-vulcanizzazione in genere è effettuata in autoclave mediante processi termochimici, sfruttando l'azione congiunta di temperatura, pressione ed additivi chimici.

1.4.8 Il water-jet

La tecnologia "water jet" sfrutta un getto d'acqua generato ad alta pressione (150-400MPa), il quale permette la disgregazione e polverizzazione della gomma, lasciando la carcassa dello pneumatico, costituita da una rete di fili d'acciaio, intatta e perfettamente ripulita. Tale lavorazione ha, infatti, un'azione molto selettiva sui componenti, consentendo di produrre un materiale metallico molto pulito e una frazione di gomma di granulometria fine e un residuo tessile riciclabile. Il granulato di gomma così ottenuto viene sottoposto a processo di essiccazione e vagliatura. Se granulometrie inferiori sono richieste per applicazioni di alto valore, si procede ad eventuale macinazione fine del granulato con i mulini polverizzatori.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

2 ASPETTI LEGISLATIVI

2.1 Il quadro normativo italiano

Un aspetto di fondamentale importanza, ai fini del recupero e della valorizzazione degli pneumatici fuori uso (PFU), è innanzitutto la corretta attuazione della normativa vigente in materia. Lo PFU rientra infatti nel campo di applicazione della normativa rifiuti e quindi, tutte le relative attività di trattamento, recupero e/o smaltimento debbono essere effettuate nel pieno rispetto della legislazione vigente. La tematica rifiuti è tuttavia una tematica complessa dal punto di vista giuridico, anche in relazione al fatto che la stessa normativa comunitaria e nazionale è sempre in continua evoluzione ed aggiornamento. Numerose sono le Direttive e i Regolamenti emessi a livello comunitario, tuttavia solo in parte attuati nel nostro ordinamento giuridico (spesso con ritardi ingiustificati). Ad oggi i principali riferimenti nazionali in tale ambito sono il Testo Unico Ambientale D.lgs. 152/2006 e il D.lgs. 36/2003 sulle discariche.

Per quanto attiene gli pneumatici al fine del loro recupero, trattamento o smaltimento, si tratta innanzitutto di vedere se rientrano o meno nella definizione di **rifiuto** (art. 183 lettera a - D.lgs. 152/2006): *qualsiasi sostanza od oggetto che rientra nelle categorie riportate nell'allegato A alla parte quarta del presente decreto e di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi*. In tal caso, se rientra in tale definizione, si incorre in numerosi adempimenti amministrativi formali (registri, formulari, MUD, ecc). Sarebbe pertanto bene che lo PFU non rientrasse in tale definizione ma, piuttosto, in quella di sottoprodotto o materia prima seconda (MPS).

Sono sottoprodotti (art. 183 lettera p - D.lgs 152/2006): *le sostanze ed i materiali dei quali il produttore non intende disfarsi ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lettera a), che soddisfino tutti i seguenti criteri, requisiti e condizioni:*

- 1) *siano originati da un processo non direttamente destinato alla loro produzione;*
- 2) *il loro impiego sia certo, sin dalla fase della produzione, integrale e avvenga direttamente nel corso del processo di produzione o di utilizzazione preventivamente individuato e definito;*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

3) *soddisfino requisiti merceologici e di qualità ambientale idonei a garantire che il loro impiego non dia luogo ad emissioni e ad impatti ambientali qualitativamente e quantitativamente diversi da quelli autorizzati per l'impianto dove sono destinati ad essere utilizzati;*

4) *non debbano essere sottoposti a trattamenti preventivi o a trasformazioni preliminari per soddisfare i requisiti merceologici e di qualità ambientale di cui al punto 3), ma posseggano tali requisiti sin dalla fase della produzione;*

5) *abbiano un valore economico di mercato.*

Sono MPS (art. 183 lettera q - D.lgs. 152/2006): *le sostanze o materia avente le caratteristiche stabilite ai sensi dell'articolo 181-bis. Ovvero: Non rientrano nella definizione di cui all'articolo 183, comma 1, lettera a), le materie, le sostanze e i prodotti secondari definiti dal decreto ministeriale di cui al comma 2, nel rispetto dei seguenti criteri, requisiti e condizioni:*

a) *siano prodotti da un'operazione di riutilizzo, di riciclo o di recupero di rifiuti;*

b) *siano individuate la provenienza, la tipologia e le caratteristiche dei rifiuti dai quali si possono produrre;*

c) *siano individuate le operazioni di riutilizzo, di riciclo o di recupero che le producono, con particolare riferimento alle modalità ed alle condizioni di esercizio delle stesse;*

d) *siano precisati i criteri di qualità ambientale, i requisiti merceologici e le altre condizioni necessarie per l'immissione in commercio, quali norme e standard tecnici richiesti per l'utilizzo, tenendo conto del possibile rischio di danni all'ambiente e alla salute derivanti dall'utilizzo o dal trasporto del materiale, della sostanza o del prodotto secondario;*

e) *abbiano un effettivo valore economico di scambio sul mercato.*

Qualora infatti si rientrasse in una di queste definizioni, lo PFU sarebbe un non rifiuto e le procedure amministrative/gestionali si semplificherebbero notevolmente, soprattutto per le aziende che intendono intraprendere tale attività di recupero/valorizzazione.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

2.1.1 Decreto Legislativo 3 aprile 2006 n.152 - Norme in materia ambientale

Recepisce ed integra numerose Direttive CEE in materia di tutela ambientale, all' *Articolo 228 Pneumatici fuori uso*, recita:

- 1. Fermo restando il disposto di cui al decreto legislativo 24 giugno 2003, n. 209, nonché il disposto di cui agli articoli 179 e 180 del presente decreto, al fine di garantire il perseguimento di finalità di tutela ambientale secondo le migliori tecniche disponibili, ottimizzando, anche tramite attività di ricerca, sviluppo e formazione il recupero degli pneumatici fuori uso e per ridurre la formazione anche attraverso la ricostruzione è fatto obbligo ai produttori e importatori degli pneumatici di provvedere, singolarmente o in forma associata e con periodicità almeno annuale, alla gestione di quantitativi degli pneumatici fuori uso pari a quelli dai medesimi immessi sul mercato e destinati alla vendita sul territorio nazionale, provvedendo anche ad attività di ricerca, sviluppo e formazione finalizzata ad ottimizzare la gestione degli pneumatici fuori uso nel rispetto dell'art. 177, comma 1.*
- 2. Con decreto del Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio, d'intesa con la Conferenza permanente per i rapporti tra lo Stato, le regioni e le province autonome di Trento e di Bolzano, da emanarsi nel termine di giorni centoventi dalla data di entrata in vigore della parte quarta del presente decreto, sono disciplinati i tempi e le modalità attuative dell'obbligo di cui al comma 1. In tutte le fasi della commercializzazione degli pneumatici è indicato in fattura il contributo a carico degli utenti finali necessario, anche in relazione alle diverse tipologie di pneumatici, per far fronte agli oneri derivanti dall'obbligo di cui al comma 1.*
- 3. Il trasferimento all'eventuale struttura operativa associata, da parte dei produttori e importatori di pneumatici che ne fanno parte, delle somme corrispondenti al contributo per la gestione, calcolato sul quantitativo di pneumatici immessi sul mercato nell'anno precedente costituisce adempimento dell'obbligo di cui al comma 1 con esenzione del produttore o importatore da ogni relativa responsabilità.*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

3 - bis. I produttori e gli importatori di pneumatici o le loro eventuali forme associate determinano annualmente l'ammontare del rispettivo contributo necessario per l'adempimento, nell'anno solare successivo, degli obblighi di cui al comma 1 e lo comunicano, entro il 31 ottobre di ogni anno, al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare anche specificando gli oneri e le componenti di costo che giustificano l'ammontare del contributo. Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, se necessario, richiede integrazioni e chiarimenti al fine di disporre della completezza delle informazioni da divulgare anche a mezzo del proprio portale informatico entro il 31 dicembre del rispettivo anno. E' fatta salva la facoltà di procedere nell'anno solare in corso alla rideterminazione, da parte dei produttori e degli importatori di pneumatici o le rispettive forme associate, del contributo richiesto per l'anno solare in corso.

4. I produttori e gli importatori di pneumatici inadempienti agli obblighi di cui al comma 1 sono assoggettati ad una sanzione amministrativa pecuniaria proporzionata alla gravità dell'inadempimento, comunque non superiore al doppio del contributo incassato per il periodo considerato.

Conseguentemente, l'articolo 228 del decreto legislativo n.152 del 3 aprile 2006, impone a produttori e importatori di provvedere alla gestione di quantitativi di PFU pari alla quantità di pneumatici immessi nel mercato nazionale, calcolata rispetto all'anno precedente, introducendo così il criterio della "Responsabilità Estesa del Produttore".

La norma si rivolge quindi a:

- ✓ produttore o importatore degli pneumatici: persona fisica o giuridica che immette per la prima volta sul mercato pneumatici da impiegare come ricambio;
- ✓ gestore degli PFU: persona fisica o giuridica che effettua, a qualsiasi stadio del processo, attività di gestione degli PFU;
- ✓ detentore degli PFU: generatore di PFU o persona fisica o giuridica che li detiene;
- ✓ generatore degli PFU: persona fisica o giuridica che, nell'esercizio della sua attività imprenditoriale, genera PFU.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

2.1.2 Decreto Ministeriale 11 aprile 2011 n.82 - Regolamento per la gestione degli pneumatici fuori uso

E' il Decreto attuativo del Decreto Legislativo 152/2006 (Testo Unico Ambientale) soprariportato, ed ha importanza fondamentale perchè ha concretamente reso operativo ed obbligatorio il sistema nazionale di recupero e smaltimento degli pneumatici fuori uso. Questo decreto definisce in tutti i dettagli chi sono i responsabili del recupero degli PFU, come si calcola il contributo ambientale, quali sono i documenti di rendiconto da inoltrare agli organi di controllo, le scadenze annuali, le sanzioni che saranno applicate in caso di violazioni e inadempienze.

2.1.3 Decreto Ministeriale 7 marzo 2012 n.44 - Decreto di nomina del Tavolo Permanente di Consultazione sulla gestione degli pneumatici a fine vita - PFU

Come previsto dal D.M. 82, viene istituito un tavolo di consultazione permanente sulla gestione degli PFU. Il tavolo è presieduto da un rappresentante del Ministero dell'Ambiente e da sette membri, di cui tre designati dalle associazioni nazionali dell'industria (dei quali due in rappresentanza del settore del recupero), uno designato dalle associazioni dei produttori ed importatori degli pneumatici, uno designato dalle organizzazioni nazionali delle categorie del commercio, uno dalle organizzazioni nazionali delle categorie dell'artigianato.

2.1.4 Decreto Ministeriale 11 ottobre 2017 n.259 - Criteri Ambientali Minimi (CAM)

È stato recentemente pubblicato in Gazzetta Ufficiale il Decreto 11 ottobre 2017 del Ministero dell'Ambiente, contenente i "Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici".

Tra i vari materiali che la Pubblica Amministrazione è tenuta ad utilizzare per rispettare tali criteri ambientali, troviamo anche la gomma riciclata dagli Pneumatici Fuori Uso tra



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

gli isolanti termo-acustici. Le caratteristiche di elasticità, fono-assorbimento e resistenza termica fanno infatti della gomma da PFU un ottimo materiale per la limitazione della trasmissione dei rumori e vibrazioni negli edifici. Il Decreto prevede che se nel progetto (di nuova costruzione, ristrutturazione o riqualificazione di un edificio pubblico) sia previsto l'impiego di isolanti termici ed acustici contenenti gomma, questa dovrà essere per almeno il 60% gomma riciclata. Questo sia nel caso di isolanti sotto forma di pannello, che di isolanti stipati o a spruzzo/insufflato, oppure che siano isolanti in materassini.

2.1.5 Divieto di smaltimento in discarica degli pneumatici fuori uso (pfu)

Ai sensi dell'art. 6 del D.Lgs. n. 36 del 2003 non sono ammessi in discarica "pneumatici interi fuori uso a partire dal 16 luglio 2003, esclusi gli pneumatici usati come materiale di ingegneria e gli pneumatici fuori uso triturati a partire da tre anni da tale data, esclusi in entrambi i casi quelli per biciclette e quelli con un diametro esterno superiore a 1400mm". Il testo della norma non risulta di facile comprensione. Tuttavia, poiché l'intero testo del D.Lgs. n. 36 del 2003 costituisce attuazione della direttiva comunitaria 1999/31/CE, si rivela assai utile la lettura della versione inglese, la quale all'art. 5 comma 3 afferma che "are not accepted in a landfill whole used tyres from two years from the date laid down in Article 18(1), excluding tyres used as engineering material, and shredded used tyres five years from the date laid down in Article 18(1) (excluding in both instances bicycle tyres and tyres with an outside diameter above 1400mm)".

L'aggiunta di una virgola conferisce alla disposizione un significato più chiaro e ragionevole. Pertanto, dal 16 luglio 2003 non sono ammessi in discarica gli pneumatici interi fuori uso, esclusi quelli usati specificatamente come materiale di ingegneria per garantire la funzionalità della discarica, mentre dal 16 luglio 2016 non sono ammessi in discarica anche gli pneumatici fuori uso triturati. Possono invece essere smaltiti in discarica gli pneumatici per biciclette e quelli con diametro superiore a 1,4m.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

2.1.6 Incentivi e altre misure premianti per il recupero degli Pneumatici Fuori Uso (PFU)

La direttiva 2009/28/CE e il D.Lgs. n.28 del 2011 che la recepisce nell'ordinamento nazionale stabiliscono un quadro di misure e di interventi per la promozione dell'uso di energia da fonti rinnovabili, tra le quali anche la biomassa, da intendersi proprio ai sensi della normativa comunitaria e nazionale appena citata come *“la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”*, mentre il biogas è definito dall'art. 2 comma 1 lett. u) del D.M. 6 luglio 2012 *“il gas prodotto dal processo biochimico di fermentazione anaerobica di biomassa”*. In particolare, in attuazione dell'art. 24 del D.Lgs. n. 28 del 2011, dapprima il D.M. 6 luglio 2012 e in seguito il D.M. 23 giugno 2016 hanno fissato il sistema incentivante per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili diversi dal fotovoltaico, e quindi l'idraulico, il geotermico, l'eolico, il biogas e la biomassa. I regolamenti ministeriali includono nel sistema di incentivazione altresì i c.d. *“impianti ibridi”*, ovvero quelli che utilizzano rifiuti solo parzialmente biodegradabili. Pur facendo salva la facoltà del produttore di richiedere l'applicazione di procedure di computo analitiche, stabiliscono per alcune tipologie di rifiuti una determinazione forfettaria della frazione biodegradabile e di conseguenza della produzione imputabile a fonti rinnovabili: viene dunque incentivata a titolo forfettario come *“rinnovabile”* solo una parte, espressa in percentuale, della produzione totale di energia elettrica immessa in rete. L'allegato 2 del D.M. 6 luglio 2012, richiamato dall'allegato 1 del D.M. 23 giugno 2016 proprio per quanto riguarda i rifiuti per quali vige la determinazione forfettaria della frazione biodegradabile, dispone che la quota di energia elettrica riconosciuta proveniente da fonti rinnovabili e perciò incentivata è pari al 51% della produzione totale nel caso di utilizzo di tali rifiuti:



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

- ✓ rifiuti urbani a valle della raccolta differenziata individuati dai CER che iniziano con le 4 cifre 2003 e 2002 con esclusione dei CER 200202 e 200203.
- ✓ Combustibile solido secondario (CSS), ivi incluso il CDR di cui alla norma UNI 9903-1:2004, prodotto da rifiuti urbani che rispetta le caratteristiche di classificazione e specificazione individuate dalla norma UNI EN 15359;
- ✓ rifiuti speciali non pericolosi a valle della raccolta differenziata che rientrano nell'elenco riportato in Tabella 6.A (tra cui il CER 160103 pneumatici fuori uso), a meno dei rifiuti identificati dal codice CER 170201 e CER 191207, solo se la somma delle masse di tali rifiuti è non superiore al 30% del peso totale dei rifiuti utilizzati su base annua;
- ✓ Combustibile Solido Secondario (CSS), ivi incluso il CDR di cui alla norma UNI 9903-1:2004, qualificato come RDF prodotto da rifiuti speciali non pericolosi a valle della raccolta differenziata e da rifiuti urbani che rispetta le caratteristiche di classificazione e specificazione individuate dalla norma UNI EN 15359, solo se la somma delle masse dei rifiuti speciali non pericolosi è non superiore al 30% del totale delle masse dei rifiuti utilizzati per la produzione del CSS.

Il ricorso a criteri forfettari è ammesso anche per le seguenti ulteriori tipologie di rifiuti speciali:

- a) rifiuti sanitari e veterinari a rischio infettivo (codici CER 180103* 180202*) per i quali si assume una percentuale forfettaria di biodegradabilità pari al 40%.
- b) pneumatici fuori uso (codice CER 160103), per i quali si assume una percentuale forfettaria di biodegradabilità pari al 35%.

Si tratta sicuramente di una disposizione di favore ai fini di un impiego massiccio degli PFU nella produzione di energia elettrica.

Passando invece alle operazioni di recupero di materia, la legge n.221/2015 ha introdotto nel Testo Unico Ambientale quattro nuovi articoli volti a incentivare l'acquisto di prodotti derivanti da materiali "post consumo".



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

L'art. 206-ter consente la stipula di accordi e contratti di programma tra il Ministro dello sviluppo economico, di concerto con il Ministro dell'Ambiente, e i soggetti elencati al comma 1 (enti pubblici, soggetti pubblici e privati, associazioni senza fini di lucro) riguardo l'erogazione di incentivi in favore delle attività imprenditoriali previste al comma 2, ove sono indicate espressamente le attività imprenditoriali di commercializzazione di prodotti derivanti dagli pneumatici fuori uso.

L'implementazione di tale norma necessita inoltre l'emanazione di un decreto del Ministro dello Sviluppo Economico che individui le risorse finanziarie disponibili da destinare alle misure di incentivazione oggetto degli accordi dei contratti di programma. Ai sensi dell'art. 206-sexies le pubbliche amministrazioni nelle gare d'appalto per la realizzazione di interventi concernenti gli edifici scolastici, le pavimentazioni stradali e le barriere acustiche, prevedono per l'impiego di prodotti contenenti materiali post consumo o derivanti dal recupero degli scarti, quali i materiali "derivanti dall'utilizzo di polverino dagli pneumatici fuori uso", criteri di valutazione con punteggi premianti secondo percentuali da stabilirsi, tuttavia, con successivi decreti ministeriali nel termine, notoriamente non perentorio, di sei mesi dalla data di entrata in vigore dell'articolo in commento.

2.2 Il contesto Europeo

La gestione degli PFU in Europa ha conosciuto negli ultimi anni importanti progressi. In base ai dati dell'ETRMA (European Tyre & Rubber Manufacturers Association), infatti, si assiste nel ventennio 1992-2012 ad un'incisiva riduzione del quantitativo degli pneumatici destinati alla discarica (dal 50% nel 1992 a meno del 5% nel 2012) in favore di altre forme di valorizzazione post-consumo. Dopo la decisione dell'Unione Europea di vietare lo smaltimento in discarica degli pneumatici interi (2003) e di quelli frantumati (2006), in Europa si possono individuare almeno tre sistemi diversi di gestione degli pneumatici fuori uso post-consumo, così sintetizzabili:



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

- 1) Responsabilità del produttore: i produttori di pneumatici, in base a quanto stabilito da specifici assetti normativi, hanno la responsabilità di organizzare la gestione degli PFU, costituendo società senza scopo di lucro che si occupino di ottemperare a tale compito. I produttori hanno l'obbligo di monitorare e rendicontare alle Autorità nazionali.
- 2) Sistema a tassazione: la responsabilità della gestione degli PFU ricade sullo Stato e i produttori si limitano a pagare una tassa con cui sono finanziati gli operatori della catena del recupero. La tassa viene successivamente applicata al consumatore.
- 3) Libero mercato: la legge stabilisce le norme da rispettare e i responsabili per le singole attività, ma non prevede un responsabile di filiera. In tal modo tutti gli operatori del sistema stipulano contratti tra di loro secondo le condizioni del libero mercato e agiscono in conformità con la locale legislazione sui rifiuti. Per quanto riguarda i mercati basati sulla responsabilità del produttore di pneumatici è possibile avere un'idea ben precisa dei risultati conseguiti dai Paesi europei in termini di riciclo e recupero energetico degli PFU. Francia e Spagna ottengono performance molto simili, destinando meno della metà degli PFU raccolti al recupero energetico e un quantitativo pari o di poco superiore al riciclo meccanico.

Il Belgio invece si distingue per gli investimenti maggiori in attività di riciclo, con una percentuale di valorizzazione superiore alla media. Nei Paesi, infine, in cui vigono regole di assoluta concorrenza e libertà di mercato, i risultati e le performance effettive di recupero energetico e riciclo sono difficilmente paragonabili con l'Italia, anche perché si aggregano i dati relativi agli PFU provenienti dai veicoli a fine vita con quelli relativi al mercato del ricambio. Il Sistema italiano eccelle per la continua ricerca di mercati di sbocco per i materiali separati dagli pneumatici fuori uso, ovvero polverino di gomma, materiale tessile e metallo ferroso. Molta attenzione è stata riservata alla ricerca di mercati di sbocco per il polverino di gomma e in particolare al suo utilizzo per la realizzazione di asfalti stradali in sostituzione di altri materiali inerti, garantendo



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

migliori performance rispetto all'asfalto tradizionale per proprietà meccaniche, acustiche e di durata nel tempo. Secondo le ultime statistiche elaborate da *ETRMA* (European Tyre & Rubber Manufacturers Association), nel 2015, gli Pneumatici Fuori Uso (PFU) generati in Europa sono pari a 3,9 Mt, di cui circa il 58% proveniente da 5 Paesi: Germania, Regno Unito, Francia, Italia e Spagna. Degli PFU generati, 2,9Mt sono stati avviati a recupero (di materia ed energetico); 678kt sono state destinate a riuso/ricostruzione/esportazione e 301kt sono state smaltite. Secondo le elaborazioni effettuate dalla "Direzione generale per i rifiuti e l'inquinamento" del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, sulla base delle comunicazioni inviate dai produttori e dagli importatori degli pneumatici, nel 2016 gli pneumatici nuovi immessi sul mercato del ricambio in Italia hanno riguardato 399.274t (+8% rispetto al 2015), mentre il quantitativo degli Pneumatici Fuori Uso raccolti e gestiti nel rispetto della normativa vigente risulta pari a 354.904t (+6% rispetto al 2015). Di questi, 313.239t (88% del totale) hanno riguardato la gestione consortile, con un decremento, in termini di quantitativi assoluti dell'1% rispetto al 2015. Il restante 12% (41.665t) degli PFU è imputabile alla gestione indipendente che ha registrato un aumento di 24.824t, più che raddoppiando le quantità gestite nell'anno precedente. Secondo le statistiche rese disponibili da ISPRA, nel 2015 sono state esportate all'estero circa 114.398t di PFU e materiali derivati sottoforma di semilavorati, di cui 56.718t sono state recuperate come materia (50% del totale esportato), 56.170t sono state recuperate sotto forma di energia (49%) e una parte residuale, 1.510t, è stata sottoposta a operazioni di smaltimento. Nel 2016, gli PFU avviati a recupero dai 3 principali Consorzi di gestione degli PFU (ECOPNEUS, ECOTYRE e GREENTIRE), che da soli gestiscono oltre il 90% degli PFU complessivamente gestiti in Italia, sono stati pari a 308.456t, con un decremento del 2% rispetto all'anno precedente. Dal trattamento di questi PFU, il 44% (135.304t) dei materiali separati è stato avviato a recupero di materia e il 56% (173.304t) a recupero di energia come combustibili, prevalentemente in impianti di produzione del cemento. In termini assoluti, le quantità avviate a recupero energetico



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

subiscono un incremento rispetto all'anno precedente dell'1%, mentre la quota avviata a recupero di materia subisce un calo del 4% rispetto al 2015. Delle 135.304t di materie prime recuperate dagli PFU, 102.540t sono rappresentate da gomma in forma di granuli e polverini (75,8%), 32.380t da acciaio (23,9%) e 384t da frazione tessile (0,3%). I principali mercati di sbocco dei granuli e dei polverini di polimero di gomma riguardano i campi da calcio in erba sintetica, le pavimentazioni sportive, i manufatti, gli isolanti acustici.

Si noti, tuttavia, che questa modalità di contabilizzazione del recupero degli PFU riferita alla destinazione finale dei materiali derivati dal trattamento, comunemente denominata "recupero al cancello", non tiene in considerazione il fatto che, in determinate condizioni operative, dall'utilizzo degli PFU come combustibili derivati per la produzione di energia, le ceneri della combustione e l'acciaio possono essere considerati come recupero di materia in quanto rimangono inglobate nel prodotto finito (ad es. il cemento) in sostituzione di altri materiali. Adottando una metodologia di contabilità di recupero effettivo che consideri anche questi quantitativi, si otterrebbero, pertanto, valori più alti di quelli riportati in tabella. L'anno 2011 ha segnato una svolta nel settore della gestione degli PFU, grazie alla pubblicazione del D.M. 11 aprile 2011 n. 82 che regola in Italia l'applicazione del principio europeo di Responsabilità Estesa del Produttore (EPR) per la gestione degli PFU, dando luogo ad una concreta crescita ed evoluzione del comparto. Lo stesso Decreto ha fissato l'obiettivo annuale di raccolta e gestione in capo ai produttori e importatori, pari al 90% dell'immesso al consumo nell'anno precedente (al netto dell'export). Il settore degli pneumatici nuovi immessi sul mercato, presenta delle criticità, tra le quali quella del mancato pagamento del contributo ambientale per una percentuale significativa di pneumatici immessi al consumo in Italia, ad esempio tramite le vendite on line B2B, nonché le vendite "in nero" di pneumatici importati illegalmente. A causa di questi aspetti, le società di gestione degli PFU si trovano a dover gestire quantitativi extra-target di PFU senza la dovuta copertura economica garantita dai contributi ambientali, per non creare disagi al

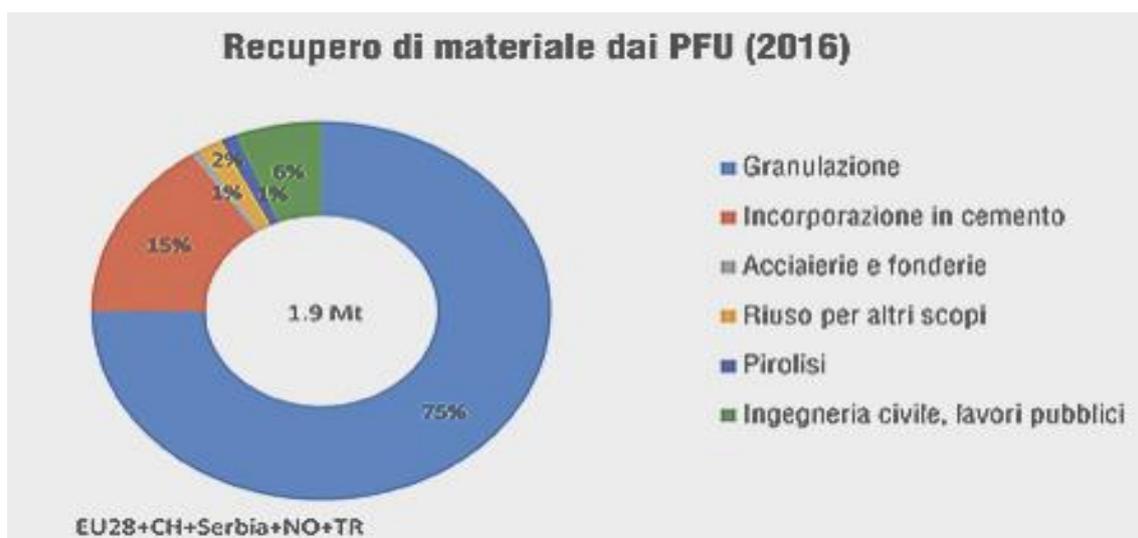


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

settore del ricambio. Risulta pertanto auspicabile, da parte delle istituzioni, una lotta efficace alle vendite in nero e la definizione di una regolamentazione efficace delle vendite di pneumatici on-line. Un ulteriore elemento di criticità potrebbe essere costituito dai mancati controlli sulle dichiarazioni dei produttori e degli importatori in merito alla metodica di conversione del numero di pneumatici immessi sul mercato in tonnellate di PFU da raccogliere, in quanto potrebbe causare una errata valutazione degli obiettivi di raccolta come previsto dal D.M. 82/2011, ed eventualmente determinare un eccesso di PFU da gestire rispetto agli obiettivi effettivi. Altro elemento, come più volte segnalato da UNIRIGOM (l'Associazione degli operatori di recupero degli PFU aderente a UNICIRCULAR), è la ridotta domanda di mercato per prodotti riciclati da PFU, e in particolare i granuli e i polverini di polimero di gomma, rispetto all'effettivo potenziale di recupero. In questo senso, il decreto EoW (*End of Life*) potrà certamente favorire un aumento della domanda di mercato anche in relazione agli obblighi normativi in relazione al Green Public Procurement. Inoltre, per aumentare i quantitativi impiegati in utilizzi innovativi o di sostituzione di materie prime vergini sarebbe necessario che tutte le imprese che riciclano la gomma degli PFU impostassero un lavoro di sperimentazione e certificazione dei loro prodotti.





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Di recente il modello europeo di recupero dei PFU è stato adottato da 3 nuovi paesi dell'Unione, la Repubblica Ceca e la Slovacchia a partire dal 2016 e l'Irlanda dal 2017. Nel 2018 sono 23 i paesi che operano sotto il cappello del regime PFU, coprendo quindi il 65% di tutto il materiale di questo tipo recuperato in Europa. Anche in Regno Unito sono partiti studi di fattibilità per introdurre questo schema di attività, in cui l'Italia, invece, è uno dei pionieri europei. L'industria degli pneumatici è favorevole all'adozione di questi protocolli, anche se i dati di mercato sembrano indicare una sua saturazione soprattutto per quanto riguarda il riutilizzo di gomma da PFU granulata. Ogni anno in Europa si accumulano in media 3.868.000 tonnellate di pneumatici usati (tra ricostruibili e fuori uso), di cui il 92,5% viene trattato in maniera ecocompatibile tramite operazioni di reimpiego, di riciclo e altre forme di recupero. Si tratta di un risultato di rilievo per l'intera filiera industriale europea del recupero degli pneumatici usati, ma è soprattutto un significativo esempio di economia circolare, un sistema virtuoso capace di generare positivi impatti economici e ambientali e che l'Unione Europea promuove come soluzione per uno sviluppo sostenibile per il futuro del pianeta. I dati citati, riferiti all'anno 2015, emergono da un'elaborazione di AIRP (l'Associazione Italiana Ricostruttori Pneumatici) sulla base di uno studio di ETRMA (l'associazione europea dei produttori di pneumatici e articoli in gomma).

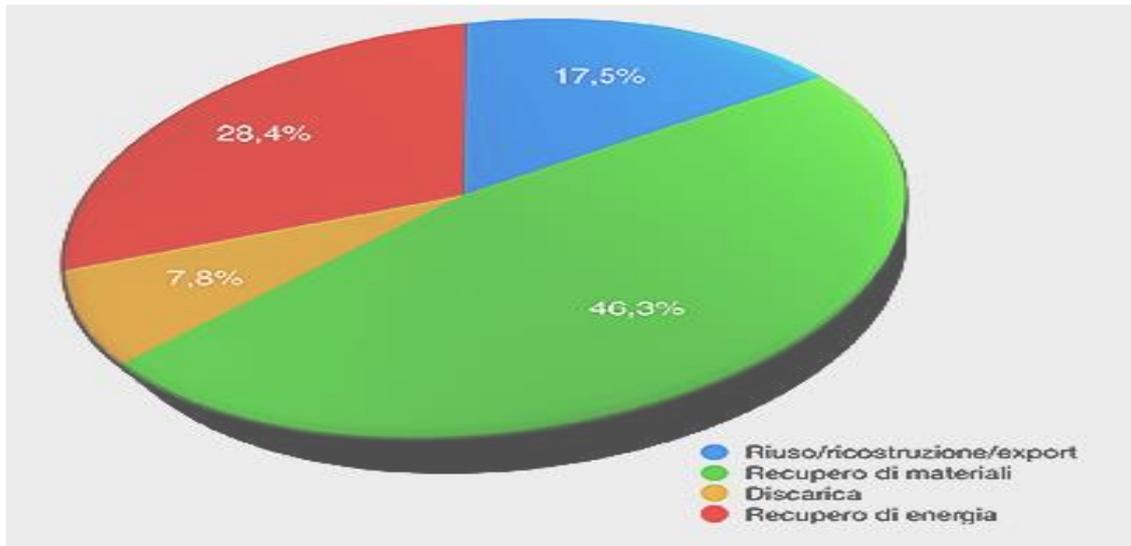
Nel dettaglio, come emerge dal grafico (vedi sotto), del totale delle tonnellate di pneumatici usati generati in Europa, soltanto il 7,8% è avviato ad operazioni di smaltimento in discarica oppure non ne si conosce la destinazione. La parte rimanente di pneumatici usati viene invece recuperata ed è così suddivisa: il 46,3% è sottoposto a recupero di materiali, il 28,4% è recuperato per produrre energia e il 17,5% riguarda pneumatici usati idonei al riutilizzo o alla ricostruzione che sono stati reimmessi sul mercato interno o esportati, principalmente per gli stessi fini.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



Lo studio di ETRMA mette inoltre in evidenza come l'Europa rappresenti una delle aree più attive al mondo per tasso di recupero degli pneumatici usati e come questo tasso sia aumentato costantemente negli ultimi 15 anni. Citando lo studio, AIRP sottolinea come l'intera filiera dello pneumatico costituisca una testimonianza concreta di economia circolare, un modello di produzione sostenibile che si pone il problema dell'uso efficiente delle risorse e delle materie prime, ma anche della maggiore riduzione possibile dello scarto, ovvero di quello che diventa un rifiuto. Nello specifico l'attività di ricostruzione rappresenta la naturale prosecuzione della vita dello pneumatico nuovo di qualità ed è anche grazie ad essa che l'impatto negativo sull'ambiente dello pneumatico usato è decisamente modesto.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

3 POSSIBILI RIUTILIZZI IN ITALIA DEGLI PNEUMATICI FUORI USO (PFU)

Di seguito vengono elencate le principali tipologie di riutilizzo degli pneumatici fuori uso impiegate in Italia.

3.1 Utilizzo del PFU per gli asfalti modificati (0 – 0,8mm polverino e 0,8 - 2mm granulato)

La frantumazione degli PFU permette di realizzare asfalti dalle prestazioni migliorate e le applicazioni negli ultimi decenni sono state molte. Questi prodotti presentano caratteristiche e prestazioni durevoli nel tempo e contribuiscono a ridurre l'inquinamento acustico dovuto al passaggio dei veicoli, hanno maggior resistenza e garantiscono sicurezza. Queste caratteristiche permettono di conseguenza di ridurre i costi di manutenzione e il numero di interventi necessari per ripristinare la superficie carrabile. L'utilizzo del bitume modificato con polverino di gomma proveniente da Pneumatici Fuori Uso ha avuto inizio quarant'anni fa negli Stati Uniti per contrastare la fessurazione delle pavimentazioni flessibili generate da gradienti di temperatura elevati che sottoponevano il conglomerato ad un notevole stress termico. I manti di usura con polverino di gomma sono miscele di conglomerato bituminoso caratterizzate da una curva granulometrica a carattere discontinuo, tipo semi-chiuso o semi-aperto, in cui è stata aggiunta una certa percentuale di polverino di gomma proveniente dagli pneumatici a fine vita. Esistono due diverse metodologie di inserimento del polverino nella miscela di conglomerato: processo *dry* e *wet*:

- ✓ nel processo dry, il polverino/granulo di gomma di dimensioni 0–6mm viene inserito insieme ad inerti e bitume direttamente nell'impianto di miscelazione del conglomerato e in percentuali comprese tra il 1–6% sul peso degli aggregati lapidei. Il risultato finale è un conglomerato (detto anche “rubberized asphalt”) caratterizzato da una curva granulometrica discontinua, tipo gap-graded, con elevata percentuale di bitume, compresa tra il 8–10%, i cui vuoti sono riempiti con mastice bituminoso formato da bitume, filler e polverino di gomma. Il processo dry ha le sue origini in



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Svezia e negli USA dove prese rispettivamente il nome di RUBIT e PLUSRIDE. Negli ultimi anni sono comparsi sul mercato diversi tipi di additivi a base di gomma che permettono l'impiego "dry" del polverino garantendo però migliori prestazioni finali della miscela.

- ✓ nel processo wet il polverino di gomma viene aggiunto come modifica al legante bituminoso al fine di migliorarne le prestazioni. Il processo prende il nome di "Asphalt Rubber (AR)". La norma ASTM D8–88 definisce l'Asphalt Rubber come una miscela di bitume e polverino, in cui il polverino presente in quantità di almeno il 15% sul peso totale della miscela di bitume e polverino, deve reagire con il bitume riscaldato ad alta temperatura in modo da garantire il rigonfiamento delle singole particelle di gomma. Durante tale processo di miscelazione, il polverino assorbe e fissa la frazione maltenica del bitume che viene dunque inglobata nella matrice semi-gelatinosa del mastice; questo fenomeno (detto "swelling") previene dunque l'ossidazione e la dispersione dei malteni che è causa del processo naturale di invecchiamento e degradazione del bitume stradale. Il legante bituminoso così ottenuto presenta una ridotta suscettività termica, ottima coesione e adesione agli inerti nonché un'eccezionale resistenza alla fatica e all'invecchiamento.

Vantaggi degli asfalti modificati:

- ✓ riduzione della rumorosità generata dallo pneumatico nel contatto con la strada e in alcune tipologie di asfalto, anche dal veicolo più in generale;
- ✓ lunga durata della pavimentazione ed eccezionale resistenza all'invecchiamento, con esperienze internazionali che attestano durate fino a tre volte superiori rispetto ad un asfalto tradizionale;
- ✓ maggiore resistenza della superficie al formarsi di fessurazioni e crepe di ogni tipo, da cui consegue il contenimento degli interventi di manutenzione, con riduzione degli inconvenienti derivanti dai cantieri stradali e dei relativi costi;



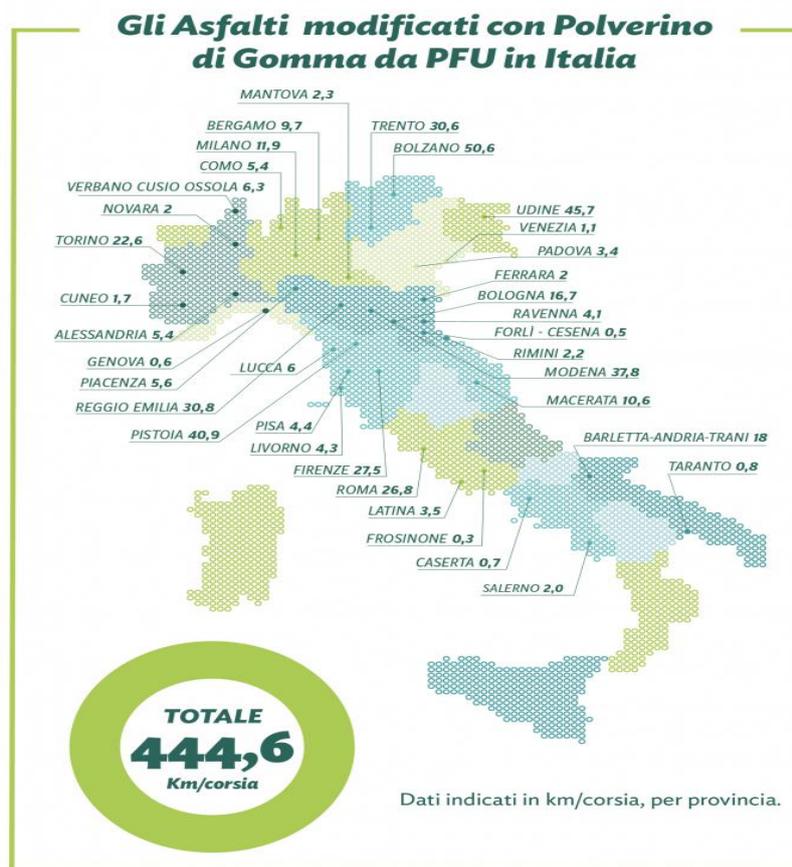
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

- ✓ maggiore sicurezza, grazie all'ottimale aderenza, al drenaggio dell'acqua con drastica riduzione dell'effetto splash and spray in caso di pioggia ed al miglioramento della visibilità. La maggiore resistenza al formarsi di buche e la conseguente minore presenza di cantieri stradali aumenta il comfort per i cittadini e riduce incidenti e rumorosità.

Situazione utilizzo asfalti modificati in Italia – (grafico ottenuto da sito Ecopneus)



Uno dei vantaggi principali degli asfalti modificati è dunque la loro silenziosità. Progettando opportunamente le miscele bituminose è possibile ottenere un asfalto in grado di ridurre il rumore generato dal passaggio dei veicoli in transito fino a 7dB: un



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

valore che corrisponde al dimezzamento dell'energia sonora percepita dall'orecchio umano. Un aspetto non secondario, dato che 1/5 della popolazione UE è esposta a livelli di rumore eccessivo e secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità l'inquinamento acustico causa oltre 10.000 morti premature l'anno in Europa. Realizzare asfalti estremamente durevoli, performanti e "silenziosi" con l'uso intelligente di materiali riciclati come polverino di gomma da PFU e fresato di asfalto è l'obiettivo del Progetto LIFE NEREIDE, guidato dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Pisa in collaborazione con Ecopneus, il Centro di ricerca belga BRRC, l'Istituto di Acustica e Sensoristica "Orso Mario Corbino", la Regione Toscana e Arpat, Agenzia regionale per la protezione ambientale della Toscana. Saranno complessivamente utilizzati oltre 24.000 kg di gomma riciclata e il 30-50% di asfalto riciclato. Le pavimentazioni saranno prodotte e posate con tecnologia a "tiepido" o "warm", ossia a temperature inferiori di 30-40°C rispetto ai tradizionali asfalti modificati con gomma riciclata da PFU, abbassando anche del 30% l'emissione di vapori di Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA). È prevista una riduzione dell'inquinamento acustico urbano di almeno 5dB e un aumento dell'aderenza su strada del 20%, migliorando inoltre anche la sicurezza stradale. Gli eco-obiettivi chiave che il *Progetto LIFE NEREIDE* mira a raggiungere sono quindi:

- ✓ la mitigazione dell'inquinamento acustico;
- ✓ la riduzione delle emissioni di CO₂ nell'atmosfera, resa possibile grazie all'abbassamento delle temperature di lavorazione e al reimpiego di materiali di risulta, altrimenti destinati a discarica.

Immagini relative alla produzione e stesura di asfalto modificato (fonte "articolo asfalti&bitumi")





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

3.2 Materiali edilizia (0 - 20mm granulato e polverino deferrizzato)

Grazie alla gomma riciclata si ottengono prodotti edilizi per diversi utilizzi, primi fra tutti, grazie alle rilevanti caratteristiche di elasticità della gomma e di resistenza agli urti, i prodotti per l'isolamento acustico dal rumore e dalle vibrazioni. I prodotti realizzati con la gomma da PFU hanno uno sviluppo batterico rallentato, resistono alla muffa, al caldo e all'umidità, non risentono dell'esposizione alla luce del sole ed ai raggi ultravioletti così come ai prodotti chimici; caratteristiche che ne fanno un prodotto competitivo in confronto agli altri materiali elastici resilienti presenti sul mercato. L'elevata capacità della gomma riciclata di mantenere inalterate le proprie prestazioni nel tempo costituisce un notevole valore aggiunto in un settore come quello edilizio, dove la durata nel tempo dei prodotti è un elemento primario. Ne derivano diversi prodotti rivolti al mercato edile, che è possibile raccogliere nelle seguenti categorie:

- ✓ prodotti anticalpestio per l'isolamento acustico dei solai, che si basano sull'interposizione tra strato superficiale e struttura di base (il solaio) di uno strato di materiale elastico (normalmente tra i 2 e i 20mm di spessore) che consente di "rompere" la loro configurazione solidale;
- ✓ prodotti da intercapedine per l'isolamento acustico delle pareti, dove l'interposizione di uno strato di gomma nell'intercapedine delle pareti in muratura permette di attenuare le perdite di isolamento provocate dalle risonanze di intercapedine. L'isolante in gomma riciclata può essere applicato anche in contro placcaggio e rivestito con pareti in cartongesso;
- ✓ prodotti antivibranti per lo smorzamento dei fenomeni di vibrazione (di macchinari per l'industria, di impianti idraulici e meccanici e delle loro componenti, per le fondazioni degli edifici): è necessario che il materiale resiliente abbia ottime proprietà elastiche e di smorzamento, oltre che una buona resistenza meccanica sotto carico. Queste caratteristiche fanno della gomma riciclata un'importante risorsa per la produzione di antivibranti. Basamenti antivibranti in gomma riciclata,



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 - 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

oltre a garantire elevati valori di elasticità, permettono di ottenere ridotte altezze di montaggio dei macchinari che garantiscono un ingombro minore nei locali.



3.3 Arredo urbano, pavimenti e manufatti (0 - 15mm granulato e polverino)

Il granulo legato con resine poliuretatiche o in combinazione con altri polimeri termoplastici viene utilizzato per la produzione di elementi di arredo urbano (dossi artificiali, cordoli etc.)

3.4 Riutilizzo in mescola (0 - 0,4mm polverino)

I polverini sono riciclati nelle nuove mescole per la produzione di articoli tecnici in quantità percentuali variabili in funzione delle prestazioni richieste al prodotto finale e, in minima parte, nelle mescole degli pneumatici.

3.5 Opere ingegneria civile (PFU interi 10 - 400mm ciabattato e cippato)

Gli PFU interi sono talvolta utilizzati come elemento costruttivo di barriere insonorizzanti, barriere antierosione, stabilizzazione di pendii, protezioni costiere, terrapieni stradali drenanti e termoisolanti e drenaggi di base di nuove discariche.

Gli PFU frantumati sono utilizzati in parziale sostituzione di inerti minerali per la realizzazione di fondazioni stradali/ferroviarie, ponti e gallerie e bacini di ritenzione delle acque piovane. Le proprietà drenanti, immarcescibili, antivibranti, termoisolanti e il basso peso specifico dei materiali derivanti dagli PFU ne rendono l'applicazione in tali impieghi particolarmente vantaggiosa.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



3.6 Superfici sportive (0,8 - 20mm granulato deferrizzato)

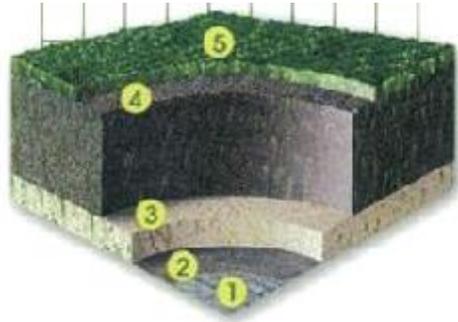
Le caratteristiche di elasticità e assorbimento delle vibrazioni e del rumore che rendono la gomma riciclata ottima per la produzione di isolanti, si uniscono ad altre importanti proprietà del materiale, rendendolo un'ottima soluzione anche per la realizzazione di pavimentazioni sportive. Gli Pfu, una volta trasformati e lavorati, si contraddistinguono per proprietà antisdruciolevoli, ottimo assorbimento degli urti e resistenza alle deformazioni. Le pavimentazioni in gomma riciclata possono essere posate senza preoccupazioni anche all'esterno, grazie alla resistenza agli agenti atmosferici e alle buone prestazioni garantite anche a diverse temperature. Per questo si trovano svariati casi di applicazioni della gomma riciclata nei complessi sportivi, che la utilizzano per prati artificiali, piste di atletica, campi da gioco e pavimentazioni antitrauma in corrispondenza delle aree giochi, anche grazie alla possibilità di ottenere materiale di diversi colori e più o meno rigidi. Queste superfici, inoltre, non richiedono elevata manutenzione e hanno costi di gestione ridotti rispetto ad altri materiali. Sono, inoltre, utilizzati quali materiale da intaso per campi in erba artificiale; infatti le proprietà drenanti del materiale unite alla capacità elastica di assorbire gli urti rendono il granulo dello PFU particolarmente idoneo a tali utilizzi conformemente alla normativa ecologica di riferimento (DIN V 18035 sez.7).



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



Legenda:

- 1: Supporto primario in polipropilene;
- 2: Secondo supporto in poliammide;
- 3: Riempimento in sabbia;
- 4: Granulato in gomma;
- 5: Monofilo legato

L'opportunità di utilizzare materiali alternativi ai tradizionali materiali inerti (ghiaia e sabbia), rappresenta un importante e necessario passo considerato che i materiali inerti naturali saranno sempre meno disponibili alla luce delle recenti restrizioni e divieti sulle attività di scavo nelle cave e negli alvei fluviali. Inoltre, poter utilizzare lo PFU in tale campo, rappresenta un importante mercato in continuo sviluppo visto che ogni anno vengono realizzati nuovi campi sportivi in erba sintetica.

3.7 Materiale per pacciamatura (10 - 50mm cippato deferrizzato)

L'utilizzo di cippato da pneumatici fuori uso rappresenta una soluzione ecologica per la pacciamatura ad esempio di giardini pubblici e privati o rotatorie. Il materiale in gomma risulta inerte e atossico, non assorbe acqua anzi mantiene il giusto grado di umidità del terreno ed evita il possibile sviluppo delle erbacce. Inoltre, non richiede particolari attività manutentive, riducendo inoltre le infestazioni parassitarie e l'attacco delle piante da parte di limacce e lumache.





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4 POSSIBILI RECUPERI DEGLI PNEUMATICI FUORI USO NEL MONDO

Di seguito vengono esposti gli estratti di alcuni articoli proposti sulle riviste internazionali di settore riguardanti gli studi effettuati in merito ai possibili riutilizzi degli pneumatici fuori uso (PFU). L'elenco delle pubblicazioni citate, con gli articoli completi, è presente nella sezione allegati presente al termine dell'elaborato.

4.1 Valutazione e sviluppo di fibre rinforzate ad alte prestazioni per calcestruzzo autocompattante leggero con briciole riciclate di gomma esposte a temperature elevate [1]. Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures.

Il granulo di gomma è un materiale creato dalla macinazione degli pneumatici usati. Non c'è dubbio che le crescenti quantità di pneumatici creino problemi ambientali. L'obiettivo a lungo termine di questo documento è quello di trovare un mezzo per "smaltire" il granulato di gomma nel calcestruzzo autocompattante leggero (SCC-Self Compacting Concrete) e ancora fornire un prodotto finale con buone proprietà ingegneristiche. Questo articolo ha considerato la sostituzione di aggregati normalmente utilizzati con aggregati di granuli di gomma e aggregati di scorie leggere insieme a fibre per fornire un'alternativa sostenibile che aiuti a minimizzare i danni ambientali associati allo smaltimento degli pneumatici usati. Inoltre, lo scopo di questo studio è determinare l'effetto delle fibre sulle proprietà fisiche e meccaniche in aggiunta alla prestazione del calcestruzzo dopo l'esposizione a temperature elevate. L'indagine è stata eseguita dopo l'esposizione sia a temperatura ambiente che elevata. Per rinforzare le fibre sono stati aggiunti un mix contenente l'80% di aggregato grossolano tradizionale con aggregato di scoria leggera e il 20% di sostituzione del tradizionale aggregato fine con aggregato di polverino di gomma. Le fibre di acciaio e polipropilene (PP) sono state esaminate in modo da accertare i benefici che ogni fibra può fornire in determinati intervalli di temperature. I dosaggi di additivi chimici sono stati regolati in



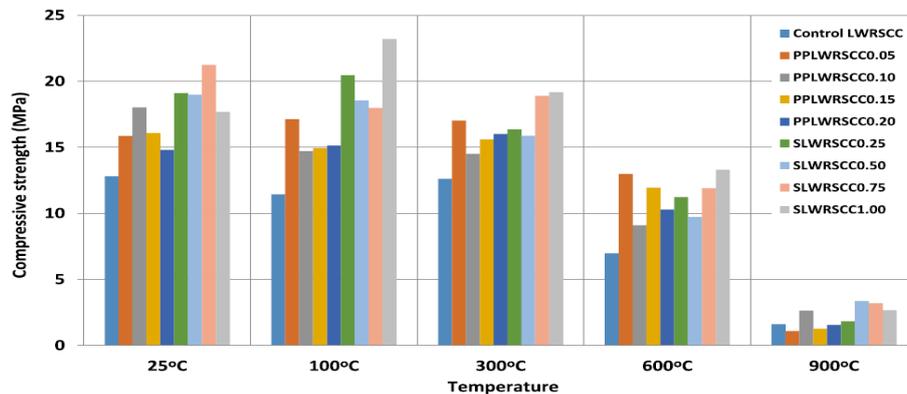
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



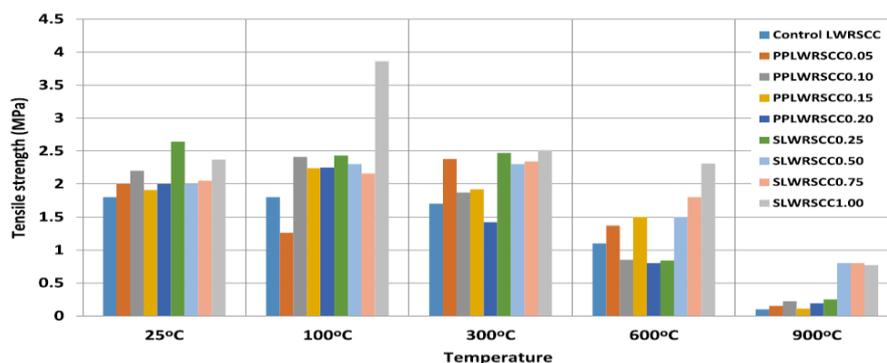
SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

modo da ottenere i rapporti di miscelazione desiderati. Il programma sperimentale ha studiato le proprietà fisiche del SCC attraverso determinati parametri. Le proprietà meccaniche sono state esaminate dopo 28 giorni di stagionatura con l'utilizzo di campioni cilindrici standard aventi dimensioni 100*200 millimetri. I campioni sono stati sottoposti a prove di trazione e compressione dopo l'esposizione a 25, 100, 300, 600 e 900°C.

Residual compressive strength of fibre reinforced LWRSCC mixes



Residual tensile strength of fibre reinforced LWRSCC mixes



I risultati dello studio mostrano che l'aggiunta di polverino di gomma nel calcestruzzo autocompattante leggero (SCC-Self Compacting Concrete) porta benefici effetti sui parametri di resistenza pur sacrificando la lavorabilità.



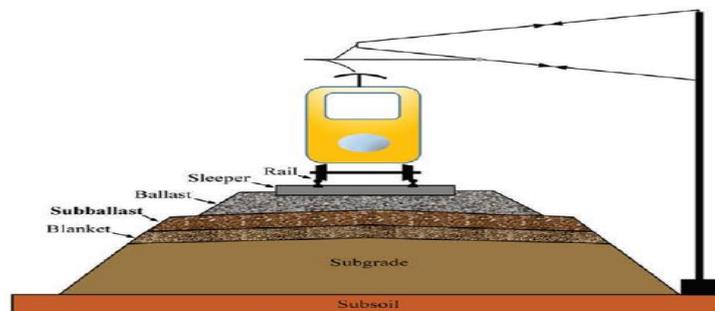
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.2 Valutazione del modulo resiliente e della deformazione permanente delle miscele non legate di materiali granulari e di particelle di gomma dagli pneumatici di scarto da utilizzare negli strati di sottofondo dei binari ferroviari [2]. An Evaluation of the Resilient Modulus and Permanent Deformation of Unbound Mixtures of Granular Materials and Rubber Particles from Scrap Tyres to Be Used in Subballast Layers.

Negli ultimi anni la gomma ottenuta dagli pneumatici fuori uso è stata riutilizzata in diverse opere civili come argini stradali e piattaforme ferroviarie grazie alle sue proprietà elastiche, alla bassa tendenza degrado ed all'attenuazione delle vibrazioni. In Spagna sono state raccolte circa 175.000 tonnellate di pneumatici di scarto nel 2014, di cui solo lo 0,6% è stato riutilizzato in opere civili. Con la finalità di contribuire al riutilizzo di grandi quantità di questo materiale di scarto, questo articolo si concentra sull'analisi di miscele non legate di materiali granulari con percentuali diverse di particelle di gomma da utilizzare come strati di sottofondi.



Le miscele sono testate attraverso prove cicliche triassiali in modo da ottenere il loro modulo resiliente e valutare le loro deformazioni permanenti. Si evince che all'aumentare del contenuto di gomma, il modulo diminuisce e la deformazione permanente aumenta. Tenendo conto dei carichi usuali trasmessi allo strato di riempimento posizionato al di sotto dei binari ferroviari, il contenuto di gomma ottimale che non compromette il comportamento della miscela è impostato in un intervallo tra 2,5% e 5% in termini di peso. Il transito dei veicoli provoca all'interno dell'ammasso



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
 Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
 Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
 Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
 Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
 Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
 Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

terroso, sottostante la pavimentazione, una variazione dello stato tensionale esistente da cui scaturiscono le deformazioni responsabili dei cedimenti visibili in superficie.

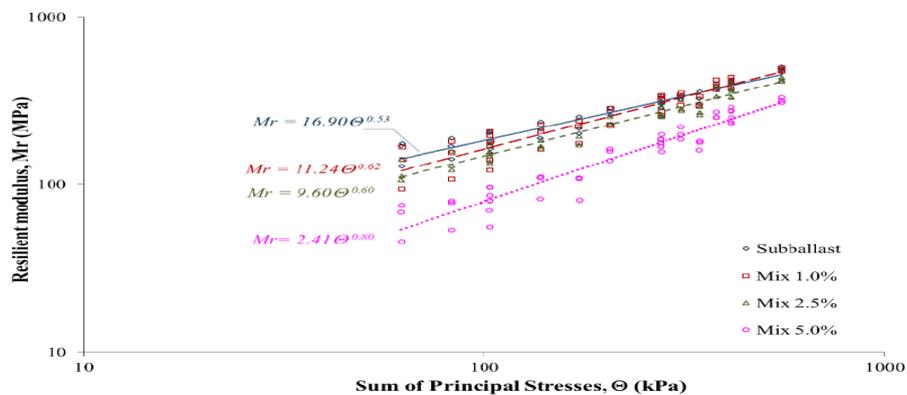


Figure 1. Subballast and rubber samples. (a) Unbound Granular Material-Subballast (b) Rubber 20 mm. (c) Rubber 2 mm. (d) Rubber 1 mm.



Figure 2. (a) Cylindrical Specimens Ø 100 mm H 200 mm (b) Cyclic Load Triaxial Test.

I risultati evidenziati nel grafico seguente mostra che il modulo resiliente tende a diminuire con l'aumento del contenuto di gomma, sebbene tutte le miscele studiate eccetto quella con il 5% producano un modulo superiore a 100 kPa, che rappresenta un valore accettabile per gli strati di substrato. Inoltre, l'aggiunta di gomma riduce il limite di scorrimento viscoso della miscela. Percentuali superiori al 5% in termini di peso possono portare a miscele instabili che presentano forti deformazioni dopo un numero ridotto di cicli di carico.





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
 Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
 Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
 Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
 Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
 Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
 Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.3 L'uso di pneumatici decostruiti come elementi elastici nei binari ferroviari [3] The use of deconstructed tyres as elastic elements in railways tracks

La gomma degli pneumatici è caratterizzata da proprietà elastiche elevate e resistenza a lungo termine, il che rende tali materiali a fine vita appropriati per il loro riutilizzo come elementi elastici nei binari ferroviari. Infatti, risultano adeguati a mitigare le vibrazioni verticali dei binari diminuendo conseguentemente lo stress dei treni in transito. Gli pneumatici a fine vita sono composti da tre strati: strato del battistrada (esterno), strato intermedio e interno; quello preso in esame per l'applicazione in oggetto è quello più esterno in quanto caratterizzato da assenza di residui metallici.



Table 1. Tread layer properties.

Properties	Outer tire layer
Layer length (m)	1.75–1.90
Layer width (m)	0.15–0.16
Shore hardness-ISO 868	60–75
Density (g/cm ³)-ISO 1183	1.198
Tensile strength-ISO 37 (MPa)	9.5
Elongation-ISO 37 (%)	145.0
Electrical insulation (dry)-EN 21303 (Ω)	1.24×10^{10}
Electrical insulation (wet)-EN 21303 (Ω)	5.48×10^6
Impact attenuation-EN 13146-3 (%)	>52

Dagli strati degli pneumatici esterni vengono prodotti i seguenti elementi elastici:

- ✓ supporti per rotaie con dimensioni orizzontali pari a 180*140 mm, che li rendono adatti per essere utilizzati sotto il binario. In questo studio sono stati analizzati oltre 100 cuscinetti per pneumatici con spessore tra 4,0 e 11,5 mm;
- ✓ sotto le traversine (USP): i campioni di pfu sono stati incorporati in blocchi di cemento con geometria quadrata (300*300 mm) secondo la norma DIN 45673-6. Sono stati utilizzati 23 campioni elastici con spessore compreso tra 5,0 e 11,0 mm;



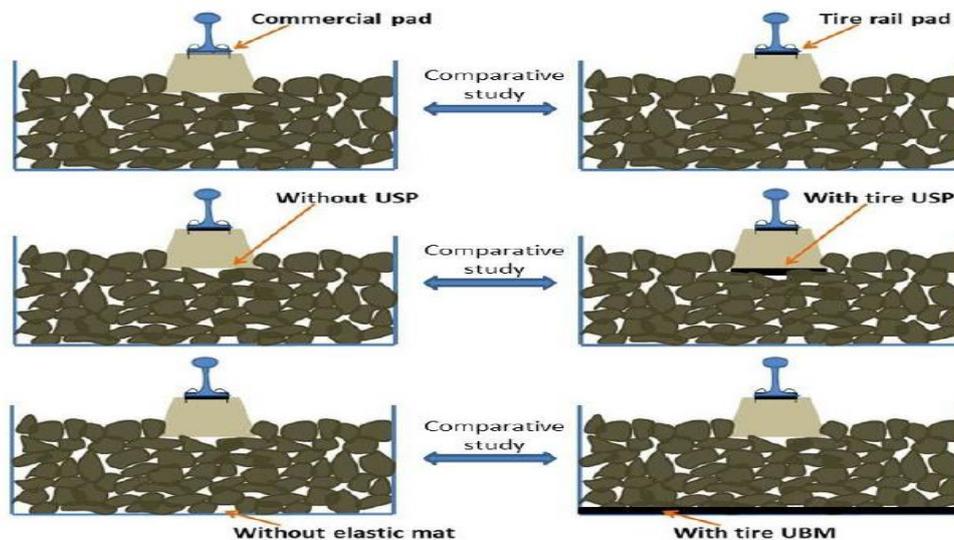
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

✓ sotto il ballast (UBM): campioni elastici di 300*300 mm sono stati ottenuti per effettuare studi di laboratorio in riferimento alla DBS 918 071-01. Sono stati utilizzati un totale di 39 campioni quadrati con uno spessore compreso tra 11,0 e 44,0 mm. Poiché lo strato esterno è solitamente più sottile di 11,5 mm, diversi strati di gomma sono stati uniti attraverso un processo di temperatura-Pressione-tempo (TPt, consistente di 2 ore a 200 °C, applicando un carico di 10 kg/cm²) allo scopo di ottenere maggiori valori di spessore.

Successivamente sono stati comparati i risultati ottenuti con i campioni addizionati con gli pfu con quelli ottenuti con campioni standard.



Gli pneumatici riutilizzati hanno presentato un'adeguata resistenza alla fatica meccanica e al deterioramento climatico e quindi sono risultati essere adatti ad essere utilizzati come componenti elastici in ambito ferroviario. Queste applicazioni permetterebbero di ridurre gli scarti da smaltire e diminuire i costi delle materie prime da utilizzare e reperire.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.4 Idoneità ambientale e risparmio di impronta di carbonio del riciclaggio di polverino di gomma da pneumatici per applicazioni stradali [4] Environmental Suitability and Carbon Footprint Savings of Recycled Tyre Crumbs for Road Applications

Questo articolo presenta l'idoneità ambientale del riutilizzo degli pneumatici usati frantumati utilizzati come aggregati per sottofondi stradali. Campioni di pneumatici triturati raccolti da una società di recupero di Melbourne è stata testata per valutare la potenziale lisciviazione di contaminanti da tale materiale all'ambiente circostante. Sono stati condotti test di lisciviazione per 100 potenziali contaminanti seguendo la procedura australiana di lisciviazione standard (ASLP).

Infine, è stata effettuata un'analisi dell'impronta di carbonio (la carbon footprint è una misura che esprime in CO₂ equivalente il totale delle emissioni di gas ad effetto serra associate direttamente o indirettamente ad un prodotto, un'organizzazione o un servizio) considerando un approccio sostenibile all'uso di tale pneumatico frantumato con calcestruzzo riciclato e roccia riciclata. Si è constatato che attraverso l'utilizzo di tali materiali riciclati esistono risparmi di impronta di carbonio per tonnellata di materiale di sottofondo stradale di 9,3 kg di CO₂ e 8,1 kg di CO₂ rispettivamente utilizzando il 2 e 3% di polverino di gomma da pneumatici.

4.5 Sviluppo e test di lisciviazione per terreni sintetici contenenti granuli di scarto da pneumatici usati [5] Development of Leaching Procedures for Synthetic Turf Systems Containing Scrap Tyre Granules

Il granulo ottenuto da PFU viene impiegato come materiale da intaso tra i fili d'erba sintetica composta principalmente da polietilene (PE) o fibre di polipropilene (PP) e per comporre il sub-strato sottostante la superficie sintetica di gioco. In questo secondo caso, sotto forma di uno speciale tappetino rivestito di lattice o poliuretano (PUR) dotato di canalizzazioni favorisce il livellamento delle fondazioni, dona elasticità alla superficie, facilitando la restituzione dell'energia all'atleta e drenando al contempo l'acqua piovana. L'intaso con granuli di gomma da PFU ha invece una funzione



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

prestazionale necessaria ai fini dell'assorbimento degli shock, nel prevenire la deformazione verticale della superficie, mantenendo alti standard qualitativi per il rotolamento e il rimbalzo del pallone. La gomma riciclata può contenere inquinanti organici e inorganici dovuti alla presenza di catalizzatori nei processi di vulcanizzazione, stabilizzanti e altri additivi che possono essere rilasciati nel suolo e nelle acque sotterranee nel caso di impianti sportivi all'aperto.

Al fine di valutare il possibile rilascio di zinco e idrocarburi aromatici policiclici (IPA) potenzialmente rilasciati dai granuli di gomma riciclata presenti nelle superfici sportive sintetiche sono stati effettuati test di lisciviazione. I dati raccolti mostrano che non vi è rilascio di zinco e IPA fino a quando il rivestimento dei granuli non risulta degradato ed usurato dall'utilizzo e dalle condizioni meteorologiche avverse.

4.6 Nuovo sistema di protezione per motociclisti fatto con gomma riciclata [6]. New motorcyclists protection system made of recycled rubber

Questo studio mira ad ottenere una barriera protettiva in caso di caduta dei motociclisti e conseguente possibile urto con il guardrail. L'uso di gomma riciclata da pneumatici fuori uso potrebbe:

- ✓ favorire un riutilizzo di tale materiale;
- ✓ aiutare a ridurre, in caso di impatto, i valori di picco dell'accelerazione della testa e delle forze del collo, grazie alla sua deformabilità e alla sua capacità di assorbimento di energia.

Tuttavia, è necessario assicurarsi che la deformazione locale e l'attrito con la barriera non impediscano al motociclista di essere rimbalzato e continui a scivolare per ottenere una decelerazione progressiva. Nonostante i progressi compiuti negli ultimi decenni in materia di sicurezza stradale, è doveroso continuare a migliorare la sicurezza stradale, specialmente per gli utenti più vulnerabili, come i motociclisti. E' stato progettato un sistema di protezione per motociclisti tecnicamente fattibile, realizzato in gomma riciclata da pneumatici di fine vita. Dopo l'ottimizzazione del progetto, nella simulazione sono stati ottenuti valori favorevoli per gli indici biomeccanici che indicano la gravità



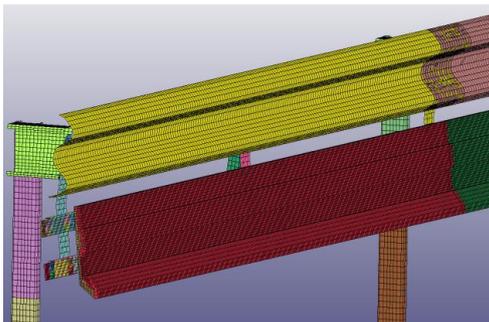
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

dell'incidente. Sebbene la validazione finale debba essere eseguita, si può affermare che questo tipo di materiale riciclato può essere utilizzato in barriere che aiutano a ridurre le lesioni in caso di incidenti con motociclisti. Inoltre, la redditività di questo MPS può costituire una nuova alternativa per il riutilizzo della gomma riciclata dagli pneumatici di scarto, contribuendo a risolvere il problema ambientale causato da questo tipo di rifiuti.

Infine, è stato dimostrato che il metodo degli elementi finiti è un aiuto importante nello sviluppo di barriere di sicurezza. I risultati della simulazione del MPS mostrano un buon accordo con i dati sperimentali nei casi discussi in questo lavoro, ed i parametri biomeccanici sono correttamente stimati. Oltre ai vantaggi economici di FEM che riducono il numero di test costosi, le simulazioni forniscono informazioni più ampie su forze, sforzi, sollecitazioni e accelerazioni degli elementi coinvolti nell'impatto, che è essenziale per capire il funzionamento e i punti deboli del MPS e ottimizzare il suo design. La fase successiva nello sviluppo di questo MPS è l'esecuzione del test in scala reale per l'approvazione secondo le normative. La conformità ai requisiti consentirà la commercializzazione della barriera in gomma riciclata.





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.7 Riutilizzi delle fibre tessili degli pneumatici in composti plastici [7] Reuse of tires textile fibers in plastic compounds

Questo studio si propone di indagare e quantificare gli impatti ambientali legati al riutilizzo delle fibre tessili degli pneumatici come materiale di seconda vita per la preparazione dei composti plastici. In Europa, ogni anno, circa 3,4 milioni di tonnellate di pneumatici vecchi sono trattati per recuperare materiali o energia. A differenza di gomma e acciaio che sono attualmente riutilizzati in vari campi di applicazione, i tessuti recuperati rappresentano un rifiuto speciale (Catalogo europeo dei rifiuti - Codice CER 19.12.08) da smaltire. Le fibre tessili rappresentano circa il 5-10% in peso del ELT (*End of Life Tyre*), quindi in Europa, circa 320.000 tonnellate all'anno di questo rifiuto speciale devono essere smaltite. Questo porta alla generazione di impatti negativi sull'ambiente, perdite economiche e costi pubblici. Pertanto, è stato testato il riutilizzo delle fibre tessili in composti plastici a base di polipropilene (PP). Dopo aver subito il processo di triturazione e macinazione i residui degli pneumatici contengono ancora delle impurità (circa 30% in peso) e non possono essere utilizzati tal quali nei composti plastici. Pertanto, vengono centrifugati fino ad ottenere fibre pulite di nylon 66. Sono stati effettuati due compounding il primo per verificare l'estrudibilità del materiale ed il secondo per testarlo con prove meccaniche.

Fiber quantity [%]	Max Stress [MPa]	Deformation % to max stress [%]	Max deformation [%]	Young module [MPa]
0%	28.72	9.2	712	1465
50%	23.92	7.96	12.22	1305

Generalmente questi rifiuti vengono smaltiti in discarica o utilizzati per il recupero energetico, in questo articolo viene evidenziato un possibile riciclo del materiale evitando impatti negativi sull'ambiente.

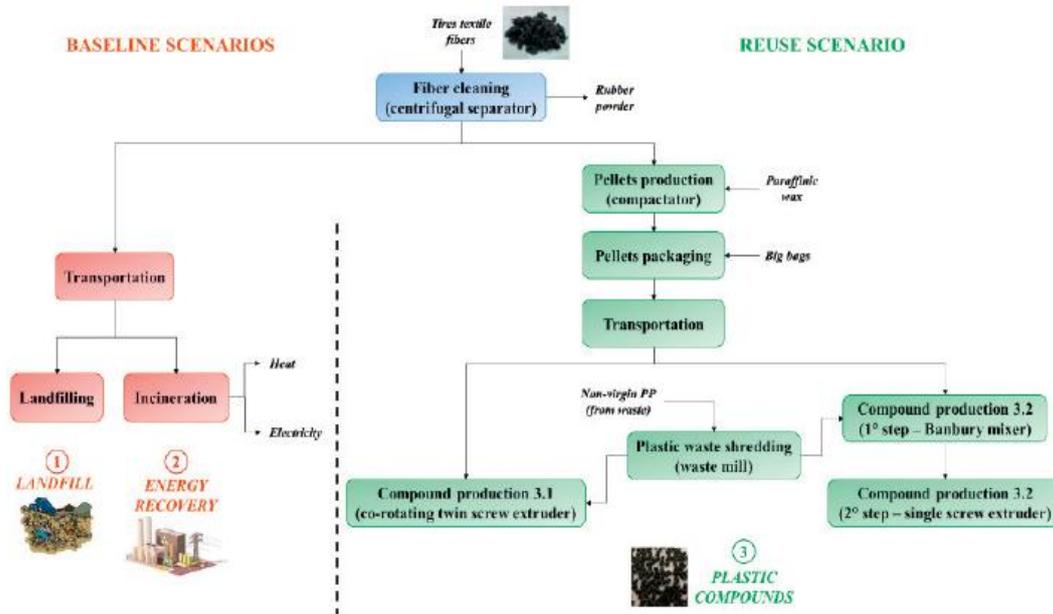


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Marco Marconi et al. / Procedia CIRP 69 (2018) 944 – 949



4.8 Metodi di lavorazione, caratteristiche e comportamento adsorbente dei carboni derivanti da pneumatici [8] Processing methods, characteristics and adsorption behavior of tire derived carbons

Il rapido sviluppo industriale ha portato a gravi problemi di inquinamento dell'acqua (pesticidi, coloranti, metalli pesanti, idrocarburi policiclici aromatici, solventi...) con conseguenze sia per l'uomo che per l'ambiente. Molti di questi inquinanti non sono biodegradabili e pertanto persistono nell'ambiente per molto tempo. Una metodologia di trattamento delle acque reflue è rappresentata dall'utilizzo del cosiddetto carbone attivo: sono genericamente chiamati "carboni attivi" tutte le sostanze con un alto contenuto di carbonio ed elevata porosità. Il carbone attivo riesce ad adsorbire e isolare sostanze di vario tipo: viene quindi impiegato per eliminare gli inquinanti dall'acqua e dall'aria o, in medicina, per assorbire i gas intestinali e per neutralizzare i veleni ingeriti. Per renderlo utilizzabile è però necessario un processo di attivazione



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

chiamato micronizzazione: in pratica, un'estrema riduzione delle dimensioni delle particelle di carbone, che serve a favorirne la reattività. Gli pneumatici fuori uso vengono raccolti e trattati con un processo di pirolisi che a seconda delle temperature utilizzate, al grado di porosità ottenuto e alla qualità iniziale della gomma, possono portare a caratteristiche differenti del carbone attivo finale.



Il pH della soluzione rappresenta un fattore importante da considerare, in quanto un valore di pH elevato è preferito per l'adsorbimento di inquinanti cationici mentre un valore di pH basso è preferito per l'adsorbimento di inquinanti anionici.

4.9 Riutilizzo di fibra di polimero da pneumatico nella mitigazione al fuoco [9]. Reused tyre polymer fibre for fire-spalling mitigation

Le fibre di polimero (polipropilene PP) provenienti da pneumatici fuori uso sono state testate per valutarne la vulnerabilità alle alte temperature; in particolare per essere utilizzate nel calcestruzzo. Esso è considerato intrinsecamente resistente al fuoco per la sua bassa conduttività e non combustibilità; tuttavia subisce fenomeni di “scheggiatura” dovuta al fuoco che possono verificarsi a temperature anche al di sotto dei 200°C con conseguente perdita di protezione termica per il rinforzo interno in acciaio (armatura). L'utilizzo della gomma riciclata (dose circa 2kg/m³) ha permesso di migliorare le caratteristiche del calcestruzzo per quanto concerne lo sgretolamento provocato dal fuoco.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



Fig. 2 Tyre polymer fibres before (left) and after (right) processing for reuse



4.10 Ricerca sul processo di pirolisi del granulato di gomma da pneumatici nell'olio da cucina esausto [10] Research on the pyrolysis process of crumb tire rubber in waste cooking oil

L'uso di olio da cucina esausto (WCO-Waste Cooking Oil) nel processo di pirolisi del granulato di gomma degli pneumatici usati (CTR-Crumb Tire Rubber) non solo migliora la sicurezza e il controllo del processo di preparazione, ma permette anche di riciclare in modo sostenibile questi due materiali di risulta. L'olio di cucina esausto (WCO) è stato utilizzato come solvente per effettuare il processo di pirolisi del CTR ottenendo ad alta temperatura olio di gomma di scarto (WRO) avente una migliore plasticità, una migliore scorrevolezza e una diminuzione della viscosità.

Composition of CTR.

Operating oil (%)	Rubber hydrocarbon (%)	Carbon black (%)	Mineral filler (%)
6.82	53.24	29.24	10.70



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Attraverso un'analisi termo-gravimetrica (tecnica termoanalitica che misura variazioni di peso in un materiale quando esso è sottoposto ad un graduale (e controllato) aumento di temperatura) sono stati analizzati i cambiamenti della struttura molecolare e delle proprietà reologiche durante l'accumulo di energia termica. La compatibilità del CTR con l'asfalto vergine prima e dopo la pirolisi è stata descritta mediante test di separazione e i risultati mostrano che essa migliora con l'utilizzo di WCO per il processo di pirolisi. La pirolisi è un metodo che realizza il trattamento termochimico di rottura dei legami chimici dei materiali in condizioni di assenza di ossigeno. Il più grande vantaggio di questo metodo è che può efficacemente smaltire rifiuti difficili da riciclare. A velocità di riscaldamento rapida, i materiali di scarto possono essere convertiti in liquidi ad alto contenuto energetico trasportabile (come olio di pirolisi e bio-olio).

Segregation index of ordinary rubber asphalt and WCO-pyrolysed CTR asphalt.

Modified asphalt type	Δt (°C)
Ordinary rubber asphalt	7.2
WCO-pyrolysed CTR asphalt	0.5

Dalla tabella sopra esposta si evince chiaramente la differenza tra l'indice relativo all'asfalto ordinario con quello pirolizzato con WCO; ne consegue che la compatibilità del CTR con l'asfalto vergine può essere migliorata con l'utilizzo di WCO per il processo di pirolisi.

4.11 Riciclaggio rifiuti di gomma attraverso la de-vulcanizzazione [11]. Recycling of rubber wastes by devulcanization

I polverini e granuli di gomma, se sottoposti ad azione meccanica, termica o irradiati di ultrasuoni, subiscono un processo di de-vulcanizzazione (rottura selettiva dei legami chimici zolfo-zolfo (S-S) e carbonio-zolfo (C-S) senza degradare il materiale) con risultati variabili in funzione del materiale di partenza e della tecnologia utilizzata. Il



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

prodotto finale è particolarmente idoneo al reimpiego in nuove mescole di gomma anche in percentuali elevate; tale operazione permette quindi il completo riciclo dei polimeri che vengono nuovamente legati alle nuove materie prime mediante un secondo processo di vulcanizzazione. Il difenile disolfuro (DD) sembra essere il miglior agente de-vulcanizzante.

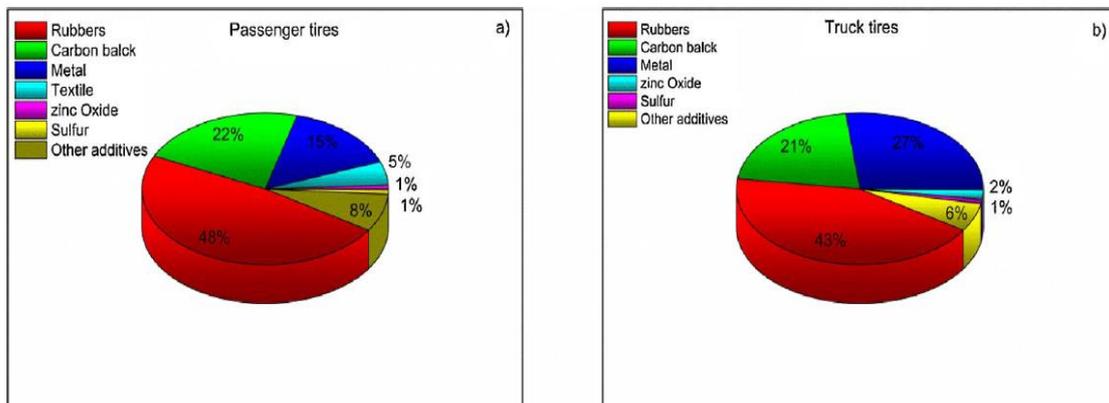


Fig. 1. a) Passenger tires and b) truck tires composition in percentage by weight.

4.12 Stabilizzazione di suoli sabbiosi usando frammenti di gomma da pneumatici riciclati [12] Stabilization of sandy soil using recycle waste tire chips

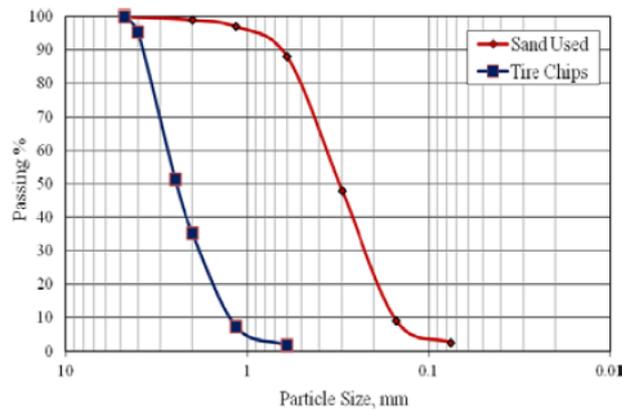
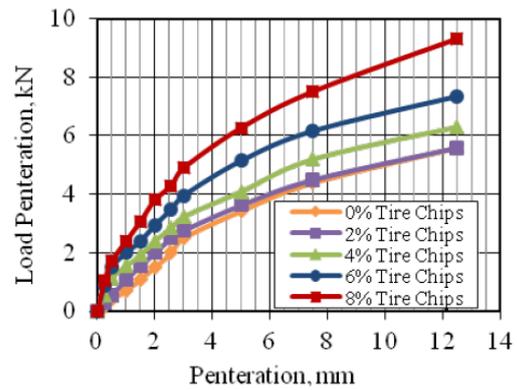
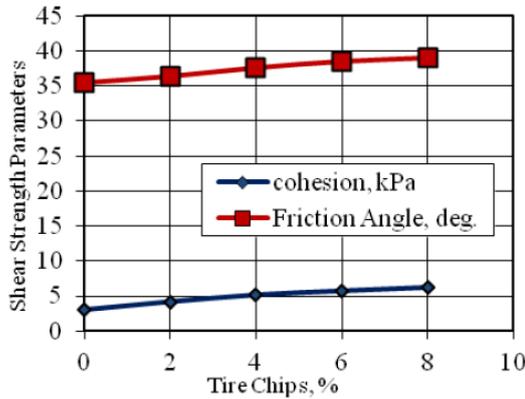
Questo studio mira a verificare la fattibilità dell'utilizzo di frammenti di gomma da pneumatici usati per migliorare la stabilità dei suoli sabbiosi in alternativa ai materiali tradizionali come cemento o calce che hanno un costo piuttosto elevato. Pertanto, si intende introdurre un metodo utile per ridurre la contaminazione ambientale degli pneumatici usati a causa della disponibilità locale (IRAQ) attraverso questi tipi di additivi per migliorare il suolo sabbioso. Sono state studiate alcune proprietà geotecniche di campioni compositi di terreno con frammenti di gomma proveniente da pneumatici usati e i risultati principali dei test hanno approvato la capacità di stabilizzare la sabbia in modo efficace utilizzando questo tipo di materiale di scarto.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



Sulla base dei risultati dei test della miscela di sabbia e frammenti di gomma da pneumatici usati, si possono trarre le seguenti conclusioni: i frammenti possono efficacemente essere utilizzati per migliorare le proprietà meccaniche del terreno sabbioso. L'aggiunta di tali materiali alla sabbia diminuisce il peso specifico e la densità secca e riduce leggermente il contenuto di umidità ottimale. Questo aspetto ha un vantaggio nel ridurre la pressione di terra laterale sulle pareti di contenimento qualora i frammenti di pneumatici vengano riutilizzati come materiale di riempimento. Inoltre, aumentano la resistenza al taglio della sabbia a causa dell'aumento dei legami fisici tra le particelle del suolo, l'angolo di attrito e la coesione.

L'uso di materiali di scarto contribuirà a ridurre i costi di costruzione e a risolvere i problemi di smaltimento di questi materiali.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.13 Durata del calcestruzzo contenente pneumatici riutilizzati come parziale sostituzione dell'aggregato fine [13] The durability of concrete containing recycled tyres as a partial replacement of fine aggregate

Questa ricerca è stata effettuata per valutare la durata del calcestruzzo contenente pneumatici usati come parziale sostituzione degli aggregati fini. I test sono stati eseguiti con diversi provini contenenti delle diverse quantità di polverino di gomma proveniente da pneumatici (0% - 3% - 5% - 7%). I risultati ottenuti hanno mostrato che la sostituzione di aggregato fine con il 7% di gomma riutilizzata ha registrato una resistenza a compressione di 43.7MPa, mentre il provino contenente un'aggiunta del 3% di gomma ha registrato un valore di 50.8MPa. Si è verificato quindi un decremento di resistenza e lavorabilità del calcestruzzo aumentando la percentuale di polverino di gomma utilizzato.

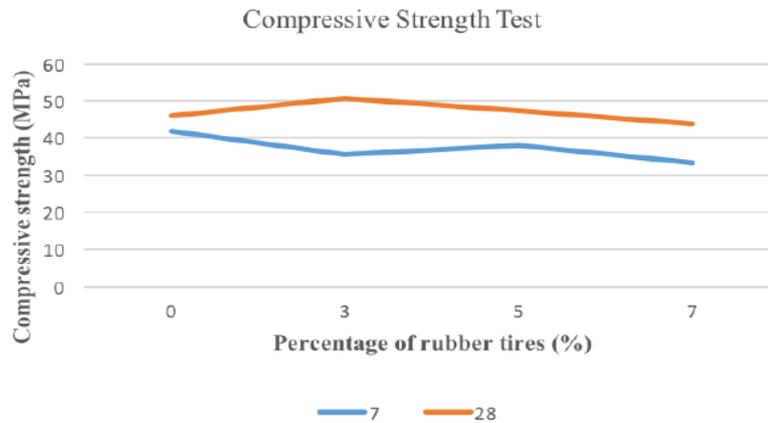




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448

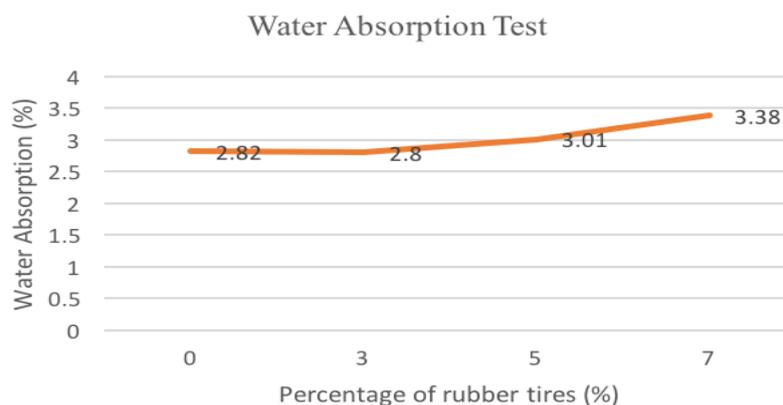


SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



Il grafico evidenzia l'andamento della resistenza a compressione dei campioni cubici dopo un periodo di indurimento di 7 giorni e di 28 giorni rispettivamente. La quantità ottimale di polverino di gomma da utilizzare nel calcestruzzo è del 3%.

Per analizzare invece la capacità di assorbimento dell'acqua sono stati testati campioni dopo un periodo di indurimento di 28 giorni. Gli stessi sono stati pesati poi immersi in una vasca d'acqua per 24h e successivamente di nuovo pesati.



Pertanto, anche in questo caso, la soluzione migliore di riutilizzo è rappresentata dalla percentuale del 3%. Tuttavia, un tasso di assorbimento dell'acqua inferiore non è sempre un indicatore di una migliore resistenza al gelo; mentre quella alta non sempre significa scarsa resistenza al gelo.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.14 Uso del gas proveniente da processo di pirolisi di pneumatici usati come carburante [14] Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel

Il processo di pirolisi consiste in una degradazione termica in atmosfera inerte; gli pneumatici subiscono un cracking termico a temperature intorno ai 500-600°C, scindendosi in una parte solida (char) ed una volatile, in parte condensabile; quest'ultima può subire raffreddamento e condensazione portando all'ottenimento di una frazione liquida e di una gassosa incondensabile.

Il processo fornisce quindi come prodotti:

- ✓ una frazione gassosa, costituita essenzialmente da idrogeno, metano, etilene, etano, ossidi di carbonio ed altri gas combustibili definita gas pirolitico, pirogas o syngas;
- ✓ una frazione liquida, costituita da catrame, acqua ed una varietà di sostanze organiche (oli);
- ✓ una frazione solida, costituita dal residuo carbonioso, oltre che da ceneri, inerti, metalli, ecc.

Le percentuali delle tre frazioni dipendono dalla temperatura, dalla pressione e dal tempo di residenza del rifiuto nel reattore, nonché dalle temperature a cui viene operata la successiva fase di condensazione. I gas ottenuti dal processo di pirolisi hanno un alto potere calorifico (circa 30-40 MJ/Nm³); contengono meno metano del gas naturale ma una concentrazione maggiore di idrocarburi C₂-C₆; inoltre sono caratterizzati da un'alta concentrazione di idrogeno e da assenza di azoto e argon. Al fine di soddisfare i requisiti normativi e mantenere uno standard ottimale è necessario rimuovere alcune sostanze (SO₂, HCL, NO_x e metalli pesanti) dal gas prodotto. Il gas pirolitico è un combustibile gassoso composto principalmente da paraffine, olefine, ossidi di carbonio, idrogeno e piccole quantità di composti di zolfo e azoto; caratterizzato da un elevato potere calorifico. Il carburante prodotto dagli pneumatici triturati è noto come carburante derivato da pneumatico (TDF).



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.15 Miglioramento del valore aggiunto del residuo pirolitico (PR) ottenuto da pneumatici usati trasformato in carbon black commerciale [15] Upgrading pyrolytic residue from waste tires to commercial carbon black

L'obiettivo di questo articolo è studiare il riutilizzo del residuo pirolitico (PR) ottenuto dal processo di pirolisi degli pneumatici usati. Il PR è stato trattato con acido cloridrico e fluoridrico e sottoposto alle onde ultrasoniche. È stata studiata l'efficienza di rimozione per la cenere e lo zolfo. Il nero di carbonio pirolitico (PCB) ottenuto dopo il trattamento dei residui pirolitici con acidi è stato analizzato mediante spettrofotometria a fluorescenza a raggi X. Le proprietà del PCB ottenuto sono state poi confrontate con le analoghe del carbon black commerciale (CCB). I risultati mostrano che il residuo pirolitico degli pneumatici usati è composto principalmente da carbonio, zolfo e cenere.

Table 1. Reported properties of PRs from waste tires.

Temperature (°C)	Ultimate analysis (wt %)					Ash (wt %)	Surface area (m ² g ⁻¹)	Reference
	C	H	O	N	S			
400	84.39	0.59	10.72	2.59	1.71	12.14	—	Akyıldız et al. (2010)
450	88.19	0.60	—	0.10	1.90	8.27	93	Conesa et al. (2004)
500	90.60	0.90	—	0.70	2.30	11.60	64	Li et al. (2012)
550	85.31	1.77	—	0.34	2.13	15.33	—	Galvagno et al. (2002)
600	86.60	0.70	—	0.40	2.10	7.10	116.3	López et al. (2010)
—	85.06	0.24	12.35	0.38	1.97	16.25	70	Tang and Huang (2005)

La cenere è composta principalmente da ossidi metallici, solfuri e silice.



I residui pirolitici ottenuti da pneumatici usati sono stati trattati inizialmente con HCl (1g ogni 10ml) per 6 ore e sottoposti ad ultrasuoni (200W, 40kHz). Dopo ciò, i residui risultanti sono stati ulteriormente trattati con 40% in peso di HF (1g ogni 2ml) per 5 ore successivamente lavati ed disidratati. Le proprietà superficiali, la porosità e la morfologia del nero di carbonio pirolitico (PCB) risultano molto affini alle corrispettive del carbon black commerciale (CCB). In conclusione, il PCB è considerato un'alternativa valida al CCB.



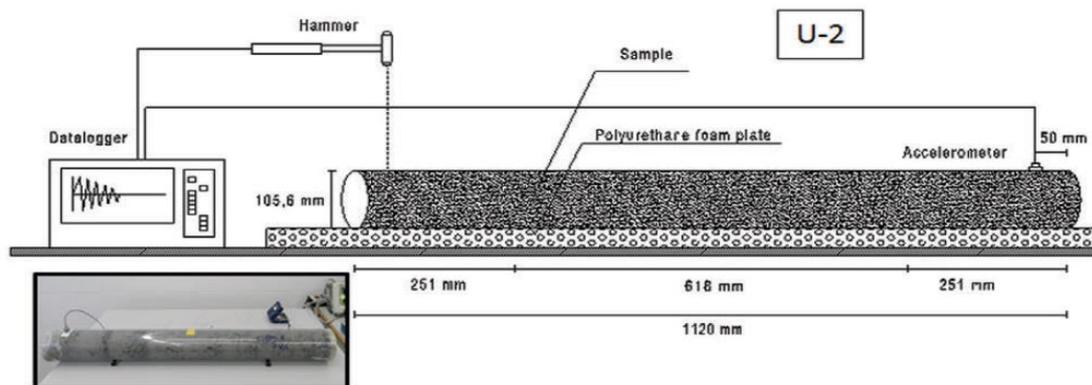
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.16 Utilizzo di pezzi di gomma per migliorare l'attenuazione degli strati di sub-ballast delle ferrovie costituiti da aggregati non legati [16] Use of rubber shreds to enhance attenuation of railway sub-ballast layers made of unbound aggregates

Uno degli approcci per risolvere il problema delle vibrazioni nelle ferrovie è caratterizzato dalla modifica dei materiali che formano la traccia. In particolare, viene analizzata la capacità di attenuazione di un composto misto di materiale granulare di terra e pezzi di gomma di scarto da pneumatici, utilizzato nello strato sotto il ballast. Campioni contenenti percentuali di residui di gomma tra l'1% e il 10% sono stati testati con prove di impatto per valutarne la risposta dinamica. I risultati ottenuti rivelano che mescolare frammenti di gomma con terreno granulare porta in media ad un aumento del 95% nel rapporto di smorzamento, dimostrando così la potenziale capacità dei mix proposti per attenuare le vibrazioni.



4.17 Ricerca e valorizzazione degli pneumatici usati come materiale innovativo in Algeria [17] Research and enhancement of used tyres such as material innovative in Algeria

Gli ingegneri algerini hanno presentato un lavoro riguardante la possibilità di riutilizzo degli pneumatici fuori uso in diverse pezzature nelle opere di ingegneria civile; in particolar modo hanno valutato:



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

- ✓ la possibilità di attenuazione della spinta del terreno nei muri di contenimento rinforzati con distese di pneumatici. Anche usato, il materiale costituente lo pneumatico conserva molte qualità: forza, solidità della struttura, alto potere calorifico, alto tenore di carbonio e sostenibilità...tutte queste qualità rendono una gomma usata un materiale altamente recuperabile;
- ✓ l'utilizzo dell'asfalto gommato test mirati a migliorare la stabilità termica e le caratteristiche delle superfici stradali. E' stata verificata anche una sostanziale diminuzione di inquinamento acustico grazie alla capacità di assorbimento acustico della gomma utilizzata. La composizione dell'asfalto modificato studiata è: 80% bitume, 18% polverino di gomma da pfu e 2% di olio aromatico.
- ✓ l'aggiunta di scarti degli pneumatici negli strati di fondazione di piccoli edifici.



L'utilizzo degli pneumatici fuori uso in ambito civile può risultare una risorsa importante dal momento che risultano migliorate le caratteristiche meccaniche prestazionali del terreno vergine.





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
 Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
 Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
 Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
 Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
 Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
 Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.18 Compositi con aggregati di gomma riciclata: proprietà e opportunità nelle costruzioni [18] Composites with recycled rubber aggregates: properties and opportunities in construction

La produzione globale di pneumatici è stimata in 1,5 miliardi di unità/anno e approssimativamente lo stesso numero di pneumatici raggiunge il fine vita ogni anno. Gli pneumatici fuori uso contengono fino al 90% di gomma vulcanizzata che non può essere facilmente riciclata a causa della complessa struttura reticolata raggiunta attraverso il processo di vulcanizzazione. Lo smaltimento inappropriato della gomma da questi pneumatici è pericoloso per l'ambiente e, di conseguenza, l'UE ha imposto delle rigorose direttive per privilegiare il riutilizzo al riciclaggio della gomma e vietano lo smaltimento degli pneumatici in discarica (direttiva 2008/98/CE e direttiva sulle discariche 1991/31/CE, rispettivamente). Nella tabella sottostante vengono elencati i materiali costituenti gli pneumatici distinti tra autoveicoli ed autocarri in percentuali di peso:

Material	Car (%wt)	Trucks (%wt)	RDV*
Elastomer: Rubber/Elastomers	40–45	42	Yes
Carbon black and Silica (fillers)	28	24	Yes
Metal reinforcement	13	25	No
Textile reinforcement	5	–	No
Zinc oxide	2	2	Yes
Sulphur (crosslinker)	1	1	Yes
Accelerators/Antidegradants	2.5	n.a.	Yes/No
Stearic acid	1	n.a.	Yes
Oils	7	n.a.	No

* Reacting during vulcanization (RDV).

Analizzando i dati forniti dallo studio in oggetto si evince che rispetto al normale calcestruzzo, il cemento gommato è meno fragile e mostra un coefficiente di smorzamento più elevato. L'indice di fragilità del calcestruzzo diminuisce con l'aumentare del contenuto di gomma e può tendere a zero per un composito di calcestruzzo contenente il 40% di aggregato di gomma. La durezza e la duttilità del calcestruzzo gommato caratterizzato da un basso volume di gomma (1-3%) può essere ulteriormente migliorato aggiungendo fibre di acciaio. Per quanto concerne la permeabilità all'acqua è possibile evidenziare che risulta più alta di 2.5 volte nel calcestruzzo gommato con 10% di frammenti di pneumatici e di 2 volte se si utilizzano



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

10% di polverino. La maggiore porosità e permeabilità del calcestruzzo gommato sono da attribuire principalmente alle caratteristiche idrofobiche della gomma. Evidenziate le proprietà sopra descritte si sottolinea la possibilità di riutilizzo della gomma da pneumatici fuori uso come additivo al calcestruzzo in applicazioni quali barriere del traffico, pannelli, pavimentazioni, isolanti termici e acustici ed elementi in grado di resistere a vibrazioni, impatti e carichi ciclici.

4.19 Valutazione sperimentale di muri di sostegno rinforzati con frammenti di gomma riciclata [19] Experimental evaluation of mechanically stabilized earth walls with recycled crumb rubbers

Nel presente studio è stata valutata la stabilità dei muri di sostegno rinforzati con frammenti di gomma da pneumatici fuori uso. La combinazione di pneumatici riciclati con terreno (principalmente sabbia) porta ad una considerevole diminuzione della compressibilità ed infiammabilità del riempimento. Tra i vantaggi degli pneumatici riciclati sono il loro peso ridotto, soddisfacente isolamento termico (otto volte meglio del terreno), alta permeabilità e assorbimento degli urti. È stata studiata la capacità portante e gli spostamenti orizzontali dei muri verificatosi a seguito di una spinta. Sono state valutate diverse concentrazioni di frammenti di gomma (5% in peso, 10% in peso, 15% in peso e 20% in peso). La sostituzione con il 15% porta ad ottenere la massima capacità portante del muro; mentre con il 20% si ottiene il minor valore di spostamento orizzontale.

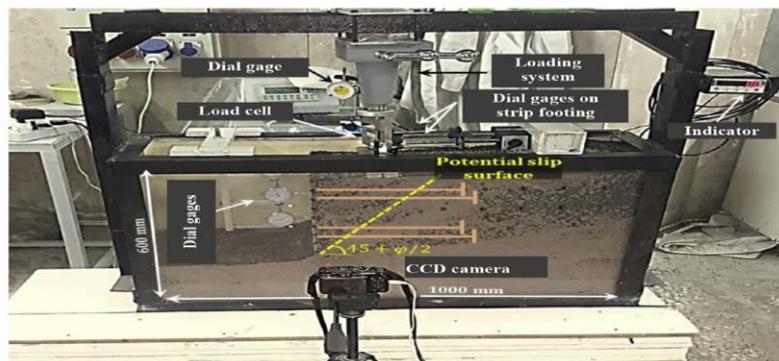


Fig. 1. Test box with instrumentation (φ is the internal friction angle).



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.20 Processo di co-pirolisi del gambo della pianta del cotone con i rifiuti da pneumatici con attenzione sulla quantità e qualità del liquido prodotto [20] Co-Pyrolysis of cotton stalk and waste tire with a focus on liquid yield quantity and quality

Questo studio focalizza l'attenzione sulla resa quantitativa e qualitativa del liquido prodotto dal processo di co-pirolisi del gambo della pianta del cotone (CS-Cotton Stalk) e del rifiuto ottenuto da pneumatici fuori uso (WT-Waste Tire). La fase di sperimentazione è stata effettuata utilizzando un reattore a letto fisso avente un riscaldamento progressivo di 20°C/min fino ad una temperatura di circa 550°C. Il prodotto con maggior resa (48% in peso) è ottenuto con una percentuale di miscelazione CS/WT di 2/3. A causa della sua struttura legnosa, il CS deve essere rimosso dal campo coltivato una volta che il cotone è stato raccolto, in modo che il campo possa essere preparato per il successivo ciclo colturale. Bruciare il CS avanzato nei campi è una pratica comune a livello globale che porta a diversi problemi tra cui l'emissione di PM₁₀, CO₂, CO e NO₂, e ad un impatto negativo sulla salute umana e sull'ambiente. Per questo motivo si è evidenziata la necessità di uno smaltimento sicuro del CS, che, unito alla criticità globale rappresentata dai rifiuti provenienti dagli pneumatici fuori uso, viene trattato con il processo di pirolisi. La pirolisi viene generalmente scelta come processo raccomandato per conversione della biomassa e dei rifiuti non biodegradabili in energia. In questo processo, la materia prima viene convertita in biocarburante da trattamento termico in assenza di ossigeno, produzione di bio-olio, bio-char e gas.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

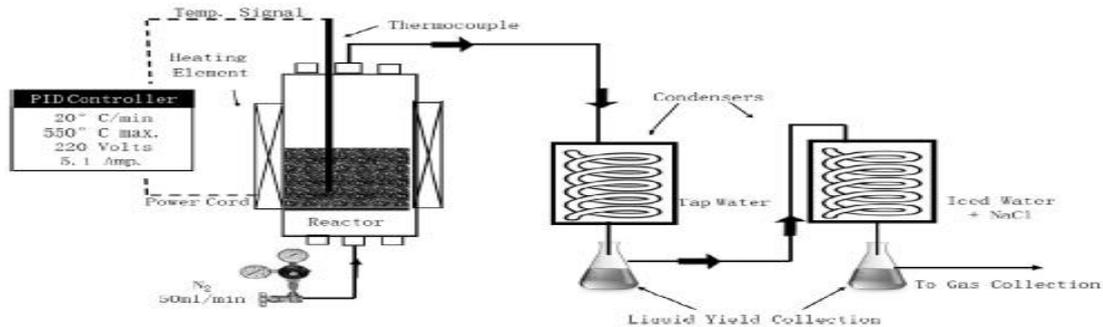


Fig. 1. Schematic diagram of pyrolysis and co-pyrolysis process.

L'aggiunta di WT al processo di pirolisi del CS ha contribuito a migliorare il rendimento del liquido ottenuto dal 38% per CS/WT (1/0) al 48% per CS/WT (2/3) e fase organica (12 e 38% rispettivamente) in esso. Oltre alla quantità anche le proprietà qualitative dell'olio di co-pirolisi sono migliorate. Il contenuto di carbonio riferito al rapporto CS/WT (2/3) è aumentato all'84% mentre l'ossigeno è sceso al 4%. Il potere calorifico dell'olio di co-pirolisi risulta aumentato fino a 41 MJ/kg.

4.21 Comportamento delle gomme sottoposte al fuoco [21] Behaviour of tyres in fire

L'obiettivo di questa ricerca è studiare le caratteristiche di combustione di vari pneumatici usati. E' stato testato il rifiuto ottenuto da pneumatici usati di sette produttori diversi. Per comprendere le proprietà termiche e poter valutare il comportamento del materiale sono stati presi in considerazione tre diversi metodi di valutazione:

- ✓ determinazione del contenuto di ceneri;
- ✓ test di propagazione della fiamma;
- ✓ analisi termica.

Il test del contenuto di ceneri è stato utilizzato per analizzare quantitativamente le percentuali di pneumatico che si presentano sotto forma di fumo o gas. Il test di propagazione della fiamma fornisce informazioni sulla durata della combustione e sul grado di generazione dei fumi; mentre i risultati dell'analisi termica mostrano il grado e la velocità dei cambiamenti di massa dei diversi tipi di pneumatici, il cambiamento



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

dell'entalpia e la temperatura delle varie reazioni durante il riscaldamento. Durante le misurazioni, il materiale di riferimento era allumina (Al_2O_3) e la massa dei campioni era di circa 250-500 mg. I campioni sono stati riscaldati a una velocità di $10^\circ C/min.$ fino a $1000^\circ C$. Prima di essere sottoposti alle indagini in oggetto, i campioni sono stati tritati e messi in crogioli di allumina. I test effettuati hanno mostrato che dalla combustione di uno pneumatico si producono circa 2 litri di residui di olio, che la durata e la temperatura del processo sono indipendenti dalla tipologia di pneumatico e che appare sufficiente raggiungere temperature di $900^\circ C$ per evidenziare una perdita di massa di circa il 100% senza produrre ceneri.

4.22 Conversione dei rifiuti ottenuti da pneumatici usati in adsorbenti in grado di rimuovere il blu di metilene, il metilarancio e le tetracicline dall'acqua [22] Conversion of waste tire rubber into a high capacity adsorbent for the removal of methylene blue, methyl orange and tetracycline from water

La gomma degli pneumatici usati viene riutilizzata come materiale adsorbente ossia materiale in grado di rimuovere dall'acqua il blu di metilene MB (composto organico della classe degli eterociclici aromatici), il metilarancio MO (composto chimico aromatico di sintesi dalle proprietà coloranti) e le tetracicline TC (vasto gruppo di farmaci antibatterici inibitori della sintesi proteica).

Nel presente studio l'adsorbente si ottiene sintetizzando gli pneumatici di scarto (WTR- Waste Tire Rubber) con un concentrato di acido solforico.



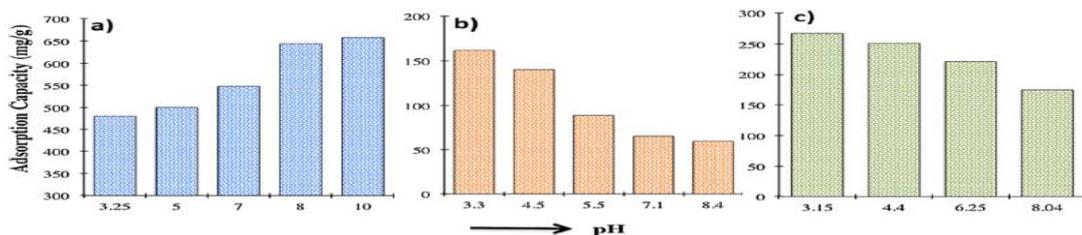


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448

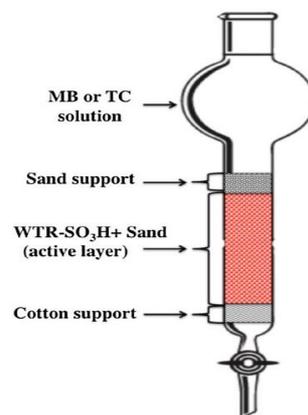


SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Il pH della soluzione da trattare svolge un ruolo determinante nel processo depurativo (efficienza di adsorbimento): nei grafici sotto riportati viene evidenziata la dipendenza dell'adsorbimento con il pH riferito al blu di metilene MB caso a), al metilarancio MO caso b) e alle tetracicline TC (caso c).



I test sono stati effettuati in colonna così come schematizzato nella figura seguente per valutare la qualità dell'acqua da rubinetto. La colonna in oggetto viene poi rigenerata dal passaggio controcorrente di una soluzione acquosa e solventi organici con disciolto NaOH aumentando di volta in volta il proprio potere adsorbente.



Lo sviluppo di adsorbenti multifunzionali per la rimozione di inquinanti organici nell'acqua utilizzando materiali riciclati può portare a nuove tecnologie con un impatto economico e ambientale sostenibile. Questo studio segnala un nuovo adsorbente ad alta capacità rigenerante derivato dalla gomma di pneumatici usati per automobili trasformati da trattamento con acido solforico.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.23 Co-pirolisi catalitica di semi d'uva e pneumatici fuori uso per la produzione di biocarburanti [23] Catalytic co-pyrolysis of grape seeds and waste tyres for the production of drop-in biofuel

La co-pirolisi catalitica di semi d'uva e pneumatici usati è stata eseguita in un reattore a letto fisso utilizzando calcite come catalizzatore. La fase organica ottenuta è stata analizzata e valutata per le caratteristiche come potenziale carburante. Notevoli effetti positivi sono stati raggiunti dopo aver sottoposto al processo di pirolisi gli pneumatici di scarto e calcite a semi d'uva. Più in particolare, l'aggiunta di notevoli quantità di pneumatici di scarto (tra il 20 e il 40% in peso) con un rapporto costante tra materia prima e calcite pari a 1 è stato verificato come condizione sperimentali ottimale per promuovere effetti sinergici positivi sulle rese del biocombustibile (contenuto minimo di ossigeno). La pirolisi della biomassa può essere definita come il degrado termico della stessa in assenza di ossigeno a temperature moderate (450-600°C). Il potenziale di questa tecnologia è consentire l'ottenimento di una frazione liquida (resa bio-olio) del 60-70% in peso raggiungibile a seconda delle condizioni e del tipo di reattore utilizzato. Nello specifico la biomassa testata proveniva dalla zona nord-est della Spagna, mentre i WT considerati avevano una granulometria tra 2-4mm (contenuto umidità 0.9% in peso). Questa tecnologia permette, inoltre, di ridurre drasticamente il contenuto di zolfo rispetto alla semplice pirolisi dei WT (Waste Tires).

4.24 Sviluppo e proprietà del compensato rinforzato con fibra di carbonio e polvere di gomma da pneumatici riciclati [24] Development and material properties of reinforced plywood using carbon fiber and waste rubber powder

Questo articolo riporta l'uso della fibra di carbonio (CF-Carbon Fiber) e della polvere di gomma ottenuta da pneumatici fuori uso (WR-Waste Rubber) come agenti di rinforzo per il compensato. Lo scopo di questo studio era determinare gli effetti valutati attraverso di tre parametri: contenuto di CF, contenuto WR e lunghezza CF, sulle proprietà meccaniche e fisiche del compensato. Sono state valutate alcune proprietà



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

meccaniche: Modulo di Rottura (MOR), Modulo di Elasticità (MOE) e Forza d'Impatto (IS) e alcune proprietà fisiche: assorbimento d'acqua (WA) e rigonfiamento dello spessore (TS). Il compensato è un materiale da costruzione fatto di tanti sottili strati di legno legati con adesivo. È uno dei più importanti compositi a base di legno prodotti da diverse specie di alberi. Il compensato è usato per pavimenti, pareti e tetti nelle costruzioni di case, pannelli controvento, carrozzeria interna del veicolo, pacchetti e scatole, recinzioni o altro. Il materiale compensato ha diversi vantaggi rispetto ad altri compositi a base di legno, tra cui facilità di lavorabilità, buona resistenza agli urti e aspetto naturale. Tuttavia, presenta anche alcuni svantaggi, come limitata durata biologica, dimensioni ridotte, bassa resistenza al fuoco e scarse prestazioni meccaniche. Gli studi sono stati effettuati utilizzando delle fibre di carbonio usate (aventi lunghezze comprese tra 12 e 18 cm) e un polverino di gomma proveniente dalla macinazione di pneumatici usati. Sono stati utilizzati due tipi di resine: Urea Formaldeide (UF) e Metilene Difenil Isocianato (MDI). Il catalizzatore per la resina UF utilizzato è rappresentato da 20% cloruro di ammonio (NH_4Cl) con soluzione acquosa ed è stato premiscelato con la resina UF prima dell'applicazione. La resina MDI è stata usata come legante per migliorare l'adesione dell'interfaccia tra la polvere WR e strati di compensato.

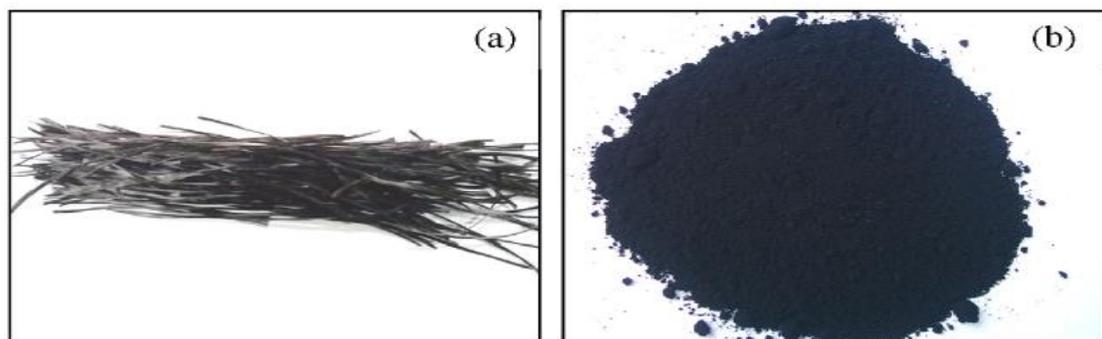


FIG. 1. Used CFs (a) and WRs (b).



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 - 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



FIG. 2. Layers arrangement of the reinforced plywood panels.

Gli esperimenti effettuati hanno portato a concludere che l'aggiunta delle fibre di carbonio (CF) ha migliorato le caratteristiche meccaniche dei provini di compensato. I risultati migliori sono stati ottenuti utilizzando CF aventi lunghezze di 18 cm e una percentuale dell'1% di peso. I valori dei Moduli a Rottura (MOR) non hanno mostrato miglioramenti nei campioni addizionati con WR (Waste Rubber), mentre i valori di Moduli di Elasticità (MOE) e Forza d'Impatto (IS) tendevano ad aumentare con l'aumento del contenuto di WR.

4.25 Indagine sulla resa e sulla qualità di bio-olio ottenuto con l'aggiunta di scarti da pneumatici usati nel processo di pirolisi della canna da zucchero [25] Investigation on bio-oil yield and quality with scrap tire addition in sugarcane bagasse pyrolysis

L'articolo si sviluppa esaminando la parte liquida ottenuta dal processo di pirolisi della bagassa (residuo di estrazione proveniente dalla lavorazione per frantumazione e spremitura della canna da zucchero costituito dalla parte fibrosa e dalla scorza della canna) addizionata con scarti provenienti da pneumatici fuori uso. Il reattore a letto fisso è stato alimentato con i due materiali con rapporti di miscelazione diversi.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

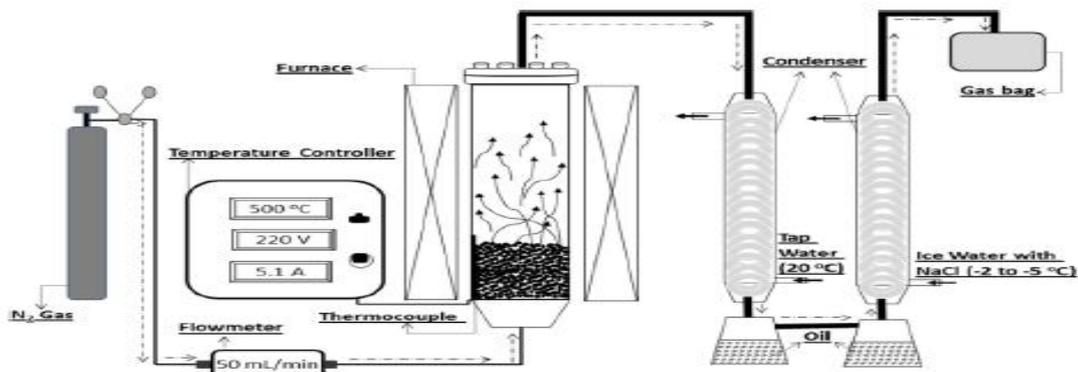


Fig. 1. Schematic diagram of pyrolysis system.

Gli esperimenti sono stati condotti a 500°C con velocità di riscaldamento di 20°C/min utilizzando azoto (50 ml/min) come gas di trasporto. Con un rapporto stechiometrico bagassa di canna da zucchero/scarto da pneumatici di 1/3 si ottiene una resa liquida del 49.7% in peso rispetto al 42.1% in peso calcolato con la sola bagassa. La biomassa (SCB-Sugarcane Bagasse) utilizzata è stata prelevata da zuccherifici locali pakistani avente inizialmente un'umidità in peso del 47% successivamente portata al 10% dopo il processo di essiccazione al sole. Ha subito poi trattamento di macinazione e setacciatura fino ad ottenere particelle uniformi aventi dimensioni comprese tra 0.6 e 1.8mm. L'olio di co-pirolisi prodotto partendo dalla miscelazione dei due materiali ha un potere calorifico di 41MJ/Kg e una viscosità inferiore rispetto all'olio prodotto dal processo con la sola bagassa.

4.26 Utilizzo sostenibile di geomateriali derivati da pneumatici usati per applicazioni geotecniche [26] Sustainable utilization of scrap tire derived geomaterials for geotechnical applications

L'utilizzo di geomateriali derivati da scarti di pneumatici (STD-Scrap Tire Derived) in applicazioni di ingegneria geotecnica è aumentato al fine di prevenire la creazione di rifiuti e conservare le risorse naturali verso il raggiungimento della sostenibilità



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

ambientale. Al fine di migliorare le caratteristiche del geomateriale STD è stata testata la miscelazione con terreno, in particolare con la sabbia.



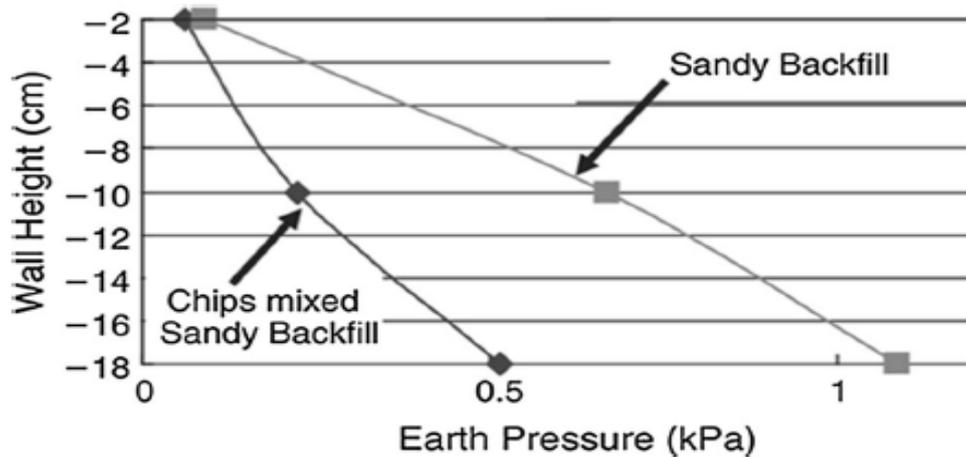
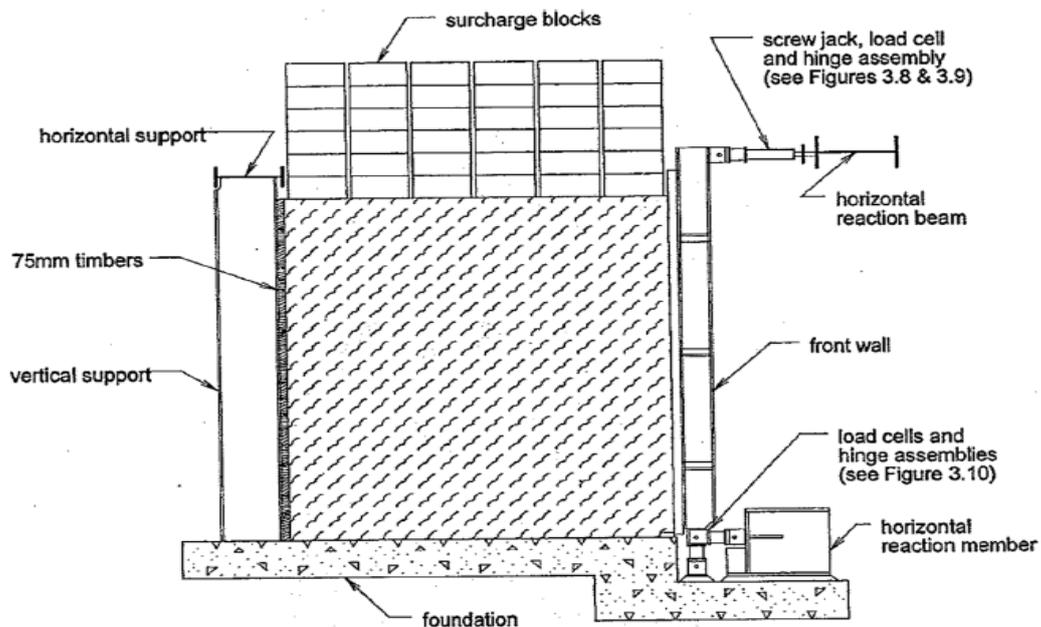
I geomateriali (STD-Scrap Tire Derived) sono materiali leggeri ed aventi alta resistenza al taglio; pertanto producendo una limitata spinta orizzontale risultano idonei al posizionamento dietro i muri di sostegno, inoltre, essendo materiali drenanti non consentono il ristagno di acqua con conseguente aumento delle pressioni. È stato valutato che le pressioni orizzontali degli strati con frammenti di pneumatici erano circa il 45% in meno in condizioni di riposo e il 35% in meno in condizioni attive rispetto a quelli con terreno granulare.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 - 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



Dagli esperimenti svolti si evince che la capacità portante della miscela (STD e sabbia) aumenta con l'aumentare della percentuale di frammenti di pneumatici di scarto (percentuale ottimale si aggira sul 40% in peso).



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.27 Effetti delle particelle di gomma sul comportamento ciclico delle miscele composte da scorie d'altoforno e carbone [27] Effect of rubber crumbs on the cyclic behavior of steel furnace slag and coal wash mixtures

Molti progetti geotecnici tendono ad utilizzare una miscela composta da scorie d'altoforno (SFS-Steel Furnace Slag) e carbone (CW-Coal Wash) addizionata da particelle di gomma provenienti da pneumatici usati (CR-Crumb Rubber). Tale operazione permette non solo di risolvere il problema dello smaltimento dei rifiuti, ma anche di migliorare le caratteristiche dello strato di subballast contribuendo a ridurre le vibrazioni e di conseguenza a preservare il degrado dei binari ferroviari. Tuttavia, il potenziale rigonfiamento delle scorie d'altoforno (SFS) e la possibile rottura delle particelle delle ceneri (CW) impediscono il riutilizzo semplice dei suddetti materiali di scarto. Pertanto, questo studio ha testato l'utilizzo di una miscela dei tre "rifiuti": in particolare il CR è stato scelto per essere caratterizzato da: un basso peso unitario, un'alta conducibilità idraulica, un'elevata deformabilità elastica, una bassa resistenza al taglio ed un'alta capacità di assorbimento di energia. Analizzando i risultati ottenuti risulta possibile concludere che includendo CR nella miscela composta da scorie d'altoforno e carbone in una percentuale del 10% si ottengono valori di assorbimento d'energia elevati ed un adeguato rapporto di smorzamento.

4.28 Proprietà meccaniche e termiche della malta leggera geopolimerica contenenti frammenti di gomma da pneumatici [28] Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymers mortar incorporating crumb rubber

Questo articolo valuta il recupero degli scarti di pneumatici (CR-Crumb Rubber), ottenuti da un processo di macinazione meccanica (dimensioni 0-4mm), come sostituti degli aggregati fini nelle malte leggere geopolimeriche nella percentuale del 100%. La gomma è stata utilizzata come "completa" sostituzione della sabbia fluviale (RS-River Sand) per ridurre la densità e la conduttività termica della malta. Parallelamente è stato preparato anche un composto contenente l'aggregato originale in modo tale da poterne valutare le differenze nei risultati: lavorabilità, resistenza alla compressione e alla



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 - 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

flessione, densità, porosità, assorbimento d'acqua e conducibilità termica. Dai test effettuati in laboratorio si evince che la malta del cemento portland contenente frammenti di gomma in percentuali del 30% e 70% presenta una lavorabilità inferiore rispetto a quella non addizionata con materiali di recupero.

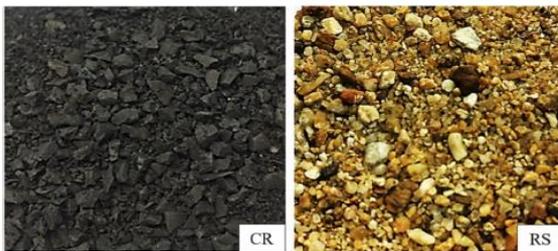
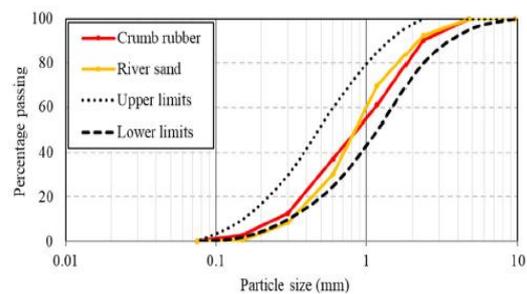


Fig. 1. Crumb rubber (CR) and river sand (RS).



La malta geo-polimerica ottenuta contenente il 100% di frammenti di gomma può essere utilizzata per la fabbricazione di mattoni/blocchi maggiormente rispettosi dell'ambiente, più leggeri ed aventi un migliore isolamento termico rispetto ai mattoni/blocchi tradizionali che non richiedono un'elevata resistenza alla compressione (densità prodotto finale: 1000-1400 kg/m³). Tuttavia, i risultati mostrano anche un incremento (1.5-5.7 volte) relativo alla porosità ed all'assorbimento dell'acqua rispetto al composto contenente solo sabbia fluviale come aggregato fine.



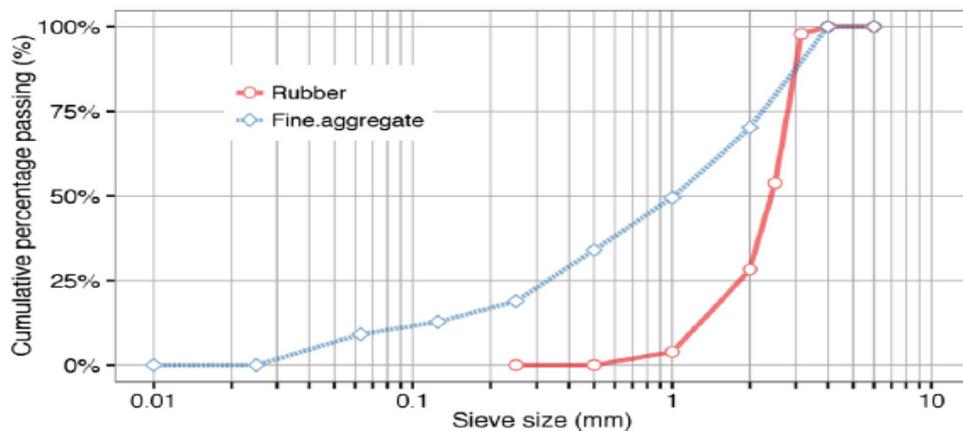
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.29 Comportamento termico mi mattori e blocchi cavi fatti con calcestruzzo addizionato di gomma di scarto da pneumatici [29] Thermal behaviour of hollow blocks and bricks made of concrete doped with waste tyre rubber

Questo studio esamina il comportamento termico di alcuni elementi di calcestruzzo leggero come mattoni, lastre o travetti realizzati con differenti percentuali di particelle di gomma di scarto (0%-10%- 20%) da pneumatici fuori uso. La gomma proveniente dagli pneumatici ha subito un processo di macinazione e separazione granulometrica in diversi setacci per eliminare alluminio e fibre tessili fino ad ottenere un prodotto finale pulito avente densità di 1150 kg/m³.



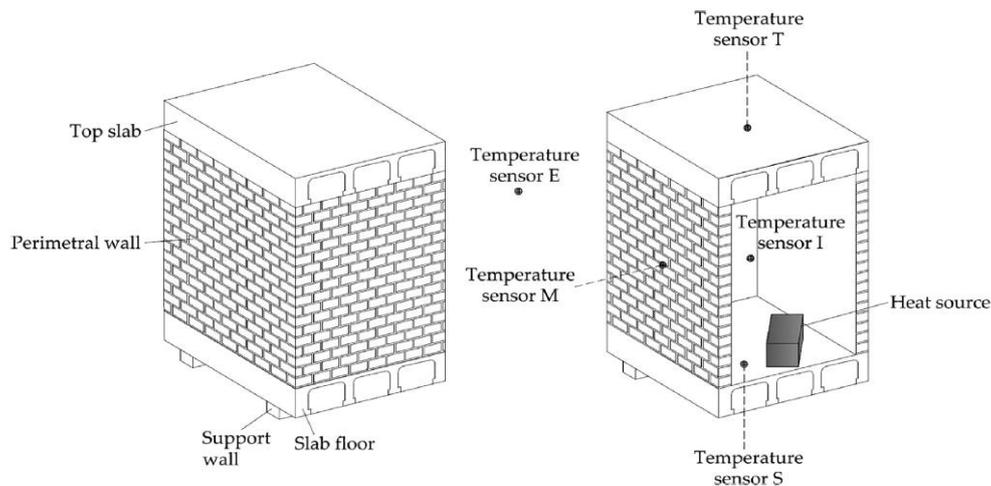
Sono state poi costruite tre celle diverse e sottoposte a cicli di riscaldamento e raffreddamento misurando le temperature registrate all'interno delle stesse e sulle pareti.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



In tutte e tre le celle la malta utilizzata come legante non è stata addizionata con residui di gomma.

Successivamente sono stati posizionati dei sensori per poter valutare le differenze termiche riscontrate nelle tre tipologie costruttive. E' stato verificato che la cella costruita con calcestruzzo leggero con il 20% di scarti di pneumatici fuori uso ottimizza la capacità di isolamento termico, infatti la temperatura interna è stata mantenuta costante nonostante le fluttuazioni della temperatura esterna.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

4.30 Comportamento meccanico e capacità portante di un pavimento permeabile ad alta porosità ottenuto utilizzando aggregati di gomma da pneumatici [30] Mechanical behaviour and load bearing mechanism of high porosity permeable pavements utilizing recycled tire aggregates

Viene studiata l'inclusione di aggregati di gomma da pneumatici usati nelle pavimentazioni permeabili ad alta porosità (PPS-Permeable Paving Systems). L'utilizzo di pavimentazioni permeabili potrebbe risultare una soluzione innovativa al problema del deflusso delle acque superficiali in caso di precipitazioni meteoriche abbondanti e concentrate in brevi periodi. Inoltre, la presenza di frammenti di gomma permette alla pavimentazione di avere un comportamento meno rigido specialmente in aree caratterizzate da una forte concentrazione di radici che potrebbero causare fratture degli strati superficiali sebbene il valore della capacità portante risulti limitato.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

5 CONCLUSIONI

Gli pneumatici fuori uso (PFU) sono una tipologia di rifiuto cosiddetta 'permanente': se lasciata in natura e in mare, necessita di centinaia di anni per degradarsi completamente; se gestita in modo corretto, invece, è riciclabile al 100%.

L'attività di ricerca svolta ha dimostrato che l'interesse rivolto alla valorizzazione di prodotti innovativi a basso impatto ambientale realizzati con gli pneumatici fuori uso (PFU) opportunamente trattati risulta crescente in tutto il mondo. Infatti, il recupero in nuove applicazioni di tali risorse mirate ad una finalità ecocompatibile consente di risolvere due problematiche: smaltimento dei rifiuti tal quali (quantitativi sempre crescenti) e risparmio nell'utilizzo delle materie prime attraverso la sostituzione delle stesse con frazioni di PFU. La finalità delle attività di ricerca deve essere mirata allo screening di soluzioni sostenibili sia dal punto di vista ambientale che economico tese a massimizzare il recupero degli pneumatici a fine vita.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**

Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA

Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

BIBLIOGRAFIA

- [1] Farad Aslani, Jack Kelin - *Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber - Journal of Cleaner Production 200 (2018) 1009-1025*
- [2] Carlos Hidalgo Signes, Pablo Martínez Fernández, Julio Garzón-Roca, María Elvira Garrido de la Torre, Ricardo Insa Franco - *An Evaluation of the Resilient Modulus and Permanent Deformation of Unbound Mixture of Granular Materials and Rubber Particles from Scrap Tyres to Be Used in Subballast Layers - XII Conference on Transport Engineering CIT 2016 Valencia (Spain)*
- [3] Miguel Sol-Sánchez, Fernando Moreno-Navarro and Carmen Rubio-Gámez - *The use of deconstructed tires as elastic elements in railways tracks - Materials 2014, 7, 5903-5919; doi: 10.3390/ma7085903*
- [4] Monzur Alam Imteaz, Arul Arulrajah, Suksun Horpibulsuk, Amimul Ahsan - *Environmental Suitability and Carbon Footprint Savings of Recycled Tyre Crumbs for Road Applications - International Journal of Environmental Research (2018) 12:693-702*
- [5] Ute Kalbe, Oliver Kruger, Volker Wachtendorf - *Development of Leaching Procedures for Synthetic Turf Systems Containing Scrap Tyre Granules - Waste Biomass Valor (2013) 4:745-757*
- [6] M. Sanchez Lozano, D. Abellan Lopez - *New motorcyclists protection system made of recycled rubber - Publicaciones DYNA SL Ingeniería e Industria Bibao (Spain)*
- [7] Marco Marconi, Daniele Landi, Ivan Meo, Michele Germani - *Reuse of Tires Textile Fibers in Plastic Compounds: is this scenario environmentally sustainable? - Procedia CIRP 69 (2018) 944-949 available online at www.sciencedirect.com*
- [8] Tawfik A. Saleh, Vinod Kumar Gupta - *Processing methods, characteristics and adsorption behavior of tire - Advances in Colloid and Interface Science 211 (2014) 93-101 contents lists available at ScienceDirect*
- [9] Shan Huang, Harris Angelakopoulos, Kypros Pilakoutas, Ian Burgess - *Reused tyre polymer fibre for fire-spalling mitigation - Applications of Structural Fire Engineering (2015) Dubrovnik (Croatia)*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

- [10] Ruikun Dong, Mengzhen Zhao – *Research on the pyrolysis process of crumb tire rubber in waste cooking oil - Renewable Energy 125 (2018) 557-567 contents lists available at ScienceDirect*
- [11] Lucia Asaro, Michel Gratton, Said Seghar, Nouredine Ait Hocine - *Recycling of rubber wastes by vulcanization - Resources, Conservation & Recycling 133 (2018) 250-262 contents lists available at ScienceDirect*
- [12] Mohammed Abdullateef Al-Neami - *Stabilization of sandy soil using recycle waste tire chips - Building and Construction Engineering, University of Technology, Iraq - International Journal of Geomate (2018) vol.15 pp 175-180 available online*
- [13] Mohamad Syamir Senin, Shahiron Shahidan, Alif Syazani Leman – *The durability of concrete containing recycled tyres as a partial replacement of fine aggregate - IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 271 (2017) 012075*
- [14] Dina Czajczynska, Renata Krzyzynska, Hussam Jouhara, Nik Spencer – *Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel - Energy 134 (2017) 1121-1131 Contents lists available at ScienceDirect*
- [15] Xue Zhang, Hengxiang Li, Qing Cao, Li e Jin and Fumeng Wang – *Upgrading pyrolytic residue from waste tires to commercial carbon black – Waste Management Research 2018 vol. 36(5) 436-444*
- [16] C. Hidalgo-Signes, J. Garzon-Roca, J.M. Grima-Palop, R. Insa-Franco – *Use of rubber shreds to enhance attenuation of railway sub-ballast layers made of unbound aggregates – Materiales de Construcción vol.67 April-June 2017, e115*
- [17] F. Belabdelouahab, H. Trouzine – *Research and enhancement of used tyres, such as material innovative in Algeria – Physics Procedia 55 (2014) 68-74 ScienceDirect available online at www.sciencedirect.com*
- [18] Nelson Flores Medina, Reyes Garcia, Imam Hajirasouliha, Kypros Pilakoutas, Maurizio Guadagnini, Samar Raffoul – *Composites with recycled rubber aggregates: properties and opportunities in construction – Construction and Building Materials 188 (2018) 884-897 Contents lists available at ScienceDirect*
- [19] Matin Jalali Moghadam, Amirali Zad, Nima Mehrannia, Nader Dastaran – *Experimental evaluation of mechanically stabilized earth walls with recycled crumb rubbers – Journal of*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 10 (2018) 947-957 Contents lists available at ScienceDirect

- [20] Syed Asfad Yar Shah, Muhammed Zeeshan, Muhammad Zohaib Farooq, Naveed Ahmed, Naseem Iqbal – Co-Pyrolysis of cotton stalk and waste tire with a focus on liquid yield quantity and quality – *Renewable Energy* 130 (2019) 238-244 Contents lists available at ScienceDirect
- [21] Zsuzsanna Kerekes, Eva Lubloy, Katalin Kopecsko – Behaviour of tyres in fire – *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2018) 133: 279-287
- [22] Md. Tariqul Islam, Ricardo Saenz-Arana, Cesar Hernandez, Thomas Guinto etc – Conversion of waste tire rubber into a high capacity adsorbent for the removal of methylene blue, methyl orange and tetracycline from water – *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6 (2018) 3070-3082 Contents lists available at ScienceDirect
- [23] O. Sanahuja Parejo, A. Veses, M.V. Navarro, J.M. Lopez, R. Murillo, M.S. Callen, T. Garcia – Catalytic co-pyrolysis of grape seeds and waste tyres for the production of drop-in biofuel – *Energy Conversion and Management* 171 (2018) 1202-1212 Contents lists available at ScienceDirect
- [24] Alireza Ashori, Mohammad Ghofrani, Mohammad Hadi Rezvani, Nadir Ayrilmis – Development and material properties of reinforced plywood using carbon fiber and waste rubber powder -*Polymer Composites* (2018) 675-680 doi 10.1002/pc
- [25] Naveed Ahmed, Muhammad Zeeshan, Naseem Iqbal, Muhammad Zohaib Farooq, Syed Asfad Shah – Investigation on bio-oil yield and quality with scrap tire addition in sugarcane bagasse pyrolysis – *Journal of Cleaner Production* (2018) 927-934
- [26] S. Bali Reddy, A. Murali Krishna, Krishna R. Reddy – Sustainable utilization of scrap tire derived geomaterials for geotechnical Applications – *Indian Geotech J (June 2018) 48 (2): 251-256*
- [27] Yujie Qi, Buddhima Indraratna, Ana Heitor, Jayan S. Vinod – Effect of rubber crumbs on the cyclic behavior of steel furnace slag and coal wash mixtures – *ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2018, 144(2): 04017107
- [28] Ampol Wongsa, Vanchai Sata, Behzad Nematollahi, Jay Sanjayan, Prinya Chindaprasirt – Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber – *Journal of Cleaner Production* 195 (2018) 1069-1080



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E
INDUSTRIALE**
Via Branze, 38 - 25123 BRESCIA
Codice Fiscale 98007650173 - Partita IVA 01773710171
Tel. 030/3715.523 – Fax. 030/3702448



SPIN-OFF PARTECIPATO DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BRESCIA
Via Aldo Moro, 34 – 25124 BRESCIA
Codice Fiscale e Partita IVA 03403820982
Tel. 030/6595057 – Fax 030/6595250

- [29] *Esteban Fraile-Garcia, Javier Ferreiro-Cabello, Manuel Mendivil-Giro, Alejandro San Vicente-Navarro – Thermal behaviour of hollow blocks and bricks made of concrete doped with waste tyre rubber – Construction and Building Materials 176 (2018) 193-200*
- [30] *Alireza Mohammadinia, Mahdi M. Disfani, Guillermo A. Narsilio, Lu Aye – Mechanical Behaviour and load bearing mechanism of high porosity permeable pavements utilizing recycled tire aggregates – Construction and Building Materials 168 (2018) 794-804*