

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi dei materiali plastici da autoveicoli a fine vita  
e gestione del car fluff**



**Relatore**

Prof.ssa Mariachiara Zanetti

**Correlatori**

Prof.ssa Barbara Ruffino

Prof. Marco Ravina

**Candidato**

Francesco Di Ceglie

Sessione di Marzo 2021



# Abstract

La presente tesi ha come obiettivo la ricerca di un'alternativa applicabile al problema dello smaltimento in discarica dei veicoli a fine vita. Negli ultimi decenni, in tale settore sono cambiate le logiche di produzione ed è cresciuta sempre più l'attenzione verso un approccio circolare basato su recupero e riciclaggio. Il materiale che rende particolarmente difficoltoso il raggiungimento di questo obiettivo è la plastica. Infatti, se da una parte i materiali plastici consentono target di emissioni inferiori rispetto al passato grazie alla riduzione del peso complessivo del veicolo, dall'altra costituiscono la principale frazione dei rifiuti automobilistici da smaltire in discarica. Dopo aver eseguito un'analisi numerica in merito alle statistiche sui veicoli a fine vita, si è valutata l'evoluzione della normativa negli ultimi decenni analizzando i motivi che portano a preferire lo smaltimento al recupero e al riutilizzo. Successivamente, si è valutata la composizione degli autoveicoli entrando nel dettaglio sui componenti plastici presenti e sulle proprietà delle diverse categorie di polimeri. Nella parte centrale di questo lavoro di tesi, grazie alla collaborazione con il Centro Recupero e Servizi di Settimo Torinese, si sono analizzate due alternative di recupero potenzialmente utili al raggiungimento dei target normativi. Nel primo caso si è indagata la possibilità di applicare processi di recupero ai componenti smontati dal veicolo a fine vita prima dell'ingresso in impianto di frantumazione. A tale scopo si è valutata la fattibilità relativa allo smontaggio delle varie parti dell'autoveicolo eseguendo due prove in campo ed individuando quelle per cui la separazione risulterebbe applicabile su vasta scala. Per quest'ultimi si è studiata come possibilità di recupero la produzione di nuovi componenti plastici riciclati con grafene. In secondo luogo, si è analizzata l'evoluzione dell'impianto di trattamento di veicoli a fine vita identificandone e descrivendone le frazioni in uscita, nello specifico il fluff leggero ed il fluff pesante. Si è eseguita la caratterizzazione di questi ultimi partendo da un'analisi merceologica che ha permesso di identificare i principali materiali costituenti i campioni. Un'ulteriore indagine sulla frazione plastica è stata effettuata tramite analisi densimetriche grazie alle quali si è osservata una diversa distribuzione di materiali leggeri e pesanti nelle due frazioni del fluff. Per completare l'analisi dei campioni si è esaminata la distribuzione dei polimeri nelle diverse componenti plastiche. A partire dai risultati ottenuti si è effettuata la valutazione relativa al recupero della frazione leggera del car fluff come combustibile solido secondario con l'obiettivo di favorire la valorizzazione energetica. In conclusione, l'applicazione dei metodi di recupero analizzati potrebbe garantire il raggiungimento dell'obiettivo del 95% di recupero e reimpiego grazie alla riduzione complessiva del fluff in uscita dall'impianto di frantumazione.

# Sommario

<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Stato dell'arte .....</b>	<b>3</b>
1.1. Veicoli a fine vita .....	4
1.2. Impianti di trattamento veicoli a fine vita .....	6
<b>2. Normativa sugli autoveicoli a fine vita .....</b>	<b>10</b>
<b>3. Componenti in plastica degli autoveicoli .....</b>	<b>15</b>
3.1 Evoluzione dei materiali nel settore automotive .....	15
3.2 Analisi della composizione dei materiali .....	18
3.3 Analisi delle categorie di polimeri .....	21
3.3.1. Polimeri termoplastici .....	21
3.3.2. Polimeri termoindurenti .....	24
3.3.3. Elastomeri .....	25
3.4 Distribuzione delle categorie di materiali polimerici .....	26
<b>4. Possibilità di recupero da veicoli a fine vita .....</b>	<b>33</b>
4.1 Valutazione di fattibilità .....	34
4.2 Prove di smontaggio presso il CRS .....	37
4.2.1. Prima prova di smontaggio .....	37
4.2.2. Seconda prova di smontaggio .....	38
4.3 Il riciclo dei polimeri .....	45
4.3.1. Grafene e compositi polimerici .....	46
4.3.2. GrapheneUP <sup>®</sup> e prove su plastica recuperata .....	48
4.4. Descrizione di un impianto di trattamento ELV .....	60
4.4.1. Vecchia configurazione di impianto .....	60
4.4.2. Nuova configurazione di impianto .....	63
4.4.3. Prova di demolizione .....	66
4.5. Analisi del car fluff di un impianto di trattamento ELV .....	67

4.5.1. Analisi merceologica.....	67
4.5.2. Analisi granulometrica del fluff leggero .....	70
4.5.3. Analisi del potere calorifico .....	73
4.5.2. Analisi densimetrica.....	74
4.6. Recupero e valorizzazione energetica del car fluff.....	78
<b>Conclusioni .....</b>	<b>81</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>84</b>

## Indice delle figure

Figura 1 - Operazioni generiche di trattamento degli ELV <a href="#">[1]</a> .....	7
Figura 2 – Stima dell’evoluzione temporale della composizione di un veicolo <a href="#">[15]</a> . ....	15
Figura 3 - Evoluzione registrata dei principali materiali in un generico veicolo <a href="#">[16]</a> .....	16
Figura 4 - Composizione dei materiali in un veicolo del segmento B.....	19
Figura 5 - Composizione dei materiali in un veicolo del segmento C.....	20
Figura 6 - Analisi del peso per ogni categoria di polimeri in un veicolo del segmento B.....	27
Figura 7 - Analisi del peso per ogni categoria di polimeri in un veicolo del segmento C.....	28
Figura 8 – Analisi della distribuzione dei polimeri termoplastici di un veicolo del segmento B. ....	30
Figura 9 - Analisi della distribuzione degli elastomeri di un veicolo del segmento B. ....	31
Figura 10 - Analisi della distribuzione dei polimeri termoindurenti di un veicolo del segmento B..	31
Figura 11 - Percentuali in peso dei singoli polimeri in un veicolo del segmento B. ....	32
Figura 12 - Vaschetta della batteria. ....	39
Figura 13 - Ruote rimosse.....	39
Figura 14 - Coppe ruote. ....	39
Figura 15 - Posizionamento sul ponte.....	40
Figura 16 – Serbatoio.....	40
Figura 17 - Paraurti anteriore.....	41
Figura 18 - Passaruota anteriore destro.....	41
Figura 19 - Rimozione del filtro dell'aria.....	42
Figura 20 - Rimozione del batticalcagno.....	42
Figura 21- Montante anteriore. ....	43
Figura 22 - Montante centrale.....	43
Figura 23 - Apertura del portellone posteriore.....	43
Figura 24- Montante posteriore.....	43
Figura 25 - Allotropi del carbonio. ....	46
Figura 26 - Spettri IR del campione 066-1.1 in più punti e HDPE di riferimento.....	51
Figura 27 - Spettri IR del campione 066-2.1 in più punti e PP di riferimento.....	52
Figura 28 - Termogramma DSC relativo al ciclo di raffreddamento.....	54
Figura 29 - Termogramma DSC relativo al secondo ciclo di riscaldamento.....	54
Figura 30 - Modulo di conservazione in funzione della temperatura. ....	56
Figura 31 - Modulo di perdita in funzione della temperatura. ....	56
Figura 32 - Prova di trazione sul campione 066-1.1.....	58
Figura 33 - Prova di trazione su campione 066-2.1 (1). ....	59

Figura 34 - Prova di trazione su campione 066-2.1 (2). .....	59
Figura 35 - Schema di processo del vecchio impianto CSR <a href="#">[34]</a> . .....	61
Figura 36 - Ipotetico trattamento del fluff leggero post frantumatore <a href="#">[33]</a> . .....	62
Figura 37 - Schema della linea di trattamento dell'impianto CRS.....	63
Figura 38 – Pre-frantumatore e fluff leggero. ....	64
Figura 39 - Separazione magnetica e trattamento del proler. ....	65
Figura 40 - Separatore densimetrico. ....	65
Figura 41 - Composizione del fluff pesante.....	68
Figura 42 - Composizione del fluff leggero.....	68
Figura 43 - Fluff leggero: curve granulometriche dei materiali a confronto. ....	70
Figura 44 - - Curva granulometrica del PUR - fluff leggero. ....	71
Figura 45 - Curva granulometrica del tessile pesante - fluff leggero.....	71
Figura 46 - Curva granulometrica della plastica - fluff leggero. ....	72
Figura 47 - Curva granulometrica dei metalli - fluff leggero. ....	72
Figura 48 - Campioni di fluff leggero e pesante dall'impianto CRS.....	75
Figura 49 - Svolgimento della prova densimetrica2020. ....	75
Figura 50 - Fase di pesatura delle frazioni separate tramite separazione densimetrica. ....	76
Figura 51 - Risultati della prova densimetrica 2020. ....	77

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - Evoluzione del parco veicoli dal 2015 al 2019 in Italia. ....	3
Tabella 2 - Evoluzione del parco veicoli dal 2015 al 2019 nell'Unione Europea. ....	3
Tabella 3 - Et� media e tipologia di carburante in Italia. ....	4
Tabella 4 - Et� media e tipologia di carburante nell'Unione Europea. ....	4
Tabella 5 - Sviluppo degli ELV dal 2014 al 2018 in Italia. ....	5
Tabella 6 - Sviluppo degli ELV dal 2014 al 2018 nell'Unione Europea. ....	5
Tabella 7 – Confronto fra diverse composizioni percentuali di car fluff. ....	8
Tabella 8 - Composizione del fluff leggero e del fluff pesante. ....	9
Tabella 9 – Decreto Ronchi: Codici CER del settore automotive. ....	10
Tabella 10 - Decreto del 05/02/1998: Attivit� di recupero del settore automotive. ....	11
Tabella 11 - Evoluzione registrata dei principali materiali in un generico veicolo. ....	16
Tabella 12 – Composizione dei materiali in un veicolo del segmento B. ....	19
Tabella 13 - Composizione dei materiali in un veicolo del segmento C. ....	20
Tabella 14 - Analisi del peso per ogni categoria di polimeri in un veicolo del segmento B. ....	27
Tabella 15 - Analisi del peso per ogni categoria di polimeri in un veicolo del segmento C. ....	28
Tabella 16 – Indicazione del livello di fattibilit� per i diversi componenti auto. ....	36
Tabella 17 – Livelli di fattibilit� derivanti dalla prima prova di smontaggio. ....	38
Tabella 18 - Livelli di fattibilit� derivanti dalla seconda prova di smontaggio. ....	44
Tabella 19 - Analisi dei compositi 066-1.1. ....	51
Tabella 20 - Analisi dei compositi 066-2.1. ....	52
Tabella 21 - Risultati DSC. ....	53
Tabella 22 - Risultati DMA. ....	55
Tabella 23 - Risultati prove meccaniche. ....	58
Tabella 24 - Distribuzione delle frazioni in uscita dall'impianto. ....	66
Tabella 25 - Composizione del fluff pesante. ....	69
Tabella 26 - Composizione del fluff leggero. ....	69
Tabella 27 - Determinazione del PCI dei campioni di PUR e tessile pesante. ....	73
Tabella 28 - Suddivisione dei polimeri per densit�. ....	74
Tabella 29 - Classificazione dei combustibili solidi secondari (CSS) (da UNI EN 15359). ....	79

# Introduzione

Con il presente studio di tesi si sono indagate delle alternative applicabili al problema dello smaltimento in discarica dei veicoli fuori uso. Negli ultimi anni, in buona parte dei settori industriali, si sta rivolgendo l'attenzione verso le problematiche riguardanti la sostenibilità della produzione, accantonando sempre più i classici approcci economici lineari e puntando a sistemi circolari che valorizzino i rifiuti. Nel settore automotive la plastica risulta essere il materiale più problematico in quest'ottica in quanto costituisce la maggiore parte dello scarto successivamente smaltito in discarica. Proprio per questa ragione in tale lavoro si sono analizzate delle potenziali soluzioni che permettano di dar valore ai componenti plastici rendendoli una risorsa sfruttabile e non un problema da gestire. All'interno del Capitolo 1 si è valutato lo stato dell'arte di tale settore produttivo, eseguendo una valutazione dei trend europei ed italiani degli ultimi anni in merito alla tipologia di veicoli e alle operazioni di recupero, riciclaggio e reimpiego. Successivamente, dopo una valutazione generica in merito ai tipici step di trattamento a cui sono assoggettati i veicoli a fine vita, si sono valutate le composizioni degli scarti in uscita per capire l'effettivo impatto dei materiali plastici.

A tale fase introduttiva è seguita, tramite il Capitolo 2, un'analisi dell'evoluzione della normativa in merito al trattamento dei veicoli a fine vita e della gestione dei rifiuti, nella quale si sono evidenziate le difficoltà che oggi portano al non raggiungimento dei target prestabiliti.

Nel Capitolo 3 si sono analizzate nel dettaglio le parti plastiche presenti nei veicoli e la loro evoluzione nel tempo, valutando le diverse categorie di polimeri e la distribuzione di questi in un generico veicolo. Tale trattazione risulta essere la base per comprendere come gestire al meglio i rifiuti plastici e raggiungere gli obiettivi del progetto Reciplast, ovvero la ricerca dell'ecosostenibilità tramite riciclo di imballi e componenti di veicoli a fine vita in plastica.

La collaborazione con il Centro Recupero e Servizi ha permesso lo sviluppo del Capitolo 4, in cui si sono andate a valutare nuove possibilità di trattamento per i veicoli a fine vita potenzialmente valide per il raggiungimento dei target normativi. Nello specifico, come prima soluzione si è valutato il recupero di componenti plastici smontati prima delle operazioni di trattamento. In tal senso si sono eseguite due valutazioni di fattibilità in merito a tale operazione e, successivamente, si è analizzata la possibilità di recupero dei componenti selezionati sotto forma di compositi ottenuti utilizzando come filler del grafene.

Le altre due soluzioni considerate hanno riguardato operazioni da applicare agli scarti in uscita dell'impianto di trattamento. La base per queste valutazioni è stata una fase di caratterizzazione in merito ai materiali uscenti dallo schema considerato, ottenuta tramite diverse analisi quali quella merceologica, granulometrica, del potere calorifico e densimetrica. A partire da queste si è

inizialmente valutata, come prima possibilità di recupero, la produzione di materia prima seconda ottenuta a partire da polimeri termoplastici separati per densità. La seconda alternativa considerata è stata la valorizzazione energetica degli scarti in uscita dall'impianto sotto forma di combustibili solidi secondari. In tal senso si sono confrontati i parametri ottenuti dalla fase di analisi con i corrispettivi riferimenti normativi per capire se il materiale ricavato potrebbe essere sfruttato in un termovalorizzatore o in un cementificio.

# 1. Stato dell'arte

Analizzando il settore automotive in Italia e nel resto d'Europa rispetto all'ultimo decennio si può notare una crescita per quel che concerne il numero complessivo di autoveicoli. Complessivamente dal 2018 al 2019 si è riscontrato un incremento di veicoli pari all'1,7% nell'Unione Europea principalmente legato ad una crescita di mezzi non commerciali. In tale categoria, come osservabile dalle tabelle successive, si ha una maggioranza di veicoli a benzina. Viceversa, analizzando i veicoli commerciali, sia leggeri "LCV – light commercial vehicles" che medi e pesanti "MHCV – medium and heavy commercial vehicles", domina il diesel. L'età media varia in funzione della tipologia di mezzo e del paese analizzati, ciononostante si può notare come per l'Italia si è al di sotto dei dodici anni in linea con la media europea [1]. Nelle seguenti tabelle si riportano i dati inerenti alla crescita registrata negli ultimi anni, l'età media e le percentuali per ogni tipologia di carburante relative alle diverse categorie di veicoli.

*Tabella 1 - Evoluzione del parco veicoli dal 2015 al 2019 in Italia.*

<b>Italia</b>	2015	2016	2017	2018	2019	%19/18
<i>Automobili</i>	37.351.233	37.876.138	38.520.321	39.018.170	39.545.232	1,4
<i>LCV</i>	3.874.452	3.964.436	4.045.183	4.108.520	4.172.981	1,6
<i>MHCV</i>	918.258	923.655	933.311	941.994	946.393	0,5
<i>Autobus</i>	97.991	97.817	99.100	100.042	100.149	0,1
<i>CV e Autobus</i>	4.890.701	4.985.908	5.077.594	5.150.556	5.219.523	1,3
<b><i>Veicoli totali</i></b>	<b>42.241.934</b>	<b>42.862.046</b>	<b>43.597.915</b>	<b>44.168.726</b>	<b>44.764.755</b>	<b>1,3</b>

*Tabella 2 - Evoluzione del parco veicoli dal 2015 al 2019 nell'Unione Europea.*

<b>UE</b>	2015	2016	2017	2018	2019	%19/18
<i>Automobili</i>	224.338.696	229.041.465	234.122.014	238.533.039	242.727.242	1,8
<i>LCV</i>	25.510.684	26.137.417	26.982.519	27.676.122	28.110.951	1,6
<i>MHCV</i>	5.765.018	5.881.445	6.020.307	6.143.333	6.229.282	1,4
<i>Autobus</i>	641.040	651.552	664.694	680.836	692.207	1,7
<i>CV e Autobus</i>	<b>31.916.742</b>	<b>32.670.414</b>	<b>33.667.520</b>	<b>34.500.291</b>	<b>35.032.440</b>	<b>1,5</b>
<b><i>Veicoli totali</i></b>	<b>256.255.438</b>	<b>261.711.879</b>	<b>267.789.534</b>	<b>273.033.330</b>	<b>277.759.682</b>	<b>1,7</b>

Tabella 3 - Et  media e tipologia di carburante in Italia.

<b>Italia</b>	Et� media	Benzina	<b>Diesel</b>	Elettrico	Ibrido	Gas	LPG
<i>Automobili</i>	11,4	<b>46,0 %</b>	44,2 %	0,1 %	0,8 %	2,4 %	6,5 %
<i>LCV</i>	12,6	5,0 %	<b>91,2 %</b>	0,1 %	0,0 %	2,3 %	1,3 %
<i>MHCV</i>	14,3	0,8 %	<b>98,5 %</b>	0,0 %	0,0 %	0,4 %	0,2 %
<i>Autobus</i>	12,8	0,4 %	<b>93,8 %</b>	0,5 %	0,1 %	4,7 %	0,3 %

Tabella 4 - Et  media e tipologia di carburante nell'Unione Europea.

<b>UE</b>	Et� media	Benzina	Diesel	Elettrico	Ibrido	Gas	LPG
<i>Automobili</i>	11,5	<b>52,9 %</b>	42,3 %	0,2 %	1,0 %	0,5 %	2,7 %
<i>LCV</i>	11,6	7,8 %	<b>89,5 %</b>	0,3 %	0,0 %	0,5 %	1,0 %
<i>MHCV</i>	13,0	1,0 %	<b>97,8 %</b>	0,0 %	0,0 %	0,4 %	0,2 %
<i>Autobus</i>	11,7	0,8 %	<b>94,5 %</b>	0,6 %	0,7 %	2,7 %	0,2 %

## 1.1. Veicoli a fine vita

I dati appena mostrati vanno presi in esame quando si vuole procedere nella valutazione della gestione dei veicoli a fine vita. In tale condizione i mezzi vengono indicati con la sigla ELV – End of Life Vehicles e vanno considerati a tutti gli effetti come un rifiuto, ai sensi dell'articolo 1, lettera a), della Direttiva 75/442/CEE [2]. Il riferimento europeo a cui si fa testo sul tema dei veicoli fuori uso   la Direttiva 2000/53/EC. Tale normativa stabilisce le misure per prevenire e limitare i rifiuti prodotti da veicoli fuori uso e si focalizza sul punto di vista ambientale dando priorit  a soluzioni quali il riutilizzo, il riciclaggio ed il recupero piuttosto che allo smaltimento in discarica. Di seguito si riportano, da direttiva, le definizioni di tali procedure [3]:

- “Reimpiego”: le operazioni in virt  delle quali i componenti di un veicolo fuori uso sono utilizzati allo stesso scopo per cui erano stati originariamente concepiti;
- “Riciclaggio”: il ritrattamento in un processo di produzione di materiali di rifiuto per la loro funzione originaria o per altri fine, escluso il recupero energetico.
- “Recupero energetico”: l'utilizzo di rifiuti combustibili quale mezzo per produrre energia mediante incenerimento diretto con o senza altri rifiuti ma con recupero del calore;
- “Recupero”: le pertinenti operazioni di cui all'Allegato II/B della Direttiva 75/442/CEE;

- “Smaltimento”: le pertinenti operazioni di cui all’Allegato II/A della Direttiva 75/442/CEE;

Le statistiche vedono un andamento crescente del numero degli ELV negli ultimi anni del tutto in linea con lo sviluppo delineato ad inizio paragrafo. I dati più recenti indicano come, a livello europeo, si siano superati sei milioni di veicoli fuori uso e di questi sono stati soggetti a riciclaggio e reimpiego più del 85% mentre per il recupero e reimpiego si è al di sotto del 93% [4].

Si riportano nelle tabelle successive in dettaglio i dati in merito alla situazione dell’Unione Europea e dell’Italia.

*Tabella 5 - Sviluppo degli ELV dal 2014 al 2018 in Italia.*

<b>Italia</b>	2014	2015	2016	2017	2018
<i>Veicoli fuori uso [n]</i>	853.584	958.245	978.960	990.876	1.030.318
<i>Veicoli fuori uso [t]</i>	953.690	1.036.562	1.086.425	1.096.145	1.201.500
<i>Recupero e reimpiego [t]</i>	811.863	878.394	897.117	912.082	992.864
<i>Recupero e reimpiego [%]</i>	85,1	84,7	82,6	83,2	<b>82,6</b>
<i>Riciclaggio e reimpiego [t]</i>	795.518	876.904	896.097	911.912	992.864
<i>Riciclaggio e reimpiego [%]</i>	83,4	84,6	82,5	83,2	<b>82,6</b>
<i>Recupero [t]</i>	738.550	738.964	776.087	796.415	860.620
<i>Riciclaggio [t]</i>	722.205	737.474	775.067	796.245	860.620
<i>Reimpiego [t]</i>	73.313	139.430	121.030	115.667	132.244

*Tabella 6 - Sviluppo degli ELV dal 2014 al 2018 nell’Unione Europea.*

<b>UE</b>	2014	2015	2016	2017	2018
<i>Veicoli fuori uso [n]</i>	5.043.000	4.969.000	4.823.000	5.296.000	6.083.000
<i>Veicoli fuori uso [t]</i>	5.279.000	5.217.000	5.128.000	5.699.000	6.732.000
<i>Recupero e reimpiego [t]</i>	4.824.000	4.842.000	4.755.000	5.341.000	6.254.000
<i>Recupero e reimpiego [%]</i>	91,4	92,8	92,7	93,7	<b>92,9</b>
<i>Riciclaggio e reimpiego [t]</i>	4.510.000	4.536.000	4.465.000	5.009.000	5.875.000
<i>Riciclaggio e reimpiego [%]</i>	85,4	87	87,1	87,9	<b>87,3</b>

Gli obiettivi della Direttiva 2000/53/CE, recepita a livello nazionale dal D.lgs. 209/2003, prevedevano entro il 2015 il raggiungimento di traguardi quali l'85% di riciclo e reimpiego ed il 95% di recupero e reimpiego. Come osservabile dalla [Tabella 5](#), al 2018 risultano al di sotto del target entrambe le voci, è lontano in particolare il limite del 95% di recupero e reimpiego. Gli aspetti che limitano l'incremento del tonnello recuperato sono molteplici e dovuti a varie cause. Un fattore che sicuramente non permette l'innalzamento delle percentuali è il recupero dei materiali. A livello nazionale, quando si ha a che fare con la frantumazione di veicoli, sono presenti una moltitudine di micro-impianti non dotati di BAT (Best Available Techniques) e quindi non capaci di ottimizzare il trattamento dei veicoli a fine vita. Anche per i centri di raccolta e gli impianti di frantumazione qualificati le operazioni di recupero e riciclo risultano limitate a monte da fasi di progettazione e costruzioni di componenti che poco facilitano tali operazioni. Un aspetto su cui si dovrebbe migliorare è la tracciabilità delle parti di ricambio vista la diffusione di pratiche scorrette e illegali in tal senso. Un'altra delle principali cause che portano a tale realtà in Italia è l'assenza di recupero energetico come soluzione per incrementare il recupero complessivo. Tale soluzione sarebbe sfruttabile in quanto il prodotto ottenuto dagli ELV, previa corretta bonifica e decontaminazione, potrebbe possedere buone caratteristiche di potere calorifico [5]. Buona parte dei problemi elencati sono legati alla composizione del prodotto in uscita dagli impianti di frantumazione.

## **1.2. Impianti di trattamento veicoli a fine vita**

La gestione dei veicoli a fine vita è demandata agli impianti di trattamento autorizzati in cui si applica uno schema di processo generalmente costituito dalle seguenti fasi operative:

- *Messa in sicurezza e bonifica del veicolo;*
- *Asportazione delle componenti riciclabili e riutilizzabili;*
- *Frantumazione;*
- *Recupero delle componenti metalliche.*

Con la prima fase si procede nella rimozione di componenti pericolosi eventualmente contenenti sostanze pericolose. Di norma viene asportato circa il 4% in peso di un ELV vengono rimossi elementi quali carburante residuo, olio del motore e della trasmissione, antigelo, liquido dei freni e airbag. La seconda fase prevede l'allontanamento di quelle componenti sfruttabili come pezzi di ricambio fra i quali pneumatici, catalizzatori e pezzi in rame, alluminio e magnesio e grandi elementi plastici come paraurti e serbatoi. Generalmente, in Europa, grazie a tali operazioni si arriva a rimuovere circa il 10% in peso del veicolo. Finita la fase di rimozione appena descritta si procede con la frantumazione, tipicamente tramite frantumatori a martelli, al quale seguono processi di post frantumazione nei quali

si separano i residui metallici dalla parte restante. Le frazioni non metalliche seguono un percorso che le porta a smaltimento o recupero, anche energetico. I residui metallici ottenuti, invece, subiscono la quarta fase operativa nella quale si vanno ad applicare separazioni magnetiche ed elettrostatiche. Tramite tale operazione si riescono a separare metalli ferrosi e non ferrosi garantendo, per le due frazioni, gestioni differenti. A fine processo si raggiunge un tasso di circa un 75% in peso di recupero del veicolo a fine vita. La parte restante va a costituire un rifiuto speciale prendente il nome di car fluff o “Automotive Shredder Residue” ASR. Sulla base del test di cessione EN12457/2 tale rifiuto può essere classificato come pericoloso o non pericoloso [6]. Si riporta di seguito uno schema riassuntivo delle operazioni appena descritte.

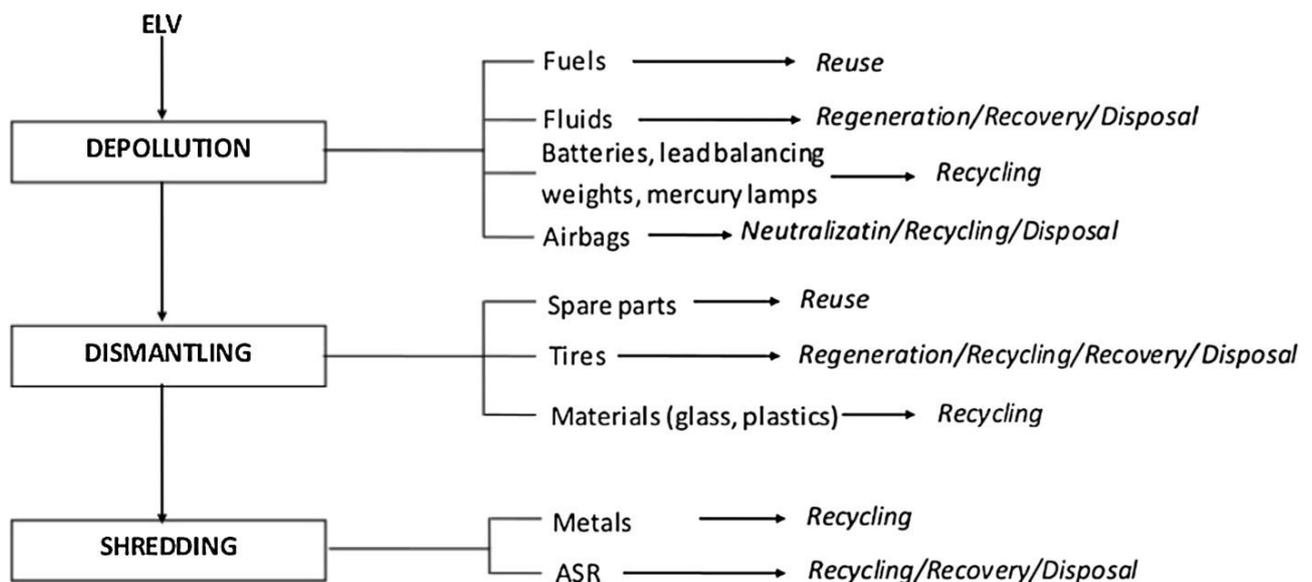


Figura 1 - Operazioni generiche di trattamento degli ELV [1].

Il car fluff risulta essere uno scarto molto eterogeneo e composto da materiali quali schiuma di poliuretano (PUF), tessuti, gomma/elastomeri, sostanze plastiche aventi diverse caratteristiche, materiali elettrici nonché metalli, legno e cartone. La distribuzione e il quantitativo di ogni materiale dipendono da svariati aspetti, a partire dai processi eseguiti in impianto fino a caratteristiche proprie del veicolo quali anno di costruzione, casa produttrice e cilindrata del motore.

Un'idea di una possibile composizione di ASR ottenibile tramite gli impianti di frantumazione è riportata nella seguente tabella dove vengono confrontati i risultati di test eseguiti su tre campioni diversi.

*Tabella 7 – Confronto fra diverse composizioni percentuali di car fluff.*

<b>Materiale</b>	% in peso di ASR (Mancini et al. 2010)	% in peso di ASR (Ruffino et al. 2010)	% in peso di ASR (Ruffino et al. 2014)
<i>Materiale fine &lt; 10 mm</i>	53.5	21.7	32.3
<i>Materiale fine &lt; 20 mm</i>	69.6	35.2	-
<i>PUF</i>	0.26	0.28	3.5
<i>Tessile</i>	12.3	17	15.6
<b><i>Plastica morbida</i></b>	<b>0.26</b>	<b>0.47</b>	<b>21</b>
<b><i>Plastica dura</i></b>	<b>13.4</b>	<b>32.9</b>	<b>24.5</b>
<i>Gomma ed elastomeri</i>	1.4	15.9	6.6
<i>Materiale elettrico</i>	0.44	3.5	-
<i>Metalli ferrosi</i>	1.1	2.9	6.9
<i>Metalli non ferrosi</i>	0.29	1.4	-
<i>Vetro</i>	-	0.09	-
<i>Legno</i>	0.63	2.07	0.4
<i>Cartone</i>	0.41	0.4	0.4
<i>Altro</i>	-	-	18

Schemi differenti vengono utilizzati nei diversi impianti presenti sul territorio ma in generale post triturazione si ottengono due tipologie di car fluff, una frazione leggera e una frazione pesante.

La parte leggera si ottiene tramite classificazione pneumatica e compone circa il 75% in peso dell'ASR e al 10-24% in peso di un ELV. Risulta essere più piccola la frazione pesante, circa il 25% in peso del fluff corrispondente al 2/8% in peso del veicolo a fine vita [7]. Nella tabella seguente si riportano degli esempi di composizione di fluff leggero e pesante.

Tabella 8 - Composizione del fluff leggero e del fluff pesante.

<b>Materiale</b>	Fluff leggero (% in peso di ASR)	Fluff pesante (% in peso di ASR)
<i>Metalli</i>	1.0 – 1.7	0.2 – 1.4
<i>Cavi</i>	2.9 – 3.0	7.0 – 12.7
<i>Gomma</i>	3.8 – 4.0	14.1 – 17.3
<i>Tessili</i>	37.5 – 39.6	7.7 – 11.6
PUR Schiuma	6.6 – 20.6	0.9 – 2.8
<b><i>Plastica</i></b>	<b>16.1 – 24.1</b>	<b>23.8 – 30.9</b>
<i>Legno</i>	0.03 – 0.4	0.06 – 0.7
<i>Carta</i>	0.8 – 1.0	1.0 – 2.5
<i>Suolo/sabbia</i>	6.4 – 21.6	7.6 – 12.3
<i>Vetro</i>	0.0	8.3 - 11.0
<i>Altro</i>	2.7 – 6.2	4.6 – 14.0

I confronti analizzati finora permettono di capire quanto le percentuali delle diverse frazioni varino notevolmente. Nonostante ciò risulta tutt'altro che trascurabile la presenza di materiale plastico fortemente presente nel fluff in uscita da vari impianti di trattamento. Sulla base di tali dati si può concludere che investire in iniziative rivolte alla migliore gestione, al recupero e al successivo riciclaggio delle materie plastiche potrebbe dare un contributo notevole alla miglioria della gestione del car fluff, nonché alla riduzione del suo smaltimento in discarica.

## 2. Normativa sugli autoveicoli a fine vita

Negli ultimi trent'anni la normativa in merito ai veicoli a fine vita e post trattamento al car fluff è variata più volte subendo svariate correzioni. Nonostante questo, non è mai stato precisamente definito un fine differente dallo smaltimento in discarica per tale categoria di rifiuti viste le difficoltà di caratterizzazione e l'eterogeneità di tale scarto. Prima degli anni duemila il decreto di riferimento era il Decreto Ronchi ovvero il D.lgs. n°22 del 05/05/1997 che categorizzava i rifiuti provenienti dal settore degli ELV rispetto al capitolo 16 e quindi come "Rifiuti non altrimenti specificati nel catalogo". Nello specifico ai rifiuti post demolizione potevano essere assegnati i CER 16 01 04 o 16 02 08 entrambi, come osservabile anche nella seguente tabella, impostati con non pericolosi [8].

Tabella 9 – Decreto Ronchi: Codici CER del settore automotive.

<b>Codice CER</b>	<b>Descrizione</b>
<b>16 00 00</b>	<b>Rifiuti non specificati altrimenti nel catalogo</b>
16 01 00	Veicoli fuori uso
16 01 01	Catalizzatori contenenti metalli preziosi sostituiti in veicoli
16 01 02	Altri catalizzatori sostituiti in veicoli
16 01 03	Pneumatici fuori uso
<b>16 01 04</b>	<b>Parti leggere provenienti dalla demolizione veicoli</b>
16 01 05	Rifiuti non specificati altrimenti
<b>16 02 08</b>	<b>Rifiuti della demolizione dei veicoli</b>

Oltre alla possibilità dello smaltimento si poteva far riferimento alle normative riguardanti il recupero e la valorizzazione energetica. Per quanto riguarda le prime, secondo il Decreto del 05/02/1998 parte del materiale in uscita dai processi di frantumazione poteva essere soggetto a recupero. Sfogliando l'allegato 1 sub allegato 1 si possono ad esempio trovare elementi quali parti di veicoli a motore dopo operazioni di messa in sicurezza o paraurti e plance di autoveicoli in materie plastiche rispettivamente nelle sezioni 5 e 6. Si riportano in [Tabella 10](#) alcuni CER legati al mondo dei veicoli a fine vita ricavati dall'allegato 4 [9].

Tabella 10 - Decreto del 05/02/1998: Attività di recupero del settore automotive.

<i>Attività di Recupero</i>	<i>Tipologia</i>	<i>Codice rifiuto</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Quantità (t/a)</i>
<i>Industria delle materie plastiche</i>	6.5	[070213] [120105] [160119]	Paraurti e plance di autoveicoli in materie plastiche	1000
	6.6	[070213] [120105] [160119]	Imbottiture sedili in poliuretano espanso	200
	6.11	[070213] [070299] [120105] [160119]	Pannelli sportelli auto	1000
<i>Industria della gomma</i>	10.2	[160103]	Pneumatici non ricostruibili, camere d'aria non riparabili ed altri scarti di gomma	3500
<i>Industria metallurgica</i>	5.1	[160106] [160116] [160117] [160118] [160122]	Parti di autoveicoli risultanti da operazioni di messa in sicurezza	3000
	5.2	[160106] [160116] [160117] [160118] [160122]	Parti di mezzi mobili rotabili per trasporti terrestri risultanti da operazioni di messa in sicurezza	6300
<i>Produzione di conglomerati bituminosi</i>	10.2	[160103]	Pneumatici non ricostruibili, camere d'aria non riparabili ed altri scarti di gomma	2500
<i>Messa in riserva</i>	6.5	[070213] [120105] [160119]	Paraurti e plance di autoveicoli in materie plastiche	100
	6.6	[070213] [120105] [160119]	Imbottiture sedili in poliuretano espanso	100
	6.11	[070213] [070299] [120105] [160119]	Pannelli sportelli auto	500
	10.2	[160103]	Pneumatici non ricostruibili, camere d'aria non riparabili ed altri scarti di gomma	7680
<i>Impianti di frantumazione</i>	5.1	[160106] [160116] [160117] [160118] [160122]	Parti di autoveicoli risultanti da operazioni di messa in sicurezza	118000

In merito alla valorizzazione energetica invece ci sono stati dei cambiamenti nei riferimenti normativi nel tempo. Prima del Decreto del 05/02/1998 si faceva riferimento al DM del 16/01/1995 ovvero alle “Norme tecniche per il riutilizzo in un ciclo di combustione per la produzione di energia dei residui derivanti da cicli di produzione o di consumo”. Secondo tale normativa rispetto a specifiche condizioni di contenuto di inerti, zolfo, ossido di zinco e potere calorifico inferiore il fluff si sarebbe potuto sfruttare in un ciclo di combustione [\[10\]](#). L’abrogazione di tale decreto a favore del DM del 05/02/1998 vede venir meno la possibilità di recupero energetico come soluzione alternativa allo smaltimento in discarica per il car fluff. Nel duemila le politiche in merito ai veicoli a fine vita subirono delle modifiche a livello europeo con l’arrivo della Direttiva 2000/53/CE, che in Italia fu recepita attraverso il D.Lgs. 209/2003 [\[11\]](#) [\[12\]](#). A livello comunitario si scelse di normare la disciplina relativa alla gestione dei rifiuti derivanti dagli ELV basandosi sul modello “EPR” della responsabilità estesa del produttore, attribuendo responsabilità maggiori a chiunque fabbricava, trattava, sviluppava e vendeva i prodotti in questo settore. In quest’ottica si introdusse la categoria dei veicoli fuori uso pericolosi, indicata con il CER 16 01 04\*, distinguendola dai veicoli non contenenti liquidi né altre componenti pericolose aventi CER 16 01 06. Con tale decreto il fluff ottenuto dal trattamento viene posto in un’altra macrocategoria di rifiuti ovvero la 19 “Rifiuti prodotti da impianti di trattamento dei rifiuti, impianti di trattamento delle acque reflue fuori sito, nonché dalla potabilizzazione dell’acqua e della sua preparazione per uso industriale”, nella sottocategoria 10 “Rifiuti da operazioni di frantumazione di rifiuti contenenti metallo”. In funzione del contenuto di sostanze pericolose al fluff viene attribuito o il codice CER 19 10 03\* o il CER 19 10 04. In generale, a livello comunitario si cercò di fondare la disciplina sui veicoli a fine vita su elementi fondanti quali la promozione di misure di prevenzione dei rifiuti ed il raggiungimento degli obiettivi minimi entro Gennaio 2015 del 95% di reimpiego e recupero e dell’85% di reimpiego e riciclaggio del peso medio per veicolo. In tutto questo, sotto lo sguardo attento delle amministrazioni pubbliche interne, risultava fondamentale l’imputazione della responsabilità estesa ai produttori di veicoli e componenti con la collaborazione di operatori economici quali concessionari, compagnie di assicurazione ed operatori della gestione dei rifiuti di veicoli fuori uso. Negli ultimi anni, i risultati raggiunti dall’Italia sul fronte delle percentuali relative al recupero dei veicoli a fine vita hanno registrato ritardi notevoli rispetto agli obiettivi attesi e proposti a livello comunitario. Questo è stato dovuto a difficoltà riscontrate su vari fronti, che sommandosi hanno condizionato negativamente l’intera filiera del settore automotive italiano. Il primo aspetto che ha contribuito fortemente a questo risultato sono state le criticità normative, a partire dall’assenza di un assetto sanzionatorio mirato che incentivasse i produttori all’assumersi oneri maggiori, dando un senso così alla rationale di fondo del regime EPR.

Sempre da un punto di vista normativo un altro aspetto che ha portato alla situazione attuale è la carenza di accordi fra l'amministrazione pubblica e le associazioni di categoria. L'unico tentativo in tal senso è avvenuto nel 2008 con l'Accordo di programma quadro" per la gestione dei veicoli fuori uso" con cui si è cercato di coordinare tutti gli operatori del settore per avvicinarsi agli obiettivi della direttiva europea. In particolare, si era affrontato il tema della gestione del car fluff ma non si sono raggiunti i livelli di recupero e riciclaggio a cui si mirava. Un altro aspetto che ha contribuito negativamente all'efficacia delle disposizioni emanate è stato il monitoraggio dei rifiuti assoggettati a trattamento, misurati sulla base del peso medio dei veicoli e non sulla misura reale di tale parametro. Se si aggiunge a tale aspetto il problema dei traffici fraudolenti di componenti dei veicoli a fine vita risulta difficile un conteggio affidabile del recupero. Infine, da un punto di vista legislativo non ci si è adattati all'evoluzione tecnologica e alle variazioni di prezzo delle materie prime vergini, risultanti inferiori a quelle delle controparti riciclate. Alle questioni normative vanno sommate le criticità tecniche, in particolare la mancata possibilità di avvicinarsi alle soglie europee di recupero attraverso la valorizzazione energetica e l'incentivo alle pratiche di recupero. In particolare, per quest'ultima opzione, si dovrebbe rivolgere più attenzione alla rimozione delle parti in plastica potenzialmente riciclabili, vista la forte presenza di tale categoria di materiale nel car fluff. L'assenza di migliori pratiche in tal senso dipende da vari fattori potenzialmente risolvibili lavorando sulla componente normativa, tra cui ad esempio una progettazione a monte che tenga conto dell'intero ciclo di vita dei mezzi. Da tutti i fattori analizzati derivano anche le diverse criticità di mercato riscontrate in tale settore produttivo. In generale, negli ultimi anni le dinamiche in tal senso hanno portato a preferire il conferimento in discarica dei rifiuti in uscita dagli impianti di trattamento all'investimento in soluzioni più rivolte al recupero.

Per affrontare le problematiche descritte, il D.Lgs. 209/2003 è stato sostituito dal D.Lgs. 119 del 03/09/2020 ovvero l'"Attuazione dell'articolo 1 della Direttiva UE 2018/849, che modifica la Direttiva 2000/53/CE relativa ai veicoli fuori uso" [\[13\]](#) [\[14\]](#). In tale decreto vengono introdotte una serie di novità aventi come scopo la ricerca di una migliore gestione dei veicoli fuori uso. Fra queste le principali sono le seguenti:

- Obbligo di pesatura dei veicoli tramite apposito sistema posto all'ingresso dei centri raccolta e comunicazione annuale obbligatoria dei dati relativi ai veicoli e ai materiali trattati ed inviati a recupero tramite MUD "Modello Unico di Dichiarazione ambientale";
- Obbligo di effettuare le operazioni di messa in sicurezza del veicolo fuori uso entro dieci giorni lavorativi dall'ingresso dello stesso nel centro di raccolta, anche se non ancora cancellato dal PRA "Pubblico Registro Automobilistico";

- Incremento delle sanzioni in caso di mancata presentazione della comunicazione prevista dall'articolo 11, comma 3 fino alla sospensione dell'autorizzazione per l'impianto;
- Obbligo di dotazione di un adeguato sistema di pesatura per veicoli per ottemperare al primo punto.

Il D.Lgs. 119/2020 fa parte di un pacchetto di decreti aventi come scopo fare in modo che rifiuti differenti quali pile, RAEE, imballaggi e veicoli fuori uso siano maggiormente improntati a politiche di economia circolare. In tal senso l'obiettivo del decreto sopracitato è quello di semplificare il riutilizzo di componenti ottenute dagli ELV e promuovere il riciclo dei rifiuti e la valorizzazione energetica, andando così a ridurre le percentuali di smaltimento in discarica. Tenendo conto di questi aspetti in tale lavoro di tesi si sono valutati, oltre che migliorie in ottica gestione del car fluff, anche possibilità a monte dell'impianto di frantumazione che permettano di ridurre le percentuali di fluff prodotto.

### 3. Componenti in plastica degli autoveicoli

Negli ultimi decenni nel settore automotive si sono riscontrati notevoli cambiamenti in merito alle tecniche e a materiali utilizzati in fase produttiva. Buona parte di queste variazioni sono state dovute allo sviluppo tecnologico e alle applicazioni dei componenti di plastica nelle loro diverse forme che, grazie all'ampio spettro di utilizzo, sono risultati essere particolarmente versatili. Partendo dalla metà del secolo scorso, infatti, grandi passi in avanti sono stati fatti in merito alle possibilità applicative dei diversi polimeri in combinazione fra loro o con altri materiali. Vista l'ampio spettro di proprietà associabili ai vari polimeri si è andati incontro sempre più ad una sostituzione di materiale, parziale o completa, per molte componenti dell'auto. La plastica nelle sue varie forme risulta essere un materiale particolarmente performante in quanto, in funzione dell'esigenza, può avere caratteristiche quali leggerezza, flessibilità, resistenza meccanica e alla corrosione ed ottime capacità di insonorizzazione che nel complesso permettono di ottenere un riscontro positivo sulla qualità costruttiva e sulla sicurezza del veicolo.

#### 3.1 Evoluzione dei materiali nel settore automotive

Come osservabile da [Figura 2](#) già dagli anni 80 agli anni 90 i materiali plastici hanno superato percentuali in peso del 10% e studi del settore proiettavano tale crescita addirittura al 15% entro la fine del secolo [\[15\]](#).

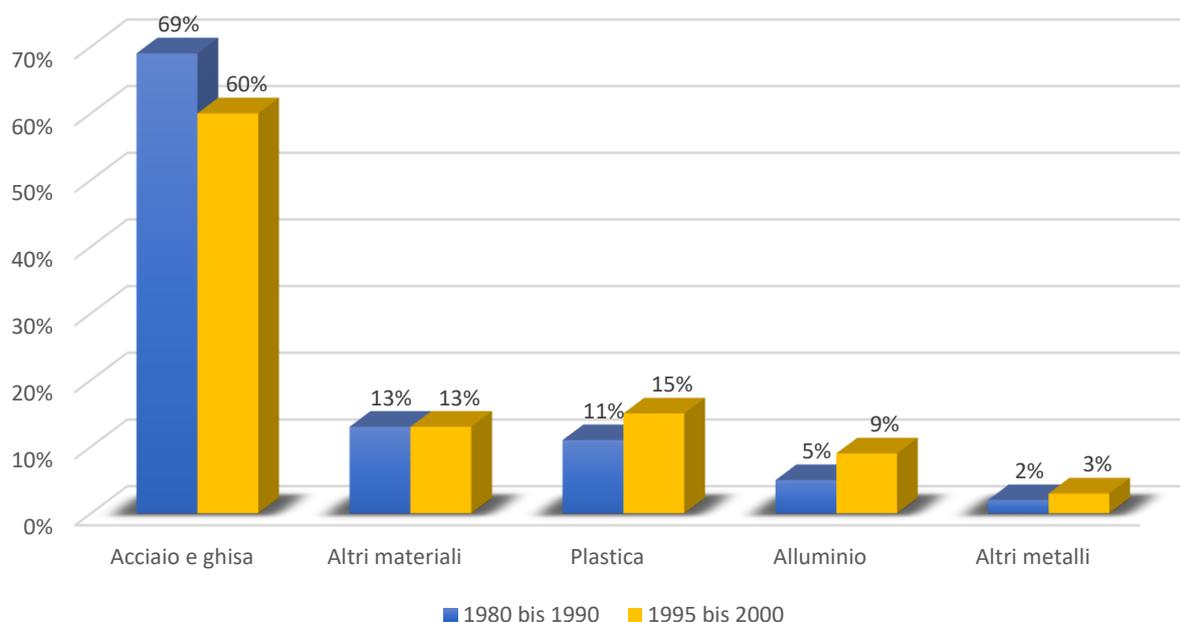
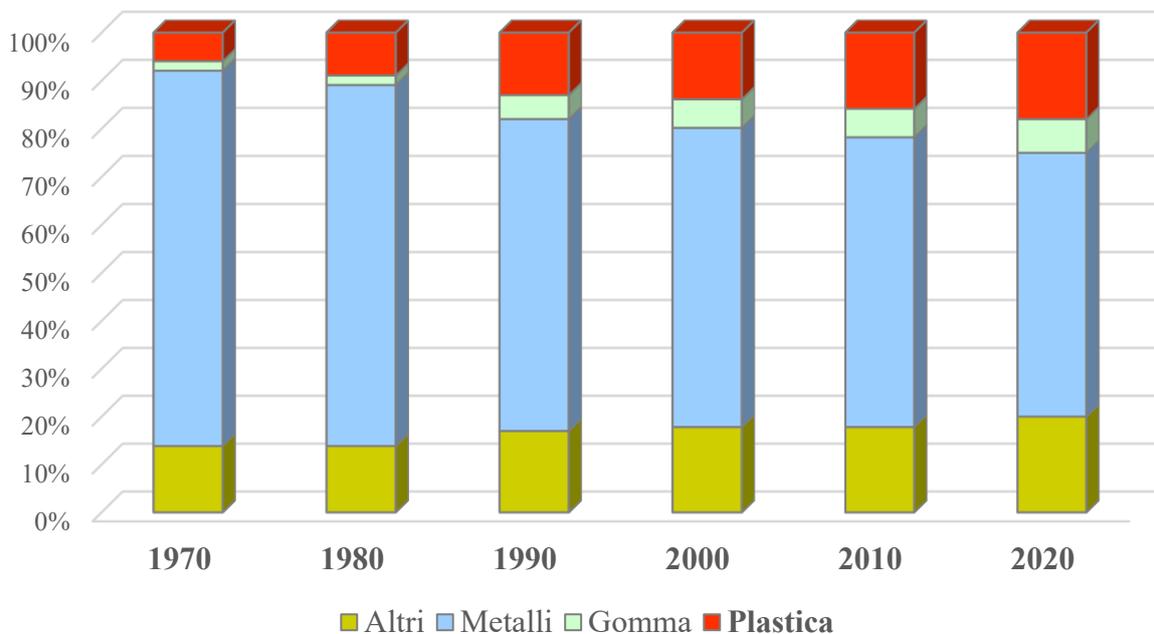


Figura 2 – Stima dell'evoluzione temporale della composizione di un veicolo [\[15\]](#).

Tali studi sono stati ampiamente confermati negli ultimi anni in quanto la presenza di polimeri plastici è cresciuta decisamente toccando quasi vette del 20% in peso come osservabile in [Figura 3](#). Il principale aspetto che ha portato allo svilupparsi di tale trend è stato principalmente la ricerca della riduzione del peso dei veicoli. Una maggiore leggerezza infatti è correlabile a minori consumi e quindi emissioni inferiori. Si riporta in [Tabella 11](#) l'evoluzione registrata in merito alla distribuzione percentuale dei materiali negli ultimi cinquanta anni [\[16\]](#).

*Tabella 11 - Evoluzione registrata dei principali materiali in un generico veicolo.*

<b>Materiale</b>	1970	1980	1990	2000	2010	2020
<b>Plastica</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>18</b>
<i>Gomma</i>	2	2	5	6	6	7
<i>Metalli</i>	79	76	65	63	61	55
<i>Altri</i>	14	14	17	18	18	20



*Figura 3 - Evoluzione registrata dei principali materiali in un generico veicolo [\[16\]](#).*

Tale crescita registrata negli anni conferma ulteriormente la necessità di una migliore gestione del flusso dei rifiuti plastici per potere raggiungere livelli di riciclabilità maggiori. Il tema del fine vita dei rifiuti plastici, vista la crescita degli ultimi decenni, risulta essere particolarmente sentito e si necessita di una variazione di approccio sia da un punto di vista sociale che da un punto di vista tecnologico. Questo vale per diversi contesti produttivi quali l'agricoltura, il ramo delle costruzioni e demolizioni, la produzione di attrezzature elettriche ed elettroniche e realtà quali quella del packaging nonché il settore automotive. Proprio per rispondere a queste esigenze in Piemonte è nato il progetto *Reciplast*, avente come obiettivo l'incremento dell'ecosostenibilità della plastica lavorando sulle quelle barriere tecnologiche che attualmente non permettono il riciclo completo di certe componenti plastiche. I settori industriali sui quali si concentra tale progetto sono gli ultimi due citati, vale a dire l'imballaggio industriale e quello dell'auto [17]. Il motivo dietro tale scelta va ricercato nell'importanza che tali contesti produttivi hanno in una regione quale il Piemonte. La maggiore presenza sul territorio di tali tipologie di settori unita ad una filiera ben strutturata in merito alla gestione e recupero del fine vita permette di ottimizzare in maniere efficiente il quantitativo complessivo di scarto gestito nonché la rapidità di applicazione nel contesto industriale. A tale progetto hanno aderito diversi partner, fra i quali il Politecnico di Torino e FCA Italy S.p.A., esperti del settore che hanno come scopo lo sviluppo di soluzioni gestionali e tecnologiche in grado di ridurre significativamente la frazione non riciclabile con l'applicazione di processi innovativi di tipo termomeccanico e chimico. L'obiettivo post trattamento è l'ottenimento di ecosistemi circolari in cui le materie prime secondarie in uscita non abbiano carenze prestazionali e possano quindi essere confrontate con i polimeri vergini. L'analisi sviluppata tramite il presente lavoro di tesi rientra nel Work Package del progetto intitolato "Processi di riciclo materiali del settore auto" in cui uno degli obiettivi è la valorizzazione delle frazioni riciclabili del settore auto. Per potere raggiungere tale scopo risulta necessario inizialmente descrivere nel dettaglio la composizione e la collocazione delle diverse famiglie di polimeri all'interno dei veicoli. Sulla base del quadro generale sviluppato si procederà con l'individuazione dei componenti plastici da avviare al riciclo per poi capire l'effettiva efficacia delle operazioni di separazione perseguibili. A questo punto, a partire dalle informazioni ricavate, si procederà nel decidere quali componenti auto sono effettivamente assoggettabili a riciclaggio.

## 3.2 Analisi della composizione dei materiali

L'evoluzione della composizione dei veicoli precedentemente analizzata ha mostrato come il settore automotive, da un punto di vista dei materiali, è fortemente cambiato negli ultimi decenni. Lo studio "Analisi di materiali plastici da autoveicoli a fine vita" ha permesso di rendere più precisa l'analisi della composizione dei veicoli al momento in circolazione in quanto ci si è rifatti al database IMDS "International Material Data System" [18]. Per eseguire un'analisi coerente e sensata si è deciso di concentrarsi unicamente sugli autoveicoli escludendo quindi veicoli commerciali e autobus. In Europa per classificare in maniera coerente le diverse tipologie di vetture presenti sul mercato, da un punto di vista di dimensioni e tipologia di carrozzeria, si associa una lettera indicante il segmento auto di appartenenza. Di tutti i segmenti i più numerosi, da un punto di vista di vendite e quindi successivamente necessità di smaltimento, sono il B e il C ovvero rispettivamente le utilitarie e le berline di medie dimensioni. Proprio per questo motivi ci si è riferiti a questi segmenti per ottimizzare, da un punto di vista statistico, la trattazione precedentemente definita. L'analisi nel dettaglio della composizione dei materiali di due veicoli rappresentativi è riportata nella [Tabella 12](#) e nella [Tabella 13](#) nelle pagine successive. I numeri derivanti dall'analisi sviluppata a partire dal database IMDS dimostrano come le previsioni precedentemente illustrate e relative a prima della fine degli anni duemila fossero corrette. Si può notare come, per entrambe le tipologie di veicolo, appena dopo i materiali ferrosi al momento i materiali plastici risultano essere i più presenti sui veicoli, aspetto che conferma ulteriormente la necessità di una loro migliore gestione a fine vita.

Tabella 12 – Composizione dei materiali in un veicolo del segmento B.

<b>Materiale</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>% in massa</b>
<i>Metalli ferrosi</i>	650.5	65.5
<i>Metalli non ferrosi</i>	70	7.1
<b><i>Polimeri</i></b>	<b>150</b>	<b>15.1</b>
<b><i>Elastomeri</i></b>	<b>36</b>	<b>3.6</b>
<i>M.O.N.</i>	4.5	0.5
<i>Vetro</i>	29	2.9
<i>Fluidi</i>	45	4.5
<i>Altro</i>	7.5	0.8
<b><i>Totale</i></b>	<b>992</b>	<b>100</b>

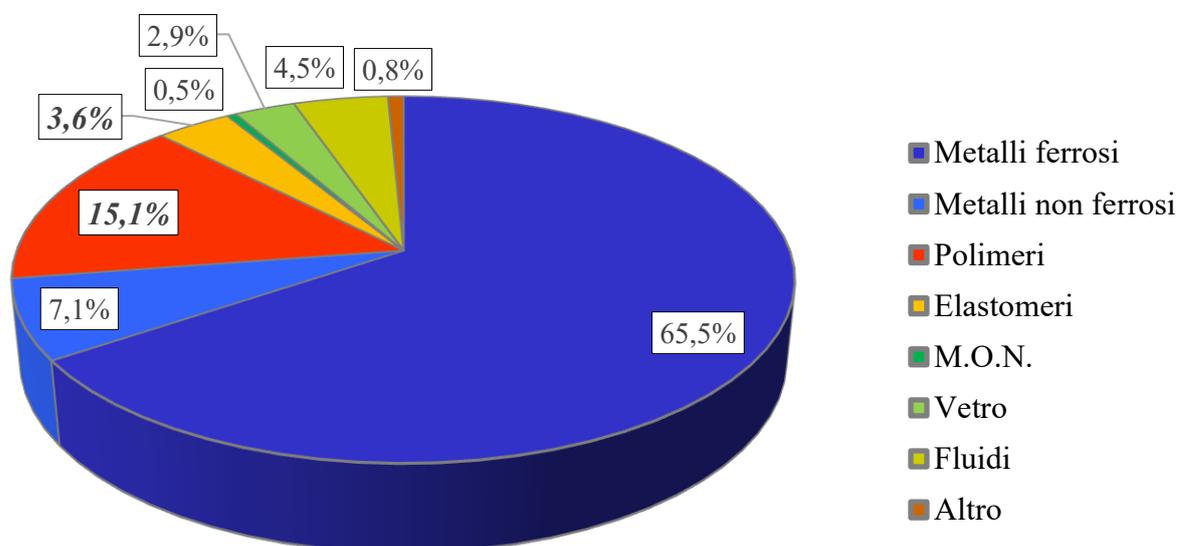


Figura 4 - Composizione dei materiali in un veicolo del segmento B.

Tabella 13 - Composizione dei materiali in un veicolo del segmento C.

<b>Materiale</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>% in massa</b>
<i>Metalli ferrosi</i>	806	61,2
<i>Metalli non ferrosi</i>	151	11,5
<b><i>Polimeri</i></b>	<b>186</b>	<b>14,1</b>
<b><i>Elastomeri</i></b>	<b>59</b>	<b>4,5</b>
<i>M.O.N.</i>	1	0,1
<i>Vetro</i>	40	3,0
<i>Fluidi</i>	60	4,6
<i>Altro</i>	15	1,1
<b><i>Totale</i></b>	<b>1318</b>	<b>100</b>

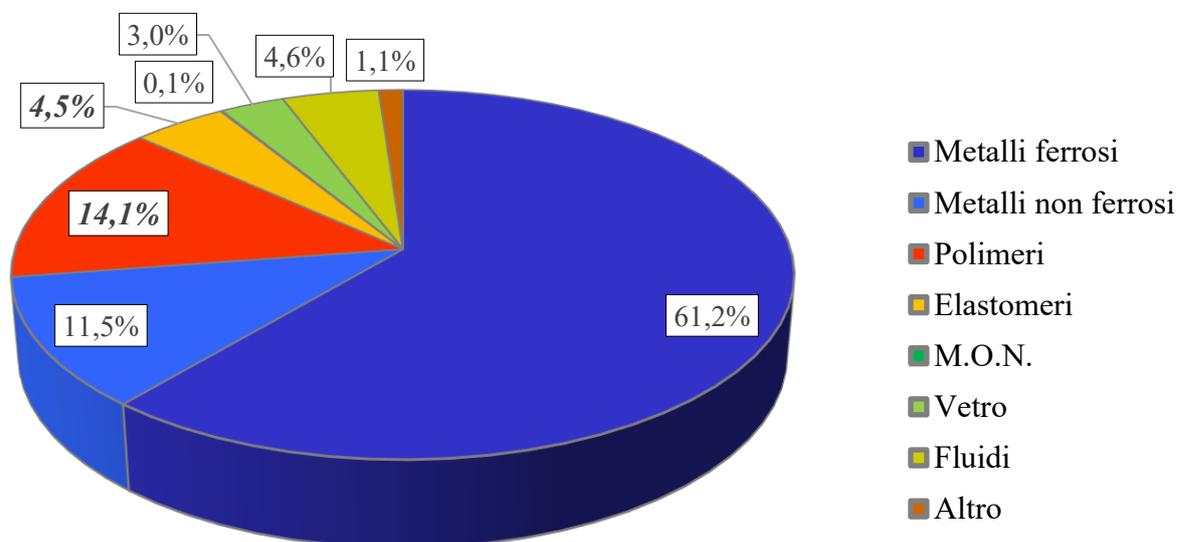


Figura 5 - Composizione dei materiali in un veicolo del segmento C.

### 3.3 Analisi delle categorie di polimeri

Nel capitolo precedente si è introdotto il problema dell'elevate percentuali di materiale plastico riscontrate nel car fluff e quindi, fra tutti i materiali, conviene scendere maggiormente nel dettaglio su questi. Nello specifico, rispetto all'analisi dei materiali sviluppata finora si andranno ad analizzare i dati rilevanti alle classi dei polimeri e degli elastomeri. Quando si valutano materiali polimerici applicati a settori produttivi bisogna considerare che si sta parlando di prodotti che possono appartenere a diverse categorie con caratteristiche di molto differenti in funzione dell'obiettivo che si vuole perseguire. Volendo classificare per categorie tale classe di materiali si possono andare a distinguere le seguenti tre famiglie di polimeri:

- *Polimeri termoplastici;*
- *Polimeri termoindurenti;*
- *Elastomeri.*

#### 3.3.1. Polimeri termoplastici

I materiali termoplastici sono costituiti da polimeri formati da catene lineari e poco ramificate non reticolate. Queste caratteristiche permettono, incrementando la temperatura al di sopra del punto di rammollimento, il raggiungimento di uno stato viscoso che garantisce un ottimo livello di malleabilità permettendone così la modellazione. Una volta modellato, il materiale ottiene rigidità per raffreddamento, acquisendo la forma voluta. Le proprietà caratteristiche di questa categoria prevedono, salvo eccezioni, densità relativamente basse tipicamente inferiori a quella dell'acqua e coefficienti di conducibilità sia termica, sia elettrica, di ordini di grandezza inferiori rispetto a quelli dei metalli. In funzione della tipologia di polimero si riscontrano colori differenti. I polimeri amorfi sono tipicamente trasparenti o eventualmente con leggere colorazioni. I polimeri semicristallini, invece, a causa della presenza di una fase cristallina tendono a diventare traslucidi o addirittura completamente opachi. Se soggetti a sforzi non eccessivi per i polimeri termoplastici vale la legge di Hooke, ovvero è garantita l'elasticità che permette deformazioni reversibili. Deformazioni più consistenti portano invece ad un comportamento plastico dovuto a legami di attrazione intermolecolare tra le macromolecole. Le proprietà di un materiale termoplastico variano in funzione del prodotto analizzato, ma in generale si può dire che sono correlabili alla temperatura di stampaggio mantenuta durante la produzione del pezzo e dal tempo richiesto per l'esecuzione di tale processo. Le dinamiche di produzione e le proprietà appena descritte comportano ottime possibilità in ottica di riciclabilità dei polimeri termoplastici. Agendo sulla temperatura, infatti, anche se per un numero

finito di cicli, si può riapplicare lo schema produttivo che prevede il rammollimento seguito dal raffreddamento. Di seguito si riportano i principali materiali termoplastici sfruttati nel settore automotive.

### **Polipropilene (PP)**

Il monomero alla base del polipropilene è il propilene, caratterizzato dalla presenza di un gruppo metilico  $\text{CH}_3$  laterale. Durante la polimerizzazione è possibile ottenere diversi stereoisomeri in funzione di come si dispone il gruppo metilico. La forma più sfruttata in ambito industriale, ottenuta sfruttando i catalizzatori di Ziegler-Natta, è il polipropilene isotattico ovvero un polimero semicristallino in cui i gruppi  $\text{CH}_3$  sono collocati tutti dalla stessa parte della catena. Questa conformazione permette di ottenere una densità finale inferiore a quella dell'acqua e porta a proprietà quali elevati carichi a rottura, buona resistenza meccanica, buona resistenza termica, all'abrasione e chimica nonché rende il materiale un buon isolante elettrico.

### **Poliammide (PA)**

I composti appartenenti a questa classe sono costituiti da macromolecole all'interno delle quali si trovano dei gruppi ammidici  $\text{CO-NH}$ . In questa macrocategoria rientra la famiglia delle poliammidi sintetiche definita come nylon. Le principali proprietà associate a questi materiali sono una discreta resistenza all'usura e agli urti, un buon isolamento elettrico nonché un'alta resistenza ai solventi che, sommato alla loro leggerezza, li portano ad essere ampiamente utilizzati nel settore automotive.

### **Policarbonato (PC)**

Il policarbonato è un polimero ottenuto partendo dall'acido carbonico al cui interno è presente una catena alchilica generalmente derivante da un diolo aromatico. Industrialmente il più noto è quello ottenuto a partire dal bisfenolo A caratterizzato da proprietà principali quali l'eccellente resistenza agli urti e al calore, l'ottima stabilità dimensionale e lavorabilità ma soprattutto la trasparenza e la chiarezza ottica.

### **Polivinilcloruro (PVC)**

Tale polimero deriva dal cloroetene o cloruro di vinile e nella sua forma pura risulta essere un materiale molto duro. Le caratteristiche che fanno preferire il suo utilizzo sono l'isolamento elettrico nonché la buona resistenza agli urti e alle sostanze chimiche. Un ulteriore aspetto positivo di tale polimero è che risulta essere compatibile con vari tipi di additivi, tra cui ad esempio i plastificanti che incrementano la flessibilità.

## **Polietilene (PE)**

Il monomero da cui si parte è l'etilene  $C_2H_4$ , molecola particolarmente stabile visto il doppio legame fra gli atomi di carbonio. Questo garantisce, per questa categoria di polimeri, buone proprietà isolanti e prodotti stabili chimicamente. In base al grado di ramificazione, al peso molecolare e quindi a partire dalla densità si possono classificare differenti tipologie di PE ognuna avente proprietà specifiche. Fra le più diffuse si trovano il polietilene ad alta densità HDPE e il polietilene a bassa densità LDPE. La prima forma è poco ramificata e per questo risulta essere maggiormente rigida, la seconda invece, è caratterizzata da una maggiore ramificazione che la rende meno rigida e maggiormente duttile.

## **Polistirene (PS)**

Il polistirene è un polimero aromatico termoplastico dalla struttura lineare derivante dallo stirene e alle volte nominato anche come polistirolo. Ha la caratteristica acquisire plasticità superata la temperatura di transizione vetrosa, pari circa a cento gradi centigradi, mentre si presenta come solido vetroso a temperatura ambiente. Risulta essere un materiale particolarmente versatile le cui proprietà più sfruttate sono il peso esiguo e una buona capacità isolante oltre che un'ottima resistenza agli acidi, alle soluzioni alcaline, agli alcoli e all'acqua.

## **Polimero acrilonitrile/butadiene/stirene (ABS)**

Tale polimero normalmente è ottenuto tramite polimerizzazione in emulsione di acrilonitrile e stirene in presenza di polibutadiene. Miscelare tali composti permette di ottenere un materiale rigido, resistente da un punto di vista termico e chimico, tenace e con una discreta processabilità. Uno dei grandi vantaggi dell'ABS è che combinato con additivi permette il raggiungimento di proprietà particolare in funzione delle necessità. Come contro di solito tale categoria di polimeri risultano essere poco resistenti ad aggressioni atmosferiche.

La tecnologia e le necessità più recenti hanno portato ad uno sviluppo ed una ricerca sempre maggiore di nuove tipologie di polimeri termoplastici negli ultimi decenni. Si sono citati solo alcuni dei polimeri più utilizzati nel settore automotive ma non tutti. Altri materiali degni di menzione potrebbero essere il poliossimetilene POM, particolarmente resistente agli agenti chimici, il polietilene tereftalato PET, sfruttato per le cinture di sicurezza in forma di fibre sintetiche, ed il polietersulfone PES, avente ottima resistenza alle alte temperature per lunghi periodi.

### **3.3.2. Polimeri termoindurenti**

I materiali termoindurenti sono ottenuti tramite curing, ovvero attraverso processi di reticolazione fra diverse catene polimeriche che portano alla formazione di un unico reticolo tridimensionale. Tale reazione la si ottiene agendo sulle condizioni di temperatura e pressione oppure agendo a freddo tramite reazioni chimiche e porta alla formazione di legami forti e definitivi. Il materiale ottenuto è solitamente rigido, insolubile e infusibile oltre che caratterizzato da ottime resistenze al calore e agli agenti chimici. Una volta trasformati tali polimeri non possono essere nuovamente fusi e riutilizzati in quanto si andrebbe incontro a degradazione chimica, nello specifico carbonizzazione. Tale caratteristica li rende difficilmente assoggettabili a politiche di riciclo visto il processo di formazione delle reticolazioni. Di seguito si riportano alcuni esempi di polimeri termoindurenti utilizzati in ambito industriale.

#### **Poliuretano (PUR)**

A questo gruppo di materiali appartengono un'ampia gamma di polimeri, tutti caratterizzati da catene costituite di legami uretanici  $\text{-NH-(CO)-O-}$ . Tipicamente sono ottenuti facendo reagire di-isocianati, polioli e varie tipologie di catalizzatori e additivi che, a seconda di come vengono combinati, portano alla formazione di diverse tipologie di prodotti. In ambito industriale si possono trovare in varie forme come ad esempio poliuretani espansi flessibili o rigidi, poliuretani rigidi compatti e poliuretani elastici compatti.

#### **Resina epossidica**

Tale materiale è ottenuto facendo reagire a freddo una resina base e un indurente rispettando un opportuno rapporto di miscelazione. Si riscontrano varie tipologie di resine epossidiche, tra queste le più usate sono polimeri che hanno come base di partenza il bisfenolo A e l'epicloridrina. Tipicamente tali tipologie di resine sono caratterizzate da alti livelli di isolamento elettrico, adesione e resistenza chimica e termica.

#### **Resina poliestere insatura**

La resina poliestere è un polimero ottenuto facendo avvenire una policondensazione tra poliacidi e polialcoli. Nello specifico con resina poliestere insatura si intende un materiale, generalmente stampabile da liquido, che quando indurito mantiene la forma assunta durante lo stampaggio.

Normalmente a tali polimeri vengono associati materiali di rinforzo, come fibre di vetro, che permettono di ottenere caratteristiche come alte resistenze meccaniche e all'usura oltre che ottima rigidità, leggerezza e resistenza agli agenti chimici.

### **3.3.3. Elastomeri**

Gli elastomeri sono polimeri caratterizzati principalmente dalla proprietà di poter subire deformazioni elastiche reversibili importanti, quindi si rilevano piccoli valori di modulo di Young. Questo comportamento è possibile grazie alla presenza di una struttura rafforzata tramite legami, deboli o forti, che incrementano le prestazioni meccaniche. Tali materiali possono essere naturali o sintetici e vengono classificati, in base alla tipologia di reticolazione delle strutture, in due classi principali ovvero in elastomeri termoplastici o elastomeri termoindurenti. I primi possono essere facilmente riciclati in quanto sono rimodellabili se portati vicino alla temperatura di transizione vetrosa. Sono copolimeri di stirene e butadiene, poliolefine e co-poliesteri e sono prodotti principalmente tramite due metodi di lavorazione, l'estrusione e lo stampaggio ad iniezione. Gli elastomeri termoindurenti, invece, sono ottenuti per vulcanizzazione. Tale processo non rende fattibile il riciclo, vista l'impossibilità di una modellazione postuma lavorando nuovamente con temperatura e pressione piuttosto che reagenti chimici. Alcuni esempi di elastomeri utilizzati nel settore automotive sono riportati di seguito.

#### **Gomma naturale (NR)**

Tale elastomero può essere di origine naturale o prodotto sinteticamente e viene ottenuto a partire dal lattice grazie a processi di raffinazione che permettono di ottenere una gomma lavorabile.

È caratterizzato da ottimi valori di resistenza a compressione, trazione, abrasione e strappo oltre che buone caratteristiche di attrito e assorbimento di vibrazioni.

#### **Gomma stirene-butadiene (SBR)**

Questo materiale viene prodotto polimerizzando in emulsione due principali unità monomeriche ovvero il butadiene e lo stirene. La presenza di quest'ultimo monomero, in particolare, permette di ottenere una gomma maggiormente tenace e resistente.

Tale materiale risulta avere ottime proprietà meccaniche come resistenza alle deformazioni permanenti, carico a rottura, recupero elastico e si oppone bene all'usura e alle lacerazioni.

#### **Gomma etilene propilene diene (EPDM)**

La sigla EPDM deriva da "Ethylene-Propylene Diene Monomer" infatti questa gomma si ottiene tramite copolimerizzazione di etilene, propilene e un diene come il dicitlopentadiene DCPD, l'etilidene norbornene (ENB) e il vinil norbornene (VNB).

Il terpolimero così costituito permette di ottenere caratteristiche quali ottima resistenza al calore, alle basse temperature e agli agenti atmosferici nonché resistenza all'invecchiamento e agli agenti chimici.

### **Gomma nitrile butadiene (NBR)**

La gomma NBR si ottiene sintetizzando, tramite copolimerizzazione, dell'acrilonitrile con il butadiene. Le proprietà variano in funzione della composizione del copolimero ma, in generale, la gomma nitrilica risulta essere particolarmente resistente agli oli e agli acidi anche se patisce maggiormente le sollecitazioni meccaniche rispetto alla gomma naturale. Inoltre, tale materiale risulta avere una discreta resistenza a flessione e abrasione.

### **Elastomeri fluorurati (FKM, FPM, FFKM)**

I fluoroelastomeri sono una categoria di materiali aventi caratteristiche specifiche di alto livello dovute alla presenza di fluoro e in particolare alla stabilità intrinseca del legame carbonio-fluoro. Tale categoria di gomme sintetiche ha la caratteristica di possedere la più elevata resistenza al calore e agli agenti chimici e quindi può essere sfruttata per applicazioni specifiche che richiedono un'attenzione particolare in tal senso.

## **3.4 Distribuzione delle categorie di materiali polimerici**

Dall'analisi delle diverse categorie di polimeri emerge l'ampio spettro di proprietà raggiunte da tali tipologie di materiali dovute alle diverse composizioni degli stessi nonché al differente processo di formazione. Appunto per questo, quando si parla di sostenibilità e riciclabilità dei veicoli, la tipologia di polimero è un parametro fondamentale di cui tenere conto. Cercare di capire a quanto ammontano le diverse frazioni di polimeri presenti all'interno di automobile permette di farsi un'idea iniziale su quale tipologia di scarto si andrà ad agire durante lo smaltimento e quindi su quale approccio risulterà migliore per ridurre l'impatto degli elementi plastici stessi [19]. Sfruttando il database IMDS è stato possibile indagare in che percentuale si trovano le diverse categorie di polimeri analizzando nuovamente due veicoli differenti appartenenti al segmento B e C. Si riportano in [Tabella 14](#) e [Tabella 15](#) i pesi delle diverse frazioni.

Tabella 14 - Analisi del peso per ogni categoria di polimeri in un veicolo del segmento B.

<b>Categoria</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>% in massa</b>
<i>Termoplastici</i>	107.6	57.8
<i>Termoindurenti</i>	14.0	7.5
<i>Elastomeri</i>	35.7	19.2
<i>Tessuti</i>	10.7	5.8
<i>Altri</i>	18.0	9.7
<b><i>Totale</i></b>	<b>186.0</b>	<b>100.0</b>

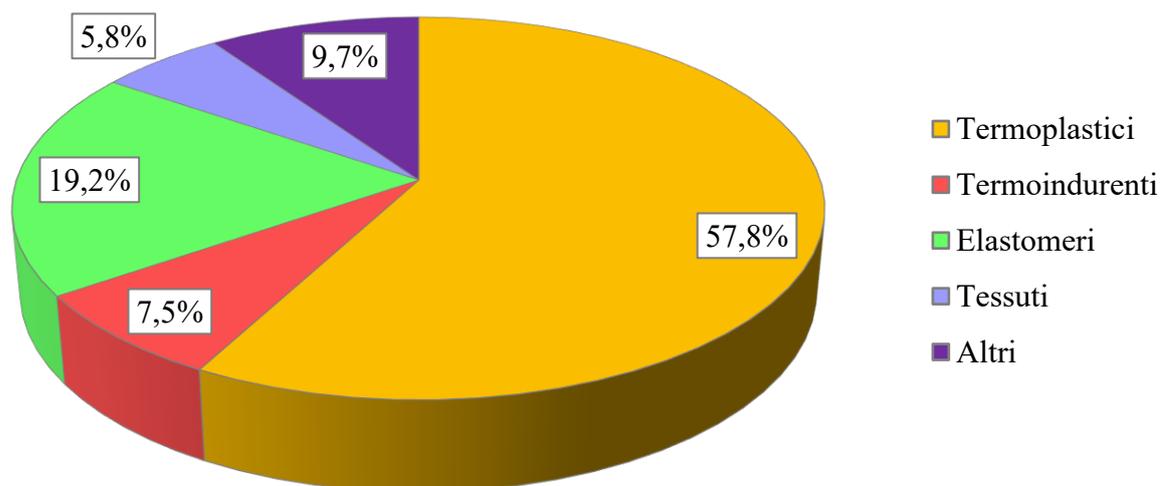


Figura 6 - Analisi del peso per ogni categoria di polimeri in un veicolo del segmento B.

Tabella 15 - Analisi del peso per ogni categoria di polimeri in un veicolo del segmento C.

<b>Categoria</b>	<b>Peso [kg]</b>	<b>% in massa</b>
<i>Termoplastici</i>	147.0	60.0
<i>Termoindurenti</i>	23.0	9.4
<i>Elastomeri</i>	59.0	24.1
<i>Tessuti</i>	16.0	6.5
<b>Totale</b>	<b>245.0</b>	<b>100.0</b>

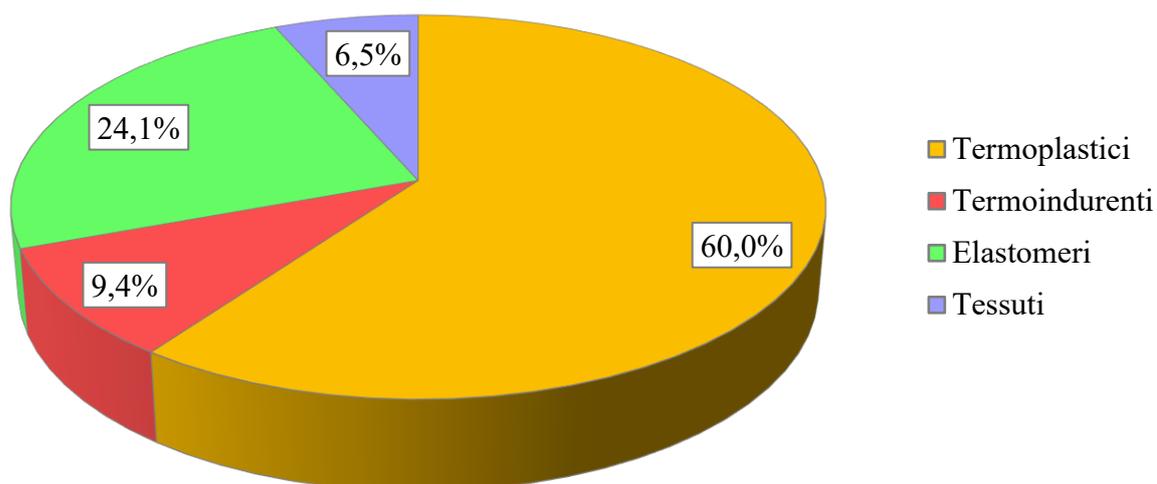


Figura 7 - Analisi del peso per ogni categoria di polimeri in un veicolo del segmento C.

Dalle tabelle precedentemente illustrate risulta evidente come buona parte dei polimeri la si trova sotto forma di termoplastici. La spiegazione di tale andamento la si deve principalmente al fatto che sono materiali maggiormente lavorabili e modellabili, caratteristica che impatta sia i tempi che i costi di produzione. Seppure dipenda dalla tipologia di materiale si è visto come i termoplastici risultino essere i più recuperabili e quindi un loro grande impiego risulta essere un aspetto decisamente positivo. Altra categoria che occupa una buona porzione in tale analisi sono gli elastomeri di cui una buona parte, costituita dagli pneumatici, viene rimossa prima della rottamazione del veicolo. La restante parte genericamente la si trova in componenti dalle dimensioni ridotte e difficilmente riciclabili a costi modici. Per questo normalmente tali componenti a fine trattamento vanno a formare parzialmente del car fluff. I polimeri termoindurenti li si trova in percentuali decisamente ridotte che addirittura, nel caso del segmento B, sono più basse di elementi non categorizzabili e quindi plastiche non recuperabili quali smalti, vernici, adesivi e sigillanti. Nelle tabelle precedenti si sono indicati una parte dei termoplastici in maniera differente, identificandoli come tessuti. Tali polimeri, nonostante l'appartenenza alla categoria citata, risultano difficilmente recuperabili a causa del loro utilizzo in combinazione con altri materiali. Tale approccio è dovuto alla necessità di raggiungere proprietà e mansioni differenti come nel caso di tappeti, rivestimenti e sedili. A partire dal database IMDS è stato possibile entrare ulteriormente nel dettaglio in merito alle percentuali in peso relative ad ogni singolo polimero appartenente alle diverse categorie appena valutate. Nello specifico si illustrano nelle figure seguenti i risultati delle analisi riferite al veicolo appartenente al segmento B in cui si sono considerati tutti i polimeri presenti in quantitativi complessivi di almeno un chilogrammo. Come osservabile da [Figura 8](#) dall'analisi dei polimeri termoplastici emerge come più della metà di tale categoria sia composta dal polipropilene, oltre il 40%, e dalla poliammide. Altri materiali meno presenti ma non per questo trascurabili sono sicuramente il policarbonato, quasi al 10%, e le varie tipologie di polietilene. nello specifico l'HDPE principale costituente del serbatoio.

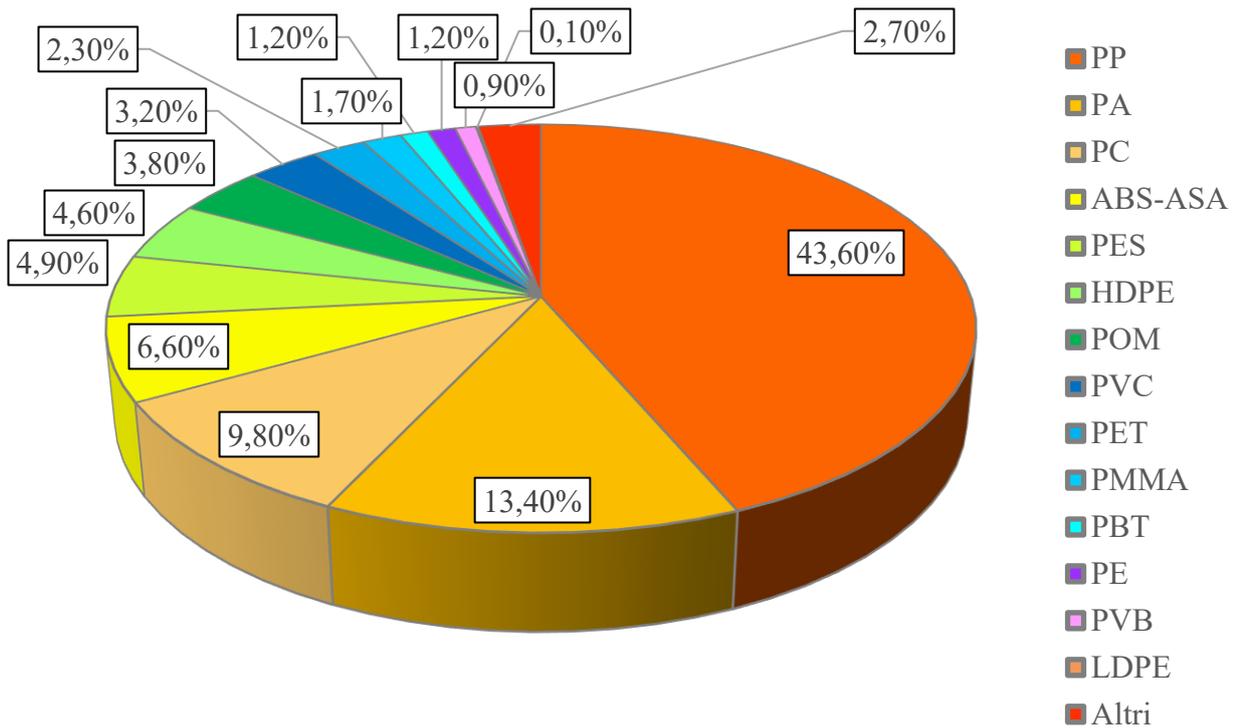


Figura 8 – Analisi della distribuzione dei polimeri termoplastici di un veicolo del segmento B.

Decisamente più semplici risultano le analisi relative agli elastomeri e ai polimeri termoindurenti infatti per entrambe le categorie si sono individuate tre famiglie di polimeri. Nel caso degli elastomeri, come osservabile da [Figura 9](#), oltre il 60% in peso del materiale lo si trova sotto forma di gomma naturale e questo è dovuto alla forte impatto in peso legato alla presenza degli pneumatici. Il secondo elastomero in tale valutazione è risultato essere l'EPDM riscontrabile nelle guarnizioni ma difficilmente riciclabile in quanto spesso associato ad un'anima metallica. Per quanto riguarda i polimeri termoindurenti, le cui percentuali sono rappresentate in [Figura 10](#), sono quasi completamente rappresentati dal poliuretano, nello specifico quello reticolato, in quanto tale materiale lo si trova in maniere consistente in elementi quali portiere, sedili ed airbag. Decisamente meno presenti sono invece le resine epossidiche infatti, come osservabile, risultano coprire meno del 3% in peso della categoria.

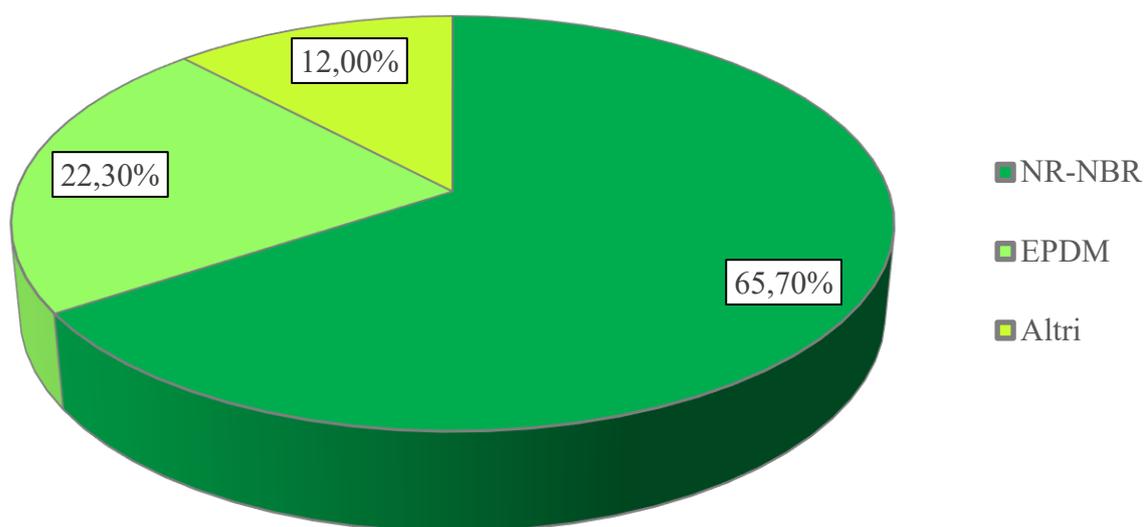


Figura 9 - Analisi della distribuzione degli elastomeri di un veicolo del segmento B.

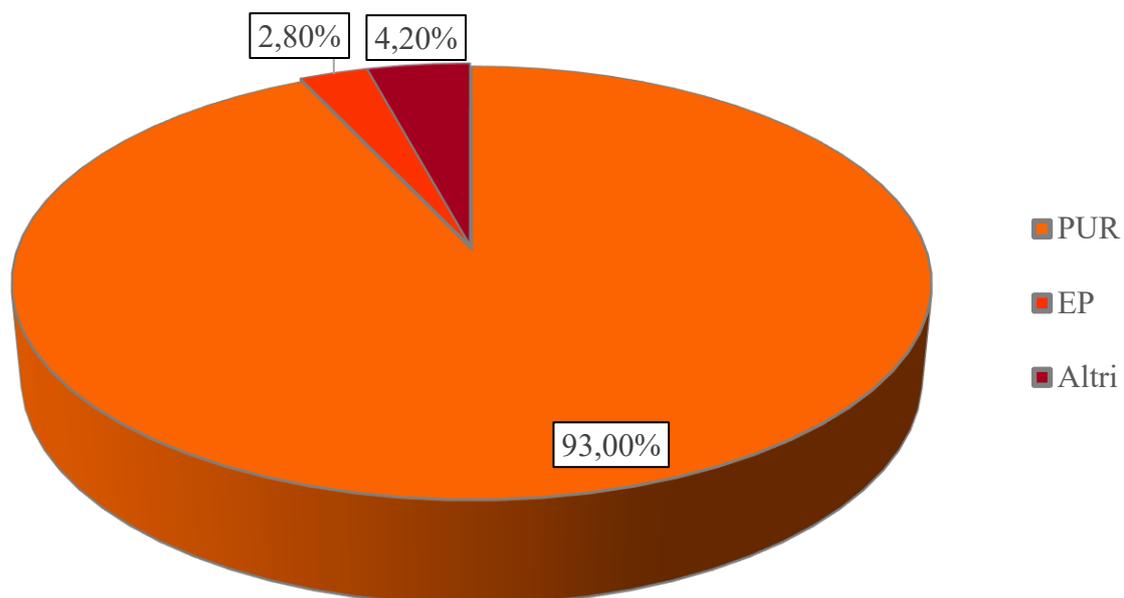
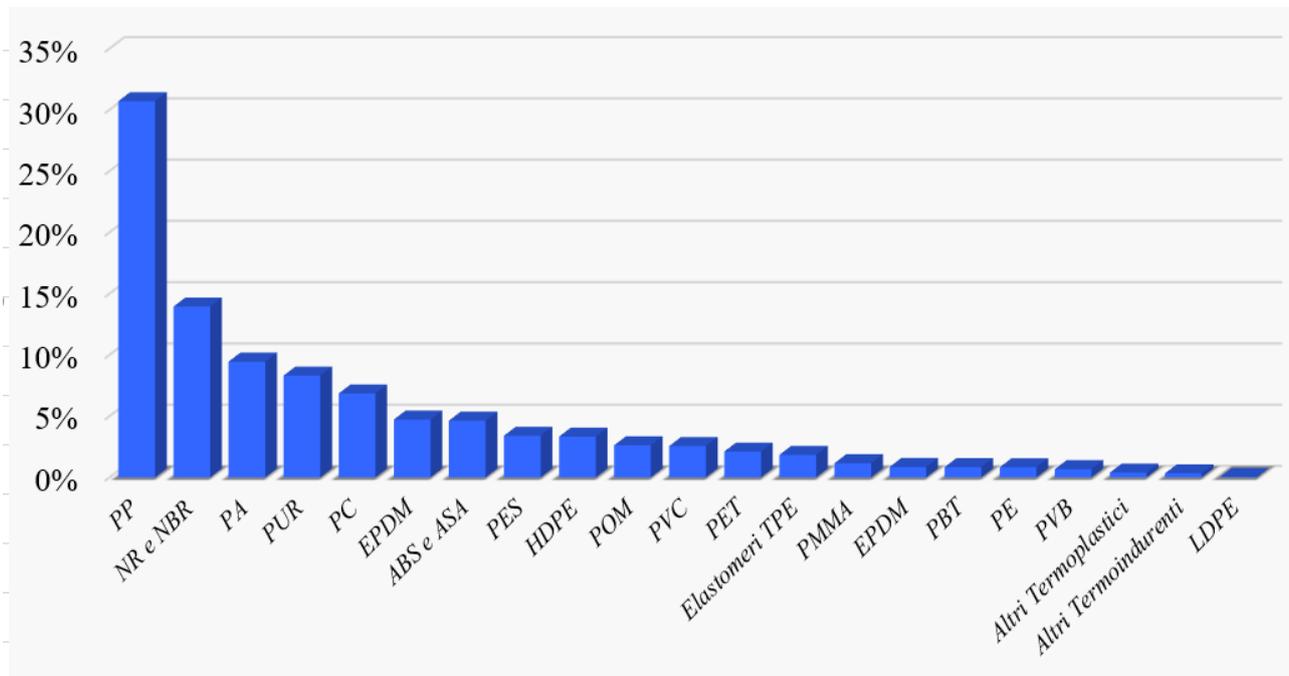


Figura 10 - Analisi della distribuzione dei polimeri termoindurenti di un veicolo del segmento B.

In [Figura 11](#) si riporta un ulteriore confronto fra i diversi polimeri presenti in un veicolo appartenente al segmento B. In tal caso si riescono a visualizzare al meglio i principali polimeri che contribuiscono per gran parte all'ammontare complessivo della plastica in un autoveicolo del segmento sopra citato.



*Figura 11 - Percentuali in peso dei singoli polimeri in un veicolo del segmento B.*

A colpo d'occhio risulta chiaro come tra i polimeri più utilizzati, escludendo quelli derivanti dagli pneumatici, ci siano il polipropilene e la poliammide. Il loro essere termoplastici e con un ottimo margine di riciclabilità fa capire come investire nel migliorare tale pratica potrebbe avere grandi riscontri positivi in ottica gestione alternativa e maggiormente ottimale del car fluff.

## 4. Possibilità di recupero da veicoli a fine vita

A partire dall'analisi eseguita dei principali materiali costituenti il car fluff risulta chiaro come, per riuscire ad avvicinarsi ai target dettati dalla normativa, bisogna investire nel recupero e nel riciclaggio delle frazioni plastiche. In questo capitolo verranno analizzati due approcci differenti aventi entrambi come scopo il raggiungimento di tale obiettivo. In entrambi i casi le valutazioni sono state possibili grazie alla collaborazione del Centro Recupero e Servizi di Settimo Torinese (TO). La prima valutazione eseguita ha avuto come scopo la ricerca di ulteriori potenziali componenti riciclabili ricavati tramite smontaggio preventivo all'ingresso in impianto di frantumazione del veicolo fuori uso. Per portare avanti tali considerazioni si sono valutati inizialmente i livelli di fattibilità teorici a partire da parametri quali il peso, il numero di sub-componenti e i materiali costituenti i vari componenti. Eseguendo prove di smontaggio in campo successivamente è stato possibile attribuire nuovi valori ai livelli di fattibilità basati anche sul tempo richiesto per tale operazione. In particolare, nella seconda prova ci si è concentrati su parti costituite principalmente da materiali polimerici, cercando di capire se fosse possibile estendere la pratica del recupero ad altre componenti oltre quelle attualmente considerate. Infine, per i componenti aventi un buon potenziale si è valutato un metodo innovativo che consentirebbe il riciclaggio. Tale metodo, sfruttando le proprietà del grafene, permetterebbe di conferire agli elementi riciclati proprietà paragonabili ai corrispettivi componenti in plastica vergine. Con il secondo approccio perseguito ci si è concentrati maggiormente sulla valorizzazione delle frazioni uscenti dall'impianto di frantumazione. Si sono valutate nel dettaglio le due frazioni di fluff uscenti attualmente dall'impianto, facendo riferimento ad un'analisi merceologica, due differenti analisi densimetriche e valutando la composizione dei polimeri dei campioni. A partire dai dati raccolti si è cercato di capire se fosse possibile produrre merci composte da plastica riciclata estratta da campioni di car fluff. Successivamente, per la restante parte di fluff, si è valutata la possibilità di utilizzo come CSS "combustibile solido secondario" da sfruttare nell'impianto di incenerimento dei rifiuti solidi urbani di Torino.

## 4.1 Valutazione di fattibilità

La fase di valutazione delle componenti plastiche riciclabili è stata pensata e sviluppata cercando di massimizzare il vantaggio economico ottenibile da un'azienda demolitrice e quindi evitando possibili perdite economiche. Attualmente si considera accettabile la rimozione in ottica riciclo solo per i pezzi aventi peso consistente e tempi di lavorazione bassi. Questi criteri sono verificati ad esempio per componenti quali serbatoi, pneumatici e paraurti che garantiscono il raggiungimento di un buon grado d'efficienza per quel che concerne l'operazione di smontaggio. Tenendo conto di quanto detto finora si sono considerati tre fattori cruciali per la ricerca di nuovi elementi plastici potenzialmente assoggettabili a riciclo, ovvero il peso, la complessità e l'eterogeneità del materiale. Per quanto riguarda il peso dei componenti, associabile ovviamente al volume complessivo degli stessi, vale la regola generale secondo la quale un maggiore quantitativo di materiale riciclato comporta un maggiore ritorno economico finale. Per questo motivo in una fase di valutazione di fattibilità non ci si può astenere dal valutare tale parametro. Per avere un quadro chiaro della situazione, in una fase iniziale, si sono considerate tutte le parti aventi un peso maggiore di duecento grammi. Il secondo aspetto di cui bisogna tener conto è la complessità legata ai pezzi che dovranno essere soggetti a riciclaggio. In funzione dello scopo possono essere presenti diversi elementi, come rivestimenti, fissaggi o parti strutturali. Maggiore è la loro presenza tanto più possono risultare complesse le fasi prima di smontaggio e poi di riciclaggio, portando quindi tale scelta ad essere non conveniente e quindi non perseguita. La presenza di diversi sub-componenti è strettamente correlata con il terzo fattore sul quale si basa l'analisi ovvero l'eterogeneità dei materiali costituenti l'elemento. Normalmente la presenza di più sub-componenti è sintomo di coesistenza fra diversi materiali. Tra questi, inoltre, molto spesso si possono ritrovare plastiche composte da più tipologie di polimeri. Tale situazione ovviamente rende più difficoltosa la fase di riciclaggio in quanto risulterà necessaria una separazione preventiva al trattamento vero e proprio. Sulla base dei criteri descritti, per ogni componente riportata nella tabella successiva, si è sviluppata la valutazione che ha permesso di individuare il corrispettivo livello di fattibilità. Tale livello lo si è impostato stabilendo un numero da uno a quattro, dove con uno si identifica un elemento facilmente ricavabile mentre con quattro un elemento poco propenso alla riciclabilità. In modo particolare, per il numero di sub-componenti, si è ritenuto un numero minore di dieci abbastanza piccolo da poter essere considerato accettabile. Superata questa soglia tale parametro lo si è considerato problematico se non addirittura critico lì dove risulti essere molto maggiore di dieci. Come osservabile e prevedibile fra le componenti più propense alla fase di smontaggio e riciclo si trovano quelle già precedentemente nominate, ovvero serbatoi, pneumatici e paraurti. A queste si aggiungono coppe ruote, manicotto radiatore, riparo sole e guarnizioni quindi elementi facilmente raggiungibili e poco eterogenei. Le coppe ruote, così come

le guarnizioni, sono immediatamente raggiungibili infatti basterà staccarle richiedendo un tempo minimo di azione. Per quanto riguarda invece il riparo sole non prevede difficoltà di sorta per la fase di smontaggio anche se il profitto che se ne trae è minore visto il peso ridotto del componente. È stato assegnato il livello di affidabilità due a componenti che mediamente tendono ad essere facilmente raggiungibili, in quanto collocate esternamente all'autovettura, ma sono caratterizzati da un peso esiguo o un numero rilevante di sub-componenti. Tra queste si trovano elementi quali la vaschetta della batteria, le cinture di sicurezza, il batticalcagno e le cappelliere. Infine, le parti a cui è stato dato un livello pari a tre o addirittura a quattro sono quelle molto eterogenee dal punto di vista dei materiali e polimeri, caratterizzate da un alto numero di componenti e difficilmente smontabili in tempi accettabili. Tali caratteristiche, tipiche di elementi quali il mobiletto centrale, l'airbag o i sedili, rendono poco vantaggioso il riciclo su vasta scala e portano così ad una scelta più indirizzata allo smaltimento.

Tabella 16 – Indicazione del livello di fattibilità per i diversi componenti auto.

Componenti	Peso [g]	Sub-componenti	Materiali	Fattibilità
<i>Airbag</i>	1100	>> 10	Metalli, PA	4
<i>Vaschetta batteria</i>	120	< 10	PP, PVC	2
<i>Cinture di sicurezza</i>	1800	> 10	Metalli, PET, POM	2
<i>Pannello porta</i>	3000	> 10	PP, PVC	3
<i>Maniglia</i>	700	> 10	PA, Metalli	3
<i>Batticalcagno</i>	300-500	< 10	PP	2
<i>Guarnizione cristalli</i>	1000	< 10	PP, EPDM	2
<i>Guarnizione porte</i>	1200	< 10	EPDM, Metalli	1
<i>Guarnizione raschiavetro</i>	200	< 10	PP, EPDM	2
<i>Manicotto radiatore</i>	200	< 10	EPDM	1
<i>Serbatoio</i>	8300	< 10	HDPE, PE	1
<i>Serbatoio lavacrystalli</i>	600	> 10	PE	3
<i>Riparo vano ruote</i>	700-900	< 10	PP	2
<i>Passaruota</i>	500	< 10	POM, PES	2
<i>Fanaleria</i>	1000-2000	>> 10	PA, PP, PC, ABS	4
<i>Sedili</i>	58000	>> 10	PUR, PES, PP, PA	4
<i>Coppa ruota</i>	2100	< 10	PP, ASA	1
<i>Paraurti</i>	4000-9000	> 10	PP, PC-ABS, PMMA	1
<i>Cappelliera</i>	1500	> 10	PP, PA	2
<i>Battivaligia</i>	580	< 10	PP, POM	2
<i>Pillar</i>	200-600	< 10	PP/PMMA	2
<i>Riparo sole</i>	240	< 10	HDPE, PVC	1
<i>Mostrina presa aria</i>	700-1000	< 10	PP, TPV	3
<i>Mobiletto centrale</i>	1000	< 10	PP	3
<i>Filtro aria</i>	1500	>10	PP, M.O.N.	3

## 4.2 Prove di smontaggio presso il CRS

L'analisi teorica relativa ai livelli di fattibilità ha permesso una valutazione preliminare su quali potrebbero essere i componenti potenzialmente gestibili per il riciclo. Tramite una prova presso il CRS è stato possibile eseguire due prove di smontaggio direttamente in campo. Tale operazione è stata eseguita con lo scopo di verificare l'attendibilità delle valutazioni sviluppate finora, permettendo il confronto dei materiali costituenti i componenti analizzati. Un altro aspetto indagato durante le prove è stato il tempo di smontaggio relativo ai vari elementi, tale parametro infatti incide in maniera diretta sulla sostenibilità economica dell'operazione. Le due prove sono state svolte a partire da due veicoli differenti ma entrambi appartenenti al segmento B in modo tale da rendere confrontabili i risultati.

### 4.2.1. Prima prova di smontaggio

L'idea iniziale dietro la prima prova effettuata è stata quella di analizzare tutte le componenti finora viste, rilevando tempi, pesi ed eventuali problemi legati allo smontaggio. È stato possibile però effettuare solo un'analisi parziale a causa della complessità legata alla separazione di alcuni elementi e alla mancanza di una bilancia in loco. Lo sviluppo di tale prova nel dettaglio è descritto nello studio "Analisi di materiali plastici da autoveicoli a fine vita" [18]. A partire dai dati rilevati si è eseguito nuovamente lo studio di fattibilità aggiornando alcuni livelli sulla base delle difficoltà riscontrate durante la prova. Come già anticipato, il tempo di smontaggio è stato un fattore cruciale nella scelta dei livelli. La durata ottimale in tal senso la si è valutata al di sotto dei due minuti questo perché, se si superasse tale soglia, l'operazione inciderebbe negativamente sulla realizzazione su vasta scala. Ci sono stati parti soggette a miglioria di giudizio come le cinture di sicurezza e il filtro dell'aria. Per le prime si è stabilito un livello pari ad uno grazie all'estrema velocità di smontaggio, vista la sola necessità di tagliare la fibbia, nonché al fatto che la parte metallica interna risulta removibile con facilità in una fase successiva. Anche il filtro dell'aria, con la sua copertura, è risultato essere fra i migliori in ottica riciclo vista l'agevolezza ed i tempi di smontaggio dovuti unicamente alla necessità di smontare un paio di viti fissanti. D'altro canto, si è dovuto modificare in negativo il livello relativo ad alcuni elementi quali il pannello porta, la cappelliera ed il riparo sole. Nello specifico per il pannello, già problematico vista la moltitudine di materiali, si sono riscontrate difficoltà aggiuntive legate alla rimozione della maniglia. Gli ultimi due elementi risultano essere più critici del previsto principalmente a causa della loro composizione multimateriale oltre che del peso esiguo. Si riportano in [Tabella 17](#) i nuovi livelli di fattibilità definiti post prova di smontaggio.

Tabella 17 – Livelli di fattibilità derivanti dalla prima prova di smontaggio.

Componenti	Tempo [s]	Procedura	Fattibilità
<i>Cinture di sicurezza</i>	30	Tirare e tagliare	1
<i>Pannello porta</i>	180	Svitare le viti e tirare il pannello	4
<i>Maniglia</i>	60	Svitare	3
<i>Batticalcagno</i>	50 - 300	Svitare la vite e sbloccare il componente	2
<i>Guarnizione cristalli</i>	55	Strappare la guarnizione	2
<i>Guarnizione porte</i>	15	Strappare la guarnizione	1
<i>Serbatoio lavacristalli</i>	240	Togliere prima paraurti e passaruota	3
<i>Passaruota</i>	150	Svitare le viti e rimuovere	2
<i>Fanaleria</i>	-	Necessaria rimozione di paraurti e altro	4
<i>Sedili</i>	210 - 540	Svitare le viti e dislocare i sedili	4
<i>Coppa ruota</i>	10	Staccare il componente	1
<i>Cappelliera</i>	1	Sganciare	3
<i>Pillar</i>	10 - 60	Sganciare agganci cintura e strappare	2
<i>Riparo sole</i>	2	Tirare il componente	3
<i>Mostrina presa aria</i>	120	Rimuovere tergicristallo e strappare	3
<i>Mobiletto centrale</i>	90	Svitare tre viti e rimuovere	3
<i>Filtro aria e Copertura</i>	10 - 40	Svitare due viti della copertura e rimuovere	1

#### 4.2.2. Seconda prova di smontaggio

Gli obiettivi che hanno guidato lo svolgimento della seconda prova di smontaggio sono stati leggermente differenti rispetto a quelli della prima. In particolare, sono stati indagati esclusivamente componenti costituiti da polimeri termoplastici, nello specifico polietilene, polipropilene e poliammide. È stata effettuata tale scelta in quanto i termoplastici risultano essere i più gestibili in ottica riciclo, vista la possibilità di lavorarli incrementando la temperatura. I componenti sui quali si è agito sono stati, oltre serbatoio e paraurti anteriore, parti facilmente raggiungibili come i passaruota, i batticalcagni, i montanti interni all'auto e il filtro dell'aria. In una fase iniziale precedente alla bonifica del veicolo, inoltre, si sono rimosse le coppe ruota e la vaschetta della batteria.

La prima operazione eseguita è stata proprio l'apertura del cofano che ha permesso di rimuovere facilmente la vaschetta della batteria.



*Figura 12 - Vaschetta della batteria.*

Successivamente si sono distaccate le quattro coppe ruota risultate agevolmente accessibili e caratterizzate da un basso tempo di rimozione.



*Figura 14 - Coppe ruote.*



*Figura 13 - Ruote rimosse.*

Si è continuato operando la bonifica dell'autovettura, posizionando, tramite muletto, la stessa su di un ponte per poi procedere nella rimozione del carburante residuo tramite un taglio al serbatoio.



*Figura 15 - Posizionamento sul ponte.*

Come fase ultima legata alla bonifica si è distaccato il serbatoio, costituito principalmente da polietilene, per il quale si è riscontrata qualche difficoltà legata alla rimozione della marmitta.



*Figura 16 – Serbatoio.*

Altra operazione complicata è stata l'allontanamento del paraurti anteriore, per il quale è stato necessario prima rimuovere le viti fissanti e poi forzare la separazione del pezzo stesso.



*Figura 17 - Paraurti anteriore.*

Una volta rimosso il paraurti è stato possibile accedere ai passaruota anteriore e posteriore. Per entrambi non si sono riscontrati problemi di sorta visto che è solamente bastato rimuovere un paio di viti prima di rimuovere il pezzo.



*Figura 18 - Passaruota anteriore destro.*

A questo punto si è riposizionato il veicolo per terra, allontanandolo dal ponte, permettendo di accedere e successivamente rimuovere il filtro dell'aria. Questa operazione è risultata essere particolarmente semplice in quanto è servito unicamente svitare un paio di viti.



*Figura 19 - Rimozione del filtro dell'aria.*

Si è continuata l'operazione di smontaggio iniziando ad operare sulle parti interne del veicolo. Per prima cosa sono stati rimossi i batticalcagni, operazione abbastanza rapida che ha richiesto unicamente lo svitamento di qualche vite fissante.



*Figura 20 - Rimozione del batticalcagno.*

Successivamente si è deciso di analizzare la rimozione dei montanti. Per quanto riguarda il montante anteriore e quello centrale non si sono riscontrate difficoltà di alcun tipo in quanto l'unica operazione preventiva da effettuare è il taglio delle cinture di sicurezza.



*Figura 21- Montante anteriore.*



*Figura 22 - Montante centrale.*

La rimozione del montante posteriore è stata invece decisamente più complessa in quanto l'accesso a tale componente ha richiesto l'accesso dal portellone posteriore. L'apertura del portellone è stata un'operazione critica e dispendiosa in quanto a tempo visto che si è reso necessario l'utilizzo del muletto a causa dell'assenza della chiave. Questo aspetto va tenuto in considerazione se si pensa allo svolgimento di uno smontaggio su larga scala in quanto è un problema che potrebbe presentarsi comunemente.



*Figura 23 - Apertura del portellone posteriore.*



*Figura 24- Montante posteriore.*

In [Tabella 18](#) si riporta un sunto dei risultati ottenuti dalla prova di smontaggio e un'ulteriore valutazione in merito ai livelli di fattibilità.

*Tabella 18 - Livelli di fattibilità derivanti dalla seconda prova di smontaggio.*

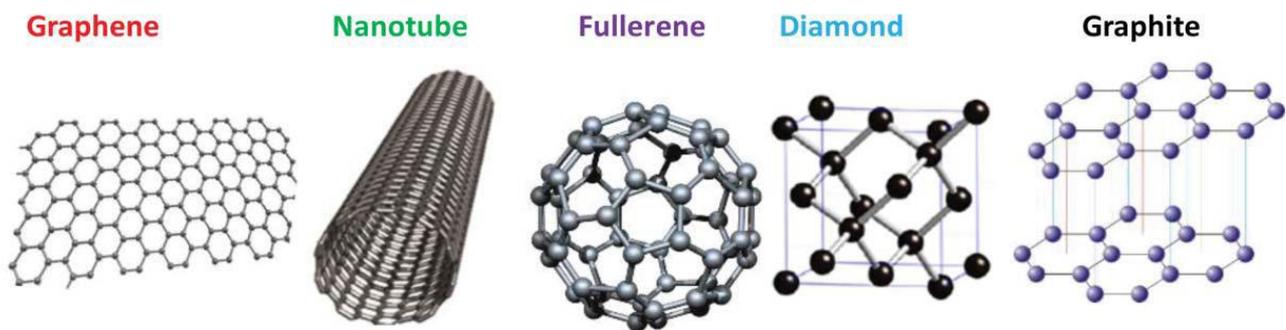
Componenti	Tempo [s]	Procedura	Fattibilità
<b><i>PE</i></b>			
<i>Serbatoio</i>	600	Bonifica iniziale del veicolo	1
<b><i>PP</i></b>			
<i>Paraurti anteriore</i>	1200	Svitare le viti e sbloccare componente	1
<i>Passaruota anteriore dx</i>	60	Svitare le viti e rimuovere	2
<i>Passaruota posteriore dx</i>	60	Svitare le viti e rimuovere	2
<i>Batticalcagno anteriore sx</i>	50	Svitare le viti e rimuovere	2
<i>Montante anteriore sx</i>	40	Svitare le viti e staccare	1
<i>Montante centrale sx</i>	40	Svitare le viti e staccare	1
<i>Montante posteriore sx</i>	480	Apertura portellone e rimozione	4
<i>Filtro aria</i>	80	Svitare le viti e rimuovere	1
<i>Vaschetta batteria</i>	60	Apertura cofano e rimozione	2
<b><i>PA</i></b>			
<i>Coppe Ruote</i>	30	Staccare il componente	1

### 4.3 Il riciclo dei polimeri

Le soluzioni che permettono il recupero ed il riciclo di cui si tiene più considerazione nel trattamento dei rifiuti plastici provenienti dal settore dei veicoli a fine vita sono il riciclo a materia prima e il recupero energetico ma per entrambe bisogna considerare i rispettivi problemi. Il riciclo risulta essere una scelta tutt'altro che ottimale visto il mix di polimeri ottenuti come rifiuto in uscita dagli impianti di trattamento, non assoggettabili a separazione meccanica. Per quanto riguarda la valorizzazione energetica, invece, è una scelta fortemente rallentata a causa delle normative vigenti in materia e alle politiche degli impianti di incenerimento. A questi problemi, si aggiunge un altro fattore che impatta negativamente l'ottimizzazione del riciclo dei rifiuti plastici ovvero l'utilizzo sempre maggiore di materiali compositi. Una buona parte della plastica la si ritrova sotto forma di compositi in quanto, grazie a tali soluzioni, si riescono a combinare le qualità di diverse classi di materiali. In generale, per quel che riguarda i polimeri, tramite l'aggiunta di filler si riescono ad ottenere compositi con caratteristiche quali leggerezza, resistenza a corrosione e lavorabilità ma anche proprietà meccaniche migliorate. In funzione della miglioria che si vuole attribuire ai materiali è possibile utilizzare diversi filler come idrossido di alluminio, talco, fibre di vetro o sfere costituite da leghe metalliche. I compositi plastici ad oggi in commercio sono materiali multifase costituiti da una matrice in resina, termoplastica o termoindurente, a cui è associata uno o più filler e alle volte anche fibre rinforzanti. L'innesto di tali materiali a sfavore di componenti metalliche ha contribuito positivamente nell'alleggerimento dei veicoli nel tempo ed al raggiungimento di target di emissioni inferiori. Nonostante questo, l'eterogeneità caratterizzante i compositi ha reso ancora più complessa la gestione dei rifiuti legati ai veicoli a fine vita, complicando le operazioni perseguite per garantire il riciclo di tale categoria di materiale. Le metodologie di riciclo utilizzabili su questi materiali multifase possono essere a base meccanica, termica o chimica [20]. Da un punto di vista economico il metodo applicabile su vasta scala è il riciclo meccanico che prevede prima una fase di frantumazione e granulazione e poi la realizzazione di composti con stampaggio. I compositi rigranulati dovrebbero essere utilizzati come filler applicati ad una nuova matrice ma questo comporta cali drastici nelle prestazioni rispetto al materiale vergine. Questo aspetto, unito a alla mancanza di un reale vantaggio economico dell'operazione, porta a non trovare una soluzione alla necessità ambientale di riciclare i materiali plastici [21]. Considerando filler alternativi è stata preso in considerazione l'utilizzo del grafene in quanto potrebbe risolvere i problemi legati al recupero di compositi, favorendo al tempo stesso il riciclo dei componenti plastici.

### 4.3.1. Grafene e compositi polimerici

Il grafene risulta costituito da uno strato monoatomico di atomi di carbonio che si dispongono fino a formare una serie di esagoni regolari. È la forma del carbonio scoperta più di recente, nel 2004 per la precisione, e si va ad aggiungere alla lista di allotropi già noti quali il diamante, la grafite, il fullerene e i nanotubi. In funzione di come si vanno a disporre gli atomi di carbonio si ottengono forme con proprietà di molto differenti l'una dall'altra. Una struttura tetraedrica come quella del diamante comporta caratteristiche quali un'estrema durezza e alta conducibilità termica. Al contrario la grafite risulta essere un ottimo conduttore elettrico e una forma particolarmente morbida in quanto costituita da anelli esagonali fusi assieme. I nanotubi di carbonio identificabili grazie alla loro struttura unidimensionale a cilindro sono particolarmente resistenti a trazione. Infine, nel fullerene sono costituite da atomi di carbonio che vanno a formare strutture di forma sferica che rendono tale allotropo poco reattivo e insolubile in gran parte dei solventi.



*Figura 25 - Allotropi del carbonio.*

Il grafene, grazie alla sua struttura bidimensionale, risulta avere proprietà molto simile a quelle di un metallo conduttore in quanto l'elettrone libero e la struttura esagonale garantiscono un'elevata conducibilità elettrica. A questa caratteristica peculiare si aggiungono discrete proprietà termiche, ottiche e meccaniche oltre che elevata superficie specifica e resistenza alla corrosione. Visti tutti questi aspetti positivi il grafene è stato preso fortemente in considerazione negli ultimi anni per svariate applicazioni quali il campo dell'energia e applicazioni elettroniche.

Il singolo strato di grafene finora descritto risulta essere la forma più pura e migliore che si possa utilizzare per quel che concerne le proprietà. Nonostante questo, usualmente si attribuisce il nome di grafene ad una varietà più ampia di materiali aventi gradi di purezza inferiore, il cui spessore è anche più di un foglio di atomi di carbonio o con strutture parzialmente amorfe. In tal senso il grafene lo si può trovare in varie forme quali nanonastri costituiti da strisce sottili di grafene, fiocchi ottenuti da scaglie di grafene mono-strato, nanopiastrine e ossido di grafene ovvero foglio costituiti da particelle di carbonio, ossigeno e idrogeno. Le varie tipologie di materiale sono caratterizzate da diversi strati e generalmente il costo di produzione tende ad aumentare all'abbassarsi di tale numero. Il rapporto

costo/proprietà migliore lo si riscontra quando il numero di strati oscilla fra i tre e i dieci. La produzione che permette di ottenere le varie forme di grafene si basa su tecniche diverse fra cui la riduzione dell'ossido di grafene, l'espansione della grafite, l'esfoliazione in fase liquida e l'esfoliazione elettrochimica ed esfoliazione plasmatica [22] [23] [24] [25] [26]. Il grafene potrebbe impattare positivamente il mercato dei compositi plastici applicati al settore dei veicoli a fine vita anche per quel che riguarda il problema della riciclabilità. Per i compositi classici si è visto come il trattamento finale risulti essere una fase critica principalmente a causa delle percentuali non indifferenti di filler. Inoltre, le operazioni meccaniche applicabili al materiale comportano il danneggiamento dello stesso e quindi rendono meno performante il filler recuperato. Col grafene si riuscirebbero a produrre dei nanocompositi con migliorie importanti per quel che concerne le proprietà utilizzando piccole quantità di nanofiller. Vari studi dimostrano come con cariche minori del 5% in peso di grafene si possono raggiungere le proprietà richieste, ottimizzando non solo i processi di riciclo e recupero di materia successivi ma anche i costi iniziali di produzione. Viste le sue caratteristiche e dimensioni il grafene non subirebbe alterazioni durante il riciclo, portando ad un tasso di recupero decisamente maggiore e all'incremento dell'efficienza complessiva delle operazioni. Alcuni studi effettuati su compositi ottenuti utilizzando il grafene dimostrano come, anche piccole quantità di tale materiale, permettono miglioramenti da un punto di vista meccanico, termico ed elettrico. Per quanto riguarda il polietilene ad esempio, si sono ottenute notevoli migliorie di conduttività e modulo di trazione tramite l'aggiunta di circa il 5% in peso di ossido di grafene ridotto termicamente (TRG) [27]. Un altro studio, sempre a partire da una matrice di polietilene, ha messo a confronto l'applicazione di due nanofiller ovvero nanofogli di grafene (GNs) e nanotubi di carbonio (CNTs). I risultati dimostrano come all'aumentare delle cariche di filler siano migliorate alcune proprietà termiche come stabilità e decomposizione nonché alcune proprietà meccaniche fra cui la resistenza a trazione [28]. Sul polipropilene, il più presente sui veicoli come osservato nei capitoli precedenti, sono stati eseguiti altri studi significativi aggiungendo varie forme di nanofiller di grafene. Nello specifico si è mescolata tale matrice polimero con ossido di grafene e ossido di grafene ridotto con diverse percentuali di carica. Anche in questo caso sono state registrate migliorie importanti in merito alla stabilità termica e proprietà meccaniche quali resistenza a trazione e modulo di Young [29]. Negli ultimi anni, vari studi hanno provato come l'utilizzo di questa tipologia di nanofiller comporti vantaggi in merito alle proprietà di svariati materiali plastici come i già citati polietilene e polipropilene ma anche polistirene, PMMA e poliammide. In generale si ha che l'utilizzo di grafene per la produzione di compositi plastici ridurrebbe il tasso di sostituzione riducendo l'utilizzo di materiale vergine per i nuovi cicli produttivi.

### 4.3.2. GrapheneUP<sup>®</sup> e prove su plastica recuperata

È stato possibile scendere maggiormente nel dettaglio in merito alle prestazioni dei compositi con grafene grazie alla collaborazione con l'azienda GrapheneUP<sup>®</sup>. Tale società si occupa di produzione e distribuzione di tecnologie e prodotti ottenuti a partire dal grafene con una capacità produttiva potenziale di circa 560 tonnellate l'anno. La particolarità di tale azienda è il metodo di produzione del grafene, flessibile e pensato per essere adattabile alle necessità senza rinunciare alla qualità della materia prima. Il prodotto è ottenuto tramite un'esfoliazione della grafite ottenuta facendo avvenire una reazione esotermica, con aggiunta di composti chimici e catalizzatori, che permette di ottenere del grafene con un grado di purezza elevato. Gli additivi utilizzati dipenderanno dallo scopo finale del materiale e dalla matrice con cui lo stesso andrà ad interagire. A partire dai dati forniti da GrapheneUP<sup>®</sup> si sono valutate le possibilità applicative del grafene per il riciclo dei polimeri termoplastici associabili al settore automotive. Noti i tempi di smontaggio degli elementi selezionati tramite la prova presso il CRS e la distribuzione di polimeri in un generico veicolo, si sono valutati i componenti potenzialmente più adatti al test del riciclo con grafene. A partire dalle analisi eseguite nei paragrafi precedenti si è deciso di verificare l'efficienza di tale soluzione su due elementi in particolare, il paraurti ed il serbatoio. La scelta di tali componenti è legata al peso degli stessi ed al materiale di cui sono composti, ovvero il polietilene ed il polipropilene. Questi due polimeri sono fra i più presenti nei veicoli e quindi, in caso le operazioni di riciclo risultassero efficienti, l'applicazione del grafene risulterebbe estendibile ad altri componenti. Ad esempio, osservando la [Tabella 18](#), si potrebbero ampliare le valutazioni eseguite a parti quali i montanti, i passaruota e le coppe ruote. Grazie all'ultima prova di smontaggio in campo presso il CRS è stato possibile prelevare due campioni di paraurti e serbatoio. Tali campioni sono stati inviati presso la sede operativa di GrapheneUP<sup>®</sup> e sono stati assoggettati a diverse prove per capire la potenziale efficacia di tale metodo di riciclo. Preventivamente all'esecuzione di queste i materiali hanno subito una serie di trattamenti di preparazione all'aggiunta del grafene per l'ottenimento dei compositi. Nello specifico come prima operazione si è andati a sminuzzare il polipropilene e il polietilene tramite uno shredder che ha permesso la riduzione dimensionale cercata. Successivamente, si è passati ad una fase di lavaggio, con una soluzione al 70% di toluene e il 30%, di p-xilene avente come obiettivo l'eliminazione delle impurità ancora presenti. I solventi aggiunti sono stati fatti evaporare a 110°C in forno sottovuoto prima di un'ulteriore fase di pulizia in cui i campioni sono stati fatti entrare in contatto con dell'acqua e poi lasciati in forno a 80°C per quattro ore. A questo punto il materiale è risultato essere in condizioni idonee per l'applicazione del grafene e l'ottenimento del composito, andando a realizzare nello specifico due tipologie di campioni. Il primo, nominato GA.066-1.1 è il campione ottenuto a partire dall'HDPE del serbatoio a cui è stata aggiunta dell'anidride maleica al 3% in peso come

compatibilizzante preventivamente essiccata a 105°C in forno. Per ottimizzare la miscelazione di tale materiale si è posta la miscela in un two roll mill con temperatura incrementale da 170°C a 190°C. In queste condizioni il polimero ha superato il melting point diventando una pasta viscosa a cui è stata aggiunto poco alla volta il grafene GUP fino ad una concentrazione dell'1% in peso. Per garantire l'omogeneizzazione del processo la fase di miscelazione si è protratta per novanta minuti circa. A questo punto si è lasciato raffreddare il tutto prima di andare a formare i campioni utilizzati per i test. Lo stesso iter produttivo è stato seguito per ottenere il campione GA.066-2.1, ovvero il composito ricavato a partire dal polipropilene del paraurti, in cui si è cambiato il compatibilizzante con il PPH-MAH al posto del HD-MAH. Grazie alla collaborazione con il professore Alberto Fina ed il team del DISAT su tali campioni sono state eseguite delle prove aventi come scopo la valutazione di alcune proprietà dei compositi ottenuti ed il confronto di queste con i polimeri originali. Per quanto si sia ancora in una fase sperimentale, già con queste prove in cui il contenuto di grafene risulta minimo, si sono registrati dei valori di alcune proprietà che si avvicinano ai parametri di riferimento dei polimeri vergini. Nonostante la necessità di scendere maggiormente nel dettaglio in tale trattazione, sulla base degli studi valutati ad inizio paragrafo e guardando i risultati ottenuti dai compositi analizzati, si può concludere che investire nel recupero di plastica tramite la realizzazione di compositi polimerici a base di grafene potrebbe essere una delle soluzioni valide al raggiungimento dei target normativi. Si riportano di seguito le prove eseguite per la caratterizzazione ed i relativi risultati.

## *Prova IR-ATR*

L'ATR ovvero la riflettanza totale attenuata permette, facendo penetrare della luce in un campione, di raccogliere dati in merito alla struttura di un determinato materiale. Tale tecnologia di campionamento rientra nella spettroscopia FTIR e consente l'analisi accurata di elementi liquidi e solidi indipendentemente dallo spessore e senza apportare modifiche alcune ai campioni. L'acronimo FTIR si rifà alla spettroscopia infrarossa a trasformata di Fourier ed una tecnica spettroscopica di assorbimento che permette di identificare la trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda. Il funzionamento dell'ATR si basa su l'invio di energia luminosa attraverso un sensore ottico trasparente alla frequenza impostata per ridurre al minimo l'assorbimento energetico di quest'ultimo. Il sensore stesso, avendo il compito di guida d'onda e dovendo permettere la riflessione interna dell'energia luminosa, è caratterizzato da un indice di rifrazione maggiore di quello del mezzo che lo circonda. Note le caratteristiche del sensore si potranno definire in maniera precisa il numero di nodi e quindi di riflessioni a cui si andrà incontro, determinando così la lunghezza complessiva di cammino. Tramite i nodi il materiale a contatto con il sensore viene investito dall'energia e quindi analizzato. L'esame del campione, ottenuto a partire da radiazioni modulate, permetterà di ricavare lo spettro i cui picchi si disporranno in maniera simile ad uno spettro trasmissione/assorbanza [30]. Tramite la prova IR-ATR si ottiene uno spettro infrarosso all'interno del quale è possibile individuare tre diverse zone, ovvero la zona dei gruppi funzionali, la zona delle impronte digitali e la zona del lontano IR. La prima permette di valutare i gruppi funzionali e quindi legami come N-H, O-H, C-H, C=C, C=O. La seconda zona prende tale nome perché qui vengono caratterizzate le singole molecole. Infine, la zona del lontano IR è legata allo stiramento degli atomi pesanti. Le varie vibrazioni percepite inoltre vengono distinte in funzione della loro origine. Se queste derivano dallo stiramento del legame chimico si parlerà di stretching, se varia l'angolo di legame si avrà il bending. Sia per lo stiramento che per la deformazione si potranno individuare fenomeni simmetrici o asimmetrici. Nel secondo caso in particolare se la deformazione avviene lungo il piano può essere simmetrica, si parlerà di scissoring, o asimmetrica, indicata con il termine rocking. Fuori dal piano in caso di simmetria si avrà il wagging mentre se c'è asimmetria si parlerà di twisting. Gli spettri FTIR-ATR sono stati registrati tramite l'utilizzo di un PerkinElmer Frontier a un numero d'onda tra 4000 e 400  $\text{cm}^{-1}$  e una risoluzione di 4  $\text{cm}^{-1}$ . Per ogni spettro sono state effettuate 16 scansioni. Si riportano nelle figure e nelle tabelle successivi i risultati ottenuti dalle prove eseguite sui campioni inviati a GrapheneUP<sup>®</sup>. Per entrambi i compositi polimerici si osservano comportamenti molto simili ai polimeri di riferimento ovvero il polietilene e il polipropilene [31].

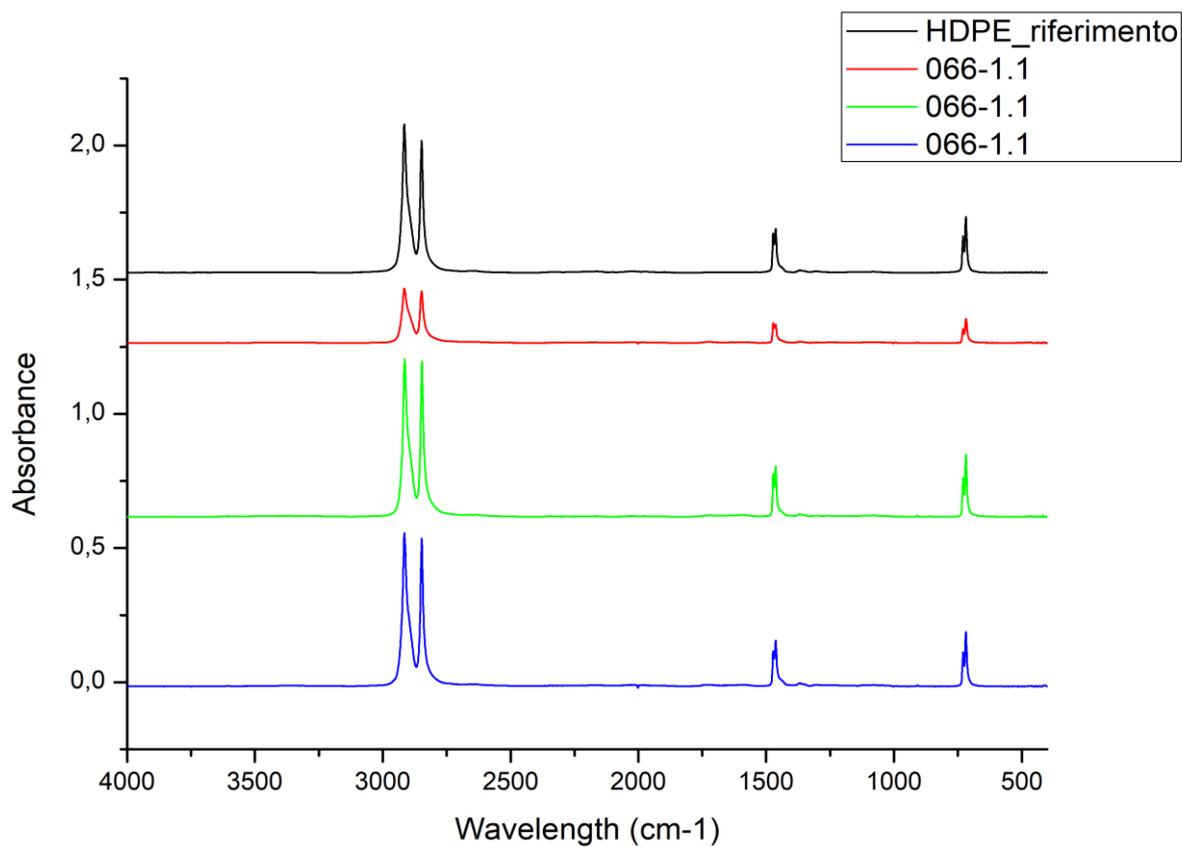


Figura 26 - Spettri IR del campione 066-1.1 in più punti e HDPE di riferimento.

Tabella 19 - Analisi dei compositi 066-1.1.

Lunghezza d'onda [cm <sup>-1</sup> ]	Modi vibrazionali
2914	CH stretching
2847	CH stretching
1472	CH <sub>2</sub> bending
1462	CH <sub>2</sub> bending
730	CH <sub>2</sub> rocking
719	CH <sub>2</sub> rocking

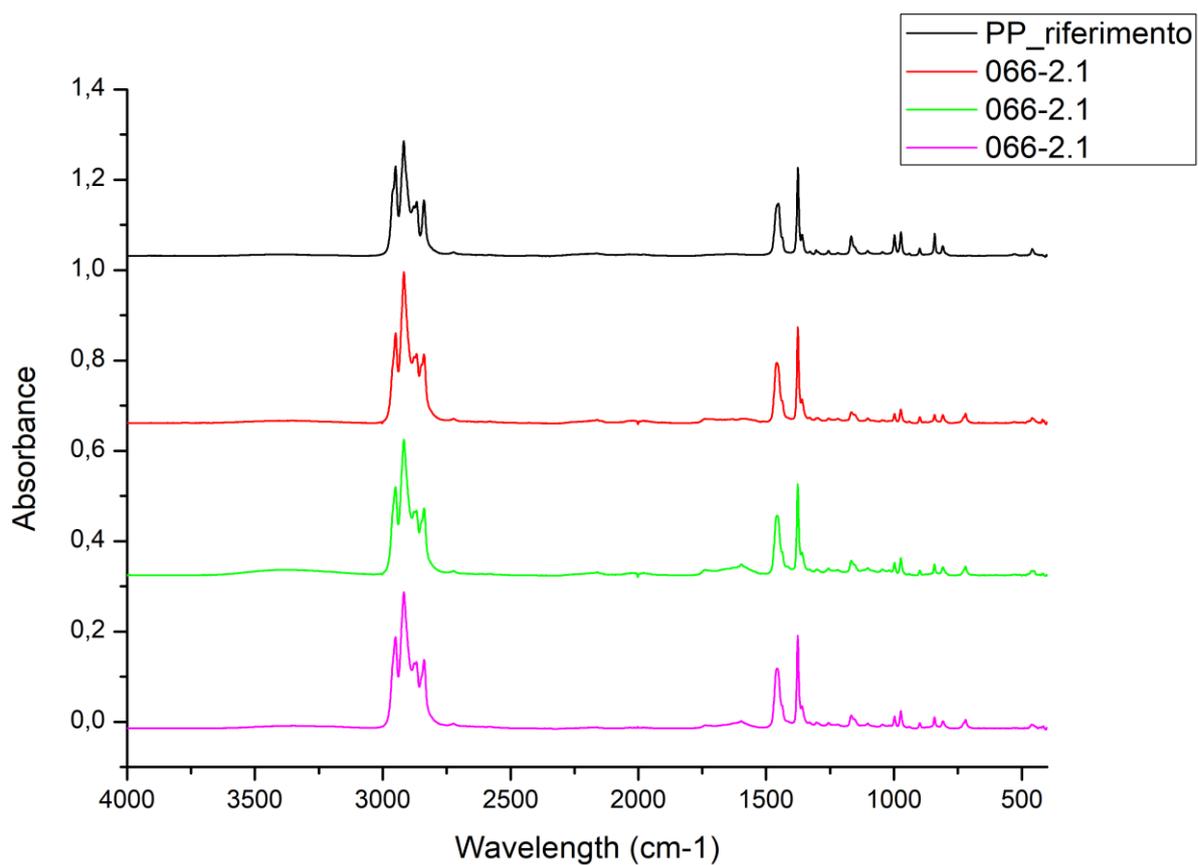


Figura 27 - Spettri IR del campione 066-2.1 in più punti e PP di riferimento.

Tabella 20 - Analisi dei compositi 066-2.1.

Lunghezza d'onda [cm <sup>-1</sup> ]	Modi vibrazionali
2950	C-H stretching
2917	C-H stretching
2838	C-H stretching
1457	CH <sub>2</sub> bending
1376	CH <sub>3</sub> bending
1167	CH bend, CH <sub>3</sub> rocking, C-C stretching
997	CH <sub>3</sub> rocking, CH <sub>3</sub> bending, CH bending
973	CH <sub>3</sub> rocking, C-C stretching
841	CH <sub>2</sub> rocking, C-CH <sub>3</sub> stretching
808	CH <sub>2</sub> rocking, C-C stretching, C-CH stretching

## Prova DSC

La calorimetria differenziale a scansione DSC è una tecnica di analisi termica che permette di caratterizzare vari materiali a partire da processi di riscaldamento e raffreddamento controllati. Con la DSC si analizza la differenza fra i flussi di calore fra il campione di cui si vuole eseguire la descrizione e uno di riferimento, al variare della temperatura secondo un programma predefinito. La presenza di un riferimento permette di valutare il flusso di calore, parametro non assoluto, indipendentemente dagli effetti termici esterni al sistema analizzato in quanto questi si ripercuotono egualmente sui due campioni [32]. Quando applicata a materiali polimerici tale prova permette di determinare parametri quali temperature di cristallizzazione  $T_c$  e di fusione  $T_m$ , entalpie di cristallizzazione  $H_c$  e fusione  $H_m$ , temperatura di transizione vetrosa  $T_g$  e grado di cristallinità  $X_c$ . Le analisi eseguite in condizioni dinamiche, come avviene in tale prova, sono fortemente condizionate dalle cinetiche scelte per l'esecuzione del test. In generale, più la velocità di scansione è bassa tanto più ci si avvicina alle condizioni di equilibrio termodinamico. Per garantire l'esecuzione di prove rappresentative e sensate si è operato con un DSC Q20, sfruttando una doppia rampa di temperatura da  $-50^\circ\text{C}$  a  $220^\circ\text{C}$ , incrementando di  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ . Il primo ciclo di riscaldamento non è stato considerato come affidabile visto che la storia del materiale potrebbe influenzare i parametri ottenuti alterando la veridicità dei risultati. Per questo i seguenti termogrammi sono relativi alla prova di raffreddamento e al secondo ciclo di riscaldamento e riguardano entrambi i campioni 066-1.1 e 066-2.1. Analizzando i dati ottenuti dalle prove si osserva come i picchi di cristallizzazione e fusione cadano a temperature tipiche rispettivamente dell'HDPE e del PP. Si può concludere quindi che il comportamento termico dei compositi realizzati è paragonabile ai materiali vergini di riferimento.

Tabella 21 - Risultati DSC.

	$T_c$ ( $^\circ\text{C}$ )	$H_c$ (J/g)	$T_m$ ( $^\circ\text{C}$ )	$H_m$ (J/g)
<i>Paraurti*</i>	125,4	49,2	166,4	44,1
<i>066-1.1</i>	111,6	164,3	133,1	120,1
<i>066-2.1</i>	122,2	67,4	165,1	60,7

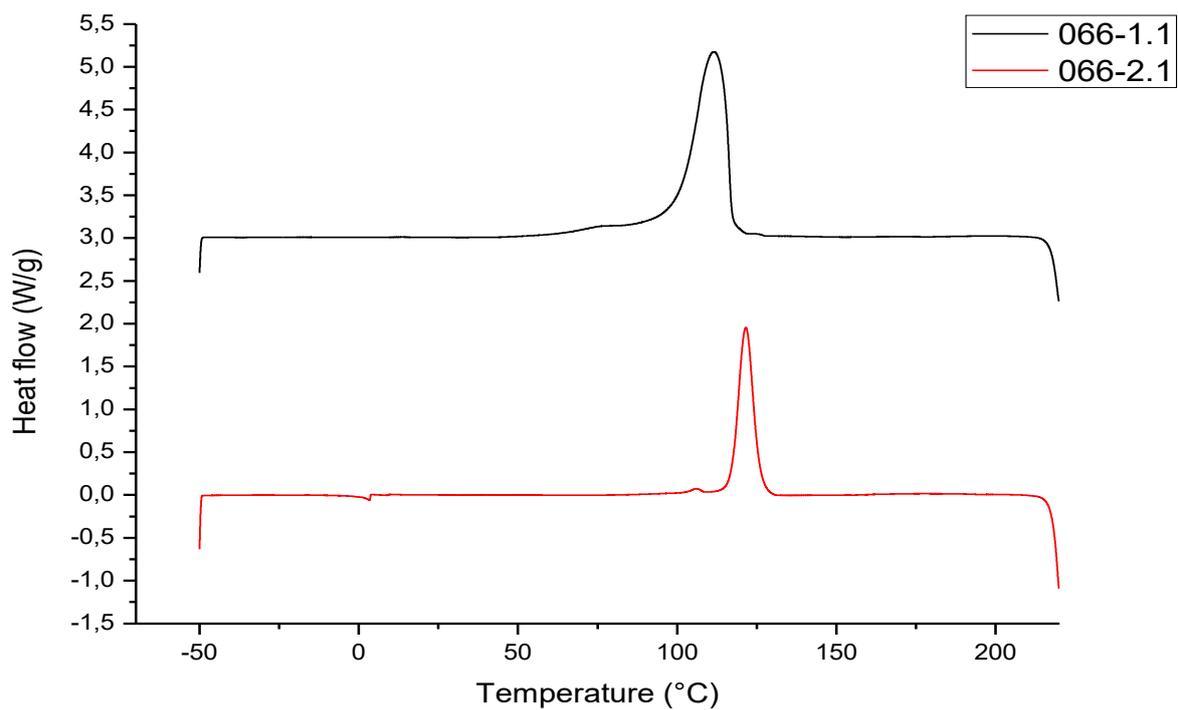


Figura 28 - Termogramma DSC relativo al ciclo di raffreddamento.

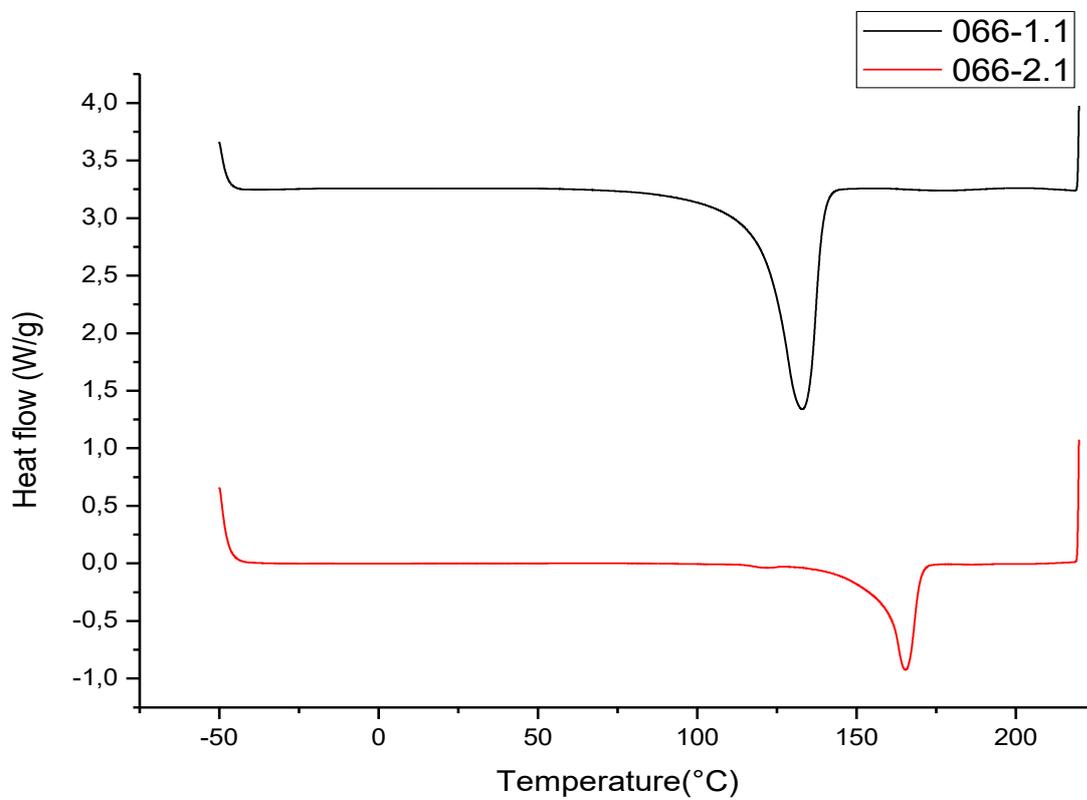


Figura 29 - Termogramma DSC relativo al secondo ciclo di riscaldamento.

## *Prova DMA*

L'analisi meccanica dinamica è una tecnica che permette l'analisi termica e la valutazione delle proprietà viscoelastiche di un materiale tramite l'applicazione di una forza oscillante a temperatura preimpostata. Nello specifico, con la prova eseguita, si sono determinati parametri quali i moduli di conservazione e di perdita rispetto a due condizioni di temperatura differenti. Valutando materiali viscosi e applicando uno stress sinusoidale nel tempo si registrerà una deformazione proporzionale alla durata della prova. Nei polimeri la differenza di fase fra la deformazione e lo sforzo dipenderà strettamente dal modulo di conservazione e dal modulo di perdita. Il primo permette di valutare l'energia immagazzinata durante il processo mentre il secondo l'energia dissipata in calore dovuta al comportamento viscoso. La parte centrale della strumentazione che permette di eseguire questa prova è costituita da due bracci o piatti grazie ai quali si applicano stress differenti quali azioni di compressione, taglio o torsione. In funzione dello scopo finale della prova si possono fare variare i principali parametri d'azione, ottenendo misure a frequenza costante e variando la temperatura o viceversa. L'analisi è stata eseguita partendo da un campione di dimensioni 17x6x1 mm, grazie ad una DMA Q800 TA Instruments fatta lavorare in un range di temperatura compreso tra i 30°C e i 140°C, con una rampa di riscaldamento di 3°C/min e con una frequenza di 1 Hz. Si riportano di seguito i risultati.

*Tabella 22 - Risultati DMA.*

	<b>Storage modulus (T=30°C)</b>	<b>Storage modulus (T=135°C)</b>	<b>Loss modulus (T=30°C)</b>	<b>Loss modulus (T=135°C)</b>
<i>Paraurti</i>	1167	165	99	30
<i>066-1.1</i>	1032	34	138	8,6
<i>066-2.1</i>	869	156	50	17,5

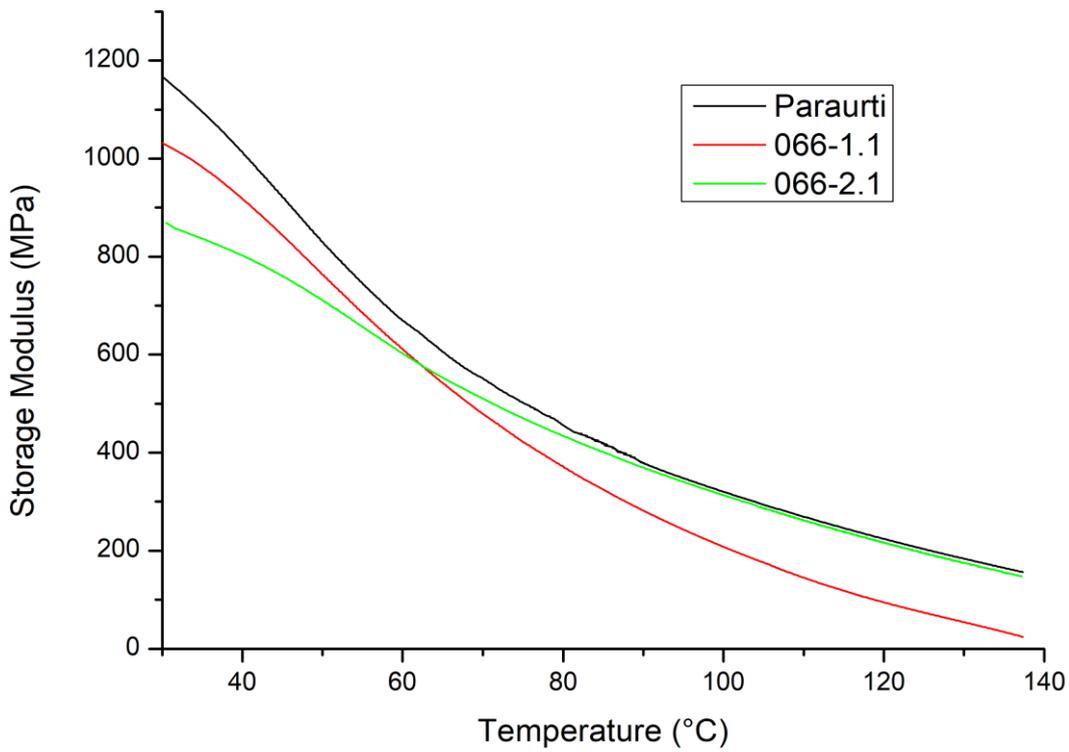


Figura 30 - Modulo di conservazione in funzione della temperatura.

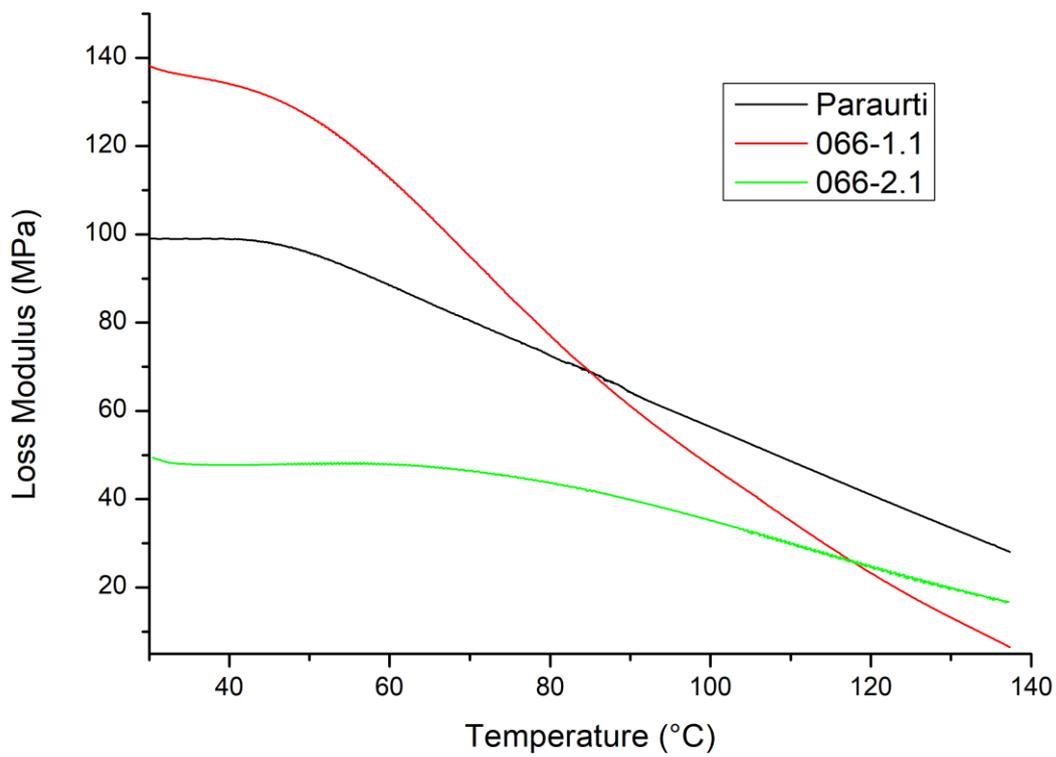


Figura 31 - Modulo di perdita in funzione della temperatura.

### *Prova di trazione*

La prova di trazione permette la caratterizzazione di un materiale tramite l'applicazione di un carico monoassiale su un provino con dimensioni standard fino a rottura di quest'ultimo. Le principali caratteristiche ricavabili da tale prova sono la resistenza meccanica, il modulo di Young, il carico unitario di snervamento e l'allungamento percentuale. Durante l'esecuzione della prova si misurano come variano nel tempo i valori del carico applicato e della lunghezza del provino, ottenendo le informazioni che permettono di costruire un diagramma carico-lunghezza. In realtà, per permettere una valutazione del test indipendente dalle geometrie dei provini, ci si rifà a parametri quali lo sforzo  $\sigma$  e la deformazione  $\epsilon$  riportati successivamente nel diagramma sforzi-deformazioni (stress-strain curve). Generalmente, durante l'evoluzione della prova si potranno andare a distinguere diversi comportamenti del materiale testato. Inizialmente si ha una fase elastica in cui deformazione e sforzo sono dipendenti linearmente secondo la legge di Hooke. La fase elastica perdura fino al raggiungimento del punto di snervamento oltre il quale il materiale assume un comportamento plastico. Valutato lo snervamento si procede con l'applicazione del carico fino a rottura rispetto alla quale si registrano i valori di riferimento di stress e strain. Per l'esecuzione della prova sui compositi ottenuti a partire dal serbatoio e dal paraurti i provini ad osso di cane sono stati sottoposti alla prova tramite dinamometro Instron5966, con una cella di carico di 2 kN, una pressione delle pinze di 3 bar e velocità di trazione di 10 mm/min. Inoltre, per rispettare gli standard tutti i provini, per 24 ore prima della prova, sono stati posti in una camera climatica a 23°C e al 50% di umidità. Il comportamento dei provini ricavati dal campione 066-1.1 hanno mostrato un comportamento simile come osservabile da [Figura 32](#). Al contrario, per i provini ricavati dal 066-2.1 si sono registrati andamenti differenti per quel che concerne l'allungamento fino a rottura. Per questo le prove relative a questi compositi sono state divise rispetto a due famiglie di provini aventi comportamento simile.

Tabella 23 - Risultati prove meccaniche.

	Modulo elastico (MPa)	Snervamento		Rottura	
		$\epsilon_s$ (%)	$\sigma_s$ (Mpa)	$\epsilon_r$ (%)	$\sigma_r$ (Mpa)
<i>Paraurti</i>	807	-	-	8,3	3,7
<i>066-1.1</i>	877± 24	15,1 ± 0,7	40,6 ± 0,7	21,7 ± 1,3	4,1 ± 0,1
<i>066-2.1 (1)</i>	755 ± 17	6,1 ± 0,2	18,7 ± 0,4	160 ± 29	15,5 ± 0,3
<i>066-2.1 (2)</i>	822 ± 8	8,0 ± 0,1	21,1 ± 0,1	439 ± 16	20,6 ± 0,2

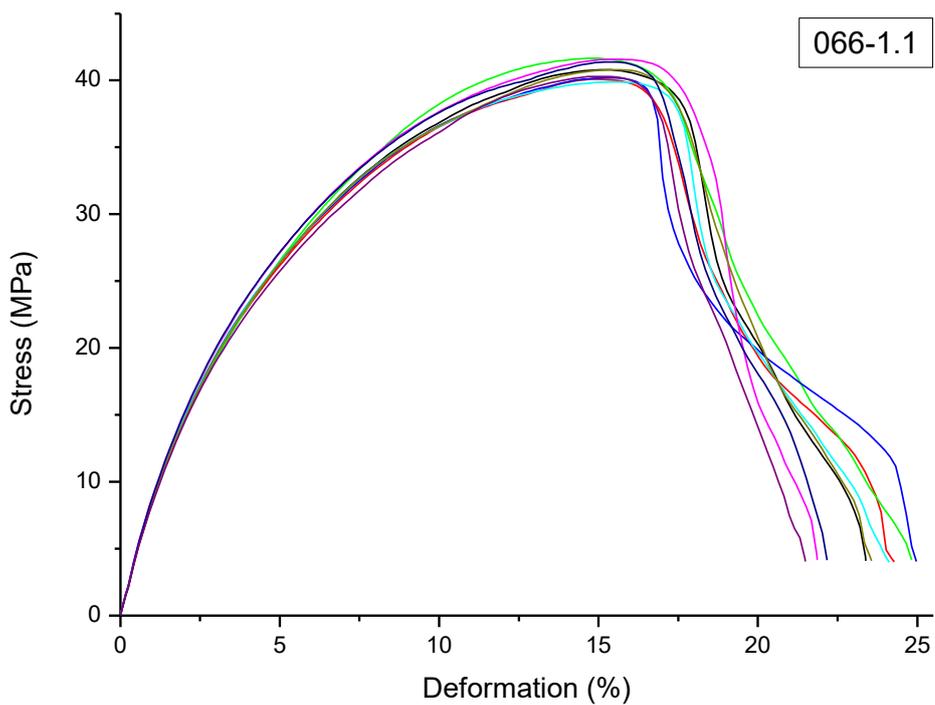


Figura 32 - Prova di trazione sul campione 066-1.1.

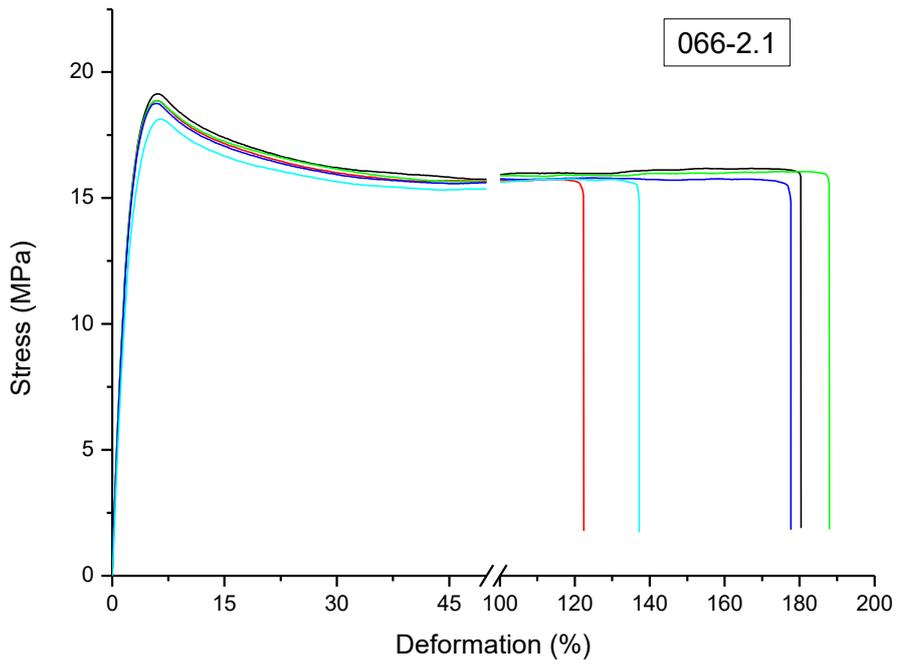


Figura 33 - Prova di trazione su campione 066-2.1 (1).

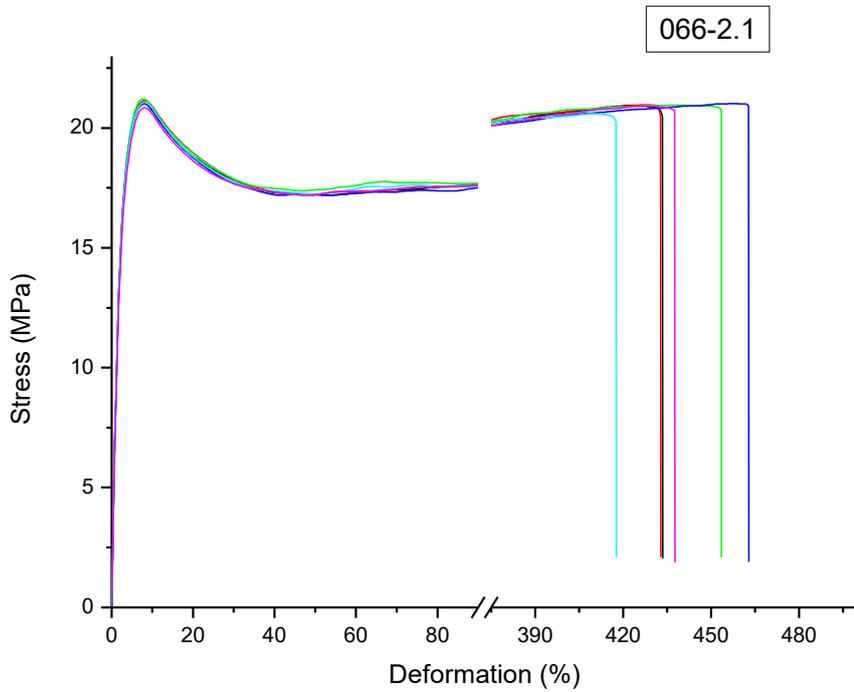


Figura 34 - Prova di trazione su campione 066-2.1 (2).

## **4.4. Descrizione di un impianto di trattamento ELV**

L'impianto del Centro Recupero e Servizi si occupa di attività di recupero di rifiuti pericolosi e non pericolosi, fra cui rifiuti metallici, RAEE e veicoli a fine vita con lo scopo di estrapolare metalli ferrosi e non ferrosi da rivendere successivamente sul mercato. A partire dal 2007 tale realtà è stata studiata dal Politecnico di Torino per riuscire ad ottenere dei riscontri reali e pratici sul campo. Il primo progetto, sviluppatosi dal 2007 al 2010, ha permesso di raccogliere campioni di fluff leggero e pesante per capire come sarebbe stato possibile incrementare l'efficienza di trattamento relativa alla prima configurazione d'impianto.

### **4.4.1. Vecchia configurazione di impianto**

Prima della variazione di configurazione l'impianto CRS prevedeva come prima fase un pre-frantumazione che aveva come scopo ridurre dimensionalmente il materiale in ingresso per facilitare la fase di frantumazione successiva. Quest'ultima veniva eseguita tramite un frantoio a martelli dal quale uscivano due flussi. Il primo, legato al materiale più leggero, era costituito principalmente da materiale quale gomma, plastica e tessuti e andava a formare il fluff leggero. Il secondo, invece, procedeva la sua corsa verso un separatore magnetico a tamburo che permetteva di separare la frazione magnetica dalla frazione amagnetica. Dalla frazione magnetica risultava possibile separare i metalli non ferrosi come l'acciaio, del proler e fluff costituito da gomma, plastica e tessili. La restante parte amagnetica, invece, proseguiva la sua corsa verso un separatore magnetico a nastro che consentiva un'ulteriore separazione di altro proler. La parte restante veniva inviata ad un vaglio a tamburo che permetteva un'ultima suddivisione del materiale in funzione della dimensione. Come leggibile dallo schema di flusso in basso ciò che non rientrava nel range dimensionale compreso fra i 10 mm e i 50 mm veniva classificato principalmente come fluff. Il materiale rientrante nel range precedentemente nominato, invece, proseguiva la sua corsa verso la sezione B dell'impianto. In tale segmento, a partire da una tramoggia, sfruttando un separatore elettrostatico a correnti indotte e un separatore densimetrico posti in serie era permessa la separazione ed il recupero di metalli leggeri e pesanti e di materiale successivamente trattato come fluff [\[33\]](#) [\[34\]](#). Si riporta di seguito il flowsheet del vecchio impianto.

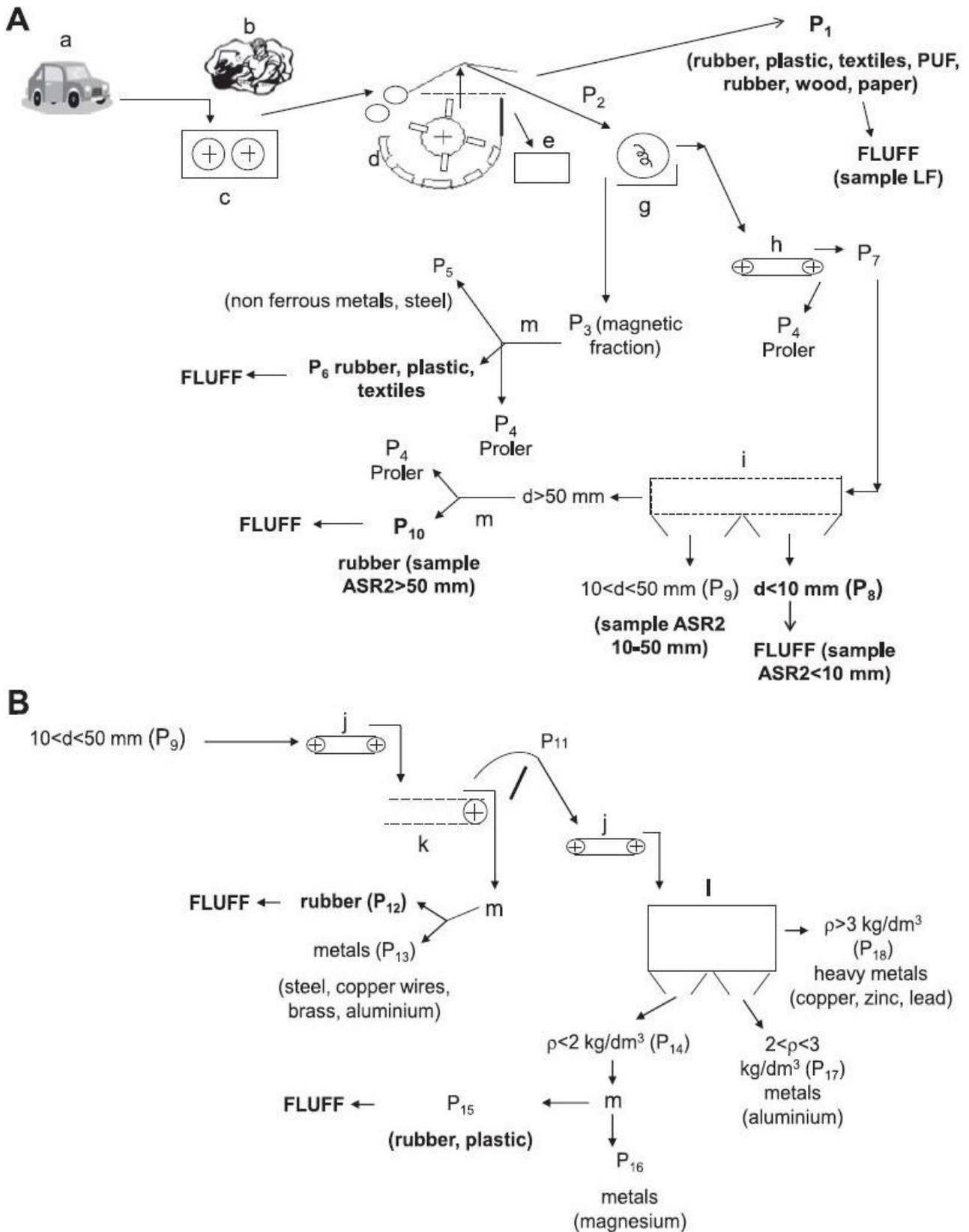


Figura 35 - Schema di processo del vecchio impianto CSR [34].

Rispetto al vecchio schema valutato finora, col progetto di ricerca si era sviluppata un'ipotetica soluzione impiantistica da affiancare a quella esistente per permettere una migliore gestione del fluff leggero post frantoio a martelli. In particolare, per raggiungere percentuali più alte di frazioni recuperate si era pensato ad una linea di trattamento costituita da diversi step di separazione quali quella granulometrica, magnetica, elettrostatica e densimetrica impostati come osservabile in [Figura 36](#).

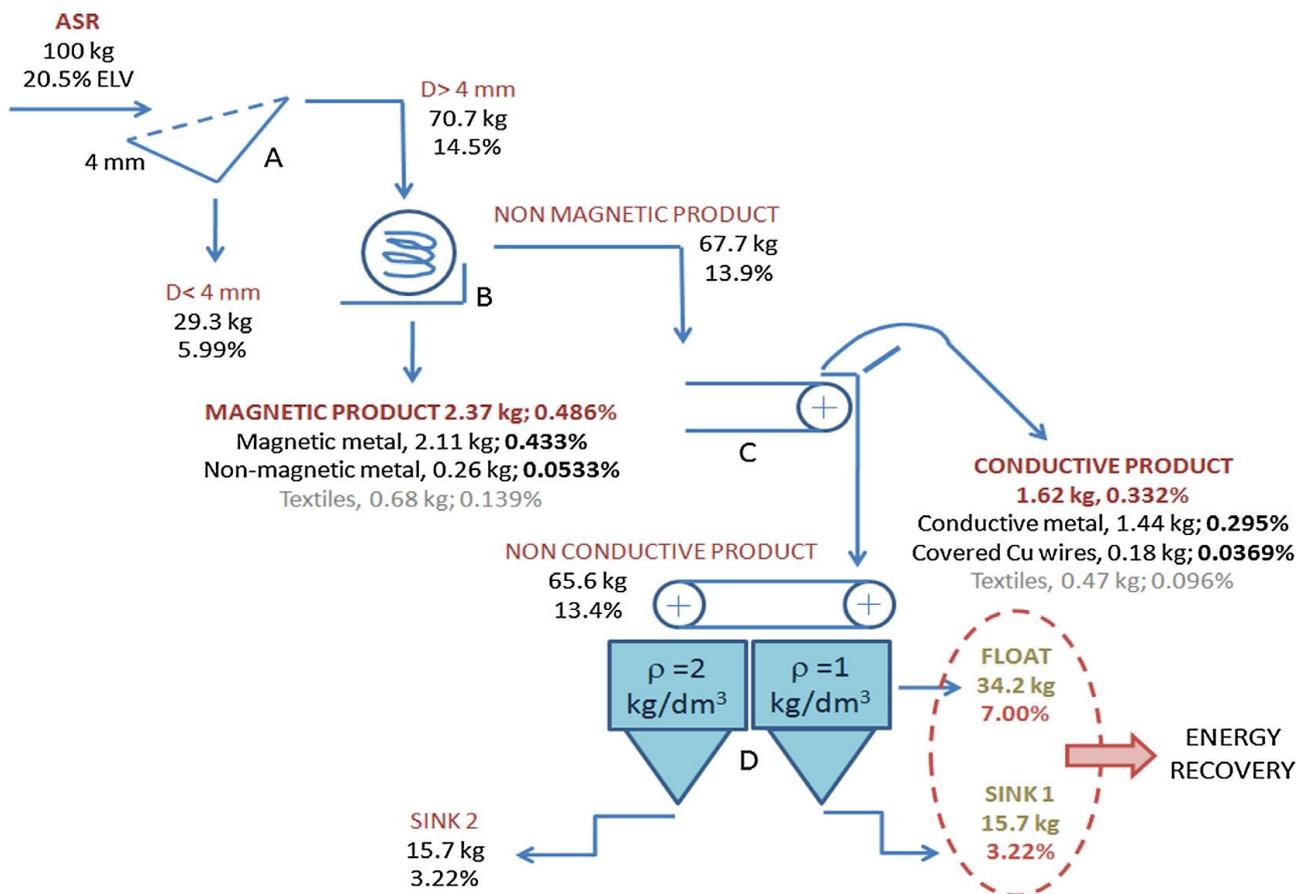


Figura 36 - Ipotetico trattamento del fluff leggero post frantumatore [33].

La prima fase di separazione, quella granulometrica, aveva visto come dimensione di riferimento ottimale i 4 mm. La rationale dietro l'applicazione di tale processo è stata evitare di impattare l'efficacia dei trattamenti successivi facendo passare anche la componente più fine. Il materiale avente dimensione maggiori del vaglio impostato avrebbe subito una separazione magnetica dividendosi in prodotto magnetico, recuperabile, e una parte amagnetica che sarebbe stata soggetta ad una separazione elettrostatica. I prodotti conduttivi separati risultavano essere principalmente metalli non magnetici e fili di rame scoperti. Infine, il materiale non conduttivo avrebbe subito una doppia separazione densimetrica prendendo come parametri di riferimento valori quali 1 kg/dm<sup>3</sup> e 2 kg/dm<sup>3</sup>. Tale impostazione avrebbe portato alla separazione di materiali quali tessuti, gomme, legno e carta aventi alto potere calorifico e quindi possibilità di recupero energetico.

#### 4.4.2. Nuova configurazione di impianto

Negli ultimi anni l'impianto CRS ha aggiornato il proprio schema di trattamento per rendere più efficiente la separazione delle diverse frazioni merceologiche recuperabili. Rispetto alla vecchia configurazione tale schema mantiene i quattro processi di separazione visti precedentemente ma con un'applicazione differente per adeguarsi alle recenti esigenze [35]. Il nuovo schema di funzionamento attualmente attivo è descritto in [Figura 37](#).

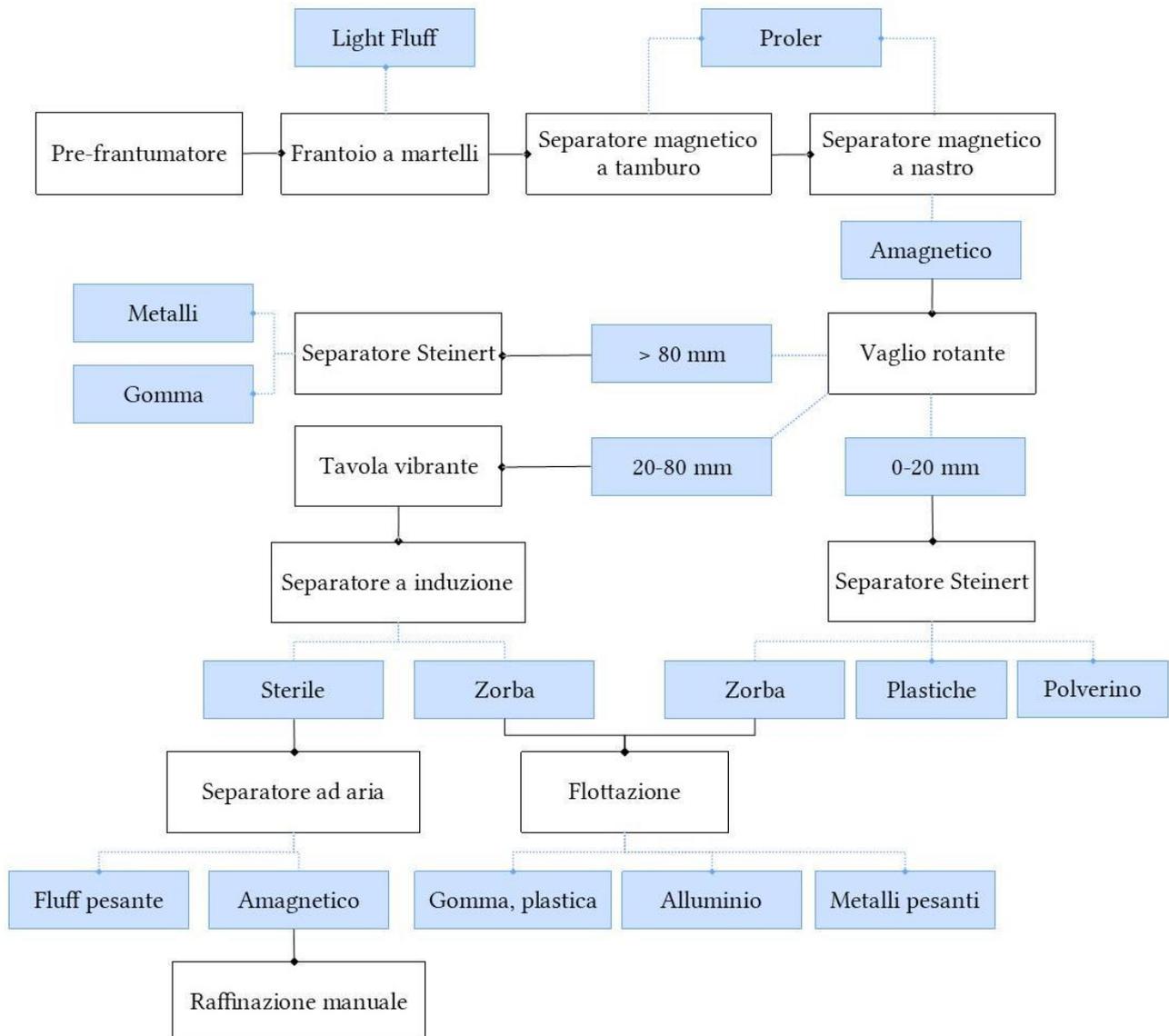
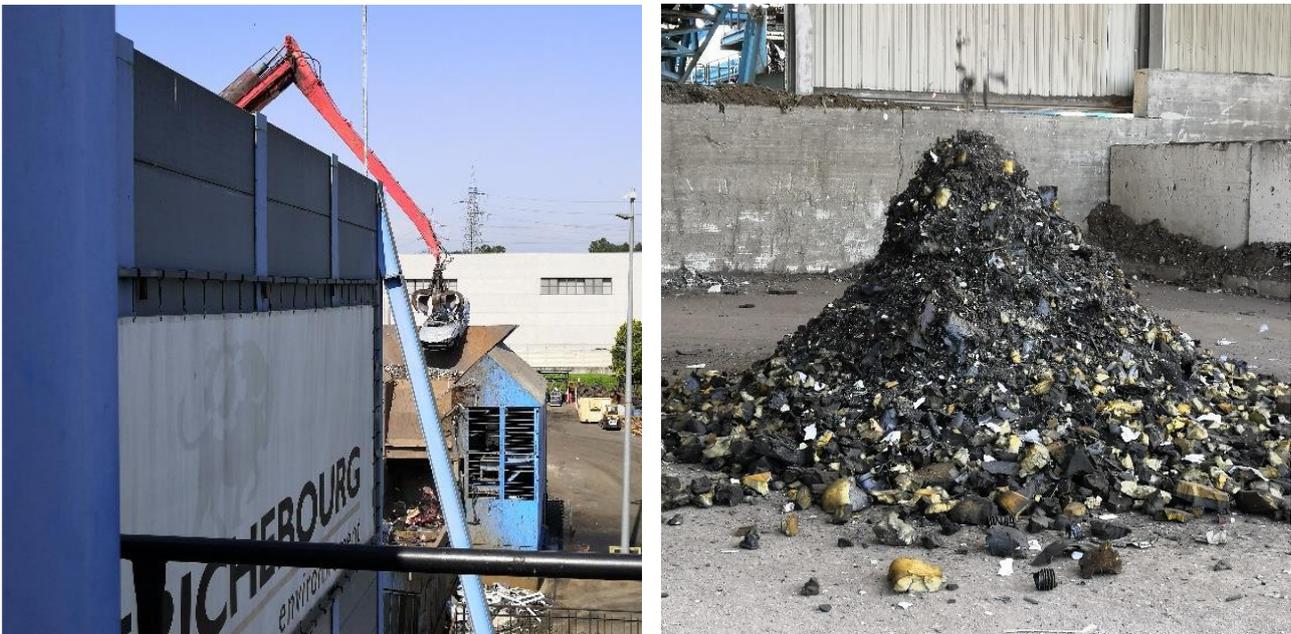


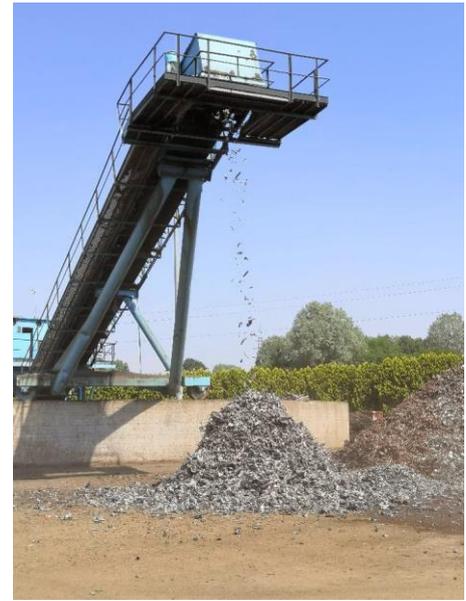
Figura 37 - Schema della linea di trattamento dell'impianto CRS.

Attualmente, il CRS tratta autoveicoli a fine vita sia già bonificati e pronti per il trattamento sia veicoli che necessitano operazioni di bonifica. In questo secondo caso, prima dell'avvio a frantumazione, l'autoveicolo viene bonificato e si procede con operazioni quali la rimozione e successivamente lo smaltimento la batteria, la rimozione degli airbag e l'allontanamento dei fluidi eventualmente presenti oltre che il prelievo di elementi recuperabili come pneumatici, serbatoi e paraurti. Successivamente il veicolo entra nella linea di trattamento all'interno della quale andrà incontro a processi di separazione granulometrica, magnetica, elettrostatica e densimetrica. La prima operazione prevede l'azione di un pre-frantumatore che ha come scopo aprire i blocchi di auto compattate e ridurre dimensionalmente il materiale entrante in impianto. Così facendo viene incrementata l'efficienza della fase successiva, nella quale si sfrutta un frantoio a martelli che permette un'ulteriore diminuzione di pezzatura per gli step che seguono. Nella parte superiore del frantoio è presente un sistema aspirante che permette l'allontanamento di una frazione leggera del materiale che andrà a formare il fluff leggero.



*Figura 38 – Pre-frantumatore e fluff leggero.*

La restante parte, post frantoio, prosegue la sua corsa tramite un nastro trasportatore fino ad un separatore magnetico a tamburo. Questa prima fase di separazione magnetica permette, tramite un'elettrocalamita rotante di allontanare una prima parte di materiale magnetico separandolo dalle componenti amagnetiche. Ciò che non viene catturato dalla calamita appena superata viene inviato ad una seconda fase di separazione magnetica che sfrutta un separatore a nastro. Anche in questo caso si avranno due flussi di materiale in uscita. Il primo, costituito da materiale magnetico, viene raccolto insieme al prodotto magnetico uscente dal separatore a tamburo mentre la parte restante prosegue il suo viaggio verso gli step di trattamento successivi. Il proler separato viene sottoposto a cernita manuale che permette di eliminare impurità quali fili di rame e gomme, plastiche e tessuti associati al metallo ferroso prima di poter essere venduto diventando così una risorsa.



*Figura 39 - Separazione magnetica e trattamento del proler.*

Il materiale amagnetico in uscita dai trattamenti appena visti viene inviato ad un vaglio rotante a tamburo per una classificazione dimensionale impostata su tre granulometrie di riferimento. La prima fascia separata è quella avente pezzatura maggiore di 80 mm composta principalmente da gomma, plastica e tessili. Per la gran parte composta da materiali polimerici e metalli invece è la seconda fascia che ha dimensione compresa fra i 20 mm e gli 80 mm. Il materiale più fine, dimensionalmente più piccolo dei 20 mm risulta essere composto soprattutto da vetro, inerti e materiali non ferrosi oltre che polimeri. La frazione più grande viene inviata ad un separatore elettrostatico a correnti indotte Steinert che permette la separazione di alcune frazioni metalliche costituite da fili di rame e parti in acciaio/ferro dalla gomma. Il destino della frazione più piccola è lo stesso della precedente infatti, anche tale materiale, viene assoggettato a separazione elettrostatica. In uscita da tale fase si ottengono plastiche, zorba e una frazione fina nominata polverino. La zorba è un materiale metallico non ferroso che, post separatore Steinert, subisce una separazione densimetrica a base di polvere di ferrosilicio in acqua.



*Figura 40 - Separatore densimetrico.*

Il quantitativo di polvere, e quindi la densità, può essere regolata permettendo di adeguarsi alle esigenze e garantendo di gestire al meglio la separazione. Normalmente il materiale sospeso risulta essere costituito per la gran parte da gomme e plastiche. I metalli, invece, contribuiscono al materiale che affonda e vengono recuperati. La frazione dimensionalmente compresa fra i 20 mm e gli 80 mm è quella che subisce il percorso di trattamento più lungo dopo la separazione dimensionale. Viene, tramite tavola vibrante, convogliata verso un separatore ad induzione che permette di separare le componenti sterili non magnetiche dalla frazione di zorba. La zorba segue lo stesso percorso descritto per la frazione avente dimensione minore di 20mm. Fra i materiali sterili, invece, si trovano vetro, plastiche e gomma che subiscono una separazione ad aria “Titec”. Tale operazione permette una suddivisione in funzione del peso specifico delle varie componenti. Il prodotto amagnetico più pesante procede verso una fase di cernita manuale che permette di recuperare eventuali metalli scampati alle fasi precedenti. La frazione più leggera va a formare una parte del fluff leggero costituito, come il precedente, principalmente da plastica e gomma. Il trattamento attuale nel complessivo risulta essere più efficiente rispetto all’insieme delle operazioni attuate nel vecchio impianto. Le principali differenze, come osservabile facendo un confronto fra le configurazioni descritte, sono legate alla differenza nella gestione dimensionale basata su diversi spettri granulometrici. Inoltre, attualmente, dopo il trattamento magnetico, si va incontro alla separazione di tre diverse frazioni granulometriche rispetto a dimensioni di riferimento pari a 20 mm e 80 mm che subiscono, in maniera differente, almeno un trattamento di separazione elettrostatica.

#### 4.4.3. Prova di demolizione

Per caratterizzare ulteriormente i prodotti uscenti dalla configurazione d’impianto appena descritta, a Maggio del 2020, si è eseguita una prova di demolizione su campioni precedentemente bonificati e privati delle componenti recuperabili. La durata complessiva della prova è stata di quattro ore ed ha permesso la valutazione di circa 285 tonnellate di auto demolite corrispondenti a circa 435 veicoli. Si riportano nella seguente tabella i dati raccolti tramite la prova relativi alla prima mezz’ora, in cui si sono processati 35.28 tonnellate di materiale.

*Tabella 24 - Distribuzione delle frazioni in uscita dall'impianto*

<i><b>Frazione</b></i>	<i><b>Peso [t]</b></i>	<i><b>Percentuale [%]</b></i>
<i>Proler</i>	24.56	69.03
<i>Fluff leggero</i>	<b>8.22</b>	<b>23.10</b>
<i>Fluff pesante</i>	<b>0.96</b>	<b>2.70</b>
<i>Filo Titec</i>	0.38	1.07
<i>Zorba piccola &lt; 20mm</i>	0.64	1.80
<i>Zorba grande</i>	0.82	2.30
<i><b>Totale</b></i>	<b>35.58</b>	

## **4.5. Analisi del car fluff di un impianto di trattamento ELV**

Grazie alla collaborazione fra il Centro Recupero e Servizi e il Politecnico di Torino, nello specifico i dipartimenti del DIATI e del DISAT, è stato possibile lo sviluppo di varie fasi di analisi eseguite su campioni prelevati a seguito della prova di demolizione precedentemente descritta. Tali tipologie di valutazioni hanno permesso di andare oltre la generica composizione descritta in [Tabella 7](#) permettendo l'elaborazione di congetture più precise in merito a possibilità alternative allo smaltimento per gli ELV. Nello specifico sono stati prelevati diversi campioni rappresentativi sia di fluff leggero che di fluff pesante. Dopo aver eseguito un'analisi merceologica di tali campioni con lo scopo di individuare le principali frazioni di materiale presenti, si è andata a valutare la fattibilità d'applicazione di due diversi processi di riciclaggio. Con il primo si intende produrre merci ottenute a partire da frazioni di plastica uscenti dall'impianto di trattamento ELV. Il secondo focus dello studio è stato cercare di capire se ci fossero possibilità in merito all'utilizzo di una parte lavorata di car fluff come combustibile solido secondario.

### **4.5.1. Analisi merceologica**

La prima operazione eseguita è stata la valutazione della composizione dei campioni raccolti. Grazie ad un'analisi eseguita tramite cernita manuale a cui è succeduta una fase di pesatura delle diverse frazioni è stato possibile identificare i diversi quantitativi di materiale presente nei campioni. L'analisi sul fluff pesante, eseguito su un peso maggiore di 12 kg, ha mostrato una alta presenza di materiali quali la gomma e la plastica. Al contrario, nel full leggero la stima eseguita su quasi 3 kg di provino ha permesso di individuare le percentuali di materiali quali gommapiuma, tessile pesante, plastica e metalli. Si riportano di seguito le distribuzioni di materiale ricavate tramite tale tipologia di analisi.

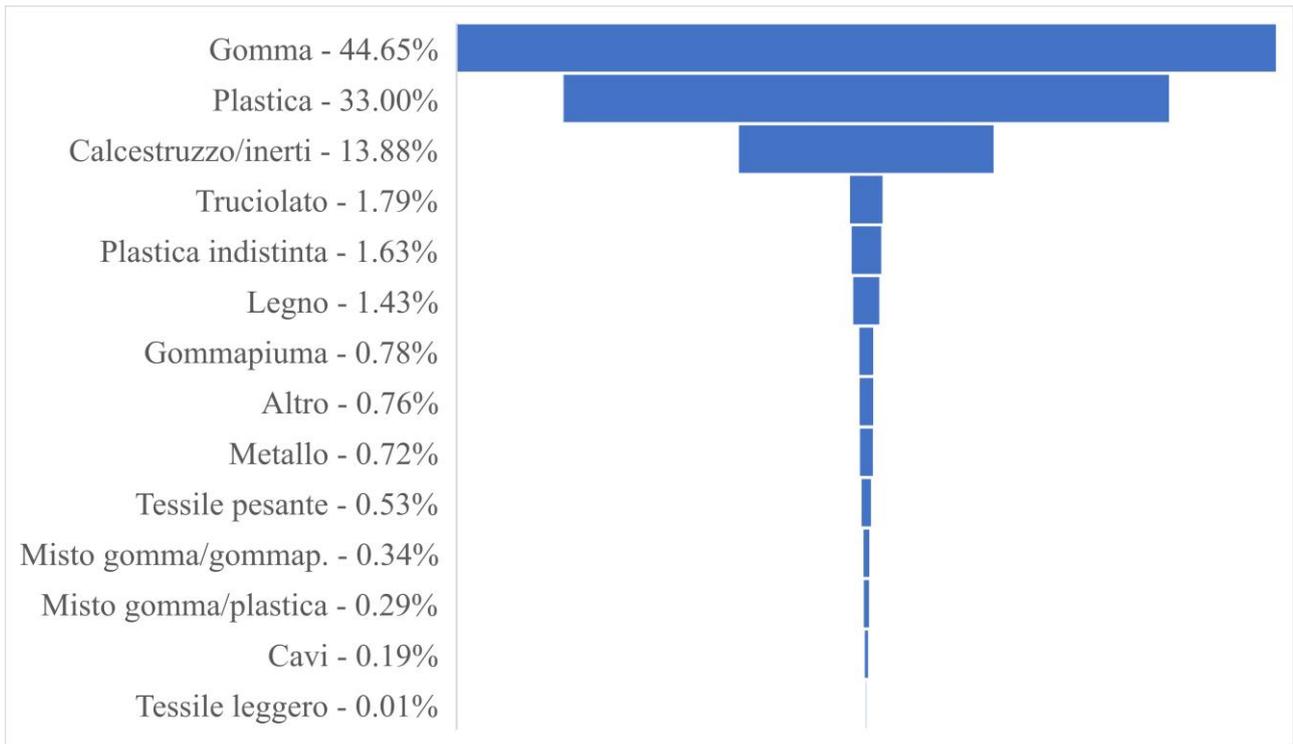


Figura 41 - Composizione del fluff pesante.

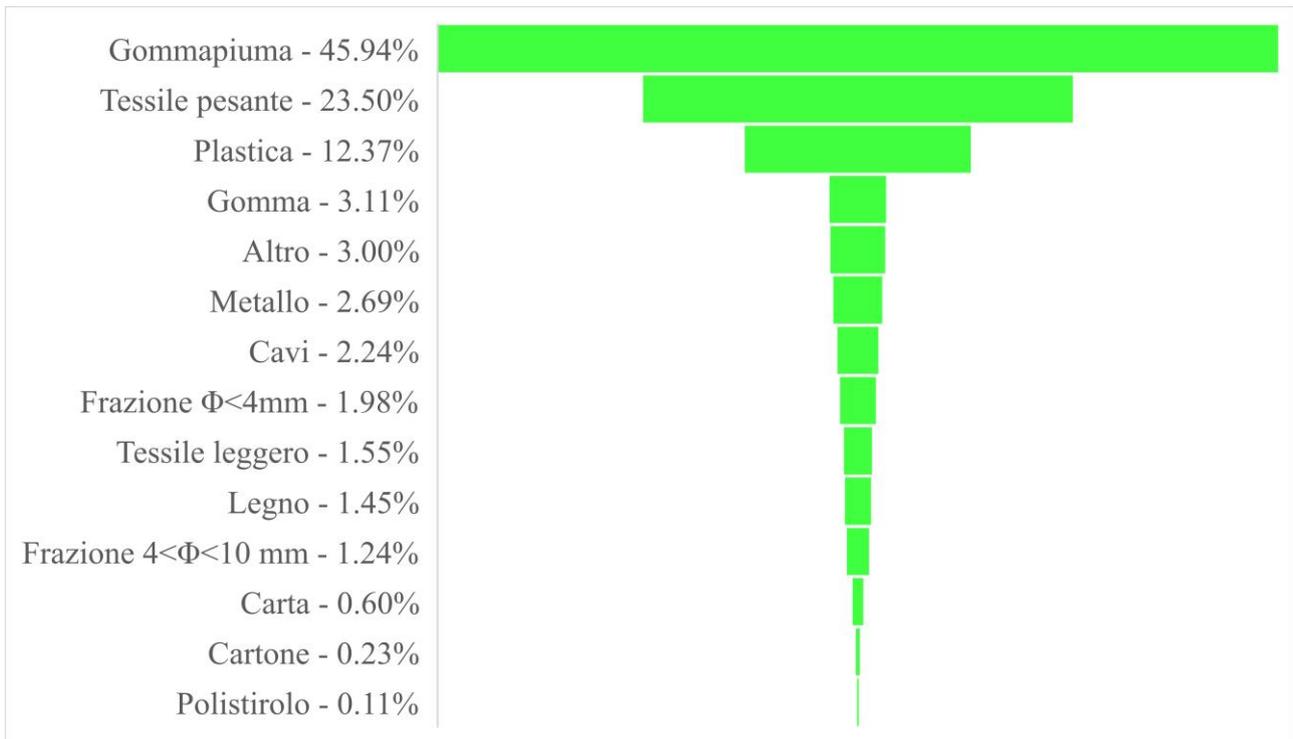


Figura 42 - Composizione del fluff leggero.

Tabella 25 - Composizione del fluff pesante.

<b>Frazione</b>	<b>Peso [g]</b>	<b>%</b>
<i>Gomma - 44.65%</i>	5480,5	44,65%
<i>Plastica - 33.00%</i>	4050,5	33,00%
<i>Calcestruzzo/inerti - 13.88%</i>	1704	13,88%
<i>Truciolato - 1.79%</i>	220	1,79%
<i>Plastica indistinta (rosso) - 1.63%</i>	200	1,63%
<i>Legno - 1.43%</i>	176	1,43%
<i>Gommapiuma - 0.78%</i>	96	0,78%
<i>Altro - 0.76%</i>	93	0,76%
<i>Metallo - 0.72%</i>	88	0,72%
<i>Tessile pesante - 0.53%</i>	65	0,53%
<i>Misto gomma/gommapiuma - 0.34%</i>	41,5	0,34%
<i>Misto gomma/plastica - 0.29%</i>	36	0,29%
<i>Cavi - 0.19%</i>	23	0,19%
<i>Tessile leggero - 0.01%</i>	1	0,01%
<b>Totale</b>	<b>12274,5</b>	

Tabella 26 - Composizione del fluff leggero.

<b>Frazione</b>	<b>Peso [g]</b>	<b>%</b>
<i>Gommapiuma - 45.94%</i>	<b>1300</b>	<b>45,94%</b>
<i>Tessile pesante - 23.50%</i>	<b>665</b>	<b>23,50%</b>
<i>Plastica - 12.37%</i>	<b>350</b>	<b>12,37%</b>
<i>Gomma - 3.11%</i>	<b>88</b>	<b>3,11%</b>
<i>Altro - 3.00%</i>	85	3,00%
<i>Metallo - 2.69%</i>	<b>76</b>	<b>2,69%</b>
<i>Cavi - 2.24%</i>	63,5	2,24%
<i>Frazione <math>\Phi &lt; 4\text{mm}</math> - 1.98%</i>	56	1,98%
<i>Tessile leggero - 1.55%</i>	44	1,55%
<i>Legno - 1.45%</i>	41	1,45%
<i>Frazione <math>4 &lt; \Phi &lt; 10\text{ mm}</math> - 1.24%</i>	35	1,24%
<i>Carta - 0.60%</i>	17	0,60%
<i>Cartone - 0.23%</i>	6,5	0,23%
<i>Polistirolo - 0.11%</i>	3	0,11%
<b>Totale</b>	<b>2830</b>	

## 4.5.2. Analisi granulometrica del fluff leggero

Come osservabile da [Tabella 24](#) il fluff leggero costituisce una frazione molto più alta del fluff pesante in uscita dall'impianto di trattamento. Anche per questo motivo si è deciso di concentrare l'attenzione esclusivamente sulla porzione leggera del fluff andando ad eseguire un'analisi granulometrica solo dei principali componenti di quest'ultima ovvero il PUR, il tessile pesante, la plastica ed i metalli. Tramite lo sviluppo della prova si è notato come le frazioni dei metalli e del tessile pesante abbiano tendenzialmente una forma 2D, mentre il poliuretano reticolato risulta essere caratterizzato da un ingombro maggiore. Inoltre, come osservabile in [Figura 43](#) dal confronto fra le curve granulometriche, per il tessile pesante si sono registrate dimensioni mediamente maggiori rispetto agli altri materiali. Partendo da tali valutazioni, se si volessero separare il PUR dai metalli, una soluzione sensata potrebbe essere quella di utilizzare un vaglio a barre impostato con una dimensione di 15-20 cm. Non è stato possibile indagare tale tipologia di approccio visto che il campione non si trovava in condizioni indisturbate a seguito delle analisi eseguite. Si riportano nelle figure seguenti le curve granulometriche ottenute dallo svolgimento delle analisi, in particolare il confronto fra queste in [Figura 43](#).

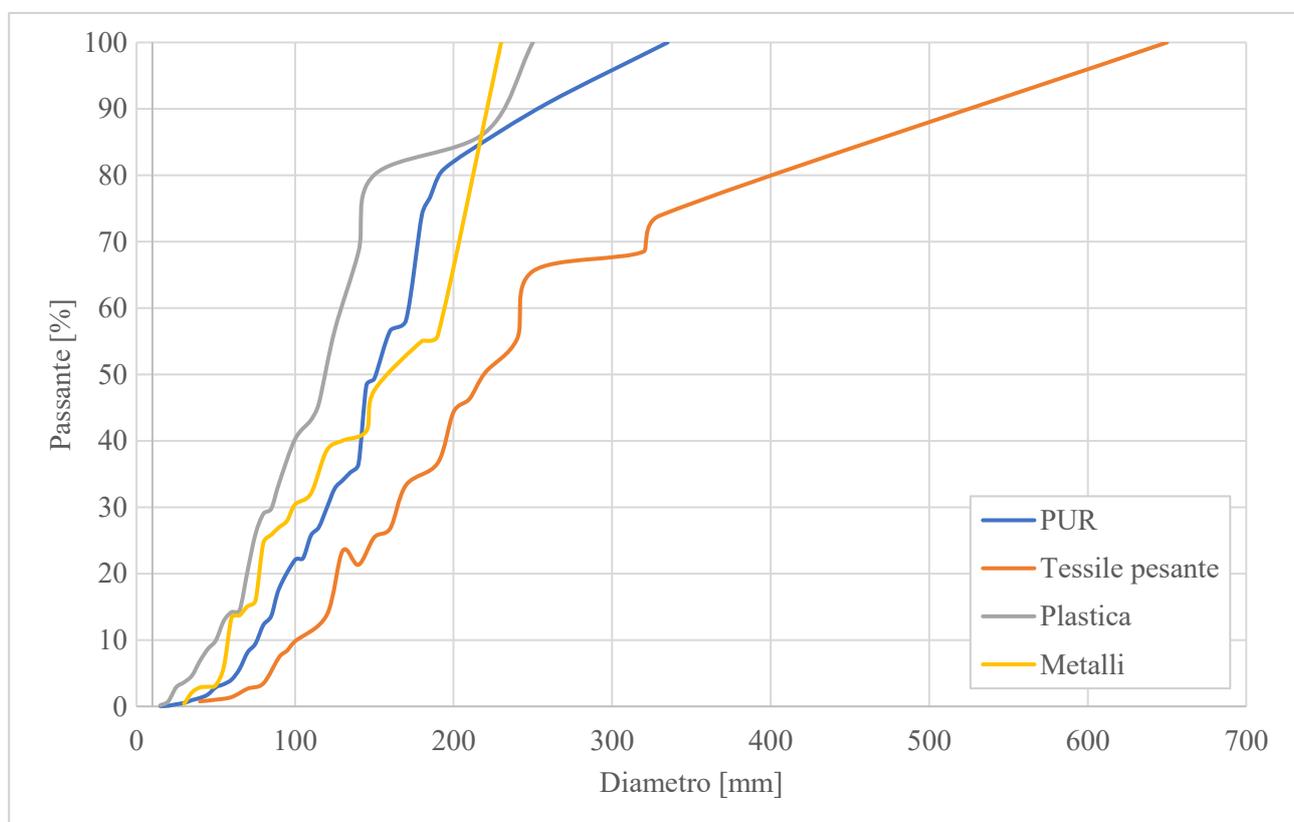


Figura 43 - Fluff leggero: curve granulometriche dei materiali a confronto.

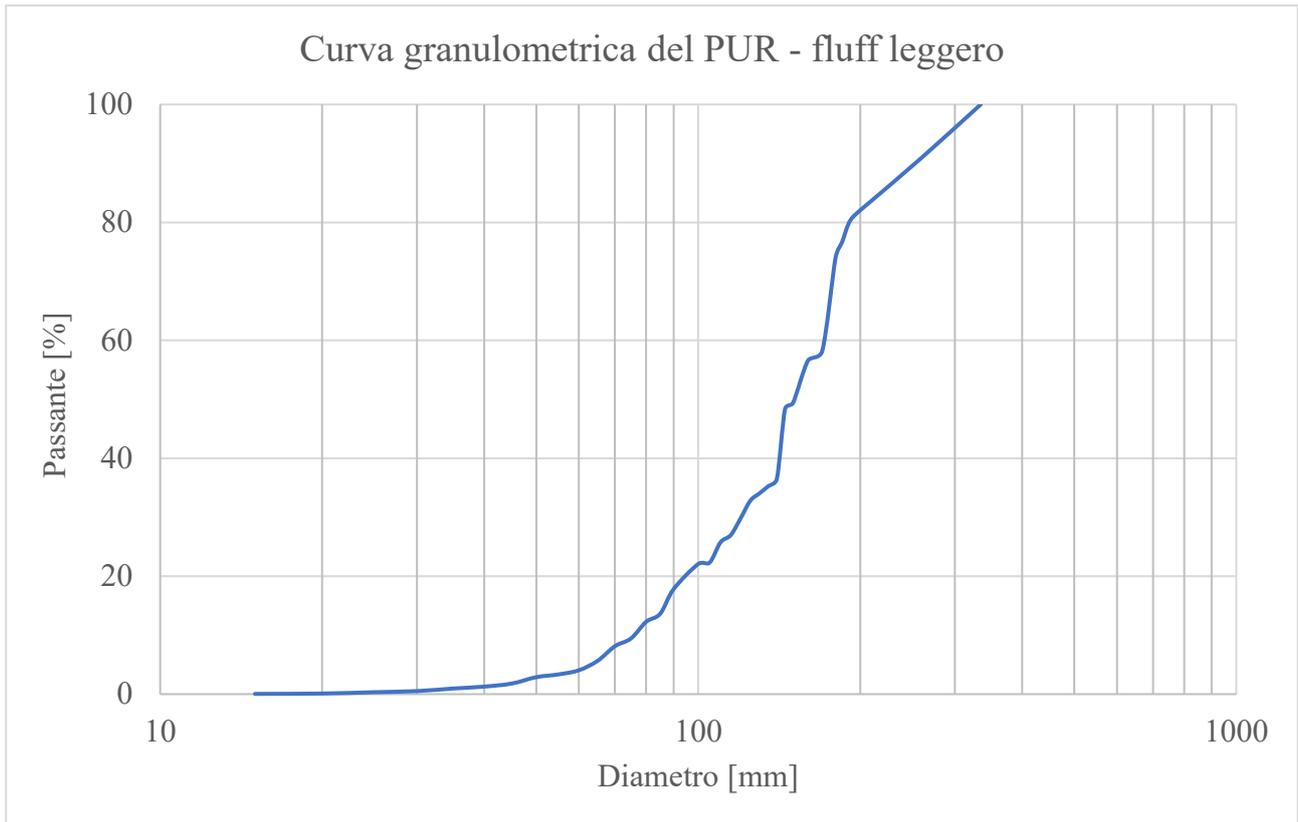


Figura 44 - - Curva granulometrica del PUR - fluff leggero.

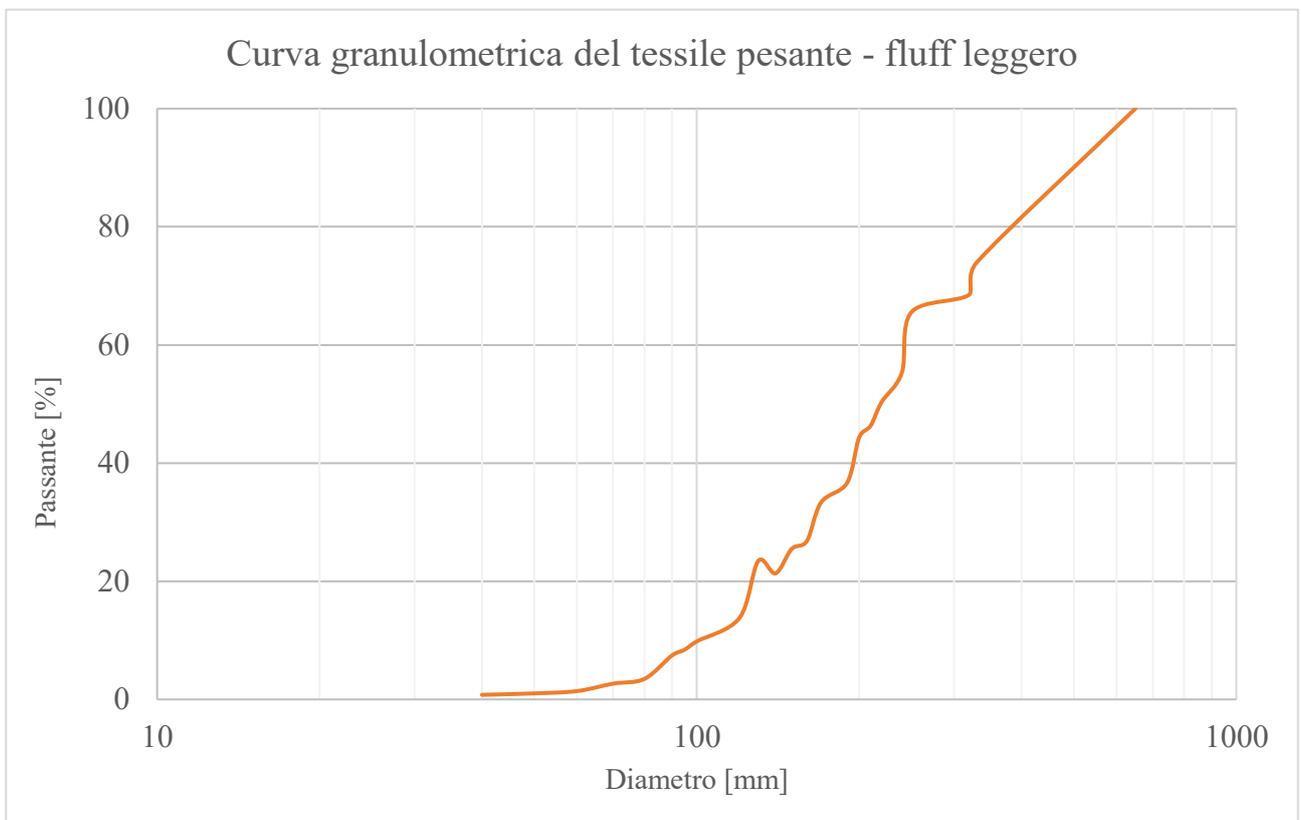
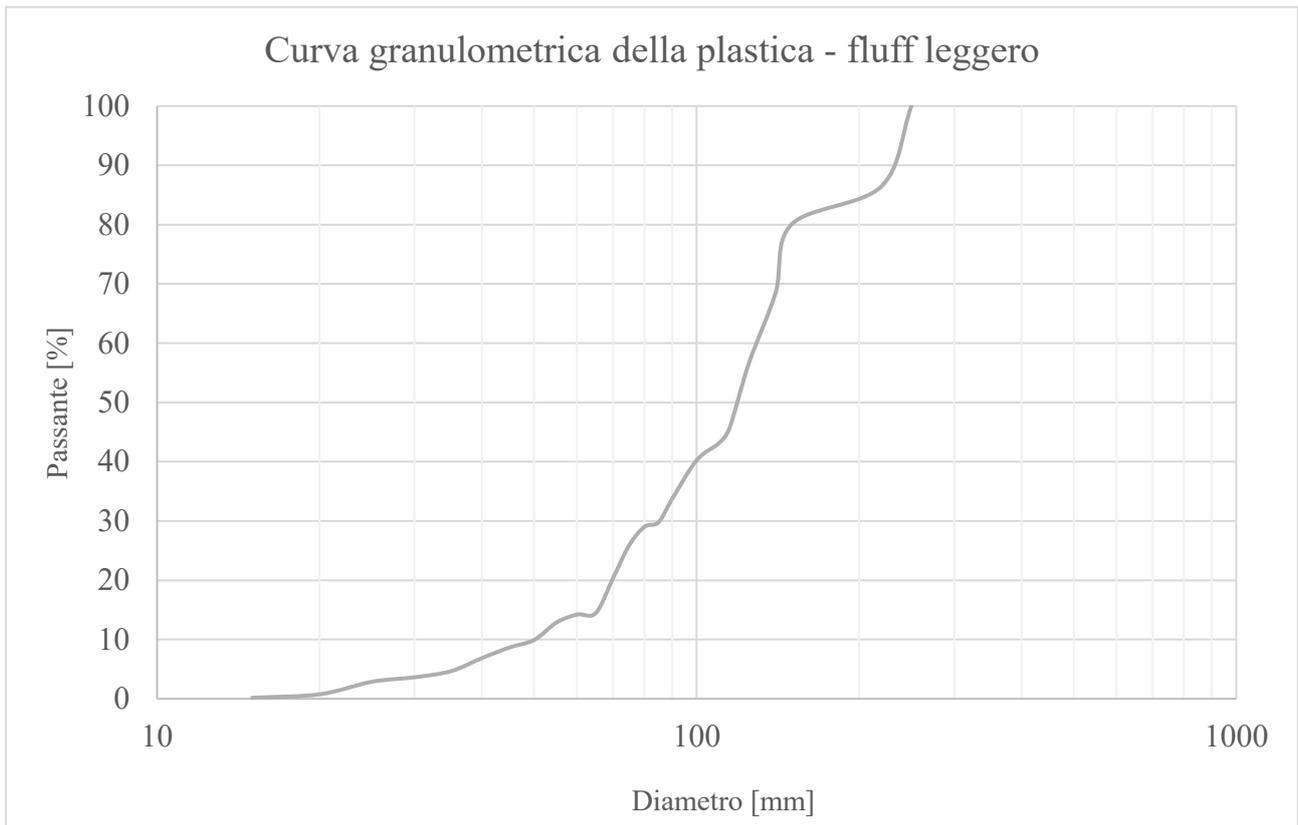
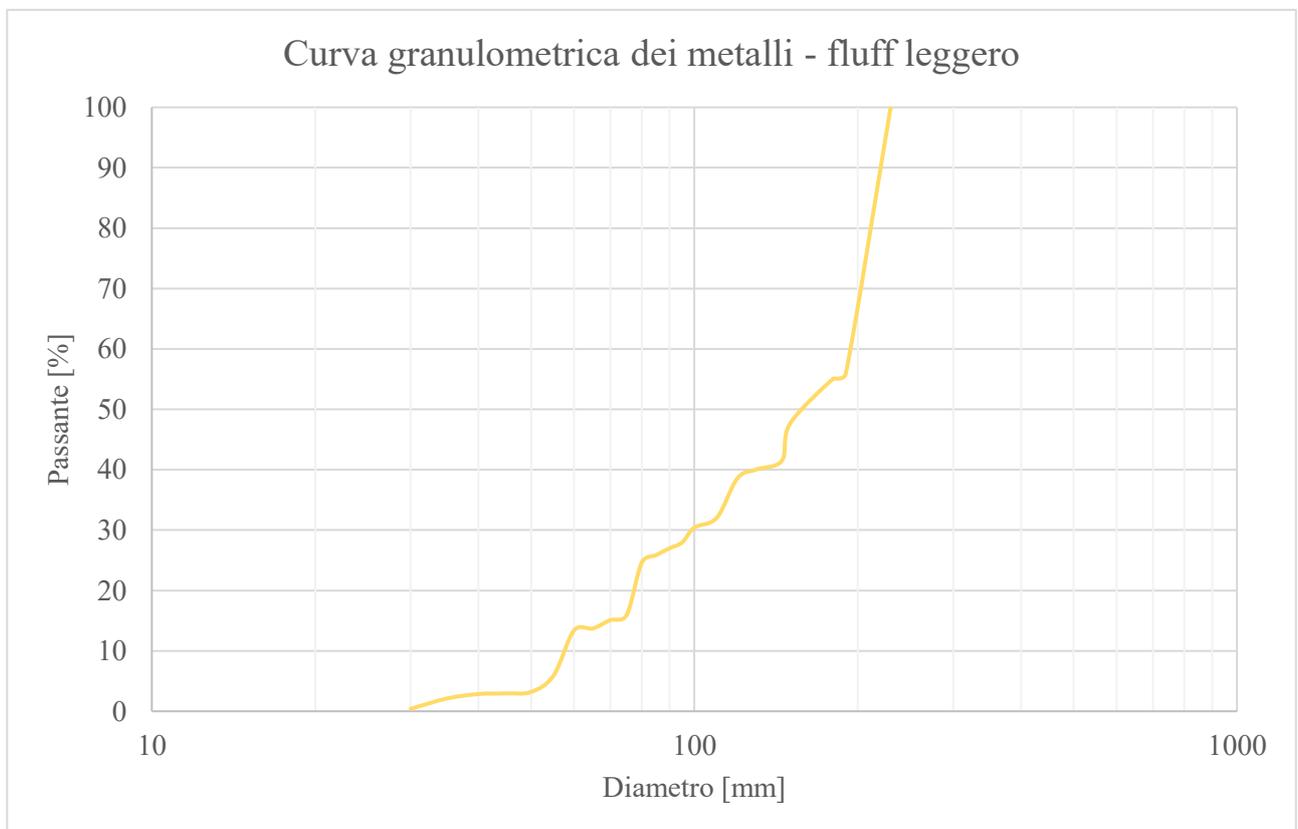


Figura 45 - Curva granulometrica del tessile pesante - fluff leggero.



*Figura 46 - Curva granulometrica della plastica - fluff leggero.*



*Figura 47 - Curva granulometrica dei metalli - fluff leggero.*

### 4.5.3. Analisi del potere calorifico

Grazie all'analisi granulometrica si è visto come, applicando una setacciatura basata su di un vaglio a barre avente apertura 15 cm, sarebbe possibile allontanare buona parte dei metalli da frazioni quali il PUR ed il tessile pesante. Così facendo si riuscirebbero a separare queste ultime due frazioni e si potrebbe pensare ad un loro utilizzo in contesti quali un termovalorizzatore o un cementificio recuperati sotto forma di combustibile solido secondario. In tal senso l'analisi del potere calorifico inferiore risulterebbe fondamentale ed è per questo che si è deciso di determinare tale parametro sui campioni di PUR e tessile pesante separati nella fase precedente. Visto il quantitativo di acqua trascurabile è stato possibile determinare direttamente il potere calorifico inferiore di tali frazioni tramite una bomba calorimetrica, la cui taratura iniziale è stata eseguita con dell'acido benzoico avente PCS noto pari a 26,42 kJ/g. Sia per la taratura che per le prove per entrambi i materiali, si è fatto riferimento a tre campioni differenti e successivamente si sono determinate la capacità termica del sistema ed il PCI dei campioni mediando i valori ottenuti. Si riportano nella tabella seguente i risultati derivati dalle prove eseguite.

Tabella 27 - Determinazione del PCI dei campioni di PUR e tessile pesante.

<b>Taratura con acido benzoico (PCS: 26.42 kJ/g)</b>				
<b>Campione</b>	<b>Peso [g]</b>	<b><math>\Delta T</math> [°C]</b>	<b>C [-]</b>	<b>C media</b>
1	1.002	2.21	11.97	<b>11.91</b>
2	1.003	2.24	11.83	
3	1.002	2.22	11.92	
<b>Determinazione del potere calorifico</b>				
<i>Tessile pesante</i>				
<b>Campione</b>	<b>Peso [g]</b>	<b><math>\Delta T</math> [°C]</b>	<b>PCI [kJ/g]</b>	<b>PCI medio</b>
1	0.503	0.98	23.21	<b>22.64</b>
2	0.504	0.94	22.22	
3	0503	0.95	22.50	
<i>PUR</i>				
<b>Campione</b>	<b>Peso [g]</b>	<b><math>\Delta T</math> [°C]</b>	<b>PCI [kJ/g]</b>	<b>PCI medio</b>
1	0.504	1.18	28.09	<b>28.02</b>
2	0.502	1.20	28.58	
3	0.502	1.15	27.38	

## 4.5.2. Analisi densimetrica

Una volta individuati i principali materiali costituenti i campioni si è eseguita un'analisi densimetrica esclusivamente sulla componente plastica estratta dal car fluff utilizzando, come liquido di riferimento, dell'acqua a circa 20°C e quindi una densità pari a 1 g/cm<sup>3</sup>. La scelta di utilizzare dell'acqua è legata alla volontà di separare, per i diversi campioni, una frazione costituita esclusivamente da polimeri termoplastici. Infatti, i polimeri termoindurenti risultano essere caratterizzati da densità maggiori di tale valore come osservabile dalla [Tabella 28](#).

Tabella 28 - Suddivisione dei polimeri per densità.

Polimero	Sigla	Densità [g/cm <sup>3</sup> ]
<b><i>Termoplastici</i></b>		
<i>Polipropilene</i>	PP	0.90
<i>Polietilene a bassa densità</i>	LDPE	0.91 – 0.92
<i>Polietilene ad alta densità</i>	HDPE	0.94 – 0.96
<i>Acrilonitrile butadiene stirene</i>	ABS	1.04 – 1.06
<i>Poliammide 6</i>	PA-6	1.13
<i>Poliammide 66</i>	PA-66	1.14
<i>Polimetilmetacrilato</i>	PMMA	1.17 – 1.20
<i>Polietilentereftalato</i>	PET	1.37
<i>Polivinilcloruro</i>	PVC	1.38 – 1.55
<b><i>Termoindurenti</i></b>		
<i>Resina poliuretana</i>	PU	1.05
<i>Resine fenoliche</i>	PF	1.40
<i>Resine ammidiche</i>	MF	1.50
<i>Resine siliconiche</i>	SI	1.80 – 1.90
<i>Resina epossidica</i>	EP	1.90
<i>Resine poliestere insature</i>	UP	2.00

Dall'impianto CRS sono stati raccolti due campioni di fluff leggero e pesante da cui si sono separate le parti plastiche ottenendo il materiale riportato in [Figura 48](#).



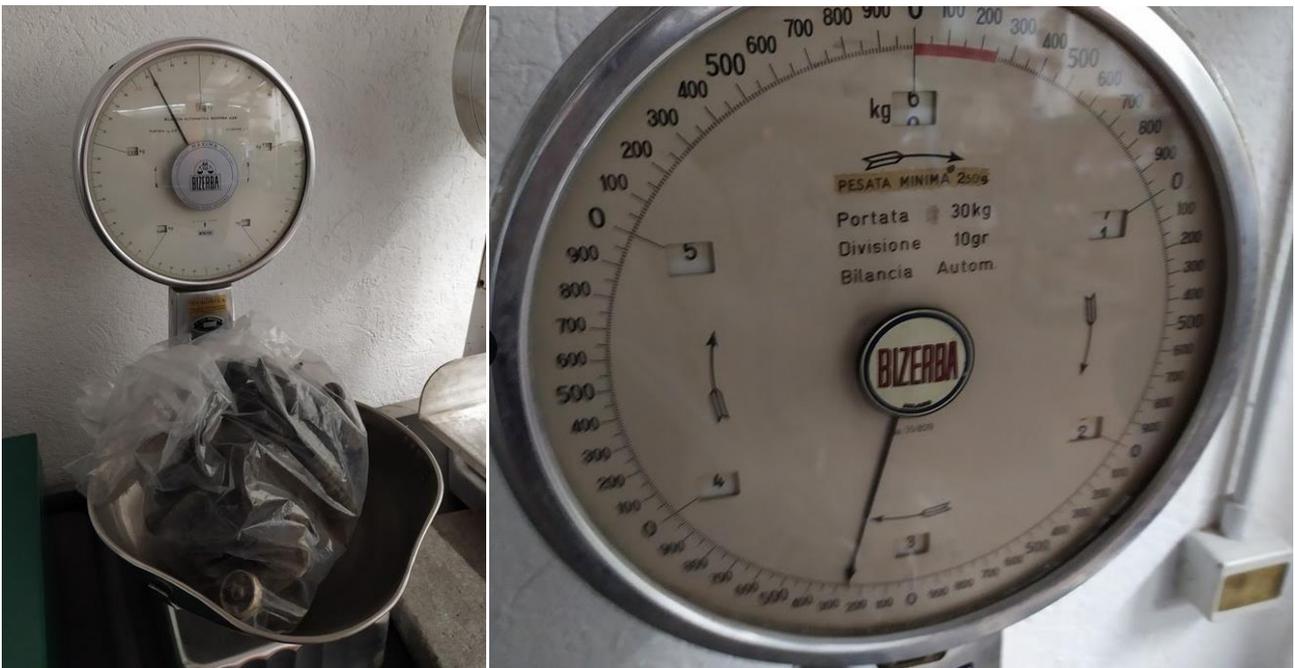
*Figura 48 - Campioni di fluff leggero e pesante dall'impianto CRS.*

La prova è stata svolta ponendo i campioni di plastica all'interno di un recipiente riempito d'acqua e spingendoli verso il basso. Attendendo il tempo necessario si è aspettato che le frazioni leggere salissero verso l'alto, per poi galleggiare, mentre la parte pesante depositasse sul fondo. Tramite raccolta a mano sono state divise le due frazioni, quella pesante avente densità maggiore dell'acqua e quella leggera con una densità minore di quella indicata.



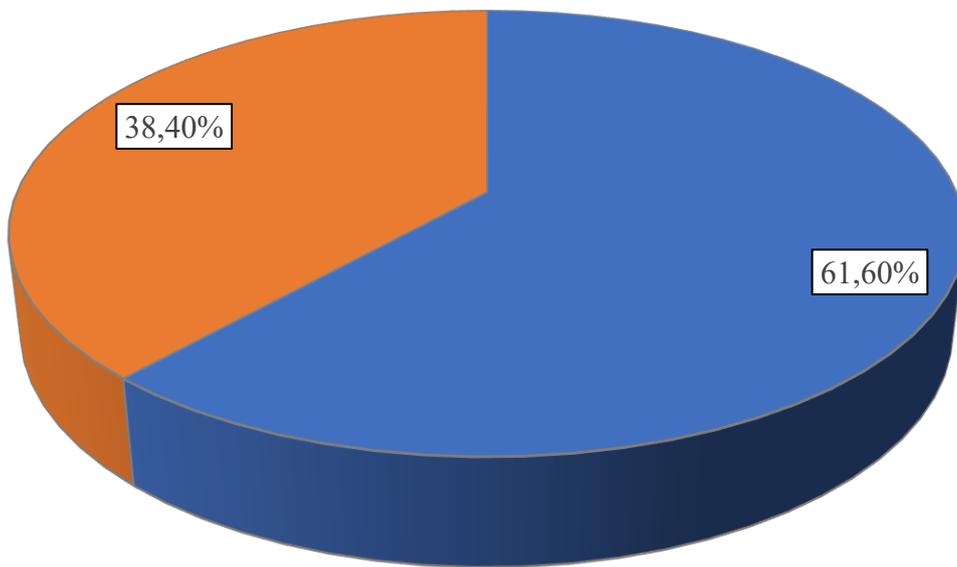
*Figura 49 - Svolgimento della prova densimetrica2020.*

Infine, i campioni sono stati asciugati prima della pesatura che ha permesso di valutare le varie percentuali in peso caratteristiche dei provini. Confrontando i risultati ottenuti dalle prove effettuate, si è notato come nel fluff leggero la percentuale di materiali aventi densità minore dell'acqua sia più grande, arrivando quasi al 62%, e quindi come ci sia una maggiore presenza di termoplastici. Al contrario, nel fluff pesante oltre il 77% del materiale plastico risulta avere densità maggiore di  $1 \text{ g/cm}^3$  e quindi probabilmente in tale frazione di fluff sono più abbondanti i polimeri termoindurenti. Si riportano nelle figure successive le ultime fasi di pesatura e le caratterizzazioni finali ottenute tramite la prova.

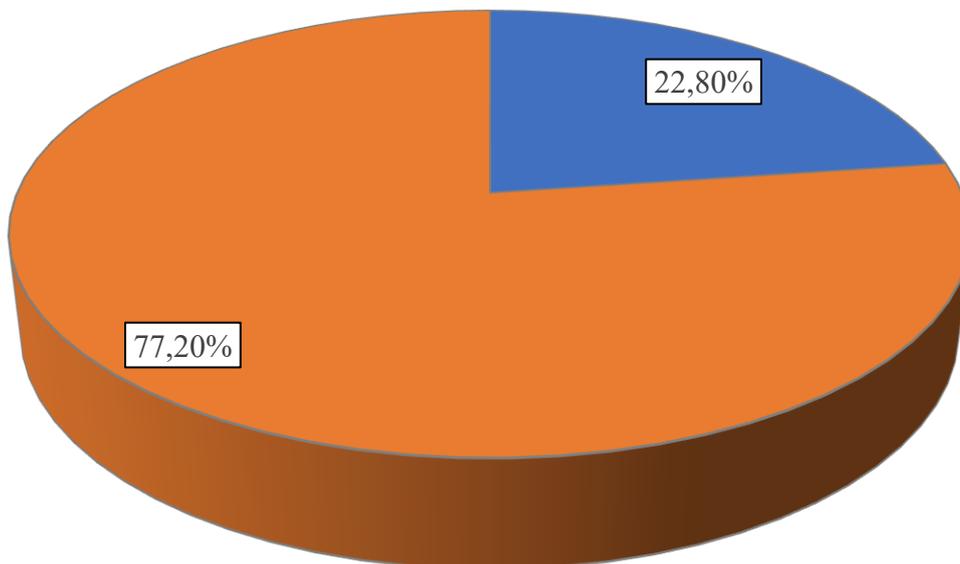


*Figura 50 - Fase di pesatura delle frazioni separate tramite separazione densimetrica.*

*Fluff leggero 2020*



*Fluff pesante 2020*



■ *Frazione leggera*   ■ *Frazione pesante*

*Figura 51 - Risultati della prova densimetrica 2020.*

## 4.6. Recupero e valorizzazione energetica del car fluff

La quasi totalità dei settori produttivi in Europa negli ultimi anni ha visto la legislazione cambiare e aggiornarsi per puntare all'obiettivo comune dell'economia circolare. Tale approccio economico ed industriale, ripreso e spinto dal CEP "European Circular Economy Package", ha come scopo strutturare un sistema che permetta l'utilizzo delle risorse il più a lungo possibile e che, a fine vita, favorisca operazioni quali il recupero o la rigenerazione rispetto allo smaltimento in discarica. Seguendo proprio tale linea di pensiero la Direttiva 2018/849 ribadisce il concetto della gerarchia dei rifiuti definendo prioritarie azioni come il reimpiego, il riciclo e il recupero nell'ambito dei veicoli a fine vita. Nello specifico, il reimpiego e la rigenerazione andrebbero preferiti al riciclo di materiali che a sua volta è una soluzione migliore della valorizzazione energetica attraverso processi chimici e termici [14]. Proprio per andare incontro a questa tipologia di logiche in quest'ultima parte di tesi si sono valutate i due processi di valorizzazione introdotti ad inizio capitolo, ovvero la produzione di merci a partire dalle frazioni termoplastiche uscenti dall'impianto di trattamento e la possibilità di utilizzare una parte del car fluff come CSS.

Per quanto riguarda la possibilità di recuperare come materia prima seconda i polimeri termoplastici ottenuti tramite separazione densimetrica, i campioni sui quali si è effettuata la prova verranno analizzati per identificarne le caratteristiche e valutarne eventuali impieghi sulla base di queste. Vista la reversibilità delle proprietà dei materiali termoplastici al variare della temperatura, una soluzione per permettere operazioni di recupero sostenibili potrebbero essere lo stampaggio di elementi terzi con tecniche a compressione o ad iniezione [37]. L'applicazione di una selezione basata sulle proprietà densimetriche permetterebbe di separare in maniera semplice ed economica polimeri quali polietilene o polipropilene dai termoindurenti, indesiderati in tale tipologia di approccio visto il loro diverso comportamento termico.

Una delle principali alternative considerate per il raggiungimento dei target sopra citati è il recupero energetico che, secondo la Direttiva Europea 2000/53/EC, può spingersi fino al 10% del peso dei veicoli a fine vita. Per capire se i rifiuti provenienti da questo settore potrebbero tornare utili in ottica valorizzazione energetica bisogna fare riferimento al Decreto 22 del 14/02/2013 ovvero il "Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di determinate tipologie di combustibili solidi secondari (CSS)" che si basa sulla norma tecnica UNI EN 15359.

Secondo tale decreto la cessazione della qualifica di rifiuto è possibile se sono verificate le condizioni di riferimento rispetto a tre parametri, ovvero la media del PCI "Potere Calorifico Inferiore" e del contenuto di Cloro ed il contenuto di Mercurio valutato rispetto alla mediana e all'ottantesimo percentile. Si riporta nella tabella successiva la classificazione dei CSS secondo il Decreto 22 del 14/02/2013 riportante i rispettivi valori limite per classe.

Tabella 29 - Classificazione dei combustibili solidi secondari (CSS) (da UNI EN 15359).

Caratteristiche di classificazione							
Caratteristica	Misura statistica	Unità di misura	Valori limite per classe				
			1	2	3	4	5
<i>PCI</i>	Media	MJ/kg t.q.	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
<i>Cl</i>	Media	% s.s.	≤0,2	0,6	1,0	1,5	3
<i>Hg</i>	Mediana	mg/MJ t. q.	≤0,02	≤0,03	≤0,08	≤0,15	≤0,50
	80° percentile	mg/MJ t. q.	≤0,04	≤0,06	≤0,16	≤0,30	≤1,00

Secondo la tabella si può classificare come combustibile solido secondario un rifiuto avente PCI e Cl come definito dalle classi 1, 2, 3 e relative combinazioni e Hg come definito dalle classi 1 e 2. La valutazione del cloro risulta di particolare importanza vista l'alto potenziale corrosivo associabile ai composti ottenuti dai processi termici nonché ai contaminanti clorurati derivanti da essi [38]. Appunto per questo alcuni rifiuti non pericolosi associabili al settore automotive non sono ammessi per la produzione di CSS. Tra questi rifiuti si trovano i "rifiuti di ferro e acciaio" e i "rifiuti di metalli non ferrosi" i cui rispettivi CER sono il 19 10 01 ed il 19 10 02. Nella categoria dei rifiuti esclusi da tale lista non rientra il CER 19 10 04 ovvero il fluff leggero non pericoloso costituente una parte importante dello scarto in uscita dall'impianto. Considerando tale aspetto, una possibilità alternativa allo smaltimento per questa tipologia di rifiuto potrebbe essere proprio il suo utilizzo come combustibile solido secondario. Come osservato attraverso l'analisi granulometrica, l'utilizzo di un vaglio a barre impostato con apertura 150 mm permetterebbe di allontanare una buona percentuale di metalli da elementi quali il PUR ed il tessile pesante. Quest'ultime due frazioni potrebbero così andare a costituire la base di un materiale sfruttabile come CSS, visti anche i valori di potere calorifico rispettivamente pari a 28.02 MJ/kg e 22.64 MJ/kg. Nonostante andrebbero ancora verificati i parametri del Cloro e del Mercurio, si può notare come i presupposti per una valorizzazione energetica ci siano tutti e quindi come tale soluzione risulti sensata in un'ottica di recupero. Oltre ai parametri appena nominati, inoltre, risulterebbe opportuno tenere in considerazione alcune specifiche quali il codice classe, l'origine del rifiuto, la forma e la dimensione delle particelle setacciate, il contenuto di ceneri e di umidità piuttosto che le proprietà chimiche. La fase di analisi sui campioni di PUR e tessile pesante sono state effettuate seguendo metodiche di indagine che fanno riferimento alle norme UNI EN. Le fasi relative alla campionatura e alla preparazione dei campioni di laboratorio sono state

effettuate nel rispetto delle norme UNI EN 15442, UNI 10802 e UNI EN 15443. Le prime due riguardano i metodi di campionamento applicati al CRS ed hanno come scopo l'ottenimento di campioni rappresentativi e casuali, in relazione sia alla massa del materiale raccolto che alla frequenza di prove effettuate. L'ultima norma nominata definisce le regole per la corretta preparazione del campione di laboratorio, stabilendo gli standard in merito alle fasi di pesatura dei campioni, alla separazione di pezzi grossolani di metallo e alle riduzioni dimensionali del materiale tramite mulino. Nello specifico si sono effettuate delle comminuzioni ottenendo materiale di dimensioni di 4 mm e 1 mm tramite mulino a coltelli seguendo le indicazioni dello studio APAT/ARPA sul fluff da autoveicoli. La soluzione del recupero energetico potrebbe essere una delle vie migliori per l'avvicinamento ai target definiti nei capitoli precedenti come confermato dai chiarimenti interpretativi del DM n. 22 del 14/02/2013 emanati tramite circolare del MATTM del 27/03/2018. L'obiettivo è quello di promuovere il recupero del car fluff sfruttandolo per la preparazione di CSS contribuendo ad un maggiore recupero complessivo di rifiuti, alla riduzione della pratica dello smaltimento in discarica, al risparmio delle risorse naturali e alla riduzione di utilizzo di combustibili convenzionali incrementando al tempo stesso la certezza d'approvvigionamento energetico.

## Conclusioni

Col presente lavoro di tesi si è andati a valutare il tema della sostenibilità applicato al settore automotive scendendo nel dettaglio sulla gestione dei rifiuti plastici e sul trattamento dei veicoli a fine vita. In tal senso si sono cercate delle soluzioni alternative per una migliore gestione dei rifiuti originato da questo particolare settore produttivo.

Come osservato nel primo capitolo, i trend europei ed italiani mostrano una continua crescita del numero di autoveicoli negli ultimi anni, fattore che rende ancora più urgente la necessità di assecondare politiche sempre più sostenibili e vicine ad un modello circolare. Analizzando la composizione dei rifiuti in uscita dagli impianti di trattamento, uno dei principali fattori che ad oggi limita l'applicazione di tali logiche in questo settore è la forte presenza di materiale plastico contenuto nello scarto. Per questo motivo, gli sforzi aventi come obiettivo il raggiungimento dei target normativi definiti nel secondo capitolo, sono stati rivolti alla ricerca di soluzioni alternative che permettano di trattare e gestire al meglio tale categoria di rifiuto.

Seguendo gli obiettivi definiti dal progetto Reciplast si è eseguita inizialmente un'analisi delle diverse categorie plastiche presenti nelle autovetture e successivamente si è andati a valutare la distribuzione dei vari polimeri nei veicoli.

Sulla base del quadro costruito e grazie alla collaborazione con il Centro Recupero e Servizi si è sviluppato l'ultimo capitolo, nel quale si è scesi nel dettaglio nella valutazione di trattamenti alternativi allo smaltimento, pensati per facilitare il raggiungimento dei target dell'85% di riciclo e reimpiego e del 95% di recupero e reimpiego.

La prima soluzione presa in considerazione è stata il recupero di componenti plastici smontati preventivamente alle operazioni di trattamento in impianto. Per capire come ottimizzare al meglio tale approccio si sono inizialmente valutati i livelli di fattibilità teorici sulla base di parametri quali il peso, il numero di sub-componenti e i materiali costituenti il pezzo analizzato. Successivamente tali livelli sono stati verificati tramite due prove in campo, grazie alle quali si è determinato il tempo di smontaggio e quindi la sostenibilità economica dell'operazione. In particolare, nella seconda prova si è eseguita l'analisi esclusivamente per i componenti prodotti a partire da polimeri termoplastici vista la loro maggiore propensione alla riciclabilità. Dalle prove eseguite si è notato come, oltre il serbatoio ed il paraurti, sarebbe possibile il recupero di altri elementi quali i montanti, i passaruota, i batticalcagno e il filtro dell'aria. A partire da tali valutazioni si è considerata come possibilità di recupero l'aggiunta di grafene come nanofiller ai componenti caratterizzati da un livello di fattibilità basso. L'analisi della letteratura in tal senso dimostra come, aggiungendo piccoli quantitativi di

grafene, si riescano ad ottenere miglioramenti prestazionali in merito alle proprietà termiche, elettriche e meccaniche.

Grazie alla collaborazione con l'azienda GrapheneUP<sup>®</sup> si è eseguita una prima indagine su compositi di grafene all'1% in peso ottenuti a partire da parti di serbatoio e paraurti provenienti dalla prova di smontaggio. L'indagine eseguita sui campioni si è basata su prove quali la riflettanza totale attenuata, la calorimetria differenziale a scansione, l'analisi meccanica dinamica e la prova a trazione. Per quanto si sia ancora in una fase sperimentale, già con queste prove in cui il contenuto di grafene risulta minimo, per alcune proprietà si sono registrati valori che si avvicinano ai parametri di riferimento dei polimeri vergini. Lo sviluppo di un'analisi più concreta necessiterebbe di prove più dettagliate ed estese, nonostante questo i dati analizzati fanno presupporre che, investire nel recupero tramite la realizzazione di compositi con grafene, potrebbe essere una valida alternativa allo smaltimento in discarica di tale rifiuto.

Le altre due soluzioni che sono state valutate tenendo in considerazione gli obiettivi europei in merito alle pratiche del recupero e del riciclo sono pratiche applicabili post trattamento dei veicoli a fine vita. Tali valutazioni sono state effettuate a partire da una caratterizzazione del materiale in uscita dall'impianto di trattamento costituita da diverse fasi di analisi sviluppate in collaborazione con il DISAT. Il primo ha previsto un'analisi merceologica nella quale si sono indagati diversi campioni di fluff prelevati dal CRS. Sul fluff leggero prelevato si sono successivamente eseguite, prima l'analisi granulometrica identificando le curve di riferimento per i quattro materiali più abbondanti ovvero il PUR, il tessile pesante, i metalli e la plastica e successivamente un'analisi del potere calorifico inferiore delle prime due frazioni nominate. Infine, si è svolta l'analisi densimetrica con la quale si sono separati i diversi polimeri per densità rispetto a dell'acqua a 20°C come liquido di riferimento. Si è notato come per il fluff pesante oltre il 75% della plastica sia risultata appartenere alla frazione pesante, al contrario per il fluff leggero si è riscontrata una maggiore presenza di frazione leggera. Osservando le densità caratterizzanti i polimeri appartenenti alle diverse categorie si nota come sarebbe possibile, grazie ad una fase di separazione densimetrica, allontanare i termoplastici per poi recuperarli come materia nuova seconda. Tale pratica è in fase di studio in quanto risulta necessario capire quali sarebbero le proprietà di tali materiali e quindi in quali ambiti potrebbero trovare impiego a seguito del recupero.

La seconda soluzione analizzata sarebbe la valorizzazione energetica del fluff leggero in uscita dall'impianto. L'idea è stata quella di valutare le caratteristiche del materiale soggetto ad una fase di vagliatura preventiva e costituito quindi prevalentemente da PUR e tessile pesante. Grazie all'analisi del potere calorifico si è visto come tale parametro risulti in linea con le richieste della normativa e

quindi, se il calcolo dei livelli di Cloro e Mercurio ancora in corso risultassero nei range, sarebbe verificata la possibilità di sfruttare tale scarto come combustibile solido secondario.

## Bibliografia

- [1] ACEA Report: Vehicles in use in Europe January 2021;
- [2] Direttiva 75/442/CEE;
- [3] Direttiva 2000/53/EC:
- [4] Eurostat 2020: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>;
- [5] L'Italia del Riciclo 2020: <http://unicircular.org/files/rapporto2020.pdf>;
- [6] Cossu, R., Lai, T.: "Automotive shredder residue (ASR) management: An overview" (2015);
- [7] Vermeulen, I., Van Caneghem, J., Block, C., Baeyens, J., Vandecasteele, J.: "Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy, or chemicals' valorization" (2011);
- [8] Ministero dell'Ambiente, "Decreto Legislativo 5 febbraio 1997 n. 22";
- [9] Ministero dell'Ambiente, "Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998";
- [10] Ministero dell'Ambiente, "Decreto Ministeriale 16 gennaio 1995";
- [11] Commissione Europea, "Direttiva Europea 2000/53/CE";
- [12] Ministero dell'Ambiente, "Decreto Legislativo 24 giugno 2003 n 209";
- [13] Ministero dell'Ambiente, "Decreto Legislativo 3 settembre 2020 n 119";
- [14] Commissione Europea, "Direttiva Europea 2018/849/CE";
- [15] Wilhelm: "Materials used in automobile manufacture - current state and perspectives" (1993);
- [16] Lindsay Miller, Katie Soulliere, Susan Sawyer-Beaulieu, Simon Tseng and Edwin Tam: "Challenges and Alternatives to Plastics Recycling in the Automotive Sector" (2014);
- [17] D. Regionale, C. Del, S. Regionale, D. Regionale, and C. Sociale, Progetto Reciplast: *appRoccio all'Economia Circolare per il riciclo di imballi e componenti auto fine vita in PLastica*. 2020;
- [18] Marta Minardi: "Analisi di materiali plastici da autoveicoli a fine vita" (2020);
- [19] M. Kutz, Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials and Applications. (2016);
- [20] R. D. Adams et al.: "Recycling of reinforced plastics," Applied Composite Materials, (2014);
- [21] B. Y. J. S. Mayes, P. Rebecca, and N. E. W. Y. State: "Recycling of fibre-reinforced plastics," (2020);
- [22] De La Fuente, Jesus: "Reduced Graphene Oxide - What is it? How is it created?" (2018);
- [23] Y. Xu, H. Cao, Y. Xue, B. Li, and W. Cai: "Liquid-phase exfoliation of graphene: An overview on exfoliation media, techniques, and challenges," (2018);
- [24] J. Fuente: "CVD Graphene - Creating graphene via Chemical Vapour Deposition." (2014);

- [25] J. Liu et al., “Improved synthesis of graphene flakes from the multiple electrochemical exfoliations of graphite rod” (2013);
- [26] H. Lee, M. A. Bratescu, T. Ueno, and N. Saito: “Solution plasma exfoliation of graphene flakes from graphite electrodes” (2014);
- [27] H. Kim et al.: “Graphene/polyethylene nanocomposites: Effect of polyethylene functionalization and blending methods” (2011);
- [28] M. el Achaby and A. Qaiss,: “Processing and properties of polyethylene reinforced by graphene nanosheets and carbon nanotubes” (2013);
- [29] S. Mishra: “Effect of Graphitic Nanomaterials on Thermal, Mechanical and Morphological Properties of Polypropylene Nanocomposite,” (2019);
- [30] Chércoles Asensio, R., San Andrés Moya, M., de la Roja, J.M. et al.: “Analytical characterization of polymers used in conservation and restoration by ATR-FTIR spectroscopy” (2009);
- [31] Noda I., Dowrey A.E., Haynes J.L., Marcott C.: “Group Frequency Assignments for Major Infrared Bands Observed in Common Synthetic Polymers” (2007);
- [32] Lin J. et al.: “Preparation and Compatibility Evaluation of Polypropylene/High Density Polyethylene Polyblends Materials” (2015);
- [33] Cossu, R., Fiore, S., Lai, T., Mancini, G., Ruffino, B., Viotti, P., Zanetti M.C.: “Review of Italian experience on automotive shredder residue characterization and management” (2013);
- [34] Fiore, S., Ruffino, B., Zanetti, M.C.: “Automobile Shredder Residues in Italy: Characterization and valorization opportunities” (2012);
- [35] Ruffino, B., Panepinto, D., Zanetti, M.C.: “A Circular Approach for Recovery and Recycling of Automobile Shredder Residues (ASRs): Material and Thermal Valorization” (2020);
- [36] Miller, L., Soulliere, K., Sawyer-Beaulieu, S., Tseng, S., Tam E.: “Challenges and Alternatives to Plastics Recycling in the Automotive Sector” (2014);
- [37] Edo, M., Aracil, I., Fonta, R., Anzano, M., Fullana, A., Collina, E.: “Viability study of automobile shredder residue as fuel” (2013).