



# POLITECNICO DI BARI

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di  
Chimica – DICATECh

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL  
TERRITORIO

---

RELAZIONE TESI

***TECNOLOGIE GREEN PER LA GESTIONE SOSTENIBILE DEL  
CICLO DEI RAEE. CARICAMENTO TRIBO-ELETTROSTATICO DI  
PLASTICHE: PS, PVC, PP, PA***

Relatori:

Prof. Ing. Michele Notarnicola

Prof. Ing. Francesco Todaro

Christian Montaruli

Matricola: 589340



**Politecnico  
di Bari**

## Sommario

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| <b>1. Introduzione:</b>               | 3  |
| <b>2. Attività di sperimentazione</b> | 4  |
| <b>2.1 Pretrattamenti</b>             | 4  |
| <b>3. Tribo-caricamento</b>           | 6  |
| <b>4. Misura della carica</b>         | 8  |
| <b>5. Elaborazione dati</b>           | 10 |
| <b>6. Conclusioni</b>                 | 12 |

# 1. Introduzione:

I Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) derivano da dispositivi alimentati da corrente elettrica, inclusi i loro componenti e materiali integranti, di cui il proprietario desidera disfarsi per vari motivi (guasti, obsolescenza o inutilizzo). A causa del rapido progresso tecnologico e della concorrenza sul mercato, queste apparecchiature generano uno dei flussi di rifiuti in più rapida crescita al mondo.

Questi rifiuti sono composti da metalli ferrosi e non ferrosi (come rame e alluminio), plastiche, vetro, materiali preziosi e terre rare che, se trattati correttamente, possono essere recuperati e reintegrati nel ciclo economico. Tuttavia, alcune apparecchiature contengono sostanze nocive (come mercurio, piombo, sostanze che riducono l'ozono, bifenili polibromurati, ecc.) che richiedono trattamenti adeguati per evitare impatti ambientali e danni alla salute umana.

Pertanto, i RAEE sono costituiti da materiali eterogenei, il che rende necessarie tecnologie innovative per una separazione ad alta efficienza. In questo contesto, il lavoro di tesi mira a verificare la fattibilità tecnica della separazione tribo-elettrostatica dei polimeri tipicamente presenti nei RAEE di categoria R2 (grandi elettrodomestici).

L'attività di tirocinio formativo propedeutico alla realizzazione della tesi intitolata "TECNOLOGIE GREEN PER LA GESTIONE SOSTENIBILE DEL CICLO DEI RAEE. CARICAMENTO TRIBO-ELETTROSTATICO DI PLASTICHE: PS, PVC, PP, PA", è stata svolta presso il Laboratorio di Tecnologie Ambientali, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECh) del Politecnico di Bari.

Le attività svolte hanno, quindi, permesso di comprendere sistemi di recupero dei polimeri plastici, contribuendo così alla promozione di pratiche sostenibili e alla tutela dell'ambiente.

## 2. Attività di sperimentazione

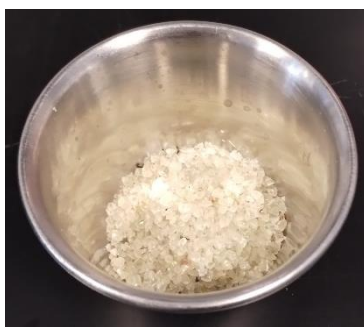
### 2.1 Pretrattamenti

La preparazione dei campioni al fine del caricamento elettrostatico avviene per mezzo di un processo di triturazione. Utilizzando un mulino a taglienti RETSCH SM300, strumento che può essere utilizzato per trattare le componenti plastiche dei RAEE - opportunamente disassemblate dal resto del rifiuto – è stato possibile ottenere particelle con dimensioni idonee ai successivi processi di recupero.

Il tritratore RETSCH SM30, dotato di barre di taglio a doppio effetto possiede un rotore a sezione parallela che genera 18 tagli per rotazione e ha permesso di ottenere più frazioni granulometriche.

Successivamente, al fine di un controllo qualitativo del materiale triturato, ha seguito un'operazione atta alla selezione dimensionale (vagliatura), adoperando un Setacciatore Retsch AS 200 utilizzato per separare i polimeri in classi granulometriche, ad esempio: 1,25 – 2 mm; 1,25 – 2,5 mm; 2 – 2,5 mm.

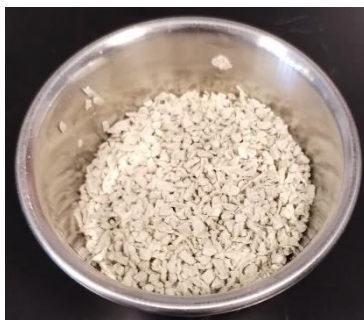
Nelle figure seguenti si riportano degli esempi di materiali ottenuti dalle operazioni descritte in precedenza.



**Figura 1** – Contenitore con polistirene (PS)



**Figura 2** – Contenitore con polivinilcloruro (PVC)



***Figura 3 – Contenitore con polipropilene (PP)***



***Figura 4 – Contenitore con poliammide (PA)***

### 3. Tribo-caricamento

Il tribo-caricatore Stokkermill utilizzato per il tribo-caricamento dei polimeri plastici, composto da un rotore cilindrico al cui interno è incernierato un tubo chiamato “camera di caricamento” dotato di setti longitudinali (*Figura 5*) utili a favorire il caricamento delle particelle in alimentazione. I granuli vengono messi in movimento e fatti collidere tra loro o con le pareti del dispositivo. Questo movimento genera cariche elettriche attraverso l’effetto triboelettrico. Alcuni granuli acquisiscono cariche positive, mentre altre acquisiscono cariche negative. Il rotore è messo in movimento tramite un motore posizionato al di sotto della camera di carica e del rotore stesso.



*Figura 5 – Camera di caricamento tribo-caricatore Stokkermill*

Il tribo-caricatore è dotato di un pannello di controllo dal quale è possibile modificare i parametri del dispositivo, quali:

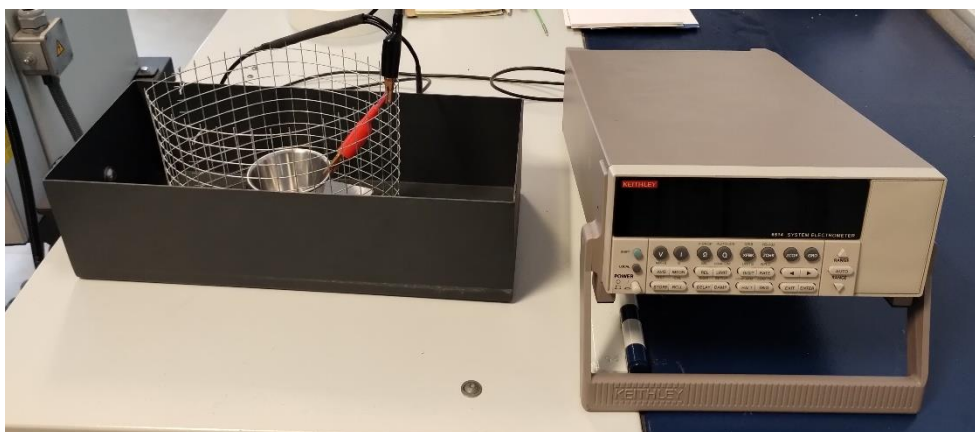
- **Velocità di rotazione del cilindro:** variabile in un range di 15 Hz - 60 Hz.
- **Inclinazione:** variabile in un range di 0° - 20°.

Quando il dispositivo viene acceso e impostato sulla modalità di carica desiderata, i materiali all'interno della camera di carica vengono sottoposti a un'azione di sfregamento o agitazione. L'obiettivo principale è quello di creare un movimento relativo tra i materiali, generando così una

carica elettrostatica. Il materiale viene introdotto nella camera di caricamento tramite una tramoggia di carico.

## 4. Misura della carica

Il metodo più efficace per determinare la densità di carica consiste nell'utilizzo di un multimetro collegato a una gabbia di Faraday (**Figura 6**) per isolare il campione tribo-caricato dalle possibili interazioni con campi elettrostatici esterni. L'elettrometro Keithley, progettato per applicazioni che richiedono misurazioni rapide e precise di correnti basse, tensioni da fonti ad alta resistenza, cariche o alte resistenze, è stato collegato tramite cavi dotati di morsetti ai terminali, al supporto e alla gabbia di Faraday.



*Figura 6 – Supporto isolante dotato con gabbia di Faraday*

Al termine del tempo stabilito di tribo-carica, la camera di carica viene inclinata e le particelle caricate, cadono per gravità all'interno del supporto accoppiato alla gabbia di Faraday. I sistemi isolanti realizzati, permettono alla carica acquisita di non essere ceduta a corpi esterni, in modo tale da permanere all'interno del contenitore, affinché venga misurata numericamente tramite l'elettrometro. La densità di carica (nC/g) si ottiene dal rapporto tra la misura di carica (nC) e il peso del materiale (g).

I dati registrati durante le prove di laboratorio riguardanti il tribo-caricamento hanno consentito di calcolare la densità di carica (nC/g) calcolata come:

$$nC/g = \frac{nC}{g}$$

- nC, carica elettrica misurata tramite multimetro Keithley;



- g, peso del materiale raccolto nel contenitore isolante.

## 5. Elaborazione dati

Inizialmente sono stati eseguiti 9 set di esperimenti, ciascuno costituito da 4 prove di laboratorio, utilizzando 150 g di polistirene (PS) con 3 differenti range di granulometria. Sono stati analizzati i range [1,25 – 2 mm], [2 – 2,5 mm], e [1,25 – 2,5 mm]. In ciascun set di prove, è stato variato il tempo di permanenza del materiale nel dispositivo tra 1 e 5 minuti, mantenendo costanti sia la velocità di rotazione (40 Hz) che l'inclinazione del cilindro tribo-caricatore ( $0^\circ$ ).

Sulla base dei risultati ottenuti dalle sperimentazioni sopracitate, è stato così possibile individuare una dimensione granulometrica dei polimeri identificabile nel range 1,25 – 2,5 mm.

Per ogni polimero analizzato (PS, PVC, PP, PA), sono stati presi in considerazione dai 3 ai 4 set di esperimenti per materiale, con: range granulometrico 1,25 – 2,5 mm; inclinazione della camera di caricamento  $0^\circ$ ; velocità del cilindro rotante 40 Hz; al variare del tempo di tribo-carica (1, 2, 3, 5, 7, 9min). Avendo un range di velocità variabile tra i 15 Hz e 60 Hz, si è deciso di effettuare la sperimentazione con una velocità del cilindro rotante di 40 Hz, valore vicino alla media dei parametri di velocità minimo e massimo (15 Hz – 60 Hz). Per l'inclinazione ( $0^\circ$ -  $20^\circ$ ), si è scelto di eseguire i test di tribo-caricamento con una inclinazione iniziale di  $0^\circ$ , tale da non consentire al materiale in alimentazione di cadere per gravità nella camera di caricamento, prima dell'accensione del dispositivo stesso.

Si sono scelti suddetti parametri per valutare per ogni polimero, l'ottimale tempo di tribo-caricamento che restituisse il maggior valore di densità di carica.

Individuato il tempo di tribo-caricamento utile alla misurazione della densità di carica maggiore per ogni polimero analizzato, lo studio ha approfondito la velocità di tribo-carica ottimale.

Pertanto, sono stati eseguiti 3 set di esperimenti, ciascuno costituito da 3 prove di laboratorio, utilizzando 150 g per ogni polimero analizzato (PS, PVC, PP, PA) con granulometria compresa tra [1,25 – 2,5 mm]. In ciascun set, la velocità di rotazione è stata variata tra 25 Hz, 40 Hz e 55 Hz, mantenendo costanti sia il tempo di permanenza ottimale individuato precedentemente per ogni polimero analizzato, che l'inclinazione ( $0^\circ$ ). Quindi, la granulometria e il tempo di permanenza scelti, rispecchiano quelli che hanno consentito di raggiungere i migliori livelli di densità di carica nei set precedentemente eseguiti.

Da queste valutazioni, è risultato ragionevole, alla luce dei risultati di laboratorio ricondotti, l'utilizzo nelle prove di tribo-caricamento di una granulometria mista, ovvero 1,25-2,5mm.

## 6. Conclusioni

Il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo l'analisi delle prestazioni del processo di tribo-caricamento di quattro dei principali polimeri presenti nei RAEE R2: il polistirene (PS), il polivinilcloruro (PVC), il polipropilene (PP) e poliammide (PA). Per lo scopo, è stato utilizzato un impianto prototipale disponibile presso il Laboratorio di Tecnologie Ambientali del DICATECh (Politecnico di Bari).

I risultati hanno evidenziato la dipendenza delle prestazioni dai parametri di funzionamento. In particolare, la sperimentazione ha evidenziato che:

- la combinazione ottimale dei parametri di funzionamento del dispositivo di tribo-carica è caratterizzata da valori di Tempo,  $T = 5\text{min}$  per PS e PVC, diversamente dal tempo  $T = 9\text{min}$  per PP e PA. Per i quattro polimeri è stata individuata una Velocità ottimale  $V = 40\text{ Hz}$ , con Inclinazione  $I = 0^\circ$ . Queste combinazioni di parametri del tribo-caricatore, hanno permesso di massimizzare la differenza di carica tra i due polimeri plastici presi in esame in coppia (PS e PVC, PP e PA), ottenuta durante il processo di tribo-caricamento. Questa massimizzazione della differenza di carica tra i due polimeri, permette una valida efficienza di separazione tramite l'utilizzo di un separatore elettrostatico;
- la granulometria del materiale in ingresso influisce in modo rilevante sulla performance di tribo-caricamento; in particolare, la granulometria  $[1.25\text{-}2.5\text{mm}]$  è quella che garantisce migliori risultati in termini di densità di carica;
- l'umidità relativa influenza fortemente il processo di tribo-carica e deve essere mantenuta a livelli bassi.

In conclusione, la sperimentazione pone le basi per lo sviluppo di una tecnologia innovativa e green per il recupero di materie prime dai RAEE, in sintonia con le strategie ambientali europee attuali di green/circular economy, permettendo il recupero di queste frazioni plastiche. Questo processo, utilizzabile su scala industriale, permetterebbe di rendere obsoleti ed evitabili, tutti i processi di separazione di polimeri plastici “ad umido”, ovvero con l'utilizzo di acqua come matrice di separazione tramite tecniche di flottazione, che necessitano successivamente i trattamenti di depurazione delle acque di processo utilizzate.

Le frazioni plastiche, come ogni altro materiale, rappresentano una preziosa risorsa che può essere ulteriormente riutilizzata per altri scopi, donandole una “seconda vita” e in particolare, i sistemi di tribo-caricamento risultano un processo promettente e funzionante per l'ottenimento di materie prime seconde (MPS).



Politecnico  
di Bari

Christian Montebelli

---