

# **POLITECNICO DI TORINO**

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

Tesi di Laurea Magistrale

## **IPOTESI DI UN PROCESSO DI RECUPERO DI MATERIE PRIME SECONDARIE DA SCHEDE ELETTRONICHE A FINE VITA**



Relatore

Prof.ssa Mariachiara Zanetti

Candidato

Marco Magni

Correlatore

Prof.ssa Paola Marini

Anno Accademico 2018/2019

*Un ringraziamento eccezionale va  
alla mia famiglia che mi ha sostenuto in tutto questo percorso.  
Ringrazio anche Martina una persona speciale che mi ha dato un grande aiuto  
e senza la quale non avrei iniziato e completato questo importante percorso.*

# Indice

<b>Introduzione</b> .....	<b>4</b>
<b>Capitolo 1 – Quadro normativo</b> .....	<b>6</b>
1.1 La gerarchia dei rifiuti .....	7
1.2 Direttive europee: rifiuti .....	7
1.3 Normativa italiana: rifiuti .....	10
1.4 Normativa RAEE .....	13
1.5 Normativa “End of waste” .....	20
<b>Capitolo 2 – Il Sistema RAEE</b> .....	<b>23</b>
2.1 RAEE Domestici.....	24
2.2 RAEE Professionali .....	26
2.3 Soggetti del sistema RAEE.....	26
<b>Capitolo 3 – Le schede elettroniche</b> .....	<b>31</b>
3.1 Tipologie in commercio .....	32
3.2 Modalità costruttive .....	33
3.3 Quantità e gestione attuale .....	41
3.4 Caratterizzazione.....	42
3.5 Critical Raw Materials .....	47
<b>Capitolo 4 – Trattamenti esistenti</b> .....	<b>51</b>
4.1 Trattamenti industriali.....	51
4.2 Trattamenti sperimentali .....	52
4.3 Confronto fra i trattamenti presentati.....	73
<b>Capitolo 5 – Trattamento in ipotesi</b> .....	<b>75</b>
5.1 Ipotesi.....	75
5.2 Materiali e metodi .....	75

5.3 Trattamenti per la frazione fine (<0,5 mm) .....	80
5.4 Trattamenti per la frazione grossolana (>0,5 mm).....	84
5.5 Risultati .....	89
5.6 Caratterizzazione merceologica .....	99
<b>Conclusioni .....</b>	<b>102</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>105</b>

# Introduzione

In un'era moderna in cui la tecnologia è sempre più presente in ogni tipo di attività umana si presenta un problema di non poco conto, la gestione dei rifiuti tecnologici. E nel nostro mondo contemporaneo, in cui la coscienza ambientale continua ad essere sempre più sviluppata e in cui si teme l'esaurimento delle risorse per l'elevato sfruttamento, un'economia di tipo circolare si palesa come unica soluzione per un'esistenza di tipo sostenibile. E per fare tutto ciò si rende necessario il trattamento dei rifiuti da noi prodotti in modo da poterne ricavare tutte le materie prime e ridurre la pressione da noi perpetrata sull'ambiente che ci circonda. Questa tipologia di azioni può essere attuata solo in impianti di tipo specializzato e progettati da adeguate figure professionali in modo da portare il riciclo dei diversi materiali al limite massimo e ridurre il più possibile gli scarti.

In Italia nell'anno 2018 sono state raccolte circa 421 mila tonnellate di rifiuti da apparecchiature elettroniche ed elettriche ([www.cdcaee.it](http://www.cdcaee.it)). Il tasso di raccolta del nostro Paese è al di sotto del target europeo in termini di percentuale della raccolta sull'immesso nel mercato nei tre anni precedenti. Cresce quindi la necessità di aumentare la raccolta e la conseguente necessità del trattamento dei rifiuti in modo da recuperare al meglio le materie prime.

Uno tra i rifiuti più interessanti, in questo contesto, sono le schede elettroniche che, durante la vita utile dell'apparecchio, ne gestiscono le funzioni e a fine vita divengono una fonte di importanti materie prime seconde. Diventa quindi importante recuperare tali rifiuti e trattarli in modo corretto per motivazioni economiche ma anche politiche e sociali.

In questa trattazione verrà quindi illustrato, in primo luogo, il contesto normativo che regola questo ambito. Successivamente verranno riportate le operazioni e il funzionamento del sistema di raccolta dei rifiuti da apparecchiature elettroniche ed elettriche (RAEE) dal consumatore all'impianto di trattamento. Di seguito verrà mostrata la situazione italiana e verranno approfondite anche le tematiche relative alla costruzione, realizzazione e smaltimento delle schede elettroniche. Inoltre, verranno descritti i trattamenti esistenti al momento attuale e i trattamenti sperimentali tentati. In ultimo,

viene proposto un metodo di trattamento nuovo in cui vengono sperimentate diverse soluzioni di gestione in modo da ottenere un rendimento massimo di separazione dei diversi materiali.

# Capitolo 1

## Quadro normativo

La legislazione ambientale dell'UE affronta temi di ampia portata, come la qualità dell'aria e dell'acqua, i gas a effetto serra e, ovviamente, la gestione dei rifiuti, che l'UE definisce come l'insieme delle operazioni di raccolta, trasporto, recupero e smaltimento dei rifiuti, compresi la supervisione di tali operazioni e gli interventi successivi alla chiusura dei siti di smaltimento nonché le operazioni effettuate in qualità di commercianti o intermediari. L'Unione Europea si è posta l'obiettivo di ridurre drasticamente l'ammontare di rifiuti generato attraverso iniziative di prevenzione, un utilizzo migliore delle risorse e incoraggiando un passaggio verso forme più sostenibili di produzione e di consumo.

Negli ultimi anni l'aumento dell'utilizzo dei beni di natura elettrica ed elettronica ha generato un notevole flusso di materiale di scarto. Tali rifiuti devono essere trattati in maniera opportuna vista la presenza di sostanze inquinanti e per la loro importanza come fonte di materiale riciclato, viste le grandi quantità in gioco. Al fine di costituire un sistema di gestione efficace, che perseguisse gli obiettivi di salvaguardia, tutela e miglioramento della qualità dell'ambiente, la protezione della salute umana e l'uso accorto e razionale delle risorse naturali l'Unione Europea emise diverse direttive, fra cui le più importanti sono la 2002/96/EC, e la 2012/19/EU, recepite in Italia con appositi decreti. Tali direttive promuovono azioni a favore dell'ambiente e con il fine di conseguire lo sviluppo sostenibile. Questi provvedimenti sono basati inoltre sui principi di precauzione, dell'azione preventiva, su quello della correzione del danno ambientale alla fonte e sul principio "chi inquina paga".

In questo capitolo verranno quindi presentate le principali direttive europee che hanno definito il concetto di rifiuto come le conosciamo noi oggi e di conseguenza le norme italiane che le hanno recepite. Verranno poi descritte le principali direttive riguardanti l'ambito dei RAEE (Rifiuti da Apparecchiature Elettroniche ed Elettriche) e i recepimenti italiani e per ultimo verranno illustrate le norme relative al concetto di End of Waste.

## 1.1 La gerarchia dei rifiuti

Per una gestione dei rifiuti efficace ed efficiente era fondamentale stabilire delle priorità a livello europeo, priorità relative alle diverse soluzioni adottabili per il trattamento dei rifiuti. Venne quindi stabilita la cosiddetta “gerarchia dei rifiuti”, che trova nella direttiva 2008/98/CE il suo principale fondamento normativo. Venne stabilito un preciso ordine di priorità, in modo da rimarcare il fatto che, per il legislatore europeo, non è equivalente adottare una certa soluzione piuttosto che un'altra. L'ordine di priorità che definisce la gerarchia dei rifiuti è il seguente:

- **Prevenzione:** Il primo passo per affrontare la questione dei rifiuti è non produrli, operare per una riduzione del rifiuto alla fonte. Per fare ciò è necessario agire sui prodotti, che devono essere concepiti in modo da poter essere riutilizzati e da garantire una facile separazione delle varie parti che li compongono e favorire la successiva raccolta differenziata.
- **Preparazione per il riutilizzo:** Opzione già residuale rispetto alla precedente che stabilisce la necessità di agire per favorire il riutilizzo/riuso dei prodotti una volta esaurita la loro funzione principale, in modo da far sì di utilizzare i prodotti per altri scopi rispetto a quelli per cui sono nati.
- **Riciclaggio:** Non tutti i prodotti possono infatti essere riutilizzati e si creano quindi degli scarti. Ciò che è importante è garantire che questi scarti possano essere riciclati nella misura il più possibile consistente e per fare questo è necessaria la raccolta differenziata, che permette di separare tra loro i materiali e favorire il successivo riciclaggio. L'UE definisce “riciclaggio” qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i materiali di rifiuto sono ritrattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini.
- **Recupero di altro tipo (per esempio il recupero di energia):** Viene inteso come qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile, per esempio il recupero di energia attraverso soluzioni impiantistiche come i termovalorizzatori.
- **Smaltimento in discarica:** Soluzione sempre meno voluta ed utilizzata che prevede l'interro del rifiuto. Questa soluzione viene proposta quando non sono più attuabili azioni di diverso tipo. ([www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it))

## 1.2 Direttive europee: rifiuti

La politica europea dei rifiuti si può ricondurre alla direttiva 75/442/CE in cui la concezione dei rifiuti come problema non solo di ordine pubblico ma anche legato alle dimensioni della salute e dell'ambiente prende piede. La direttiva introdusse anche un nuovo fondamentale principio, quello del “chi inquina paga”. Questo principio viene incontro alla necessità che siano gli operatori economici a sopportare i costi dell'inquinamento prodotto, ovvero, chi attua comportamenti non compatibili con la tutela ambientale deve essere quindi gravato da un costo maggiore in relazione al danno che produce e che si scarica sulla collettività. Mentre, per quanto concerne i rifiuti speciali, tale principio è più facilmente applicabile ed è possibile valutare i comportamenti



più o meno virtuosi delle singole imprese, valorizzando quelle imprese che investono in tecnologie pulite e poco invasive e, viceversa, penalizzando quelle che operano diversamente, diverso è il discorso per i rifiuti solidi urbani, in quanto è molto più complesso misurare quanti rifiuti ha prodotto un singolo soggetto. La direttiva 442/75 eliminava quindi la sottostante idea di ordine pubblico per sostituirla con quella di sostenibilità e di armonizzazione tra le legislazioni comunitarie nel rispetto del mercato comune.

Passiamo ora alla cosiddetta “direttiva imballaggi”, la direttiva 94/62/CE, che regola appunto la produzione, il recupero e lo smaltimento dei rifiuti da imballaggio. Il fine della direttiva è quello di armonizzare le legislazioni nazionali in materia di imballaggi in modo da ridurre l’impatto sull’ambiente e garantire la tutela ambientale. La direttiva definisce infatti obiettivi di riduzione degli imballaggi entro la fine del 2008 e per raggiungere questo obiettivo prevede misure intese a prevenire la produzione degli stessi, oltre che la promozione del reimpiego, del riciclaggio e delle altre forme di recupero, per favorire la riduzione dello smaltimento finale di tali rifiuti. In particolare, la direttiva individua una serie di obiettivi quantitativi per raggiungere i quali gli Stati membri devono instaurare determinati sistemi di ritiro, raccolta e recupero. L’interpretazione generale ritiene che, in base alla logica della direttiva, l’incenerimento dei rifiuti negli impianti con recupero di energia contribuisca alla realizzazione di tali obiettivi.

Un’altra direttiva importante è la 99/31/CE che tratta il tema delle discariche, è infatti conosciuta come “landfill directive”. L’obiettivo della direttiva è quello di ridurre il più possibile il conferimento in discarica, riconoscendo il danno ambientale derivante da questa soluzione di smaltimento dei rifiuti. In sintesi, la direttiva riconosce che ci sono molti modi diversi per smaltire i rifiuti e che interrarli nelle discariche è il modo meno sostenibile da un punto di vista ambientale e dovrebbe essere ridotto al minimo. I governi dell’Unione europea devono attuare strategie nazionali per ridurre progressivamente la quantità di rifiuti biodegradabili da conferire in discarica. Tali strategie devono essere notificate alla Commissione e devono includere misure, in particolare mediante il riciclaggio, il compostaggio, la produzione di biogas o il recupero di materiali/energia, intese a realizzare determinati obiettivi quantitativi.

Parliamo ora della direttiva quadro sui rifiuti, direttiva 2006/12/CE, che codifica e sostituisce la direttiva 75/442/CE e fornisce una definizione e classificazione dei rifiuti più chiara ed omogenea per tutti i paesi UE. Le misure previste si applicano, come già chiarito dalla direttiva del 1975, a qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l’obbligo di disfarsi secondo le disposizioni nazionali degli Stati membri. Il ruolo di norma quadro generale della direttiva 2006/12/CE discende proprio dall’esistenza di direttive specifiche per la gestione di alcuni rifiuti che la completano, ponendosi con la stessa in rapporti di complementarietà e di integrazione. La direttiva stabilisce che gli Stati membri devono vietare l’abbandono, lo scarico e lo smaltimento incontrollato dei rifiuti e promuoverne la prevenzione, il riciclaggio e la trasformazione a fini di riutilizzo. Questa direttiva prevede una cooperazione tra Stati membri al fine di creare una rete integrata e adeguata di impianti di smaltimento che consenta alla Comunità di raggiungere l’autosufficienza nello smaltimento dei rifiuti e a ciascuno Stato membro di tendere verso questo obiettivo. Viene poi ulteriormente sottolineato il principio “chi inquina paga”, per

cui il costo dello smaltimento dei rifiuti deve essere sostenuto dal detentore che consegna i rifiuti ad un raccoglitore o ad un'impresa, dai precedenti detentori o dal produttore iniziale del rifiuto.

La direttiva 2006/12/CE è stata poi abrogata dalla direttiva 2008/98/CE, che riunifica e mantiene molti degli aspetti definiti fino ad allora, rafforzando la gerarchia dei rifiuti e l'aspetto della prevenzione. La direttiva stabilisce un quadro giuridico per il trattamento dei rifiuti nell'Unione europea, studiato in modo da proteggere l'ambiente e la salute umana, sottolineando l'importanza di adeguate tecniche di gestione, riutilizzo e riciclaggio dei rifiuti, volte a ridurre le pressioni sulle risorse e a migliorare il loro uso. Come è già stato riportato, è proprio la direttiva 2008/98/CE ad aver introdotto la gerarchia dei rifiuti, con le cinque opzioni della prevenzione, del riutilizzo, del riciclaggio, del recupero e dello smaltimento, ognuna delle quali residuale rispetto a quella che la precede. Tale direttiva ribadisce il principio "chi inquina paga" ed introduce il principio della "responsabilità estesa del produttore", per cui i diversi soggetti che intervengono lungo la filiera di produzione e distribuzione dei beni sono responsabili del destino ultimo di questi e delle esternalità ambientali da essi causate. Altro punto chiave della direttiva è il fatto che distingue tra rifiuti e sottoprodotti. Una sostanza infatti, si può definire sottoprodotto soltanto se sono soddisfatte le seguenti condizioni:

- a) è certo che la sostanza sarà ulteriormente utilizzata;
- b) la sostanza può essere utilizzata direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;
- c) la sostanza è prodotta come parte integrante di un processo di produzione;
- d) l'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana.

In breve, è possibile affermare che il sottoprodotto è il risultato di un processo di produzione che non era lo scopo primario di tale processo e che, diversamente da un rifiuto, deve poter essere utilizzato in seguito. La direttiva 2008/98/CE stabilisce inoltre dei target di riciclaggio entro il 2020. Ogni tre anni gli Stati membri riferiscono alla Commissione in merito ai risultati relativi al conseguimento degli obiettivi. Qualora gli obiettivi non siano conseguiti, tale relazione deve includere i motivi del mancato conseguimento e le azioni che lo Stato membro intende adottare per porvi rimedio.

Sempre all'interno di questa direttiva vengono riassunte e ricapitolate tutte le definizioni importanti nel contesto dei rifiuti al fine di risolvere alcune ambiguità (art.3 Direttiva europea 2008/98):

- rifiuto: qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi;
- produttore di rifiuti: la persona la cui attività produce rifiuti (produttore iniziale di rifiuti) o chiunque effettui operazioni di pretrattamento, miscelazione o altre operazioni che hanno modificato la natura o la composizione di detti rifiuti;

- detentore di rifiuti: il produttore dei rifiuti o la persona fisica o giuridica che ne è in possesso;
- commerciante: qualsiasi impresa che agisce in qualità di committente al fine di acquistare e successivamente vendere rifiuti, compresi i commercianti che non prendono materialmente possesso dei rifiuti;
- intermediario: qualsiasi impresa che dispone il recupero o lo smaltimento dei rifiuti per conto di altri, compresi gli intermediari che non prendono materialmente possesso dei rifiuti;
- gestione dei rifiuti: la raccolta, il trasporto, il recupero e lo smaltimento dei rifiuti, compresi la supervisione di tali operazioni e gli interventi successivi alla chiusura dei siti di smaltimento nonché le operazioni effettuate in qualità di commercianti o intermediari;
- raccolta: il prelievo dei rifiuti, compresi la cernita preliminare e il deposito preliminare, ai fini del loro trasporto in un impianto di trattamento;
- raccolta differenziata: la raccolta in cui un flusso di rifiuti è tenuto separato in base al tipo e alla natura dei rifiuti al fine di facilitarne il trattamento specifico.

Le ultime direttive approvate e pubblicate dall'Unione europea in ambito di rifiuti sono quelle relative al cosiddetto "pacchetto Circular Economy" e sono entrate in vigore lo scorso 4 luglio 2018. La prima norma facente parte di questo raggruppamento è la direttiva 2018/850/UE. Questa modifica la direttiva relativa alle discariche imponendo che entro il 2035 i rifiuti urbani smaltiti in discarica dovranno essere ridotti, per costituire al massimo il 10% del totale dei rifiuti urbani prodotti. Rendendo ancora più stringente e disincentivando ulteriormente la scelta dello smaltimento in discarica. La seconda direttiva del "pacchetto Circular Economy" è rappresentata dalla 2018/851/UE la quale si configura come una modifica alla direttiva-quadro sui rifiuti. Questa rafforza la "gerarchia dei rifiuti", imponendo agli Stati membri l'adozione di misure specifiche che diano priorità alla prevenzione, al riutilizzo e al riciclaggio rispetto allo smaltimento in discarica e all'incenerimento. I nuovi obiettivi di riciclo per i rifiuti urbani sono divisi in 3 step: 2025 (55%), 2030 (60%) e 2035 (65%). Inoltre, viene imposta la raccolta separata per: i rifiuti domestici pericolosi entro il 2022; i rifiuti organici entro il 2023; i rifiuti tessili entro il 2025. In aggiunta, per produttori, viene specificata la responsabilità finanziaria e/o organizzativa della gestione della fase del ciclo di vita in cui il proprio prodotto diventa un rifiuto. La terza norma collegata alle precedenti è identificata dalla direttiva 2018/852/UE che modifica la direttiva relativa agli imballaggi. Vengono imposti nuovi obiettivi minimi di riciclaggio da raggiungere in più step successivi. Entro il 2025 i rifiuti da imballaggio devono essere tutti riciclati almeno al 65%. La soglia viene poi estesa al 70% da raggiungere nel 2030 con quote differenziate per i diversi materiali. Inoltre, i nuovi requisiti in materia di responsabilità estesa del produttore (EPR scheme) dovranno essere applicati a tutti i tipi di imballaggio entro il 2024. ([www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it))

### **1.3 Normativa italiana: rifiuti**

Prima degli anni '70 il tema dei rifiuti non era particolarmente sentito né a livello europeo né a livello dei singoli Stati membri. Il problema dei rifiuti era considerato essenzialmente un problema di igiene urbana e il nostro paese non era da meno. Nel 1925 in Italia la

gestione dei rifiuti costituiva un onere dei comuni, che se ne occupavano mediante gestioni in economia o aziende municipalizzate.

Un primo tentativo di regolamentare la materia risale al 1941, anno in cui fu emanata la legge n.366. Prima di questa legge infatti la normativa sui rifiuti era essenzialmente contenuta in atti di carattere sanitario o in regolamenti locali della polizia urbana. La legge 366/1941 qualifica i servizi di raccolta, trasporto e smaltimento dei rifiuti come servizi di interesse pubblico e conferisce la competenza dell'intero ciclo dei rifiuti ai comuni, che hanno l'obbligo di assumersi direttamente la responsabilità di tali servizi. Rispetto alla situazione precedente infatti, la legge 366 introduce un criterio definitorio del livello di governo che non sarà più abbandonato, ovvero la "privativa dei comuni", per cui si stabiliva che questi ultimi avessero la riserva esclusiva ad organizzare il governo dei rifiuti autonomamente in gestione diretta o attraverso un'azienda municipalizzata. La legge 366, pur facendo un passo avanti, non tratta ancora però il tema dei rifiuti dal punto di vista della salvaguardia ambientale, limitandosi a finalizzare i servizi di raccolta, trasporto e smaltimento a meri obiettivi di tutela dell'igiene, dell'economia e del decoro. In ogni caso, anche se la logica di ordine pubblico era ancora prevalente, la legge 366/1941 è stata la prima legge di disciplina dei rifiuti, pur prendendo in considerazione solo i rifiuti provenienti dalle abitazioni civili.

Se la legge 366/1941 può essere considerata il primo atto normativo in materia di rifiuti, è però con il DPR 915 del 1982 che per la prima volta introduce la dimensione ambientale nel ciclo dei rifiuti. Il decreto si configura infatti come l'attuazione della direttiva comunitaria 75/442, direttiva che, come abbiamo visto, apre le porte ad una concezione dei rifiuti non solo come problema di ordine pubblico ma anche legato alle dimensioni della salute e dell'ambiente. Si legge appunto all'art. 1, in cui sono elencati i principi generali su cui si fonda il decreto, che lo smaltimento dei rifiuti, comprensivo delle varie fasi di conferimento, raccolta, spazzamento, cernita, trasporto e trattamento, deve avvenire evitando qualsiasi tipo di danno per la salute e il benessere della collettività e dei singoli. Procedimenti che devono essere portati a termine salvaguardando inoltre l'ambiente, la fauna e la flora. Altro importante elemento di innovazione presente nel primo articolo del decreto è l'introduzione dell'idea del trattamento come fase preliminare al riuso o alla generazione di energia. Con il DPR 915 del 1982 per la prima volta viene definito il problema, ovvero viene finalmente data una definizione di ciò che è rifiuto e anche una classificazione dei rifiuti, che vengono distinti in tre tipologie: rifiuti urbani, rifiuti speciali e rifiuti tossici/nocivi (art. 2); in base a queste tipologie vengono inoltre previste soluzioni differenziate per quanto riguarda il loro trasporto e trattamento. Altro importante elemento di innovazione presente nel decreto del 1982 è che, mentre prima il problema dei rifiuti era un onere prettamente a carico dei comuni, vengono specificati gli ambiti di competenza dei vari attori che prendono parte al processo di gestione dei rifiuti: lo Stato deve svolgere una funzione di indirizzo, promozione e coordinamento; Regioni e Province si occupano della pianificazione e regolazione dei servizi, della localizzazione degli impianti e di conferire le autorizzazioni alle imprese di raccolta; infine ai Comuni spetta l'attuazione della gestione.

Tra il 1982 e il 1995 in Italia si ha uno sviluppo normativo senza precedenti, con lo scopo di integrare, aggiornare e ridefinire le scelte fissate dal decreto 915/1982. Vengono quindi

emanate varie norme che precisano singoli aspetti e specifiche emergenze in materia di rifiuti e che spesso costituiscono la risposta a nuove direttive europee, oltre a circa una quarantina di leggi regionali che ridefiniscono le previsioni del DPR 915 su scala territoriale. Tra queste norme di attuazione di direttive comunitarie, ricordiamo ad esempio la legge 441/88 contenente disposizioni urgenti in tema di rifiuti, la legge 475/88 sui rifiuti industriali, la legge 45/89 sui rifiuti sanitari, il D.lgs. 95/1992 relativo all'eliminazione degli olii usati o ancora il D.lgs. 100/1992 relativo all'inquinamento provocato dai rifiuti dell'industria del biossido di titanio.

Il 5 febbraio 1997 viene approvato il decreto 22/97 meglio conosciuto come “Decreto Ronchi”, il quale aveva l'obiettivo di riordinare la stratificazione di norme esistente e di dare attuazione alle direttive europee. La sua finalità principale era quella di ridurre la produzione di rifiuti e di incentivarne il recupero ed il riciclaggio. Si tratta di una vera e propria legge quadro del settore, attuativa delle direttive europee 91/156/CE (sui rifiuti), 91/689/CE (sui rifiuti pericolosi) e 94/62/CE (sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio). Con questo decreto l'ordinamento italiano ha operato una completa riformulazione dell'intera legislazione sull'ambiente, enunciando principi e indirizzi di carattere generale e profilando un ipotetico sistema di governo dei rifiuti che segue un ciclo ideale. Il decreto 22/1997 pone solo le basi della successiva disciplina ambientale, lasciando il compito di esprimere i dettami regolamentari e tecnici ad una numerosa serie di decreti attuativi.

Il Decreto Ronchi fu seguito, negli anni successivi, da ben 26 decreti attuativi che vennero progressivamente emanati e modificati, anche a seguito alle nuove direttive UE. I vari provvedimenti che si sono susseguiti, oltre ai successivi “Ronchi bis” (D. Lgs. 389/1997) e “Ronchi ter” (D. Lgs. 426/1998) che si proponevano di apportare dei correttivi alla normativa appena emanata prevedendo modifiche ed integrazioni, hanno fatto sì che la legge quadro emanata nel febbraio del 1997 assumesse nel corso del tempo la natura di un sistema normativo complesso, articolato e frammentato.

Il Testo Unico Ambientale, D. Lgs. 152/2006, entrato in vigore il 6 aprile 2006, ha profondamente trasformato la normativa nazionale sui rifiuti e ha condotto alla razionalizzazione ulteriore del settore, riordinando e riformulando l'intera legislazione interna sull'ambiente e sancendo l'espressa abrogazione del D. Lgs 22/97. La Parte Quarta del TU, infatti, riprende, corregge e sistematizza il decreto Ronchi, senza stravolgerlo, ma apportando invece ulteriori aggiornamenti ed integrazioni. Il TU è suddiviso in sei parti nelle quali sono contenuti 318 articoli, 45 allegati e una decina di appendici. Ciascuna parte in cui il TU è suddiviso si occupa di uno specifico ambito della materia ambientale: la prima parte contiene le disposizioni comuni, ovvero l'ambito di applicazione, le finalità ed i criteri per l'adozione dei provvedimenti successivi; la seconda parte disciplina le procedure di valutazione e di autorizzazione; la terza parte contiene le norme in materia di difesa del suolo, tutela delle acque e relativo sistema sanzionatorio e di vigilanza; la quarta parte contiene le disposizioni in materia di gestione dei rifiuti, gestione degli imballaggi, bonifica dei siti inquinati e relativo sistema sanzionatorio e di vigilanza; la parte quinta reca le norme in materia di tutela dell'aria; la parte sesta infine contiene le norme in materia di prevenzione e risarcimento del danno ambientale. Il Testo Unico Ambientale è quindi diventato, ed è tuttora, la normativa di riferimento a livello nazionale in materia di rifiuti. ([www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it))

## 1.4 Normativa RAEE

L'uso dell'acronimo RAEE (in inglese WEEE, Waste of Electrical and Electronic Equipment), diffusosi in alcuni settori industriali nell'ultimo decennio, serve per sintetizzare l'insieme dei "Rifiuti generati dalle Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche". Si parla di tutti quei prodotti che, per il loro funzionamento, utilizzano corrente elettrica o campi elettromagnetici. Sono oggetti di uso quotidiano che, quando non funzionano più, o semplicemente vengono sostituiti, diventano rifiuti che, possono danneggiare gravemente l'ambiente e la salute dell'uomo se dispersi nell'ambiente. Proprio per questo il legislatore europeo, e di conseguenza, il legislatore nazionale hanno predisposto una legislazione ad hoc per regolamentarne tutti gli aspetti. ([www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it))

### 1.4.1 Direttiva 2002/96/CE

Nel 2003 viene pubblicato il testo integrale della Direttiva 2002/96/CE riguardante la gestione di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche e sull'ottimizzazione del ciclo di vita delle AEE. Viene introdotto il principio della responsabilità del produttore il quale nella progettazione e produzione di apparecchiature elettriche ed elettroniche deve adottare soluzioni idonee a facilitare la riparazione, l'adeguamento al progresso tecnico, il reimpiego, lo smontaggio e il riciclaggio dei suoi prodotti, riducendo così al minimo lo smaltimento alla fine del ciclo di vita. I produttori di AEE diventano anche responsabili della gestione dei rifiuti derivanti dai loro prodotti, assicurando il finanziamento ai punti di raccolta, di trattamento, recupero e smaltimento dei RAEE. Le categorie di apparecchiature (allegato I della direttiva) in cui vengono classificati i RAEE sono:

1. Grandi elettrodomestici;
2. Piccoli elettrodomestici;
3. Apparecchiature informatiche e per telecomunicazioni;
4. Apparecchiature di consumo;
5. Apparecchiature di illuminazione;
6. Strumenti elettrici ed elettronici (ad eccezione di utensili industriali fissi di grandi dimensioni);
7. Giocattoli ed apparecchiature per lo sport ed il tempo libero;
8. Dispositivi medicali (ad eccezione di tutti i prodotti impiantati e infettati);
9. Strumenti di monitoraggio e controllo;
10. Distributori automatici.

La prima prescrizione posta dalla normativa, come detto in precedenza prevede che la progettazione e la produzione tengano in conto e favoriscano il reimpiego e il riciclaggio, ad esempio devono potersi effettuare sostituzioni di parti guaste di apparecchiature e nella costruzione devono essere impiegati materiali riciclabili che devono poter essere separati facilmente gli uni dagli altri in fase di trattamento e recupero. Viene inoltre posto un obiettivo per il 31 dicembre 2008 che prevede un tasso di raccolta separata dei RAEE provenienti da nuclei domestici di almeno 4 kg per abitante all'anno. Tale obiettivo non tiene in conto delle diverse quantità pro-capite di AEE messe in commercio nei singoli stati membri, ciò ha portato a disparità fra gli stati con una maggiore difficoltà a

raggiungere l'obiettivo di raccolta da parte di quei paesi che presentano un consumo meno elevato di AEE. Al fine di raggiungere l'obiettivo posto, gli stati membri dell'Unione Europea devono evitare che i RAEE vengano smaltiti come rifiuti urbani misti, organizzando degli appositi sistemi di raccolta in modo da facilitare l'accesso delle utenze domestiche. I detentori finali e i distributori devono poter accedere almeno gratuitamente a centri di raccolta appositi, dimensionati in base alla popolazione. Viene inoltre introdotta la possibilità del ritiro 1 contro 1, cioè i distributori devono permettere il reso gratuito in caso di acquisto di una apparecchiatura equivalente a quella ceduta. I produttori di AEE essendo responsabili dello smaltimento dei rifiuti derivanti dalle loro apparecchiature possono organizzare e gestire sistemi individuali e/o collettivi di resa e raccolta dei RAEE provenienti da nuclei domestici. Per quando riguarda il trattamento questo deve avvenire secondo le migliori tecniche disponibili. La direttiva non impone procedure specifiche di trattamento, ma prescrive che i metodi utilizzati siano sempre i migliori disponibili in modo da garantire sempre la migliore efficienza e tutela dell'ambiente e della salute umana, mantenendo il passo con il progresso tecnologico. Vengono però richiesti alcuni requisiti tecnici per i siti di stoccaggio e per i siti di trattamento dei RAEE che sono:

1. Siti di stoccaggio anche temporaneo dei RAEE prima del trattamento:
  - Superfici impermeabili per determinate zone con centri di raccolta degli spandimenti e, ove opportuno, decantatori e detersivi-sgrassanti;
  - Copertura resistente alle intemperie per determinate zone.
2. Siti di trattamento dei RAEE:
  - Bilance per misurare il peso dei rifiuti trattati;
  - Superfici impermeabili e copertura resistente alle intemperie per determinate zone con centri di raccolta degli spandimenti e, ove opportuno, decantatori e detersivi-sgrassanti;
  - Stoccaggio adeguato per i pezzi smontati;
  - Container adeguati allo stoccaggio di pile, condensatori contenenti PCB/PCT e altri rifiuti pericolosi come i residui radioattivi;
  - Apparecchiature per il trattamento dell'acqua, in conformità della regolamentazione in materia sanitaria e ambientale.

Similmente accade per il riutilizzo e il riciclaggio, dove non si indica come recuperare, reimpiegare e riciclare i rifiuti raccolti, ma vengono forniti obiettivi da raggiungere:

- a. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 1 e 10 dell'allegato I:
  - i. Aumento del tasso di recupero ad un minimo dell'80% in peso medio per apparecchio;
  - ii. Reimpiego e il riciclaggio di componenti, materiali e sostanze, aumento ad un minimo del 75% in peso medio per apparecchio.
- b. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 3 e 4 dell'allegato I:
  - i. Aumento del tasso di recupero ad un minimo del 75% in peso medio per apparecchio;
  - ii. Reimpiego e il riciclaggio di componenti, materiali e sostanze, aumento ad un minimo del 65% in peso medio per apparecchio.
- c. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 2, 5, 6, 7, e 9 dell'allegato I:

- i. Aumento del tasso di recupero ad un minimo del 70% in peso medio per apparecchio;
  - ii. Reimpiego e il riciclaggio di componenti, materiali e sostanze, aumento ad un minimo del 50% in peso medio per apparecchio.
- d. Per tutti i rifiuti di lampade a scarica, un tasso di reimpiego e riciclaggio di componenti, materiali e sostanze di un minimo dell'80% in peso di queste lampade.

Al fine di facilitare il raggiungimento di tali obiettivi da parte degli impianti di trattamento i produttori devono fornire informazioni riguardanti reimpiego e trattamento per ogni nuova apparecchiatura entro un anno dalla sua messa in commercio, indicando i diversi componenti e materiali delle AEE e la localizzazione delle eventuali sostanze pericolose all'interno dell'apparecchiatura. Inoltre, dal 13 agosto 2005 sulle AEE deve essere apposto un marchio per identificare chiaramente il produttore su ogni apparecchiatura commercializzata. La direttiva prevede inoltre che i produttori delle apparecchiature considerate finanzia la raccolta, il trattamento, il recupero e lo smaltimento ecologicamente corretto dei RAEE. A tal fine viene fatta distinzione da un lato fra i rifiuti provenienti da nuclei domestici e quelli provenienti da utenti diversi. Per raggiungere un elevato livello di protezione ambientale la direttiva pone l'accento anche sul tema della sensibilizzazione dei cittadini, per cui gli stati membri devono fornire le informazioni concernenti:

- L'obbligo di non smaltire i RAEE come rifiuti urbani indifferenziati;
- I sistemi di gestione e raccolta disponibili;
- Il ruolo del cittadino nel reimpiego, riciclo e recupero dei RAEE;
- Gli effetti dannosi sull'ambiente e sulla salute umana che si possono avere a causa delle sostanze pericolose contenute nelle apparecchiature;
- Dare informazioni sul simbolo "cassonetto barrato" che deve essere posto su ogni prodotto commercializzato dopo il 13 agosto 2005. ([www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it))

#### *1.4.2 Direttiva 2012/19/UE*

Questa seconda direttiva dell'Unione Europea modifica le criticità sorte dal primo provvedimento, ovvero la 2002/96/CE, e pone nuovi obiettivi in termini di protezione dell'ambiente e della salute umana pur mantenendo i principi ispiratori precedenti. In molti punti viene ripresa la direttiva passata con aggiunte e miglioramenti dovuti a nuovi obiettivi, al progresso della tecnica e novità del mercato. Ad esempio, le definizioni e le categorie di RAEE (come da allegato I direttiva 2002/96/CE) vengono completate e aggiornate con l'elenco dell'allegato III:

1. Apparecchiature per lo scambio di temperatura;
2. Schermi monitor ed apparecchiature dotate di schermi di superficie superiore a 100 cm<sup>2</sup>;
3. Lampade;
4. Apparecchiature di grandi dimensioni (almeno una dimensione esterna >50 cm);
5. Apparecchiature di piccole dimensioni (nessuna dimensione esterna >50 cm);



6. Piccole apparecchiature informatiche e per telecomunicazioni (nessuna dimensione esterna >50 cm).

Viene sottolineata nuovamente la necessità di una progettazione che tenga conto delle fasi finali del ciclo di vita del prodotto, con il bisogno di cooperazione fra produttori e gestori degli impianti di riciclaggio e di una raccolta differenziata tale da ridurre al minimo la quantità di RAEE che vengono smaltiti come rifiuti urbani misti. Come in precedenza deve esserci la possibilità per detentori finali e distributori di rendere almeno gratuitamente i rifiuti prodotti a sistemi organizzati di gestione, così come la possibilità di resa uno contro uno. Come novità viene introdotta la possibilità di consegnare a distributori con negozio al dettaglio di dimensioni superiori a 400 m<sup>2</sup> RAEE di piccolissime dimensioni (dimensioni esterne inferiori a 25 cm) gratuitamente senza l'obbligo di acquistare una AEE di tipo equivalente (ritiro uno contro zero). Un'importante novità è dovuta ai differenti obiettivi posti in termini di tasso di raccolta da raggiungere. Si passa da una quantità per abitante annua (4 kg/ab) a una percentuale che viene calcolata sulla base del peso totale dei RAEE raccolti in un dato anno espresso rispetto alla quantità di apparecchiature elettriche ed elettroniche messe in commercio nell'arco dei tre anni precedenti dal singolo stato membro. Il valore da raggiungere è pari al 45% nel periodo che va dal 2016 al 2019, dopo il 2019 la percentuale dovrà essere del 65%. La formulazione precedente dell'obiettivo di raccolta dava origine a disparità all'interno dei paesi membri, in quanto risultavano svantaggiati quei paesi con una minore quantità di AEE vendute per singolo abitante, con conseguenti maggiori difficoltà a raggiungere la soglia minima richiesta. Con la nuova formulazione sono accettati valori anche inferiori a 4 kg/ab, purché venga soddisfatta la percentuale richiesta, anche se per quasi tutti questi nuovi obiettivi sono più onerosi dei precedenti. Le disposizioni relative alle metodologie raccolta vengono mantenute tali a quelle del 2002. Gli obiettivi di recupero vengono modificati e si pongono valori man mano crescenti nel corso degli anni:

Parte 1: Obiettivi minimi applicabili per categoria dal 13 agosto 2012 fino al 14 agosto 2015 con riferimento alle categorie elencate nell'allegato I:

- a. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 1 o 10 dell'allegato I:
  - Recupero dell'80%;
  - Riciclaggio del 75%.
- b. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 3 o 4 dell'allegato I:
  - Recupero del 75%;
  - Riciclaggio del 65%.
- c. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 2, 5, 6, 7, 8 o 9 dell'allegato I:
  - Recupero del 70%;
  - Riciclaggio del 50%.
- d. Per le lampade a scarica il riciclaggio dell'80%.

Parte 2: Obiettivi minimi applicabili per categoria dal 15 agosto 2015 fino al 14 agosto 2018 con riferimento alle categorie elencate nell'allegato I:

- a. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 1 o 10 dell'allegato I:
  - Recupero dell'85%;

- Preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio dell'80%.
- b. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 3 o 4 dell'allegato I:
  - Recupero dell'80%;
  - Preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 70%.
- c. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 2, 5, 6, 7, 8 o 9 dell'allegato I:
  - Recupero del 75%;
  - Preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 55%.
- d. Per le lampade a scarica il riciclaggio dell'80 %.

Parte 3: Obiettivi minimi applicabili per categoria dal 15 agosto 2018 con riferimento alle categorie elencate nell'allegato III:

- a. Per i RAEE che rientrano nelle categorie 1 o 4 dell'allegato III:
  - Recupero dell'85%;
  - Preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio dell'80%.
- b. Per i RAEE che rientrano nella categoria 2 dell'allegato III:
  - Recupero dell'80%;
  - Preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 70%.
- c. Per i RAEE che rientrano nell'allegato III, categorie 5 o 6:
  - Recupero del 75%;
  - Preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 55%.
- d. Per i RAEE che rientrano nella categoria 3 dell'allegato III, riciclaggio dell'80%.

Questa direttiva introduce inoltre l'obbligo da parte degli enti o le imprese che effettuano operazioni di trattamento di conseguire un'autorizzazione emessa dalle autorità competenti. Il modello di finanziamento dei sistemi di gestione dei RAEE rimane inalterato rispetto alla prima direttiva emanata nel 2002, così come le indicazioni da fornire agli utilizzatori finali riguardo il corretto smaltimento delle apparecchiature utilizzate, e la comunicazione necessaria fra produttori e impianti di trattamento in caso di nuovi modelli immessi sul mercato. Infine, una novità introdotta da questa direttiva è il registro dei produttori che ogni stato membro deve stilare al fine di verificare l'osservanza delle prescrizioni previste. I produttori devono fornire informazioni per identificare chiaramente la loro attività. Questa verrà poi modificata dalla direttiva 2018/849/UE principalmente garantendo la possibilità agli Stati membri di attivare politiche di incentivazione volte al recupero e al riciclo di RAEE. ([www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it))

#### *1.4.4 Decreto legislativo n.151 del 2005*

La direttiva europea 96 del 2002 viene recepita in Italia con il Decreto Legislativo n.151 del 2005 e il relativo decreto attuativo 185/2007 che definiscono il quadro normativo in materia di gestione dei RAEE. Lo scopo di questi decreti, come indicato nella direttiva europea, sono la prevenzione della produzione dei RAEE, favorendo il reimpiego e il riciclaggio delle apparecchiature al fine di ridurre al minimo la quantità di rifiuti da avviare a smaltimento. Un punto fondamentale del decreto è l'estensione della responsabilità dei produttori al fine vita delle apparecchiature che producono e commercializzano. Di conseguenza nasce l'obbligo, per le aziende produttrici di organizzare e gestire un sistema per il recupero dei prodotti giunti a fine vita, con

l'obiettivo di raggiungere un tasso di raccolta pari a 4 kg per abitante all'anno. I RAEE devono essere raccolti in maniera separata, per questo motivo i comuni devono assicurare la funzionalità, l'accessibilità e l'adeguatezza del sistema di raccolta differenziata in modo da permettere ai detentori finali e ai distributori di conferire gratuitamente al centro di raccolta i rifiuti prodotti nel loro territorio. I distributori devono assicurare a titolo gratuito il ritiro in ragione di uno contro uno al momento della fornitura di una nuova apparecchiatura elettrica ed elettronica analoga a quella ceduta. A questo punto rientra la responsabilità dei produttori che devono provvedere al ritiro dei RAEE raccolti separatamente nei centri di raccolta e al loro invio ai centri di trattamento. Tali operazioni devono avvenire in modo tale da ottimizzare il reimpiego e il riciclaggio delle apparecchiature o di alcuni loro componenti. Gli impianti di trattamento devono operare secondo le migliori tecniche disponibili ed avere un'apposita autorizzazione. Dalla direttiva 96 del 2002 vengono ripresi gli obiettivi di recupero posti per le diverse categorie di rifiuti. Al fine di monitorare il raggiungimento di tali obiettivi i gestori degli impianti di trattamento devono compilare un registro con peso dei RAEE in entrata, con il peso dei loro componenti, materiali o sostanze in uscita e la quantità di materiali effettivamente recuperati. Tali registri devono essere disponibili per le verifiche di raggiungimento degli obiettivi che vengono effettuate dall' APAT (agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici). Il finanziamento del sistema di raccolta dei RAEE viene garantito attraverso l'applicazione del modello descritto nella direttiva europea di riferimento, con l'obbligo da parte dei produttori di aderire ad un sistema collettivo adeguato. I produttori devono aderire al Registro Nazionale dei soggetti tenuti al finanziamento dei sistemi di gestione dei RAEE al fine di permettere il calcolo delle quote di mercato e il controllo della filiera di gestione. Le quote di mercato per gestione dei rifiuti "storici" vengono calcolate dal Comitato di vigilanza e di controllo sulla gestione dei RAEE, il quale raccoglie le informazioni sulle apparecchiature messe in commercio e prevede le ispezioni nei confronti dei produttori che non effettuano le comunicazioni, per i quali sono previste sanzioni in caso di inadempienze. In questo decreto viene inoltre introdotto il concetto di messa in sicurezza dei RAEE prima del trattamento, entro cui ricade l'operazione di rimozione dei circuiti stampati con superficie maggiore di 10 cm<sup>2</sup>. I quali vanno a costituire quindi una ulteriore tipologia di rifiuto da trattare correttamente come tale. ([www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it))

#### *1.4.5 Decreto ministeriale n.185 del 2007*

In questo decreto vengono specificate nel dettaglio le modalità di funzionamento del registro nazionale dei produttori di AEE e del sistema di finanziamento del sistema di gestione dei RAEE. I sistemi collettivi per la gestione dei RAEE provenienti da nuclei domestici a cui possono aderire i singoli produttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche devono istituire il Centro di coordinamento, in forma di consorzio avente personalità giuridica di diritto privato, con i seguenti compiti:

- Definire con l' ANCI e le associazioni nazionali di categoria della distribuzione le condizioni generali per il ritiro da parte dei sistemi collettivi dei RAEE raccolti nell'ambito del circuito domestico e di quelli raccolti dai distributori;
- Stipulare accordi con le associazioni dei recuperatori per assicurare livelli di trattamento adeguati e omogenei;

- Ottimizzare le operazioni di raccolta, assicurando tempestività e uniformità dei metodi di raccolta, dei rifiuti dai centri di raccolta;
- Assicurare il monitoraggio del flusso dei RAEE;
- Predisporre programmi annuali di prevenzione e attività.

Nel decreto 185/2007 le tipologie di RAEE definite dalle direttive europee e dal decreto 51/2005 vengono raggruppate in categorie al fine di facilitare i compiti di controllo del Centro di coordinamento. Queste categorie sono quelle con cui comunemente si conoscono i RAEE e sono:

- R1: freddo e clima (Grandi apparecchi di refrigerazione, frigoriferi, congelatori, altri grandi elettrodomestici per la refrigerazione, la conservazione e il deposito di alimenti, apparecchi per il condizionamento);
- R2: grandi bianchi (lavatrici, asciugatrici, lavastoviglie, apparecchi per la cottura, stufe elettriche, piastre riscaldanti elettriche, forni a microonde, grandi elettrodomestici usati per la cottura e la trasformazione degli alimenti, apparecchi elettrici di riscaldamento, radiatori elettrici, grandi elettrodomestici per riscaldare ambienti, letti e divani, ventilatori elettrici, apparecchiature per la ventilazione e l'estrazione dell'aria);
- R3: televisori e monitor;
- R4: elettronica di consumo (telefoni, fax, telefoni cellulari, calcolatrici, videoregistratori, videocamere, registratori hi-fi, amplificatori, ferri da stiro, aspirapolveri, frullatori, piccoli elettrodomestici, tostapane, utensili elettrici, computer portatili ecc.);
- R5: sorgenti luminose (tubi fluorescenti, sorgenti luminose fluorescenti compatte, sorgenti luminose a scarica ad alta intensità, comprese sorgenti luminose a vapore di sodio ad alta pressione e sorgenti luminose ad alogenuri metallici, sorgenti luminose a vapori di sodio a bassa pressione). ([www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it))

#### *1.4.6 Decreto legislativo n.49 del 2014*

Il 12 aprile 2014 è entrato in vigore il Decreto Legislativo n.49/2014 riguardante i rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, che recepisce la direttiva dell'Unione Europea 2012/19/UE. Pone come obiettivo la riduzione dell'impatto sull'ambiente e sulla salute umana dei RAEE attraverso l'organizzazione di un sistema di raccolta differenziata che favorisca il loro reimpiego, riutilizzo e recupero. Sostituisce il precedente D. Lgs. 151/2005, introducendo alcune importanti novità introdotte dalla direttiva 2012/19/UE:

- Estensione del campo di applicazione ai pannelli fotovoltaici che divengono soggetti a tutte le prescrizioni previste dalla direttiva RAEE;
- I produttori devono conseguire gli obiettivi minimi di recupero e riciclaggio previsti e comunicare al Ministero dell'ambiente l'ammontare del contributo necessario per adempiere agli obblighi di raccolta, trattamento, recupero e smaltimento dei RAEE;
- Viene introdotto l'obbligo di marcare i prodotti messi in commercio con il marchio del cassetto barrato e gli estremi identificativi del produttore o il suo numero di iscrizione al registro RAEE;

- Obbligo di ritiro uno contro zero da parte dei grandi distributori (punti vendita oltre i 400 m<sup>2</sup>) dei RAEE di piccole dimensioni (dimensioni inferiori a 25 cm) senza obbligo di acquisto di un'apparecchiatura analoga;
- Obbligo di dare la possibilità del ritiro uno contro uno per chi vende prodotti elettrici ed elettronici on line e a distanza;
- Cambiano gli obiettivi di raccolta che passano da 4 kg/ab al minimo del 45% delle apparecchiature immesse sul mercato nei tre anni precedenti, fino ad arrivare al 65% a partire dal 2019. (www.reteambiente.it)

## 1.5 Normativa “End of waste”

Il concetto di End-of-Waste è stato introdotto dalla “Strategia tematica sulla prevenzione e il riciclaggio dei rifiuti”, adottata dalla Commissione europea nel 2005, nella quale si proponeva di precisare le condizioni per la cessazione della qualifica di rifiuto nell’ambito della revisione della direttiva quadro sui rifiuti. L’articolo 6, paragrafo 1, della direttiva 2008/98/CE (Direttiva quadro sui rifiuti di cui abbiamo già parlato) stabilisce che un rifiuto cessa di essere tale qualora sia sottoposto a un’operazione di recupero (incluso il riciclaggio) e risulti conforme a specifici criteri da elaborare nel rispetto delle seguenti condizioni:

- a. il materiale (sostanza od oggetto) è comunemente utilizzato per scopi specifici;
- b. esiste un mercato o una domanda per tale materiale;
- c. il materiale soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;
- d. l’utilizzo del materiale non porterà a impatti complessivi negativi sull’ambiente o sulla salute umana.

Allo stato attuale, malgrado i suggerimenti contenuti nella direttiva 2008/98/CE, i regolamenti emanati sono soltanto tre:

- regolamento 31 marzo 2011, n.333/2011/UE, recante i «criteri che determinano quando alcuni tipi di rottami metallici cessano di essere considerati rifiuti ai sensi della Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio»;
- regolamento 10 dicembre 2012, n.1179/2012/UE, recante i «criteri che determinano quando i rottami di vetro cessano di essere considerati rifiuti ai sensi della Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio»;
- regolamento 25 luglio 2013, n.715/2013/UE, recante i «criteri che determinano quando i rottami di rame cessano di essere considerati rifiuti ai sensi della Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio».

Inoltre, in mancanza di criteri stabiliti a livello comunitario, l’art. 6, comma 4, direttiva 2008/98/CE prevede che gli Stati membri possano decidere, caso per caso, se un determinato rifiuto abbia cessato di essere tale. A livello nazionale, il comma 2 dell’art. 184-ter prevede che, in mancanza di regolamenti comunitari i criteri sono individuati «caso per caso per specifiche tipologie di rifiuto attraverso uno o più decreti del Ministro dell’ambiente». L’unico regolamento ministeriale oggi adottato in tema di end of waste è il DM 14 febbraio 2013, n.22 «Regolamento recante disciplina della cessazione della

qualifica di rifiuto di determinate tipologie di combustibili solidi secondari (CSS)». Ulteriori decreti ministeriali in fase di prossima emanazione riguardano il fresato d'asfalto e la gomma derivante da pneumatici fuori uso.

Al di fuori di quanto previsto dalle fonti comunitarie e nazionali, nell'attesa che vengano adottati gli specifici criteri, il comma 3 dell'art. 184-ter garantisce, in via transitoria, l'applicazione dei «decreti del Ministero dell'Ambiente n.n. 161/2002, 269/2005 e 5 febbraio 1998. Tali decreti contengono le norme tecniche per il recupero semplificato dei rifiuti pericolosi e non. Queste regolamentazioni risultano oggi, in molti casi, inadeguate e, comunque, non aggiornate agli sviluppi delle tecniche di recupero, con tutte le conseguenze che ciò comporta sulla concreta applicabilità di questa disciplina. Tra le tipologie di rifiuto, attività di recupero o prodotti non contemplati dal DM 5 febbraio 1998 ci sono i rifiuti da spazzamento stradale, i rifiuti in vetroresina da demolizione di barche e pale, produzione di biometano da rifiuti organici, trattamento di rifiuti di plastiche miste, alcuni trattamenti innovativi dei RAEE, produzione di aggregati riciclati, con il riciclo dei rifiuti inerti da costruzione e demolizione o il granulo per i campi da calcio ottenuto dai PFU (pneumatici fuori uso).

Nella circolare 1° luglio 2016, n.10045 («Disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto "End of Waste" – Applicazione dell'art. 184-ter del d.lgs. 152/2006»), il ministero dell'Ambiente ha precisato che regolamenti comunitari, decreti ministeriali e autorizzazioni costituiscono le tre modalità gerarchicamente ordinate di definizione dei criteri dell'end of waste. Ciò comporta che le Regioni possono, in sede di rilascio dell'autorizzazione alla conduzione di un impianto di recupero di rifiuti, definire criteri EoW previo riscontro della sussistenza delle condizioni prima elencate, rispetto a rifiuti che non sono stati oggetto di regolamentazione dei regolamenti comunitari e decreti ministeriali. Ha confermato quest'interpretazione anche il Tar Veneto, nella sentenza n.1422/2016 che ha visto la Regione Veneto parte resistente in un giudizio relativo a un'autorizzazione all'esercizio di un impianto sperimentale di trattamento e recupero di rifiuti urbani domestici e assimilabili. Secondo il tribunale, in sede di rilascio delle autorizzazioni ordinarie e integrate, l'autorità competente deve verificare la sussistenza delle quattro condizioni previste dall'art. 184-ter comma 1 e, conseguentemente, definire criteri end of waste.

In riferimento a tale sentenza del Tar Veneto il consiglio di Stato ha recentemente proposto un'interpretazione molto restrittiva. Nella sentenza n.1229/2018, accogliendo l'appello proposto dalla Regione Veneto alla sentenza n.1422/2016, i giudici del consiglio di Stato hanno, infatti, confermato le perplessità della Regione Veneto e sovvertito l'interpretazione del giudice di primo grado. A detta del consiglio di Stato, la direttiva 2008/98/CE, in caso di assenza di regolamentazione comunitaria, prevede, infatti, che la valutazione "caso per caso" debba essere realizzata dallo Stato membro con notifica alla Commissione della decisione assunta. Per il consiglio di Stato è quindi evidente che destinatario del potere di determinare "caso per caso" la cessazione della qualifica di rifiuto è lo Stato e non altri enti e/o organizzazioni interne a questo.

Per oltre un anno quindi gli operatori del settore hanno aspettato una norma che sbloccasse gli iter autorizzativi per il riciclo dei rifiuti non regolato da regolamenti europei

o da decreti nazionali. È per questo motivo che all'interno del decreto-legge 32/2019 denominato "Sblocca Cantieri" si sono riportate una serie di novità per portare chiarezza. Il risultato invece è che queste novità hanno, di fatto, impedito di riciclare molte tipologie di rifiuti, di ottenere nuovi prodotti riciclati ed avviare nuove attività di riciclo. Proprio per questo motivo il riciclo di molti rifiuti risulta tuttora inapplicabile. ([www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it))

# Capitolo 2

## Il sistema RAEE

Viene identificato come sistema RAEE tutto l'organismo di raccolta e smaltimento che interessa un'apparecchiatura di tipo elettrico da quando diviene un rifiuto, ed è ancora in possesso del produttore/detentore, a quando viene conferita nell'impianto di trattamento specializzato. Dai dati raccolti dal Centro di Coordinamento RAEE risulta che nel 2018 sul territorio nazionale hanno operato 953 impianti che si occupano di RAEE dediti sia al trattamento per il recupero delle materie prime sia alla sola attività di stoccaggio dei rifiuti in attesa dell'invio ad un impianto di trattamento. A fronte di 983.610 tonnellate di AEE immesse sul mercato e dichiarate al Registro AEE nel triennio 2015-2017, nel 2018 gli impianti registrati hanno trattato 421.344 tonnellate di RAEE, di cui il 75,20% (pari a 316.864 tonnellate) riconducibili a RAEE domestici, e il 24,80% (pari a 104.480 tonnellate) a RAEE professionali. Complessivamente le dichiarazioni evidenziano un incremento del 10,14% di rifiuti elettrici ed elettronici trattati rispetto al 2017. L'Italia nel 2018 ha conseguito un tasso di ritorno complessivo minore del 42,84%, risultato poco distante dal target europeo del 45% previsto per il 2018, ma assai lontano da quello molto più sfidante previsto dal 2019 pari al 65%. Dall'analisi dei tassi di ritorno emerge quindi che una gran parte dei rifiuti che si generano, rispetto alle apparecchiature vendute, non viene correttamente tracciata, sfuggendo al sistema di gestione regolato dalla normativa. Tali volumi vanno quindi ad alimentare il traffico illegale dei rifiuti, con le conseguenze che ne derivano in termini di inquinamento ambientale e di danno economico per le aziende e per il sistema Paese.

Si è stimato che oltre il 55-60% dei RAEE sono rifiuti pericolosi motivo per il quale si rende necessaria una raccolta accurata e un trattamento adeguato. Le componenti più pericolose in essi contenute sono:

- Cfc/Hcfc: clorofluorocarburi e idrofluorocarburi: Sono sostanze in grado di raggiungere la stratosfera e di reagire con le molecole di ozono. Aumentano le radiazioni UV, causa di tumori della pelle, malattie degli occhi, indebolimento del sistema immunitario;



- Pb: il piombo si accumula nell'ambiente e può entrare nella catena alimentare. Causa danni al sistema nervoso centrale e periferico, effetti acuti e cronici a livello vascolare;
- Cd: il cadmio è considerato una sostanza cancerogena. Causa danni irreversibili a reni e sistema osseo;
- Hg: il mercurio si accumula negli organismi viventi ed entra a far parte della catena alimentare. Causa danni al cervello e ai sistemi di coordinazione e bilanciamento;
- Cr VI/PBB: Cromo esavalente e Policromo Bifenili solubili in acqua, possono entrare nella catena alimentare. Considerati cancerogeni, causano reazioni allergiche e bronchiti asmatiche, possono inoltre attraversare la membrana cellulare e danneggiare il DNA.

In questo capitolo verranno quindi illustrate le diverse tipologie di RAEE poi verranno identificati e spiegati i ruoli dei diversi soggetti coinvolti nella filiera dei RAEE.

## **2.1 RAEE Domestici**

Vengono definiti come RAEE domestici tutti i rifiuti da apparecchiature elettroniche ed elettriche provenienti da un ambiente domestico o da un ambiente assimilabile come tale. A loro volta questi RAEE vengono suddivisi in 5 categorie in base alla loro dimensione e destinazione d'uso:

1. R1: Freddo e clima;
2. R2: Grandi bianchi;
3. R3: TV e monitor;
4. R4: Piccoli elettrodomestici;
5. R5: Sorgenti luminose.

La composizione di questa categoria di rifiuti, per quanto riguarda la situazione italiana, vede la predominanza di apparecchiature appartenenti al raggruppamento grandi bianchi (R2), in crescita del 15% rispetto al 2017 e a quello di freddo e clima (R1) che registra un incremento del 2,3%.

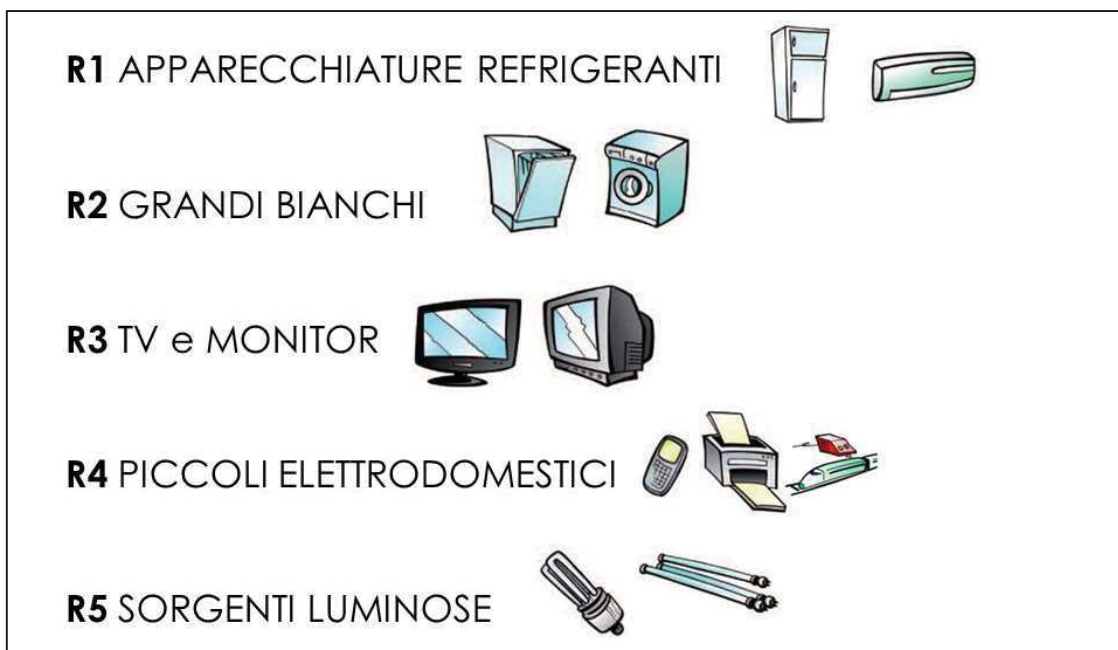


Figura 2.1 Raggruppamenti istituiti per i RAEE domestici. (www.cdcaee.it)

#### 2.1.1 R1: Freddo e clima

Fanno parte di questa categoria tutte le apparecchiature che sono coinvolte nella creazione di freddo o adibite alla climatizzazione degli ambienti. Ne sono un esempio i frigoriferi, i condizionatori, i congelatori etc.

#### 2.1.2 R2: Grandi bianchi

In questa categoria vengono raggruppati tutti i RAEE ingombranti e adibiti agli usi più svariati. Ne sono un esempio le lavatrici, le lavastoviglie, i forni etc.

#### 2.1.3 R3: TV e monitor

Di questa categoria fanno parte tutti i dispositivi che sono forniti di schermi utilizzabili per il funzionamento di un computer o tutti i televisori utilizzati a fine di intrattenimento. Ne sono un esempio i televisori a tubo catodico, gli schermi LCD, i monitor etc.

#### 2.1.4 R4: Piccoli elettrodomestici

Sono piccoli elettrodomestici tutti i RAEE che vengono utilizzati per gli usi più svariati e non rientrano nelle categorie precedenti. Ovvero sono dispositivi facilmente trasportabili, anche dal consumatore finale, e sono quindi facilmente conferibili presso i soggetti addetti al corretto smaltimento. Ne sono un esempio i forni a microonde, i tostapane, i cellulari, i computer, i giochi elettronici etc.

### *2.1.5 R5: Sorgenti luminose*

Di questa categoria fanno parte tutti i dispositivi che hanno come funzione principale quella di fornire illuminazione artificiale negli ambienti. Ne sono un esempio i tubi fluorescenti, le lampadine, LED etc.

## **2.2 RAEE Professionali**

Vengono definiti come RAEE professionali tutti i dispositivi elettrici ed elettronici derivanti da una attività produttiva o commerciale. Questi si dividono principalmente in 10 categorie come già illustrato precedentemente:

1. Grandi elettrodomestici;
2. Piccoli elettrodomestici;
3. Apparecchiature informatiche e per telecomunicazioni;
4. Apparecchiature di consumo e pannelli fotovoltaici;
5. Apparecchiature di illuminazione;
6. Strumenti elettrici ed elettronici;
7. Giocattoli e apparecchiature per il tempo libero e lo sport;
8. Dispositivi medici;
9. Strumenti di monitoraggio e di controllo;
10. Distributori automatici.

## **2.3 Soggetti del sistema RAEE**

I principali soggetti che vengono coinvolti in questo ambiente sono:

- i consorzi o sistemi collettivi;
- i distributori;
- gli installatori;
- i consumatori finali;
- i centri di raccolta;
- i luoghi di raggruppamento;
- gli impianti di trattamento;
- il Centro di Coordinamento RAEE.

### *2.3.1 Consorzi o sistemi collettivi*

I consorzi sono associazioni di produttori di apparecchiature elettroniche ed elettriche che si impegnano, versando una quota di partecipazione, ad assicurare il corretto smaltimento dei propri prodotti una volta raggiunta la fine della propria utilità. Il versamento della quota di partecipazione dipende dalla quantità, in percentuale, di mercato occupata dai prodotti delle aziende facenti parte del consorzio. In Italia sono presenti 15 sistemi collettivi che rappresentano tutti i produttori di apparecchiature che insistono sul nostro territorio.

### *2.3.2 Distributori*

I distributori sono coloro i quali gestiscono un'attività di vendita all'ingrosso o al dettaglio di AEE. Questi soggetti sono obbligati dalla normativa ad effettuare il ritiro uno contro uno gratuito dei RAEE. Ovvero per ogni AEE acquistata dal consumatore finale essi sono obbligati a ritirare l'AEE non più funzionante e di cui il consumatore vuole disfarsi configurandosi come un RAEE. Per questa tipologia di soggetti si è predisposto inoltre da normativa il ritiro uno contro zero. Ovvero, per distributori con superficie commerciale superiore a 400 metri quadri, si è predisposto il ritiro gratuito di RAEE con dimensioni, nel lato maggiore, inferiori di 25 cm senza che il consumatore debba comprarne un sostituto. Rimane ad obbligo del distributore stesso quello di provvedere ad un adeguato deposito per i RAEE ricevuti e un successivo trasporto presso i centri di raccolta adibiti allo stoccaggio dei RAEE.

### *2.3.3 Installatori*

Gli installatori sono invece i soggetti che si occupano della sola installazione della AEE senza fornirla direttamente al consumatore. Questi soggetti non hanno l'obbligo di ritiro gratuito del RAEE derivante dall'installazione della nuova apparecchiatura ma hanno la possibilità di farlo.

### *2.3.4 Consumatori finali*

I consumatori finali sono tutti coloro che acquistano un AEE e, successivamente, allo scadere del ciclo di vita utile della stessa se ne vogliono disfare creando quindi un RAEE. L'unico obbligo a carico di questi soggetti è quello di smaltire correttamente il rifiuto e quindi consegnarlo ad un soggetto abilitato per il corretto smaltimento dello stesso. Per il riconoscimento di RAEE è stato istituito dal legislatore un apposito logo, il cassetto barrato, da apporre sulle AEE in modo da informare il consumatore che il bene in oggetto deve seguire uno specifico iter di smaltimento.

### *2.3.5 Centri di raccolta*

Il centro di raccolta si configura come un luogo in cui, tramite le adeguate misure di sicurezza e di prevenzione di inquinamento, vengono stoccati i RAEE e dove il consumatore finale può gratuitamente conferire i propri RAEE, come definito dalle norme nazionali. Da qui i RAEE vengono poi prelevati e trasportati in un impianto di smaltimento dove verranno trattati e correttamente riciclati. Questo luogo può essere gestito in modo autonomo da una società di tipo privato, dal comune in cui si trova il centro di raccolta stesso oppure può essere creato e gestito direttamente da un sistema collettivo.

### *2.3.6 Luoghi di raggruppamento*

Questa tipologia di soggetto rappresenta il luogo in cui il distributore effettua il raggruppamento dei RAEE conferiti dai consumatori che aderiscono al sistema di ritiro

uno contro uno. Da questo luogo si ha il ritiro da parte dei sistemi collettivi che provvederanno poi al corretto smaltimento come definito dalle norme vigenti.

### *2.3.7 Impianti di trattamento*

Questi soggetti sono coloro i quali ricevono i RAEE e si occupano, mediante specifici trattamenti, di recuperare i diversi materiali di cui sono composti i rifiuti mandati allo smaltimento. Per fare ciò è necessario raggiungere determinati obiettivi di riciclo come imposto dalla comunità europea e avere all'attivo una serie di autorizzazioni come da normativa vigente.

### *2.3.8 Centro di Coordinamento RAEE*

Questo organismo si occupa delle relazioni tra tutti i soggetti coinvolti dalla filiera dei RAEE e organizza e stabilisce i rapporti che intercorrono tra gli stessi. Ogni anno questo ente rilascia inoltre tutte le informazioni riguardanti la situazione italiana in questo ambito e si occupa di informare i cittadini sul corretto smaltimento di questa tipologia di rifiuti. Tutti i soggetti che hanno a che fare con i RAEE devono essere registrati a questo ente in modo che esso possa vigilare sulla filiera ed evitare azioni illecite da parte di uno o più soggetti. Questo attore si occupa inoltre di valutare la quantità di RAEE che ogni sistema collettivo ha l'obbligo di smaltire e quali categorie, per ogni centro di raccolta, sono a carico di ogni sistema collettivo. ([www.cdcrree.it](http://www.cdcrree.it))

Nella figura 2.2 viene riportato lo schema di gestione 1 contro 1 dove vengono riportati i diversi soggetti del sistema RAEE e i rapporti che li legano:

- 1: Conferimento di RAEE diretto da parte del cliente;
- 2: Ritiro dei RAEE da parte del distributore/installatore con conferimento presso altro soggetto abilitato;
- 3: Ritiro dei RAEE dal punto vendita del distributore e conferimento al proprio luogo di raggruppamento;
- 4: Trasporto dei RAEE dal punto vendita del distributore/luogo di raggruppamento o dalla sede del centro di assistenza al centro di raccolta comunale o privato;
- 5: Trasporto dei RAEE dal punto vendita del distributore/luogo di raggruppamento, dalla sede del centro di assistenza, dal cliente verso gli impianti di trattamento.

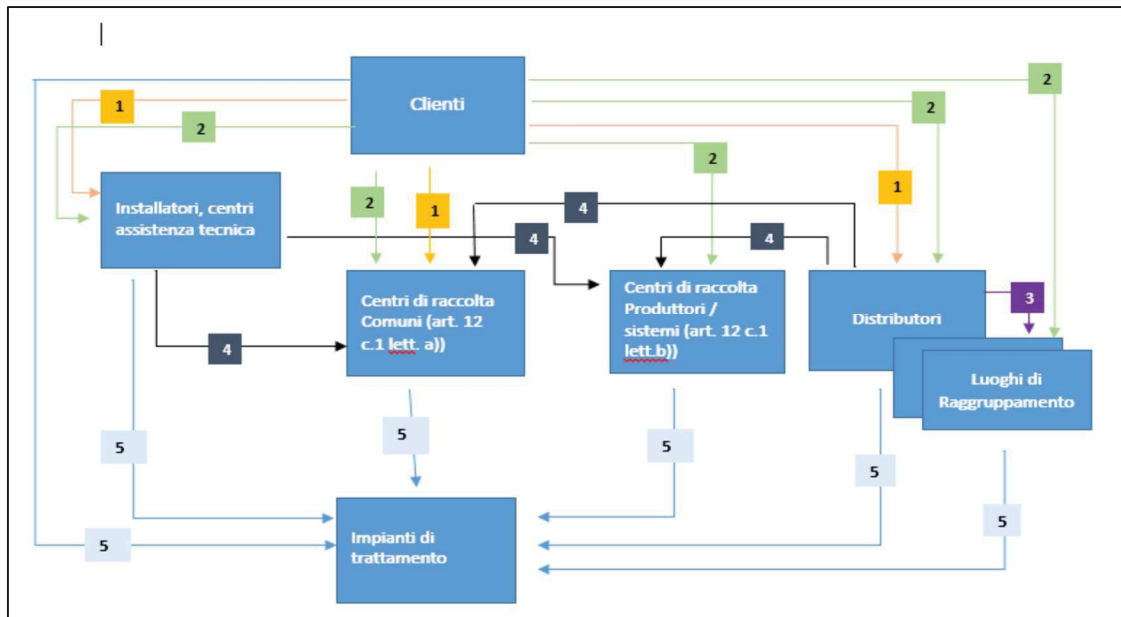


Figura 2.2 Schema di gestione 1 contro 1. (Guida alla gestione dei RAEE; Ecocerved 2018)

Nella figura 2.3 viene riportato invece lo schema di gestione 1 contro 0 con i soggetti coinvolti e i rapporti che li legano:

- 1: Conferimento dei RAEE di piccolissime dimensioni direttamente da parte del cliente al distributore sul luogo di ritiro allestito nei locali del punto vendita od in prossimità immediata;
- 2: Il distributore effettua periodicamente lo svuotamento verso il successivo luogo di raggruppamento/deposito preliminare;
- 3: Il trasporto dei RAEE dal luogo di raggruppamento ai diversi soggetti del sistema RAEE.

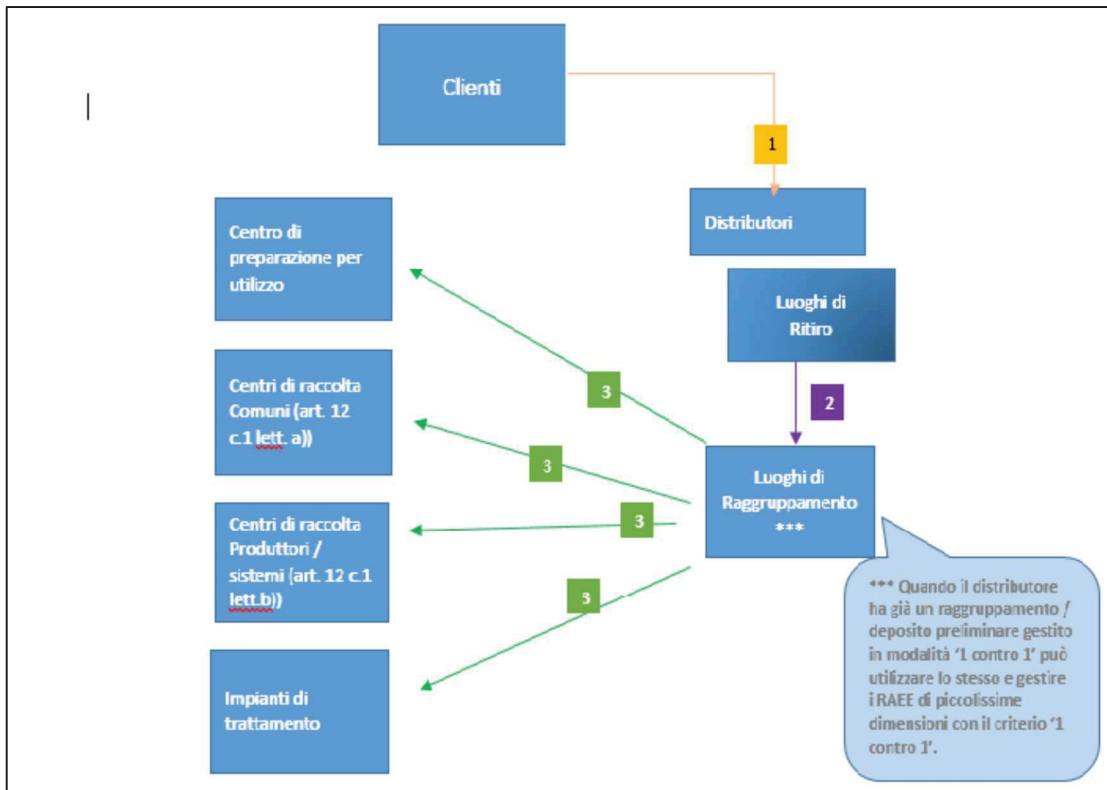


Figura 2.3 Schema di gestione 1 contro 0. (Guida alla gestione dei RAEE; Ecocerved 2018)

# Capitolo 3

## Le schede elettroniche

Per quanto riguarda le schede elettroniche ci si rifà alla normativa dove viene esplicitato l'obbligo della rimozione di tali componenti dai RAEE durante il trattamento. In questo modo si ha la suddivisione di tali rifiuti dai corpi principali e si ha quindi la possibilità di recuperarne le materie prime. Questo vincolo è stato imposto proprio con l'intento di realizzare un recupero di questo particolare rifiuto in quanto in ogni scheda elettronica sono contenute quantità variabili di composti con valore economico, strategico o ambientale. Alcuni esempi sono oro, argento, terre rare, piombo etc.

Uno dei componenti più importanti tuttora di un'apparecchiatura elettronica moderna è senza dubbio la scheda elettronica. Questa infatti svolge la funzione di coordinazione di tutte le funzioni svolte dal dispositivo e senza di essa sarebbe difficile svolgere anche le azioni più semplici. Con l'avanzare della tecnologia inoltre si ha una progressiva necessità di migliorare e aumentare le funzioni svolte da ogni apparecchio, ne consegue quindi una raffinazione e uno sviluppo incessante delle schede. Allo stesso tempo ci si pone come obiettivo quello di miniaturizzare sempre di più tali componenti in modo da occupare meno spazio possibile. Per fare ciò vengono quindi utilizzati molti metalli preziosi e altri elementi definiti terre rare. Mentre i metalli hanno di per sé un valore economico che li rende obiettivo di recupero le terre rare sono elementi con valore strategico tanto che alcune rientrano nelle cosiddette Critical Raw Materials. Queste materie prime vengono infatti prodotte da pochi paesi nel mercato mondiale e vengono poi esportate in tutto il mondo. Per tale motivo sono appunto critiche in quanto sono risorse scarse e si vuole evitare la monopolizzazione del mercato da parte di pochi paesi.

In questo capitolo verranno riportate le tipologie di schede in commercio ed utilizzate, le modalità costruttive, le quantità presenti sul territorio e le modalità di gestione a fine vita e in ultimo le tecnologie utilizzabili per la caratterizzazione dei componenti a fine vita. Verrà inoltre spiegata la definizione delle Critical Raw Materials e per quale motivo è così importante il loro recupero.



### 3.1 Tipologie in commercio

Esistono svariate tipologie di schede elettroniche in commercio che variano per materiali del substrato, pigmentazione dello stesso e struttura costruttiva vera e propria. È possibile però identificare una suddivisione iniziale innanzitutto per struttura in quanto esistono sul mercato schede rigide e flessibili e ad un solo strato o a più strati. Nella figura 3.1 vengono riportati gli schemi di alcune strutture comunemente utilizzate nelle schede elettroniche mentre nella tabella 3.1 vengono riportate i relativi campi d'uso in funzione della struttura.

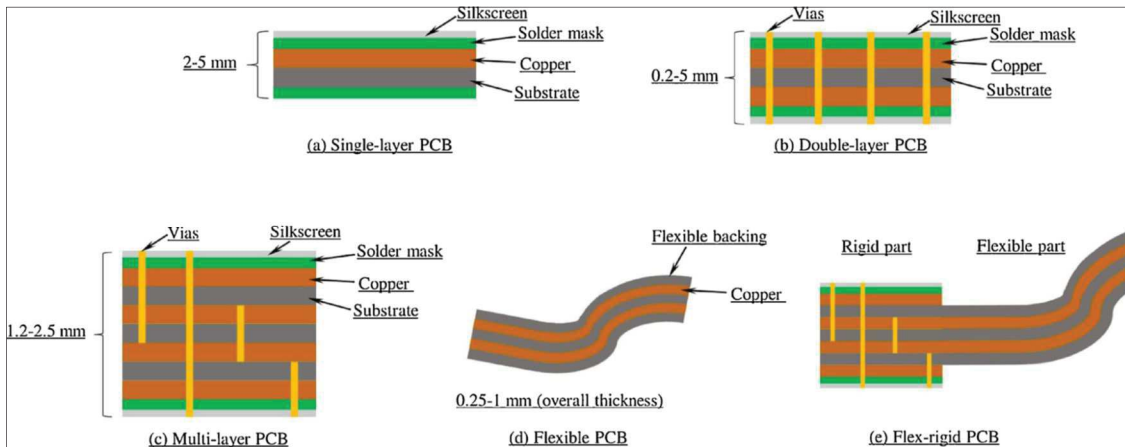


Figura 3.1 Schema delle strutture più comuni nelle schede elettroniche. (H. Li et al., 2018)

Tabella 3.1 Campi di utilizzo delle schede elettroniche in funzione della loro struttura. (H. Li et al., 2018)

Types of PCB	Characteristics	Applications
<b>Based on the number of layers</b>		
Single layer	Single layer of printed wiring or substrate, easily to design and manufacture, low-cost.	General electronic devices, e.g. calculators, radio, printers, etc.
Double layer	Printed wirings on both sides of substrate.	Instrumentation, computers, LED lighting, automotive dashboards, etc.
Multi-layer	3~ layers of printed wirings, with metallized holes connecting different layers	For complicated designs like medical equipment, satellite systems, computers, etc.
<b>Based on board forms</b>		
Rigid PCB	With rigid substrate preventing the board from twisting.	With single-, double- or multi-layer, application same as them.
Flexible PCB	Free bending, folding and easily coiled.	With single-, double- or multi-layer, used for special requirements, e.g. complicated shape, waterproof, shockproof
Flex-rigid PCB	Suitable for streamlined design, reducing overall board size and weight	Used in the case when space or weight are prime concerns, e.g. cellphone, digital cameras, automobiles

In generale tutti i tipi di schede sul mercato vengono identificati da sigle che ne caratterizzano la modalità costruttiva e i materiali utilizzati al proprio interno. Ne sono un esempio le schede: da FR-1 a FR-6, da CEM-1 a CEM-8, G-10 e G-11. Nonostante ciò le tipologie principalmente utilizzate nei dispositivi elettronici, di comune utilizzo, sono 2 e vengono identificate con la sigla FR-2 e FR-4. Questa numerazione indica, in senso crescente, un aumento della complessità e delle capacità funzionali della scheda stessa. La scheda di tipo FR-2 è composta da un substrato di carta da cellulosa rinforzata con resina polimerica fenolica ed è utilizzata soprattutto in televisori, elettrodomestici e computer. La tipologia FR-4 invece consiste in uno o più strati sovrapposti realizzati annegando fibre di vetro in una matrice di resina epossidica rivestiti da uno strato di rame e vengono utilizzati soprattutto in piccoli dispositivi come i cellulari. Entrambi questi due modelli vengono utilizzati quando si hanno condizioni di alta pericolosità di incendio e

quindi richiedono una elevata capacità di resistenza al fuoco. Per garantire questa caratteristica nel passato venivano utilizzati composti contenenti Bromo e Antimonio proprio per le loro caratteristiche di ritardare il punto di fiamma. (A. Kumar et al., 2018)

### **3.2 Modalità costruttive**

Per quanto riguarda invece i componenti e i materiali presenti all'interno delle schede si fa riferimento alla figura 3.2 dove vengono riassunti i possibili casi. Come si può dedurre da tale schema esistono molte tipologie differenti di materiali e componenti ma tutte le schede presentano uno schema ricorrente. Esse infatti hanno in comune un substrato polimerico composito in grado di proteggere i contatti dalla corrosione e di garantire un supporto meccanico. Su questo strato vengono saldati i componenti elettronici tramite l'utilizzo di una lega solitamente a base di stagno. La lega più usata è quella a base di Pb-Sn per le sue buone proprietà di resistenza ma anche per il costo ridotto e per la temperatura di fusione non troppo elevata pari a 183 °C. A causa della pericolosità dovuta alla presenza del piombo in questa lega negli ultimi anni si è più portati all'utilizzo di leghe Pb-free ovvero senza piombo. Queste leghe sono ad esempio Sn-Zn, Sn-In-Ag e Sn-Bi-Zn. Un altro tipo di materiale utilizzato, più raramente, per le saldature sono anche i compositi elettricamente conduttivi composti da una base polimerica con fibre metalliche. I metalli, all'interno delle schede, rimossi i componenti elettronici, si trovano sottoforma di lamine di rame e film sottili di altri metalli conduttivi per garantire il corretto passaggio del segnale elettrico tra i diversi componenti. In generale si riporta che la composizione percentuale media di una scheda elettronica, compresi i componenti, è circa pari al 40% di metalli, 30% di polimeri plastici e 30% di ceramici. Il substrato polimerico in genere fornisce sostegno per la composizione del tracciato conduttivo e per l'apposizione dei diversi componenti elettronici, perciò viene realizzato in materiale composito dove vengono utilizzati come matrice una resina polimerica, degli agenti di rinforzo come le fibre di vetro e degli additivi per migliorarne le caratteristiche meccaniche. Questo substrato così realizzato rappresenta uno dei componenti più critici dal punto di vista ambientale in quanto è sorgente di numerosi composti organici inquinanti durante il procedimento di riciclaggio tradizionale. Ne sono un esempio i ritardanti di fiamma bromurati ma anche gli eteri difenil polibromurati, i bifenili polibromurati, il tetrabromobifenolo A e il esabromociclododecano. (H. Li et al., 2018)

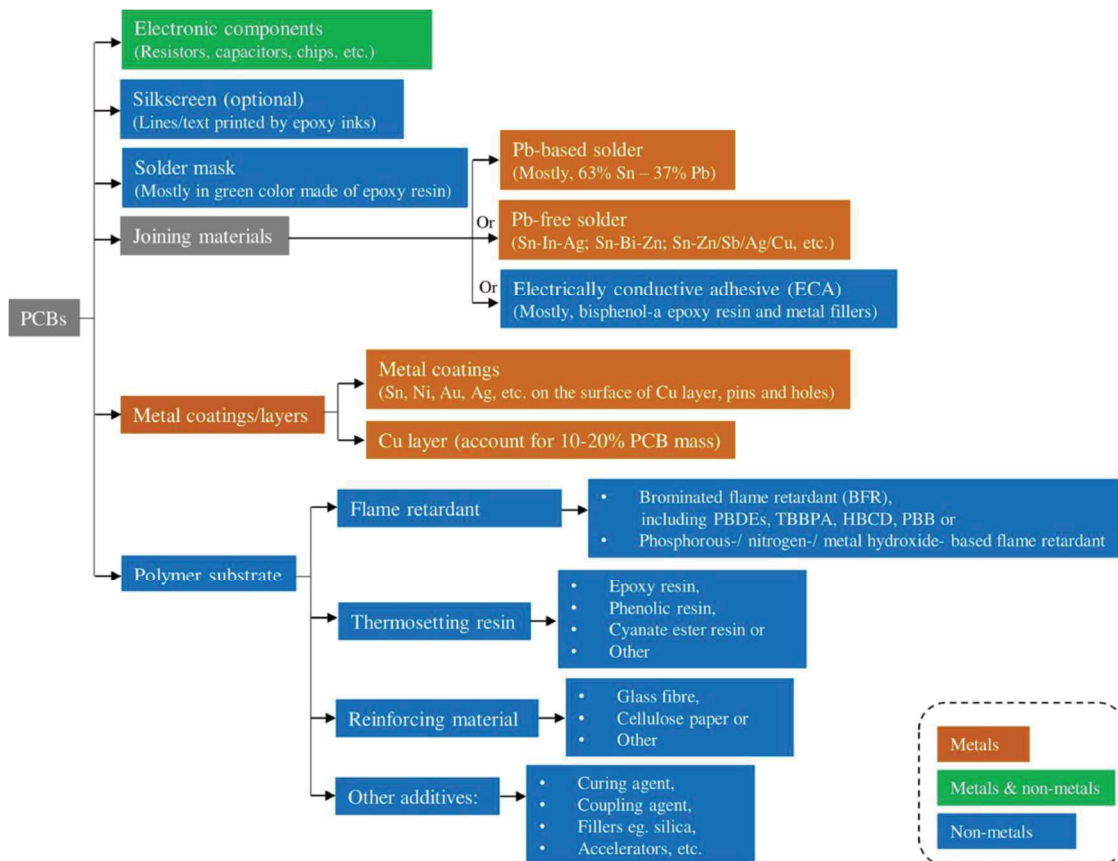


Figura 3.2 Schema dei diversi componenti e relativi materiali presenti nelle schede elettroniche. (H. Li et al., 2018)

### 3.2.1 Processo produttivo

Innanzitutto, per la produzione di questa tipologia di dispositivo si comincia dalla fase di progettazione dove un team di ingegneri e tecnici progetta la scheda elettronica nella sua interezza seguendo le specifiche dettate dal cliente. Questo step iniziale prevede quindi il coinvolgimento del cliente per identificare l'utilizzo finale della scheda e tramite software di progetto 2D e 3D si crea un prototipo virtuale in modo da studiare gli ingombri e i successivi step di realizzazione effettuando lo sbroglio della scheda. Segue quindi la fase di assemblaggio vera e propria composta generalmente di 7 step di processo:

1. Scelta e acquisto di tutti i componenti: In questa fase si identificano i componenti che andranno a formare il circuito sulla scheda e la scelta dipenderà dal progetto fatto precedentemente tramite il software CAD. Per prima cosa è necessario procurarsi il circuito stampato vero e proprio. Ovvero un supporto su cui andranno saldati i successivi componenti realizzato tramite una piastra non conduttiva in fibra di vetro con al suo interno delle piste conduttive che interconnettono i componenti elettronici. Le piste conduttive vengono realizzate intagliando un sottile strato metallico con la tecnica di fotoincisione (tramite l'azione di luce e acidi) o con quella di fresatura meccanica (tramite fresa CNC). Inoltre, con l'avvento dei LED di potenza, si è resa necessaria una nuova tipologia di circuito stampato, capace di dissipare il notevole calore prodotto dai nuovi LED, è definito "MCPCB", sigla di Metal Core Printed Circuit Board, ed

è caratterizzato da un nucleo principale costituito da alluminio o rame, metalli con buona conducibilità termica.

Oltre al circuito stampato serviranno anche tutti i componenti che regolano e controllano la corrente elettrica all'interno della scheda. Questi si distinguono in:

- a. Componenti SMD: Surface Mounted Devices;
- b. Componenti PTH: Pin Through Hole.

I primi sono i componenti più piccoli come i processori, piccoli condensatori e resistenze, mentre i secondi sono quelli più grossolani che vanno installati attraverso una serie di fori che si trovano sul circuito stampato. Di questi componenti (sia SMD che PTH) ne esistono migliaia di tipologie ma si possono generalmente catalogare in: passivi (ad es. le resistenze), attivi (ad es. i transistor), e integrati (ad es. i dispositivi digitali). La scelta dei componenti e la loro disposizione sul circuito stampato dipendono dalle funzionalità che la scheda elettronica dovrà compiere. Proprio per questo la fase di progettazione è una fase molto delicata e va portata a termine con cura.

2. Applicazione della pasta adesiva: Una volta progettata la scheda elettronica, recuperato lo "stampato" e selezionati tutti i componenti si può iniziare l'assemblaggio della scheda elettronica. Prima di cominciare con il posizionamento dei componenti si dovrà applicare una speciale pasta adesiva allo stagno. Questa servirà a saldare i componenti con il circuito stampato sottostante una volta riscaldata tramite un forno. L'applicazione della pasta adesiva è un passaggio particolarmente delicato. Se la pasta, infatti, non viene spalmata attentamente in tutti i punti di contatto la scheda non potrà funzionare correttamente. Per applicare correttamente la pasta adesiva viene utilizzato un foglio metallico guida delle stesse dimensioni della scheda. Il foglio metallico viene intagliato per realizzare il negativo della scheda elettronica, con dei fori in corrispondenza dei punti dove andranno posizionati i componenti. Il foglio metallico viene quindi posizionato sopra la scheda elettronica dove una speciale macchina si occupa di mantenerlo aderente e con una spatola spalmare la pasta adesiva.
3. Posizionamento dei componenti SMD sul circuito stampato: Il circuito stampato con la pasta adesiva viene trasportato ad una speciale macchina che preleverà i componenti dalle bobine e li posizionerà nel punto corretto sulla scheda elettronica. Queste macchine vengono generalmente chiamate pick & place. Normalmente questo processo viene suddiviso in due step successivi con due macchine separate. Per diminuire le rotture e incidenti infatti si preferisce concentrare i componenti più piccoli e leggeri sulla prima e quelli più grossolani/pesanti sulla seconda. Questo permette anche di ottimizzare i tempi e aumentare l'efficienza del processo produttivo. La prima macchina potrà lavorare a velocità più elevate posizionando la maggior parte dei componenti. La seconda raggiungerà velocità più basse ma dovendo maneggiare meno componenti e permetterà di ottenere un tempo di produzione di una scheda elettronica minore.
4. Saldatura dei componenti: Uno degli ultimi passaggi del processo di assemblaggio delle schede elettroniche è la saldatura della scheda. Fino ad adesso i componenti sono stati solo posizionati sopra la scheda elettronica, ma

non sono ancora saldati. Le schede elettroniche con tutti i componenti posizionati vengono convogliate all'interno di un grosso forno. Qui vengono raggiunte temperature di alcune centinaia di gradi e la pasta adesiva, che contiene particelle di stagno, fonde saldando tra loro i componenti elettronici con il circuito stampato sottostante. Le schede vanno poi lasciate raffreddare per alcuni minuti prima di poter essere ispezionate.

5. Ispezione ottica o automatizzata delle schede: Prima di passare al prossimo step si procede con un'accurata ispezione controllando che tutti i componenti siano stati effettivamente posizionati e saldati. Il processo può essere anche completamente automatizzato con dei speciali macchinari che fotografano ogni singolo componente, paragonandolo a una foto presa da un database di riferimento. Database che contiene tutte le foto di ogni singolo componente correttamente posizionato. In qualche minuto verranno controllati tutti i componenti verificando che siano stati posizionati e saldati correttamente.
6. Montaggio componenti PTH: Completato questa prima parte del processo di assemblaggio della scheda elettronica, rimangono da installare tutti i componenti particolarmente grossi e pesanti di tipo PTH. Questo processo viene ancora largamente fatto a mano da operatori specializzati. I componenti vengono predisposti su appositi fori e a mano saldati tramite stagno fuso. Questa fase può essere meccanizzata seppur con difficoltà. L'automazione prevede infatti la deposizione dei componenti tramite la tecnologia prima descritta, l'apposizione di una colla successivamente rimovibile e poi la saldatura. La saldatura degli elementi alle piazzole avviene mediante una breve massiva esposizione ad una lega saldante fusa (metodo di saldatura "ad onda"). In pratica il circuito stampato con i componenti già posizionati viene fatto lentamente scorrere sulla cresta di un'onda fissa di lega saldante fusa creata artificialmente in un crogiolo. Nel caso di circuiti con fori metallizzati la lega saldante aderisce alle piazzole di rame e ai terminali metallici dei componenti, e risale lungo il foro metallizzato bagnandone le pareti e il terminale, fino ad arrivare a bagnare correttamente anche la piazzola di rame superiore. Solitamente la tecnologia con fori metallizzati viene impiegata solo per un numero di strati uguale o superiore a 2.
7. Collaudo funzionale: Una volta completata anche l'installazione dei componenti PTH la scheda può essere collaudata un'ultima volta, adeguatamente impacchettata e spedita al cliente. È importante che il collaudo svolto prima di inviare la scheda al cliente sia di tipo funzionale. Questo perché il collaudo funzionale delle schede elettroniche permetterà di verificare se tutti i componenti sono installati correttamente. Si eviteranno situazioni in cui i componenti sono installati ma con i poli invertiti, per esempio. Il collaudo funzionale permette anche di testare la reale intensità di corrente che circolerà nella scheda elettronica, oltre che alla differenza di potenziale. Questo consentirà di individuare e prevenire tutti i problemi di surriscaldamento che possono capitare durante il normale funzionamento. Passata anche questa ultima verifica le schede sono pronte per essere imballate e spedite al cliente. ([www.trollsystem.com](http://www.trollsystem.com))

### 3.2.2 Componenti delle schede elettroniche

Per garantire il corretto funzionamento e le operazioni desiderate, come già detto precedentemente, sono necessari determinati componenti da montare sulle schede. Alcuni di questi, i più importanti e i più comuni, sono:

- **Alimentatore:** L'alimentatore è un dispositivo che fornisce una sorgente di potenza elettrica per un circuito. Un alimentatore genera una differenza di potenziale (che si misura in Volt) tra i due pin di uscita. La misura del voltaggio e della corrente che è fornita differisce da dispositivo a dispositivo. (www.fadel.net)
- **Resistore:** Il resistore è un dispositivo che oppone resistenza al passaggio dell'elettricità. Il resistore può essere usato per limitare la corrente che passa in un componente elettrico. L'abilità del dispositivo di resistere al passaggio di corrente elettrica è misurata in Ohm. Nel caso in cui le resistenze non abbiano i valori numerici stampati su di esso, si utilizza un codice a colori, che per le resistenze essi sono definiti dalla EIA, tramite la "Tabella codici colori EIA-RS-279". Questi resistori sono tipicamente realizzati con un avvolgimento di filo di leghe metalliche a base di ferro, cromo, tungsteno. L'elemento resistivo è anche realizzato depositando sulla superficie del cilindro uno strato di lega metallica, ossidi metallici o carbone, successivamente inciso a laser con andamento elicoidale per ottenere il valore voluto. Per garantirne l'isolamento vengono poi ricoperti da un composto di tipo ceramico. (www.fadel.net)

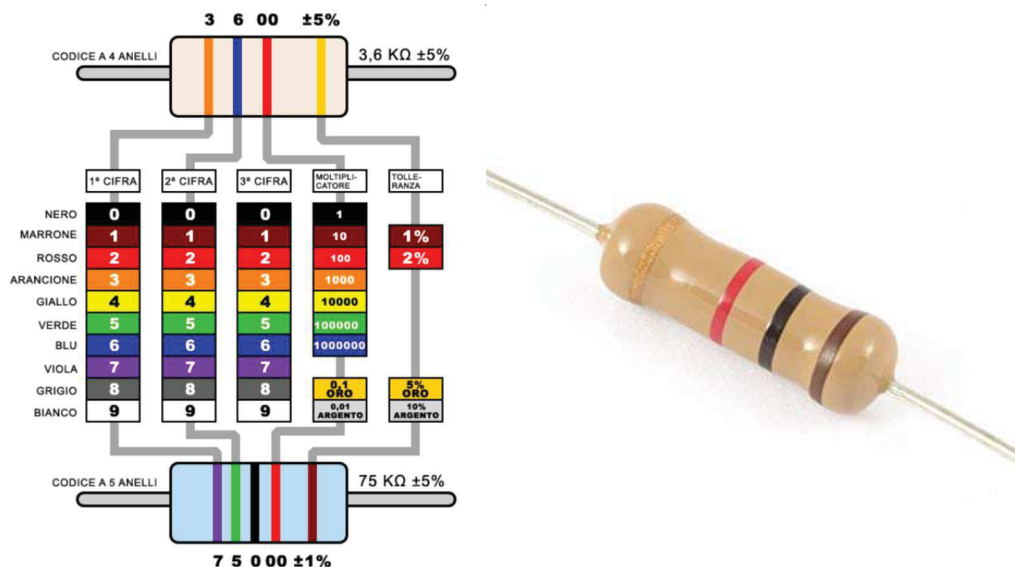


Figura 3.3 (a sinistra) Schema colori per determinazione resistenza del resistore e (a destra) foto di un resistore PTH. (www.fadel.net)

- **Condensatore:** Un condensatore è un dispositivo che può accumulare e rilasciare energia in un circuito. Tipicamente un condensatore è formato da due lastre cariche con un materiale isolante tra esse, il quale ha il compito di evitare che si perda la carica elettrica accumulata. Questi dispositivi possono essere utilizzati per regolare e smussare i segnali in un circuito. Grandi condensatori possono essere utilizzati

come riserva di corrente. La loro abilità di immagazzinare carica è misurata in Farad [F]. I condensatori sono classificati in base al materiale con cui è costituito il dielettrico, riassumibili in due macrocategorie:

- A dielettrico solido: i quali sono solitamente di forma affusolata e possono essere di vario tipo: ceramici, C0G o NP0, X7R, Z5U, a chip ceramico, di vetro, di carta, di poliestere tipo Mylar, di polistirene, di polipropilene, di politetrafluoroetilene, di mica argentata o a circuito stampato. Ogni tipologia differisce per capacità e per campo di applicazione. Ad oggi i più diffusi nel campo degli elettrodomestici da casa sono quelli realizzati in materiale ceramico.
- Elettrolitici: Nei condensatori elettrolitici non è presente un materiale dielettrico, ma l'isolamento è dovuto alla formazione e mantenimento di un sottilissimo strato di ossido metallico sulla superficie di una armatura a contatto con una soluzione chimica umida. Vista la esiguità fisica del dielettrico, non possono sopportare tensioni molto alte. A differenza dei condensatori comuni, la sottigliezza dello strato di ossido consente di ottenere, a parità di dimensioni, capacità molto più elevate. Per contro, occorre adottare particolari accorgimenti per conservare l'ossido stesso. Solitamente questo tipo di condensatore si presenta di forma cilindrica ma ne esistono anche alcuni di forma affusolata, inoltre sono molto comuni nell'elettronica degli elettrodomestici. Esistono diversi tipi di condensatori elettrolitici: ad alluminio, ad alluminio-polimero, al tantalio, elettrolitici a doppio strato o ad aerogel. Anche qui, come per i condensatori a dielettrico solido, la tipologia varia per capacità e differente campo di applicazione. I condensatori elettrolitici più comuni si basano sulla passivazione dell'alluminio, cioè sulla comparsa di una pellicola isolante di ossido, estremamente sottile, che fa da dielettrico fra il metallo e una soluzione elettrolitica acquosa: per questo, essi hanno una polarità ben precisa che deve essere rispettata, pena il cedimento dell'isolamento e la possibilità di esplosione del condensatore. ([www.fadel.net](http://www.fadel.net))

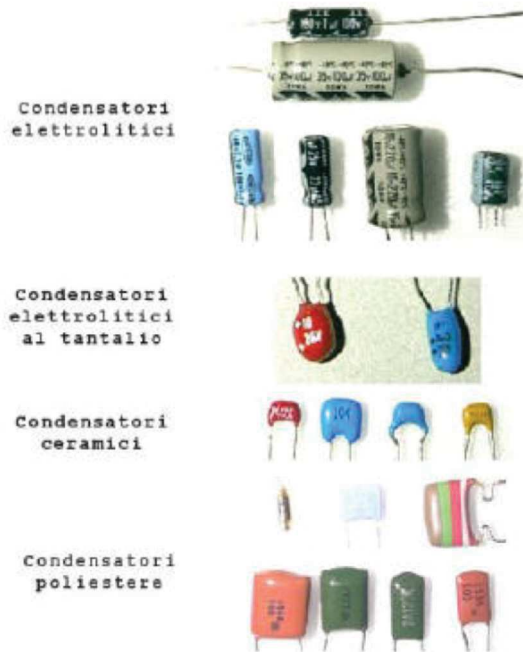


Figura 3.4 Foto di alcune tipologie di condensatori PTH. (www.fadel.net)

- Induttore:** Un induttore è un dispositivo, formato da un cavo di rame avvolto a spirale, che immagazzina energia elettrica in un campo magnetico. Quando viene fatta passare corrente elettrica attraverso il cavo viene generato un campo magnetico. Quando la corrente aumenta, viene immagazzinata più energia nel campo magnetico. Quando la corrente diminuisce l'energia è rilasciata come potenza elettrica. Un induttore può essere utilizzato per smussare o filtrare le brusche variazioni di corrente elettrica, più o meno come può fare il condensatore. L'abilità di un induttore di immagazzinare energia elettrica è misurata in Henry [H]. (www.fadel.net)

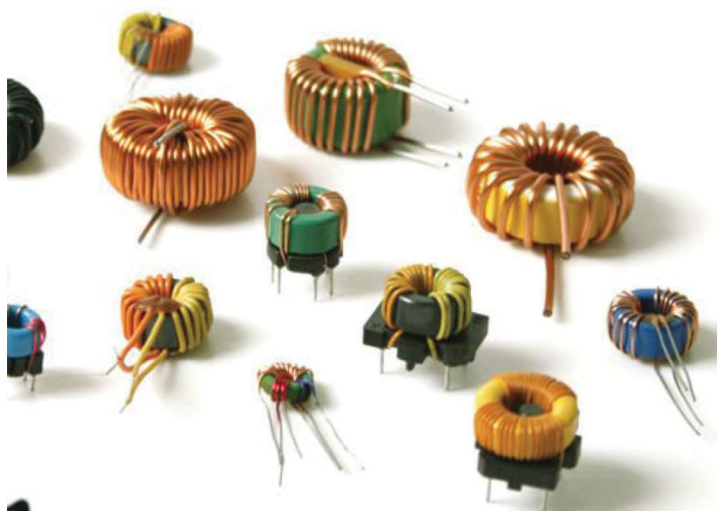


Figura 3.5 Foto di alcune tipologie di induttori con avvolgimento di rame. (www.fadel.net)



- **Diodo:** Un diodo è un dispositivo che permette il passaggio della corrente elettrica in una sola direzione. Questi componenti sono spesso usati per isolare l'effetto di un componente su un altro. Alcuni tipi di diodi:
  - **LED (Light emitting Diode):** diodo che emette luce;
  - **Fotodiodo:** diodo che rileva la luce;
  - **Laser:** diodo che emette un fascio di luce laser;
  - **Zener:** diodo che impedisce il flusso di corrente al di sotto di una certa soglia. (www.fadel.net)
- **Pulsante:** Un pulsante è un dispositivo che permette di chiudere o aprire il flusso elettrico in un circuito attraverso la commutazione del pulsante. I pulsanti sono presenti in vari tipi e configurazioni. Il tipo più comune è l'interruttore temporaneo (pulsante). Quando una forza è applicata al pulsante, il pulsante chiude la connessione (questa tipologia è nota come "NO", "normally open switch") o interrompe la connessione (tipologia nota come "NC", "normally closed switch"). Questi dispositivi possono essere utili per interrompere segnali che vanno verso gli input del microcontrollore. (www.fadel.net)
- **Transistor:** Un transistor è un dispositivo che limita o facilita il passaggio di corrente tra i suoi due contatti in base alla presenza o assenza di corrente su un terzo contatto. I pin di un transistor sono quindi tre: Collettore, Emettore e Base. La Base, in pratica è l'innesco il Collettore e l'Emettitore sono in pratica l'input e l'output del transistor. I due tipi di transistor più comuni sono:
  - **PNP:** Questo transistor lascia passare corrente (dall'Emettitore al Collettore) se la tensione alla Base è minore della tensione dell'Emettitore
  - **NPN:** Questo tipo invece lascia passare corrente (dal Collettore all'Emettitore) se la tensione alla Base è maggiore della tensione dell'Emettitore. (www.fadel.net)

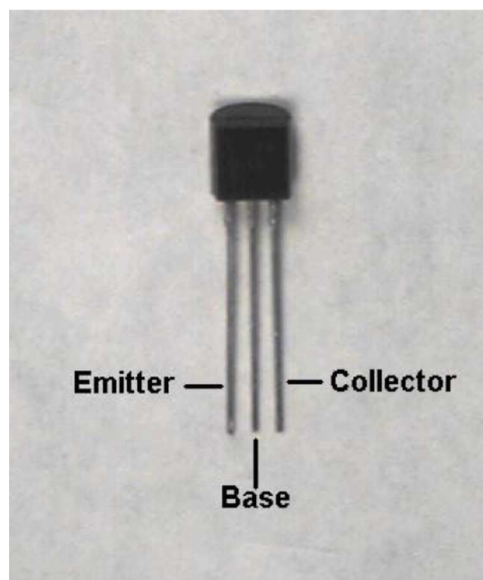


Figura 3.6 Foto di un transistor con indicazione dei tre pin base. (www.fadel.net)

- **Relè:** Un relé è un dispositivo che completa la connessione tra due contatti attraverso un movimento meccanico. Può utilizzare un solenoide per muovere magneticamente un interruttore di contatto. Un segnale è inviato al relé che può essere usato come sorgente dell'elettromagnete. Spesso sono utilizzati come meccanismi di cambio tra una corrente di comando proveniente da un circuito a corrente continua a bassa tensione (DC) verso un interruttore che apre e chiude un circuito in corrente alternata (AC) o in corrente continua ad alta tensione. In questo modo è possibile isolare la parte più sensibile del circuito (quella a bassa tensione continua) da componenti più grandi. (www.fadel.net)



Figura 3.7 Rappresentazione di una tipologia di relè con visione sui componenti interni. (www.fadel.net)

### 3.3 Quantità e gestione attuale

A livello mondiale non sono uno dei rifiuti particolarmente critici in quanto le quantità in gioco risultano essere abbastanza contenute rispetto alle altre tipologie di rifiuti. C'è da dire che la quantità di questo rifiuto è stimata in forte crescita in quanto le apparecchiature elettroniche ed elettriche, da cui derivano, sono in eccezionale crescita. Si registra infatti una crescita annua mondiale del 4-5% partendo dalle 41,8 Mt del 2014 alle 49,8 Mt previste del 2018 (A. Priya and S. Hait, 2018). E sicuramente il trend di crescita è in aumento soprattutto nei paesi in via di sviluppo dove la tecnologia avanza molto velocemente. Analogamente per i paesi dove il livello di ricchezza è alto e dove gli apparecchi tecnologici la fanno da padrone. Questo significa quindi che, con l'avanzare del tempo, ci si aspetta un aumento dei flussi dei RAEE da smaltire e di conseguenza un aumento delle schede elettroniche da trattare. Diventa sempre più importante inoltre il concetto di recupero delle materie prime dai rifiuti di questo tipo sia dal punto di vista economico che strategico. In riferimento alla quantità percentuale delle schede rispetto alle apparecchiature complete si riporta la tabella 3.2 dove vengono riportati diversi tipi di apparecchiature elettriche e la quantità percentuale relativa di schede.

Tabella 3.2 Percentuali relative in peso per diversi tipi di apparecchiature elettroniche ed elettriche. (A. Priya and S. Hait, 2018)

S. No.	WEEE category	EEE	Brand	Weight of EEE (kg)	Weight of PCB (kg)	% weight of PCB against EEE (w/w)
1	Information technology and telecommunication equipment	Computer	I	7.924	0.224	2.827
			II	6.840	0.226	3.304
		Laptop	I	2.240	0.115	5.134
			II	2.191	0.154	7.029
		Mobile phone	I	0.079	0.014	17.722
			II	0.072	0.012	16.667
		Calculator	I	0.090	0.007	7.778
			II	0.143	0.018	12.587
		Modem	I	0.640	0.007	1.093
			II	0.523	0.008	1.530
2	Large household equipment	Refrigerator	I	37.500	0.014	0.037
			II	33.524	0.018	0.054
		WM	I	7.362	0.102	1.385
			II	8.243	0.113	1.371
		AC	I	35.564	0.034	0.096
			II	34.870	0.037	0.107
		Inverter	I	11.211	0.008	0.071
			II	13.625	0.007	0.051
3	Consumer equipment	TV	I	7.650	0.234	3.059
			II	8.921	0.221	2.477
		Radio	I	0.165	0.019	11.515
			II	0.220	0.021	9.545
		DVD player	I	0.890	0.006	0.674
			II	0.952	0.007	0.735
		TV remote control	I	0.062	0.012	19.355
			II	0.048	0.012	25.000
		Stereo amplifier	I	8.758	0.006	0.072
			II	10.656	0.005	0.052
4	Lighting equipment	CFL	I	0.053	0.013	24.528
			II	0.057	0.011	19.298
		Rechargeable lamp	I	0.650	0.012	1.846
			II	0.525	0.010	1.905

Nell'anno 2018 sul territorio nazionale, come detto in precedenza, sono state inviate a trattamento oltre 421.000 tonnellate di RAEE. Di questi bisogna poi valutare che una percentuale saranno schede elettroniche che andranno poi gestite come tali. Nel nostro paese esistono alcune piccole realtà che si occupano della valorizzazione solo di lacune tipologie di schede in quanto vengono predilette quelle ad alto contenuto di elementi preziosi perché più economicamente vantaggiose. Per tutte le altre invece il procedimento è più oneroso, in termini di tecnologie impiantistiche, e di conseguenza il trattamento viene effettuato quasi totalmente all'estero.

### 3.4 Caratterizzazione

La composizione delle schede elettroniche dipende molto dalla localizzazione, dall'anno e dal tipo di applicazione per cui vengono utilizzate. La caratterizzazione dei materiali e degli elementi costituenti il substrato e i componenti delle schede elettroniche avviene seguendo diverse metodologie che in generale si suddividono in tecniche a umido e a secco. Nella tabella 3.3 vengono riportate le metodologie più utilizzate con i vantaggi e gli svantaggi derivanti da esse. Una tecnica sicuramente molto utilizzata è la triturazione con successiva comminuzione seguita da una separazione per dimensione e poi una lisciviazione dei metalli tramite acqua regia. In questo modo è possibile identificare tramite uno spettrometro di massa i diversi elementi componenti la scheda.

Tabella 3.3 Metodologie utilizzate per la caratterizzazione delle schede elettroniche. (A. Hubau et al., 2019)

Sample preparation methods	Analytical methods	Advantages	Drawbacks	Study	Element studied
<i>Dry techniques</i>					
Calcination	X-ray fluorescence (XRF)	Destruction of plastics, which can interfere with analysis	Not compatible with volatile elements (Hg, As, Pb, Sn, Zn...)	Birloaga et al. (2013)	Cu, Al, Fe, Sn, Ni, Zn, Pb, Au, Ag
No preparation	XRF	- 10-20% more Cu compared to wet characterization - Easily performed	- Not precise - Need for calibration with particle of similar size and composition, but no existing reference materials	Ernst et al. (2003) Wienold et al. (2011) Morf et al. (2007) Martin et al. (2010) Sun et al. (2015)	Ag, Br, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Pd, Sb Pb, Cd, Hg Al, Sb, Pb, Cd, Cr, Fe, Cu, Ni, Hg, Zn, Sn, Cl, P Cd, Cr, Pb Cu, Sn, Fe, Al, Pb, Zn, Ni, Nd, Ag, SiO <sub>2</sub>
<i>Wet techniques</i>					
Aqua regia	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP AES)	- Large quantities - Less milling - Easily performed - Repeatable - Reproducible	- Incomplete digestion (40-50% residues) - Not compatible with Ta, Sn - Doubt for Cu	Ernst et al. (2003) Wienold et al. (2011) Ogunniyi et al. (2009)	Ag, Au, Be, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Pd, Sb Pb, Cd, Hg 44 elements
Micro-wave (MW) and aqua regia	ICP-AES	Higher dissolution of Cr and Sb than without MW	- Incomplete digestion (10% residues) - sample mass < 1 g	Wienold et al. (2011) Holgersson et al. (2018)	Pb, Cd, Hg 38 elements
Aqua regia followed by calcination and fusion	Inductively Coupled Plasma Mass Spectro-metry (ICP-MS)	Digestion almost total (<10% residues)	- Time consuming - Difficult to implement	Ernst et al. (2003)	
Calcination followed by acid leaching (aqua regia + HF) under micro-wave	Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)	Destruction of plastics, which can interfere during analysis	Not compatible with volatile elements (Hg, As, Pb, Sn, Zn...)	Birloaga et al. (2013)	Cu, Al, Fe, Sn, Ni, Zn, Pb, Au, Ag
Fusion with sodium peroxide followed by HCl leaching	ICP-AES and ICP-MS	Digestion total	Difficult to implement	Ogunniyi et al. (2009)	44 elements
Micro-wave (MW) and HNO <sub>3</sub> /HBF <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	ICP-AES	Digestion almost total (2,5% residues)	- sample mass < 1 g - difficult to implement	Ernst et al. (2003)	Ag, Au, Be, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Pd, Sb
Micro-wave (MW) and HNO <sub>3</sub> /HCl/HF/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ICP-AES	Digestion almost total	- sample mass < 1 g - difficult to implement	Xiang et al. (2010)	Cu, Pb, Al, Sn, Zn, Fe, Ni, Mg, Sb, Ag, Au, Mn, Co, Pd

Un'indicazione sufficientemente completa dei diversi elementi metallici componenti le schede elettroniche viene fornita dalla ricerca realizzata da A. Hubau et al. (2019) dove vengono effettuati due passaggi tramite un tritratore per ottenere un campione di dimensione di circa 30x30 mm e successivamente di 10x10 mm. Di seguito viene applicata una comminuzione con un mulino a martelli da laboratorio con una dimensione di output di 750 µm. In questo modo vengono poi selezionati 3 campioni da 40 g l'uno e su questi viene applicata la lisciviazione tramite acqua regia e acqua regia inversa su sub campioni da 5 g l'uno per questioni di sicurezza. Ovvero viene utilizzata una soluzione HNO<sub>3</sub>:HCl con rapporto 1:3 e una con rapporto 3:1 partendo da una soluzione di acido nitrico al 67-69% e di acido cloridrico al 32% in peso. I reattori utilizzati vengono inoltre riscaldati ad una temperatura di 200°C per 2 ore. I residui solidi, separati con un filtro di cellulosa con pori di 0,45 µm, sono stati poi risciacquati e asciugati a 40°C. Successivamente la caratterizzazione dei metalli è stata effettuata con uno spettrometro ad assorbimento di fiamma atomica per Fe, Cu, Zn, Pb, Co e Ni e con uno spettrometro di massa (ICP-MS) per Ag, Al, Au, Cr, Ga, Ge, In, Mg, Mn, Mo, Pd, Sb, Sn, Ta, V e W. I risultati così ottenuti sono riportati nella tabella 3.4 e nella tabella 3.5.

Tabella 3.4 Concentrazioni dei metalli nei campioni analizzati dopo la lisciviazione con acqua regia. (A. Hubau et al., 2019)

	Concentrations in %w						Concentrations in mg kg <sup>-1</sup>						
	Cu	Fe	Al	Zn	Sn	Pb	Ni	Co	Ag	Au	Pd	Ga	Ta
Sample N°1	14.60%	12.20%	6.240%	1.81%	1.89%	1.23%	0.32%	334	198	42.2	22.9	10.6	0.034
Sample N°2	14.32%	12.34%	5.841%	1.51%	1.44%	1.08%	0.32%	374	166	62.0	26.8	10.7	0.038
Sample N°3	14.82%	12.15%	N.A.	1.68%	N.A.	1.21%	0.37%	366	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Average	14.58%	12.23%	6.040%	1.67%	1.67%	1.17%	0.34%	358	182	52.1	24.9	11	0.036
RSD	1.7%	0.8%	-	8.9%	-	7.2%	7.2%	5.9%	-	-	-	-	-
Relative difference	-	-	6.8%	-	31.3%	-	-	-	19.3%	46.9%	17.0%	0.9%	11.8%

Tabella 3.5 Concentrazioni dei metalli nei campioni analizzati dopo la lisciviazione con acqua regia. (A. Hubau et al., 2019)

Metal	Unit	Digestion n°1	Sample n°1				Sample n°2			
		Method	Aqua regia	Content measured after 1 <sup>st</sup> digestion	Content after 2 digestions	% recovered from 1 <sup>st</sup> digestion	Aqua regia	Content measured after 1 <sup>st</sup> digestion	Content after 2 digestions	% recovered from 1 <sup>st</sup> digestion
		% w/w residues	40%				47.5%			
		% w/w residues	0%				90%			
Cu	%w		14.60%	14.61%	99.9%	14.32%	14.34%	99.9%		
Fe	%w		-	-	-	12.34%	12.52%	98.5%		
Al	%w		-	-	-	5.84%	5.96%	98.0%		
Zn	%w		1.81%	1.85%	97.9%	1.52%	1.53%	98.5%		
Sn	%w		1.89%	1.90%	99.7%	1.44%	1.45%	99.3%		
Pb	%w		1.23%	1.24%	99.3%	1.08%	1.09%	98.8%		
Ni	%w		0.32%	0.34%	94.5%	0.32%	0.33%	97.3%		
Co	mg kg <sup>-1</sup>		334	338	98.9%	374	376	99.5%		
Ag	mg kg <sup>-1</sup>		198	209	94.6%	166	179	92.6%		
Au	mg kg <sup>-1</sup>		42.2	44.4	95.2%	62.0	65.9	94.1%		
Pd	mg kg <sup>-1</sup>		22.9	23.2	98.8%	26.8	27.3	98.4%		
Ga	mg kg <sup>-1</sup>		10.6	11.4	93.0%	10.7	11.5	93.1%		
Ta	mg kg <sup>-1</sup>		0.034	7.5	0.5%	0.038	0.045	83.6%		

La componente non metallica recuperata dalle schede elettroniche contiene perlopiù resine, materiali per il rinforzo e residui di metalli e solitamente viene inviata a smaltimento in discarica. Questa componente è pari a circa il 70% in massa di una scheda e di conseguenza poterla recuperare rappresenterebbe un aspetto positivo. Molti studi concordano sul fatto che la composizione di questa frazione è circa 65% fibra di vetro, 32% resina epossidica e la rimanente parte sono impurità metalliche.

Lo studio analizzato, presentato da A. Kumar et al. (2018), riporta una caratterizzazione seguendo diversi test come: un test di lisciviazione dei componenti tossici, un'analisi termogravimetrica e un test per la determinazione del potere calorifico. Per lo studio viene preso in considerazione un campione di circa 25 kg di frazione non metallica essiccata all'aria. Il campione descritto è ottenuto da una combinazione di schede di tipo FR-2 e FR-4 dopo una separazione gravimetrica a umido e una essiccazione a 60°C per 96 ore. Viene quindi eseguita un'analisi dimensionale e per identificare il tenore di metalli viene utilizzata una lisciviazione con acqua regia a 95°C per 30 minuti. Vengono poi eseguite le prove per identificare la perdita di massa per combustione in una fornace a 750°C riscaldata per 3 ore. Viene poi misurato il potere calorifico con un calorimetro e successivamente viene eseguita un'analisi per l'identificazione dei composti facenti parte della famiglia degli eteri difenili polibromurati e un test sull'eluato. Come ultimo test viene portata a termine un'analisi termogravimetrica portando il campione ad una temperatura di 950°C dalla temperatura ambiente per step successivi. Nelle figure da 3.8 a 3.10 riportano i risultati delle analisi effettuate. Nelle tabelle 3.6 e 3.7 vengono riassunti invece i risultati derivanti dall'analisi degli eteri e il test sull'eluato.

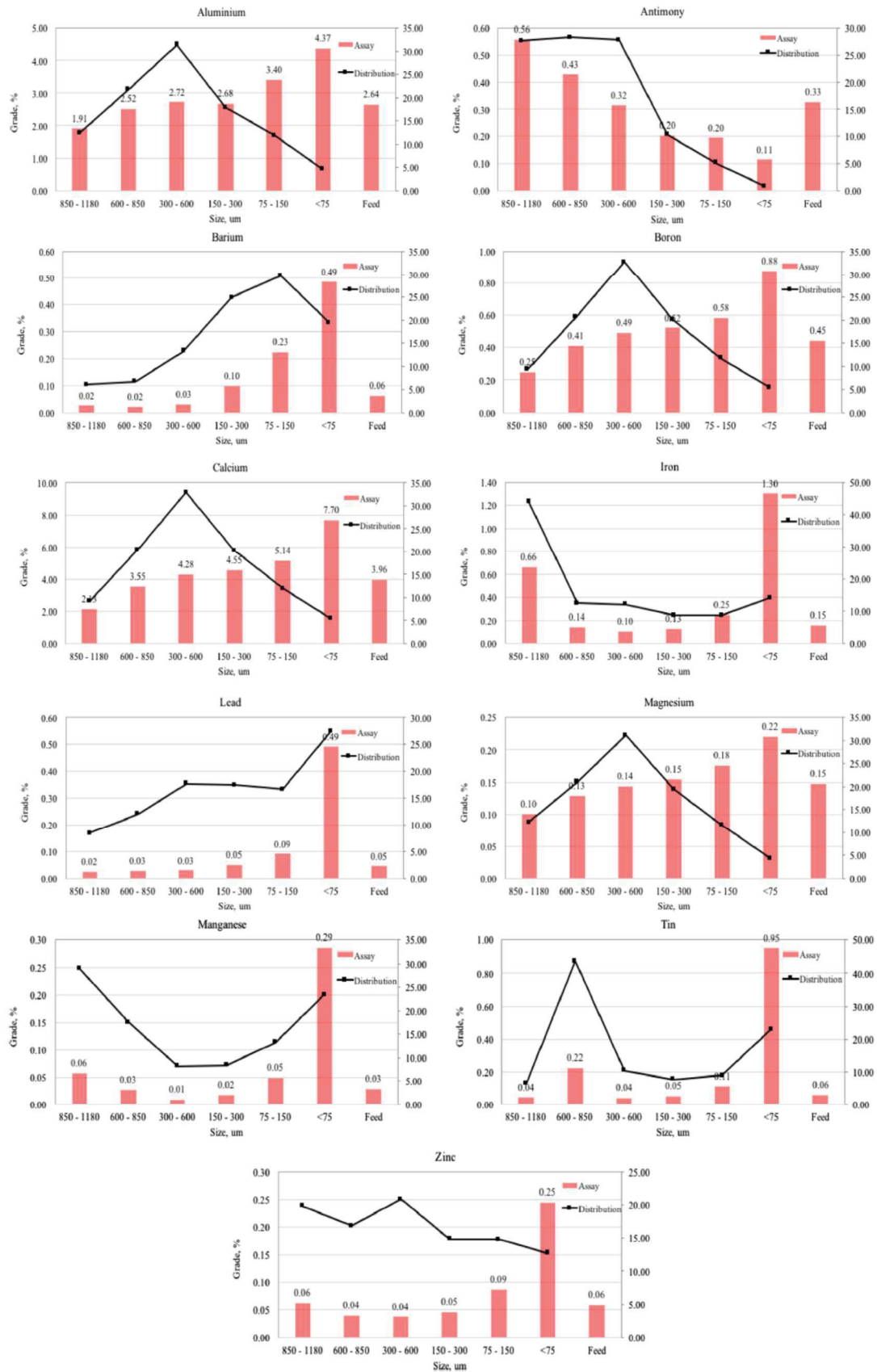


Figura 3.8 Contenuto di metalli e differente distribuzione nelle diverse classi dimensionali. (A. Kumar et al., 2018)

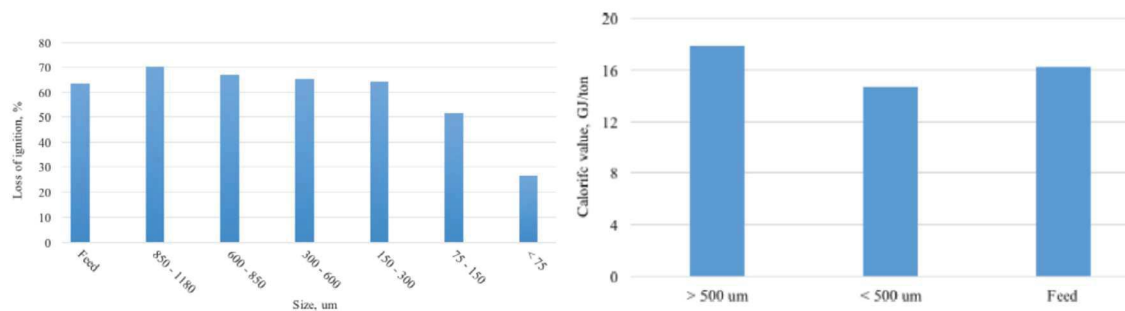


Figura 3.9 Perdita di massa per combustione (a sinistra) e potere calorifico (a destra) per le diverse classi dimensionali. (A. Kumar et al., 2018)

Tabella 3.6 – Risultati dell’analisi effettuata per l’identificazione degli esteri. (A. Kumar et al., 2018)

Analyte name	>500 $\mu\text{m}$ (mg/kg)	<500 $\mu\text{m}$ (mg/kg)	Overall (mg/kg)
PBDE 17	1.70	3.90	2.8
PBDE 28	2.60	5.90	4.3
PBDE 71	4.40	10.00	7.2
PBDE 47	17.00	37.00	27.0
PBDE 66	5.40	12.00	8.7
PBDE 100	1.10	2.20	1.7
PBDE 99	16.00	35.00	25.5
PBDE 85	1.10	2.00	1.6
PBDE 154	1.00	2.00	1.5
PBDE 153	3.30	7.30	5.3
PBDE 138	0.42	0.80	0.6
PBDE 128	0.51	0.89	0.7
PBDE 183	1.70	2.10	1.9
PBDE 190	0.05	0.06	0.1
PBDE 203	0.32	0.31	0.3
PBDE 206	5.00	5.40	5.2
PBDE 209	110.00	89.00	99.5

Tabella 3.7 Risultati del test sull’eluato. (A. Kumar et al., 2018)

Element	>500 $\mu\text{m}$ (mg/L)	<500 $\mu\text{m}$ (mg/L)	Feed (mg/L)	BC limits (mg/L)
Antimony	<1.0	<1.0	<1.0	-
Arsenic	<1.0	<1.0	<1.0	2.5
Barium	3.1	4.4	3.75	100
Beryllium	<0.025	<0.025	<0.025	-
Boron	0.82	1	0.91	500
Cadmium	<0.050	0.16	-	0.5
Calcium	12.7	19.6	16.16	-
Chromium	<0.25	<0.25	<0.25	5
Cobalt	0.058	0.115	0.09	-
Copper	16.9	21.7	19.31	100
Iron	<5.0	14.1	-	-
Lead	9.05	26	17.55	5
Magnesium	7.62	8.54	8.08	-
Mercury	<0.0010	<0.0010	<0.0010	0.1
Nickel	0.28	0.41	0.35	-
Selenium	<1.0	<1.0	<1.0	1
Silver	<0.050	<0.050	<0.050	5
Thallium	<1.0	<1.0	<1.0	-
Vanadium	<0.15	<0.15	<0.15	-
Zinc	9.41	19.2	14.32	500

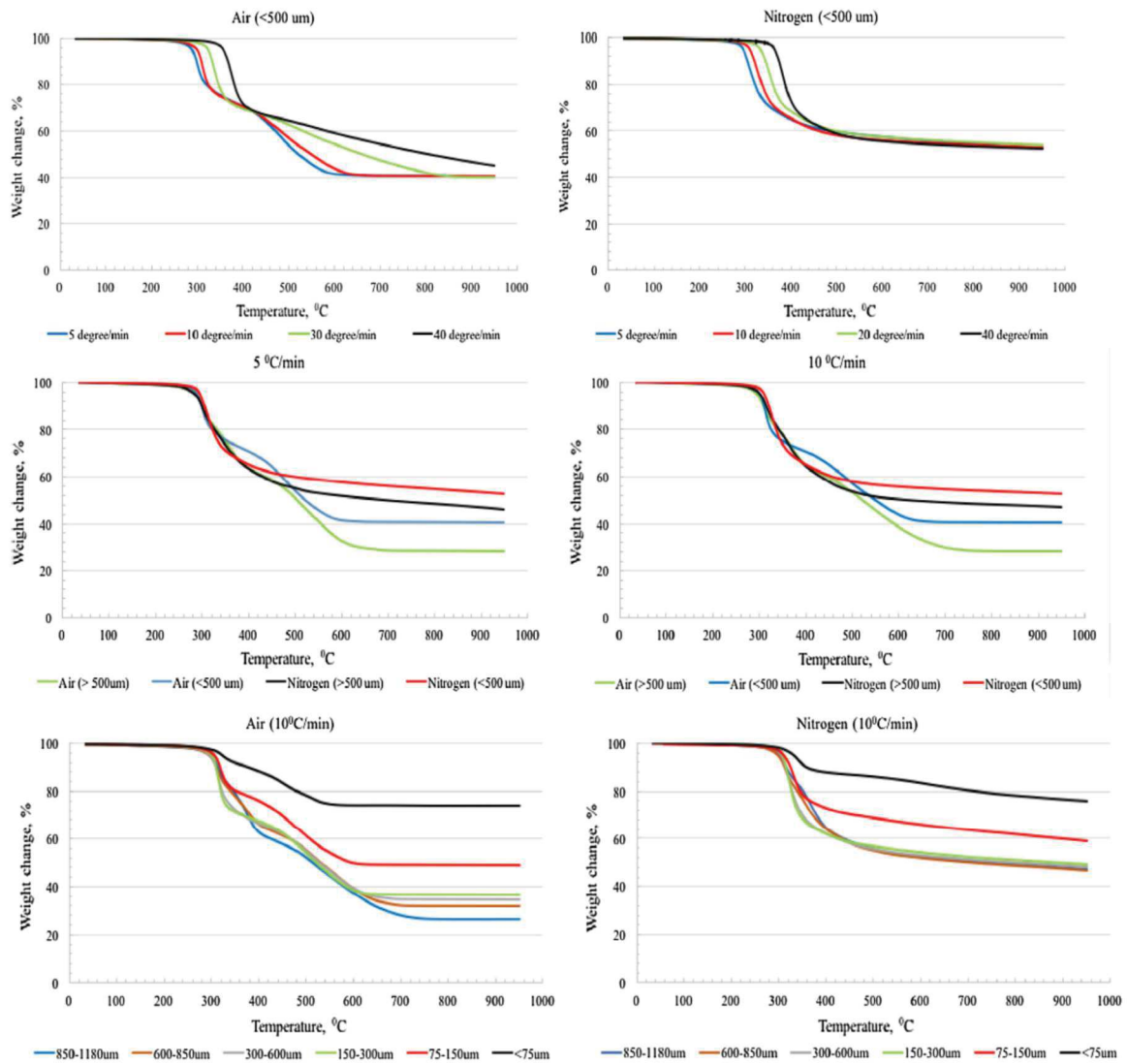


Figura 3.10 Risultati dell'analisi termogravimetrica. (A. Kumar et al., 2018)

### 3.5 Critical Raw Materials

Le materie prime critiche o critical raw material (CRM) sono materie prime che, come descritto dal nome, sono critiche per quanto riguarda la reperibilità e la grande importanza nel mercato mondiale. Esse sono individuate dalla Commissione Europea sulla base di due fattori: l'importanza economica e il rischio di approvvigionamento per l'industria europea. Il primo fattore dipende da condizioni di stabilità politica ed economica, livello della concentrazione di produzione, potenziale di sostituibilità e grado di riciclo. Il secondo fattore è indicativo dell'importanza di una materia prima nello specifico settore economico e dell'importanza del settore stesso nell'economia comunitaria. La disponibilità delle materie prime può cambiare nel tempo, in linea con i flussi commerciali e le politiche di settore. La criticità è quindi un fattore dinamico. L'Europa deve quindi far fronte al rischio di approvvigionamento a causa di situazioni di monopolio, alto costo, elevata domanda, instabilità politica dei Paesi produttori, accumulo di riserve, volatilità del prezzo. A causa di risorse proprie limitate, l'Europa



importa materie prime dalla Cina (antimonio, bismuto, magnesio), nonché da Marocco, Russia, Turchia, Stati Uniti, Australia, Messico, Algeria, Indonesia, Brasile, Kazakistan, Nigeria, Sudafrica. Nello specifico, l'Europa importa il 100% di antimonio, bismuto, borati, magnesio, gomma naturale, niobio, fosforo, scandio, tantalio, platino, terre rare leggere e pesanti. Importa oltre il 96% di elio e l'88% di fosfati di roccia. La nuova lista delle materie prime critiche, pubblicata nel settembre del 2017, annovera ventisette elementi, di cui alcuni sono nuovi rispetto alla lista del 2014 (20 elementi), che era una versione successiva alla prima lista del 2011 (14 elementi). Le materie prime critiche sono quindi identificate come le seguenti:

1. Antimonio;
2. Barite;
3. Berillio;
4. Bismuto;
5. Borati;
6. Cobalto;
7. Carbone da coke;
8. Elio;
9. Fluorite;
10. Fosfato di roccia;
11. Fosforo;
12. Gallio;
13. Germanio;
14. Gomma naturale;
15. Grafite naturale;
16. Hafnio;
17. Indio;
18. Magnesio;
19. Niobio;
20. Platino ed elementi del suo gruppo;
21. Scandio;
22. Silicio metallico;
23. Tantalio;
24. Terre rare leggere;
25. Terre rare pesanti;
26. Tungsteno;
27. Vanadio.

Questa lista proveniente dal report del JRC (Joint Research centre; Critical raw materials and the circular economy, 2017) costituisce un riferimento per il commercio, l'innovazione e le politiche industriali. Viene, infatti, adoperata dalla Commissione Europea per negoziare accordi commerciali, promuovere ricerca e innovazione, mettere a punto misure per evitare distorsioni commerciali. La lista è soggetta a regolare aggiornamento (almeno ogni tre anni), in linea con lo sviluppo produttivo, tecnologico e del mercato di settore. È facile comprendere come vi possano essere delle materie prime che, pur non essendo classificate fra quelle critiche, sono tuttavia strategiche e a rischio, a causa della crescente domanda o dell'avanzamento della tecnologia. Il riciclo dei

prodotti a fine vita costituisce quindi una risorsa imprescindibile ai fini di una corretta politica sulle materie prime, che dovrebbe includere la valorizzazione di risorse come rifiuti di miniera, rifiuti industriali, scarti di fabbricazione, miniere urbane. Le tematiche di riciclo sono però spesso sottovalutate e il grado di riciclo dei materiali è ridotto a causa di carenze tecnologiche e di alti costi che rendono dubbiose le aziende sulla possibilità di utilizzare materie prime secondarie anche con più bassa qualità di quella iniziale. Occorrono, quindi, politiche strategiche che facilitino la dismissione di impianti e prodotti, la raccolta dei rifiuti, la separazione, il trattamento per il recupero delle materie prime ed il loro riuso, in base a standard di qualità che sono confinati a pochi settori ed applicazioni. Secondo i dati della Commissione Europea, il tasso di riciclo da prodotti a fine vita è ridotto, pari al 28% per l'antimonio, al 17% per i fosfati di roccia, 9% per il magnesio, 42% per il tungsteno, 44% per il vanadio, 14% per il platino, 8% per le terre rare leggere. Tuttavia, è zero o pari a zero, per berillio, borati, cobalto, carbone da coke, gallio, indio, niobio, fosforo, scandio, silicio; solo l'1% per tantalio, barite, bismuto, fluorite, hafnio, elio e gomma naturale. Per migliorare il grado di riciclo occorre migliorare la conoscenza degli utilizzatori e sviluppare dei processi di trattamento idro- e piro-metallurgici per il recupero dei materiali. Oggi sono già disponibili processi per il recupero di materiali da circuiti stampati; metalli preziosi (platino, rodio, palladio) da catalizzatori industriali e automobilistici; Ni, Cd, terre rare e manganese dalle batterie dei cellulari; cobalto e manganese dai catalizzatori industriali esausti; vanadio dalla gassificazione di frazioni residue di oli pesanti; antimonio, manganese e terre rare dalle lampade fluorescenti; indio e antimonio da monitor LCD. Anche i materiali plastici contenuti nei RAEE (rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche) possono essere recuperati mediante pirolisi. Ad oggi comunque, la quasi totalità dei materiali critici non è sostituibile o lo è solo in applicazioni limitate, come evidenziato dagli studi parzialmente pubblicati dalla Commissione Europea. Non sono praticamente sostituibili berillio, borati, cobalto, germanio, fosfati, silicio. Altri elementi risultano sostituibili per una percentuale fra il 5 e il 10% (tantalio, vanadio, platino, terre rare leggere, antimonio, barite, carbone da coke, elio, magnesio, gomma naturale, niobio, fosforo, scandio, ad esempio), o compresa fra l'1 e il 5% (bismuto, fluorite, gallio, hafnio, elio, indio, grafite, tungsteno). Il quadro descritto pone l'esigenza di approfondire la ricerca tecnologica e di rinforzare la collaborazione a livello regionale, comunitario e internazionale, al fine di garantire soluzioni tecnologiche ad hoc e politiche future tali da assicurare un approvvigionamento sicuro delle materie prime. Esistono delle carenze e delle barriere in materia di leggi e regolamenti. Il Joint Research Centre (JRC) ha sviluppato un sistema informativo sulle materie prime (RMIS), ovvero un database online contenente informazioni su politiche, dati, metodi, approcci e attività relative al settore delle materie prime. In linea generale, le future strategie sono essenzialmente mirate a:

- diversificazione delle risorse e migliori pratiche di gestione delle risorse esterne (mediante nuovi accordi internazionali con i Paesi produttori) e domestiche;
- nuove esplorazioni per giacimenti sconosciuti o non totalmente sfruttati all'interno dell'Unione Europea e sfruttamento delle miniere urbane, con recupero dei rifiuti di miniera, dei residui minerari, degli scarti di lavorazione. La possibilità di attingere a risorse interne contribuisce a una corretta strategia di mitigazione del fabbisogno;

- sviluppo di nuovi processi per l'estrazione e il trattamento dei minerali, che permettano di ridurre i consumi e migliorino la salute e la sicurezza di persone ed impianti;
- studio di nuovi regolamenti e standard riguardo alla dismissione, raccolta, trattamento, recupero, riciclo e riuso dei rifiuti, per categorie specifiche di prodotti/settori/applicazioni ad ampio mercato (dispositivi elettrici ed elettronici, batterie);
- sviluppo di tecnologie e procedure per il riciclo e nuovi processi (idro e piro-metallurgici) per il recupero e la separazione, al fine di incrementare la frazione riciclata e ridurre i costi di trattamento, in congiunzione con l'adozione di norme di eco-design che facilitino, già in fase di progettazione, la dismissione, la separazione e il recupero dei materiali a fine vita;
- riduzione dell'uso delle materie prime nelle applicazioni e ricerca di sostituti, non solo a livello di elementi e sostanze, ma anche di processi e servizi. (Circular Economy Network e ENEA, 2019)

# Capitolo 4

## Trattamenti esistenti

La tematica del recupero dei differenti materiali costituenti le schede elettroniche è oggetto di studio di molti ricercatori i quali, come già detto, accolgono in pieno il bisogno di un procedimento di trattamento in grado di trattare questa particolare tipologia di rifiuto nella maniera più corretta e più efficiente possibile. Ad oggi il trattamento avviene utilizzando procedimenti energivori e che mettono a rischio l'ambiente causando possibili inquinamenti dalla scorretta gestione. Soprattutto considerato che la maggior parte di questo rifiuto viene trattato all'estero e spesso in paesi in via di sviluppo dove la regolamentazione, in termini di protezione dell'ambiente, lascia decisamente a desiderare.

In questo capitolo verranno quindi illustrati i trattamenti attuati ad oggi per il recupero delle materie prime a livello industriale e di seguito alcuni procedimenti sperimentali promettenti messi a punto da ricercatori universitari provenienti da diverse parti del mondo.

### **4.1 Trattamenti industriali**

A livello industriale, per adempiere al recupero della maggior parte delle materie prime, le schede elettroniche seguono principalmente due vie di processo. Questi procedimenti vengono attuati principalmente per il recupero del rame e dei metalli preziosi. I due rami di trattamento prevedono infatti l'utilizzo di tecniche di tipo pirometallurgico e tecniche di tipo fisico.

#### *4.1.1 Procedimento pirometallurgico*

Il procedimento in questione ha come obiettivo principale il recupero del rame contenuto nelle schede principalmente quello utilizzato sia per le piste conduttive che per i componenti. Le vie di procedimento possibili sono due denominate Noranda e Rönnskar ma generalmente richiedono i medesimi passaggi. Si tratta infatti di unire, in percentuale di circa il 14% in peso, frammenti triturati di schede da trattare con il minerale di rame

trattando le schede come impurità. Viene quindi inserito il tutto in fornaci apposite dove il rame raggiunge la temperatura di circa 1250°C in un'atmosfera ricca di ossigeno e si forma quindi una fase ricca di rame. A questo punto per ottenere il rame puro si procede con una purificazione attuata tramite un procedimento di lisciviazione del metallo e successiva deposizione tramite procedimento elettrolitico. Questa tecnologia rappresenta la tecnica più diffusa per il trattamento delle schede in quanto richiede un costo di trattamento relativamente ridotto e una produttività sufficientemente conveniente evitando l'elevata produzione di scarti. D'altro canto, la produzione di rame con questo procedimento richiede l'utilizzo di una gran quantità di energia e l'efficienza del procedimento in questione è molto bassa. Altro aspetto negativo è la produzione di scarti gassosi altamente inquinanti, causati dalla combustione dei polimeri utilizzati come substrato, che se non trattati correttamente causano notevoli problemi di inquinamento ambientale. (R. Cayumil et al., 2018)

#### *4.1.2 Procedimento fisico*

Ad un livello industriale decisamente più ridotto del procedimento illustrato precedentemente, un altro procedimento messo in atto da piccole realtà di trattamento è la suddivisione dei materiali per via fisica. Il processo in questione prevede la separazione dei componenti dal substrato della scheda tramite riscaldamento delle schede fino alla fusione della lega saldante e distacco dei componenti tramite vibrazione. Successivamente si ha la triturazione dei circuiti stampati e dei componenti in step separati in modo da avere un materiale il più possibile granulare ed omogeneo. In ultimo si ha la separazione dei diversi materiali tramite l'utilizzo di una tavola a scosse ad acqua la quale, tramite accurati studi e sperimentazioni, viene regolata per suddividere i diversi metalli dalle plastiche e dagli inerti. Questo tipo di trattamento viene effettuato principalmente da piccole aziende e in piccole quantità in quanto applicabile su una piccola parte delle schede ovvero quelle più "preziose". Tramite questo procedimento infatti è possibile ricavare principalmente oro, argento e rame che però rendono il processo conveniente solo utilizzando in input schede provenienti principalmente da computer o laptop essendo queste più ricche di metalli preziosi. Questa tecnica non produce effetti significativi sull'ambiente ma produce grandi quantità di rifiuti secondari, principalmente plastiche, che vengono poi destinate a smaltimento. Inoltre, come già detto, assolve al trattamento di una percentuale decisamente esigua del rifiuto in questione non essendo una tecnologia applicabile a tutte le schede a fine vita.

## **4.2 Trattamenti sperimentali**

Una delle problematiche più importanti del riciclo delle schede elettroniche è la separazione delle stesse dalla sede all'interno degli elettrodomestici. Per fare ciò si sono studiati diversi metodi per semplificare questo passaggio e da Y. Tsunazawa et al. (2018) viene proposto l'utilizzo di un mulino del tipo a barile. Per la sperimentazione vengono utilizzati tre tipi di elettrodomestici fuori uso: cellulari, forni a microonde ed elettrodomestici per la cottura del riso. Nella tabella 4.1 vengono riportati i dati relativi a questi elettrodomestici e nella tabella 4.2 vengono riportati i dati relativi alle sperimentazioni effettuate.

Tabella 4.1 Caratteristiche degli elettrodomestici utilizzati come input. (Y. Tsunazawa et al., 2018)

		Smartphone	Microwave oven	Electric rice cooker
Mass	kg	0.104	13.70	3.34
Width × Depth × Height	mm	66 × 11 × 132	455 × 322 × 285	257 × 350 × 238

Tabella 4.2 Condizioni dell'esperimento di comminazione. (Y. Tsunazawa et al., 2018)

1. Smartphone		Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-4		
Feed weight	kg	5.00	4.99	5.05	5.00		
Feed number	-	51	47	49	50		
Rotation speed	rpm	500	750	1125	1500		
Frequency	Hz	20	30	45	60		
2. Microwave oven		Case 2-1	Case 2-2	Case 2-3	Case 2-4	Case 2-5	
Feed weight	kg	12.19	12.78	13.48	12.61	13.06	
Feed number	-	1	1	1	1	1	
Rotation speed	rpm	315	420	630	945	1260	
Frequency	Hz	15	20	30	45	60	
3. Electric rice cooker		Case 3-1	Case 3-2	Case 3-3	Case 3-4	Case 3-5	Case 3-6
Feed weight	kg	3.31	2.59	2.31	3.82	4.02	3.34
Feed number	-	1	1	1	1	1	1
Rotation speed	rpm	210	315	420	630	945	1260
Frequency	Hz	10	15	20	30	45	60

Dopo la fase sperimentale si è effettuata una simulazione agli elementi finiti in modo da spiegare i risultati ottenuti sperimentalmente con i risultati ottenuti dalla simulazione. Per la simulazione viene utilizzato un modello basato sulle particelle di corpo rigido e per diverse casistiche ne viene misurata l'energia cinetica di collisione e il recupero percentuale delle schede elettroniche. Per i tre casi vengono quindi recuperati tramite misurazioni i dati relativi al numero di frazioni di schede elettroniche e il peso recuperato in base alle frazioni dimensionali. Nelle figure da 4.1 a 4.3 vengono riportati i risultati delle misurazioni.

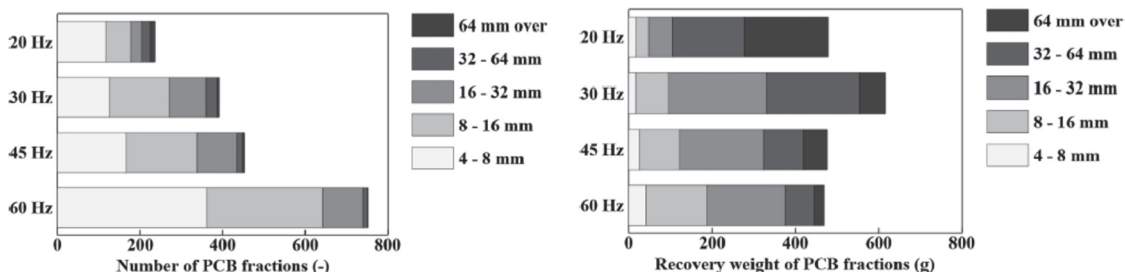


Figura 4.1 Numero di frazioni di schede (a sinistra) e recupero in peso delle schede (a destra) in funzione dei diversi range dimensionali e della frequenza di rotazione dello strumento per gli smartphone. (Y. Tsunazawa et al., 2018)

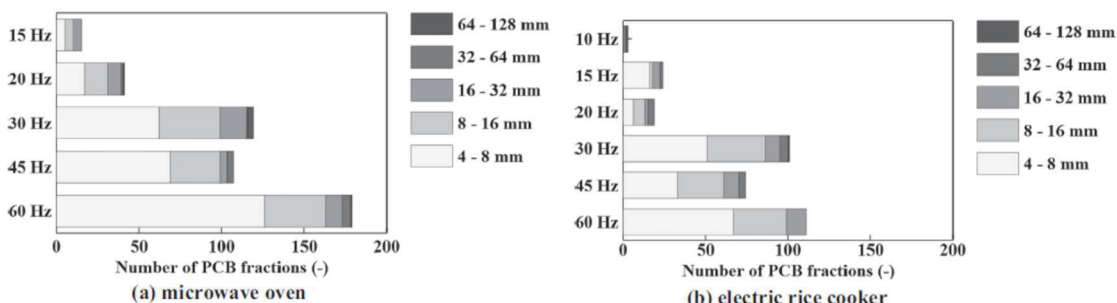


Figura 4.2 Numero di frazioni di schede in funzione dei diversi range dimensionali e della frequenza di rotazione dello strumento per (a) i forni a microonde e (b) gli elettrodomestici per la cottura del riso. (Y. Tsunazawa et al., 2018)

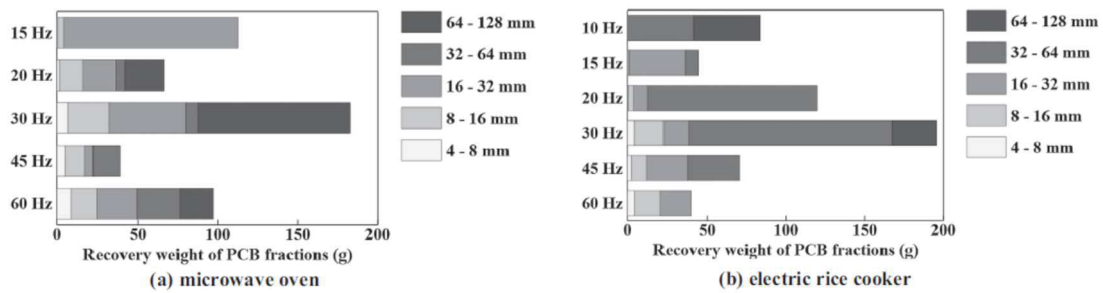


Figura 4.3 Peso recuperato delle frazioni di schede in funzione dei diversi range dimensionali e della frequenza di rotazione dello strumento per (a) i forni a microonde e (b) gli elettrodomestici per la cottura del riso. (Y. Tsunazawa et al., 2018)

Dalle simulazioni vengono invece recuperati i dati relativi all'energia di collisione e sono riportati nelle tabelle 4.3 e 4.4. Da questi dati si è quindi ricavata una correlazione tra l'energia di collisione e il tasso di recupero delle schede e tale correlazione è riportata nella figura 4.4.

Tabella 4.3 Risultati dalla simulazione per la misurazione dell'energia di collisione per gli smartphones. (Y. Tsunazawa et al., 2018)

	Average collision energy (J)	Total collision energy (J)
20 Hz/500 rpm	$1.15 \times 10$	$1.04 \times 10^4$
30 Hz/750 rpm	$2.40 \times 10$	$2.57 \times 10^4$
45 Hz/1 125 rpm	$5.94 \times 10$	$5.33 \times 10^4$
60 Hz/1500 rpm	$1.04 \times 10^2$	$1.05 \times 10^5$

Tabella 4.4 Risultati dalla simulazione per la misurazione dell'energia di collisione per i forni a microonde e per gli elettrodomestici per la cottura del riso. (Y. Tsunazawa et al., 2018)

	Average collision energy (J)	Total collision energy (J)
<i>(a) Microwave oven</i>		
15 Hz/315 rpm	$2.12 \times 10^2$	$3.25 \times 10^4$
20 Hz/420 rpm	$1.77 \times 10^2$	$3.26 \times 10^4$
30 Hz/630 rpm	$2.88 \times 10^2$	$4.44 \times 10^4$
45 Hz/945 rpm	$1.74 \times 10^3$	$2.17 \times 10^5$
60 Hz/1260 rpm	$2.91 \times 10^3$	$6.43 \times 10^5$
<i>(b) Electric rice cooker</i>		
10 Hz/210 rpm	$1.54 \times 10$	$3.01 \times 10^3$
15 Hz/315 rpm	$6.53 \times 10$	$5.68 \times 10^3$
20 Hz/420 rpm	$6.60 \times 10$	$1.25 \times 10^4$
30 Hz/630 rpm	$2.35 \times 10^2$	$1.13 \times 10^4$
45 Hz/945 rpm	$3.31 \times 10^2$	$3.54 \times 10^5$
60 Hz/1260 rpm	$1.66 \times 10^3$	$4.98 \times 10^5$

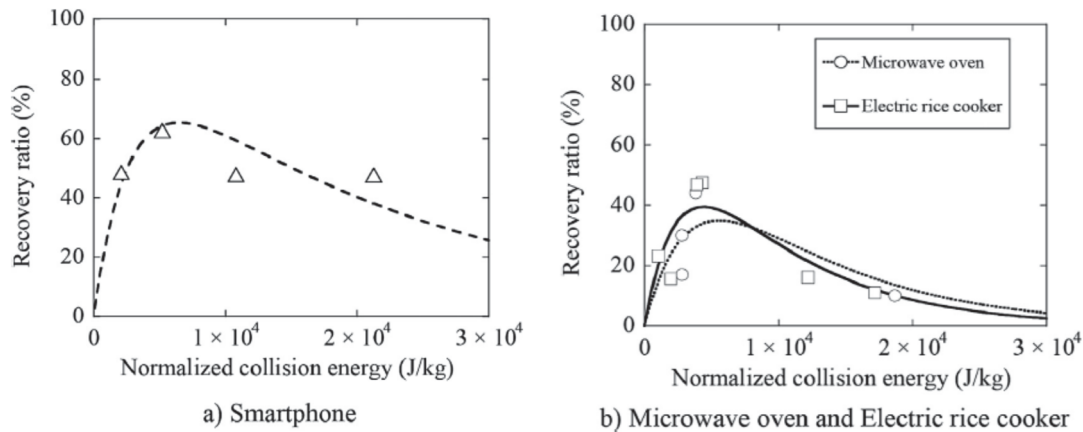


Figura 4.4 Correlazione tra l'energia di collisione e la percentuale di recupero delle schede elettroniche. (Y. Tsunazawa et al., 2018)

Esistono molte tipologie di trattamento fisico da applicare per la separazione delle diverse componenti delle schede e nello studio di C. Guo et al. (2011) vengono analizzati per identificarne l'efficienza. Per lo studio in questione sono stati presi come campione 20 kg di schede elettroniche private delle componenti riutilizzabili e tossiche. Prima della separazione si sono effettuate due step di triturazione, utili a separare correttamente i metalli dai non metalli, e setacciatura per la classificazione dimensionale. Dopodichè si sono essiccati i campioni per 3 ore a  $100^{\circ}\text{C}$ . I metodi fisici utilizzati sono una separazione pneumatica, una separazione elettrostatica e una separazione magnetica. Tutto ciò che si è ottenuto dalle separazioni è stato poi analizzato tramite uno spettrometro di massa. Nella figura 4.5 viene presentata la distribuzione dimensionale dopo la triturazione. Per quanto riguarda l'analisi dei metalli si riportano i dati ottenuti nella tabella 4.5.

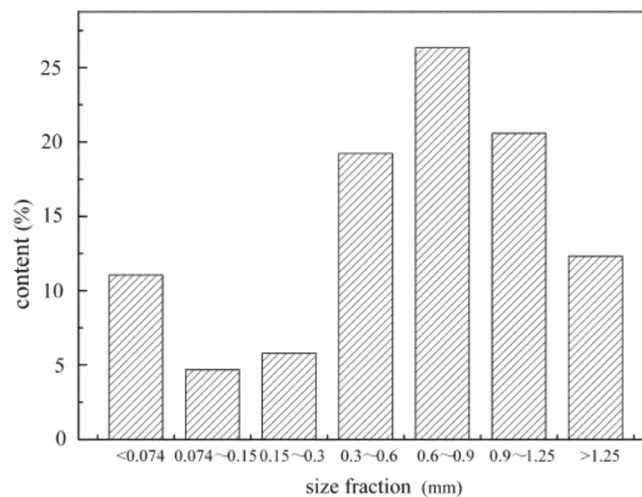


Figura 4.5 Distribuzione dimensionale in massa dopo la triturazione. (C. Guo et al., 2011)



Tabella 4.5 Risultati dell'analisi dei metalli. (C. Guo et al., 2011)

Size fraction (mm)	Metal grade (%)									
	Cu	Al	Pb	Sn	Fe	Ni	Zn	Au	Ag	Total
>1.25	21.79	1.42	0.70	1.15	3.34	0.25	0.93	0.0019	0.0013	29.58
0.9-1.25	33.75	0.93	4.80	4.38	1.07	0.45	4.21	0.0038	0.0041	49.60
0.6-0.9	29.96	1.05	3.64	4.82	1.66	0.49	3.63	0.0088	0.0019	45.26
0.3-0.6	36.08	1.02	3.00	4.39	1.12	0.52	4.19	0.0069	0.0041	50.33
0.15-0.3	27.08	1.51	2.44	3.23	1.38	0.28	0.79	0.0069	0.0019	36.72
0.074-0.15	13.63	1.97	1.26	0.063	0.31	0.19	0.42	0.0060	0.0011	17.84
<0.074	7.60	2.70	0.96	0.72	1.97	0.25	0.49	0.0062	0.0011	14.69
Total	27.50	1.32	2.91	3.43	1.60	0.40	2.86	0.0060	0.0026	40.04

Per quanto riguarda la separazione pneumatica vengono presi in considerazione solo le particelle con dimensione compresa tra 0,6 mm e 0,9 mm e l'obiettivo della separazione sono i metalli totali e il rame. Nella figura 4.6 vengono riportati i risultati di recupero e l'efficienza in funzione della velocità del flusso dell'aria e della dimensione delle particelle.

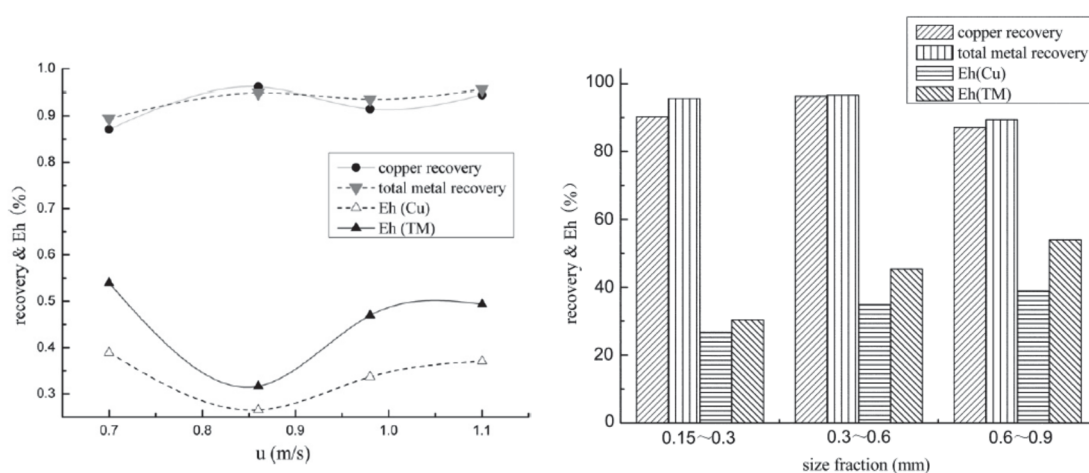


Figura 4.6 Dati di recupero ed efficienza in funzione della velocità del flusso dell'aria (a sinistra) e in funzione della dimensione delle particelle (a destra). (C. Guo et al., 2011)

La separazione elettrostatica viene effettuata considerando 4 range dimensionali (0,15-0,3, 0,3-0,6, 0,6-0,9 e 0,9-1,25 mm). Non viene considerata la frazione minore di 0,15 mm perché la separazione non sarebbe concludente. I dati relativi ai parametri della separazione sono indicati nella tabella 4.6 e i risultati della separazione sono riportati nella figura 4.7 e nella tabella 4.7 in base ai metalli recuperati.

Tabella 4.6 Parametri impostati per la separazione elettrostatica. (C. Guo et al., 2011)

Size fraction (mm)	High voltage ( $\times 10^4$ V)	High current (A)	Cylinder speed (r/min)
0.15-0.3	3.00	0.045	40
0.3-0.6	3.00	0.045	40
0.6-0.9	3.20	0.050	40
0.9-1.25	3.40	0.050	40

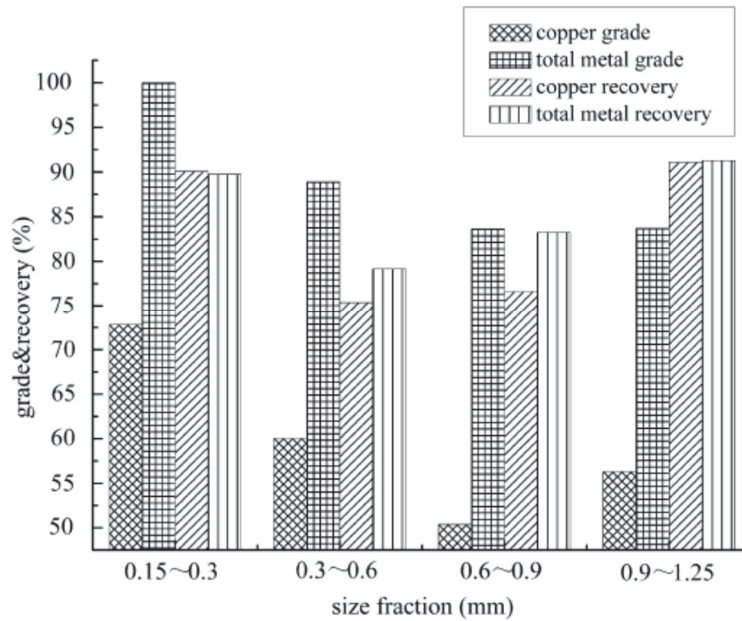


Figura 4.7 Risultati della separazione elettrostatica in termini di recupero e grado di separazione. (C. Guo et al., 2011)

Tabella 4.7 Risultati della separazione elettrostatica in funzione della dimensione delle particelle e del grado dei metalli. (C. Guo et al., 2011)

Size fraction (mm)	Product	Metal grade (%)								
		Cu	Al	Pb	Sn	Mg	Fe	Ni	Zn	Total
0.15-0.3	Conductor	72.81	2.63	7.06	9.63	1.23	3.74	0.75	2.12	99.99
	Nonconductor	3.99	0.93	0.12	0.01	0.28	0.19	0.039	0.11	5.65
0.3-0.6	Conductor	60.05	1.47	5.60	9.87	1.09	1.64	0.85	8.30	88.90
	Nonconductor	16.35	0.72	1.10	0.29	0.10	0.77	0.28	1.17	23.39
0.6-0.9	Conductor	50.37	1.95	7.93	10.69	1.07	3.24	0.99	7.39	83.64
	Nonconductor	12.32	0.18	0.07	0.061	0.39	0.079	0.60	0.32	15.08
0.9-1.25	Conductor	56.29	1.04	8.24	7.62	0.81	1.80	0.78	7.16	83.72
	Nonconductor	6.86	0.16	0.01	0.10	0.10	0.023	0.27	0.86	5.25

Viene inoltre sperimentata la separazione magnetica a valle della separazione elettrostatica e i risultati così ottenuti sono riassunti in tabella 4.8.

Tabella 4.8 Risultati della separazione magnetica a valle della separazione elettrostatica. (C. Guo et al., 2011)

Size fraction (mm)	Name	Yield (%)	Copper grade (%)	Copper recovery (%)
0.3-0.6	Mag. product	28.39	71.70	56.54
	Mag. tailing	16.56	40.14	18.46
	Elec. conductor	44.95	60.05	75.00
	Elec. nonconductor	55.05	16.35	25.00
	Feed	100.00	36.01	100.00
0.6-0.9	Mag. product	24.50	71.05	57.70
	Mag. tailing	22.41	27.76	20.62
	Elec. conductor	46.91	50.37	78.32
	Elec. nonconductor	53.09	12.32	21.68
	Feed	100.00	30.17	100.00

La separazione elettrostatica tramite un separatore a correnti parassite è molto utile per la separazione delle particelle di materiale conduttivo da quello non conduttivo tanto che lo studio di J. Ruan et al. (2017) ne studia i fattori più influenti per la separazione. Nella figura 4.8 viene presentato il separatore elettrostatico e le particelle prese in considerazione per lo studio. Nella tabella 4.9 vengono invece riportate le caratteristiche fisiche delle suddette particelle. Per i parametri del separatore si fa riferimento alla tabella 4.10.

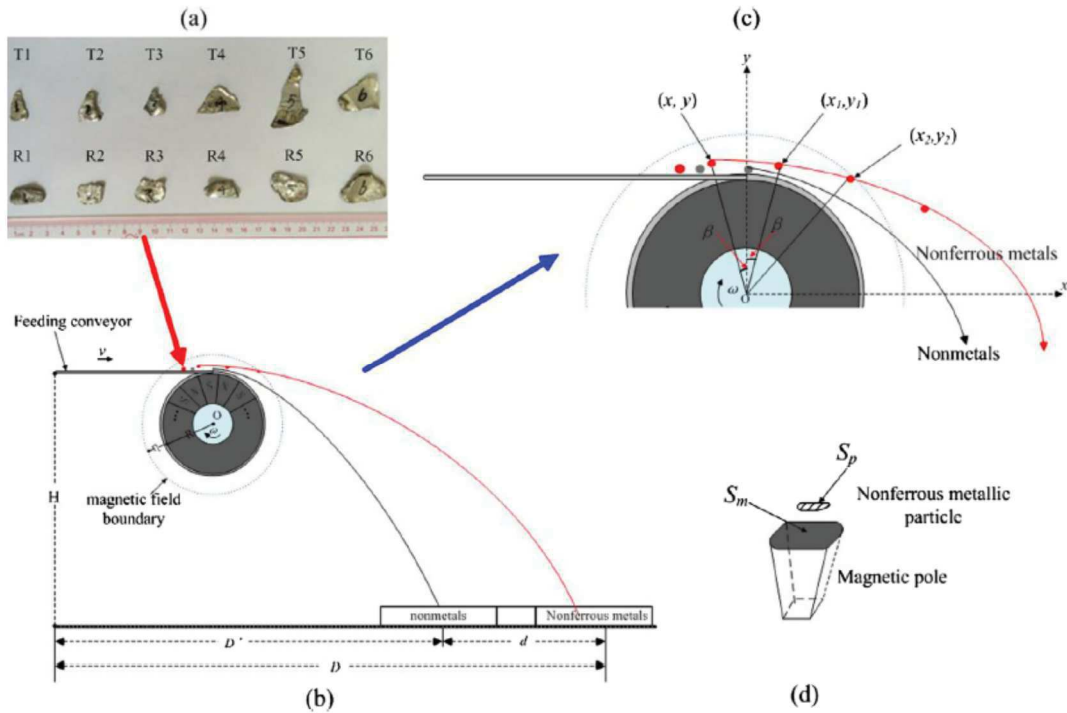


Figura 4.8 Foto delle particelle di alluminio e rappresentazione del separatore elettrostatico. (J. Ruan et al., 2017)

Tabella 4.9 Parametri fisici delle particelle di alluminio considerate. (J. Ruan et al., 2017)

Particles	Shape factor		$S_p$ (cm <sup>2</sup> )	$S_p/S_m$	$V$ (cm <sup>3</sup> )	$M$ (g)	$T$ (cm)	$L$ (cm)	$\gamma$ (S/m)
	$\delta_r = \frac{l}{c}$	$\delta_R = \frac{W}{2(L+W)}$							
T1	0.375	/	0.75	0.08	0.06	0.16	0.08	1.8	$6.67 \times 10^5$
T2	0.339	/	1.5	0.16	0.15	0.4	0.1	2.1	
T3	0.369	/	1.25	0.13	0.10	0.26	0.08	1.2	
T4	0.361	/	3	0.32	0.24	0.64	0.08	2.8	
T5	0.362	/	4.8	0.51	0.24	0.64	0.05	4.5	
T6	0.356	/	3.13	0.33	0.25	0.68	0.08	2.9	
R1	/	0.143	1.8	0.19	0.36	0.96	0.2	2.1	
R2	/	0.222	1	0.11	0.05	0.14	0.05	1.7	
R3	/	0.235	2.4	0.25	0.12	0.32	0.05	2	
R4	/	0.167	2.2	0.23	0.44	1.19	0.2	2.2	
R5	/	0.214	3.25	0.34	0.26	0.7	0.08	2.8	
R6	/	0.191	2.45	0.26	0.49	1.32	0.2	3	

Tabella 4.10 Parametri del separatore elettrostatico. (J. Ruan et al., 2017)

$H$ (cm)	$B_m$ (T)	$S_m$ (cm <sup>2</sup> )	$R$ (cm)	$k$ (pair)	$\mu_0$ (N/A <sup>2</sup> )	$\mu_r$ (N/A <sup>2</sup> )	$\eta$ (cm)
90	0.3	9.49	9.6	9	$4\pi \times 10^{-7}$	5000	5

Con questo esperimento si è quindi notato che all'aumentare della differenza tra la velocità di alimentazione e la velocità di rotazione del campo magnetico aumenta l'angolo di distacco e di conseguenza la distanza di separazione. Una velocità di alimentazione molto alta però abbassa drasticamente l'efficienza di separazione. La distanza di separazione aumenta anche all'aumentare del rapporto tra la superficie delle particelle e la superficie del polo magnetico. Per ultimo aumentando la superficie delle particelle si può estendere la velocità critica di alimentazione che può migliorare l'efficienza del separatore a correnti parassite.

Un altro interessante metodo per la separazione dei metalli dalle schede elettroniche viene riportato nello studio di M. Sarvar et al. (2015) ed è basato su una serie di separazioni fisiche. Questi successivi step di separazione vengono realizzati da tecnologie normalmente utilizzate per trattare i minerali. Nella figura 4.9 vengono riportati gli step di separazione.

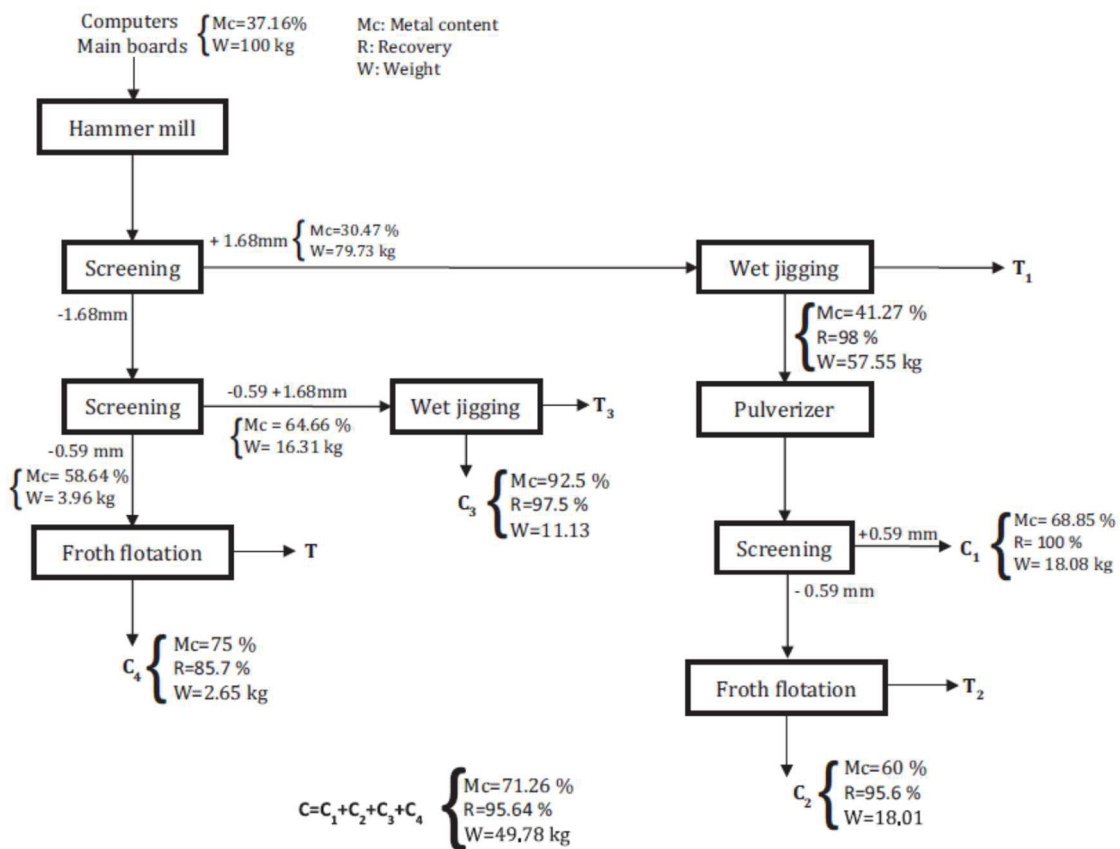


Figura 4.9 Step di processo per la separazione dei metalli. (M. Sarvar et al., 2015)

Dopo la prima comminuzione con un mulino a martelli viene effettuata un'analisi granulometrica e i risultati sono riportati nella tabella 4.11. Successivamente vengono definiti 7 gruppi omogenei in cui suddividere il materiale in uscita. Viene quindi eseguita una caratterizzazione per identificare le percentuali relative ai 7 gruppi definiti e ciò che si ottiene è riportato nella tabella 4.12. Vengono inoltre misurate le relative densità dei gruppi omogenei e sono riportate nella tabella 4.13 e vengono anche ricavati i valori relativi al grado di liberazione riportati nella tabella 4.14.

Tabella 4.11 Risultati derivanti dall'analisi granulometrica. (M. Sarvar et al., 2015)

Fraction (mm)	Weight of fraction (g)
+6.3	35.93
+4.76-6.3	103.29
+3.36-4.76	247.41
+2.38-3.36	103.99
+1.68-2.38	80.53
+1.19-1.68	32.11
+0.84-1.19	51.43
+0.59-0.84	33.26
+0.42-0.59	11.59
+0.21-0.42	9.97
-0.21	6.82
<b>Total</b>	<b>716.33</b>

Tabella 4.12 Risultati derivanti dalla suddivisione in 7 gruppi omogenei. (M. Sarvar et al., 2015)

Fraction (mm)	%							
	Free metals	Free plastics	Locked plastics	Locked board pieces	Free board pieces	Locked ceramics	Free ceramics	Total
+6.3	25.43	20.16	3.32	45.89	0.00	5.21	0.00	100
+4.76-6.3	11.96	23.66	1.64	57.61	0.00	5.13	0.00	100
+3.36-4.76	8.18	19.33	0.56	67.35	0.00	3.85	0.73	100
+2.38-3.36	13.75	29.39	0.45	50.06	0.00	3.70	2.65	100
+1.68-2.38	19.21	53.70	0.00	23.25	1.15	2.23	0.47	100
+1.19-1.68	38.56	36.91	0.00	11.28	1.37	4.31	7.78	100
+0.84-1.19	70.33	18.09	0.00	5.10	2.20	2.57	1.72	100
+0.59-0.84	71.27	13.20	0.00	3.29	6.21	3.11	2.91	100
+0.42-0.59	55.70	16.43	0.00	3.73	21.62	0.14	2.28	100
+0.21-0.42	69.69	2.46	0.00	2.49	11.32	0.00	14.04	100
-0.21	42.47	1.26	0.00	0.00	31.93	0.00	24.34	100
<b>Total</b>	<b>22.34</b>	<b>25.28</b>	<b>0.66</b>	<b>44.87</b>	<b>1.45</b>	<b>3.64</b>	<b>1.76</b>	<b>100</b>

Tabella 4.13 Densità ricavate per i 7 gruppi omogenei. (M. Sarvar et al., 2015)

Material	Free metals	Free plastics	Locked plastics	Locked board pieces	Free board pieces	Locked ceramics	Free ceramics
Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.60-7.00	1.08-1.43	1.80	1.67-1.92	1.25	1.86-2.00	1.74

Tabella 4.14 Dati relativi al grado di liberazione delle diverse fasi. (M. Sarvar et al., 2015)

Fraction (mm)	%		
	Plastics and metals	Board pieces and metal	Ceramics and metals
+6.3	85.9	0	0
+4.76-6.3	93.5	0	0
+3.36-4.76	97.2	0	16
+2.38-3.36	98.5	0	41.8
+1.68-2.38	100.0	4.7	52.5
+1.19-1.68	100.0	10.8	74.7
+0.84-1.19	100.0	30.2	81.2
+0.59-0.84	100.0	65.4	85.6
+0.42-0.59	100.0	85.3	94.2
+0.21-0.42	100.0	91.1	100.0
-0.21	100.0	100.0	100.0

A questo punto, per questioni tecniche, vengono presi in considerazione tre nuovi range dimensionali ovvero meno di 0,59 mm, tra 0,59 e 1,68 mm e maggiore di 1,68 mm. Per questi campioni vengono poi riportati le relative percentuali in peso nella tabella 4.15.

Tabella 4.15 Dati relativi alle percentuali relative in peso dei nuovi campioni. (M. Sarvar et al., 2015)

Fraction (mm)	%								
	Free metals	Free plastics	Locked plastics	Locked board pieces	Free board pieces	Locked ceramics	Free ceramics	Total	Relative weight of size fraction to initial sample (%)
+1.68	12.52	26.84	0.83	54.87	0.16	3.91	0.87	100	79.73
+0.59-1.68	61.87	21.87	0.00	6.28	3.12	3.20	3.73	100	16.31
-0.59	57.47	7.88	0.00	2.40	20.49	0.06	11.72	100	3.96
Total sample	22.34	25.28	0.66	44.87	1.45	3.64	1.76	100	100

Per quanto riguarda il campione maggiore di 1,68 mm viene utilizzato un crivello idraulico per la separazione delle plastiche dal materiale contenente dei metalli. Per poter concentrare ulteriormente i metalli, viene effettuata un'ulteriore comminuzione alla quale segue una vagliatura e, per la frazione minore di 0,59 mm, una flottazione. Per quanto riguarda la frazione con dimensione compresa tra 0,59 mm e 1,68 mm invece viene applicato solamente un passaggio nel crivello idraulico. Per la frazione minore di 0,59 mm viene applicata direttamente la flottazione. Sia per il procedimento nel crivello idraulico che per la flottazione vengono studiati anche gli effetti di alcuni parametri che possono condizionare l'efficienza di separazione. I risultati, relativi alla concentrazione, riguardanti questo procedimento, per i metalli più preziosi, sono riportati nella tabella 4.16.

Tabella 4.16 Dati relativi ai componenti preziosi. (M. Sarvar et al., 2015)

Element	Cu (wt.%)	Au (mg/kg)
The initial sample	19	125
Expected content in the final product	36.44	239.75
Measured content in the final product	36.21	189.33

Un altro metodo interessante che permette la concentrazione di metalli preziosi è quello discusso da L.Meng et al. (2018). Questo metodo prevede l'applicazione della supergravità per la suddivisione e la concentrazione dei metalli preziosi in una lega da raffinare successivamente. Per l'applicazione di questo metodo viene utilizzata un'apparecchiatura in grado di ruotare a velocità molte elevate sottoponendo i campioni ad una forza centrifuga molte volte superiore alla forza di gravità. In questo modo il campione, sottoposto a temperature in grado di fondere i metalli, si suddivide e le leghe metalliche filtrano da un apposito foro in una camera dove verranno successivamente recuperate. Una schematizzazione e una foto della tecnologia utilizzata per questo procedimento vengono riportate nella figura 4.10. I successivi step di separazione tramite questo metodo vengono invece riassunti nella figura 4.11. In questo schema si vedono le diverse leghe che vengono separate per poi essere sottoposte a successiva raffinazione.

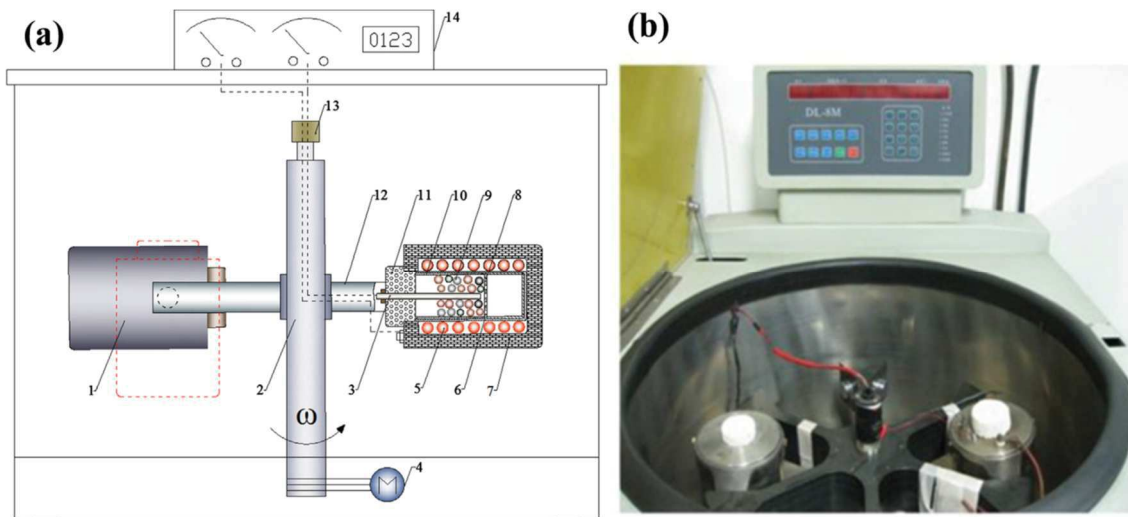


Figura 4.10 Schema e foto dell'apparecchiatura utilizzata. (1. Contrappeso; 2. Asse centrifugo; 3. Termocoppia; 4. Motore; 5. Spira resistiva; 6. Camera della fornace; 7. Materiale refrattario; 8. Foro per il filtraggio; 9. Particelle di schede elettroniche; 10. Crogiolo grafitico; 11. Mattoni refrattari; 12. Rotore orizzontale; 13. Conductive slipping; 14. Pannello di controllo). (L. Meng et al., 2018)

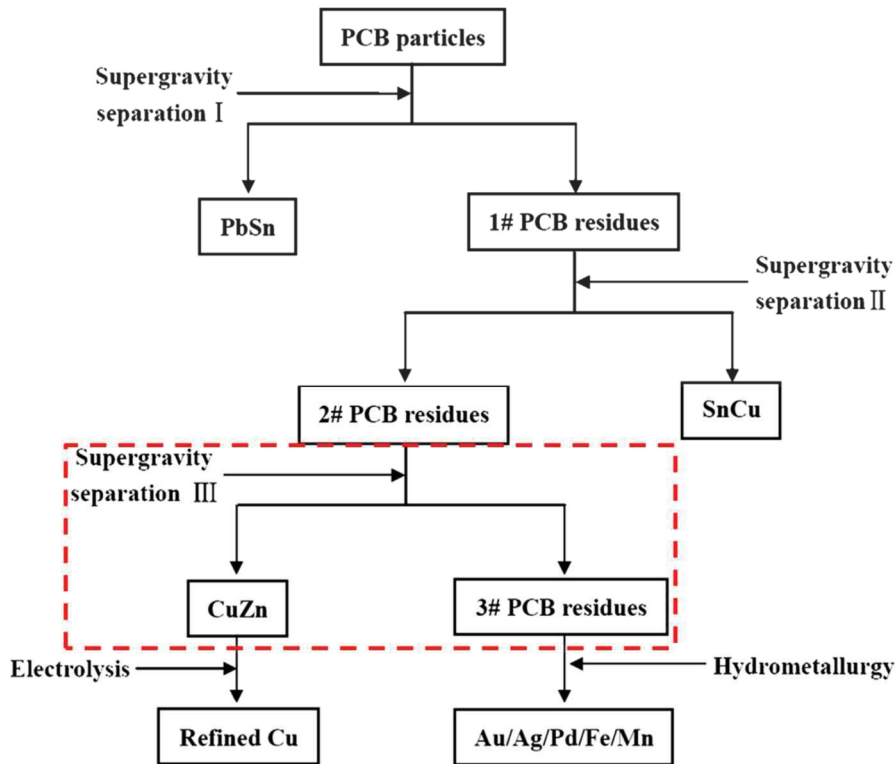


Figura 4.11 Schema del procedimento applicato. (L. Meng et al., 2018)

L'ultima fase ottenuta, ovvero la lega Cu-Zn, viene ottenuta ad una temperatura di 1200°C, con un coefficiente di gravità pari a 1000 e per un tempo pari a 5 min. Vengono poi effettuate diverse prove in condizioni differenti di temperatura e di coefficiente di gravità. I risultati delle successive sperimentazioni vengono riportati nelle figure 4.12 e 4.13.

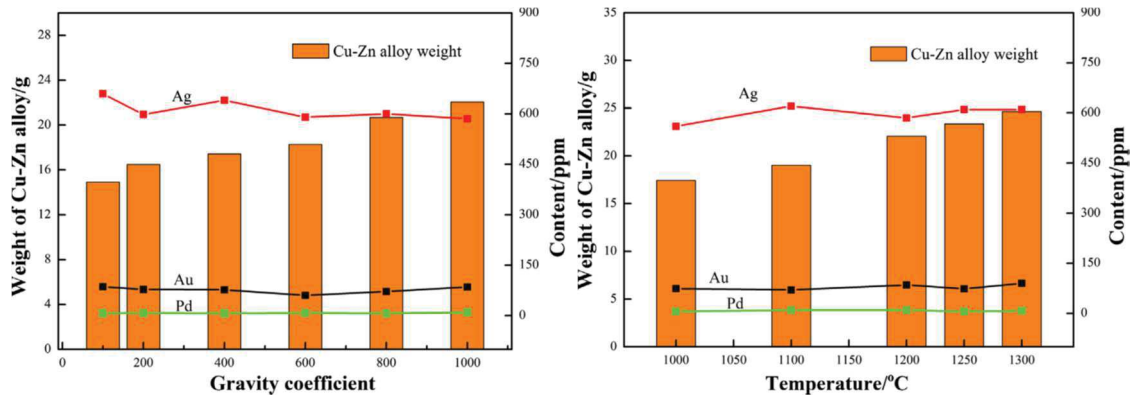


Figura 4.12 Peso della lega Cu-Zn e contenuto di metalli preziosi in funzione del coefficiente di gravità e della temperatura. (L. Meng et al., 2018)

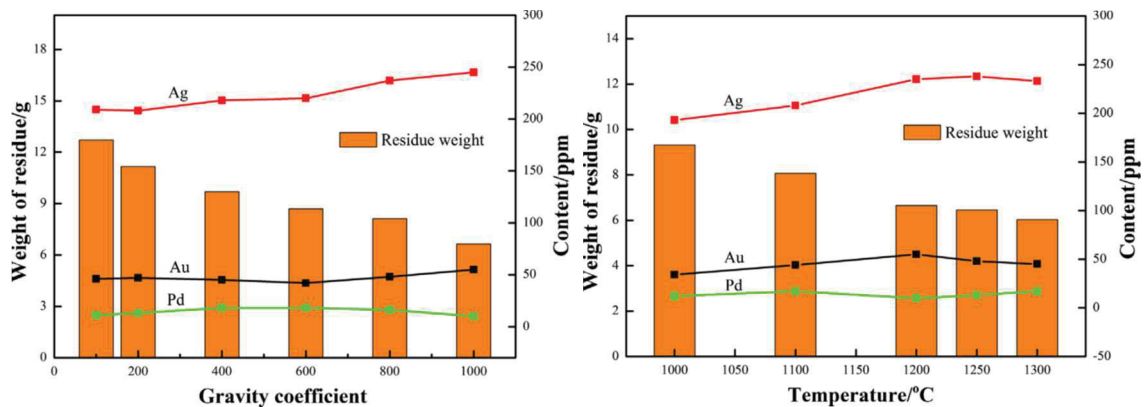


Figura 4.13 Peso del residuo e contenuto di metalli preziosi in funzione del coefficiente di gravità e della temperatura. (L. Meng et al., 2018)

Un metodo simile a quello presentato precedentemente è quello della filtrazione a bassa pressione presentato da L. Meng et al. (2019). Questo procedimento prevede l'utilizzo di un principio fisico simile a quello presentato nell'utilizzo della supergravità. Si procede infatti utilizzando un crogiolo dove vengono riposti i frammenti delle schede elettroniche e dopo essere riscaldate vengono sottoposte ad una pressione costante per separare le diverse leghe metalliche. In questo modo è quindi possibile ottenere più leghe arricchite di diversi metalli che andranno sottoposte ad ulteriore raffinazione per ricavarne i metalli elementari. Il procedimento seguito viene schematizzato nella figura 4.14 e l'apparecchiatura utilizzata viene schematizzata nella figura 4.15. Per l'esperimento vengono utilizzati 40 g di frammenti di schede elettroniche con dimensione minore di 1 mm. All'aumentare della temperatura i metalli cominciano a fondere e tramite l'applicazione di una pressione localizzata si ha la suddivisione in una camera differente prima riempita da gas inerte per evitare l'ossidazione dei metalli. Vengono inoltre svolti più esperimenti a temperature e a pressione di filtrazione differente per entrambe le leghe recuperate. I risultati vengono riportati nelle figure 4.16 e 4.17. La condizione ottimale per il recupero dei metalli viene identificata con una temperatura di processo pari a 1350°C e una pressione di 0,30 MPa.



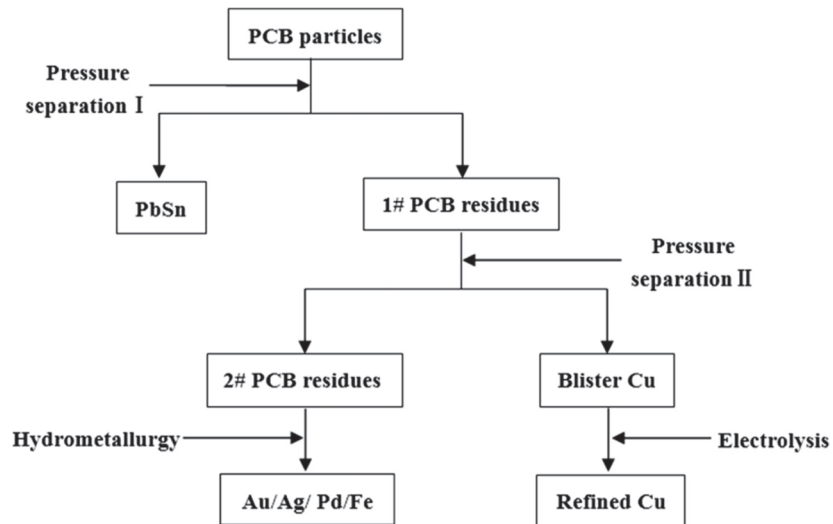


Figura 4.14 Schema del procedimento seguito. (L. Meng et al., 2019)

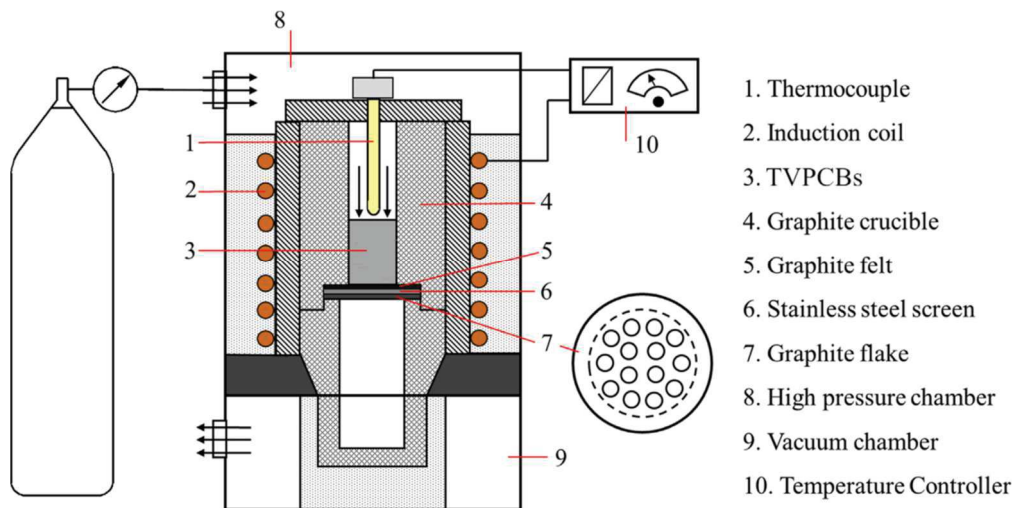


Figura 4.15 Schema dell'apparecchiatura utilizzata. (L. Meng et al., 2019)

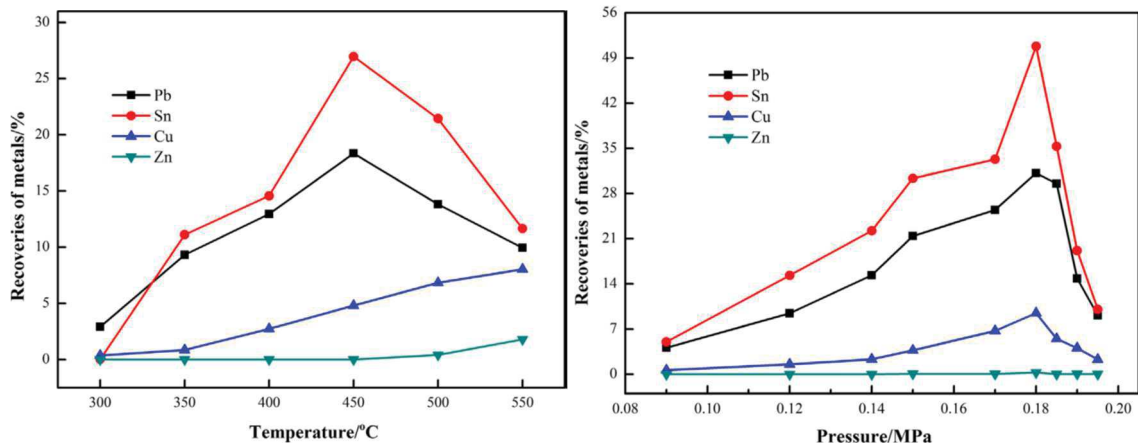


Figura 4.16 Risultati ricavati dalla sperimentazione del recupero dei metalli nella lega Pb-Sn in funzione della temperatura (a sinistra) e della pressione (a destra). (L. Meng et al., 2019)

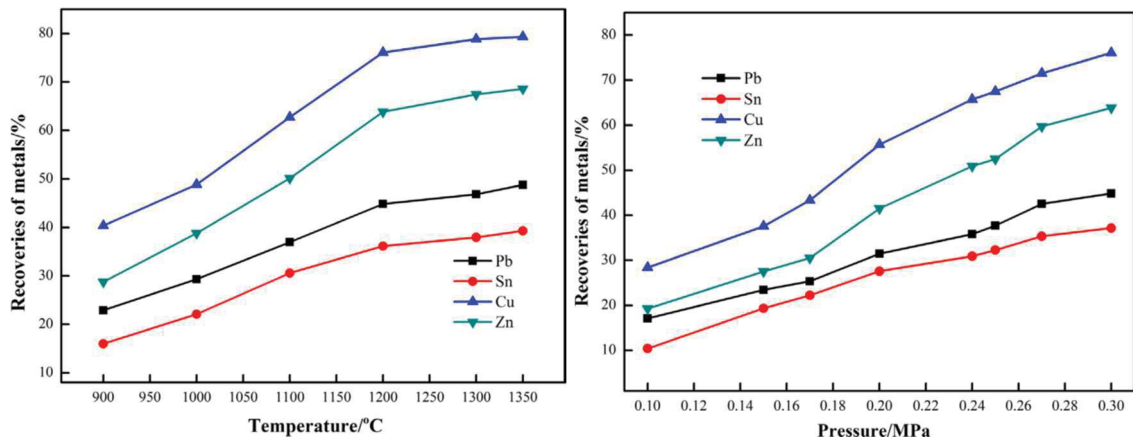


Figura 4.17 Risultati ricavati dalla sperimentazione del recupero dei metalli nella lega Cu in funzione della temperatura (a sinistra) e della pressione (a destra). (L. Meng et al., 2019)

Una metodologia interessante per la concentrazione dei metalli è l'utilizzo della flottazione inversa descritta da J. He et al. (2017). La sperimentazione prevede una prima fase di taglio manuale in pezzi di 50x50 mm, successivamente viene applicata una triturazione fino a frammenti minori di 3 mm e per ultima si effettua una comminazione fino ad una dimensione minore di 0,5 mm tramite un mulino a sfere. Il campione così ottenuto viene poi setacciato e suddiviso in 5 classi dimensionali: +0,5 mm, 0,25-0,5 mm, 0,125-0,25 mm, 0,074-0,125 mm e -0,074 mm. Questi frammenti vengono poi analizzati per caratterizzarli. Viene così ottenuta nella figura 4.18 dove vengono riportati i dati relativi alle classi dimensionali scelte. Per motivi tecnici viene scelto di sottoporre a flottazione solo le classi minori di 0,25 mm. La procedura prevede l'aggiunta dei frammenti nella cella di flottazione insieme ad acqua distillata e il tutto viene sottoposto a miscelazione per 1 minuto. Dopodichè vengono aggiunti cherosene, in concentrazione di 60 g/t, e dopo un'agitazione di 3 minuti viene aggiunto olio terpenico in concentrazione di 30 g/t e il composto viene agitato per 2 minuti. Viene poi insufflata l'aria per 5 minuti e la schiuma contenente la frazione non metallica viene separata. Questo procedimento viene ripetuto per tutte le classi dimensionali e per diversi parametri quali: concentrazione di alimentazione, tasso di aerazione e velocità di agitazione. I risultati delle sperimentazioni vengono riportati nelle figure da 4.19 a 4.20. Vengono poi confrontati i risultati delle tre classi dimensionali e riportati nella figura 4.21. In generale si può dire che questo sistema funziona bene ma ha qualche problematica per la classe dimensionale molto fine ovvero sotto i 0,074 mm. L'applicabilità migliore, di questo metodo, si registra per le particelle con dimensione compresa tra 0,074 mm e 0,25 mm dove si registra un recupero dei metalli del 84%.

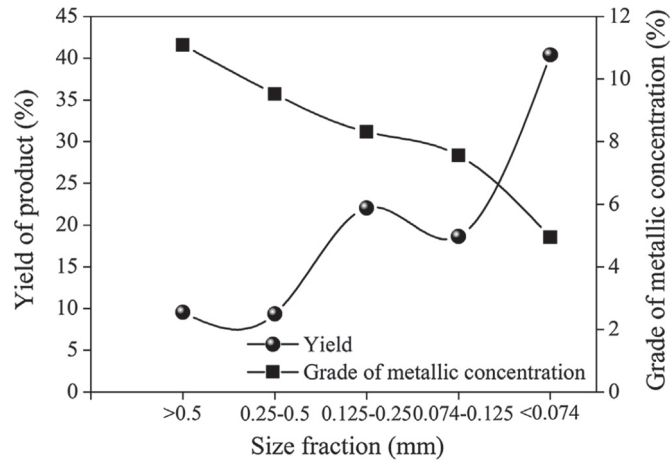


Figura 4.18 Risultati ricavati dall'analisi dimensionale. (J. He et al., 2017)

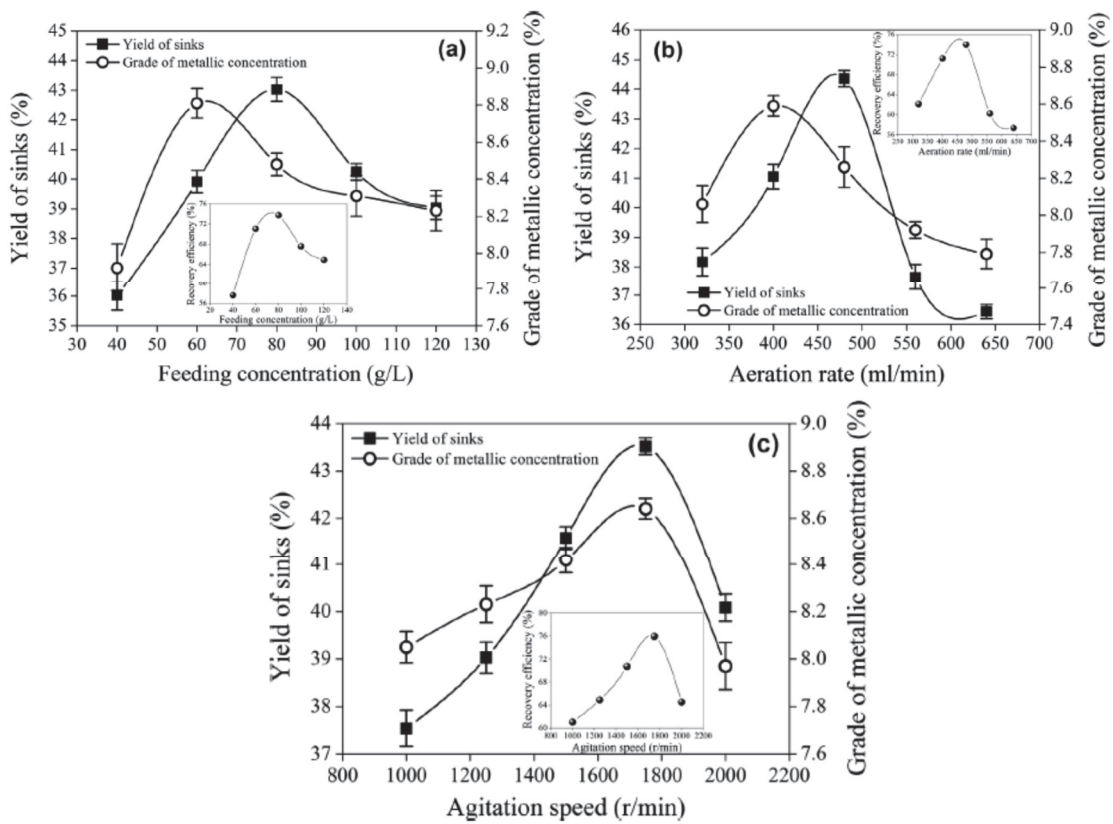


Figura 4.19 Risultati delle sperimentazioni effettuate sulle particelle con dimensione minore di 0,074 mm. (J. He et al., 2017)

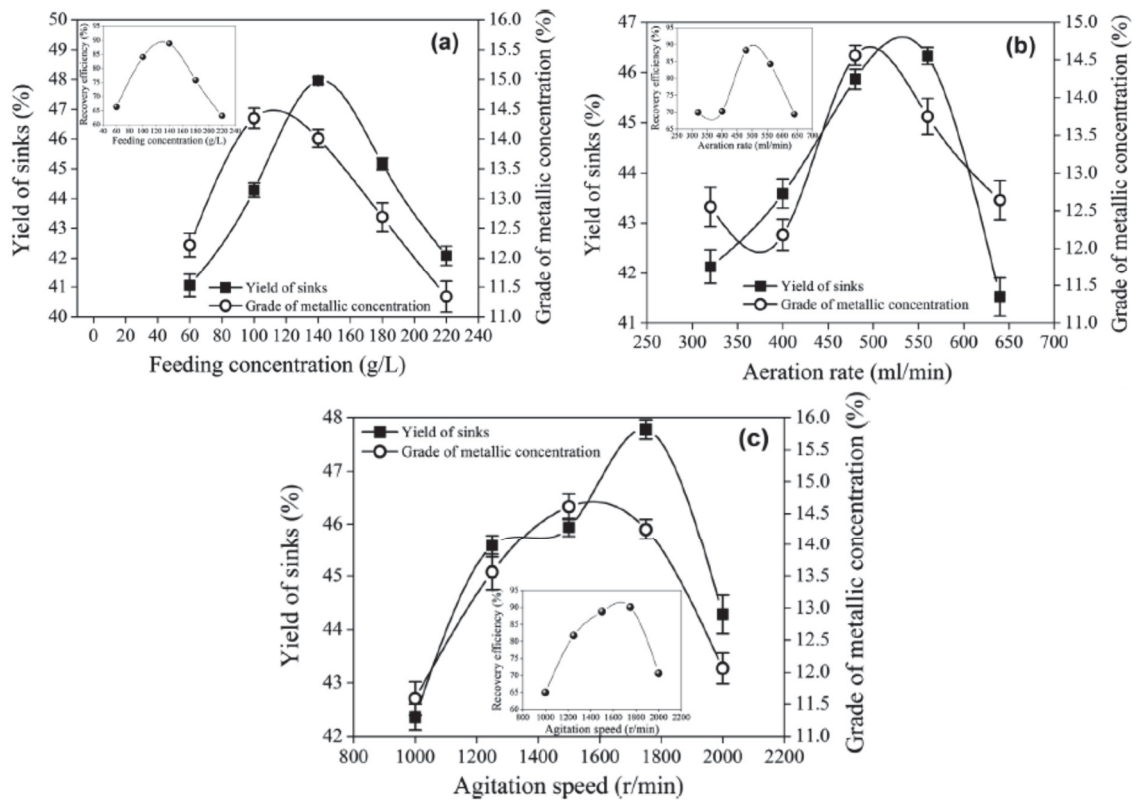


Figura 4.20 Risultati delle sperimentazioni effettuate sulle particelle con dimensione compresa tra 0,074 mm e 0,125 mm. (J. He et al., 2017)

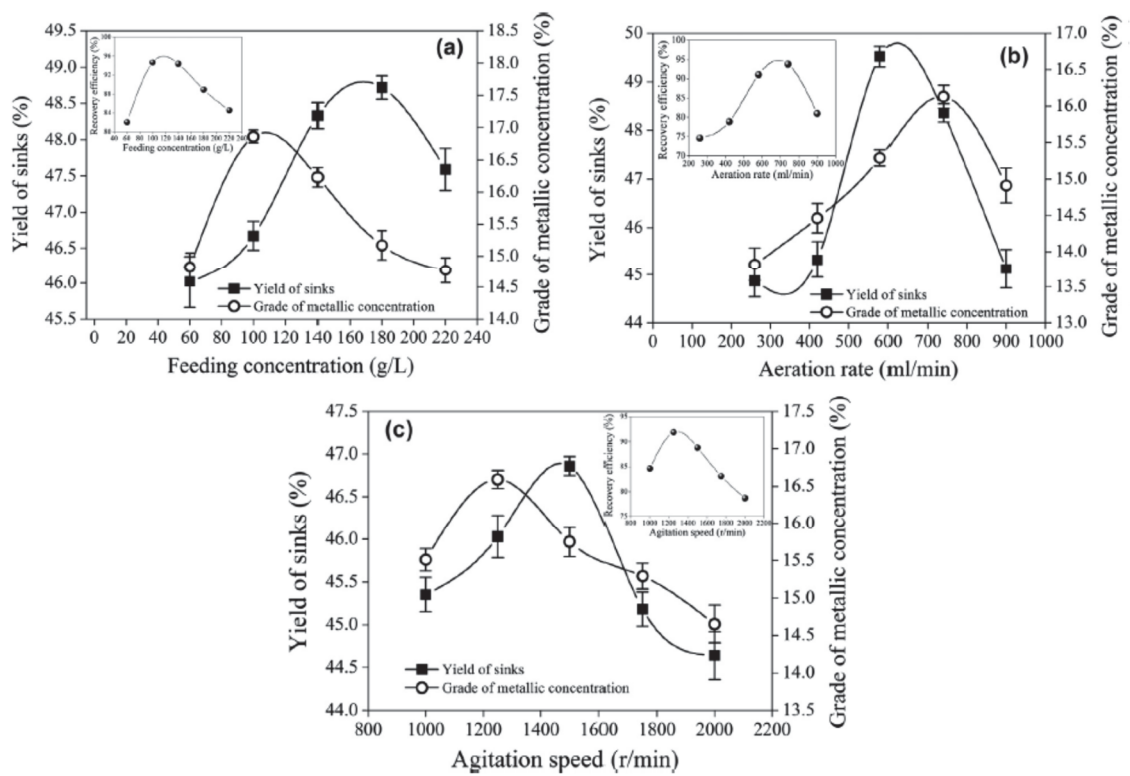


Figura 4.21 Risultati delle sperimentazioni effettuate sulle particelle con dimensione compresa tra 0,125 mm e 0,25 mm. (J. He et al., 2017)

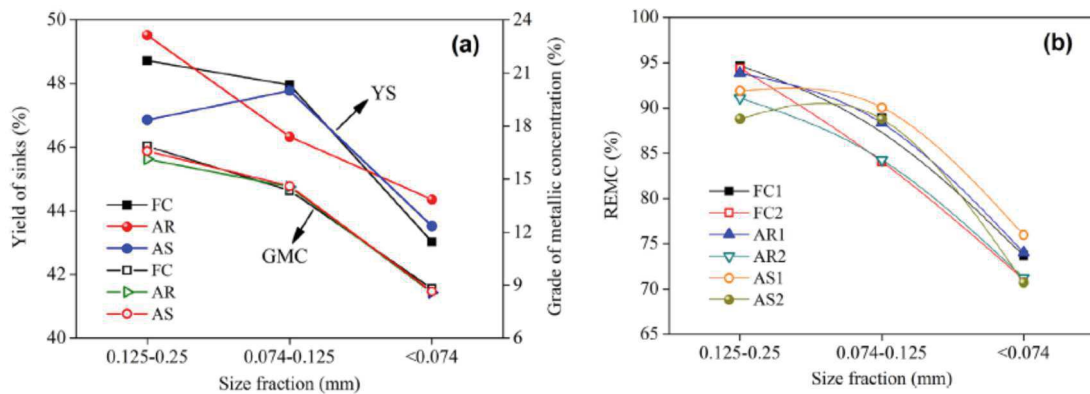


Figura 4.22 Confronto fra le sperimentazioni per le 3 diverse classi dimensionali (J. He et al., 2017)

Un procedimento degno di nota è governato dall'utilizzo della flottazione inversa per la separazione dei diversi materiali. Con l'utilizzo di questa tecnica vengono coinvolti diversi parametri che influiscono sull'angolo di contatto fra le bolle d'aria e i materiali non metallici. Nello studio di R. Flores-Campos et al. (2017) vengono studiati quindi gli effetti di temperatura e concentrazione di tensioattivo sull'angolo di contatto. L'esperimento viene condotto utilizzando particelle di schede elettroniche di dimensione di 250  $\mu\text{m}$  ottenute dopo un taglio grossolano manuale, una triturazione fino a 6 mm e una comminuzione finale. Per la misurazione dell'angolo di contatto viene utilizzato un dispositivo composto da un contenitore di vetro riempito d'acqua e una siringa per l'insufflazione d'aria. Uno schema del dispositivo è presentato nella figura 4.23. La procedura prevede l'utilizzo della siringa per la creazione delle bolle che vengono spinte a contatto del materiale di fondo e, tramite l'ausilio di un software di elaborazione delle immagini, si misurano l'angolo di contatto in avanzata e in recessione. Nella figura 4.24 vengono presentate le foto degli stadi dell'esperimento e nella figura 4.25 si riportano le foto degli angoli misurati.

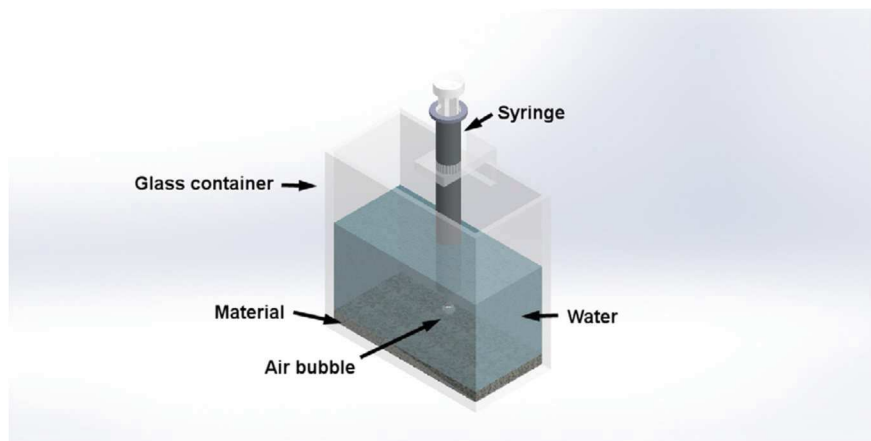


Figura 4.23 Schema del dispositivo utilizzato per la sperimentazione. (R. Flores-Campos et al., 2017)

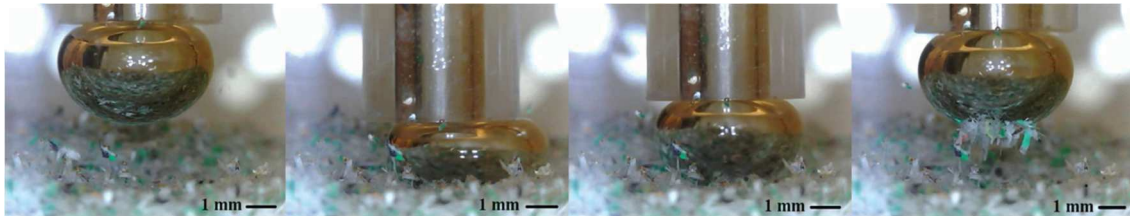


Figura 4.24 Foto degli stadi di contatto della bolla sul materiale. (R. Flores-Campos et al., 2017)

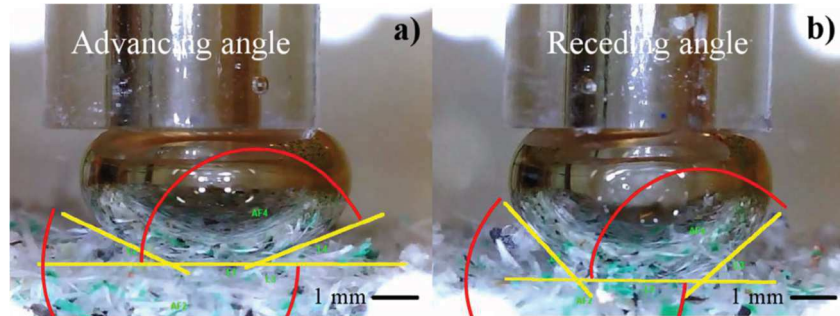


Figura 4.25 Foto delle misurazioni dell'angolo di contatto della bolla sul materiale. (R. Flores-Campos et al., 2017)

Come tensioattivo viene utilizzato il metil isobutil carbinolo (MIBC) e viene somministrato in successive concentrazioni crescenti e inoltre si ripete l'esperimento per temperature crescenti. I risultati relativi alla misurazione dell'angolo di contatto vengono riassunte nella tabella 4.17 mentre nella figura 4.26 vengono presentate le isteresi dell'angolo di contatto (CAH) in funzione di temperatura e concentrazione di tensioattivo. In generale si può dire che l'angolo di contatto aumenta all'aumentare della temperatura contribuendo quindi ad una migliore adesione delle bolle al materiale non metallico. Inoltre, si può dire che la concentrazione di MIBC pari a 10 ppm contribuisce al massimo dell'angolo di contatto quindi aumentandolo non si ottengono risultati interessanti.

Tabella 4.17 Risultati delle misurazioni degli angoli di contatto in avanzata, in recessione e delle relative isteresi in funzione della temperatura e della concentrazione del tensioattivo. (R. Flores-Campos et al., 2017)

Sample	Temperature (°C)	Frother (ppm)	$\theta_A$ (°)	$\theta_R$ (°)	CAH (°)
RER001	5	-	23.99 ± 1.13	49.66 ± 2.25	25.66 ± 1.69
RER002	10	-	25.82 ± 1.11	54.77 ± 2.81	28.95 ± 1.96
RER003	20	-	21.97 ± 2.42	53.26 ± 3.88	31.29 ± 3.15
RER004	30	-	24.24 ± 2.64	58.67 ± 3.58	34.44 ± 3.11
RER005	40	-	21.78 ± 1.88	60.69 ± 2.40	38.91 ± 2.14
RER006	5	5	23.13 ± 2.21	65.81 ± 3.72	42.68 ± 2.96
RER007	10	5	23.70 ± 2.28	67.47 ± 3.13	43.77 ± 2.71
RER008	20	5	22.26 ± 2.39	71.80 ± 5.48	49.54 ± 3.94
RER009	30	5	20.76 ± 1.74	74.35 ± 2.88	53.59 ± 2.31
RER010	40	5	21.38 ± 1.85	76.37 ± 3.23	54.99 ± 2.54
RER011	5	10	23.66 ± 3.08	67.74 ± 1.84	44.08 ± 2.46
RER012	10	10	18.91 ± 4.71	66.92 ± 2.07	48.01 ± 3.39
RER013	20	10	17.99 ± 4.39	69.56 ± 3.43	51.58 ± 3.91
RER014	30	10	19.10 ± 1.85	74.45 ± 2.70	55.35 ± 2.28
RER015	40	10	18.87 ± 1.95	79.30 ± 2.53	60.43 ± 2.24
RER016	5	20	20.33 ± 0.95	62.80 ± 3.57	42.46 ± 2.26
RER017	10	20	19.35 ± 2.74	67.05 ± 3.08	47.70 ± 2.91
RER018	20	20	20.80 ± 2.35	71.18 ± 3.31	50.38 ± 2.83
RER019	30	20	19.03 ± 1.65	72.53 ± 2.11	53.50 ± 1.88
RER020	40	20	18.64 ± 2.53	78.15 ± 3.48	59.51 ± 3.00
RER021	5	30	15.67 ± 1.64	57.71 ± 2.86	42.04 ± 2.25
RER022	10	30	18.18 ± 2.62	63.28 ± 2.23	45.09 ± 2.43
RER023	20	30	19.36 ± 2.39	70.19 ± 2.46	50.84 ± 2.42
RER024	30	30	18.30 ± 1.67	73.48 ± 2.23	55.18 ± 1.95
RER025	40	30	14.07 ± 3.05	72.15 ± 2.16	58.08 ± 2.60
RER026	5	40	19.48 ± 5.04	63.40 ± 2.93	43.92 ± 3.99
RER027	10	40	21.08 ± 2.15	67.33 ± 2.09	46.25 ± 2.12
RER028	20	40	21.71 ± 3.97	71.46 ± 2.56	49.75 ± 3.26
RER029	30	40	20.38 ± 1.19	76.33 ± 2.53	55.95 ± 1.86
RER030	40	40	20.73 ± 2.64	79.69 ± 0.55	58.96 ± 1.59

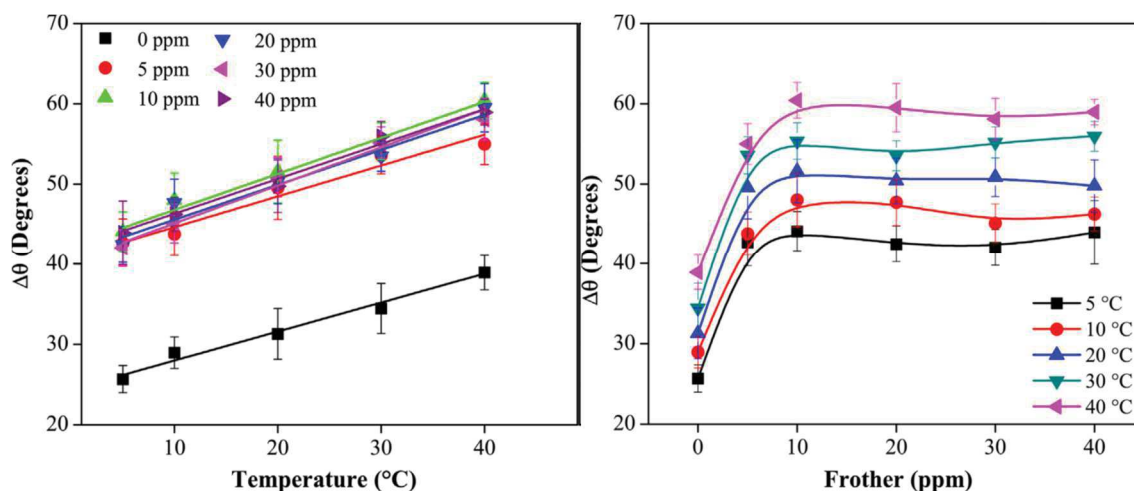


Figura 4.26 Isteresi dell'angolo di contatto in funzione di temperatura e della concentrazione del tensioattivo. (R. Flores-Campos et al., 2017)

Finora sono stati presentati metodi per la concentrazione e la separazione della frazione metallica dalla frazione non metallica delle schede elettroniche. Mentre la frazione metallica viene recuperata abbastanza facilmente, la componente non metallica viene solitamente smaltita tramite incenerimento o in discarica creando composti dannosi per la salute umana e per l'ambiente. Per poter recuperare questa frazione è necessario suddividere la componente organica, composta prevalentemente da polimeri plastici, dalla componente inorganica composta in generale da fibre di vetro. In questo contesto lo studio di G. Zhang et al. (2016) propone di utilizzare il metodo della separazione triboelettrica in modo da eliminare le fibre di vetro e poter riutilizzare la componente organica. Questa tipologia di trattamento prevede il passaggio su una tavola di un materiale in grado di caricare di carica elettrica opposta le diverse componenti da separare. In questo caso dopo un'adeguata sperimentazione il materiale scelto è il polimetil metacrilato (PMMA). Il campione utilizzato per lo studio è composto da particelle di schede elettroniche triturate e aventi una distribuzione dimensionale come riportato nella figura 4.27. L'apparecchiatura utilizzata per la sperimentazione è invece schematizzata nella figura 4.28.

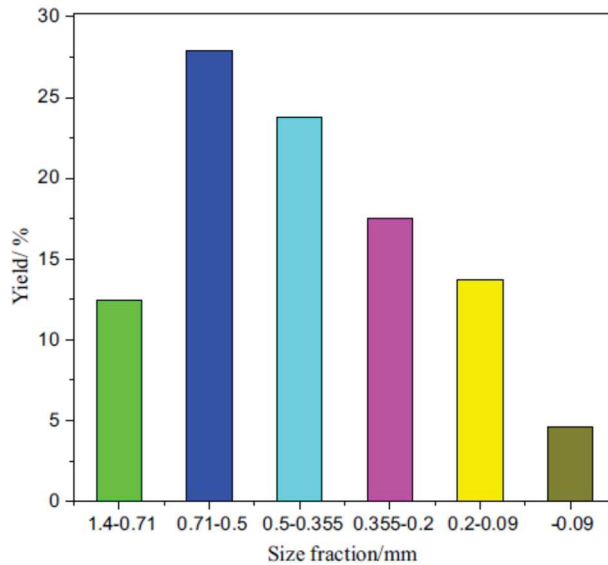


Figura 4.27 Distribuzione dimensionale delle particelle utilizzate per l'esperimento. (G. Zhang et al., 2016)

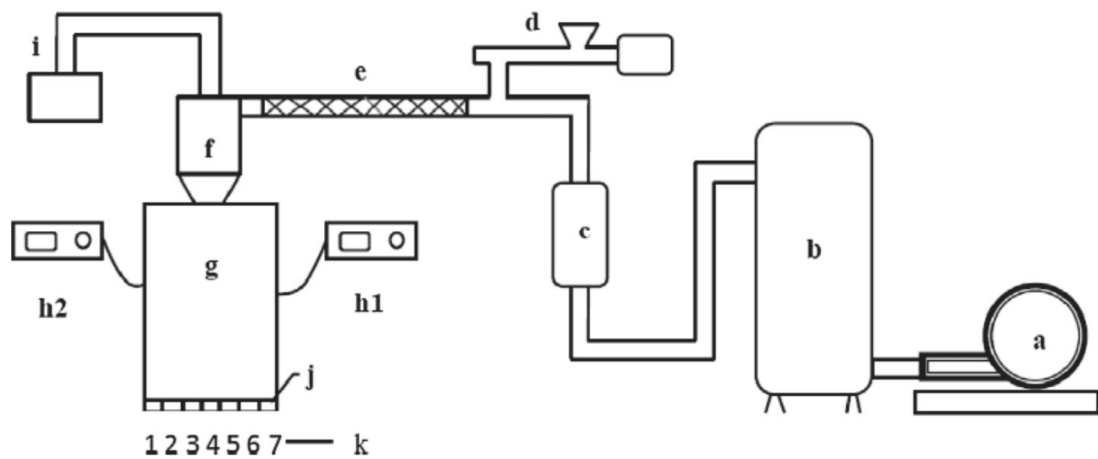


Figura 4.28 Schema dell'apparecchiatura utilizzata per l'esperimento. (a: ventilatore; b: serbatoio pressurizzato; c: rotameter; d: tramoggia di carico; e: caricatore triboelettrico; f: ciclone; g: separatore; h1: generatore positivo; h2: generatore negativo; i: sistema di raccolta polveri; j: canale di raccolta dei prodotti; k: numero dei canali di raccolta) (G. Zhang et al., 2016)

Durante la sperimentazione viene misurata la perdita di massa per combustione in funzione dei parametri di funzionamento del separatore quali portata di aria, voltaggio e tasso di alimentazione. I risultati delle sperimentazioni sono riportati nella figura 4.29. Vengono inoltre misurate le quantità dei diversi componenti inorganici all'interno dei 7 canali di raccolta e i dati sono raccolti nella figura 4.30. In generale si può dire che il contenuto di silicato denota una forte presenza di fibre di vetro nel campione numero 1 che va decrescendo fino al numero 7 mentre la componente organica presenta un andamento inverso. Questo dimostra quindi che la componente organica si carica negativamente mentre quella inorganica si carica positivamente. La condizione ottimale di separazione è stata raggiunta con un tasso di alimentazione pari a 300 g/min, un voltaggio pari a 30 kV e una portata d'aria pari a 50 m<sup>3</sup>/h. Questa tecnologia si è comunque dimostrata in grado di separare efficacemente la componente organica dalla componente inorganica della frazione non metallica delle schede elettroniche.



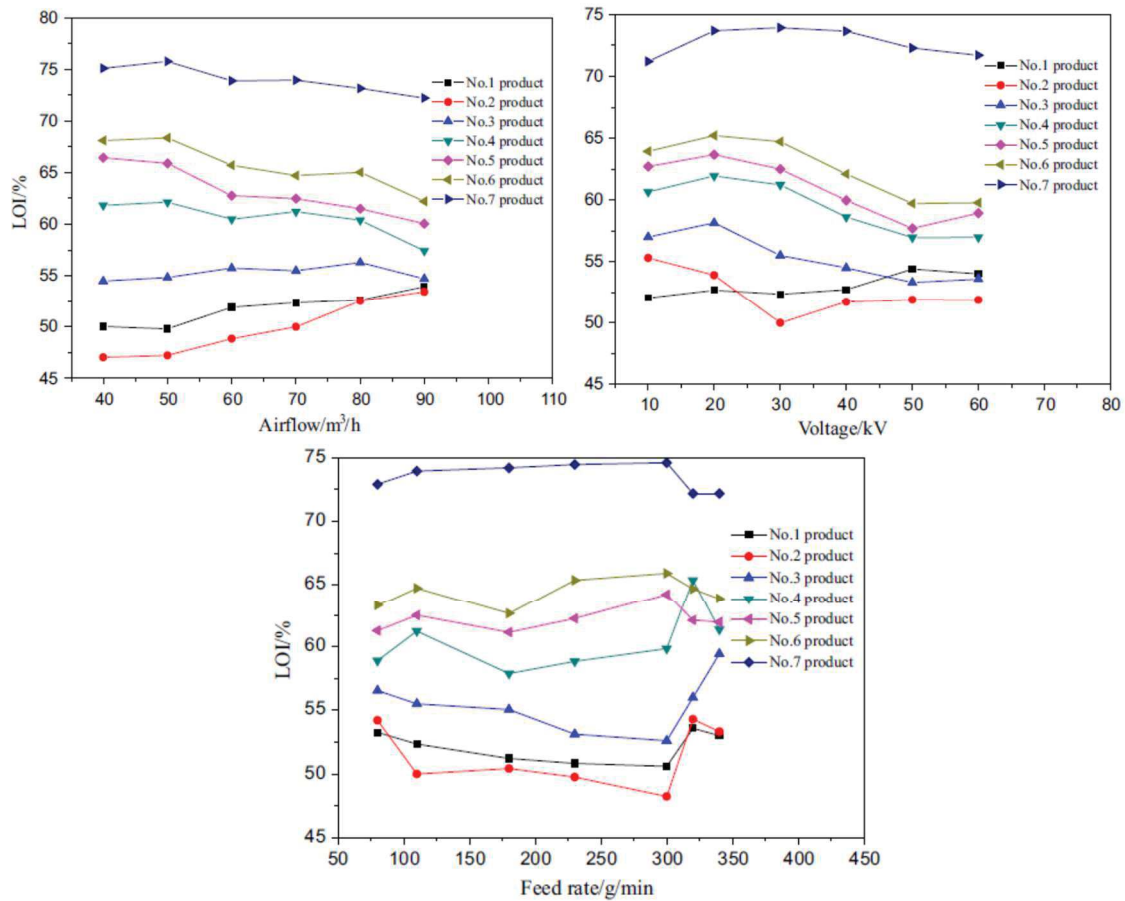


Figura 4.29 Rappresentazione della perdita in massa per combustione in funzione della portata d'aria, del voltaggio e del tasso di alimentazione. (G. Zhang et al., 2016)

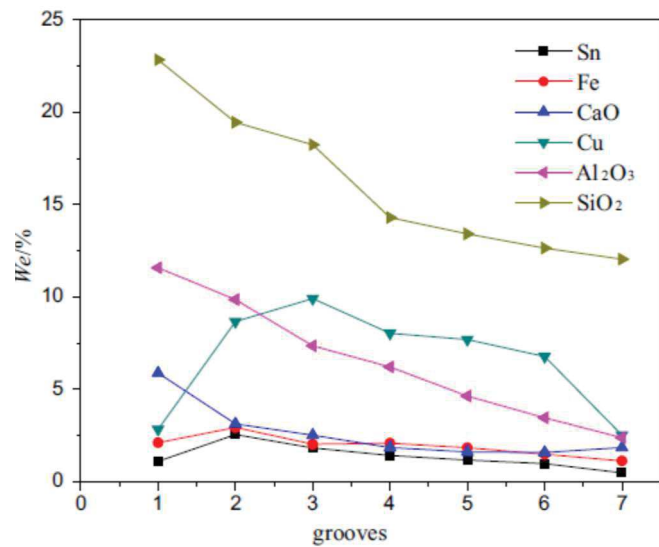


Figura 4.30 Rappresentazione delle quantità percentuali dei componenti inorganici all'interno dei 7 prodotti ricavati. (G. Zhang et al., 2016)

### 4.3 Confronto fra i trattamenti presentati

Si è deciso di effettuare un confronto fra i diversi trattamenti presentati, sia industriali che sperimentali. Nella tabella 4.18 vengono presentati i diversi studi analizzati con i relativi vantaggi e svantaggi rilevati.

Tabella 4.18 Confronto fra i vantaggi e gli svantaggi dei trattamenti precedentemente presentati.

Confronto fra i trattamenti esistenti				
Tipologia di trattamento	Riferimento	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi
Industriale	R. Cayumil et al., 2018	Trattamento pirometallurgico applicato tramite la fusione di schede triturate.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grandi quantità trattabili;</li> <li>- Trattamento semplice.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissioni gassose molto inquinanti;</li> <li>- Trattamento molto energivoro.</li> </ul>
	-	Trattamento fisico consistente in separazione di polveri di schede comminuite con tavola a scosse.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilità applicativa;</li> <li>- Suddivisione dei metalli senza ulteriore trattamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacità di trattamento limitate a poche tipologie di schede;</li> <li>- Grandi quantità di scarti.</li> </ul>
Sperimentale	Y. Tsunazawa et al., 2018	Uso di un trituratore cilindrico per la liberazione delle schede elettroniche dalle apparecchiature intere.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tecnologia applicabile come pretrattamento meccanizzato;</li> <li>- Facilità costruttiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Applicabilità ridotta ad apparecchiature di taglia ridotta;</li> <li>- Impossibilità di utilizzo su apparecchiature con schede contenenti elementi pericolosi.</li> </ul>
	C. Guo et al., 2011	Confronto tra più procedimenti di separazione fisica tra cui separazione elettrostatica, magnetica e pneumatica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tecnologie di trattamento poco impattanti sull'ambiente;</li> <li>- Possibile sinergia fra le diverse separazioni.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessità di una comminuzione fine per la separazione pneumatica.</li> </ul>
	J. Ruan et al., 2017	Spiegazione e revisione dei parametri più influenti sulla separazione elettrostatica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tecnologia applicabile su diverse tipologie di schede.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Applicabilità solo su materiale grossolano e non sulle polveri.</li> </ul>
	M. Sarvar et al., 2015	Applicazione di un trattamento applicato generalmente in ambito minerario per il trattamento delle schede elettroniche.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metodo semplice con attrezzature comuni;</li> <li>- Trattamento poco impattante sull'ambiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Applicazione possibile solo su alcune tipologie di schede.</li> </ul>
	L. Meng et al., 2018	Recupero di metalli preziosi tramite la supergravità. Utilizzo di una fornace e una centrifuga.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separazione di più leghe differenti;</li> <li>- Metalli recuperati con purezza elevata.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessità di un trattamento di raffinazione a posteriori;</li> <li>- Difficoltà nel trattamento.</li> </ul>

	L. Meng et al., 2019	Separazione di metalli preziosi tramite l'applicazione di una filtrazione a bassa pressione.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separazione di leghe differenti in step di trattamento conseguenti;</li> <li>- I metalli recuperati presentano un grado di purezza elevata.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trattamento applicabile solo per piccole quantità;</li> <li>- Strumentazione complicata;</li> <li>- Necessità di trattamento di raffinazione a posteriori.</li> </ul>
	J. He and C. Duan, 2017	Recupero dei metalli tramite un procedimento di flottazione inversa.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ottimo metodo di separazione dei metalli;</li> <li>- Separazione di facile applicazione e poco impattante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Applicabilità solo su alcune tipologie di schede;</li> <li>- Necessità di un pretrattamento di fino.</li> </ul>
	G. Zhang et al., 2016	Utilizzo della separazione triboelettrica per rimuovere la frazione inorganica dai non metalli derivati dalle schede elettroniche.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Separazione efficiente degli inerti dai non metalli;</li> <li>- Metodo di facile applicazione;</li> <li>- Trattamento per la raffinazione della parte non metallica trattata raramente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficile applicazione su diverse tipologie di schede elettroniche in input.</li> </ul>

# Capitolo 5

## Trattamento in ipotesi

In questo capitolo verrà riportato il procedimento di trattamento studiato per recuperare le materie prime utili da schede elettroniche a fine vita. Verranno inoltre riportati i vantaggi e gli svantaggi dei diversi trattamenti e le tecnologie più indicate. Inoltre, si illustreranno anche le tecniche provate ma che in realtà non hanno portato a risultati soddisfacenti.

### 5.1 Ipotesi

Il trattamento ipotizzato prevede l'utilizzo di una serie di macchine utilizzate comunemente per la separazione dei diversi materiali, costituenti gli oggetti studiati, in modo da renderli riutilizzabili come materie prime seconde. Tutte le sperimentazioni sono state condotte nel Laboratorio di Trattamento dei Solidi del Politecnico di Torino sotto la supervisione della professoressa Paola Marini.

L'oggetto di trattamento è composto da un campione di schede elettroniche a fine vita provenienti da caldaie ad uso domestico. Si hanno quindi a disposizione 6 schede pressochè identiche differenziate principalmente per data di realizzazione. Le schede in questione sono relativamente semplici in quanto, le funzioni da governare non sono particolarmente complesse.

L'obiettivo posto è quindi quello di separare i diversi materiali con un procedimento possibilmente fisico che sia poco costoso e che non comporti un carico ambientale troppo oneroso.

### 5.2 Materiali e metodi

Le schede sottoposte a trattamento sono di forma quadrata con lato di circa 13 cm. Come si può vedere dalla figura 5.1, sul fronte della scheda sono montati una serie di componenti PTH, facilmente riconoscibili ed identificabili. Su questo lato sussistono infatti, condensatori, resistori, diodi Zener, potenziometri, transistor e relè. Nel lato

inferiore possiamo trovare tutti i componenti più piccoli ovvero i componenti SMD. Nella figura 5.2 vengono riportati i componenti riconosciuti.

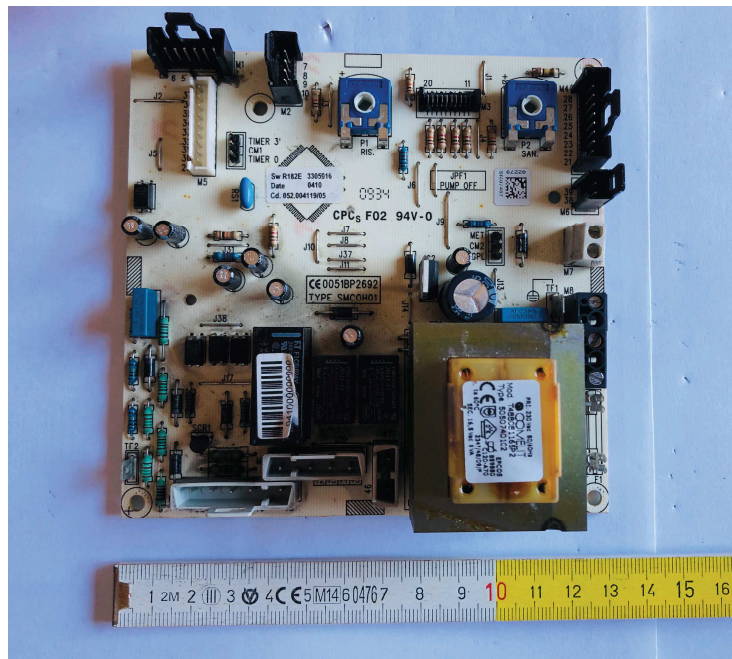


Figura 5.1 Foto della scheda tipo utilizzata per lo studio.

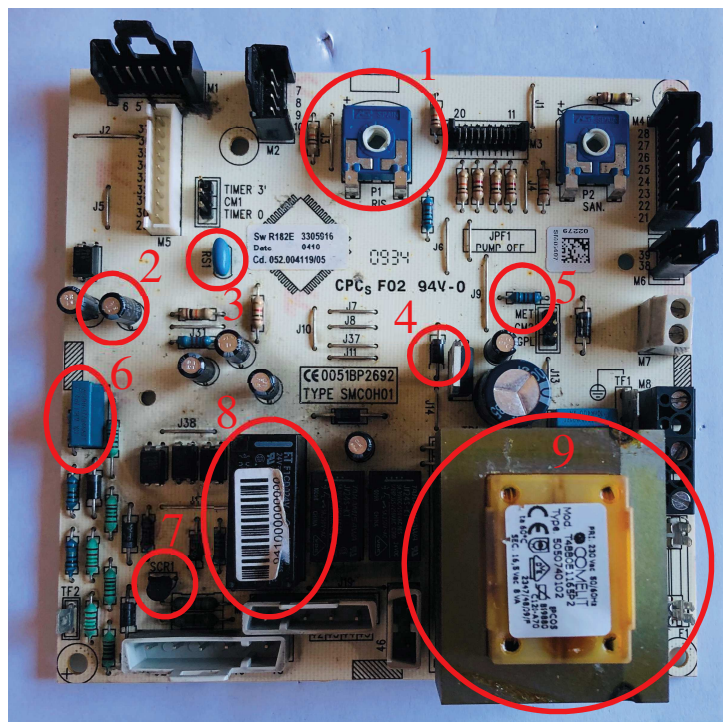


Figura 5.2 Foto della scheda tipo con indicazione dei diversi componenti. 1: Potenziometro o reostato; 2: Condensatore elettrolitico a dielettrico liquido; 3: Condensatore ceramico; 4: Diodo Zener; 5: Resistore; 6: Condensatore a dielettrico solido; 7: Transistor; 8: Relè; 9: Alimentatore.

Per sottoporre le schede ai trattamenti si è proceduto rimuovendo i resti dei fili elettrici ancora collegati alle schede poi si sono rimossi i componenti che avrebbero potuto creare un danno alle attrezzature del laboratorio. Tramite un saldatore si sono quindi rimossi l'alimentatore e i condensatori elettrolitici riportati in figura 5.3 ottenendo dei campioni come riportato nella figura 5.4. Come si può notare dalla figura 5.3 gli alimentatori sono composti quasi totalmente di rame puro e acciaio, per i quali il recupero risulta essere molto semplice con l'attrezzatura adeguata ad aprirli.

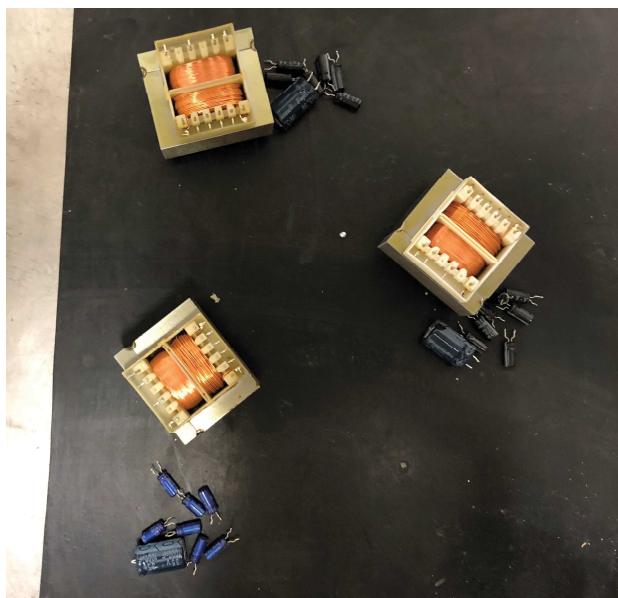


Figura 5.3 Foto dei condensatori elettrolitici e degli alimentatori rimossi dalle schede elettroniche.

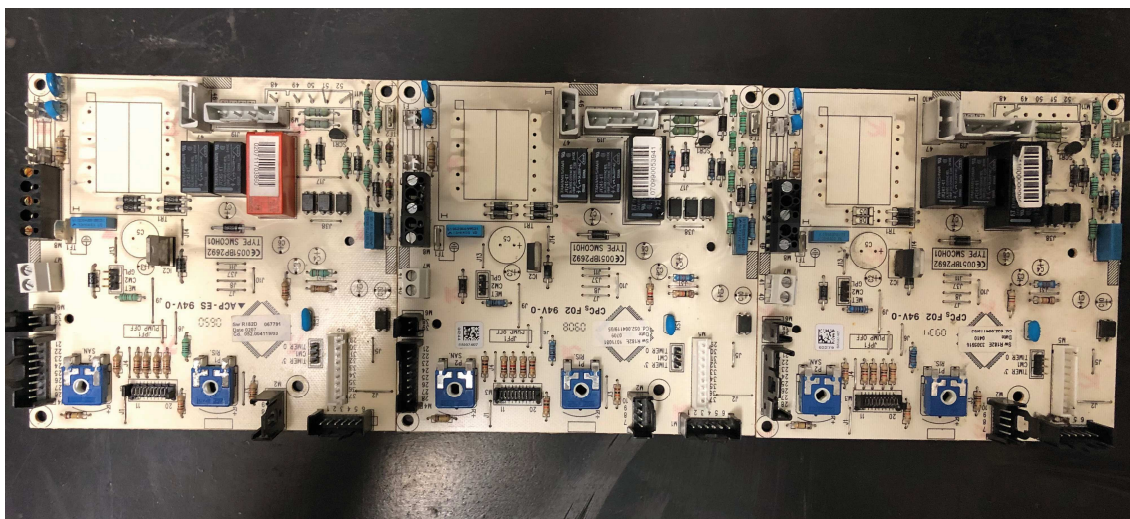


Figura 5.4 Foto di tre schede elettroniche private dei condensatori elettrolitici e degli alimentatori.

Le operazioni effettuate successivamente sono riassunte nella figura 5.5 dove viene riportato lo schema seguito per il trattamento della prima scheda. Si è quindi proceduto tramite la triturazione e, per tale procedimento, è stato utilizzato un triturratore a coltelli da laboratorio della Retsch, riportato nella figura 5.6a, con griglia di uscita a sezione

quadrata con lato pari a 4,5 mm. Il materiale così ottenuto viene riportato nella figura 5.6b.

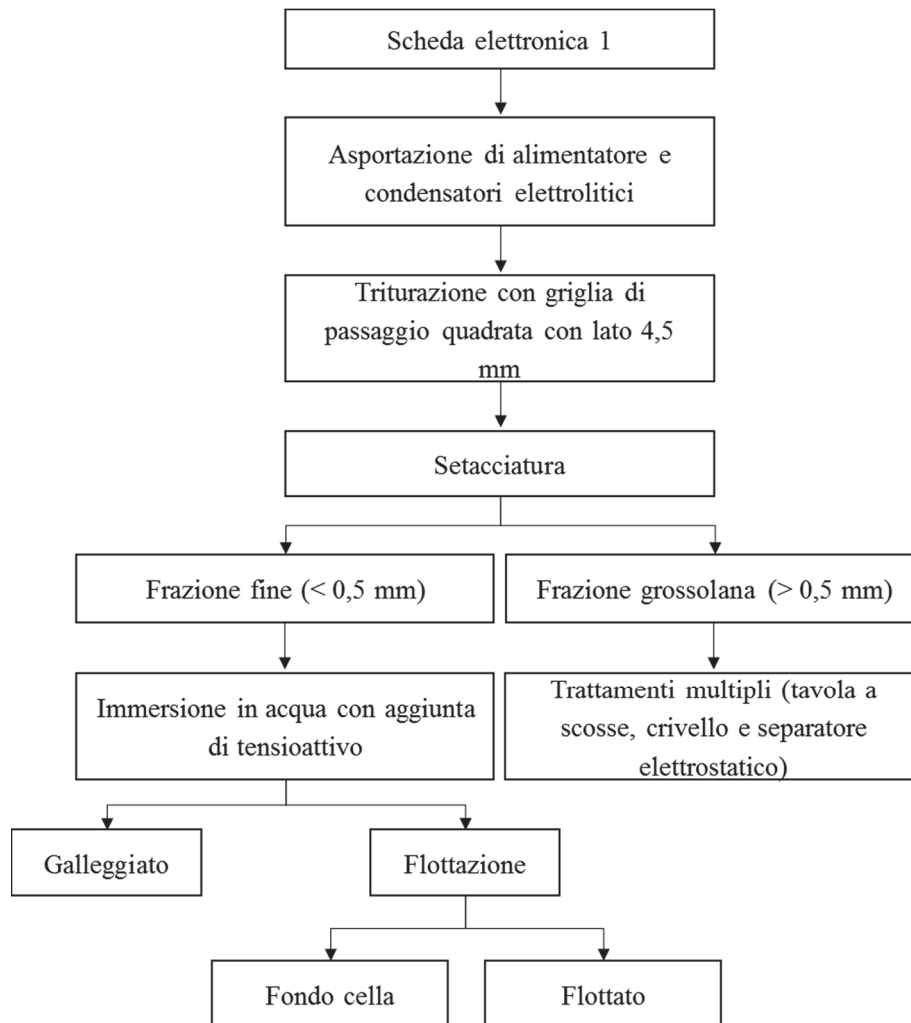


Figura 5.5 Schema di processo applicato per la prima scheda triturata.



Figura 5.6 a) Foto del tritatore usato per riduzione volumetrica e b) materiale in output alla tritrazione.

A questo punto si è proceduto con la setacciatura del materiale di output in modo da isolare le polveri fini in modo da poterle trattare separatamente. Si è quindi scelto di utilizzare un setaccio con passaggio pari a 0,5 mm e il materiale passante è riportato nella figura 5.7. Come si può notare il materiale fine risulta essere particolarmente ricco di rame in forma fibrosa derivante presumibilmente dagli avvolgimenti dei relè. Si rende necessario quindi trattare sia la componente fine che la componente grossolana che risulta, ad una prima valutazione ad occhio nudo, più ricca di altri metalli. La frazione grossolana viene quindi momentaneamente messa da parte e, riunita a quella derivante dalle altre 4 schede triturate, verrà trattata separatamente e in seguito verranno illustrati i diversi passaggi seguiti.



Figura 5.7 Foto del materiale fine (<0,5 mm) dopo la setacciatura realizzata a valle della tritrazione.



### 5.3 Trattamenti per la frazione fine (< 0,5 mm)

La frazione fine viene immersa in acqua in un becher con una goccia di tensioattivo e, mantenendola in agitazione tramite una bacchetta di vetro, si attua un processo di tipo sink-float facendo sfiorare le particelle che rimangono in sospensione essendo quindi più leggere. Ciò che si ottiene è una sospensione acquosa dove permangono piccole particelle leggere, presumibilmente plastiche. Tale sospensione viene poi sottoposta a filtrazione tramite un filtro di carta e ciò che si ottiene viene indicato con galleggiato e viene riportato nella figura 5.8. In questo materiale si nota che il rame risulta essere meno presente in quanto da un primo esame ad occhio nudo non si scorge la presenza di molte fibre di rame.

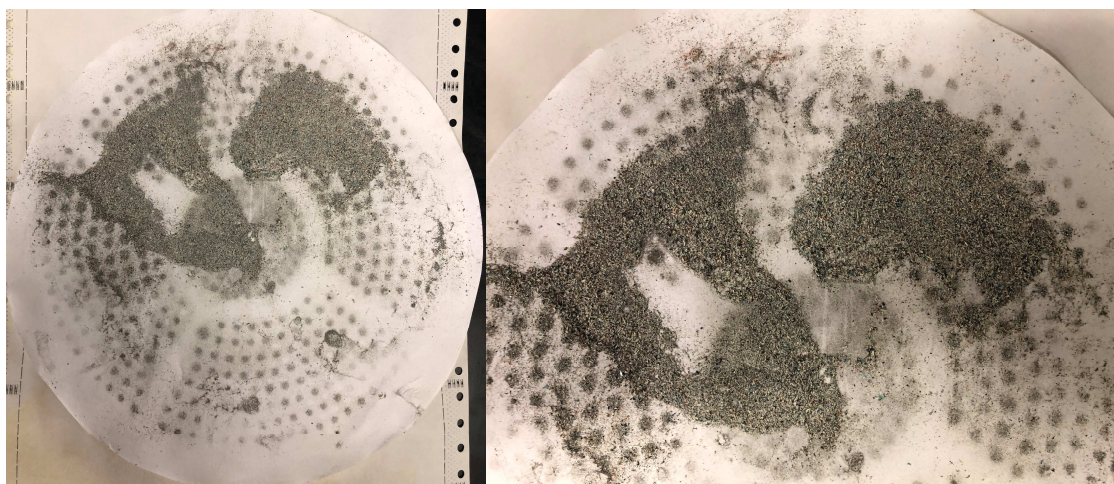


Figura 5.8 Foto del materiale fine (<0,5 mm) "galleggiato" dopo il procedimento di sink-float.

La sospensione con le particelle più pesanti viene invece sottoposta a flottazione tramite una cella di flottazione della Denver riportata in figura 5.9 e utilizzando un tensioattivo comune come agente schiumogeno. Tramite questo procedimento si ottengono quindi due prodotti in sospensione che vengono filtrati e si ottengono quindi il flottato e il fondo cella. Nella figura 5.10 vengono riportati i campioni ottenuti dal flottato mentre nella figura 5.11 viene riportato il filtrato relativo al fondo cella. Nel materiale relativo al flottato si riconosce chiaramente il rame che sembra essere presente in gran quantità e moderatamente puro. L'adesione del rame alla schiuma generata dal tensioattivo è generalmente imputabile alla sua presenza sottoforma di fibre molto sottili e leggere. Nel fondo cella si possono notare molte particelle, presumibilmente plastiche, di diverso colore e natura.



Figura 5.9 Foto della cella di flottazione Denver utilizzata per il procedimento di separazione del materiale fine.

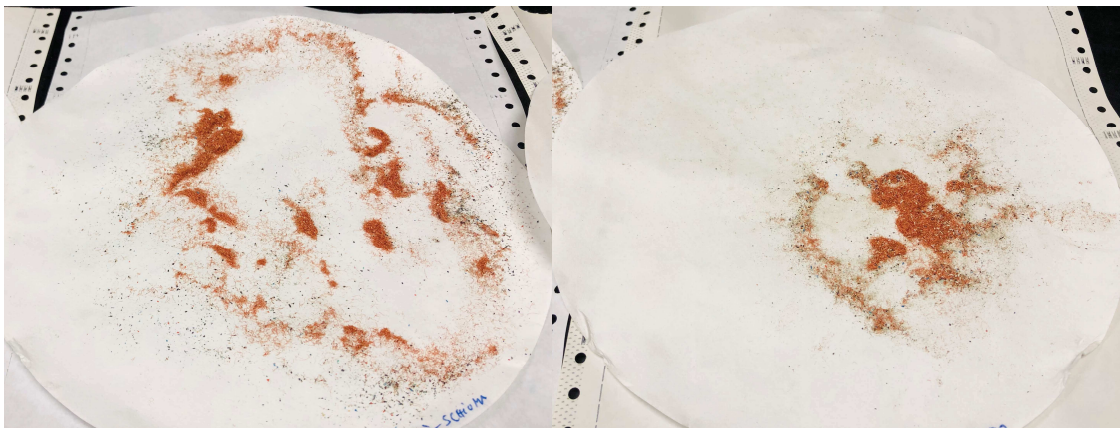


Figura 5.10 Foto del materiale fine ( $<0,5\text{ mm}</math>) flottato in seguito al processo di flottazione.$

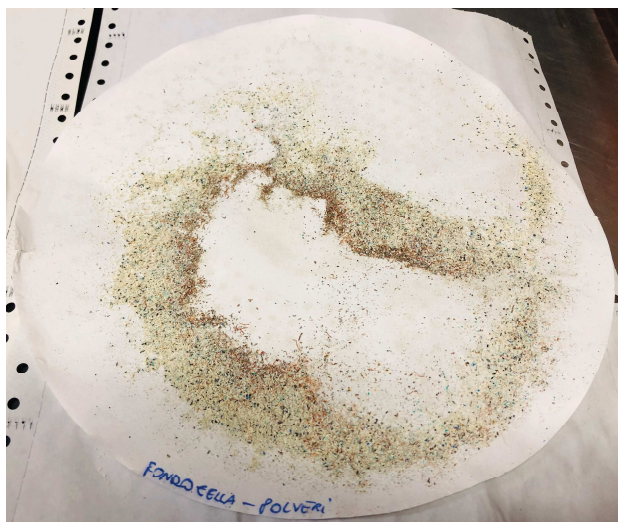


Figura 5.11 Foto del materiale fine ( $<0,5$  mm) denominato fondo cella dopo il procedimento di flottazione.

Come seconda parte della sperimentazione si è proceduto seguendo il procedimento riportato nella figura 5.12. Si sono infatti triturate le altre 4 schede con la medesima procedura del caso precedente e si sono sottoposti i campioni ottenuti a metodi di separazione differenti. La frazione fine viene infatti sottoposta a separazione tramite tavola a scosse in acqua. la strumentazione utilizzata viene riportata nella figura 5.13. Mentre i campioni separati, in output dal trattamento, vengono riportati nella figura 5.14. Come si può notare da tale rappresentazione, uno dei due prodotti risulta essere più ricco di rame ma decisamente meno puro del prodotto ottenuto con la flottazione. Per l'altro campione in output invece si riconosce una presenza più elevata di plastiche e altro ma si riscontrano anche molte fibre di rame. Sul campione più ricco di rame si è effettuata anche una separazione magnetica tramite l'ausilio di una comune calamita. Questa separazione ha isolato le particelle metalliche magnetiche, anche se in esigua quantità sul totale.

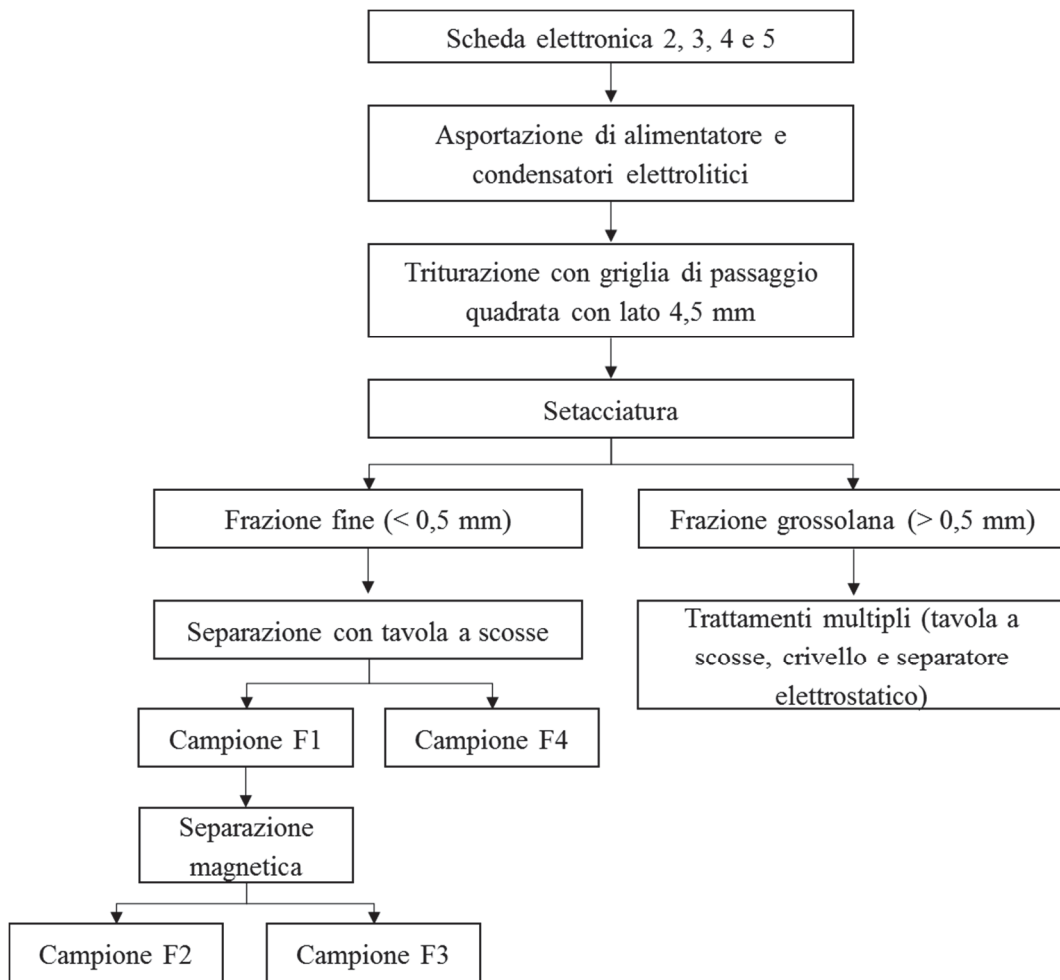


Figura 5.12 Schema delle operazioni effettuate sulle altre 4 schede trattate.



Figura 5.13 Foto della tavola a scosse utilizzata per il trattamento sopra descritto.

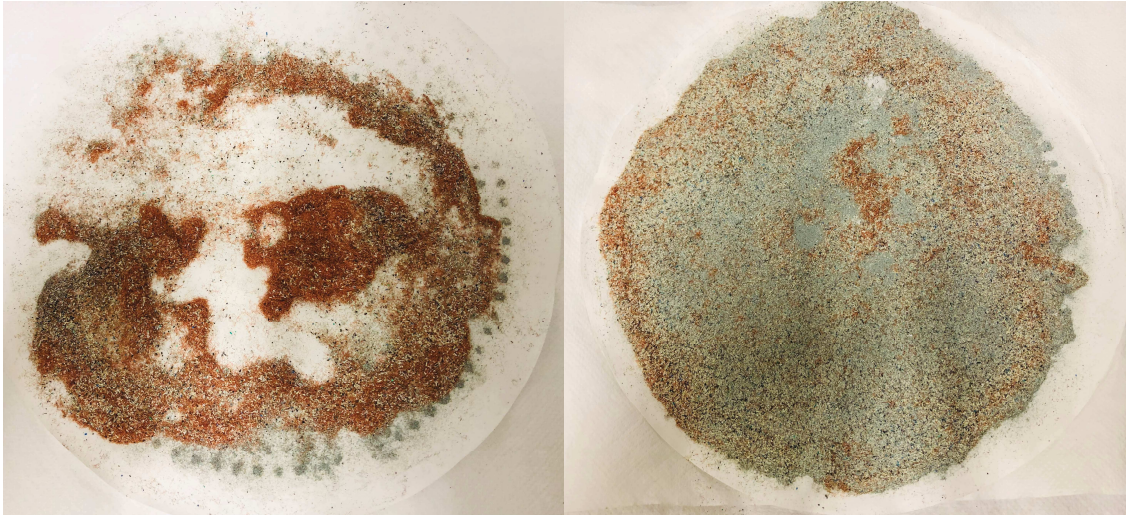


Figura 5.14 Foto dei prodotti di separazione tramite tavola a scosse applicata sul materiale fine (<0,5 mm).

#### 5.4 Trattamenti per la frazione grossolana (> 0,5 mm)

Per quanto riguarda la frazione grossolana si è deciso di costituire un campione riunito dalle due triturazioni e di sottoporre tutto il materiale a separazioni differenti. Negli schemi riportati nelle figure 5.15, 5.18 e 5.20 vengono illustrati tutti i procedimenti a cui è stata sottoposta la frazione grossolana riunita. Si è proceduto infatti applicando la separazione con tavola a scosse ad acqua sul campione grossolano per isolare i diversi componenti. Con questo procedimento si sono ottenuti 3 prodotti riconducibili a plastiche leggere, plastiche pesanti e metalli come riportati nelle figure 5.16 e 5.17. In ogni caso però la separazione non ha portato grandi benefici in quanto i prodotti sono decisamente mal separati. Probabilmente complici le dimensioni e le forme delle particelle troppo disomogenee. Inoltre, si può ipotizzare che i diversi materiali non si siano liberati in modo sufficiente e che quindi, per utilizzare questo procedimento, serva un ulteriore step di triturazione. Riunito il campione si è tentata la separazione con l'uso del crivello idraulico dove una volta inserito il materiale si è attivata la pulsazione e dopo un tempo pari a 10 minuti si sono raccolti i diversi prodotti. Anche in questo caso si sono raccolti tre prodotti come indicato nella figura 5.18 ma, analogamente al procedimento precedente, la separazione non ha avuto un gran successo. Si sono riscontrati infatti, grandi impurezze nei tre campioni in output probabilmente per le medesime cause riportate in precedenza. La strumentazione è riportata nella figura 5.19. Come ultimo procedimento si è applicato l'uso del separatore elettrostatico in più step di separazione in seguito all'uso della calamita per rimuovere i metalli magnetici, come riportato in figura 5.20. I parametri impostati sul separatore sono: voltaggio pari a -30 kV; frequenza di rotazione del tamburo pari a 30 Hz; vibrazione dello scivolo di alimentazione pari al 25%. Tali parametri sono stati ottenuti dopo una serie di sperimentazioni per identificare la configurazione di separazione più idonea per il campione da trattare. Il separatore utilizzato è riportato in figura 5.21 ed è un separatore elettrostatico da laboratorio della Prodecologia. In questo modo si sono ottenuti tre campioni di materiale diversi: conduttivo riunito (C2+C3+C4), misto (M4) e non conduttivo riunito (NC1+NC2+NC3+NC4). In totale si sono ottenuti un campione magnetico, riportato nella figura 5.22, e i tre prodotti dal separatore elettrostatico, riportati

nelle figure 5.23 e 5.24. La separazione in questo caso ha avuto un effetto molto positivo infatti la purezza dei campioni risulta essere alta come si può notare dalle foto riportate.

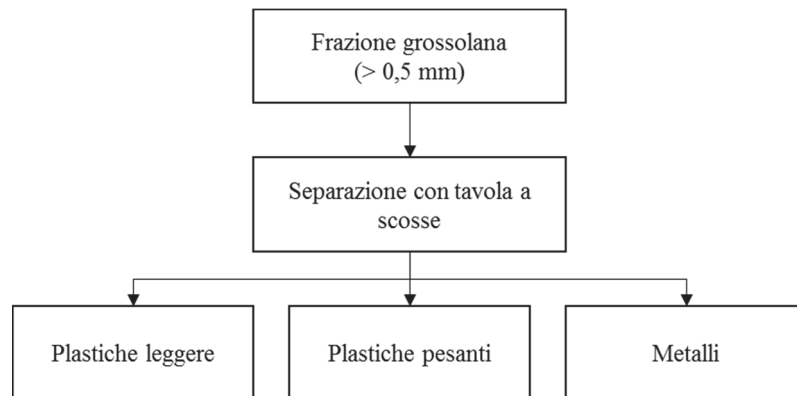


Figura 5.15 Schema rappresentante la separazione con tavola a scosse effettuata sul materiale grossolano (>0,5 mm).

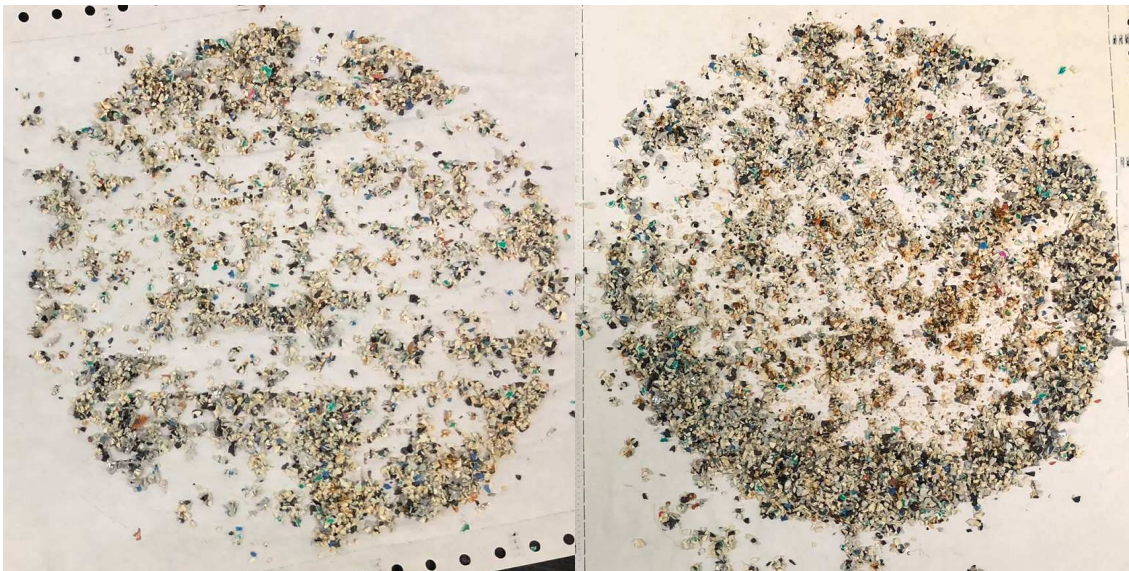


Figura 5.16 Foto di (a sinistra) plastiche leggere e (a destra) plastiche pesanti ottenute dalla separazione con tavola a scosse del materiale grossolano (>0,5 mm).



Figura 5.17 Foto dei metalli ottenuti dalla separazione con tavola a scosse del materiale grossolano (>0,5 mm).

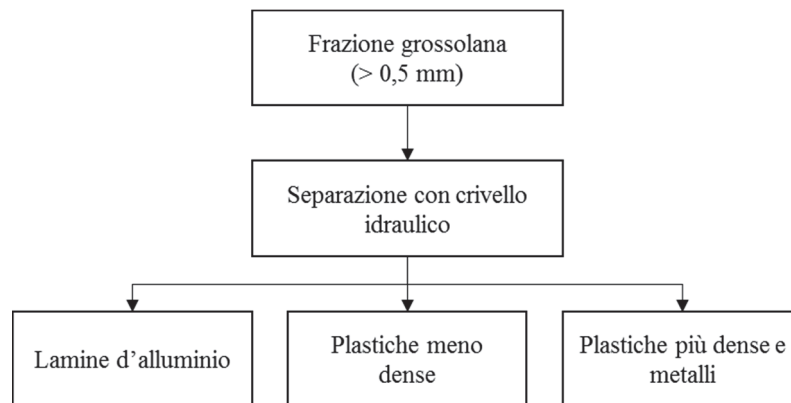


Figura 5.18 Schema rappresentante la separazione con crivello idraulico effettuata sul materiale grossolano (>0,5 mm).



Figura 5.19 Foto del crivello idraulico utilizzato per gli esperimenti sul materiale grossolano (>0,5 mm).

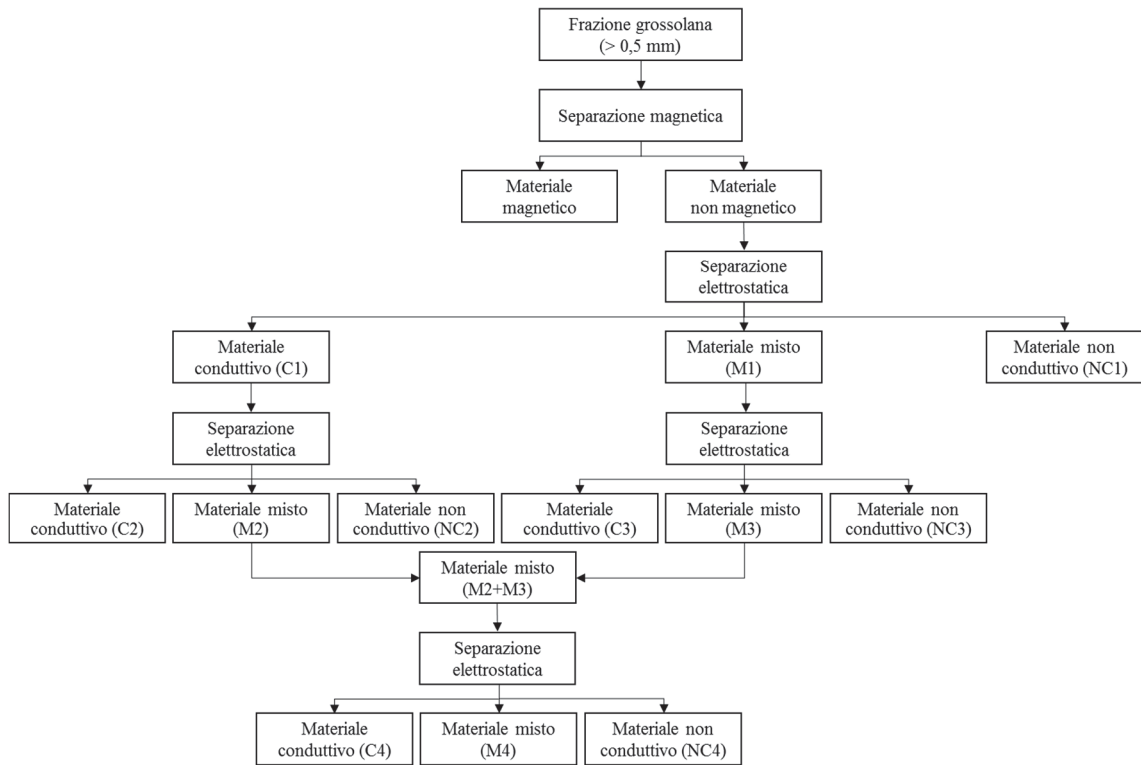


Figura 5.20 Schema rappresentante la separazione con separatore elettrostatico effettuata sul materiale grossolano (>0,5 mm).



Figura 5.21 Foto del separatore elettrostatico utilizzato per le sperimentazioni sul materiale grossolano (>0,5 mm).





Figura 5.22 Foto dei metalli magnetici ottenuti dalla separazione magnetica del materiale grossolano (>0,5 mm).

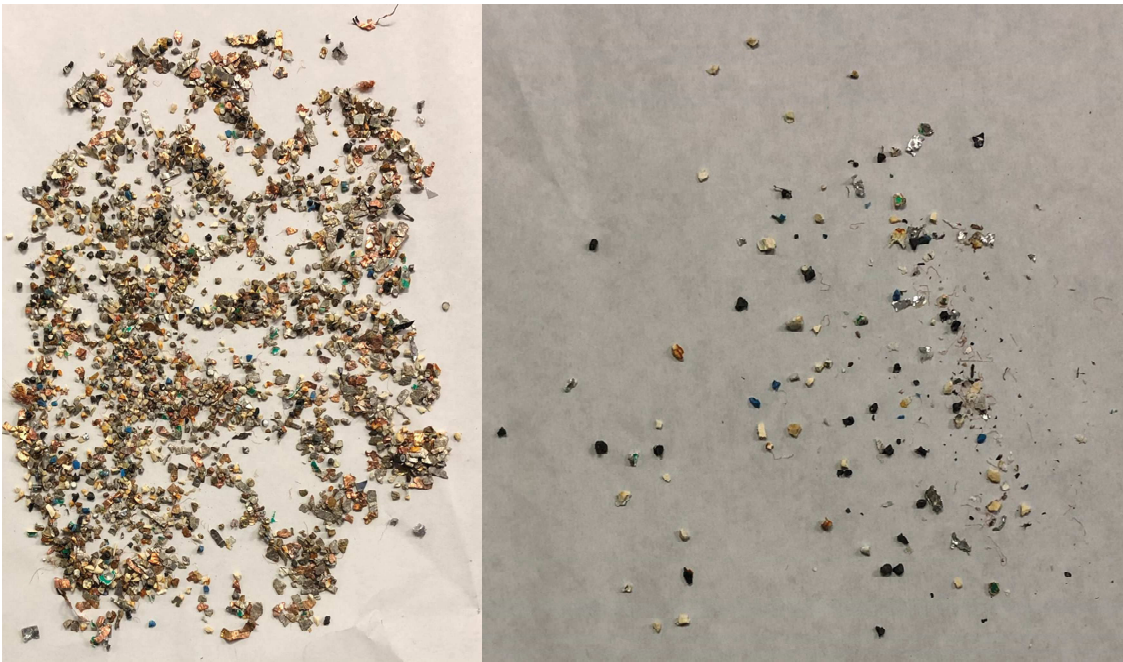


Figura 5.23 Foto di (a sinistra) materiale conduttivo riunito (C2+C3+C4) e (a destra) materiale misto (M4) ottenuti dalla separazione elettrostatica del materiale grossolano (>0,5 mm).



Figura 5.24 Foto del materiale non conduttivo riunito (NC1+NC2+NC3+NC4) ottenuto dalla separazione elettrostatica del materiale grossolano (>0,5 mm).

## 5.5 Risultati

Come prima cosa si sono pesati i campioni da sottoporre a trattamento. I risultati di questo procedimento sono presentati nella tabella 5.1. In media si è notato che le schede complete pesano all'incirca 410 g e l'alimentatore, composto perlopiù da rame e ferro, è circa il 75% del peso di tutta la scheda elettronica. I condensatori rimossi sono all'incirca il 1% del peso totale della scheda e di conseguenza il peso trattato risulta essere il 24% del totale.

Tabella 5.1 Riepilogo dei pesi dei diversi componenti principali delle schede elettroniche.

Riepilogo pesi		
	Peso [g]	Range di variazione del peso [g]
Totale della scheda	411,08	404,89 – 411,08
<i>Alimentatore</i>	306,66	303,12 – 306,66
<i>Condensatori</i>	5,96	5,96 – 6,54
Totale elementi sottratti	312,62	309,66 – 312,62
<b>Totale della scheda trattata</b>	<b>98,46</b>	<b>95,23 – 98,46</b>

Si è quindi sottoposta a triturazione la prima scheda, privata dell'alimentatore e dei condensatori. Il peso di tale campione è pari a 98,46 g. Successivamente si è effettuata la setacciatura e i dati ricavati sono presentati nella tabella 5.2. Da cui è possibile osservare che la maggior parte del materiale ha una dimensione fra 2 mm e 1 mm. La frazione fine invece (< 0,5 mm) risulta essere pari a circa 11% del totale.

Tabella 5.2 Dati delle pesature ottenuti dalla setacciatura della prima scheda elettronica triturata.

<b>Setacciatura</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Frazione &lt; 0,5 mm</b>	10,90	11,1
<i>Totale frazione fine</i>	<i>10,90</i>	<i>11,1</i>
<b>Frazione compresa tra 0,5 mm e 1 mm</b>	19,02	19,3
<b>Frazione compresa tra 1 mm e 2 mm</b>	55,67	56,5
<b>Frazione compresa tra 2 mm e 3 mm</b>	10,97	11,1
<b>Frazione &gt; 3 mm</b>	0,05	0,1
<i>Totale frazione grossolana</i>	<i>85,71</i>	<i>87,0</i>
<b>Totale</b>	<b>96,61</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	1,85	1,9
<b>Input</b>	<b>98,46</b>	<b>100,0</b>

Come secondo step di triturazione si sono utilizzate 4 schede, sempre private di alimentatori e condensatori, e il peso del materiale ottenuto dalla triturazione è pari a 386,67 g di cui 48,11 g di materiale minore di 0,5 mm.

### 5.3.1 Risultati relativi alla frazione fine (<0,5 mm)

La parte di materiale fine derivante dalla prima triturazione, come spiegato precedentemente, è stata sottoposta a un procedimento analogo al sink-float e poi a flottazione. I dati ottenuti da tale trattamento sono riportati nella tabella 5.3 da dove si può dedurre che circa il 50% del materiale fine rimane nel fondo cella ovvero è appartenente a plastiche pesanti o metalli. Il flottato invece risulta essere circa il 35% del materiale fine e, come illustrato nel paragrafo precedente, è composto prevalentemente da fibre di rame.

Tabella 5.3 Dati delle pesature ottenuti dall'applicazione del procedimento di sink-float e poi di flottazione sul materiale fine della prima scheda.

<b>Procedimento di sink/float e flottazione</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Galleggiato</b>	1,53	14,0
<b>Flottato</b>	3,66	33,6
<b>Fondo cella</b>	5,43	49,8
<b>Totale</b>	<b>10,62</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	0,28	2,6
<b>Input</b>	<b>10,90</b>	<b>100,0</b>

Il materiale fine ottenuto dalla seconda triturazione è stato sottoposto a separazione tramite tavola a scosse e i dati ottenuti sono riportati nella tabella 5.4. Il materiale in questo caso si suddivide quasi equamente e la separazione non dà un esito egualmente soddisfacente al procedimento di flottazione.

Tabella 5.4 Dati delle pesature ottenuti dall'applicazione della separazione tramite tavola a scosse sul materiale fine di 4 schede triturate.

<b>Separazione con tavola a scosse sul materiale fine</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Prodotto F2</b>	20,68	43,0
<b>Prodotto F3</b>	1,23	2,6
<b>Prodotto F4</b>	25,63	53,2
<b>Totale</b>	<b>47,54</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	0,57	1,2
<b>Input</b>	<b>48,11</b>	<b>100,0</b>

### 5.3.2 Risultati relativi alla frazione grossolana (>0,5 mm)

Analogamente al materiale fine, anche i frammenti di schede maggiori di 0,5 mm, riuniti con quelli precedentemente triturati, sono stati sottoposti a separazione con tavola a scosse. Il campione sottoposto a separazione è pari a 424,27 g, i prodotti così ottenuti sono stati pesati e i dati sono riportati nella tabella 5.5. In questo caso la separazione ha avuto un effetto più soddisfacente, anche se non ottimale, di quanto registrato con l'esperimento sul materiale fine. In questo caso il prodotto che è stato classificato come plastiche pesanti rappresenta comunque più del 40% del totale e insieme con il prodotto denominato plastiche leggere si raggiunge un valore in percentuale di circa il 77%.

Tabella 5.5 Dati delle pesature ottenuti dall'applicazione della separazione tramite tavola a scosse sul materiale grossolano di 4 schede triturate.

<b>Separazione con tavola a scosse sul materiale grossolano</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Prodotto 1 (metalli)</b>	93,35	22,0
<b>Prodotto 2 (plastiche leggere)</b>	138,45	32,6
<b>Prodotto 3 (plastiche pesanti)</b>	184,52	43,5
<b>Totale</b>	<b>416,32</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	7,95	1,9
<b>Input</b>	<b>424,27</b>	<b>100,0</b>

Come ultimo esperimento si è tentato un procedimento utilizzato ampiamente nel campo del trattamento dei rifiuti, ovvero una separazione magnetica seguita da una serie di

separazioni elettrostatiche per raffinare i campioni in output. Per questo esperimento è stato utilizzato un campione di materiale grossolano con un peso pari a 256,22 g. Su questo campione è stata condotta la separazione magnetica e i pesi dei prodotti ottenuti sono riportati nella tabella 5.6. Il materiale non magnetico è stato poi sottoposto a separazione elettrostatica raffinando, in primo luogo, il materiale conduttivo e successivamente il materiale misto per due volte. Tutti i prodotti sono stati pesati e i dati dei diversi step sono riportati nelle tabelle da 5.7 a 5.10. Nella tabella 5.11 viene riportato invece un riepilogo dei diversi prodotti ottenuti.

Tabella 5.6 Dati delle pesature ottenuti dalla separazione magnetica del campione grossolano ridotto.

<b>Separazione magnetica sul materiale grossolano</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Materiale magnetico</b>	27,01	10,5
<b>Materiale non magnetico</b>	228,66	89,2
<b><i>Totale</i></b>	<b>255,67</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	0,55	0,3
<b>Input</b>	<b>256,22</b>	<b>100,0</b>

Tabella 5.7 Dati delle pesature ottenuti dalla separazione elettrostatica del prodotto non magnetico del campione grossolano ridotto.

<b>1° Separazione elettrostatica</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Materiale conduttivo (C1)</b>	26,42	11,6
<b>Materiale misto (M1)</b>	14,17	6,2
<b>Materiale non conduttivo (NC1)</b>	188,04	82,2
<b><i>Totale</i></b>	<b>228,63</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	0,03	0,0
<b>Input</b>	<b>228,66</b>	<b>100,0</b>

Tabella 5.8 Dati delle pesature ottenuti dalla separazione elettrostatica del prodotto conduttivo della prima separazione elettrostatica (C1).

<b>2° Separazione elettrostatica</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Materiale conduttivo (C2)</b>	21,44	81,2
<b>Materiale misto (M2)</b>	3,59	13,6
<b>Materiale non conduttivo (NC2)</b>	1,35	5,1
<b>Totale</b>	<b>26,38</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	0,04	0,1
<b>Input</b>	<b>26,42</b>	<b>100,0</b>

Tabella 5.9 Dati delle pesature ottenuti dalla separazione elettrostatica del prodotto misto della prima separazione elettrostatica (M1).

<b>3° Separazione elettrostatica</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Materiale conduttivo (C3)</b>	7,94	56,0
<b>Materiale misto (M3)</b>	2,65	18,7
<b>Materiale non conduttivo (NC3)</b>	3,52	24,8
<b>Totale</b>	<b>14,11</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	0,06	0,5
<b>Input</b>	<b>14,17</b>	<b>100,0</b>

Tabella 5.10 Dati delle pesature ottenuti dalla separazione elettrostatica della somma dei prodotti misti della seconda e della terza separazione elettrostatica (M2+M3).

<b>4° Separazione elettrostatica</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Materiale conduttivo (C4)</b>	5,41	86,7
<b>Materiale misto (M4)</b>	0,42	6,7
<b>Materiale non conduttivo (NC4)</b>	0,39	6,2
<b>Totale</b>	<b>6,22</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	0,02	0,4
<b>Input</b>	<b>6,24</b>	<b>100,0</b>

Tabella 5.11 Riepilogo delle frazioni separate dai diversi procedimenti di separazione magnetica ed elettrostatica.

<b>Riepilogo frazioni separate</b>		
	<b>Peso [g]</b>	<b>Percentuale sull'input [%]</b>
<b>Materiale magnetico</b>	27,01	10,5
<b>Materiale conduttivo (C2+C3+C4)</b>	34,79	13,6
<b>Materiale misto (M4)</b>	0,42	0,2
<b>Materiale non conduttivo (NC1+NC2+NC3+NC4)</b>	193,3	75,4
<b>Totale</b>	<b>255,52</b>	<b>-</b>
<b>Perdita</b>	0,70	0,3
<b>Input</b>	<b>256,22</b>	<b>100,0</b>

Per la valutazione della buona riuscita o meno del procedimento di separazione si è deciso di valutare la resa in funzione della quantità percentuale di rame correttamente separato. Questo perché, essendo questo metallo il più prezioso, lo rende il principale obiettivo della separazione. Per quanto riguarda la frazione fine si sono infatti valutate le particelle di rame e dei diversi materiali e si è quindi stabilita la distribuzione percentuale, su base numerica, delle diverse frazioni merceologiche presenti nei prodotti separati. Analogamente si è proceduto per la frazione grossolana dove tramite analisi di immagine o dal vivo si è effettuato un conteggio delle particelle appartenenti alle diverse. Nella tabella 5.12 vengono quindi riportati i dati registrati della distribuzione percentuale, in termini numerici, di rame e dei diversi materiali separati per ogni esperimento tentato.

Tabella 5.12 Riepilogo dei pesi relativi ai diversi esperimenti e delle frazioni dei diversi materiali separati. Il peso del campione iniziale è da intendersi comprensivo delle perdite. (Cu: Rame, Me: metalli escluso il Rame, PC: plastiche e ceramici)

Riepilogo tenori dei diversi materiali per ogni prodotto ottenuto							
Materiale utilizzato	Procedimento di separazione	Peso campione iniziale [g]	Prodotto	Peso del prodotto [g]	Percentuale dei diversi materiali		
					Cu	Me	PC
Triturato fine (<0,5 mm)	Sink-float e flottazione	10,90	Galleggiato	1,53	1%	1%	98%
			Flottato	3,66	90%	2%	8%
			Fondo cella	5,43	15%	10%	70%
	Separazione con tavola a scosse	48,11	Campione F2	20,68	80%	15%	5%
			Campione F3	1,23	1%	98%	1%
			Campione F4	25,63	25%	15%	60%
Triturato grosso (>0,5 mm)	Separazione con tavola a scosse	424,27	Prodotto 1	93,35	20%	65%	15%
			Prodotto 2	138,45	5%	5%	90%
			Prodotto 3	184,52	10%	5%	85%
	Separazione magnetica	256,22	Magnetico	27,01	2%	97%	1%
			Non magnetico	228,66	10%	20%	70%
	Separazione elettrostatica	228,66	Conduttivo	34,79	40%	57%	3%
			Misto	0,42	1%	5%	94%
Non conduttivo			193,3	2%	2%	96%	

Sui prodotti fini separati si è proceduto effettuando un'analisi chimica per identificare i metalli presenti al loro interno. La procedura di sperimentazione adottata prevede di porre a contatto i campioni prelevati con una soluzione composta da 5 ml di HF al 40% e 3 ml di HNO<sub>3</sub> al 65% e riscaldarli successivamente in microonde per una durata pari a 30 minuti per portare la reazione a 350°C. Ciò che si è ottenuto è stato poi raffreddato per due ore e poi filtrato con filtri di carta. Per identificare poi le concentrazioni dei diversi metalli è stato utilizzato uno spettrometro di massa a plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS). Le analisi sono state portate a termine dalla Dott. ssa Giovanna Zanetti presso il Politecnico di Torino. I campioni analizzati sono stati contrassegnati con la dicitura da A1 a A6 e sono riportati nella figura 5.25. Dopodichè, tramite la procedura illustrata, sono state registrate le concentrazioni di 7 elementi principali ovvero: cromo, rame, piombo, ferro, zinco, stagno e antimonio. I risultati ottenuti dalle diverse prove sono stati mediati e riportati nella tabella 5.13. Per una migliore visualizzazione dei dati ottenuti sono stati inoltre realizzati i grafici degli andamenti delle concentrazioni relative ad ogni elemento per i diversi campioni analizzati. I grafici così realizzati sono riportati nelle figure da 5.26 a 5.32. Da tali rappresentazioni si può notare un andamento simile sia per



l'accoppiamento Cr-Fe che per lo Sn-Zn. Questo può quindi significare che le particelle contenute nei campioni siano leghe di tali materiali, motivo per cui il cromo legato al ferro, pur non essendo magnetico, si ritrova nel prodotto ottenuto con la separazione magnetica. La lega Sn-Zn invece viene utilizzata come materiale per la saldatura dei componenti elettronici alla scheda stessa ed è quindi comprensibile trovare questi due elementi accoppiati. Per quanto riguarda il rame si riscontra una elevata concentrazione nel flottato, più alta rispetto a quella misurata nella separazione a scosse. Significa quindi che la separazione attuata con la flottazione ha dato risultati migliori. La concentrazione di piombo invece, risulta essere molto alta nel prodotto di fondo cella, questo perché essendo appunto un metallo ad alta densità rimane sul fondo della cella di flottazione. Il ferro risulta essere molto presente, come c'era da aspettarsi, nel materiale magnetico (F3) portandosi dietro il cromo perché, come già detto, essi formano una lega. Lo zinco e lo stagno invece si ritrovano in alte concentrazioni nel fondo cella e nel prodotto pesante ottenuto con la tavola a scosse (F2). Questo può essere dovuto principalmente al fatto che questi due elementi sono accoppiati a formare una lega che ha una densità elevata. L'antimonio è un elemento che è stato utilizzato negli anni passati come ritardante di fiamma nelle plastiche e di conseguenza si riscontra nei prodotti dove le plastiche sono dominanti quali: galleggiato, leggero della tavola a scosse (F4) e parzialmente anche nel fondo cella.



Figura 5.25 Foto dei campioni di materiale fine utilizzati per le analisi chimiche dei metalli.

Tabella 5.13 Risultati mediati dell'analisi chimica dei metalli effettuati sui campioni fini.

Concentrazioni medie in [g/kg] degli elementi analizzati						
	Galleggiato	Flottato	Fondo cella	Tavola a scosse (F2)	Tavola a scosse (F3)	Tavola a scosse (F4)
	A1	A2	A3	A4	A5	A6
<b>Cromo – Cr</b>	0,04	0,02	0,06	0,07	1,83	0,09
<b>Rame – Cu</b>	315,93	709,08	244,52	383,23	48,02	192,88
<b>Piombo – Pb</b>	1,39	0,96	8,83	2,47	6,30	3,11
<b>Ferro – Fe</b>	0,64	0,45	1,90	2,74	35,38	1,87
<b>Zinco – Zn</b>	0,33	0,27	2,77	3,05	1,95	0,91
<b>Stagno – Sn</b>	2,41	1,62	22,08	28,79	21,12	6,88
<b>Antimonio – Sb</b>	11,25	2,23	4,88	2,57	0	6,84

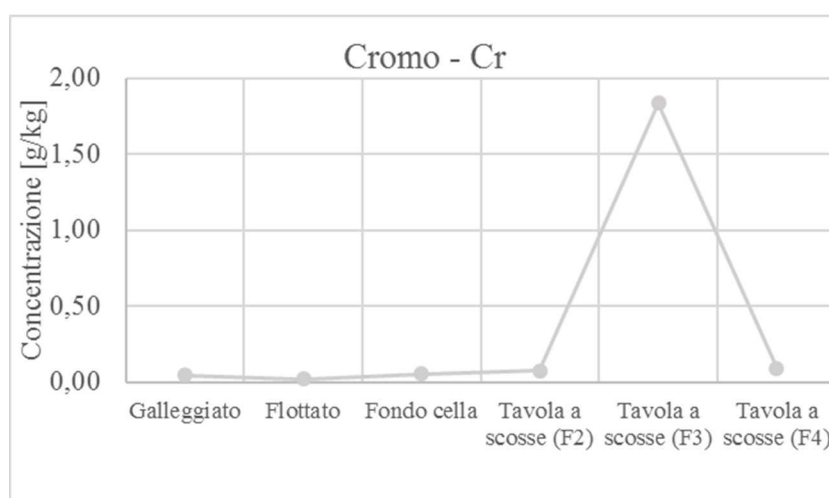


Figura 5.26 Andamento della concentrazione di cromo nei campioni fini.

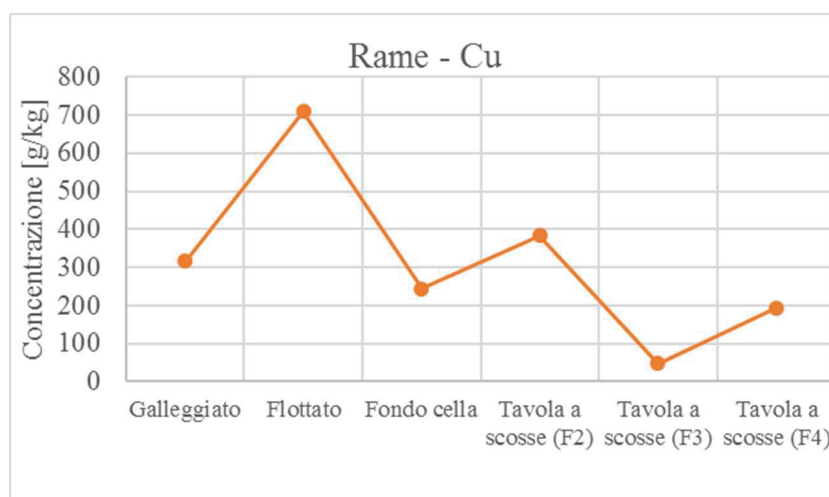


Figura 5.27 Andamento della concentrazione di rame nei campioni fini.

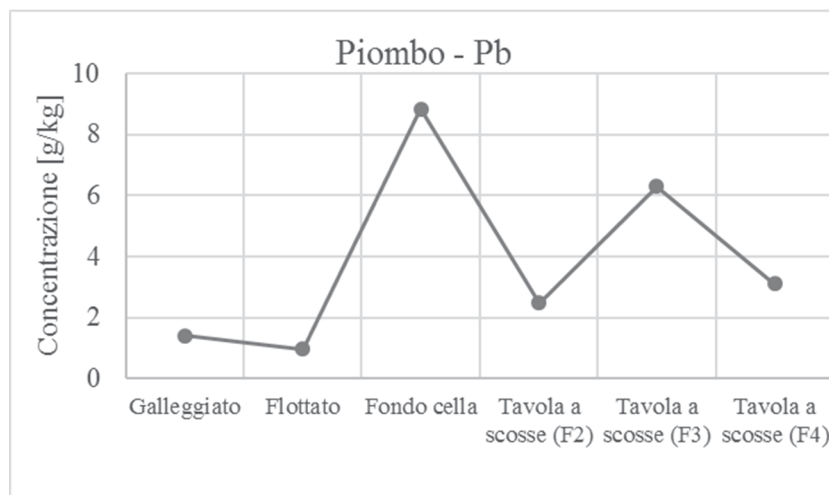


Figura 5.28 Andamento della concentrazione di piombo nei campioni fini.

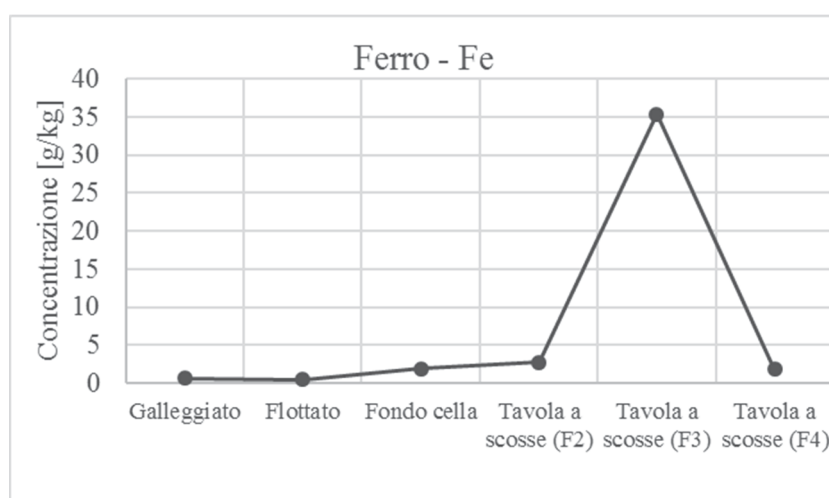


Figura 5.29 Andamento della concentrazione di ferro nei campioni fini.

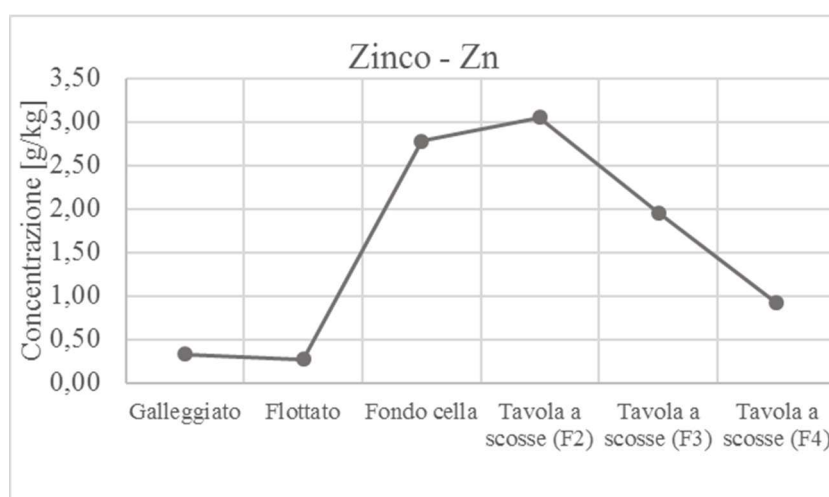


Figura 5.30 Andamento della concentrazione di zinco nei campioni fini.

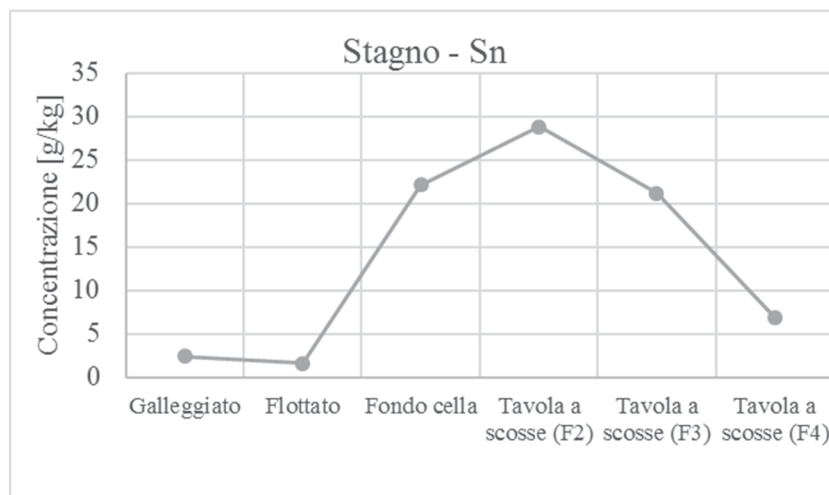


Figura 5.31 Andamento della concentrazione di stagno nei campioni fini.

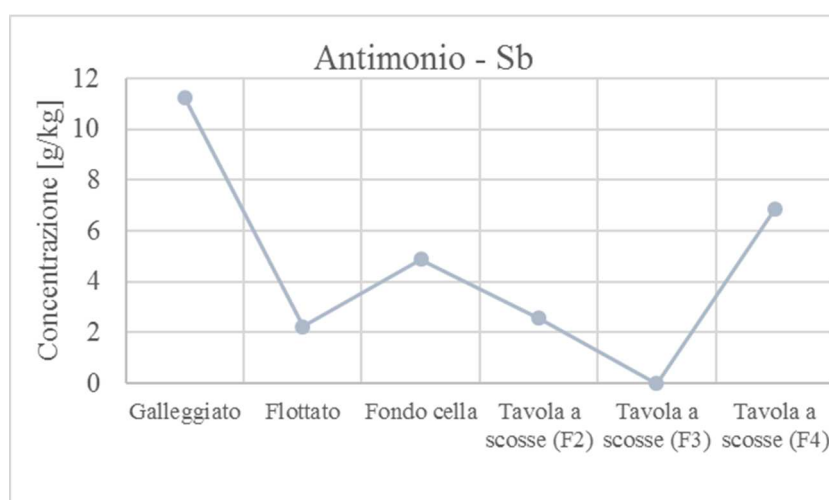


Figura 5.32 Andamento della concentrazione di antimonio nei campioni fini.

## 5.6 Caratterizzazione merceologica

In ultimo si è deciso di provvedere ad una caratterizzazione merceologica dei campioni in modo da identificare le diverse tipologie di materiali. Si è proceduto quindi prelevando dei campioni di materiale metallico e dei campioni di materiale non metallico, ottenuti dalla separazione elettrostatica. Quest'ultimo, essendo composto di particelle di molte colorazioni differenti, è stato suddiviso in quadranti e tramite un conteggio visivo si è ricavato il numero di particelle per ogni tipo di colorazione. In questo modo poi, ricavando il materiale tramite altre tecniche, è stato possibile identificare la composizione percentuale. Nella figura 5.33 è riportato il campione non metallico utilizzati per il riconoscimento merceologico. Il conteggio effettuato e la suddivisione percentuale sono riportati rispettivamente nella tabella 5.14 e nella figura 5.34.

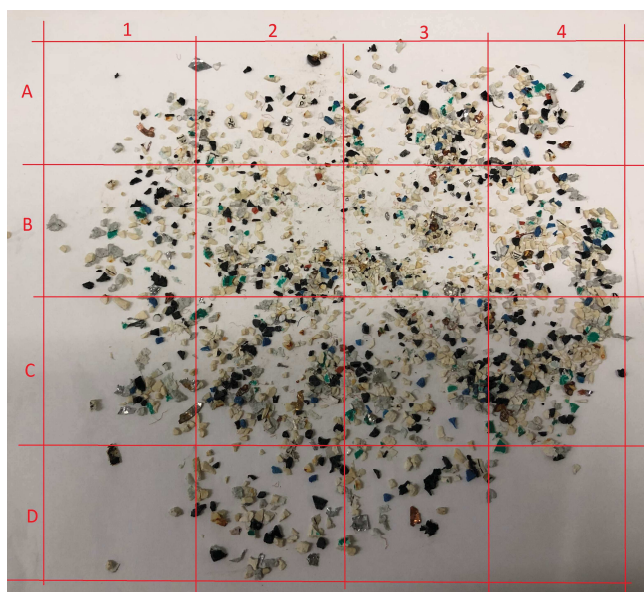


Figura 5.33 Foto del campione di materiale non metallico utilizzato per la caratterizzazione merceologica con la suddivisione in quadranti.

Tabella 5.14 Riepilogo delle frazioni merceologiche identificate nel campione non metallico.

	Peso [g]	Percentuale sul totale [%]	Percentuali relative [%]
<b>Plastiche:</b>			
<b>Bianche</b>	332	44,44	54,07
<b>Verdi</b>	39	5,22	6,35
<b>Rosse</b>	10	1,34	1,63
<b>Blu</b>	19	2,54	3,09
<b>Gialle</b>	17	2,28	2,77
<b>Nere</b>	197	26,37	32,08
<b><i>Totale plastiche</i></b>	<b>614</b>	<b>82,20</b>	<b>100,00</b>
<b>Ceramici:</b>			
<b>Grigi</b>	101	13,52	75,94
<b>Azzurri</b>	15	2,01	11,28
<b>Beige</b>	17	2,28	12,78
<b><i>Totale ceramici</i></b>	<b>133</b>	<b>17,80</b>	<b>100,00</b>
<b>Totale</b>	<b>747</b>	<b>100,00</b>	

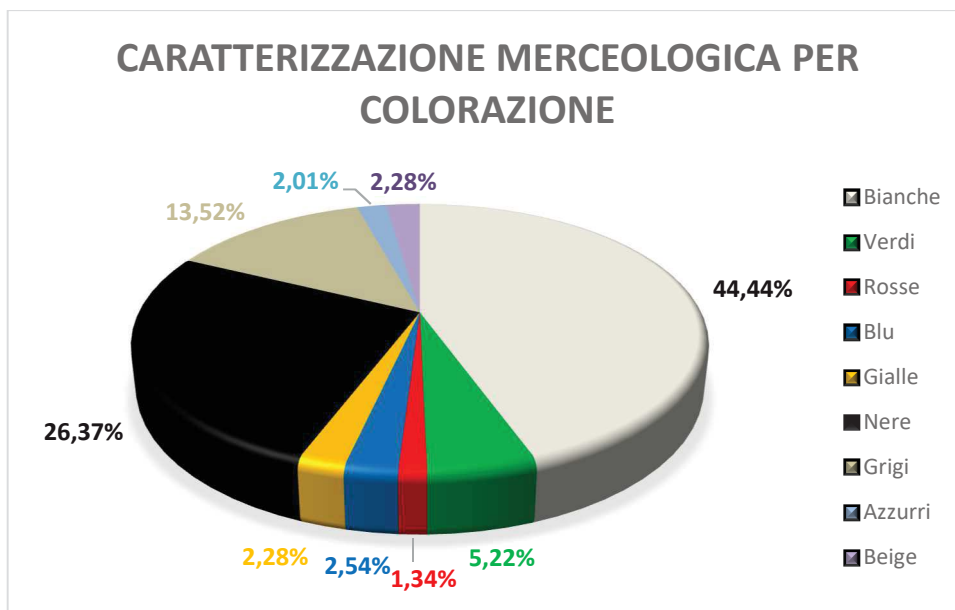


Figura 5.34 Rappresentazione grafica delle percentuali delle diverse colorazioni registrate nei non metalli.

# Conclusioni

Questo campo sicuramente attira su di sé molta attenzione, soprattutto in quest'ultimo periodo, in quanto la ricerca e l'obiettivo sempre più ambizioso è quello del riciclo di tutte le materie prime ai massimi termini. Sono molte le ricerche che sono state e che vengono condotte tuttora per la messa a punto di un sistema, il più possibile semplice ed efficiente, per separare i differenti materiali derivanti da questo particolare rifiuto quali sono le schede elettroniche. Si può dire inoltre che nel prossimo futuro sarà necessario trattare sempre più rifiuti di questo tipo perché, come dimostrato dai dati, la crescita dei quantitativi di RAEE e, di conseguenza, di schede elettroniche è in costante aumento. D'altro canto, il sistema di trattamento utilizzato attualmente non garantisce efficienze particolarmente elevate soprattutto per schede meno "preziose". Proprio per tale motivo si è scelta questa tipologia per ipotizzare un trattamento che fosse facilmente applicabile, conveniente e sostenibile.

Il processo ipotizzato richiede infatti una triturazione e una successiva setacciatura. Il fine può essere trattato efficacemente sia con una separazione per flottazione che tramite una separazione con tavola a scosse. Il materiale grossolano invece risulta ben separato solo con una separazione elettrostatica. Obiettivo di questa separazione è stato quello di recuperare i metalli in particolare il rame. E, come presentato nel capitolo precedente, la percentuale di rame presente nei prodotti delle separazioni per flottazione e per la separazione con tavola a scosse per il fine sono soddisfacenti. Anche riguardo al materiale grossolano, per la separazione elettrostatica, si ha una percentuale di rame ragguardevole intorno al 40% che, può risultare più bassa rispetto alle altre ma soltanto per il fatto che il materiale conduttivo contiene anche alluminio e altre leghe, ugualmente recuperabili. Per quanto riguarda il materiale non metallico invece si può concludere che, essendoci molte tipologie differenti di plastiche e ceramici, il procedimento di riciclo non è particolarmente soddisfacente, in quanto la separazione dei diversi materiali risulta essere difficoltosa. In questo caso quindi l'unica scelta sarebbe un recupero energetico tramite incenerimento oppure una molto meno opportuna scelta di smaltimento in discarica. In forza di queste ultime considerazioni, il processo più opportuno che può essere ipotizzato prevede di eseguire le operazioni di pretrattamento come: asportazione alimentatore e condensatori elettrolitici, triturazione con griglia di passaggio pari a 4,5 mm e setacciatura

con sbarramento a 0,5 mm. Dopodichè il materiale fine, ovvero minore di 0,5 mm, si ipotizza di trattarlo con un procedimento analogo al sink-float e una successiva flottazione come riportato nella figura 5.5. La frazione grossolana invece, si ipotizza di trattarla utilizzando una separazione magnetica e una successiva separazione elettrostatica in più fasi come presentato nella figura 5.20. In questo modo è possibile ottenere dei prodotti concentrati in grado di essere recuperati come materie prime seconde. Analizzando i risultati si è inoltre identificata la composizione percentuale relativa alle polveri e al materiale grossolano riportata nella tabella 6.1. Come si può dedurre da tale tabella la composizione media percentuale del campione differisce da quella ipotizzata precedentemente nel paragrafo 3.2 dove si riportava una composizione media delle schede composta da circa il 40% di metalli, 30% di plastiche e 30% di ceramici. Questo è dovuto al fatto che, come pretrattamento, si sono asportati gli alimentatori dalle schede complete e, essendo composti perlopiù da rame e ferro, modificano le percentuali in quanto il peso di tali componenti rappresenta circa il 75% del peso della scheda iniziale. Riportando infatti i pesi degli alimentatori e dei relativi materiali con le composizioni percentuali i dati coincidono con buona approssimazione. Si è ricavato inoltre il recupero dei diversi prodotti in percentuale sul materiale in input al trattamento. I dati ricavati sono presentati nella tabella 6.2 e sono stati ottenuti prendendo in considerazione i risultati riportati nelle tabelle 5.3 e da 5.6 a 5.12. Come si può notare da tale tabella il rame può essere recuperato facilmente dalle polveri tramite la flottazione mentre si recupera bene dalla frazione grossolana tramite separazione elettrostatica. Per quanto riguarda gli altri metalli si ha un buon recupero utilizzando la separazione magnetica per il ferro e le sue leghe mentre si può utilizzare sempre la separazione elettrostatica per i metalli non magnetici, come ad esempio l'alluminio, che possono essere separati ulteriormente tramite una separazione per gravità in tavola densimetrica. Le plastiche e i ceramici si concentrano molto nel materiale non conduttivo e nel fondo cella proprio a causa delle loro proprietà fisiche. L'ulteriore separazione dei diversi tipi di plastiche per una ulteriore valorizzazione risulta essere molto complicata e al momento non conveniente. L'unico destino possibile sembra essere dunque la valorizzazione energetica anche in aggiunta ai materiali ceramici, essendo questi inerti, diventando direttamente parte delle ceneri a fine valorizzazione.

Tabella 6.1 Riepilogo delle composizioni percentuali dei diversi campioni analizzati. Il peso del campione è da intendersi comprensivo di perdite. (PC: plastiche e ceramici)

<b>Composizione percentuale dei campioni analizzati</b>				
<b>Materiale analizzato</b>	<b>Peso campione [g]</b>	<b>Composizione percentuale</b>		
		<b>Rame</b>	<b>Metalli</b>	<b>PC</b>
<b>Frazione fine (&lt;0,5 mm)</b>	10,90	40%	6%	54%
<b>Frazione grossolana (&gt;0,5 mm)</b>	256,22	7%	20%	73%
<b>Media pesata</b>	267,12	8,5%	19%	72,5%



Tabella 6.2 Riepilogo dei pesi relativi ai diversi esperimenti e delle percentuali di recupero delle diverse materie prime seconde. Il peso del campione iniziale è da intendersi comprensivo delle perdite. (Cu: Rame, Me: metalli escluso il Rame, PC: plastiche e ceramici)

<b>Riepilogo percentuale di recupero dei diversi materiali per ogni prodotto</b>							
<b>Materiale utilizzato</b>	<b>Trattamento</b>	<b>Peso campione iniziale [g]</b>	<b>Prodotto</b>	<b>Peso del prodotto [g]</b>	<b>Recupero dei diversi materiali</b>		
					<b>Cu</b>	<b>Me</b>	<b>PC</b>
<b>Triturato fine (&lt;0,5 mm)</b>	Sink-float e flottazione	10,90	Galleggiato	1,53	0%	2%	27%
			Flottato	3,66	80%	12%	5%
			Fondo cella	5,43	20%	86%	68%
<b>Totale relativo al singolo materiale</b>					100%	100%	100%
<b>Triturato grosso (&gt;0,5 mm)</b>	Separazione magnetica	256,22	Magnetico	27,01	3%	52%	0%
	Separazione elettrostatica		Conduttivo	34,79	76%	40%	1%
			Misto	0,42	-	-	-
			Non conduttivo	193,3	21%	8%	99%
<b>Totale relativo al singolo materiale</b>					100%	100%	100%

In conclusione, si può sostenere che un procedimento di riciclo per le schede elettroniche poco impattante e sostenibile esiste ma l'applicabilità dipende molta dalla convenienza economica. In quanto sarebbe necessario effettuare un'analisi dei costi per verificare l'effettiva sostenibilità economica di tale procedimento. Si può inoltre aggiungere che il materiale plastico/ceramico potrebbe essere oggetto di ulteriori studi per identificare un procedimento di riciclo ad hoc in modo da rendere ancora più sostenibile l'utilizzo e il riciclo delle schede elettroniche a fine vita.

# Bibliografia

- A. Hubau et al.; Recycling-oriented methodology to sample and characterize the metal composition of waste Printed Circuit Boards; *Waste Management* 91 (2019) 62-71;
- L. Harue et al.; Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers; *Waste Management* 31 (2011) 2553-2558;
- A. Kumar et al.; Characterization of the non-metal fraction of the processed waste printed circuit boards; *Waste Management* 75 (2018) 94-102;
- R. Cayumil et al.; High temperature investigations on optimizing the recovery of copper from waste printed circuit boards; *Waste Management* 73 (2018) 556-565;
- X. Wang, G. Gaustad; Prioritizing material recovery for end-of-life printed circuit boards; *Waste Management* 32 (2012) 1903-1913;
- Y. Tsunazawa et al.; Investigation and evaluation of the detachment of printed circuit boards from waste appliances for effective recycling; *Waste Management* 78 (2018) 474-482;
- C. Guo et al.; Liberation characteristic and physical separation of printed circuit board (PCB); *Waste Management* 31 (2011) 2161-2166;
- J. Ruan et al.; Key factors of eddy current separation for recovering aluminum from crushed e-waste; *Waste Management* 60 (2017) 84-90;
- M. Sarvar et al.; Characterization and mechanical separation of metals from computer Printed Circuit Boards (PCBs) based on mineral processing methods; *Waste Management* 45 (2015) 246-257;
- L. Meng et al.; Concentration of precious metals from waste printed circuit boards using supergravity separation; *Waste Management* 82 (2018) 147-155;
- L. Meng et al.; Separation of metals from metal-rich particles of crushed waste printed circuit boards by low-pressure filtration; *Waste management* 84 (2019) 227-234;
- J. He, C. Duan; Recovery of metallic concentrations from waste printed circuit boards via reverse floatation; *Waste Management* 60 (2017) 618-628;
- R.Flores-Campos et al.; Study of the physicochemical effects on the separation of the non-metallic fraction from printed circuit boards by inverse flotation; *Waste Management* 69 (2017) 400-406;

- G. Zhang et al.; Removing inorganics from nonmetal fraction of waste printed circuit boards by triboelectric separation; Waste Management 49 (2016) 230-237;
- Joint Research centre; Critical raw materials and the circular economy (2017);
- Circular Economy Network e ENEA; Rapporto sull'economia circolare in Italia (2019);
- [www.cdcrree.it](http://www.cdcrree.it) (accesso il giorno 17/08/2019);
- [www.reteambiente.it](http://www.reteambiente.it) (accesso il giorno 18/08/2019);
- [www.trollsystem.com](http://www.trollsystem.com) (accesso il giorno 19/08/2019);
- [www.fadel.net](http://www.fadel.net) (accesso il giorno 22/08/2019);