

Il riciclo meccanico dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche: una sfida tecnologica

Giuseppe Bonifazi, Riccardo Gasbarrone, Silvia Serranti

Abstract

MECHANICAL RECYCLING OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC DEVICES: A TECHNOLOGICAL CHALLENGE. Due to the technological progress, electronics became more and more part of our lifestyle. Alongside the continuous progress, the volume of electric and electronic waste (WEEE) steady arising. The WEEE, because of a large number of hazardous substances in various equipment, such as lead in printed circuit boards and cadmium in semiconductor chips, could cause serious environmental problems if not properly handled at the end of their life cycle (i.e. recycling and/or disposed-off). However, a significant amount of valuable materials is contained in WEEE, such as metals, high-quality plastic and other materials/elements that can be profitably recovered. WEEE recycling is considered a real opportunity for contrasting an inbound threat for the Industry and for the Environment. For these reasons it is thus essential to improve the WEEE recycling process, both from an economic and an environmental point of view. These two goals can be reached adopting new, and up-to-date, processing/recycling strategies based on innovative technologies allowing to implement more environmentally friendly and economically sustainable processing.

KEYWORDS: waste electrical and electronic equipment (WEEE), recycle, mechanical treatment, quality control.

1. La sfida dei rifiuti elettronici

L'elettronica è ormai diventata, grazie al continuo progresso tecnologico, parte integrante nella nostra vita e la ritroviamo in molti oggetti di uso quotidiano, si pensi ad esempio a televisori LCD, agli smartphone, alle macchine fotografiche digitali, agli elettrodomestici, alle autovetture, ecc. Tali prodotti hanno contribuito e tuttora continuano a contribuire al miglioramento del nostro tenore di vita e al nostro benessere.

Il settore dell'industria elettronica è considerevolmente cresciuto negli ultimi anni, generando un gran numero di posti di lavoro, promuovendo lo sviluppo di nuove tecnologie e allo stesso tempo, richiedendo una elevata domanda di materie prime, alcune di esse scarse, di difficile reperimento o addirittura rare.

Di pari passo con il continuo progresso tecnologico, si è altresì accresciuto il volume di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche guaste, inutilizzate, o obsolete: i cosiddetti RAEE (i.e. rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche). Alcune stime indicano che annualmente sono generate circa 40 milioni di tonnellate di rifiuti elettronici, che sono all'incirca il 5% dei rifiuti solidi presenti nel mondo. Uno studio effettuato da Greenpeace ha stimato che nel mondo, annualmente, sono generati tra le 20 e le 50 milioni di tonnellate di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (VEIT ET AL. 2015).

Nella sola Unione Europea, nel 2005 sono stati prodotti 8,3 – 9,1 milioni di tonnellate di RAEE. Spesse volte tali apparecchiature giunte a fine vita vengono trattate in modo non corretto: attualmente circa il 90% dei RAEE viene portato in discarica, incenerito oppure recuperato senza alcun pre-trattamento.

I RAEE, in relazione all'elevato numero di sostanze pericolose presenti, come il piombo nelle schede dei circuiti stampati ed il cadmio nei chip semiconduttori, possono essere fonte, se non adeguatamente riciclati o smaltiti, di gravi problemi ambientali. D'altro canto essi contengono quantità significative di materiali pregiati, come metalli, circa il 66% (rame, piombo, ferro, alluminio e zinco), metalli preziosi (i.e. oro, platino, palladio e argento), materiali plastici di alta qualità (19%) ed altri componenti (i.e. terre rare) che, per caratteristiche e composizione, possono essere proficuamente recuperati e riutilizzati. Per queste ragioni è di estrema importanza lo sviluppo e l'applicazione di adeguate strategie di trattamento finalizzate al raggiungimento di obiettivi positivi sia in termini ambientali che economici. Tali obiettivi non possono che essere raggiunti attraverso l'implementazione di processi di riciclo ecocompatibili ed economicamente sostenibili e che partano da una caratterizzazione attenta ed approfondita dei "costituenti" di tale tipologie di prodotti (HU ET AL. 2011).

2. La gestione dei RAEE

Affrontare una qualunque problematica di riciclo di prodotti e/o materiali significa, in prima battuta, operare una valutazione, sia qualitativa che quantitativa, dei flussi in alimentazione ai potenziali processi di recupero e/o di riciclo, nonché il quadro normativo di riferimento all'interno del quale dover operare. Entrambi questi aspetti ben si collocano all'interno del concetto di bioregione,

intesa come luogo nel quale vengono consumati dei beni, in questo caso i RAEE, il cui recupero deve essere realizzato nel rispetto di politiche ambientali e sociali in grado di chiudere in maniera efficiente e virtuosa il ciclo di tale tipologia di rifiuti.

2.1 *La produzione dei RAEE*

Uno studio effettuato dal Centro Coordinamento RAEE nel 2015 (CENTRO COORDINAMENTO RAEE 2015) ha stimato la produzione annuale pro-capite di rifiuti RAEE pari a 12 kg. Questo significa che annualmente in Italia si producono circa settecentomila tonnellate di RAEE. Tale cifra è destinata a crescere nei prossimi anni, in relazione alla continua ed inesorabile commercializzazione di nuovi prodotti elettronici (si pensi ai televisori, cellulari e computer di nuova generazione) con sempre migliori caratteristiche e prestazioni. Il ciclo di vita di molti prodotti elettronici si è notevolmente ridotto, ciò in relazione ai sempre maggiori avanzamenti dell'industria elettronica dal punto di vista delle tecnologie di produzione, dei design più appetibili per i consumatori, per motivi di marketing e di compatibilità. A titolo di esempio, il ciclo di vita medio di un computer nuovo è passato da 4.5 anni nel 1992 a 2 anni nel 2005 e sta ulteriormente decrescendo (CENTRO COORDINAMENTO RAEE 2015).

A fronte del continuo aumento di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche è stato sviluppato un vasto quadro normativo, a partire dalla raccolta fino al recupero di materiali o al loro smaltimento in discarica.

In Europa, un gran numero di documenti legislativi sono stati redatti e / o implementati prevedendo che i produttori e le altre parti interessate avrebbero adottato un approccio ambientale al design, valutando nel contempo l'impatto ambientale dei loro prodotti nell'intero ciclo di vita. I rifiuti elettronici sono regolamentati dalla Direttiva WEEE, ovvero "*Waste of electric and electronic equipment*", recepita in Italia dal Decreto "RAEE" (EUR-LEX, 2017). La Direttiva a livello europeo, che è stata emanata nel 2002, ha imposto ai Paesi dell'Unione la raccolta differenziata di questa particolare categoria di rifiuti, definendo come obiettivo al 31 dicembre 2015 che il tasso medio di raccolta differenziata fosse di almeno 4 kg l'anno per abitante relativamente ai RAEE provenienti dai nuclei domestici (LONGONI, 2015). Dal 2016, con la Direttiva RAEE (direttiva 2012/19/UE), l'obiettivo di raccolta è stato impostato pari al 45% calcolato sulla base del peso totale di RAEE raccolti in un dato anno dallo Stato membro interessato ed espresso come percentuale del peso medio delle apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) immesse sul mercato in detto Stato membro nei tre anni precedenti e del 65% dell'immesso (Tab. 1), calcolato con lo stesso criterio, a partire dal 2019 (EUR-LEX 2017; SALVI 2010).

Tab. 1 - Dati relativi a raccolta e a volume immesso si apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) di Italia, Francia e Germania (Fonte: CENTRI DI COORDINAMENTO RAEE, 2015).

	Popolazione	Quantitativo Immesso		Quantitativo Raccolto		Raccolto vs Immes- so
		Tons	kg pro capi- te	Tons	kg pro capi- te	
Italia	60782668	716835	11,79	25078 0	4,13	0,35
Francia	66917964	139133 3	20,79	52685 5	7,87	0,38
Germania	81200000	141347 9	17,41	57467 4	7,08	0,41
Inghilter- ra	64597000	145735 4	22,56	50585 4	7,83	0,35

2.2 La situazione in Europa

Prima di prendere in esame la raccolta dei RAEE in Italia, è interessante fornire qualche dato circa il quantitativo di AEE immesse in media annualmente sul mercato in alcuni paesi europei. Tenendo conto delle differenze socio-culturali e della numerosità della popolazione, si evince che il quantitativo in Kg di AEE immesse dichiarati da Francia e Inghilterra siano poco meno del doppio del quantitativo dell'Italia. Gli AEE immessi dichiarati dalla Germania sono superiori del 50% rispetto a quelli dell'Italia. Per quanto riguarda la raccolta pro-capite (2014), l'Italia con i suoi 4,13 kg/ab risulta essere notevolmente al di sotto della media rispetto a Francia (7,87 kg/ab), Inghilterra (7,83 kg/ab) e Germania (7,08 kg/ab). Considerando il target fissato per il 2016, ovvero il 45% delle AEE immesse sul mercato, si ha che l'Italia continua ancora ad essere lontana dall'obiettivo europeo con circa il 35%, pari all'Inghilterra, dato che risulta inferiore rispetto a quello della Francia (38%) e della Germania (41%).

L'Europa, nei riguardi della produzione di RAEE, può essere considerata come un insieme di macro-bioregioni (i.e. scala nazionale), ciascuna caratterizzata da specifici attributi economici, politici, ambientali e territoriali. Tali attributi, definibili a livello di macro scala, sono a loro volta la risultante prodotta dalle diverse bioregioni, definibili e/o individuabili, all'interno del singolo paese europeo. Seguendo tale approccio risulta chiara la difficoltà di produrre regole di validità generale (i.e. leggi e/o direttive europee) per la gestione dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) e che possano altresì contribuire a generare comportamenti condivisi nei diversi paesi, al fine di perseguire obiettivi di auto-sostenibilità, di “*self-reliance growth*” e di miglioramento della qualità ambientale, in relazione ai diversi ambiti territoriali, alle diverse culture ed ai diversi contesti ambientali.

2.3 La situazione in Italia

In Italia i RAEE vengono gestiti dai Sistemi Collettivi, che sono obbligatori e riuniscono i produttori e gli importatori di tali apparecchiature. Se si effettua un confronto tra i dati provenienti dagli impianti di trattamento e quelli forniti dai Sistemi Collettivi (CENTRO COORDINAMENTO RAEE 2015), si possono effettuare alcune considerazioni sulla presenza di flussi di RAEE che giungono direttamente agli impianti di trattamento senza avvalersi del sistema organizzato dal Centro di Coordinamento RAEE (LONGONI, 2015) (Tab. 2).

Da alcune stime si evince che esistono quantitativi non tracciati da parte degli impianti autorizzati che sfuggono al sistema di gestione regolato dalla legge e vanno ad alimentare il traffico illegale dei rifiuti. Il quantitativo stimato è di circa 500.000 tonnellate: una vera e propria fonte di inquinamento ambientale e di distorsione economica (CENTRO COORDINAMENTO RAEE 2015). Per quanto riguarda il trattamento, la migliore strada per gestire questi rifiuti è quella che persegue il recupero ed il riciclo dei materiali presenti al loro interno.

Tab. 2 – Raccolta RAEE in Italia, secondo i cinque raggruppamenti (Fonte: CENTRI DI COORDINAMENTO RAEE 2015).

Raggruppamento	Raccolta 2013 [kg]	Raccolta 2014 [kg]	Raccolta 2015 [kg]	Raccolta 2015 vs Raccolta 2014
R1 Freddo e Clima (frigoriferi, condizionatori, congelatori, ecc.)	62158612	64024226	70415437	0,0998
R2 Grandi bianchi (lavatrici, lavastoviglie, cappe, forni, ecc.)	56156357	57949079	68767964	0,1867
R3 TV e monitor (televisori e schermi a tubo catodico, LCD o al plasma, ecc.)	68879875	68512035	65181725	-0,0486
R4 Piccoli elettrodomestici (telefonini, computer, stampanti, giochi elettronici, apparecchi illuminanti, ventilatori ecc.)	37620439	39957152	43439076	0,0871
R5 Sorgenti luminose (lampadine a basso consumo, lampade al neon, lampade fluorescenti, ecc.)	1115935	1274539	1449714	0,1374
Totale	225931218	231717031	249253916	0,0757

La composizione chimico-fisica di un RAEE è estremamente varia. Essa è fortemente influenzata dal tipo di apparecchiatura, dall'anno di produzione, dall'azienda manifatturiera, dal paese d'origine, ecc. Polimeri, ceramiche e metalli possono essere recuperati dai RAEE. I metalli, in relazione al loro valore

economico, sono quelli che suscitano maggiore interesse. Essi sono presenti in varie quantità, in forma pura o in lega. Le schede dei circuiti stampati sono i componenti di maggiore interesse in quanto vengono considerate delle vere e proprie materie prime secondarie, poiché ricche di rame e metalli preziosi come oro, argento, e palladio. Per esempio, un singolo cellulare può contenere elevate concentrazioni di oro (24 mg), argento (250 mg) e palladio (9 mg). (VEIT ET AL. 2015). Va comunque tenuto presente che ai valori analitici degli elementi presenti in un certo RAEE non sempre è associabile una pari capacità di recupero, in termini di processi applicabili, sia in relazione ai costi, che ad aspetti di tipo chimico-fisico che, di fatto, ne ostacolano l'estrazione e la successiva separazione.

Una categoria abbastanza problematica dei RAEE, soprattutto dal punto di vista del trattamento è rappresentata dai piccoli elettrodomestici (Categoria R4). Per tale categoria è possibile rilevare come la raccolta al 2015, si sia attestata intorno ad un valore di circa 44 milioni di chilogrammi (Tab. 2) e rappresenta il 17,43%. Quantitativo minore rispetto alle altre categorie, non considerando la categoria relativa alle sorgenti luminose. Per interpretare tali dati è però necessario effettuare alcune considerazioni. La raccolta dei RAEE non avviene in modo omogeneo per ciascun Raggruppamento. Ciò dipende dal comportamento del cittadino e dalla tipologia di AEE. Il tasso di ritorno per il Raggruppamento 4 (Piccoli Elettrodomestici) risulta essere il più basso in assoluto tra tutte le tipologie di RAEE, con un tasso pari al 14,60% (Tab. 3). Il valore di questo dato è influenzato dal fatto che spesso a causa delle ridotte dimensioni (i.e. telefoni cellulari), le apparecchiature malfunzionanti appartenenti a tale Raggruppamento vengono gettate in contenitori per la raccolta indifferenziata oppure tenute in casa anche dopo la loro sostituzione (CENTRO COORDINAMENTO RAEE 2015).

Tab. 3 – Raccolta ed immesso per i raggruppamenti R1, R2 e R3 (Fonte: CENTRI DI COORDINAMENTO RAEE 2015).

	R1 - Freddo e Clima	R2 - Grandi bianchi	R4 - Piccoli elettrodomestici
Imnesso [kg]	161887412	288111966	297521662
Raccolta [kg]	70415437	68767964	43439076
Tasso	0,44	0,24	0,15

2.4 La situazione nel Lazio

In Italia i Centri di Raccolta (CdR) sono realizzati e gestiti dai Comuni e dalle Aziende abilitate alla gestione dei RAEE. Tutti i Cittadini possono

consegnare gratuitamente i RAEE domestici presso i CdR.

Nel Lazio, secondo le statistiche sono presenti circa 126 Comuni con centri di raccolta RAEE. Tali centri sono distribuiti prevalentemente nella provincia di Roma e Viterbo. In provincia di Latina il numero dei CdR è pari a 23 (Tab. 4). I Comuni con CdR in Provincia di Latina sono 18 (COMUNIVERSO 2017), mentre nell'areale della bioregione pontina (comprese le zone di transizione) sono racchiusi 15 Comuni con CdR. Nel 2015, a confronto con gli anni passati, la Regione Lazio mantiene il secondo posto per raccolta complessiva nell'area del Centro Italia, totalizzando 17.183.711 kg di RAEE. Il dato di raccolta maggiore è rappresentato dalla Provincia di Roma, a cui seguono Viterbo e Latina con oltre 1 milione di kg di RAEE. Diversamente, Frosinone e Rieti sono ancora distanti dalla media nazionale di raccolta (Tab. 5 e Fig. 1).

Tab. 4 - Numero dei Centri di Raccolta per provincia nella regione Lazio (Fonte: CENTRI DI COORDINAMENTO RAEE 2015).

Provincia	CdR (Centri di Raccolta)	CdC (altri Centri di Conferimento)	Totale
Frosinone	27	1	28
Latina	23	5	28
Rieti	13	0	13
Roma	81	30	111
Viterbo	42	0	42
Totale	186	36	222

Tab. 5 - Dati relativi la raccolta RAEE per raggruppamenti nel Lazio (Fonte: CENTRI DI COORDINAMENTO RAEE, 2015).

Provincia	Raccolta [kg]					Totale complessivo
	R1 (Freddo e clima)	R2 (Grandi bianchi)	R3 (TV e monitor)	R4 (Piccoli elettrodomestici)	R5 (Sorgenti luminose)	
Frosinone	344352	50256	397883	91844	4952	889287
Latina	466650	193789	476680	176127	7980	1321226
Rieti	141473	100120	160190	56765	930	459478
Roma	3676300	3956936	3401314	1857176	79859	12971585
Viterbo	486730	197187	599788	251955	6475	1542135
Totale	5115505	4498288	5035855	2433867	100196	17183711

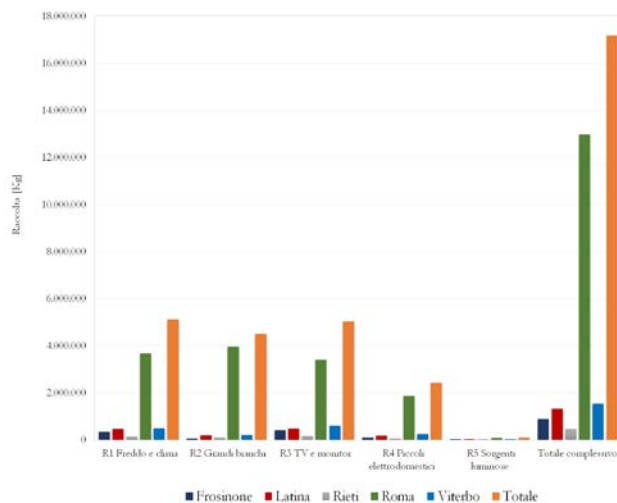


Fig. 1 - Raccolta RAEE per raggruppamenti nel Lazio (Fonte: CENTRO DI COORDINAMENTO RAEE 2015).

Altro dato importante da prendere in considerazione è quello riguardante la media regionale di raccolta pro capite, che è di circa 2,92 kg per abitante: valore molto inferiore rispetto alla media nazionale, che si attesta attorno ai 4,13 kg per abitante (Tab. 6).

Per quanto riguarda gli impianti di trattamento, i Sistemi Collettivi, ai fini del trattamento dei RAEE di loro competenza, hanno l'obbligo di rivolgersi ai soli impianti accreditati (CENTRO COORDINAMENTO RAEE 2015).

Tab. 6 - Dati regionali sulla raccolta RAEE (Fonte: CENTRO DI COORDINAMENTO RAEE 2015).

Totale kg RAEE raccolti:	17.183.711
Media pro capite (kg/ab):	2,92
Variazione raccolta 2015/2014:	11,84%
Popolazione totale:	5.892.425
Centri di Raccolta:	186
Altri centri:	36
Centri di conferimento / 100.000 ab.:	3

Nel centro Italia ci sono circa 121 impianti, aventi una capacità di recupero di circa 1,9 Mton all'anno, ove si effettuano attività di recupero e riciclo di metalli (autodemolitori, rottamazione, RAEE) e 28 impianti, con capacità di circa 0,49 Mton. Gli impianti registrati nella provincia di Latina sono otto, mentre sul territorio della Bioregione Pontina sono presenti sette impianti

registrati. Gli impianti per i quali è stata rilasciata da parte di un soggetto di riconosciuta autorità una attestazione della capacità di operare in un determinato contesto sociale (i.e. impianti accreditati) sono sul territorio 2 (Fig.2).



Fig. 2 - Impianti accreditati sul territorio dell'Agro Pontino (Fonte: CENTRO DI COORDINAMENTO RAEE 2017).

3. L'importanza del trattamento meccanico

Il trattamento dei RAEE, finalizzato prevalentemente al recupero delle frazioni di metalli nobili, è solitamente articolato in una prima fase di trattamento meccanico, una seconda fase di trattamento termico ed una terza fase di trattamento chimico ad umido (lisciviazione) dei prodotti (ceneri) risultanti dalla combustione. In taluni casi dopo il trattamento meccanico si applicano direttamente processi di lisciviazione.

Il trattamento meccanico può essere di fatto considerato come una prima fase di separazione. Esso fa ricorso alle tecniche di trattamento solitamente utilizzate nell'industria delle materie prime (i.e. grezzi minerali). Questa tipologia di valorizzazione può essere vista come un pretrattamento (i.e. pre-concentrazione) finalizzato alla separazione dei materiali di interesse. Di questo processo fanno parte: la comminuzione, la classificazione e la separazione. La frazione metallica ottenuta dopo la fase di lavorazione meccanica viene inviata ad una linea di trattamento idro-metallurgico, elettrometallurgico e/o pirometallurgico. Mentre, le frazioni ceramiche e polimeriche vengono inviate a linee di trattamento specifiche (VEIT 2015, pp. 13-16) (Fig.3).



Fig. 3 - Esempio di un campione di RAEE (i.e. particelle comprese nell'intervallo dimensionale tra 2 e 0.5 mm) risultante da azioni di comminuzione e successiva classificazione.

L'introduzione di un trattamento meccanico applicato in maniera sistematica ai RAEE rappresenta un aspetto importante, soprattutto in un'ottica di valorizzazione di questa tipologia di prodotti legata a specifiche peculiarità territoriali. I RAEE prodotti in una grande città sono diversi, sia in termini di qualità che di quantità, da quelli prodotti in aree agricole e/o industriali e, con riferimento a quest'ultime, in relazione alle tipologie di produzione degli impianti. Su tali basi si possono definire, come già in parte evidenziato, delle bioregioni la cui peculiarità è rappresentata dal tipo di RAEE prodotti e dalle modalità con le quali avviene la loro "pre-concentrazione meccanica".

L'applicazione di logiche comuni e condivise di trattamento meccanico, finalizzato all'ottenimento di prodotti pre-concentrati da avviare alle successive fasi di trattamento termico e/o chimico, consente di stabilire relazioni tra i diversi ambiti territoriali e di definire logiche operative comuni tecnologicamente integrate. Ciò si traduce nel produrre processi auto-sostenibili e nello sviluppare sistemi di imprenditorialità diffusa generata in un'ottica di reciprocità (i.e. processi meccanici diversi associati a diversi flussi di alimentazione che generano prodotti finali diversi) legati alla necessità di integrare i prodotti finali in maniera tale da generare flussi costanti di prodotti di qualità, sia in termini quantitativi che qualitativi, da avviare al recupero definitivo.

3.1 La pre-concentrazione meccanica

Il riciclo meccanico dei RAEE è importante, sia da un punto di vista strettamente economico che energetico, soprattutto se finalizzato alla realizzazione di pre-concentrati aventi caratteristiche di composizione ed attributi morfologi-

ci e morfometrici diversi, per i quali è necessario mettere a punto specifiche azioni di trattamento chimico-fisico. Un tale approccio produce, come risultato, azioni di trattamento idro-metallurgico, elettro-metallurgico e piro-metallurgico più efficienti e concorrenti all'ottenimento di maggiori recuperi e minori impatti ambientali legati al processo.

Il trattamento finalizzato alla pre-concentrazione meccanica dei flussi, se confrontato con i processi chimici applicati “tout court”, risulta quindi essere una soluzione di tipo *eco friendly*, grazie ad un uso più specifico e sicuramente in quantitativi ridotti, di sostanze chimiche, per i cui prodotti di scarto deve comunque essere effettuato lo smaltimento, con inevitabili costi ed impatti ambientali.

3.2 La caratterizzazione dei RAEE

Una caratterizzazione approfondita dei RAEE rappresenta il primo passo da sviluppare al fine di rilevare le possibilità di recupero di un metallo *target* (VEIT E MOURA BERNARDES 2015).

A partire da una caratterizzazione approfondita e di tipo *recycling oriented* del materiale, si può perseguire l'ottimizzazione dell'intero sistema del processo di riciclo. L'obiettivo della caratterizzazione è, infatti, proprio quello di indagare le caratteristiche fisiche, chimiche e morfologiche del prodotto in esame, al fine di scegliere la strada più adatta ai fini del recupero. Diverse ed articolate possono essere le tecniche e le strategie di caratterizzazione cui fare ricorso.

Tramite analisi di immagini acquisite con stereo microscopio digitale si può effettuare lo studio della forma delle particelle costituenti il campione da analizzare, attributi questi che influenzano la scelta delle condizioni di separazione da utilizzare a parità di processo.

La conduzione di analisi granulometriche sui prodotti della comminuzione, con o senza il supporto di indagini microscopiche quali quelle citate, può fornire utili indicazioni ai fini della pre-concentrazione fisica o per l'utilizzo di tecniche di lisciviazione chimica.

La composizione dei materiali, e dei loro attributi tessiturali, possono essere acquisite mediante tecniche innovative basate su analisi di immagine iperspettrale (HSI) (SERRANTI ET AL. 2010, combinate con tecniche chemiometriche, integrate da analisi alla spettroscopia Raman, alle fluorescenza X (XRF) o utilizzando tecniche ai raggi X, sia di tipo classico (microscopia elettronica e micro-analisi), che innovativo quale la *Dual Energy X-ray Transmission (DE-XRT)*(WIRTH 2011; BRUKER CORPORATION 2016a; BRUKER CORPORATION 2016b).

3.3 La scelta della strategia di pre-concentrazione meccanica

A seconda delle caratteristiche del materiale in esame e del materiale *target* si sceglierà la tecnica di concentrazione meccanica più adatta. Esempio, un separatore elettrostatico o a correnti parassite, consentirebbe la concentrazione di metalli non ferrosi (HU ET AL. 2011; RAMACHANDRA E RAO 2006; KASPER ET AL. 2015). I separatori magnetici consentono un'ottima soluzione per separare particelle ferrose, quando queste ultime sono presenti (RAMACHANDRA E RAO 2006).

Accanto a tecnologie classiche di separazione, quali quelle citate, possono essere impiegate altre innovative quali il *Magnetic Density Separator* (MDS) (Fig. 4). Tale sistema di separazione per densità sfrutta il Principio di Archimede applicato ai ferro-fluidi. Esso utilizza, come mezzo di separazione, una torbida costituita da H₂O e particelle di Ferro-Silicio sferulizzato aventi una dimensione tra i 10 nm ed i 20 nm. Tale fluido, se sottoposto ad un campo magnetico generato grazie all'ausilio di un magnete permanente, produce un gradiente di densità apparente lungo l'altezza stessa del fluido (HU ET AL. 2011). Grazie a questo sistema, si è in grado di concentrare diversi materiali, partendo da una miscela multi-materiale con granulometria omogenea per densità, come ad esempio metalli, plastiche, vetro ed altro.

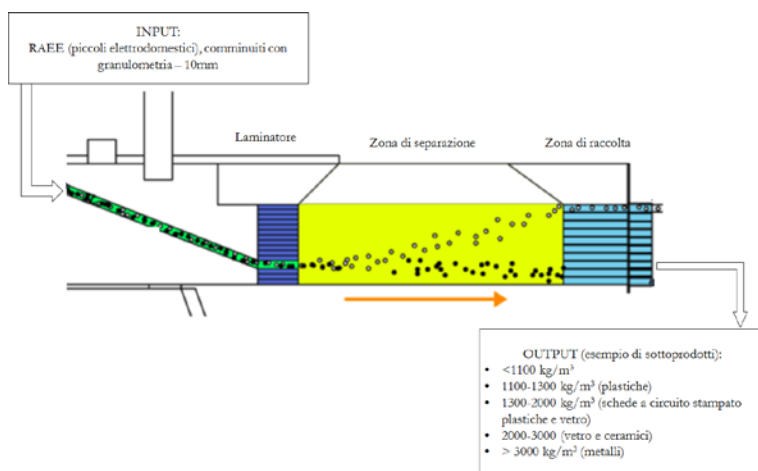


Fig. 4 – Schema di un separatore MDS (adattato da HU ET AL. 2010).

Gli studi sin qui condotti (BAKKER ET AL. 2010; HU ET AL. 2010; HU ET AL. 2011) hanno dimostrato che utilizzando la separazione mediante MDS su schede elettroniche e fili comminuti (con una dimensione media di 8 mm) è possibile ottenere elevati tassi di recupero (fino al 90 %) nel *sink* (materiale af-

fondato) per quanto riguarda la frazione non-ferrosa pesante.

Nei prodotti di tale separatore, nonostante l'elevata efficienza del processo, continuano però ad essere presenti piccole frazioni di metalli di interesse ed impurità quali plastiche, vetro e talvolta legno.

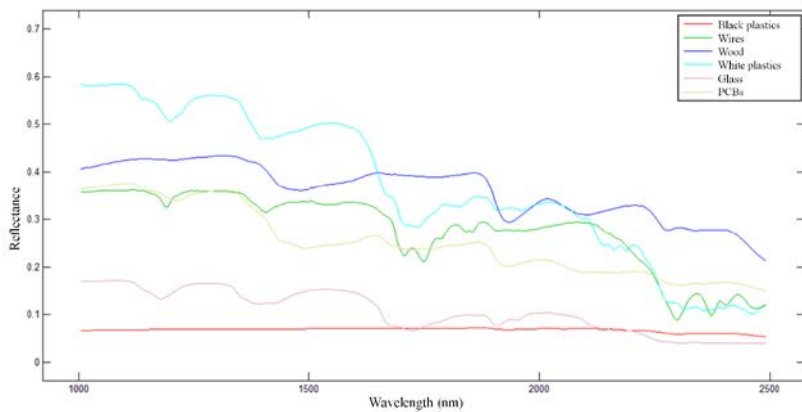
Nasce quindi la necessità di associare al processo di separazione un sistema di analisi efficace, implementabile in linea, che sia in grado di qualificare i prodotti della separazione, nello specifico, quello realizzato attraverso l'MDS.

Il gruppo di ricerca di Ingegneria delle Materie Prime dell'Università di Roma - La Sapienza dal 2011 al 2014 ha sviluppato, nell'ambito di un progetto europeo (Collaborative Project 212782 - FP7-ENV-2007-1: W2Plastics "*Magnetic Sorting and Ultrasound Sensor Technologies for Production of High Purity Secondary Polyolefins from Waste*"), congiuntamente con l'Università TU Delft (Olanda), un'architettura integrata hardware e software in grado di controllare la qualità dei prodotti attraverso un approccio di tipo ottico-digitale basato sull'utilizzo di tecniche di spettrofotometria digitale di immagini (HSI: *HyperSpectral Imaging*) operante nel vicino infrarosso (1000-2500 nm). Attraverso tale tecnica è stato possibile sviluppare un modello predittivo per il riconoscimento delle particelle contenenti metalli non ferrosi. I risultati, sinteticamente riportati per un campione di materiale in figura 5, hanno dimostrato come l'approccio analitico proposto sia in grado di rilevare le diverse tipologie di materiali, sia di interesse che inquinanti, consentendo così di poter qualificare i prodotti in accordo con la tipologia delle alimentazioni e delle corrispondenti azioni di trattamento.

Questa tecnologia è di particolare interesse, sia da un punto di vista squisitamente tecnico per controllare e/o certificare i materiali relativamente alle varie fasi del processo e/o nei concentrati finali, che ai fini di identificare prodotti provenienti da trattamenti meccanici condotti in diversi ambiti territoriali la cui integrazione con quelli provenienti da altri, non può che essere condotta attraverso una valutazione oggettiva, quantitativamente e qualitativamente, confrontabile.

L'approccio proposto e sviluppato ben si presta al conseguimento di tali obiettivi, essendo di facile implementazione, di basso costo, ma soprattutto in grado di rilevare i parametri di interesse con costanza e continuità direttamente in impianto. L'individuazione di tali caratteristiche contribuisce in maniera determinante alla possibilità di definire bioregioni di produzione dei RAEE, dove il dato "composizione dei prodotti risultanti dal riciclo meccanico", da indirizzare al recupero finale, costituisce elemento di sintesi e di identificazione.

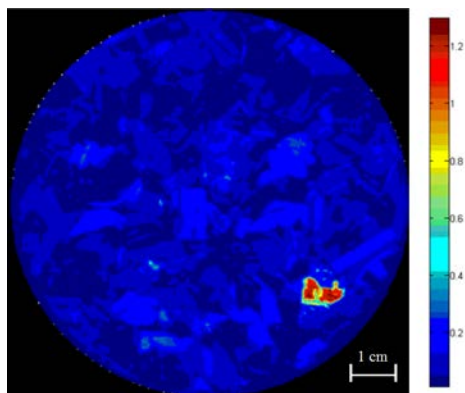
Tramite l'analisi di immagini iper-spetttrali è quindi possibile riconoscere la firma spettrale delle resine, che compongono le schede a circuito stampato, e/o i metalli inglobati come impurità.



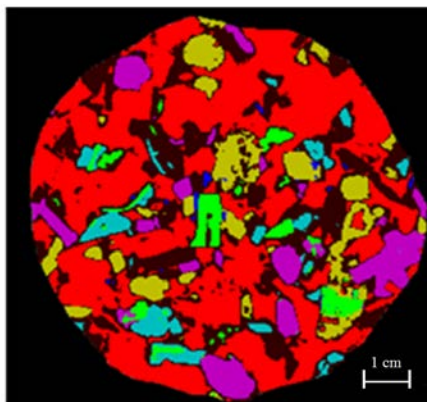
A



B



c



D

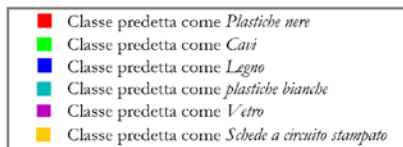


Fig. 5 – Esempio dell'applicazione della procedura di analisi/classificazione iperspettrale applicata ad un campione di RAEE. Spettri medi (a), immagine pittorica (b) ed immagine iperspettrale (1000-2500 nm) (c) dei vari costituenti il campione di RAEE. Risultati della classificazione PLS-DA (d).

4. Conclusioni

I processi di separazione applicati ai RAEE rappresentano una delle sfide tecnologiche più importanti nel campo del recupero e del riciclo delle materie prime seconde. Strategie di pre-concentrazione meccanica basate su tecniche di separazione fisica innovative integrate da logiche di analisi e controllo avanzate dei prodotti, queste ultime basate su dispositivi ottici, sono le tematiche di ricerca applicata sulle quali si misureranno le sfide tecnologiche future in un'ottica di sostenibilità e di economia circolare applicate ai RAEE. Un tale approccio consentirà l'apertura di scenari innovativi nel campo delle risorse e del riciclo come di seguito riportati:

- La possibilità di sviluppo di un sistema in grado di riconoscere materiali inquinanti, utilizzabile non solo per il selezionamento, ma anche come nucleo di analisi per eseguire un controllo qualità sui prodotti provenienti da diversi stadi di lavorazione.
- La possibilità di garantire una produzione affidabile sia in termini di qualità che di quantità di prodotto riciclato. Obiettivo, questo, che dovrebbe prendere in considerazione anche la possibilità di definire nuove classi di prodotti riciclati, non solo nella composizione, ma anche in termini di attributi fisici delle particelle stesse (dimensioni, forma, morfologia), secondo processi di riciclaggio innovativi incorporando l'approccio delle tecniche HSI (SERRANTI ET AL., 2010).
- L'attuazione di politiche ambientali e sociali in grado di chiudere in maniera efficiente e virtuosa il riciclo di tale tipologia dei rifiuti. Il contributo ad una gestione integrata dei prodotti risultanti dal pre-trattamento meccanico, e da avviare al recupero finale, provenienti da diversi ambiti territoriali (i.e. bioregioni), caratterizzati da diverse specificità economiche, sociali e ambientali.

Riferimenti bibliografici

- EUR-LEX 2017, < <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0019> > (ultima visita: maggio 2017).
- BAKKER E.J., BERKHOUT A.J., HARTMANN L. E REM P.C. (2010), "Turning Magnetic Density Separation into Green Business Using the Cyclic Innovation Model", *The Open Waste Management Journal*, vol. 3, pp. 99-116.
- BRUKER CORPORATION (2016a), *M4 TORNADO, User manual*.
- BRUKER CORPORATION (2016b), *M4 TORNADO, Physical principles of Micro-X-ray Fluorescence*.
- CENTRO DI COORDINAMENTO RAEE (2015), *Ritiro e trattamento dei Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche in Italia: rapporto annuale 2015*, MGP & Partners,

- <https://www.google.it/url?sa=t&rcrt=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=0ahUKEwjk4_179_RAhXC1iwKHZSCDZQQFggdMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.cdcracee.it%2FDownloadPubFile.pub_do%3Fid%3D2ca98095523b3d5b015384af935577bb&usg=AFQjCNFsscoBMRzXRvfFOEzR3nNaHFvZOg&cad=rja>.
- CENTRO DI COORDINAMENTO RAEE (2017),
<https://www.cdcracee.it/GetPage.pub_do?id=2ca98095523b3d5b015384af935577bb> (ultima visita: maggio 2017).
- COMUNIUNIVERSO (2017),
<http://www.comuniuniverso.it/index.cfm?Comuni_conferenti_RAEE_nella_Regione_Lazio&menu=647> (ultima visita: maggio 2017).
- DA LIO A. (2006), *Il Sistema di gestione dei Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) come Delineato Dal D. Lgs. 151/2005 e successive modifiche ed Integrazioni*, Diritto all'ambiente, testata giornalistica online. <http://www.dirittoambiente.net/file/rifiuti_articoli_320.pdf> (ultima visita: maggio 2017).
- HU B., GIACOMETTI L., DI MAIO F., REM P. (2011), "Recycling of WEEE by Magnetic Density Separation", Selected Proceedings of the Sixth International Conference on Waste Management and Technology (ICWMT 6), China.
- HU B., VAN BEEK K., BOSMAN A., REM P.C., BAKKER E.J. E DI MAIO F. (2010), "Magnetization Control of Magnetic Liquids for Sink-Float Separations"; *Open Waste Management Journal*, edizione speciale, p81.
- KASPER A.C., DE FREITAS JUCHNESKI N. C. E VEIT H.M. (2015), *Mechanical Processing* in VEIT H.M., BERNARDES A.M., *Electronic Waste: Recycling Techniques*, Springer International Publishing, Svizzera, pp. 32-36.
- LONGONI F. (2015), XIII Commissione Territorio, ambiente e beni ambientali, Audizione 12.1.2015, Centro di Coordinamento RAE,
<https://www.senato.it/application/xmanager/projects/leg17/attachments/documento_ven-to_procedura_commissione/files/000/002/165/Centro_di_Coordinamento_RAEE_Audizione_senato_12_1_2015.pdf> (ultima visita: gennaio 2017).
- RAMACHANDRA RAO S. (2006). "Physical and physico-chemical processes" in RAMACHANDRA RAO S., *Recovery and recycling from metallurgical wastes, Waste management series 7 resource*; Department of Mining, Metals and Materials Engineering McGill University, Canada, (3) pp. 35-69.
- SALVI M. (2010), *Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) – Aspetti tecnico-gestionali e ambientali*, Tesi di Laurea In Valorizzazione delle Risorse Primarie e Secondarie, Facoltà di Ingegneria Alma Mater Studiorum - Università Di Bologna,
<http://amslaurea.unibo.it/2922/1/matteo_salvi_tesi.pdf> (ultima visita: gennaio 2017).
- SERRANTI S., GARGIULO A. E BONIFAZI G. (2010), "The Utilization of Hyperspectral Imaging for Impurities Detection in Secondary Plastics", *The Open Waste Management Journal*, vol. 3, pp. 56-70.
- VEIT H. M. (2015), "Processing Techniques" in VEIT H. M. E BERNARDES A.M., *Electronic Waste: Recycling Techniques*, Springer International Publishing, Svizzera, pp. 13-16.
- VEIT H.M. E MOURA BERNARDES A. (2015), *Electronic Waste*, Springer International Publishing, Svizzera.
- WIRTH K. (2011), *X-Ray Fluorescence (XRF)*.