

**POLITECNICO DI MILANO**

**II Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale**



**TECNOLOGIE E SVILUPPO NORMATIVO PER IL RICICLO DI  
POLIURETANO DERIVANTE DALLA LAVORAZIONE DI  
RIFIUTI DA APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED  
ELETTRONICHE (RAEE)**

Relatore: Prof. E. Cagno

Tesi di Laurea di:

Laura BORGHI

Matr. 682670

**Anno Accademico 2011-2012**



# SOMMARIO

Negli ultimi anni l'industria delle apparecchiature elettriche ed elettroniche ha registrato un incremento notevole nei volumi di vendita; maggiori volumi di vendita equivalgono a maggiori volumi di rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) anche proporzionalmente al totale dei rifiuti prodotti nel nostro paese. Partendo da queste premesse la massimizzazione del recupero e riciclaggio di tali rifiuti deve essere un obiettivo chiave in prospettiva di una sostenibilità dello sviluppo.

Sul tema il legislatore europeo prima e quello italiano poi, hanno emanato specifici provvedimenti alla luce dei quali i produttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche hanno la responsabilità del corretto trattamento dei RAEE e nello specifico del raggiungimento di sfidanti obiettivi di recupero e riciclaggio (in percentuale sul peso totale dei rifiuti). Per quanto riguarda il corretto trattamento dei rifiuti derivanti dalla dismissione di frigoriferi e congelatori, il riciclaggio del poliuretano risulta essere la chiave di volta per il raggiungimento di detti target.

Da un'analisi della normativa vigente risulta che il riciclaggio del poliuretano, reimmettendolo nel ciclo produttivo in sostituzione di materia vergine, non risulta vietato. Non esiste tuttavia una normativa specifica di riferimento che definisca le caratteristiche minime per il passaggio da rifiuto a prodotto.

Le prove di laboratorio svolte su alcuni campioni di poliuretano hanno permesso di identificarne le principali caratteristiche fisiche e chimiche, uno studio di mercato ha quindi permesso una serie di possibili mercati di sbocco qualora il poliuretano potesse essere re-introdotta nel sistema produttivo.

Sarà ora necessario che il legislatore, a livello europeo, nazionale o anche solo locale emani un provvedimento che consenta di definire lo stato di End of Waste per il poliuretano derivante dal trattamento dei RAEE.

# INDICE

1. LA GESTIONE INTEGRATA DEI RIFIUTI.....	6
1.1. LA GESTIONE DEI RIFIUTI URBANI IN ITALIA .....	8
2. I RAEE .....	13
2.1. COSA SONO I RAEE.....	13
2.2. LA NORMATIVA EUROPEA.....	14
2.2.1 La direttiva 2002/96/CE.....	14
2.2.2 La Direttiva 2002/95/CE.....	18
2.3. LA NORMATIVA ITALIANA .....	19
2.3.1 Decreto 151/2005, il decreto RAEE .....	19
2.3.2 DM 8 marzo 2010 - Modalità semplificate per la gestione dei RAEE domestici.....	23
2.3.3 Il sistema RAEE in Italia .....	24
2.4. L'EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA .....	31
3. IL TRATTAMENTO DEI RAEE .....	36
3.1. COMPONENTI RECUPERABILI E PERICOLOSE CONTENUTE NEI RAEE .....	36
3.2. IL PROCESSO DI TRATTAMENTO.....	39
3.2.1 Le autorizzazioni per il trattamento dei RAEE.....	39
3.2.2 Le fasi del trattamento dei RAEE .....	41
3.2.3 Le fasi di trattamento dei RAEE del raggruppamento R1 .....	48
3.2.4 Possibili soluzioni alternative per il trattamento.....	55
3.2.5 Output del processo di trattamento .....	58
4. IL RECUPERO DEL POLIURETANO.....	64
4.1.NORMATIVA APPLICABILE AL RECUPERO DEL POLIURETANO.....	64
4.2. ANALISI DELLA MATRICE POLIURETANICA.....	67
4.3. VERIFICA TECNICA PER IL RECUPERO DEL POLIURETANO .....	70
4.3.1 Diffusione del CFC nell'atmosfera .....	72
4.3.2 Indagini sperimentali e caratterizzazione dei campioni di poliuretano.....	75
4.4. CAMPI DI APPLICAZIONE .....	82
4.3.3 Campi di applicazione come recupero di materia.....	85
5. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	90
Bibliografia .....	93



# 1. LA GESTIONE INTEGRATA DEI RIFIUTI

Negli ultimi decenni si è sviluppato in Europa e negli Stati Membri l'interesse verso le problematiche ambientali, favorendo così uno sviluppo sostenibile che non andasse a compromettere le generazioni future. La produzione e lo smaltimento dei rifiuti sono questioni che hanno sollecitato l'interesse pubblico verso una gestione degli stessi meno impattante a livello ambientale. Nasce così la necessità di trovare ed incentivare forme di trattamento dei rifiuti diverse allo smaltimento in discarica e all'incenerimento considerando più opzioni differenziate correlate tra loro, ciascuna delle quali destinata ad uno specifico trattamento in funzione della diversità dei rifiuti trattati e in grado di sfruttarne le potenzialità di recupero, sia di materiale che di energia.

In Italia, ancor prima dell'emanazione della direttiva europea, con l'emanazione del D. Lgs. 22/97 viene creata una prima normativa strutturata relativa al tema della gestione dei rifiuti; in tale contesto viene quindi abbozzato un primo principio di priorità nella gestione dei rifiuti, ovvero: (Art 5 comma 2) *I rifiuti da avviare allo smaltimento finale devono essere il più possibile ridotti potenziando la prevenzione e le attività di riutilizzo, riciclaggio e recupero.*

Il D. Lgs. 152/2006 definisce come *gestione (Art 183 comma 1 lettera d) la raccolta, il trasporto, il recupero e lo smaltimento dei rifiuti, compreso il controllo di queste operazioni, nonché il controllo delle discariche e degli impianti di smaltimento dopo la chiusura.* Il Decreto segue le linee guida europee riguardanti la sostenibilità ambientale, che impongono l'ottimizzazione dello sfruttamento di risorse, comprendendo così anche i rifiuti, e la minimizzazione di rilasci nell'ambiente di sostanze inquinanti di origine antropica. Al tema dei *Criteri di Priorità nella gestione dei rifiuti* il normatore dedica l'intero articolo 179 in cui viene definito: *Nel rispetto delle misure prioritarie di cui al comma 1, le misure dirette al recupero dei rifiuti mediante riutilizzo, riciclo o ogni altra azione diretta ad ottenere da essi materia prima secondaria sono adottate con priorità rispetto all'uso dei rifiuti come fonte di energia.*

La direttiva europea 2008/98/CE introduce, come punto cardine della normazione a livello comunitario, nelle considerazioni, che *l'obiettivo principale di qualsiasi politica in materia di rifiuti dovrebbe essere di ridurre al minimo le conseguenze negative della produzione e della gestione dei rifiuti per la salute umana e l'ambiente. La politica in materia di rifiuti dovrebbe altresì puntare a ridurre l'uso di risorse e promuovere l'applicazione pratica della gerarchia dei rifiuti.*

All'Art 4 viene quindi definito che i criteri di priorità nella gestione dei rifiuti, atti a ridurre il consumo di risorse naturali, secondo i quali i trattamenti da effettuare in materia di prevenzione e gestione dei rifiuti sono quelli riportati in Figura 1.1 e rappresentano la cosiddetta *piramide dei rifiuti*.



**Figura 1.1: Gerarchia dei rifiuti.**

La prima azione per uno sviluppo sostenibile è la riduzione dei rifiuti mediante forme di prevenzione che consentono di ridurre gli impatti negativi dovuti all'immissione nell'ambiente di sostanze pericolose. Un passo successivo nelle opere di prevenzione è la pratica del riutilizzo, ove per riutilizzo si intende *qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti*. Il riutilizzo, o riuso, è quindi una modalità di controllo e prevenzione che tende ad allungare la vita dei prodotti, diminuendo la quantità di rifiuti in circolazione.

Poiché la prevenzione non è applicata direttamente ai rifiuti, ma al bene prodotto, la prima vera e propria fase di una gestione sostenibile è il recupero di materia, ovvero qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile sostituendo altri materiali, inteso come riutilizzo o riciclaggio. La differenza tra riciclaggio e riutilizzo sta nel fatto che nel riutilizzo i prodotti o componenti che non sono rifiuti sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti (per esempio motori di auto riutilizzati in quanto tali su nuove auto), mentre nel riciclaggio i materiali di rifiuto sono ritrattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze

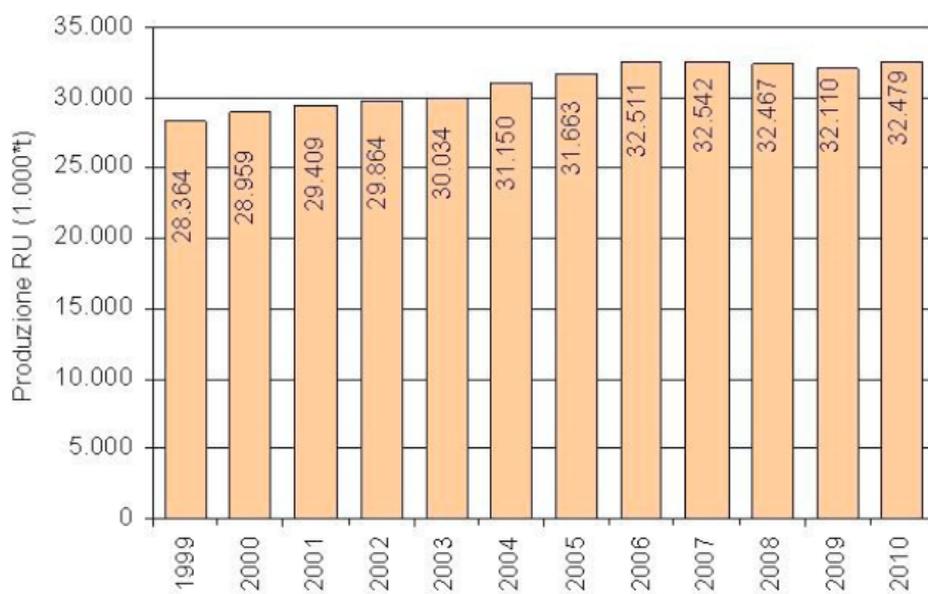
da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini; in questo caso viene quindi “riutilizzato” il materiale di cui il bene era costituito (per esempio riutilizzo del ferro di cui è fatto un motore di auto per produrre nuovi prodotti).

I rifiuti che non possono essere riciclati o riutilizzati in alcun modo possono essere destinati al recupero di energia, tramite trattamento termico in inceneritori che, per minimizzare gli impatti ambientali, sono tenuti ad adottare le migliori tecniche disponibili, BAT (Best Available Techniques), individuate specificatamente a livello europeo. In impianti di incenerimento con recupero energetico il calore sviluppato durante la combustione dei rifiuti viene recuperato ed utilizzato per produrre vapore, che viene poi usato per fornire energia elettrica piuttosto che come vettore di calore per il teleriscaldamento o per il riscaldamento di acqua.

Passo finale di una corretta gestione è lo smaltimento dei rifiuti con il loro confinamento in discariche controllate. È importante che questa operazione finale venga condotta nel rispetto delle norme imposte dalla legislazione europea e soprattutto che vengano rispettate le condizioni di messa in sicurezza e controllo dei siti, anche dopo la chiusura della discarica, per salvaguardare la salute umana e l'ambiente (Brambilla e Luglietti, 2011).

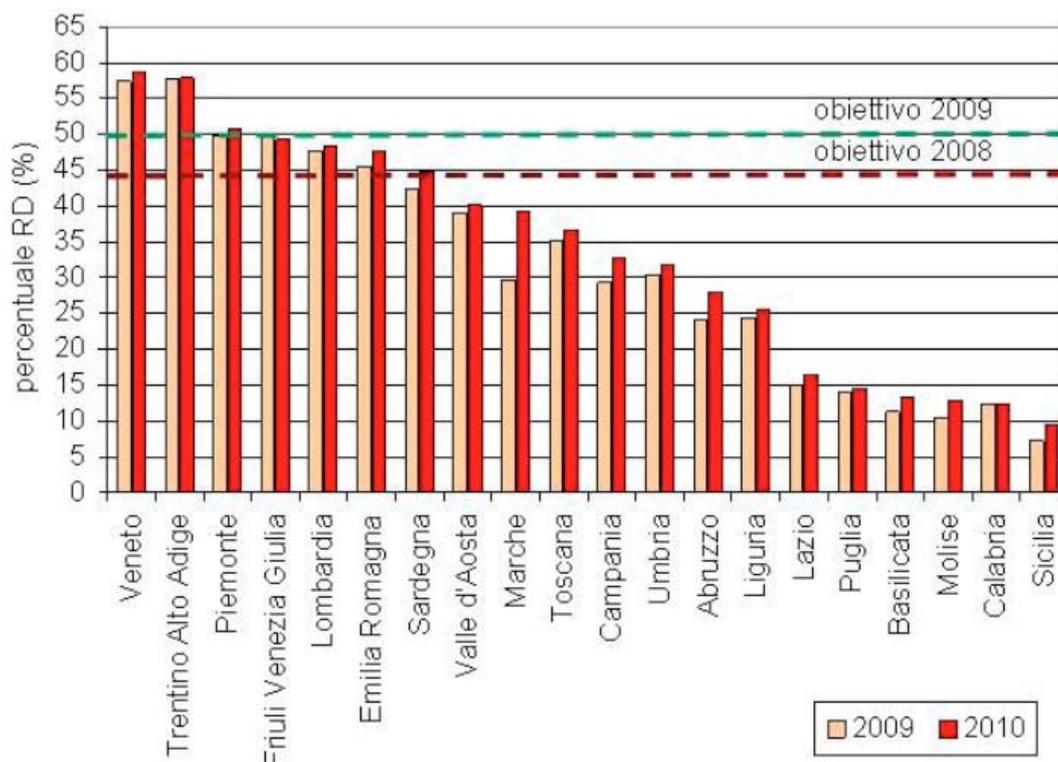
## 1.1.LA GESTIONE DEI RIFIUTI URBANI IN ITALIA

Nel 2010 in Italia la produzione di rifiuti urbani si è attestata a poco meno di 32,5 milioni di tonnellate, facendo rilevare una crescita percentuale pari all'1,1% circa rispetto al 2009 ed una crescita di poco più del 10% negli ultimi 10 anni (Rapporto Rifiuti, 2012).



**Figura 1.2: Produzione rifiuti urbani dal 1999 al 2010 (Fonte: Rapporto rifiuti, 2012)**

E' importante evidenziare come la raccolta differenziata è tutt'altro che omogenea nelle diverse aree del Paese: solo le regioni del nord riescono a raggiungere gli obiettivi di raccolta, mentre nella maggior parte dei casi la percentuale di raccolta differenziata è al di sotto dei valori target. Tale dato, come si vedrà nei capitoli successivi, è confermato anche nello specifico settore della raccolta dei RAEE.



**Figura 1.3: % raccolta differenziata per regione (Fonte: Rapporto rifiuti, 2012)**

Sempre nel 2010 la raccolta differenziata è stata pari al 35,3%; anche in questo caso il valore è in crescita rispetto al 2009, in cui risultava pari a 33,6%. In Tabella 1.1 si può vedere come la frazione merceologica maggiormente raccolta è quella organica, con circa 4 milioni di tonnellate raccolte, mentre tra le frazioni da imballaggio quella maggiormente raccolta è la carta; sempre in tabella sono riportati anche i quantitativi di RAEE raccolti nel 2010, pari a circa 253 mila tonnellate, dato in crescita rispetto al 2009, in cui risultava di 216 mila tonnellate, a fronte anche di una migliore gestione del nascente sistema RAEE.

<b>Frazione merceologica</b>	<b>Nord</b>	<b>Centro</b>	<b>Sud e Isole</b>	<b>Totale Italia</b>
Carta	1.812.760	702.060	547.890	3.062.710
Vetro	1.159.280	241.860	377.370	1.778.510
Plastica	434.990	101.750	111.860	648.600
Metalli	210.330	56.470	51.030	317.830
Legno	507.840	120.190	63.840	691.870
Frazione organica	2.724.840	637.990	823.940	4.186.770
RAEE	150.080	50.610	52.960	253.650
Altri ingombranti	162.760	19.380	133.510	315.650
Tessili	49.120	16.160	15.030	80.310
Selettiva	28.870	5.750	2.930	37.550
Altro	29.070	34.760	15.320	79.150
<b>Totale</b>	<b>7.269.940</b>	<b>1.986.980</b>	<b>2.195.680</b>	<b>11.452.600</b>

**Tabella 1.1: Ripartizione della raccolta differenziata delle singole frazioni merceologiche per area geografica (Fonte: Rapporto Rifiuti, 2012).**

Data la scarsa incidenza della raccolta differenziata sul totale dei rifiuti urbano prodotti in Italia, accade che un elevato quantitativo di rifiuti non venga né riciclato né recuperato, ma venga destinato ad incenerimento o addirittura in discarica: solo un terzo dei rifiuti prodotti viene valorizzato mediante la combustione con recupero di energia, il riciclaggio di materia o la creazione di compost. In Figura 1.4 viene riportata la ripartizione fra le diverse destinazioni avute dalla totalità dei rifiuti urbani raccolti in Italia nel 2012.

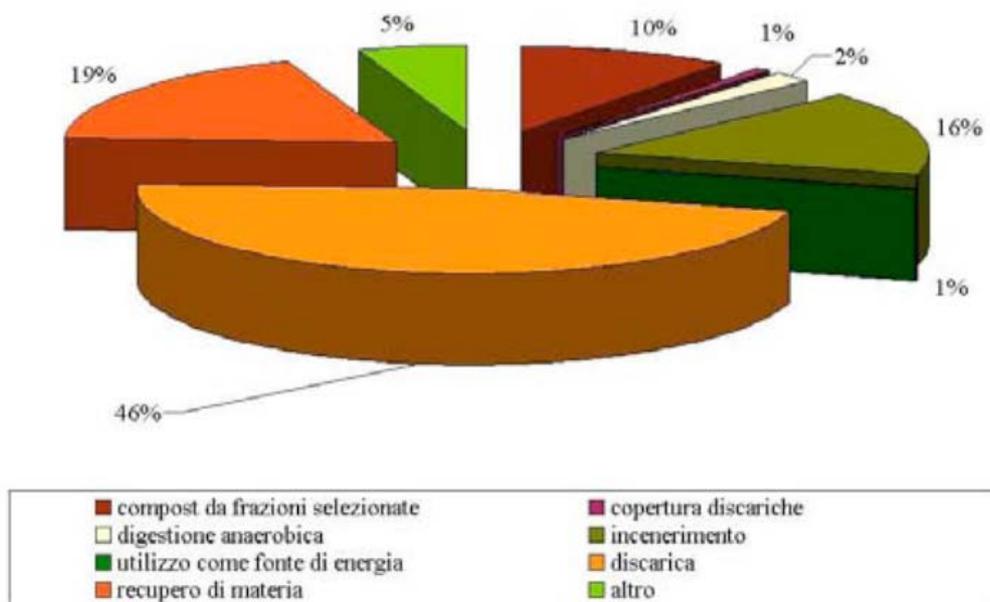


Figura 1.4: ripartizione percentuale dei rifiuti per destinazione finale (Fonte: Rapporto rifiuti, 2012)

## **2. I RAEE**

### **2.1. COSA SONO I RAEE**

I RAEE sono i Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche, cioè rifiuti che derivano da qualunque apparecchiatura elettrica o elettronica di cui il possessore intenda disfarsi in quanto guasta, inutilizzata o obsoleta e dunque destinata all'abbandono.

L'industria mondiale del settore elettrico ed elettronico negli ultimi decenni, grazie al progredire dello sviluppo industriale e al miglioramento delle condizioni economiche mondiali, ha avuto un forte incremento, raggiungendo negli ultimi anni proporzioni sempre maggiori. Di conseguenza l'aumento dei prodotti immessi sul mercato ha portato anche ad un aumento dei rifiuti derivanti dalle apparecchiature obsolete, aumentando il rischio di abbandono nell'ambiente di sostanze inquinanti utilizzate nell'industria elettronica.

Per questo motivo negli ultimi anni si è sviluppato l'interesse dell'opinione pubblica verso una corretta gestione di tali rifiuti al fine di garantire un corretto trattamento e smaltimento finale.

I RAEE, una volta che hanno esaurito il loro ciclo di vita, devono essere trattate in modo specifico per evitare la dispersione nell'ambiente di sostanze tossiche quali i PCB e metalli pesanti o, come nel caso dei frigoriferi, clima-alteranti, come CFC (cloro-fluoro-carburi) e HCFC (idro-cloro-fluoro-carburi), gas ad effetto serra, che provocano il riscaldamento del pianeta e l'allargamento del buco dell'ozono. Inoltre è importante evitare lo smaltimento di detti rifiuti in discarica o presso impianti di incenerimento, in modo da consentire il riciclo dei materiali di cui sono composti, come ferro, rame, alluminio, plastica, vetro, metalli rari, etc.; le materie prime seconde derivate dal corretto trattamento dei rifiuti rappresentano una risorsa mondiale con cui è possibile ridurre l'impatto ambientale dovuto all'estrazione di nuove materie prime vergini per la produzione di nuovi componenti.

Alla luce di quanto sopra, il normatore comunitario ha reputato indispensabile l'emanazione di una direttiva europea che regolasse specificatamente la gestione dei RAEE, così da evitare uno smaltimento incontrollato di tali apparecchiature, con le conseguenze sopra descritte. Tale direttiva è stata recepita in Italia nel 2005 con il decreto 151/2005.

## 2.2.LA NORMATIVA EUROPEA

### 2.2.1 La direttiva 2002/96/CE

Nel 2003 viene pubblicato il testo integrale della Direttiva 2002/96/CE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche. Lo scopo della direttiva comunitaria è quello di sviluppare  *misure miranti in via prioritaria a prevenire la produzione di Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) ed inoltre al loro reimpiego, riciclaggio e ad altre forme di recupero in modo da ridurre il volume dei rifiuti da smaltire. Essa mira inoltre a migliorare il funzionamento dal punto di vista ambientale di tutti gli operatori che intervengono nel ciclo di vita delle AEE, quali ad esempio produttori, distributori e consumatori, in particolare quegli operatori direttamente collegati al trattamento dei rifiuti delle stesse.*

La direttiva è uno dei primi esempi di applicazione a livello europeo di principi innovativi nella gestione dei rifiuti, come elencato nella prima considerazione iniziale,  *Gli obiettivi della politica ambientale della Comunità sono in particolare la salvaguardia, la tutela e il miglioramento della qualità dell'ambiente, la protezione della salute umana e l'uso accorto e razionale delle risorse naturali. Questa politica è basata sul principio di precauzione, sul principio dell'azione preventiva e su quello della correzione del danno ambientale, in via prioritaria, alla fonte e sul principio «chi inquina paga».*

Il principio del “chi inquina paga” si declina quindi concretamente con l’obbligo per i produttori di AEE di organizzare, gestire e finanziare  *il ritiro dal punto di raccolta, il trattamento, il recupero e lo smaltimento dei RAEE. Per ottimizzare l'efficacia del concetto di responsabilità del produttore, ciascun produttore dovrebbe essere responsabile del finanziamento della gestione dei rifiuti derivanti dai suoi prodotti. Il produttore dovrebbe poter scegliere di adempiere tale obbligo o individualmente o aderendo ad un regime collettivo. Ciascun produttore, allorché immette un prodotto sul mercato, dovrebbe fornire una garanzia finanziaria per evitare che i costi della gestione dei RAEE derivanti da prodotti orfani ricadano sulla società o sugli altri produttori. Tutti i produttori esistenti dovrebbero condividere la responsabilità del finanziamento della gestione dei rifiuti storici nell'ambito di regimi di finanziamento collettivi ai quali contribuiscono proporzionalmente tutti i produttori esistenti sul mercato al momento in cui si verificano i costi. I regimi di finanziamento collettivi non dovrebbero avere l'effetto di escludere i produttori di nicchie di mercato o con ridotti volumi di produzione, gli importatori e i nuovi arrivati. Per un periodo transitorio i produttori dovrebbero poter indicare agli acquirenti, su base volontaria al momento*

*della vendita di nuovi prodotti, i costi della raccolta, del trattamento e dello smaltimento inoffensivo per l'ambiente dei rifiuti storici. I produttori che si avvalgono di tale disposizione dovrebbero provvedere affinché i costi indicati non superino le spese effettivamente sostenute.*

Le apparecchiature interessate vengono raggruppate in 10 macro categorie:

- Grandi elettrodomestici (frigoriferi, lavatrici, lavastoviglie, etc.);
- Piccoli elettrodomestici (aspirapolvere, tostapane, friggitrice, etc.);
- Apparecchiature informatiche per le telecomunicazioni (computer, stampanti, telefoni, fax, etc.);
- Apparecchiature di consumo (TV, radio, videoregistratori, etc.);
- Apparecchiature di illuminazione;
- Strumenti elettrici ed elettronici (ad eccezione degli utensili industriali fissi di grandi dimensioni);
- Giocattoli e apparecchiature per il tempo libero e lo sport;
- Dispositivi medicali;
- Strumenti di monitoraggio e controllo (rivelatori di fumo e di calore, termostati, etc.);
- Distributori automatici.

Nel testo vengono prese in considerazione sia le fasi della raccolta sia quelle del trattamento, definendo che siano predisposti sistemi di raccolta differenziata, riducendo al minimo il quantitativo di rifiuti municipali misti. Gli Stati Membri devono, quindi, organizzare la raccolta di rifiuti dai privati cittadini e garantire che i distributori ritirino gratuitamente i prodotti presso i centri di raccolta e trasportino gli stessi ai centri di trattamento; inoltre i distributori, al momento dell'acquisto di un nuovo apparecchio, sono responsabili di ritirare gratuitamente un'apparecchiatura dismessa di tipo equivalente.

Secondo la direttiva, entro il 31 dicembre 2008, doveva essere raggiunto un tasso di raccolta separata di RAEE provenienti da nuclei domestici di 4 kg/abitante per anno. Si sottolinea che nel 2002 in Italia, nelle 83 province che hanno attuato la raccolta differenziata, è stato raggiunto un indice di raccolta dei beni durevoli di 1,6 kg/abitante per anno, ben al di sotto del target della direttiva.

La direttiva dispone delle linee guida per le fasi di trattamento, cui i Centri di Trattamento devono sottostare utilizzando le Migliori Tecnologie Disponibili (BAT). I target di recupero e riciclaggio imposti dalla direttiva sono definiti, per ciascuna categoria, tra il 60% e il 90%, in particolare:

- *Per i RAEE che rientrano nelle categorie 1 e 10 dell'allegato I A (della Direttiva europea),*
  - *Aumento del tasso di recupero ad un minimo dell'80%; in peso medio per apparecchio;*
  - *Per il reimpiego e il riciclaggio di componenti, materiali e sostanze, aumento ad un minimo del 75 % in peso medio per apparecchio;*
- *Per i RAEE che rientrano nelle categorie 3 e 4 dell'allegato I A (della Direttiva europea),*
  - *Aumento del tasso di recupero ad un minimo dell'75%; in peso medio per apparecchio;*
  - *Per il reimpiego e il riciclaggio di componenti, materiali e sostanze, aumento ad un minimo del 65 % in peso medio per apparecchio;*
- *Per i RAEE che rientrano nelle categorie 3 e 4 dell'allegato I A (della Direttiva europea),*
  - *Aumento del tasso di recupero ad un minimo dell'75%; in peso medio per apparecchio;*
  - *Per il reimpiego e il riciclaggio di componenti, materiali e sostanze, aumento ad un minimo del 65 % in peso medio per apparecchio;*
- *Per i RAEE che rientrano nelle categorie 2, 5, 6, 7, e 9 dell'allegato I A (della Direttiva europea),*
  - *Aumento del tasso di recupero ad un minimo dell'70%; in peso medio per apparecchio;*
  - *Per il reimpiego e il riciclaggio di componenti, materiali e sostanze, aumento ad un minimo del 50 % in peso medio per apparecchio;*
- *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.*

La direttiva predispone le linee guida per il finanziamento necessario al corretto trattamento e/o smaltimento dei RAEE, distinguendo da un lato tra rifiuti provenienti da nuclei domestici e rifiuti provenienti da utenti diversi dai nuclei domestici e dall'altro tra rifiuti "nuovi", ovvero immessi sul mercato dopo il 13 agosto 2005, e rifiuti "storici", ovvero immessi sul mercato prima di quella data, come esemplificato in Figura 2.1.

		anno di vendita del prodotto	
origine del rifiuto	rifiuti domestici storici	rifiuti domestici nuovi	
	rifiuti professionali storici	rifiuti professionali nuovi	

**Figura 2.1: Classificazione RAEE**

Per quanto riguarda i RAEE classificati come “nuovi” i produttori sono responsabili su base individuale del finanziamento della gestione, sia per i rifiuti provenienti da nuclei domestici sia quelli da altri nuclei. Per i rifiuti storici invece si ha una distinzione se questi provengono da nuclei domestici o da nuclei diversi.

- RAEE provenienti da nuclei domestici: il finanziamento è fornito da tutti i produttori esistenti sul mercato in proporzione ad esempio alla quota di mercato per tipo di apparecchiatura.
- RAEE da utenti diversi da nuclei domestici: nel caso siano stati sostituiti da nuovi prodotti equivalenti o adibiti alla stessa funzione, il finanziamento compete ai produttori dei nuovi prodotti all’atto della fornitura, altrimenti, per gli altri rifiuti storici, i costi devono essere sostenuti dagli utenti.

Questi ultimi due casi sono stati inseriti grazie alla Direttiva 2003/108/CE del Parlamento Europeo dell’8 Dicembre 2003 che ha modificato in parte la 2002/96/CE.

La Direttiva, oltre ad avere come obiettivo intrinseco il raggiungimento di un elevato grado di protezione ambientale, pone l’attenzione anche al tema della sensibilizzazione dei cittadini informandoli circa:

- l’obbligo di non smaltire i RAEE come rifiuti municipali misti e di effettuare una raccolta separata di tali RAEE;
- i sistemi di ripresa e raccolta disponibili;
- il proprio ruolo nel reimpiego, riciclaggio e in altre forme di recupero dei RAEE;

- gli effetti potenziali sull'ambiente e la salute umana come risultato della presenza di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche;
- il significato del simbolo del “bidoncino barrato”, ovvero RAEE da raccogliere separatamente.

Infine, viene dato l’obbligo agli Stati Membri di adottare misure adeguate ad assicurare che i consumatori contribuiscano alla raccolta dei RAEE e ad indurre i consumatori stessi ad agevolare il processo di reimpiego, trattamento e recupero e, al fine di ridurre al minimo lo smaltimento dei RAEE come rifiuti municipali misti e di facilitarne la raccolta separata provvedere affinché i produttori marchino adeguatamente con il simbolo indicato nell'allegato IV le apparecchiature elettriche ed elettroniche immesse sul mercato dopo il 13 agosto 2005.

### 2.2.2 La Direttiva 2002/95/CE

La Direttiva 2002/95/CE, sulla restrizione dell'uso di determinate sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche si applica ad alcune delle categorie RAEE indicate nella direttiva 2002/96/CE, con lo scopo di *riavvicinare le legislazioni degli Stati membri sulle restrizioni dell’uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche e a contribuire alla tutela della salute umana nonché al recupero e allo smaltimento ecologicamente corretto dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche.*

Secondo la Direttiva, dal 1 luglio 2006, le apparecchiature elettriche ed elettroniche nuove immesse sul mercato non devono contenere:

- piombo;
- mercurio;
- cadmio;
- cromo esavalente;
- bifenili polibromurati (PBB);
- etere di difenile polibromurato (PBDE).

Potrebbero esserci delle eccezioni al divieto, in quanto non è sempre possibile rimuovere o sostituire alcuni materiali, o se la loro sostituzione portasse a impatti negativi sull’ambiente superiori a quelli derivati dai possibili benefici. Materiali esonerati sono ad esempio il piombo nel

vetro dei tubi a raggi catodici ed il mercurio nelle lampade fluorescenti; l'allegato II della direttiva riporta tutte le eccezioni che possono verificarsi. Tali eccezioni devono però essere riviste ogni quattro anni, in quanto la tecnologia potrebbe portare a nuovi miglioramenti in campo elettrico ed elettronico.

## 2.3.LA NORMATIVA ITALIANA

### 2.3.1 Decreto 151/2005, il decreto RAEE

In Italia, le direttive europee 2002/95/CE e 2002/96/CE sono state recepite con il Decreto Legislativo 151/2005 e il relativo Decreto Ministeriale attuativo 185/2007 che definiscono l'assetto normativo e operativo in materia di gestione dei RAEE per tutte le categorie di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (grandi e piccoli elettrodomestici, apparecchiature informatiche e per le telecomunicazioni, apparecchiature di illuminazione etc.). Come indicato dalla Direttiva europea, gli scopi principali del Decreto italiano sono la prevenzione della produzione dei RAEE e la promozione del reimpiego, del riciclaggio e delle altre forme di recupero dei RAEE, in modo da ridurre la quantità da avviare allo smaltimento oltre alla riduzione dell'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche.

Nodo centrale del Decreto, in pieno accordo con lo spirito stesso della direttiva comunitaria, è l'estensione del principio di responsabilità dei Produttori anche alle apparecchiature elettriche ed elettroniche e il conseguente obbligo, per le aziende produttrici, di organizzare e gestire un sistema per il recupero dei prodotti immessi sul mercato e giunti a fine vita. Di conseguenza i produttori, cioè coloro che producono, importano o commercializzano con marchi propri Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (AEE) sul territorio italiano hanno la responsabilità di gestire le fasi per il corretto trattamento e/o smaltimento dei RAEE, tra cui:

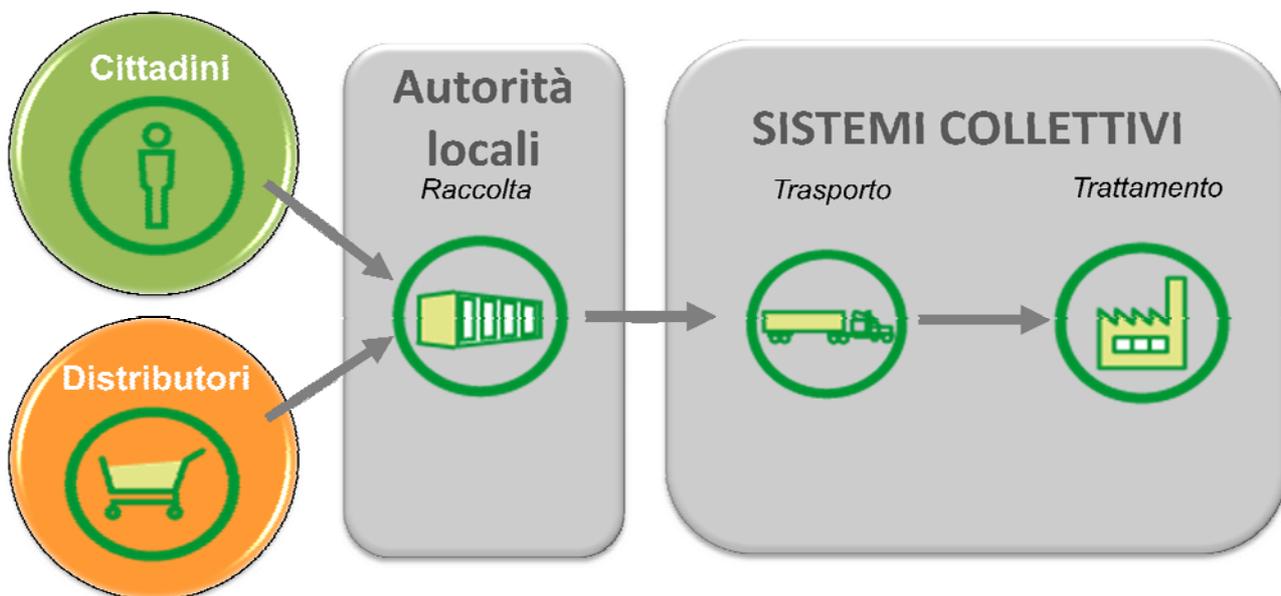
- Il ritiro dei RAEE dai centri di raccolta, dove i cittadini possono portare i propri rifiuti gratuitamente;
- Il trasporto e il conferimento dei RAEE presso impianti di trattamento autorizzati.

Inoltre i produttori devono verificare che le attività di riciclo e recupero dei materiali, nonché lo smaltimento delle componenti non riutilizzabili in completa sicurezza per l'ambiente e la salute dei

cittadini, vengano svolte secondo i criteri imposti dalla legge. Questo comporta una serie di responsabilità logistiche, operative e di controllo lungo tutta la filiera dei RAEE.

La Legge attribuisce oneri specifici anche ai Comuni e ai distributori di AEE. Infatti, i Comuni devono mettere a disposizione dei cittadini e dei distributori i centri per la raccolta differenziata dei RAEE, su tutto il territorio nazionale, e devono assicurare la funzionalità, l'accessibilità e l'adeguatezza dei sistemi di raccolta differenziata dei RAEE provenienti dai nuclei domestici, 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 hanno l'obbligo di ritiro gratuito dei RAEE domestici al momento dell'acquisto di una nuova apparecchiatura equivalente (obbligo di ritiro denominato *Uno contro Uno*), ovvero devono assicurare al momento della fornitura di una nuova apparecchiatura elettrica ed elettronica destinata ad un nucleo domestico, il ritiro gratuito dell'apparecchiatura dismessa, a condizione che l'apparecchiatura sia di tipo equivalente e abbia svolto le stesse funzioni della nuova apparecchiatura fornita.

Il Decreto prevede quindi la creazione di sinergie fra i 3 principali attori della filiera allo scopo di raggiungere gli obiettivi di raccolta di 4 kg per abitante (tale obbligo non è posto in capo direttamente a nessuno degli attori della filiera e non sono previste sanzioni in merito).



**Figura 2.2: Struttura del sistema di raccolta dei RAEE**

Il decreto impone ai produttori di apparecchiature elettriche ed elettroniche di aderire a sistemi collettivi per la gestione del trattamento dei RAEE a partire dalle fasi di recupero nei Centri di Raccolta, cioè aree per la raccolta differenziata dei rifiuti urbani realizzata e gestita dagli Enti Locali, dove i RAEE vengono suddivisi nei cinque Raggruppamenti previsti dal D.M. 185/2007. Il Decreto impone anche dei target di raccolta in riferimento alla Direttiva comunitaria, con data limite il 31 Dicembre 2006:

- *Per i RAEE che rientrano nelle categorie 1 e 10 dell'allegato 1 A (del D.Lgs.151/05), una percentuale di recupero pari almeno all'80% in peso medio per apparecchio e una percentuale di reimpiego e di riciclaggio di componenti, di materiali e di sostanze pari almeno al 75% in peso medio per apparecchio;*
- *Per i RAEE che rientrano nelle categorie 3 e 4 dell'allegato 1 A (del D.Lgs.151/05), una percentuale di recupero pari almeno al 75% in peso medio per apparecchio e una percentuale di reimpiego e di riciclaggio di componenti, di materiali e di sostanze pari almeno al 65% in peso medio per apparecchio;*
- *Per i RAEE che rientrano nelle categorie 2, 5, 6, 7 e 9 dell'allegato 1 A (del D.Lgs.151/05), una percentuale di recupero pari almeno al 70 % in peso medio per apparecchio e una percentuale di reimpiego e di riciclaggio di componenti, di materiali e di sostanze pari almeno al 50% in peso medio per apparecchio;*
- *Per tutti i rifiuti di sorgenti luminose fluorescenti, una percentuale di reimpiego e di riciclaggio di componenti, di materiali e di sostanze pari almeno l'80% in peso di tali sorgenti luminose.*

Seguendo le linee della Direttiva europea, la normativa attribuisce oneri e competenze diverse per la gestione dei RAEE a seconda che si tratti di RAEE domestici o professionali, in base cioè alla provenienza del rifiuto. Sono considerati RAEE professionali tutti i rifiuti provenienti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (AEE) destinate ad attività amministrative ed economiche, la cui fornitura sia quantitativamente importante o le cui caratteristiche siano di uso esclusivamente professionale. Sono, invece, RAEE domestici quelli originati dai nuclei domestici e quelli di origine commerciale, industriale o istituzionale, analoghi, per natura e per quantità, a quelli originati dai nuclei domestici. Secondo la normativa vigente è responsabilità dei Sistemi Collettivi, istituiti dai Produttori di AEE, organizzare e finanziare la gestione dei RAEE domestici, dal ritiro presso i Centri di Raccolta fino al trattamento. Per i Produttori di AEE professionali, invece, non esiste alcun obbligo d'iscrizione a un Sistema Collettivo.

I RAEE, sia domestici che professionali, sono classificati in due categorie diverse, considerandone la data di immissione sul mercato. I rifiuti sono quindi classificati come RAEE storici, se derivanti da apparecchiature immesse sul mercato entro il 31 Dicembre 2010 e come RAEE nuovi (*new waste*) derivanti da apparecchiature immesse sul mercato dopo tale data.

La normativa vigente prevede, infatti, due differenti modalità di gestione e finanziamento per il trattamento dei RAEE provenienti da nuclei domestici, a seconda che si tratti di RAEE storici o RAEE nuovi. Nel primo caso il Produttore ha l'obbligo di gestire non direttamente i RAEE derivanti dalle apparecchiature che ha immesso sul mercato, ma un obbligo di gestione per "quote di competenza", ovvero ciascun produttore ha l'obbligo di gestire una percentuale dei RAEE che si generano anno per anno pari alla propria quota di mercato, secondo il cosiddetto "sistema generazionale". Gli oneri per la gestione dei RAEE sono quindi ripartiti proporzionalmente tra i Produttori, senza la necessità di distinguere i differenti marchi e quindi le differenti tecnologie usate in fase di produzione dell'apparecchiatura.

Nel caso dei RAEE nuovi (*new waste*), invece, ciascun Produttore dovrebbe gestire i propri RAEE secondo un "sistema di responsabilità individuale". Per consentire ciò sarebbe indispensabile la definizione di una modalità di identificazione del Produttore univoca a livello europeo e valida anche dopo anni dall'immissione del prodotto sul mercato, nonché la definizione di un sistema di garanzie finanziarie da prestare in favore dello Stato posto a garanzia del corretto trattamento al momento della generazione del RAEE (tale sistema mira ad evitare RAEE "orfani" dovuti, per esempio, alla cessazione dell'attività del produttore). Alla luce quindi della mancanza di un sistema di tracciatura tanto efficace e non essendo ancora stato definito il sistema delle garanzie finanziarie, anche per il RAEE nuovi di origine domestica è possibile adottare una gestione in forma collettiva per quote di competenza.

Il Decreto definisce tutti i soggetti che entrano in gioco nel sistema di gestione della filiera di trattamento dei RAEE, così da chiarire i compiti specifici di ciascun soggetto e consentire il corretto funzionamento del nuovo sistema. Vengono quindi costituiti:

- Centro di Coordinamento RAEE, *finanziato e gestito dai produttori, per l'ottimizzazione delle attività di competenza dei sistemi collettivi, a garanzia di comuni, omogenee e uniformi condizioni operative* (Art 10, DM 185/07 del Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare); fra le attività del Centro di Coordinamento rientrano quindi:
  - Ripartizione dei punti di raccolta presenti sul territorio fra i Sistemi Collettivi;

- Definizione e stipula di accordi per la definizione delle caratteristiche del servizio di ritiro presso i centri di raccolta istituiti dai comuni e dai distributori (Accordi di Programma con ANCI e Associazioni Nazionali della Distribuzione);
- controllo delle attività dei Sistemi Collettivi.

Il Centro di Coordinamento è quindi un soggetto di diritto privato, istituito nella forma giuridica del consorzio, cui aderiscono tutti i Sistemi Collettivi chiamati a gestire RAEE domestici.

- Registro Nazionale dei Produttori di AEE, che ha il compito di raccogliere annualmente le dichiarazioni sull'impresso sul mercato per l'anno precedente di ciascun produttore; tali dati vengono quindi forniti in via esclusiva al Comitato di Vigilanza e Controllo;
- Comitato di Vigilanza e Controllo, che ha il compito di predisporre ed aggiornare il registro, raccogliere, esclusivamente in formato elettronico, i dati relativi ai prodotti immessi sul mercato e alle garanzie finanziarie che i produttori sono tenuti a comunicare al Registro, calcolare le rispettive quote di mercato dei produttori, programmare e disporre ispezioni nei confronti dei produttori che non effettuano le comunicazioni, vigilare affinché le apparecchiature immesse sul mercato dopo il 13 agosto 2005 rechino l'identificativo del produttore, ed elaborare i dati relativi agli obiettivi di recupero.
- Comitato di indirizzo sulla gestione dei RAEE, ha uno scopo di supporto del Comitato di Vigilanza e Controllo. In particolare il Comitato di indirizzo monitora l'operatività, la funzionalità logistica e l'economicità, nonché l'attività di comunicazione, del sistema di gestione dei RAEE, inoltrando al Comitato di vigilanza e controllo le proprie valutazioni e le proprie proposte di miglioramento.

### 2.3.2 DM 8 marzo 2010 - Modalità semplificate per la gestione dei RAEE domestici

Il D.Lgs. 151/05 pone in capo ai distributori di AEE l'obbligo del ritiro del prodotto usato al momento della vendita di un nuovo prodotto equivalente, mettendo quindi il distributore nelle condizioni di dover gestire rifiuti prodotti da terzi e sottostanti quindi alla normativa della gestione rifiuti (D.Lgs. 152/06). Gli oneri previsti dal testo unico ambientale non sono tuttavia applicabili nella realtà operativa di aziende la cui attività è completamente estranea al mondo dei rifiuti.

In questo contesto l'obbligo di ritiro "uno contro uno" da parte della distribuzione è quindi risultato inapplicabile per i primi due anni di operatività del sistema di gestione dei RAEE secondo il D.Lgs. 151/05.

Con l’emanazione da parte del Ministero dell’Ambiente della Tutela del Territorio e del Mare del Decreto 65 del 2010, sono state previste condizioni semplificate per la gestione del RAEE ritirati da parte dei distributori dalle famiglie:

- Condizioni semplificate per l’Albo Gestori Ambientali per l’autorizzazione al trasporto (con limitazioni circa la massa complessiva del mezzo e il peso complessivo trasportabile);
- Condizioni semplificate per l’autorizzazione come luoghi di “raggruppamento” provvisorio dei rifiuti (con limiti estremamente stringenti in termini di quantitativi raggruppabili);
- Semplificazioni circa l’obbligo di compilazione e tenuta dei registri di carico e scarico, dei FIR (Formulario Identificazione Rifiuti, documentazione obbligatoria per il trasporto e di dichiarazione annuale MUD (Modello Unico Dichiarazione; dichiarazione annuale relativa alle attività connesse alla gestione di rifiuti svolte nell’anno solare precedente la dichiarazione).

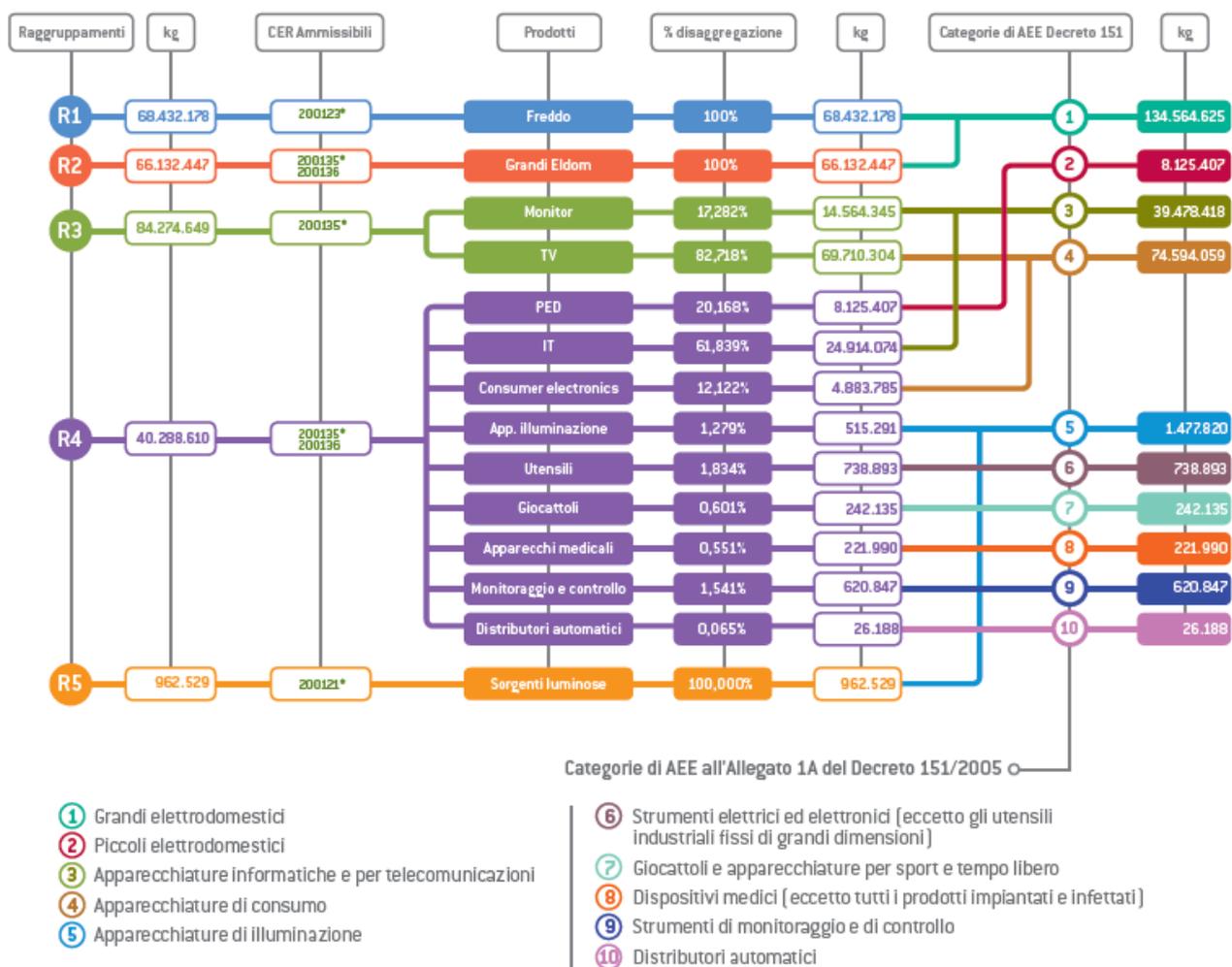
### 2.3.3 Il sistema RAEE in Italia

Con l’emanazione del decreto ministeriale 185 del 2007, vengono identificate le modalità di funzionamento del registro nazionale dei produttori di AEE e vengono introdotti i cinque raggruppamenti in cui sono classificati i RAEE domestici; tali raggruppamenti sono stati identificati sulla base delle diverse modalità di trattamento e di recupero dei materiali e sull’impatto ambientale che possono causare. I raggruppamenti così risultanti sono:

- R1: freddo e clima (frigoriferi, congelatori, condizionatori, scaldacqua, ecc.);
- R2: grandi bianchi (lavatrici, lavastoviglie, cappe, forni, piani cottura, forni a microonde, ecc.);
- R3: televisori e monitor (televisori e schermi a tubo catodico, LCD, plasma, ecc.);
- R4: piccoli elettrodomestici, elettronica di consumo, informatica, apparecchi di illuminazione, giocattoli, orologi, apparecchi per la cura della persona ecc.
- R5: sorgenti luminose.

Dato la non diretta corrispondenza fra raggruppamento e categoria di apparecchiature (suddivisione in 10 categorie secondo quanto previsto dall’allegato 1A del D.Lgs. 151/05), nella Figura 2.3 viene riportata, ad esempio, il calcolo della corrispondenza fra categorie e raggruppamenti per l’anno

2011 (tale ripartizione è stata effettuata sulla base di rilevazioni sperimentali sul campo relative al tasso di ritorno di ciascuna categoria).



**Figura 2.3: Disaggregazione dei Raggruppamenti in categorie di AEE secondo i coefficienti adottati nel 2011 (Fonte: Ecodom, I RAEE domestici generati in Italia)**

A seguito, quindi, del Decreto 151 del 2005, che impone ai produttori di AEE di istituire Sistemi Collettivi per la gestione del trattamento dei RAEE, in Italia si sviluppa un sistema multi consortile: i produttori sono liberi di aderire a uno fra i Sistemi Collettivi esistenti o associarsi per fondarne di nuovi. Ad oggi si contano quindici Sistemi Collettivi, che si differenziano per numero di aziende produttrici aderenti, per quota di mercato rappresentata, per forma giuridica e per tipologia di RAEE trattati. I Sistemi Collettivi sono a loro volta consorziati nel Centro di Coordinamento RAEE, avente lo scopo di garantire l'uniformità del servizio ai Centri di Raccolta su tutto il territorio

nazionale e un sistema di regole volte a garantire un “levelled field” su cui competere per tutti i Sistemi Collettivi. I Sistemi Collettivi presenti sul territorio nazionale sono:

- APIRAEE
- CONSORZIO CCR
- COBAT
- DATASERV ITALIA
- ECODOM
- ECOELIT
- ECOEM
- ECOPED
- ECOLAMP
- ECOLIGHT
- ECOR'IT
- ERP
- RAECYCLE
- REMEDIA
- RIDOMUS

Il Centro di Coordinamento RAEE è un organismo costituito, finanziato e gestito dai Sistemi Collettivi istituiti dai Produttori di AEE, con il compito di garantire condizioni uniformi ed omogenee tra i Sistemi Collettivi stessi, che devono obbligatoriamente farne parte. Il Centro di Coordinamento RAEE ha scelto di dotarsi di due importanti strumenti di governance, denominati "Regole Operative" e "Regolamento in Materia di Sanzioni", che stabiliscono precise regole tese a garantire omogenee condizioni di operatività e modalità eque e condivise per assicurare il servizio su tutto il territorio nazionale ponendo delle sanzioni a carico di chi dovesse non rispettare le regole interne condivise. In particolare essi hanno l'obiettivo di:

- Assicurare maggiore trasparenza e controllo del Sistema RAEE;
- Garantire elevati livelli di servizio nel ritiro dei RAEE dai Centri di Raccolta;
- Assicurare un corretto comportamento dei Sistemi Collettivi.

Il Regolamento rende quindi più autorevole il ruolo del Centro di Coordinamento RAEE attraverso una serie di strumenti di controllo sul lavoro dei Sistemi Collettivi che possono essere sottoposti a sanzioni in caso di inadempienze o comportamenti non corretti.

Il Centro di Coordinamento ha inoltre stipulato:

- *“Accordo di programma per la definizione delle condizioni generali di raccolta e gestione dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche”* con ANCI (Associazione Nazionali Comuni Italiani) per definire le caratteristiche minime del servizio offerto dai Sistemi Collettivi ai Centri di Raccolta comunali;
- *“Accordo tra ANCI, le organizzazioni nazionali di categoria della distribuzione e il centro di coordinamento RAEE per la raccolta e la gestione di rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche come previsto dall’Art.10 comma 2 lettera B del Decreto Ministeriale del 25 settembre 2007 e nel rispetto del decreto ministeriale 8 marzo 2010 n° 65”* per definire le caratteristiche minime del servizio offerto dai Sistemi Collettivi ai Distributori;
- *“Accordo relativo al trattamento dei RAEE e alla qualificazione delle aziende di recupero dei RAEE”* con ASSORAEE (Associazione Recuperatori Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) allo scopo di assicurare un adeguato livello di qualificazione delle aziende del settore, un’omogenea qualità di trattamento e il raggiungimento di un elevato livello di qualità nel recupero delle materie prime e nella messa in sicurezza delle componenti inquinanti. Tale accordo viene fattivamente implementato attraverso Audit di terza parte per il controllo delle performance degli impianti di trattamento.

Il nuovo sistema RAEE ha iniziato la propria operatività nel corso del 2008, ma solo nel 2009 ha raggiunto la sua piena maturità, raggiungendo un quantitativo di RAEE gestiti pari a circa 193.000 tonnellate. Nel 2010 una sempre maggiore efficienza del sistema di gestione e l’entrata in vigore del cosiddetto *Uno contro Uno* presso la Distribuzione ha contribuito ad aumentare significativamente la raccolta con un quantitativo raccolto di circa 245.000 tonnellate (possiamo notare che il dato discosta leggermente da quello fornito da Rapporto Rifiuti 2012, in quanto la fonte dei dati è differente). Il 2011 è stato un anno di sostanziale consolidamento e di progressiva crescita del sistema.

La Figura 2.4 riporta come i quantitativi di RAEE siano in crescita dal 2008 al 2011; si può notare come nel 2010 le quantità siano notevolmente aumentate e come il raggruppamento R3 sia quello con i quantitativi raccolti maggiori, complice anche il passaggio al digitale terrestre in molte regioni d’Italia, dove gli schermi a tubo catodico sono stati sostituiti da televisori LCD.

Per quanto riguarda le sorgenti luminose (R5) le quantità raccolte non sono significative, sia a causa di una ridotta sensibilità dei cittadini ad una raccolta differenziata per questa tipologia di

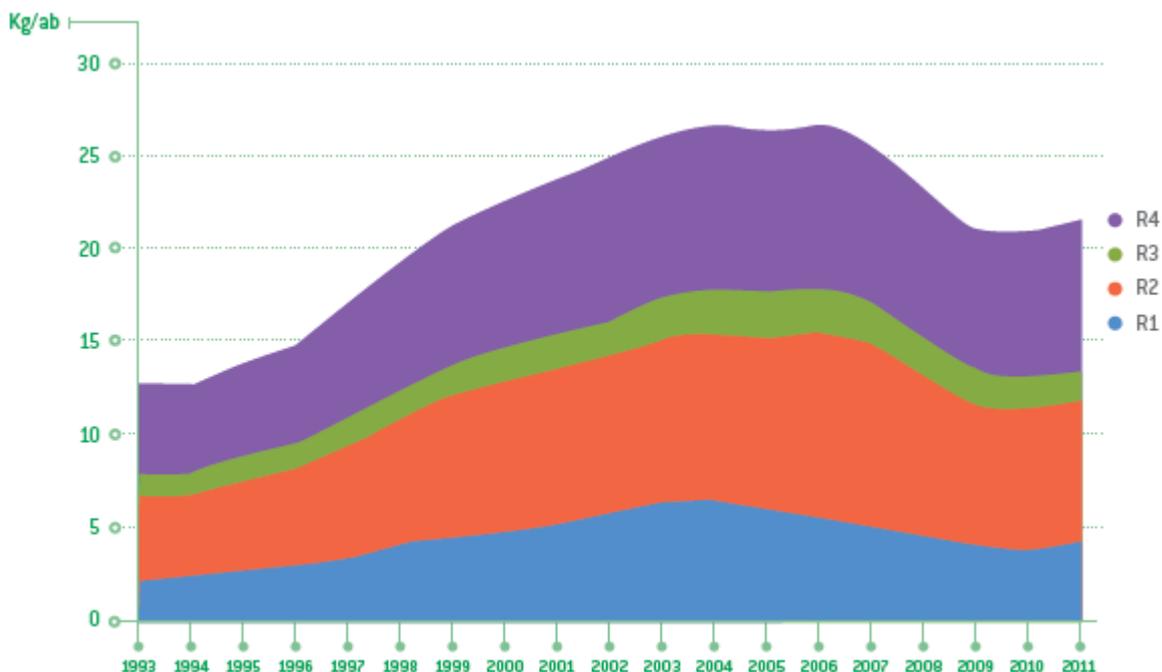
apparecchiature, sia per il divieto di accesso ai Centri di raccolta comunali di alcune figure professionali detentrici dei rifiuti (come ad esempio gli installatori).



**Figura 2.4: Andamento della raccolta dei RAEE per gli anni dal 2008 al 2011 suddiviso per raggruppamento (Fonte: Centro di Coordinamento RAEE)**

Dai dati forniti dal Rapporto Rifiuti 2012, le Apparecchiature Elettriche e d Elettroniche immesse sul mercato nel 2010 sono circa 845 mila tonnellate; questo dato evidenzia il fatto che il potenziale di crescita della raccolta dei RAEE sia ancora molto elevato, in quanto nel 2010 è stato raccolto

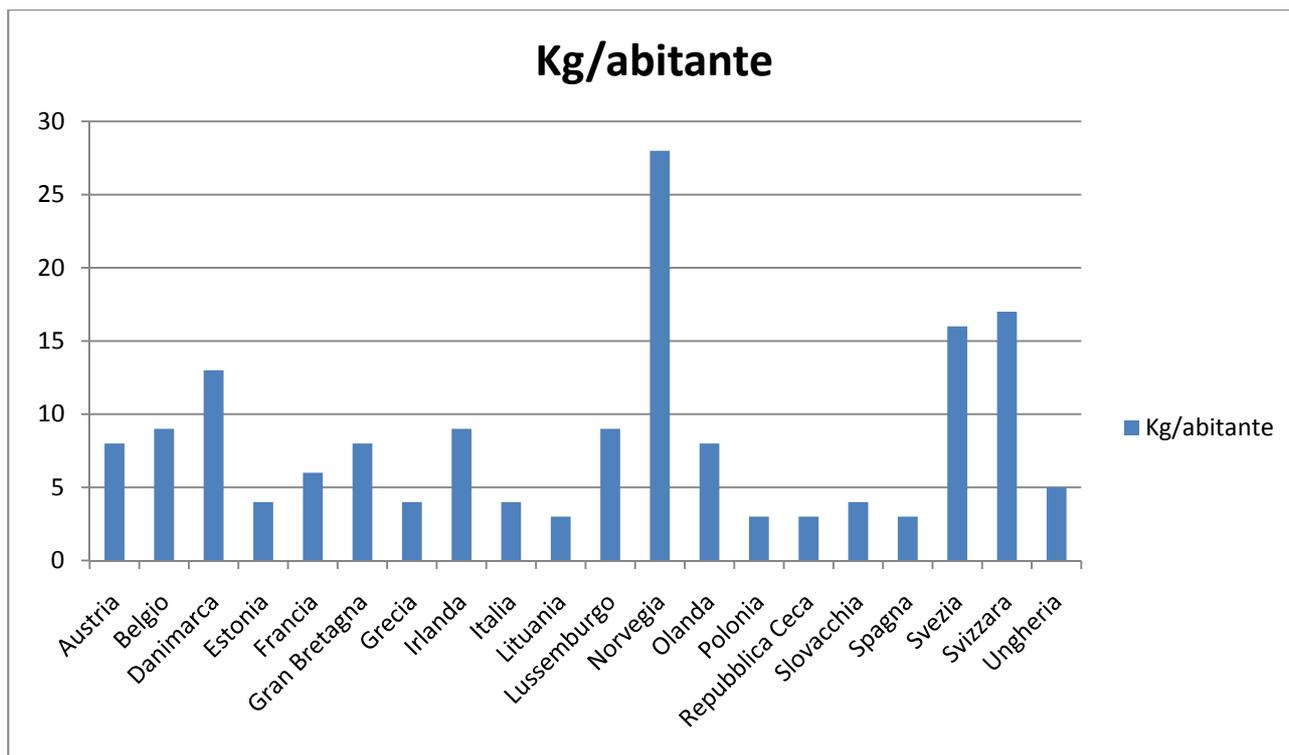
solo il 30% dell'immesso sul mercato (in Figura 2.5 è rappresentata la quantità prodotta di AEE in kg/abitante dal 1993 al 2011).



**Figura 2.5: AEE prodotte in kg/abitante (Fonte: Ecodom, I RAEE domestici generati in Italia)**

È comunque importante ricordare che tale dato è da considerarsi come indicativo, poiché a determinare il rapporto tra RAEE raccolti e AEE vendute intervengono numerose variabili, quali ad esempio la vita media dell'apparecchiatura, il tasso di sostituzione (alcune apparecchiature non vengono acquistate in sostituzione di quelle vecchie) o la differenza di peso tra apparecchiature nuove e vecchie (è il caso dei televisori a schermo piatto rispetto a quelli a tubo catodico che hanno avuto un tasso di ritorno molto elevato rispetto alla media, intorno all'80%).

Un altro dato significativo è il quantitativo pro capite raccolto in Italia: infatti l'Italia ha raggiunto nel 2010 i 4 kg per abitante, fissato dalla normativa europea, a differenza di altri stati europei che invece hanno superato tale valore da tempo, arrivando in alcuni casi, come ad esempio le realtà scandinave, a valori intorno ai 16 kg per abitante, con una media europea di 7 kg per abitante. In Figura 2.6 è riportata la raccolta pro-capite di RAEE nei Paesi dell'Unione Europea rappresentati nel WEEE Forum nel 2011.



**Figura 2.6: Raccolta pro-capite (kg/ad abitante servito) di RAEE nei Paesi Europei rappresentati nel WEEE Forum nel 2011 (Fonte: WEEE Forum)**

Anche a livello nazionale la situazione è molto differente fra regione e regione; tale fenomeno è parzialmente imputabile alla non omogenea distribuzione dei Centri di Raccolta; la Tabella 2.1 riporta la distribuzione nazionale dei centri di raccolta e la raccolta pro capite italiana. Si può notare come le regioni del nord e dell'Italia centrale siano gestite con un numero maggiore di CdR, e che anche regioni con un ridotto numero di isole ecologiche possa avere un'elevata raccolta pro capite di RAEE, ma è comunque al Sud che si riscontra il minor livello di raccolta pro-capite.

Regioni	Centri di Raccolta	Raccolta pro-capite (kg-ab <sup>-1</sup> )
Valle d'Aosta	17	4,47
Piemonte	308	5,50
Lombardia	846	5,05
Liguria	63	4,73
Veneto	456	5,55
Trentino Alto Adige	208	7,33
Friuli Venezia Giulia	219	6,94
Emilia Romagna	366	6,07
Toscana	143	4,90
Umbria	67	7,59
Marche	104	4,14
Abruzzo	24	2,55
Lazio	128	3,42
Campania	205	3,24
Molise	19	3,82
Basilicata	37	2,41
Puglia	115	1,73
Calabria	64	3,93
Sicilia	66	2,79
Sardegna	109	7,31

**Tabella 2.1: Distribuzione nazionale dei centri di raccolta e produzione pro capite – anno 2010 (Fonte: Rapporto CdC, 2011)**

## 2.4.L'EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA

La Direttiva europea sui RAEE è stata oggetto tra il 2006 ed il 2012 di un profondo ed importante processo di revisione (recast) a livello europeo, con studi preparatori, impact assessment, proposte del Consiglio dell'UE e infine un testo di compromesso che ha visto numerosi emendamenti durante le votazioni del parlamento.

In data 24 luglio 2012 il testo della nuova Direttiva 2012/19/UE è stato quindi pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea; da tale data gli Stati Membri hanno 18 mesi per effettuare la trasposizione in normativa nazionale.

Le principali innovazioni introdotte dalla normativa riguardano:

- target di raccolta: il target non è più unico e fissato in kg/abitante per tutti i Paesi dell'Unione, ma legato alle condizioni e ai mercati dei singoli Stati membri; attraverso un percorso di avvicinamento gli Stati Membri dovranno definire il target di raccolta secondo uno dei criteri:
  - 65% in peso dell'immesso sul mercato nei 3 anni precedenti;

- 85% in peso dei RAEE generati;

Anno	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Target	4 kg/abitante oppure media kg/abitante raccolti nei tre anni precedenti (il maggiore dei due)				45% immesso sul mercato (media tre anni precedenti)			65% immesso sul mercato oppure 85% RAEE generati	

**Figura 2.7: Struttura ed evoluzione dei target di raccolta previsti dalla nuova direttiva RAEE (Fonte: Ecodom, I RAEE domestici generati in Italia)**

- obiettivi di recupero: vengono imposto obiettivi di recupero progressivamente più sfidanti, ovvero:

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

- per i RAEE che rientrano nelle categorie 1 o 10 dell'allegato I,*
  - recupero dell'80 %, e
  - riciclaggio del 75 %;
- per i RAEE che rientrano nelle categorie 3 o 4 dell'allegato I,*
  - recupero dell'75 %, e
  - riciclaggio del 65 %;
- per i RAEE che rientrano nelle categorie 2, 5, 6, 7, 8 o 9 dell'allegato I,*
  - recupero dell'70 %, e
  - riciclaggio del 50 %;
- per le lampade a scarica, il riciclaggio dell'80 %.*

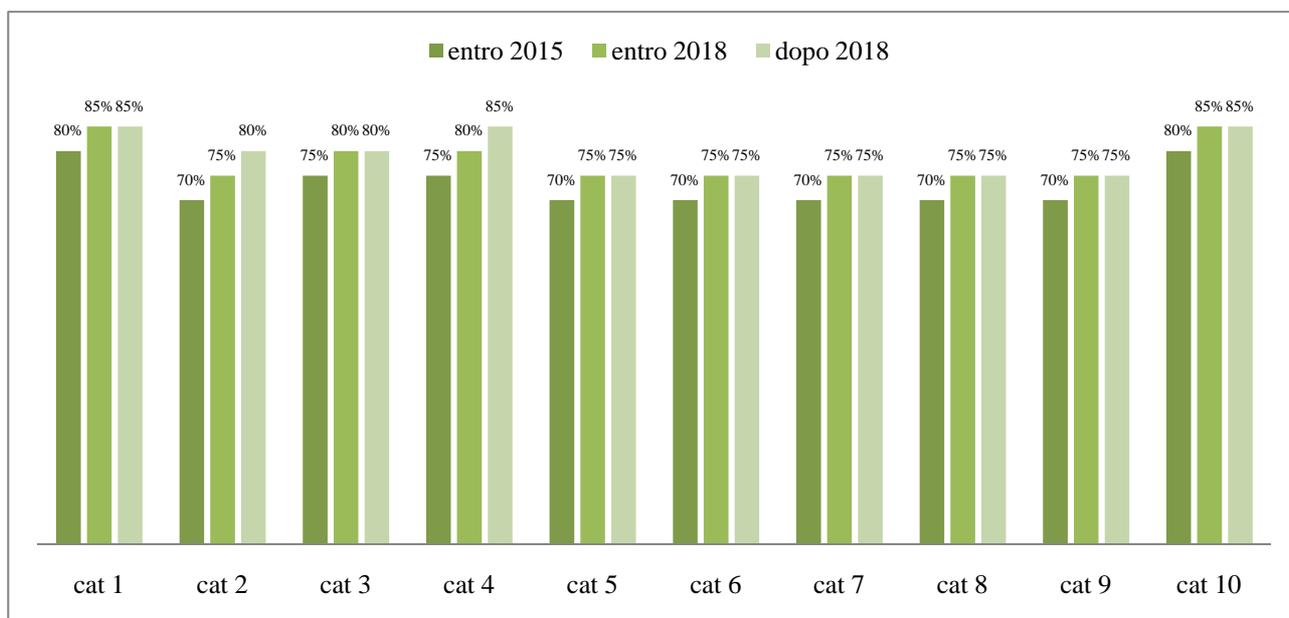
*Parte 2: Obiettivi minimi applicabili per categoria dal 15 agosto 2015 fino al 14 agosto 2018 con riferimento alle categorie elencate nell'allegato I:*

- per i RAEE che rientrano nelle categorie 1 o 10 dell'allegato I,*
  - recupero dell'85 %, e
  - preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio dell'80 %;
- per i RAEE che rientrano nelle categorie 3 o 4 dell'allegato I,*
  - recupero dell'80 %, e
  - preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 70 %;

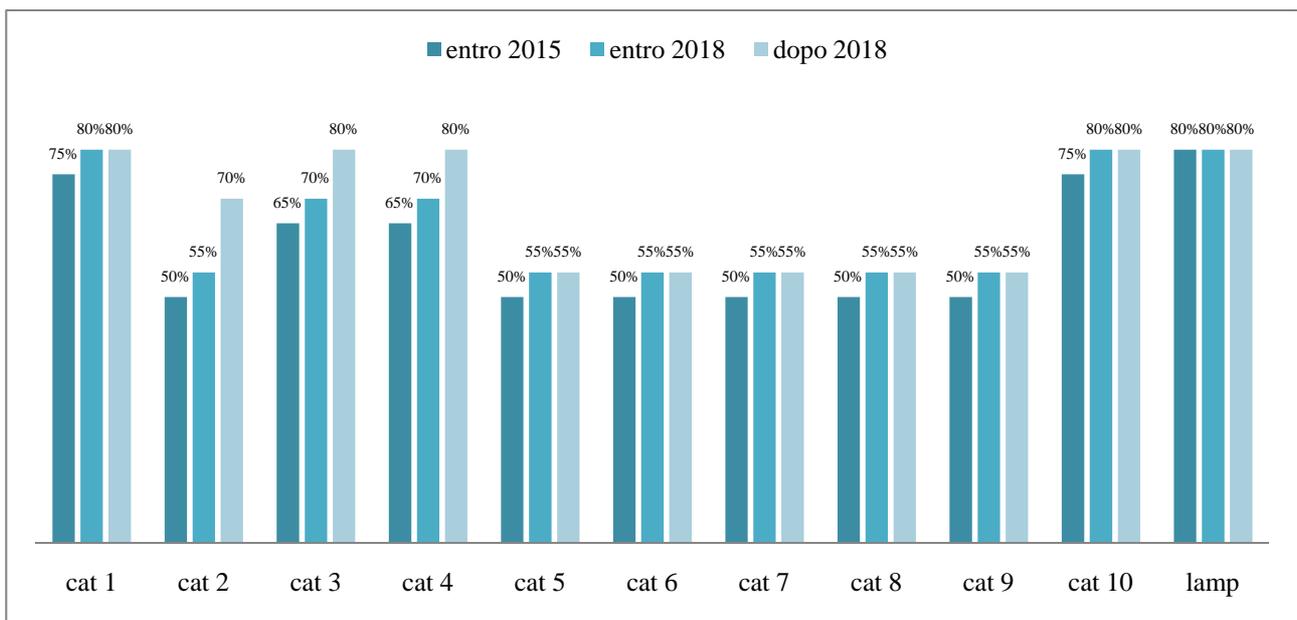
- c) per i RAEE che rientrano nelle categorie 2, 5, 6, 7, 8 o 9 dell'allegato I,
  - recupero dell'75 %, e
  - preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 55 %;
- d) per le lampade a scarica, il riciclaggio dell'80 %.

*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 %, e
  - preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio dell'80 %;
- b) per i RAEE che rientrano nella categoria 2 dell'allegato III,
  - recupero dell'80 %, e
  - preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 70 %;
- c) per i RAEE che rientrano nell'allegato III, categorie 5 o 6,
  - recupero dell'75 %, e
  - preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 55 %;
- d) per i RAEE che rientrano nella categoria 3 dell'allegato III, riciclaggio dell'80 %.



**Figura 2.8: Evoluzione dei target di riciclaggio (% in peso) previsti dalla nuova direttiva RAEE**



**Figura 2.9: Evoluzione dei target di recupero (% in peso) previsti dalla nuova direttiva RAEE**

- norme minime europee per il trattamento: la Commissione è chiamata a incaricare un organismo di standardizzazione europeo, affinché questo normi circa il trattamento, compresi il recupero, il riciclaggio e la preparazione per il riutilizzo, dei RAEE. Tali norme dovranno essere espressione del progresso tecnico raggiunto.

In tal senso il CENELEC (Comitato Europeo di Normazione Elettrotecnica) ha già istituito un gruppo di lavoro che sta sviluppando lo standard prendendo come canovaccio dallo standard privato WEEELABEX già creato dal WEEE FORUM (associazione europea dei Sistemi Collettivi per la raccolta dei RAEE).

Lo standard WEEELABEX si divide in tre sezioni:

- Raccolta;
- Trasporto;
- Trattamento.

Nella sezione relativa al trattamento viene posta l'attenzione sulle attività maggiormente critiche per poter garantire un elevato livello qualitativo dei RAEE, con particolare riferimento a:

- *batch*: con cadenza annuale viene posto l'obbligo di effettuare batch volti a valutare le performance di *depollution* degli impianti di trattamento, ovvero la loro capacità di recuperare, stoccare e inviare a corretto trattamento le sostanze inquinanti;

- *depollution monitoring*: gli impianti di trattamento devono costruire e mantenere un continuo un sistema di indicatori tali da dimostrare il corretto funzionamento dell'impianto, ovvero il mantenimento, a parità di condizioni, dei risultati ottenuti durante il batch anche nel day by day;
- *downstream monitoring*: le frazioni ottenute dal trattamento dei RAEE devono essere seguite da parte dell'impianto di trattamento durante tutta la filiera del recupero a valle; attraverso il puntuale ed accorto monitoraggio della filiera si ottiene da un lato la corretta rendicontazione degli obiettivi di recupero e riciclaggio e dall'altra la garanzia del corretto trattamento anche delle componenti rimesse dai RAEE (evitando quindi pratiche altamente deprecabili quali bruciare in modo incontrollato cavi per ottenerne rame).

## 3. IL TRATTAMENTO DEI RAEE

### 3.1.COMPONENTI RECUPERABILI E PERICOLOSE CONTENUTE NEI RAEE

Il corretto trattamento dei RAEE ha un'elevata importanza ambientale su più fronti; oltre a ridurre l'immissione in atmosfera di sostanze pericolose come i metalli pesanti presenti nelle schede elettroniche o i gas ozono lesivi presenti nei circuiti refrigeranti di frigoriferi e condizionatori, consente un notevole risparmio energetico per il riciclo di materie prime seconde. I principali materiali recuperati da un punto di vista quantitativo, che possono essere re-immessi sul mercato come materie prime seconde, sono:

- Ferro;
- Rame;
- Alluminio;
- Plastiche (PVC, ABS, etc.);
- Calcestruzzo;
- Vetro.

Inoltre dal corretto trattamento soprattutto delle apparecchiature IT è possibile recuperare materiali quali:

- Oro;
- Argento;
- Zinco;
- Terre rare.

Un aspetto molto importante del processo di trattamento è la separazione e la messa in sicurezza delle componenti pericolose presenti nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche che possono determinare danni alla salute dell'uomo o sull'ambiente.

L'elenco seguente riunisce le principali sostanze pericolose che sono potenzialmente presenti nei RAEE (ANPA, 1998):

- *Cloro-fluoro-carburi (CFC) e idro-cloro-fluoro-carburi (HCFC)*: sono gas refrigeranti ed espandenti usati nei frigoriferi, congelatori e condizionatori, presenti nei circuiti refrigeranti o nelle schiume poliuretaniche come isolanti termici, prodotti prima del 1996; a partire da

tale dato l'utilizzo di tali sostanze é stato vietati dal protocollo di Montreal. Tali sostanza devono quindi essere captate e recuperate per permetterne un successivo corretto smaltimento. Le curve di mortalità delle apparecchiature per il raffreddamento fanno si che ad oggi circa la metà dei questa tipologia di RAEE ancora contenga cloro-fluoro-carburi e idro-cloro-fluoro-carburi;

- *Idro-fluoro-carburi (HCF) e idrocarburi (HC):* sono i gas refrigeranti ed espandenti presenti nei frigoriferi e nei condizionatori in sostituzione di CFC e HCFC dopo il bando del 1996. Gli idro-fluoro-carburi mantengono caratteristiche ozono lesive, ma di ridotta entità, mentre gli idrocarburi hanno caratteristiche di esplosività ed è quindi necessario un monitoraggio continuo e il loro recupero, per consentirne un corretto smaltimento da una parte e per garantire la sicurezza del luogo di lavoro dall'altra.
- *Olii lubrificanti (minerali o sintetici):* sono contenuti nei compressori e inseriti nei circuiti di refrigerazione dei frigoriferi, congelatori e condizionatori. In ciascun compressore è contenuto un quantitativo di olio pari circa a 300 grammi. Gli oli possono essere recuperati direttamente dal compressore, ma si deve procedere ad un'operazione di bonifica in quanto, durante gli anni di utilizzo dell'apparecchiature, gli olii, in continuo contatto con i gas refrigeranti, sono stati da questi ultimi contaminati. Oggi, con l'utilizzo dell'HCF la presenza di gas refrigerante negli oli è ridotta, anche se la bonifica deve essere comunque effettuata. Una volta bonificati gli oli devono essere raccolti in appositi contenitori per essere correttamente rigenerati ed inviati al riutilizzo.
- *Condensatori con poli-cloro-bifenili (PCB):* sono idrocarburi aromatici contenenti cloro molto diffusi fino a pochi anni fa per la forte resistenza all'attacco acido e basico e per l'alta costante dielettrica. Il quantitativo di PCB presente nei condensatori è di circa 30-90 grammi e, a causa della loro pericolosità, devono essere separati e raccolti per essere avviati a centri specializzati di trattamento. L'utilizzo di condensatori contenenti PCB è stato bandito dal D.P.R 216 del 1988; la successiva modifica apportata dal D.M. del 1994, ha abbassato il limite di concentrazione ammessa di PCB da 0,01% a 0,005%.
- *Mercurio:* era presenta negli interruttori di frigoriferi e congelatori e, in modesta concentrazione, anche nei vetri dei tubi catodici. Il mercurio è tutt'ora presente, seppure in quantità limitate, nelle lampade. Può provocare gravi danni alla salute umana e per questo motivo la direttiva europea 2002/95/CE (Rohs) ha predisposto delle limitazioni nella presenza di alcune sostanze, tra cui il mercurio, che non può essere presente con una percentuale superiore al 0,1% in peso nelle nuove apparecchiature immesse sul mercato in seguito all'emanazione della Direttiva.

- *Piombo*: è una sostanza largamente utilizzata per le notevoli proprietà (resistenza alla corrosione, lavorabilità associata a alta densità e resistenza alla erosione) a fronte di un costo contenuto. All'interno delle AEE lo si può trovare come additivo nei rivestimenti plastici (PVC) dei cavi elettrici, nelle microsaldature di circuiti stampati o altri componenti elettrici e come additivo nei vetri dei tubi catodici. Poiché può causare elevati danni alla salute umana tutti i materiali contenenti piombo devono essere separati, per quanto possibile, prima delle fasi di trattamento dei RAEE, ed inviati ad apposito trattamento.
- *Nickel e Cadmio*: si possono trovare in alcuni tipi di batterie e di tubi catodici. Il cadmio può essere inoltre utilizzato come stabilizzatore nella plastica PVC ed è presente anche nei semiconduttori. I composti di cadmio sono tossici e possono provocare danni all'organismo.
- *Cromo esavalente*: utilizzato principalmente come anticorrosivo nei sistemi di raffreddamento in acciaio al carbonio nei frigoriferi ad assorbimento. Il cromo è soprattutto tossico per gli organismi. Può alterare i materiali genetici e causare il cancro.
- *Zinco*: è uno dei più comuni metalli usati nell'industria. In particolare l'industria elettrica ed elettronica ne assorbe oltre il 10% della produzione complessiva. Nel caso dei computer e monitor è rintracciabile sia come rivestimento di alcuni metalli, sia come ottone (lega zinco-rame) nei circuiti stampati; è possibile trovare tracce di zinco anche nei tubi catodici. Elevate concentrazioni di zinco possono causare problemi alla salute umana e all'ambiente.
- *Ritardanti di fiamma*: i più comuni sono i bifenili polibromurati (PBB) e gli eteri di difenile polibromurati (PBDE); servono per garantire la protezione contro l'infiammabilità innalzando la temperatura d'innescio. Sono utilizzati comunemente nei circuiti stampati, nei cavi e nelle cover di plastica dei televisori e degli elettrodomestici che possono raggiungere elevate temperature. Sono fortemente tossici ed una volta introdotti in natura si diffondono nella catena alimentare.

L'utilizzo della maggior parte di queste sostanze è stato bandito a livello europeo dalla direttiva 2002/95/CE, art. 5, che prevede specifiche eccezioni per l'utilizzo e relativi limiti di concentrazione.

L'elevato contenuto di sostanze e componenti pericolosi rende i RAEE rifiuti dall'elevato impatto ambientale; di conseguenza la messa in discarica provoca un grave impatto ambientale principalmente per due motivi:

- inadeguatezza di molte delle discariche e mancanza di un efficace controllo;
- rilascio progressivo di parte delle sostanze pericolose contenute.

I rischi principali per l'ambiente sono quelli derivanti dalla lisciviazione ed evaporazione del mercurio e dei PCB. Si calcola, inoltre, che i rifiuti di frantumazione degli elettrodomestici bianchi abbiano una concentrazione elevata di piombo e che il 95 % dei PCB contenuti nei condensatori finisca nella polvere di frantumazione. I ritardanti di fiamma bromurati e il cadmio possono penetrare nel terreno andando ad inquinare le falde sotterranee, ed eventuali incendi in discarica possono causare reazioni chimiche che producono diossine e furani (Cagno *et al.*,2004). Per questo motivo è molto importante un corretto trattamento dei RAEE, che consenta la rimozione delle componenti pericolose, e il recupero delle materie prime seconde, senza recare danno all'ambiente e alla salute umana.

## 3.2.IL PROCESSO DI TRATTAMENTO

Il processo di trattamento delle apparecchiature a fine vita è articolato in più fasi nel rispetto della normativa vigente ed ha inizio dal momento in cui i rifiuti sono ritirati dai centri di raccolta comunali e dai distributori di AEE per essere consegnati presso impianti appositamente autorizzati.

### 3.2.1 Le autorizzazioni per il trattamento dei RAEE

Le autorizzazioni per la gestione dei RAEE possono essere di tre tipologie differenti:

- Autorizzazioni in procedura semplificata: vengono rilasciate dalle province o regioni territorialmente competenti secondo quanto previsto dagli articoli 214 e 216 del D.Lgs. 152/06 e dal Decreto del Ministero dell'Ambiente n. 65 del 1998 *Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del D.Lgs 5 febbraio 1997, n.22.*

Possono essere trattati presso impianti autorizzati secondo questa normativa esclusivamente rifiuti destinati alle operazioni di recupero, con quantitativi massimi in ingresso limitati effettuando *attività di recupero: messa di riserva di rifiuti [R13] con asportazione di eventuali batterie e pile; disassemblaggio delle carcasse, dei cablaggi elettrici e delle schede elettroniche; estrazione e messa in sicurezza dei tubi catodici con separazione e raccolta delle polveri presenti; separazione delle componenti di plastica, gomma, ecc.,*

*laddove non strutturalmente vincolati con il resto della struttura; frantumazione e separazione delle parti metalliche da quelle non metalliche; macinazione e granulazione della frazione costituita da gomma e della frazione plastica per sottoporle alle operazioni di recupero nell'industria delle materie plastiche e della gomma [R3] e per sottoporre i rifiuti metallici all'operazione di recupero nell'industria metallurgica [R4]. Le materie prime ottenute e/o i prodotti ottenuti devono avere le seguenti caratteristiche: metalli ferrosi e non ferrosi nelle forme usualmente commercializzate; prodotti e materiali plastici e in gomma nelle forme usualmente commercializzate.*

L'autorizzazione ha una validità di 5 anni.

- Autorizzazioni in procedura ordinaria: vengono rilasciate dalle province o regioni territorialmente competenti secondo quanto previsto dall'articolo 208 del D.Lgs. 152/06. Le autorizzazioni vengono rilasciate a valle di una specifica delibera della Conferenza dei Servizi.

*L'autorizzazione individua le condizioni e le prescrizioni necessarie per garantire l'attuazione dei principi di cui all'articolo 178 e contiene almeno i seguenti elementi:*

- a) i tipi ed i quantitativi di rifiuti da smaltire o da recuperare;*
- b) i requisiti tecnici con particolare riferimento alla compatibilità del sito, alle attrezzature utilizzate, ai tipi ed ai quantitativi massimi di rifiuti ed alla conformità dell'impianto al progetto approvato;*
- c) le precauzioni da prendere in materia di sicurezza ed igiene ambientale;*
- d) la localizzazione dell'impianto da autorizzare;*
- e) il metodo di trattamento e di recupero;*
- f) le prescrizioni per le operazioni di messa in sicurezza, chiusura dell'impianto e ripristino del sito;*
- g) le garanzie finanziarie richieste, che devono essere prestate solo al momento dell'avvio effettivo dell'esercizio dell'impianto; a tal fine, le garanzie finanziarie per la gestione della discarica, anche per la fase successiva alla sua chiusura, dovranno essere prestate conformemente a quanto disposto dall'art. 14 del decreto legislativo 13 gennaio 2003, n. 36;*
- h) la data di scadenza dell'autorizzazione, in conformità con quanto previsto al comma 12;*
- i) i limiti di emissione in atmosfera per i processi di trattamento termico dei rifiuti, anche accompagnati da recupero energetico.*

*L'autorizzazione ... è concessa per un periodo di dieci anni.*

- Autorizzazioni Integrate Ambientali (AIA): vengono rilasciate ai sensi del D.Lgs. 59 del 18 febbraio 2005 *Attuazione integrale della direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento*. Autorità competente per il rilascio di questo tipo di autorizzazioni è il ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare o la regione territorialmente competente.

L'Autorizzazione Integrata Ambientale ha lo scopo di normare e definire tutti gli aspetti impattanti sull'ambiente delle attività produttive svolte nel sito autorizzato. Sono quindi integrati nell'autorizzazione anche le emissioni in atmosfera e la gestione delle acque di scarico.

La durata dell'AIA è di 6 anni.

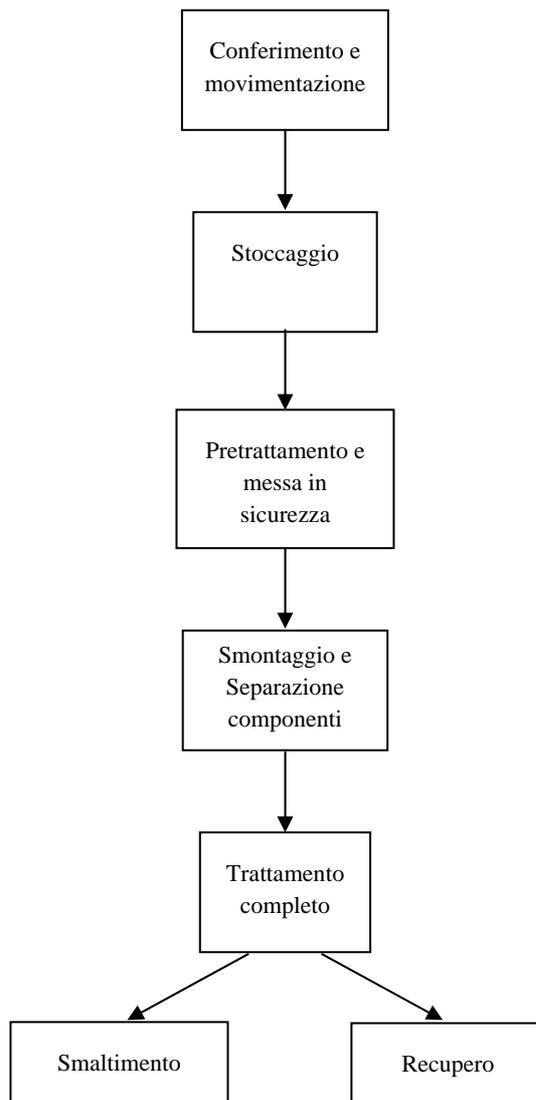
### 3.2.2 Le fasi del trattamento dei RAEE

Il processo di lavorazione è sostanzialmente differente secondo la tipologia trattata; possono essere tuttavia, individuate delle fasi di trattamento simili per tutti i RAEE:

1. Stoccaggio;
2. Messa in sicurezza;
3. Smontaggio;
4. Triturazione e separazione dei materiali;
5. Recupero energetico e smaltimento finale.

Ciascuna delle fasi deve essere condotta in modo tale da evitare la dispersione nell'ambiente di sostanze pericolose e da massimizzare l'efficienza di recupero.

La Figura 3.1 riporta lo schema di processo di un generico impianto di trattamento, in cui sono riportate tutte le fasi per il trattamento dei RAEE.



**Figura 3.1: Processo di trattamento dei RAEE**

### *Fase di conferimento e movimentazione*

Il conferimento e la movimentazione dei RAEE da sottoporre ad operazioni di trattamento deve essere effettuata adottando criteri che garantiscano la protezione delle apparecchiature dismesse durante il trasporto e durante le operazioni di carico e scarico. Le apparecchiature non devono subire danneggiamenti che possano causare il rilascio di sostanze inquinanti o pericolose per l'ambiente o compromettere le successive operazioni di recupero: devono quindi essere evitate lesioni ai circuiti frigoriferi e alle pareti, nel caso di frigoriferi, per evitare il rilascio all'atmosfera dei refrigeranti o degli oli, nonchè ai tubi catodici, nel caso di televisori e computer; le sorgenti luminose durante le fasi di raccolta, stoccaggio e movimentazione, devono essere mantenute integre

per evitare la dispersione di polveri e vapori contenuti nelle apparecchiature stesse, anche attraverso l'impiego di appositi contenitori che ne assicurino l'integrità.

Devono quindi essere:

- a. scelte idonee apparecchiature di sollevamento;
- b. rimosse eventuali sostanze residue rilasciabili durante la movimentazione delle apparecchiatura;
- c. assicurata la chiusura degli sportelli e fissate le parti mobili;
- d. mantenuta l'integrità della tenuta nei confronti dei liquidi o dei gas contenuti nei circuiti;
- e. evitare operazioni di riduzione volumetrica prima della messa in sicurezza;
- f. utilizzare modalità conservative di caricamento dei cassoni di trasporto.

I materiali da sottoporre a trattamento devono essere caratterizzati e separati per singola tipologia al fine di identificare la specifica metodologia di trattamento.

Un rivelatore di radioattività in ingresso all'impianto di trattamento, anche portatile, deve consentire di individuare materiali radioattivi eventualmente presenti tra i rifiuti.



**Figura 3.2: Movimentazione dei RAEE**

### *Fase di stoccaggio*

Lo stoccaggio dei RAEE e dei rifiuti della loro lavorazione deve essere realizzato in modo da non modificarne le caratteristiche compromettendone il successivo recupero.

Nella gestione dello stoccaggio è necessario evitare ogni contaminazione del suolo e dei corpi ricettori superficiali e profondi.

Il settore di stoccaggio delle apparecchiature dismesse deve essere organizzato in aree distinte per ciascuna tipologia di trattamento a cui le apparecchiature sono destinate; nel caso di apparecchiature contenenti sostanze pericolose, tali aree devono essere contrassegnate da tabelle, ben visibili per dimensioni e collocazione, indicanti le norme per il comportamento, per la manipolazione dei rifiuti e per il contenimento dei rischi per la salute dell'uomo e per l'ambiente.

Nell'area di stoccaggio delle apparecchiature dismesse devono essere adottate procedure per evitare di accatastare le apparecchiature senza opportune misure di sicurezza per gli operatori e per l'integrità delle stesse apparecchiature.



**Figura 3.3: Corretto stoccaggio dei RAEE**

### *Fase di messa in sicurezza*

L'attività consiste nel complesso delle operazioni necessarie a rendere l'apparecchiatura ambientalmente sicura e pronta per le operazioni successive.

La messa in sicurezza deve comprendere, preventivamente, la rimozione di tutti i fluidi e delle seguenti sostanze, preparati e componenti:

- a. condensatori contenenti difenili policlorurati (PCB) da trattare ai sensi del decreto legislativo 22 maggio 1999, n. 209;
- b. componenti contenenti mercurio, come gli interruttori o i retroilluminatori;
- c. pile;

- d. circuiti stampati dei telefoni mobili in generale e di altri dispositivi se la superficie del circuito stampato è superiore a 10 cm<sup>2</sup>;
- e. cartucce di toner, liquido e in polvere, e di toner colore;
- f. plastica contenente ritardanti di fiamma bromurati;
- g. rifiuti di amianto e componenti che contengono amianto;
- h. tubi catodici;
- i. colorofluorocarburi (CFC), idroclorofluorocarburi (HCFC), idrofluoroclorocarburi (HFC) o idrocarburi (HC);
- j. sorgenti luminose a scarica;
- k. schermi a cristalli liquidi , se del caso con il rivestimento, di superficie superiore a 100 cm<sup>2</sup> e tutti quello retroilluminati mediante sorgenti luminose a scarica;
- l. cavi elettrici esterni;
- m. componenti contenenti fibre ceramiche refrattarie descritte nella direttiva 97/69/CE della Commissione, del 5 dicembre 1997, recante adeguamento al progresso tecnico della direttiva 67/548/CEE del Consiglio relative alla classificazione, all'imballaggio e all'etichettatura delle sostanze pericolose;
- n. componenti contenenti sostanze radioattive, fatta eccezione per i componenti che sono al di sotto delle soglie di esenzione previste dall'articolo 3 e dall'allegato I della direttiva 96/29/Euratom del Consiglio, del 13 maggio 1996, che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti;
- o. condensatori elettrolitici contenenti sostanze potenzialmente pericolose (altezza > 25 mm, diametro > 25 mm o proporzionalmente simili in volume).



**Figura 3.4: Macchina per la messa in sicurezza dei frigoriferi**

### *Fase di smontaggio*

La fase di smontaggio richiede una definizione attenta di procedure al fine di garantire la possibilità di recupero dei componenti potenzialmente validi da un punto di vista tecnico economico. Essa richiede, rispetto alle altre fasi, un maggior apporto di lavoro manuale. Sulla fase di smontaggio e sulla capacità di orientare il riutilizzo verso il riuso dei componenti o il riciclo dei materiali incidono molto le tecniche di fabbricazione del bene. Per alcune tipologie di RAEE le possibilità di recupero dei materiali dipendono da come viene condotto lo smontaggio se operato in modo scrupoloso è possibile estrarre componenti che durante la triturazione andrebbero persi, come ad esempio le schede elettriche e elettroniche o i pannelli di vetro dei frigoriferi.



**Figura 3.5: Smontaggio manuale del tubo catodico**

#### *Fase di triturazione e di separazione dei materiali*

È la fase centrale del trattamento dei RAEE in cui si realizza la frantumazione delle apparecchiature; i materiali triturati vengono inviati ad una fase successiva di separazione dei materiali in base alla loro composizione. Ad esempio i materiali ferrosi sono facilmente separati mediante sistemi magnetici, mentre per i materiali non ferrosi sono utilizzati sistemi amagnetici come le correnti indotte o le tavole densimetriche. I materiali separati nelle diverse categorie possono essere inviati agli appositi impianti di riciclo dove cessano di essere rifiuti e vengono utilizzati come materia in nuovi processi produttivi (End of Waste). Questa fase è caratterizzata da un maggiore impiego di energia e da soluzioni automatizzate e ad alto contenuto tecnologico, il che si traduce in maggiori potenzialità di recupero



**Figura 3.6: Impianto di triturazione e separazione dei materiali**

### *Recupero energetico e smaltimento finale*

I materiali per i quali non è possibile il recupero di materia anche secondo il testo unico ambientale 152/2006 devono, se possibile, essere inviati a recupero energetico, come ad esempio avviene per alcune plastiche o materiali di scarto ad elevato potere calorifico. Il materiale che invece non è possibile avviare ad alcuna forma di recupero deve essere inviato in discarica, previa inertizzazione delle componenti pericolose. Ad oggi una delle maggiori problematiche italiane è l'invio in discarica del poliuretano proveniente dalla lavorazione dei frigoriferi e dei congelatori, oggetto di questo studio.

### 3.2.3 Le fasi di trattamento dei RAEE del raggruppamento R1

L'interesse principale di questo studio è l'analisi del trattamento dei RAEE contenenti schiume poliuretatiche facenti parte del raggruppamento R1. Le fasi di trattamento di questa specifica categoria di rifiuti sono complessivamente quelle descritte precedentemente con alcune peculiarità dovute alla presenza di gas refrigeranti ed espandenti che, come già spiegato, hanno un GWP (Global Warming Potential) molto elevato e se non gestiti in modo corretto, possono contribuire sensibilmente all'assottigliamento della fascia di ozono e alla presenza dei gas refrigeranti ed espandenti, di nuova generazione, che possono provocare incendi ed esplosioni.

La fase di messa in sicurezza del raggruppamento R1 deve essere svolta tramite una delicata operazione di bonifica per la rimozione del gas refrigerante e dell'olio presenti nel compressore e nei circuiti refrigeranti; il gas presente nel poliuretano come espandente viene invece estratto successivamente all'operazione di triturazione. Le operazioni di bonifica in questo caso possono essere svolte con differenti tecnologie, tutte volte a rimuovere l'olio e a separare il gas. Il Decreto del Ministero del Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare del 20 settembre 2002 prevede alcuni accorgimenti per le operazioni di messa in sicurezza per apparecchiature contenenti sostanze ozono lesive [..]:

- 1. L'estrazione dovrà avvenire per mezzo di dispositivi aspiranti operanti in circuito chiuso in modo da assicurare che non ci sia alcun rilascio di sostanze lesive in atmosfera;*
- 2. L'asportazione del gruppo di compressione dalle apparecchiature fuori uso dovrà avvenire senza perdita di olio lubrificante poiché in esso sono contenute sostanze lesive;*
- 3. La bonifica del gruppo di compressione dall'olio lubrificante dovrà avvenire a mezzo di apposito impianto e con procedure tali da evitare il rilascio delle sostanze lesive, operando separatamente il recupero degli oli e delle stesse sostanze lesive.*

Il trasferimento del liquido refrigerante può avvenire in due modalità differenti: in fase liquida o in fase gassosa. Il primo sistema è molto costoso e non conveniente nel caso del trattamento di RAEE, di conseguenza vengono utilizzati i metodi di estrazione in fase gassosa, che garantiscono anche una maggiore efficienza; tra i sistemi di estrazione in fase gassosa quelli più facilmente applicabili sono (Cagno, 2004):

- Ad adsorbimento: sono state sviluppate delle matrici solide in grado di adsorbire refrigeranti diversi. Dopo l'aspirazione dal bene, la cartuccia adsorbente deve essere inviata a centri di trattamento che, mediante riscaldamento, estraggono il fluido adsorbito.
- A evaporazione mediante compressore: è uno dei sistemi più utilizzati; il metodo ad evaporazione prevede l'aspirazione del refrigerante in fase gassosa, attraverso alcune perforazioni effettuate nel circuito. L'aspirazione è possibile grazie alla depressione che fa evaporare il gas. In seguito, il refrigerante aspirato condensa e viene trasferito in un recipiente di recupero. Tale metodo non è rapido (il tempo del ciclo è di circa 10 minuti) e l'efficienza dipende dalla carica residua nel circuito (70-80%).
- A pompa pneumatica: tale tecnologia garantisce prestazioni simili a quelle di un compressore (portata di 8-18 m<sup>3</sup>/h di liquido aspirato), ed estrazione fino a 0,1 bar di pressione assoluta.

- A pompa a vuoto: impianti di questo tipo possono lavorare solo con valori di pressione allo scarico inferiori a 2,5 bar e con temperatura inferiore ai 35°C, comunque sufficienti per l'applicazione nel trattamento dei RAEE. Rappresentano la soluzione più economica, garantendo un'efficacia superiore al 97%. In genere viene utilizzato un sistema simile, che si applica praticando un foro nel circuito refrigerante, solitamente alla base del compressore e aspirando, per mezzo di una pompa a vuoto, una miscela olio-refrigerante in fase liquida, che viene separata successivamente per evaporazione. Il tempo del ciclo è in questo caso pari a 40-60 secondi, con un'efficienza superiore al 99%.

Una volta separati e conservati in contenitori ad hoc, l'olio e i gas refrigeranti seguono percorsi differenti: l'olio viene rigenerato e riutilizzato, mentre i gas sono smaltiti attraverso termodistruzione.

Immediatamente a valle delle operazioni di messa in sicurezza, vengono rimossi il compressore, il cavo di alimentazione, il condensatore (ove presente) e alcune componenti mobili quali ripiani in vetro e cassette in plastica.

Il compressore costituisce una delle parti di maggior valore, per la presenza di metalli come il ferro e il rame, e per questo viene inviato a impianti specializzati per il successivo trattamento.

Una volta effettuate tutte le operazioni preliminari, la carcassa viene inviata all'impianto di triturazione che consente una riduzione di volume e la separazione dei materiali. La triturazione è l'operazione tecnologica che trasforma la carcassa del bene messo in sicurezza in un insieme eterogeneo di materiale triturato con diversa granulometria.

La triturazione generalmente può essere effettuata con diverse tecnologie tra cui le più frequenti sono (Cagno et al., 2004):

- Trituratore a catene: i RAEE vengono inseriti nella camera di triturazione a lotti di 3-4 pezzi per ciclo. I frigoriferi vengono convogliati tramite un nastro trasportatore all'interno di una camera, che viene poi chiusa, per evitare il rilascio di polveri e di gas ozono lesivi contenuti nei pannelli di poliuretano e in cui opera un sistema di aspirazione e trattamento dell'aria. Il trituratore è costituito da due catene montate su un rotore centrale; le catene, poste in rotazione, sminuzzano il materiale in sfere della dimensione di qualche centimetro. Questa tecnologia garantisce un'efficienza di separazione tra i diversi materiali superiore al 99%, in

quanto il frantumato, ottenuto non per compressione e taglio come avviene in altre tecnologie, non risulta impastato ma in grani distinti di diverse dimensioni.

- Trituratore a lame: la camera di triturazione è in questo caso posta in depressione e la lavorazione avviene in continuo; ogni carcassa viene fatta cadere su due o quattro set di coltelli, che stando in contro-rotazione a coppie di due, procedono a tritare il pezzo in lavorazione. L'output del processo sono "strisce" di materiale di qualche centimetro di lunghezza, in alcuni casi sono possibili più step di lavorazione analoghi tra loro posti in serie per migliorare la qualità del prodotto in output.
- Trituratore con mono rotore: con questa tecnologia le carcasse vengono progressivamente erose ottenendo in output delle scaglie di materiale. Anche in questo caso la lavorazione è in continuo e la camera è posta in depressione.

Poiché il processo di triturazione comporta lo sviluppo di gas e di polveri, l'operazione deve essere svolta in ambiente controllato; l'impianto di trattamento deve quindi essere provvisto un sistema di abbattimento delle emissioni tale da consentire il rispetto dei valori di emissione in atmosfera previsti per legge e sistemi inertizzanti tali da prevenire rischi di infiammabilità o di esplosività delle polveri e dei gas.

I gas ozono-lesivi presenti nelle schiume isolanti possono essere captati mediante l'utilizzo di diverse tecnologie. Il flusso gassoso viene raccolto direttamente durante le fasi di lavorazione in camera di triturazione e nei punti di maggiore estrazione dalle schiume e viene quindi convogliato ad impianti di abbattimento, che possono appartenere a 3 diverse famiglie:

- Impianti di criococondensazione: l'effluente gassoso, composto da aria e da gas ozono-lesivi liberati durante le fasi di triturazione della carcassa, viene raffreddato mediante un flusso contro-corrente di azoto. La temperatura, mediante varie fasi di abbattimento, viene portata fino a  $-150^{\circ}\text{C}$ , temperatura alla quale tutte le tipologie di espandenti utilizzate nella schiumatura dei frigoriferi condensano e possono quindi essere raccolte allo stato liquido in apposite bombole. L'impianto non può lavorare in continuo, ma necessita di cicli di "sbrinamento" in quanto l'umidità contenuta nell'affluente gassoso condensa all'interno del sistema di abbattimento provocando progressivamente l'ostruzione del passaggio; la rigenerazione del sistema consiste nel riscaldamento dello stesso fino a  $+20^{\circ}\text{C}$ ;
- Adsorbimento mediante carboni attivi e/o filtri molecolari: l'effluente gassoso, ad una temperatura di  $20^{\circ}\text{C}$  circa, viene fatto passare su uno o più letti di carboni attivi e/o filtri molecolari, che sono in grado di trattenere le molecole di CFC e di altri espandenti delle

schiume poliuretaniche lasciando invece passare le molecole di aria; una volta saturati i letti di adsorbimento possono essere inviati a termodistruzione o possono essere rigenerati mediante un flusso di vapore acqueo o azoto riscaldato. I letti di adsorbimento, riscaldati, rilasciano il gas precedentemente catturato; il gas può quindi essere condensato e raccolto in bombole. Anche in questo caso, la tecnologia non è in grado di garantire la lavorazione in continuo e necessita di tempi di rigenera;

- Combustione: l'effluente gassoso viene condotto in una camera di combustione mantenuta ad una temperatura di 900° C circa. A tale temperatura le molecole di CFC si scindono producendo degli acidi di cloro e di fluoro; gli acidi così prodotti vengono fatti reagire con basi quali soda caustica, bicarbonato o calce ottenendo quindi come output finale del processo dei sali di cloro e di fluoro che possono essere inviati a smaltimento. Tale sistema di abbattimento non necessita di rigenerazioni e può quindi operare in continuo.

Gli impianti che trattano beni contenenti gas refrigeranti (frigoriferi, congelatori e condizionatori) devono sottostare alle disposizioni del Decreto del Ministero del Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare del 20 settembre 2002:

*Gli impianti [...] devono essere costruiti e gestiti in modo che, nelle fasi di triturazione delle apparecchiature fuori uso, le emissioni non superino in tutte le condizioni di esercizio dell'impianto i seguenti valori di emissione:*

- a) 25 g/h per le sostanze ozono lesive;
- b) 5 mg/Nm<sup>3</sup> per le polveri;
- c) 100 mg/Nm<sup>3</sup> per il pentano.

Il progressivo passaggio da CFC ad HC quale agente espandente delle schiume poliuretaniche ha portato all'introduzione del pericolo di infiammabilità e di esplosione nel processo di lavorazione delle carcasse di frigorifero.

Infatti, al contrario dei CFC che non sono infiammabili e svolgono una azione anticatalitica nei confronti del fuoco tanto che vengono usati come agenti estinguenti gassosi con il nome di halon, gli HC sono caratterizzati da:

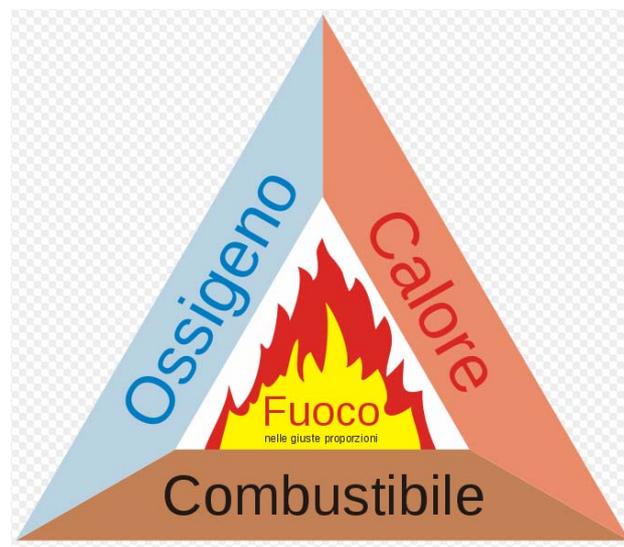
- punto di infiammabilità: - 49° C;
- limite di esplosione: 1,4 – 8 % in volume;

---

<sup>1</sup>I valori di cui alle lettere b) e c) sono riferiti al volume di effluente gassoso secco rapportato alle condizioni normali di 273 K e 101.3 k Pa.

- temperatura di auto-ignizione: 285 ° C.

Tali caratteristiche fanno sì che, nelle condizioni in cui normalmente verrebbe esercitato un impianto di triturazione, potrebbero facilmente crearsi condizioni tali da produrre esplosioni e incendi: la presenza infatti di ossigeno (contenuto nell'aria), calore provocato dall'attrito creato durante le fasi di triturazione, combustibile costituito dalle polveri di poliuretano e di plastica prodotte dalle lavorazioni e la potenziale presenza di un innesco costituito, per esempio, da una scintilla generata da frammenti di ferro, rende estremamente probabile il pericolo di incendio e di esplosione.



**Figura 3.7: triangolo del fuoco, esemplificazione grafica comunemente utilizzata per individuare le condizioni in cui si può generare un incendio**

Per ridurre tali rischi, è stato introdotto un sistema di inertizzazione con azoto allo stato gassoso, iniettato in specifiche aree della camera di triturazione. In questo modo da una parte viene ridotto il calore mentre dall'altra viene abbattuto il quantitativo di ossigeno presente nell'atmosfera della camera, mediante la sostituzione dell'aria presente con azoto.

Altro punto fondamentale per ridurre il pericolo di esplosione è la corretta valutazione delle traiettorie seguite dall'aria nella camera di macinazione, in modo da individuare eventuali punti in cui si possa creare accumulo di pentano per dimensionare e posizionare nel modo più efficiente i punti di aspirazione.

Una volta che le carcasse sono state triturate, la polvere di poliuretano viene separata mediante aspirazione o mediante dei cicloni dai rimanenti materiali.

I rimanenti frammenti in uscita dal trituratore sono costituiti da materiale eterogeneo, che deve quindi essere separato nelle diverse frazioni. Le tecnologie per la separazione dei materiali sono diverse a seconda del tipo di materiale che si vuole separare; in genere il flusso in uscita è costituito da metalli ferrosi, metalli non ferrosi e plastiche.

Per la separazione dei metalli ferrosi, o più in generale magnetici, si utilizza un nastro trasportatore magnetico che separa il ferro dal flusso eterogeneo, che è ora costituito da metalli non ferrosi, come alluminio e rame, e non metalli come le plastiche.

La tecnologia maggiormente utilizzata per la separazione dei metalli dalla plastica sono le correnti indotte o correnti parassite: si sfrutta la proprietà fisica dei metalli di perdere rapidamente la carica elettrostatica a differenza dei non metalli. In una conformazione a tamburo il materiale viene caricato elettricamente da un elettrodo, di conseguenza i non metalli perdono rapidamente la carica e vengono rilasciati molto rapidamente, mentre i metalli rimangono attaccati al tamburo per un tempo maggiore in virtù della carica indotta e percorrono una traiettoria diversa. In alcuni casi può anche essere utilizzata una tecnologia a nastro, in cui il materiale attraversa un campo magnetico che carica i granuli mediante una corrente parassita, in questo modo i metalli vengono respinti poiché di carica opposta. In uscita dal trattamento mediante correnti parassite si avrà un flusso di plastiche eterogenee che generalmente vengono inviate agli impianti di riciclo che separano successivamente tra loro i diversi polimeri, ed un flusso di alluminio e rame che invece può essere separato per aumentare il valore di mercato. Per separare alluminio e rame si utilizza sempre una tecnologia a correnti parassite, in quanto le traiettorie di allontanamento dei metalli sono differenti a causa della loro conducibilità e del peso specifico.

Una seconda tecnologia che viene utilizzata per la separazione dei materiali è la tavola vibrante, che opera sulla base del diverso peso specifico delle frazioni. È quindi possibile prevedere un sistema di raccolta del flusso in uscita che avrà due differenti traiettorie, una per il materiale più pesante ed una per il materiale più leggero. Con questa tecnologia, mettendo in serie 2 tavole vibranti è possibile in un primo step separare plastica (più leggera) dai metalli non ferrosi ed in un secondo step i metalli fra loro.

Entrambe le tecnologie sopra descritte aumentano la loro efficienza quanto più la dimensione delle frazioni di materiale in ingresso è omogenea e costante nel tempo. Per tale ragione è comune trovare, prima della separazione dei materiali non magnetici, un impianto di ulteriori triturazione o di granulazione delle frazioni.

Il poliuretano, al fine di raggiungere un quantitativo residuo di sostanze ozono-lesive in esso contenuto particolarmente limitato e comunque inferiore al limite di legge dello 0,5% in peso, viene ulteriormente lavorato mediante un processo di bricchettatura o pellettizzazione: in entrambi i casi il poliuretano viene schiacciato e riscaldato (solitamente mediante l'attrito provocato dalla schiacciatura) in modo da permetterne la completa bonifica. In alternativa è possibile polverizzare in modo estremamente fine il poliuretano e quindi riscaldarlo fino ad una temperatura di 140° C.

Il processo di riscaldamento ed eventualmente di compressione permette la rottura della matrice poliuretanicca, ovvero delle celle di poliuretano, createsi al momento dell'espansione e contenenti l'espandente stesso.

Il processo di bricchettatura o pellettizzazione permette inoltre di porre rimedio al problema della polverosità del poliuretano. Il poliuretano infatti, prima della compattazione si presenta come una polvere estremamente fine che, oltre a dover essere oggetto di specifiche attenzioni in fase di stoccaggio e trasporto, può essere pericolosa per l'uomo in quanto facilmente inalabile.

Una volta bonificato dal gas refrigerante e verificato che rispetta i limiti di legge viene inviato a a recupero o, più comunemente, a smaltimento. In Italia, come vedremo nel successivo Capitolo 4, non è ancora possibile utilizzare il poliuretano come Materia Prima Seconda, né vi è un numero sufficiente di impianti di termovalorizzazione o produzione di energia in co-combustione che accettino il poliuretano in ingresso; Di conseguenza il poliuretano deve essere inviato in discarica, nonostante il suo elevato potere calorifico inferiore.

#### 3.2.4 Possibili soluzioni alternative per il trattamento

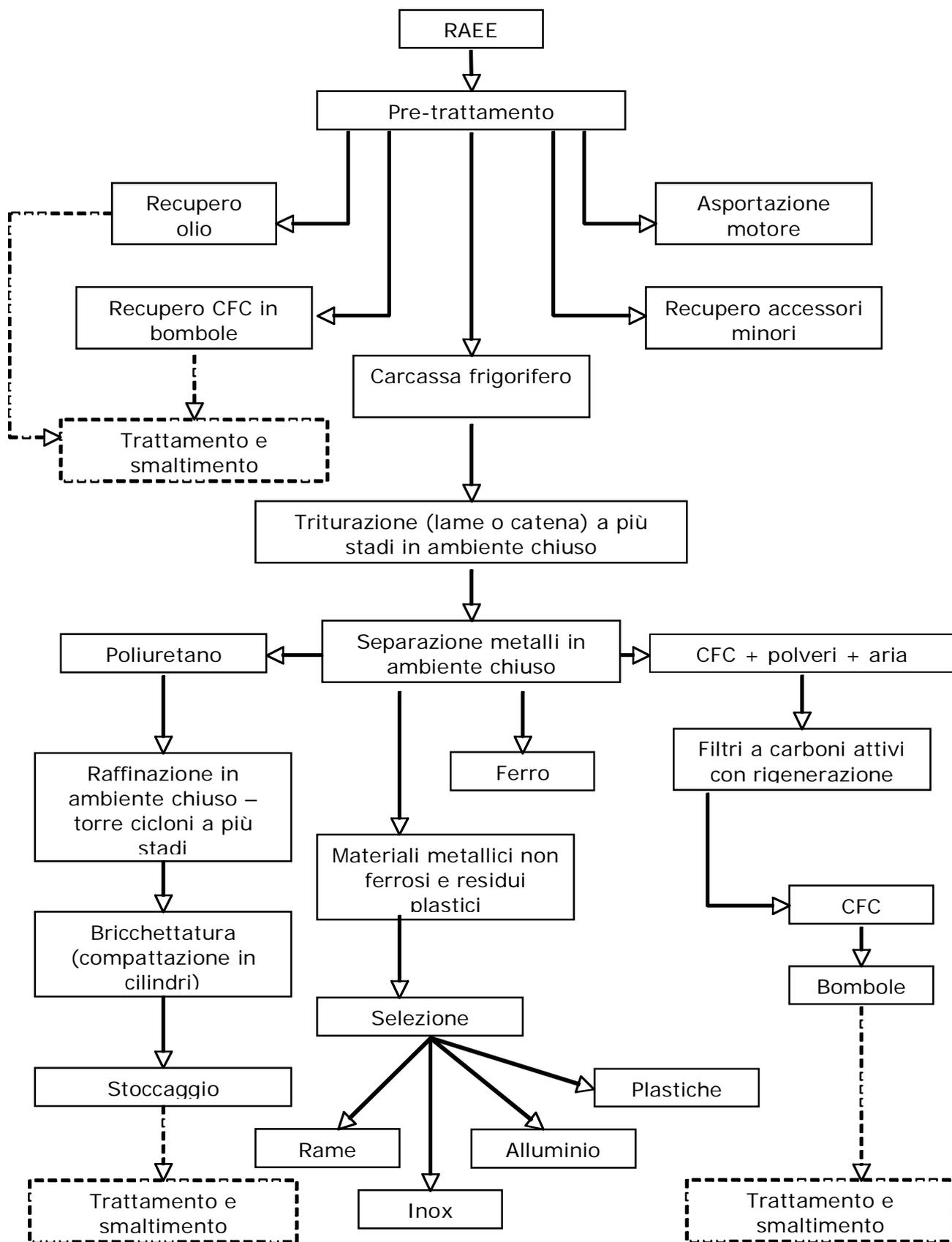
Ad oggi, il mix di apparecchiature contenenti CFC ed HC non rende economicamente conveniente la separazione delle due tipologie per procedere a trattamenti separati: i costi derivanti dalla necessità di manipolazione dei rifiuti risultano essere maggiori dei vantaggi potenzialmente derivanti da trattamenti ad hoc. Le apparecchiature vengono quindi trattate in quello che comunemente viene definito *mix-mode*.

Dato tuttavia il progressivo incremento delle apparecchiature contenenti HC, e le caratteristiche totalmente differenti dei gas di vecchia e di nuova generazione, alcune soluzioni per il trattamento separato sono attualmente in via di sviluppo :

- Trattamento in lotti differenti di apparecchiature a CFC e a pentano: in questo scenario sarebbe possibile trattare presso un unico impianto, riducendo i costi di investimento, in lotti separati caratterizzati da settaggi differenti dell'impianto: ovvero inertizzando

esclusivamente nel trattamento del pentano e adeguando il sistema di captazione agli specifici espandenti;

- Trattamento delle carcasse a CFC in appositi impianti e dell'HC insieme ad altri tipi di rifiuti in impianti non specializzati (es. mulini per auto): in questo scenario le apparecchiature contenenti HC possono essere trattate in mulini non specializzati nel trattamento dei RAEE, con costi fissi per apparecchiatura trattata decisamente inferiori; tuttavia, questo tipo di trattamento ha maggiori costi per la selezione ed il conferimento presso impianto specializzato.



**Figura 3.8: schema tipico di un impianto con filtri a carboni attivi**

### 3.2.5 Output del processo di trattamento

In uscita dal processo di lavorazione sopra descritto si ottengono da una parte un quantitativo considerevole di materiali recuperabili, quali ferro, alluminio, plastica, rame e dall'altra una serie di componenti non recuperabili quali polimeri di plastiche e gomme, gas refrigeranti, condensatori, interruttori a mercurio e poliuretano.

Sebbene la normativa imponga il raggiungimento di target di riciclo e recupero dei materiali contenuti nei RAEE, nessuna indicazione viene fornita circa le modalità per effettuare l'effettivo calcolo delle percentuali stesse. A titolo esemplificativo basti pensare che, se si prendesse in considerazione esclusivamente il primo step di trattamento, ovvero l'impianto lavorazione dei RAEE nella loro interezza, si potrebbe considerare che i rifiuti vengono tutti accettati per essere destinati a recupero e si potrebbe quindi considerare raggiunta una percentuale di recupero del 100%. All'estremo opposto, potrebbe invece essere necessario seguire ciascuno dei flussi in uscita dagli impianti di trattamento dei RAEE, analizzare ciascuno dei processi subiti dalle frazioni a valle e la relativa resa in termini di recupero e riciclaggio fino al raggiungimento dello stato di EoW (End of Waste) o di smaltimento di ciascuna frazione.

Allo scopo di uniformare a livello europeo le metodologie di calcolo degli obiettivi di recupero e riciclaggio, il WeeeForum (associazione europea dei Sistemi Collettivi per la gestione dei RAEE per conto dei Produttori di AEE) ha sviluppato il software RepTool.

Basato su una struttura ad albero (Figura 3.9), il software permette il calcolo della effettiva destinazione finale di ciascuna frazione, ottenendo quindi l'esatto calcolo delle percentuali di recupero e riciclaggio (Figura 3.10).

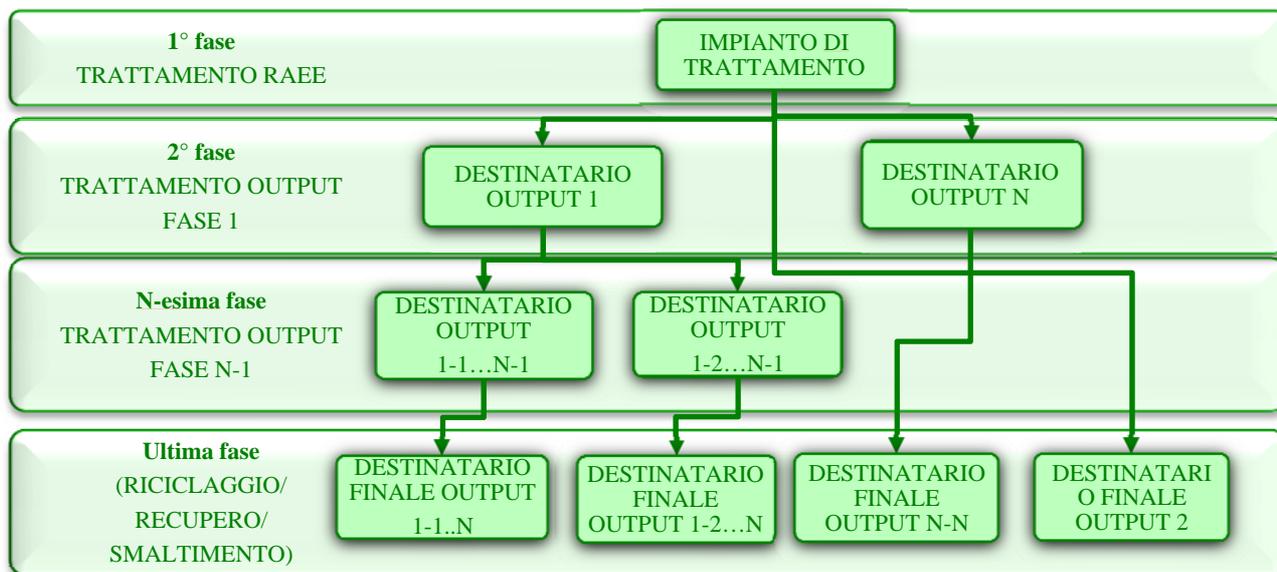


Figura 3.9: Struttura per la rendicontazione Reptool.

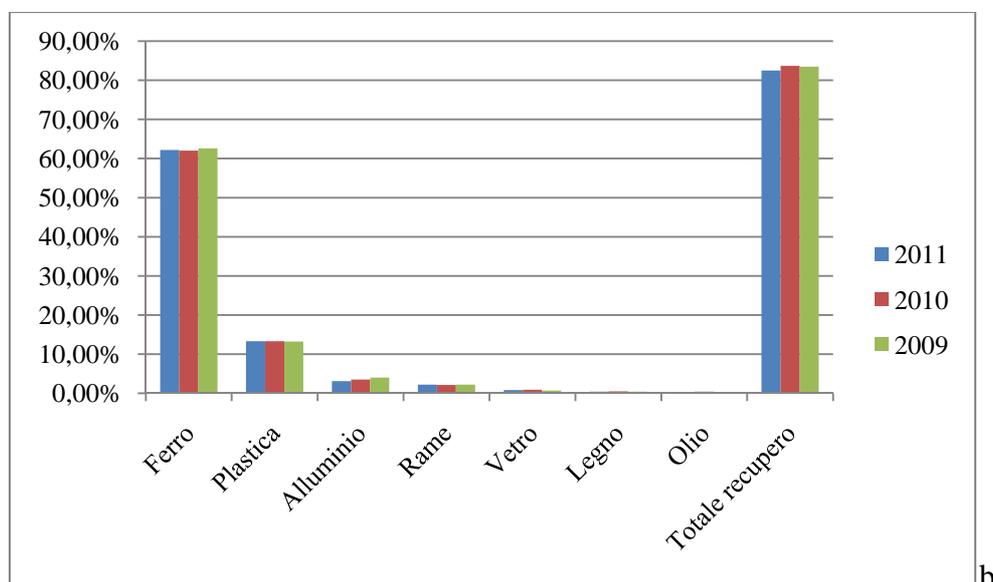
codice	nome frazione	nome interno	accettante	tecnologia utilizzata	RU	RM	VE	ST	SD	???	verifica il totale
14 06 01* / 01-1	CPC, HCPC, HFC, HC (fase 1) - miscela		S.E.Val S.r.l. - Colico	distribuzione del CPC				991,00			991,00
14 06 01* / 02-1	CPC, HCPC, HC (fase 2) - miscela		S.E.Val S.r.l. - Colico	distribuzione del CPC				3.483,00			3.483,00
19 02 07* / 01	olio di compressori - basso contenuto di alogeno	Utilizzato CER 13 02 05	Non Disponibile	produzione di nuovi oli		2.713,00					2.713,00
19 12 02 / 01-2	frazione di ferro - 'pura'		NON DISPONIBILE	acciaierie 'tradizionali'		79.690,00					79.690,00
19 12 02 / 01-2	frazione di ferro - 'pura'		NON DISPONIBILE	acciaierie 'tradizionali'		238.151,00					238.151,00
19 12 03 / 03-2	frazione di alluminio - 'pura'		NON DISPONIBILE	fonderia Alluminio		11.796,00					11.796,00
19 12 03 / 05-2	rame e leghe di rame - 'puri'		NON DISPONIBILE	Fonderie del rame		1.190,00					1.190,00
19 12 03 / 05-2	rame e leghe di rame - 'puri'		NON DISPONIBILE	Fonderie del rame		8.855,00					8.855,00
19 12 04 / 01-2	'pezzi' di materie plastiche e gomma - 'puri' (privi di Br-FR)		NON DISPONIBILE	riciclo di materie plastiche		1.784,00					1.784,00
19 12 04 / 01-2	'pezzi' di materie plastiche e gomma - 'puri' (privi di Br-FR)		NON DISPONIBILE	riciclo di materie plastiche		67.204,00					67.204,00
19 12 04 / 05-1a	Schiama PU - < 0,2 % (H)CFC		NON DISPONIBILE	discariche					88.544,00		88.544,00
19 12 05 / 01	'pezzi' di vetro piano - 'puri'		Non Disponibile	Produzione di vetro		3.550,00					3.550,00
19 12 07	'pezzi' di legno - 'puri'	CER 15.01.03	NON DISPONIBILE	produzione di pannelli truciolari		1.772,00					1.772,00
19 12 10 / 03	'misto' di cartone/carta (cond.)	Utilizzato CER 19 12 01	NON DISPONIBILE	produzione di carta e cartone		1.304,00					1.304,00
19 12 12 / 01	residui provenienti da separazione		NON DISPONIBILE	discariche					7.667,00		7.667,00
peso totale (kg):						421.085,00		4.474,00	96.211,00		521.770,00
% del totale in ingresso (521.770):						80,7031 %		0,8575 %	18,4394 %		100,0000 %
riciclaggio:											80,7031 %
recupero:											80,7031 %
Non - smaltimento:											80,7031 %
smaltimento :											19,2969 %

Figura 3.10: Calcolo delle % di recupero e riciclaggio svolto dal software Reptool (Fonte: Reptool).

Secondo i dati dichiarati da Ecodom nei propri rapporti di sostenibilità dal 2009 al 2011 le frazioni in uscita dal processo di trattamento e destinate a riciclaggio, ovvero re-immissione nel processo produttivo dei materiali con la loro funzione iniziale, sono composte come riportato in Tabella 3.1 e in Figura 3.11.

<b>FRAZIONE</b>	<b>2011</b>	<b>2010</b>	<b>2009</b>
Ferro	62,20%	62,00%	62,60%
Plastica	13,30%	13,30%	13,20%
Alluminio	3,10%	3,50%	4,00%
Rame	2,20%	2,10%	2,20%
Vetro	0,80%	0,90%	0,70%
Legno	0,40%	0,50%	0,40%
Olio	0,30%	0,40%	0,30%
<b>Totale recupero</b>	<b>82,50%</b>	<b>83,70%</b>	<b>83,50%</b>

**Tabella 3.1: Frazioni riciclate in uscita dal trattamento RAEE R1 dal 2009 al 2011.**



**Figura 3.10: Frazioni riciclate in uscita dal trattamento RAEE R1 dal 2009 al 2011.**

A queste frazioni è quindi possibile sommare la marginale quota di poliuretano che viene destinata a recupero energetico, come si vede nella tabella sotto riportata

<b>FRAZIONE</b>	<b>2011</b>	<b>2010</b>	<b>2009</b>
PU	2,90%	1,70%	1,10%

**Tabella 3.2: Percentuale in peso dei RAEE R1 composto da Poliuretano inviato a recupero energetico.**

Come di vede, la percentuale di poliuretano inviata a recupero energetico è in progressiva crescita. Tuttavia buona parte del poliuretano generato dalla lavorazione del Raggruppamento R1 viene inviato a smaltimento in discarica, come evidente dalla tabella sotto riportata.

FRAZIONE	2011	2010	2009
Poliuretano	11,80%	12,20%	12,53%

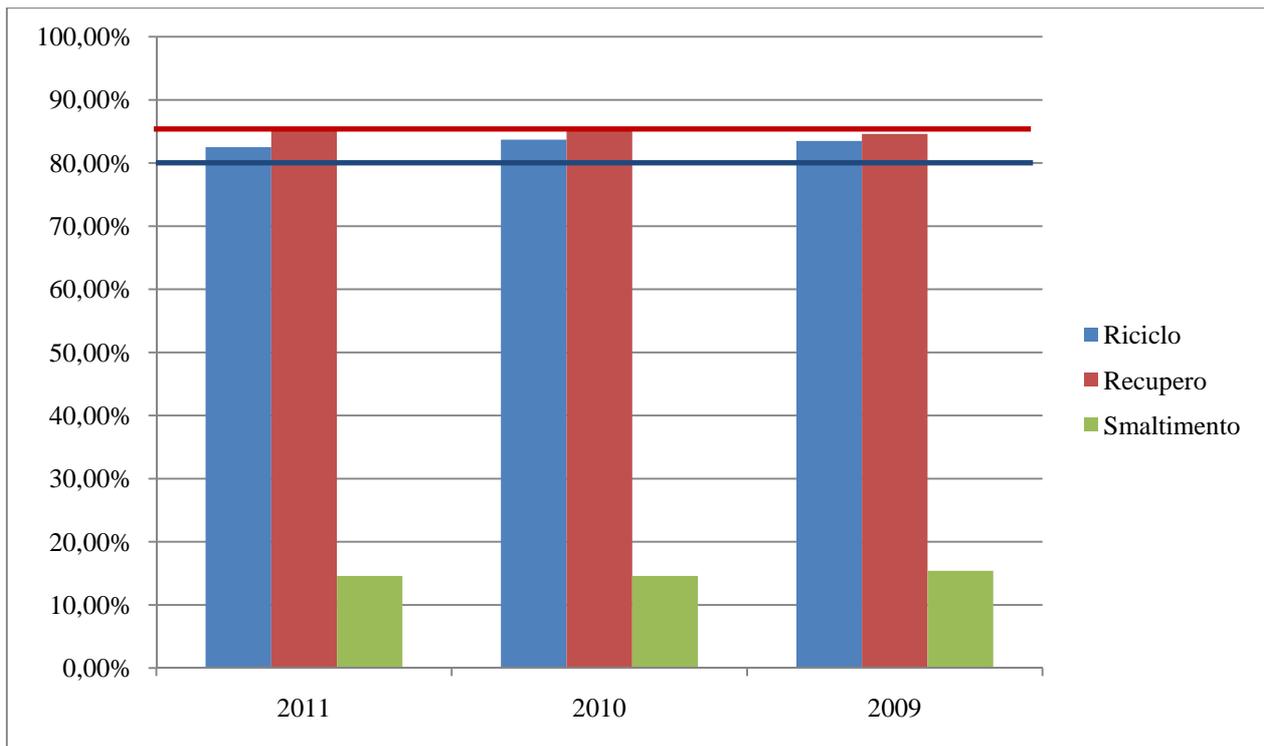
**Tabella 3.3: Percentuale in peso dei RAEE R1 composto da Poliuretano inviato a smaltimento in discarica.**

I risultati di recupero e riciclaggio ottenuto quindi dal 2009 al 2011 (indicato in Tabella 3.4) sono quindi ampiamente conformi a quanto richiesto dalla normativa oggi in vigore.

OPERAZIONE	2011	2010	2009
Riciclo	82,50%	83,70%	83,50%
Recupero energetico	2,90%	1,70%	1,10%
Totale recupero	85,40%	85,40%	84,60%
Smaltimento	14,60%	14,60%	15,40%

**Tabella 3.4: % in peso materiali, riciclati, recuperati e smaltiti.**

Dalle tabelle si può subito notare come il quantitativo maggiore di materiale inviato in discarica è costituito dal poliuretano, di conseguenza una gestione migliore di tale materiale potrebbe consentire una diminuzione netta del materiale totale inviato in discarica e aumentare notevolmente la percentuale di rifiuti recuperati anche in vista dei maggiori tassi di recupero e riciclaggio imposti come target dalla normativa a partire dal 2015 (Figura 3.11).

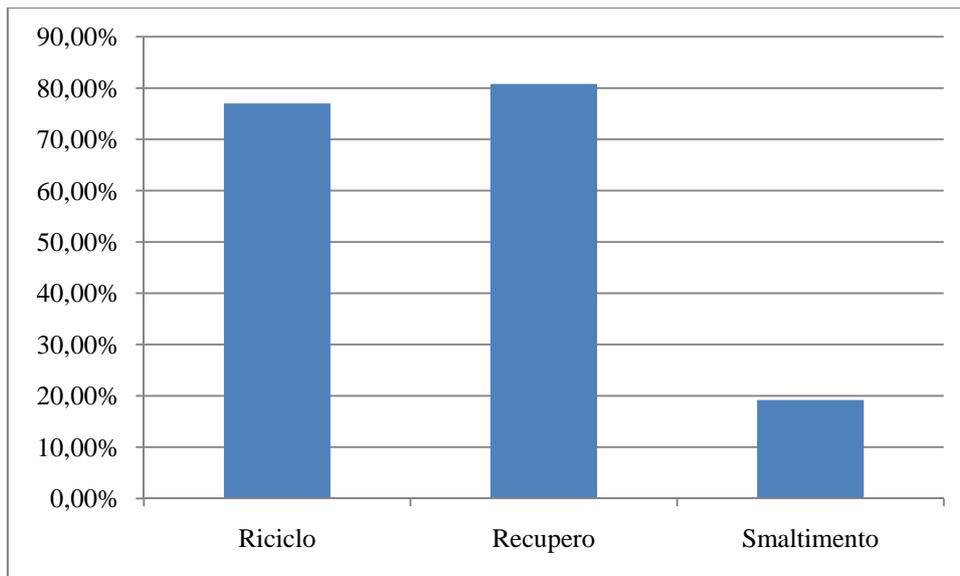


**Figura 3.11: Comparazione % riciclo e recupero attuali con target futuri.**

Prove sperimentali svolte presso impianti di trattamento del raggruppamento R1 hanno infine permesso di evidenziare la progressiva modificazione della composizione media dei rifiuti da frigoriferi e congelatori in rapporto alla tecnologia utilizzata per la produzione e all'anno di produzione del bene.

Il passaggio dall'uso del CFC a espandenti caratterizzati da una minore efficienza da un lato e la progressiva crescente attenzione al tema del consumo energetico dall'altro hanno fatto sì che lo spessore del poliuretano espanso utilizzato come isolante dei prodotti aumentasse progressivamente. E' quindi stimabile un aumento di circa il 30 % in peso della schiuma di poliuretano sul peso totale del RAEE; questo porterebbe ad un aumento del peso percentuale del poliuretano sul totale del RAEE a circa il 23 %.

Nella figura che segue vengono paragonate le percentuali di recupero e riciclaggio, supponendo l'aumento di peso del poliuretano, rispetto ai target di riciclo e recupero previsti a partire dal 2015: come si può notare, in queste condizioni, i target di riciclo e recupero non potranno essere raggiunti.



**Figura 3.12: Comparazione % riciclo e recupero attuali con target futuri tenendo conto dell'aumento del poliuretano nei prodotti di nuova generazione.**

## **4. IL RECUPERO DEL POLIURETANO**

### **4.1. NORMATIVA APPLICABILE AL RECUPERO DEL POLIURETANO**

Il decreto legislativo 152/06, come descritto nel Capitolo 1, riporta i criteri di priorità nella gestione dei rifiuti:

1. Prevenzione;
2. Preparazione per il riutilizzo;
3. Riciclaggio;
4. Recupero di altro tipo, ad esempio recupero energetico;
5. Smaltimento.

Deve essere data l'assoluta priorità al riutilizzo e al riciclo delle componenti in uscita dal trattamento dei rifiuti e come ultima alternativa, ma solo se le altre non sono applicabili, è possibile inviare il materiale in discarica.

Quindi i materiali in uscita dagli impianti di trattamento dei rifiuti devono essere preferibilmente inviati ad aziende che svolgono attività di riciclo di materia per ottenere in uscita materiali, che poi possono essere utilizzate nei processi produttivi usuali per quel tipo di sostanza, oppure ad impianti che consentono il recupero energetico, sia cioè impianti di termovalorizzazione, sia centrali termiche che utilizzano tali rifiuti come combustibile in co-combustione per la produzione di energia. Solo qualora il materiale in uscita non rispetti i limiti normativi o tecnici per le azioni di recupero/riciclaggio, allora dovrebbe essere inviato in discarica.

Il rifiuto che cessa di essere tale perché viene re-immesso nel ciclo produttivo può essere conteggiato per il raggiungimento degli obiettivi di recupero e riciclaggio imposti dalla normativa europea. Di conseguenza, se il poliuretano potesse usufruire della normativa relativa all'End of Waste (EoW), si potrebbero raggiungere delle percentuali molto più elevate di recupero rispetto a quanto registrato ad oggi, questo anche in previsione di nuovi target di recupero e riciclaggio da raggiungere nei prossimi anni (si veda Capitolo 3).

La normativa non fornisce alcuna prescrizione per il recupero del poliuretano come materia prima seconda, ad eccezione del quantitativo di rifiuti pericolosi presenti nella matrice poliuretanic estratta dalle apparecchiature dismesse (questo tema sarà oggetto di discussione nei paragrafi successivi).

Per quanto attiene lo specifico caso del poliuretano, nel valutare la possibilità di effettuare il riciclo di materia è necessario tenere in considerazione anche le prescrizioni dell'articolo 6 del D.Lgs. 36 del 13 gennaio 2003, che ha vietato a partire dal 1 gennaio 2007 il conferimento in discarica di rifiuti aventi un PCI (Potere Calorifico Inferiore) > 13.000 kJ/kg; in tale divieto rientra quindi anche il poliuretano, caratterizzato da un PCI fra i 25.000 ed i 30.000 kJ/kg. Tuttavia, data la persistente difficoltà italiana nella costruzione di una rete di impianti di termodistruzione con il recupero di energia, tale scadenza è stata di anno in anno prorogata a partire dal 2007 fino ad arrivare all'attuale scadenza del 1 gennaio 2013. Qualora non vi fossero ulteriori proroghe, a partire dal 2013 sarebbe quindi fatto divieto di conferire il poliuretano in discarica (attualmente destinazione di circa il 90% del rifiuti prodotto, si veda capito 3).

Nonostante quanto fin qui riportato, ad oggi, in Italia, il poliuretano recuperato dalle Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche viene inviato quasi interamente in discarica e solo in alcuni rari casi viene inviato a recupero energetico in impianti per la produzione di energia o in termovalorizzatori.

Il Decreto 152/06, così come modificato dal D.Lgs. 205/10, riporta i criteri per la cessazione della qualifica di rifiuto. Secondo la normativa, un rifiuto cessa di essere tale, quando è stato sottoposto a un'operazione di recupero, incluso il riciclaggio e la preparazione per il riutilizzo, e soddisfa i criteri specifici, da adottare nel rispetto delle seguenti condizioni:

- la sostanza o l'oggetto è comunemente utilizzato per scopi specifici;
- esiste un mercato o una domanda per tale sostanza o oggetto;
- la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;
- l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

L'operazione di recupero può consistere semplicemente nel controllare i rifiuti per verificare se soddisfano i criteri elaborati conformemente alle predette condizioni. I criteri di cui al paragrafo precedente sono adottati in conformità a quanto stabilito dalla disciplina comunitaria ovvero, in mancanza di criteri comunitari, caso per caso per specifiche tipologie di rifiuto attraverso uno o più decreti del Ministro dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare. I criteri includono, ove necessario, valori limite per le sostanze inquinanti e tengono conto di tutti i possibili effetti negativi sull'ambiente della sostanza o dell'oggetto.

Tuttavia nelle more dell'adozione di uno o più decreti di cui al paragrafo precedente, continuano ad applicarsi le disposizioni di cui ai decreti del Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio in data 5 febbraio 1998, 12 giugno 2002, n. 161, e 17 novembre 2005, n. 269 e l'art. 9-bis, lett. a) e b), del decreto-legge 6 novembre 2008, n. 172, convertito, con modificazioni, dalla legge 30 dicembre 2008, n. 210.

Per quanto riguarda la matrice poliuretanicica non vi sono norme specifiche che regolano le caratteristiche che deve avere per poter far cessare la qualifica di rifiuto, ma all'interno del Decreto Ministeriale del 20 Settembre 2002 vengono definiti sia i vincoli a cui devono sottostare gli impianti che trattano frigoriferi a fine vita, sia i quantitativi massimi di CFC che possono essere presenti nel poliuretano in uscita dagli impianti stessi per evitare rilasci successivi nell'atmosfera. Di conseguenza, *il contenuto residuo di sostanze lesive nelle schiume poliuretanicche degassificate dopo il trattamento negli impianti deve essere inferiore o uguale allo 0,5% in peso delle stesse schiume*. Tale limite, se rispettato, permette quindi di garantire che il poliuretano sia privato delle sostanze ozono-lesive con cui era stato espanso nel momento della produzione dei pannelli isolanti dei frigoriferi. Il quantitativo di CFC residuo ancora presente nelle schiume, se inferiore allo 0,2% in peso, può essere ritenuto indivisibile dalla matrice poliuretanicca secondo quello che può essere definito un "effetto matrice". Per tali ragioni il poliuretano oggetto di tali lavorazioni può essere considerato come non più vincolato all'applicazione dei vincoli della normativa relativa alle sostanze ozono-lesive, inoltre la normativa stessa non fa alcun riferimento all'impossibilità di utilizzare il poliuretano per scopi diversi al solo smaltimento, come il recupero energetico e il recupero di materia. Sempre all'interno del Decreto del 20 settembre 2002 si fa riferimento alla metodologia da utilizzare per l'individuazione di CFC all'interno della matrice poliuretanicca estratta dagli impianti, indicando appunto il metodo IRSA-CNR (metodi analitici per fanghi (64) – Vol. 3 parametri chimico fisici, 1990), oppure qualsiasi altro metodo concordato con l'autorità competente.

Inoltre, successivamente alla fase di degasaggio, possono essere previste delle indagini per stabilire che i gas ozono-lesivi presenti ancora nella matrice poliuretanicica non siano di natura volatile, e restino inglobati nel pannello fino al successivo smaltimento o recupero.

Un altro punto importante a cui non si fa riferimento in alcuna normativa sulla gestione il trattamento dei RAEE è la presenza di metalli pesanti all'interno della matrice poliuretanicica. Per maggiore cautela è stata presa in considerazione la Direttiva europea 94/62/CE sugli imballaggi e i rifiuti da imballaggio. Tale normativa ha dei parametri molto stringenti, soprattutto per quanto riguarda la presenza di metalli pesanti nelle frazioni, che risultano di 100 ppm in peso per Cadmio, Mercurio, Piombo, e Cromo (VI). Si ricorda che gli stessi limiti sono poi stati ripresi dallo stesso Decreto 152/2006.

## 4.2. ANALISI DELLA MATRICE POLIURETANICA

Nel processo di trattamento dei RAEE del raggruppamento R1 si usano diverse tecnologie per la separazione della matrice poliuretanicica. Generalmente il poliuretano viene separato dagli altri materiali mediante metodi di aspirazione, degasato e compattato mediante sistemi di pellettizzazione e bricchettatura, oppure viene mantenuto in polvere e raccolto in *big bag*. Una volta che il poliuretano è stato estratto in una delle tre diverse forme è indispensabile verificare la percentuale di CFC ancora presente per poter correttamente definire la più appropriata destinazione finale del rifiuto.

Durante le operazioni di analisi della matrice poliuretanicica è bene mantenere i campioni alla temperatura di circa 5° C per via della natura volatile del CFC. Una volta estratti i campioni da analizzare questi devono essere inviati a laboratori specializzati per l'individuazione delle componenti ritenute pericolose, quali CFC e metalli pesanti.

In laboratorio viene prelevato un campione pesato di circa 3-6 grammi di matrice poliuretanicica e viene miscelato in 50 ml di metanolo ultrapuro, utilizzando un recipiente da 60 ml chiuso ermeticamente; il campione di poliuretano viene lasciato immerso nel metanolo per una notte a temperatura ambiente senza agitazione. Concluso il processo di estrazione viene prelevato 1 ml del metanolo usato per l'estrazione che viene a questo punto diluito in 9 ml di acqua, in una fiala da 20 ml adatta per l'analisi in GC-MS (*gas cromatografia/spettrometria di massa*) con estrattore HSS (*Head Space Sample*). Questo approccio è valido per la determinazione dei composti presenti in basse concentrazioni (principalmente Freon-12 e tracce di altri CFC). Per i composti ad elevate concentrazioni (principalmente Freon-11) l'analisi viene eseguita tramite gas-cromatografia (GC) con rivelatore a ionizzazione di fiamma (FID) e doppia colonna.

Per avere una stima precisa del contenuto di CFC residuo nella matrice poliuretanicica è indispensabile la ripetizione dell'analisi su campioni prelevati dallo stesso impianto; solo in questo modo si possono avere dei campioni rappresentativi della matrice poliuretanicica presente nei frigoriferi. In particolare:

- per bricchetti di poliuretano è necessario prelevare tre campioni ed eseguire l'analisi nella sezione della parte centrale di ciascun bricchetto;
- per pellet di poliuretano è necessario prelevare tre campioni;
- per la polvere di poliuretano è necessario eseguire la quartatura dei campioni.

Sulla base di analisi svolte sui campioni prelevati da 11 differenti impianti autorizzati al trattamento del raggruppamento R1 sono stati elaborati i risultati relativi a diversi campioni della matrice poliuretanicica riportati in Tabella 4.1.

Campione	Sostanze ozono-lesive residue	Cadmio residuo	Mercurio residuo	Piombo residuo	Cromo residuo
AMI0412PU	1,74%	nr	nr	0,02%	0,01%
ELE0512POLVERE_PU	0,11%	nr	nr	0,01%	0,02%
NEC0612PU	0,09%	nr	nr	0,01%	0,01%
RIP0712PU	0,01%	nr	nr	0,01%	nr
SEV0912PUR	0,21%	nr	nr	0,01%	nr
SEV0712PUR	0,01%	nr	nr	0,01%	nr
SIR0712PUR	0,31%	nr	nr	0,01%	0,01%
TRL1207PU	0,23%	nr	nr	0,01%	0,01%
TRS1207PU	0,09%	nr	nr	0,01%	0,01%
VAL1209PU	0,94%	nr	nr	nr	nr
WES1209PU	1,97%	nr	nr	nr	0,01%

**Tabella 4.1: Risultati delle analisi svolte sui campioni di matrice poliuretanicica per diversi impianti.**

Come già evidenziato nel precedente paragrafo, non esiste nella normativa relativa al recupero di RAEE indicazioni specifiche riguardanti i limiti massimi di inquinanti in peso consentiti come residui nel poliuretano per poterne consentire il riutilizzo, né esiste una specifica norma UNI di riferimento per la valutazione degli inquinanti in un materiale che potrebbe essere ritenuto analogo al poliuretano.

Si è ritenuto opportuno, in un ottica cautelativa, riferirsi ad altre normative già esistenti. Una delle normative più stringenti è la direttiva 94/62/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 20 dicembre 1994 (e successiva modifica: direttiva 2004/12/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio), sugli imballaggi e i rifiuti di imballaggio. L'articolo 11 di tale normativa fissa al comma 1 i livelli di concentrazione dei metalli pesanti presenti negli imballaggi a 100 parti per milione in peso. Lo stesso quantitativo limite è previsto anche nel Decreto Legge 152/06 del 3 aprile 2006, norme in materia di ambientale. Infine, va rilevato che i metalli pesanti presi in considerazione dalla direttiva 94/62/CE, articolo 11 sono:

- Cadmio
- Mercurio
- Piombo
- Cromo

Dall'analisi di laboratorio sulle quantità e tipi di metalli sono quindi stati presi detti riferimenti.

I dati riportati evidenziano che i metalli pesanti presenti nei campioni di poliuretano sono accettabili, ad eccezione del quantitativo di piombo, il cui valore è spesso molto vicino ed in alcuni casi persino leggermente superiore al limite normativo, ma che può essere ridotto migliorando la fase di selezione, in vista di un possibile riciclo della sostanza.

Per quanto riguarda i CFC dopo un opportuno degasaggio, il quantitativo in peso ad eccezione di alcuni *out-lier* è da considerarsi entro i limiti normativi. E' da tenere presente che, in vista di opportunità di re immissione nel ciclo produttivo, questi potrebbero essere sottoposti a un degasaggio più intensivo, che consenta una netta riduzione dei quantitativi di CFC presenti, rispettando così abbondantemente tutti i limiti normativi.

Si può quindi concludere, dopo un'attenta analisi della normativa vigente, che non esistono vincoli per l'utilizzo del poliuretano come materia prima seconda, ad eccezione del quantitativo di CFC presente, ma se questo risultasse più basso del limite di 0,5% in peso allora sarebbe possibile a possibili utilizzazioni del materiale, cercando di arrivare alla definizione di una norma UNI UNIPLAST che regoli l'uso di schiume poliuretaniche provenienti dalla dismissione di frigoriferi e congelatori da utilizzare come materia prima seconda per la realizzazione di nuovi prodotti.

### 4.3. VERIFICA TECNICA PER IL RECUPERO DEL POLIURETANO

Il materiale che si intende recuperare è poliuretano espanso con triclorofluorometano, gas refrigerante ad effetto ozono-lesivo e ad elevato GWP (Global Warming Potential) che quindi concorre con l'anidride carbonica al surriscaldamento globale. Il poliuretano è un prodotto utilizzato come isolamento nei frigoriferi e congelatori, inglobando al proprio interno le particelle di gas con il quale è stato espanso. È costituito da una catena polimerica di legami uretanici -NH-(CO)-O-; i polimeri uretanici sono largamente impiegati nella produzione di una grande varietà di materiali. La reazione chimica per la sintesi del poliuretano avviene tra un di-isocianato (aromatico o alifatico) e un poliolo (tipicamente un glicole poli-propilenico o un poliestere-diolo) in presenza di catalizzatori per aumentare la velocità della reazione e di altri additivi per conferire determinate caratteristiche al materiale da ottenere, in particolare:

- Tensioattivi per abbassare la tensione superficiale e quindi favorire la formazione della schiuma (nel caso di poli-uretani espansi utilizzati ad esempio come materiale isolante per i frigoriferi),
- Ritardanti di fiamma, per i settori di applicazione ove ciò è richiesto.

Nel settore della coibentazione, ad esempio per i frigoriferi, si utilizzano poliuretani espansi rigidi con rivestimento rigido. Nel caso specifico dei frigoriferi il poliuretano viene espanso iniettando un gas espandente come il CFC o l'HCFC, che permane all'interno del pannello poliuretano per tutta la durata della vita dell'apparecchiatura.

Al termine della propria vita, i frigoriferi vengono triturati e i CFC presenti all'interno delle lastre di poliuretano viene liberato. Le lastre di poliuretano possono considerarsi sufficientemente stabilizzate nel tempo e vanno considerati esauriti tutti i transitori di diffusione tipici di una produzione recente (diffusione nel breve); infatti la schiuma di PUR è restata compressa per 10-15 anni tra lastre dei frigoriferi, costituite da plastiche o alluminio formando multistrati funzionali, decorativi o strutturali. La presenza di strati barriera può aver ridotto la diffusione di inquinanti eventualmente presenti all'interno del PUR verso l'ambiente circostante, ma il tempo trascorso assicura l'assenza di CFC libero derivante dal processo di formatura della schiuma. Di conseguenza, la diffusione del CFC risulta limitata poiché, in caso contrario, nei 10-15 anni di esercizio si sarebbero perse le proprietà isolanti che invece si dimostrano essere mantenute nel tempo.

Durante il processo di frantumazione il poliuretano, recuperato all'interno dei pannelli multistrato, può venire ridotto in frammenti da 1-2 mm, pellettizzato e compresso per ridurre la quantità di CFC e successivamente polverizzato mediante polverizzatori a dischi, ottenendo dimensioni inferiori a 500 micron.

Come già richiamato nel paragrafo precedente, un aspetto critico risulta essere la concentrazione di CFC presente nel poliuretano in uscita dagli impianti di trattamento, che secondo il Decreto del 20 settembre 2002 deve essere inferiore a 5000 ppm (0.5% in peso). Un altro aspetto fondamentale da chiarire è se tale concentrazione di gas resta inglobata all'interno del nuovo materiale o se è possibile che si verifichi una progressiva cessione nell'ambiente, andando ad aumentare l'effetto depredatorio dello strato di ozono, che resta il principale effetto negativo del CFC; è quindi necessario, prima di una diffusione di nuovo materiale contenente CFC, assicurare che questa quantità resti inglobata all'interno dei granuli e, di conseguenza, all'interno della lastra anche per un lungo periodo dopo la sua trasformazione in un nuovo prodotto.

L'analisi della possibile diffusione di CFC all'interno della schiuma di poliuretano è stata effettuata sia con riferimenti a studi già pubblicati in letteratura sia con misure sperimentali dirette; trattandosi di indagini nel lungo periodo ci si può riferire in particolare a studi internazionali elaborati a partire dagli anni novanta. Già a partire dal 1993 vi sono alcuni studi sugli effetti negativi del CFC per l'ambiente, che furono volti, da un lato, a valutare la diffusione nel tempo per le lastre esistenti e dall'altro a ricercare agenti espandenti isolanti in sostituzione ai cloro-fluoro-carburi, nonostante questi fossero a basso costo ed alta efficienza. Nei primi anni 2000, poi, a fronte della necessità di smaltire notevoli quantità di poliuretano, iniziarono indagini e ricerche per ipotizzarne un possibile riutilizzo alternativo alla discarica e alla termovalorizzazione e quindi vennero ripresi i lavori precedenti, approfondendone alcuni aspetti.

Negli anni si sono sviluppati diversi studi scientifici sulla produzione di schiume poliuretatiche contenenti polvere di poliuretano, andando ad analizzare le proprietà finali che queste possono avere nel tempo; resta comunque da scongiurare la possibilità che il CFC ancora presente nelle celle delle polveri possa migrare successivamente e possa diffondersi in atmosfera. Una delle tesi più sviluppate, che smentisce questa possibilità, si basa sul fatto che se il CFC è ancora presente nelle lastre di poliuretano dopo 10-15 anni, significa che ha una notevole stabilità, e risulta, quindi, in parte adsorbito dal materiale e in parte libero, ma confinato nelle celle chiuse del poliuretano espanso. Studi sulla sostituzione di aria che soppianti il CFC diffuso nel poliuretano sono stati

eseguiti valutando la perdita di isolamento considerando che il CFC ha una resistività 290 volte superiore a quella dell'aria (e quindi il PUR diminuisce nel tempo la sua resistenza termica per invecchiamento). Mark Bomberg nel suo libro "*Spray Polyurethane Foam in External Envelopes of Building*", rivolto all'analisi dei processi di degradazione delle proprietà termiche nel campo edile, e altri articoli scientifici, riportano che "il processo di invecchiamento è completato in 100-250 anni, anche se nei primi 10-20 anni si può ipotizzare un dimezzamento della quantità di CFC presente". Studi sperimentali di altri autori e comparazioni sulla conducibilità termica permettono di asserire che la perdita di CFC avuta in 10 anni a 20° C corrisponde a quella avuta in 1700 ore a 70° C; l'aumento di conducibilità ascritto ad una perdita di gas con sostituzione dell'aria è pari ad una variazione del 40% del peso del gas stesso; di conseguenza è possibile confermare la ridotta diffusione in atmosfera del CFC nel tempo.

#### 4.3.1 Diffusione del CFC nell'atmosfera

Nel seguente paragrafo viene svolto un approfondimento per analizzare più in dettaglio la capacità del CFC di disperdersi in atmosfera, con conseguenti danni ambientali. L'analisi considera che all'interno dei pannelli poliuretani, successivamente alla loro espansione con il gas refrigerante la concentrazione di CFC R11 in peso non sia superiore a 20000 ppm, pari a circa il 2% in peso. Il CFC R11 è uno tra i gas a maggior impatto ambientale in quanto contiene la maggior quantità di cloro rispetto agli altri CFC e HCFC. Per quanto riguarda le sue caratteristiche fisiche esso è liquido a temperatura ambiente, con densità di 1.494 g/cm<sup>3</sup> e ha il punto di ebollizione a temperatura notevolmente inferiore a quella dell'acqua e pari a 23,77 ° C, inoltre la tensione di vapore a 20°C è pari a 89 kPa, mentre a 30° C è pari a 131 kPa.

Si considera che durante l'esercizio decennale dell'apparecchiatura generalmente il gas refrigerante presente nei pannelli di poliuretano si riduca, ma in modo non determinante. Si può ipotizzare, quindi, che la rottura della cella faccia uscire il gas a temperature superiori a 25-30° C, ma che una volta estratto il gas dalle celle rotte, quelle integre contengano all'interno il gas in modo stabile (se mantenuto a temperature ordinarie come quella ambiente).

Lo studio di Peter Kjeldsen e Morten Hjorth Jensen "*Release of CFC from Disposal of Polyurethane foam waste*" conferma i risultati attesi secondo cui tra i 9 e i 300 anni si libera il 50% del CFC residuo. Un ulteriore confinamento in altrettanto poliuretano a celle chiuse limita ulteriormente questa possibile diffusione; i dati riportati si basano su ricerche dei due autori e su

dati di letteratura e mostrano comunque un notevole margine di incertezza, anche se tutti confermano la notevole stabilità che si misura nei decenni di funzionamento dell'apparecchiatura.

La quantità di CFC residuo dopo lavorazione dipende da molti fattori, tra cui il processo di estrazione dei CFC e successivi processi di trasformazione. Durante il primo stadio di compressione si libera la maggior parte del CFC R11, contenuto come gas all'interno delle celle chiuse di poliuretano, e resta la sola parte adsorbita che non è soggetta a particolari modifiche durante i successivi processi di polverizzazione e successivo riutilizzo. I dati di stabilità nel tempo dei CFC si riferiscono, ovviamente, a questa quantità adsorbita, mentre la parte racchiusa nelle celle può venire separata durante la compressione della lastra espansa.

Da alcune semplici sperimentazioni è possibile confermare la notevole stabilità del CFC R11 in quanto, dopo 10 giorni di permanenza sotto vuoto (50 mmHg residui), non si sono avute diffusioni e perdite di CFC dal poliuretano già lavorato e polverizzato; i risultati delle analisi effettuate sul poliuretano estratto da tre diverse aziende di trattamento di RAEE del raggruppamento R1 sono riportati in Tabella 4.2.

Componente		Azienda 1	Azienda 2	Azienda 3
Ferro	ppm	26.500	11.600	21.200
Zinco	ppm	3.770	1.830	2.750
Rame	ppm	131	729	222
Piombo	ppm	79	224	0
Cromo	ppm	66	54	0
CFC R11	ppm	145	1.580	400
CFC R11 polverizzato	ppm	238	2.430	650
CFC R 11 Polverizzato 50°	ppm	322	2.420	550

**Tabella 4.2: Analisi della lastra di poliuretano dopo 10 giorni dalla lavorazione.**

Lo smaltimento del poliuretano espanso deve prevedere il recupero e il confinamento del CFC in modo tale che non venga liberato nel tempo nelle discariche dove è smaltito, o in modo che non vi sia il pericolo di formazione di diossine o furani se bruciato in termovalorizzatori. L'utilizzo nei bruciatori di gas proveniente dai processi di fermentazione delle discariche ha mostrato l'effetto corrosivo dei CFC e dell'acido cloridrico prodotto durante la combustione di tali gas.

Il coefficiente di diffusione deve considerare solo la parte effettivamente adsorbita e non quella inglobata nelle bolle, che è rilasciata durante il processo di polverizzazione, nella forma classica si ha:

$$\frac{M_t}{M_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_0^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left\{ -D(2n+1)^2 \cdot \frac{\pi^2 t}{L^2} \right\}$$

$D$  assume valori compresi tra  $0,18-1,7 \cdot 10^{-14}$  m<sup>2</sup>/s a 25° C.

La relazione permette di calcolare il tempo  $t$  necessario affinché la concentrazione iniziale  $M_0$  arrivi alla concentrazione  $M_t$  diffondendo sui due lati di una lastra di spessore  $L$  quando sulle due superfici si possa trascurare la concentrazione dell'elemento che sta diffondendo. Quando il rapporto vale  $1/2$ ,  $t$  viene detto tempo di dimezzamento in quanto si arriva alla metà della concentrazione iniziale con diffusione di metà del componente.

La seconda serie di campionature, oggetto della presente indagine, mostra la possibilità di arrivare a valori di CFC molto bassi a dimostrazione che un buon processo di frantumazione e compressione, cioè lo schiacciamento delle bolle contenenti CFC, riduce opportunamente la quantità di CFC a valori di 500 ppm che sono ben al di sotto di quanto suggerito in sede europea, e pari a 0,2% in peso.

Quando si leggono in letteratura valori molto alti del coefficiente di diffusione ( $D = 0,19-2,1 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s a 25 °C) non si deve intendere una maggior facilità di cessione nell'ambiente ma, piuttosto, una perdita di CFC dai pori aperti e/o spezzati durante la polverizzazione che è da considerarsi come un meccanismo diverso di perdita del gas.

In realtà il processo diffusivo determinato dal coefficiente di diffusione  $D$  conferma i tempi decennali per la cessione del CFC dal poliuretano, a esclusione della rottura dei pori durante il processo di polverizzazione e compressione che riduce enormemente, nelle prime settimane, la quantità di CFC, che però rappresenta il CFC libero e non quello adsorbito.

E' quindi importante il processo di frantumazione per l'apertura delle celle chiuse, ma anche il processo di compressione per fare uscire il gas ed altre operazioni successive atte a eliminare i CFC ancora presenti e non adsorbiti (gas libero tra le celle rotte) che potrebbero liberarsi in ambiente nelle prime settimane. Dopo il trattamento ed alcune settimane di stabilizzazione (oppure altri post trattamenti) è presente solo la frazione adsorbita che resta stabile.

La possibilità di recuperare il poliuretano consente di mantenere il CFC inglobato nelle celle della polvere poliuretanic; al contrario, lo smaltimento in discarica o la combustione in termovalorizzatori potrebbe portare all'emissioni di diossine e furani. In proposito va rimarcato che l'attuale sistema di conferimento in discarica è, pertanto, da considerarsi negativamente rispetto ad un processo di recupero e reimpiego, a causa delle quantità di CFC che vengono lentamente

rilasciate in atmosfera data la loro quantità contenuta nei PUR espansi e non trattati; infatti nel caso non si debba trattare il poliuretano per un successivo recupero il quantitativo di CFC all'interno delle celle sarebbe maggiore, con maggiori possibilità di rilascio in atmosfera. Contrariamente a ciò, trattando il PUR mediante polverizzazione e compressione, si riduce la quantità di CFC presente a valori di 500-1000 ppm, permettendo in questo modo un ulteriore recupero dei gas; il successivo incapsulamento, inoltre, stabilizza ulteriormente il gas presente nelle celle, riducendo la possibilità di avere perdite in atmosfera.

Il CFC/HCFC che rimane nel poliuretano pretrattato è da considerare un valore positivo in termine di performance in quanto può sostituire parzialmente l'utilizzo di materiale vergine, con percentuali che variano dal 20% al 50%, con punte fino al 70% a seconda dell'impiego, comportando benefici in termini di:

- Minor impiego di risorse naturali;
- Riduzione dei consumi energetici, (tale comparazione è stata fatta tra nuovi materiali vergini e riutilizzo del materiale riciclato);
- Minori emissioni di anidride carbonica (anche in questo caso la comparazione è stata fatta tra nuovi materiali vergini e riutilizzo del materiale riciclato).

#### 4.3.2 Indagini sperimentali e caratterizzazione dei campioni di poliuretano

Al fine di rendere omogenea la miscela di poliuretano, è possibile liberare ancora CFC rompendo le celle chiuse e migliorare la qualità del prodotto finito, che risulterà avere migliori proprietà meccaniche, polverizzando il poliuretano in uscita dagli impianti di trattamento fino ad ottenere una polvere con granulometria inferiore a 500 micron. Infatti, i pellets, o i bricchetti, derivanti dalla lavorazione delle schiume isolanti, sono caratterizzati da una struttura non uniforme e da una granulometria non costante e piuttosto grossolana, attorno a 1-2 millimetri. Per tale ragione, prima di procedere alla lavorazione del poliuretano per il suo finale recupero, si rende necessaria una polverizzazione. A valle del processo di polverizzazione, la polvere può essere utilmente impiegata come carica all'interno di nuovi pannelli in PUR, la cui reattività residua è stata in parte indagata. Si tratta quindi di valutare le caratteristiche tecniche (conducibilità e resistenza meccanica) del materiale ottenibile e il variare di tali caratteristiche all'aumentare della percentuale di polvere di poliuretano presente nel prodotto che si desidera ottenere.

La sintesi dei poliuretani ha come base la reazione tra isocianati aventi uno o più gruppi isocianici per molecola con degli alcoli aventi due o più gruppi ossidrilici per molecola (dioli o polioli). Le proprietà e le caratteristiche del prodotto polimerico ottenuto dipendono sia dalla struttura dei prodotti di base, polioli e isocianati, sia dal tipo di catalizzatori e additivi impiegati; catalizzatori e additivi vengono spesso premiscelati con i polioli e contribuiscono, durante la reazione con l'isocianato, sia a controllare la reazione di sintesi del poliuretano, sia a modificare le proprietà del polimero finale.

Già dal 2004 studi della Polyurethanes Recycle and Recovery Council (PURRC), avevano stabilito che l'additivazione del 20% in peso di polvere di PUR al poliolo della miscela reagente durante il processo di polimerizzazione nello stampo a compressione (RIM) non dava significative riduzioni della resistenza a compressione né una riduzione nella resistenza alla abrasione. Si legge inoltre che la dimensione delle particelle dovrebbe essere inferiore ai 200 micron e pertanto nella sperimentazione si sono utilizzate due granulometrie differenti, da 500 a 200 micron e sotto i 200 micron. La polvere di PUR contiene qualche gruppo idrossile reattivo in grado di legarsi al diisocianato per formare qualche uretano oligomero più o meno reticolato. Evidenza di questo fatto è quella di miscelare separatamente la polvere con polioli e con diisocianati; dopo 24 ore si nota che la miscela con polioli non è indurita mentre quella con diisocianati ha preso la forma del contenitore.

Tra le applicazioni possibili ed in base agli studi fatti finora in campo internazionale, si è ipotizzata una tecnologia di produzione che permettesse una prima valutazione delle proprietà del materiale rimacinato. Le prove svolte non hanno avuto l'obiettivo di individuare la migliore applicazione industriale perché tale obiettivo può essere perseguito solo mediante l'ausilio di un piccolo impianto pilota che simuli il processo soprattutto in termini di miscelazione e controllo della temperatura. La miscelazione è stata fatta manualmente, senza controllo di temperatura e l'espansione è stata fatta con un minimo di pressione, uguale in tutte le condizioni (Figura 4.1). L'aver mantenuto le stesse condizioni di processo ha permesso così di stimare alcuni andamenti e di effettuare una comparazione con il prodotto tal quale. Per gli stessi motivi, non è fondamentale il tipo di poliolo e di diisocianato utilizzato che comunque è simile a quello usato per le schiume isolanti utilizzate nei frigoriferi.



**Figura 4.1: Processo di lavorazione per la preparazione dei campioni di prova**

Sono state condotte analisi su 3 differenti campioni di poliuretano provenienti da altrettanti impianti di triturazione, caratterizzati da tecnologie differenti per la lavorazione delle carcasse e del poliuretano stesso.

Il primo processo di vagliatura ha permesso di selezionare polvere più grossolana e polvere più fine (con granulometria inferiore a 200 micron). Dalle prove realizzate la polvere più grossolana ha permesso un miglior grado di miscelazione permettendo facilmente di realizzare miscele con il 40% di polvere, mentre la polvere fine non ha permesso di ottenere una bagnabilità sufficiente (con semplici mezzi) e non sono stati realizzati dei campioni compatti con caratteristiche meccaniche minime. Il processo di polverizzazione ha, inoltre, messo in evidenza la presenza di metalli duri (probabilmente acciai legati) che hanno prodotto scintille tra i dischi rotanti. La presenza di frammenti di materiale metallico non è risultata omogenea in tutti i campioni di poliuretano utilizzato. Si può quindi desumere che alcune tecnologie di lavorazione dei frigoriferi a fine vita producano poliuretano con una maggiore quantità di sostanze estranee rispetto ad altre.

In generale, i risultati delle prove sui tre distinti materiali hanno dato risultati del tutto confrontabili e pertanto ogni altra successiva indagine (di tipo tecnologico o prove meccaniche) può essere effettuata su uno dei tre materiali indifferentemente. Alcune sostanziali differenze invece restano dal punto di vista della composizione e tale assunzione è stata verificata con prove ripetute.

L'analisi dei valori mostra una minima riduzione della resistenza a rottura per flessione rispetto al materiale vergine (parametro che è assunto a base del processo di omogeneizzazione e della qualità dei legami formati) anche se in esercizio tale proprietà potrebbe risultare ininfluenza. Un altro parametro critico è la resistenza allo schiacciamento che è diminuita rispetto al poliuretano vergine. La resistenza a flessione nel campo delle piccole deformazioni è meno significativa e si evidenziano valori molto simili per tutte le miscele. La densità mostra andamenti crescenti con la percentuale di polvere di riciclato fino a raggiungere valori intorno a  $0,140-0,155 \text{ kg/dm}^3$  per il 40% di rimacinato. La densità è un parametro molto variabile che dipende soprattutto dalle variabili di processo impostate, quali, la pressione e la granulometria del materiale riciclato e polverizzato che influenzano le proprietà meccaniche.

In sintesi, la valutazione complessiva delle proprietà meccaniche mette in luce una riduzione non rilevante di alcune proprietà meccaniche che, comunque, potrebbero non essere fondamentali nelle applicazioni previste. Esiste quindi una realistica possibilità di miscelare il 20% o il 30% di poliuretano, previa polverizzazione, ma senza vagliatura in quanto la granulometria appare già sufficientemente omogenea e pronta all'uso. Si riportano in Tabella 4.4 i risultati delle analisi svolte sui campioni come precedentemente descritti.

Tipologia	%	Densità			Modulo Flessione			Rottura per Flessione			Sforzo compressione 40% def		
		kg/dm <sup>3</sup>			Mpa			Mpa			Mpa		
	(kg/k g)	Az 1	Az 2	Az 3	Az 1	Az 2	Az 3	Az 1	Az 2	Az 3	Az 1	Az 2	Az 3
200 micron	20	0,064	0,094	0,074	7,500	7,50	6,50	0,32	0,30	0,31	0,17	0,24	0,16
<500 micron	10		0,047						0,41			0,22	
	20	0,047	0,054	0,051	6,000	6,50	5,00	0,42	0,40	0,26	0,15	0,23	0,15
	30		0,066						0,34			0,23	
	40	0,111	0,094	0,140		7,10			0,30		0,32	0,35	0,40
Polverizzato	20		0,055						0,28			0,16	
	40		0,155						0,35			0,45	
Tal quale		0,064			7,50			0,65			0,35		

**Tabella 4.3: Risultati delle caratteristiche meccaniche dei campioni di poliuretano.**

In seguito alla ricerca effettuata, che ha evidenziato l'assenza di impedimenti normativi e legislativi all'uso di PUR espanso come materia prima seconda, e dopo una semplice valutazione delle caratteristiche meccaniche dei campioni ottenuti usando poliuretano riciclato (sottoposto ad un semplice ricondizionamento) come carica, si è completata la caratterizzazione dei campioni con prove di conducibilità termica.

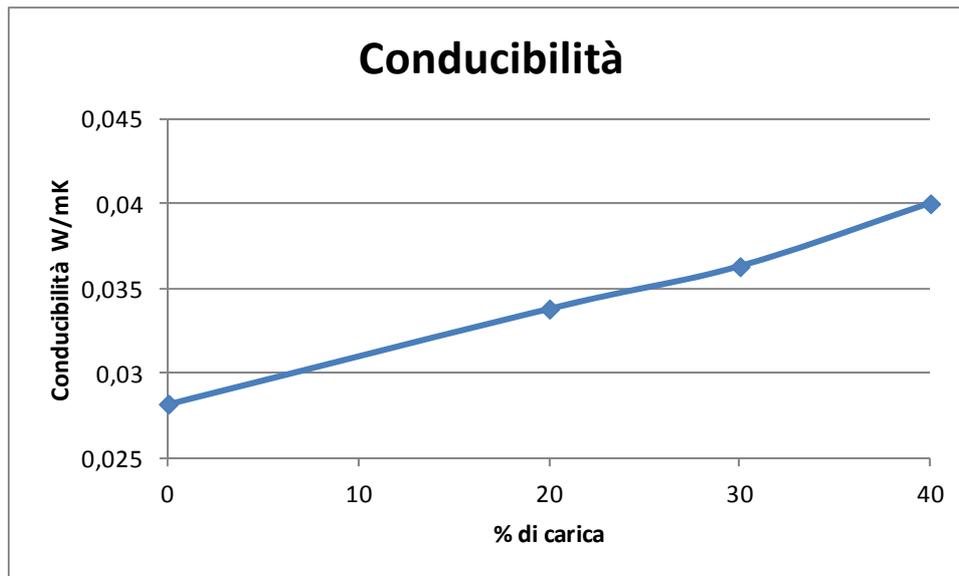
Per le prove si è utilizzata una lastra ottenuta in modo artigianale in laboratorio senza l'impiego di impianti automatici mediante reazione a 40°C tra polioli e diisocianati (gli stessi materiali utilizzati per la prima produzione di lastre) in uno stampo a debole compressione. In tal caso, poiché i dati sono ottenuti per confronto, devono essere ritenute valide le condizioni di processo assunte arbitrariamente (pressione e temperatura). Sono state prodotte quattro serie di campioni: una senza carica di poliuretano (vergine) e tre serie con diverse percentuali di carica di poliuretano. I campioni con carica sono stati ottenuti mescolando polvere di poliuretano macinato (fino a circa 500 micron ma non setacciato) con poliolo alla quale successivamente è stato aggiunto il diisocianato. In questo modo si sono ottenute delle lastre con spessori superiori a 15 millimetri come richiesto dalle specifiche tecniche della prova di conducibilità termica.

Per ogni campione si è calcolata la densità (peso specifico) come rapporto tra massa (peso) e volume (ricavato in termini geometrici); si riassumono in Tabella 4.4 i risultati delle prove effettuate. Come evidenziato in tabella, è stato possibile ottenere anche campioni con percentuale di carica fino al 40% che mantengano comunque una certa consistenza sebbene il grado di espansione risultante è inferiore di 1/3 rispetto al grado di espansione del campione vergine.

<b>Descrizione Serie</b>	<b>Percentuale di carica [%]</b>	<b>Conducibilità [W/mK]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>
Vergine	0	0,0282	56
Caricato 20%	20	0,0338	91
Caricato 30%	30	0,0363	109
Caricato 40%	40	0,0400	186

**Tabella 4.4: Risultati delle prove effettuate sulle diverse serie di campioni.**

Rappresentando su un grafico i risultati di conducibilità termica ottenuti, si nota che essa aumenta proporzionalmente con la percentuale di carica introdotta a dimostrazione del carattere inerte della carica che non conferisce alcuna particolare caratteristica.



**Figura 4.2: Conducibilità in funzione della percentuale di carica.**

La sperimentazione condotta, senza particolari ottimizzazioni del sistema di miscelazione e di espansione, ha mostrato che la parte di poliuretano compresso, liberato dal gas espandente, e polverizzato in particelle non espanse di dimensioni variabili da 0 a 500 micron, non conferisce particolari proprietà di isolamento termico al pannello realizzato. Poiché lo scopo dell'isolamento termico è quello di assicurare l'isolamento mantenendo spessori ridotti, un eventuale incremento di spessore per uguagliare la stessa quantità di flusso di calore permesso potrebbe migliorarne le caratteristiche. Infatti si evidenzia come ad un aumento della conducibilità termica  $K$  del 10% debba corrispondere un pari aumento dello spessore  $s$  che produce la resistenza termica. Va comunque tenuto in considerazione che ad oggi sono presenti sul mercato materiali isolanti con caratteristiche di isolamento inferiori a quelle ottenute dalla sperimentazione, è opportuno quindi tenere in considerazione che:

- le caratteristiche di isolamento dei campioni di poliuretano ottenuti sono comunque competitive rispetto ad una serie di materiali isolanti ad oggi impiegati nel mercato;
- tutte le prove sono state realizzate in laboratorio in modo artigianale e che quindi una industrializzazione del processo porterebbe ad un miglioramento del materiale in termini di consistenza e compattezza migliorando, seppur in piccola parte, anche le caratteristiche di isolamento;
- è opportuno ricercare modalità di impiego in comparti merceologici che considerino anche le proprietà meccaniche o meglio il volume occupato dal manufatto, la resistenza e la densità, oltre alle proprietà termiche, in tal caso il riempimento inerte trova maggiori giustificazioni;

- va inoltre tenuta in considerazione la consistenza del materiale ottenuto in lastre che quindi potrebbe trovare impiego in diversi settori dell'edilizia o dell'arredo;

In Tabella 4.5 vengono riportati i valori di conducibilità termica, della densità e dei costi indicativi del poliuretano con diversi quantitativi di materiale riciclato (dal materiale vergine al materiale con una percentuale di riciclato pari al 40%). È possibile notare come ad un aumento del quantitativo di riciclato corrisponda una diminuzione dei costi del materiale al chilo, a fronte di un aumento della densità e della conducibilità termica. I costi sono puramente indicativi e stimati rispetto ai prezzi di mercato dei materiali, l'industrializzazione del processo porterebbe ad una riduzione degli stessi.

Descrizione	Conducibilità	Densità	Costo
	[W/mK]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[€/kg]
PUR Vergine	0,0282	56	7,40
80% PUR Vergine + 20% PUR riciclato	0,0338	91	6,44
70% PUR Vergine + 30% PUR riciclato	0,0363	109	5,96
60% PUR Vergine + 40% PUR riciclato	0,0400	186	5,48

**Tabella 4.5: Confronto delle proprietà di isolamento fra vari campioni.**

I costi per i materiali e le lavorazioni utilizzate per l'ottenimento del prodotto finito sono di seguito riportati:

- Costo del poliolo e diisocianato (materia prima per il vergine) 2,70 euro/Kg;
- Costo per polverizzazione grossolana (500 micron) 0,10 euro/Kg;
- Costo di trasformazione con produzione di lastre estruse circa 1 euro/Kg.

#### 4.4.CAMPI DI APPLICAZIONE

Una volta che il materiale è stato polverizzato e sono state verificate le caratteristiche fisico-meccaniche è possibile prevedere diversi campi di applicazione, sia come materia prima seconda in nuovi materiali sia come recupero energetico in impianti di produzione di energia. Si individuano, sostanzialmente, quattro settori di utilizzo della polvere di poliuretano da riciclare:

- Riagglomerazione con legante;
- Recupero energetico;
- Polverizzazione e recupero come carica;

- Glicolisi.

### Riagglomerazione con legante

Uno dei processi più interessanti per il riciclo del poliuretano consiste nel ricomporre assieme, per azione della pressione, particelle di schiuma poliuretanicavvalendosi di un legante solitamente anch'esso poliuretanicov. Le particelle vengono ottenute in prevalenza dagli sfridi di lavorazione di blocco flessibile opportunamente macinati, che hanno il vantaggio rispetto a schiume recuperate, di essere pulite e selezionate per l'impiego all'origine. Il legante è una miscela di poliolo ed isocianato che non ha reagito completamente e quindi ancora in grado di legarsi chimicamente alla schiuma; la preparazione avviene in un serbatoio a parte, dove in un mescolatore viene distribuito il legante in modo uniforme sulle particelle di schiuma, la miscela viene poi trasferita alla fase successiva di formatura. In questa fase si possono utilizzare processi in discontinuo o continuo.

Nel primo caso la miscela è posta in uno stampo solitamente a forma di parallelepipedo e iniettata con vapore per far reagire il legante, il blocco formato viene poi estratto e lasciato raffreddare ed asciugare. Nel secondo caso, la miscela viene compressa tra due convogliatori inclinati, in movimento continuo, sino alla densità desiderata e quindi nella sezione finale viene iniettato vapore, sempre per fare reagire il legante. La qualità delle schiume riagglomerate dipende da numerosi fattori, tra i quali:

- le caratteristiche degli sfridi di espanso utilizzati (densità, forma..);
- la densità finale del riagglomerato;
- la dimensione media e l'uniformità delle particelle utilizzate;
- il tipo di legante e la quantità adoperata rispetto alla quantità di schiuma.

Il prodotto finito viene lavorato mediante un processo simile al blocco poliuretanicov convenzionale, il quale viene tagliato, sagomato, incollato ecc. Le applicazioni della schiuma agglomerata sono varie: per le buone capacità di assorbimento di energia può essere usata per tappeti ginnici, appoggiatesta, sottotappeti, parti di scarpe da sci e moquettes (specialmente per il mercato americano) e, più in generale, dove sono necessarie alte densità (da 60 a 200 kg/m<sup>3</sup>).

Si stima che in Europa vengano prodotte circa 20.000 tonnellate all'anno e ben 90.000 tonnellate solo per il mercato nordamericano.

### Recupero energetico

Un'alternativa valida al recupero di materia è il recupero energetico, considerando che circa il 4% del petrolio estratto viene trasformato in materie plastiche, tra cui il poliuretano.

Già durante il processo di fabbricazione delle materie plastiche si producono degli scarti di lavorazione che però possono essere facilmente separati, inoltre, alla fine del loro ciclo di vita, buona parte di queste plastiche finiscono in rifiuti urbani. L'incenerimento dei rifiuti urbani costituisce una valida modalità di smaltimento in alternativa alle note discariche. Il rifiuto urbano, in virtù della sua composizione (plastica, carta, fibre e simili), possiede un potere calorifico proprio, che può essere integrato da combustibile convenzionale e da cariche di poliuretano flessibile. In questo caso l'aggiunta di poliuretano in fase di incenerimento non peggiora le condizioni di funzionamento del forno o la composizione dei fumi. Si può pertanto stimare la possibilità di aggiungere poliuretano sino al 30% in volume del rifiuto da incenerire senza risultanze di rilievo.

Alternativamente, gli sfridi di poliuretano possono essere usati da soli o in miscela con altre plastiche in centrali termoelettriche in parziale sostituzione dei combustibili primari come il carbone, oppure in forni per cemento o come cariche d'altoforno per produrre acciaio. In questi ultimi casi l'uso di materie plastiche oltre a ridurre il fabbisogno di combustibile primario consente anche di migliorare la qualità dei fumi di combustione riducendo l'emissione di ossidi di zolfo e azoto. Un'attenzione particolare deve essere dedicata alle condizioni di gestione del forno, alla composizione della miscela di materie plastiche ed alla presenza di alcuni elementi chimici indesiderati.

Alla base della scelta di recuperare il contenuto energetico di plastica e poliuretani non bisogna quindi porre solo il calcolo della convenienza economica dell'operazione ma anche altri aspetti altrettanto importanti, quali la riduzione del volume occupato dai rifiuti, la controllabilità del processo ed il minore consumo delle fonti di energia primarie quali carbone e petrolio.

Si ricorda che il poliuretano ha un potere calorifico intorno ai 25.000-30.000 kJ/kg, e una temperatura di accensione pari a 400 °C.

#### Polverizzazione e recupero come carica

Dal 2004, in modo non strutturato, diversi tecnici hanno proposto metodi per riutilizzare il poliuretano con soluzioni industriali accettabili anche se prive di organicità. Scopo del presente lavoro, però, è anche quello di conferire una certa sistematicità alle esperienze condotte in modo disorganico da più tecnologi nel mondo. La mancanza di norme organiche ha inoltre impedito la diffusione e la sistematicità dell'uso del poliuretano in ambiente industriale su larga scala e in modo assolutamente trasparente.

La polverizzazione permette operazioni di recupero di tipo fisico, in quanto a seguito di un processo meccanico di riduzione del materiale in piccole particelle esso può essere opportunamente incorporato nel poliolo usato per produrre schiume nuove. La parte fondamentale del processo è la

riduzione in piccole particelle con diametro dell'ordine di pochi decimi di millimetro, che si ottiene mediante opportuni mulini o altre tecnologie. Nel caso dei mulini, va ricordato che i cilindri ruotano in senso opposto forzando la schiuma attraverso una stretta fenditura dove il materiale viene "strappato" e ridotto in particelle, oppure è premuto contro delle piastre munite di piccoli fori, le particelle vengono quindi setacciate e premiscelate con il poliolo che viene fatto reagire con l'isocianato. Questo utilizzo è applicabile a molti tipi di schiuma, ma viene preferibilmente adoperata per i sedili automobilistici, dove una percentuale del 15-20% di materiale riciclato lascia fundamentalmente invariate le caratteristiche della seduta. Secondo quanto già realizzato, abbiamo ipotizzato l'uso di cariche di poliuretano macinato nella percentuale dal 20 al 40% utilizzando una granulometria intorno ai 200 micron.

### Glicolisi

La glicolisi è un'operazione di natura chimica nella quale vengono spezzate le lunghe molecole di poliuretano per rigenerare le molecole di partenza o comunque molecole di minore lunghezza utili per essere riutilizzate per la produzione di poliuretano. Il processo consiste nel trattare le schiume con glicoli di diverso tipo e catalizzatori opportuni, che combinati ad elevate temperature e pressioni portano alla formazione di polioli ed una serie di sottoprodotti. I polioli così ottenuti possono essere miscelati con polioli nuovi in percentuali diverse, a seconda delle caratteristiche; in alcuni casi questa percentuale può arrivare sino al 90%, consentendo così di produrre schiume che contengono anche il 30% di materiale riciclato.

Questa tecnologia si applica attualmente al poliuretano microcellulare quale quello adoperato per la calzatura, al poliuretano stampato (RIM) per parti auto, alle schiume isolanti rigide. Ad oggi, il suo impiego per il riciclo delle schiume flessibili non si è ancora sviluppato, ma si sta studiando la giusta collocazione per i prodotti di recupero.

### 4.3.3 Campi di applicazione come recupero di materia

Il poliuretano, come già anticipato, è utilizzato in tantissimi campi e settori, tra cui quello dell'auto, dell'edilizia della nautica; di conseguenza è possibile valutare l'utilizzo di poliuretano riciclato dal settore dei frigoriferi negli stessi ambiti.

### Settore dell'automobile

Il 70% del poliuretano contenuto in un'auto è costituito dalle imbottiture dei sedili e dal 1960 queste vengono sminuzzate e trasformate in un agglomerato riutilizzato per produrre, ad esempio, sottotappeti e pannelli di coibentazione del vano bagagliaio.

Per favorire il riciclaggio del poliuretano, la Germania ha favorito lo sviluppo di tecniche di smaltimento che comprendono tutte le diverse opzioni già descritte: stampaggio a pressione elevata di scarti poliuretano macinati, processo di glicolisi (per esempio la trasformazione di paraurti in condotti dell'aria), stampaggio per compressione, incorporamento di materiale in polvere, ottenuto dalla macinazione di fiocchi in espanso flessibile e aggiunta della polvere al poliolo di una miscela di reazione.

### Settore dell'edilizia ([www.prefabbricato.org](http://www.prefabbricato.org))

Il settore edile consuma grandi quantità di materie prime che generalmente sono e devono essere a basso costo. Negli ultimi anni la normativa vigente ha imposto limiti sempre più stringenti per il risparmio energetico e la coibentazione degli edifici, così da aumentare l'uso di materiali isolanti anche in questo settore. Sfridi di poliuretano, sia flessibile che rigido, possono essere utilizzati come tappetini fonoassorbenti o come pannelli termoisolanti. La perdita delle proprietà fisiche (potere fonoassorbente e resistenza termica) dovuta all'utilizzo di materiale riciclato è ampiamente bilanciata dal minor costo per unità di massa e quindi risulta possibile riprogettare i manufatti in modo da soddisfare completamente i requisiti funzionali.

Viste le caratteristiche del poliuretano riciclato riscontrate a fronte delle analisi condotte e dei risultati ottenuti, si è verificato che questo può sostituire in maniera competitiva il vergine per alcune applicazioni, avendo l'accortezza di dosare le percentuali di carica del riciclato in base alle funzioni che il prodotto finito andrà ad assolvere. Il poliuretano contenente cariche di riciclato fino al 30 % ha dimostrato di garantire un isolamento termico competitivo rispetto ad una serie di materiali impiegati attualmente isolanti in edilizia, sia vergini che riciclati. Inoltre, vi sono stati riscontri positivi anche per un suo utilizzo come parte strutturale o di alleggerimento di una serie di applicazioni (con poliuretano riciclato fino al 50%). Proprio per questo il poliuretano riciclato si dimostra adatto all'impiego per la realizzazione di controsoffitti, pannelli isolanti, superfici di rivestimento interne ed esterne e nella realizzazione di lapidei naturali alleggeriti e altri elementi strutturali che debbano assolvere tali funzioni. Le sue prestazioni possono essere ulteriormente potenziate attraverso l'accoppiamento con altri materiali, e le possibili applicazioni studiate sono:

- controsoffitti: il poliuretano espanso riciclato può essere impiegato nella realizzazione di pannelli per controsoffitti, può essere impiegato “nudo”, per poi essere stuccato, o accoppiato ad altri materiali nobilitanti, per migliorarne la resa estetica.
- superfici di rivestimento: si tratta di pannelli in poliuretano per superfici esterne, rivestiti con diversi materiali come fogli di tavella (da intonacare), mattoncini naturali in argilla o blocchi di pietra irregolari.
- lapidei naturali: sono pannelli strutturali di poliuretano espanso accoppiati a sottili strati di marmi e altre pietre.
- pannelli isolanti: il poliuretano espanso riciclato può essere impiegato nella realizzazione di pannelli isolanti per sistemi di isolamento termico.

### Settore della nautica

A seguito dell'affermarsi della vetroresina come principale materiale nella realizzazione degli scafi delle imbarcazioni, il poliuretano ha trovato largo impiego nel settore della nautica come riempitivo di scafi di tutte le dimensioni; si tratta di un materiale autoestinguento che costituisce la maggior parte dello spessore degli scafi in vetroresina, e conferisce alla struttura robustezza ed un'elevata resistenza tecnica. Tramite il poliuretano, l'intercapedine tra i due gusci dello scafo viene ottimamente isolata sia dal punto di vista termico che acustico. Da ciò derivano innumerevoli benefici, tra cui l'assenza di condensa, che mantiene asciutti gli interni e posticipa di molto lo svilupparsi di fenomeni corrosivi; inoltre, sono garantite temperature tiepide d'inverno e miti durante il periodo estivo.

Il poliuretano con cariche di riciclato fino al 50% può quindi inserirsi in questo settore in maniera competitiva sotto ogni aspetto in quanto in grado di garantire le funzioni svolte dal materiale vergine per la realizzazione delle imbarcazioni, come galleggiamento, stabilità dimensionale, elevata resistenza agli urti e alla compressione, ecc. Il poliuretano espanso rigido è uno schiumato con buona stabilità dimensionale ed elevata resistenza agli urti e alla compressione, e può essere ben impiegato per rendere inaffondabili gli scafi. Laddove sia prevista la necessità che lo scafo svolga anche funzione di isolamento termico per garantire una buona abitabilità e prevenire in maniera più sicura la formazione di umidità e condensa, si può optare per un poliuretano con una carica di riciclato inferiore, e compresa tra il 20% e il 30%, a seconda del grado di isolamento che si vuole ottenere.

Riassumendo, i principali vantaggi funzionali di utilizzo nel settore nautico di pannelli in poliuretano riciclato sono:

- Costituisce la maggior parte dello spessore degli scafi;

- Conferisce robustezza ed un'elevata resistenza tecnica alla struttura;
- Ha un'elevata resistenza agli urti e alla compressione;
- Ha una buona stabilità dimensionale;
- Rende inaffondabile gli scafi;
- Funge da isolante termico e acustico;
- Impedisce la formazione di condensa mantenendo asciutti gli interni;
- Posticipa lo svilupparsi di fenomeni corrosivi;
- Materiale autoestinguento (limita diffusione di eventuali fiamme a bordo).

Da un'indagine svolta presso alcuni cantieri navali presenti in provincia di La Spezia, è emerso che per una serie di imbarcazioni, di piccole e medie dimensioni, l'utilizzo del poliuretano ha la sola funzione di robustezza e spessore per gli scafi, dare stabilità, e rendere inaffondabili le imbarcazioni. In questo caso l'utilizzo di pannelli di poliuretano riciclato possono assolvere completamente tali funzioni.

#### Settore arredamento d'interni

La leggerezza e la facilità di lavorazione dei pannelli di poliuretano sono caratteristiche che lo rendono un materiale ottimale per l'impiego nel settore dell'arredo per interni. La sua buona stabilità dimensionale e la sua elevata resistenza agli urti e alla compressione lo rendono un materiale ideale per la realizzazione di sandwich, accoppiando pannelli riempitivi di poliuretano a laminati di materiali pregiati o comunque con una buona estetica. Per questi motivi il poliuretano con carica di riciclato anche fino al 50% può essere impiegato nella realizzazione di pannelli divisorii per ambienti, modulari o singoli, in sostituzione dei materiali tradizionalmente utilizzati per queste funzioni (come il cartone a nido d'ape, i pannelli di legno truciolato, etc.), inoltre può essere utilizzato come riempitivo nella realizzazione di tapparelle avvolgibili, al fine di migliorarne le caratteristiche di resistenza alle intemperie o a tentativi di manomissione.

L'accoppiamento può avvenire con laminati in materiale ferroso o plastico a seconda delle funzioni e del peso che si vuole ottenere. È possibile prevedere anche un accoppiamento in tessuto, in questo caso è richiesta una certa stabilità del prodotto che può essere ottenuta con l'impiego di supporti alla base.

#### Pavimentazioni

In molti casi, i materiali riciclati che non trovano un impiego nelle più comuni mansioni a cui sono adibiti anche i materiali vergini, possono essere utilizzati per le pavimentazioni. In questo caso, è

stato fornito del poliuretano riciclato all'azienda Ecoplan, specializzata nella realizzazione di pavimentazioni in poliolefine (PP e PE) riciclate e senza esausta. L'azienda ha prodotto, a fini di verifica, dei campioni di materiale di piccole dimensioni, allo scopo di verificare la possibilità di un impiego del materiale come inerte nella realizzazione di pavimentazioni. L'esito della sperimentazione è stato positivo. L'azienda ha valutato che il poliuretano riciclato e micronizzato può essere utilizzato come inerte in percentuali che oscillano tra il 30% e il 50%. Per la realizzazione di una prova industriale sono necessari circa 1000 kg di PUR riciclato.

## 5. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Dall'analisi della normativa applicabile è emerso che non esistono divieti al riciclaggio del poliuretano derivante dalla triturazione dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche. Non esistono tuttavia nemmeno norme tecniche specifiche che permettano la classificazione di tale rifiuto come materia da re-immettere nel processo produttivo.

Le analisi svolte in laboratorio hanno quindi dimostrato che:

- il poliuretano oggetto di studio conteneva un quantitativo di inquinanti (CFC e metalli pesanti) mediamente al di sotto di quanto previsto da norme del settore plastico (preso a riferimento data la mancanza di una normativa specifica);
- le caratteristiche del materiale esplorate hanno evidenziato che le performance del poliuretano riciclabile sono inferiori rispetto al poliuretano vergine; il materiale riciclato non potrà quindi essere re-immesso nel processo produttivo da cui ha avuto origine ma potrà comunque essere re-impiegato in settori che richiedano performance inferiori o comunque differenti o che possano utilizzare il poliuretano come materiale per riempimento ed appesantimento.

Le caratteristiche analizzate ed il sunto dei risultati sono riportati in Tabella 5.1.

Proprietà	Materiale Vergine	Media campioni da PUR riciclato
Densità (kg/dm <sup>3</sup> )	0,064	0,081
Modulo flessione (Mpa)	7,500	6,586
Rottura per flessione (Mpa)	0,650	0,340
Sforzo compressione 40% def (Mpa)	0,350	0,250
Conducibilità (W/mk)	0,0282	0,0367

**Tabella 5.5: Confronto delle proprietà di isolamento fra vari campioni.**

Sono quindi stati individuati molteplici potenziali settori di impiego per il poliuretano riciclato:

- automobile: a complemento del poliuretano riciclato già utilizzato;
- edilizia:
  - controsoffitti;

- superfici di rivestimento;
- lapidei naturali;
- pannelli isolanti;
- nautica: riempitivo degli scafi;
- arredamento per interni:
  - pannelli divisori;
  - riempitivo per tapparelle;
- pavimentazioni.

In tutti i casi citati, per poter immettere il poliuretano nel processo produttivo è tuttavia indispensabile la sua trasformazione da rifiuto a prodotto, in modo da poter essere lavorato da aziende tipicamente non autorizzate alla gestione di rifiuti. In mancanza di questa ri-classificazione i molteplici sbocchi teoricamente possibili diventerebbero nella pratica non implementabili.

Per portare a termine quanto cominciato è quindi necessaria una specifica normativa, che potrebbe assumere una delle seguenti forme:

- regolamento europeo: la Commissione Europea sta in questi anni procedendo alla redazione di una serie di regolamenti (che non necessitano di trasposizione in normativa nazionale) per la definizione delle caratteristiche minime che un rifiuto deve avere per poter essere trasformato in materia nonché delle verifiche necessarie. E' per esempio già stato emesso il regolamento 333 relativo alla classificazione come prodotto dei rifiuti metallici e sono in via di emanazione analoghi regolamenti nel campo del riciclo della carta e del vetro;
- decreto italiano: emanazione di uno specifico decreto che definisca le caratteristiche minime del rifiuto per essere catalogato come materia. Nonostante tale modalità venga individuata come strumento principe dal D.Lgs. 205/10, ad oggi il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare non ha mai emanato decreti in merito.

Per poter stendere un testo di decreto potrebbe essere utile approfondire possibili punti di contatto fra le caratteristiche fisiche del poliuretano riciclato e norme UNI già esistenti.

- linee guida a livello regionale: analogamente a quanto già fatto dall'ARPAV (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale Veneto) per il vetro proveniente dalla lavorazione dei tubi catodici, potrebbero essere stilare relazioni tecniche contenenti parametri oggettivi. La presente relazione tecnica ha lo scopo di definire parametri oggettivi per definire l'avvenuta bonifica e trattamento del poliuretano con lo scopo del successivo avvio alla valorizzazione in settori industriali quali sostitutivi di materie prime vergini.

- autorizzazione alla gestione per impianti di trattamento: inserimento nelle autorizzazioni alla gestione e al trattamento di rifiuti degli impianti che lavorano i RAEE della possibilità di esitare il poliuretano come materia. Tale facoltà dovrebbe essere accompagnata, a discrezione dell'autorità che emana l'autorizzazione, da una serie di limiti che il materiale dovrebbe avere e da una serie di controlli in merito.

## Bibliografia

1. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). *Rapporto rifiuti 2012* (2012).
2. Centro di Coordinamento RAEE (CDC RAEE). *Rapporto Annuale 2012* (2012).
3. Centro di Coordinamento RAEE (CDC RAEE) – Associazione Nazionale Comuni Italiani (ANCI). *Accordo di programma per la definizione delle condizioni generali di raccolta dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche* (2012).
4. Centro di Coordinamento RAEE (CDC RAEE) – Associazione Nazionale Comuni Italiani (ANCI) – *Organizzazioni nazionali di categoria della distribuzione. Accordo di programma per la raccolta e la gestione dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche* (2012).
5. Centro di Coordinamento RAEE (CDC RAEE) – ASSORAE - Associazione Recuperatori Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche. *ACCORDO relativo al trattamento dei RAEE e alla qualificazione delle aziende di recupero dei RAEE* (2008).
6. WEEE FORUM. *Key Figures* (2012).
7. WEEE FORUM. *Weee Labex Standard*.
8. Agenzia Nazionale per la Protezione dell’Ambiente (ANPA). *Linee guida e criteri di valutazione dei parametri di efficacia ambientale delle attività di recupero dei beni durevoli dismessi* (1998).
9. E. Cagno, E. Di Giulio, F. Magalini, L. Tardini, P. Trucco. *Recupero e trattamento dei RAEE: sfide per un nascente settore industriale* (2004).
10. Ecodom. *I RAEE domestici generati in Italia. Analisi su volumi, tipologie ed abitudini di dismissione dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche* (2012).
11. F. Andreola, L. Barbieri, A. Corradi, M. Garzoni, E. Guidetti, I. Lancellotti, A. Medici, D. Rabitti, A. Sansone “Smalti per piastrelle dal vetro di TV e monitor”, *Recycling* 8[4] (2004) 85-89.
12. F. Andreola, L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti, R. Falcone, S. Hreglich “Glass-ceramics obtained by the recycling of end of life cathode ray tubes glasses”, *Waste Manage.* 25 (2005) 183-189.
13. F. Andreola, L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti “Cathode Ray Tube glass recycling: an example of clean technology”, *Wast. Manag. Res.*, in press.

14. F. Andreola, L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti “New marketable products from inorganic residues” *Am. Ceram. Soc. Bull.* 83[3] (2004) 9401-9408, ISSN 002-7812.
15. Fleischmann M., Bloemhof J., Dekker R., Van der Laan E., Van Nunen J., Van Wassenhoven L. Quantitative models for reverse logistics: a review (1997). *European Journal of Operational Research* 103,1-17.
16. Fleischmann M., Krikke H. R., Dekker R., Flapper S.D.P. A characterisation of logistics network for product recovery (2000). *Omega* 28, 653-666.
17. Future Energy Solutions (FES). Study into European WEEE schemes (2003).
18. Giannelli A. Il trattamento dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) verso una piattaforma ecologica. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Udine (A.A. 2002-2003).
19. Menad N. Cathode ray tube recycling (1999). *Resources, Conservation and Recycling* 26, 143-154.
20. Mosca A. Lo smaltimento dei componenti elettrici ed elettronici obsoleti: aspetti normativi e tecnologici. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Torino (A.A. 2001-2002).
21. Silicon Valley Toxics Coalition. Poison PCs and toxic TVs: California’s biggest environmental crisis that you’ve never heard of (1999).
22. Mark Bomberg. Spray Polyurethane Foam in External Envelopes of Building (1998).
23. Peter Kjeldsen e Morten Hjorth Jensen. Release of CFC from Disposal of Polyurethane foam waste. *Environmental Science & Technology Volume: 35 Issue: 14 (2001) Page: 3055-0*

## **Riferimenti legislativi**

### **Normativa europea**

1. Direttiva 2008/98/CE del 19/11/2008. *Gazzetta Ufficiale Unione Europea n. L 312 del 22/11/2008.*
2. Direttiva 2002/96/CE del 27/01/2003. *Gazzetta Ufficiale Unione Europea n. L 037 del 13/02/2003.*

3. Direttiva 2002/95/CE del 27/01/2003. *Gazzetta Ufficiale Unione Europea n. L 037 del 13/02/2003.*
4. Direttiva 2012/19/CE del 04/07/2012. *Gazzetta Ufficiale Unione Europea n. L 197 del 24/07/2012.*
5. Direttiva 94/62/CE del 20/12/2004. *Gazzetta Ufficiale Unione Europea n. L 365 del 31/12/1994.*

### **Normativa italiana**

1. Decreto Legislativo del 05 febbraio 1997, n. 22. *Gazzetta Ufficiale n. 38 del 15/02/1997.*
2. Decreto Ministeriale del 05/02/1998. *Gazzetta Ufficiale n. 88 del 16/04/1998.*
3. Decreto Ministeriale del 20/09/2002. *Gazzetta Ufficiale n. 230 del 01/10/2002.*
4. Decreto Legislativo del 24/03/2006, n. 152. *Gazzetta Ufficiale n. 97 del 27/04/2006.*
5. Decreto Legislativo del 15/07/2005, n. 151. *Gazzetta Ufficiale n. 175 del 29/07/2005.*
6. Decreto Ministeriale del 25/09/2007, n.185. *Gazzetta Ufficiale n. 257 del 05/11/2007.*
7. Decreto Ministeriale del 08/03/2010, n.65. *Gazzetta Ufficiale n. 65 del 19/03/2010.*
8. Decreto Legislativo del 13/01/2003, n.36. *Gazzetta Ufficiale n. 59 del 12/03/2003.*
9. Decreto del Presidente della Repubblica del 24/05/1988 n. 216. *Gazzetta Ufficiale n.143 del 20/06/1988.*
10. Decreto Legislativo del 03/12/2010, n. 205. *Gazzetta Ufficiale n. 288 del 10/12/2010.*