



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto
a.a. 2022-23
Anno I – Semestre I



Tecnologia dei materiali polimerici

Lezione 34

- Prof. **Lisa Biasetto**
- E-mail: lisa.biasetto@unipd.it



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto

a.a. 2022-23

Anno I – Semestre I



❖ **Tecnologie di Riciclo**

CARATTERISTICHE E LAVORABILITÀ DELLA MATERIA PRIMA-SECONDA

Data la varietà delle materie plastiche, è impossibile definire uno standard qualitativo in grado di descrivere in modo omogeneo le diverse materie prime-seconde ottenibili da riciclo. In linea generale si può affermare che il processo di riciclaggio riguarda soprattutto i materiali termoplastici e che, tra questi, alcuni polimeri presentano caratteristiche prestazionali migliori di altri una volta reimpiegati, come nel caso delle poliolefine o del PET. Il successo del processo di riciclo e la conseguente qualità dei prodotti ottenuti dipende in larga parte dalla selezione operata in fase di recupero sul materiale raccolto. Prima di essere avviate al riciclo le plastiche devono essere sia separate da sostanze contaminanti (metalli, carta o altri materiali che costituivano il prodotto giunto a fine vita), sia divise per famiglie, a seconda della composizione chimica e delle proprietà tecniche. Dopo la fase di riciclaggio, dalla plastica recuperata si ottiene un granulare dalle diverse matrici polimeriche, che, spesso miscelato a materia prima vergine, può essere impiegato con prestazioni leggermente inferiori (ma in qualche caso pressochè equivalenti) a quelle delle materie prime vergini.



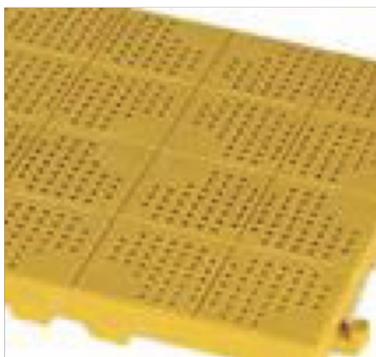
Granuli di HDPE riciclati



Granuli di LDPE riciclati

PRINCIPALI APPLICAZIONI

- teli, tubi e imballaggi per il settore agricolo
- casseri a perdere, tubature, pavimentazioni, isolanti per l'edilizia
- scocche per prodotti elettrici ed elettronici
- componenti per auto-articoli casalinghi (vasi, accessori, cestini)
- arredi per interni ed esterni (tavoli, sedie, panchine)
- arredo urbano (cordoli, bacheche, recinzioni, parchi giochi)
- imballaggi non alimentari
- abbigliamento e tessile per la casa



IL RICICLO MECCANICO

Il riciclo meccanico, rappresenta una delle possibile vie di valorizzazione dei polimeri termoplastici. Il ricorso al riciclo meccanico come possibile via di valorizzazione implica che il materiale da trattare risponda a **minimi requisiti di lavorabilità**. Il riciclo meccanico consiste fundamentalmente nella rilavorazione meccanica della plastica dismessa come rifiuto che diventa materia prima-seconda per la produzione di nuovi manufatti. E' quindi chiaro che il successo del riciclo meccanico e di conseguenza la **qualità** dei prodotti ottenuti sarà **funzione della selezione operata sul prodotto di riciclo**. Non a caso i continui sforzi dell'industria del settore sono proprio orientati verso il miglioramento delle tecniche di selezione dei materiali di riciclo. Questo con particolare riferimento ai prodotti post-consumo al fine di ottenere frazioni sempre più "pulite" di materiali omogenei. D'altra parte il riciclo meccanico degli sfridi di lavorazione, ovvero dei termoplastici provenienti dal circuito industriale, è una attività consolidata da tempo. A seconda della tipologia di rifiuto plastico recuperato, e avviato al processo di riciclo meccanico, si possono ottenere:

-**dai polimeri termoplastici macinati**, granuli o scaglie da utilizzare nella produzione di nuovi manufatti;

-**dai polimeri termoindurenti macinati**, delle frazioni di materiale utilizzabili come cariche inerti nella lavorazione di polimeri termoindurenti/termoplastici vergini, o riempitivi per altri prodotti poichè non possono essere rilavorati essendo infusibili.

Riciclo Meccanico Secondario

1. RACCOLTA

Tutte le attività di recupero dei materiali prendono inizio con la fase di raccolta. Questa avviene secondo una differenziazione del sistema in atto: -raccolta differenziata per tipologia di prodotto; -raccolta multimateriale per due o più tipologie di prodotto; -raccolta indifferenziata di tutte le frazioni di rifiuti.

Sulla base del tipo di raccolta perseguita è già possibile ottenere una buona qualità del prodotto recuperato da avviare al riciclo.

2. SELEZIONE

La selezione degli imballaggi in plastica provenienti dalla raccolta urbana (bottiglie, flaconi e altri imballaggi in plastica) può essere eseguita **meccanicamente o manualmente** in base alla tipologia dell'impianto. L'attività di selezione permette di eliminare eventuali **frazioni estranee**, ovvero vetro, carta, alluminio, dagli imballaggi in plastica e di suddividere quest'ultimi secondo la tipologia del polimero.

IL RICICLO ETEROGENEO

Il riciclo eterogeneo viene effettuato attraverso la lavorazione di un materiale misto contenente **PE , PP, PS, PVC** (film in PE alta e bassa densità, film in PP, taniche, vaschette, big bags, barattoli, reggette e retine). Nel materiale eterogeneo possono essere presenti, anche se in quantità minime, inerti, altri imballaggi, metalli. In questo processo vi è una **prima separazione morfologica e dimensionale** seguita da una **magnetica** per separare eventuali **frazioni estranee** che potrebbero creare problemi in fase di lavorazione. Queste separazioni vengono eseguite in base alla lavorazione e al prodotto che si vuole realizzare.

Successivamente il riciclo procede secondo **tre fasi**:

- **Triturazione, frantumazione grossolana del materiale**
- **Densificazione**
- **Estrusione**

In base alla lavorazione e al prodotto che si vuole ottenere, si potranno eseguire tutte le fasi o solamente in parte: ad esempio si potrà tritare il materiale e successivamente densificarlo oppure, una volta tritato il materiale può essere direttamente estruso.

Le difficoltà presenti nel riciclo eterogeneo sono legate alle **differenti temperature di lavorazione dei polimeri miscelati**. Questo problema esclude la possibilità d'impiego di plastiche eterogenee per la realizzazione di prodotti di forma complessa e che presentano spessori minimi. Il nuovo materiale ottenuto presenta però discrete proprietà meccaniche ed estetiche risultando quindi particolarmente idoneo ad applicazioni nell' **arredo urbano, pavimentazioni da esterni e manufatti per l'edilizia**.

Durante l' operazione di riciclo:

- si **producono direttamente gli oggetti finiti**, quando non sarebbe economico pellettizzare e successivamente lavorare nuovamente. Date le **limitate proprietà meccaniche**, in genere si producono **oggetti di grandi dimensioni** che non sono soggetti a sforzi particolarmente intensi durante l'utilizzo (es. vasi, aiuole, steccati...)
- Le macchine devono lavorare in modo tale da fondere tutti i polimeri (alta temperatura) con tempi di permanenza breve per minimizzare la degradazione termica (estrusori con basso rapporto L/D) e devono essere in grado di miscelare efficacemente i polimeri (elevato sforzo di taglio)

IL RICICLO OMOGENEO

Nel riciclo omogeneo di polimeri termoplastici il riciclatore dovrà accertarsi che nel polimero da trattare non siano presenti altri polimeri, materiali inerti, cariche o additivi in quantità tale da pregiudicare la processabilità.

Successivamente alla fase di raccolta, e separazione da altri materiali, la plastica viene accuratamente selezionata per tipologia di polimero.

Le metodologie **di separazione** che si possono effettuare sono diverse:

- Separazione magnetica
- Separazione per densità
- Separazione per proprietà aerodinamiche
- Separazione elettrostatica
- Separazione per flottazione
- Galleggiamento
- Setaccio tramite soffio d'aria

Va sottolineato che l'importanza delle varie operazioni cambia notevolmente al cambiare dei manufatti da riciclare. Non tutti i processi di riciclo sono composti dalle stesse unità fondamentali, così come non tutte le operazioni di riciclo richiedono la presenza di tutte le apparecchiature.

Raccolta dei Rifiuti Solidi Urbani

Le materie plastiche costituiscono solo una parte minore dei Rifiuti Solidi Urbani. Il loro recupero richiede, per prima cosa, la loro separazione dagli altri componenti e a questo scopo sono disponibili numerosi processi sperimentali e industriali.

Molti degli impianti esistenti constano di due stadi principali:

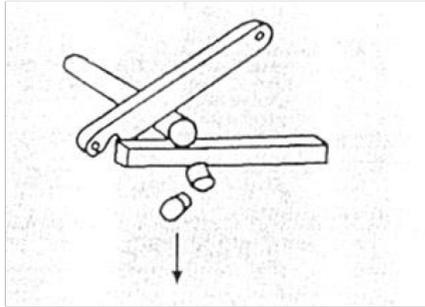
a) Preparazione dei rifiuti b) Separazione

A. Preparazione dei rifiuti

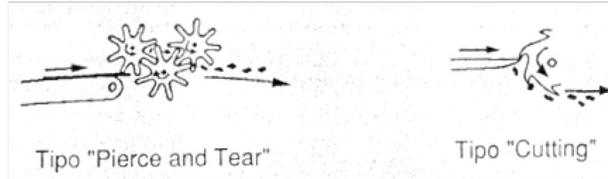
La miscela eterogenea iniziale viene trasformata in una miscela costituita da **particelle di dimensioni uniformi**, in maniera da rendere possibile la separazione dei vari componenti mediante le tecnologie note. In particolare, nei casi in cui è importante la dimensione delle particelle finali, ad esempio nella preparazione del combustibile derivato da rifiuti indicato nella letteratura anglosassone come RDF (refuse derived fuel), si può controllare l'insieme di queste operazioni in maniera da ottenere le dimensioni volute. La riduzione della dimensione dei rifiuti viene solitamente effettuata per macinazione applicando forze meccaniche di tensione, compressione e taglio, mediante l'uso di frantumatori, cesoie, schiacciatori, frese, mulini a raspe, polverizzatori a tamburo, a mulino e a dischi, spappolatori e trituratori a martelli.

Possono venire usati vari tipi di **frantumatori**: a mascelle, a cilindri, ad urto e rotativi.

Questo tipo di macinatori viene in genere usato per **materiali fragili**.

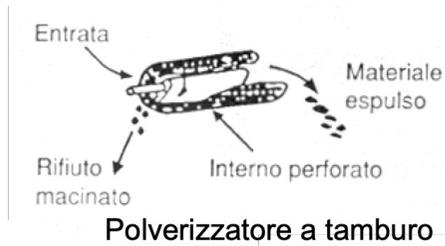


Cesoie ad una sola lama

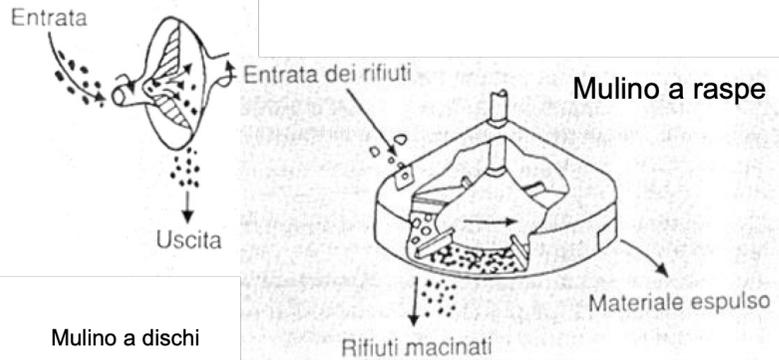


Frese e scriccatori

Le **cesoie** ad una sola lama, vengono in genere usate per rifiuti voluminosi. Le frese e gli scriccatori utilizzano sia forze dovute al carico, sia forze di taglio. Il «Pierce and tear type» viene usato per la macinatura di materiali fibrosi e duttili. Le **frese** in realtà non vengono usate per la macinatura dei RSU a causa della facilità di danneggiamento delle loro lame. I **mulini** a raspe, *così* come i polverizzatori a tamburo, si basano su forze di carico, compressione e forze di taglio.

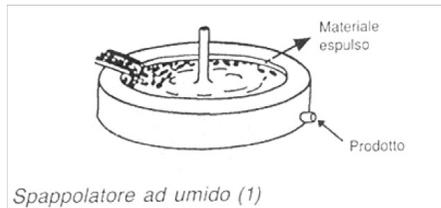


Polverizzatore a tamburo

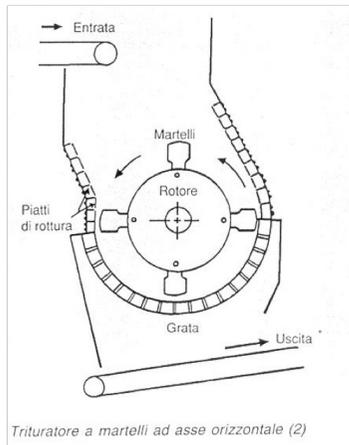


Mulino a dischi

Il mulino a dischi è costituito da un singolo disco ruotante, poggiante su una superficie fissa, oppure da due dischi che ruotano contemporaneamente, ma in senso opposto. Può essere usato per materiali di piccole dimensioni.



Spappolatore ad umido (1)



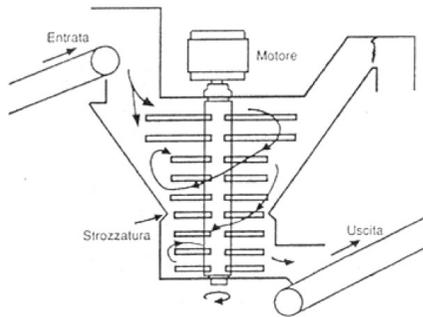
Trituratore a martelli ad asse orizzontale (2)

Agendo sulla velocità di passaggio dei rifiuti nella gola della macchina, si può determinare il grado di sminuzzamento rendendo così la macchina più idonea al trattamento del rifiuto grezzo. I trituratori ad asse verticale consentono inoltre, un più agevole passaggio ai materiali **tessili e plastici**.

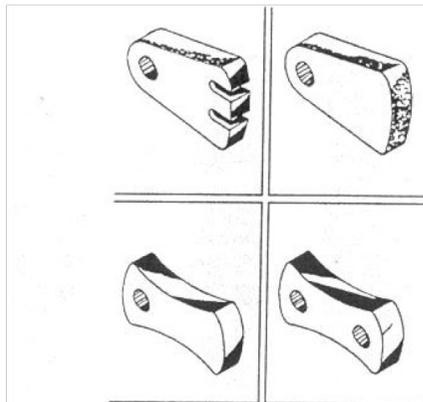
Lo **spappolatore ad umido** è simile al mulino a dischi: i rifiuti vengono mescolati con acqua e poi introdotti nel pulper dove vengono macinati da una lama segmentata rotante. Il materiale macinato viene spinto e raccolto all'esterno. I **trituratori a martelli** sono stati i primi a essere usati per la lavorazione dei RSU allo stato grezzo. L'effetto di triturazione è determinato dall'azione d'urto combinata con quella di attrito dei martelli rotanti ad alta velocità. Esistono 2 tipi di trituratori a martelli:

- a. ad asse orizzontale con grata inferiore di passaggio obbligato;
- b. ad asse verticale, con un'ulteriore distinzione a seconda che i martelli siano oscillanti o rigidamente vincolati all'asse.

Le dimensioni dei fori della grata (**vaglio**) controllano le dimensioni delle particelle prodotte. I trituratori verticali costituiscono un apprezzabile progresso rispetto a quelli orizzontali in quanto consentono un cammino del rifiuto dall'alto verso il basso, con triturazione progressiva durante il passaggio nella gola della macchina..

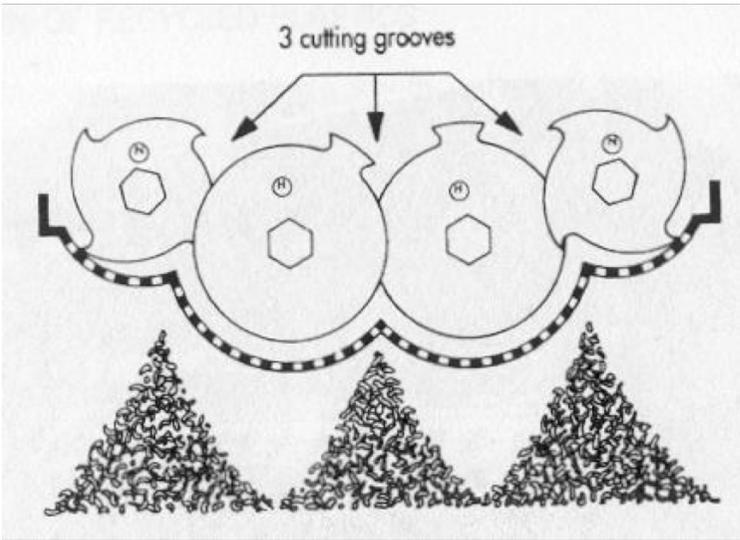
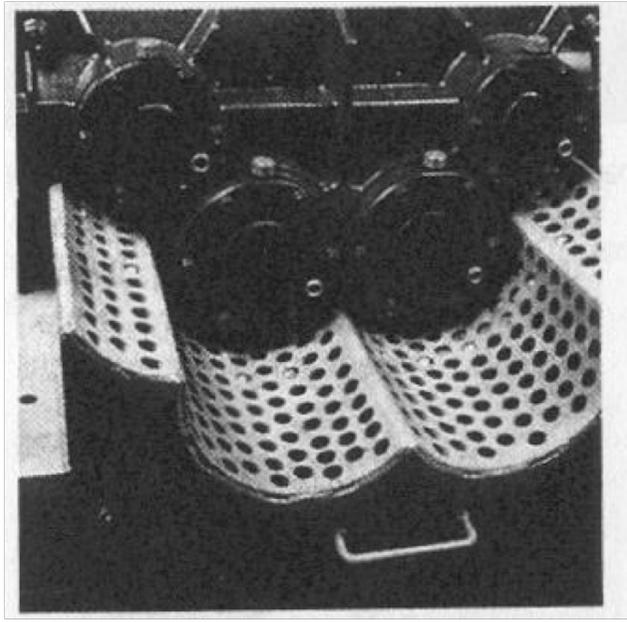
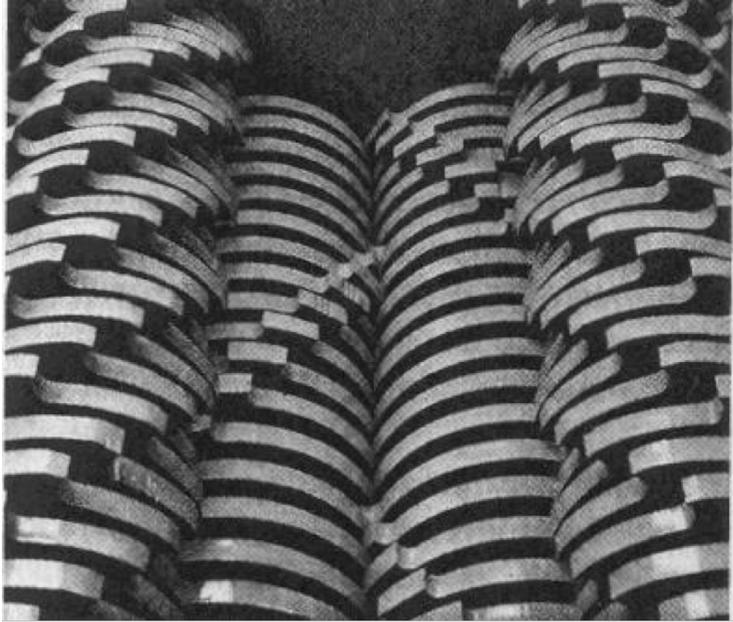


Trituratore a martelli ad asse verticale (2)



Forme usuali dei martelli trituratori (4)

Un problema della gestione dei trituratori del rifiuto grezzo è costituito dal **rischio di esplosione**. Molte esplosioni sono determinate da rapide reazioni di combustione causate da scintille d'attrito che innescano la combustione di aerosol e vapori di sostanze altamente infiammabili che scaturiscono dal rifiuto (vapori di solventi, vernici ecc.). A queste combustioni iniziali può seguire la combustione delle particelle più fini in sospensione e il verificarsi di una esplosione ibrida gas-polvere, per innescare la quale è necessario un quantitativo minimo di gas. La **prevenzione** del rischio di esplosione può essere ottenuta con la realizzazione di **atmosfera inerti** all'interno dei trituratori e con l'installazione di **rivelatori** di vapori infiammabili nell'alimentazione. Tra i metodi di controllo dell'atmosfera entro la cavità del trituratore sono state sperimentate con buon successo **iniezioni di acqua** in modo da creare una «nebbia» che tenda a sopprimere le esplosioni. Tra gli agenti soppressivi, oltre all'acqua sono utilizzati: vapore, gas inerti (anidride carbonica, azoto) e sostanze chimiche quali sodio carbonato, ammonio fosfato ed idrocarburi alogenati.



B. Separazione

I metodi usati per separare i componenti dei rifiuti solidi si basano su differenze di **proprietà fisiche** dei materiali quali ad esempio: densità, elettromagnetismo, colore.....

1. Separazione a mano: è di poca importanza in impianti di separazione moderni che trattano rifiuti solidi di varia provenienza e si serve in genere di un nastro trasportatore, in maniera da facilitare la selezione. Il metodo viene invece usato per la selezione di frazioni provenienti da raccolte differenziate come ad esempio le bottiglie di materia plastica.

2. Separazione per gravità: allo scopo possono essere usati tavoli vibranti, separatori balistici, nastri trasportatori inclinati e separatori a letto fluido.

3. Classificazione ad aria: si tratta della tecnica più usata per la separazione dei rifiuti solidi. I separatori di questo tipo sfruttano un flusso d'aria per separare il materiale in due frazioni: la frazione leggera trasportata dall'aria e poi da questa separata in camere di calma o più usualmente in cicloni e la frazione pesante, non trasportata dall'aria, che resta sul fondo dei separatori. I parametri su cui si basa la classificazione ad aria sono: dimensioni delle particelle, peso specifico e forma. L'**efficienza** del processo è governata da vari fattori.

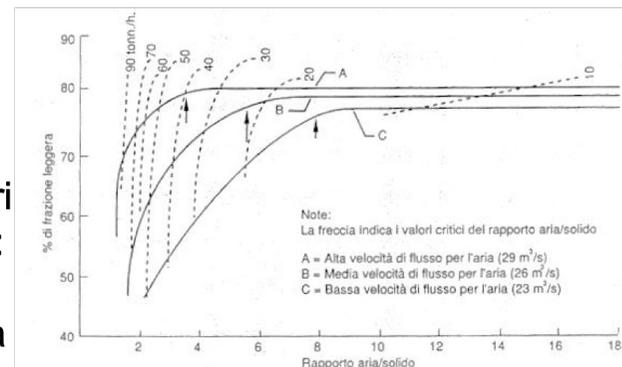


Fig. 2.11 Influenza del rapporto aria/solido sull'efficienza di separazione della frazione leggera (5)

Il primo è dato dal **rapporto aria/solidi**, in particolare per rapporti al di sopra di un valore critico, l'efficienza si mantiene costante, mentre crolla al di sotto di questo punto a causa dell'agglomerazione delle particelle solide tra loro.

Un altro fattore importante è costituito dall'**umidità** che agisce negativamente in quanto fa aumentare la densità delle frazioni leggere e la coesione delle particelle leggere con quelle più pesanti. L'aumento dell'efficienza può essere ottenuto usando più colonne con differenti geometrie e differenti velocità di flusso.

La scelta di un sistema specifico va fatta in base al tipo di alimentazione e al grado di separazione desiderato. I classificatori ad aria a **flusso verticale a zig-zag** (i più conosciuti) sono costruiti in modo da aumentare la turbolenza del flusso per rompere eventuali grumi o coesioni tra inerti e frazione leggera. I classificatori orizzontali consentono anche la separazione in più flussi.

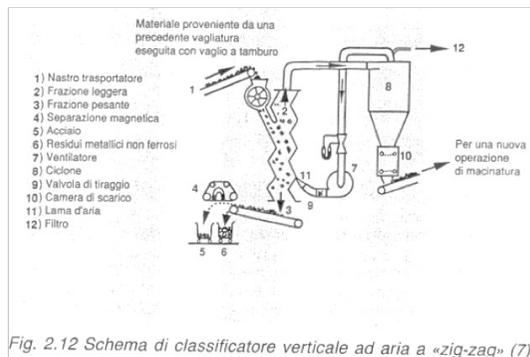
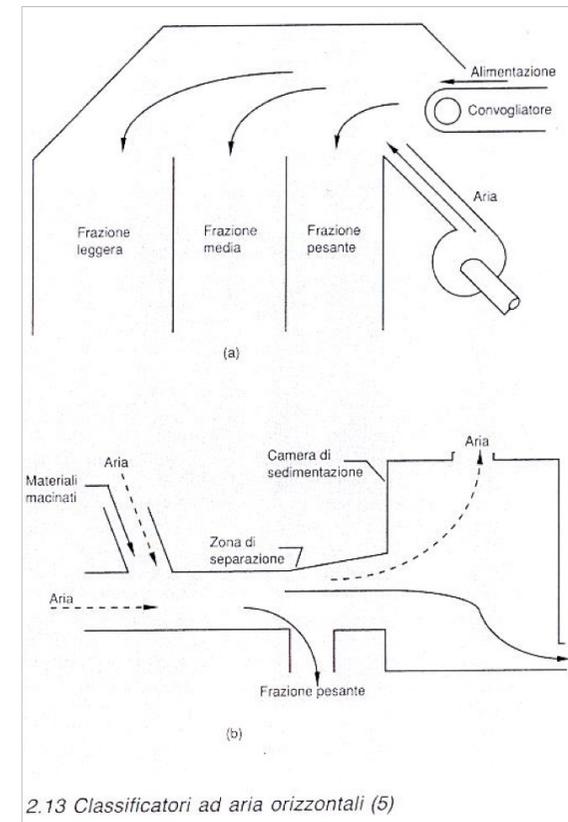


Fig. 2.12 Schema di classificatore verticale ad aria a «zig-zag» (7)



2.13 Classificatori ad aria orizzontali (5)

4. Separazione magnetica

Viene usata per la rimozione dei materiali ferrosi. Esistono fondamentalmente due tipi di apparecchiature. Il primo consiste in un tamburo rotante al cui interno sono installati i magneti, posizionato sopra la puleggia di un nastro trasportatore: i metalli ferrosi sulla superficie del flusso di materiale vengono così sollevati e poi scaricati su altro nastro. Non vengono però attratte le piccole parti in ferro giacenti sotto il materiale non magnetico, nè i pezzi solo in parte ferrosi. Il secondo tipo è costituito da un nastro trasportatore magnetico che impiega magneti multipli, posti sotto un breve nastro trasportatore. Il nastro trasportatore magnetico può anche essere sospeso al di sopra del nastro che trasporta i rifiuti.

5. Separazione elettromagnetica

Si basano sul principio dell'induzione elettromagnetica.

Utilizzando campi magnetici modulati, si generano delle correnti all'interno delle particelle di metallo che, interagendo con il campo magnetico esterno, causano la deflessione delle particelle fuori dal separatore.

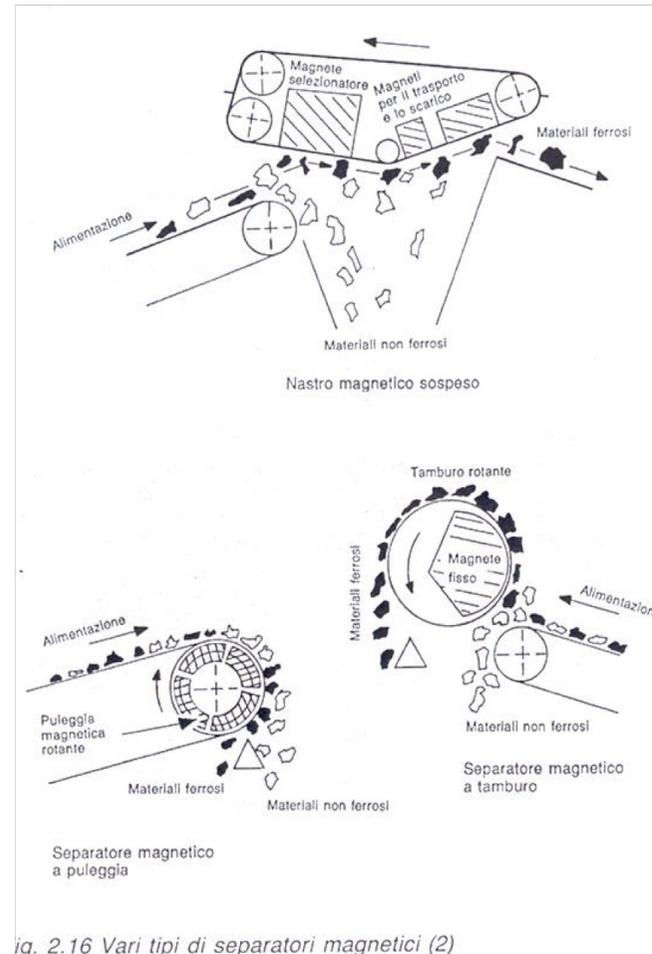


fig. 2.16 Vari tipi di separatori magnetici (2)

6. Separazione elettrostatica

Il metodo utilizza campi elettrostatici ad alto voltaggio e si basa sulla capacità di materiali come la carta e le materie plastiche di acquisire una certa carica elettrostatica. Le particelle vengono attratte da un rullo o da un nastro muniti di cariche, oppure vengono deflesse in un campo elettrostatico, mentre i conduttori, dissipata la loro carica elettrostatica, si staccano dal rullo.

7. Separazione inerziale

I separatori inerziali sono macchine piuttosto semplici che si fondano sul principio secondo il quale particelle differenti per caratteristiche fisiche e chimiche percorrono traiettorie differenti quando vengano lanciate ad alta velocità da un rotore. In un primo separatore "balistico" il materiale da separare viene trasportato da un nastro fino al rotore di lancio; il materiale lanciato viene raccolto in tramogge poste a varia distanza dal rotore.

Le particelle più leggere si depositeranno nelle tramogge più vicine al rotore, mentre quelle più pesanti in quelle più lontane. In un secondo tipo, detto "secator", le particelle trasportate dal nastro vengono fatte cadere su una puleggia in rotazione le particelle leggere e anelastiche vengono trascinate nel senso del moto e successivamente fatte cadere in una tramoggia di raccolta. Quelle pesanti o resilienti rimbalzano indietro. La puleggia rotante può essere sostituita da un nastro trasportatore inclinato.

Separazione dei componenti della miscela di materie plastiche recuperata da rifiuti solidi

La separazione dei componenti della miscela delle materie plastiche che si trovano nei rifiuti viene eseguita secondo tre metodi fondamentali che sfruttano proprietà peculiari dei componenti della miscela:

- sistemi che si basano sulle proprietà di **galleggiamento e affondamento** delle diverse materie plastiche in soluzioni acquose a densità controllata;
- sistemi che utilizzano **fenomeni di tensione superficiale** come la flottazione;
- sistemi che utilizzano **l'estrazione con solventi**.

1. Separazione mediante galleggiamento/ affondamento

La miscela di materiali termoplastici contenuta nei rifiuti urbani (Poliiolefine, PVC, e PS) può essere separata usando quattro soluzioni di diversa densità: acqua (densità = 1 kg/litro), acqua/alcol etilico ($d = 0.93$ e $d = 0.91$ kg/litro) e acqua/sodio cloruro ($d = 1,2$ kg/litro). Il processo è una combinazione di galleggiamento/affondamento e di elutriazione.

La miscela macinata viene introdotta nel separatore dove le poliolefine galleggiano e gli altri componenti affondano. La frazione pesante viene poi trasportata nella colonna di elutriazione dove il materiale da trattare viene sottoposto all'azione di una

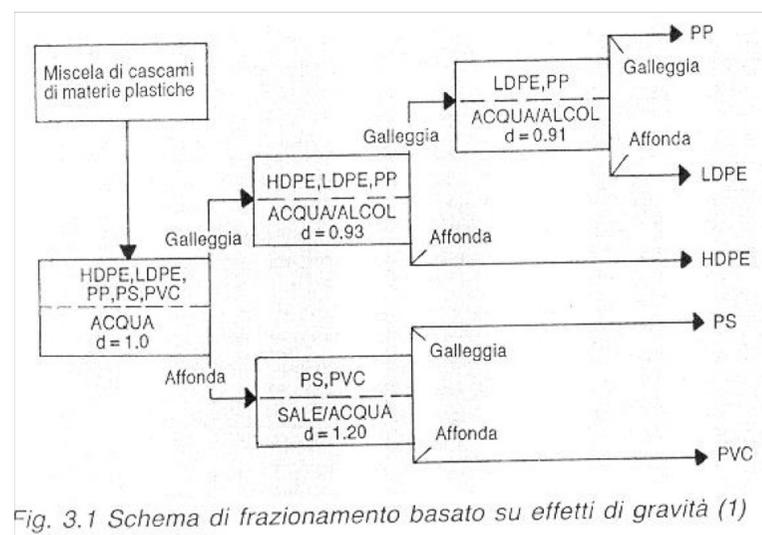


Fig. 3.1 Schema di frazionamento basato su effetti di gravità (1)

corrente ascendente di acqua. Le particelle di PS, la cui velocità di caduta per gravità è inferiore alla velocità del fluido, vengono portate in alto, mentre il PVC finisce sul fondo.

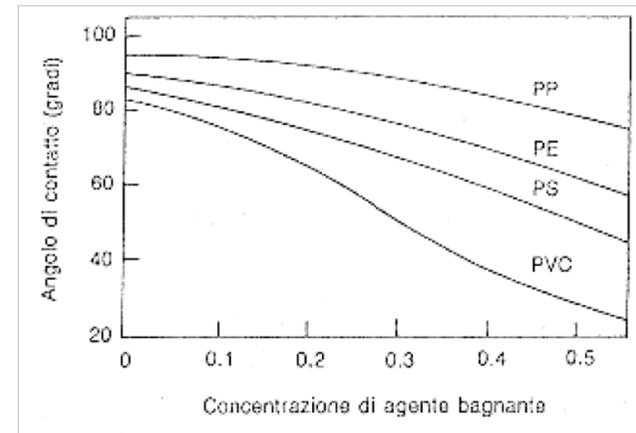
2. Separazione mediante processi che utilizzano differenze di tensione superficiale

Utilizzando tensioattivi particolari è possibile modificare la bagnabilità dei materiali polimerici che può essere misurata determinando il valore dell'angolo di contatto.

A parità di concentrazione dell'agente bagnante, l'angolo di contatto decresce in funzione della sostanza chimica del polimero con un ordine che corrisponde ad una crescente bagnabilità del supporto.

Se si insuffla aria nella sospensione acquosa delle materie plastiche, si ha la formazione di bolle che aderiscono alla superficie del materiale relativamente più idrofobo e lo portano in superficie lasciando andare sul fondo l'altro componente.

Una cella di flottazione per una miscela di materie plastiche deve soddisfare le seguenti condizioni:



Relazione fra l'angolo di contatto e la concentrazione dell'agente bagnante

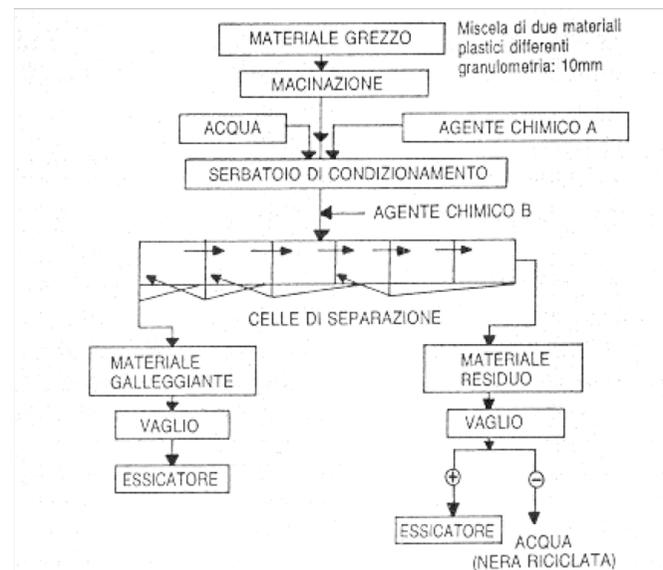


Diagramma di flusso di un processo di flottazione

- Le bolle d'aria della misura necessaria devono essere generate in modo uniforme,
- È necessaria l'agitazione per impedire che le particelle più grandi si depositino sul fondo.
- Nella zona di separazione devono essere assenti moti turbolenti dell'acqua,
- La superficie dell'acqua deve essere liscia e stabile.

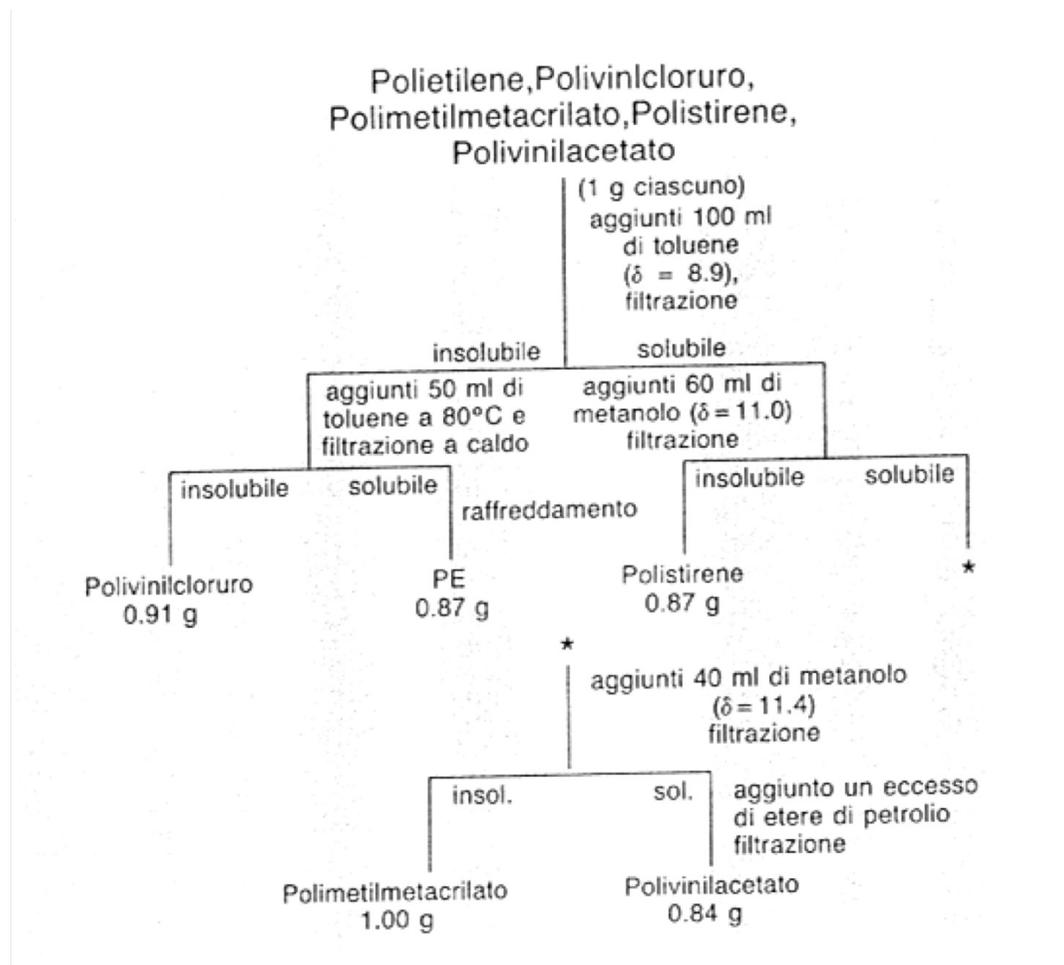
3. Separazione mediante estrazioni con solvente

Polimeri ad alto peso molecolare con differente composizione chimica sono raramente miscibili e, quando vengono miscelati, formano un sistema bifasico. Anche le soluzioni dei polimeri non sono in genere miscibili. Se quindi una miscela di materie plastiche viene disciolta in un solvente, si formeranno più fasi contenenti ciascuna uno solo dei polimeri componenti, con alta purezza.

Sperber e Rosen si sono occupati della separazione dei vari componenti di una miscela contenente poliolefine, PS e PVC, utilizzando come solvente una miscela di cicloesano e xilene. L'efficacia del processo è influenzata dalla composizione del solvente, dalla temperatura, dalla composizione dell'alimentazione e dal rapporto solvente/alimentazione. In totale si hanno tre fasi (Poliolefine, PS, PVC) che possono essere separate con alte rese (circa 99%).

Una variante di questo sistema si basa sull'impiego di solventi selettivi capaci di sciogliere un polimero lasciando inalterati gli altri componenti la miscela.

La scelta dei solventi può essere fatta orientativamente in base ai valori del parametro di solubilità delle sostanze considerate. Miscibilità apprezzabili sono prevedibili se la differenza dei parametri di solubilità è inferiore a 2 unità.



Schema di frazionamento di una miscela di materie plastiche con solventi selettivi

Sequenza delle fasi di riciclo meccanico delle materie plastiche:

- Triturazione
- Lavaggio
- Macinazione
- Esiccamento
- Granulazione



IL RICICLO TERZIARIO (CHIMICO)

Il riciclo chimico è economicamente conveniente solo se eseguito presso industrie chimiche che già possiedono gli impianti adatti per la produzione e la separazione dei prodotti ottenibili, o che possiedono energia a basso costo, cosa che permette di ridurre gli alti costi di investimento. Inoltre, tali processi, possono attualmente essere applicati solo a pochi tipi di materiali (PET, poliuretani, poliammidi, ecc.).

Le catene polimeriche hanno subito l'inevitabile danneggiamento durante il primo ciclo di utilizzo. In generale, non è possibile riparare la catena polimerica una volta che essa è stata danneggiata dall'uso. Quando si affronta il problema delle plastiche riciclate, la situazione viene aggravata da questo fatto.

Per rendere possibile il reimpiego dei materiali polimerici provenienti da post-consumo, vengono oggi studiate e già proposte, formulazioni stabilizzanti specifiche. In alcuni casi, per esempio per il riciclo del PET sono stati studiati con successo degli estensori di catena.

Il riciclo chimico prevede il ritorno alla materia prima di base attraverso la trasformazione delle plastiche usate in monomeri e/o prodotti chimici di base, sostanzialmente idrocarburi, di pari qualità di quelli vergini, da utilizzare nuovamente nella produzione.

I metodi possibili sono tre:

- **la pirolisi**

Prevede la scomposizione delle molecole mediante riscaldamento sotto vuoto o in atmosfera controllata: si ottiene una miscela di idrocarburi liquidi e gassosi simile al petrolio. I processi di cracking vengono sperimentati in reattori di pirolisi a letto fluidizzato.

Mediante una scelta delle condizioni termiche, si possono riottenere cere paraffiniche con pesi molecolari nell'intervallo 300-800 g/mol, in condizioni più drastiche, prodotti chimici di base.

- **l'idrogenazione**

Trattamento a base di idrogeno e calore: i polimeri si degradano e vengono trasformati in idrocarburi liquidi; In una prima fase si realizza la dealogenazione del materiale e l'abbattimento dell'HCl prodotto, seguito dalla idrogenazione vera e propria, che porta ad un prodotto che può essere immesso nel processo di raffinazione del petrolio.

- **la chemiolisi**

Le singole materie dismesse vengono attaccate con processi chimici che le trasformano nelle materie prime di origine.

RECUPERO ENERGETICO

L'incenerimento è un processo di combustione ad alta temperatura principalmente utilizzato per lo smaltimento dei rifiuti solidi urbani. Avviene all'interno di impianti detti **inceneritori**, i più moderni dei quali sono dotati di sistemi per il recupero del calore sviluppato durante la combustione dei rifiuti, che viene poi utilizzato sotto forma di vapore per la produzione di energia elettrica o impiegato come vettore di calore (ad esempio per il teleriscaldamento). Questi impianti con tecnologie per il recupero vengono indicati col nome di inceneritori con recupero energetico, o più comunemente termovalorizzatori.

Occorre precisare che, secondo le attuali teorie sulla corretta gestione dei rifiuti e come ribadiscono le normative europea e italiana (che parlano solo di inceneritori), solo il riuso ed il riciclo possono essere considerati metodi di valorizzazione dei rifiuti, mentre l'incenerimento (anche se con recupero energetico) costituisce un semplice smaltimento ed è preferito alla sola discarica controllata.

Attualmente, gran parte degli inceneritori sono dotati di qualche forma di recupero energetico, ma va rilevato che il rendimento di tali impianti risulta minore di quello di una normale centrale elettrica, poiché non tutti i rifiuti hanno un buon potere calorifico e le temperature raggiunte in camera di combustione, inferiori rispetto a quelle delle centrali tradizionali, producono vapore a minore pressione. Talvolta per aumentare l'efficienza della combustione insieme ai rifiuti viene bruciato anche del gas metano. A titolo di confronto, per la produzione di energia elettrica una moderna centrale termoelettrica a ciclo combinato, il cui scopo primario è ovviamente quello di produrre elettricità, ha una resa del 57%, mentre l'efficienza energetica di un termovalorizzatore è variabile tra il 19 e il 27%.

Quando la generazione di energia elettrica viene abbinata al teleriscaldamento (recupero di calore per la produzione di acqua calda), questi valori aumentano notevolmente, arrivando ad un rendimento energetico totale dell'84% nei termovalorizzatori e dell'87% nelle centrali tradizionali.

Il rifiuto da imballaggio plastico può essere riciclato o sottoposto a termovalorizzazione con recupero energetico. Le plastiche sono un ottimo combustibile, mediamente superiore alla nafta e possono essere bruciate mescolate ai rifiuti solidi urbani (RSU). Gli impianti moderni di combustione dei rifiuti garantiscono il contenimento delle emissioni in atmosfera e la combustione delle plastiche non aumenta le emissioni di sostanze nocive. In molti casi la termovalorizzazione è più conveniente rispetto ad altre modalità di smaltimento, sia economicamente, sia in termini di ecobilancio. **La plastica ha un valore calorifico uguale a quello del carbone e, sebbene in peso costituisca il 12% dei rifiuti urbani, produce più del 50% di tutta l'energia generata durante la loro combustione.**

Il recupero di questa energia ed il suo utilizzo a fini civili e industriali può essere attuato attraverso: la combustione diretta dei rifiuti.

In Europa si bruciano attualmente circa 27 milioni di rifiuti (il 16% del totale), e si produce così energia per riscaldamento e illuminazione. Se nel nostro continente tutti i rifiuti fossero utilizzati per generare energia, si coprirebbe quasi il 4% del fabbisogno europeo di elettricità domestica; tramite Package Derived Fuel (PDF)

Si tratta del combustibile derivato dagli imballaggi contenuti nei RSU e alcuni studi hanno dimostrato che il PDF può sostituire l'equivalente di 14 milioni di tonnellate di combustibile industriale per anno negli impianti che producono energia.

POTERI CALORIFICI A CONFRONTO

Materie plastiche	Poteri calorifici MJ/kg
PA	19,0 -37,0
PMMA	25,1
PE	46,0
PP	46,0
PS	41,0
PC	29,3
PET	33,4
Combustibili	
Carbone	21,0 -32,6
Petrolio	42,0 -46,0
Gas naturale	52,0
Metano	54,0
Altre sostanze	
Legno secco	18,9 -20,6
cellulosa	18,8
Cuoio	16,7
Lana	20,0
Carta, cartone	15,5 -18,5

FUNZIONAMENTO DI UN INCENERITORE

Le materie plastiche, essendo ottimi combustibili, consentono un risparmio di petrolio.

Il funzionamento di un inceneritore con recupero energetico può essere suddiviso in sei sezioni fondamentali che consentono rispettivamente:

1. Preparazione e alimentazione del rifiuto

I rifiuti provenienti dagli impianti di selezione o direttamente dalla raccolta urbana mista vengono immagazzinati in un'area dotata di sistema di aspirazione, per evitare il disperdersi di cattivi odori. Prima di procedere all'incenerimento, i rifiuti possono essere trattati in modo da eliminare tutti i materiali non combustibili (vetro, metalli, inerti) e la frazione umida (scarti alimentari, agricoli, etc.), per diventare così PDF, frazione che può essere "termovalorizzata" producendo energia elettrica con resa nettamente migliore rispetto all'incenerimento classico e con una diminuzione dell'impatto ambientale.

2. Combustione

I forni a griglia sono impiegati prevalentemente nella combustione dei rifiuti solidi. Possono essere a griglia fissa e a griglia mobile. Fra le diverse tipologie di inceneritori, i più diffusi in Italia ed in Europa sono quelli cosiddetti "a griglie mobili", che permettono il continuo movimento dei rifiuti durante la combustione. Il rifiuto viene immesso mediante tramoggia nella parte più alta della griglia, da cui uno spintore lo avvia verso i gradini inferiori. L'ossigeno necessario per la combustione viene inserito nel forno stesso attraverso una corrente d'aria forzata, che contribuisce a mantenere la temperatura intorno e sopra i 1000 °C; qualora il potere calorifico del materiale a disposizione sia troppo basso per mantenere tali temperature, può essere immesso del gas metano, in una quantità variabile fra i 4 e 19 m³ per tonnellata di rifiuti. Gli impianti di questo tipo possono bruciare da 4 a 30 t/h di rifiuti e produrre per ciascuna tonnellata di rifiuti 450 kWh di energia elettrica e, se utilizzabile, 1.000 kWh di calore a bassa temperatura.

La camera di combustione primaria viene spesso associata ad una camera di post-combustione, dove si completano i processi di combustione dei fumi, in modo da eliminare i composti organici nelle emissioni in uscita dall'impianto.

3. Produzione del vapore

Il calore generato dalla combustione di metano e rifiuti viene convogliato nella caldaia, dove l'acqua presente viene trasformata in vapore. Attraversata la camera di post-combustione infatti si svolge la fase cruciale del ciclo energetico: i fumi entrano nella caldaia, dove cedono il proprio calore trasformando acqua in vapore. L'energia contenuta nel vapore può essere utilizzata come energia termica, o energia elettrica impiegabile anche per autoalimentare l'impianto.

4. Produzione di energia elettrica

Il vapore generato mette in movimento una turbina che, accoppiata ad un motoriduttore ed alternatore, trasforma l'energia termica in energia elettrica.

5. Estrazione delle ceneri

Le componenti dei rifiuti non combustibili (circa il 10% del volume totale ed il 30% in peso, rispetto al rifiuto in ingresso) vengono invece convogliate in una vasca piena d'acqua posta a valle dell'ultima griglia, per essere raffreddate. L'acqua impiegata per il raffreddamento (circa 2.5 mc/t) deve essere depurata prima di essere scaricata nell'ambiente. Ovviamente, le frazioni di PDF già separate dagli inerti producono meno scorie dei rifiuti misti. Tutti i residui da inceneritore vengono smaltiti in discariche per rifiuti speciali, anche se, mentre le polveri fini intercettate dai sistemi di filtrazione (circa il 4% del peso del rifiuto in ingresso) vengono considerate rifiuti speciali pericolosi, le ceneri più grossolane sono classificate come rifiuti speciali non pericolosi e sono oggetto di varie sperimentazioni per il riuso delle stesse (in alcuni paesi vengono usate per esempio come materiale per fondi stradali e altri usi civili).

6. Trattamento dei fumi

All'uscita dalla caldaia i fumi raffreddati vengono immessi in un sistema multi-stadio di filtraggio, che consente l'abbattimento delle diverse tipologie di sostanze inquinanti (sia chimiche che solide) e vengono rilasciati in atmosfera a circa 140°C.

RECUPERO DELLE SCORIE DA INCENERITORE

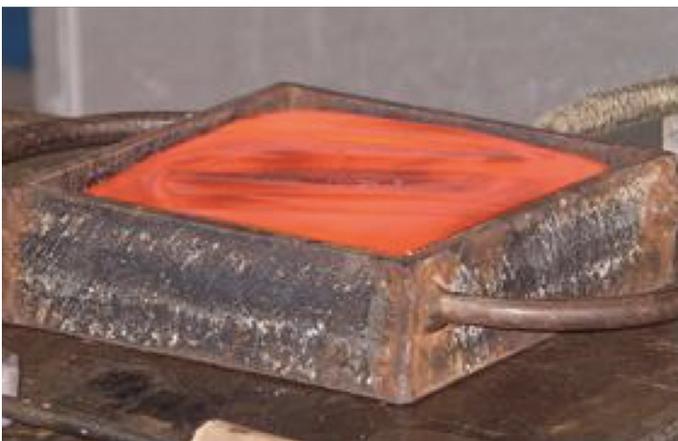
Lo smaltimento in discarica delle scorie da inceneritore costituisce solitamente una grossa voce di spesa, quindi negli ultimi anni si sono avviate numerose sperimentazioni per il recupero di tutti i materiali che, una volta finito il processo, possono essere riciclati (alluminio, altri metalli ferrosi e non ferrosi e materiale destinato alla produzione di calcestruzzo).

Una volta finito il processo all'interno dell'inceneritore, le scorie e le ceneri vengono caricate su un nastro trasportatore; i rottami ferrosi più consistenti sono subito raccolti, quelli più piccoli vengono rimossi poi con un nastro magnetico. Appositi macchinari separano dal resto i rimanenti metalli a-magnetici (prevalentemente alluminio), mentre tutto il resto, miscelato con opportune dosi di acqua, inerti, cemento e additivi, e reso così inerte, va a formare **calcestruzzo** subito adoperato per la produzione di elementi per prefabbricati. Con un trattamento di questo genere, le scorie pesanti passano dal 30 al 3,3% in peso dei rifiuti inceneriti.

Un'altra tecnologia che si sta sperimentando è la **vetrificazione delle ceneri** con l'uso della torcia al plasma, sistema attraverso cui si rendono inerti le ceneri risolvendo il problema dello smaltimento delle stesse come rifiuti speciali. Sono in corso di sperimentazione diversi processi per l'impiego del materiale ottenuto come materia prima per il comparto ceramico e cementizio.

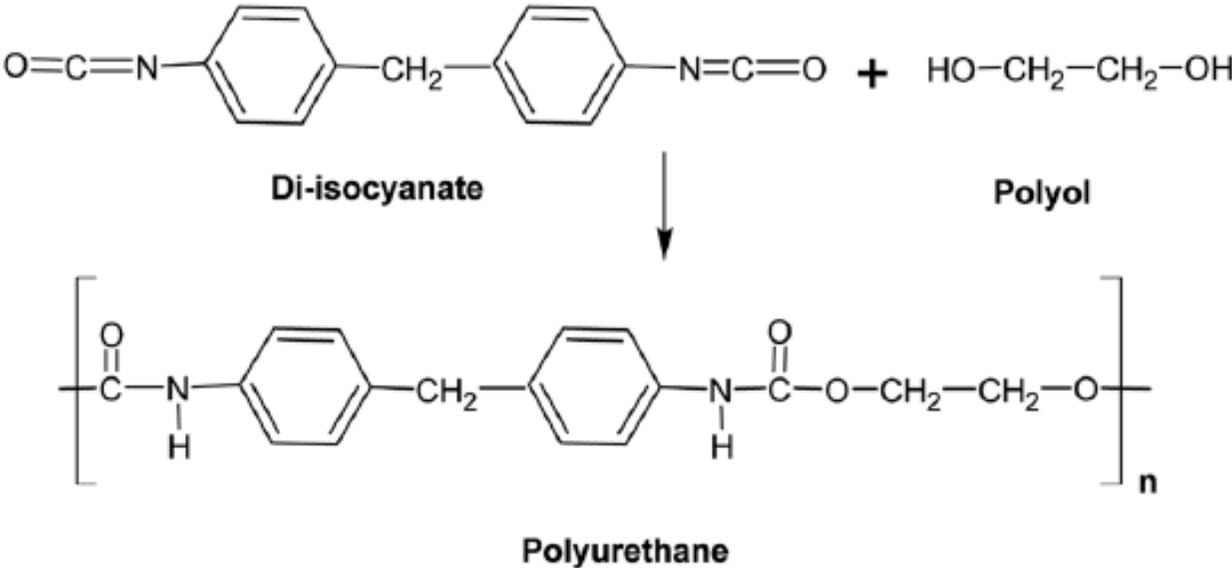


*Produzione di piastrelle a partire
da scorie di inceneritore*

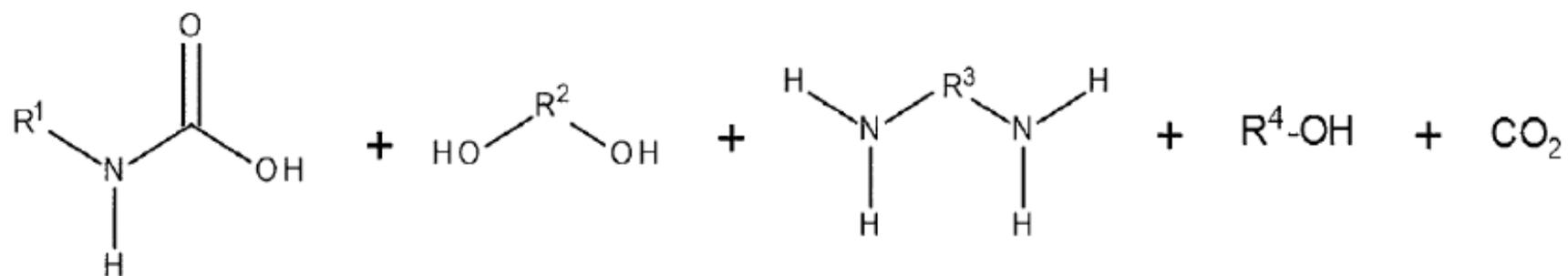
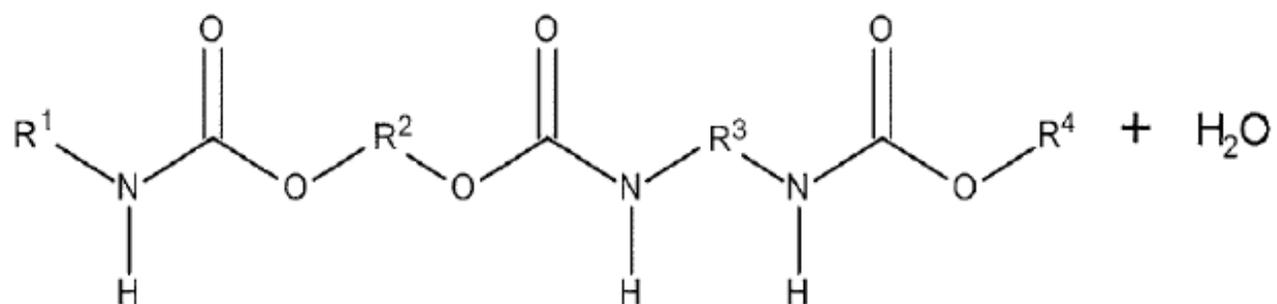


CHEMIOLISI

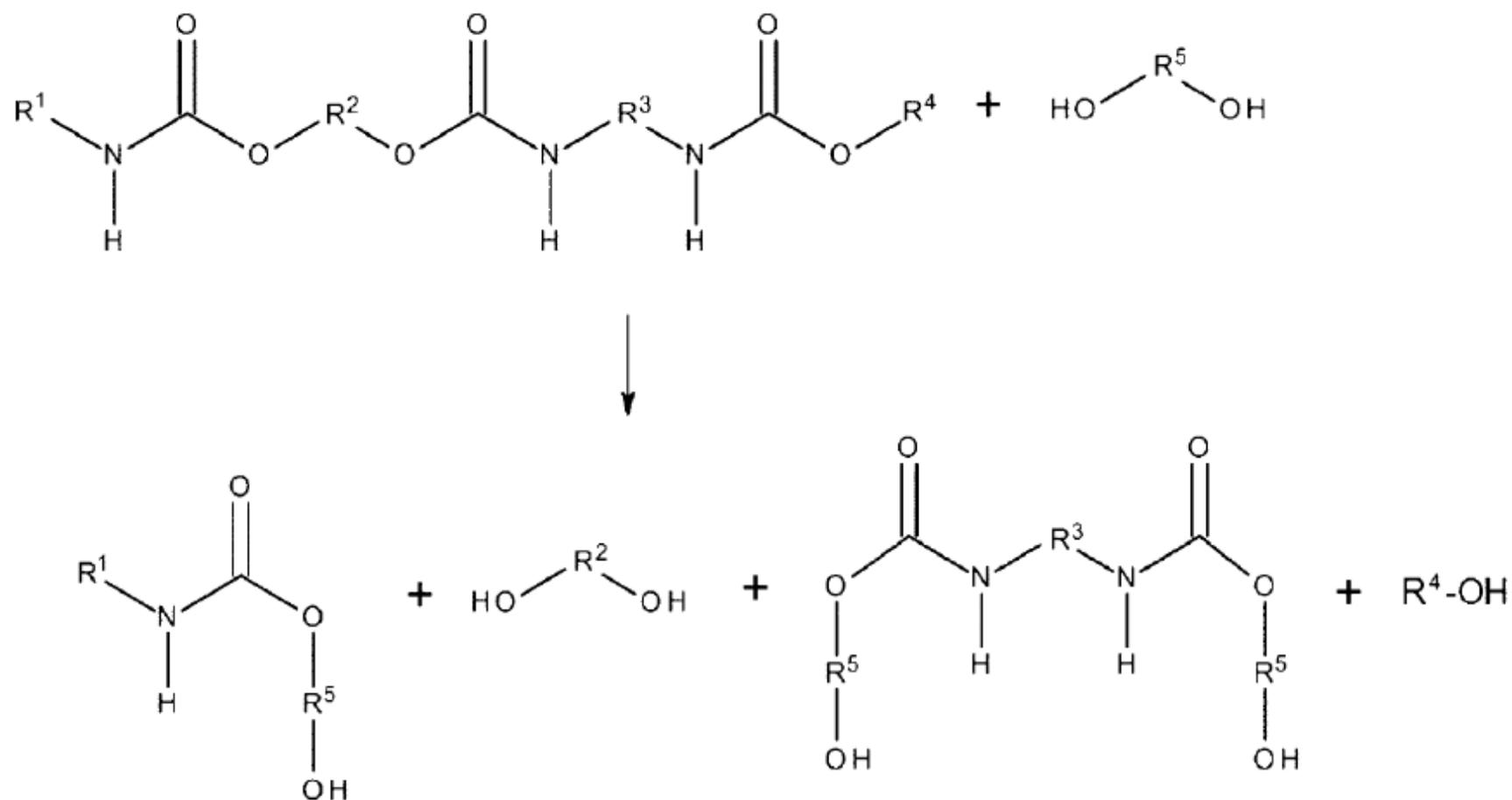
Sintesi del PU



Idrolisi del PU

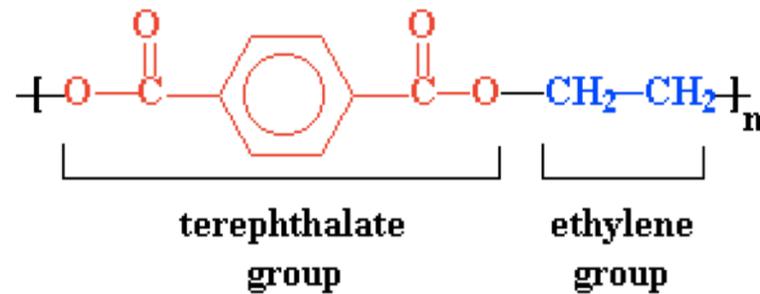


Glicolisi del PU



ESEMPIO IL PET

- riutilizzo del polimero per usi non alimentari mediante operazioni di lavaggio e macinazione;
 - recupero dei monomeri mediante depolimerizzazione per idrolisi, alcolisi e glicolisi, che possono essere utilizzati nella sintesi di nuove resine poliestere;
 - utilizzo del materiale recuperato come combustibile, infatti i polimeri a base di PET producono la stessa quantità di calore del carbone, a parità di peso, e non danno origine a prodotti inquinanti o tossici.
- Il PET derivante da scarti di fibre o film di origine industriale si presenta in genere non contaminato, ma il peso molecolare relativamente basso rende inapplicabile un riciclo. Le bottiglie di PET presentano, invece, il problema di dover separare bottiglie di altro tipo di materiale (per esempio PVC) provenienti dalla stessa raccolta differenziata, tappi e coperchi (in genere in PP, PE, Al), etichette ed adesivi. Le operazioni necessarie ad ottenere un PET di qualità adatte al riciclo prevedono una prima separazione, una successiva triturazione, un lavaggio e diversi stadi di separazione dei contaminanti. La presenza di bottiglie colorate impedisce l'impiego del PET di riciclo in alcuni settori, per cui si deve effettuare anche la separazione delle bottiglie incolore da quelle colorate.



glicolisi:

il prodotto polimerico, o le fibre di scarto, vengono riscaldati con etilen glicole o propilen glicole in autoclave a circa 220 °C. I prodotti che si ottengono possono sostituire in parte, o completamente, l'anidride ftalica o l'acido isoftalico ed una parte del glicole che vengono usati per la produzione di resine poliestere insature convenzionali, a partire da **glicoli, anidride ftalica** o acido isoftalico e **anidride maleica**.

metanolisi:

il materiale di scarto viene riscaldato con metanolo in autoclave a 160°C in presenza di un catalizzatore di transesterificazione. Il **dimetiltereftalato** cristallizza per raffreddamento ed è isolato per filtrazione mentre l'**etilen glicole** che rimane viene separato per distillazione frazionata.

idrolisi:

il materiale di scarto viene riscaldato con acqua in autoclave a circa 230°C. Si ottiene l'**acido tereftalico**, che è insolubile ed è isolato per filtrazione, e l'**etilen glicole**, che rimane in acqua e viene separato mediante distillazione frazionata

RICICLO DEL PET

		<u>PRO</u>	<u>CONTRO</u>
RICICLO CHIMICO	■ Glicolisi	Utilizzabile PET con alto livello di contaminanti I prodotti ottenuti sono identici ai prodotti vergini	Alto costo Il valore aggiunto per la conversione dei monomeri in resina è completamente perso
	■ Metanolisi		
	■ Idrolisi		
RICICLO MECCANICO	■ Omogeneo	Economicamente vantaggioso	↓ PM
	■ Eterogeneo	Fattibilità	↓ Viscosità
		Sostenibilità ambientale	Qualità inferiore