

FACOLTA' DI INGEGNERIA

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

Dipartimento DICMA

TESI DI LAUREA

in

Valorizzazione delle Risorse Primarie e Secondarie

**Approccio modellistico al processo di selezione e separazione
dimensionale dei RSU ed applicazione ad un impianto TMB**

CANDIDATO
Erminia Decembrini

RELATORE
Prof.ssa Alessandra Bonoli

CORRELATORE
Ing. Paolo Maria de Felice

Anno Accademico 2008/09

Sessione III

INTRODUZIONE	4
1.QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO.....	6
1.1 La gestione integrata dei rifiuti	6
1.2 La situazione nel mondo	8
1.3 La situazione in Italia	8
1.4 Gestione dei Rifiuti Urbani a Roma.....	11
1.5 La normativa.....	12
1.5.1 La normativa in materia di discariche	12
1.5.2 La normativa specifica sul trattamento meccanico biologico	14
1.6 Tecnologie per lo smaltimento dei rifiuti.....	16
2. TMB-IMPIANTI DI TRATTAMENTO MECCANICO- BIOLOGICO	17
2.1 Il trattamento meccanico-biologico.....	18
2.2 Impianti di trattamento dei rifiuti indifferenziati per la produzione di CDR.....	21
2.3 Produzione di CDR da selezione secco umido e biostabilizzazione della frazione organica.....	23
2.4 Criteri di scelta dei processi e delle tecnologie per la realizzazione degli impianti di selezione e di produzione di CDR.....	25
2.5 Indici per la valutazione delle prestazioni degli impianti	27
2.6 Valutazione dell’impatto ambientale.....	28
3.PROCESSI DI SEPARAZIONE DEI RIFIUTI URBANI	29
3.1 Principi generali dei sistemi di selezione	30
3.2 Unità di accettazione	32
3.3 Unità di apertura sacchi, triturazione, macinazione	34
3.4 Unità di vagliatura.....	43
3.5 Unità di separazione aerodinamica	47
3.6 Unità di separazione dei metalli.....	50
3.7 Separatori binari e separatori multipli.....	53
4. SEPARAZIONE DIMENSIONALE:MODELLO SPERIMENTALE.....	58
4.1 Processo di vagliatura	58
4.1.1 Parametri di efficienza del processo.....	60
4.2 Analisi cinematica.....	61
4.2.1 Numero impatti	67

4.2.2 Tempo di residenza	70
4.3 Modello predittivo di calcolo.....	73
4.4 Sviluppo del modello	77
4.4.1 Prove sperimentali.....	78
4.4.2 Implementazione del modello deterministico tramite Matlab.....	83
5.APPLICAZIONE :OTTIMIZZAZIONE CDR.....	87
5.1 Descrizione Impianto	87
5.1.1 Reparto ricezione, selezione RSU e produzione CdR.....	89
5.1.2 Reparto igienizzazione sostanza organica.....	93
5.1.3 Reparto raffinazione frazione organica	94
5.2 Campionamento	99
5.2.1 Preparazione del campione rappresentativo.....	99
5.2.2 Analisi merceologica del rifiuto.....	102
5.2.3 Risultati Analisi Merceologica.....	107
5.3 Applicazione del modello di calcolo	109
5.5 Calcolo del potere calorifico	113
CONCLUSIONI	118
APPENDICE.....	120
BIBLIOGRAFIA.....	140

INTRODUZIONE

Il riutilizzo, il riciclo ed il recupero dei rifiuti rappresentano le fasi fondamentali di un efficiente sistema di gestione integrata dei rifiuti.

Il nucleo fondamentale di questa filosofia è quello di uscire dalle logiche delle gestioni di “emergenza” per affrontare la materia in modo organico e sistematico nell’ottica del cosiddetto “ciclo integrato del rifiuto” che implica una gestione dello stesso in tutte le sue fasi, dalla produzione al recupero/smaltimento attraverso un’attenta analisi e valutazione che prevede una visione olistica del problema.

La gestione attraverso il “ciclo integrato dei rifiuti” presuppone, oltre alla raccolta, la selezione, il recupero o lo smaltimento dei rifiuti, nelle diverse forme possibili secondo una serie di operazioni da esplicitare, fra loro coordinate e volte alla tutela dell’ambiente e al rispetto della normativa vigente.

Una corretta gestione dei rifiuti impone l’utilizzo razionale dei sistemi di raccolta differenziata, riciclaggio, recupero di materia e di energia, con un tendenziale superamento dello smaltimento in discarica, il quale, comunque, disperde risorse e lascia problemi insoluti alle generazioni future.

Nel panorama europeo, nonché in quello nazionale, sebbene con notevoli differenze tra i paesi settentrionali e quelli mediterranei, le politiche ambientali sono sempre più volte a promuovere i processi di valorizzazione dei rifiuti, favorendo un aumento del compostaggio, del riciclaggio e del recupero energetico, in un progressivo mutamento del quadro impiantistico.

I rifiuti urbani costituiscono un mezzo polifase piuttosto complesso, in cui è possibile distinguere una frazione inerte stabile che include tutti quei materiali tipo vetri, metalli, scarti di lavorazione edilizie, ecc. per i quali il comportamento meccanico di insieme può sostanzialmente essere schematizzato. Esiste poi una componente altamente deformabile, costituita da imballaggi plastici, carta e tessuti, soprattutto se in fogli o frammenti, che complica notevolmente il modello meccanico. La presenza di aria, altri fluidi e materiale organico facilmente degradabile conferisce all’insieme un comportamento non facilmente schematizzabile.

Per questi motivi il dimensionamento delle unità di selezione meccanica dei rifiuti urbani è stato da sempre condotto per via empirica, servendosi di esperienze maturate su campo. Tuttavia le proprietà fortemente variabili dei rifiuti hanno spesso causato una scarsa rispondenza dei modelli teorici formulati alla pratica realtà dei processi.

Scopo di questa tesi è quello di esaminare lo stato attuale e le prospettive di impiego delle piattaforme di recupero a mezzo di selezione meccanica dei rifiuti urbani, al fine di descriverne le caratteristiche, mettere in evidenza i relativi campi di impiego e le potenzialità. L'analisi si concentrerà in particolare sulla tecnica di selezione dei rifiuti per vagliatura e su una sua modellizzazione.

1. QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

1.1 La gestione integrata dei rifiuti

Il concetto di Sistema Integrato dei Rifiuti (SIR) è stato introdotto in Italia dal Decreto “Ronchi” e successive integrazioni, in attuazione delle varie Direttive comunitarie.

Questo modello gestionale prevede un approccio a 360 gradi del “sistema rifiuti” considerandone ogni aspetto; produzione, raccolta, trasporto, opzioni tecnologiche di trattamento e smaltimento finale, allo scopo di ottimizzare i percorsi, di sfruttarne ogni contenuto di materia ed energia e di ridurre il più possibile l’impatto ambientale. Questa visione si inserisce nell’ottica più ampia di una gestione ambientale sostenibile, che impone la necessità di ottimizzare lo sfruttamento delle risorse (fra le quali quindi non solo le materie prime ma anche i rifiuti) e di minimizzare la dispersione nell’ambiente di sostanze inquinanti derivanti da attività antropiche, come descritto nella gerarchia dei principi dettate a livello europeo in materia di rifiuti:

- ✓ prevenzione della produzione e pericolosità dei rifiuti;
- ✓ recupero di materia ed in secondo luogo di energia dai rifiuti;
- ✓ smaltimento finale in sicurezza.

In base a quanto ricordato precedentemente, un sistema di gestione integrato corretto ed efficace, in linea con le disposizioni del D.lgs.22/97, deve essere basato sui principi di seguito riportati:

- il recupero e la valorizzazione degli scarti sotto forma di materia devono essere prioritari ed in questo contesto la raccolta differenziata rappresenta la forma di selezione per pervenire a tale risultato, in quanto genera flussi con la massima qualificazione merceologica; altre forme di recupero di materia a valle della raccolta differenziata, attuate attraverso sistemi più o meno spinti di selezione, concorrono alla diminuzione del flusso complessivo di rifiuti da avviare allo smaltimento finale e come tale vanno incoraggiate. In questo caso molti sforzi andranno spesi per creare condizioni di mercato favorevoli per l’allocazione dei prodotti riciclati.
- la valorizzazione energetica del rifiuto residuo, in particolare per quanto attiene alla frazione secca dotata di buon potere calorifico, è parimenti importante come sistema per recuperare ancora risorse dal rifiuto e per minimizzare il ricorso alla discarica. Tale opzione risulta comunque di “rango” inferiore rispetto al recupero di materia e

va, quindi, attuata solo per i rifiuti per i quali non è tecnicamente o economicamente sostenibile una qualsiasi forma di riciclaggio. Nel sistema integrato, tale opzione si deve applicare al solo rifiuto residuo dotato di buon potere calorifico.

- lo smaltimento finale deve costituire l'opzione ultima per i soli rifiuti in nessun modo recuperabili o trattabili.

In questo contesto la discarica, come affermato in precedenza, attualmente la pratica più diffusa a livello nazionale ed europeo per lo smaltimento dei rifiuti urbani, non avendo alcuna funzione di valorizzazione delle risorse, e comportando un rischio per l'ambiente, deve rappresentare l'opzione per i rifiuti non più suscettibili di essere riusati, o trattati, nelle condizioni tecniche ed economiche del momento.

Il problema dei rifiuti deve quindi essere affrontato a largo spettro, intervenendo con tecnologie appropriate e con opportune iniziative di tipo gestionale in ogni sua fase. Quella dei rifiuti è infatti una filiera che origina dalla loro produzione da parte del sistema industriale; passa attraverso la loro raccolta, l'eventuale separazione e/o pretrattamento, il loro recupero o riciclaggio, e termina con lo smaltimento.

Partendo da questo approccio, il problema dei rifiuti va affrontato seguendo diversi stadi:

1. Riduzione

2. Restituzione

3. Consegna differenziata e raccolta differenziata

4. Pretrattamento e recupero (riciclaggio)

5. Smaltimento

Tutti questi stadi sono ineludibili e si presentano nell'ordine gerarchico indicato, poiché l'efficienza degli stadi superiori si riflette sulle richieste agli stadi successivi. Idealmente, il sistema "perfetto" che coinvolga le politiche industriali di base non porterebbe materiali al quinto stadio, ovvero sarebbe effettivamente a "rifiuti zero". Un sistema del genere non esiste in pratica ma deve essere considerato come una direzione chiara e comune verso la quale dirigersi. Ciò detto, i primi stadi della filiera di processo, riduzione e restituzione, consegna differenziata e raccolta differenziata sono da considerarsi come essenziali per una corretta gestione del sistema rifiuti. La loro elencazione è a volte considerata solo un'enunciazione di principio a cui riferirsi; al contrario, invece, tutti questi stadi devono essere potenziati concretamente soprattutto attraverso provvedimenti di tipo fiscale e legislativo. Inoltre, una corretta politica di smaltimento dei rifiuti non deve prescindere da una valutazione di tutto il ciclo di vita del rifiuto e gli stadi prima citati non possono essere considerati disgiunti uno dall'altro. In altre parole si tratta di ragionare in termini di filiera, in modo tale che le proposte

avanzate nella pratica tengano conto in modo coerente di tutti i costi e le implicazioni su tutti gli stadi. Questa visione unitaria ha implicazioni anche sulle condizioni da mettere in atto per aspetti concorsuali e contrattuali, in particolare nel senso che eventuali offerte e contratti siano assolutamente inclusivi degli ultimi due stadi dell'evoluzione del rifiuto, dal pretrattamento e recupero allo smaltimento.

1.2 La situazione nel mondo

I rifiuti sono ormai da anni al centro di tematiche politico-ambientali a livello internazionale ed europeo. Non a caso diversi programmi europei d'azione per l'ambiente hanno posto al centro dell'attenzione proprio il tema rifiuti e l'Europa ha promosso ed integrato una serie di normative di settore allo scopo di raggiungere una maggiore tutela dell'ambiente e della salute umana.

La loro continua e smisurata produzione è il primo problema che dovrebbe essere affrontato concretamente. Ogni anno soltanto in Europa sono prodotti circa 1,3 miliardi di tonnellate di rifiuti, di cui 40 milioni di tonnellate di natura pericolosa. La produzione dei rifiuti, dagli anni '90 ad oggi, ha continuato a crescere parallelamente all'aumento della ricchezza e agli standard di vita sempre più elevati dei paesi occidentali.

Tra il 1990 e il 1995, il totale dei rifiuti prodotti è aumentato di circa il 10% e si prevede che intorno al 2020 la produzione dei rifiuti possa aumentare del 45% rispetto al 1995.

Oggi, fra l'altro, c'è una nuova minaccia in questo campo legata al boom dei consumi dei prodotti elettronici che ha portato in poco tempo ad un incremento di questi rottami ad alto contenuto di composti chimici pericolosi.

Per la stragrande maggioranza questi rifiuti, che in Europa stanno crescendo ad un tasso del 3-5% all'anno, quasi tre volte superiore a qualsiasi altra frazione merceologica, sono smaltiti nel flusso dei rifiuti urbani determinando non pochi problemi d'inquinamento ambientale.

1.3 La situazione in Italia

Negli ultimi anni in Italia abbiamo assistito ad una crescente e smisurata produzione di rifiuti, indice di una società sempre più orientata ai consumi e verso il sistema usa e getta. Basti pensare che nell'ultimo decennio si è avuto un aumento nella produzione di rifiuti pari al 20% e quella pro-capite è passata da 466 Kg/ab/anno nel 1998 a 539 Kg/ab/anno nel 2005.

Secondo i dati ufficiali desunti dal rapporto Rifiuti APAT-ONR 2006, la produzione dei rifiuti

urbani fa ancora registrare un ulteriore aumento raggiungendo quota 31,7 milioni di tonnellate nel 2005 (+5,5% rispetto al 2003), con un pro-capite medio nazionale di 539 kg/abitante per anno.

La crescita appare particolarmente marcata nelle regioni centrali dove la produzione ha fatto registrare un aumento percentuale, tra il 2001 ed il 2005, di poco inferiore al 10,3% contro un incremento dell'ordine dell'8,4% per il sud e del 6% circa per il nord. I valori di produzione più elevati si riscontrano al centro con circa 633 kg di rifiuti per abitante prodotti all'anno, a seguire si colloca il nord con 533 kg/ab./anno mentre i valori più bassi spettano al sud, in cui ogni abitante ha prodotto 496 kg nel 2005.

Per quanto riguarda la produzione dei rifiuti speciali (compresi quelli da costruzione e demolizione) si registra in Italia, come in molti altri paesi dell'Unione europea, un forte aumento di questa tipologia derivante dalle diverse attività economiche, tale da avere un incremento della produzione totale pari a circa il 18% nel triennio 2002-2004.

I rifiuti speciali prodotti in Italia ammontano, nel 2004, ad oltre 108 milioni di tonnellate, di cui il 93% è costituito da rifiuti non pericolosi ed il restante 7% da quelli pericolosi.

Lo smaltimento in discarica, pur mostrando una lieve riduzione pari al 3%, si conferma, anche nel 2005, come la forma di gestione più utilizzata, con oltre 17 milioni di tonnellate di rifiuti interrati. Va comunque registrata la progressiva diminuzione del numero di discariche (61 in meno rispetto al 2004), soprattutto al sud del paese dove maggiore era la loro concentrazione e la loro inadeguatezza rispetto agli standard fissati dalla direttiva europea in materia. L'incenerimento dei rifiuti urbani, che interessa il 10,2% dei rifiuti prodotti (bruciando una quota pari a 3,8 milioni di tonnellate nei 50 impianti operativi al 2005), mostra un aumento negli ultimi 5 anni di circa il 9%.

Tra il 2001 ed il 2005, la raccolta differenziata ha fatto registrare un incremento pari a circa 2,6 milioni di tonnellate (da 5,1 milioni di tonnellate a 7,7 milioni di tonnellate) corrispondente ad una crescita percentuale intorno al 50%. Nello stesso periodo di tempo, però, la produzione complessiva dei rifiuti urbani ha fatto rilevare un incremento di circa 2,3 milioni di tonnellate, andando così a controbilanciare l'esito positivo della raccolta differenziata, i cui livelli comunque risultano ancora bassi su scala nazionale.

Nel 2005, la raccolta differenziata si colloca al 24,3% della produzione totale dei rifiuti urbani, ancora sensibilmente al di sotto del target previsto dalla normativa.

La situazione appare, comunque, decisamente diversificata passando da una macroarea geografica all'altra. Infatti, nel nord (38,1%) si è ormai consolidato un sistema di raccolta differenziata dei rifiuti, in particolare delle frazioni organiche, in linea con le altre nazioni

europee.

I dati del centro (19,4%) e soprattutto quelli del sud (8,7%) evidenziano, invece, che le perduranti emergenze richiedono di essere affrontate con la dovuta energia; in particolare, è necessario intervenire soprattutto per quanto riguarda l'attivazione della raccolta differenziata "porta a porta", con particolare attenzione alla frazione umida, che risulta addirittura assente nella maggior parte dei contesti che vivono l'emergenza rifiuti.

Parallelamente allo sviluppo della raccolta differenziata, nelle aree del nord e del centro si va consolidando un sistema industriale per il riciclo dei materiali raccolti separatamente che riguarda ormai il 15,5% del totale dei rifiuti urbani gestiti. Il compostaggio dei rifiuti urbani (incluso il loro trattamento meccanico biologico), per esempio, ha raggiunto nel 2005 una quota pari a 3 milioni di tonnellate, registrando un incremento di circa il 125% rispetto al 1999.

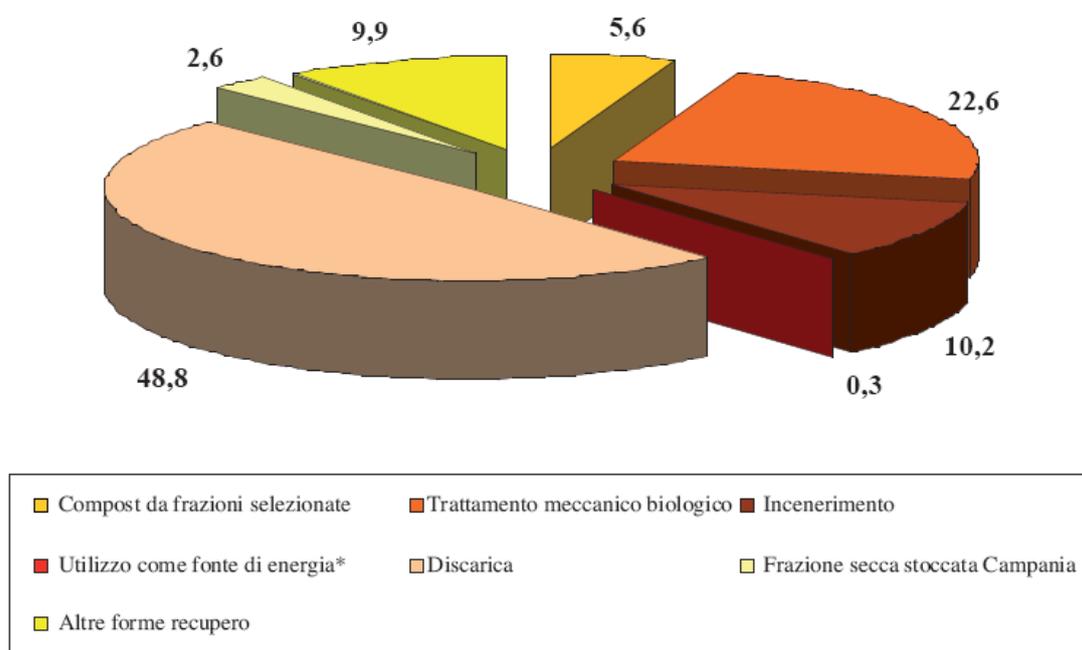


Figura 2.1 – Gestione dei rifiuti urbani – (Fonte: APAT)

1.4 Gestione dei Rifiuti Urbani a Roma

La gestione integrata dei servizi ambientali nella città di Roma è affidata al gruppo AMA, Azienda Municipale Ambiente, nata nell'anno 2000, raccogliendo l'eredità dell'omonima Azienda Speciale che aveva gestito i servizi dal 1994 fino a risalire ai primi del '900 con il Servizio di Nettezza Urbana. I principali servizi istituzionali che AMA fornisce alla città di Roma rientrano nel contratto di servizio stipulato con il Comune di Roma e sono coperti dalla Tariffa Rifiuti pagata annualmente dagli utenti. Si tratta sinteticamente dello spazzamento e lavaggio delle strade, della raccolta, trasporto e smaltimento dei rifiuti. Una parte sempre più consistente dei RU è raccolto in modo differenziato, anche a domicilio con la raccolta "porta a porta".

L'Azienda, da diversi anni, è impegnata nella progettazione e costruzione di nuovi impianti e stabilimenti per la gestione dei propri servizi. Attualmente gestisce 13 isole ecologiche e 6 impianti di trattamento, tra cui:

1. Termovalorizzatore di Ponte Malnome, a regime dal 1996, per una potenzialità di 200 tonnellate al giorno;
2. Impianto di compostaggio di Maccarese, a regime dal 2002, tratta i rifiuti della raccolta dei mercati, oltre a residui organici raccolti in modo differenziato e a rifiuti ligneo – cellulósici, per una potenzialità di 100 tonnellate al giorno;
3. Impianto di selezione del multimateriale di Rocca Cencia, inaugurato nel 2003, consente la selezione del multimateriale proveniente dalla raccolta differenziata a mezzo dei cassonetti blu, con una capacità di circa 100 tonnellate al giorno;
4. Impianto di selezione del multimateriale di via Laurentina, preso in carico da AMA nel 2006, consente la selezione del multimateriale con processo analogo a quello dell'impianto di Rocca Cencia, con una capacità di circa 100 tonnellate al giorno;
5. Impianto di selezione e trattamento RU di Rocca Cencia, inaugurato nel 2006, consente il trattamento meccanico – biologico del RU indifferenziato, per la produzione di CDR e compost grezzo, per una potenzialità di 750 tonnellate al giorno;
6. Impianto di selezione e trattamento RU di via Salaria, di prossimo avvio, con linea di trattamento e potenzialità gemelle a quelle dell'impianto di Rocca Cencia.

1.5 La normativa

Molte sono le novità normative intervenute negli ultimi anni destinate ad incidere profondamente sul ciclo di gestione dei rifiuti e sulla stessa pianificazione territoriale. Di seguito si fornisce un quadro sintetico dei principali provvedimenti compreso il decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 di riordino dell'intera legislazione in materia di rifiuti.

1.5.1 La normativa in materia di discariche

La vigente normativa in materia di discariche, è in grado di svolgere un ruolo determinante nell'innovazione del sistema di gestione che incentivi il riciclaggio dei materiali e la valorizzazione energetica dei rifiuti.

Le rigide prescrizioni tecniche relative alla realizzazione e gestione di nuove discariche, cui anche quelle esistenti hanno dovuto adeguarsi, e la nuova disciplina sui prezzi di smaltimento hanno riequilibrato, infatti, i costi di allocazione in discarica rispetto ai costi relativi ad altre forme di smaltimento e/o recupero.

Il costo dello smaltimento in discarica risultava essere infatti troppo basso rispetto ad altre forme di gestione, compreso l'incenerimento, in quanto non rispecchiava i costi reali associati con il suo esercizio.

Con tale normativa, invece, i prezzi che i gestori devono applicare per lo smaltimento di qualsiasi tipo di rifiuto devono coprire tutti i costi derivanti, non solo dalla realizzazione dell'impianto e dal suo esercizio, ma anche quelli sostenuti per la prestazione della garanzia finanziaria, per la chiusura e la successiva gestione "post mortem" che dovrà protrarsi per un periodo non inferiore ai 30 anni.

Anche i rigidi criteri relativi all'ammissibilità dei rifiuti in discarica, introdotti dal DM 13 marzo 2003 ed integrati dal DM 3 agosto 2005 che ha abrogato il precedente decreto e trasposto integralmente la decisione europea 2003/33/CE, impongono a molte tipologie di rifiuti forme di smaltimento alternative alla discarica. In particolare il nuovo decreto, in conformità al dettato comunitario, fissa le caratteristiche che i rifiuti devono possedere per essere ammessi nelle tre diverse tipologie di discarica (discariche per rifiuti inerti, per rifiuti non pericolosi e per rifiuti pericolosi).

Tutti i rifiuti devono essere caratterizzati dal punto di vista chimico-fisico secondo analisi standard e, sottoposti a test di eluizione, devono avere un eluato conforme ai limiti fissati per una serie di parametri chimici.

Solo se i rifiuti soddisfano, in base alle loro caratteristiche di base, i criteri di ammissibilità per una categoria di discarica, potranno essere ammessi nella corrispondente categoria di

discarica. La mancata conformità ai criteri comporta, invece, l'inammissibilità dei rifiuti a tale categoria. Significative sono le restrizioni che riguardano il contenuto di sostanze organiche nei rifiuti ammessi in discarica, determinato dai parametri TOC (carbonio organico totale) e DOC (carbonio organico disciolto); molte tipologie di rifiuti (vedi fanghi di depurazione) in base a tali parametri non saranno più smaltibili in discarica e, di conseguenza, dovranno essere avviati ad altre forme di gestione.

Va detto che, le autorità territorialmente competenti possono, comunque, autorizzare, anche per settori confinati, sottocategorie di discariche per rifiuti non pericolosi così definite:

- ✓ discariche per rifiuti inorganici a basso contenuto organico o biodegradabile;
- ✓ discariche per rifiuti in gran parte organici da suddividersi in discariche considerate bioreattori con recupero di biogas e discariche per rifiuti organici pretrattati;
- ✓ discariche per rifiuti misti non pericolosi con elevato contenuto sia di rifiuti organici o biodegradabili che di rifiuti inorganici, con recupero di biogas.

I relativi criteri di ammissibilità per queste sottocategorie di discariche sono individuate dalle stesse autorità in sede di rilascio dell'autorizzazione, stabiliti caso per caso sulla base delle caratteristiche dei rifiuti, della valutazione del rischio di emissioni della discarica e dell'idoneità del sito.

I criteri di ammissibilità introdotti dal DM 3 agosto 2005 sono operativi solo dal 1° gennaio 2007, a causa di due leggi intervenute successivamente che hanno prorogato i criteri di ammissibilità di cui alla deliberazione 27 luglio 1984 fino al 31 dicembre 2006 (vedi D.L. 30 settembre 2005 n. 203 "Misure di contrasto all'evasione fiscale e disposizioni urgenti in materia tributaria e finanziaria" convertito in legge, con modificazioni, dall'art. 1, Legge 2 dicembre 2005, n. 248). Sempre dal 1° gennaio 2007, è vietato smaltire in discarica rifiuti con un potere calorifico superiore a 13.000 kJ/kg; tale disposizione che riguarda in particolare il combustibile derivato da rifiuti (CDR) e, in alcuni casi, la frazione secca dei rifiuti derivante da impianti di trattamento meccanico biologico, impone la ricerca di forme alternative di trattamento ed in particolare il recupero energetico.

Importanti sono, poi, le disposizioni contenute nell'articolo 5 del D.Lgs 36/2003, relative agli obiettivi di progressiva riduzione del conferimento in discarica della frazione biodegradabile di rifiuti urbani, da raggiungersi a livello degli ambiti territoriali ottimali, o qualora questi ultimi non siano costituiti, a livello provinciale .

Gli obiettivi di riduzione fissati sono:

- entro il 2008, i rifiuti urbani biodegradabili allocati in discarica dovranno essere inferiori a 173 kg/anno per abitante;

- entro il 2011, i rifiuti urbani biodegradabili dovranno essere inferiori a 115 kg/anno per abitante;
- entro il 2018, i rifiuti urbani biodegradabili dovranno essere inferiori a 81 kg/anno per abitante.

Per il raggiungimento di tali obiettivi ciascuna regione doveva redigere ed approvare, entro il 27 marzo 2004, un apposito programma per la riduzione dei rifiuti biodegradabili da collocare in discarica ad integrazione del Piano regionale di gestione dei rifiuti, contenente l'indicazione degli strumenti e delle modalità di trattamento (riciclaggio, trattamento aerobico e/o anaerobico, recupero di energia) necessari per il raggiungimento degli obiettivi fissati dalla normativa.

Altro punto importante del D.Lgs 36/2003 è l'articolo 7 che stabilisce l'obbligo in via generale del pretrattamento pur con alcune distinzioni

- l'obbligo “non si applica (...) ai rifiuti il cui trattamento non contribuisce (...)” a ridurre “la quantità dei rifiuti o i rischi per la salute umana e l'ambiente, e non risulta indispensabile ai fini del rispetto dei limiti fissati dalla normativa vigente”.

Con il termine “trattamento”, si intende: “..... processi fisici, termici, chimici o biologici, incluse le operazioni di cernita, che modificano le caratteristiche dei rifiuti, allo scopo di ridurre il volume o la natura pericolosa o di favorirne lo smaltimento in condizioni di sicurezza”.

1.5.2 La normativa specifica sul trattamento meccanico biologico

La Commissione Europea ha trattato il quadro normativo sul TMB separatamente dalle altre leggi ed in modo accurato, tanto che sono stati avviati i lavori per pervenire ad uno strumento normativo comune relativo alla gestione dei rifiuti organici biodegradabili che ha comportato l'elaborazione, da parte della DG Ambiente, di un documento di lavoro portato alla discussione con gli Stati Membri (seconda bozza del 12 febbraio 2001). Tale documento introduce disposizioni atte a regolamentare in maniera completa le attività di compostaggio e digestione anaerobica individuando la lista positiva dei rifiuti biodegradabili ammessi al trattamento biologico (allegato 1), i requisiti relativi all'igienizzazione in termini di validazione del processo (allegato 2), le classi di qualità del compost digestato e dei rifiuti biostabilizzati (allegato 3), i metodi di analisi e campionamento dei rifiuti trattati biologicamente (allegato 4), i requisiti generali degli impianti di trattamento biologico (localizzazione, trattamento delle acque reflue e del percolato, controllo degli odori - allegato 5) e i requisiti per l'utilizzazione del biogas.

La normativa di riferimento in materia di compost da rifiuti indifferenziati, ossia il compost ottenuto da matrici organiche ottenute per selezione meccanica all'impianto, o, comunque, da matrici le cui caratteristiche non consentono di ottenere compost con i requisiti di ammendante commerciale, sono il D. Lgs 22/97 e la Deliberazione 27 Luglio 1984.

La realizzazione e la gestione degli impianti di trattamento biologico di rifiuti indifferenziati sono, quindi, sottoposte alla disciplina autorizzativa di cui agli art. 27 e 28 del D.lgs. 22/97.

La deliberazione 27 luglio 1984 pone forti limitazioni all'uso del prodotto in relazione al contenuto di metalli pesanti rapportato a quello dei terreni ricettori, alle caratteristiche agronomiche e all'accettabilità ai fini della tutela ambientale.

Per il compost da rifiuti indifferenziati un impiego di elezione può essere rappresentato, piuttosto, dalla destinazione ad attività paesistico ambientali, per le quali viene richiesta la disponibilità di sostanza organica stabilizzata al fine di migliorare le caratteristiche dei materiali inerti impiegati.

Tra queste:

- ✓ la sistemazione di aree di rispetto di autostrade e ferrovie (scarpate, argini, terrapieni);
- ✓ la costituzione di aree verdi di grandi dimensioni: costituzione di parchi pubblici, campi da golf, campi da calcio;
- ✓ il recupero ambientale di cave esaurite;
- ✓ il ripristino ambientale di aree inquinate, conformemente a quanto previsto da D.lgs 22/97 (art. 22) che menziona esplicitamente l'opportunità di privilegiare l'impiego di materiali provenienti da attività di recupero di rifiuti urbani;
- ✓ capping periodico durante la coltivazione delle discariche;
- ✓ la sistemazione post chiusura di discariche esaurite.

A livello nazionale è stato predisposto uno schema di decreto ministeriale relativo al trattamento biologico dei rifiuti; in linea con gli orientamenti comunitari, esso individua una serie di disposizioni in merito ai requisiti tecnici degli impianti di trattamento biologico, alle condizioni per l'igienizzazione (che ricalcano quelle previste dal Documento di lavoro della DG Ambiente della Commissione Europea), alle caratteristiche dei rifiuti ammessi alla produzione di compost e biostabilizzato aerobico ed anaerobico, alle modalità di utilizzo dei materiali prodotti dal trattamento ed alla frequenza e metodiche di campionamento ed analisi.

1.6 Tecnologie per lo smaltimento dei rifiuti

Da un punto di vista generale, i sistemi di smaltimento finale di rifiuti già sottoposti a raccolta differenziata possono essere di tipo monotecnologico o complesso (composizione in sequenza/parallelo di più tecnologie); in pratica cioè, una medesima tecnologia può essere utilizzata come unico sistema di smaltimento, oppure come parte di un sistema articolato.

Le problematiche ambientali, sociali e economiche relative al problema hanno portato negli ultimi anni ad un fiorire di nuove proposte di tecnologie di smaltimento; molte di queste sono poi state rapidamente abbandonate a causa di vari motivi tra cui:

- ✓ difficoltà di applicazione di tecnologie derivanti da processi industriali ad un prodotto (il rifiuto) avente composizione variabile ed incostante.
- ✓ scarsa flessibilità nei confronti di una “offerta” del mercato rifiuti che è destinata a variare in termini quantitativi e qualitativi in funzione delle politiche di riduzione della produzione rifiuti e raccolta differenziata che vengono adottate dai governi locali;
- ✓ sottovalutazione delle questioni operative e degli effetti secondari che tali tecnologie causano in termini di bilancio energetico/ambientale complessivi.

In sintesi, le tecnologie principali di smaltimento dei rifiuti sono riassumibili in:

- ✓ Valorizzazione di flussi di materiali da raccolta differenziata
- ✓ Trattamenti di selezione/valorizzazione dei rifiuti indifferenziati con trattamento meccanico - biologico (TMB) con produzione di CDR
- ✓ Smaltimento in discarica controllata
- ✓ Termodistruzione con recupero di energia
- ✓ Essiccamento termico di fanghi da depurazione
- ✓ Trattamenti di recupero di scorie da termovalorizzazione
- ✓ Trattamenti di inertizzazione di ceneri da combustione
- ✓ Incenerimento

Tra queste quella che negli ultimi anni sta avendo il maggior sviluppo, e di conseguenza quella che suscita più interesse, è sicuramente la tecnologia riguardante il TMB, ovvero il trattamento meccanico - biologico trattato nei capitoli successivi.

2. TMB-IMPIANTI DI TRATTAMENTO MECCANICO- BIOLOGICO

Il trattamento meccanico biologico ha assunto, negli anni, un ruolo sempre più determinante, contribuendo ad una gestione più corretta del rifiuto residuo dalla raccolta differenziata, sia ai fini dello smaltimento finale, sia per la possibilità di impiegare la frazione organica stabilizzata (FOS) prodotta, nella copertura delle discariche o in attività paesaggistiche e di ripristino ambientale.

Una progressiva crescita del settore del trattamento biologico, è, infatti, essenziale ai fini del raggiungimento degli obiettivi di riduzione del conferimento in discarica dei rifiuti biodegradabili da raggiungersi, a livello degli ambiti territoriali ottimali, ai sensi dell'art. 5 del D.Lgs. 36/2003.

Per il biostabilizzato proveniente dagli impianti di trattamento meccanico biologico non esiste, allo stato attuale, alcuna normativa comunitaria o nazionale.

È indispensabile, in ogni caso, che tale materiale, ai fini di un corretto impiego, sia contraddistinto da un elevato grado di stabilità e da un basso contenuto di sostanze inquinanti e di materiali inerti.

Il trattamento meccanico biologico si è rivelato efficace nelle regioni in emergenza che, ponendo una maggiore attenzione al problema dello smaltimento dei rifiuti, si sono dotate di impianti con potenzialità tali da poter effettuare il trattamento di rilevanti quantitativi di rifiuti.

Tale scelta appare, in particolare, coerente con l'obbligo di pretrattare tutti i rifiuti da smaltire in discarica, fissato dalla direttiva 99/31/CE e dal citato D.Lgs. 36/2003.

A differenza degli impianti di compostaggio, si assiste, in questo contesto, ad un andamento più omogeneo sia nei quantitativi di rifiuti indifferenziati trattati, che nelle potenzialità e nella distribuzione degli impianti sul territorio nazionale, non essendo, il trattamento meccanico biologico, soggetto ad un sistema organizzato di raccolte differenziate.

2.1 Il trattamento meccanico-biologico

I processi di trattamento meccanico-biologico proponibili per la gestione smaltimento dei rifiuti costituiscono allo stato dell'arte attuale l'evoluzione di forme di trattamento già adottate da alcuni decenni e basate su una preselezione meccanica ed un successivo trattamento biologico dei rifiuti, volto ad ottenerne la stabilizzazione. Nel tempo, questi schemi di trattamento si sono evoluti, sia in relazione alla progressiva politica di raccolta differenziata (con modifica quindi delle caratteristiche quali-quantitative del rifiuto residuo), sia in relazione alla adozione di tecniche di separazione preliminare più efficienti, sia in relazione alle esperienze maturate nella metodologia di stabilizzazione della frazione organica (trattamenti anaerobici in alternativa alla stabilizzazione aerobica). Pur nella varietà di tecniche impiantistiche esistenti ed in fase di sperimentazione, gli impianti di trattamento MB sono costituiti da tre fasi:

- fase di pretrattamento meccanico (selezione)
- fase principale di trattamento biologico
- fase di post-trattamento meccanico.

I moderni impianti di trattamento meccanico-biologico sono progettati per operare in un sistema basato su un vasto ricorso alle raccolte differenziate, anche della frazione verde e organica. Oggetto del trattamento è la sola frazione residua del rifiuto (RU indifferenziato), la cui composizione varierà anche in funzione delle tipologie e dei rendimenti della raccolta differenziata.

Il rifiuto residuo della raccolta differenziata delle frazioni secche (carta, vetro, plastica), e della frazione organica, manterrà comunque una frazione putrescibile importante (almeno il 10%).

Assieme alla raccolta differenziata, gli impianti TMB costituiscono quindi una tecnica di trasformazione del rifiuto residuo, da concepire e dimensionare in funzione allo smaltimento finale e cioè:

- ✓ sistemazione in discarica/ripristini ambientali
- ✓ riutilizzo come CDR presso impianti di termodistruzione o come fonte energetica integrativa rispetto a combustibili fossili.

Il vantaggio dei trattamenti TMB è costituito dalla loro modularità e flessibilità, associata a bassi costi di investimento.

Elemento essenziale di questo tipo di trattamento è un ciclo di selezione semplificata, tecnologicamente simile ai trattamenti preliminari che venivano in origine utilizzati negli impianti di produzione di RDF da rifiuti indifferenziati.

Le funzioni di questi trattamenti sono:

- separazione dei RSU in flussi a composizione dominante di sostanza “secca” e “umida”, flussi caratterizzati pertanto da una certa omogeneità di composizione (il flusso umido, a matrice prevalentemente organica destinabile a stabilizzazione biologica aerobica o anaerobica e riutilizzo come ammendante per ripristini ambientali o a discarica come sovrullo non più putrescibile, il flusso a matrice prevalentemente secca e combustibile destinabile a termodistruzione);
- separazione delle frazioni granulometriche e/o merceologiche che possono deteriorare la qualità dei flussi umidi e secchi o che possono dar luogo nei successivi trattamenti a problemi ambientali.

La separazione deve preferibilmente avvenire in maniera automatica, in modo da evitare rischi per la salute degli operatori.

I suddetti obiettivi possono evidentemente essere raggiunti con risultati assai diversi in funzione della complessità impiantistica.

Il flusso di sostanza organica è rappresentato dal sottovaglio e, in funzione del livello di purezza desiderato per questa componente, la selezione può essere ulteriormente spinta lavorando con vaglio aventi luci di dimensioni inferiori; evidentemente questo comporta la produzione di una maggiore quantità di scarti che, essendo per lo più caratterizzati da elevata umidità e da rilevante presenza di materiali inerti, hanno come destino finale lo scarico controllato.

In aggiunta i diversi flussi possono essere sottoposti a trattamenti di deferrizzazione per il recupero dei materiali ferrosi.

Per il trattamento biologico possono essere impiegati metodi aerobici (compostaggio, essiccamento) o metodi anaerobici (digestione), in quest'ultimo caso seguiti da trattamenti aerobici di stabilizzazione.

Nelle esperienze esistenti il metodo più frequentemente impiegato è quello del compostaggio. Per questo motivo, le linee di stabilizzazione della frazione umida a matrice prevalentemente organica possono essere integrate con linee specificatamente destinate a trattare la frazione umida + verde da RD per la produzione di compost di qualità. Attraverso il compostaggio il contenuto biologicamente degradabile viene convertito a CO₂, acqua e sostanze umiche. La produzione di biogas e di eluato dal materiale stabilizzato, comparato a quello del rifiuto non trattato è estremamente ridotto. Nella fase di compostaggio intensivo (che può essere spinto fino a 4 settimane) hanno luogo la parte principale delle reazioni biochimiche e si forma una certa quantità di gas fortemente odorigeno. Pertanto questa fase deve essere effettuata

all'interno di edifici/capannoni chiusi, dotati di sistemi di ventilazione/aspirazione aria con deodorizzazione prima dell'emissione in atmosfera. Il prodotto in uscita dalla fase di compostaggio viene poi normalmente sottoposto ad una fase di maturazione, volta alla stabilizzazione del prodotto; in questa fase proseguono le reazioni biochimiche della fase di compostaggio, anche se con cinetica inferiore.

Poichè il prodotto ha perso le proprietà odorigene iniziali, il processo di maturazione può avvenire all'aperto, in apposite aie. I tempi di maturazione variano in funzione delle caratteristiche del rifiuto e dell'intensità delle fasi di compostaggio; essi sono compresi tra 2 e 8 mesi.

In alternativa alla fase di stabilizzazione aerobica basata sul processo di compostaggio-maturazione, sono utilizzati altri due processi di trattamento della frazione organica:

- ✓ la bioessiccazione: con questo processo si attua una ridotta degradazione biochimica della componente organica; il rifiuto viene alimentato in apposite celle di fermentazione. Il calore generato dalla decomposizione della frazione organica più degradabile determina un processo di essiccazione del rifiuto tale da renderlo stabile e adatto ad uno stoccaggio temporaneo e, quindi, alla combustione. La miscela di rifiuti giace nelle celle di fermentazione per circa 7 ÷ 15 giorni, durante i quali, a causa del calore generato dal processo biologico di tipo aerobico, essa perde parte della sua umidità, che viene asportata insieme all'aria di scarico. L'aria estratta dalle celle mediante il sistema di ventilazione viene adeguatamente depolverata e filtrata. La miscela fermentata residua ha un contenuto di umidità inferiore al 15% (che corrisponde ad una perdita di peso per fermentazione dell'ordine del 30% ca.) e si trova nelle condizioni ideali per essere separata nei suoi componenti fondamentali (a diverso potere calorifico).
- ✓ la digestione anaerobica; questo processo avviene all'interno di manufatti totalmente chiusi, con presenza d'acqua ed in assenza d'aria, a temperatura controllata (35-55°C). In queste condizioni avviene una fermentazione di tipo metanico e con produzione di biogas; il biogas può essere utilizzato, se prodotto in quantità adeguata, oltre che per l'autoriscaldamento del digestore, anche per riscaldamento o produzione di energia elettrica tramite motori a combustione interna (tipicamente motori progettati per utilizzare metano). Dopo la fase di digestione anaerobica, i rifiuti escono in forma di fango con elevato contenuto acquoso; devono quindi essere disidratati per essere trasformati in frazione palabile.

Le tecnologie di trattamento meccanico-biologico oggi operanti possono essere quindi suddivise in tre principali categorie: a) impianti di trattamento meccanico-biologico integrati, destinati alla produzione di una frazione stabilizzata, FOS, (con impieghi in discarica o per alcuni usi non agronomici) e di una frazione secca, CDR destinata al recupero energetico. b) impianti di digestione anaerobica sulla frazione residua del rifiuto, con recupero del biogas, separazione della frazione secca e stabilizzazione dei fanghi c) impianti di essiccamento biologico della frazione residua per la produzione di CDR e/o frazioni destinate a recupero energetico.

2.2 Impianti di trattamento dei rifiuti indifferenziati per la produzione di CDR

L'utilizzo del CDR come combustibile in impianti dedicati o come combustibile alternativo in impianti che utilizzano combustibili tradizionali, si inserisce nel sistema integrato di gestione dei rifiuti.

Il processo di produzione di CDR è finalizzato all'ottenimento di un materiale sufficientemente omogeneo, privo di inquinanti e con un buon potere calorifico, che può essere impiegato per la produzione di energia in impianti dedicati o in impianti produttivi in sostituzione di combustibili convenzionali (cementifici, centrali termoelettriche, impianti siderurgici, ecc.).

Gli impianti per la produzione di combustibile da rifiuti (CDR) eseguono un trattamento sul materiale in ingresso finalizzato a garantire sia un elevato potere calorico del prodotto in uscita, sia l'eliminazione delle sostanze indesiderate e pericolose per la combustione.

L'ingresso agli impianti può essere costituito da:

- frazione secca ottenuta per separazione meccanica dei rifiuti urbani indifferenziati;
- frazione secca non riciclabile (di scarto) proveniente dalla selezione dei materiali prodotti dalla raccolta differenziata;
- rifiuti umidi bioessiccati.

Il processo di trattamento deve restituire un prodotto che risponda alle caratteristiche chimico fisiche indicate dalla normativa. Qui di seguito solo alcune di esse.

P.C.I.1 sul tal quale	Min 15.000 Kj/Kg
Umidità	in massa max 25 %
Cloro	in massa max 0,9%
Ceneri sul secco	in massa max 20%
Pb (volatile) sul secco	massa max 200 mg/kg

[la quantità di calore fornita dal sistema al contorno nel corso di reazioni di combustione viene definita "calore di combustione": se riferita

all'unità di massa (di volume per i combustibili gassosi) o alla mole di combustibile prende il nome di “**potere calorifico specifico**”; tale grandezza è definita P.C.I. (potere calorifico inferiore) se l'acqua eventualmente prodotta nella reazione di combustione si trova allo stato di vapore.)]

Sempre secondo tale normativa, nel processo di produzione di CDR possono essere presenti, fino al 50% in peso, rifiuti dichiarati assimilati agli effetti del recupero energetico, costituiti da:

- ✓ plastiche clorurate;
- ✓ poliaccoppiati;
- ✓ gomme sintetiche non clorurate;
- ✓ resine e fibre artificiali e sintetiche con contenuto di cloro in massa < 0,5%;
- ✓ pneumatici fuori uso.

Il CDR così prodotto viene usato come combustibile alternativo in cocombustione con altre fonti primarie o in coincenerimento con altri rifiuti (esempi di impieghi industriali sono in centrali termoelettriche alimentate con polverino di carbone e cementifici alimentati con polverino di carbone o con altri combustibili solidi alternativi).

Con riferimento allo schema generale di gestione integrata dei rifiuti, la produzione di CDR può essere eseguita o attraverso una selezione della frazione secca da quella umida, o previa bioessiccazione dei rifiuti misti: trattamenti leggeri sul rifiuto indifferenziato in ingresso (RSU) possono portare o alla separazione della frazione secca (FS), o alla separazione della frazione secca e della frazione organica stabilizzata (FOS), o ancora, alla separazione della frazione secca, della frazione organica stabilizzata e di altri scarti recuperabili, quali metalli e inerti; i processi per ottenere CDR di qualità elevata (seguendo le norme UNI 9003) sono caratterizzati invece, da trattamenti più o meno spinti della frazione secca o di quella organica stabilizzata. Nella tabella seguente vengono confrontati i parametri significativi caratterizzanti lo stato del materiale all'ingresso dell'impianto e all'uscita, nel caso che si considerino una produzione di CDR normale ed una di CDR di qualità elevata:

	RU a valle RD	CDR normale	CDR di qualità elevata
C.I. l/ kg	9.000 – 12.500	> 15.000	> 20.000
umidità %	25 – 35	< 25	< 18
energetici %	17 – 20	< 20	< 15
cloro %	0,2 – 1,5	0,9	0,7
g / kg	0,4 – 13	7 (Hg + Cd)	1

Di seguito viene descritta una tipologia di impianto di produzione di CDR, quale impianto di

selezione secco–umido e di biostabilizzazione della frazione organica detto anche impianto TMB.

2.3 Produzione di CDR da selezione secco umido e biostabilizzazione della frazione organica

L'ingresso di un impianto di questo tipo è generalmente costituito dal rifiuto indifferenziato residuo proveniente dalla raccolta differenziata, ma possono essere consegnati anche altri rifiuti come plastiche non clorurate, pneumatici fuori uso, poliaccoppiati, gomme sintetiche non clorurate, resine e fibre artificiali e sintetiche con contenuto in Cl < allo 0,5% in massa; tutti questi rifiuti possono entrare nella composizione del CDR per una percentuale massima del 50%, come previsto dalla normativa vigente.

Impianto di separazione dal fine

Scopo: Effettuare un pretrattamento del rifiuto ai fini della sua termovalorizzazione.

Descrizione del processo:

- Scarico in fossa o su pavimento a raso;
- Carico dell'impianto con carroponte o con pala meccanica;
- Prima riduzione dimensionale;
- Estrazione materiali ferrosi;
- Separazione di materiale fine (< 20-30 mm);
- Trasporto all'impianto di termovalorizzazione.

Tipo di processo: meccanico

Uscita: Il sovrappiù combustibile che si ottiene ha un P.C.I. più elevato del rifiuto originale (2600-2800 Kcal/kg in più rispetto al rifiuto indifferenziato e una percentuale di ceneri più bassa del 15-20%).

La massa di materiale inviata all'impianto di termovalorizzazione è circa l'80% della massa in ingresso.

Impianto di separazione secco umido

Scopo: Effettuare un pretrattamento costituito dalla separazione della parte combustibile dalla parte

biodegradabile, con o senza separazione del fine.

Descrizione del processo:

- Scarico in fossa o su pavimento a raso;

- Carico dell'impianto con carroponte o con pala meccanica;
- Prima riduzione dimensionale;
- Estrazione materiali ferrosi;
- Separazione di materiale fine (< 20-30 mm) ;
- Separazione della Frazione Organica Putrescibile (FOP) con un vaglio (sezione di passaggio > 80 mm);
- Invio della frazione organica putrescibile alla stabilizzazione;
- Invio del sovrullo secco alla termovalorizzazione;

Tipo di processo: meccanico

Impianto di produzione CDR

Scopo: Spingere il trattamento per ottenere un combustibile qualificato (CDR) rispondente a standard fissati dalla normativa.

Descrizione del processo:

- Scarico in fossa o su pavimento a raso e carico dell'impianto con carroponte o con pala meccanica;
- Prima riduzione dimensionale;
- Estrazione materiali ferrosi;
- Separazione del FOP tramite vaglio (<60 mm) e suo invio alla stabilizzazione;
- Separazione dei materiali a maggiore densità dai sovrulli;
- Separazione dei metalli ferrosi e dei metalli non ferrosi;
- Seconda riduzione dimensionale (50*50 mm) ;
- Stoccaggio e invio a destinazione.

Tipo di processo: meccanico

A partire dal sovrullo secco ottenuto seguendo gli schemi visti le possibili alternative di produzione di CDR si articolano secondo linee costituite da tecnologie per la riduzione di pezzatura (tritatori o lacerasacchi) in serie con attrezzature per la separazione dimensionale (vagli), gravimetrica (classificatori ad aria e balistici) ed elettromagnetica (deferrizzatori) fino ad ottenere un CDR "sfuso" se non sono presenti macchinari per la compattazione finale come presse, addensatrici e pellettizzatrici che consentono invece di produrre rispettivamente un CDR "imballato", "pellettizzato" e "addensato".

Le prime due linee, molto semplificate, presentano un deferrizzatore elettromagnetico in serie con il raffinatore, seguito da un deferrizzatore: l'unica differenza fra le due è l'aggiunta di una pressa imballatrice nella seconda linea. Entrambe necessitano di un raffinatore in grado di

accettare materiali intriturbabili con danni minimi al sistema di taglio. I prodotti delle due linee sono rispettivamente CDR fluff sfuso e CDR imballato. La terza linea è dotata anche di un separatore di metalli non ferrosi (a correnti indotte) tra il deferrizzatore elettromagnetico e il raffinatore: anche in questo caso non è garantita l'eliminazione di materiali intriturbabili.

La quarta è una linea più complessa con l'inserimento di un separatore aeraulico o balistico fra il separatore a correnti indotte e il raffinatore, con lo scopo di salvaguardare il sistema di taglio del raffinatore. La separazione aeraulica è più efficiente ma con più ingolfamenti dovuti alla pezzatura grossolana del materiale. Nell'ultima linea la separazione aeraulica è inserita a valle del raffinatore (pertanto il raffinatore deve essere del tipo previsto nelle linee 1 e 2), con lo scopo di eliminare materiali pesanti ferrosi e non ferrosi, inerti e plastiche rigide, per salvaguardare le filiere delle pellettizzatrici che diversamente si otturerebbero. In questo caso potrebbe essere omesso il separatore a correnti indotte.

2.4 Criteri di scelta dei processi e delle tecnologie per la realizzazione degli impianti di selezione e di produzione di CDR

In linea di principio, il trattamento dei rifiuti ai fini del recupero di materiali e di energia, può portare a diversi benefici, come la minore necessità di estrazione e consumo di materie prime minerali e di combustibili convenzionali e, conseguentemente a questo, ad un minor consumo di prodotti ottenuti da materie prime vergini. Il passo successivo è quello di ottenere questi vantaggi con un buon rendimento economico e con un basso impatto ambientale.

La scelta dei processi e delle tecnologie negli impianti di trattamento dei rifiuti, compatibilmente a quanto detto e alla strategia europea (e del decreto Ronchi) sui rifiuti deve essere quindi orientata verso i seguenti obiettivi:

- ottenere il massimo rendimento dell'impianto, riferito sia alla quantità e qualità del materiale recuperato (anche energeticamente) che al consumo di energia conseguente al trattamento;
- ottenere le minime emissioni possibili, includendo in tale accezione le emissioni in ambiente di polveri, odori, acque reflue, rifiuti e rumori.

I processi realizzati devono quindi garantire, per ciascuno dei materiali selezionati, i livelli di qualità richiesti dalle filiere di recupero a valle del trattamento e realizzarli con il minimo impiego di risorse (soprattutto di energia) e il minimo impatto ambientale (soprattutto per quel che riguarda la produzione di rifiuti) possibili: generalmente schemi semplificati portano ad un aumento di affidabilità complessiva e ad una maggiore costanza nella produzione che aumenta la qualità del prodotto e risulta quindi non sempre conveniente utilizzare processi

molti spinti che aumentano sicuramente la qualità del prodotto, ma comportano anche un maggior consumo di energia e un aumento di costi di esercizio oltre che complicazioni e maggiori difficoltà impiantistiche.

Le tecnologie che coadiuvano i processi a loro volta devono essere dimensionate in base a valori definiti di materiale in ingresso (composizione del rifiuto e singoli quantitativi) e in uscita (quantitativi di materiale recuperato, anche energeticamente, per ogni frazione merceologica e quantitativi di materiale di scarto inviato a smaltimento in discarica) e le prestazioni delle apparecchiature devono essere stabilite in base alle loro capacità di trattamento in relazione al materiale in ingresso.

L'applicazione dei processi e delle tecnologie che soddisfano i requisiti appena descritti determina in generale, su tutte le tipologie d'impianto esaminate, i seguenti benefici:

- incremento della produttività degli impianti (maggiore automazione, maggiore affidabilità e minore necessità di manutenzione); minori costi di esercizio;
- miglioramento della qualità dei prodotti, che dipende dalla funzionalità delle tecnologie, soprattutto in termini di costanza delle caratteristiche dei materiali da avviare al recupero;
- maggiore sicurezza del lavoro, in quanto vengono eliminate in grande parte le operazioni manuali dirette sui rifiuti, il contatto con materiali polverosi, oggetti taglienti, il rischio dovuto a mezzi in movimento, a incendi, a esplosioni, ecc.
- maggiore sostenibilità ambientale sia per gli apparati produttivi che per gli impianti di abbattimento delle emissioni (una maggiore efficienza di recupero, una migliore utilizzazione delle risorse quali energia, acqua, materiali di consumo);
- maggiore controllabilità di tutto il sistema (la concentrazione delle lavorazioni in unità produttive più grandi e organizzate rende più controllabile tutto il sistema industriale del recupero, che tenderà per sé stesso a un maggiore autocontrollo).

A fronte di questi benefici si possono considerare:

- i costi di impianto, che, specialmente per piccole realtà locali, possono essere relativamente elevati;
- la sensibile riduzione di impiego di manodopera in un settore dove sono spesso presenti cooperative che utilizzano personale non altamente qualificato;
- impianti di grandi dimensioni al servizio di un grande bacino di utenza può comportare, entro certi

limiti, un aumento dei costi di trasporto a carico delle aziende che gestiscono la raccolta. In un sistema equilibrato questo fattore negativo è compensato dall'aumento di produttività degli impianti di recupero.

Va considerato, infine, che l'applicabilità dei processi e delle relative tecnologie che verranno in seguito descritti non può avere validità generale anche per lo stesso tipo di impianto, perché è legata a diversi fattori del contesto locale che ne influenzano sensibilmente le prestazioni, come:

- ✓ Le dimensioni e il tempo di vita residuo (“età”) dell'impianto;
- ✓ L'ubicazione e il contesto locale;
- ✓ Le caratteristiche dei rifiuti trattati (principalmente il contenuto di inquinanti);
- ✓ La presenza di vincoli di carattere tecnico;
- ✓ La legislazione e la pianificazione a livello regionale.

La Tabella seguente riporta una valutazione dell'applicabilità dei processi e delle migliori tecniche e tecnologie nei diversi tipi di impianti esaminati, basandosi sulla disponibilità di mercato e sui tempi tecnici di realizzazione delle installazioni. Alla valutazione dei tempi è associata anche una valutazione dell'ordine di grandezza della spesa necessaria per i vari tipi di adeguamento. L'impegno finanziario è alto se $> 500.000 \text{ €}$, medio se $> 150.000 \text{ €}$, basso se $> 25.000 \text{ €}$.

Di seguito verranno definiti gli indici per la valutazione delle prestazioni degli impianti, gli effetti e i presidi ambientali, i processi e le tecnologie da utilizzare ed infine verranno dati dei cenni sulla realizzazione e la gestione degli impianti.

2.5 Indici per la valutazione delle prestazioni degli impianti

Bilancio di materia

Il bilancio di materia, inteso come la definizione delle quantità in gioco dei vari flussi di materiali in

ingresso ed uscita dall'impianto, è indispensabile per:

- ✓ dimensionare in modo opportuno le varie sezioni di impianto;
- ✓ individuare una corretta logistica dei rifiuti in ingresso e dei materiali in uscita;
- ✓ valutare correttamente i rendimenti del processo e la produzione di scarti non recuperabili
- ✓ predisporre un bilancio economico dell'iniziativa.

Rendimento di recupero

Il rendimento di recupero η_r , è il rapporto tra la quantità complessiva di materiali selezionati

avviati ad impianti di recupero (Q_r) e la quantità totale di rifiuti in ingresso (Q_{tot}):

$$\eta_r = Q_r / Q_{tot}$$

ed è un indice delle prestazioni dell'impianto in termini di recupero globale di materia.

Rendimento di separazione

Il rendimento di separazione delle varie frazioni η_s , è il rapporto percentuale fra la quantità di materiale selezionata avviabile a recupero (F_s) e quella effettivamente contenuta nel rifiuto da separare (F_r), ricavata mediante analisi merceologica:

$$\eta_s = F_s / F_r$$

η_s è un indice dell'efficienza dell'impianto nella separazione di una particolare frazione di materiale e può variare anche di molto in dipendenza della selezione eseguita. Valori tipici di riferimento sono:

rendimento di separazione	selezione manuale	selezione meccanica
separazione umido da indifferenziato		70%
separazione materiali ferrosi da indifferenziato		70%
separazione materiali non ferrosi da indifferenziato		70%
separazione vetro da multimateriale e a 4 componenti		70%
separazione plastica da multimateriale a 4 componenti		70%
separazione del PET dal totale della plastica raccolta	90%	70%

2.6 Valutazione dell'impatto ambientale

Per analizzare gli impatti ambientali generati dalle operazioni di recupero e riciclaggio di materiali dai rifiuti si considerano:

- ✓ i consumi energetici connessi alla raccolta e al trattamento necessari per la selezione dei materiali rispondenti agli standard di accettazione delle filiere di riciclaggio;
- ✓ le emissioni nell'ambiente, quali:

1. la produzione di rifiuti connessa alle attività di trattamento dei rifiuti, la cui entità dipende dal modo con cui viene eseguita la raccolta differenziata e dalla qualità richiesta dagli impianti di riciclaggio (connessa a requisiti impiantistici ma anche alla purezza del materiale usato per prodotti che vengono immessi al consumo);
2. le emissioni in atmosfera, connesse al trasporto e alle lavorazioni, limitate in genere a emissioni di polveri e di odori;
3. il consumo di acqua e gli scarichi liquidi, di solito limitati;
4. le emissioni di rumori, che possono essere rilevanti se si usano macchine per riduzione

volumetrica (tritinatori, vagli).

Gli impianti di selezione e trattamento dei rifiuti ai fini di un loro successivo invio ad un circuito di recupero presentano, nella maggior parte dei casi, un bilancio energetico e ambientale positivo se si mettono in conto i recuperi di energia, il risparmio di risorse e le emissioni evitate per il mancato smaltimento dei materiali avviati al recupero.

I fattori che influenzano questi bilanci sono molteplici e riguardano la qualità dei rifiuti che vengono trattati dagli impianti, in particolare: la tipologia di rifiuto; il contenuto di impurità (se si tratta di flussi di raccolta differenziata) ovvero la quantità di rifiuto effettivamente riciclabile; il contenuto di sostanze pericolose; lo stato fisico rispetto alle caratteristiche di lavorazione richieste dall'impianto.

Gli impianti di selezione per la produzione di frazione secca o CDR possono essere soggetti agli stessi criteri di analisi se si tiene conto che sono realizzati per produrre materiali da avviare a recupero energetico e invece sono considerati ambientalmente positivi solo quando viene assicurata la valorizzazione energetica del CDR in impianti dedicati o in coincenerimento o in cocombustione. In generale, per questi impianti, si deve cercare di realizzare cicli con il massimo recupero netto di energia, tenuto conto di tutte le condizioni d'uso.

3.PROCESSI DI SEPARAZIONE DEI RIFIUTI URBANI

In questo paragrafo verranno trattati i processi di separazione applicabili al trattamento dei rifiuti urbani, le relazioni e le leggi che regolano dette tecniche di separazione. I processi di separazione dei rifiuti si basano sul criterio generale di *codifica e commuta*; in altre parole un processo di separazione di materiali è reso possibile lì dove sia possibile *identificare* un criterio di selezione (ad esempio oggetti costituiti in prevalenza da uno stesso materiale hanno misura simile) e stabilire una tecnica di *selezione* degli stessi rispetto alla restante parte (gli stessi oggetti possono essere separati per dimensione geometrica). Di fatto ogni singolo oggetto costituente un rifiuto ha proprie dimensioni geometriche che spesso risultano diverse rispetto al prodotto originario (si pensi ad una bottiglia in polietilene (PET) prima e dopo lo schiacciamento) anche in relazione alle modalità di applicazione delle forze deformanti; la presenza significativa di specifici materiali nell'oggetto da separare rende inoltre conto di altre caratteristiche dello stesso, quali densità, proprietà magnetiche, etc. Dette caratteristiche possono essere sfruttate per processi di separazione al fine di selezionare materiali aventi caratteristiche tali da poter essere convenientemente riutilizzati e conseguentemente commercializzati.

Gli impianti a recupero possono essere più o meno complessi a seconda delle frazioni che si vogliono recuperare. In generale le linee di selezione contemplano, seppur in diversa sequenza, alcune unità standard di trattamento meccanico.

3.1 Principi generali dei sistemi di selezione

Si definiscono sistemi di selezione tutti i procedimenti che permettono di separare diverse frazioni di rifiuti con l'obiettivo di:

- recuperare materiali (carta, plastica, vetro, metalli, legno, tessili, Frazione Organica Stabilizzata);
- produrre materiale combustibile per il recupero energetico;
- ottimizzare i trattamenti successivi;
- separare materiali di per sé pericolosi (Rifiuti Urbani Pericolosi) o pericolosi per i trattamenti successivi.

I sistemi di selezione sono principalmente costituiti da raccolta separata dei flussi ed impianti di selezione meccanica e manuale.

Gli impianti di selezione impiegano principalmente sistemi meccanici o manuali per ottimizzare quantità e qualità dei materiali recuperabili dai rifiuti, ovvero semplificare o

facilitare i processi di recupero energetico. Le principali tipologie di impianti di selezione meccanica sono realizzati per rispondere alle seguenti esigenze:

- A. separare dal flusso principale il materiale fine (<20 mm) costituito in varia misura da organico putrescibile e da una frazione secca. La selezione del materiale fine migliora le caratteristiche del sopravaglio (o sovvallo) perché sia nella componente secca che in quella putrescibile sono concentrate generalmente sostanze inquinanti e hanno un alto contenuto di ceneri;
- B. separare il materiale fine e il materiale secco di sovvallo per produrre FOP (Frazione Organica Putrescibile) da inviare a trattamento biologico;
- C. produrre una frazione ad alto potere calorifico ottenuta separando la FOP ed eventualmente la frazione fine, da cui con successivi trattamenti si può ottenere CDR (Combustibile Da Rifiuto) a norma.

La selezione meccanica si può eseguire anche su rifiuti sottoposti ad un processo di essiccazione o di bioessiccazione allo scopo di ottenere CDR a norma.

Di norma gli impianti di tipo A. sono costituiti da macchine per la riduzione di pezzatura (tritatori o rompisacchi) fino a quella compatibile con le lavorazioni successive; vagli rotanti o vibranti o a dischi. Da tali impianti si ottengono due prodotti:

- ✓ un sovvallo costituito soprattutto da carta e cartone, plastica, legno, stracci (si suppone che quasi tutto l'organico putrescibile sia passato sotto il vaglio), e che ha caratteristiche tali da migliorare il funzionamento e le prestazioni dei termovalorizzatori, diminuire l'impatto ambientale in caso di conferimento in discarica, migliorare il rendimento di successivi impianti di selezione più spinti;
- ✓ un sottovaglio fine che deve essere stabilizzato e/o successivamente selezionato, poiché non può essere messo in discarica senza una stabilizzazione biologica.

Gli impianti di tipo B. sono costituiti almeno da macchine per la riduzione dimensionale, deferrizzatori e vagli. Essi producono:

- ✓ un sovvallo costituito dalla frazione secca ad alto potere calorifico (generalmente superiore a 3100 MJ/kg);
- ✓ una FOP che può essere utilizzata, dopo biostabilizzazione, come materiale di copertura per discarica o di riempimento stradale;
- ✓ materiali ferrosi che possono essere inviati al riutilizzo; un sottovaglio fine del tipo sopra menzionato.

Gli impianti di tipo C. includono al sistema degli impianti di tipo B. trituratori della frazione secca per ottenere una pezzatura compatibile con la tecnologia di termoutilizzazione, dando luogo agli stessi prodotti degli impianti di tipo B.

Il combustibile da rifiuti è il materiale ricavato dai rifiuti solidi urbani (dopo separazione delle frazione destinate al recupero di materia attuata con la raccolta differenziata) mediante trattamento finalizzato all'eliminazione di sostanze pericolose per la combustione e a garantire un adeguato potere calorico, e che possiede le caratteristiche individuate dalle specifiche norme tecniche. Pertanto il CDR sarà tipicamente il prodotto finale di un trattamento di raffinazione che riguarderà la frazione secca ottenuta per separazione meccanica dei RU indifferenziati o dei rifiuti bioessiccati.

Nella produzione di CDR possono essere presenti nella normativa vigente fino al 50% in peso rifiuti dichiarati assimilati agli effetti di tale recupero costituiti da plastiche non clorurate poliaccoppiati, gomme sintetiche non clorurate, resine e fibre artificiali e sintetiche con contenuto di cloro inferiore a 0,5% in massa, pneumatici fuori uso. Il trattamento di raffinazione sarà costituito tipicamente dalle seguenti fasi:

- ✓ riduzione dimensionale ed omogeneizzazione dei materiali secchi grezzi;
- ✓ deferrizzazione;
- ✓ asportazione di materiali non ferrosi;
- ✓ asportazione di materiali inerti (vetro, ceramiche, sassi, inerti vari) con sistemi balistici;
- ✓ triturazione (per ottenere la pezzatura richiesta ai fini della termoutilizzazione);
- ✓ pressatura con reggette di plastica, addensamento o pellettizzazione, in funzione delle modalità di trasporto e di alimentazione degli impianti di termorecupero.

Il CDR si presenta come combustibile alternativo utilizzabile in co-combustione con altre fonti primarie in impieghi industriali quali centrali termoelettriche o cementifici alimentati con polverino di carbone, sistemi in genere di produzione di energia elettrica e/o calore, utilizzando altri combustibili solidi alternativi.

3.2 Unità di accettazione

E' costituita dalla fossa di scarico dei RSU, di solito in calcestruzzo, profonda 6-10 m e con capacità tale da assicurare almeno 2-3 giorni di produzione.

Il flusso di rifiuti in ingresso conferito attraverso gli automezzi di raccolta stradale (autocompattatori o altro), dopo essere stato quantificato con una pesa di tipo elettronico, deve essere scaricato.

Lo scarico può avvenire in fosse di accumulo chiuse e mantenute in depressione da cui vengono estratti tramite benna a polipo azionata idraulicamente e montata su carroponete, oppure su platee di ricezione da cui vengono alimentati all'impianto con benna o pala meccanica.

Le fosse di accumulo consentono di minimizzare gli spazi richiesti, ma hanno molti inconvenienti – soprattutto ai fini di una successiva selezione. In primo luogo il fatto che si ha una intensa miscelazione e che i rifiuti alimentati sono spesso gli ultimi arrivati (metodo *Last In First Out*). Questo fatto crea qualche problema nelle successive fasi di separazione in quanto il contatto tra sostanza secca e sostanza organica provoca un'umidificazione eccessiva della frazione secca e conseguente "incollamento" la cui separazione può diventare difficoltosa.

Le platee di ricezione presentano i seguenti vantaggi rispetto alla fossa di accumulo:

- Possibilità di lavorare successivamente sempre rifiuti freschi e quindi con migliori rese di separazione (metodo *First In First Out*);
- Minori costi di investimento;
- Possibilità al fine turno di lavoro di sottoporre a pulizia la platea con conseguenti vantaggi di tipo igienico;
- Minori rischi di "fermo impianto" causati da problemi al sistema carroponete benna dal momento che le macchine operatrici utilizzate in alternativa (pala o benna mobili) sono di facile reperibilità anche a noleggio;
- Possibilità di eseguire agevolmente una prima cernita e di scartare i materiali indesiderabili (voluminosi, elettrodomestici, pneumatici, mobili, bombole), preservando le apparecchiature poste a valle da problemi di intasamento e manutenzione.

Il volume della fossa è dato da:

$$V_{(m^3)} = 48 \frac{P_m}{p_s}$$

P_m = potenzialità massima dell'impianto (t/h);

p_s = peso specifico dei rifiuti in fossa (0,35-0,4 t/m³)

Per il dimensionamento delle benne di caricamento, generalmente si scelgono benne con un numero minimo di 4 valve; per il dimensionamento del volume della benna si deve tener conto della durata effettiva del turno di lavoro T_{eff} e della portata oraria della benna Q_{oraria} :

$$T_{eff} = C * T_{turno} \quad , \text{ con } C = 0,8$$

$$Q_{oraria} = Q / T_{eff} \quad , \text{ con } Q = \text{potenzialità}$$

da cui si ricava il volume della singola bennata:

$$V = \frac{Q_{oraria}}{n^{\circ} \text{ bennte/h}} \quad , \text{ calcolando in genere 6 bennate/h}$$

3.3 Unità di apertura sacchi, triturazione, macinazione

Per le operazioni di selezione e vagliatura è necessaria preliminarmente l'apertura dei sacchetti. Dispositivi lacera-sacchi, che svolgono anche una funzione di rottura di materiali come le scatole di cartone, sono disponibili sotto forma di:

- Macchine a cilindri controrotanti dentati
- Macchine a coltelli rotanti o fissi o a contrappesi
- Macchine a piastre e catene
- Nastri dilaceratori
- Sistemi a filo rotante

Questa stessa funzione, unita ad una blanda triturazione del materiale, è svolta anche dai trituratori e dai mulini a coclee. Trituratori più distruttivi non appaiono opportuni, qualora si debba successivamente operare una vagliatura del materiale per separare la frazione umida dalla frazione secca.

Prima della vagliatura, infatti, la triturazione deve essere lacerante ma non distruttiva, in modo tale da diminuire le dimensioni della frazione leggera e sminuzzare la frazione organica putrescibile, ma senza determinare la frammentazione di inerti metallici e la commistione delle varie componenti.

Le diverse tipologie di mulini trituratori disponibili – a martelli, a coltelli – sono risultati in genere inadeguati se non controproducenti quando impiegati a monte della fase di vagliatura.

In particolare i *trituratori o mulini a martelli*, i più diffusi, sono sicuramente quelli che presentano i maggiori problemi nelle normali condizioni d'uso. Infatti a causa dell'elevata velocità di rotazione dei martelli, i materiali non resilienti (vetro, pietre ecc.) vengono polverizzati ed i materiali poco elastici (sostanza organica putrescibile) vengono sminuzzati

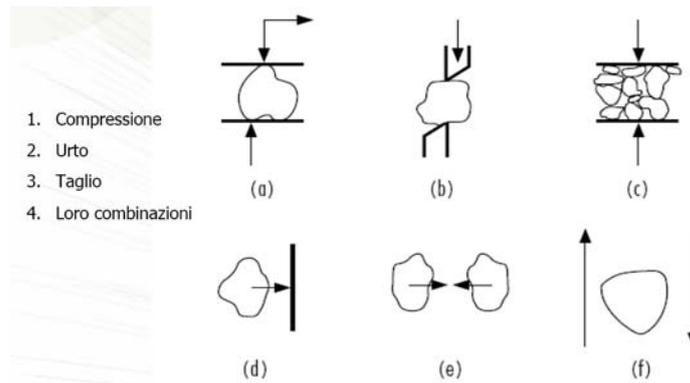
molto finemente. Nella configurazione più diffusamente adottata, ne risulta un sottovaglio (< 50 mm) che ingloba, oltre ad una gran parte della frazione organica finemente sminuzzata anche la quasi totalità della frazione inerte e del vetro e oltre il 50- 60% della frazione combustibile. Aumentando la spaziatura delle griglie del mulino al di sopra di 80 mm si può ottenere un miglioramento dell'efficacia di triturazione, almeno per la frazione organica putrescibile e per quella combustibile (plastiche). La frazione inerte, a causa della vera e propria macinazione cui è sottoposta, è indifferente alle variazioni di spaziatura delle griglie del mulino, in quanto l'impatto con i martelli riduce la stragrande maggioranza delle particelle a dimensioni molto fini (qualche mm). L'aumento della spaziatura delle griglie risulta molto efficace anche sui consumi energetici che si possono ridurre anche al 30% dei consumi registrati con spaziatura di 80 mm.

I *trituratori a coltelli* operano a velocità molto inferiori a quelle caratteristiche dei mulini a martelli, in quanto l'azione triturante non è ottenuta in seguito all'impatto ma con l'azione di taglio delle lame rotanti. Il risultato della loro azione è una triturazione più omogenea delle varie componenti dei rifiuti, con una scarsa differenziazione granulometrica tra le varie componenti e in specie della frazione combustibile e compostabile, anche se consente una ridotta frantumazione del materiale inerte. Pertanto il loro impiego sembra più efficace per tritare la frazione combustibile da avviare alla classificazione ad aria oppure in fase di raffinazione del compost nel caso in cui non sia stato previsto un mulino in testa all'impianto o nel caso in cui quest'ultimo si limiti ad una primaria grossolana triturazione.

La triturazione, soprattutto nel caso si debba condizionare anche la frazione secca o produrre un combustibile è invece necessaria per i rifiuti ingombranti. Per la pre- triturazione sono impiegate specifiche unità trancianti e di frantumazione (ad esempio con rotor a cesoie), per la triturazione fine possono essere usati mulini a martello o a coltelli.

La macinazione, indipendentemente dal dispositivo utilizzato, è una delle operazioni più onerose dal punto di vista degli investimenti di capitale e di costi operativi.

L'applicazione di energia meccanica da luogo a diversi meccanismi di rottura: compressione, urto, taglio.



Per calcolare il consumo di energia necessaria alla comminuzione esistono varie leggi empiriche, come illustrato in 3.1.

$n = 1.0$ legge di Kick,

$n = 2.0$ legge di Rittinger,

$n = 1.5$ legge di Bond).

$$\frac{dE}{dD} = -\frac{C}{D^n}$$

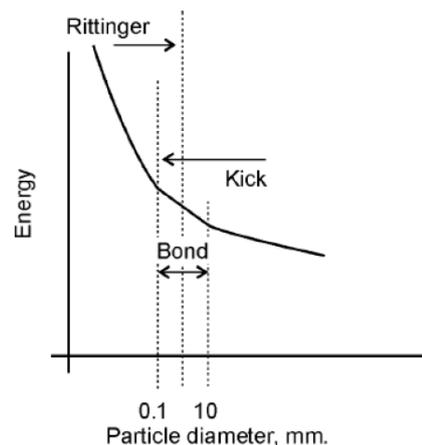


Figura 3.1 – legge del consumo di energia per comminuzione

L'equazione generale indica il quantitativo di energia richiesta (dE) per produrre una variazione di dimensione (dD) dell'unità di massa del materiale, dipende dalle dimensioni che si vogliono ottenere (D^n).

Più in dettaglio, si avrà:

- ✓ $n = 1$: ipotesi di Rittinger. L'energia richiesta è proporzionale alla nuova superficie prodotta a seguito del processo di riduzione dimensionale. (per macinazioni molto fini in cui l'aumento di superficie per unità di massa è molto elevato)

$$E = C' \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right)$$

con E = Energia richiesta

$C' = C_r * f_c = \text{cost}$; C_r = costante di Rittinger, f_c = durezza del materiale

D_1 = Diametro delle particelle prima della macinazione

D_2 = Diametro delle particelle dopo la macinazione

- ✓ $n = 2$: ipotesi di *Kick*. L'energia richiesta è proporzionale alla nuova superficie prodotta a seguito del processo di riduzione dimensionale (per la macinazione più grossolana);

$$E = C \ln \frac{D_1}{D_2}$$

- ✓ $n = 1.5$: ipotesi di Bond: non si basa su un'ipotesi teorica, ma empirica. Il lavoro speso nella comminazione è proporzionale al volume totale delle particelle da comminuire.

$$E = 2C' \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right)$$

Nel *frantoio a mascelle* la comminazione è operata applicando azioni di compressione. Procediamo allo studio del sistema delle forze, con riferimento alla Figura 3.2.

Occorre tener conto delle forze di compressione F, F' e dell'attrito tra solido e mascelle, in virtù del quale la particella non schizza via dalla camera di compattazione. Per la presenza di attrito si generano due componenti tangenziali, T, T' . Chiamato θ l'angolo di presa e P la forza peso, possiamo tracciare l'equilibrio nella direzione orizzontale:

$$F - F' \cos \theta - T' \sin \theta = 0$$

Tra la componente tangenziale T e quella normale F sussiste la relazione $T \leq fF$, $T' \leq fF'$ dove $f = \tan \varphi$: coefficiente di attrito, essendo φ : angolo di attrito.

Nella condizione limite di aderenza tra solido e mascella vale la condizione $T = fF$ l'equilibrio dei momenti con polo O :

$$T \cdot R - T' \cdot R = 0 \rightarrow T = T'$$

Nella condizione limite di aderenza tra solido e mascella vale la condizione $F = F'$.

Calcolando nuovamente il bilancio nella situazione limite: $F(1 - \cos \theta) = T \sin \theta$

da cui, mediante semplici passaggi, si ricava la condizione limite di aderenza $\theta \leq 2\varphi$

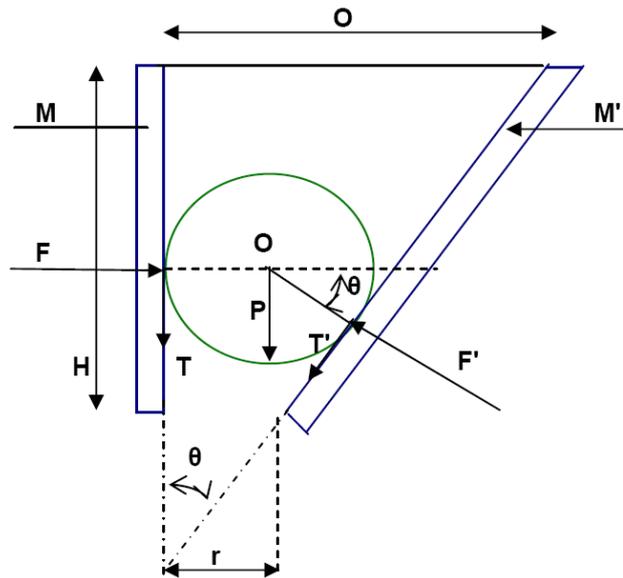


Figura 3.2 – frantoio a mascelle

Il *mulino a rulli* sfrutta le forze di compressione; è costituito da due cilindri, con diametro variabile da pochi cm fino ad un metro, che ruotano attorno al loro asse longitudinale, schiacciando il materiale da comminuire. A seconda del grado di finezza desiderato, viene regolata la distanza tra i cilindri.

Studiamo l'equilibrio delle forze, con riferimento alla Figura 3.3.

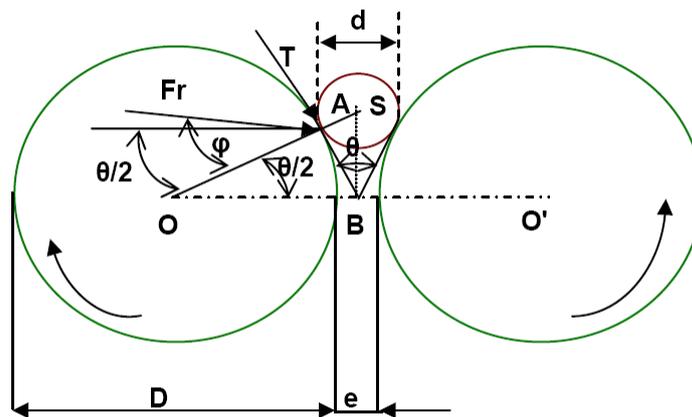


Figura 3.3 – frantoio a rulli

Considerato il triangolo OSB, si ha:

$$OB = OS \cos \theta/2 \quad ; \quad \left(\frac{D}{2} + \frac{e}{2} \right) = \left(\frac{D}{2} + \frac{d}{2} \right) \cos \frac{\theta}{2}$$

Applicando l'equazione di bilancio delle forze, si ha $\theta \leq 2\varphi$.

$$\text{Se } \frac{\theta}{2} \leq \varphi \Rightarrow \cos \frac{\theta}{2} \geq \cos \varphi \quad \text{essendo} \quad \cos \frac{\theta}{2} = \frac{D+e}{D+d} \geq \cos \varphi$$

Data la dimensione d delle particelle da ridurre, si può ricavare il diametro minimo D_{\min} tale da garantire la presa sfruttando l'attrito, mediante la disuguaglianza:

$$D+e \geq (D+d)\cos \varphi \quad \text{da cui segue} \quad D \geq \frac{d \cos \varphi - e}{1 - \cos \varphi}.$$

Allo stesso modo, data la dimensione delle particelle D , si può ricavare la dimensione massima d_{\max} iniziale dei solidi da comminuire mediante la disuguaglianza:

$$d \leq \frac{D(1 - \cos \varphi) + e}{\cos \varphi}$$

È possibile ricavare dal valore della forza di compressione e dalle caratteristiche di funzionamento dell'apparecchiatura l'entità della potenza P richiesta, espressa da

$$P = M_{\text{tot}} \cdot \omega, \text{ essendo la velocità angolare } \omega = \frac{v}{R} = \frac{2v}{D}.$$

L'applicazione della forza genera, per ciascun tamburo, un momento M_C con polo O pari a

$$M_C = F \cdot \frac{D}{2} \sin \frac{\theta}{2}.$$

La potenza richiesta sarà dunque pari a

$$P = FD \sin \frac{\theta}{2} \cdot \frac{2v}{D} = 2 \sin \frac{\theta}{2} v \frac{F}{L \cdot D} \cdot \frac{L}{D} \cdot D^2, \quad \text{con } L = \text{lunghezza del tamburo}.$$

Si possono così confrontare apparecchiature, diverse per ingombro e tipologia di solidi trattati, ma geometricamente simili, ovvero con stessa v , oppure stessa forza specifica di macinazione $\frac{F}{LD}$, stesso rapporto dimensionale $\frac{L}{D}$.

Agevolmente si può ricavare la quantità di materiale macinato. La quantità massima teorica Q_{\max} è dedotta ipotizzando che, se lo spazio intermedio tra i due cilindri, di lunghezza e , fosse occupato interamente dalle particelle, lo si può pensare come una striscia di materiale che sfilava in continuo tra i due cilindri:

$$Q_{\max} = \rho_p \cdot v \cdot e \cdot L$$

ove

ρ_p = densità del materiale

v = velocità periferica di rotazione

$e \cdot L$ = superficie attraversata.

Nella realtà la quantità reale va calcolata tenendo conto degli spazi vuoti lasciati dalle particelle, per cui $Q_{eff} = 20 - 30\% \cdot Q_{max}$.

Il *mulino a martelli* è formato da una camera cilindrica e da un asse centrale con 2 – 8 martelli snodati di acciaio inossidabile. Nella parte inferiore del mulino c'è una griglia intercambiabili per l'espulsione del materiale macinato. Quando l'asse ruota, i martelli, per effetto della forza centrifuga, si dispongono radialmente e macinano il materiale introdotto dall'alto, sfruttando le forze di impatto. È un dispositivo particolarmente adatto per la macinazione ad umido.

Per calcolare le forze di comminazione, si faccia riferimento alla Figura 3.4.

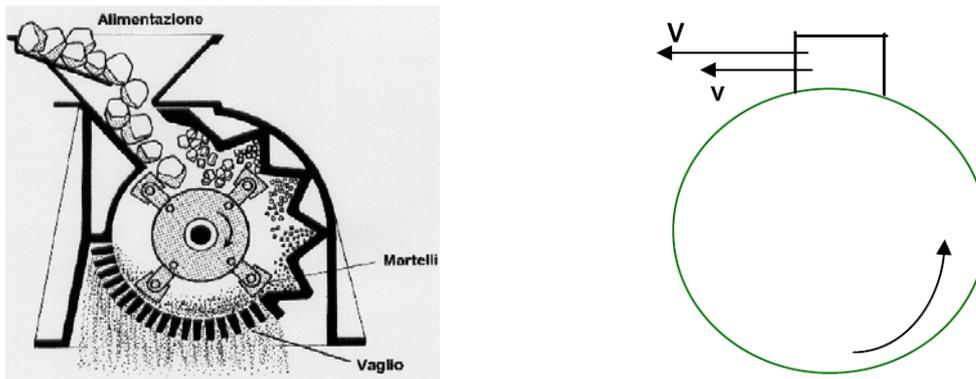


Figura 3.4 – mulino a martelli

Quando il martello incontra la particella, trasferendo la propria energia cinetica, le conferisce una velocità V , funzione inversa dell'elasticità della particella, pari a:

$$V = (1 + r)v$$

ove

v = velocità periferica di rotazione

r = coefficiente di restituzione.

Il tempo di trasferimento dell'energia cinetica dal martello alla particella a seguito dell'urto è

circa $\frac{1}{1000} \div \frac{1}{2000}$ sec.

La forza applicata alla singola particella è pari a:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{V}{t} = m \cdot \frac{(1 + r)v}{t}$$

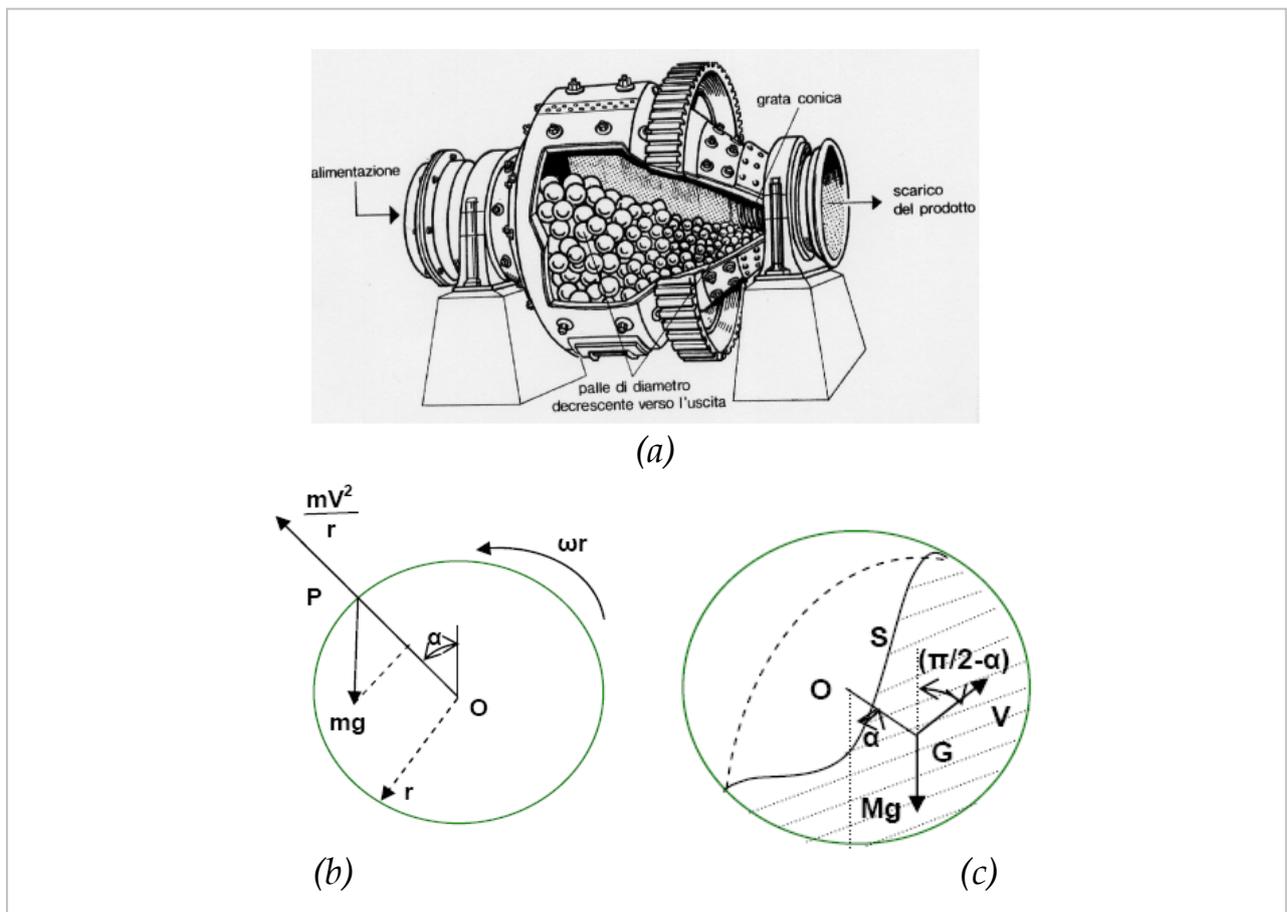
Tale forza deve essere maggiore delle resistenze opposte dalla particella ai meccanismi di rottura.

Il *mulino a sfere* è costituito a un tamburo rotante, parzialmente riempito con sfere di materiale diverso, che costituiscono gli elementi macinanti. Il tamburo ruota intorno al suo asse longitudinale e la macinazione avviene mediante impatto ed attrito, a causa del movimento delle sfere all'interno del tamburo.

Data la velocità di rotazione ω del tamburo (si faccia riferimento alla 3.5b), nel moto interno la particella si stacca dalla superficie interna del tamburo, seguendo una traiettoria parabolica, risultante dalla combinazione tra la velocità tangenziale della particella, soggetta alla forza peso. Nel punto P vale l'uguaglianza tra la componente radiale della forza peso e la forza centrifuga:

$$m \cdot \frac{v}{r} = mg \cos \alpha, \quad \text{con} \quad \cos \alpha = \frac{v^2}{gr} = \frac{2v^2}{gD}$$

Figura 3.5 – mulino a sfere



La velocità di rotazione del tamburo può essere variabile. La velocità critica di centrifugazione è quella alla quale la forza centrifuga che agisce sulle sfere a contatto con la parete del cilindro nel punto più alto del percorso è uguale alla forza di gravità. La velocità di rotazione ottimale è compresa tra il 60% e l'80% della velocità critica: infatti in questa situazione le sfere ricadono sul materiale con un moto a cascata, macinandolo efficacemente (Figura 3.6c), mentre a velocità più bassa le sfere rotolano le une sulle altre, con un moto a cataratta, poiché l'energia trasferita non è sufficiente ad imprimere alle particelle un moto parabolico (Figura 3.6a), e a velocità più alta le sfere restano aderenti alle pareti del tamburo, soggette alla forza centrifuga (Figura 3.6b).

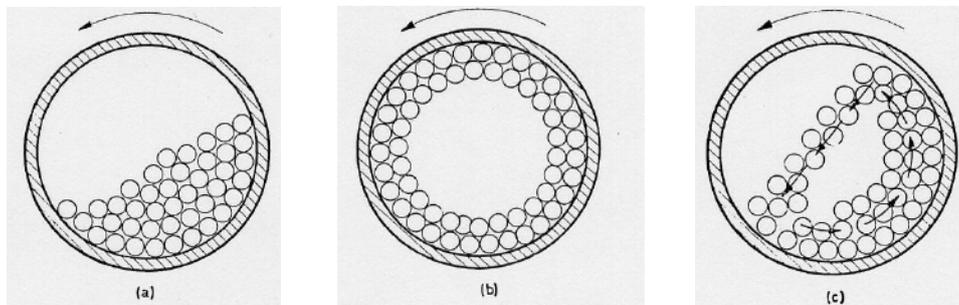


Figura 3.6 – moto rotativo delle particelle all'interno del mulino a sfere

L'azione che il mulino deve trasferire alle particelle per imprimere il moto a cascata non è diretta a tutto il materiale, ma solo ad una porzione di massa $M' = k \cdot M$, ($k < 1$). Tenendo conto delle zone vuote nel mulino, la massa di particelle è pari a $M = \rho_a \frac{\pi D^2}{4} \cdot Gr$, ove Gr corrisponde al grado di riempimento del tamburo. Considerando la porzione di particelle, contenuta nella zona tratteggiata in Figura 3.6c, soggetta all'azione di mescolamento, concentrata nel baricentro G , la particella assume dimensioni infinitesime di massa M' .

La potenza, a meno delle perdite di energia per attrito, è espressa da

$$P = (Mom) * (\omega) = (M' g \cdot s) * \left(\frac{2v}{D} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \right), \quad \text{ovvero}$$

$$P = k \cdot \rho_a \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot Gr \cdot g \cdot s \cdot \sin \alpha \cdot \frac{2v}{D}.$$

3.4 Unità di vagliatura

La vagliatura ha lo scopo di suddividere i rifiuti pretriturati, in due o più frazioni con composizione e caratteristiche differenti mediante appositi separatori.

I separatori possono essere suddivisi nelle seguenti principali categorie:

- Vagli rotanti
- Separatori balistici
- Separatori vibranti (questi ultimi idonei però soprattutto in fase di raffinazione secondaria)

I *vagli rotanti*, i più diffusi, sono costituiti da un cilindro rotante di grandi dimensioni in lamiera forata calandrata ed intercambiabile. Sono disponibili soluzioni con interni esagonali od ottagonali anziché cilindrici. Il tamburo è generalmente inclinato di qualche grado. La velocità di rotazione e l'inclinazione sono generalmente regolabili. Il materiale alimentato viene separato in due flussi, un sottovaglio ed un sopravaglio le cui caratteristiche dipendono sostanzialmente dalla dimensione dei fori di passaggio.

I *separatori balistici* sfruttano invece le caratteristiche di aderenza di ciascun materiale. La macchina è costituita da un nastro inclinato (in qualche caso anche un semplice tamburo orizzontale che ruota intorno al proprio asse). Il materiale cade sopra di esso dalla tramoggia di alimentazione, e le diverse proprietà dei materiali contenuti fanno sì che parte del materiale (tipo vetro, ferro, plastica pesante ed inerti) venga proiettato in una tramoggia mentre le sostanze con maggiore aderenza (sostanza organica) cadono in una seconda tramoggia. La velocità di scorrimento/rotazione e l'inclinazione sono regolabili in funzione del processo.

Nella maggior parte dei separatori, con l'eccezione del separatore balistico, si ha suddivisione del materiale in ingresso sulla base delle dimensioni dei fori di passaggio dell'apparecchiatura:

- Frazione grossolana (costituita prevalentemente da plastica in film, tessuti, carta). Tale frazione è il sovravaglio della vagliatura, cioè lo scarto del setaccio. Il contenuto di ceneri e metalli è in genere basso, in seguito all'assenza o quasi di materiali fini
- Frazione fine (costituita prevalentemente da residui alimentari, carta bagnata, inerti).

Un grado di separazione del 100% si ha quando la frazione grossolana è totalmente priva di materiale fine. I separatori attualmente in commercio raggiungono un grado di separazione del 75-90%.

I separatori balistici hanno in genere un'efficienza superiore ai vagli rotanti. Il coefficiente di separazione è influenzato da diversi fattori:

- ✓ numero di passaggi nel separatore cioè il numero di volte che la frazione fine del rifiuto viene fatta passare attraverso i fori del separatore;
- ✓ umidità del rifiuto alimentato. All'aumentare dell'umidità aumenta la coesione tra le componenti del rifiuto e diminuisce pertanto l'efficienza di separazione.

Al contrario un rifiuto troppo secco dà luogo alla formazione di polveri. Nella configurazione del separatore i fattori che più influiscono sono la velocità periferica (vaglio rotante) la frequenza di vibrazioni (vaglio vibrante) ed il carico. Nel vaglio rotante la regolazione quantitativa delle due frazioni separate si effettua oltre che sui suddetti parametri agendo anche sulla forma del vaglio, dei fori e sull'inclinazione del tamburo.

Il problema maggiore che si incontra nei separatori è il mantenimento del grado di efficienza richiesto durante l'esercizio. Infatti, la progressiva ostruzione dei vagli è la principale causa del decadimento delle prestazioni.

I separatori a vaglio richiedono pertanto onerose operazioni di manutenzione e pulizia. In generale tanto più sono ravvicinati i fori del vaglio tanto più aumenta la probabilità di intasamento. Per ovviare a tale problema sono state proposte soluzioni diverse, che prevedono l'inserimento all'interno del separatore di catene, lame o altri dispositivi atti a lacerare ulteriormente il rifiuto.

Nei processi di separazione come quello di vagliatura si ricorre ad un approccio probabilistico. Considerando piccoli spostamenti, illustrati in Figura 3.7, la particella non compie una traiettoria circolare, ma si muove lungo la tangente, con spostamenti di ampiezza e , essendo il vaglio inclinato nel senso del moto di un angolo β . La particella, soggetta alla gravità \vec{g} viene allontanata dalla superficie del vaglio con un'accelerazione \vec{a} , espressa dal vettore inclinato di un angolo α , con modulo $\vec{a} = \omega^2 \cdot e$. Le componenti del vettore accelerazione e gravità nella direzione ortogonale alla superficie del vaglio, equivalgono a:

$$g_n = g \cos \beta$$

$$a_n = a \sin(\alpha + \beta).$$

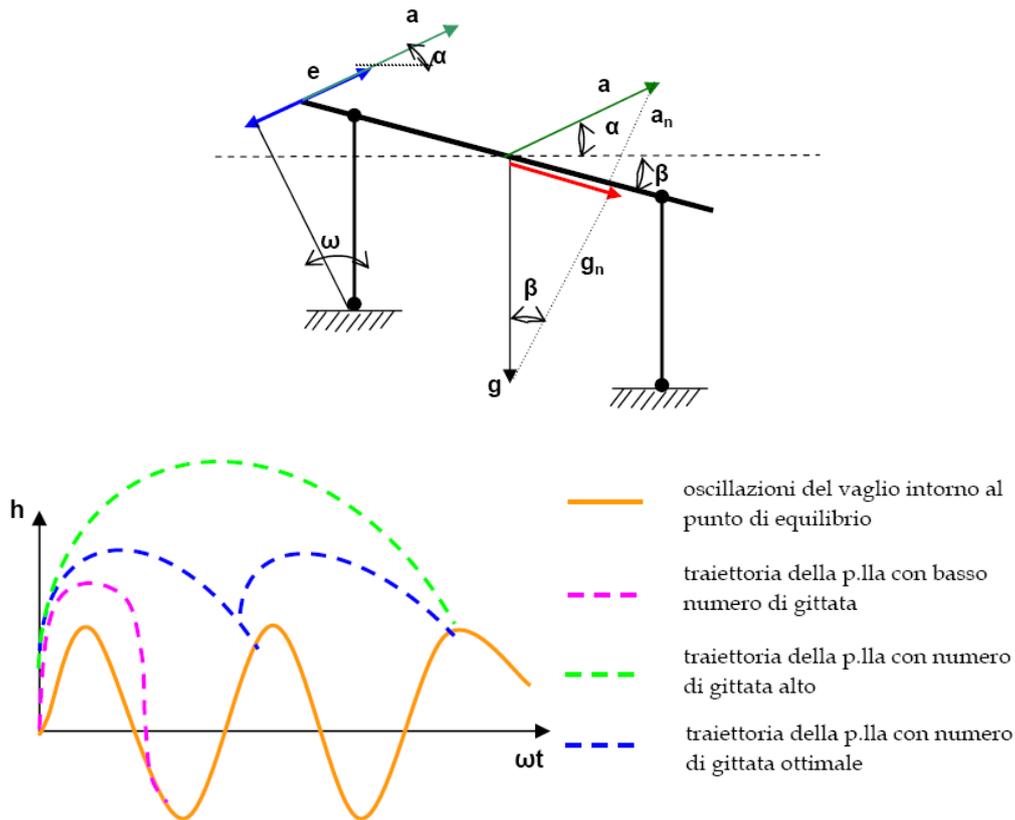


Figura 3.7 – dinamica del moto all'interno di un vaglio

Il parametro k_v , chiamato numero di gittata, indica l'ampiezza della traiettoria che la particella compie prima di ridiscendere sul vaglio sotto l'azione del proprio peso; è espresso da:

$$k_v = \frac{a_n}{g_n} = \frac{\omega^2 e \cdot \sin(\alpha + \beta)}{g \cos \beta}$$

Le oscillazioni del vaglio intorno ad una posizione di equilibrio, sono solidali con quelle della posizione h di una particella sulla superficie. Se nella posizione corrispondente a $\omega t = 0$ sulla superficie del vaglio giace una particella, allora essa verrà scagliata ad una distanza direttamente proporzionale al numero di gittata. Esiste un valore ottimale del numero di gittata, pari a $k_v = 3,3$ per il quale la particella, dopo essere stata allontanata, incontra il vaglio sempre alla stessa altezza, percorrendo dunque la stessa traiettoria (indicata in blu in Figura 3.7), per cui ad ogni oscillazione corrisponde effettivamente un contatto tra vaglio e particella. Per valori di $k_v > 3,3$ la traiettoria risultante è più ampia del dovuto (indicata in verde in Figura 3.7), ed alcune oscillazioni non risultano efficaci.

Per i vagli rotanti la condizione critica riguarda la velocità di rotazione del tamburo: se la velocità è troppo elevata la particella entra in moto centrifugo, restando adesa alla superficie

del vaglio, annullandone l'effetto vagliante. La condizione limite è che in posizione verticale la forza centrifuga venga equilibrata dalla gravità:

$$mg = ma \quad \text{ovvero} \quad g = a = \frac{\omega^2 D}{2}$$

In questa condizione la velocità critica di rotazione è espressa da $\omega_c = \sqrt{2g/D}$. Minore è il valore della velocità, migliore è il rimescolamento delle particelle nel vaglio, tuttavia deve essere sufficiente a vincere le forze di scivolamento per attrito. Nella pratica si tara la velocità della rotazione a valori di circa il $60\% \omega_c$.

Il rimescolamento è controllato assicurando un grado di riempimento del tamburo di circa il 40%. Nel dimensionamento del vaglio a tamburo rotante si fa riferimento ad una funzione empirica:

$$D = \left(\frac{11.36 \cdot Q_m}{\rho_s \cdot Gr \cdot k_v \cdot \sqrt{g} \cdot \tan \alpha} \right) \quad \text{ove } \alpha = \text{angolo di inclinazione del vaglio (3 - 4}^\circ\text{)}$$

Figura 3.8 - vaglio vibrante

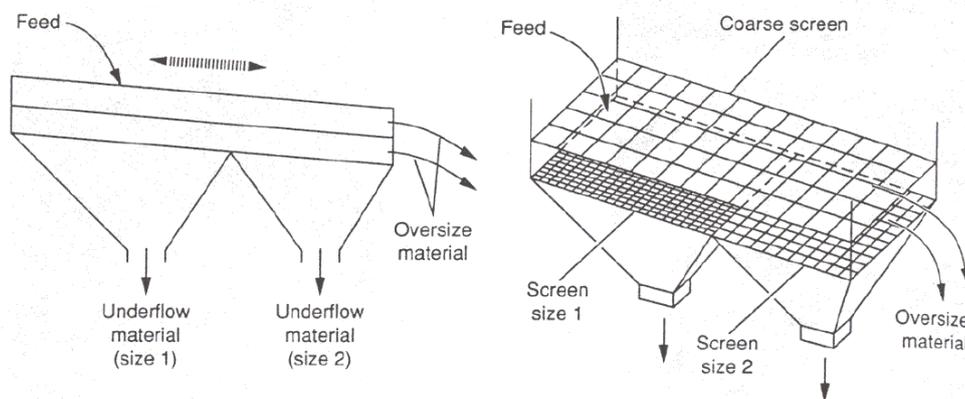


Figura 3.9 – vaglio rotante

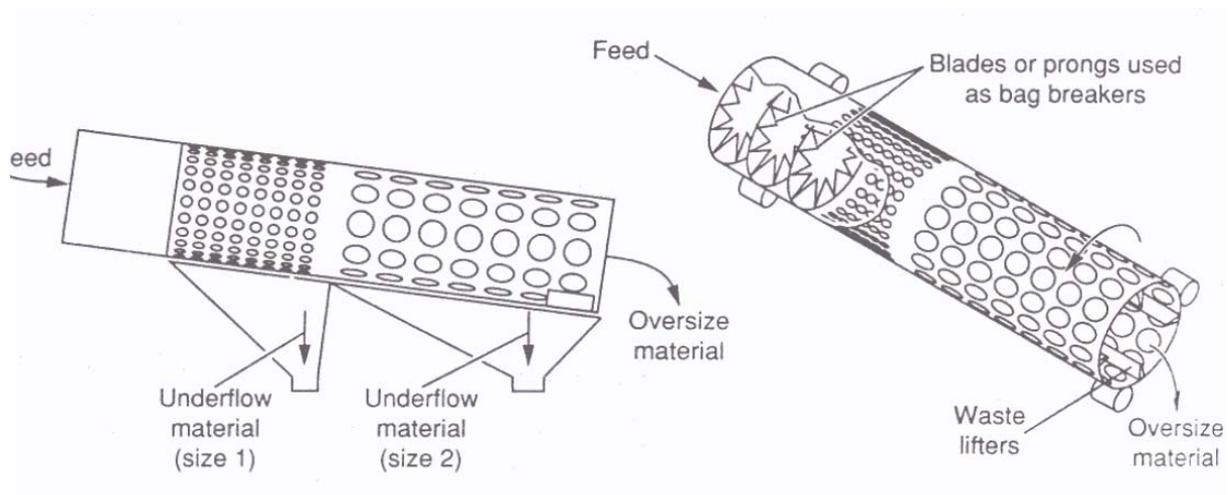
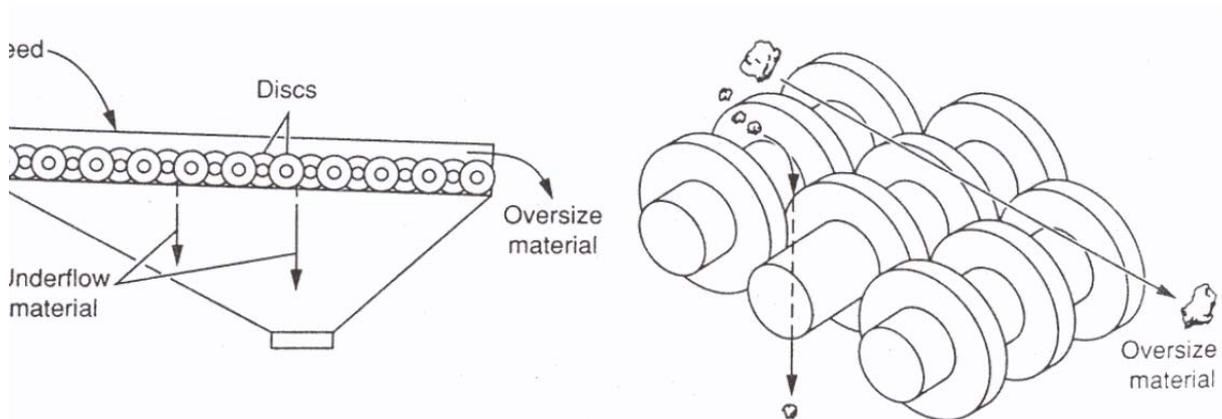


Figura 3.10 – vaglio a dischi



3.5 Unità di separazione aerodinamica

I classificatori ad aria, si basano sul principio che una miscela di particelle, immessa in un flusso d'aria verticale può essere separata nelle sue componenti mediante la regolazione della velocità del flusso.

L'utilizzo dei classificatori ad aria negli impianti di selezione è finalizzato alla selezione della frazione leggera del rifiuto, partendo da materiale già precedentemente selezionato dalla vagliatura.

L'applicazione della classificazione ad aria ha messo in luce che i principali fattori che influenzano i rendimenti di classificazione sono: umidità, composizione, forma delle particelle, portata dei rifiuti, geometria del classificatore, portata d'aria.

Un contenuto elevato di umidità nei rifiuti diminuisce l'efficienza di separazione e la qualità dei materiali selezionati. Un elevato contenuto di carta nel rifiuto aumenta invece la

possibilità di ostruzione del classificatore e diminuisce l'efficienza di separazione a causa dell'intrappolamento di particelle fini nella carta.

Le caratteristiche aerodinamiche dei rifiuti hanno un'importante influenza sull'efficienza di separazione in quanto la velocità terminale di una particella è direttamente proporzionale alla resistenza aerodinamica della stessa. All'aumentare della portata dei rifiuti, la sezione di passaggio del classificatore tende a congestionarsi determinando una forte interazione tra le particelle con conseguente perdita di efficienza.

I classificatori ad aria maggiormente diffusi utilizzano un flusso d'aria costante per separare la massa di rifiuti in due frazioni. I classificatori ad aria si distinguono in primo luogo per la forma del canale verticale di separazione:

- Classificatori rettilinei
- Classificatori a zig-zag

I classificatori a zig-zag sono più efficienti di quelli rettilinei. Il principio fisico su cui si basa la separazione in tali classificatori è la velocità terminale cioè la velocità massima asintotica ed uniforme a cui tende un corpo in caduta libera in un aeriforme.

Le particelle alimentate che si raccolgono sul fondo del classificatore vengono denominate pesanti in quanto la loro velocità terminale è superiore a quelle delle particelle denominate leggere trascinate dal flusso d'aria.

La frazione leggera, in un impianto di selezione dovrebbe essere idealmente costituita solo da materiale altamente combustibile (carta e plastica leggera). In realtà, le frazioni combustibile e non combustibile dei RSU non vengono perfettamente separate in un classificatore a flusso d'aria costante in quanto la velocità terminale è fortemente influenzata dalle caratteristiche idrodinamiche delle particelle.

Per ottimizzare la separazione della frazione combustibile dai RSU sono stati sviluppati classificatori ad aria di nuova concezione che operano la selezione non più sulla base della velocità terminale, ma effettivamente sulla base della densità delle particelle come dovrebbe accadere in un separatore ideale.

I classificatori ad aria basati su questo principio sono detti pulsanti in quanto la portata d'aria immessa non è costante ma varia nel tempo (classificatori attivi) o nello spazio (classificatori passivi).

La pulsazione del flusso d'aria impedisce alle particelle di accelerare fino alla velocità terminale consentendo così una separazione ideale sulla base della sola densità.

I classificatori pulsanti passivi, invece, imprimono le pulsazioni al flusso d'aria sfruttando la geometria del canale di separazione. Espansioni periodiche della sezione del canale

imprimono al flusso d'aria una serie di accelerazioni e decelerazioni periodiche. Tutti i separatori raggiungono elevate efficienze con rifiuti triturati (<25 mm).

Studiamo il moto di una particella, supposta sferica di raggio x , sottoposta a classificazione aerodinamica in un ciclone con sezione circolare di raggio r (vedi Figura 3.11).

La particella immersa in una corrente d'aria è soggetta a:

- ✓ la forza di massa F_M , espressa, da:

$$F_M = \rho_p \cdot V \cdot g = \rho_p \frac{\pi x^3}{6} g$$

- ✓ la forza di resistenza al trascinarsi da parte del fluido F_R , espressa, da:

$$F_R = \rho_a \cdot C_D \cdot A \cdot \frac{v^2}{2} = \rho_a \cdot C_D \cdot \frac{\pi x^2}{4} \cdot \frac{v^2}{2}$$

con ρ_g = densità del fluido

ρ_a = densità dell'aria

C_D = coefficiente di resistenza di Newton

A = superficie della particella offerta alla resistenza al moto;

$\frac{v^2}{2} \cong$ energia cinetica della particella

La velocità considerata è la velocità $v_{re} = v_r - v_t$, relativa tra quella della particella, che si muove verso il basso, e quella del fluido, scomponibile in una componente radiale v_r ed in una componente tangenziale v_t .

Quando le due forze si bilanciano, ($F_M = F_R$), è possibile ricavare il diametro di taglio della particella che resta indefinitamente in equilibrio. Nel punto di equilibrio, la velocità della particella equivale a quella tangenziale del fluido:

$$\rho_p \frac{\pi x^3}{6} \cdot \frac{v_t^2}{r} = \rho_a \cdot C_D \cdot \frac{\pi x^2}{4} \cdot \frac{v_r^2}{2}, \quad \text{da cui deriva} \quad x_t = \frac{3}{4} \cdot C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_p} \cdot \frac{v_r^2}{v_t^2} \cdot r$$

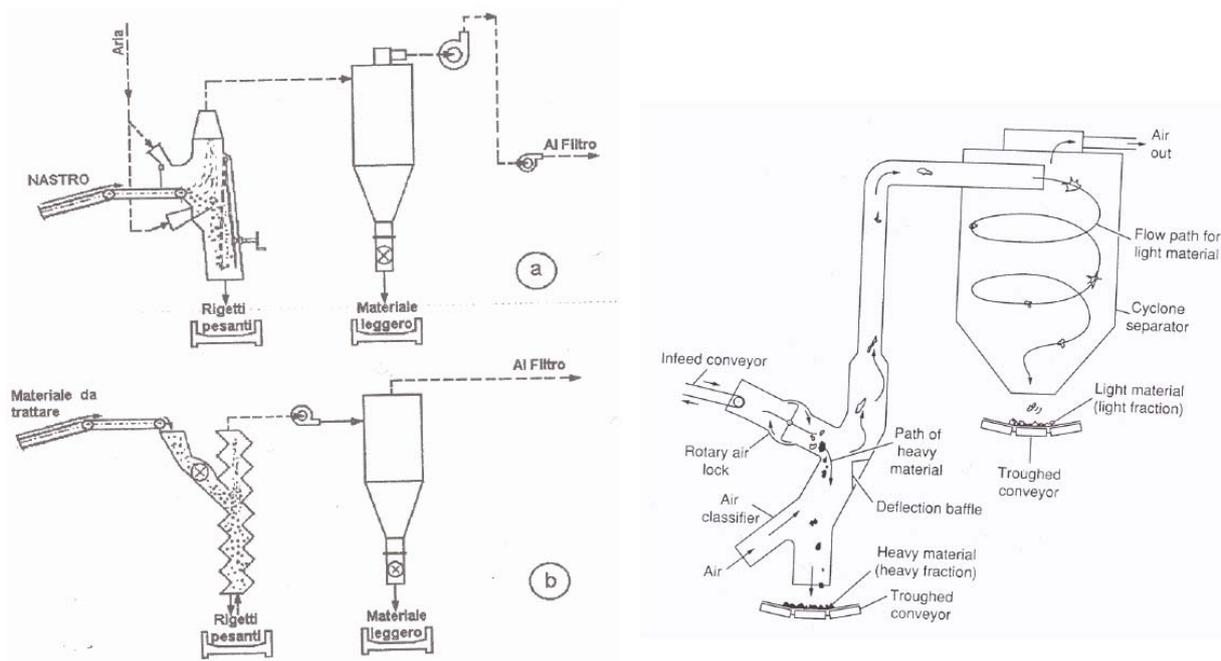
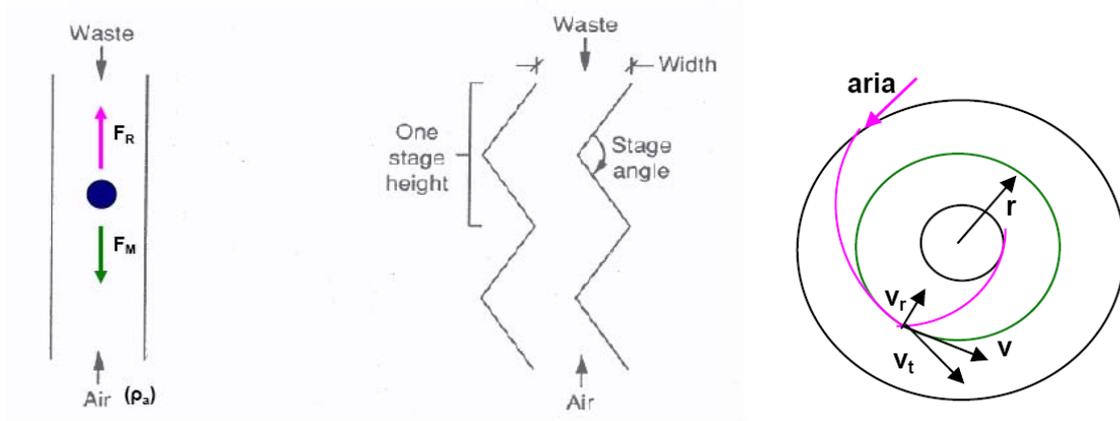


Figura 3.11 – unità di separazione aerodinamica

3.6 Unità di separazione dei metalli

La frazione di materiale ferroso presente in un insieme di diversi materiali (rifiuti tal quali o pre-trattati, residui di incenerimento, prodotti provenienti da raccolta differenziata...) può essere separata per mezzo di magneti permanenti o elettromagneti. La tecnica è impiegata ampiamente, e permette efficienze di separazione superiori al 95%. Le principali tipologie di apparecchiature sono del tipo a tamburo o a nastro (Figura 3.12).

- ✓ *Separatore magnetico a nastro*. Il materiale da trattare è movimentato da un trasportatore orizzontale a nastro. In prossimità dell'estremità di scarico è opportunamente disposto, un po' più in alto, un secondo nastro trasportatore, palettato, avente un magnete tra i due rulli di traino. Il materiale ferroso presente nel prodotto da trattare, attratto dal magnete, resta adiacente al nastro palettato, e viene trasportato in una zona di raccolta, mentre il materiale non ferroso cade subito all'uscita dal primo nastro. Il magnete può essere permanente o un elettromagnete.
- ✓ *Separatore magnetico a tamburo* (overbelt a puleggia magnetica): il separatore a tamburo non ha il magnete inserito nella zona "interna" del nastro (cioè tra i rulli di traino), ma direttamente dentro un tamburo rotante, di traino del nastro o esterno. È configurato come un nastro trasportatore palettato, inclinato, che porta il materiale da separare verso l'estremità a quota più elevata; uno dei due rulli di traino del nastro (quello più in alto, in corrispondenza della sezione di scarico del materiale) ha al proprio interno il magnete. Il materiale ferroso presente nel prodotto da trattare, attratto dal magnete, resta adiacente al nastro per un tratto più lungo rispetto al materiale non ferroso. I due flussi, nella caduta seguono traiettorie differenti; tramite un deviatore opportunamente disposto nella parte sottostante la zona di caduta del materiale, è possibile raccogliere separatamente i due flussi.

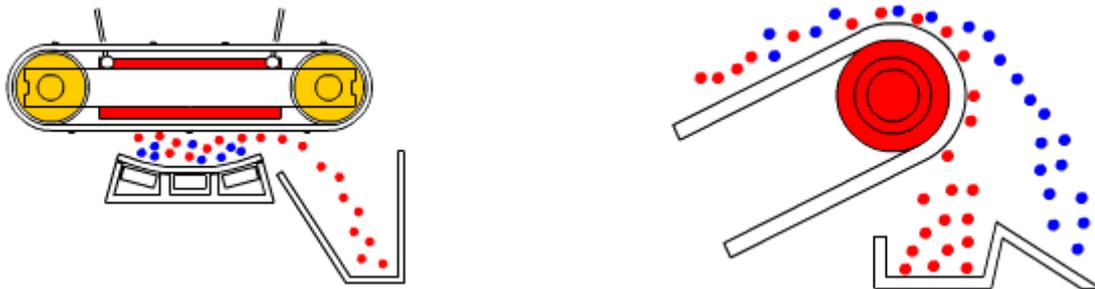


Figura 3.12 – separatore elettromagnetico a nastro e puleggia magnetica

Oltre alla separazione dei metalli ferrosi dal rifiuto, è possibile recuperare i metalli non ferrosi, quali l'alluminio, il rame, l'acciaio inox puro, l'ottone, ecc... Il separatore per metalli non ferrosi è detto anche "a correnti indotte" o ECS (Eddy Current System). La separazione è basata sulla legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica. Se un conduttore come l'alluminio è posto in un campo magnetico variabile, (ad esempio rotante) nel materiale si instaura una differenza di potenziale che provoca la circolazione di correnti e induce un campo magnetico che si oppone a quello applicato: ciò produce una forza elettromotrice

indotta che respinge il conduttore fuori dal campo magnetico, con un salto proporzionale al rapporto tra conducibilità elettrica e peso specifico, pari a 13.1 per l'alluminio, 13 per il magnesio, 6.6 per il rame, 6.5 per l'argento, 2.5 per lo zinco, 0.45 per il piombo.

Un separatore per metalli non ferrosi del tipo “a rullo induttore” è configurato come un separatore a tamburo, ma all'interno del rullo di estremità è presente un rotore magnetico, avente campo magnetico a polarità alternata (nord-sud) attorno alla propria circonferenza, posto in rotazione ad elevata velocità. Le componenti metalliche non ferrose presenti nel rifiuto vengono allontanate dal materiale rimanente, e cadono seguendo una traiettoria differente, potendo essere quindi recuperate tramite appositi deviatori.

Lo schema tipico di un separatore a correnti indotte è riportato in Figura 3.13.

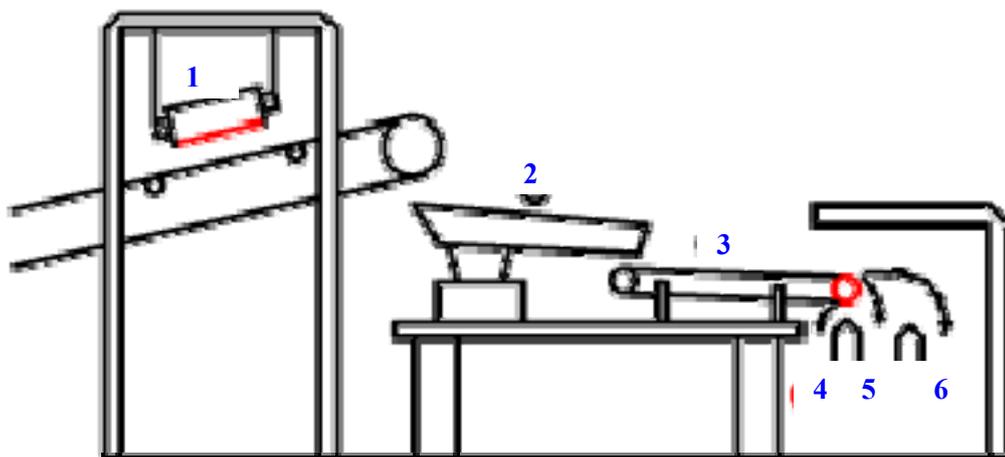


Figura 3.13 – separatori a correnti indotte

Il materiale di processo subisce una prima separazione magnetica (1) e viene scaricato su un alimentatore vibrante (2) che ne allarga e dosa il flusso. Il nastro trasportatore del separatore ECS (3) ha velocità variabile così come il rotore magnetico (induttore). I residui ferrosi vengono scaricati nella tramoggia (4), i residui inerti cadono nella tramoggia centrale (5), i metalli non ferrosi vengono lanciati e scaricati nella tramoggia (6).

Il materiale di processo subisce una prima separazione magnetica (1) e viene scaricato su un alimentatore vibrante (2) che ne allarga e dosa il flusso. Il nastro trasportatore del separatore ECS (3) ha velocità variabile così come il rotore magnetico (induttore). I residui ferrosi vengono scaricati nella tramoggia (4), i residui inerti cadono nella tramoggia centrale (5), i metalli non ferrosi vengono lanciati e scaricati nella tramoggia (6).

3.7 Separatori binari e separatori multipli

Dal punto di vista pratico occorre definire criteri atti a valutare la bontà di un processo di separazione nota che sia la composizione del flusso di massa da trattare. In generale i separatori si distinguono in *binari* e *multipli*. Nei separatori binari il flusso in ingresso viene suddiviso in due flussi in uscita, mentre in quelli multipli i flussi in uscita risultano in numero superiore a due.

Consideriamo lo schema di un separatore binario così come riportato in figura 3.14:



Figura 1.14 – Separatore binario

Il flusso in ingresso sia costituito da una miscela di due specie x e y che si intende separare la cui portata totale in massa sia q_0 (da esprimere ad esempio in Mg/h) e le portate in massa delle due specie singole siano x_0 e y_0 ; risulterà dunque:

$$q_0 = x_0 + y_0$$

$$q_1 = x_1 + y_1$$

$$q_2 = x_2 + y_2$$

$$q_3 = x_3 + y_3$$

$$q_4 = x_4 + y_4$$

Considerando che in entrambe i due flussi in uscita si avrà la presenza della specie x e della specie y , si potrà scrivere per il primo flusso in uscita:

$$q_1 = x_1 + y_1$$

e per il secondo flusso:

$$q_2 = x_2 + y_2$$

ed inoltre:

$$q_0 = q_1 + q_2 = (x_1 + y_1) + (x_2 + y_2)$$

Se dunque il separatore binario ha quale obiettivo quello di ottenere nel primo flusso di uscita essenzialmente la specie x mentre nel secondo flusso essenzialmente la specie y , nel primo flusso la specie y risulterà essere *impurezza di x* e viceversa nel secondo flusso.

Sulla base dunque di quanto schematizzato in figura 32 possono essere definiti due rapporti, detti *Percentuali di recupero*, relativi alla specie x , corrispondente al primo flusso, ed alla specie y , corrispondente al secondo, da indicare rispettivamente con R_{x1} e R_{y2} , le cui espressioni analitiche risultano:

- Percentuale di recupero del componente x nel primo flusso: $R_{x1} = \left(\frac{x_1}{x_0} \right) 100$

- Percentuale di recupero del componente y nel secondo flusso: $R_{y2} = \left(\frac{y_2}{y_0} \right) 100$

risultando inoltre:

$$x_0 = x_1 + x_2 \text{ e dunque } x_1 = x_0 - x_2$$

si ha:

$$R_{x1} = \left(\frac{x_0 - x_2}{x_1 + x_2} \right) 100 \quad \text{e analogamente:} \quad R_{y2} = \left(\frac{y_0 - y_1}{y_1 + y_2} \right) 100$$

Occorre osservare come l'efficienza di un separatore binario non possa essere valutata solo in base ai valori delle *Percentuale di recupero* R_{x1} e R_{y2} , sopra definite; considerando infatti la situazione in cui ad esempio il secondo flusso in uscita risulti nullo (ovvero $x_2 = y_2 = 0$), si avrebbe:

$$R_{x1} = \left(\frac{x_1}{x_0} \right) 100 = \left(\frac{x_0}{x_0} \right) 100 = 100\%$$

sicché a fronte di una Percentuale di recupero del componente x nel primo flusso pari al 100%, il separatore binario non consentirebbe l'esecuzione di alcuna azione di separazione tra le due componenti x ed y considerate.

Per tale motivo risulta necessario definire un ulteriore parametro che indichi il livello di purezza del componente x nel primo flusso in uscita e parallelamente del componente y nel

secondo flusso in uscita dal separatore. Detto parametro, identificato con il termine *Purezza*, fornisce la quantità del componente x nel primo flusso in uscita rispetto all'intera massa in uscita dallo stesso flusso, ovvero:

$$P_{x_1} = \left(\frac{x_1}{x_1 + y_1} \right) 100$$

ed in modo del tutto simile avremo che la purezza di y dal secondo flusso in uscita risulterà:

$$P_{y_2} = \left(\frac{y_2}{x_2 + y_2} \right) 100$$

I separatori multipli sono caratterizzati in generale dalla presenza di n componenti ($x_{10}, x_{20}, x_{30}, \dots, x_{n0}$) nel flusso in ingresso ed n componenti ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) negli m flussi in uscita (Figura 3.15); i diversi componenti vengono indicati con la stessa lettera (x) con doppio pedice; il primo di questi specifica il componente (es.: 1 = carta, 2 = vetro, ..., n = plastica) ed il secondo il flusso corrispondente (0 per il flusso in ingresso, e 1, 2, ..., m il primo, il secondo, ..., l' m -esimo flusso in uscita).

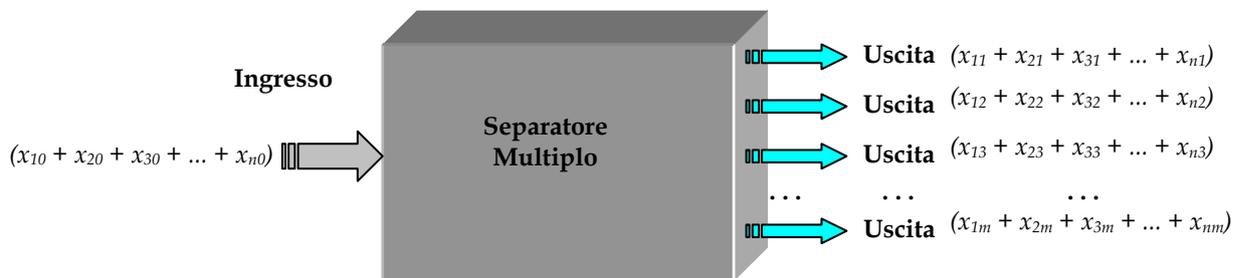


Figura 2.15 – Separatore multiplo

Come per i separatori binari, anche in tal caso si possono definire ad esempio la percentuale di Recupero del componenti x_{11} nel primo flusso in uscita come:

$$R_{x_{11}} = \left(\frac{x_{11}}{x_{10}} \right) 100$$

ed analogamente la purezza del componente x_{11} nel primo flusso in uscita come:

$$P_{x_{11}} = \left(\frac{x_{11}}{x_{11} + x_{21} + x_{31} + \dots + x_{n1}} \right) 100$$

Spesso un separatore è progettato per ottenere dalla miscela in *Alimentazione* un componente

da destinare alla valorizzazione (da indicare componente recuperata o semplicemente *Recupero*) ed una componente non utilizzabile da destinare allo smaltimento (da indicare come *Sovvallo* o *Scarto*).

Considerata dunque il flusso di alimentazione caratterizzato da n componenti, può essere associata a questa un vettore colonna \mathbf{A} (n righe x 1 colonna) in cui riportare le portate orarie relative alle diverse frazioni. A sua volta il dispositivo di separazione può essere caratterizzato ancora da un vettore colonna, \mathbf{F} , delle stesse dimensioni del precedente, i cui elementi rappresentino le frazioni di scarto ottenibili relativamente ai diversi componenti; in tal modo il prodotto della i -esima frazione di scarto per il valore della portata oraria dell' i -esimo componente, dà il valore della portata scartata (o *scarto*) dal separatore.

Per automatizzare il calcolo, in vista delle possibili opzioni di trattamento, è conveniente procedere come segue:

1. considerato il vettore colonna \mathbf{X} (di dimensioni n righe x 1 colonna) relativo alle diverse componenti di flusso, i cui elementi rappresentano le portate massiche, si costruisce la matrice diagonale corrispondente \mathbf{X}_d (di dimensioni n righe per n colonne), ovvero:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \\ \vdots \\ x_{n0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{X}_d = \begin{bmatrix} x_{10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_{20} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{n0} \end{bmatrix}$$

2. per ogni dispositivo di separazione (A, B, C, ecc.), caratterizzato dal vettore colonna \mathbf{F}_A delle frazioni di scarto (di dimensioni n righe x 1 colonna, ovvero tante righe quante le componenti di flusso considerate), si costruisce la matrice diagonale corrispondente $\mathbf{F}_{A,d}$, (di dimensioni n righe x n colonne), ovvero

$$\mathbf{F}_A = \begin{bmatrix} f_{1A} \\ f_{2A} \\ f_{3A} \\ \vdots \\ f_{nA} \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}_{A,d} = \begin{bmatrix} f_{1A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{2A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{nA} \end{bmatrix}$$

3. il prodotto:

$$\mathbf{X}_d \times \mathbf{F}_{A,d} = \begin{bmatrix} x_{10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_{20} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{n0} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_{1A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{2A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_{nA} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_{A,d}$$

è una matrice $\mathbf{S}_{A,d}$ (di dimensioni n righe x n colonne) i cui elementi della diagonale rappresentano le portate massiche di scarto relative al dispositivo di separazione considerato:

$$S_{A,d} = \begin{bmatrix} s_{1A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{2A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{nA} \end{bmatrix}$$

4. il prodotto di $S_{A,d}$ per un vettore colonna unitario U (di dimensioni n righe x 1 colonna), fornisce direttamente il vettore S_A (di dimensioni n righe x 1 colonna) delle portate massiche di scarto, ovvero:

$$S_A = S_{A,d} x U = \begin{bmatrix} s_{1A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{2A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{nA} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{1A} \\ s_{2A} \\ \dots \\ s_{nA} \end{bmatrix}$$

5. considerato che per ogni dispositivo di separazione (A, B, C, ecc.), caratterizzato dal vettore colonna F_A delle frazioni di scarto, si può associare un vettore colonna Q_A (ancora di dimensioni n righe x 1 colonna) i cui elementi risultino pari a:

$$Q_A = \begin{bmatrix} 1 - f_{1A} \\ 1 - f_{2A} \\ 1 - f_{3A} \\ \vdots \\ 1 - f_{nA} \end{bmatrix}$$

e rappresentano quindi le frazioni recuperate, si avrà anche:

$$X_{d} x Q_{A,d} = R_{A,d}$$

con $R_{A,d}$, la matrice diagonale delle portate massiche di recupero dal dispositivo A, ed inoltre:

$$R_{A,d} x U = R_A$$

con R_A il vettore (di dimensioni n righe x 1 colonna) delle portate massiche di recupero.

6. Risulta in tal modo di facile calcolo il Recupero e la Purezza corrispondenti ad un determinato dispositivo o serie di questi.

Il principale limite di questa metodologia di valutazione dei flussi di recupero e delle relative purezze risiede essenzialmente nel considerare invariante, rispetto alla composizione dei rifiuti in ingresso, il vettore delle frazioni di scarto associato ad un determinato dispositivo di selezione.

4. SEPARAZIONE DIMENSIONALE:MODELLO SPERIMENTALE

4.1 Processo di vagliatura

La vagliatura è un processo di separazione che si basa sulla dimensione degli elementi da separare.

Un vaglio è dunque costituito da una serie di maglie aventi dimensione della sezione di passaggio uniforme, per cui particelle con diametro inferiore a quello dell'apertura possono passare attraverso esse ed essere separate dalle restanti che diversamente rimangono trattenute.

Un corpo può passare attraverso i fori del vaglio se presenta almeno due dimensioni inferiori all'apertura del vaglio. Il materiale restante sul vaglio prende il nome di *sopravaglio* quello che lo attraversa *sottovaglio*.

La vagliatura è una operazione di processo largamente utilizzata negli impianti di selezione dei rifiuti urbani, spesso utilizzata per la separazione della frazione organica dalla restante parte o per la separazione del vetro, plastica, ecc.

La separazione dimensionale di un materiale può essere realizzata per via secca ovvero umida, risultando la prima quella più utilizzata nei sistemi di trattamento dei rifiuti solidi. Per quanto riguarda la sua collocazione nella filiera di selezione dei rifiuti, la vagliatura può essere compiuta sia a monte che a valle di unità di triturazione del rifiuto, mentre spesso è collocata a monte della sezione di separazione aerea nel caso di impianti di selezione per la produzione di combustibile derivato dai rifiuti (CDR).

In impianti di selezione dei rifiuti urbani la vagliatura è una operazione di processo largamente utilizzata per la separazione della frazione organica dalla restante parte.

Nei processi in continuo si utilizzano spesso i vagli rotanti; questi presentano forma cilindrica con superficie del mantello dotata di fori circolari di dimensioni differenti in relazione alle componenti da separare del rifiuto. Il cilindro ruota intorno al proprio asse di simmetria con velocità di rotazione piuttosto bassa (10 – 15 rpm) cui corrisponde un altrettanto basso consumo energetico.

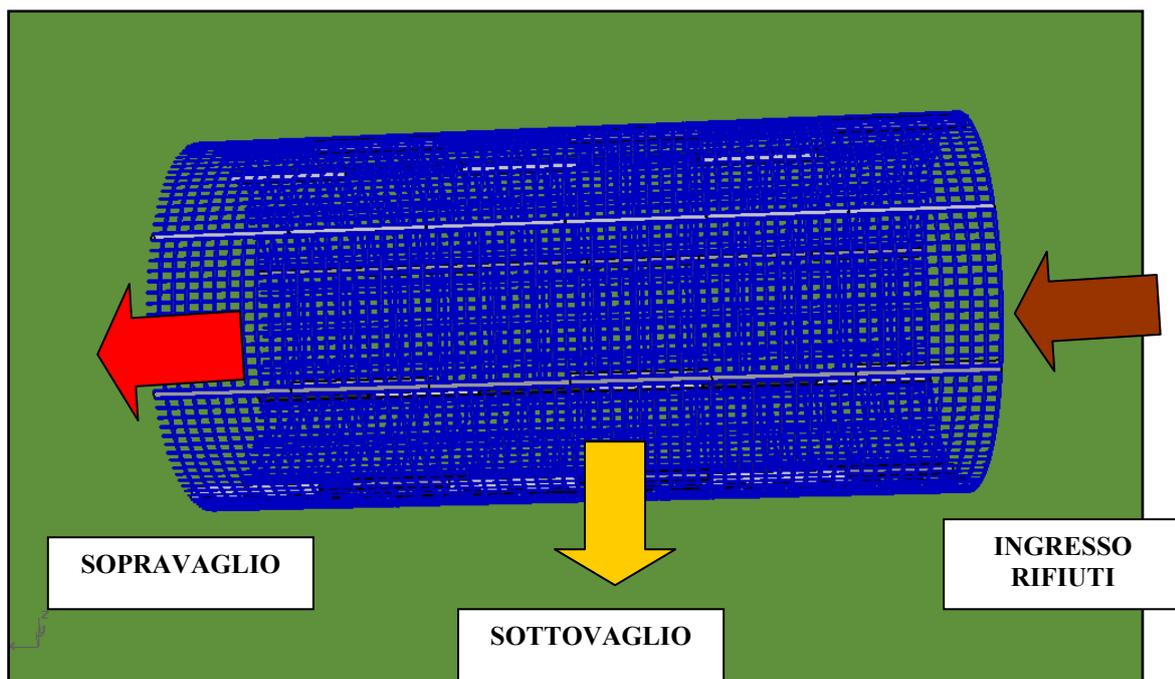


Figura 4.1 - Flussi in ingresso e uscita al vaglio.

Il principale vantaggio dei vagli rotanti risiede nella difficoltà di occlusione dei fori.

Il movimento del materiale all'interno del vaglio durante la sua rotazione può essere di diverso tipo e ciò influenza l'efficienza di separazione del dispositivo.

Un primo tipo di movimento del rifiuto all'interno è cosiddetto a *caduta*; in questo caso il materiale sollevato dal movimento di rotazione del tamburo ridiscende verso il basso ed in verso opposto al sottostante strato restando aderente a quest'ultimo.

Un secondo tipo di movimento, cosiddetto a *cataratta*, si ha nel caso in cui la velocità di rotazione risulti sufficientemente elevata e tale da consentire una sorta di lancio del materiale all'interno del tamburo; il materiale in tal modo descrive nello spazio libero interno al vaglio una traiettoria parabolica ricadendo nella parte bassa della superficie cilindrica. Il più elevato grado di segregazione della massa e l'elevato impatto del materiale sulla superficie interna del vaglio producono una maggiore efficienza di separazione rispetto al caso del movimento a caduta.

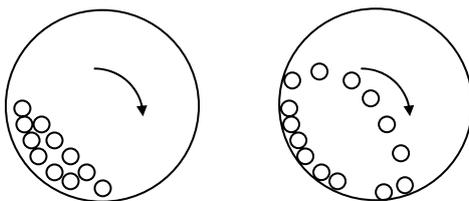


Figura 4.2 - Movimento a cascata e a cataratta

Una terza situazione si verifica per velocità di rotazione del tamburo ancor più elevate; può

accadere infatti che l'azione centrifuga consenta al materiale di rimanere adeso alla superficie cilindrica interna del tamburo determinando di conseguenza percentuali di recupero particolarmente basse.

4.1.1 Parametri di efficienza del processo

I parametri di efficienza del processo di vagliatura costituiscono la risposta del dispositivo al settaggio di diverse condizioni operative.

Il vaglio rotante dell'impianto di selezione di Rocca Cencia è da considerarsi un separatore binario.

L'esigenza di utilizzare un unico parametro per caratterizzare l'efficienza di un dispositivo di separazione al fine di rendere più semplice ed agevole il giudizio relativamente all'efficacia del dispositivo, ha portato all'introduzione di una *Efficienza globale di recupero*, $E_{g,x,y}$, con formulazioni diverse.

Considerato allora un separatore binario, si può pensare di definire in prima istanza l'Efficienza globale di recupero quale rapporto tra l'intera portata del flusso in uscita e quella in ingresso, ovvero:

$$E_{g,x,y} = \left(\frac{x_1 + y_1}{x_0 + y_0} \right) 100$$

Questa formulazione però non appare propriamente idonea alla caratterizzazione del dispositivo poiché, nel caso in cui si verificasse il by-pass del separatore, risulterebbe:

$$x_1 + y_1 = x_0 + y_0$$

ed a ciò corrisponderebbe una Efficienza globale di recupero del 100%.

Si può allora pensare di considerare quale Efficienza globale la differenza tra la percentuale di recupero del componente x dal primo flusso in uscita e quella del componente y che invece non si intende recuperare nel primo flusso, ovvero:

$$E'_{g,x,y} = R_{x_1} - R_{y_1} = \left(\frac{x_1}{x_0} - \frac{y_1}{y_0} \right) 100$$

analogamente per il secondo flusso in cui y è il componente desiderato, mentre x quello indesiderato:

$$E''_{g,x,y} = R_{y_2} - R_{x_2} = \left(\frac{y_2}{y_0} - \frac{x_2}{x_0} \right) 100$$

sostituendo in questa $y_2 = y_0 - y_1$ e $x_2 = x_0 - x_1$ si osserva facilmente l'eguaglianza dei due parametri definiti, per cui l'Efficienza globale di recupero risulta:

$$E_{g_{x,y}} = E'_{g_{x,y}} = E''_{g_{x,y}}$$

Una ulteriore formulazione per caratterizzare globalmente con un unico parametro l'efficienza di recupero di un separatore è quella proposta da *Warrell e Stessel*, ottenuta moltiplicando la frazione recuperata del componente x nel primo flusso in uscita per la frazione recuperata del componente y nel secondo flusso in uscita, per poi estrarne la radice quadrata, ovvero:

$$E_{g_{x,y}} = R_{x_1} R_{y_2} = \left(\frac{x_1}{x_0} \frac{y_2}{y_0} \right)^{1/2} 100$$

Queste due ultime formulazioni per l'Efficienza globale di recupero mostrano come nel caso in cui il primo flusso in uscita sia costituito dal solo componente x ($x_1 = x_0$ e $y_1 = 0$) ed il secondo da y ($y_2 = y_0$ e $x_2 = 0$), fornirebbero:

$$E_{g_{x,y}} = R_{x_1} - R_{y_1} = \left(\frac{x_1}{x_0} - \frac{y_1}{y_0} \right) 100 = 100\%$$

$$E_{g_{x,y}} = R_{x_1} R_{y_2} = \left(\frac{x_1}{x_0} \frac{y_2}{y_0} \right)^{1/2} 100 = 100\%$$

Nel caso in cui invece il dispositivo non operasse separazione alcuna delle due componenti, si avrebbe un unico flusso con $x_1 = x_0$ e $y_1 = y_0$ mentre risulterebbe $x_2 = y_2 = 0$, per cui entrambi le formulazioni fornirebbero per l'Efficienza globale un valore nullo.

4.2 Analisi cinematica

Lo studio della cinematica della particella all'interno di un vaglio rotante è stato condotto assumendo che il moto delle singole frazioni di rifiuto potesse essere approssimato a quello di sfere ideali, soggette alla forza peso ed alla forza centrifuga.

Tali ipotesi riprendono quelle proposte da *Stessel (1992)*, che per primo propose un modello basato sullo studio delle traiettorie compiute dalle particelle, fissate le condizioni iniziali.

Si faccia quindi riferimento alla situazione teorica in cui un corpo di massa m si trovi nel punto O in contatto con la superficie interna del tamburo (Figura 4.3). Le forze agenti sulla massa m risultano in tal caso la forza peso, P , e la forza centrifuga, F_c , che valgono rispettivamente:

$$P = mg \qquad F_c = m\omega^2 r = \frac{P}{g} \omega^2 r$$

in cui ω è la velocità angolare di rotazione del vaglio (rad/s) ed r il raggio interno del tamburo. Considerata dunque la componente radiale, P_r , della forza peso, si ha:

$$P_r = P \cos \alpha$$

Nella precedente espressione della componente radiale della forza peso si è trascurato l'angolo γ di inclinazione del vaglio rispetto all'orizzontale. Tale approssimazione (per $\gamma < \pi/12$, $\cos \gamma \approx 1$) verrà sempre applicata anche in seguito, eccetto nei casi in cui si andrà a studiare il moto della particella in direzione assiale (Stessel, 1991).

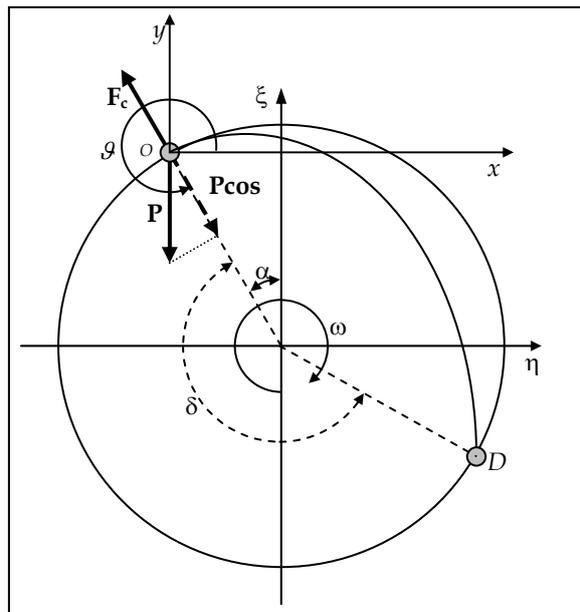


Figura 4.3 - Cinematica di una particella all'interno di un vaglio rotante

Si possono verificare dunque le seguenti condizioni:

$F_c > P_r$: in tal caso la particella rimane costantemente in contatto con il tamburo durante il moto di rotazione;

$F_c \leq P_r$: in tal caso la particella tende a staccarsi dalla superficie interna del mantello ed a ricadere sul fondo del tamburo.

La componente radiale della forza peso non si mantiene costante ma varia con la posizione geometrica assunta dalla massa in considerazione. Considerando dunque l'angolo α per identificare la posizione del punto O, si osserva che per $\alpha = 0$ P_r assume il valore massimo P, mentre risulta nullo per $\alpha = 90^\circ$. Se dunque $F_c > P$ la particella non si distaccherà mai dal mantello, mentre se $F_c < P$ esisterà una posizione (e dunque un angolo α) in cui si verificherà la condizione $F_c = P_r$. Quest'ultima condizione, in base alle precedenti diviene:

$$\frac{P}{g} \omega^2 r = P \cos \alpha$$

La velocità angolare è legata al numero di giri al secondo, n , dalla relazione:

$$\omega = 2\pi n$$

per cui la precedente esplicitata rispetto ad α diviene:

$$\cos \alpha = \frac{\omega^2 r}{g} = \frac{4r\pi^2 n^2}{g} \quad \text{ovvero:} \quad \alpha = \arccos\left(\frac{4r\pi^2 n^2}{g}\right)$$

dove:

r = raggio del tamburo rotante;

n = numero di giri del tamburo

g = accelerazione di gravità

La relazione precedente, consente di determinare l'angolo α di incipiente distacco della massa m dal mantello interno del vaglio.

La precedente consente di ricavare altresì la velocità critica di rotazione, n_c , che si ha per $F_c = P$ (ovvero $\alpha = 0$), per cui risulta risulta:

$$n_c = \sqrt{\frac{g}{4r\pi^2}} \quad (3)$$

Considerato dunque un sistema cartesiano di assi x-y con origine nel punto O di incipiente distacco, le componenti secondo detto sistema della velocità periferica della particella risulteranno:

$$v_{x,0} = v \cos \alpha = \omega r \cos \alpha \quad \text{e} \quad v_{y,0} = v \sin \alpha = \omega r \sin \alpha \quad (4)$$

Il punto materiale, distaccandosi in corrispondenza del punto O, descriverà dunque una traiettoria in accordo alle relazioni cinematiche seguenti:

$$\left. \begin{aligned} a_x(t) &= 0 \\ v_x(t) &= v_{x,0} \\ x(t) &= v_{x,0} t \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} a_y(t) &= -g \\ v_y(t) &= v_{y,0} - gt \\ y(t) &= v_{y,0} t - g \frac{t^2}{2} \end{aligned} \right\}$$

dalle quali utilizzando le (4), si ricava con facili passaggi l'equazione di detta traiettoria descritta dal punto materiale, ovvero:

$$y = x \tan \alpha - \frac{1}{2} g \frac{x^2}{\omega^2 r^2 \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

La (5) è l'equazione di una parabola passante per il punto O. L'intersezione di questa con la circonferenza di raggio r (mantello del tamburo) si ricava considerando l'intersezione tra quest'ultima e la (5).

Considerato dunque che l'equazione della circonferenza di raggio r rispetto al sistema cartesiano d'assi η - ξ con origine nel centro della circonferenza risulta:

$$\eta^2 + \xi^2 = r^2$$

e che $\eta = x - x_0$ e $\xi = y - y_0$, dove x_0 ed y_0 rappresentano le coordinate del centro della circonferenza rispetto al sistema di riferimento x-y, si ha:

$$x_0 = r \cos \vartheta \quad \text{e} \quad y_0 = r \sin \vartheta$$

dove ϑ indica l'angolo spazzato dalla congiungente l'origine dei due sistemi di riferimento misurato rispetto all'asse x ed in verso antiorario; si osserva facilmente come:

$$\vartheta = 2\pi - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \frac{3}{2}\pi + \alpha$$

L'equazione della circonferenza rispetto al sistema d'assi x-y risulta dunque:

$$(x - r \cos \vartheta)^2 + (y - r \sin \vartheta)^2 = r^2$$

che con semplici passaggi porge la:

$$x^2 + y^2 - (2r \cos \vartheta)x - (2r \sin \vartheta)y = 0 \quad (6)$$

La soluzione del sistema costituito dalla (5) e dalla (6) fornisce le coordinate del punto D di ricaduta del punto materiale sulla superficie interna del tamburo.

Posto dunque nella (5):

$$a = -\frac{g}{2\omega^2 r^2 \cos^2 \alpha} \quad \text{e} \quad b = \tan \alpha$$

Per cui dalla (2):

$$a = -\frac{l}{D \cos^3 \alpha} \quad \text{e} \quad b = \tan \alpha,$$

con D = diametro del tamburo.

Il sistema risolvibile risulta dunque:

$$\begin{cases} y = ax^2 + bx \\ x^2 + y^2 - (2r \cos \vartheta)x - (2r \sin \vartheta)y = 0 \end{cases}$$

da cui:

$$x^2 + (ax^2 + bx)^2 - (2r \cos \vartheta)x - (2r \sin \vartheta)(ax^2 + bx) = 0$$

e dunque:

$$a^2 x^4 + 2abx^3 + (1 - 2r \sin \vartheta + b^2)x^2 - (2r \cos \vartheta + 2rb \sin \vartheta)x = 0$$

Osservando infine che i termini tra parentesi tonde risultano nulli, si ha:

$$(a^2 x + 2ab)x^3 = 0$$

Da cui le coordinate del punto D di impatto sul mantello rispetto al sistema di riferimento x-y:

$$x_D = -\frac{2b}{a} \quad \text{e}$$

$$y_D = ax^2 + bx = a \left(-\frac{2b}{a} \right)^2 - b \frac{2b}{a} = \frac{2b^2}{a}$$

Sostituendo quanto posto in precedenza per i termini a e b , si ottiene:

$$x_D = \frac{4\omega^2 r^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} \quad \text{e} \quad y_D = -\frac{4\omega^2 r^2 \sin^2 \alpha}{g} \quad (7)$$

ovvero:

$$x_D = 2D \operatorname{sen} \alpha \cos^2 \alpha \quad \text{e} \quad y_D = -2D \cos \alpha \operatorname{sen}^2 \alpha \quad (7')$$

Le coordinate del punto D di impatto sul mantello, riferite al sistema cartesiano d'assi η - ξ con origine nel centro della circonferenza risultano:

$$\eta_D = x_D - r \cos \vartheta \quad \text{e} \quad \xi_D = y_D - r \operatorname{sen} \vartheta$$

da cui:

$$\eta_D = \frac{4\omega^2 r^2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha}{g} - r \cos \vartheta \quad \text{e} \quad \xi_D = -\frac{4\omega^2 r^2 \operatorname{sen}^2 \alpha}{g} - r \operatorname{sen} \vartheta$$

(8)

ovvero:

$$\eta_D = 2D \operatorname{sen} \alpha \cos^2 \alpha - r \cos \vartheta \quad \text{e} \quad \xi_D = -2D \cos \alpha \operatorname{sen}^2 \alpha - r \operatorname{sen} \vartheta \quad (8')$$

Ricordando inoltre che:

$$\vartheta = \frac{3}{2} \pi + \alpha$$

E che dunque:

$$\operatorname{sen} \alpha = \cos \left(\frac{3}{2} \pi + \alpha \right) = \cos \vartheta \quad \text{e} \quad \cos \alpha = -\operatorname{sen} \left(\frac{3}{2} \pi + \alpha \right) = -\operatorname{sen} \vartheta$$

Si ha anche:

$$\eta_D = D \operatorname{sen} \alpha \left(2 \cos^2 \alpha - \frac{1}{2} \right) \quad \text{e} \quad \xi_D = D \cos \alpha \left(-2 \operatorname{sen}^2 \alpha + \frac{1}{2} \right) \quad (8'')$$

Nel caso dunque in cui la traiettoria identificata fosse quella massima, risulta possibile calcolare l'area della sezione interna del tamburo rotante che sarà interessata dal moto del rifiuto. In tal modo sarebbe possibile definire il rapporto F tra il volume V_r interessato dal moto del rifiuto (volume comprensivo dello spazio occupato dal rifiuto e dall'aria) e l'intero volume V del tamburo, ovvero:

$$F = \frac{V_r}{V} \quad (7)$$

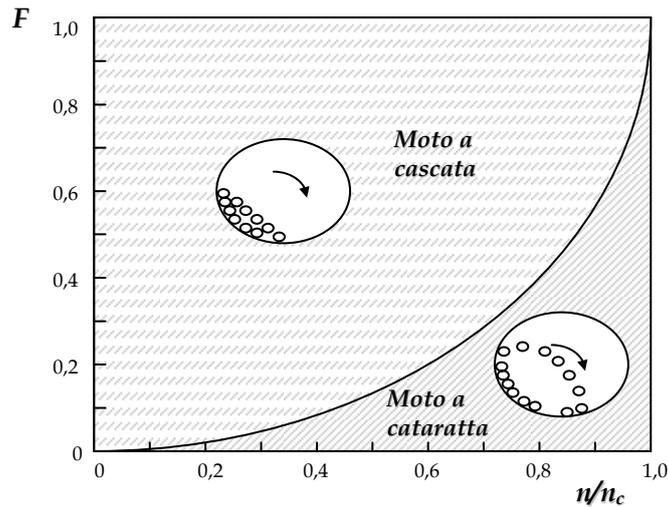


Figura 4.4 - Effetto del volume occupato dai solidi sul moto all'interno del vaglio

Detto rapporto può essere riportato in funzione del rapporto tra numero di giri del tamburo n e numero di giri critico n_c , così come riportato in Figura 4.4 .

Si può allora facilmente osservare come nel caso di $F = 1$ (vaglio completamente pieno di rifiuto) l'unico moto possibile del rifiuto è quello a cascata anche per velocità inferiori a quella critica in quanto non vi è spazio disponibile per la ricaduta delle particelle; man mano che F diminuisce, il movimento a cataratta si ha solo per velocità di rotazione elevate anche se inferiori alla critica. Al limite, nel caso di un'unica particella presente il movimento a cataratta si ha anche per velocità di rotazione estremamente basse.

4.2.1 Numero impatti

Il tempo impiegato dal punto materiale, dal suo distacco a raggiungere il punto di impatto D sul mantello, si può ricavare a mezzo della $x(t) = v_{x,0}t$, da cui:

$$t_{O,D} = \frac{x_D}{v_{x,0}} = \frac{4\omega r \sin\alpha}{g} \quad (9)$$

Si consideri ora che il tamburo rotante risulta inclinato rispetto all'orizzontale di un angolo γ , come mostrato in Figura 3.3. Preso dunque un sistema di riferimento cartesiano τ - ζ , possiamo scomporre la componente della velocità v_{0y} , secondo i due suddetti assi e determinare la proiezione della traiettoria sul corrispondente piano, che risulteranno:

$$v_{\tau,0} = v_{y,0} \sin\gamma = \omega r \sin\alpha \sin\gamma \quad \text{e} \quad v_{\zeta,0} = v_{y,0} \cos\gamma = \omega r \sin\alpha \cos\gamma$$

Il punto materiale, distaccandosi in corrispondenza del punto O, descriverà dunque sul piano τ - ζ , una traiettoria in accordo alle relazioni cinematiche seguenti:

$$\begin{cases} a_{\tau}(t) = 0 \\ v_{\tau}(t) = v_{\tau,0} \\ \tau(t) = v_{\tau,0}t \end{cases} \quad \begin{cases} a_{\zeta}(t) = -g \\ v_{\zeta}(t) = v_{\zeta,0} - gt \\ \zeta(t) = v_{\zeta,0}t - g\frac{t^2}{2} \end{cases}$$

dalle quali utilizzando le precedenti si ricava con facili passaggi l'equazione di detta traiettoria descritta dal punto materiale, ovvero:

$$\zeta = \left(\frac{v_{\zeta,0}}{v_{\tau,0}} \right) \tau - \left(\frac{g}{2v_{\tau,0}^2} \right) \tau^2 \quad (10)$$

Lo spazio percorso in direzione τ a partire dall'origine O del sistema τ - ζ si ricava a mezzo della (9), ovvero:

$$\tau_D(t_D) = v_{\tau,0}t_D = \omega r \sin \alpha \sin \gamma \frac{4\omega r \sin \alpha}{g} = \frac{4\omega^2 r^2 \sin^2 \alpha \cdot \sin \gamma}{g}$$

che proiettata in direzione delle generatrici del cilindro porge:

$$z_1 = \frac{\tau_D}{\cos \gamma} = \frac{4\omega^2 r^2 \sin^2 \alpha \cdot \sin \gamma}{g \cos \gamma} = \frac{4\omega^2 r^2 \sin^2 \alpha \cdot \tan \gamma}{g}$$

Per il calcolo dello spazio percorso lungo in direzione delle generatrici del cilindro alla precedente distanza deve essere aggiunta la quantità :

$$z_2 = |y_D| \tan \gamma$$

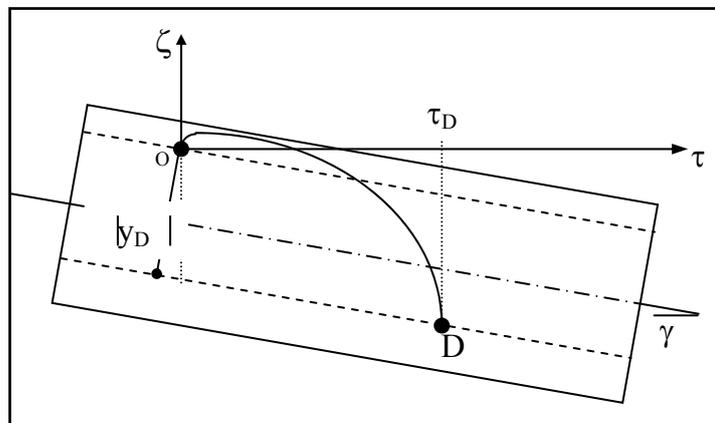


Figura 4.5 - Schematizzazione dell'avanzamento longitudinale della particella.

Per cui lo spazio totale percorso dal punto materiale in direzione delle generatrici dal distacco al successivo impatto sul mantello, risulta:

$$z_{O,D} = z_1 + z_2 = \frac{4\omega^2 r^2 \sin^2 \alpha \cdot \tan \gamma}{g} + |y_D| \tan \gamma$$

Sostituendo nella precedente la (2) e la seconda delle (7'), si ha:

$$z_{O,D} = 2D \cos \alpha \sin^2 \alpha \tan \gamma + 2D \cos \alpha \sin^2 \alpha \tan \gamma$$

Si ha infine:

$$z_{O,D} = 4D \cos \alpha \sin^2 \alpha \tan \gamma$$

(11)

Il numero di impatti, N_i , del punto materiale sul mantello si ricava dunque dividendo lo sviluppo longitudinale L del cilindro per il valore di $z_{O,D}$ appena ricavato, ovvero:

$$N_i = \frac{L}{4D \cos \alpha \sin^2 \alpha \tan \gamma} \quad (12)$$

Attraverso questa relazione è possibile ricavare l'andamento del numero degli impatti N_i in funzione della velocità di rotazione ω del tamburo, per fissati valori dell'inclinazione dell'asse γ , della lunghezza L e del diametro D del vaglio. Infatti a mezzo della (2) la (12) diviene:

$$N_i = \frac{L}{4D \frac{\omega^2 r}{g} \cos \alpha \sin^2 \alpha \left(\arccos \frac{\omega^2 r}{g} \right) \tan \gamma} \quad (12')$$

La dinamica di moto delle diverse particelle dipende da un numero molteplice di parametri (quali densità e forma delle particelle, attrito con la superficie del disco, tipo di urto, ecc.) il che comporta un numero di impatti sia superiore che inferiore rispetto al valore N_i .

In prima istanza, per valutare l'effetto di questi, si può considerare che il numero efficace, N_e , degli impatti possa essere correlato ad N_i a mezzo di una relazione del tipo:

$$N_e = a N_i^b$$

(13)

dove:

- a è un parametro del modello funzione dell'entità del carico massimo superficiale (portata di

alimentazione per unità di superficie lorda del vaglio)

- b è un parametro che tiene conto degli impatti multipli delle particelle sul vaglio

I parametri a e b sono sperimentali, ovvero vanno determinati caso per caso attraverso prove specifiche.

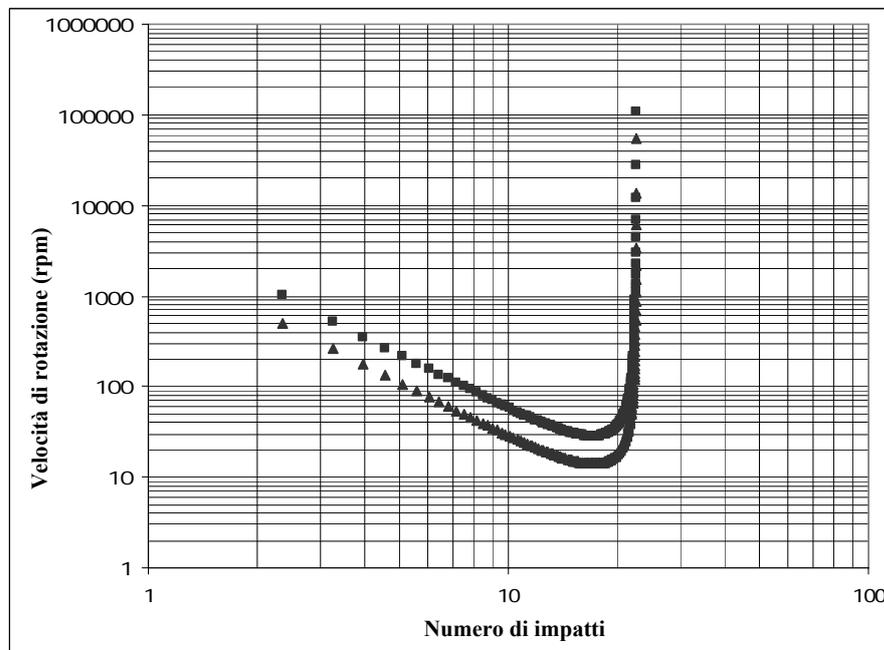


Figura 4.6 – Effetto della velocità di rotazione sul numero di impatti

4.2.2 Tempo di residenza

Il tempo di residenza del punto materiale nel cilindro, si può ricavare considerando la durata che intercorre tra il distacco e l'impatto, così come espressa dalla (9) ed il tempo necessario per passare dal punto D al successivo punto O' posto sulla stessa generatrice di O ad una distanza espressa dalla (11). Considerando dunque un impatto anelastico del corpo sul mantello interno del tamburo, il tempo necessario per passare dal punto D al punto O' risulta pari a:

$$t_{D,O'} = \frac{\delta}{\omega}$$

avendo indicato con δ , l'angolo mostrato in Figura 3.2 espresso in radianti e ω la velocità angolare del tamburo espressa in rad/s.

Se inoltre si assume che l'ingresso della particella avvenga in corrispondenza della generatrice inferiore I della circonferenza del tamburo, il tempo necessario per raggiungere la prima posizione di distacco risulta:

$$t_{I,D} = \frac{\pi - \alpha}{\omega}$$

Il tempo di residenza teorico complessivo si ottiene dunque, a mezzo della seguente

espressione: $\mathcal{G}_H = t_{I,D} + t_{O,D} + t_{D,O'} = \frac{\pi - \alpha}{\omega} + \left(\frac{\delta}{\omega} + \frac{4\omega r \sin \alpha}{g} \right) N_i$

Al fine delle successive considerazioni riguardanti l'efficienza di separazione di un vaglio rotante, è importante conoscere l'inclinazione della traiettoria della particella rispetto alla superficie del vaglio. Allo scopo, deve essere dunque calcolata la tangente alla traiettoria parabolica del punto materiale in corrispondenza del punto di impatto sulla circonferenza del tamburo. Conviene allo scopo ricavare l'equazione della traiettoria parabolica rispetto al sistema di riferimento $\tilde{\eta}\tilde{\xi}$, che con facili passaggi risulta:

$$\xi = a\tilde{\eta}^2 + (b + 2ar \cos \vartheta)\tilde{\eta} + (r \sin \vartheta + br \cos \vartheta + ar^2 \cos^2 \vartheta)$$

con:

$$a = -\frac{l}{D \cos^3 \alpha} \quad \text{e} \quad b = \tan \alpha$$

La derivata della precedente calcolata in $\eta = \eta_D$, porge:

$$\left. \frac{d\xi}{d\eta} \right|_{\eta=\eta_D} = 2a\eta_D + (b + 2ar \cos \vartheta)$$

Sostituendo i valori di a, b ed η_D prima determinati, si ricava con facili passaggi che in corrispondenza del punto di impatto il coefficiente angolare della retta tangente alla parabola nel punto di impatto vale:

$$m_{parabola,D} = -3 \tan \alpha$$

Considerato allora che la retta per il centro della circonferenza e passante per il punto D ha coefficiente angolare:

$$m_{centro,D} = \frac{\xi_D}{\eta_D} =$$

per cui la retta ortogonale a questa e tangente alla circonferenza in D dovrà avere coefficiente angolare dato da:

$$m_{circonferenza,D} = -\frac{\eta_D}{\xi_D} =$$

Si può ricavare il punto D in corrispondenza del quale la tangente alla circonferenza risulta ortogonale alla tangente alla parabola nel punto di impatto, osservando che essendo ortogonale alla tangente alla circonferenza, la retta con coefficiente angolare $-3\tan\alpha$, deve necessariamente passare per il centro della circonferenza, per cui ha equazione:

$$\xi = -3 \tan \alpha \cdot \eta$$

Questa retta deve soddisfare anche il passaggio per il punto di impatto, e dunque:

$$\frac{\xi_D}{\eta_D} = -3 \tan \alpha$$

Sulla base dunque delle espressioni ricavate per le coordinate del punto di impatto, si ha che la precedente diviene:

$$\frac{D \cos \alpha \left(-2 \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} \right)}{D \sin \alpha \left(2 \cos^2 \alpha - \frac{1}{2} \right)} = -3 \tan \alpha$$

Sviluppando i calcoli si ottiene la seguente equazione:

$$8 \cos^4 \alpha - 12 \cos^2 \alpha + 3 = 0$$

per cui posto $z = \cos^2 \alpha$, si ricava:

$$8z^2 - 12z + 3 = 0$$

che ammette le seguenti soluzioni:

$$z_{1,2} = \frac{12 \pm \sqrt{48}}{16}$$

ovvero: $\cos \alpha = \pm \sqrt{1.183013}$ e $\cos \alpha = \pm \sqrt{0.316987}$

Tra questi l'unico valore di interesse fisico, rispetto al problema di che trattasi, risulta:

$$\cos \alpha = 0.563016$$

Per cui risultando:

$$\cos \alpha = \frac{\omega^2 D}{2g}$$

Si ricava il valore della velocità angolare che, corrispondentemente al diametro D assunto per il vaglio, fornisce un impatto ortogonale sulla superficie di questo, ovvero:

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \times 0.563016 g}{D}}$$

con ω espresso in rad/s. E' dunque possibile determinare le coordinate del corrispondente punto di impatto Y.

Allo stesso modo è possibile calcolare la tangente trigonometrica al cerchio per D e la tangente trigonometrica della retta passante per il centro della circonferenza e per il punto D; l'angolo formato dalla tangente alla traiettoria parabolica e la tangente per la circonferenza rende conto di come la particella veda l'area disponibile di passaggio.

4.3 Modello predittivo di calcolo

I modelli finora sviluppati e che hanno tentato di guidare la scelta sia del progettista che del gestore di impianti si fondavano su basi puramente meccanicistiche (Stessel, 1991) o puramente empiriche (Wheeler et al, 1989). Tali approcci hanno portato, da un lato, alla formulazione di modelli estremamente complessi e delicati, che difficilmente si prestano a descrivere il comportamento di un materiale variabile e disomogeneo quale il rifiuto urbano e dall'altra allo sviluppo di criteri sì maggiormente rispondenti alla realtà, ma strettamente legati allo specifico impianto ed alla specifica merceologica in ingresso, per cui difficilmente applicabili ad altre realtà.

Lo sviluppo di un modello che consenta di determinare l'efficienza di rimozione per le diverse frazioni merceologiche di un rifiuto, ciascuna caratterizzata da una propria distribuzione dimensionale, può essere eseguito con riferimento ai parametri precedentemente illustrati.

Considerata dunque una particella di rifiuto di diametro D_p , la probabilità di passaggio di questa attraverso un foro circolare del vaglio di diametro D_f può essere determinata con

riferimento alla seguente figura:

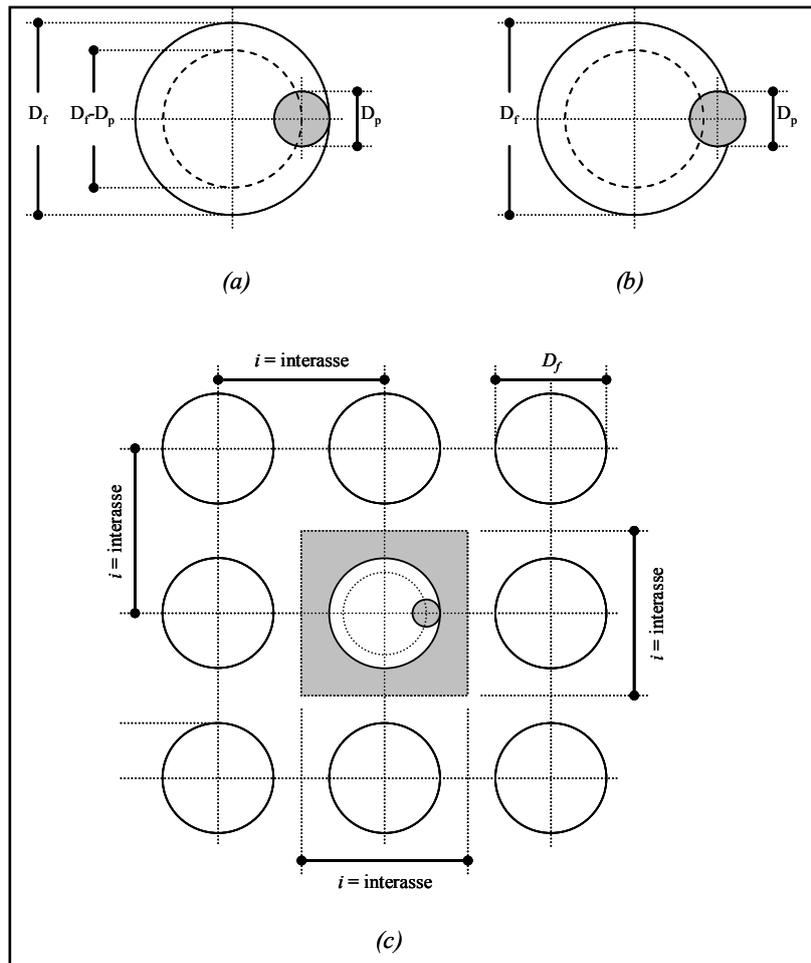


Figura 4.7 - (a) Condizione limite di passaggio di un oggetto attraverso il foro dello schermo; (b) Condizione di non passaggio dell'oggetto attraverso il foro dello schermo; (c) Interasse tra i fori.

Risultando infatti la probabilità di passaggio della particella attraverso il foro pari al rapporto tra il numero dei casi favorevoli (pari all'area del cerchio di diametro $(D_f - D_p)$) ed il numero dei casi egualmente probabili (pari all'area del quadrato di lato i , interasse tra i fori), detta probabilità P_0 risulterà:

$$P_0 = \frac{\pi(D_f - D_p)^2 / 4}{i^2}$$

Dividendo dunque numeratore e denominatore per l'area del foro, si ha:

$$P_0 = \frac{(\pi(D_f - D_p)^2 / 4) / \pi D_f^2 / 4}{i^2 / \pi D_f^2 / 4} = \frac{(D_f - D_p)^2}{D_f^2} \frac{\pi D_f^2 / 4}{i^2}$$

Osservando inoltre che il secondo rapporto della precedente rappresenta la frazione f_p di area

disponibile al passaggio rispetto a quella totale, la probabilità di passaggio P_0 di una particella di diametro D_p risulta:

$$P_0 = (1 - D_p/D_f)^2 F_{ad} \quad (14)$$

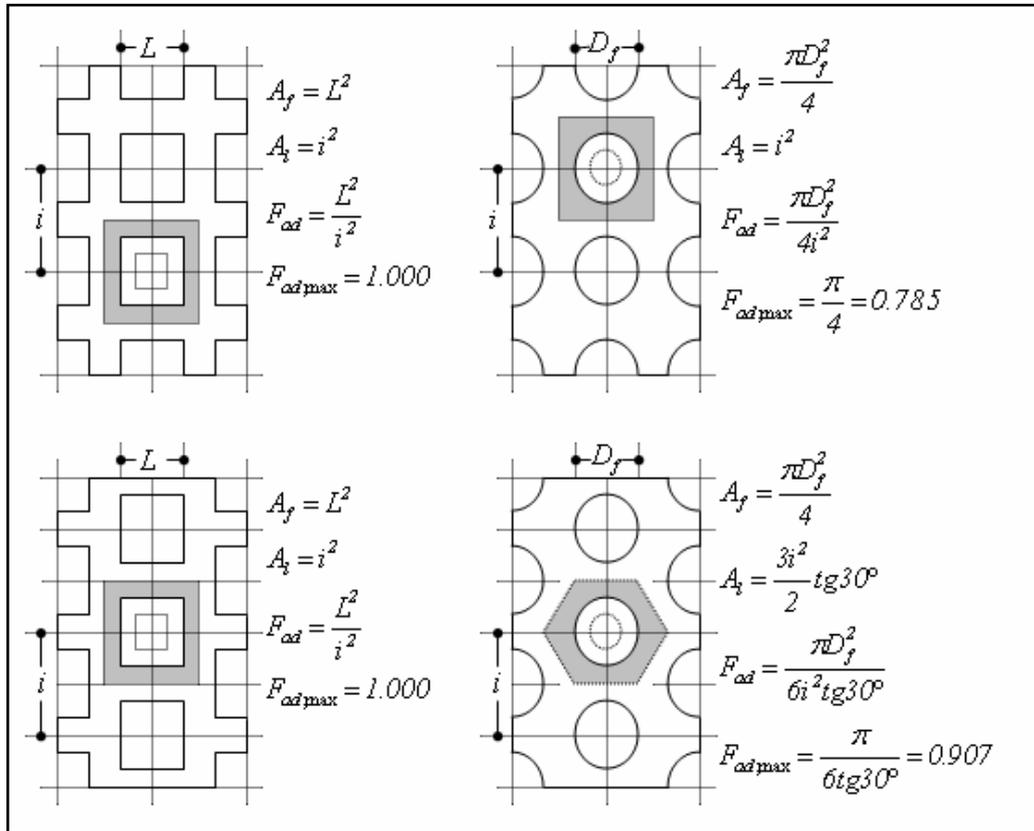


Figura 4.8 – Tipologie di maglie forate e corrispettive frazioni di area disponibile al passaggio.

valida per $D_p \leq D_f$ mentre per $D_p > D_f$ la probabilità di passaggio P_0 risulta ovviamente nulla.

Ovviamente la quantità $(1-P_0)$ rappresenta la probabilità che una particella di diametro D_p non passi attraverso i fori e resti dunque per questo motivo nel flusso di sopravaglio.

Le considerazioni svolte sono ovviamente relative ad un impatto della particella sul mantello interno del vaglio; poiché la particella di diametro D_p impatterà N_i volte sul mantello interno del vaglio solo se non verrà rimossa e verrà con ciò a trovarsi nel flusso di sopravaglio in uscita, la probabilità totale che la particella ha di far parte di detto flusso di sopravaglio risulterà pari al prodotto $(1-P_0) \cdot (1-P_0) \cdot (1-P_0) \dots (1-P_0)$ per N_i volte. Se dunque si indica con m la portata massica del rifiuto e con $f_f(i,j)$ e $f_o(i,j)$ le frazioni in massa del componente i (ad esempio vetro) di classe dimensionale j , rispettivamente per il flusso di alimentazione e di sopravaglio, si può scrivere la seguente relazione:

$$m \cdot f_o(i,j) = (1 - P_0)^{N_i} m \cdot f_f(i,j) \quad (15)$$

Allo stesso modo, se si indicano con $f_f(i,j)$ e $f_u(i,j)$ le frazioni in massa del componente i (ad esempio vetro) di classe dimensionale j , rispettivamente per il flusso di alimentazione e di sottovaglio, si può scrivere la seguente relazione:

$$m \cdot f_u(i, j) = \left(1 - (1 - P_0)^{N_i}\right) m \cdot f_f(i, j) \quad (16)$$

Considerando il fatto che l'angolo che si viene a formare tra la tangente alla traiettoria della particella e la tangente alla circonferenza del vaglio nel punto di impatto D , varia al variare della velocità di rotazione, si può facilmente osservare come un osservatore solidale con la particella vedrà una diversa superficie disponibile di passaggio, così come schematizzato in Figura .

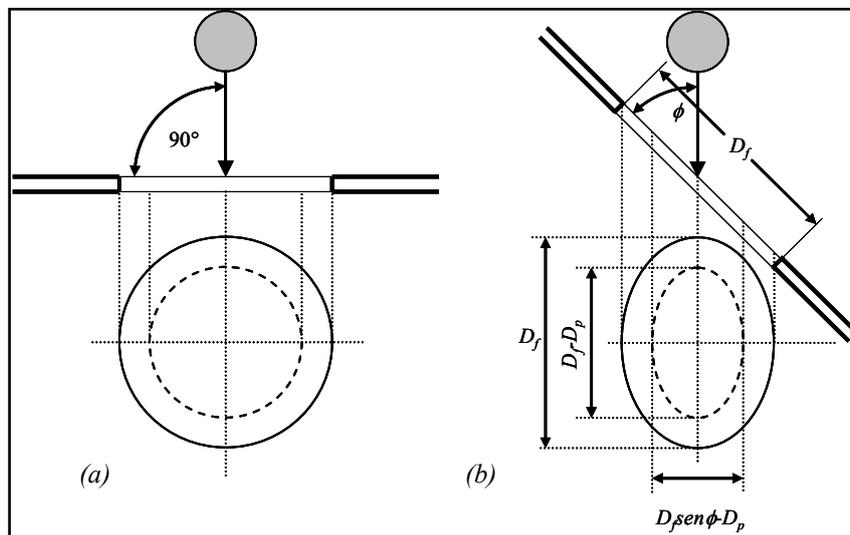


Figura 4.9 - (a) Impatto perpendicolare allo schermo e sezione massima disponibile al passaggio ;
(b) Impatto inclinato rispetto allo schermo e sezione minima disponibile al passaggio.

In particolare, detto ϕ l'angolo di incidenza, si ricavano facilmente i seguenti parametri:

$$D_f' = D_f \cdot \text{sen} \phi \quad \text{e} \quad i' = i \cdot \text{sen} \phi$$

Risultando dunque la probabilità di passaggio della particella attraverso il foro ellittico pari al rapporto tra il numero dei casi favorevoli (pari all'area dell'ellisse di asse maggiore $(D_f' - D_p)$) ed asse minore $(D_f' - D_p)$) ed il numero dei casi egualmente probabili (pari all'area del rettangolo di lati i e $i \cdot \text{sen} \phi$), detta probabilità P_0 risulterà:

$$P_0 = \frac{\pi \frac{(D_f - D_p)}{2} \frac{(D_f' - D_p)}{2}}{i \times i'}$$

Ovvero:

$$P_0 = \frac{\frac{\pi}{4} (D_f - D_p) (D_f \text{sen} \varphi - D_p) / (\pi D_f^4 / 4)}{i^2 \text{sen} \varphi / (\pi D_f^2 / 4)}$$

Da cui:

$$P_0 = \frac{(D_f - D_p) (D_f \text{sen} \varphi - D_p)}{D_f^2 \text{sen} \varphi} f_p$$

e con $F_{ad} = f_p$

4.4 Sviluppo del modello

Per poter verificare, l'attendibilità del modello di calcolo descritto nel capitolo precedente, è stata svolta una campagna di misurazioni, su un vaglio pilota, in scala 1:10 rispetto alle dimensioni di un vaglio reale, utilizzato in un impianto di selezione dei rifiuti solidi urbani.

Il vaglio pilota, è costituito da un cilindro in lamiera forata (schermo), poggiato su quattro ruote indipendenti, fissate a loro volta, su una intelaiatura in acciaio. La parte del telaio, sottostante il vaglio, presenta un'apertura a scivolo per il recupero del materiale di sottovaglio, mentre all'uscita dello schermo, è presente uno scivolo per la raccolta del materiale di sopravaglio. Per variare l'angolo di inclinazione del vaglio con l'orizzontale, è stata posta un regolatore a vite, tra telaio e controtelaio, con quest'ultimo munito di gambe.

La trazione, viene trasmessa al tamburo, per mezzo di due cinghie in gomma, collegate a un motore elettrico, munito di motoriduttore. Quest'ultimo, capace di variare la frequenza da un minimo di 20 Hz (12 r.p.m.) ad un massimo di 60 Hz (40 r.p.m.).

Le caratteristiche dimensionali del suddetto vaglio sono le seguenti:

LUNGHEZZA TOTALE DELLO SCHERMO	110 cm
LUNGHEZZA VAGLIANTE DELLO SCHERMO	80 cm
DIAMETRO DELLO SCHERMO	32 cm
DIAMETRO FORI DELLO SCHERMO	1 cm
ANGOLO DI INCLINAZIONE LONGITUDINALE DELLO	$1^\circ < \gamma < 6^\circ$

SCHERMO	
VELOCITA' TANGENZIALE	12 < r.p.m. < 40

Tabella 4.10 Caratteristiche dimensionali del vaglio pilota.



Foto 4.11 Vista laterale del vaglio pilota .

All'interno del vaglio, per tutta la sua lunghezza, sono presenti quattro rialzi in metallo, i così detti *facchini*, di 2 cm di altezza, concepiti per impedire lo scivolamento degli oggetti sulla rete vagliante e poter approssimare il movimento caratteristico al moto a cataratta, caratterizzato dai migliori efficienza di vagliatura.

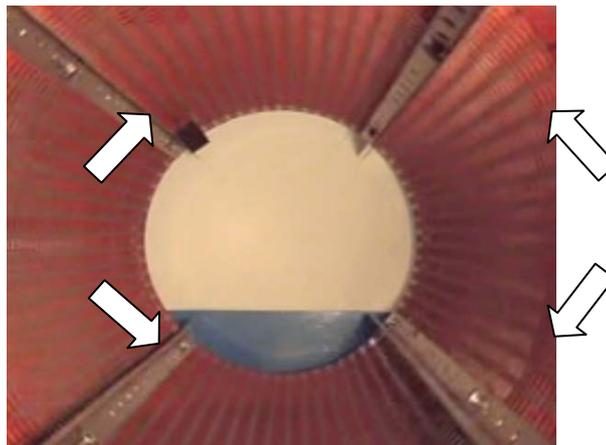


Foto 4.12 Vista interna del vaglio pilota .

4.4.1 Prove sperimentali

La validazione del modello deterministico, è stata eseguita confrontando gli output del modello stesso con i risultati di indagine sperimentale.

L'indagine, si è incentrata sulle misurazioni del numero di impatti di alcuni oggetti, introdotti

singolarmente, all'interno del vaglio pilota descritto in precedenza.

Per la prima campagna di misurazioni, sono state utilizzate differenti forme geometriche e differenti materiali, con dimensioni maggiori rispetto all'area dei fori presenti sul schermo quali: *tappi di plastica di bottiglia, tappi di sughero, cubetti in legno, ciottoli di ghiaia, forme irregolari di cartone e di plastica trasparente (PET)*;

mentre per la seconda campagna, sono stati impiegati oggetti con forme geometriche ben definite e una dimensione minore rispetto all'area dei fori dello rete vagliante, tali da poter passare nei fori dello della rete come: *cilindri di legno di lato variabile, bastoncini di legno.*



Foto 4.13 Oggetti utilizzati durante la campagna di misurazioni .

Nel caso specifico, dei tappi di plastica e dei cubetti di legno, sono state effettuate le misure per ciascun valore dell'angolo di inclinazione del tamburo con l'orizzontale(da 1 a 6 gradi) e sono state utilizzate cinque diverse velocità di rotazione riportate di seguito:

Frequenza	Velocità
20 Hz	12,00 giri/minuto
30 Hz	18,20 giri/minuto
40 Hz	25,50 giri/minuto
50 Hz	32,50 giri/minuto
60 Hz	40,00 giri/minuto

Tabella 4.14 Velocità di rotazione utilizzate.

Dai dati è emerso, come era ragionevole dedurre, che all'aumentare della velocità di rotazione del vaglio e dell'angolo di inclinazione con l'orizzontale, si verifica una diminuzione del numero di impatti, prima che gli oggetti cadano nello scivolo del sopravaglio.

Di seguito sono riportate le tabelle con il numero medio di impatti per il tappo di plastica e per il cubetto di legno. Le differenze riscontrabili sono dovute alla differente forma degli oggetti. Il tappo di plastica, vista la sua forma pseudo-cilindrica, impatterà più volte rispetto al cubetto di legno, dato che a seguito dell'impatto sulla parte bassa dello schermo, si instaura un rotolamento sia del verso positivo che negativo sull'asse dello schermo.

Numero Medio di Impatti (Tappo di Plastica)					
	12 r.p.m.	18 r.p.m.	25,5r.p.m.	32,5r.p.m.	40r.p.m.
2°	29,74	19,12	18,73	16,08	15,12
3°	18,28	10,22	9,45	10,97	11,23
4°	12,97	7,18	6,72	7,99	8,70
5°	8,88	5,31	6,08	6,26	7,25
6°	5,24	4,47	4,46	4,70	6,03

Tabella 4.15 Numero medio di impatti misurati utilizzando il tappo di plastica..

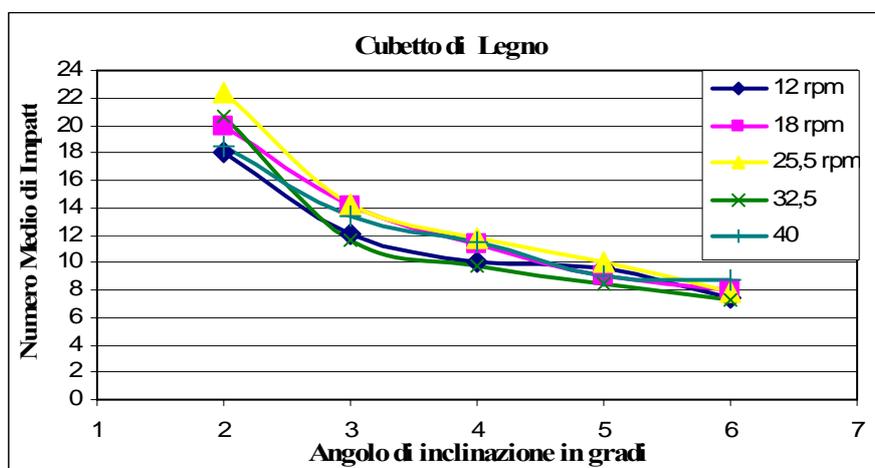


Grafico 4.16 Rappresentazione delle curve di velocità per il cubetto di legno.

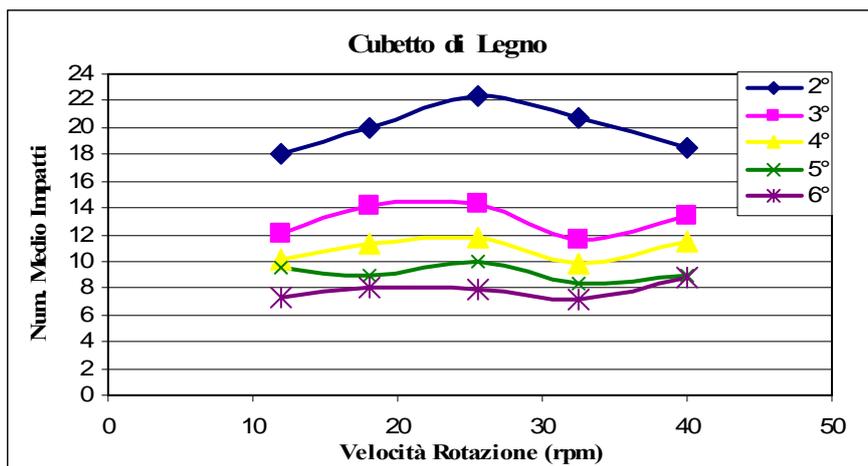


Grafico 4.17 Rappresentazione delle curve di inclinazione per il cubetto di legno.

Nel grafico seguente, invece, vengono riportate le misurazioni effettuate utilizzando i diversi materiali citati in precedenza. Come è possibile vedere, il numero degli impatti è più alto nel caso dell'utilizzo dei pezzi irregolari di cartone e plastica.

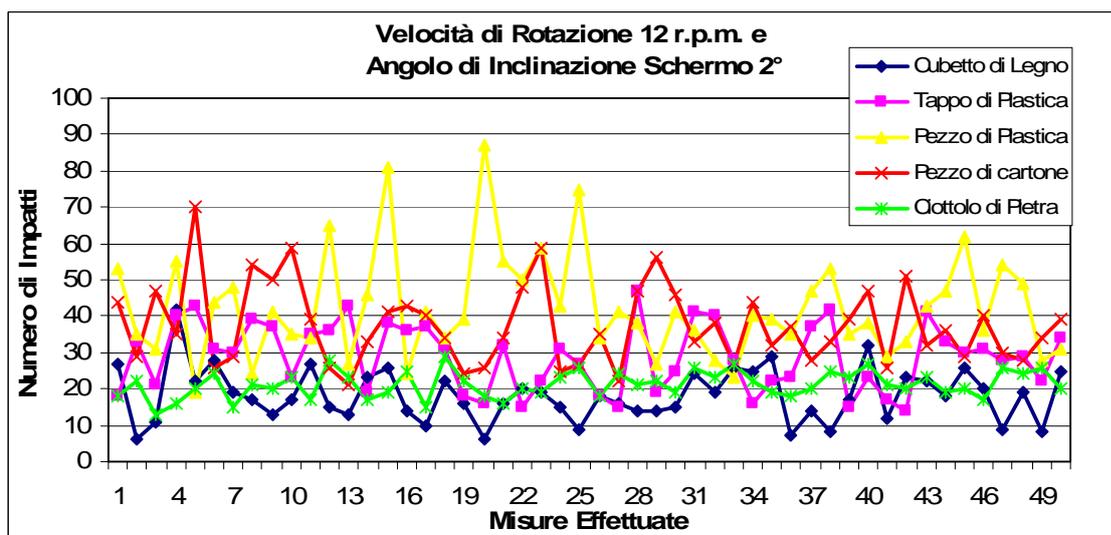


Grafico 4.18 Grafico dell'andamento degli impatti con l'utilizzo di oggetti e materiali differenti.

Nella seconda campagna, come detto in precedenza, sono stati utilizzati oggetti di diametro inferiore rispetto al diametro dei fori presenti sullo schermo del vaglio.

Di seguito sono riportati i risultati percentuali ottenuti utilizzando il modello di calcolo esposto nel Capito 3 e misure dirette effettuate sul vaglio in scala.

VELOCITA' DI ROTAZIONE 12 r.p.m. E ANGOLO DI INCLINAZIONE VAGLIO $\gamma = 2^\circ$					
OGGETTO	DIAMETRO e LATO	RISULTATI MODELLO		MISURE VAGLIO IN SCALA	
		Sopravaglio	Sottovaglio	Sopravaglio	Sottovaglio
CILINDRO LEGNO	D=0,4 cm L=1 cm	0,30%	99,70%	0,00%	100,00%

""	""	D=0,4 cm L=2 cm	15,65%	84,35%	7,00%	93,00%
""	""	D=0,4 cm L=3 cm	34,25%	65,75%	20,00%	80,00%
CILINDRO LEGNO		D=0,8 cm L=1 cm	0,71%	99,29%	7,00%	93,00%
""	""	D=0,8 cm L=2 cm	90,28%	9,72%	94,00%	6,00%
""	""	D=0,8 cm L=3 cm	99,93%	0,07%	100,00%	0,00%

Tabella 4.19 Valori percentuali ricavati dal modello e dalle misurazioni registrate sul vaglio pilota utilizzando una velocità di rotazione di 12 r.p.m. e un angolo di inclinazione con l'orizzontale di 2°.

I valori trovati, sono molto simili, a testimonianza del fatto che il modello deterministico, simula con buona approssimazione, il comportamento che si ha nella realtà.

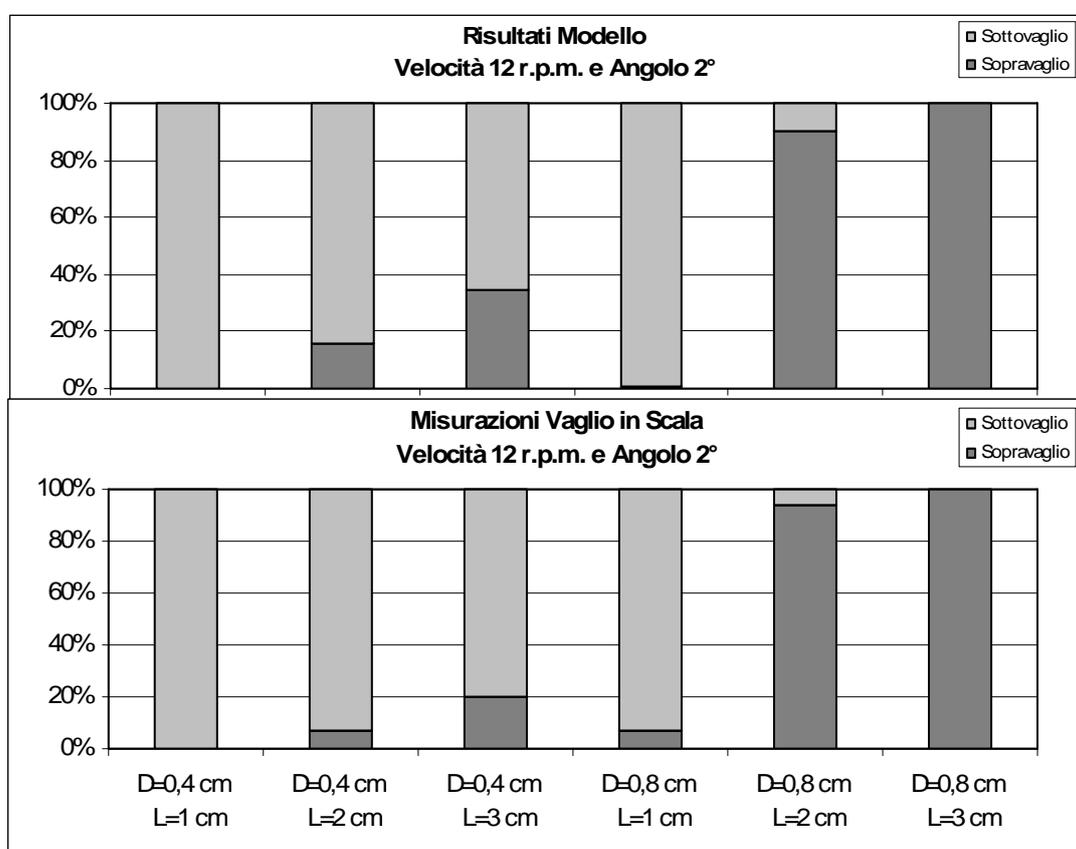


Grafico 4.20 - Confronto tra i valori percentuali ricavati dal modello e dalle misurazioni registrate sul vaglio pilota utilizzando una velocità di rotazione di 12 r.p.m. e un angolo di inclinazione con l'orizzontale di 2°.

VELOCITA' DI ROTAZIONE 12 r.p.m. E ANGOLO DI INCLINAZIONE VAGLIO $\gamma = 3^\circ$					
OGGETTO	DIAMETRO e LATO	RISULTATI MODELLO		MISURE VAGLIO IN SCALA	
		Sopravaglio	Sottovaglio	Sopravaglio	Sottovaglio
CILINDRO LEGNO	D=0,4 cm L=1 cm	2,20%	97,80%	0,00%	100,00%
""	D=0,4 cm L=2 cm	25,59%	74,41%	10,00%	90,00%

""	""	D=0,4 cm L=3 cm	28,70%	71,30%	22,00%	78,00%
CILINDRO LEGNO		D=0,8 cm L=1 cm	79,17%	20,83%	6,00%	94,00%
""	""	D=0,8 cm L=2 cm	99,27%	0,73%	94,00%	6,00%
""	""	D=0,8 cm L=3 cm	99,52%	0,48%	94,00%	6,00%

Tabella 4.21 Valori percentuali ricavati dal modello e dalle misurazioni registrate sul vaglio pilota utilizzando una velocità di rotazione di 12 r.p.m. e un angolo di inclinazione con l'orizzontale di 3°.

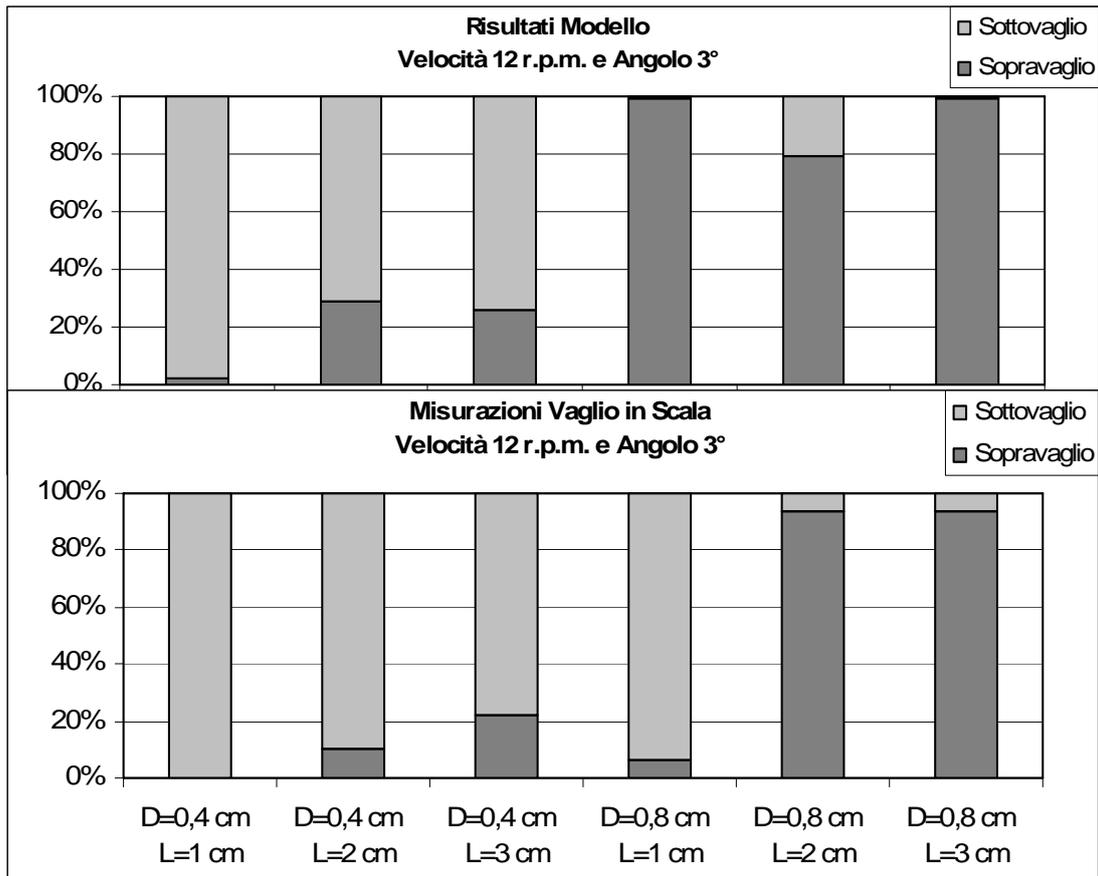


Grafico 4.22 - Confronto tra i valori percentuali ricavati dal modello e dalle misurazioni registrate sul vaglio pilota utilizzando una velocità di rotazione di 12 r.p.m. e un angolo di inclinazione con l'orizzontale di 3°.

4.4.2 Implementazione del modello deterministico tramite Matlab

E' stato possibile mettere in relazione le frequenze relative del numero di impatti registrato delle curve continue modellate sugli stessi dati., questo grazie all'utilizzo del *dffitool* del programma Matlab. Tale applicazione è stata utilizzata anche nel capitolo successivo, per disegnare i grafici inerenti al potere calorifico superiore calcolato sul CDR sia umido che secco.

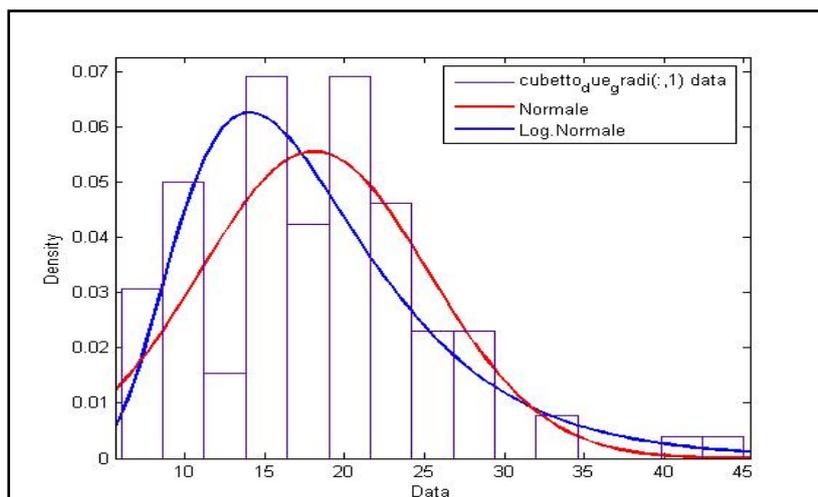


Grafico 4.23 - Modellazione Normale e Log. Normale utilizzando i dati iniziali (il cubetto di legno).

Applicando alla procedura di generazioni di numeri pseudo casuali, il test di Kolmogorov-Smirnov, è stato possibile confrontare i valori ottenuti con la distribuzione continua, stimandone la distanza positiva o negativa, fra le funzioni cumulative.

Per effettuare il test, sono state utilizzate le frequenze cumulate della nostra funzione empirica e poi sono state confrontate con quelle delle curve teoriche ipotizzate.

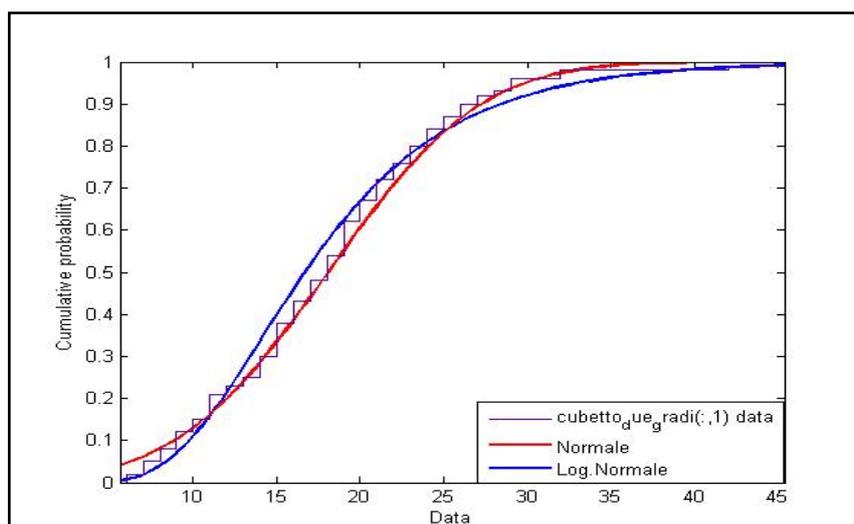


Grafico 4.24 - Confronto frequenze cumulate Normale e Log.Normale con la curva empirica (cubetto legno).

Valutando la differenza tra la nostra funzione e la curva teorica, si controllano i rispettivi valori della tabella di Kolmogorov-Smirnov, dalla quale è emerso che la migliore funzione di approssimazione è quella Log.Normale.

Per il calcolo delle espressioni sviluppate nel modello deterministico, visto nel capitolo precedente, si è reso necessario l'utilizzo del software Matlab per snellire il procedimento di calcolo.

Di seguito, vengono riportati i grafici, utilizzando le misure di un vaglio a scala reale e quelle inerenti al vaglio pilota.

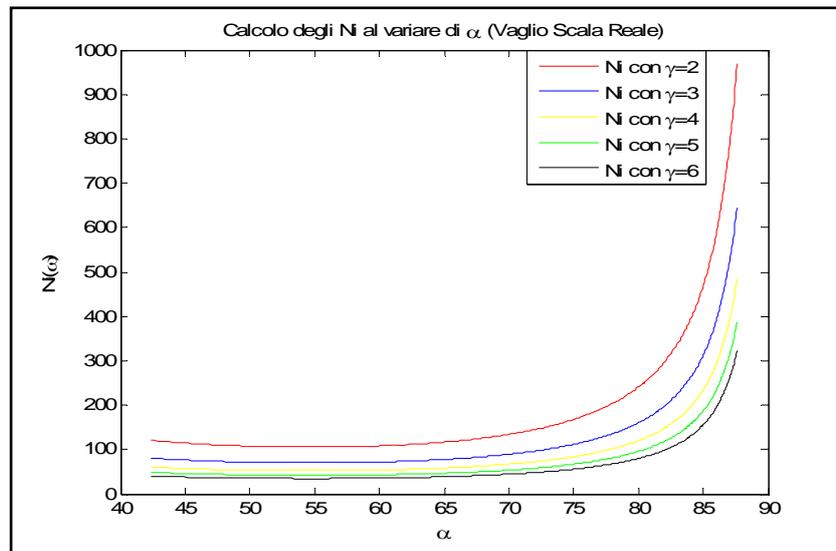


Grafico 4.25 - Numero di impatti al variare dell'angolo di inclinazione per un vaglio in scala reale

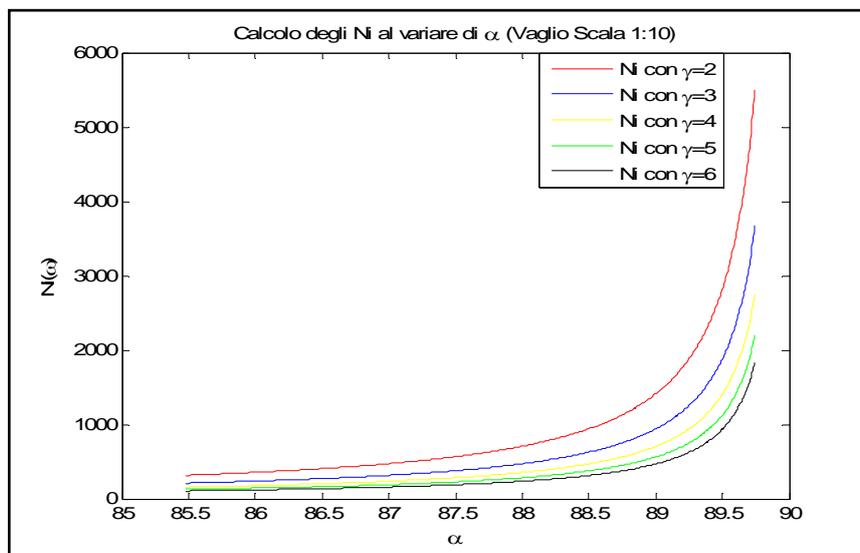


Grafico 4.26 - Numero di impatti al variare dell'angolo di inclinazione per un vaglio in scala 1:10

L'andamento delle curve è influenzato dalla presenza dei facchini all'interno dello schermo vagliante, presenza di cui il modello non tiene conto, i quali limitano il campo di variazione dell'angolo di distacco α da un minimo di 20° a un massimo di 45° .

Per rendere visibile questo comportamento, sono state fatte delle registrazioni video, a differenti velocità di rotazione dello schermo e dalle quali sono stati estratti dei fotogrammi che visualizzano i punti in cui l'oggetto impatta sulla superficie dello schermo vagliante.

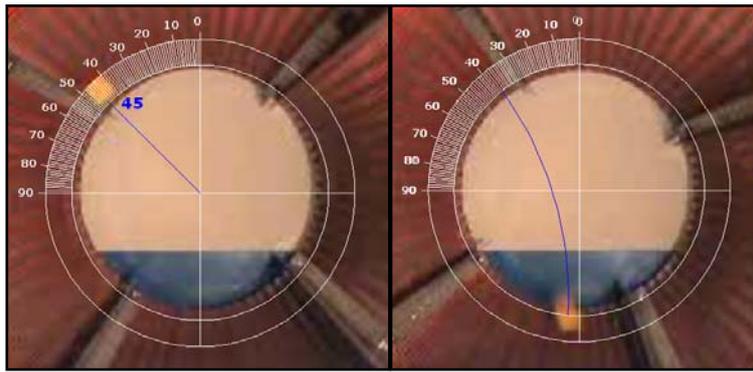


Foto 4.27 Fotogramma del punto di distacco e di impatto del cubetto di legno a 12 r.p.m.

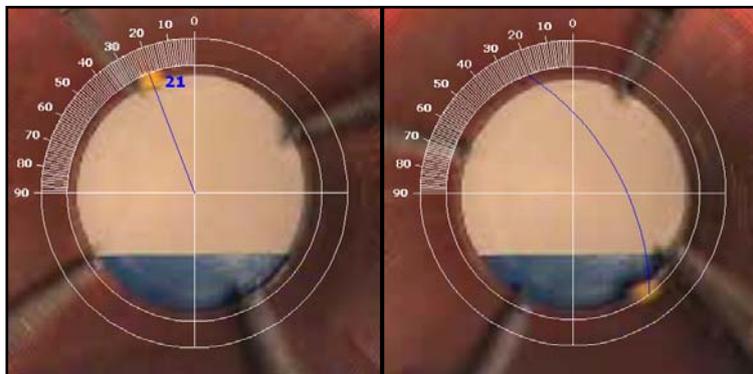


Foto 4.28 Fotogramma del punto di distacco e di impatto del cubetto di legno a 40 r.p.m

5.APLICAZIONE :OTTIMIZZAZIONE CDR

Giunti a questo risultato si è potuto decidere di testare il modello applicandolo ad un vaglio reale, alimentato da rifiuto tal quale, da far ‘girare’ sotto monitoraggio al fine di poter apprezzare gli scostamenti da quanto simulato dal modello.

A tale scopo abbiamo avuto a disposizione il vaglio a tamburo rotante dell’impianto di Rocca Cencia, grazie al quale abbiamo eseguito le varie prove sperimentali necessarie.

5.1 Descrizione Impianto

Il comparto di selezione di cui ci si è avvalsi per la validazione del modello oggetto della presente ricerca è uno dei trattamenti cui viene sottoposto il rifiuto urbano della città di Roma una volta avviato a recupero presso gli impianti di proprietà della azienda municipale ambiente della città.

Lo scopo generale del trattamento è la separazione dai rifiuti (tal quali) provenienti dalla raccolta indifferenziata della frazione organica, combustibile, metallica.

La frazione organica stabilizzata potrà essere utilizzata come terreno di copertura nella coltivazione di discariche nell’attesa che l’evoluzione normativa ne consenta più nobili utilizzi alternativi, come *compost grigio*, nel recupero di siti degradati, ecc.; la parte combustibile, accuratamente selezionata e valorizzata, nota come combustibile derivato da rifiuto (ovvero CDR) sarà avviata a termovalorizzatori; i metalli (ferrosi e non) sono destinati all’industria siderurgica per mezzo dell’intermediazione dei consorzi di filera (CIAI, CNA).

Nell’impianto ‘prestato’ alla validazione del modello, tutte le operazioni di ricezione, selezione, produzione del CdR ed igienizzazione della sostanza organica sono state previste all’interno di corpi di fabbrica completamente chiusi e posti in depressione. Il complesso si articola nei seguenti reparti:

1) Ricevimento dei rifiuti.

L’RSU, proveniente direttamente dalla raccolta stradale, è scaricato dagli appositi automezzi all’interno dei locali di Ricezione. Opportuni caricatori fissi a benna idraulica provvedono ad alimentare i mulini triturator (primo comparto di trattamento meccanico) previa cernita e separazione del materiale non-triturabile eventualmente presente tra i RU.

2) *Trattamento dei rifiuti triturati.*

I rifiuti triturati sono inviati ai vagli che provvedono alla separazione della frazione a prevalente matrice organica, sottovaglio, dalla frazione a prevalente matrice inorganica, sopravaglio. Proprio detta separazione è stata oggetto della modellazione sviluppata dal presente lavoro. Il sovrvallo è inviato a un separatore aeraulico che provvede alla separazione della parte leggera (con maggiore potere calorifico) da quella pesante. La frazione leggera, che è CDR grezzo, è inviata, previa valorizzazione operata a mezzo di separatori magnetici, ad un raffinatore dimensionale (trituratore secondario) seguito da ulteriore magnete, ovvero ad una pressa per l'eventuale stoccaggio in balle preliminare alla rimessa in linea direttamente nel raffinatore.

Riguardo lo scarto pesante, passante all'aeraulico, un deferrizzatore elettromagnetico provvede al recupero dei residui ferrosi ancora presenti; effettuata quest'ultima operazione anche la frazione pesante, scarti pesanti, è avviata raffinazione dimensionale ovvero ad una pressa.

3) *Igienizzazione della frazione organica.*

Il sottovaglio viene in primo luogo deferrizzato con un separatore elettromagnetico per il recupero dei residui ferrosi; di seguito viene inviato alle aie di igienizzazione in cui subisce un trattamento di ossidazione aerobica per garantirne la stabilizzazione.

4) *Raffinazione della frazione organica.*

La frazione organica stabilizzata è inviata a dei vagli che provvedono alla raffinazione della frazione igienizzata separando gli scarti finali (sovrvallo) ancora contenuti nella frazione organica stabilizzata (FOS).

L'impianto è costituito da due linee gemelle aventi ciascuna capacità pari al 50% della portata di targa dell'impianto (750 ton/die); ciò conferisce all'impianto maggiore continuità operativa e flessibilità.

La presenza di eventuali apparecchiature non duplicate sarà riconducibile alla logistica dell'impianto; per evitare fermi impianto derivanti da guasti alle presse, queste sono state dotate di apparecchiature di by-pass, così che il materiale possa essere eventualmente scaricato sfuso su autocarri o su contenitori scarrabili.

La tecnologia dei nastri trasportatori invece non è tale da subire danni il cui superamento possa richiedere tempi tali da pregiudicare il ciclo di conferimento e trattamento dei rifiuti. Di seguito si descrivono più in dettaglio le modalità operative dei reparti sopra presentati.

5.1.1 Reparto ricezione, selezione RSU e produzione CdR

I rifiuti giungono all'impianto trasportati dagli automezzi all'uopo predisposti e come prima operazione vengono sottoposti al controllo ponderale del quantitativo recapitato per mezzo di una pesa ubicata in prossimità del cancello di ingresso.

Effettuate le operazioni di pesatura, gli automezzi che trasportano gli RSU sono abilitati a scaricare i rifiuti dalle piattaforme di scarico disposte al termine di una rampa.



Figura 5.1 - comparto di ricezione RU

Il trasferimento dei rifiuti dalla zona di scarico alle zone di azione dei caricatori a polipo (che alimentano le due linee) è effettuato per mezzo di pala gommata dotata, per l'operatore, di cabina pressurizzata con aria filtrata e condizionata.

La movimentazione dei rifiuti con la pala e quindi con i polipi facilita l'individuazione di rifiuti ingombranti o potenzialmente dannosi per le apparecchiature e/o per il processo; tali materiali saranno accumulati nell'apposita area e successivamente allontanati.

L'edificio ricezione è posto in depressione e l'aria aspirata viene depolverata e convogliata all'edificio di igienizzazione. Sono garantiti n°3 ricambi/ora circa durante il normale periodo di funzionamento dell'impianto.

Sono installati mulini (tritinatori primari) a doppio rotore che hanno il duplice scopo di liberare il materiale dai sacchetti di plastica in cui in gran parte viene conferito e di fornire una prima, grossolana triturazione di eventuali residui ingombranti triturabili (omogeneizzazione).

A valle dell'operazione di riduzione dimensionale primaria i rifiuti sono inviati tramite trasportatori a nastri al trattamento di vagliatura primaria.



Figura 5.2 - comparto di vagliatura

I vagli rotanti sono del tipo a due uscite per la separazione di:

Sottovaglio: flusso a prevalente matrice organica da destinare alla successiva fase di igienizzazione;

Sopravaglio: flusso costituito dalla frazione secca a prevalente matrice carta-plastica, a basso contenuto di umidità (<25%), da destinare alle successive fasi di lavorazione per la produzione di CdR.

Alla luce delle migliori tecnologie disponibile (Best Available Techniques - BAT) all'epoca del progetto dell'impianto qui descritto e allo scopo di contenere l'umidità del flusso destinato alla produzione del CdR, si è prevista l'adozione di un vaglio rotante con tamburo rivestito da pannelli di lamiera con fori rettangolari da 80x80 mm.



Figura 5.3

Il reparto di selezione è, inoltre, completato da cinque separatori magnetici a nastro e due separatori a correnti passive a nastro, per la separazione dei materiali ferrosi e non ferrosi, dei quali sei (quattro ferrosi e due non-ferrosi) operanti sul flusso di sopravvaglio e uno operante sul materiale organico.

I materiali metallici così recuperati vengono riavviati in filiera.

La frazione secca può essere ulteriormente selezionata per produrre un combustibile a più alto potere calorifico (CdR). Tale frazionamento è effettuato con un separatore aeraulico, che inviando aria sulla frazione combustibile invia la parte leggera, a più alto potere calorifico, in una camera di calma e da qui alla pressa per la produzione del CdR; la parte pesante è inviata alla pressa di compattazione del sovrvallo.

La portata d'aria necessaria al trasporto pneumatico della frazione leggera viene ricircolata per circa l'80% mentre la restante parte viene estratta e inviata all'ingresso del vaglio rotante per consentire lo spurgo delle polveri (che vengono captate da un impianto centralizzato di aspirazione e depolverazione).



Figura 5.4 - cernita automatico - aeraulica

Il materiale leggero separato dalla camera di calma viene scaricato attraverso le rotocelle e inviato tramite un opportuno nastro a un caricatore a piastre dotato di tramoggia; tale apparecchiatura incrementa la flessibilità del processo di produzione del CdR, costituendo un polmone di accumulo per il materiale nei momenti in cui la pressa è in fase di lavoro.

Il CdR in balle originato dalla selezione è momentaneamente accumulato su un'area pavimentata, realizzata in prossimità delle linee di pressatura.

Nello stesso modo viene trattato ed allontanato lo scarto pesante.

5.1.2 Reparto igienizzazione sostanza organica

La fase di igienizzazione avviene in un'aia automatizzata a fermentazione accelerata in ambiente completamente confinato.

L'igienizzazione della frazione organica avviene consentendo la permanenza della massa in condizioni aerobiche per periodi di tempo sufficientemente lunghi, ma compatibili con un processo di lavorazione industriale, per lo sviluppo dei naturali processi fermentativi (almeno 28gg).

Il sistema si basa sull'impiego di un'aia a fermentazione accelerata completamente automatizzata.

Il grado di automazione è tale da consentire la movimentazione del prodotto senza richiedere la presenza di alcun operatore all'interno del capannone.

L'edificio, che ospita le apparecchiature per lo svolgimento del ciclo di igienizzazione accelerata, è completamente tamponato e dotato di un sistema di estrazione e depurazione dell'aria per evitare la dispersione di odori.

L'aria prodotta dal processo di trasformazione biologica è inviata ai gruppi di deodorizzazione, costituiti da torri di lavaggio (scrubber) a doppio stadio, con la possibilità di utilizzo di reagenti acidi e basici, seguito da biofiltro (a torba).

La sezione di igienizzazione è costituita da due vasche parallele tra loro.

Il ciclo di trattamento inizia quando il materiale organico viene depositato uniformemente nel lato di carico delle vasche per mezzo di un nastro trasportatore tipo tripper munito di carrello scaricatore mobile.

All'interno di ogni vasca della sezione di igienizzazione opera un carro ponte provvisto di carrello mobile portante gli organi di rivoltamento e trasporto (tre coclee), il cui ciclo di lavorazione è completamente automatizzato.

Questa apparecchiatura svolge il compito di rivoltare e trasferire il materiale dal lato di carico verso lo scarico secondo modalità prefissate.

Il fondo delle vasche è dotato di una rete di tubazioni per l'aspirazione di aria dall'ambiente dell'edificio di igienizzazione attraverso il cumulo da igienizzare e per la raccolta dei percolati.



Figura 5.5

Gli organi di rivoltamento nell'ultima sezione della vasca scaricano il prodotto che ha terminato il ciclo di processo sul sistema di nastri che alimentano le due linee di raffinazione indipendenti (una per vasca).

Il controllo visivo delle varie operazioni è effettuato direttamente dalla sala comando generale attraverso telecamere a circuito chiuso TV.

Con tale soluzione è stato possibile raggiungere un livello di mineralizzazione della sostanza ritenuto oggi corretto da enti quali l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale, già APAT).

Oltre a ciò, tale soluzione consente di mantenere tutto il processo di igienizzazione confinato all'interno degli edifici riducendo, così, in maniera notevole l'impatto ambientale dell'impianto in termini di emissioni odorifere.

5.1.3 Reparto raffinazione frazione organica

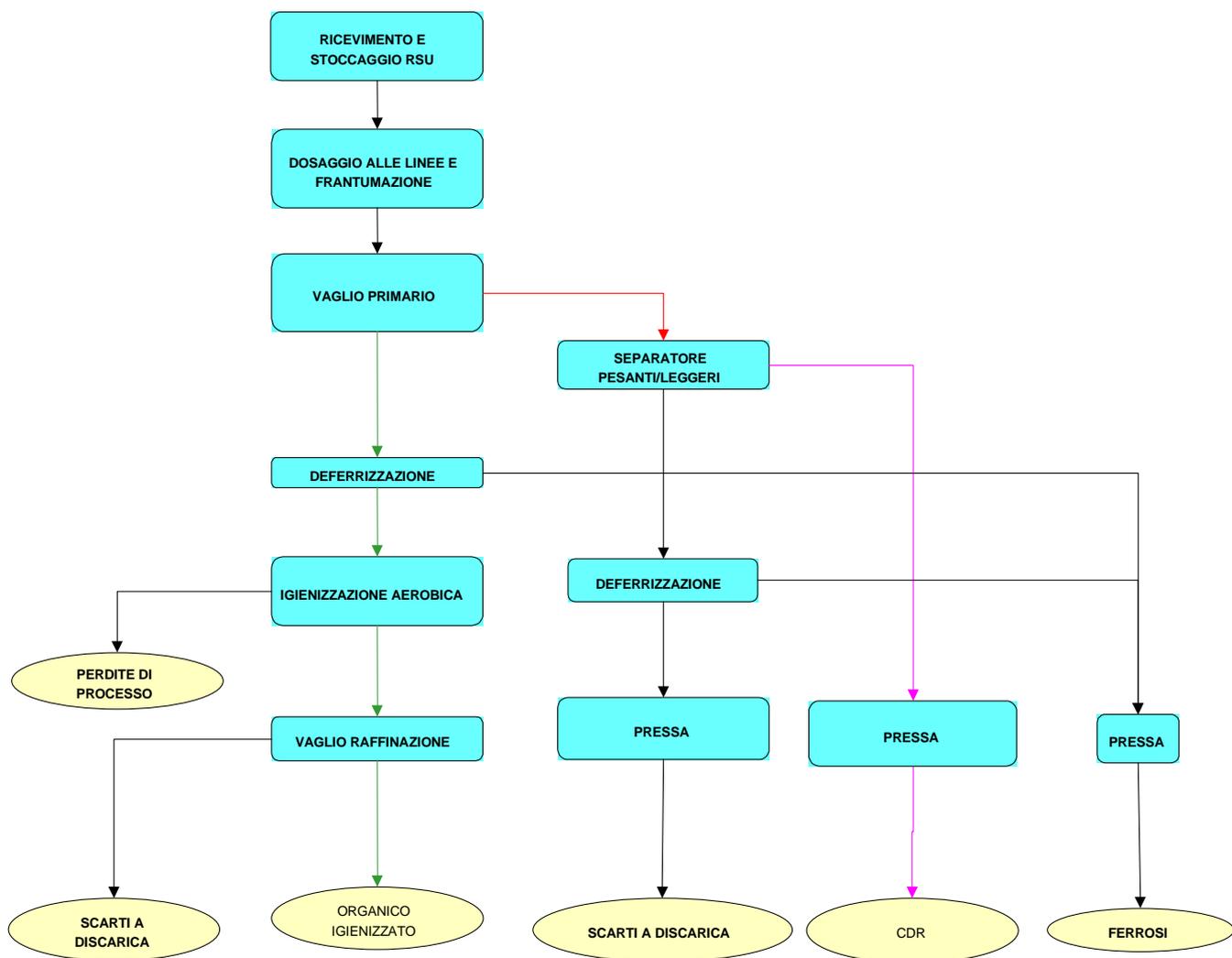
La raffinazione ha lo scopo di eliminare tutti quei materiali indesiderati che potrebbero limitare l'utilizzo della FOS.

In uscita dall'aia di igienizzazione la FOS viene avviata, tramite un sistema di nastri trasportatori, alla fase di raffinazione finale.

La raffinazione consiste di due vagli rotanti operanti in parallelo per una vagliatura al fine (15 - 20 mm) del materiale igienizzato allo scopo di allontanare i materiali indesiderati costituiti dal sopravaglio, quali plastiche, tessili, vetri, non-ferrosi e altri inerti grossolani, ecc.

Per la messa a parco del prodotto igienizzato e degli scarti vi sono due diverse aree d'accumulo all'interno del reparto di raffinazione. La ripresa dei materiali è effettuata tramite pala meccanica.

Di seguito è riportato lo schema a blocchi del trattamento



PRESIDI AMBIENTALI

I rischi ambientali legati all'esercizio di quest'impianto sono individuabili nelle emissioni gassose in atmosfera, essendo le emissioni liquide immesse nel sistema di trattamento reflui di stabilimento.

Dette emissioni consistono dell'aria che viene estratta dagli edifici dove avvengono i trattamenti.

✓ Trattamento aria ambientale

L'aria degli ambienti in cui avvengono i trattamenti descritti è inquinata da polveri e da sostanze odorigene.

Il primo intervento di protezione dell'ambiente è quello di aver curato la realizzazione degli edifici nei quali i processi hanno luogo: gli stabili sono stati realizzati impiegando strutture prefabbricate tamponate con pannelli in cemento armato con intercapedine coibentata e copertura costituita da elementi a volta e controsoffittatura in pannelli di cemento armato; le zone d'appoggio dei pannelli di parete alle colonne e quelle dei pannelli di controsoffittatura alle travi sono state accuratamente sigillate per evitare fughe d'aria verso l'esterno determinate da eventuali particolari situazioni localizzate d'inversione del gradiente barico.

Gli edifici sono ventilati per mezzo di un sistema che, oltre a garantire un numero di ricambi tale da rispettare i requisiti necessari per mantenere l'accessibilità dei locali al personale operativo, li mantiene costantemente in depressione rispetto all'ambiente esterno; l'aria degli ambienti polverosi viene filtrata su filtri a maniche e tutta l'aria che viene così estratta dagli edifici è avviata al trattamento che provvede all'abbattimento delle sostanze odorigene in essa contenute.

Poiché i rischi riguardanti la fuoriuscita d'aria maleodorante permangono anche quando l'impianto non è esercito, i sistemi di trattamento aria sono mantenuti in funzione 24 ore/giorno e, per prevenire eventuali arresti dovuti a mancanza di energia elettrica, è stato installato un adeguato gruppo elettrogeno in grado di fornire l'energia richiesta per il loro funzionamento.

✓ Sistema di ventilazione e depolverizzazione

Il sistema di ventilazione dell'impianto fornisce un adeguato numero di ricambi aria nei locali in cui si effettuano le lavorazioni, evitando l'accumulo di polveri e di odori

all'interno dei capannoni e consentendo agli operatori di lavorare in condizioni adeguate.

Tutti i locali in cui è prevista la presenza e la lavorazione dei rifiuti sono mantenuti in depressione; tale provvedimento, richiamando aria fresca dall'esterno, evita la fuoriuscita di polveri e odori molesti dai locali di lavorazione e consente il convogliamento di tutta l'aria "esausta" alle appropriate apparecchiature di trattamento.

All'interno dell'impianto di trattamento rifiuti vi sono delle zone in cui è prevalente lo sviluppo di polveri ed altre in cui è prevalente lo sviluppo di sostanze odorogene, dovuto ai processi di stabilizzazione delle parti organiche.

Le sezioni in cui si ha il prevalente sviluppo di polvere sono:

- edificio di Ricezione;
- edificio di Selezione e Produzione CdR;
- Sezione di Raffinazione.

La sezione in cui si il maggiore sviluppo di odori è l'edificio di Igienizzazione.

Il trattamento prevede le seguenti fasi:

- aspirazione dell'aria dalle zone polverose e invio a una sezione di depolverazione, costituita da filtri a maniche;
- immissione dell'aria depolverata nell'igienizzazione;
- aspirazione da questa zona ed invio alla sezione di trattamento e deodorizzazione, costituita da torri di lavaggio chimico-fisico e da uno stadio finale di biofiltrazione.

✓ Esercizio

Per trattare le previste 750 t/d di RSU il lavoro è organizzato su tre turni per un numero d'ore complessivo pari a 18; il funzionamento del macchinario dura da 10 a 12 ore e le rimanenti ore sono impiegate per operazioni di pulizia e manutenzione. L'esercizio dell'impianto avviene per 6 giorni/settimana, 312 giorni/anno, per un totale di rifiuti trattati pari a 234.000 tonnellate/anno.

5.2 Campionamento

5.2.1 Preparazione del campione rappresentativo

Al fine di ottenere risultati estendibili a tutta la comunità considerata, è essenziale che il campione raccolto e l'analisi effettuata siano effettivamente rappresentativi del territorio in esame. A tal proposito, è opportuno far precedere al momento di raccolta del materiale e di analisi di questo una fase preliminare di indagine sulla comunità in esame, sui rifiuti prodotti e sull'organizzazione della raccolta. La scelta del campione ideale deve infatti tener conto di:

- tipo di comunità (comunità rurale, urbana, mista);
- attività economica prevalente (agricoltura, pesca, acquicoltura, industria estrattiva, industria manifatturiera, agricola, tessile, ecc.);
- numero di abitazioni nella zona;
- tipologia di abitazioni;
- popolazione sedentaria;
- avvenimenti particolari che possono influenzare la natura ed il quantitativo dei rifiuti prodotti (mercati giornalieri o settimanali, manifestazioni locali, attività stagionali, turistiche, ecc.).

E' inoltre essenziale la conoscenza di dati quantitativi quali la produzione mensile e annuale (riferita all'anno precedente) della zona considerata.

Poiché la raccolta dei rifiuti è solitamente organizzata in itinerari con giorni e frequenze di raccolta differenti, è importante:

- conoscere il valore di produzione in una settimana normale (esclusi periodi di ferie ecc.);
- rilevare quali siano le raccolte differenziate effettuate (carta, vetro ecc.) e i relativi quantitativi; identificare il sistema di raccolta dei rifiuti;
- rilevare il numero di camion utilizzati per la raccolta, la relativa capacità, l'itinerario di raccolta, i codici dei veicoli, i giorni di ricezione e l'ora di ingresso al centro di trattamento.

I dati e le informazioni elencate concorrono all'inquadramento del territorio oggetto dell'analisi merceologica e forniscono indicazioni utili per la selezione di gruppi di strade o distretti ritenuti rappresentativi dell'area in esame.

Sulla base delle informazioni ottenute, si può organizzare la raccolta del campione scegliendo percorsi rappresentativi dei mezzi di raccolta o, ancora, suddividendo il territorio mediante diversi sistemi quali, ad esempio, il metodo a griglia (applicabile quando il territorio è caratterizzato da una distribuzione omogenea di insediamenti e consiste nella sovrapposizione

di una griglia, con maglie di dimensioni opportune, ad una carta in scala 1:10.000; di tutti i riquadri ottenuti, se ne sceglie in modo casuale un numero ritenuto sufficiente in base alla dimensione del campione; nei riquadri prescelti si preleva in maniera randomizzata un cassonetto o, nel caso di un sistema di raccolta porta a porta, un numero di sacchetti equivalenti alla volumetria dello stesso) o il metodo a transetti (sulla stessa carta si suddivide il territorio utilizzando le 2 vie principali del centro abitato e si preleva in modo casuale un numero di contenitori fino a raggiungere il quantitativo voluto).

Le collettività marine e montane, caratterizzate da attività stagionali di una certa rilevanza, possono subire notevoli variazioni quali-quantitative nella produzione dei rifiuti. Pertanto, appare importante, al fine dell'organizzazione della raccolta e dello svolgimento dell'analisi merceologica, conoscere la media e l'alta stagione in contrapposizione alla bassa.

Poiché, inoltre, la composizione del rifiuto può essere soggetta a variazioni stagionali, è idealmente opportuno effettuare l'analisi ad intervalli di tre mesi (marzo, giugno, settembre, dicembre) per ottenere un quadro completo della realtà in esame. In alternativa, possono essere effettuate almeno due analisi a distanza di sei mesi l'una dall'altra, avendo l'accortezza di evitare periodi anomali come Natale o le ferie estive, in modo che il campionamento risulti quanto più possibile rappresentativo.

È infine necessario considerare, durante l'organizzazione e il successivo avviamento della raccolta, i seguenti fattori e indicazioni:

- effettuare la raccolta del campione nello stesso giorno e con le stesse modalità con cui vengono prelevati i rifiuti che il campione vuole rappresentare; occorre inoltre scegliere un giorno all'interno della settimana;
- non avvertire le abitazioni dell'intenzione di effettuare un'analisi merceologica dei rifiuti: molte persone, infatti, non gradiscono che venga effettuata l'analisi dei propri rifiuti e possono modificare il proprio comportamento nel periodo del prelievo;
- usare i contenitori locali: questo assicura una raccolta significativa e costi minori rispetto all'utilizzo di contenitori extra;
- pianificare e coordinare la raccolta dall'area prescelta secondo il programma prestabilito;
- non mescolare il campione con materiali diversi oppure con altri flussi; se necessario, etichettare i campioni;
- evitare di compattare il campione: ciò rende la separazione e la classificazione più difficoltosa e può fornire valori di umidità non veritieri. La dimensione del campione in termini di abitazioni coinvolte è funzione del numero di utenze e del grado di attendibilità richiesto.

Un aiuto nella definizione della dimensione del campione può sicuramente derivare dall'analisi statistica dei dati, di cui un'utile semplificazione è fornita dalla Tabella n.3.1

Abitazioni coinvolte	Dimensione minima del campione
[n.]	[% utenze servite - abitazioni]
< 1.000	10% o 50
1.000– 9.999	5,0% o 100
10.000 – 49.999	2,5% o 500
≥ 50.000	1,0% o 1.250

Tabella n. 3.1: Dimensione del campione

Sulla base di tali indicazioni, assumendo una produzione media settimanale per famiglia di almeno 20 kg e ipotizzando la raccolta effettuata due volte a settimana, il quantitativo minimo di volgare raccolto è riportato in Tabella n. 3.2.

Numero di abitazioni coinvolte	Peso minimo del campione
	[kg]
< 1.000	500
1.000 – 9.999	1.000
10.000 – 49.999	5.000
≥ 50.000	12.500

Tabella n. 3.2: Peso del campione

Il campione raccolto deve essere successivamente ridotto di dimensione in modo da ottenere un quantitativo più maneggiabile, compreso tra i 100 e 200 kg. Questa riduzione deve essere effettuata con la necessaria accuratezza, al fine di conservare la rappresentatività del campione di provenienza.

Esistono diversi metodi per ottenere la riduzione del campione, il metodo proposto si basa sulla tecnica dell'inquartamento.

I rifiuti vengono pesati e scaricati sull'area adibita alle operazioni. Tale area deve essere asfaltata o cementata ed accuratamente pulita.

Come prima operazione, si separano dal cumulo gli oggetti ingombranti (pneumatici, mobiletti vari, materassi, elettrodomestici, ecc.) che vengono successivamente ripartiti secondo le principali categorie di appartenenza (gomma, plastica, vetro, legno, tessili, metalli, inerti) e pesati accuratamente.

Si procede quindi all'apertura dei sacchetti di plastica contenenti i rifiuti. Quando tutti i sacchetti sono stati aperti e svuotati, si mescolano i rifiuti con una pala meccanica per ripartire su tutta la massa eventuali concentrazioni di rifiuti particolari.

Al termine dell'operazione, si distribuisce il materiale in modo da formare una torta di altezza

non superiore ai 50-60 cm, il più possibile omogenea.

Si procede poi all'inquartamento suddividendo la torta in quattro parti uguali mediante due nastri colorati tenuti a 90°, ed allontanando completamente, con pala e scopa, il materiale costituente due quarti opposti. Il materiale rimasto viene rimescolato e ridistribuito per la formazione di una nuova torta. Successivamente, si sfalsano di 45° i due nastri colorati rispetto ai tracciati precedenti e i rifiuti di due quarti opposti vengono allontanati come in precedenza. In questo modo si ottiene una massa pari ad un quarto di quella di partenza. Il materiale viene poi nuovamente rimescolato ed accumulato verso il centro. Viene fatta una nuova torta su cui si procede ad un ulteriore inquartamento. Partendo da una massa di rifiuti di circa 5 t, vengono effettuati normalmente due inquartamenti, ottenendo un residuo di circa 200 kg che costituisce il materiale di riferimento per la valutazione della composizione merceologica (Figura n.3.1). Considerando, invece, un quantitativo minimo di 500 kg, individuato per una collettività di 1000 utenze, è sufficiente un'unica operazione di inquartamento (*primo inquartamento*) con un campione finale di 125 kg circa, pari ad un quarto del quantitativo di partenza.

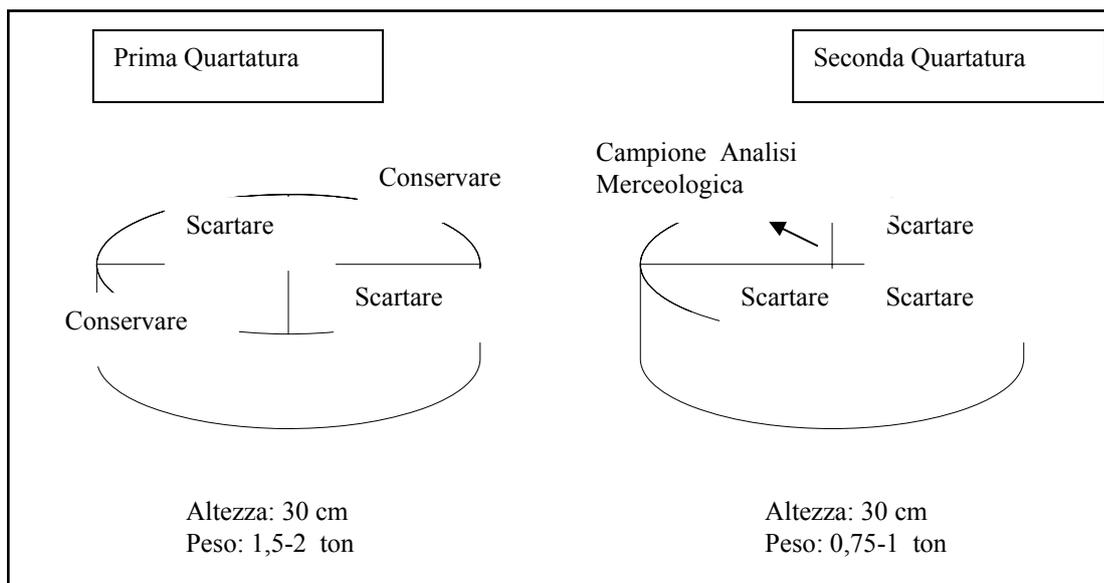


Figura 5.6 – Disegno esplicativo riguardo al metodo della quartatura

5.2.2 Analisi merceologica del rifiuto

Dopo aver pesato il campione, si procede all'analisi merceologica. L'analisi deve essere effettuata in tempi brevi dalla costituzione del campione per evitare variazioni di umidità o alterazioni nei risultati.

Il campione non deve essere contaminato da rifiuti di diversa natura per cui è consigliabile condurre l'analisi su una superficie ampia, piana, impermeabile e preferibilmente in ambiente

chiuso, effettuando tutte le operazioni con la massima accortezza. Una certa attenzione è fondamentale anche nelle precedenti fasi di inquarteramento in cui non bisogna dimenticare di pesare il campione prima e dopo tale operazione.

È infine fondamentale curare la preparazione delle attrezzature necessarie, dei macchinari, degli abiti per il personale e dei contenitori per i materiali ottenuti dalla selezione manuale.

L'analisi comporta l'impiego di un vaglio vibrante a maglie quadre di 20 mm di luce. Si raccoglie il sottovaglio su di un telo di plastica e si esegue la cernita manuale del materiale nelle categorie merceologiche adottate, pesando i rifiuti appartenenti alle differenti classi al termine dell'operazione. In alternativa al vaglio si può utilizzare un tavolo a maglie quadrate di 20 mm di luce, dotato di una vasca di raccolta del sottovaglio, sopra il quale operare la cernita. Si procede quindi alla suddivisione del sottovaglio nelle frazioni granulometriche > 10mm, 5-10 mm, 3-5 mm e < 3 mm.

Nella seguente tabella (Tabella 5.7) vengono riportate le principali classi e sottoclassi nelle quali suddividere il campione. Occorre decidere, prima dell'inizio delle operazioni di selezione, se utilizzare tutte le sottoclassi proposte oppure effettuare degli accorpamenti delle stesse in funzione del tipo di rifiuto e degli obiettivi che si pone l'analisi merceologica. In tal caso il codice sarà dato dalla somma dei codici (ad esempio il sottovaglio non suddiviso in sottocategorie avrà come codice SV 123).

Codice	Categorie	Codice	Sottocategorie	Specificazioni
SV	sottovaglio	SV 1	> 10 mm	pezzi di vetro, pietre, frammenti di verde, frammenti di sostanze organiche
		SV 2	10-5 mm, 5-3 mm	pezzi di vetro, pietre, frammenti di verde, frammenti di sostanze organiche
		SV 3	< 3 mm	pezzi di vetro, pietre, frammenti di verde, frammenti di sostanze organiche
OR	organico	OR 1	Putrescibile da cucina	alimenti cotti e crudi
		OR 2	Putrescibile da giardino	foglie, erba
		OR 3	giardino	residui di potatura legnosi

		OR 4	altro	organico di origine diversa (carta cucina, fazzoletti da naso e simili, ecc.)
CT	carta	CT 1	imballaggi	sacchetti di carta, carta da imballo
		CT 2	giornali, riviste	quotidiani, riviste, pubblicità
		CT 3	altro	carta da lettera, agende, libri
CN	cartone	CN 1	cartone da imballo ondulato	cartone ondulato
		CN 2	cartone da imballo liscio	scatole di cartone per prodotti alimentari e non alimentari
		CN 3	altro	dossier, calendari, cartone misto
PT	poliaccoppiati	PT 1	Imballaggi poliaccoppi ati in cartone	contenitori alimentari per latte, succhi di frutta
		PT 2	Altri imballaggi poliaccoppi ati	imballi composti da materie miste differenti (carta, plastica, metalli) non separabili
		PT 3	Altri poliaccoppi ati non da imballaggio	altri poliaccoppiati non da imballaggio
TE	tessili	TE 1	tessili naturali e sintetici	abiti in cotone, lana, lino o materiali sintetici, collant, borse in stoffa
		TE 2	imballi tessili	reti per alimenti (legumi, frutta)
TS	tessili sanitari	TS	tessili sanitari	cotone idrofilo, assorbenti igienici, pannolini per bambini
PL	plastica	PL 1	plastica film sacchetti	sacchetti supermercato, sacchi spazzatura, sacchi compost, fertilizzanti
		PL 2	altra plastica film	film per imballaggio alimentare e non alimentare

		PL 3	Bottiglie trasparenti PVC	acqua minerale, liquidi alimentari
		PL 4	Bottiglie trasparenti PET	acqua minerale, liquidi alimentari
		PL 5	bottiglie e contenitori opachi PVC	detersivi, contenitori alimentari
		PL 6	bottiglie e contenitori opachi PET	detersivi, contenitori alimentari
		PL 7	altra plastica rigida	contenitori alimentari e non alimentari, alveoli, blister

		PL 8	altra plastica	polistirolo ed altri poliespansi
GO	gomma	GO1	di origine domestica	guarnizioni e altra gomma
		GO2	pneumatici	parti di pneumatici
VE	vetro	VE 1	Vetro trasparente	bottiglie e contenitori per liquidi alimentari e non alimentari
		VE 2	vetro colorato	bottiglie e contenitori per liquidi alimentari e non alimentari
		VE 3	altro vetro	vetro piatto, pirex, opaline
ME	metalli	ME 1	metalli ferrosi	lattine per bevande (banda stagnata), barattoli per cibo per animali, barattoli per conserve, alimentari
		ME 2	altri metalli ferrosi	utensili vari domestici, dadi, bulloni, piccole riparazioni
		ME 3	alluminio	lattine per bevande, barattoli per cibo per animali, barattoli per conserve alimentari
		ME 4	Alluminio lamine	fogli di alluminio, sacchetti per patatine, caffè, vaschette per alimenti
		ME 5	altri metalli non ferrosi	piccoli pezzi di bicicletta, di automobili, rubinetterie, casseruole
IN	inerti	IN	inerti	pietre, porcellana
PE	pericolosi	PE 1	Pitture, vernici,	contenitori di pitture, vernici, colle, resine

			colle, resine	
		PE 2	solventi	contenitori di solventi
		PE 3	Prodotti chimici	contenitori di prodotti chimici per fotografia, radiografia, fitofarmaci
		PE 4	Tubi fluorescent i	tubi al neon, lampade
		PE 5	pile e batterie	batterie per auto, pile stilo e a bottone
		PE 6	altri pericolosi	termometri, siringhe, deodoranti, lacche, filtro dell'olio
LE	legno	LE	legno	legno di sedie o di arredamento vario, cassette, bastoni, vassoi
PC	pelle e cuoio	PC	pelle e cuoio	scarpe, cinture, giacche in pelle
ANC	altro non classificabi le	ANC	altro non classificabi le	sacchi dell'aspirapolvere pieni, palle da tennis, bande elastiche, circuiti stampati

Tabella 5.7: Suddivisione merceologica del rifiuto

Gli oggetti misti e accoppiati (carta e plastica, vetri con inserti metallici, plastica e alluminio, ecc.) vengono inclusi nella categoria a cui, in base a valutazione visiva, il materiale di appartenenza superi il 50% in peso dell'oggetto stesso.

Concluse le operazioni di cernita manuale, si pesano, con una bilancia tecnica, i materiali appartenenti alle differenti categorie merceologiche, riportando i risultati in una apposita tabella.

Unitamente alle varie quantità appena descritte, devono essere considerate le aliquote di rifiuti ingombranti, proporzionali al peso del campione iniziale, separate prima dell'inquartamento. Solitamente, a causa di una certa evaporazione del materiale durante la cernita o per la perdita di materiali di piccole dimensioni, la somma dei pesi delle singole frazioni è inferiore al peso totale determinato precedentemente. Le percentuali delle singole categorie vengono, pertanto, calcolate rispetto alla loro somma e non al peso iniziale.

Il peso totale (P_{tot}) del campione sarà quindi dato da:

$P_{tot} = \sum C_i$ dove :

C_i = peso della frazione merceologica i -esima.

Relativamente al contenuto in vetro, poiché le operazioni di miscelazione e inquartamento determinano la frantumazione di parte di esso che passa pertanto nel sottovaglio, occorre apportare la seguente correzione:

$$VT = VA + VS$$

dove:

VT = vetro totale;

VA = vetro selezionato dall'analisi merceologica manuale;

VS = vetro presente nel sottovaglio (in % sul rifiuto tal quale).

Per ricavare VS si moltiplica il contenuto in vetro nel sottovaglio (VTS, espresso in % sul tal quale), per la percentuale di sottovaglio determinate nella analisi merceologica (SA):

$$Vs = VTS * SA$$

Si procede, quindi, a correggere il valore del sottovaglio, per determinare il sottovaglio totale (ST):

$$ST = SA - VS$$

È opportuno sottolineare che i risultati dell'analisi così ottenuti devono essere valutati attentamente per valutare se essi riflettano realisticamente il quadro della produzione dei rifiuti nell'area in esame. Pertanto, l'ottenimento dei valori deve essere seguito da una fase di comparazione con risultati di altre analisi. A questo proposito è essenziale tenere nel dovuto conto le caratteristiche e le particolarità del territorio in esame sia nel confronto che nella scelta dei termini di paragone.

5.2.3 Risultati Analisi Merceologica

Dalle analisi effettuate in laboratorio, su 100 kg di rifiuti solidi urbani, utilizzando come metodo di analisi quello della *quartatura*, sono stati ricavati i seguenti valori percentuali:

FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)
RESIDUI ALIMENTARI	45,05
CARTA	12,42
CARTONE	5,08
PLASTICHE	17,47
TESSILI	9,35
GOMMA	0,52
PELLE E CUIOIO	1,14
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15
LEGNO	0,30
FRAZIONE FINE	1,60
VETRO	4,34
METALLI	2,08
ALTRO	0,50
TOTALE	100

Tabella 5.8 - Merceologiche

Applicando ai valori ritrovati, delle singole frazioni merceologiche, la funzione log.normale, è possibile osservare le distribuzioni a seconda delle dimensioni caratteristiche:

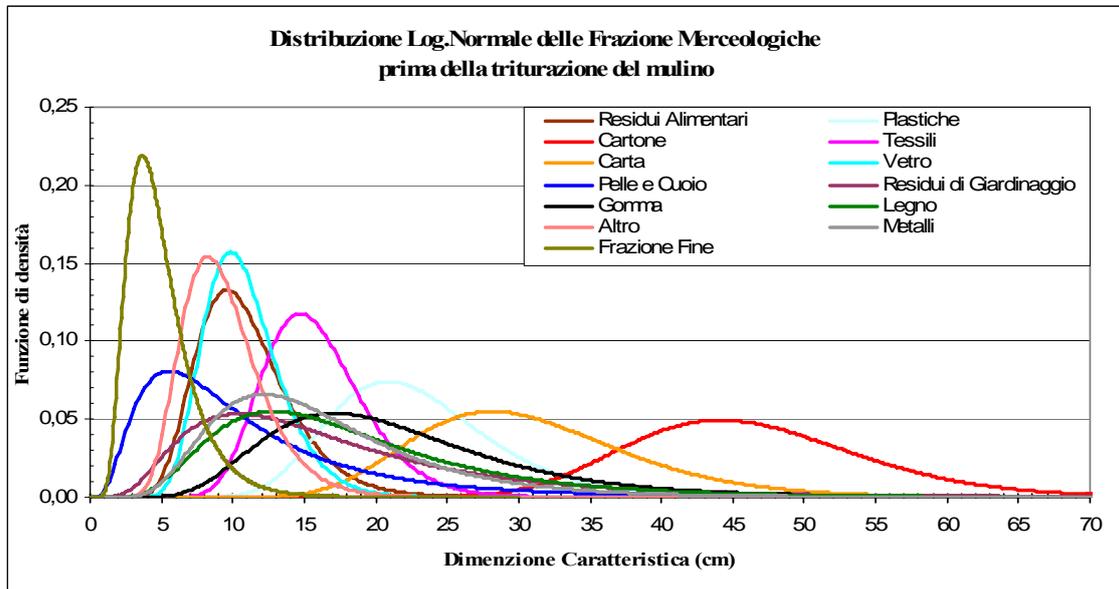


Grafico 5.9 - Curve di distribuzione dimensionale e valori modali della dimensione caratteristica delle frazioni merceologiche contenute nei rifiuti solidi urbani, prima della triturazione del mulino .

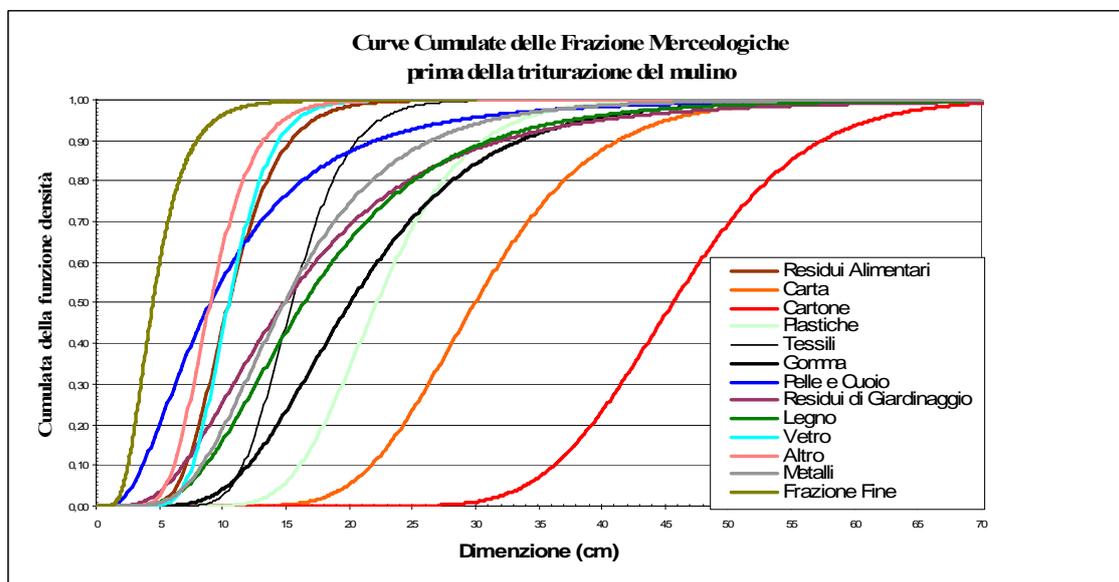


Grafico 5.10 - Curve cumulate di distribuzione dimensionale e valori medi della dimensione caratteristica delle frazioni merceologiche contenute nei rifiuti solidi urbani, prima della triturazione del mulino .

Dopo che il rifiuto è passato attraverso il mulino di triturazione, ha subito una riduzione dimensionale, che riguarda perlopiù le frazioni che possiedono dimensioni elevate come carta, cartone, gomma, sono stati presi in considerazione solo valori inferiori al novantacinquesimo

percentile, corrispondente a dimensioni inferiori a 30 cm, cioè la dimensione massima che riesce a passare attraverso i coltelli del mulino.

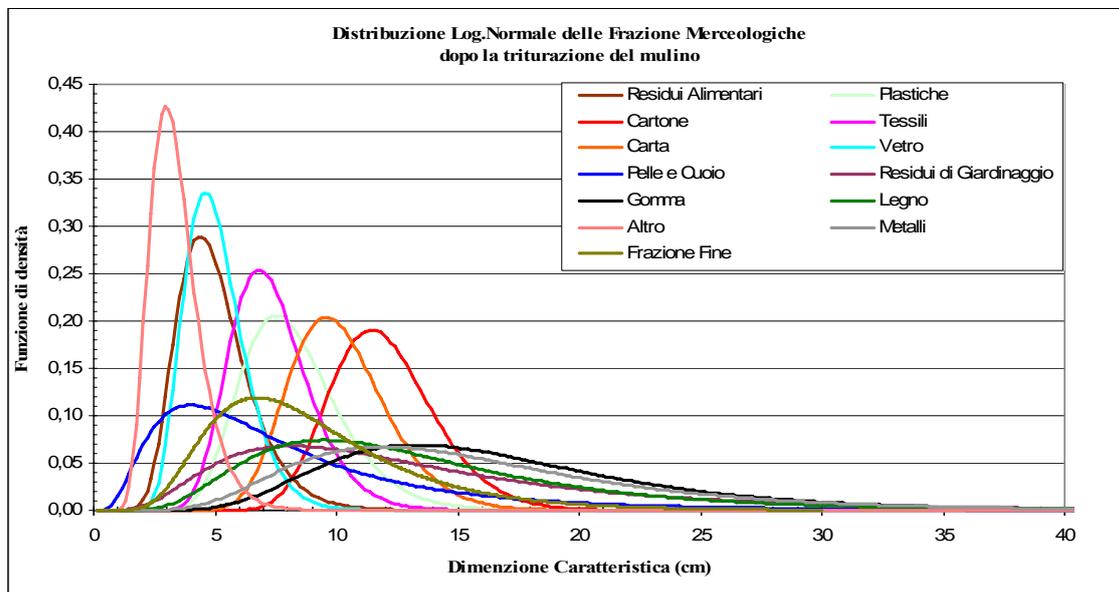


Grafico 5.11 - Curve di distribuzione dimensionale e valori modali della dimensione caratteristica delle frazioni merceologiche contenute nei rifiuti solidi urbani, dopo della triturazione del mulino .

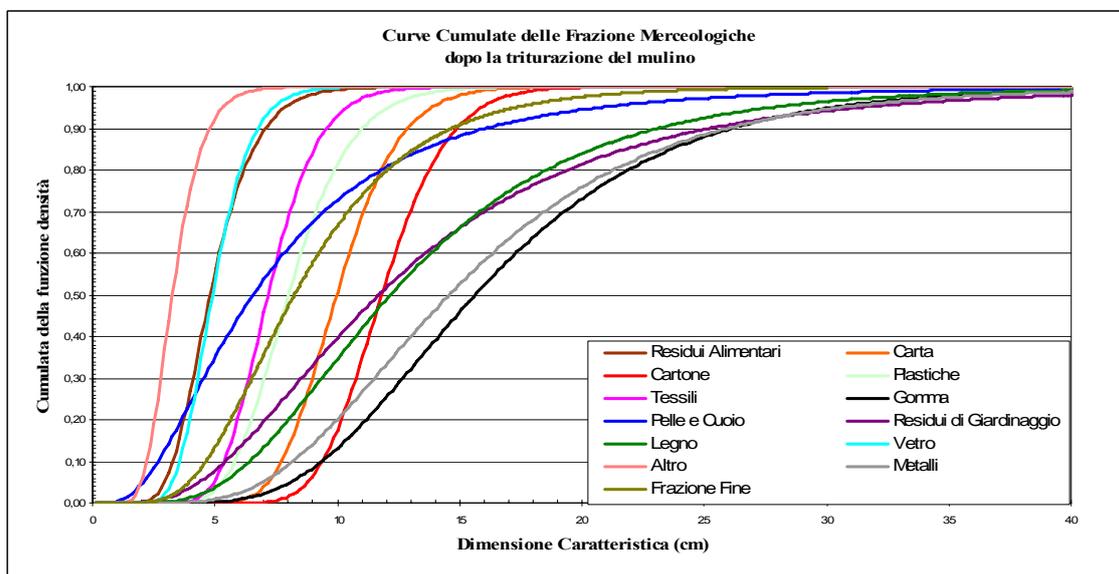


Grafico 5.12 - Curve cumulate di distribuzione dimensionale e valori medi della dimensione caratteristica delle frazioni merceologiche contenute nei rifiuti solidi urbani, prima della triturazione del mulino

5.3 Applicazione del modello di calcolo

Una volta note l'analisi merceologica e la distribuzione dimensionale del rifiuto in ingresso al

vaglio rotante, si è potuto procedere all'applicazione del nostro modello, il quale richiede ovviamente come ulteriori dati di input quelli inerenti alle caratteristiche del vaglio.

Di seguito si riportano le caratteristiche del vaglio utilizzato per la sperimentazione:

Diametro del vaglio rotante [m]	3
Lunghezza utile di vagliatura [m]	12,5
Inclinazione [°]	3
Velocità di rotazione [giri/min]	11
Diametro dei fori del vaglio [cm]	8
Frazione di area disponibile	0,9

Tabella 5.13- Caratteristiche dimensionali di funzionamento del vaglio.

Avendo dunque ora tutti i dati di input richiesti dal modello, abbiamo suddiviso le varie frazioni merceologiche in classi dimensionali e calcolato per ciascuna di esse la probabilità di passaggio o non passaggio attraverso i fori del vaglio.

Una volta calcolato il numero di impatti N_i , in funzione dell'angolo di incipiente distacco e della lunghezza, diametro e inclinazione del vaglio, applicando le formule per il calcolo del flusso di sopravvaglio e sottovaglio, rispettivamente:

$$m \cdot f_o(i, j) = (1 - P_0)^{N_i} m \cdot f_f(i, j)$$

$$m \cdot f_u(i, j) = (1 - (1 - P_0)^{N_i}) m \cdot f_f(i, j)$$

il modello in uscita ci ha fornito le seguenti percentuali di sopravvaglio e sottovaglio delle varie frazioni merceologiche riportate in tabella :

MERCEOLOGICA DEL RIFIUTO	INGRESSO [%]	RIPARTIZIONE SOPRAVAGLIO [%]	RIPARTIZIONE SOTTOVAGLIO [%]
Residui alimentari	45	5,05	39,95
Carta	12	11,03	0,97
Cartone	7,5	7,40	0,10
Plastica	15	11,17	3,83
Tessili	9	7,45	1,55
Gomma	0,5	0,49	0,01
Pellame	1,2	0,61	0,59
Residui di giardinaggio	1	0,75	0,24
Legno	0,5	0,44	0,05
Vetro	4,3	0,40	3,90
Lattine in banda stagnata	0,5	0,41	0,09
Alluminio	0,5	0,38	0,12
Metalli ferrosi	2	1,86	0,14
Frazione fine e finissima	1	0,06	0,94
Totale	100	47,49	52,50

Tabella 5.14

Per validare il modello dunque non rimane che confrontare tali dati con quelli ricavati dall'osservazione dell'output del vaglio in studio.

Tale output non è stato misurato immediatamente dopo il processo di vagliatura poiché il vaglio a tamburo rotante utilizzato per la nostra sperimentazione, essendo inserito nel circuito di impianto, convoglia il rifiuto direttamente nel successivo reparto di separazione, come si può notare dallo schema riportato sotto:

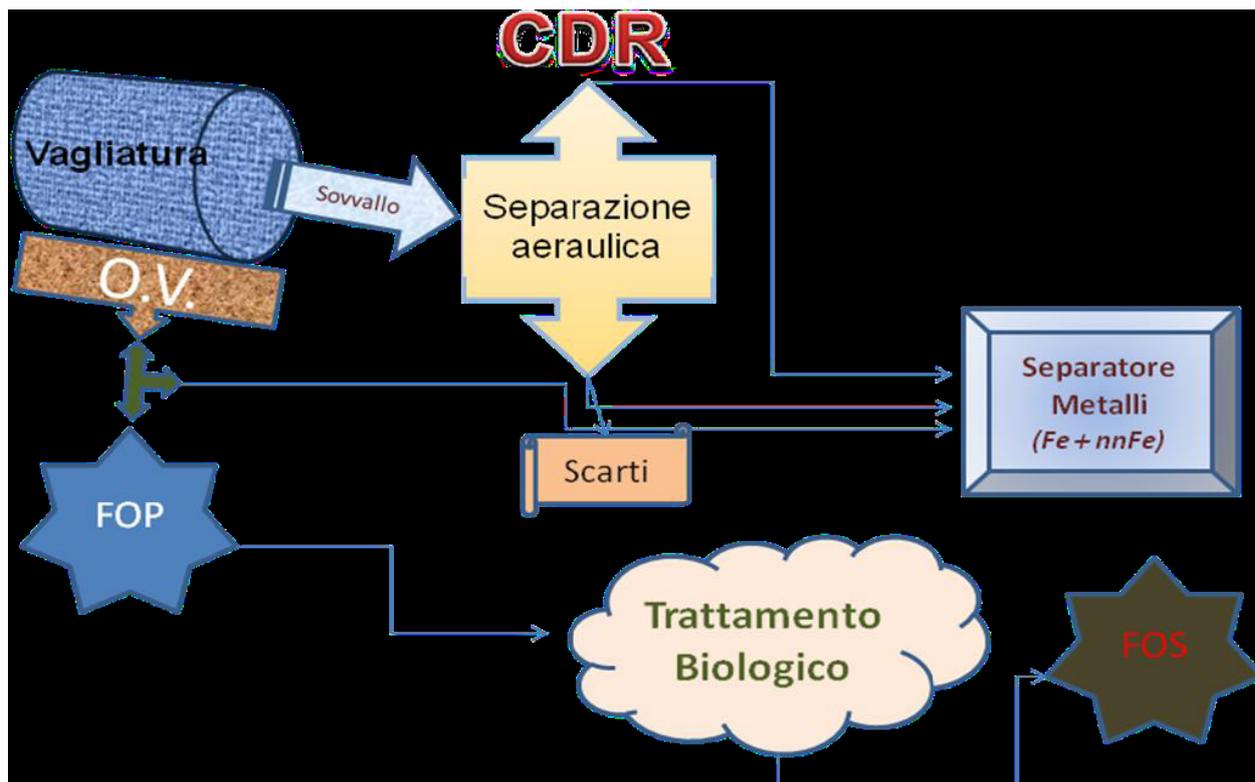


Figura 5.15

E' stato possibile comunque raccogliere i dati di output dopo la fase di separazione aerea, da questi con semplici formule si è potuto risalire alle percentuali di sottovaglio e sopravaglio delle varie frazioni merceologiche:

	RSU % in peso	CDR % in peso	Scarti % in peso	CDR % in peso	Scarti % in peso	Sovvallo % in peso su RU	FOP % in peso su RU
Sottovaglio + organico	45,05	9,07	14,12	2,73	2,43	5,15	39,9
carta	12,42	27,78	17,3	8,36	2,97	11,33	1,08
Cartone	5,08	14,51	4,42	4,37	0,76	5,03	0,04

poliaccoppiati	2,26	1,84	0,77	0,55	0,13	0,69	1,57
tessili	3,18	6,86	2,19	2,07	0,38	2,44	0,74
tessili sanitari	6,17	2,24	8,58	0,68	1,47	2,15	4,02
Plastica	15,21	30,01	9,57	9,03	1,64	10,68	4,54
Gomma	0,52	0,86	2,73	0,26	0,47	0,51	0,01
Vetro	4,34	0,21	2,03	0,06	0,35	0,41	3,92
Metalli	2,08	0,27	10,81	0,08	1,86	1,94	0,14
Inerti	1,09	0,09	10,18	0,03	1,75	0,98	0,11
Pericolosi	0,7	0,05	3,97	0,02	0,68	0,7	0
Legno	0,45	6,01	10,37	1,81	1,78	0,36	0,09
pelle e cuoio	1,14	0,01	2,96	0	0,51	0,51	0,63
Altro	0,33	0,17	0,01	0,05	0	0,05	0,27
Totale	100	100	100	30,1	17,18	44,32	55,68

Tabella 5.16

Dal confronto delle percentuali di sottovaglio e sopravaglio ottenute dal modello con quelle ottenute dalle misurazioni effettive, si evince come il modello riesca a simulare fedelmente la separazione dimensionale reale tramite vaglio a tamburo rotante, fornendo valori percentuali che si discostano in modo non apprezzabile dai rispettivi valori osservati.

Infine grazie al modello di calcolo è stato possibile anche ricavare le distribuzioni dimensionali del rifiuto in uscita dal vaglio per ciascuna frazione merceologica.

Tramite la regressione lineare è stato possibile mettere in relazione i flussi di sopravaglio e sottovaglio con le dimensioni delle classi corrispondenti ; grazie al coefficiente angolare e alla quota della retta così ottenuta si è potuto stimare la media e la deviazione standard delle distribuzioni dimensionali del sopravaglio e sottovaglio.

Di seguito si riporta in un unico grafico l'andamento delle varie distribuzioni riferito a titolo di esempio alla frazione alimentare:

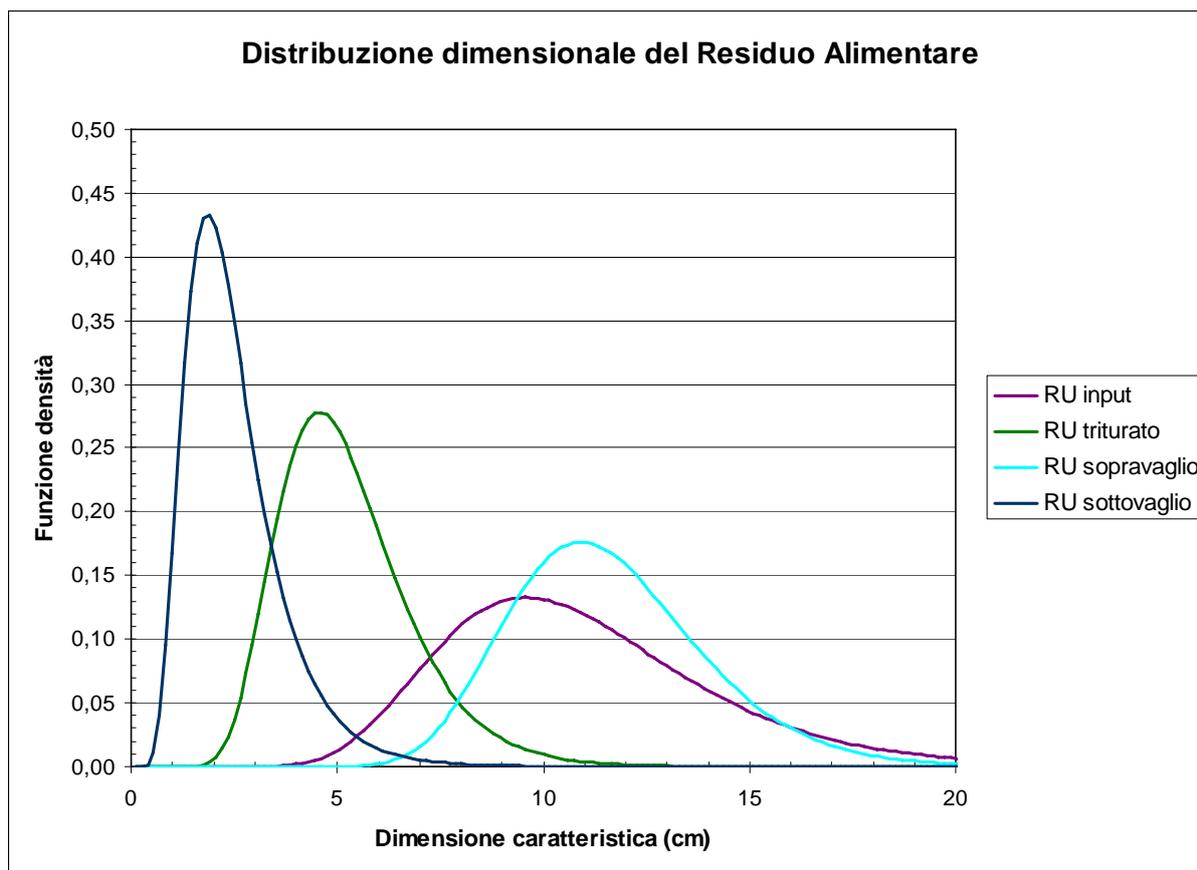


Grafico 5.17

5.5 Calcolo del potere calorifico

Effettuando un'analisi elementare del rifiuto e una volta determinata la composizione percentuale in peso in termini di carbonio (C, $p_a = 12$), idrogeno (H, $p_a = 1$), ossigeno (O, $p_a = 16$) e zolfo (S, $p_a = 32$), è possibile stimare il valore del potere calorifico.

La precisione del risultato dipende, ovviamente, in larga parte dall'accuratezza con cui è stata effettuata l'analisi ultima sul rifiuto.

Tra le relazioni disponibili, quella maggiormente utilizzata, per determinare il potere calorifico, è la relazione di Dulong, dalla quale derivano molti dei metodi empirici che possono essere utilizzati e che originariamente era stata formulata per stimare il potere calorifico del carbone. Nell'applicare la relazione di Dulong, che fornisce il valore del PCSU, occorre fare attenzione alle unità di misura cui riferiscono i coefficienti degli elementi:

$$PCSU \left[\frac{kcal}{kg} \right] = 8080 C + 28750 \left(H - \frac{1}{8} O \right) + 2500 S$$

dove C, H, O ed S rappresentano le quantità dei diverse elementi espresse come percentuali in peso.

Il termine tra parentesi tonda, tiene conto del fatto che una quota parte dell'idrogeno reagisce con l'ossigeno per formare acqua e dunque non partecipa allo sviluppo di calore.

Variando la velocità di rotazione e l'inclinazione del vaglio rotante, tramite il nostro modello di calcolo, si è potuto calcolare il sovrvallo e il potere calorifico per ciascun tipo di regolazione.

Per quanto riguarda il potere calorifico quest'ultimo è stato calcolato sia in condizioni di rifiuto completamente secco, sia in condizioni di rifiuto umido, ottenendo i risultati riportati nella tabella seguente:

Tipi di regolazione	Velocità di rotazione [giri/min]	Inclinazione [°]	Sovvallo [% totale]	PC per 100 kg di rifiuto secco [kcal/kg]	PC per 100 kg di rifiuto umido [kcal/kg]
1	10	1,5	44,94	5202	4500
2	10	2	45,66	5208	4489
3	10	2,5	46,29	5213	4478
4	10	3	46,87	5218	4468
5	11	1,5	45,37	5206	4494
6	11	2	46,15	5212	4481
7	11	2,5	46,85	5218	4468
8	11	3	47,49	5222	4456
9	12	1,5	45,78	5209	4487
10	12	2	46,63	5216	4472
11	12	2,5	47,40	5222	4458
12	12	3	48,09	5227	4444
13	13	1,5	46,17	5212	4481
14	13	2	47,09	5219	4464
15	13	2,5	47,91	5225	4448
16	13	3	48,66	5230	4431

Tabella 5.18 – Valori del Potere Calorifico Superiore al variare delle regolazioni del vaglio

Dalla tabella si evince, come ci si aspettava, che il rifiuto secco possiede un potere calorifico maggiore rispetto al rifiuto umido:

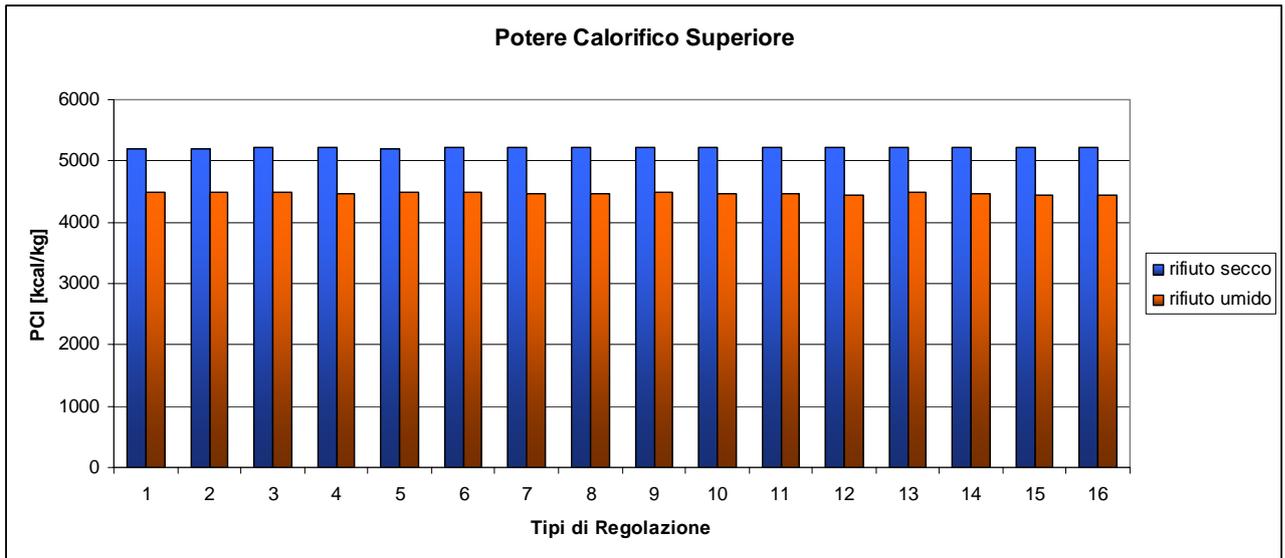


Grafico 5.19– Istogramma del potere calorifico del rifiuto umido e secco.

Graficando i dati in tabella si può notare come all'aumentare sia della velocità di rotazione che dell'inclinazione del vaglio si ha un incremento della percentuale del sovravallo, come mostrato nei grafici seguenti:

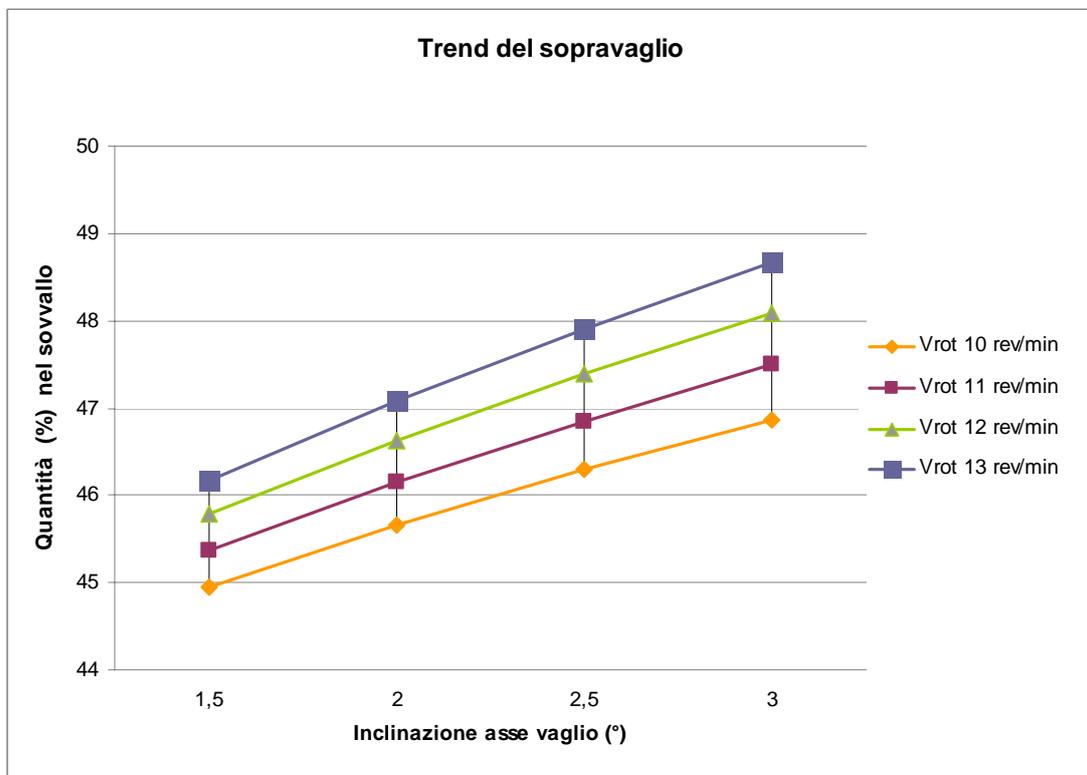


Fig.5.20 Andamento del sovravaglio al variare dell'inclinazione del vaglio.

Dunque aumentando il sopravaglio ci si aspetta che aumenti anche il potere calorifico totale, ma questo avviene solamente se il rifiuto è in condizioni asciutte, come si evince dal grafico seguente:

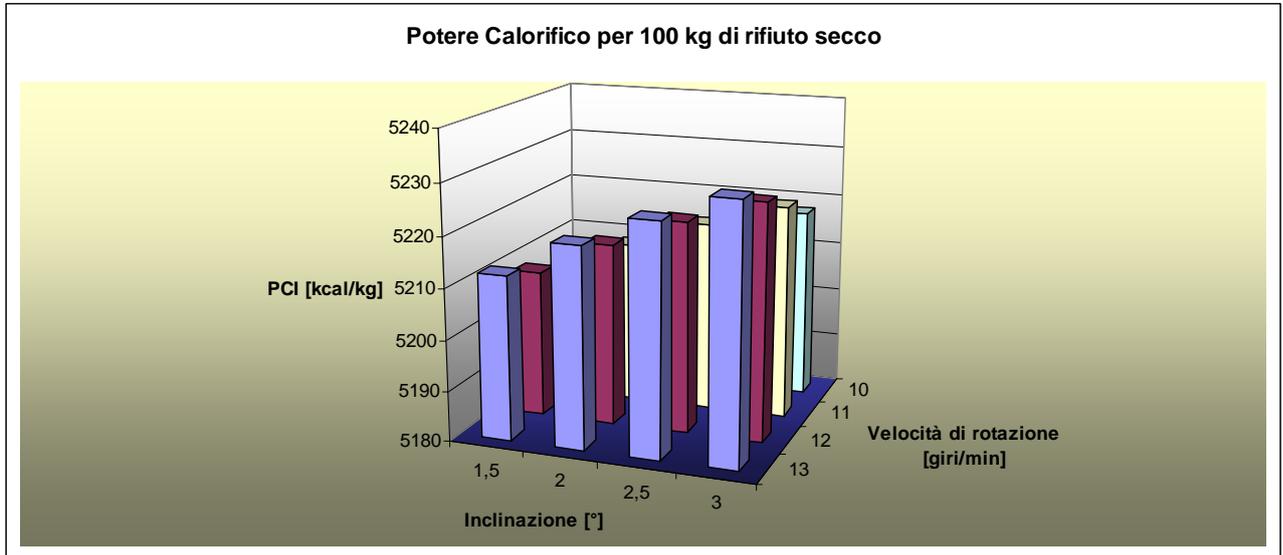


Grafico 5.21 – Istogramma tridimensionale del potere calorifico del rifiuto secco al variare dell'inclinazione e della velocità di rotazione.

Se consideriamo il rifiuto in condizioni umide, aumentando l'inclinazione e la velocità di rotazione del vaglio il potere calorifico diminuisce:

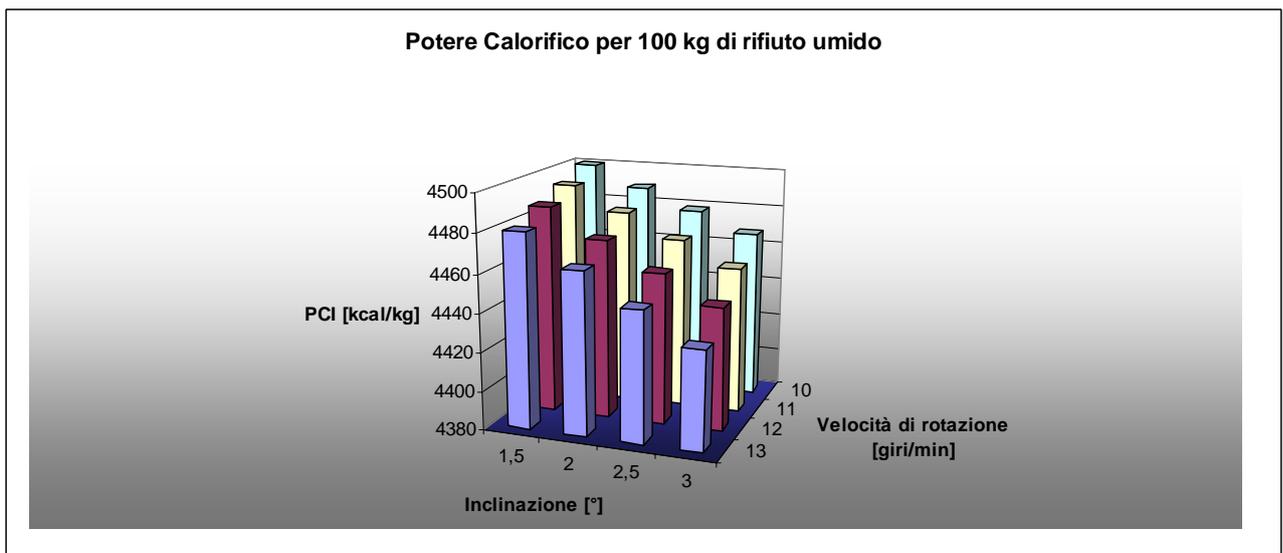


Grafico 5.22 – Istogramma tridimensionale del potere calorifico del rifiuto umido al variare dell'inclinazione e della velocità di rotazione.

Dunque per quanto riguarda il rifiuto umido il potere calorifico corrispondente diminuisce all'aumentare del sovravallo come mostrato nel grafico seguente:

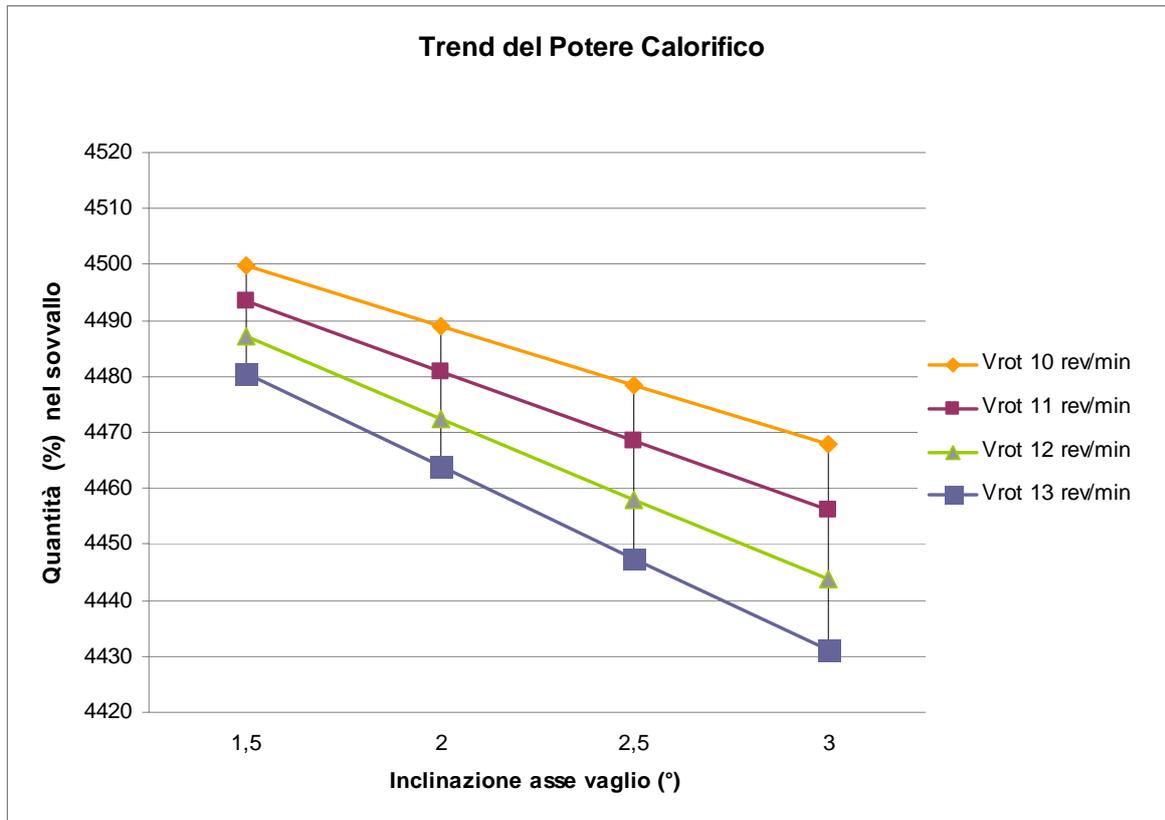


Fig.5.23 Andamento del Potere Calorifico al variare dell'inclinazione del vaglio.

Il fattore umidità gioca dunque un ruolo fondamentale ai fini del potere calorifico a disposizione, infatti aumentando l'inclinazione e la velocità del vaglio otteniamo sicuramente un aumento del sovravaglio, ma questo non implica necessariamente un'ottimizzazione del CDR in quanto il potere calorifico dipende dalla percentuale di umidità presente nel rifiuto.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati illustrati i risultati preliminari di uno studio mirato alla modellazione del processo di vagliatura di RSU.

Il modello, sviluppato sulla base di ipotesi sia cinematiche che probabilistiche, è stato implementato ed applicato per la verifica dell'influenza delle condizioni operative sull'efficienza del processo di separazione.

La modellazione è stata sviluppata studiando la cinematica di una particella all'interno di un vaglio rotante, prima studiando il comportamento della singola particella e poi studiando il comportamento di più particelle.

Lo sviluppo di tale modello, consente di determinare l'efficienza di rimozione per le diverse frazioni merceologiche di un rifiuto, ciascuna caratterizzata da una propria distribuzione dimensionale,.

La validazione è stata svolta effettuando una campagna di misurazioni utilizzando un vaglio in scala (1:10) e un vaglio di dimensioni reali .

Da queste misurazioni è emerso che il modello è ben rappresentativo della realtà, in alcuni casi, si sono evidenziate delle discrepanze dal comportamento reale del rifiuto, ciò è senz'altro da attribuite alle diverse peculiarità dei materiali costituenti il rifiuto solido urbano e dall'interferenza che le une causano sulle altre.

Si è appurato che, variando i parametri quali: l'angolo di inclinazione longitudinale del vaglio, la velocità di rotazione si ha un diverso comportamento del rifiuto all'interno del vaglio e quindi una variazione dell'efficienza di separazione di quest'ultimo.

In particolare è stata mostrata una possibile applicazione del modello legata alla valutazione delle caratteristiche del sopravaglio nel caso questo sia destinato alla produzione di CDR.

Attraverso la formula di Dulong si è calcolato il potere calorifico superiore, (sia allo stato umido che allo stato secco), ottenuto effettuando delle variazioni dei parametri citati precedentemente, calcolato sulla massa uscente dal sopravaglio e quindi quella utilizzata come combustibile per gli impianti di termovalorizzazione.(C.D.R.)

Si è osservato il legame esistente tra le condizioni operative inclinazione e velocità di rotazione del tamburo ed il potere calorifico del flusso selezionato con l'obiettivo di massimizzare quest'ultimo.

Dalle prove è emerso come il fattore umidità giochi un ruolo fondamentale per l'ottimizzazione del CDR, l'umidità infatti incide negativamente sul potere calorifico del rifiuto invertendo il rapporto normalmente direttamente proporzionale tra percentuale di sopravaglio e potere calorifico, dunque a causa dell'umidità all'aumentare del flusso di sopravaglio si ha una diminuzione del potere calorifico.

Lo sviluppo e la validazione di un modello teorico, ci permette di affrontare il problema della selezione e separazione dei RSU, non più solo tramite un procedimento induttivo basato unicamente sulle osservazioni, ma tramite un procedimento deduttivo grazie al quale "conoscendo l'input si prevede quale sarà l'output".

Concludendo penso che bisognerebbe prendere atto della complementarità della raccolta differenziata con l'indifferenziata. Il trattamento di quest'ultima, tramite impianti TMB, è molto importante perché permette di recuperare ulteriormente (producendo FOS, CDR e recuperando metalli) e quindi ridurre la percentuale di rifiuto che andrebbe in discarica rispettando la normativa vigente.

APPENDICE

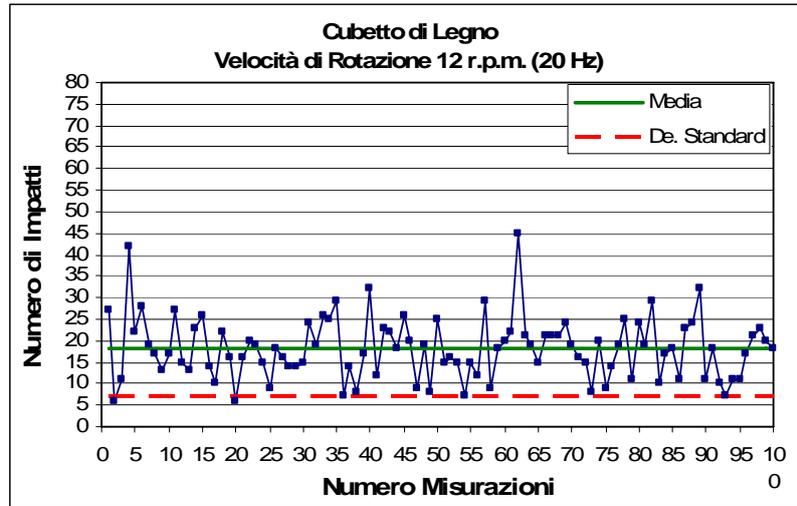


Grafico A.1 - Grafico dell'andamento degli impatti con media e dev.st, a 12 r.p.m.

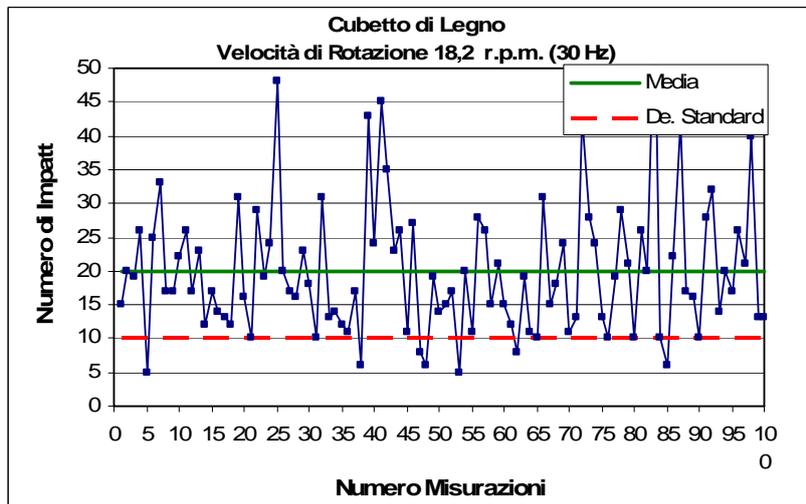


Grafico A.2 - Grafico dell'andamento degli impatti, con media e dev.st a 18,2 r.p.m.

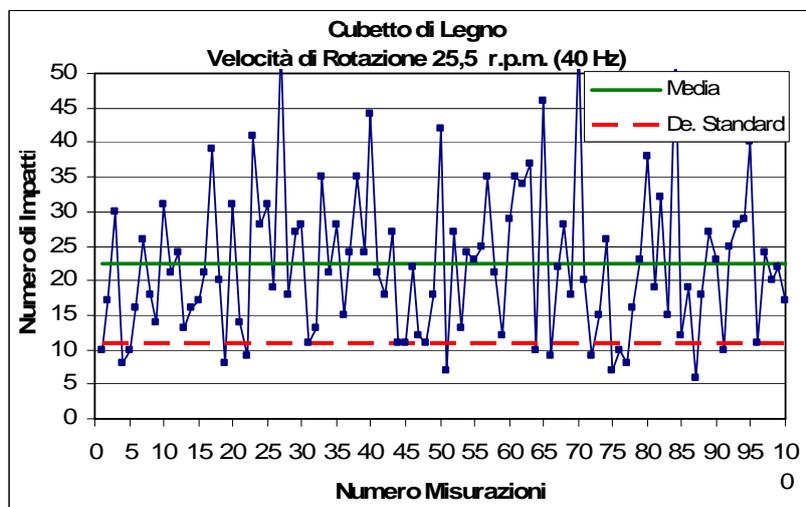


Grafico A.3 - Grafico dell'andamento degli impatti, con media e dev.st., a 25,5 r.p.m.

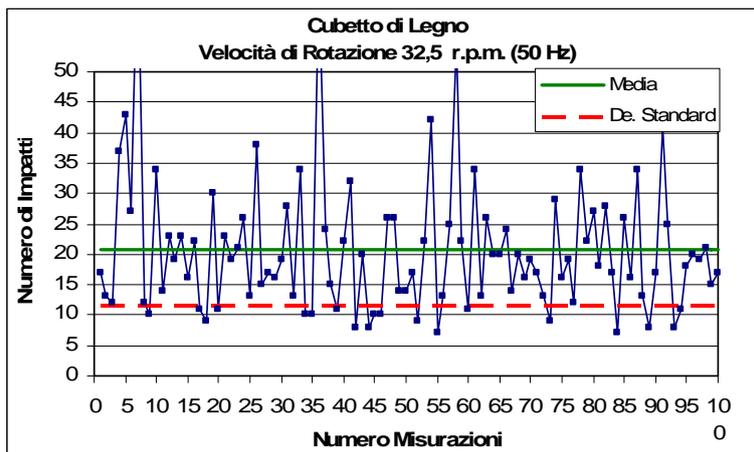


Grafico A.4 - Grafico dell'andamento degli impatti, con media e dev.st., a 32,5 r.p.m.

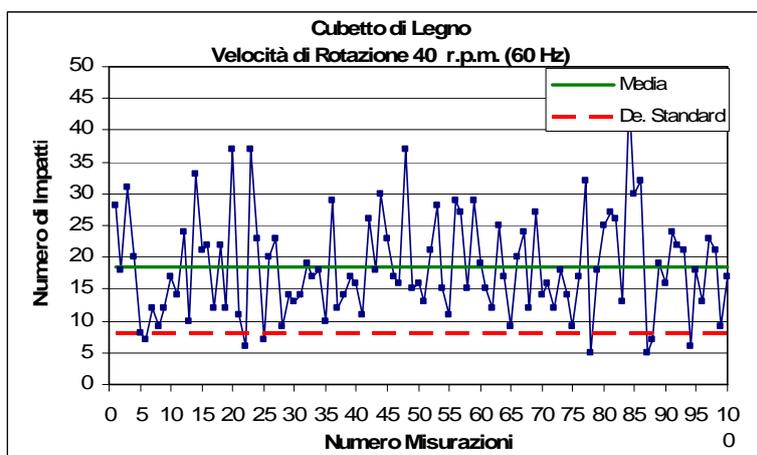


Grafico A.5 - Grafico dell'andamento degli impatti, con media e dev.st., a 40 r.p.m.

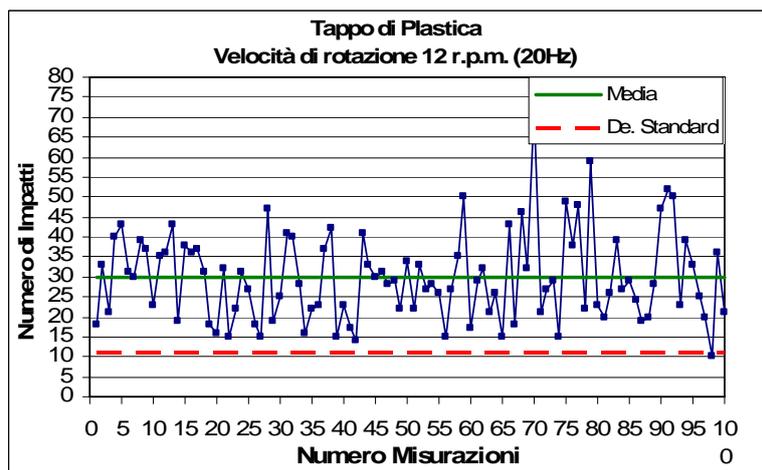


Grafico A.6 - Grafico dell'andamento degli impatti, con media e dev.st., a 12 r.p.m.

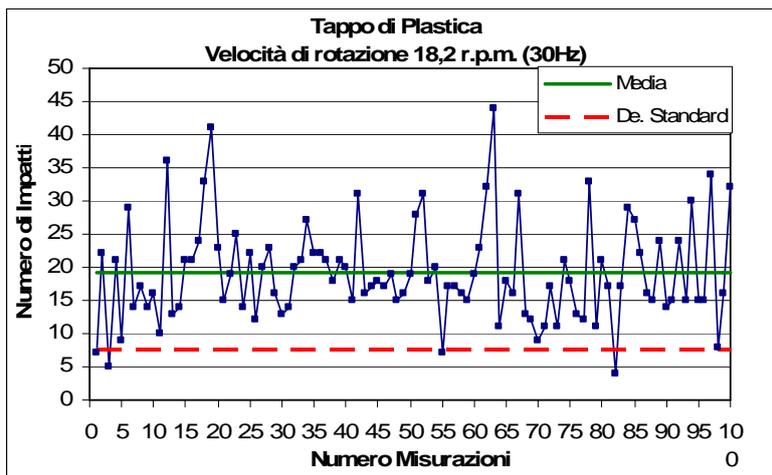


Grafico A.7 - Grafico dell'andamento degli impatti, con media e dev.st., a 18,2 r.p.m.

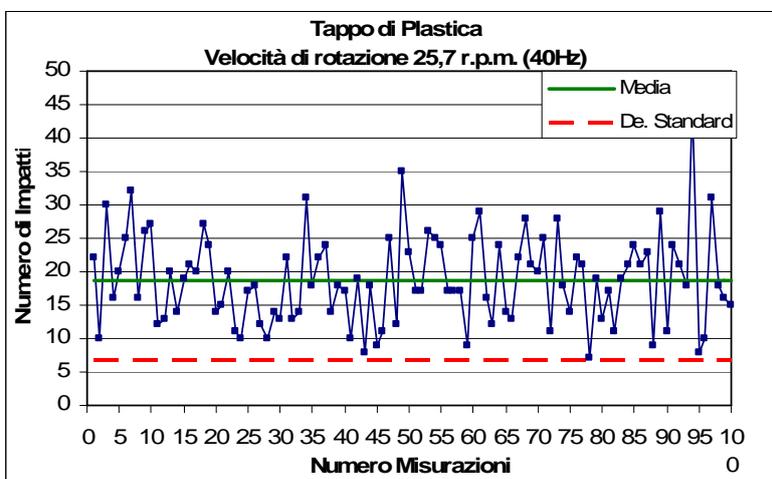


Grafico A.8 - Grafico dell'andamento degli impatti, con media e dev.st., a 25,7 r.p.m.

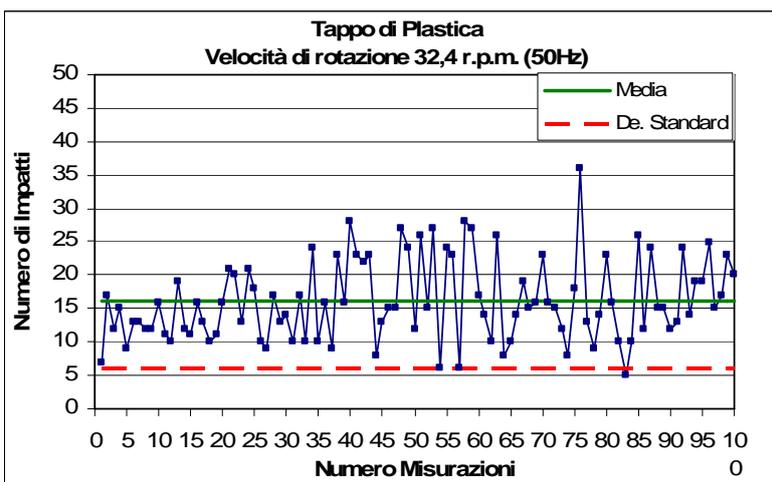


Grafico A.9 - Grafico dell'andamento degli impatti, con media e dev.st., a 32,4 r.p.m.

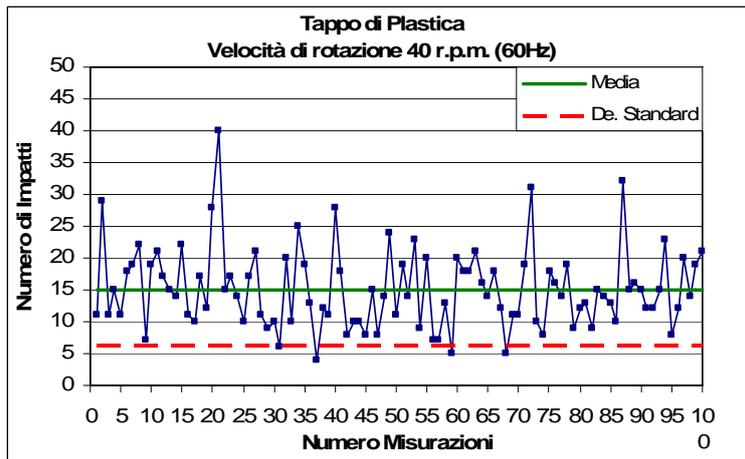


Grafico A.10 - Grafico dell'andamento degli impatti, con media e dev.st., a 40 r.p.m.

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998

Tavola A.1 – Distribuzione normale standardizzata

SAMPLE SIZE (N)	LEVEL OF SIGNIFICANCE FOR D = MAXIMUM [F ₀ (X) - S _n (X)]				
	.20	.15	.10	.05	.01
1	.900	.925	.950	.975	.995
2	.684	.726	.776	.842	.929
3	.565	.597	.642	.708	.828
4	.494	.525	.564	.624	.733
5	.446	.474	.510	.565	.669
6	.410	.436	.470	.521	.618
7	.381	.405	.438	.486	.577
8	.358	.381	.411	.457	.543
9	.339	.360	.388	.432	.514
10	.322	.342	.368	.410	.490
11	.307	.326	.352	.391	.468
12	.295	.313	.338	.375	.450
13	.284	.302	.325	.361	.433
14	.274	.292	.314	.349	.418
15	.266	.283	.304	.338	.404
16	.258	.274	.295	.328	.392
17	.250	.266	.286	.318	.381
18	.244	.259	.278	.309	.371
19	.237	.252	.272	.301	.363
20	.231	.246	.264	.294	.356
25	.210	.220	.240	.270	.320
30	.190	.200	.220	.240	.290
35	.180	.190	.210	.230	.270
OVER 35	<u>1.07</u>	<u>1.14</u>	<u>1.22</u>	<u>1.36</u>	<u>1.63</u>
	$\overline{0 N}$	$\overline{0 N}$	$\overline{0 N}$	$\overline{0 N}$	$\overline{0 N}$

Tavola A.2 - Tavola di Kolmogorov-Smirnov.

```

***** PROGRAMMA PER LA PREVISIONE DEL NUMERO DI IMPATTI *****
clear all
clc

Mean=5          *** DISTANZA MEDIA DI RIMBALZO IN cm ***
Sigma=6         *** DEVIAZIONE STANDARD DISTANZA DI RIMBALZO***

for j=1:1000;   *** NUMERO DI SIMULAZIONI ***
                *** (METODO MONTECARLO) ***

i=1;
X(i)=5;        *** DISTANZA TEORICA INIZIALE IN cm ***
D=5;
while D<109;   *** 'FINCHE' D SIA MINORE DELLA LUNGHEZZA DEL VAGLIO
    X(i+1)=X(i)+random('Normal',Mean,Sigma);
    D=X(i+1);
    i=i+1;
end
n(j)=i-2;     *** NUMERO TEORICO DI IMPATTI ***
b=X(1:i-1);   *** AVANZAMENTO PROGRESSIVO ***
x=b';
Dist(j)=109/n(j); *** DISTANZA TEORICA DI AVANZAMENTO ***
end
N=n';         *** Vettore Trasposto ***
dsteo=Dist';  *** Vettore Trasposto ***

subplot(2,1,1); (bar(hist(N,20),1,'g'));
xlabel('Numero Teorico Di Impatti')
ylabel('Densità')
subplot(2,1,2); (bar(hist(dsteo,20),1,'r'));
xlabel('Distanza Teorica Di Avanzamento')
ylabel('Densità')

N_mean=mean(N) *** MEDIA IMPATTI ***
N_std=std(N)   *** DEVIAZIONE STANDARD IMPATTI ***

```

Tavola A.3 - Work Space di Matlab ,per la previsione del numero di impatti teorico (Metodo MonteCarlo)

Angolo	1,5	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	SOPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	3,67	41,38
CARTA	12,42	11,06	1,36
CARTONE	5,08	5,02	0,06
PLASTICHE	17,47	10,05	7,42
TESSILI	9,35	3,80	5,55
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,48	0,66
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,11	0,04
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,92	0,68
VETRO	4,34	0,27	4,07
METALLI	2,08	1,91	0,17
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	38,04	61,96

Tabella A.1 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio con angolo di inclinazione variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

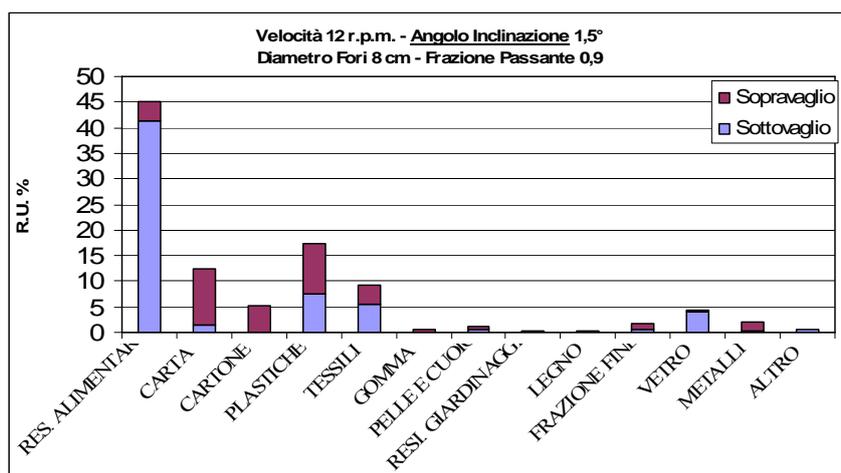


Grafico A.1 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo di inclinazione variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,9		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	4,5	40,55
CARTA	12,42	11,22	1,20
CARTONE	5,08	5,03	0,05
PLASTICHE	17,47	10,70	6,77
TESSILI	9,35	2,24	7,11
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUOIO	1,14	0,50	0,64
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,12	0,03
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,95	0,65
VETRO	4,34	0,35	3,99
METALLI	2,08	1,93	0,15
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	38,29	61,71

Tabella A.2 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio con angolo di inclinazione variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

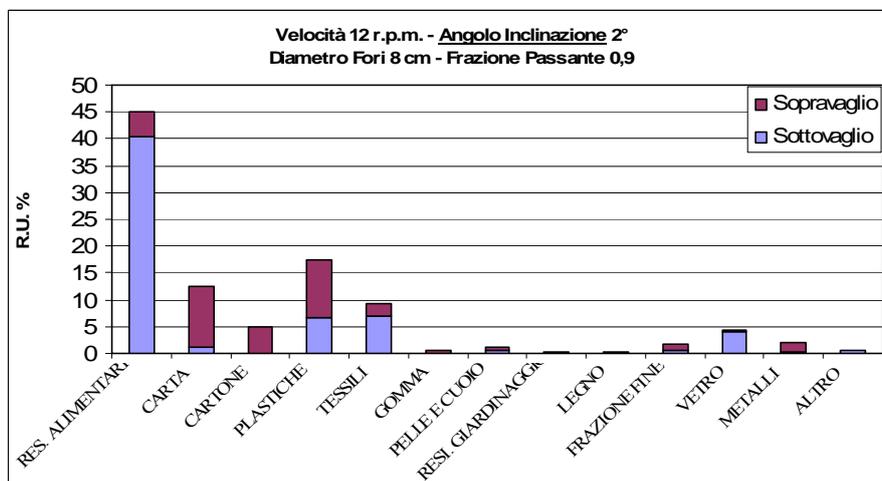


Grafico A.2 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo di inclinazione variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2,5	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,9		
RAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	5,18	39,87
CARTA	12,42	11,35	1,07
CARTONE	5,08	5,03	0,05
PLASTICHE	17,47	11,23	6,24
TESSILI	9,35	4,60	4,75
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,51	0,63
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,12	0,03
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,98	0,62
VETRO	4,34	0,41	3,93
METALLI	2,08	1,94	0,14
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	42,10	57,90

Tabella A.3 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio con angolo di inclinazione variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

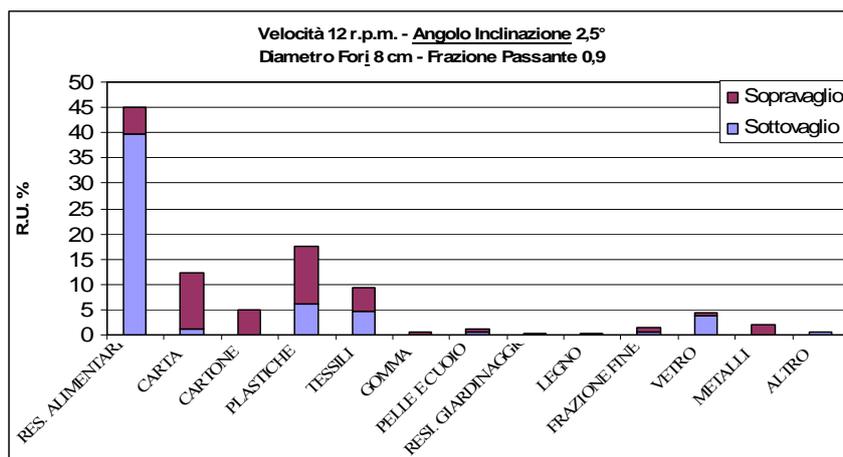


Grafico A.3 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo di inclinazione variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	3	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,9		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	5,74	39,31
CARTA	12,42	11,46	0,96
CARTONE	5,08	5,04	0,04
PLASTICHE	17,47	11,67	5,80
TESSILI	9,35	4,90	4,45
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,52	0,62
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,12	0,03
LEGNO	0,30	0,26	0,04
FRAZIONE FINE	1,60	1,01	0,59
VETRO	4,34	0,47	3,87
METALLI	2,08	1,95	0,13
ALTRO	0,50	0,01	0,49
TOTALE	100	43,65	56,35

Tabella A.4 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio con angolo di inclinazione variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

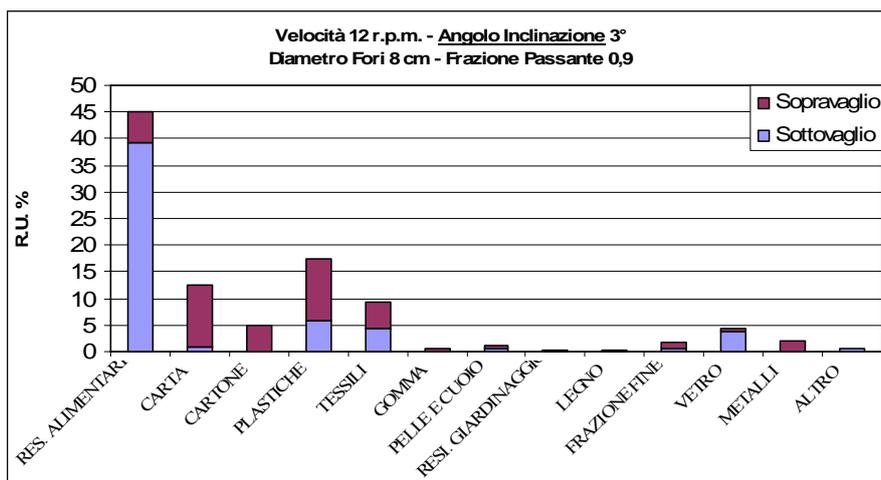


Grafico A.4 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo di inclinazione variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	6	[cm]	
Frazione	0,90		
RAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	SOPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	12,93	32,12
CARTA	12,42	12,36	0,06
CARTONE	5,08	5,08	0,00
PLASTICHE	17,47	15,54	1,93
TESSILI	9,35	7,58	1,77
GOMMA	0,52	0,52	0,00
PELLE E CUOIO	1,14	0,65	0,49
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,13	0,02
LEGNO	0,30	0,28	0,02
FRAZIONE FINE	1,60	1,25	0,35
VETRO	4,34	1,20	3,14
METALLI	2,08	2,03	0,05
ALTRO	0,50	0,02	0,48
TOTALE	100	59,57	40,43

Tabella A.5 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con diametro fori vaglio, variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo

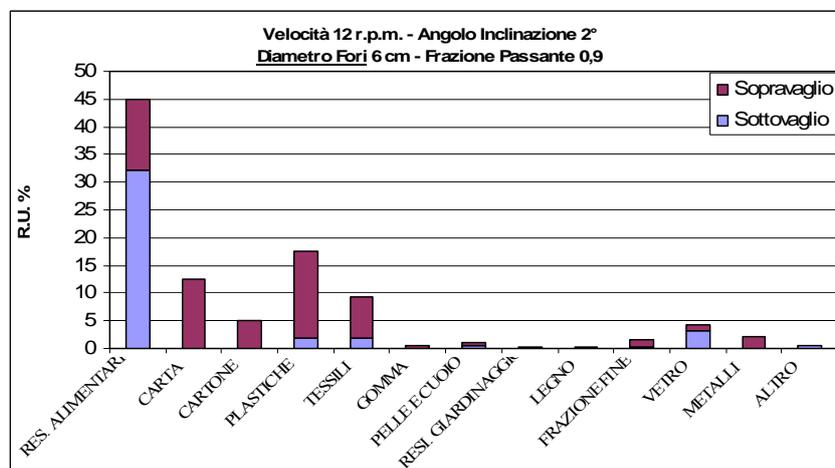


Grafico A.5 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio con diametro fori vaglio, variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	7	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	10,39	34,66
CARTA	12,42	12,35	0,07
CARTONE	5,08	5,08	0,00
PLASTICHE	17,47	17,47	0,00
TESSILI	9,35	7,35	2,00
GOMMA	0,52	0,51	0,01
PELLE E CUIOIO	1,14	0,63	0,51
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,13	0,02
LEGNO	0,30	0,28	0,02
FRAZIONE FINE	1,60	1,22	0,38
VETRO	4,34	0,91	3,43
METALLI	2,08	2,02	0,06
ALTRO	0,50	0,01	0,49
TOTALE	100	58,35	41,65

Tabella A.6 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con diametro fori vaglio, variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo

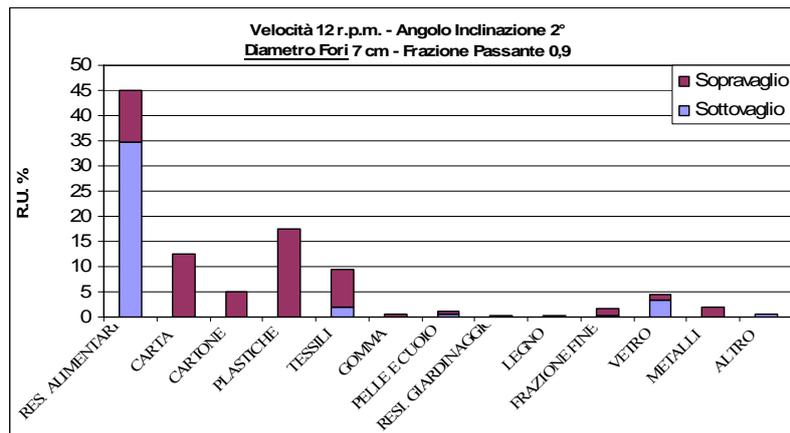


Grafico A.6 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio con diametro fori vaglio, variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	9	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	2,19	42,86
CARTA	12,42	10,78	1,64
CARTONE	5,08	5,01	0,07
PLASTICHE	17,47	8,88	8,59
TESSILI	9,35	3,02	6,33
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,44	0,70
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,11	0,04
LEGNO	0,30	0,24	0,06
FRAZIONE FINE	1,60	0,85	0,75
VETRO	4,34	0,13	4,21
METALLI	2,08	1,89	0,19
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	34,04	65,96

Tabella A.7 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con diametro fori vaglio, variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo

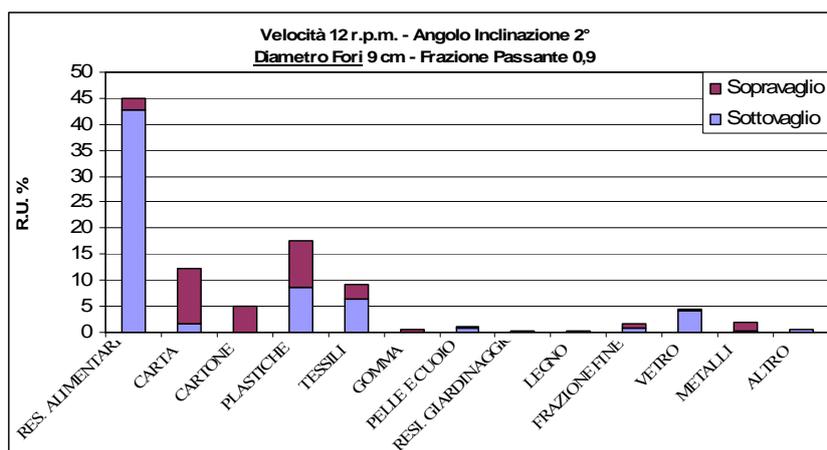


Grafico A.7 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio con diametro fori vaglio, variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	10	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	1,11	43,94
CARTA	12,42	8,27	4,15
CARTONE	5,08	4,56	0,52
PLASTICHE	17,47	5,80	11,67
TESSILI	9,35	1,70	7,65
GOMMA	0,52	0,47	0,05
PELLE E CUIOIO	1,14	0,37	0,77
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,10	0,05
LEGNO	0,30	0,22	0,08
FRAZIONE FINE	1,60	0,68	0,92
VETRO	4,34	0,06	4,28
METALLI	2,08	1,76	0,32
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	25,10	74,90

Tabella A.8 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con diametro fori vaglio, variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo

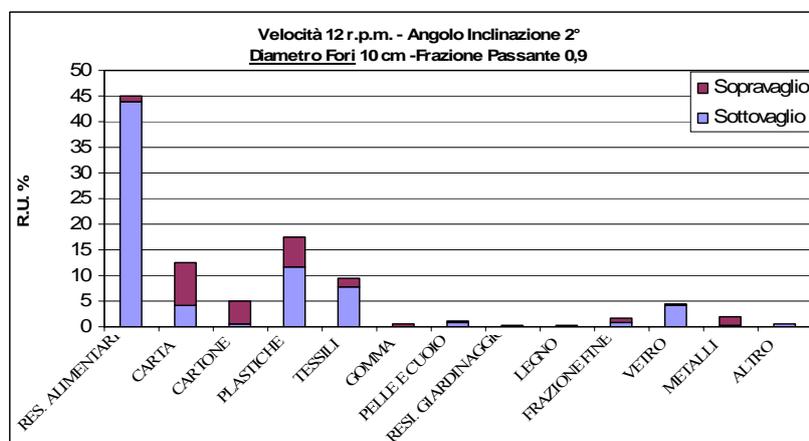


Grafico A.8 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio con diametro fori vaglio, variato rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,80		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	4,86	40,19
CARTA	12,42	11,29	1,13
CARTONE	5,08	5,03	0,05
PLASTICHE	17,47	10,98	6,49
TESSILI	9,35	4,43	4,92
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,50	0,64
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,12	0,03
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,97	0,63
VETRO	4,34	0,38	3,96
METALLI	2,08	1,93	0,15
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	41,24	58,76

Tabella A.9 – Valori percentuali di sopravvaglio e sottovaglio, con frazione di area disponibile al passaggio variata rispetto alle normali condizioni di utilizzo

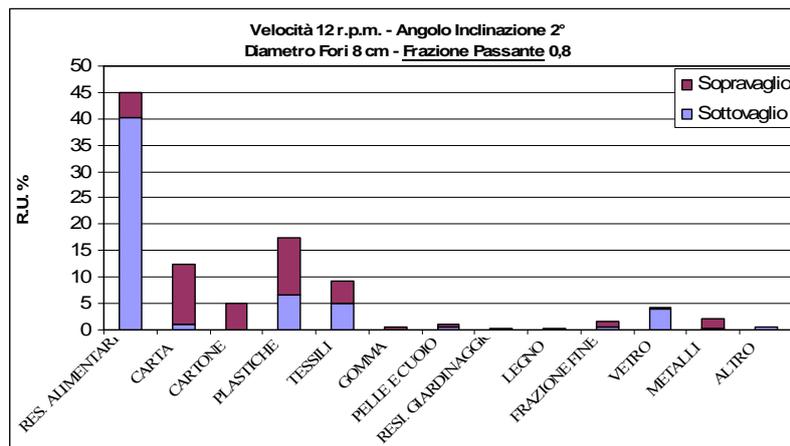


Grafico A.9 – Istogramma dei valori percentuali di sopravvaglio e sottovaglio, con frazione di area disponibile al passaggio variata rispetto alle normali condizioni di utilizzo

Angolo	2	[gradi]	
Velocità	12	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,70		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	SOPRAVAGLIO	SOTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	5,27	39,78
CARTA	12,42	11,37	1,05
CARTONE	5,08	5,03	0,05
PLASTICHE	17,47	11,30	6,17
TESSILI	9,35	4,65	4,70
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,51	0,63
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,12	0,03
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,99	0,61
VETRO	4,34	0,42	3,92
METALLI	2,08	1,94	0,14
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	42,35	57,65

Tabella A.10 – Valori percentuali di sopravvaglio e sottovaglio, con frazione di area disponibile al passaggio variata rispetto alle normali condizioni di utilizzo

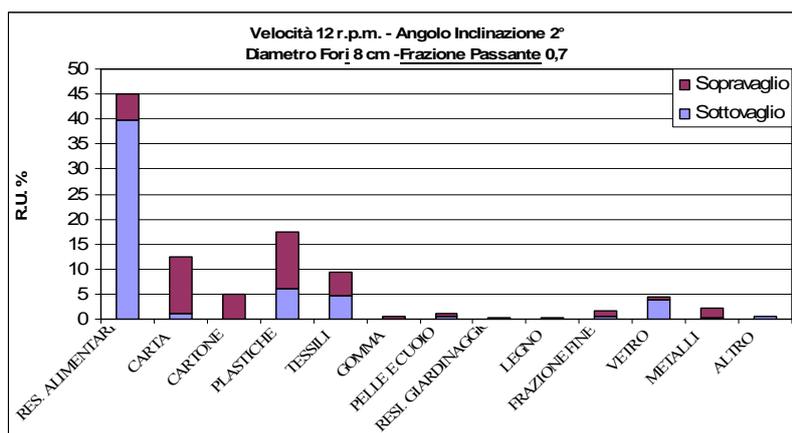


Grafico A.10 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con frazione di area disponibile al passaggio variata rispetto alle normali condizioni di utilizzo

Angolo	1,5	[gradi]	
Velocità	10	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,90		
RAZIONE MERCEOLOGICA	.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	2,92	42,13
CARTA	12,42	10,92	1,50
CARTONE	5,08	5,01	0,07
PLASTICHE	17,47	9,46	8,01
TESSILI	9,35	3,41	5,94
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUOIO	1,14	0,46	0,68
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,11	0,04
LEGNO	0,30	0,24	0,06
FRAZIONE FINE	1,60	0,88	0,72
VETRO	4,34	0,20	4,14
METALLI	2,08	1,90	0,18
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	36,01	63,99

Tabella A.11 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

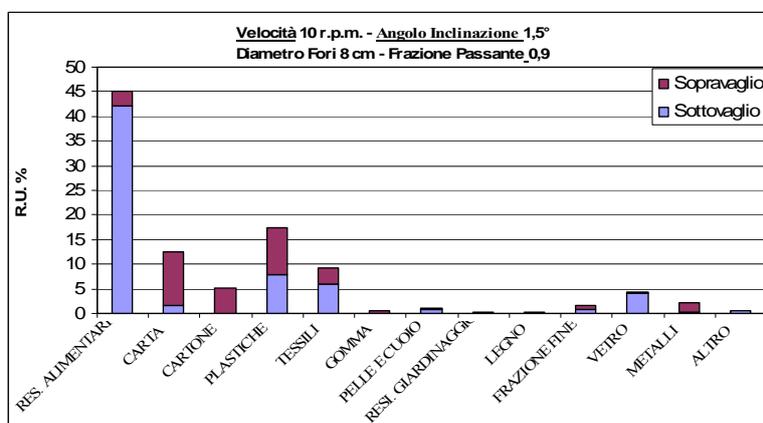


Grafico A.11 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2	[gradi]	
Velocità	10	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	3,6	41,45
CARTA	12,42	11,50	0,92
CARTONE	5,08	5,02	0,06
PLASTICHE	17,47	9,99	7,48
TESSILI	9,35	3,77	5,58
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,48	0,66
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,11	0,04
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,91	0,69
VETRO	4,34	0,26	4,08
METALLI	2,08	1,91	0,17
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	38,30	61,70

Tabella A.12 – Valori percentuali di sopravvaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

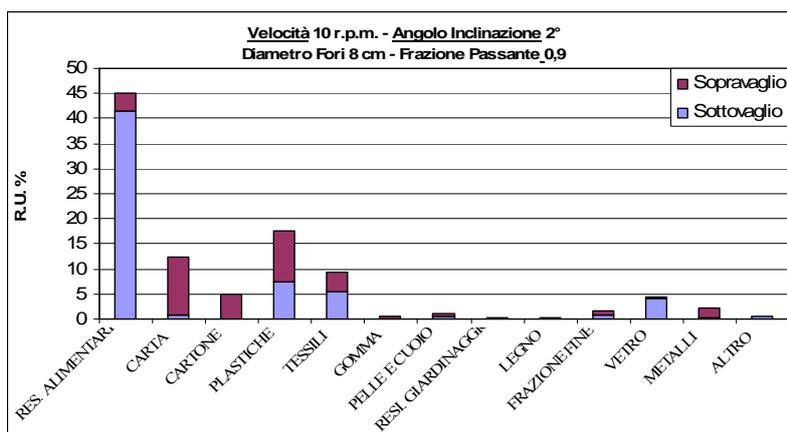


Grafico A.12 – Istogramma dei valori percentuali di sopravvaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2,5	[gradi]	
Velocità	10	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	4,22	40,83
CARTA	12,42	11,17	1,25
CARTONE	5,08	5,02	0,06
PLASTICHE	17,47	10,48	6,99
TESSILI	9,35	4,10	5,25
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,49	0,65
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,11	0,04
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,94	0,66
VETRO	4,34	0,32	4,02
METALLI	2,08	1,92	0,16
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	39,52	60,48

Tabella A.13 – Valori percentuali di sopravvaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

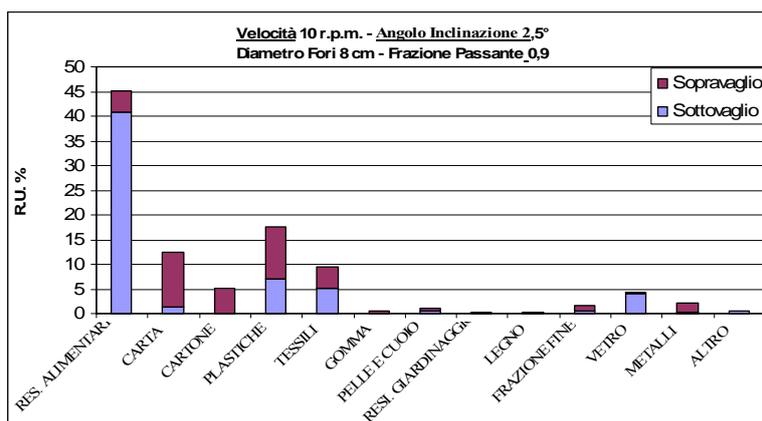


Grafico A.13 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	3	[gradi]	
Velocità	10	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	4,77	40,28
CARTA	12,42	11,27	1,15
CARTONE	5,08	5,03	0,05
PLASTICHE	17,47	10,91	6,56
TESSILI	9,35	4,39	4,96
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUOIO	1,14	0,50	0,64
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,12	0,03
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,97	0,63
VETRO	4,34	0,37	3,97
METALLI	2,08	1,93	0,15
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	41,01	58,99

Tabella A.14 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

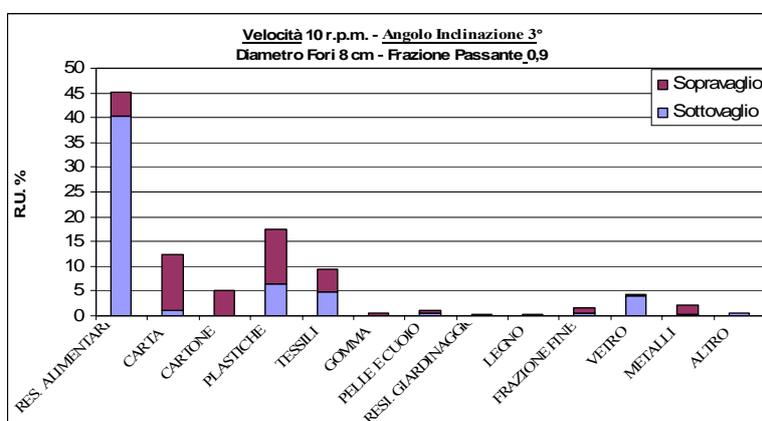


Grafico A.14 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	1,5	[gradi]	
Velocità	11	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	3,3	41,75
CARTA	12,42	10,99	1,43
CARTONE	5,08	5,02	0,06
PLASTICHE	17,47	9,76	7,71
TESSILI	9,35	3,61	5,74
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,47	0,67
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,11	0,04
LEGNO	0,30	0,24	0,06
FRAZIONE FINE	1,60	0,90	0,70
VETRO	4,34	0,23	4,11
METALLI	2,08	1,91	0,17
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	37,04	62,96

Tabella A.15 – Valori percentuali di sopravvaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

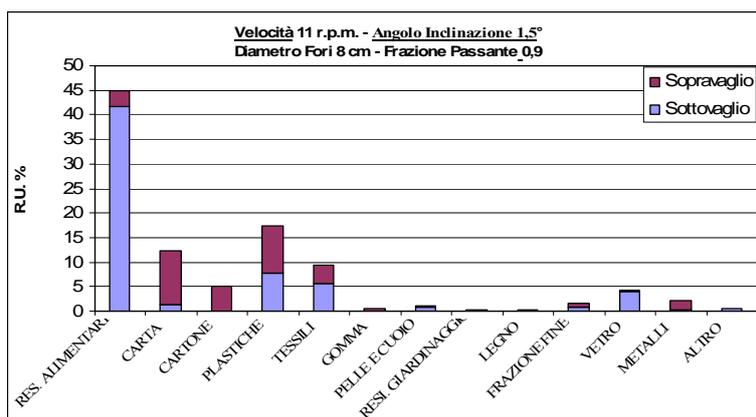


Grafico A.15 – Istogramma dei valori percentuali di sopravvaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2	[gradi]	
Velocità	11	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	4,07	40,98
CARTA	12,42	11,14	1,28
CARTONE	5,08	5,02	0,06
PLASTICHE	17,47	10,36	7,11
TESSILI	9,35	4,01	5,34
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUIOIO	1,14	0,49	0,65
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,11	0,04
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,93	0,67
VETRO	4,34	0,31	4,03
METALLI	2,08	1,92	0,16
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	39,11	60,89

Tabella A.16 – Valori percentuali di sopravvaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

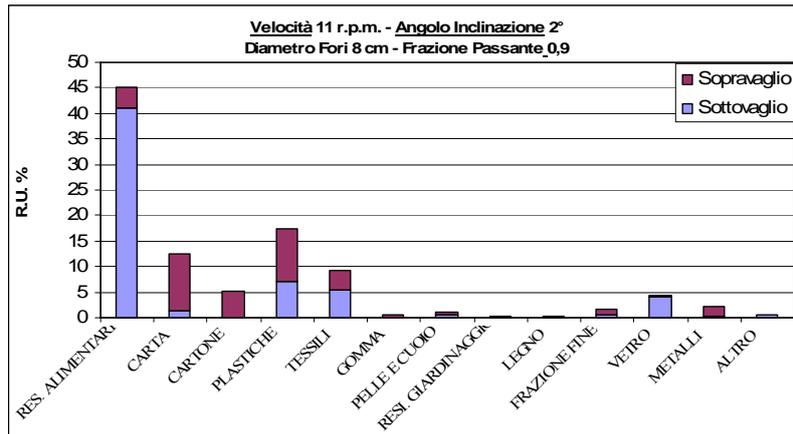


Grafico A.16 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	2,5	[gradi]	
Velocità	11	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	SOPRAVAGLIO	SOTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	4,73	40,32
CARTA	12,42	11,27	1,15
CARTONE	5,08	5,03	0,05
PLASTICHE	17,47	10,88	6,59
TESSILI	9,35	4,37	4,98
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUOIO	1,14	0,50	0,64
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,12	0,03
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,96	0,64
VETRO	4,34	0,37	3,97
METALLI	2,08	1,93	0,15
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	40,91	59,09

Tabella A.17 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

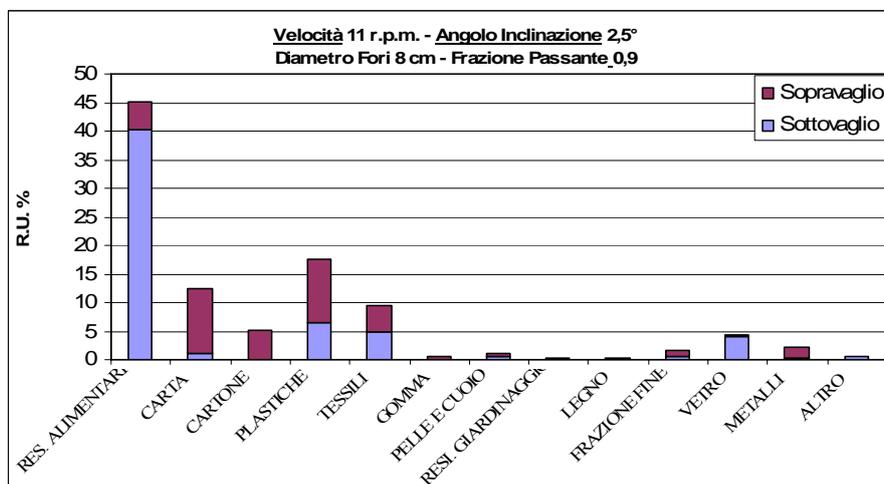


Grafico A.17 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

Angolo	3	[gradi]	
Velocità	11	[giri/min]	
Diametro Fori	8	[cm]	
Frazione	0,90		
FRAZIONE MERCEOLOGICA	R.U. (%)	OPRAVAGLIO	OTTOVAGLIO
RESIDUI ALIMENTARI	45,05	5,29	39,76
CARTA	12,42	11,37	1,05
CARTONE	5,08	5,03	0,05
PLASTICHE	17,47	11,32	6,15
TESSILI	9,35	4,66	4,69
GOMMA	0,52	0,50	0,02
PELLE E CUOIO	1,14	0,51	0,63
RESIDUI DI GIARDINAGGIO	0,15	0,12	0,03
LEGNO	0,30	0,25	0,05
FRAZIONE FINE	1,60	0,99	0,61
VETRO	4,34	0,42	3,92
METALLI	2,08	1,94	0,14
ALTRO	0,50	0,00	0,50
TOTALE	100	42,40	57,60

Tabella A.18 – Valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

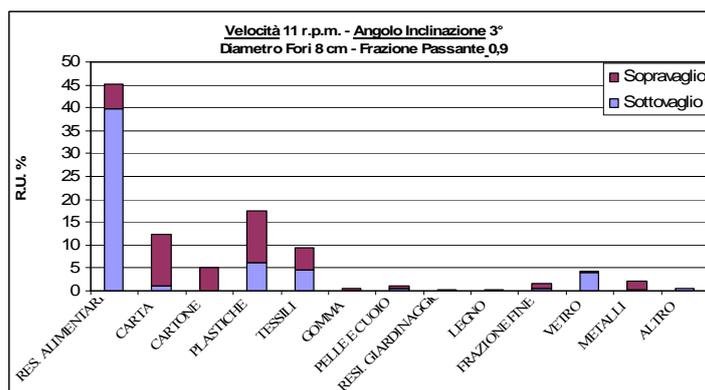


Grafico A.18 – Istogramma dei valori percentuali di sopravaglio e sottovaglio, con angolo e velocità variati rispetto alle normali condizioni di utilizzo.

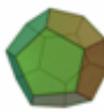
Nome	Immagine	Volume, V_p	Superficie, S_p	Diametro Equivalente, d_v $d_v = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}$	Sfericità, ψ $\psi = \frac{\pi d_v^2}{S_p}$
Tetraedro		$\frac{\sqrt{2}}{12} s^3$	$\sqrt{3} s^2$	$0.608 s$	0.671
Esaedro		s^3	$6 s^2$	$1.241 s$	0.806
Ottaedro		$\frac{\sqrt{2}}{3} s^3$	$2\sqrt{3} s^2$	$0.966 s$	0.846
Dodecaedro		$\frac{1}{4} (15+7\sqrt{5}) s^3$	$3\sqrt{25+10\sqrt{5}} s^2$	$2.446 s$	0.910
Icosaedro		$\frac{5}{12} (3+\sqrt{5}) s^3$	$5\sqrt{3} s^2$	$1.609 s$	0.939
Sfera		$\frac{\pi}{6} s^3$	πs^2	$1.000 s$	1.000

Tabella A.19 – Diametro equivalente e sfericità di alcuni solidi.

BIBLIOGRAFIA

1. Stessel R.I. (1991). A new trammel model. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 1-22.
2. Stessel R.I. (1992). Particle Motion in Rotary Screen. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.118, n.3, 604-619.
3. Stessel R.I. and Cole K. (1996). Laboratory Investigation of a New Trommel Model. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol.46, 558-568.
4. Stessel R.I. and Cole K. (1996). Laboratory Investigation of a New Trommel Model. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol.46, 558-568.
5. Wheeler P.A., Barton J.R. and New R. (1989). An Empirical Approach to the Design of trammel Screens for Fine Screening of Domestic Refuse. *Resources, Conservation and Recycling*, 2, 261-263.
6. George Tchobanoglous, Hilary Theisen, Samuel A. Vigil, (1993) *Integrated Solid Waste Management*, McGraw Hill, New York.
7. Tran-Cong S., Gay M., Michaelides E.E. (2003). Drag coefficients of irregularly shaped particles. *Powder Technology*, 139, 21-32.
8. DIVAPRA, IPLA, ARPA, 1998 - Metodi di analisi dei compost - Regione Piemonte
9. UNI 9246 (1988) – Forni di incenerimento di RSU e/o assimilabili con recupero di calore.
10. Centemero M., Mauri R., 1998 - Proposta per una metodica d'indagine merceologica della frazione organica proveniente da raccolta differenziata.
11. Fleury, P., and J. P. Mathieu: *Calore, Termodinamica, Stati della materia*, Zanichelli, Bologna, 1970.
12. Hansen, L. A. et al.: “Quantification of Fusion in Ashes from Solid Fuel Combustion”, *Thermochimica Acta*, Vol. 326, pp.105-117, 1999.
13. Hasselriis, F.: *Refuse Derived Fuel*, an Ann Arbor Science Book, Butterworth, Boston, 1984.
14. James, M. T. and R. F. Harwood: *Medical Entomology*, 6th ed., Macmillan, London, 1969.
15. Kaiser, E. R.: “Chemical Analyses of Refuse Compounds”, in *Proceedings of National Incinerator Conference*, ASME, New York, 1966.
16. Mantell, C. L. (ed.): *Solid Wastes: Origin, Collection, Processing, and Disposal*, Wiley-Interscience, New York, 1975.
17. Neissen, W. R.: “Properties of Waste Materials”, in D. G. Wilson (ed.): *Handbook of Solid Waste Management*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1977
18. Removal of batteries from solid waste using trommel separation S.T. Lau , W.H. Cheung , C.K. Kwong , C.P. Wan , K.K.H. Choy , C.C. Leung ,J.F. Porter , C.W. Hui , G. Mc Kay

19. Alter H. , Gavis J. , and Remard M.L. (1980).”Design models of trommels for resource recovery processing”. Waste processing conference American Society of Mechanical Engineers, New York.