

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

**Gestione dei fanghi industriali: soluzione innovativa per
efficienza, sostenibilità e risparmio – caso sperimentale:
*Momentive Performance Materials Specialties Srl***



Relatori

Prof. ssa Debora Fino

Prof. ssa Tonia Tommasi

Ing. Nino Luigi D'Ardes

Candidata

Arianna La Vecchia

Marzo/Aprile 2025

*A colui che è fonte inesauribile di energia,
esempio di coraggio, tenacia e determinazione,
a mio fratello Giovanni,
porto sicuro e mia ragione di vita.*

Indice

1. Introduzione	6
2. Trattamenti per la gestione e lo smaltimento dei fanghi	7
2.1 Classificazione generale dei fanghi	7
2.1.1 Composizione chimica dei fanghi	8
2.2 Trattamento dei fanghi	8
2.2.1 Ispessimento	9
2.2.1.1 Ispessimento per gravità o sedimentazione	9
2.2.1.2 Ispessimento per flottazione	10
2.2.2 Stabilizzazione	10
2.2.2.1 Digestione aerobica	11
2.2.2.2 Digestione anaerobica	11
2.2.2.3 Stabilizzazione chimica	12
2.2.3 Disidratazione	13
2.2.3.1 Disidratazione meccanica con filtropressa	13
2.2.3.2 Disidratazione meccanica mediante centrifuga	14
2.2.3.3 Essiccamento termico	15
2.2.4 Essiccamento	16
3. Caso di studio: <i>Momentive Performance Materials Specialties Srl</i> di Termoli	17
3.1 Presentazione dell'azienda	17
3.2 Ubicazione e planimetria dello stabilimento	18
3.3 Impianti e processi di produzione	20
3.4 Gestione dei rifiuti	22
3.5 Sistema trattamento fanghi e gestione	26
3.6 Obiettivi e progetti futuri, strategia per l'ambiente	27
4. Studio della stabilizzazione dei fanghi	29
4.1 Metodologia di esecuzione delle prove sperimentali	29
4.2 Risultati ottenuti sperimentalmente con l'impianto dell'acetilene spento	32
4.3 Risultati ottenuti sperimentalmente con l'impianto dell'acetilene acceso	36

5. Confronto tecnico-economico di due soluzioni per la gestione dei fanghi	40
5.1 Parametri e condizioni operative per il dimensionamento della centrifuga	40
5.2 Dimensionamento della centrifuga e dell'essiccatore	43
5.3 Bilancio economico del binomio futuro: centrifuga-essiccatore	45
5.4 Valutazione e determinazione del <i>Saving</i>	48
6. Sostenibilità ambientale correlata alle due soluzioni poste a confronto	50
6.1 Calcolo emissioni di CO ₂ da disidratazione fanghi con filtropressa	51
6.1.1 Calcolo emissioni di CO ₂ da trasporti	51
6.1.2 Calcolo emissioni di CO ₂ da travasi e movimentazioni	52
6.1.3 Calcolo emissioni di CO ₂ dal consumo di energia elettrica	53
6.2 Calcolo emissioni di CO ₂ da disidratazione fanghi centrifugati ed essiccati	53
6.2.1 Calcolo emissioni di CO ₂ da trasporti	53
6.2.2 Calcolo emissioni di CO ₂ da travasi e movimentazioni	54
6.2.3 Calcolo emissioni di CO ₂ dal consumo di energia elettrica	55
6.3 Confronto e valutazione in termini di sostenibilità tra le due soluzioni	55
6.4 Recupero e valorizzazione dei rifiuti: <i>End of Waste</i>	57
7. Conclusioni	61
8. Bibliografia e sitografia	62
9. Ringraziamenti	64

1. Introduzione

La gestione dei fanghi industriali rappresenta una delle sfide più complesse e rilevanti nel contesto della sostenibilità ambientale e dell'efficienza economica degli impianti chimici. Questa tesi nasce dall'esigenza della *Momentive Performance Materials Specialties S.r.l.* di Termoli di individuare una soluzione impiantistica innovativa capace di ridurre il volume dei fanghi prodotti, abbattendo i costi di smaltimento e limitando l'impatto ambientale delle attività produttive.

Il progetto di ricerca si sviluppa in un approccio sperimentale articolato in più fasi, con l'obiettivo di confrontare l'impianto attuale che si avvale di una filtropressa a piastre per la disidratazione dei fanghi, con una nuova configurazione basata sull'adozione di un sistema centrifuga-essiccatore, valutandone le prestazioni in termini di efficienza, sostenibilità e risparmio economico. La ricerca ha previsto l'analisi approfondita dei fanghi provenienti da due chiarificatori posti a valle di due linee produttive indipendenti, attraverso la realizzazione di curve di taratura e prove di laboratorio volte a determinare la percentuale di residuo secco.

Parallelamente, è stata condotta una valutazione economica dettagliata, che ha permesso di stimare il *Saving* annuale derivante dall'implementazione della nuova soluzione, tenendo conto di voci di costo come il noleggio delle apparecchiature, i costi energetici e le spese di smaltimento. Inoltre, è stato esaminato il potenziale dell'eccesso di calce liquida prodotto, valutando la possibilità di qualificarla come End-of-Waste e commercializzarla, trasformando così un rifiuto in risorsa e promuovendo un approccio circolare. La vendita della calce liquida al 15% in secco emerge come la scelta più vantaggiosa, qualora si generasse un surplus da gestire, poiché rappresenta un'alternativa economicamente più sostenibile rispetto al trattamento di disidratazione, sia mediante filtropressatura, che mediante centrifugazione ed essiccazione e allo smaltimento tradizionale.

Questo lavoro offre una valutazione integrata delle diverse soluzioni disponibili, evidenziando come un approccio orientato all'innovazione tecnologica e alla sostenibilità ambientale possa portare a benefici economici significativi per l'azienda, senza trascurare la conformità normativa e la riduzione dell'impatto ambientale. I risultati dello studio dimostrano infatti che l'adozione del binomio centrifuga-essiccatore consente una significativa riduzione del volume dei fanghi, passando dalle attuali 6000 tonnellate/anno al 45% di secco a circa 3000 tonnellate/anno al 95% di secco, con un risparmio annuale stimato notevole.

Infine, il progetto ha preso in considerazione l'impatto ambientale complessivo, stimando le emissioni di CO₂ legate alle diverse opzioni impiantistiche, al fine di individuare la soluzione che offrisse il miglior equilibrio tra riduzione dei rifiuti, ottimizzazione delle risorse e minimizzazione delle emissioni. Questa tesi, dunque, si propone di offrire un modello di gestione sostenibile dei fanghi industriali, capace di integrare innovazione tecnologica, risparmio economico e rispetto dell'ambiente.

2. Trattamenti per la gestione e lo smaltimento dei fanghi

2.1 Classificazione generale dei fanghi

I fanghi sono materiali semi-solidi risultanti dai processi di depurazione delle acque reflue, industriali o civili, o da altre attività produttive. Sono costituiti da una grossa quantità di acqua e solidi sospesi, che possono includere materia organica, inorganica, microrganismi e sostanze chimiche. Possono essere classificati in base a diverse caratteristiche, tra cui l'origine, la composizione e il trattamento subito.

In base all'origine si distinguono:

- Fanghi di depurazione civile: derivano dal trattamento delle acque reflue urbane.
- Fanghi industriali: provengono dal trattamento delle acque reflue di impianti produttivi (es. industria chimica, alimentare, metallurgica).
- Fanghi biologici: ottenuti dai processi di depurazione biologica, in cui i batteri degradano la materia organica.
- Fanghi chimico-fisici: derivano da trattamenti chimici e fisici, spesso con l'aggiunta di coagulanti e flocculanti.

In base alla composizione si ha la seguente classificazione:

- Fanghi organici: ricchi di sostanza organica, possono essere utilizzati in agricoltura (se conformi alle normative).
- Fanghi inorganici: con elevata presenza di metalli pesanti o minerali, tipici dei processi industriali.
- Fanghi misti: contengono sia frazioni organiche che inorganiche.

Infine, in base allo stato fisico e al trattamento subito si caratterizzano:

- Fanghi grezzi: non ancora trattati dopo la separazione dall'acqua.
- Fanghi ispessiti: con ridotto contenuto di acqua, ottenuti tramite processi di ispessimento.
- Fanghi disidratati: con ulteriore riduzione di umidità mediante centrifugazione, filtrazione o essiccamento.
- Fanghi stabilizzati: trattati per ridurre la biodegradabilità e la presenza di agenti patogeni (es. digestione anaerobica, compostaggio, calcinazione).
- Fanghi essiccati: con ridottissimo contenuto di acqua, spesso destinati alla combustione o alla produzione di materiali da costruzione.

2.1.1 *Composizione chimica dei fanghi*

Si conoscono molte analisi chimiche dei fanghi ed i valori forniti sono utili per tante ragioni. Poiché il valore fertilizzante dei fanghi di scarichi domestici ed industriali può variare molto, l'analisi chimica può servire a stabilire le possibilità di utilizzo in tal senso: le concentrazioni di azoto, di acido fosforico e di potassio, nonché la frazione organica, possono determinare il valore fertilizzante. Inoltre, è molto importante conoscere anche il grado di digestione subito dal fango, in quanto il processo di digestione comporta una riduzione del contenuto di azoto e di sostanza organica e di conseguenza anche alla riduzione del valore fertilizzante del fango. La conoscenza dei componenti organici specifici di un fango è fondamentale per poter prevedere le condizioni prevalenti nel processo di disidratazione e nella determinazione degli effetti specifici di quel fango sulle caratteristiche del terreno. La possibilità di esprimere con un parametro la natura biologica di un fango è importante perché si definiscono le sue caratteristiche di trattabilità e di inquinamento. Ci sono diversi tipi possibili per valutare la frazione biologica di un fango, come la concentrazione di BOD¹, quella dell'acido desossiribonucleico (DNA), la carica batterica o la velocità di consumo di ossigeno espressa per unità di peso di solidi sospesi volatili. Per i fanghi industriali è utile organizzare e consolidare un programma che comprenda le operazioni di campionamento e caratterizzazione, prima di poter essere trattati e poi smaltiti [1].

2.2 *Trattamento dei fanghi*

Il trattamento dei fanghi è un insieme di processi utilizzati per ridurre il volume, stabilizzare e rendere sicuri i fanghi derivanti dal trattamento delle acque reflue prima del loro smaltimento o riutilizzo. I fanghi sono costituiti da una grossa quantità d'acqua, accompagnata da una certa concentrazione di solidi sospesi e possono essere trattati mediante un gran numero di processi di digestione e di disidratazione [1].

Le fasi principali del trattamento dei fanghi sono:

1. Ispessimento

- Riduce il contenuto d'acqua nei fanghi, aumentando la concentrazione di solidi.
- Tecniche: sedimentazione, flottazione.

2. Stabilizzazione

- Riduce la presenza di microrganismi patogeni e il rischio di cattivi odori.
- Metodi:
 - Digestione anaerobica: batteri anaerobi decompongono la materia organica, producendo biogas (metano).
 - Digestione aerobica: utilizza ossigeno per degradare la materia organica.
 - Stabilizzazione chimica con l'aggiunta di calce o altri agenti chimici.

¹ BOD = Domanda di ossigeno biologico [mg/L], è la misura di ossigeno consumato per ossidare le sostanze inquinanti.

3. Disidratazione
 - Rimuove l'acqua in eccesso per ridurre il volume del fango.
 - Tecniche: filtropressa, centrifuga, essiccatori termici.
4. Essiccamento
 - Ulteriore riduzione dell'umidità per facilitare lo smaltimento o il riutilizzo.
5. Smaltimento o riutilizzo
 - Recupero energetico: utilizzo dei fanghi essiccati come combustibile.
 - Uso in agricoltura: se trattati adeguatamente, possono essere utilizzati come fertilizzanti.
 - Conferimento in discarica: se non riciclabili, vengono smaltiti in discariche controllate.

Gli obiettivi del trattamento dei fanghi sono molteplici: ridurre il volume, recuperare l'energia, minimizzare l'impatto ambientale e qualora fosse possibile, produrre materiali riutilizzabili come fertilizzanti, combustibili alternativi, compost.

2.2.1 Ispessimento

L'ispessimento costituisce generalmente il primo stadio della maggior parte dei sistemi di trattamento dei fanghi. L'ispessimento dei fanghi è un processo semplice che porta a ridurre il volume di fanghi estratti dai decantatori provenienti da impianti di depurazione acque, riducendo i costi di trasporto, trattamento e smaltimento, migliorando conseguentemente l'efficienza e l'economicità dei successivi processi di disidratazione. Quindi, la sua funzione è quella di ridurre la percentuale di umidità e di aumentarne la concentrazione. L'ispessimento può essere realizzato attraverso diversi metodi: ispessimento per gravità, ispessimento per flottazione ad aria disciolta [2].

2.2.1.1 Ispessimento per gravità o sedimentazione

L'ispessimento per gravità, noto anche come processo di sedimentazione, durante il quale il fango viene lasciato sedimentare in appositi serbatoi (ispessitori gravitazionali). L'acqua libera risale in superficie e viene separata. È un metodo economico e adatto per fanghi con buona sedimentabilità, ossia quei fanghi che tendono a sedimentare velocemente grazie alla concentrazione dei solidi, alla viscosità del liquido, alle dimensioni e alla configurazione del bacino di sedimentazione. Il processo di sedimentazione consente di ottenere, per gravità, la separazione di solidi in sospensione di densità maggiore di quella del fluido che li contiene. Ne deriva un effluente chiarificato ed un sedimento che, nel campo del trattamento delle acque, è indicato come fango. Le applicazioni del processo sono numerose. Si parla in generale di sedimentazione primaria, o chiarificazione, quando esso è utilizzato per la rimozione di solidi già originariamente presenti in forma sedimentabile nell'acqua. Si fa riferimento alla sedimentazione secondaria, quando esso è preceduto da processi chimici o biologici, di flocculazione, di precipitazione o di qualsiasi trasformazione di solidi all'origine non sedimentabili.

A parità di caratteristiche del materiale sospeso, la tendenza all'agglomerazione risulta tanto più alta quanto maggiore sia la concentrazione dei solidi, quanto più varie siano le loro dimensioni e quanto maggiore sia la profondità della vasca, tutti fattori che incrementano la possibilità di collisione e conseguente sedimentazione [2].

2.2.1.2 Ispessimento per flottazione

La flottazione è un processo di chiarificazione simile alla sedimentazione per gravità, ma nel quale i solidi galleggiano in superficie sull'acqua, invece di depositarsi sul fondo, per poi venire rimossi mediante opportuni dispositivi. Affinché una particella possa galleggiare sull'acqua è necessario che il suo peso specifico sia minore di quello dell'acqua stessa. Alcune sostanze hanno già per natura un peso specifico così basso (come gli oli, i grassi, alcune materie plastiche) e galleggiano già di per sé; nella maggior parte dei casi però, le particelle, che hanno un peso specifico superiore a quello dell'acqua, vengono rese più leggere facendo aderire ad esse delle bollicine di aria in modo tale che il peso specifico della combinazione particella-bolla d'aria sia minore di quello dell'acqua. In pratica, questo metodo utilizza microbolle di aria per far risalire le particelle solide in superficie, formando uno strato di fango ispessito. Le bolle possono essere generate nelle acque di rifiuto facendo entrare aria nel liquido mediante un sistema di aerazione meccanico, per gorgogliamento, oppure riducendo bruscamente la pressione su una parte di liquami sovra satura di aria, facendo in modo che l'eccesso d'aria venga in superficie sotto forma di piccole bolle. La flottazione è particolarmente efficace, se paragonata alla sedimentazione, quando le particelle da rimuovere sono molto leggere ed a forma di fiocchi; infatti, è un processo indicato per fanghi difficili da sedimentare o con elevata presenza di solidi fini [2].

2.2.2 Stabilizzazione

Il processo di stabilizzazione dei fanghi ha l'obiettivo di limitare la decomposizione del fango, diminuendo la quantità di sostanze organiche facilmente degradabili. Inoltre, serve a ridurre la presenza di microrganismi patogeni e cattivi odori derivanti dal trattamento delle acque reflue. Questo trattamento è essenziale per rendere i fanghi più sicuri e adatti per il loro successivo riutilizzo o smaltimento finale.

La stabilizzazione dei fanghi è un passaggio essenziale nella loro gestione, garantendo sicurezza ambientale ed economica. L'adozione di tecnologie adeguate consente di trasformare i fanghi da rifiuto a risorsa, riducendo l'impatto ecologico e favorendo il recupero di materiali o energia. Un fango si può definire stabilizzato se può essere usato o eliminato senza provocare danni apprezzabili all'ambiente o alla salute pubblica. I principali processi di stabilizzazione sono: la stabilizzazione biologica, che comprende la digestione aerobica e anaerobica e la stabilizzazione chimica, mediante aggiunta di calce o altri agenti chimici [3].

2.2.2.1 *Digestione aerobica*

La digestione aerobica del fango è utilizzata per raggiungere la “digestione tecnica” del fango, è un processo finalizzato alla stabilizzazione dei fanghi attraverso una fermentazione eterotrofa in presenza di ossigeno. Questo trattamento consente di completare la degradazione biologica delle sostanze organiche, iniziata nei processi secondari della linea acque degli impianti di depurazione. Viene utilizzata prevalentemente in impianti a fanghi attivi con schema semplificato, privi di sedimentazione primaria e di dimensioni medio-piccole, a causa del sensibile costo di gestione dovuto al consumo di elettricità per la fornitura di ossigeno. I digestori aerobici ricevono direttamente i fanghi provenienti dalla fase biologica, con un basso rapporto tra substrato e microrganismi. Di conseguenza, il processo di degradazione avviene secondo le dinamiche della respirazione endogena, riducendo la carica batterica eterotrofa. Il fango si considera stabilizzato quando non genera più odori sgradevoli, oppure quando si registra una riduzione del 40% dei solidi volatili. Il processo di digestione aerobica consiste in un'aerazione prolungata dei fanghi che può essere effettuata nello stesso bacino di trattamento biologico o in una vasca separata ed aerata nella quale viene raccolto il fango di supero. L'estrazione del fango di supero deriva dalla necessità di mantenere costante nel sistema, una volta raggiunte le condizioni di regime, la concentrazione dei batteri. L'obiettivo della digestione aerobica è quello di ottenere, attraverso il meccanismo della respirazione endogena, la mineralizzazione della frazione organica contenuta nei fanghi attivi e quindi la loro stabilizzazione. Per consentire la regolare gestione del processo e prevenire la formazione di cattivi odori occorre sempre assicurare un minimo contenuto di ossigeno. In condizioni aerobiche, i batteri consumano rapidamente la materia organica e la convertono in anidride carbonica. Quando la materia organica è carente, i batteri muoiono e vengono utilizzati come cibo da altri batteri, questa fase del processo è nota come respirazione endogena. Sono possibili due alternative per la realizzazione della digestione aerobica: la stabilizzazione a temperatura ambiente (o bassa) oppure la stabilizzazione termofila ad alta temperatura. La digestione aerobica a temperatura ambiente richiede un notevole consumo di energia per l'aerazione e la miscelazione. Per una completa digestione sono necessari tempi di residenza che vanno dai 10 ai 30 giorni (50 quando le temperature sono basse). La massima riduzione di solidi volatili che si ottiene è intorno al 40%. Nella digestione termofila invece, il calore derivante dall'ossidazione della sostanza organica viene sfruttato per incrementare la temperatura della massa del fango in digestione. Le temperature operative arrivano anche a 55°C, provocando una rapida stabilizzazione nel giro di 3/5 giorni. In questo secondo caso, il processo richiede un certo isolamento termico e l'eliminazione quasi totale delle possibili perdite di calore [4].

2.2.2.2 *Digestione anaerobica*

La digestione anaerobica è una degradazione biologica di sostanze organiche, in assenza di ossigeno libero. Il processo di digestione anaerobica coinvolge tre stadi di fermentazione: fase idrolitica, durante la quale per effetto dell'attività enzimatica extracellulare le sostanze organiche complesse (polisaccaridi, proteine, oli e grassi) vengono trasformate in sostanze più semplici; acidogenesi, o fermentazione acida, in cui tali sostanze semplici, ad opera di batteri detti produttori di acidi, vengono trasformate da specie organiche, in acidi volatili di cui l'80% formato da acido acetico e propionico;

metanogenesi, o fermentazione alcalina, che si occupa di trasformare questi prodotti acidi intermedi in prodotti finali gassosi, cioè metano e anidride carbonica, ad opera di un gruppo molto specializzato di batteri anaerobi stretti detti metanigeni. La velocità globale della reazione che porta alla formazione di CH₄ e CO₂ dipende dalla velocità delle varie fasi di fermentazione, tra le quali ve ne sarà sempre una più lenta che limiterà la velocità globale dell'intero processo, e la fase limitante è quella metanica, perché i batteri metanigeni hanno bisogno di condizioni strettamente anaerobiche e sono estremamente sensibili alle variazioni ambientali, soprattutto del pH. Tale velocità limitante dipende principalmente dall'attività metabolica e dal tempo di moltiplicazione della popolazione dei microrganismi deputati allo svolgimento di quello stadio. Un fango risulta tecnicamente digerito anaerobicamente quando esso non produce più del 10-15% del gas che produrrebbe allo stato iniziale. La digestione può essere realizzata secondo tre schemi impiantistici fondamentali, ognuno dei quali risponde a determinati requisiti:

- 1) digestione a basso carico ad un solo stadio, riscaldata o meno a seconda dei casi; in genere agitata, con funzione anche di ispessitore e adottata spesso in impianti di piccola potenzialità;
- 2) digestione ad alto carico ad uno o a due stadi, di cui il primo continuamente riscaldato e miscelato, mentre il secondo freddo e privo di miscelazione con funzione di digestore secondario nel quale avviene la decantazione;
- 3) la digestione a due stadi con ricircolo, ma con la differenza che il digestore secondario è più piccolo rispetto a quello presente nel secondo caso, perché qui ha solo la funzione di separatore dei fanghi, i quali vengono ricircolati nel digestore primario; in questo ultimo caso non si ha nessun riscaldamento.

Uno dei parametri operativi più importanti è il mescolamento: esso è ottenuto con un pompaggio esterno o con miscelatori meccanici interni o per mezzo della ricircolazione del gas prodotto. La digestione anaerobica può essere mesofila, se avviene in un intervallo di temperatura compreso tra i 30 °C ed i 38 °C, oppure termofila se l'intervallo di temperatura varia da 49 °C a 57 °C. Valutazioni effettuate sul bilancio energetico, tra l'energia prodotta dal processo e quella impiegata per il riscaldamento dei fanghi, hanno identificato nella digestione mesofila il processo più vantaggioso per impianti civili. I vantaggi della digestione anaerobica sono i seguenti: stabilizzazione del materiale organico; distruzione degli eventuali microrganismi patogeni; riduzione del volume dei fanghi; facilitazione per lo smaltimento finale [1].

2.2.2.3 *Stabilizzazione chimica*

La stabilizzazione chimica è un processo utilizzato per ridurre la degradabilità, i cattivi odori e la presenza di microrganismi patogeni nei fanghi, mediante l'aggiunta di specifici reagenti chimici. Questo trattamento modifica il pH o le proprietà chimiche del fango, inibendo la crescita batterica e rendendolo più sicuro per lo smaltimento o il riutilizzo. In particolare, l'aggiunta di calce consente al fango di innalzare il pH oltre 12 per rimuovere la maggior parte dei batteri presenti nella materia organica. Si tratta di un processo non molto costoso, ma fortemente dipendente dal costo locale della calce. La calce è il reattivo alcalino più economico ed è usato estensivamente negli impianti di trattamento delle acque e dei liquami. Nella progettazione di un sistema di manipolazione della calce, devono essere considerati i problemi connessi alla tendenza della calce di formare incrostazioni;

pertanto, bisogna prevedere l'installazione di apparecchiature che permettano la periodica e sistematica manutenzione e pulizia. Le forme nelle quali la calce è disponibile sono: calce rapida, calce idrata e calcare. La calce provvede anche all'eliminazione di odori e migliora la disidratabilità; bisogna però tener presente che il fango stabilizzato con la calce non è chimicamente stabile e risulta difficile mantenere nel tempo il pH ad un valore così elevato anche con dosaggi alti di calce [2].

2.2.3 Disidratazione

Il processo di disidratazione è essenziale per ridurre al minimo i rifiuti e separa la fase solida e la fase liquida dei fanghi. Il trattamento biologico delle acque reflue genera enormi quantità di fanghi di scarto che devono essere disidratati ed essiccati. La disidratazione può essere realizzata su un fango grezzo o su un fango stabilizzato, dipende dalla tipologia di processo che si sceglie di implementare: la disidratazione meccanica, ad opera di filtropresse o centrifughe, può consentire di escludere le fasi di stabilizzazione facendole seguire alla fase di disidratazione, mediante incenerimento o pastorizzazione; la fase di stabilizzazione può avvenire invece contemporaneamente alla fase di disidratazione, quando il meccanismo scelto è l'essiccamento termico [5]. Il primo scopo della disidratazione è quello della riduzione delle spese di trasporto e smaltimento dei fanghi prodotti da un impianto, spese che dipendono sia dalla facilità di trasporto e sia dal loro volume. Sul primo punto influisce essenzialmente la stabilità del fango (una linea tradizionale di trattamento fanghi provvede dapprima a rendere un fango stabile ed il più possibile innocuo, mediante i processi biologici aerobici e anaerobici precedentemente citati); sul secondo aspetto è essenziale il tenore di umidità. La disidratazione meccanica mediante filtri a pressione o centrifughe non è sempre sufficiente per raggiungere questo obiettivo e spesso è necessaria una fase di essiccazione termica [6].

2.2.3.1 Disidratazione meccanica con filtropressa

Il processo di disidratazione per filtrazione consiste nell'operare in modo che l'acqua contenuta nel fango venga estratta costringendola ad attraversare la massa del fango stessa chiamata 'cake'. La filtropressa è costituita da una serie di piastre a pareti filtranti, capaci di contenere un certo volume di fango che viene immesso in pressione. Il fango accumulatosi nelle piastre, per effetto della pressione esercitata dall'alimentazione, si lascia attraversare dall'acqua di idratazione che viene allontanata come filtrato. Alla fine dell'operazione, ossia quando la portata del filtrato diviene trascurabile, si provvede alla separazione delle piastre che lasciano così cadere il pannello di fango disidratato su sistemi predisposti al suo definitivo allontanamento. La buona resa di questo impianto è ancora legata alla qualità del fango; il fango ottenuto all'uscita della filtropressa può raggiungere valori di umidità anche pari al 60% [7].

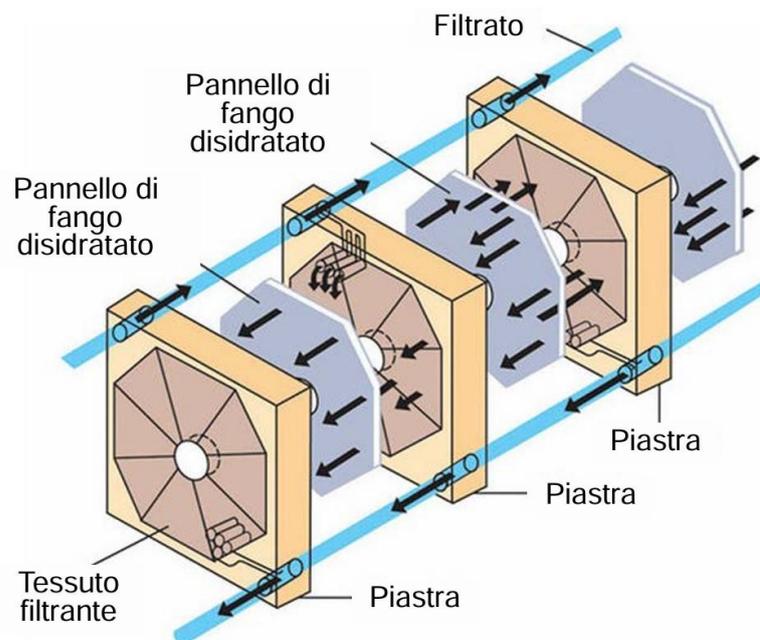


Figura 1: struttura e funzionamento di una filtropressa [5].

La filtropressa è un dispositivo che separa l'acqua dai solidi attraverso una pressione meccanica esercitata su una serie di piastre filtranti coperte da tele di filtrazione. Il processo avviene in più fasi: l'alimentazione durante la quale il fango viene pompato all'interno delle camere formate dalle piastre filtranti; la filtrazione, in cui l'acqua libera viene espulsa attraverso le tele filtranti, mentre i solidi restano intrappolati, formando una 'torta di fango', la cosiddetta 'cake'; la compressione, che consiste nell'applicare una pressione aggiuntiva fino a 15-20 bar per eliminare ulteriori quantità di acqua; lo scarico, attraverso cui le piastre si aprono e la torta di fango disidratata viene rimossa. Il funzionamento della filtropressa è discontinuo poiché il pacco di piastre, dopo la disidratazione, deve essere aperto per rimuovere il pannello² e lavare le tele filtranti [7].

2.2.3.2 Disidratazione meccanica mediante centrifuga

La centrifugazione ha raggiunto una notevole diffusione avendo mostrato vari vantaggi rispetto agli altri metodi di essiccamento meccanici. Le centrifughe sono apparecchiature semplici, compatte e di facile installazione. La separazione di due fasi in un sistema a due componenti non miscelabili e con peso specifico diverso è ottenuta attraverso un processo di sedimentazione in cui il campo di forze agenti, invece di essere quello gravitazionale, è quello derivante dalla centrifugazione; queste macchine vengono chiamate anche 'decanter veloci'. In generale, si può affermare che i requisiti che deve soddisfare la centrifugazione dipendono dalla natura e dalla concentrazione iniziale del fango e dalla qualità del fango destinato allo smaltimento finale. Le centrifughe più comunemente impiegate per la disidratazione dei fanghi, ed anche le più efficienti, sono generalmente delle macchine dotate di un rotore con forma conico-cilindrica a disposizione orizzontale [8].

² Pannello: termine usato per definire il fango secco depositato sulla piastra

In una tipica unità funzionante in controcorrente i solidi viaggiano verso l'estremità conica e la fase liquida si muove nella direzione opposta, come visibile dalla seguente *Figura 2*.

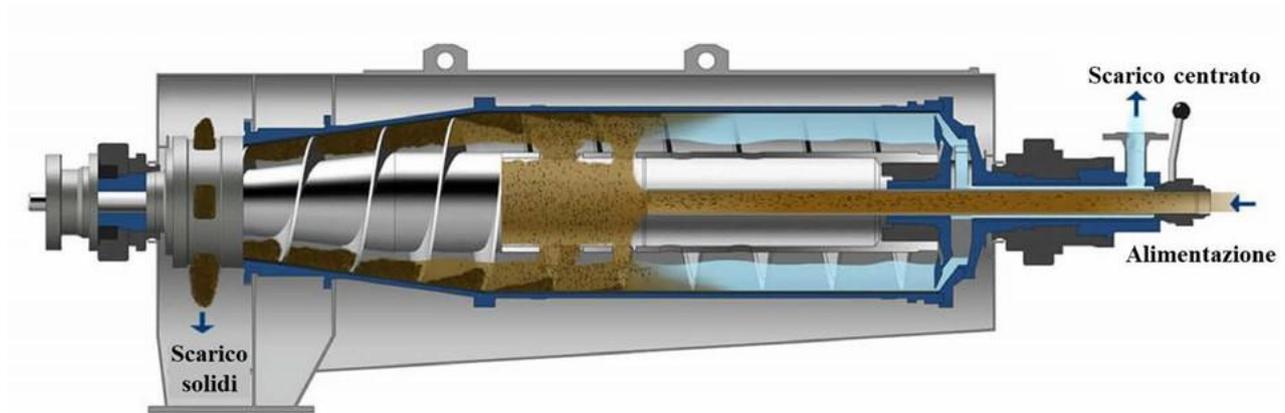


Figura 2: struttura e funzionamento di una centrifuga [5].

Essa è costituita da un rotore o tamburo e da un convogliatore a vite situato all'interno del rotore che ruota ad una velocità leggermente diversa, in modo da raschiare i solidi addensatisi sulle pareti e convogliarli verso la zona a sezione conica dove avviene unitamente alla disidratazione anche lo scarico. Dalla parte opposta viene invece scaricato il liquame chiarificato. Il fango alimentato entra attraverso l'albero assiale cavo e tramite apposite fessure penetra nel rotore. Per migliorare l'efficienza del processo di centrifugazione si può incrementare la velocità di rotazione del tamburo; in questo modo si ottiene un fango più secco, dal momento che, all'aumentare della velocità e quindi della forza centrifuga, l'acqua viene spinta sempre di più nella sezione tronco-conica. Tuttavia l'aumento della pressione esercitata dai solidi nel depositarsi sulle pareti, ne rende difficile la rimozione per lo scarico e ne consegue una maggiore abrasione sulla parete interna del tamburo. Mediante questo processo di disidratazione meccanico rapido ed efficace, adatto a grandi volumi di fanghi, questi subiscono una significativa riduzione del contenuto di acqua, con solidi secchi che possono raggiungere il 20-35% a seconda del tipo di fango trattato [5].

2.2.3.3 *Essiccamento termico*

L'essiccamento termico consente di asportare la fase liquida per evaporazione attraverso l'applicazione di calore, in modo da ottenere un residuo solido avente concentrazioni di residuo secco molto più elevate di quelle ottenibili con i tradizionali processi meccanici descritti sopra. L'essiccamento termico avviene in seguito al trasporto di massa e di calore tra i fanghi ed il mezzo caldo utilizzato per lo sviluppo del processo. In questo processo viene utilizzato un gas per la cessione di potenza termica, per esempio aria calda. L'umidità si sposta dalla zona a concentrazione più alta a quella con concentrazione più bassa, quindi dai fanghi all'aria. È importante che l'aria venga posta a contatto con il prodotto da essiccare, poiché durante il contatto l'aria si arricchisce di umidità e conseguentemente si raffredda. Questo trattamento permette di ottenere un fango con una percentuale di solidi secca superiore al 90%, facilitando lo smaltimento o il riutilizzo.

Poiché i costi connessi all'evaporazione dell'acqua sono molto elevati, il processo è economicamente competitivo se il prodotto finale può essere venduto. Ciò richiede evidentemente che il fango non solo sia idoneo ad essere usato come fertilizzante ma anche che esista una domanda sul mercato. È comunque certo che l'adozione di questo processo, posto in serie ad una disidratazione meccanica, consente di ridurre notevolmente l'umidità contenuta nel fango. Quindi, l'essiccamento termico rappresenta una soluzione efficace per ridurre il volume e migliorare la qualità dei fanghi trattati. Tuttavia, è fondamentale bilanciare i benefici con i costi energetici e ambientali, scegliendo la tecnologia più adatta alle esigenze dell'impianto [9].

2.2.4 Essiccamento

L'essiccamento è una fase avanzata del trattamento dei fanghi che ha l'obiettivo di ridurre il contenuto di umidità, diminuendo il volume del materiale e facilitandone lo smaltimento o il riutilizzo. Questo processo si basa sulla rimozione dell'acqua residua attraverso l'applicazione di calore, portando il fango a un contenuto di solidi superiore al 90%. Esistono due tipologie di essiccamento: quello naturale che avviene in letti di essiccamento, dove il fango viene depositato e lasciato essiccare all'aria aperta; quello termico che applica calore diretto o indiretto per rimuovere l'acqua (come descritto nel paragrafo precedente). In un tipico letto di essiccamento, il fango viene posto su strati di sabbia e ghiaia di varia granulometria e lasciato essiccare per gravità e per evaporazione dalla superficie esposta all'aria. I letti di essiccamento sono dotati di linee di drenaggio laterali, mediante tubi di plastica perforati o di argilla. Lo svolgimento dell'essiccamento naturale coinvolge una fase di sedimentazione, una seconda fase di filtrazione ed infine la fase dell'evaporazione. Durante la prima fase avviene la separazione della parte più pesante del fango che si deposita sul fondo dei letti di essiccamento. Nella seconda fase l'acqua sovrastante attraversa lo strato di fango depositatosi, nonché lo strato drenante che costituisce il fondo dei letti: nel corso di questo passaggio, lo strato di fango già formato per sedimentazione esercita un'azione filtrante sull'acqua che lo attraversa, trattenendo così le particelle più sottili e pertanto più difficilmente sedimentabili. Contemporaneamente l'esposizione all'aria e al sole favorisce l'evaporazione dell'acqua. I letti di essiccamento sono una soluzione economica ed ecologica per la disidratazione dei fanghi, ma richiedono ampi spazi e condizioni climatiche favorevoli per garantire un'efficace riduzione del contenuto di umidità; a causa dell'odore sgradevole, dovrebbero essere posizionati a sufficiente distanza dagli insediamenti ed abitazioni circostanti in funzione del loro tipo e situazione locale [6].

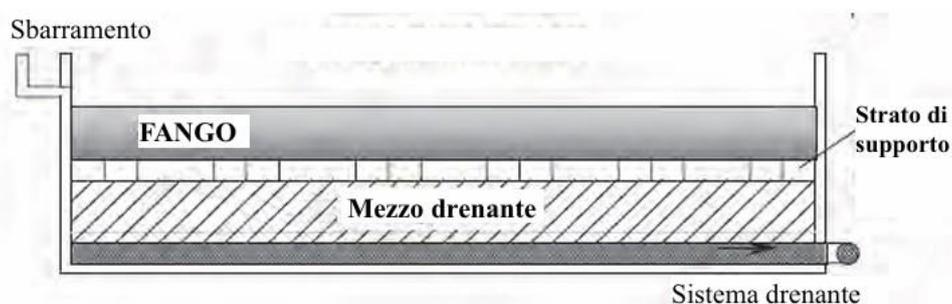


Figura 3: schema di un tipico letto di essiccamento a sabbia [5].

3. Caso di studio: *Momentive Performance Materials Specialties Srl* di Termoli

3.1 Presentazione dell'azienda

Momentive Performance Materials Specialties S.r.l., con sede legale a Termoli, è un'azienda chimica, di proprietà coreana, specializzata nella produzione di derivati organici del Silicio, situata nell'area del Consorzio di Sviluppo Industriale della Valle del Biferno. Lo stabilimento ha iniziato la sua attività nel Settembre 1982 ed è cresciuto nel corso degli anni ampliando la gamma di prodotti, innovando i processi e la sua organizzazione. La produzione della Momentive Performance Materials Specialties di Termoli viene esportata per circa l'85% in Cina, India, Europa, USA e Giappone, mentre il restante 15% è commercializzato in Italia. I maggiori volumi di prodotto finito vengono esportati in Cina, Spagna, Germania ed India. In qualità di azienda leader a livello mondiale nel settore dei siliconi e delle specialità ad alte prestazioni, Momentive crea soluzioni che migliorano la qualità della vita delle persone e consentono un futuro più sostenibile.

La Momentive Performance Materials Specialties Srl di Termoli (CB) considera prioritaria la tutela dell'ambiente, della salute e della sicurezza dei propri dipendenti, nella gestione e sviluppo delle sue attività. Aspetti caratterizzanti l'azienda sono: il costante impegno della ricerca nell'innovazione, adoperando nuove applicazioni compatibili con l'ambiente e con la sicurezza operativa; la qualità del servizio fornito ai clienti; la capacità di creare dei prodotti ad alto valore aggiunto e fortemente competitivi nel mercato globale. Oltre all'efficienza produttiva, l'azienda ha rivolto particolare impegno nel miglioramento degli aspetti ambientali riguardanti la salvaguardia e protezione delle risorse idriche, aria, suolo, falda e riduzione dei rifiuti e consumi di risorse non rinnovabili (energia e combustibili).

L'azienda si occupa principalmente della produzione di additivi a base silicea, dai molteplici campi di utilizzo. Tutte le sostanze vengono sintetizzate attraverso processi elaborati e sofisticati ed hanno la caratteristica comune, di risultare, a fine processo, delle sostanze in grado di modificare le proprietà superficiali delle molecole dei manufatti in cui sono applicate, introducendo una funzionalità altamente tecnologica. Questi additivi, seppur aggiunti in piccole percentuali rispetto al peso del prodotto finale, agiscono da agenti accoppianti, reticolanti e leganti, aumentando l'adesione tra matrici organiche di tipo polimerico e cariche inorganiche, migliorano notevolmente le proprietà meccaniche di vari materiali compositi, quali la rigidità, la resistenza ad agenti chimici, la durabilità. Pertanto, essi rivestono un elevato valore strategico, nonostante rappresentino una piccola componente del prodotto finale. I principali settori di impiego sono: l'agricoltura, l'industria automobilistica, l'aerospaziale, l'elettronica, la cura della persona, beni di consumo, l'edilizia e le costruzioni.

3.2 Ubicazione e planimetria dello stabilimento



Figura 4: Foto aerea del sito di Termoli.

Lo stabilimento occupa un'area di circa 135000 m², situata per la maggior parte nel territorio del Comune di Termoli in provincia di Campobasso e per una piccola porzione nel territorio del comune di Campomarino in provincia di Campobasso nella Regione Molise ed è localizzato nell'ambito dell'area del Consorzio di Sviluppo Industriale della valle del Biferno. Esso è costruito su un terreno pianeggiante a 11 metri sul livello del mare e a circa 150 metri dal fiume Biferno. Nell'ambito della vallata del Biferno, la struttura geologica del sottosuolo presenta le caratteristiche tipiche dei sedimenti alluvionali di tipo fluviale con presenza di argille ed elementi ghiaiosi. L'alterazione superficiale degli strati alluvionali ha dato origine al terreno agrario che ha spessore variabile da pochi centimetri a circa 1 metro. La falda acquifera del sottosuolo giace a pochi metri di profondità dal livello di superficie dell'insediamento. Il livello di falda presenta un'escursione di qualche metro tra la stagione secca estiva e quella umida invernale.



Figura 5: Ubicazione del sito produttivo di Termoli.

La planimetria generale dello stabilimento, riportata nella **Figura 6**, mostra la disposizione degli impianti di processo ed evidenzia la localizzazione degli scarichi idrici, dei principali camini per le emissioni e dei pozzetti d'ispezione delle acque di falda. Il sito è costituito da una serie di fabbricati: palazzina uffici, spogliatoi e mensa, magazzino prodotti finiti, sala controllo, laboratorio, ufficio spedizioni; contiene aree destinate alla produzione in cui le apparecchiature sono installate all'aperto su strutture metalliche e zone destinate a diverse attività, quali stoccaggi, servizi ausiliari, trattamento scarichi. Per quel che riguarda gli impianti di produzione e le attività dello stabilimento, una particolare importanza riveste lo stoccaggio e la manipolazione delle materie prime. Le materie prime utilizzate per le attività produttive sono nella quasi totalità sostanze liquide che sono trasportate in autocisterne, ferrocisterne, oppure in imballi (fusti, cisternette etc). Le principali materie prime utilizzate sono Triclorosilano (TCS), Allilcloruro, Acrilonitrile (ACN), Allilmetacrilato (AMA), Metanolo, Etanolo, Isopropanolo, Metilcellosolve, Polimetilidrosilossani, Toluene, Ammoniaca, Idrogeno, Polieteri, Ammine terziarie, Silicio metallico, Allilglicidil etero (AGE), Olio diatermico, Sodio metilato, Perossidi, etc. I prodotti finiti, tutti allo stato liquido, sono confezionati in imballaggi vari (fusti, fustini, cisternette) di metallo o di plastica in funzione delle proprie caratteristiche chimiche. I serbatoi di stoccaggio delle materie prime sono stati costruiti tenendo in considerazione le più sicure tecniche d'ingegneria. Tali serbatoi sono metallici, installati entro bacini di contenimento in cemento armato e con pavimento impermeabile per evitare che le perdite eventuali inquinino il suolo e la falda sottostante [10].

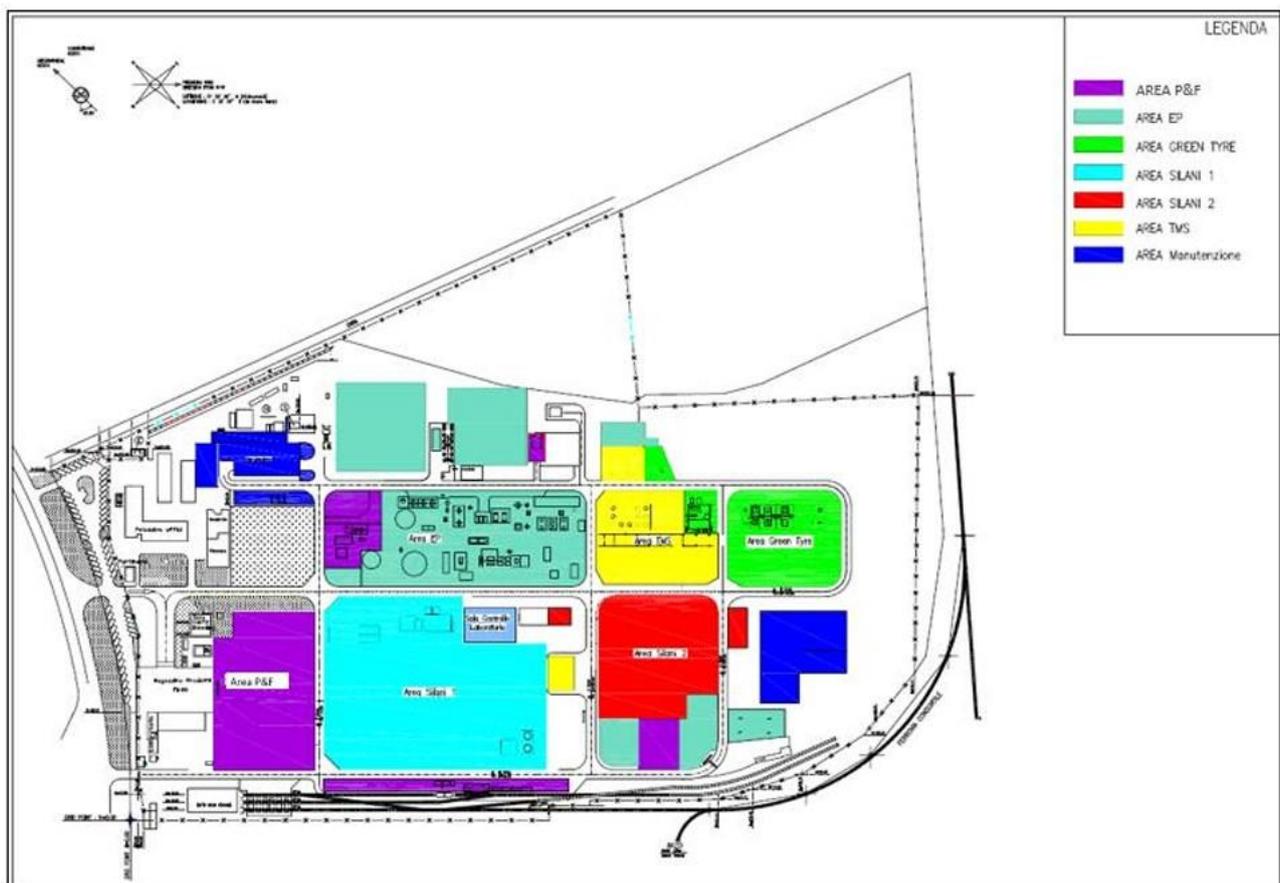


Figura 6: Planimetria dello stabilimento *Momentive Performance Materials Specialties* di Termoli [10].

3.3 Impianti e processi di produzione

L'attività produttiva dello stabilimento di Termoli è indirizzata all'ottenimento di derivati organici della chimica del Silicio. Esistono 3 linee produttive di base per ottenere le seguenti famiglie di prodotti:

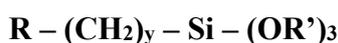
1. Silani Organo-funzionali
2. Silicone Fluids
3. Surfactants siliconici

Lo stabilimento è formato essenzialmente dalle seguenti unità produttive e di servizi:

- Silani 1 – TMS – Silani 2 – Green Tyre
- P&F: Miscelazione Silani – Silicone Fluids – Surfactants – SiH
- Impianto trattamento ecologico e servizi ausiliari (acqua, vapore, azoto, aria, metano ed elettricità).

I processi principali dello Stabilimento di Termoli sono di tipo continuo, semicontinuo e batch, in reattori di vario tipo ed in impianti di distillazione. Si tratta di produzioni di chimica fine che presentano le seguenti operazioni unitarie: esterificazione e transesterificazione, addizione, essiccamento, idrogenazione, strippaggio di solventi, distillazione sottovuoto, miscelazione e filtrazione. Per la parte di protezione ambientale inoltre sono presenti: abbattimento in colonna ad acqua per il trattamento delle emissioni gassose normali e di emergenza, termodistruzione ad alta temperatura per reflui di processo, chiariflocculazione degli effluenti idrici, neutralizzazione degli effluenti idrici che vanno al trattamento biologico consortile e pressofiltratura fanghi.

Volendo analizzare quelli che sono i processi che avvengono nelle diverse aree, si può partire dai processi dedicati all'area Silani 1 in cui si realizzano i silani organo-funzionali. Una peculiarità dei silani organo-funzionali, data la loro struttura chimica, è quella di stabilire ponti chimici tra componenti inorganici e componenti organici. I Silani organo-funzionali hanno la seguente formula chimica:



ove R è un gruppo funzionale organico e OR' un gruppo alcossidico. La tecnologia utilizzata nell'area dei Silani 1 è basata sull'uso di clorosilani per ottenere silani organofunzionali del tipo vinilico, amminico e metacrilico.

Le unità produttive dell'area Silani 1 sono le seguenti:

- 1) addizione per la produzione di intermedi di amminosilani;
- 2) esterificazione per la produzione di intermedi di amminosilani, vinilsilani e silani metacrilici;
- 3) idrogenazione per la produzione di amminosilani;
- 4) distillazione, per la raffinazione dei silani grezzi.

Le unità sopra descritte sono dotate di apparecchiature chimiche consistenti in reattori con miscelazione, sistemi di pompaggio e tubazioni a ciclo chiuso, colonne di distillazione e serbatoi di stoccaggio per i prodotti finiti. Gli impianti sono dotati di un alto livello di strumentazione e sono controllati in modo continuo.

Segue poi l'area TMS in cui è presente un'unità semicontinua su quattro linee per la produzione dell'intermedio primario trimetossisilano (TMS), tramite reazione diretta del silicio metallico con metanolo. La reazione avviene con l'ausilio di catalizzatore. Il trimetossisilano post reazione è distillato ed inviato allo stoccaggio come intermedio per uso successivo.

Per quanto concerne l'area Silani 2, la tecnologia adottata in questa sezione è basata sull'uso del trimetossisilano. Le unità produttive presenti sono:

- 1) addizione per la produzione di intermedi metacrilossisilani ed epossisilani;
- 2) addizione per la produzione di intermedi di vinilsilani – la reazione avviene tra acetilene e trimetossisilano in reattori miscelati in presenza di catalizzatore;
- 3) distillazione per la raffinazione dei silani grezzi;
- 4) unità di produzione dell'acetilene.



L'acetilene è prodotto da una reazione di carburo di calcio ed acqua con generazione di latte di calce, utilizzato per la neutralizzazione dei reflui idrici di stabilimento (correzione dell'acidità proveniente dall'utilizzo dei clorosilani).

L'ultima area di processo è l'area Green Tyre, nella quale la tecnologia adottata è simile a quella dell'area Silani 2, utilizzando come intermedio il TMS. Le unità produttive qui presenti sono:

- 1) addizione tra TMS ed allile cloruro per la produzione di cloropropiltrimetossilano grezzo;
- 2) transesterificazione, per la produzione di cloropropiltri-tossisilano e tetraetossisilano. La reazione avviene in apposita colonna a piatti;
- 3) distillazione per la raffinazione dei silani grezzi.

Come citate precedentemente, esistono una serie di unità dedicate rispettivamente ai polimeri, ai Silicone Fluids, ai Surfactants e ai fluidi SiH. Nell'unità dei polimeri sono prodotte miscele di silani e condotte reazioni caratterizzate da un'energia di reazione ridotta. L'unità produttiva è dotata di un reattore batch, di un sistema di filtrazione e di serbatoi carrellati. L'unità dei Silicone Fluids invece è basata sul principio della miscelazione, realizzata per produrre emulsioni siliconiche e dispersioni antischiuma. Il sistema utilizzato per la produzione di tali sostanze è costituito da un reattore di miscelazione, serbatoi e sistemi di filtrazione e da una unità d'infustamento dedicata. Nell'unità dei Surfactants avvengono reazioni di addizione a basso contenuto energetico. L'unità produttiva è dotata di un reattore batch, di un sistema di filtrazione e di serbatoi fissi e carrellati. L'unità è stata recentemente implementata con il processo di produzione SiH. Per la produzione di fluidi SiH si realizzano reazioni di equilibratura catalizzata da acido mediante due reattori batch e due colonne a letto catalitico.

3.4 Gestione dei rifiuti

L'attività produttiva del sito genera rifiuti di natura solida e liquida. Tutti i rifiuti generati sono classificati, in ottemperanza ai disposti della normativa vigente in materia di smaltimento rifiuti³, secondo il loro Codice CER (Codice Europeo Rifiuti). La strategia ambientale del sito prevede l'identificazione e il recupero del valore contenuto negli scarti dei processi produttivi (rifiuti), permettendo fino ad oggi di raggiungere buoni risultati in termini di riduzione dei costi e della quantità dei rifiuti prodotti. Prima dello smaltimento/recupero i rifiuti sono stoccati in un deposito temporaneo con limiti temporali, opportunamente pavimentato e drenante verso un pozzetto di raccolta e d'ispezione. I rifiuti pericolosi sono imballati in idonei contenitori opportunamente etichettati per il maneggio ed il trasporto. I rifiuti alla rinfusa, quali fanghi da depurazione acque e calce filtropressata, sono conferiti in appositi cassoni stagni e muniti di telone di copertura per la protezione da agenti atmosferici. I criteri di selezione degli smaltitori rifiuti, oltre alla verifica del possesso delle regolari autorizzazioni di legge, si basano su qualificazioni tecniche degli impianti, sui sistemi di gestione ambientale e della sicurezza a seguito di visite e controlli nei siti di smaltimento [11].

A seconda del tipo di processo produttivo, impianto e/o inquinante trattato, i sistemi impiantistici di trattamento ambientale (Environmental Protection area) dello stabilimento di Termoli possono così raggrupparsi:

- sistema di trattamento termico dei reflui non acquosi o inceneritore con impianti di abbattimento asserviti;
- sistemi di trattamento dei reflui acquosi;
- impianti di abbattimento degli effluenti gassosi (scrubber);
- processo di raccolta, selezione e smaltimento rifiuti.

Esistono, inoltre, impianti e servizi ausiliari comuni, ideati e progettati per ridurre l'impatto ambientale di cui brevemente è dato un accenno, ma che risultano fondamentali per il mantenimento degli standard di sicurezza ed efficienza ambientale del sito, quali ad esempio:

- gli impianti di carico/scarico e movimentazione interna delle materie prime e dei prodotti finiti;
- gli impianti antincendio;
- le torri di recupero e raffreddamento ed i sistemi di refrigerazione;
- altri servizi comuni.

I rifiuti liquidi sono costituiti dalle seguenti tipologie di rifiuti e sono quasi esclusivamente termodistrutti all'interno dello stabilimento mediante apposito inceneritore regolarmente autorizzato:

- ❖ reflui liquidi provenienti dalle frazioni pesanti e leggere dei sistemi di distillazione per la purificazione dei prodotti;
- ❖ oli esausti (conferiti per il recupero al Consorzio Oli Usati);
- ❖ acido solforico esausto (conferito esternamente per il recupero dell'acido).

³Decreto Legislativo 152/2006 – Testo Unico Ambientale.

Il processo di ossidazione termica nella camera di combustione dell'inceneritore avviene ad una temperatura compresa tra 850°C e 1200°C, idonea alla scissione termica dei legami chimici dei reflui da trattare, ed è mantenuta su tali valori grazie alla combustione di metano e il potere calorifico dei reflui inceneriti. Il forno di processo è verticale ed è equipaggiato con cinque bruciatori, ognuno dei quali è alimentato da gas metano, o secondo uno schema ben definito, da solventi e reflui non acquosi, provenienti dai rispettivi serbatoi di raccolta e stoccaggio.

Per facilitare la combustione, le correnti liquide dei reflui vengono atomizzate mediante aria o vapore. I gas combusti in uscita dalla camera di combustione vengono poi raffreddati con acqua, fino al raggiungimento di una temperatura all'incirca di 85°C. L'acqua alimentata in largo eccesso, satura i fumi di combustione, li raffredda, causa l'agglomerazione delle particelle solide sospese e viene raccolta nel successivo *quench tank*.

L'inceneritore può trattare solamente rifiuti liquidi, rispetta le BAT (*Best Available Technologies*) più evolute indicate dalla Comunità Europea per l'incenerimento ed è dotato delle più moderne tecnologie per l'abbattimento di polveri (silice amorfa) ed ossidi di azoto derivanti dalla termodistruzione. I sistemi di abbattimento degli inquinanti provenienti dalla combustione consistono nelle seguenti sezioni impiantistiche poste a valle dell'inceneritore:

- abbattitore ad acqua in controcorrente per l'eliminazione dell'acido cloridrico e polveri di media granulometria;
- sistema di abbattimento per polveri molto fini con precipitazione del particolato caricato elettrostaticamente ed abbattimento in controcorrente mediante acqua (IWS);
- sistema di abbattimento degli ossidi di azoto (NO_x), tramite unità di ossido-riduzione chimica.

I gas raffreddati dall'inceneritore vengono inviati ad uno apposito scrubber ad acqua in controcorrente dove l'eventuale presenza di acido cloridrico e le particelle solide sospese di diametro superiore a 5 micron vengono rimosse mediante lavaggio. I gas, quindi, attraversano un filtro elettrostatico ad umido, IWS (Ionized Wet Scrubber), a tre stadi (V-8260, V-8270 e V-8280) con ricircolazione d'acqua, nel quale vengono eliminate particelle liquide e solide fino a 0,05 micron, tramite il principio di caricamento elettrostatico delle particelle solide (tensione applicata: 20-25 KV) con conseguente abbattimento per deposizione e lavaggio con acqua. In seguito, i fumi sono trattati con un sistema di abbattimento denominato 'TRINOX' per la riduzione degli NO_x. Si tratta di un processo di ossidoriduzione con clorito di sodio, seguito da una fase di riduzione con solfuro di sodio e da apparecchiature di deodorizzazione con soda, poste sul circuito dei fumi prima dello scarico a camino. A questo punto i gas vengono emessi nell'atmosfera tramite un camino alto 40 metri, dotato di ventola di estrazione.

L'acqua alimentata allo scrubber è costituita dalla portata che circola nel circuito chiuso costituito dal chiarificatore D-823, torre di raffreddamento (X-835) e scrubber (V-819). L'eccesso, utilizzato per raffreddare i fumi nel *quench tank*, viene spurgato verso un neutralizzatore mentre una quantità corrispondente viene reintegrata al filtro elettrostatico.

I reflui liquidi acquosi generati nelle varie aree dello stabilimento, provengono principalmente dagli scrubber per l'abbattimento delle emissioni gassose e dal lavaggio delle aree di stabilimento pavimentate. Tutti i reflui vengono miscelati nella vasca di raccolta chiamata *Lift Station* dalla quale l'acqua è inviata tramite pompe di sollevamento al bacino di neutralizzazione, al chiarificatore, all'equalizzatore e al trattamento di successiva depurazione nell'impianto biologico consortile.

La *Lift Station* è un serbatoio in calcestruzzo a cielo aperto avente una capacità di 220 m³. Poiché l'acqua di processo che arriva alla *Lift Station* può essere fortemente acida, a causa dell' HCl assorbito, tutte le pareti interne del bacino ed il suo fondo sono rivestite di piastrelle resistenti all'acido. Le correnti provenienti dall'area Silani 1 sono generalmente acide per il trattamento di vapori di clorosilani o per l'abbattimento negli scrubber dell'acido cloridrico generato dai processi produttivi. La corrente proveniente dall'area Silani 2 e Green Tyre è normalmente alcalina a causa dell'uso di soda caustica negli scrubber caustici che trattano emissioni di vapori di trimetossisilano e tetrametossisilano. Complessivamente, l'acqua della vasca di raccolta *Lift Station* è acida qualora sia in funzione l'unità di esterificazione dei Silani 1 ed alcalina in caso contrario.

Dalla vasca di raccolta l'acqua viene trasferita alla vasca di neutralizzazione, come visibile nella **Figura 7**, dove arriva anche la corrente proveniente dal ciclo di raffreddamento dei fumi dell'inceneritore. Nella vasca di neutralizzazione viene addizionata, quando necessario, una corrente di calce liquida al 20% per neutralizzare l'acido cloridrico. Gran parte della torbida necessaria alla neutralizzazione è prelevata dai serbatoi di stoccaggio del latte di calce dell'impianto di produzione dell'acetilene. Dopo la neutralizzazione primaria con calce, i reflui confluiscono nel chiarificatore e successivamente in un bacino di equalizzazione, costruito su uno strato di 2 metri di argilla pressata.

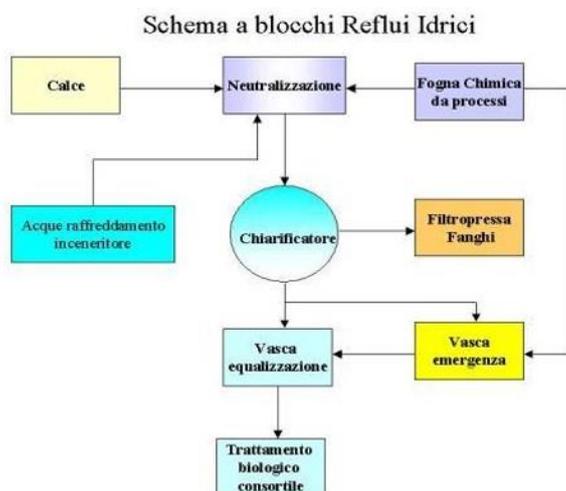


Figura 7: Schema a blocchi per il trattamento dei reflui idrici.

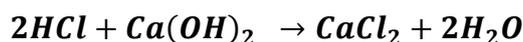
qualità dei reflui liquidi acquosi conferiti al trattamento biologico consortile deve rispettare i parametri contrattuali fissati dal Consorzio e presenti nella **Tabella 1**.

Parametri	Parametro consortile in mg/l	Valore medio 2019 mg/l	Valore medio 2020 mg/l	Valore medio 2021 mg/l	Valore medio 2022 mg/l	Valore medio 2023 mg/l	% rispetto parametro consortile
COD	700	505	470	459	369	319	46%
BOD₅	250	105	113	111	93	81	32%
Solidi sospesi	200	55	72	60	56	68	34%

Tabella 1: principali parametri relativi allo scarico idrico confrontati con quelli fissati dal Consorzio [10].

La neutralizzazione serve a garantire alle acque di scarico un pH controllato, compreso tra 5,5 e 9,5, quando escono dallo stabilimento. Questo è uno dei limiti contrattuali da rispettare stipulati con il Consorzio Industriale di Termoli. La neutralizzazione è effettuata nel chiarificatore D-854 in cui una slurry di calce liquida $Ca(OH)_2$, viene fatta reagire con HCl disciolto nell'acqua di processo.

La reazione di neutralizzazione è la seguente:



Mentre il cloruro di calcio è solubile in acqua, la calce non lo è per cui si comprende come un eccesso di neutralizzazione provochi la sedimentazione di solidi nel chiarificatore e nei bacini a valle del chiarificatore stesso. Dal D-854 l'acqua neutralizzata va a finire nel bacino di equalizzazione.

Per quanto riguarda i rifiuti solidi, questi sono costituiti essenzialmente dalle seguenti tipologie:

- fanghi impianto trattamento acque (fango filtropressato);
- fanghi trattamento reflui da impianto di acetilene (calce filtropressata);
- imballaggi in materiali misti (rifiuti assimilabili agli urbani);
- catalizzatore esausto;
- residui di filtrazione da processi produttivi;
- polimeri da processi produttivi;
- rottami di ferro e rame;
- imballaggi metallici, di plastica e palette di legno.

Si giunge alla zona dell'impianto dove trova collocamento questo progetto di tesi, ossia l'area responsabile del trattamento fanghi: previa neutralizzazione avvalendosi della calce liquida prodotta nella sintesi dell'acetilene (Silani 2), gli effluenti idrici vengono indirizzati nel chiarificatore nel quale avviene la sedimentazione e infine segue la separazione dei fanghi estratti dal chiarificatore e filtropressati.

La **tabella 2** ed il **grafico 1** riportano le quantità dei rifiuti prodotti e le percentuali di rifiuti recuperati e smaltiti nel periodo di riferimento.

RIFIUTI SMALTITI (tonnellate)	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Rifiuti liquidi termodistrutti nel sito	5040	4539	4627	4728	4927	3703
Rifiuti liquidi allo smaltimento/recupero esterno	315	178	204	184	164	167,5
Rifiuti solidi allo smaltimento/recupero esterno	8173	7172	8152	7097	6445	4247
TOTALE	13527	11889	12983	12010	11536	8118
Classificazione Rifiuti (tonn/anno)	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Rifiuti Pericolosi	11254	9850	11000	9848	10063	7331
Rifiuti Non Pericolosi	2274	2038	1983	2162	1473	787
TOTALE	13527	11889	12983	12010	11536	8118
Specifico di Produzione kg/kg_{PF}	0,647	0,614	0,675	0,544	0,562	0,432

Tabella 2: volumi di rifiuti prodotti dal 2018 al 2023 [10].



Grafico 1: Destinazione dei rifiuti nel periodo di riferimento.

3.5 Sistema trattamento fanghi e gestione

Nello stabilimento sono presenti due chiarificatori, il D-854 e il D-823; nel primo vengono chiarificate le acque reflue di processo dell'impianto; nel secondo le acque di riciclo a servizio dello scrubber V-819. La sedimentazione dei solidi sospesi nei due chiarificatori, di natura prevalentemente colloidale nel D-854, viene favorita tramite l'utilizzo dell'additivo cationico policloruro di alluminio (PC18), il quale è alimentato in continuo al D-823 e in discontinuo al D-854. Se il pH delle acque provenienti dalla *Lift Station* è acido, la calce necessaria alla neutralizzazione viene utilizzata anche come coagulante e quindi non è necessaria l'aggiunta del PC18. Se il pH delle acque provenienti dalla *Lift Station* è basico, è necessario alimentare il coagulante per consentire e facilitare la formazione del flocculo. Nel chiarificatore D-823 viene alimentato anche l'antincrostante Polivita 1200. I fanghi estratti dai chiarificatori vengono filtropressati e poi inviati al recupero presso cementifici.

La filtropressa di fornitura di un'azienda esterna è costituita da 120 piastre in polipropilene 1200×1200, ciascuna con foro di alimentazione fanghi superiore e quattro fori circolari per scarico acque. Inoltre, è dotata di una centralina oleodinamica per la chiusura e l'apertura del pacco a piastre con pressione di chiusura del martinetto intorno ai 300 bar.



Figura 8: Filtropressa a piastre usata per la disidratazione dei fanghi industriali.

La filtropressa può essere alimentata anche dal fango prelevato dalla vasca di equalizzazione tramite una draga il cui servizio è fornito da una ditta esterna che si occupa anche della filtropressatura dei fanghi. La percentuale di secco del fango in uscita dalla filtropressa è circa del 45%. Il volume dei fanghi filtropressati e della calce filtropressata costituisce da solo circa l'85% del volume dei rifiuti solidi di tutto lo stabilimento, e quindi l'impatto ambientale di tali rifiuti deve essere considerato prioritario per la gestione ambientale.

Lo smaltimento dei fanghi avviene per due vie:

- recupero come materie prime presso cementifici;
- scarica solo per indisponibilità del recupero presso cementifici.

Il recupero come materie prime permette ai cementifici di risparmiare risorse naturali quali materiali di escavazione, diminuendo così l'impatto negativo nei confronti del suolo e del paesaggio.

3.6 Obiettivi e progetti futuri, strategia per l'ambiente

La *Momentive Performance Materials Specialties* adotta una politica incentrata sull'innovazione, prestando particolare attenzione alla tutela ambientale e delle persone. In virtù di questo fatto, i sistemi di produzione, monitoraggio e supporto alle attività operative sono molteplici e all'avanguardia. Comunità e Cliente sono i beneficiari di uno sviluppo sostenibile perseguito tenacemente e fondato su tre pilastri portanti [10].



Figura 9: Politica aziendale per uno sviluppo sostenibile.

Planet = Ambiente

L'azienda, attraverso i suoi prodotti e le sue attività, opera in un contesto vasto che coinvolge il pianeta ovvero il suo ambiente. Per questo motivo, si impegna costantemente a rispettare le normative e le leggi vigenti, garantendo la tutela e la salvaguardia ambientale.

People = Centralità della Persona

Il codice etico riveste un ruolo estremamente importante e l'integrità della persona in ogni attività rappresenta un requisito essenziale per far parte di Momentive. La tutela della salute e della sicurezza dei dipendenti, la promozione di una cultura della prevenzione e l'adozione di soluzioni sicure ed ecocompatibili sono principi chiave aziendali.

Profit = Profitto

Grazie alla solidità finanziaria, l'azienda mira ad ottenere profitto migliorando la produttività e l'efficienza delle proprie attività, garantendo così uno sviluppo sostenibile e duraturo nel tempo.

L'analisi ambientale unitamente all'individuazione di rischi e opportunità ha permesso all'azienda di individuare gli aspetti ambientali significativi rispetto ai quali predisporre specifici interventi, sia gestionali che tecnici, volti al raggiungimento di obiettivi e traguardi di miglioramento ambientale definiti nel programma ambientale, che l'azienda si prefigge di redigere e approvare ogni tre anni.

In maniera specifica, uno degli obiettivi più ricercato e ambito concerne i rifiuti e consiste nel miglioramento della gestione dei rifiuti e incrementare la quantità destinata al recupero valutando ove sia possibile l'*End-of-Waste*.

Ricerca nuove opportunità di recupero verso i cementifici per il fango filtropressato; valutare la possibilità di un utilizzo esterno della calce liquida in eccesso, anziché filtropressarla e smaltirla; sono tutti obiettivi concreti che l'azienda si impegna a raggiungere, ma quello su cui si fonda tale progetto di tesi riguarda l'esigenza di implementare soluzioni tecniche che garantiscano la riduzione del contenuto di acqua presente nei fanghi filtropressati, al fine di ridurre i volumi ed i relativi costi di smaltimento. Per cui, è stato proposto di sostituire l'attuale filtropressa utilizzata per la disidratazione dei fanghi con una centrifuga seguita da un essiccatore modulare.

Per lo studio dell'efficienza e la conseguente realizzazione dell'impianto costituito da un decanter centrifugo opportunamente dimensionato e da un essiccatore modulare è stato redatto questo progetto così strutturato:

1. studio della stabilizzazione dei fanghi derivanti dai due chiarificatori precedentemente citati D-854 e D-823. In questa prima fase si mira alla realizzazione delle curve di taratura "concentrazione dei fanghi in funzione della % di solido residuo", che servono agli operatori per monitorare la qualità dei fanghi e garantire la loro conformità alle condizioni operative dell'apparecchiatura seguente;
2. elaborare una valutazione economica fondata sul confronto tra la filtropressa attuale ed il futuro binomio centrifuga-essiccatore per una corretta determinazione del Saving, tenendo in considerazione diverse voci di costo.
3. comparazione tra le due soluzioni impiantistiche rivolgendo particolare attenzione alla sostenibilità, quindi, si calcolano le emissioni di CO₂ dovute al trasporto per lo smaltimento dei fanghi, al consumo dell'energia elettrica dell'apparecchiatura coinvolta nell'essiccazione dei fanghi, alla movimentazione e al travaso dei cassoni in loco. Si giunge infine alla valutazione dell'*End-of-Waste* riguardo la calce liquida prodotta, dove per *End-of-Waste* si intende la "cessazione della qualifica di rifiuto"; è un principio del diritto ambientale che stabilisce quando un rifiuto cessa di essere tale e diventa un prodotto o una materia prima seconda, idonea per il riutilizzo.

L'aspetto più interessante riguarda il volume dei fanghi: partendo dalle attuali 6000 tonn/anno, smaltite al 45% in secco, l'obiettivo del trattamento proposto è il raggiungimento di circa 3000 tonn/anno al 95% in secco. L'idea cardine di questo progetto è quella di implementare una soluzione che renda l'azienda meno impattante, minimizzando la quantità di rifiuti da smaltire, affinché si possa operare nel pieno rispetto dell'ambiente tutelando allo stesso tempo la sicurezza, la protezione e la salute dei lavoratori.

4. Studio della stabilizzazione dei fanghi

L'obiettivo di questo progetto sperimentale per l'azienda *Momentive Performance Materials Specialties Srl* di Termoli è quello di analizzare una nuova soluzione impiantistica per la linea del trattamento dei fanghi e di porla a confronto con l'apparecchiatura attualmente utilizzata per la disidratazione dei fanghi, ossia una filtropressa a piastre. La gestione dei fanghi necessita di un'analisi complessiva, poiché affrontare il problema da una sola prospettiva potrebbe risultare limitante e poco vantaggioso dal punto di vista economico. Per evitare spese superflue, è fondamentale innanzitutto massimizzare l'efficienza delle apparecchiature già disponibili. A questo scopo, è essenziale condurre un monitoraggio continuo dell'impianto, così da poter verificare in tempo reale il suo funzionamento e caratterizzare il fango continuamente. Questa prima fase è stata condotta in laboratorio e consiste nello studio della stabilizzazione dei fanghi. Uno studio approfondito della stabilizzazione dei fanghi è essenziale per progettare un impianto di disidratazione e smaltimento efficace, economico e sostenibile, perché senza una corretta stabilizzazione, si rischiano inefficienze operative, alti costi di gestione, problemi ambientali e difficoltà nel trattamento finale dei fanghi.

Nello studio si è esaminato il contenuto di secco presente nei fanghi prodotti dagli impianti di produzione descritti nel precedente capitolo. La % di secco contenuta nei fanghi a valle dei chiarificatori D-854 e D-823, è fondamentale per poter dimensionare correttamente una centrifuga, perché conoscendo la % di secco prima dell'ingresso nella centrifuga e conoscendo la portata media annuale di fanghi prodotti e destinati al cementificio o allo smaltimento in discarica, si può calcolare quale sia la portata entrante nella centrifuga mediante un semplice bilancio di massa sul secco. È facilmente intuibile che a minori % di secco, corrispondono portate maggiori in ingresso alla centrifuga, perché vuol dire che è presente un quantitativo di acqua maggiore; mentre con l'aumento della % di secco, la portata diminuisce perché si riduce il quantitativo di acqua presente. Essendo in una fase progettuale bisogna valutare anche se il valore di secco tende a cambiare nel tempo o a rimanere pressoché costante, perché nel primo caso significherebbe avere una variazione significativa sulla portata in ingresso alla centrifuga la quale di conseguenza si troverà ad operare in condizioni differenti, per cui anche l'efficienza del processo di disidratazione sarà diverso; nel secondo caso invece, mantenendo un contenuto di secco all'incirca costante implica garantire delle condizioni operative costanti che coincidono con quelle ottimali, su cui si è basato il previo dimensionamento. Per cui questa prima fase, svolta in laboratorio, ha come fine la realizzazione delle curve di taratura "concentrazione dei fanghi in funzione della % di solido residuo", che servono per monitorare la qualità dei fanghi e la loro conformità alle condizioni operative dell'apparecchiatura successiva, nel caso in esame una centrifuga.

4.1 Metodologie di esecuzione delle prove sperimentali

Per poter analizzare l'andamento del contenuto di secco presente nei fanghi, sono stati utilizzati 22 campioni da 1 litro (visibili in **Figura 10**), prelevati ogni 8 ore (ad ogni turno lavorativo) da ciascuno dai due chiarificatori presenti, il D-854 nel quale vengono chiarificate le acque reflue di processo, ed il D-823, in cui vengono chiarificate le acque di riciclo a servizio dello scrubber V-819.

Con i campioni raccolti in una settimana si è eseguita dapprima la centrifugazione e in seguito la determinazione del secco residuo tramite stufa.



Figura 10: campioni di fango di 1 litro sui quali sono stati eseguiti gli esperimenti.

La centrifugazione è stata eseguita con 100 ml di fango prelevato da ciascun campione, posti all'interno della centrifuga visibile nella **Figura 11** a 2000 rpm per 7 minuti, determinando in tal modo la % di centrifugato.



Figura 11: centrifuga di laboratorio adottata per le prove sperimentali.

Quello che si ottiene a fine centrifugazione è presente nella **Figura 12**. Usando un centimetro si misurano l'altezza del punto più alto e l'altezza del punto più basso, si calcola il valore medio che corrisponde alla % di centrifugato presente nel campione.



Figura 12: campione di 100 ml di fango prima e dopo la centrifugazione.

In seguito, adoperando una stufa a 110 °C, è stata calcolata la % di solido residuo. L'analisi è stata effettuata utilizzando una bilancia di laboratorio per effettuare le pesate con estrema precisione e considerando il valore misurato fino alla quarta cifra decimale. L'analisi su ciascun campione di fango, viene effettuata in doppio, cioè per ogni campione di fango di un turno lavorativo si usano due dischi di alluminio e procedendo in parallelo con il calcolo del secco residuo, si calcola la differenza tra le % di residuo secco tra i due dischi. I dischi contenenti il fango vengono introdotti nella stufa per 12 ore a 110 °C. La procedura adottata è la seguente ed è stata fornita dal laboratorio di controllo e qualità dello stabilimento:

- a) si pesa un disco di alluminio di diametro 100 mm e si tara la bilancia;
- b) si aggiungono circa 2 grammi di campione e si valuta la pesata fino alla quarta cifra decimale;



Figura 13: disco contenente 2 g di fango prima di essere posto in stufa; dischi inseriti in stufa a 110 °C.

- c) introdurre i dischi in stufa a 110 °C per 12 ore;
- d) si lascia raffreddare per una ventina di minuti i dischi con il solido residuo all'interno dall'essiccatore presente in **Figura 15**, ossia un contenitore munito di spesse pareti di vetro ed un coperchio, nel quale la parte inferiore del contenitore è separata da quella superiore da un disco forato in ceramica, sopra il quale vengono posti i materiali da essiccare. Sotto di esso, un materiale igroscopico, il gel di silice, agisce da agente disidratante;
- e) si procede con la prima pesata;



Figura 14: disco estratto dalla stufa e pronto per la prima pesata.

- f) si ripete tutta la procedura lasciando nuovamente scaldare i campioni in stufa per altre due ore per giungere ad una misurazione più precisa e potersi assicurare che la disidratazione sia completa;
- g) qualora la differenza tra la prima e la seconda pesata fosse inferiore a 0,01 si procede con il calcolo della % di secco residuo:

$$\% \text{ residuo} = \frac{\text{pesata del disco (dopo scaldato)} - \text{peso del disco vuoto}}{\text{peso del disco prima di scaldare}} \times 100$$

h) si può constatare l'esattezza e l'attendibilità della prova.



Figura 15: essiccatore contenente un disco forato in ceramica sotto il quale è presente il gel di silice.

4.2 Risultati ottenuti sperimentalmente con l'impianto dell'acetilene spento

I dati ottenuti sono riassunti nella seguente **Tabella 3**.

N° CAMPIONI	DATA	ORARIO TURNO DI PRELIEVO	% CENTRIFUGATO		% SOLIDO RESIDUO TRAMITE STUFA		
			D-854	D-823	D-854	D-823	
1	25/10/2024	15:00	5	2,5	0,34675	0,4729	
2	26/10/2024	00:30	3,5	34	0,2989	12,1791	
3	26/10/2024	10:30	20	42,5	3,5398	12,3137	
4	26/10/2024	15:00	5,5	45	0,277	8,90685	
5	27/10/2024	10:00	7	27,5	0,40035	6,29645	
6	27/10/2024	15:00	18,5	50	1,33485	5,7366	
7	28/10/2024	10:00	30	56	2,76875	6,5015	
8	28/10/2024	16:30	17,5	52,5	1,72865	6,38265	
9	28/10/2024	23:30	5,5	55	0,37985	6,87015	
10	29/10/2024	08:30	5,5	58	0,3244	7,8796	
11	29/10/2024	18:30	35	55	5,9901	7,82215	
12	29/10/2024	23:00	40	37,5	7,8245	6,62475	
13	30/10/2024	08:00	40	47,5	13,9419	6,8208	
14	30/10/2024	19:00	65	22	10,702	4,2074	
15	30/10/2024	23:30	45	6	9,2913	0,37935	
16	31/10/2024	08:15	8	45	1,7271	6,36915	
17	31/10/2024	23:30	47	48	9,9783	7,1311	
18	01/11/2024	09:10	48	52	17,825	8,28675	
19	01/11/2024	16:40	8	30	4,8786	6,19615	
20	01/11/2024	22:30	5	37	3,3397	6,72135	
21	02/11/2024	12:40	43	53	9,58	7,77125	
22	04/11/2024	18:00	52,5	49	9,637	9,41975	
Totale Campioni centrifugati: 22 per ciascun chiarificatore							
			MEDIA:	25,20	41,14	5,28	6,88

Tabella 3: dati sperimentali ottenuti dalle prove di centrifugazione e disidratazione tramite stufa.

Si può constatare che il fango ha mediamente una percentuale di centrifugato corrispondente al 5% e una percentuale di secco residuo intorno al 7%.

Le curve di taratura ottenute per ciascuno dei due chiarificatori sono rappresentate nei **Grafici 2 e 3**. Sono state determinate interpolando i punti ottenuti sul grafico, ricavati avvalendosi dei dati determinati dalle prove di laboratorio indicati dalla **Tabella 3**.

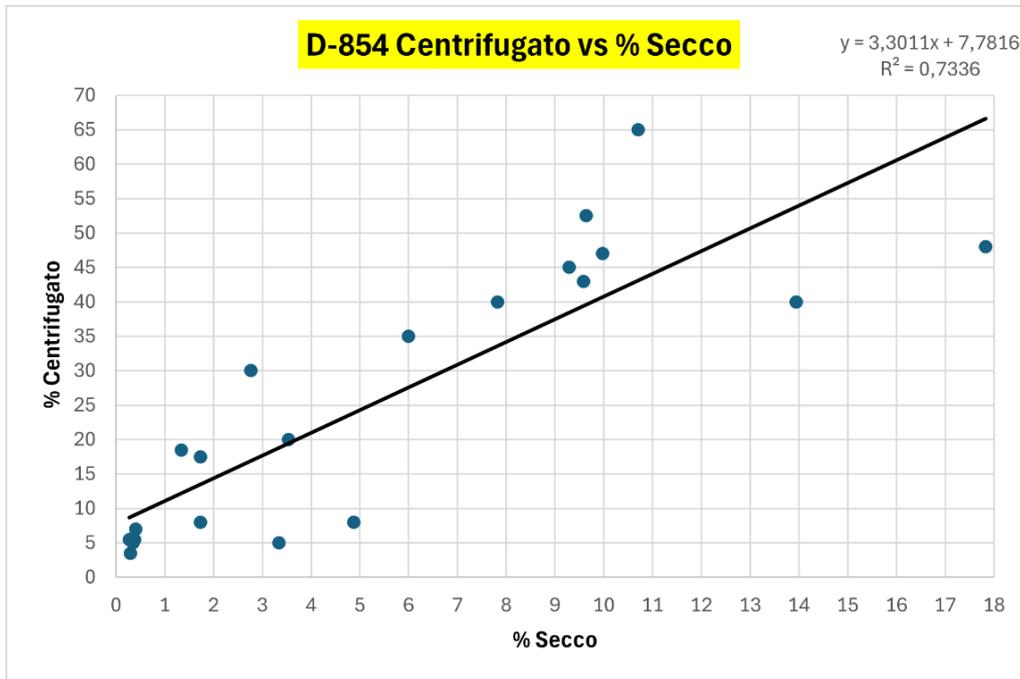


Grafico 2: curva di taratura relativa al chiarificatore D-854.

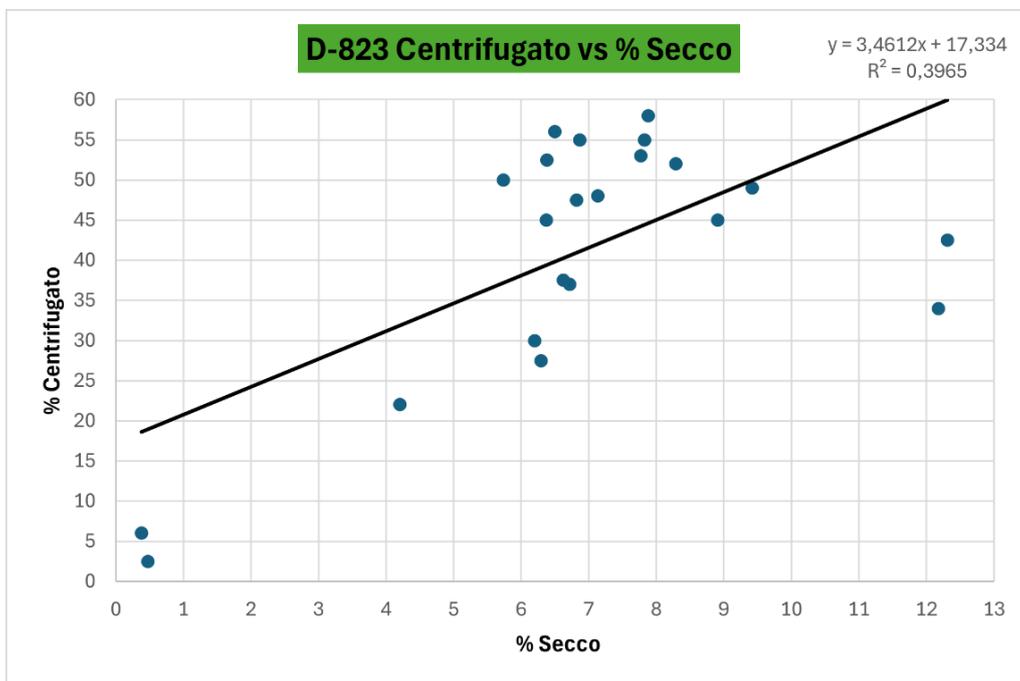


Grafico 3: curva di taratura relativa al chiarificatore D-823.

Per poter visualizzare l'andamento del contenuto percentuale di secco residuo nel tempo di durata del campionamento, sono state elaborate tramite Excel le seguenti curve rappresentate dai **Grafici 4 e 5**.

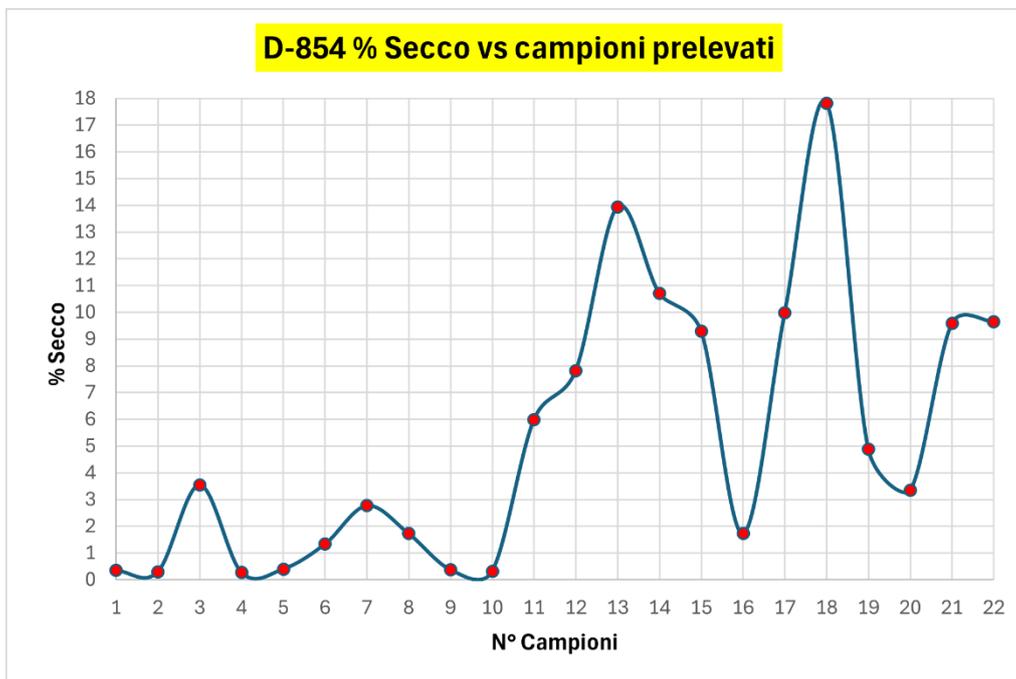


Grafico 4: andamento del valore % di secco durante il campionamento al chiarificatore D-854.

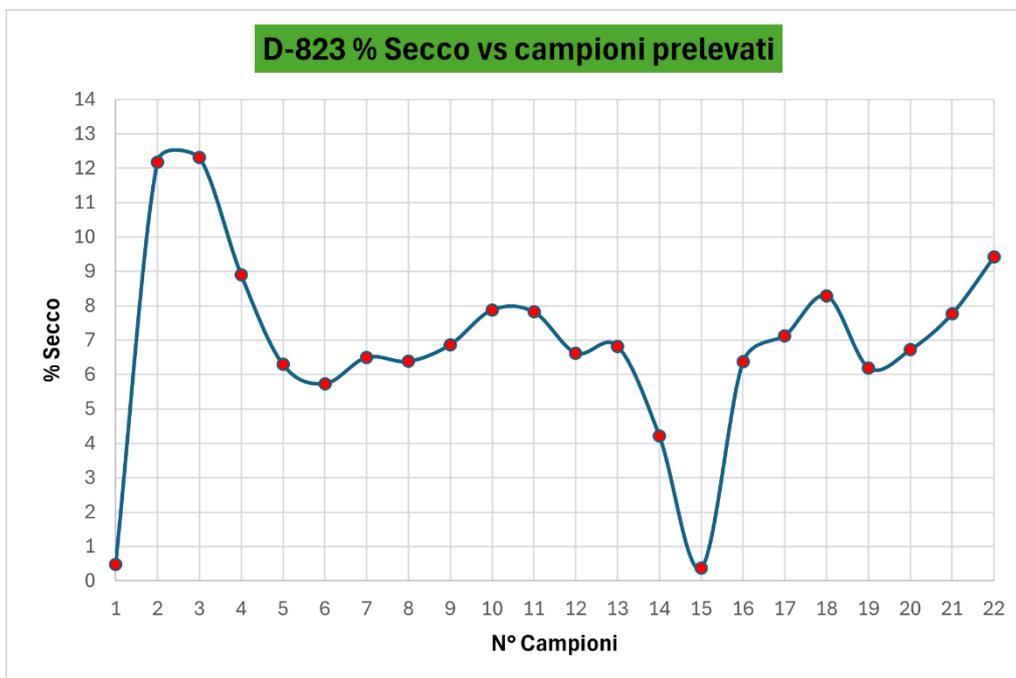


Grafico 5: andamento del valore % di secco durante il campionamento al chiarificatore D-823.

Dal **Grafico 4** si può notare un andamento variabile nell'arco della settimana di campionamento, ma dopo ogni picco di minimo o di massimo si nota immediatamente una brusca variazione dovuta al fatto che dopo la rilevazione in laboratorio di un contenuto di secco troppo basso o troppo alto rispetto a quello che si è calcolato per ottimizzare la disidratazione mediante filtropressa, si interviene rapidamente per stabilizzarlo tramite il corretto utilizzo dell'additivo cationico policloruro di alluminio (PC18) alimentato in discontinuo nel chiarificatore D-854.

Per quanto concerne il **Grafico 5** invece, si può notare un andamento pressoché costante, fatta eccezione per le due brusche variazioni al primo e al quindicesimo campione, ma subito bilanciate.

Volendo visualizzare un ‘control chart’, ossia un grafico di controllo che serve a monitorare la stabilità di un processo nel tempo, si è utilizzata la funzione ‘Statistics’ su Excel, in cui vengono indicati i due limiti di controllo, inferiore (LCL) e superiore (UCL), che non si vuole superare e depurando l’analisi di campionamento delle brusche variazioni, si ricavano i seguenti **Grafici 6 e 7**.

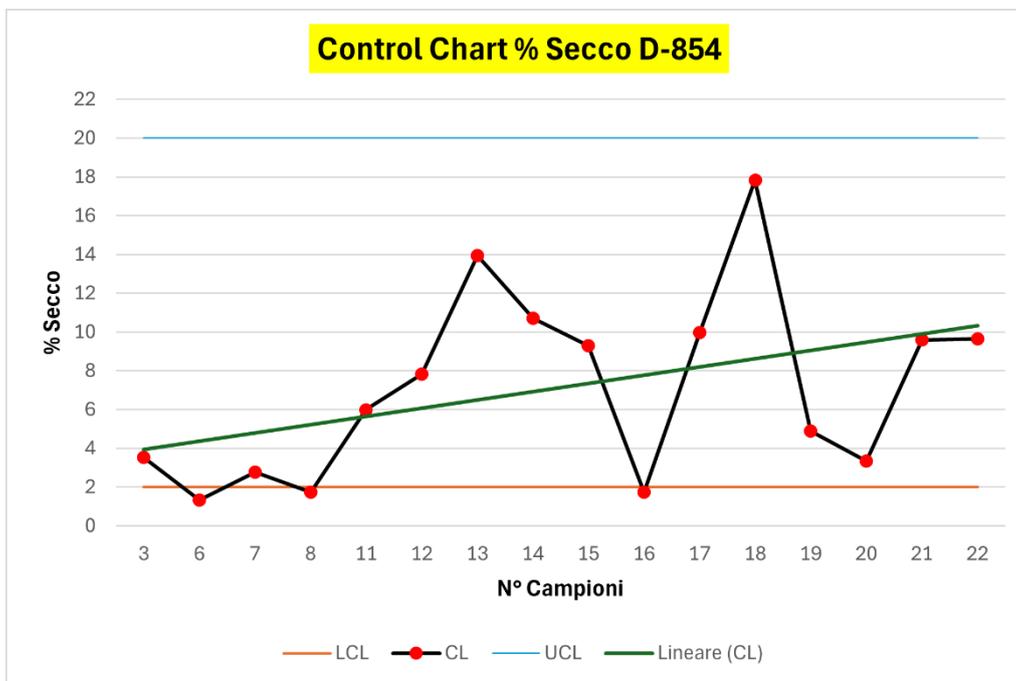


Grafico 6: control chart del valore % di secco nel chiarificatore D-854.

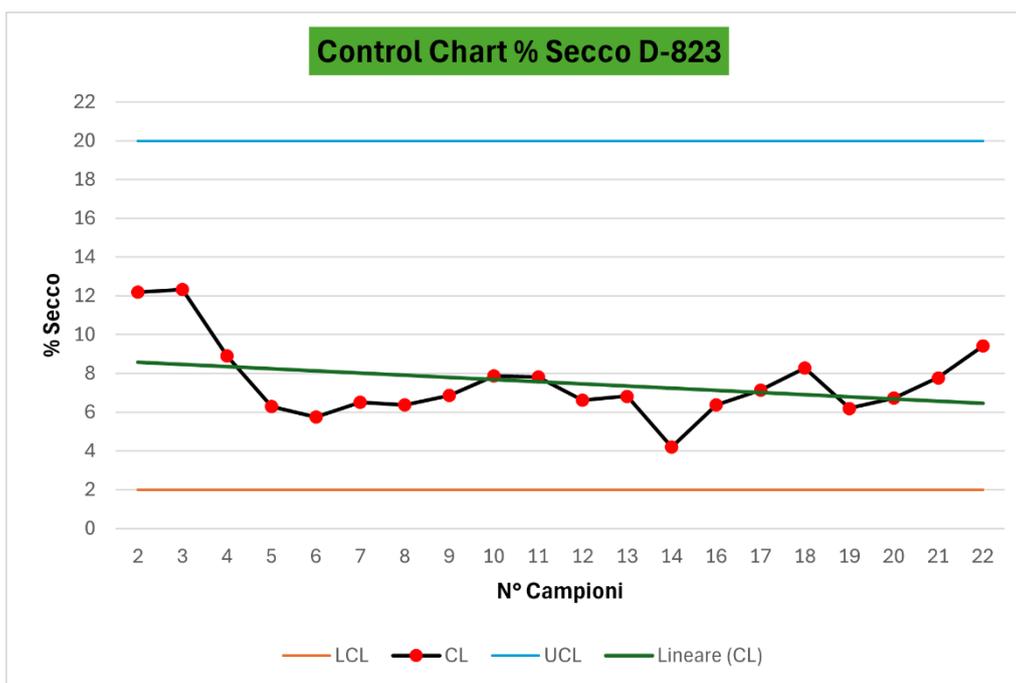


Grafico 7: control chart del valore % di secco nel chiarificatore D-823.

È importante sottolineare che la prima parte dell'analisi sperimentale è stata condotta da campioni di fango raccolti con l'impianto di produzione dell'acetilene spento per ragioni di manutenzione e controllo periodico annuale. Ma come anticipato, per una corretta e attendibile analisi bisogna valutare la tematica in esame, in questo caso la stabilizzazione e il trattamento dei fanghi, tenendo in considerazione diverse casistiche. Per cui, l'analisi sperimentale è stata condotta in un secondo momento anche con l'impianto di acetilene acceso al fine di valutare eventuali variazioni sul contenuto di secco. Si è ripetuta tutta la procedura sopra elencata, ripetendo nuovamente il campionamento per una settimana e raccogliendo altri 22 campioni per ogni chiarificatore.

4.3 Risultati ottenuti sperimentalmente con l'impianto dell'acetilene acceso

I risultati ottenuti sono presenti nella **Tabella 4**.

N° CAMPIONI	DATA	ORARIO TURNO DI PRELIEVO	CENTRIFUGATO		% SOLIDO RESIDUO TRAMITE STUFA		
			D-854	D-823	D-854	D-823	
1	04/12/2024	15:00	32,5	43	4,5716	4,3794	
2	04/12/2024	23:00	33	35	4,7357	4,103	
3	05/12/2024	07:00	33	39	5,0203	4,3911	
4	05/12/2024	15:00	38	43	5,5998	5,5794	
5	06/12/2024	07:00	37,5	43,5	7,9812	6,3599	
6	06/12/2024	15:00	34	37,5	7,5801	5,8771	
7	07/12/2024	07:00	32	35	6,2435	7,8529	
8	07/12/2024	16:30	28	40	4,4666	6,3011	
9	07/12/2024	23:30	28	9	4,8293	0,7878	
10	08/12/2024	07:30	32	40	5,9096	16,3084	
11	08/12/2024	18:30	27,5	26	5,4117	5,6995	
12	08/12/2024	23:00	32,5	27,5	6,7794	6,7601	
13	09/12/2024	08:00	34	33	7,3592	8,007	
14	09/12/2024	19:00	47	40	8,1006	9,0019	
15	09/12/2024	23:30	48	40	8,7605	7,8737	
16	10/12/2024	08:15	51	50	9,316	9,187	
17	10/12/2024	15:30	42	34	9,8099	5,2864	
18	11/12/2024	09:00	49,5	47,5	6,8436	6,1871	
19	11/12/2024	16:00	42,5	42	5,8731	5,069	
20	11/12/2024	22:30	35	52	3,5654	6,247	
21	12/12/2024	07:00	30	49	3,6575	5,6825	
22	12/12/2024	15:00	32,5	41	3,9914	5,9567	
Totale Campioni centrifugati: 22 per ciascun chiarificatore							
			MEDIA:	36,34	38,50	6,20	6,50

Tabella 4: dati sperimentali ottenuti dalle prove di centrifugazione e disidratazione tramite stufa (Acetilene ON).

Rispetto ai valori medi determinati nel caso precedente con l'impianto dell'acetilene spento, si può notare un leggero incremento della percentuale di centrifugato che arriva al 6% mentre un valore piuttosto simile per il contenuto percentuale di residuo secco. Pertanto ci si aspetta che i grafici di controllo, cioè i 'control chart', non varino rispetto a quelli precedenti.

Con il nuovo campionamento si sono ricavate le nuove curve di taratura, presenti nei **Grafici 8 e 9**, che verranno adoperate e consultate dagli operatori nei periodi in cui verrà azionato l'impianto della produzione dell'acetilene. Come le precedenti, anche quest'ultime sono state determinate interpolando i punti ottenuti sul grafico, ricavati avvalendosi dei dati determinati dalle prove di laboratorio indicati dalla **Tabella 4**.

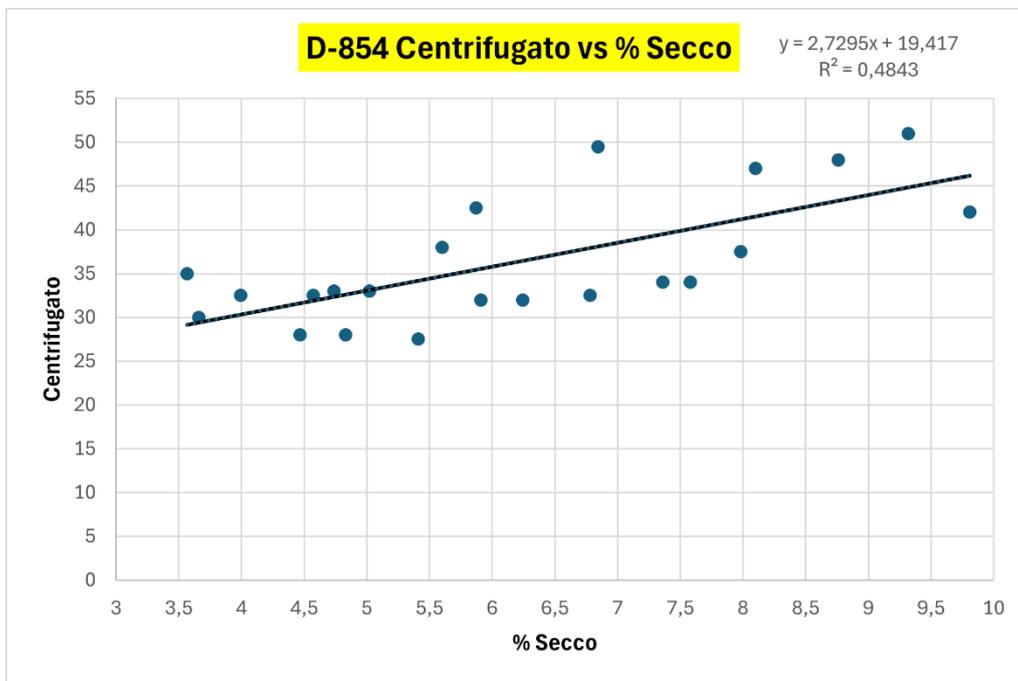


Grafico 8: curva di taratura relativa al chiarificatore D-854.

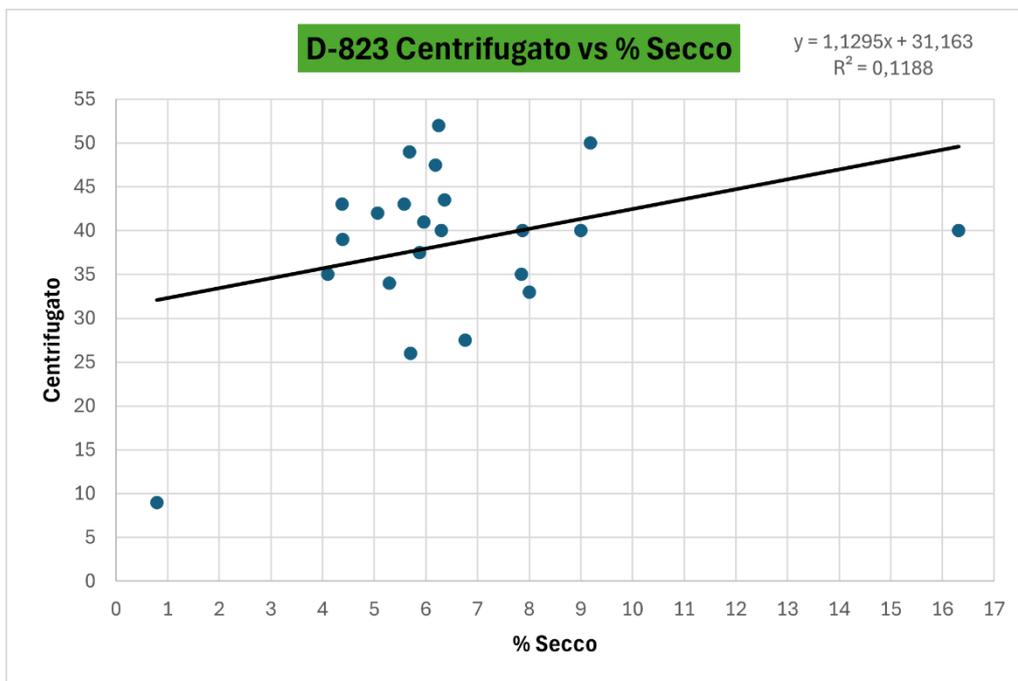


Grafico 9: curva di taratura relativa al chiarificatore D-823.

Per poter studiare l'andamento del contenuto percentuale di secco residuo nel tempo di durata del campionamento, sono state elaborate su Excel le seguenti curve rappresentate dai **Grafici 10 e 11**.

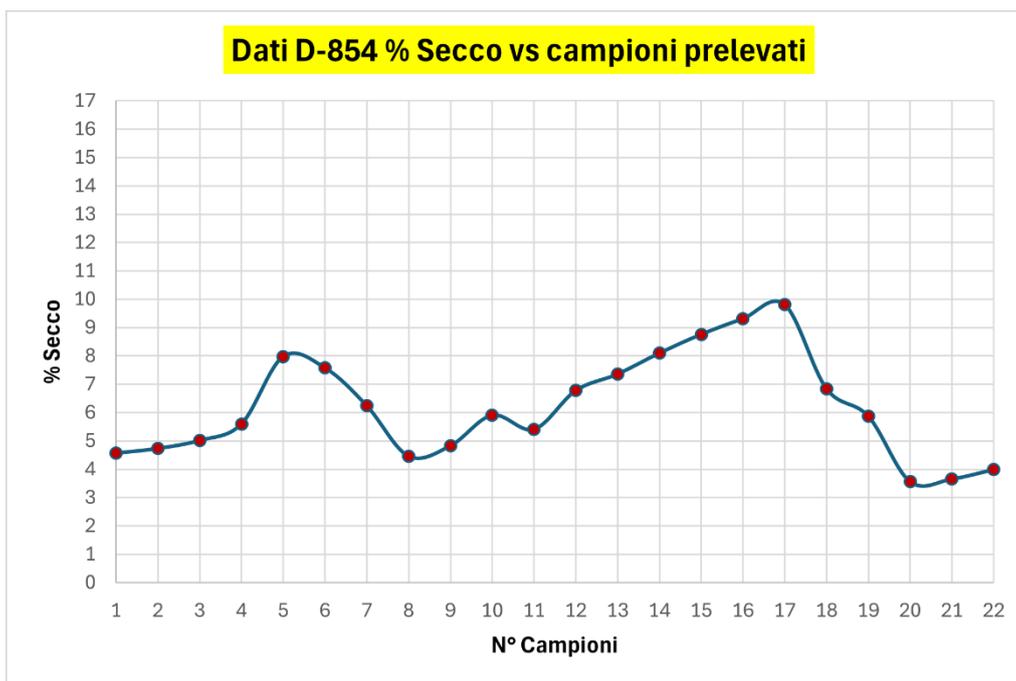


Grafico 10: andamento del valore % di secco durante il campionamento al chiarificatore D-854.

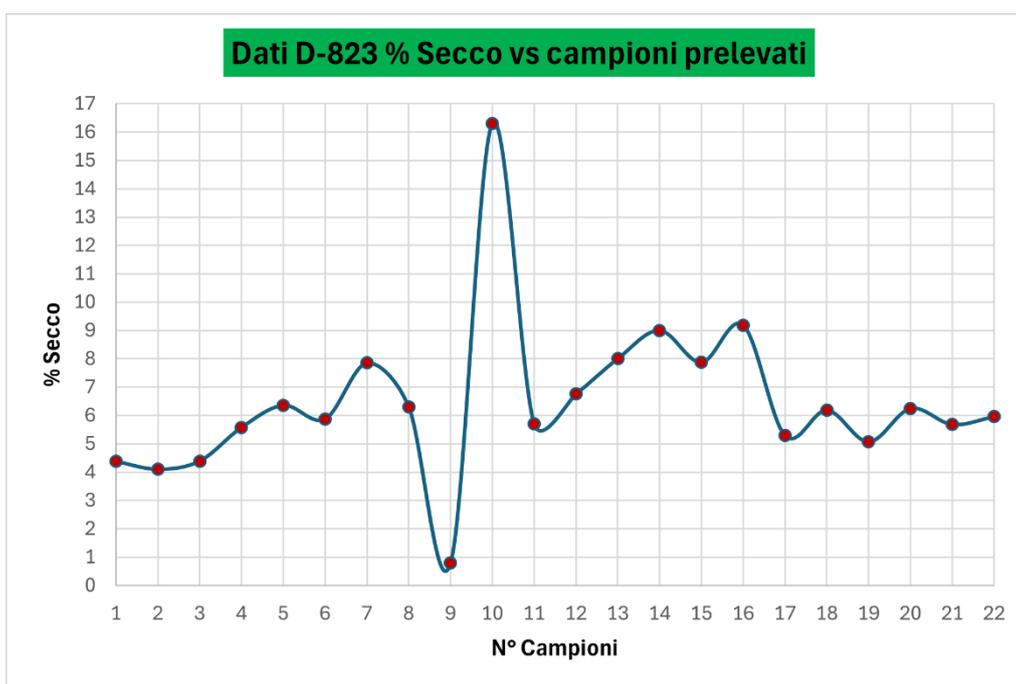


Grafico 11: andamento del valore % di secco durante il campionamento al chiarificatore D-823.

Dal **Grafico 10** si può notare un andamento piatto, circa costante, che varia in un range di valori di % di residuo secco tra il 3% e il 10%. Dal **Grafico 11** invece, si può notare un andamento costante durante l'inizio e la fine del campionamento, mentre tra l'ottavo e l'undicesimo campione, tra i quali trascorrono esattamente 24 ore, si rilevano due picchi, uno di minimo e subito dopo uno di massimo.

Questo significa che dopo la rilevazione in laboratorio di un contenuto di secco troppo basso rispetto a quello che si è calcolato per ottimizzare la disidratazione mediante filtropressa, si interviene rapidamente per stabilizzarlo tramite il corretto utilizzo dell'additivo cationico policloruro di alluminio (PC18) alimentato in continuo nel chiarificatore D-823.

Visualizzando i 'control chart' presenti nei *Grafici 12 e 13*, si può affermare e verificare la reale stabilità nel tempo, relativa alla % di residuo secco presente nei fanghi provenienti dai due chiarificatori.

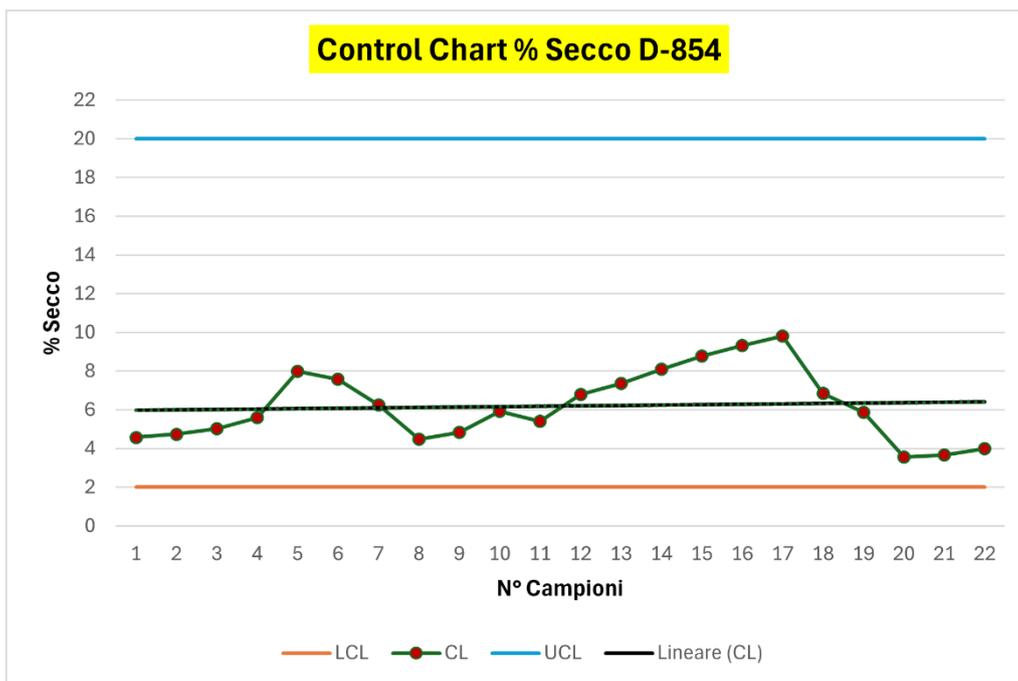


Grafico 12: control chart del valore % di secco nel chiarificatore D-854.

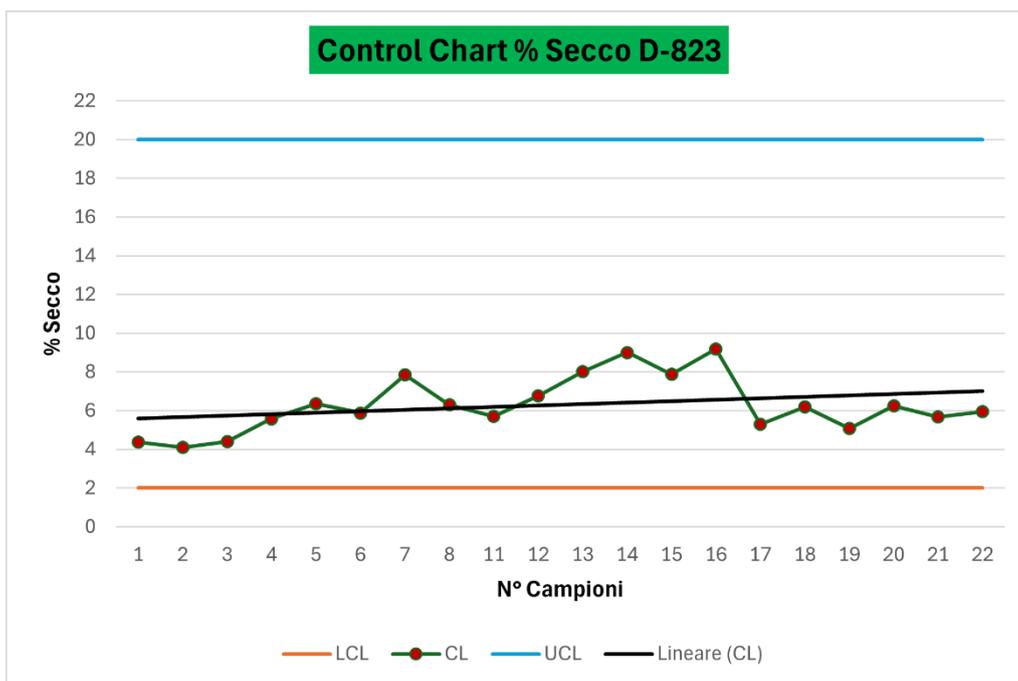


Grafico 13: control chart del valore % di secco nel chiarificatore D-823.

5. Confronto tecnico-economico di due soluzioni per la gestione dei fanghi

Nel presente capitolo verrà illustrata la procedura adottata per effettuare una prima valutazione tecnico-economica di due differenti opzioni di gestione dei fanghi, nel caso specifico per la disidratazione dei fanghi. La valutazione si basa su un confronto tra l'impianto attualmente presente e funzionante e il futuro impianto alternativo che si desidera implementare.

L'obiettivo principale è quello di analizzare la prospettiva economica dell'investimento necessario per la realizzazione dell'impianto descritto in questa tesi. L'intento è non solo quello di evidenziare i benefici economici per l'azienda, ma anche di mettere in risalto le differenze in termini di costi e impatto ambientale rispetto alle attuali soluzioni di smaltimento dei fanghi.

5.1 Parametri e condizioni operative per il dimensionamento della centrifuga

A seguito degli esperimenti condotti e descritti dettagliatamente nel precedente capitolo, si è giunti ad un valore percentuale di residuo secco circa costante pari al 7%, corrispondente alla percentuale di solidi sospesi presenti nelle portate di fanghi uscenti dai due chiarificatori e pronte per raggiungere l'apparecchiatura seguente responsabile della disidratazione di questi ultimi.

Per prima cosa si impostano i seguenti bilanci di massa per poter stimare i parametri operativi della centrifuga da dimensionare opportunamente. I dati utilizzati sono presenti nella *Tabella 5*: il primo valore relativo al secco residuo presente nella corrente in entrata alla filtropressa o centrifuga in futuro, è quello determinato dall'analisi sperimentale condotta in laboratorio. Il valore percentuale di secco residuo relativo alla filtropressa è stato fornito dal manager di produzione, sulla base delle analisi effettuate dal laboratorio di controllo e qualità sulle portate di fanghi a valle della filtropressa, destinati allo smaltimento. I valori di secco residuo in uscita dalla centrifuga e dall'essiccatore sono stati forniti dall'azienda esterna che ha elaborato per la *Momentive* una proposta budgettaria in linea con le sue esigenze e richieste.

		MEDIA:	7,35				
		VALORE %RESIDUO SECCO IN ENTRATA ALLA FILTROPRESSA/CENTRIFUGA					
			45%				
		VALORE %RESIDUO SECCO IN USCITA DALLA FILTROPRESSA					
			30-35%				
		VALORE %RESIDUO SECCO IN USCITA DALLA CENTRIFUGA					
			95%				
		VALORE %RESIDUO SECCO IN USCITA DALL'ESSICCATORE					

Tabella 5: dati relativi alle percentuali di residuo secco nelle correnti di fanghi in uscita dalle varie apparecchiature.

$$6,9 \text{ ton/h} \times 0,07 = \dot{V}_{out} \times 0,95$$

$$\dot{V}_{out} \cong 3000 \text{ ton/anno}$$

Questo valore è il primo interessante risultato di questo studio, perché dimostra l'efficacia del futuro binomio centrifuga-essiccatore in termini di riduzione dei volumi di fanghi prodotti, nello specifico si riuscirebbe a dimezzare il volume dei fanghi prodotti annualmente.

Per avere una visuale completa sulle portate coinvolte nella disidratazione dei fanghi, si vuole calcolare per ciascuna apparecchiatura le portate entranti e uscenti, tenendo in considerazione però che i ritmi di produzione dell'azienda *Momentive Performance Materials Specialties Srl* di Termoli non sono costanti durante l'anno, ma variano in base alle richieste del mercato per cui si può constatare quanto segue:

- Regime Normale = 4 batch di filtropressa (la filtropressa viene caricata e scaricata per 4 volte)
- Regime Intenso = 6 batch di filtropressa (la filtropressa viene caricata e scaricata per 6 volte)

Regime Normale:

$$\frac{6000 \text{ ton/anno}}{350 \text{ giorni/anno}} \times \frac{1}{4 \text{ batch/giorno}} \cong 4,3 \text{ ton/batch}$$

Regime Intenso:

$$\frac{6000 \text{ ton/anno}}{350 \text{ giorni/anno}} \times \frac{1}{6 \text{ batch/giorno}} \cong 2,9 \text{ ton/batch}$$

Mediamente ogni batch di filtropressa corrisponde a circa 3,5 tonnellate di fanghi prodotti. Con questo valore medio appena calcolato si possono determinare le varie portate per ciascuna apparecchiatura utilizzando il solito bilancio di massa sul secco:

$$\dot{V}_{in} \times \%_{residuo\ secco,in} = \dot{V}_{out} \times \%_{residuo\ secco,out}$$

1. Filtropressa:

Regime Normale

$$\dot{V}_{in} \times 0,07 = 3,5 \frac{\text{ton}}{\text{batch}} \times 4 \frac{\text{batch}}{\text{giorno}} \times 0,45 \times \frac{1}{16 \text{ ore/giorno}}$$

$$\dot{V}_{in} \cong 5,6 \text{ ton/h}$$

Regime Intenso

$$\dot{V}_{in} \times 0,07 = 3,5 \frac{\text{ton}}{\text{batch}} \times 6 \frac{\text{batch}}{\text{giorno}} \times 0,45 \times \frac{1}{16 \text{ ore/giorno}}$$

$$\dot{V}_{in} \cong 8,4 \text{ ton/h}$$

Questi valori di portate sono quelli su cui verrà dimensionata la centrifuga che mediamente tratterà una portata entrante di fango di 6,9 ton/h come stimato all'inizio del paragrafo.

2. Centrifuga:
Regime Normale

$$5,6 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \times 0,07 = 0,30 \times \dot{V}_{out}$$

$$\dot{V}_{out} \cong 1,3 \text{ ton/h}$$

Regime Intenso

$$8,4 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \times 0,07 = 0,30 \times \dot{V}_{out}$$

$$\dot{V}_{out} \cong 2 \text{ ton/h}$$

3. Essiccatore:
Regime Normale

$$5,6 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \times 0,07 = 0,95 \times \dot{V}_{out}$$

$$\dot{V}_{out} \cong 0,4 \text{ ton/h}$$

Regime Intenso

$$8,4 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \times 0,07 = 0,95 \times \dot{V}_{out}$$

$$\dot{V}_{out} \cong 0,6 \text{ ton/h}$$

Coerentemente con il futuro volume dei fanghi prodotti stimato prima, osservando le portate uscenti dall'essiccatore si può apprezzare la notevole differenza rispetto a quelle uscenti dalla filtropressa, per cui si rileva un enorme vantaggio per il volume dei fanghi destinati allo smaltimento e per i costi associati. Considerando che ogni modulo dell'essiccatore può essiccare 100 kg/h di fango (valore fornito dall'azienda esterna che si occuperà della realizzazione delle nuove apparecchiature), posso stimare il numero minimo di moduli necessari per gestire le portate calcolate: 5 moduli in regime normale e 7 moduli in regime intenso, approssimando i calcoli all'intero successivo.

5.2 Dimensionamento della centrifuga e dell'essiccatore

Con tutti i dati determinati è stato chiesto ad un'azienda esterna di elaborare un'offerta tecnico-budgettaria per la disidratazione dei fanghi di processo mediante trattamento meccanico e termico. Nella proposta ricevuta sono stati dimensionati sia la centrifuga che l'essiccatore, sulla base delle portate coinvolte nel processo e fornite dai calcoli sovrastanti, e aspetto non meno importante riguarda i costi per consegna, noleggio e conduzione del futuro impianto.

La centrifuga presenta le seguenti caratteristiche tecniche:

CARATTERISTICHE TECNICHE	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Portata idraulica	55	mc/h
Giri max tamburo	3500	rpm
Giri differenziali	Da 1 a 55	rpm
Efficienza del processo di separazione	95-98	%
Livello sonoro	79	dB

Tabella 8: parametri caratteristici della centrifuga fornita dall'azienda esterna.

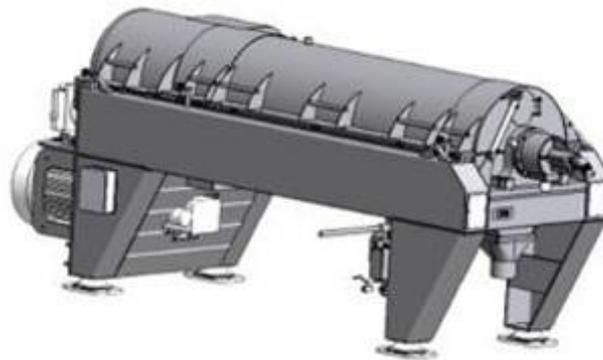


Figura 16: raffigurazione centrifuga.

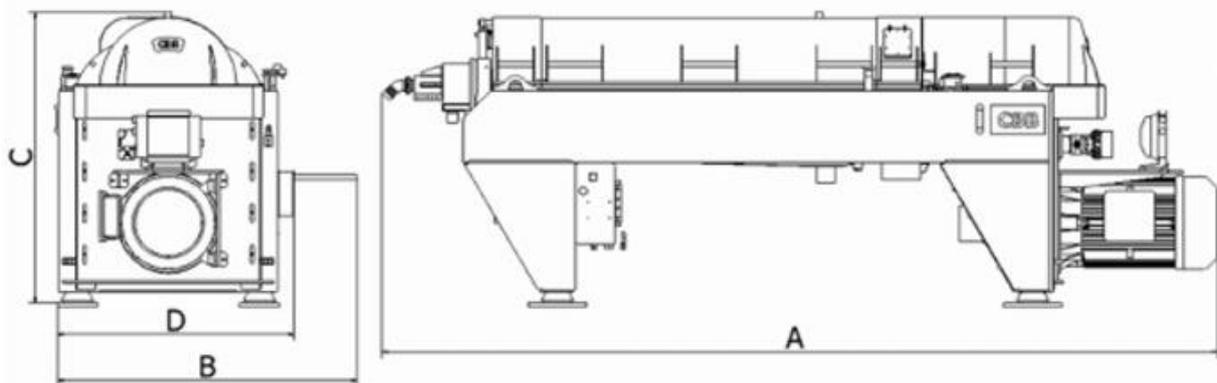


Figura 17: Decanter centrifugo.

Lunghezza A	4590 mm
Larghezza B (compresa leva per pompa apertura coperture)	1655 mm
Larghezza D	1307 mm
Altezza C	1630 mm
Peso	5200 Kg
Diametro tamburo	Ø505 mm
Lunghezza tamburo	2200 mm
Rapporto di snellezza	4,4

Tabella 9: dimensioni del decanter centrifugo presente in **Figura 17**.



Figura 18: impianto di essiccazione fanghi.

Il numero di moduli preventivato per la corretta gestione del fango prodotto è di 9 moduli, sovradimensionando il numero minimo di moduli calcolato precedentemente, al fine di colmare eventuali guasti o malfunzionamenti ad un singolo modulo, per cui non risulta necessario bloccare l'impianto. L'essiccatore a nastro per fanghi di depurazione è una soluzione modulare che consente di combinare più moduli in serie così da poter ottenere un impianto di essiccazione in grado di trattare diverse portate e gestire ritmi di produzione differenti. Ogni modulo è in grado di essiccare circa 100 kg di fango all'ora. L'essiccatore fanghi presente nella **Figura 18** consente la rimozione per strippaggio dell'umidità a mezzo di aria calda mediante l'impiego di ventilatori centrifughi a doppia aspirazione che inviano l'aria lungo i diversi piani della macchina. Soluzione altamente innovativa dal punto di vista tecnologico e assolutamente compatibile con l'ambiente circostante, a differenza degli essiccatori classici, la trasmissione del calore avviene sostanzialmente per convezione e non per irraggiamento, privilegiando il parametro velocità rispetto al parametro temperatura dell'aria di essiccazione. L'essiccazione avviene in un circuito chiuso, ad emissioni zero in atmosfera e risulta completamente indipendente dalle condizioni climatiche esterne [13]. Il comparto termico, così costituito avrà un consumo medio di energia in fase di avvio di circa 235 kW/h, valore che andrà a settarsi, in marcia, a circa 135 kW/h. Il processo di essiccazione determina una riduzione del peso del fango con conseguente diminuzione del volume del materiale da gestire. Tutto ciò, contribuisce ad una netta riduzione dei costi di smaltimento da sostenere per l'azienda oltreché vantaggi in termini di CO₂ prodotta.

5.3 Bilancio economico del binomio futuro: centrifuga-essiccatore

Segue il bilancio economico che include tutte le voci di costo, il quale consente all'azienda di valutare dettagliatamente i benefici della futura soluzione impiantistica, non solo dal punto di vista sostenibile ma anche economico. Elaborare una valutazione economica è fondamentale per poter essere in grado di prendere decisioni strategiche informate e di ottimizzare le risorse.

Le voci di costo che sono state prese in considerazione nel bilancio economico, sono così suddivise:

- a) Costo per il noleggio
 - b) Costo per lo smaltimento del volume dei fanghi prodotti
 - c) Costo relativo al consumo di energia elettrica
 - d) Costo per la movimentazione dei cassoni prima dell'uscita dallo stabilimento
 - e) Costo per il travaso dei barconi.
-
- a) La prima voce di costo è fornita dalla proposta budgettaria ricevuta dall'azienda esterna che si occuperà di realizzare per la *Momentive* la nuova soluzione per l'impianto del trattamento dei fanghi, ed è comprensiva di:
 - Canone mensile per noleggio e conduzione riferita a 2 turni lavorativi da 8 ore giornaliere con 1 operatore dell'azienda esterna per turno: €46.300
 - Consegna impianto: €16.000

Costo di noleggio centrifuga + essiccatore: $€46.300 \times 12 + €16.000 = €571.600/\text{anno}$

- b) La seconda spesa riguarda lo smaltimento. L'impianto chimico dello stabilimento in esame produce essenzialmente due tipologie di rifiuti solidi: i fanghi provenienti dall'impianto trattamento acque e i fanghi derivanti dal trattamento delle acque reflue provenienti dall'impianto di produzione dell'acetilene. I primi costituiscono il fango filtropressato, mentre i secondi costituiscono la calce filtropressata. La calce liquida è usata nella reazione di neutralizzazione effettuata nel chiarificatore D-854 in cui viene fatta reagire con *HCl* disciolto nell'acqua di processo. Mentre il cloruro di calcio è solubile in acqua, la calce non lo è per cui si comprende come un eccesso di neutralizzazione provochi la sedimentazione di solidi nel chiarificatore.

Lo smaltimento del fango avviene per due vie: recupero come materie prime presso cementifici; discarica solo per indisponibilità del recupero presso cementifici. La calce filtropressata invece, è mandata a due diverse aziende che si occupano del trattamento dei rifiuti speciali pericolosi e non pericolosi, del recupero e della valorizzazione di questi ultimi. Avendo a disposizione le offerte per il servizio di trasporto smaltimento rifiuti destinate alla *Momentive* per le diverse destinazioni sopra elencate, si sono determinate le seguenti spese:

- Costo smaltimento fanghi destinati alla discarica: €170/ton
- Costo smaltimento fanghi per il cementificio: €150/ton
- Costo di trasporto-smaltimento calce per azienda in provincia di Ancona: €294/ton
- Costo di trasporto-smaltimento calce per azienda in provincia di Chieti: €270/ton

Sulla base dei dati forniti dall'azienda riguardo al volume dei fanghi e della calce filtropressata, si può determinare un rapporto tra la calce prodotta calcolata su una media di sei anni e il fango prodotto calcolato su una media di sei anni, di circa 3:1. Quindi, sapendo che il volume dei fanghi si ridurrà a 3000 ton/anno con la nuova soluzione proposta, si calcola la produzione di 2250 ton/anno di calce essiccata e 750 ton/anno di fango essiccato.

Costo smaltimento fanghi e calce da centrifuga + essiccatore:
 $€160/\text{ton} \times 750 \text{ ton/anno} + €282/\text{ton} \times 2550 \text{ ton/anno} = €754.500/\text{anno}$

- c) La terza voce di costo concerne il consumo dell'energia elettrica il cui calcolo è stato effettuato con i valori di consumo procurati dall'azienda esterna per ciascuna delle due apparecchiature. Per poter calcolare appropriatamente il consumo elettrico, bisogna innanzitutto determinare le ore operative annuali massimizzando il regime. Tenendo in considerazione che la centrifuga lavora per un massimo di 16 ore al giorno (2 turni lavorativi coperti da lavoratori procurati dall'azienda produttrice della centrifuga) e che l'essiccatore opera in continuo alla centrifuga per evitare accumulo di fango tra le due apparecchiature, allora si può constatare che la nuova soluzione impiantistica opererà per un massimo di 5600 ore/anno, per 350 giorni lavorativi sottraendo le due settimane di stop produzione. Per cui si ottiene quanto segue:

- Costo energia elettrica: €0,241/kW
- Consumo energia elettrica dell'essiccatore a regime: 135 kW/h
- Consumo energia elettrica della centrifuga a regime: 70 kW/h
- Ore operative annuali: 5600 ore/anno

Costo totale del consumo di energia elettrica centrifuga + essiccatore:
 $5600 \text{ ore/anno} \times (135+70) \text{ kW/h} \times €0,241/\text{kW} \cong €280.000/\text{anno}$

- d) La movimentazione dei cassoni contenenti i fanghi prodotti a valle della linea di trattamento rappresenta un costo, per cui dimezzando il volume dei fanghi prodotti, dimezzeranno anche i cassoni prodotti annualmente ed i relativi costi per la movimentazione. Osservando i dati mostrati in **Tabella 7** relativi ad una produzione annuale di fanghi pari a 6000 ton/anno, si possono determinare il numero di cassoni riempiti in futuro stimando una produzione di fanghi annuale di circa 3000 ton/anno, sapendo che ogni cassone contiene 4,5 tonnellate di fanghi:

- Quantità stimata di cassoni prodotti in futuro: 667 cassoni/anno
- Costo per la movimentazione di ciascun cassone: €35,5/cassone
- Costo per il 5% del totale dei cassoni: €100/cassone

Costo per la movimentazione dei cassoni:
 $(€35,5/\text{cassone} \times 0,95 + €100/\text{cassone} \times 0,05) \times 667 \text{ cassoni/anno} \cong €26.000/\text{anno}$

- e) Ultima spesa è relativi ai barconi di fanghi in uscita dallo stabilimento; i cassoni di fango precedentemente riempiti vengono travasati in dei grandi contenitori che sono chiamati barconi che vengono caricati dal trasportatore per raggiungere la meta a cui sono destinati. Se con i dati presenti in **Tabella 7** si ha una quantità di barconi all'anno riempiti pari a 200; dimezzando il volume dei fanghi si produrranno anche la metà dei barconi. Questi travasi hanno un costo, precisamente:

- Quantità stimata di barconi prodotti in futuro: 100 barconi/anno
- Costo per il travaso di ogni barcone: €161,5/barcone

Costo per il travaso dei barconi: $€161,5/\text{barcone} \times 100 \text{ barconi/anno} \cong €16.500/\text{anno}$

Il costo totale che implicherebbe la realizzazione e la conduzione della nuova soluzione composta dalla centrifuga e dall'essiccatore ammonta quindi a circa €1.648.600/anno.

5.4 Valutazione e determinazione del Saving

Quando un'azienda decide di ottimizzare un processo produttivo attraverso l'adozione di una soluzione impiantistica innovativa, la determinazione del risparmio rappresenta un elemento cruciale per valutare la sostenibilità dell'investimento e il suo impatto economico nel medio-lungo termine. L'analisi del risparmio non si limita solo a calcolare una riduzione immediata dei costi, ma deve considerare una prospettiva strategica a medio-lungo termine, tenendo conto di efficienza operativa, riduzione dei consumi, minori costi di manutenzione, riduzione delle emissioni e del volume dei rifiuti prodotti e dei benefici indiretti. La valutazione è basata sul confronto tra i costi relativi alla filtropressa e la soluzione innovativa, utilizzando gli stessi parametri economici di riferimento.

Analogamente a quanto fatto prima per determinare il costo totale approssimativo della nuova soluzione, si determinano le stesse identiche voci di costo anche per la filtropressa attualmente in uso.

I parametri economici per effettuare un confronto tra le due soluzioni sono gli stessi:

- f) Costo per il noleggio
 - g) Costo per lo smaltimento del volume dei fanghi prodotti
 - h) Costo relativo al consumo di energia elettrica
 - i) Costo per la movimentazione dei cassoni prima dell'uscita dallo stabilimento
 - j) Costo per il travaso dei barconi.
- f) La prima voce di costo è fornita dal contratto attivo con l'azienda esterna che fornisce la filtropressa alla *Momentive*:
- Canone annuo per il noleggio: €321.000/anno

Costo del noleggio per la filtropressa: €321.000/anno

- g) La seconda spesa riguarda lo smaltimento. I costi sono esattamente gli stessi descritti nel precedente paragrafo.
- Costo smaltimento fanghi destinati alla discarica: €170/ton
 - Costo smaltimento fanghi per il cementificio: €150/ton
 - Costo di trasporto-smaltimento calce per azienda in provincia di Ancona: €294/ton
 - Costo di trasporto-smaltimento calce per azienda in provincia di Chieti: €270/ton

Sulla base dei dati forniti dall'azienda riguardo al volume dei fanghi filtropressati e della calce filtropressata, si può determinare un rapporto tra la calce prodotta calcolata su una media di sei anni e il fango prodotto calcolato su una media di sei anni, di circa 3:1. Quindi, sapendo che il volume dei fanghi prodotti al giorno d'oggi è di 6000 ton/anno, si hanno 4500 ton/anno di calce filtropressata e 1500 ton/anno di fango filtropressato.

Costo smaltimento fanghi e calce filtropressati:

$$€160/\text{ton} \times 1500 \text{ ton/anno} + €282/\text{ton} \times 4500 \text{ ton/anno} = €1.509.000/\text{anno}$$

h) La terza voce di costo concerne il consumo dell'energia elettrica il cui calcolo è stato effettuato con i valori di consumo attuali, forniti dalla *Momentive*.

- Costo energia elettrica: €0,241/kW
- Consumo energia elettrica della filtropressa: 25 kW/h
- Tonnellate di fanghi prodotti da ogni ciclo di filtropressatura: 4,5 ton/filtropressata
- Durata di ogni ciclo di filtropressatura: 2 h e 30 minuti/filtropressata

Costo totale del consumo di energia elettrica della filtropressa:

$$2,5 \text{ ore/filtropressata} \times (6000 \text{ ton/anno} / 4,5 \text{ ton/filtropressata}) \times 25 \text{ kW/h} \times €0,241/\text{kW} \cong €20.000/\text{anno}$$

i) La movimentazione dei cassoni contenenti i fanghi prodotti a valle della linea di trattamento rappresenta un costo. Si adottano i dati mostrati in **Tabella 7** relativi all'attuale produzione media annuale di fanghi:

- Quantità di cassoni prodotti ad oggi: 1333 cassoni/anno
- Costo per la movimentazione di ciascun cassone: €35,5/cassone
- Costo per il 5% del totale dei cassoni: €100/cassone

Costo per la movimentazione dei cassoni:

$$(€35,5/\text{cassone} \times 0,95 + €100/\text{cassone} \times 0,05) \times 1333 \text{ cassoni/anno} \cong €50.000/\text{anno}$$

j) Ultima spesa è relativi ai barconi di fanghi in uscita dallo stabilimento; utilizzando sempre i dati presenti in **Tabella 7** si ha:

- Quantità di barconi travasati ad oggi: 200 barconi/anno
- Costo per il travaso di ogni barcone: €161,5/barcone

$$\text{Costo per il travaso dei barconi: } €161,5/\text{barcone} \times 200 \text{ barconi/anno} \cong €30.000/\text{anno}$$

Le spese relative alla gestione dei fanghi adottando la soluzione convenzionale presente in impianto ammonta quindi a circa €1.930.000/anno.

Il *Saving*, dato dalla differenza delle spese relative alla gestione del trattamento fanghi adoperando l'attuale filtropressa e le spese da affrontare in futuro nel caso si decidesse di implementare la nuova soluzione costituita dalla centrifuga e dall'essiccatore modulare, è stato determinato minimizzando i costi attuali della filtropressa e massimizzando quelli della soluzione alternativa. Un'analisi eccessivamente rigida o troppo ottimistica potrebbe portare a stime fuorvianti e non realistiche e conseguenti decisioni finanziarie rischiose; pertanto, è fondamentale avere dei margini di errore ampi per tenere conto di variabili incerte ed imprevedibili, come le fluttuazioni nei prezzi dell'energia, la variazione nei costi di smaltimento, o possibili modifiche contrattuali con aziende esterne in linea con le richieste del mercato nazionale e globale. Un approccio prudente garantisce che l'investimento sia sostenibile anche in caso di imprevisti, assicurando che il risparmio reale sia allineato alle aspettative economiche dell'azienda. Nonostante si ipotizzino quindi spese maggiorate per la soluzione alternativa futura, si è potuto constatare un *Saving* che ammonta a €280.000 all'anno.

6. Sostenibilità ambientale correlata alle due soluzioni poste a confronto

La sostenibilità rappresenta un elemento chiave nella progettazione e realizzazione di un impianto, assicurando che l'investimento sia vantaggioso non solo dal punto di vista economico, ma anche sotto il profilo ambientale e sociale. Un'analisi approfondita consente di minimizzare gli impatti negativi, ottimizzare l'uso delle risorse e migliorare l'efficienza complessiva del sistema.

Per individuare la soluzione impiantistica più sostenibile, è fondamentale esaminare diversi fattori, tra cui l'impatto ambientale, i costi operativi e la conformità alle normative vigenti. La sostenibilità non si limita all'efficienza energetica, ma riguarda anche la gestione economica dell'investimento, il controllo delle emissioni e l'ottimizzazione del ciclo di vita dell'impianto. Investire in impianti sostenibili consente di ottenere un risparmio economico nel lungo periodo, evitando costi aggiuntivi derivanti da inefficienze o dall'introduzione di normative ambientali che diventeranno sempre più restrittive. Le aziende che adottano soluzioni impiantistiche sostenibili si distinguono per innovazione e responsabilità sociale, migliorando la propria immagine e la propria competitività sul mercato. Un approccio orientato alla sostenibilità non solo ottimizza le performance aziendali, ma riduce i rischi e contribuisce a uno sviluppo industriale più responsabile e duraturo.

La riduzione dell'impatto ambientale rappresenta un criterio essenziale nella valutazione della sostenibilità di una soluzione impiantistica. Limitare le ripercussioni su aria, acqua e suolo non solo tutela l'ecosistema, ma consente anche di migliorare l'efficienza operativa e garantire la conformità alle normative ambientali. Un impianto progettato per ridurre il proprio impatto ambientale risulta più sostenibile, rispetta le regolamentazioni vigenti e ottimizza le prestazioni complessive.

Nel caso specifico del processo di disidratazione e smaltimento dei fanghi industriali, oltre ai costi di realizzazione, gestione e smaltimento, è essenziale valutare il consumo energetico e le emissioni di gas serra generate. Le soluzioni più sostenibili sono quelle che garantiscono bassi consumi, alta efficienza, ridotta produzione di rifiuti e minime emissioni in atmosfera. Inoltre, è opportuno considerare l'eventuale possibilità di valorizzare i rifiuti prodotti, ad esempio attraverso la qualificazione del fango come "*End of Waste*", trasformandolo in una risorsa riutilizzabile.

In questo studio, particolare attenzione è stata dedicata all'analisi delle emissioni di CO₂, considerando l'intero ciclo operativo, dalle fasi di trasporto dei fanghi in uscita dallo stabilimento, alle operazioni di trasferimento nei barconi e movimentazione dei cassoni, fino ai consumi energetici legati al processo stesso. Attraverso un'analisi complessiva, che ha confrontato la disidratazione dei fanghi mediante filtropressatura con quella tramite centrifugazione ed essiccazione, è stato possibile effettuare una valutazione comparativa in termini di sostenibilità tra le due soluzioni impiantistiche, tenendo conto dei rispettivi volumi di fanghi prodotti e del loro impatto ambientale.

6.1 Calcolo emissioni di CO₂ da disidratazione fanghi filtropressati

Volendo analizzare il quantitativo totale di CO₂ prodotta dall'intera linea di trattamento fanghi, sono state prese in considerazione le seguenti fonti di emissioni di gas serra: il trasporto dei fanghi filtropressati e della calce filtropressata destinati a percorrere distanze chilometriche diverse per raggiungere le rispettive mete per smaltirli correttamente; il travaso dei barconi e la movimentazione dei cassoni, i quali implicano spostamenti all'interno dello stabilimento e conseguenti emissioni gassose; il consumo dell'energia elettrica.

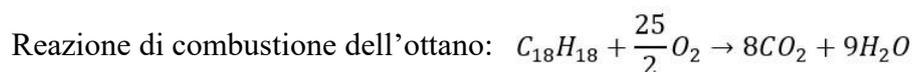
6.1.1 Calcolo emissioni di CO₂ da trasporti

I fanghi filtropressati prodotti dalla *Momentive Performance Materials Specialties Srl* di Termoli sono destinati alla discarica o al cementificio. La distanza da Termoli per raggiungere la discarica è di circa 160 Km, mentre per raggiungere il cementificio è di circa 370 Km. Per quanto concerne la calce filtropressata, essa raggiunge due appositi impianti di depurazione e smaltimento che distano rispettivamente 110 Km e 280 Km. Per cui mediamente i Km percorsi per poter adeguatamente smaltire i rifiuti solidi prodotti sono circa 230 Km.

Ogni trasportatore carica 1 barcone da 30 tonnellate l'uno, per cui ad un viaggio corrisponde il trasporto di 30 tonnellate di rifiuti. Attualmente, il volume dei fanghi e della calce prodotti annualmente è in media 6000 ton/anno (vedasi **Tabella 6**), quindi in un anno sono necessari 200 viaggi per lo smaltimento.

Segue la procedura utilizzata per poter calcolare le emissioni di CO₂:

- Consumo di benzina per un tir carico di 30 tonnellate (1 barcone): 2 L/km
- Consumo di benzina calcolato sulla media dei km percorsi: 460 litri
- Calcolo dei kg di CO₂ prodotti dal consumo di 1 litro di benzina:



Massa molare dell'ottano: 114 g/mol

Massa molare dell'anidride carbonica: 44 g/mol

Massa molare dell'acqua: 18 g/mol

Dalla reazione di combustione si può vedere come da una mole di ottano si producano 8 moli di CO₂ e 9 moli di H₂O; pertanto, bruciando 1 mole di ottano si producono 352 grammi di CO₂ e 162 grammi di H₂O. Il rapporto di combustione in termini di CO₂ emessa e la benzina consumata è:

$$\frac{CO_2 \text{ prodotta}}{1 \text{ mole di } C_8H_{18}} = \frac{352 \text{ g}}{114 \text{ g}} = 3,09$$

Sapendo che la densità della benzina è 0,74 kg/l si imposta il seguente rapporto:

$$0,74 \text{ kg/l} : x = 1 : 3,09$$

$$x = 2,2866 \text{ kg di } CO_2 / \text{ litri di benzina}$$

Alla fine si può determinare quanto segue:

$$2,2866 \text{ kg di CO}_2 / \text{litri di benzina} \times 200 \text{ viaggi/anno} \times 460 \text{ litri di benzina/viaggio} \\ = \mathbf{210367,2 \text{ kg di CO}_2/\text{anno}}$$

Quindi la quantità di CO₂ prodotta dai trasporti necessari per smaltire 6000 ton/anno di fanghi e calce filtropressati corrisponde a circa 211 tonnellate.

6.1.2 Calcolo emissioni di CO₂ da travasi e movimentazioni

Volendo calcolare anche le emissioni di CO₂ prodotte in loco dal travaso dei barconi e dalla movimentazione di ogni cassone si utilizzano i dati presenti nelle **Tabella 10** e **11**:

	CASSONI
Numero degli spostamenti/movimentazioni	1333
Durata di ogni spostamento	30 minuti
Consumo per ogni spostamento	3 litri/h

Tabella 10: dati relativi ai cassoni di fango riempiti all'anno.

	BARCONI
Numero dei travasi	200
Durata di ogni travaso	2 h
Consumo per ogni travaso	6 litri/h

Tabella 11: dati relativi ai barconi di fango riempiti all'anno.

Dal calcolo effettuato nel precedente sottoparagrafo si sa che per ogni litro di benzina consumato si producono 2,2866 kg di CO₂. Quindi, si possono calcolare le seguenti quantità:

- quantità di CO₂ prodotta dalla movimentazione dei cassoni: 4572 kg di CO₂ / anno;
- quantità di CO₂ prodotta dal travaso dei barconi: 5488 kg di CO₂ / anno.

Quindi, le emissioni di gas serra dovute ai travasi e alla movimentazione dei fanghi filtropressati, producono in totale 10 tonnellate di CO₂ all'anno.

6.1.3 Calcolo emissioni di CO₂ dal consumo di energia elettrica

L'ultima fonte di emissione di anidride carbonica analizzata da questo studio è il consumo di energia elettrica, consumo che è stato determinato nel capitolo precedente al fine di calcolarne i costi. Secondo ISPRA nel 2023 le emissioni di CO₂ per kWh in Italia sono state pari a 257,2 g CO₂/kWh (produzione elettrica lorda). Convertendolo in chilogrammi il risultato finale è pari a 0,2572 Kg CO₂/kWh. Questo dato rappresenta l'approccio *location-based* perché si basa sul mix energetico della rete elettrica nazionale.

Conoscendo quindi quale sia il consumo dell'energia elettrica della filtropressa impiegata nella disidratazione dei fanghi e sapendo il valore dei grammi di anidride carbonica prodotta per ogni kWh consumato fornito dall'ISPRA, si calcola la quantità di CO₂ prodotta dal funzionamento della filtropressa come segue:

$$\frac{6000 \text{ ton/anno}}{4,5 \text{ ton/filtropressata}} \times 2,5 \frac{h}{\text{filtropressata}} \times 25 \text{ kWh} \times 0,2572 \text{ kg di CO}_2/\text{kWh} \\ = \mathbf{21433 \text{ kg di CO}_2/\text{anno}}$$

In conclusione, l'impiego della filtropressa, attualmente presente in impianto, per la disidratazione dei fanghi provenienti dai due chiarificatori D-823 e D-854, genera annualmente un quantitativo di CO₂ pari a 21433,2 kg.

6.2 Calcolo emissioni di CO₂ da disidratazione fanghi centrifugati ed essiccati

Adesso si vuole analizzare il quantitativo totale di CO₂ prodotta dalla nuova linea di trattamento fanghi, con l'implementazione della futura soluzione impiantistica, prendendo in considerazione le stesse fonti di emissioni di gas serra usate nel paragrafo precedente: il trasporto dei fanghi essiccati e della calce essiccata verso impianti di recupero e smaltimento; il travaso dei barconi e la movimentazione dei cassoni, i quali implicano spostamenti all'interno dello stabilimento e conseguenti emissioni gassose; il consumo dell'energia elettrica.

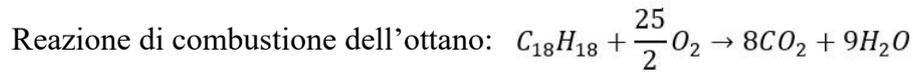
6.2.1 Calcolo emissioni di CO₂ da trasporti

I fanghi essiccati percorrono mediamente 230 Km (come calcolato nel paragrafo 6.1.1) per raggiungere la discarica, oppure il cementificio, oppure nel caso della calce essiccata diversi impianti di recupero, valorizzazione e smaltimento.

Ogni trasportatore carica 1 barcone da 30 tonnellate l'uno, per cui ad un viaggio corrisponde il trasporto di 30 tonnellate di rifiuti. In futuro, il volume dei fanghi e della calce prodotti annualmente sarà in media 3000 ton/anno (vedasi **Tabella 6**), quindi in un anno saranno necessari 100 viaggi per lo smaltimento.

La procedura utilizzata per poter calcolare le emissioni di CO₂ è la medesima utilizzata per la filtropressa nel paragrafo 6.1.1:

- Consumo di benzina per un tir carico di 30 tonnellate (1 barcone): 2 L/km
- Consumo di benzina calcolato sulla media dei km percorsi: 460 litri
- Calcolo dei kg di CO₂ prodotti dal consumo di 1 litro di benzina:



Dalla reazione di combustione si può vedere come da una mole di ottano si producano 8 moli di CO₂ e 9 moli di H₂O; pertanto, bruciando 1 mole di ottano si producono 352 grammi di CO₂ e 162 grammi di H₂O. Il rapporto di combustione in termini di CO₂ emessa e la benzina consumata è:

$$\frac{CO_2 \text{ prodotta}}{1 \text{ mole di } C_8H_{18}} = \frac{352 \text{ g}}{114 \text{ g}} = 3,09$$

Sapendo che la densità della benzina è 0,74 kg/l si imposta il seguente rapporto:

$$0,74 \text{ kg/l} : x = 1 : 3,09$$

$$x = 2,2866 \text{ kg di } CO_2 / \text{ litri di benzina}$$

Alla fine si può determinare quanto segue:

$$2,2866 \text{ kg di } CO_2 / \text{ litri di benzina} \times 100 \text{ viaggi/anno} \times 460 \text{ litri di benzina/viaggio} \\ = \mathbf{105183,6 \text{ kg di } CO_2 / \text{ anno}}$$

Quindi la quantità di CO₂ prodotta dai trasporti necessari per smaltire 3000 ton/anno di fanghi e calce essiccati corrisponde a circa 105 tonnellate, che coincide esattamente alla metà del quantitativo prodotto usando la filtropressa per disidratare i fanghi.

Questa conclusione deriva dal fatto che dimezzando in futuro il volume dei fanghi, anche il numero di viaggi necessari per lo smaltimento saranno la metà, per cui l'anidride carbonica associata verrà dimezzata.

6.2.2 Calcolo emissioni di CO₂ da travasi e movimentazioni

Volendo calcolare anche le emissioni di CO₂ prodotte in loco dal travaso dei barconi e dalla movimentazione di ogni cassone si utilizzano i dati presenti nelle **Tablelle 12 e 13**.

Dal calcolo effettuato nel precedente sottoparagrafo si sa che per ogni litro di benzina consumato si producono 2,2866 kg di CO₂. Quindi, si possono calcolare le seguenti quantità:

- quantità di CO₂ prodotta dalla movimentazione dei cassoni: 2288 kg di CO₂ / anno;
- quantità di CO₂ prodotta dal travaso dei barconi: 2744 kg di CO₂ / anno.

	CASSONI
Numero degli spostamenti/movimentazioni	667
Durata di ogni spostamento	30 minuti
Consumo per ogni spostamento	3 litri/h

Tabella 12: dati relativi ai cassoni di fango riempiti all'anno.

	BARCONI
Numero dei travasi	100
Durata di ogni travaso	2 h
Consumo per ogni travaso	6 litri/h

Tabella 13: dati relativi ai barconi di fango riempiti all'anno.

Quindi, le emissioni di gas serra dovute ai travasi e alla movimentazione dei fanghi essiccati, producono in totale 5 tonnellate di CO₂ all'anno, la metà rispetto ai travasi e alla movimentazione dei fanghi filtropressati, perché il volume dei fanghi prodotti è dimezzato.

6.2.3 Calcolo emissioni di CO₂ dal consumo di energia elettrica

Conoscendo quale sia il consumo dell'energia elettrica a regime della centrifuga e dell'essiccatore modulare impiegati nella disidratazione dei fanghi, sapendo il valore dei grammi di anidride carbonica prodotta per ogni kW/h consumato fornito dall'ISPRA e sapendo quante ore annuali sarà operativo l'impianto di disidratazione, si calcola la quantità di CO₂ prodotta dal funzionamento della centrifuga seguita in continuo dall'essiccatore, come segue:

$$16 \text{ ore/giorno} \times 350 \text{ giorni/anno} \times (135 + 70) \text{ kWh} \times 0,2572 \text{ kg di CO}_2/\text{kWh} \\ = \mathbf{295266 \text{ kg di CO}_2/\text{anno}}$$

In conclusione, l'impiego futuro della centrifuga e dell'essiccatore, per la disidratazione dei fanghi provenienti dai due chiarificatori D-823 e D-854, genera annualmente un quantitativo di CO₂ pari a 405481,6 kg.

6.3 Confronto e valutazione in termini di sostenibilità tra le due soluzioni

Con i numeri alla mano non si può trascurare l'aumento di anidride carbonica che si provocherebbe nell'ipotesi di sostituzione della filtropressa con la centrifuga e l'essiccatore. L'aumento deriva però solo ed esclusivamente dall'incremento dei consumi energetici di questo binomio di apparecchiature. I consumi energetici sono stati forniti dalle aziende produttrici sia in fase di avviamento in cui i consumi sono più elevati, sia a pieno regime in cui diminuiscono notevolmente.

Seppur i consumi energetici a regime siano minori rispetto a quelli in fase di avviamento, si parla comunque di un consumo totale di 205 kW/h, a fronte dei 25 kW/h consumati dalla filtropressa attuale. Quindi questo rappresenta un forte svantaggio della nuova soluzione impiantistica.

In virtù di questo risultato serve fare un breve approfondimento in termini di energia riguardante l'azienda *Momentive* di Termoli.

A seguito dell'aggiornamento dell'accordo del 2021 con l'ente gestore per la fornitura di energia elettrica, dal 2022 lo stabilimento utilizza esclusivamente energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili, prelevata dalla rete esterna. Nel 2018 si è registrata una significativa riduzione del consumo di energia elettrica dalla rete, attribuibile all'installazione di un impianto di cogenerazione, entrato a pieno regime il 3 ottobre 2017.

Analizzando i consumi totali di energia elettrica, nel 2023 si è osservata una riduzione di circa 1.000 MWh rispetto all'anno precedente, risultato sia della minore dipendenza dall'energia esterna sia della produzione autonoma generata dall'impianto di cogenerazione. Sono attualmente in fase di attuazione diversi progetti di efficientamento energetico, alcuni dei quali derivanti dal processo di certificazione ISO 50001. Tra gli interventi già realizzati o in fase di completamento si evidenziano:

- Ottimizzazione del recupero di calore e acqua calda dal cogeneratore;
- Studio e implementazione di un nuovo bruciatore a basse emissioni nella caldaia X2152, con valutazione di un sistema di riscaldamento dell'aria in ingresso tramite batteria riscaldante ad acqua o vapore dal cogeneratore;
- Sostituzione del compressore X1720 con un nuovo modello ad inverter e prestazioni migliorate, affiancato da una centralina innovativa per il coordinamento dell'avvio e dello stop in funzione del carico;
- Studio del recupero energetico dal salto di pressione della linea di ingresso metano;
- Analisi per l'ottimizzazione del sistema di raffreddamento della sala controllo;
- Revamping del sistema di produzione di azoto on-site, per una maggiore efficienza operativa.

Questi interventi mirano a migliorare ulteriormente l'efficienza energetica dello stabilimento, riducendo i consumi e le emissioni, in un'ottica di sostenibilità e ottimizzazione delle risorse.

Quindi, poiché parte dell'energia elettrica necessaria alla conduzione dell'impianto viene alimentata dal cogeneratore in loco e la quota rimanente viene acquistata da un ente esterno che produce energia elettrica pulita, proveniente dall'esclusivo utilizzo di fonti rinnovabili, si può affermare che l'idea di implementare un impianto che incrementa notevolmente il consumo energetico non è prettamente vincolante. È inoltre importante considerare che i valori di consumo energetico disponibili sono stime teoriche fornite dai produttori e che le ore effettive di operatività dell'impianto non saranno sempre quelle massime pari a 16 ore al giorno, ma varieranno in base ai ritmi produttivi dello stabilimento.

La *Momentive Performance Materials Specialties Srl* di Termoli ha una serie di obiettivi futuri da realizzare sempre rimanendo in questa visuale di efficienza, ottimizzazione, sostenibilità.

L'ottimizzazione e il miglioramento di un processo richiedono valutazioni trasversali in diversi ambiti. Nel caso specifico, l'introduzione di un nuovo impianto di disidratazione presenta numerosi vantaggi, precedentemente analizzati, ma comporta un aumento del consumo energetico. Per questo motivo, è necessario trovare un compromesso, scegliendo una soluzione che offra benefici complessivi senza necessariamente risultare ottimale sotto ogni singolo aspetto.

6.4 Recupero e valorizzazione dei rifiuti: *End of Waste*

Affinché un fango possa essere qualificato come sottoprodotto, è necessario che soddisfi i requisiti stabiliti dall'art. 184-bis del Testo Unico Ambientale (T.U.A.), che prevedono:

- a. La sostanza o il materiale deve derivare da un processo produttivo principale, senza che la sua produzione costituisca l'obiettivo primario del processo stesso.
- b. Deve essere certo che la sostanza sarà effettivamente riutilizzata, sia nello stesso processo produttivo sia in uno successivo, da parte del produttore o di terzi.
- c. Il materiale deve poter essere utilizzato direttamente, senza necessità di trattamenti aggiuntivi, oltre a quelli previsti nelle normali pratiche industriali.
- d. Il riutilizzo deve essere conforme alla normativa vigente, garantendo il rispetto dei requisiti di sicurezza ambientale e sanitaria, senza generare impatti negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

Inoltre, la sentenza del Consiglio di Stato n. 1229/2018 ha stabilito che solo lo Stato ha la competenza per definire le condizioni in cui un processo di recupero dei rifiuti possa generare un prodotto qualificabile come "End of Waste" (cessazione della qualifica di rifiuto). Secondo l'articolo 6 della Direttiva 2008/98/CE: *“Gli stati membri adottano misure appropriate per garantire che i rifiuti sottoposti a un'operazione di riciclaggio o di recupero di altro tipo cessino di essere considerati tali se soddisfano le seguenti condizioni:*

- 1) *la sostanza o l'oggetto è destinata/o a essere utilizzata/o per scopi specifici;*
- 2) *esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto;*
- 3) *la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;*
- 4) *l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.”*

Le normative illustrate permettono di introdurre i concetti di *End of Waste* e sottoprodotto, elementi chiave per favorire la transizione verso un modello di economia circolare [19].

Nello stabilimento chimico oggetto di studio è presente un impianto di produzione, non sempre attivo, che concerne la produzione dell'acetilene. La reazione che porta alla formazione dell'acetilene genera anche un sottoprodotto che è identificato dalla calce liquida. La calce liquida ad una concentrazione compresa tra il 15% e il 20% in secco, viene utilizzata per la reazione di neutralizzazione, la quale serve a garantire alle acque di scarico un pH controllato, compreso tra 5,5 e 9,5, quando escono dallo stabilimento. L'eccesso di questa calce liquida viene filtropressata e smaltita esternamente. A questo punto vale la pena capire se la calce liquida possa rispettare tutti i requisiti per poter essere qualificata come sottoprodotto e poterla vendere come *End of Waste*.

Il primo requisito è soddisfatto in quanto la calce liquida è una sostanza che viene prodotta da un processo di cui non costituisce lo scopo primario, il quale risulta essere l'acetilene. Il secondo requisito concerne l'impiego certo e anche questo è rispettato perché la calce liquida viene usata all'interno dello stabilimento per la neutralizzazione delle acque reflue.

Il terzo requisito è ampiamente soddisfatto in quanto la calce liquida non viene trattata in alcun modo e non subisce alcuna modifica prima di essere usata per la neutralizzazione.

Infine, come ultimo requisito, la sostanza o il materiale destinato all'utilizzo deve rispettare tutti i requisiti previsti per il prodotto finale, garantendo la tutela della salute umana e dell'ambiente, senza generare impatti complessivi negativi. Tali requisiti devono assicurare che l'impiego dei sottoprodotti non provochi emissioni o effetti diversi da quelli già autorizzati per l'impianto in cui verranno utilizzati. Nel caso specifico, la calce liquida sostituisce completamente l'uso di una materia prima che, altrimenti, sarebbe stata acquistata da produttori esterni, ovvero la calce anidra. Di conseguenza, l'impiego di questa sostanza non altera l'impatto ambientale e produttivo rispetto all'uso della calce anidra nel processo industriale in cui viene integrata.

Avendo quindi associato che la calce liquida possa essere identificata come sottoprodotto, si potrebbe pensare di venderla, qualora ci fosse un eccesso, piuttosto che essicarla e smaltirla. Quindi si vuole comprendere in termini economici quale possa essere la scelta più conveniente per l'azienda.

Nel 2025 l'azienda prevede la produzione di 1400 tonnellate del prodotto A-171. L'A-171 è un silano impiegato come agente di accoppiamento e additivo nelle resine termoplastiche ed elastomeriche. Un esempio di applicazione dell'A-171 è il suo utilizzo nel settore dei cavi elettrici, dove contribuisce a migliorare la resistenza alla trazione e l'allungamento relativo nei materiali isolanti utilizzati per il rivestimento dei cavi. Per produrre 1 kg di A-171 servono 1,1 kg di Y-11385, il viniltrimetossisilano, l'intermedio dal quale per distillazione si ottiene il prodotto finale A-171. Il composto Y-11385 è prodotto facendo reagire l'acetilene con il trimetossisilano (TMS). 1 kg di Y-11385 produce 0,61 kg di calce anidra. Si calcola quindi la calce anidra prodotta per poter ottenere la quantità stimata di A-171 per il 2025.

Calce anidra prodotta:

$$1400 \times 1000 \text{ kg di A171} \times 1,1 \frac{\text{kg di Y11385}}{1 \text{ kg di A171}} \times 0,61 \frac{\text{kg di calce anidra}}{1 \text{ kg di Y11385}} = 939400 \text{ kg}$$

La calce necessaria alla neutralizzazione delle acque reflue è così determinata:

- nel 2025 si stima di produrre 1100 tonnellate di CNE⁴ e 700 tonnellate di CNM⁵
- per neutralizzare 1 kg di CNE servono 0,52 kg di calce anidra
- per neutralizzare 1 kg di CNM servono 0,684 kg di calce anidra

quindi la calce anidra che serve per neutralizzare 1100 tonnellate di CNE è pari a

$$1100 \times 1000 \text{ kg di CNE} \times 0,52 \frac{\text{kg di calce anidra}}{\text{kg di CNE}} = 572000 \text{ kg di calce anidra}$$

Mentre la calce anidra che serve per neutralizzare 700 tonnellate di CNM è pari a:

$$700 \times 1000 \text{ kg di CNM} \times 0,684 \frac{\text{kg di calce anidra}}{\text{kg di CNE}} = 478800 \text{ kg di calce anidra}$$

La quantità di calce anidra totale necessaria alla neutralizzazione delle acque reflue è di 1050800 kg.

⁴ CNE: cianoetilrietossisilano

⁵ CNM: cianoetiltrimetossisilano

Dal momento che la quantità di calce anidra prodotta è inferiore a quella necessaria per la neutralizzazione delle acque reflue, l'ipotesi di qualificazione come End of Waste non risulta applicabile. Questo perché non vi è alcun eccesso di calce da smaltire, filtropressare o vendere.

Si potrebbe ipotizzare di avere un incremento della produzione di A-171 così da valutare l'eventuale possibilità di ottenere un eccesso di calce e capire quale sia la scelta più conveniente per l'azienda determinandone i costi di smaltimento e servizio in caso di filtropressatura, in caso di centrifugazione ed essiccazione oppure in caso di vendita.

Si ipotizza una produzione annuale di 2000 tonnellate del prodotto A-171.

Per produrre 1 kg di A-171 servono 1,1 kg di Y-11385 e 1 kg di Y-11385 produce 0,61 kg di calce anidra. Si calcola quindi la calce anidra prodotta per poter ottenere la quantità ipotizzata di A-171 prodotto.

Calce anidra prodotta:

$$2000 \times 1000 \text{ kg di A171} \times 1,1 \frac{\text{kg di Y11385}}{1 \text{ kg di A171}} \times 0,61 \frac{\text{kg di calce anidra}}{1 \text{ kg di Y11385}} = 1342000 \text{ kg}$$

La produzione di CNE e CNM risulta invariata perché l'esterificazione responsabile della loro produzione lavora già al 100% dell'efficienza, per cui la quantità di calce anidra totale necessaria alla neutralizzazione delle acque reflue rimane di 1050800 kg.

L'eccesso di calce anidra secondo la nuova ipotesi di produzione del prodotto finale A-171 è di 291200 kg, che corrispondono a 1941333 kg di calce liquida al 15% in secco, ossia 1941 tonnellate.

Se si decidesse di filtropressare e smaltire la calce liquida si avrebbe la seguente spesa da sostenere:

$$1941 \text{ ton} \times \frac{0,15}{0,45} \times (282 + 58) \text{ €/ton} = \text{€}220.018$$

dove, €282 è il costo dello smaltimento per ogni tonnellata di calce filtropressata e €58 è il costo del trasporto quando si producono da 0 a 2000 tonnellate all'anno, come da contratto tra la *Momentive* e l'azienda che offre il servizio di disidratazione fanghi mediante filtropressa e prelievo di quest'ultimi.

Se invece si valutasse la possibilità di filtropressarla, essiccarla e smaltirla, adottando la nuova soluzione proposta si avrebbe la seguente spesa da sostenere:

$$1941 \text{ ton} \times \frac{0,15}{0,95} \times (282 + 167) \text{ €/ton} = \text{€}220.018$$

dove, €282 è il costo dello smaltimento per ogni tonnellata di calce essiccata e €167 è il costo di servizio ricavato dal seguente calcolo:

$$555600 \text{ €/anno} / \left[\frac{(1941 \text{ ton} \times \frac{0,15}{0,45})}{2} + 3000 \text{ ton/anno} \right] = 167 \text{ €/ton}$$

in cui €555600 è il costo del noleggio annuale della centrifuga, mentre la quantità nelle parentesi quadre rappresenta il volume totale prodotto dei fanghi e della calce post centrifugazione ed essiccazione.

Se come ultima opzione si valutasse l'idea di poterla vendere e quindi conferirle la qualifica di *End of Waste* si avrebbe la seguente spesa:

$$(1941 \text{ ton}/25 \text{ ton}/\text{viaggio}) \times 1600 \text{ €/viaggio} = \text{€}124245.$$

Escludendo dal calcolo il consumo di energia elettrica necessario per la filtropressatura, centrifugazione ed essiccazione della calce in eccesso, si può già affermare che la qualifica come *End of Waste* rappresenta l'opzione più sostenibile ed economicamente vantaggiosa per valorizzare il materiale, trasformandolo da rifiuto in un prodotto vendibile.

Pertanto, se si dovesse avere un incremento della produzione di A-171 come precedentemente ipotizzato, l'eccesso di calce liquida accumulata nello stabilimento cessa di essere qualificata come rifiuto e può essere venduta, in quanto il costo del trasporto messo a confronto con i costi che si avrebbero considerando le altre due opzioni descritte, risulta essere inferiore, per cui l'*End of Waste* è la soluzione più economica e sostenibile.

7. Conclusioni

L'analisi condotta in questa tesi ha permesso di valutare soluzioni impiantistiche alternative per la gestione dei fanghi industriali prodotti presso la *Momentive Performance Materials Specialties S.r.l.* di Termoli, con l'obiettivo di ridurre i volumi di fango da smaltire, ottimizzare i costi operativi e migliorare la sostenibilità ambientale del processo.

Dallo studio è emerso che l'implementazione di un impianto di disidratazione dei fanghi costituito da una centrifuga e un essiccatore modulare rappresenta una scelta più efficiente rispetto alla filtropressa attuale, consentendo di abbattere i costi di smaltimento grazie a una maggiore riduzione del contenuto d'acqua nei fanghi e, di conseguenza, a una minore quantità di materiale da trasportare e trattare. La valutazione economica ha evidenziato un *Saving* annuo significativo, rendendo l'investimento in questa nuova tecnologia vantaggioso nel medio-lungo termine.

Dal punto di vista ambientale, con l'analisi delle emissioni di CO₂ è emerso uno svantaggio della nuova soluzione in termini energetici, in quanto consumerebbe 205 kWh a fronte degli attuali 25 kWh consumati dalla filtropressa, con un conseguente notevole incremento delle emissioni gassose. Dal momento che una parte dell'energia elettrica necessaria al funzionamento dell'impianto è fornita dal cogeneratore interno e la restante quota proviene da un fornitore esterno che utilizza esclusivamente fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica, l'incremento del consumo energetico derivante dall'implementazione di un nuovo impianto non rappresenta un fattore limitante assoluto. È inoltre fondamentale considerare che i dati di consumo energetico disponibili sono stime teoriche fornite dai produttori e che le ore effettive di operatività dell'impianto non saranno costantemente pari a 16 ore al giorno, ma varieranno in base ai ritmi produttivi dello stabilimento.

L'ottimizzazione di un impianto richiede valutazioni trasversali che coinvolgano aspetti tecnici, economici ed ambientali. Nel caso specifico, l'adozione di un nuovo sistema di disidratazione offre numerosi vantaggi analizzati dettagliatamente, ma comporta anche un maggiore fabbisogno energetico. Per questo motivo, è necessario trovare un equilibrio tra benefici e costi, optando per una soluzione che garantisca un miglioramento complessivo, pur senza essere perfetta sotto ogni singolo aspetto. In aggiunta, è stata esplorata la possibilità di valorizzare la calce liquida prodotta, qualificandola come End-of-Waste, il che consentirebbe di trasformarla da rifiuto a risorsa riutilizzabile in altri settori industriali.

Nonostante i numerosi vantaggi individuati, l'implementazione della nuova soluzione richiede un'attenta pianificazione, considerando sia i costi iniziali di investimento che le variabili operative, come le ore effettive di utilizzo dell'impianto e le condizioni di mercato per la vendita della calce recuperata. In prospettiva futura, sarebbe opportuno approfondire ulteriormente l'efficienza del processo attraverso test pilota su scala industriale, monitorando i risultati in un tempo mediamente lungo per individuare le condizioni operative ottimali. Inoltre, un'eventuale integrazione con fonti energetiche rinnovabili potrebbe rendere il sistema ancora più sostenibile, riducendo ulteriormente il suo impatto ambientale.

In conclusione, questa ricerca ha dimostrato che l'adozione di soluzioni innovative per il trattamento dei fanghi industriali può portare benefici economici, ambientali e operativi, contribuendo alla transizione verso un modello produttivo più efficiente e sostenibile.

8. Bibliografia e sitografia

1. De Feo, G., De Gisi, S., Galasso, M., (2014). *Fanghi di depurazione: produzione, caratterizzazione e trattamento*. Dario Flaccovio Editore.
2. Urbini, G., (1979). *Tecnologia dei trattamenti di depurazione degli scarichi industriali*. Volumi I e II. Atti del Corso di Aggiornamento internazionale organizzato dall'Istituto di Ingegneria Sanitaria del Politecnico di Milano in collaborazione con la Vanderbilt University, USA; coordinatore degli Atti: Giordano Urbini.
3. Masotti, L., (1975). Trattamento dei fanghi. *Impianti a fanghi attivi con stabilizzazione aerobica del fango*, XV(5), 153-161.
4. Demirbas, A., Coban, V., Taylan, O., Kabli, M., (2017). Aerobic digestion of sewage sludge for waste treatment. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(10), 1056-1062.
5. Visigalli, S., Spinosa, L., Canziani, R., (2019). Tecnologie di disidratazione dei fanghi. *Ingegneria dell'Ambiente*, 6(4).
6. Kamizela, T., Kowalczyk, M., (2019). Sludge dewatering: Processes for enhanced performance. *Industrial and Municipal Sludge*, 399-423.
7. Hashimoto, M., Hiraoka, M., (1990). Characteristics of sewage sludge affecting dewatering by belt press filter. *Water Science and Technology*, 22(12), 143-152.
8. Ginisty, P., Mailler, R., & Rocher, V., (2021). Sludge conditioning, thickening and dewatering optimization in a screw centrifuge decanter: Which means for which result? *Journal of environmental management*, 280, 111745.
9. Vaxelaire, J., Bongiovanni, J. M., Puiggali, J. R., (1999). Mechanical dewatering and thermal drying of residual sludge. *Environmental technology*, 20(1), 29-36.
10. Relazione annuale 2021 Momentive Performance Materials di Termoli. Reperibile online: <https://www.regione.molise.it/flex/cm/pages/ServeAttachment.php/L/IT/D/1%252Fa%252F9%252FD.689550c397b8c3209e0c/P/BLOB%3AID%3D16885/E/pdf?mode=download>
11. Benozzo, M., (2012). La gestione dei rifiuti. *Rischio di impresa e tutela dell'ambiente*, 143-204. ESI Edizioni Scientifiche Italiane.
12. Peeters, B., Dewil, R., Smets, I. Y., (2012). Improved process control of an industrial sludge centrifuge-dryer installation through binary logistic regression modeling of the fouling issues. *Journal of Process Control*, 22(7), 1387-1396.

13. Peeters, B., (2010). Mechanical dewatering and thermal drying of sludge in a single apparatus. *Drying Technology*, 28(4), 454-459.
14. Tosi, N., (1976). *Tecniche dei trattamenti di depurazione dei liquami domestici*. (Doctoral dissertation).
15. Spinosa, L., Mininni, G., (1984). Assessment of sludge centrifugability. *Methods of Characterization of Sewage Sludges*, 16-30.
16. Dellacqua, L., (2020). *Caratterizzazione e valutazione sulla termovalorizzazione dei fanghi di depurazione = characterization and evaluation on the inceneration of waste water sludge*. Doctoral dissertation, Politecnico di Torino.
17. Pirotta, N., (2014). *Studio di fattibilità tecnico-economica di un impianto di incenerimento fanghi urbani con recupero termico tramite ORC*. Tesi di laurea, Politecnico di Milano.
18. Canato, M., Bertanza, G., Papiri, S., (2012). *Tecniche innovative per il trattamento/recupero dei fanghi di depurazione delle acque reflue*. Doctoral dissertation, Università di Pavia.
19. Direttiva 2008/98/Ce del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive. Reperibile online: [D.Lgs. 3 dicembre 2010, n. 205 - Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive \(G.U. 10 dicembre 2010 n. 288, S.O. n. 269\) | Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica](#)

14. Ringraziamenti

Ringrazio i miei genitori che mi hanno dato la possibilità di sostenere questo percorso, facendo fronte a tutte le difficoltà che ne sono scaturite. Mi avete dato fiducia e questa per me è la cosa più importante, perché mi sono sentita al sicuro, appoggiata e affiancata in ogni mio piccolo traguardo raggiunto ma soprattutto ad ogni mia sconfitta. Vi ringrazio per tutto quello che mi avete insegnato, ora finalmente posso raccogliere i frutti dei sacrifici che abbiamo fatto insieme.

Ringrazio Giuseppe. Sei stato al mio fianco ogni giorno, non facendomi mai sentire sbagliata quando avevo perso di vista l'obiettivo, perché non avevo più quella voglia, caparbia ed entusiasmo che piano piano sei riuscito a farmi ritrovare ricordandomi chi fossi e quanto valessi per te. I momenti difficili vissuti insieme valgono tutte le lacrime di gioia di questa vittoria. Spero tu possa essere fiera di me come lo sono io di te.

Ringrazio Giovanni. A te ho voluto dedicare questo lavoro di tesi perché nonostante tu sia il più piccolo, rappresenti il più grande esempio di determinazione, coraggio, tenacia e dedizione. Vorrei che questo mio pensiero ti possa spronare a continuare a fare sempre meglio, ricordandoti che anche quando i percorsi inseguiti non portano alle mete che desideri, ci sarà sempre il momento della rivincita in cui riuscirai ad ottenere quello che meriti, quello che sogni e anche di più di ciò che immagini.

Ringrazio i miei nonni. Sono la ragazza più fortunata al mondo, perché vi ho tutti e quattro qui a gioire per me. A nonno Giovanni, al nostro amore incondizionato che ci lega dalla nascita, grazie perché hai combattuto per essere al mio fianco oggi, sei l'emblema dell'ottimismo, della forza e dell'altruismo a cui io mi ispiro. A nonna Netta, grazie perché mi hai sempre tutelata, protetta, incoraggiata. Vederti qui oggi mi rende felice, perché so quanto sia complicato per te ma allo stesso tempo so quanto tu tenga alla nostra famiglia di cui sei il cardine. A nonno Nicola, ci hai creduto più di me, dal primo giorno. Oggi finalmente posso renderti fiero. A nonna Nenella, probabilmente non riuscirai a farmi un sorriso, o forse sì, ma credo che un giorno riusciremo di nuovo a parlare, a guardarci negli occhi e potrò raccontarti di questo giorno trascorso a Torino tutti insieme. Sei comunque qui con noi, nel cuore dei tuoi figli e dei tuoi nipoti.

Ai miei zii di cui non potrò mai fare a meno. Penso che non avrei potuto avere una famiglia migliore della nostra, siete preziosi per me. Con ognuno di voi ho condiviso qualcosa, ho un bagaglio di ricordi troppo carico di cose belle. Mi siete sempre stati vicini ed io ve ne sarò per sempre grata.

Ai miei cugini, Antonia, Michele, Antonio, Nicola, Federica, Costanza, Nicola piccolo e Aurora, dal maggiore al minore occupate tutti un posto importante nel mio cuore e nella mia vita. Mi amate conoscendo tutti i miei difetti, avete sempre fatto il tifo per me e io vi ringrazio tutti perché anche in questo giorno speciale avete fatto l'impossibile per esserci.

Ringrazio Concetta, nessuno più di lei conosce le difficoltà di questo percorso. Sei stata una vera amica perché ho potuto contare su di te sempre. Abbiamo condiviso la quotidianità, abbiamo avuto modo di avvicinarci più di quanto lo fossimo già. Spero che tu oggi possa avere la dimostrazione di quello che ci siamo sempre dette, perché il panorama vale tutta la salita. Sei più forte di quanto pensi, quindi non mollare perché anche io voglio gioire per te.

Ringrazio Angelica, che è dimostrazione di vicinanza costante e silenziosa, lei c'è sempre e comunque, anche dopo mesi di silenzio e di assenza. Sono orgogliosa di averti nella mia vita e di vivere insieme i momenti più importanti. Vorrei che la felicità di questo giorno sia di rivincita per entrambe all'impossibilità di festeggiare insieme lo scorso traguardo.

Ringrazio Raffaella e Nicola, con cui ho creato un rapporto bellissimo, fatto di gesti semplici e dimostrazioni di affetto. Siete dei veri amici per me, so di poter contare su di voi. Grazie per aver condiviso ogni piccolo step di questo percorso e per avermi fatto entrare nella vostra vita ed ora in quella del piccolo nuovo arrivato Alessandro.

Ringrazio Clarissa, a cui mi sono legata senza neanche sapere come. Siamo così diverse quanto complementari, riesci a trasmettere la tua autenticità anche in un abbraccio. Grazie perché ci sei stata, mi hai ascoltata e mi hai spronata a continuare.

Ringrazio Federica, che mi ha dato consigli preziosi, mi ha capita senza giudicarmi. Il nostro legame non può essere descritto a parole. Le nostre vite si sono intrecciate senza più slegarsi e quando qualcuna ha bisogno dell'altra siamo lì pronte a sostenerci. Grazie perché hai sempre avuto un pensiero per me, oggi sono io ad averlo per te.

Ringrazio le mie amiche, uniche ed inimitabili. Siete la spensieratezza nei momenti difficili, siete il caos e l'allegria. Grazie perché ognuna di voi è indispensabile nel nostro gruppo, senza il quale io non potrei sentirmi libera di essere me stessa. Come farei senza di voi.

Infine, ma non per importanza, ringrazio l'Ing. D'Ardes e l'Ing. Iannacci che hanno avuto estrema fiducia in me e nelle mie capacità senza conoscermi. Sono felice di avervi incontrati alla fine di un percorso che necessitava di una nuova esperienza, è stata quella scossa che mi ha dato la giusta energia per affrontare un nuovo capitolo della mia vita, quello lavorativo. Mi avete insegnato tanto senza saperlo, spero di potervi rendere fieri di me un giorno.