

DGR 1800 del 15 dicembre 2021

2° PERIODO DI PROGETTO –RELAZIONE INTERMEDIA PROGETTO INERTEX

WP-2

TITOLO DELIVERABLE

D5_bis - Report contenente schede descrittive delle tecniche/tecnologie selezionate per l'inertizzazione dei rifiuti, sulla base dello stato fisico dei rifiuti.

CONTENUTI

1. Obiettivi iniziali
2. Metodologia adottata
3. Risultati ottenuti
4. Ruoli e attività svolta dai partner
5. Ruoli e attività svolta dai consulenti
6. Bibliografia

1. Obiettivi iniziali

L'obiettivo di questa Task è stato quello di individuare tecniche/tecnologie impiegabili per l'inertizzazione dei rifiuti già esistenti. È stato un processo complesso reso difficoltoso dai numerosi parametri che possono essere presi in considerazione. Per le finalità del progetto, sono stati selezionati e quindi presi in considerazione i seguenti parametri:

- caratterizzazione dei rifiuti: composizione e la pericolosità dei rifiuti;
- normative e regolamentazioni: è fondamentale tenere conto delle normative e delle regolamentazioni locali, nazionali e internazionali; le leggi ambientali possono imporre limiti e requisiti specifici per la gestione dei rifiuti, inclusa l'inertizzazione;
- valutazione del rischio associato a ciascun tipo di rifiuto (potenziali impatti sulla salute umana e sull'ambiente).

Una volta definiti la natura dei rifiuti, il livello di rischio e riesaminata la normativa cogente, è stato possibile identificare e selezionare le tecnologie disponibili industrialmente e più interessanti per l'inertizzazione. Ogni tecnologia ha i suoi vantaggi e svantaggi: oltre alla pericolosità dei fattori sono state fatte valutazioni in merito alla quantità di rifiuti teoricamente da trattare (dati di mercato), i costi e ovviamente i requisiti normativi.

Una attenzione è stata posta sulla fattibilità economica delle tecnologie, ossia una stima dei costi di implementazione e gestione a lungo termine, confrontati con i benefici attesi.

2. Metodologia adottata

Partendo da una buona conoscenza della composizione e la pericolosità dei rifiuti derivante dall'esperienza dei partner di progetto, l'indagine si è sviluppata tenendo in conto gli indirizzi e prescrizioni della normativa italiana riguardante la miscelazione dei rifiuti, contenuta nel Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante il "Codice dell'ambiente". Al riguardo, è opportuno ricordare alcuni vincoli: l'articolo 187 del Codice dell'ambiente disciplina le miscelazioni di rifiuti, stabilendo che è vietata:

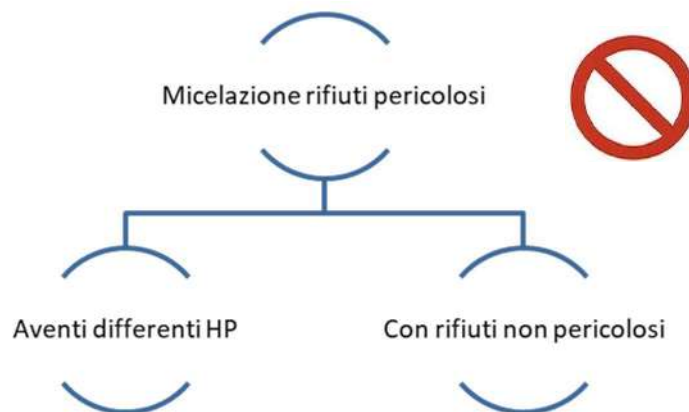
- la miscelazione di rifiuti pericolosi aventi caratteristiche di pericolosità (HP) differenti.
- la miscelazione di rifiuti pericolosi con rifiuti non pericolosi.

La miscelazione è definita come "l'operazione di omogeneizzazione di due o più rifiuti o di rifiuti e materie prime". Il divieto di miscelazione di rifiuti pericolosi aventi caratteristiche di pericolosità (HP) differenti è finalizzato a prevenire la formazione di nuove sostanze pericolose o di miscele più pericolose delle sostanze o miscele originali. Il divieto di miscelazione di rifiuti pericolosi con rifiuti non pericolosi è finalizzato a prevenire la diffusione di sostanze pericolose nell'ambiente.

Sono previste deroghe al divieto di miscelazione di rifiuti pericolosi, in particolare in caso di:

- miscelazione di rifiuti pericolosi aventi caratteristiche di pericolosità (HP) uguali o simili.
- miscelazione di rifiuti pericolosi con rifiuti non pericolosi, previa autorizzazione dell'autorità competente.

Divieto di miscelazione rifiuti pericolosi



Possibilità di deroghe



La miscelazione di rifiuti non pericolosi non è vietata, ma è comunque soggetta ad autorizzazione in quanto rientra tra le operazioni di trattamento dei rifiuti (art. 23 del Codice dell'ambiente).

L'autorizzazione alla miscelazione di rifiuti è rilasciata dall'autorità competente, in conformità alle disposizioni del Codice dell'ambiente e delle relative norme di attuazione.

La miscelazione dei rifiuti deve essere effettuata in modo da garantire la sicurezza dell'ambiente e della salute umana, deve essere effettuata in impianti adeguati e da personale qualificato.

Il produttore o il detentore dei rifiuti è responsabile della corretta gestione della miscelazione dei rifiuti, in conformità alla normativa vigente

La normativa regionale del Veneto riguardante la miscelazione dei rifiuti è contenuta nella Delibera della Giunta Regionale n. 119 del 7 febbraio 2018, recante gli "Indirizzi tecnici sulla miscelazione e gestione dei rifiuti". La delibera regionale recepisce la normativa nazionale e integra le disposizioni del Codice dell'ambiente con ulteriori indicazioni operative. In particolare, la delibera regionale stabilisce che la miscelazione di rifiuti:

- deve essere effettuata in conformità alla normativa nazionale e regionale;
- in conformità alle prescrizioni dell'autorità competente;
- deve essere effettuata in modo da garantire la sicurezza dell'ambiente e della salute umana;
- deve essere effettuata in impianti adeguati e da personale qualificato.

Il produttore o il detentore dei rifiuti è responsabile della corretta gestione della miscelazione dei rifiuti, in conformità alla normativa vigente. In particolare, il produttore o il detentore dei rifiuti deve:

- identificare i rifiuti da miscelare.
- valutare la compatibilità dei rifiuti da miscelare.
- elaborare un piano di miscelazione.
- eseguire la miscelazione in conformità al piano di miscelazione.

La delibera regionale è stata confermata dalla sentenza del TAR Veneto n. 1010 del 19 luglio 2022, che ha respinto il ricorso di un'impresa che contestava la legittimità della delibera.

Riassumendo, i punti da tenere in considerazione sono i seguenti:

- la miscelazione di rifiuti è vietata se comporta la formazione di nuove sostanze pericolose o di miscele più pericolose delle sostanze o miscele originali;
- la miscelazione di rifiuti pericolosi con rifiuti non pericolosi è consentita solo previa autorizzazione dell'autorità competente;
- la miscelazione di rifiuti non pericolosi è consentita solo previa autorizzazione dell'autorità competente;
- la miscelazione di rifiuti deve essere effettuata in impianti adeguati e da personale qualificato;
- il produttore o il detentore dei rifiuti è responsabile della corretta gestione della miscelazione dei rifiuti.

Lo studio ha poi indagato le tecniche o tecnologie più diffuse a livello industriale per l'inertizzazione dei rifiuti; in particolare sono state verificate le autorizzazioni disponibili e in essere di impianti del territorio veneto-lombardo. A livello macro, le tecnologie riguardano processi di:

-inertizzazione chimica: i rifiuti vengono miscelati con sostanze chimiche che reagiscono con le sostanze pericolose, intrappolandole o neutralizzandole. Le sostanze chimiche più comunemente utilizzate per l'inertizzazione chimica sono il cemento, la calce e il gesso.

- inertizzazione fisica: i rifiuti vengono sottoposti a un trattamento fisico che ne riduce la pericolosità. I trattamenti fisici più comunemente utilizzati per l'inertizzazione fisica sono la compattazione, la granulazione e la vitrificazione.

- inertizzazione biologica: i rifiuti vengono sottoposti a un trattamento biologico che degrada le sostanze pericolose. I trattamenti biologici più comunemente utilizzati per l'inertizzazione biologica sono la digestione anaerobica e il compostaggio.

Dall'analisi delle autorizzazioni, che corrispondono a scelte tecnologiche industrialmente implementate, sono stati confermati i fattori discriminanti già citati, ossia:

- il tipo di rifiuti da inertizzare, alcuni tipi di rifiuti sono più facilmente inertizzabili di altri;
- il livello di pericolosità dei rifiuti, alcuni richiedono tecniche di inertizzazione più complesse;
- le caratteristiche dei rifiuti, come la granulometria e la umidità, possono influenzare la scelta della tecnica di inertizzazione;
- le esigenze ambientali, in particolare localizzazione degli impianti, vincoli urbanisti e geomorfologici.

In generale, la tecnica di inertizzazione chimica è la più utilizzata per l'inertizzazione dei rifiuti pericolosi, mentre la tecnica di inertizzazione fisica è la più utilizzata per l'inertizzazione dei rifiuti non pericolosi. La tecnica di inertizzazione biologica è una tecnica che si sta consolidando e ampliando nelle applicazioni, in particolare per l'inertizzazione dei rifiuti organici di varia origine.

Grazie al supporto consulenziali di Greenagrys, sono state infine fatte valutazioni sul rapporto costo benefici relativamente a potenziali impianti di inertizzazione dei rifiuti, sotto il profilo economico e finanziario. L'approccio è utile e determinante per valutare l'economicità dell'impianto; le variabili economico e finanziarie includono:

- i costi di investimento, quali costi di progettazione, costruzione e installazione dell'impianto (generalmente considerati un costo fisso);
- i costi di esercizio che includono i costi per il personale, le materie prime e l'energia (costo variabile);

- benefici economici quali la riduzione dei costi di smaltimento dei rifiuti;
- benefici finanziari quali il potenziale aumento del valore dell'impianto nel tempo.

Oltre ai costi economici e finanziari, nella valutazione costi/benefici devono essere presi in considerazione:

- l'impatto ambientale, in quanto l'inertizzazione dei rifiuti può avere un impatto ambientale, sia positivo che negativo;
- la sicurezza, in quanto l'inertizzazione dei rifiuti può essere un processo pericoloso;
- l'accettazione sociale, in quanto, come tutti i processi inerenti i rifiuti, sono controversi, e possono condizionare decisamente il successo dell'operazione d'investimento.

È stata infine decisa l'elaborazione di schede informative relative ai processi selezionati, in primis per un loro veloce aggiornamento e miglioramento, poi per consentire una rappresentazione e una comunicazione chiara e trasparente, in particolare per gli addetti ai lavori. Le schede descrivono direttamente il processo e possono includere indicatori chiave di prestazione (KPI) e criteri di controllo, per un futuro monitoraggio. In questo momento devono essere considerate e utilizzate come work in progress.

Nel corso del 2024 è proseguito il monitoraggio delle tecnologie di avanguardia, esaminando le seguenti possibilità:

Vetrificazione a bassa temperatura

Questa tecnica consente di fondere i rifiuti a temperature inferiori rispetto ai metodi tradizionali, riducendo così il consumo energetico e le emissioni. Il prodotto finale, un vetro ceramico, è estremamente stabile e resistente alla lisciviazione.

Solidificazione con leganti a base biologica

Si stanno sviluppando nuovi leganti a base di biopolimeri o sottoprodotti agricoli, che permettono di ottenere matrici solide e stabili, riducendo l'impatto ambientale.

Microrganismi e bio-cementazione

Alcuni microrganismi hanno la capacità di produrre sostanze minerali che possono cementare i rifiuti, trasformandoli in una massa solida e stabile. Questa tecnica è particolarmente promettente per il trattamento di rifiuti contaminati da metalli pesanti.

Plasma

La tecnologia al plasma permette di trattare i rifiuti a temperature estremamente elevate, distruggendo gli inquinanti organici e inorganici e producendo un residuo inerte e vitreo.

Nanotecnologie

L'utilizzo di nanoparticelle può migliorare le proprietà dei materiali leganti, rendendoli più efficaci nel bloccare la migrazione degli inquinanti.

Sistemi di monitoraggio e controllo avanzati

Sensori e sistemi di controllo basati sull'intelligenza artificiale permettono di ottimizzare i processi di inertizzazione, garantendo una maggiore efficienza e sicurezza.

Integrazione con altre tecnologie

Le tecnologie di inertizzazione possono essere integrate con altre tecnologie, come la pirolisi o la gassificazione, per ottenere un trattamento più completo dei rifiuti e recuperare energia.

Alcune di queste sono già state schedate, permane l'interesse di verificare le applicazioni industriali quindi le possibilità di utilizzo nei nostri contesti. Le barriere sono rappresentate dagli ingenti investimenti iniziali, sia per l'acquisto delle attrezzature che per le opere civili, i costi di gestione di questi impianti sono elevati e il tempo necessario per recuperare gli investimenti è spesso lungo, soprattutto per le piccole e medie imprese. Un'altra barriera è la normativa italiana e europea in materia di gestione dei rifiuti che è in continua evoluzione, rendendo complesso il processo di autorizzazione e gestione degli impianti.

Infine bisogna sottolineare che la mancanza di competenze specifiche, trovare personale altamente qualificato in grado di gestire impianti di inertizzazione può essere difficile ed è necessario investire in formazione continua per garantire che il personale sia sempre aggiornato sulle ultime tecnologie e normative.

Sono state anche analizzate le tecnologie di inertizzazione dei rifiuti per aree geografiche significative, quali Europa, Stati Uniti e Cina, influenzate da fattori diversi quali le normative ambientali, la disponibilità di risorse, le esigenze industriali e le politiche energetiche. Le tecnologie di inertizzazione dei rifiuti sono in continua evoluzione e le scelte tecnologiche variano a seconda del contesto geografico e delle esigenze specifiche.

L'Europa, con una forte attenzione alla sostenibilità e normative ambientali rigorose, ha adottato un approccio multidisciplinare all'inertizzazione. Le tecnologie più diffuse includono:

- Solidificazione/stabilizzazione
- Vittrificazione
- Solidificazione con cemento
- Tecnologie biologiche
- Pirolisi e gassificazione

Negli Stati Uniti, l'approccio all'inertizzazione è diversificato sotto il profilo della ricerca, riflettendo la vasta estensione del territorio e la varietà di rifiuti prodotti, ma alla fine le tecnologie industrialmente utilizzate sono quelle europee.

La Cina, con una crescita industriale rapida e una grande produzione di rifiuti, ha adottato un approccio pragmatico all'inertizzazione, focalizzandosi su soluzioni economiche ed efficienti. Le tecnologie più diffuse includono la solidificazione/stabilizzazione, la vittrificazione.

L'Europa ha norme ambientali più stringenti rispetto agli Stati Uniti e alla Cina, influenzando le tecnologie adottate. La disponibilità di risorse naturali, come il cemento e i leganti, varia tra i diversi paesi, influenzando le scelte tecnologiche. Le esigenze industriali specifiche di ciascun paese influenzano il tipo e la quantità di rifiuti da trattare, e quindi le tecnologie più adatte.

Infine, le politiche energetiche nazionali influenzano la scelta di tecnologie che permettono di recuperare energia dai rifiuti.

Indipendentemente dal paese, le tendenze future nell'inertizzazione dei rifiuti si orientano verso tecnologie più sostenibili, si cercheranno soluzioni che riducano al minimo l'impatto ambientale, consumando meno energia e producendo meno rifiuti. Le tecnologie di inertizzazione saranno sempre più integrate in un'ottica di economia circolare, valorizzando i rifiuti come risorse.

L'utilizzo di sensori, sistemi di controllo avanzati e intelligenza artificiale permetterà di ottimizzare i processi di inertizzazione, garantendo una maggiore efficienza e sicurezza.

3. Risultati ottenuti

Di seguito si riportano le schede riassuntive inerenti alle tecniche/tecnologie attualmente utilizzate in ambito industriale.

SCHEDE INFORMATIVE RELATIVE AI PROCESSI DI INERTIZZAZIONE DI RIFIUTI SOLIDI E LIQUIDI

Indice Schede

➤ Processi a base di cemento	8
➤ Processi a base di calce.....	9
➤ Processi a base di argille.....	10
➤ Processi a base di sostanze termoplastiche.....	11
➤ Processi a base di polimeri organici	12
➤ Processi a base di composti macroincapsulanti.....	13
➤ Vetrificazione	14
➤ Autocementificazione.....	15
➤ Disidratazione meccanica.....	16
➤ Processi combinati di flocculazione, sedimentazione e filtrazione	17
➤ Processi di filtrazione	18
➤ Processi di microfiltrazione e ultrafiltrazione	19
➤ Processi di flocculazione/sedimentazione	20
➤ Processi di flottazione.....	21
➤ Processi di osmosi inversa e nanofiltrazione.....	23
➤ Processi di elettrodialisi.....	24
➤ Processi di precipitazione	25
➤ Processi di riduzione chimica.....	27
➤ Processi di strippaggio con aria.....	29
➤ Processi di adsorbimento solido liquido (RAEE).....	30
➤ Altre tecniche in fase di sperimentazione per i rifiuti solidi.....	34

Processi a base di cemento	
Tipologia di rifiuto	Solido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	<p>Trattasi di un processo di solidificazione/stabilizzazione in cui il rifiuto viene miscelato con cemento principalmente di tipo Portland (il più comune ed utilizzato) o pozzolanico; insieme al cemento vengono solitamente aggiunti dei leganti quali calce, bentonite e degli additivi quali zeoliti, silicati etc, per aumentare l'efficienza del processo. Come additivi possono essere utilizzati anche rifiuti non pericolosi con caratteristiche paragonabili agli additivi sostituiti. Solitamente il composto cemento/legante più additivi presenta pH neutro o acido in base al rifiuto da trattare.</p> <p>Con questo processo di solidificazione/stabilizzazione si ottiene l'immobilizzazione dell'inquinante/degli inquinanti tramite:</p> <ul style="list-style-type: none"> • fissazione chimica: intervengono reazioni di precipitazione di idrossidi insolubili di metalli pesanti, reazioni di complessazione con formazione di silico-alluminati insolubili di metalli pesanti e reazioni di adsorbimento di cationi liberi; • Fissazione fisica: intrappolamento fisico di tutte le sostanze, comprese quelle non reattive, all'interno della matrice cementizia.
Risultati del processo	Immobilizzazione, precipitazione e inglobamento dell'inquinante all'interno di una matrice solida inerte.
Vantaggi	Reagenti a costo ragionevole e facilmente reperibili; tecnologia semplice e ampiamente applicata, con costi di investimento contenuti; controllabilità e flessibilità del processo: le proprietà fisiche dei rifiuti trattati possono essere variate in funzione delle quantità di reagenti addizionati; Possibilità di riciclaggio dei prodotti di alcuni processi.
Svantaggi	Possibilità di ridissoluzione in presenza di forti concentrazioni acide; in alcuni casi sono richiesti elevati quantitativi di reagenti; sensibile aumento di volume del rifiuto inertizzato rispetto al grezzo
Informazioni da letteratura	<p>Ricerche scientifiche recenti pongono l'attenzione allo smaltimento mediante processo a base di cemento di prodotti farmaceutici e ceneri di incenerimento con alta concentrazione di metalli. Questo trattamento prevede l'incapsulamento dei rifiuti mediante la loro combinazione con acqua, cemento e calce per creare una pasta uniforme. Una volta solidificato il prodotto viene smaltito all'interno dei rifiuti solidi urbani, riducendo la presenza di sostanze chimiche pericolose in superficie o nelle acque sotterranee.</p> <p>Petro Karungamye, Anita Rugaika, Kelvin Mtei, Revocatus Machunda, HydroResearch, 5(2022), 99-107</p>

Processi a base di calce	
Tipologia di rifiuto	Solido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	<p>Il processo avviene attraverso la miscelazione della calce con additivi quali l'allumina e materiali silicei a grana fine come le pozzolane per la formazione di miscele di gel che sono responsabili del microincapsulamento dell'inquinante.</p> <p>Oltre al macroincapsulamento, i materiali pozzolanici hanno una grande affinità nei confronti delle reazioni di scambio ionico: tale capacità potrebbe favorire il legame sia con la calce che con gli ioni metallici contenuti nel rifiuto da inertizzare.</p>
Risultati del processo	Immobilizzazione, precipitazione e inglobamento dell'inquinante all'interno di una matrice solida inerte.
Vantaggi	<p>Reagenti a costo ragionevole e facilmente reperibili;</p> <p>tecnologia semplice e ampiamente applicata, con costi di investimento contenuti;</p> <p>controllabilità e flessibilità del processo: le proprietà fisiche dei rifiuti trattati possono essere variate in funzione delle quantità di reagenti addizionati;</p> <p>Possibilità di riciclaggio dei prodotti di alcuni processi.</p>
Svantaggi	<p>Possibilità di ridissoluzione in presenza di forti concentrazioni acide;</p> <p>in alcuni casi sono richiesti elevati quantitativi di reagenti;</p> <p>sensibile aumento di volume del rifiuto inertizzato rispetto al grezzo</p>
Informazioni da letteratura	<p>Il processo a base di calce viene utilizzato per neutralizzare rifiuti fangosi attraverso la miscelazione della calce con specifici additivi come le pozzolane, riuscendo ad inglobare metalli pericolosi smaltendo i rifiuti con basso impatto ambientale</p> <p>J. P. MARTIN, S. C. CHENG, P. A. FRY, Transp. Res. Rec. 1424 (1996)</p>

Processi a base di argille	
Tipologia di rifiuto	Solido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	<p>Sono processi di inertizzazione che sfruttano le attitudini di alcuni minerali argillosi allo scambio cationico, ovvero alla fissazione di metalli pesanti per scambio con ioni mobili (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}) presenti nel reticolo cristallino dell'argilla. Le argille più utilizzate sono la vermiculite e le montmorilloniti (es. bentonite).</p> <p>L'adsorbimento degli ioni metalli tossici sulle microparticelle di argilla è un fenomeno di superficie e gli ioni dei metalli tossici possono essere rilasciati abbastanza facilmente, ad esempio, nel caso di allocazione in discarica il percolato raggiunga elevate concentrazioni di ioni di metalli alcalini (Na^+ e K^+) o alcalino terrosi (Ca^{2+} e Mg^{2+}).</p>
Risultati del processo	Immobilizzazione e inglobamento dell'inquinante sulla superficie di una matrice solida.
Vantaggi	<p>Reagenti a costo ragionevole e facilmente reperibili;</p> <p>tecnologia semplice e ampiamente applicata, con costi di investimento contenuti;</p> <p>meno sensibile alle variazioni di pH rispetto ai processi di trattamento tramite calce o cemento.</p>
Svantaggi	<p>Possibilità di ridissoluzione in presenza di soluzione con forti concentrazioni di metalli alcalini o alcalino-terrosi;</p> <p>sensibile aumento di volume del rifiuto inertizzato rispetto al grezzo</p>
Informazioni da letteratura	<p>I rifiuti di fanghi galvanici sono prodotti dai trattamenti fisico-chimici delle acque reflue generate da impianti galvanici. Questi materiali hanno un potenziale significativo per la produzione di mattoni ceramici in argilla. Ricerche scientifiche hanno valutato l'inertizzazione dei metalli pesanti (Cr, Zn, Ni e altri) da rifiuti di fanghi galvanici mescolandoli con tre tipi di argilla grezza (rossa, gialla e nera). I risultati hanno indicato una corretta inertizzazione degli inquinanti portando ad una corretta gestione dei rifiuti in un'ottica di sostenibilità e basso impatto ambientale.</p> <p>L. Pérez-Villarejo, S. Martínez-Martínez, B. Carrasco-Hurtado, D. Eliche-Quesada, C. Ureña-Nieto, P.J. Sánchez-Soto, Appl. Clay Sci.,105–106 (2015),89-99</p>

Processi a base di sostanze termoplastiche	
Tipologia di rifiuto	Solido
Descrizione del processo di trattamento	<p>Il trattamento avviene mescolando, ad alta temperatura (superiore ai 100 °C) il rifiuto precedentemente essiccato con sostanze organiche polimeriche capaci di indurire o rammollire reversibilmente con la variazione della temperatura quali asfalto e bitume (i due più utilizzati), paraffina, polietilene, polipropilene, nylon. La miscela viene poi lasciata raffreddare e solidificare.</p> <p>Il processo imprigiona l'inquinante con un meccanismo puramente fisico.</p>
Risultati del processo	Immobilizzazione e inglobamento dell'inquinante all'interno di una matrice solida.
Vantaggi	Resistenza all'attacco di soluzioni acquose e agenti microbici; basso rilascio di inquinanti
Svantaggi	Sensibile aumento di volume del rifiuto inertizzato rispetto al grezzo; infiammabilità della matrice plastica; costi elevati; possibili alterazioni della matrice a causa di particolari sostanze presenti nel residuo.
Informazioni da letteratura	<p>Diversi studi pongono l'attenzione sull'immobilizzazione di rifiuti in miscele di asfalto e bitume per una gestione sostenibile dei rifiuti. I materiali di scarto più utilizzati in queste ricerche sono: plastica, rifiuti di cava di marmo, rifiuti di demolizione di edifici, gomma di pneumatici, scarti di olio da cucina, olio di palma, cenere combustibile, cellulosa, fibre di poliestere, amido, vetro di scarto, mattoni di scarto e ceramica di scarto.</p> <p>Un esempio di grande interesse per la ricerca industriale è il riciclo, con processi a base di sostanze termoplastiche, di gomma e plastiche di scarto, inglobate in miscele di bitume per la costruzione di strade.</p> <p>M.T. Rahman, A. Mohajerani, F. Giustozzi, Materials (Basel). 13,7 (2020),1495.</p>

Processi a base di polimeri organici	
Tipologia di rifiuto	Solido
Descrizione del processo di trattamento	<p>Questi processi consistono nel miscelare al rifiuto un monomero (il più comune è l'urea formaldeide ma sono impiegati anche poliestere, melammina, resine fenoliche) che, in presenza di un catalizzatore, polimerizza, incapsulando nella struttura polimerica le sostanze contenute.</p> <p>Il processo imprigiona l'inquinante con un meccanismo puramente fisico.</p>
Risultati del processo	Il materiale polimerizzato forma una massa spugnosa che intrappola le particelle solide.
Vantaggi	Reagenti facilmente reperibili;
Svantaggi	Costi più elevati rispetto ai trattamenti a base di cemento, calce e argille
Informazioni da letteratura	<p>I polimeri organici sono stati spesso utilizzati nella sedimentazione chimicamente assistita (CAPS) dei solidi delle acque reflue per migliorare la rimozione della materia sospesa. Il concetto è applicabile alle acque reflue industriali per il trattamento del cuoio, acciaio, lana, cosmetici, detersivi, materie plastiche, tintoria, carta, industrie alimentari e produzione di birra.</p> <p>B. A. Bolto, D.R. Dixon, S. R. Gray, H. Chee, P. J. Harbour, L. Ngoc, A. J. Ware, Water Sci Technol, 34, 9 (1996),117-124</p>

Processi a base di composti macroincapsulanti	
Tipologia di rifiuto	Solido
Descrizione del processo di trattamento	Sono processi che danno luogo alla formazione di un prodotto finale costituito da una struttura composta di resine organiche. Generalmente le particelle inquinanti vengono agglomerate da resine termoindurenti e incapsulate da resine termoplastiche. Ad esempio, vengono utilizzate resine polibutadieniche fuse che formano con il rifiuto una miscela, che, dopo raffreddamento, viene ricoperta con polietilene ad alta densità fuso, in modo da creare un involucro esterno ad alta resistenza.
Risultati del processo	Il materiale polimerizzato forma una massa spugnosa che intrappola le particelle solide.
Vantaggi	Reagenti facilmente reperibili;
Svantaggi	Costi più elevati rispetto ai trattamenti a base di cemento, calce e argille; sensibile aumento di volume del rifiuto inertizzato rispetto al grezzo.
Informazioni da letteratura	Sono stati studiati dei processi che utilizzano materiali polimerici, in particolare resine polibutadieniche, per cementificare e incapsulare rifiuti pericolosi. Il processo consiste nel cementare fondendo in situ un rivestimento di plastica sulle superfici agglomerate. Il polibutadiene, come resina legante, è risultato in grado di cementare i rifiuti dal 94 al 96% in peso dell'agglomerato. Il metodo è stato applicato in modo soddisfacente per campioni di laboratorio contenenti, in alcuni casi, alte concentrazioni di rifiuti di metalli pesanti, come meta arseniato di sodio altamente solubili in acqua. C.C. Wiles, H. R. Lubowitz, Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Municipal Environmental Research Laboratory, (1976) 139

Vetrificazione	
Tipologia di rifiuto	Solido
Descrizione del processo di trattamento	Il rifiuto viene miscelato con silice e sottoposto a processo di vetrificazione a 1300/1400°C
Risultati del processo	Si ottiene un prodotto solido e compatto, sicuro dal punto di vista del rilascio di sostanze inquinanti.
Vantaggi	Reagenti facilmente reperibili e a basso costo; elevata inerzia chimica.
Svantaggi	Costi elevati; consumi energetici elevati; volatilizzazione di alcuni inquinanti a causa delle elevate temperature del processo; sensibile aumento di volume del rifiuto inertizzato rispetto al grezzo.
Informazioni da letteratura	<p>I rifiuti maggiormente smaltiti attraverso il processo di vetrificazioni sono le ceneri, derivanti da processi industriali e dall'incenerimento di rifiuti solidi urbani (RSU), che rappresentano un grave problema ambientale, data la grande quantità di costituenti organici e inorganici pericolosi, come diossina, furani e metalli pesanti (Cd, Cr, Cu, Pb). La vetrificazione permette l'immobilizzazione dei metalli pericolosi e l'eliminazione degli inquinanti organici ottenendo una riduzione significativa del volume dei rifiuti (fino a 80-90%). Altre tipologie di ceneri studiate e trattate con la stessa metodologia sono polveri provenienti da processi dell'industria siderurgica contenenti metalli pericolosi (Cr, Pb, Zn, Cu, Cd, Ni), ceneri ricche di piombo prodotte dall'incenerimento di fanghi recuperati dal piombo tetraetile e dalla benzina al piombo e rifiuti pericolosi derivanti dalle industrie metallurgiche.</p> <p>P. Colombo, G. Brusatin, E. Bernardo, G. Scarinci, Curr Opin Solid State Mater Sci, 7, 3 (2003),225-239,</p>

Autocementificazione	
Tipologia di rifiuto	Solido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	Il rifiuto viene sottoposto ad un pretrattamento di calcinazione. Il residuo ottenuto viene fatto reagire con il prodotto della calcinazione e con altri reagenti (es. ceneri volanti). È una tecnica in fase di sperimentazione utilizzata soprattutto su rifiuti aventi un elevato tenore di solfato di calcio (es. gessi chimici)
Risultati del processo	Si ottiene un prodotto solido e compatto.
Vantaggi	Produzione del principale reagente dallo stesso rifiuto; tempi di presa ed indurimento ridotti; stabilità del prodotto finale.
Svantaggi	Costi elevati; necessità di elevato tenore in solfato e/o solfito di calcio; possibile rilascio di inquinanti; elevato consumo di energia.
Informazioni da letteratura	L'autocementazione è un processo utilizzato per smaltire materiali di scarto pericolosi come tufo vulcanico per i suoli contaminati Hg, scorie di fusione piombo-zinco o miscele di ceneri e argilla attraverso un'attivazione alcalina per evitare l'utilizzo di leganti e per massimizzare il recupero di materiali di scarto durante la cementazione. T. Huang, D. Song, L. Zhou, L. Pan, S. W. Zhang, <i>Chemosphere</i>, 325 (2023)

Disidratazione meccanica	
Tipologia di rifiuto	Liquido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	<p>Il rifiuto viene sottoposto inizialmente al condizionamento chimico e ad omogeneizzazione, mediante pompaggio inviato a spremitura attraverso i setti filtranti della filtropressa. Sui pannelli rimane la frazione solida mentre la frazione liquida è raccolta in apposita vasca, per poi essere riutilizzata o inviata in fognatura.</p> <p>Nella linea possono essere utilizzati i seguenti additivi:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sali minerali a cationi polivalenti di ferro e di alluminio con funzione flocculante; - Calce con la duplice funzione di diminuire l'alcalinità del fango e favorire la saponificazione dei grassi; - Polielettroliti organici con funzioni coagulanti e flocculanti.
Risultati del processo	<p>Si ottengono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • una frazione liquida che può essere inviata in fognatura o riutilizzata nell'impianto • una frazione solida che, in base alle caratteristiche può essere inviata a recupero/smaltimento oppure sottoposta ad ulteriore processo di inertizzazione.
Vantaggi	Reagenti facilmente reperibili.
Svantaggi	Costi elevati; elevato consumo di energia.
Informazioni da letteratura	<p>La maggior parte degli impianti delle industrie minerarie, ceramiche, della carta e della sanità, producono o trattano miscele solido-liquido generando una grande quantità di fanghi residui.</p> <p>Il processo di disidratazione meccanica è un'ottima soluzione al fine di ridurre la presenza di acqua e rendere più economiche e più facili le successive operazioni di trattamento e smaltimento o incenerimento, in quanto porta a un aumento del potere calorifero del fango.</p> <p>D. Mihoubi, J. Vaxelaire, F. Zagrouba, A. Bellagi, <i>Desalination</i>, 158 (2003), 259-265.</p>

Processi combinati di flocculazione, sedimentazione e filtrazione	
Tipologia di rifiuto	Liquido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	Il rifiuto viene sottoposto ad un processo di flocculazione tramite miscelazione con polielettroliti organici a cui segue una fase di sedimentazione dei precipitati ottenuti. Al termine della fase di sedimentazione la fase liquida viene separata dalla fase solida tramite pompaggio e viene sottoposta a filtrazione attraverso filtri a quarzo e carboni attivi per l'eliminazione degli inquinanti ancora disciolti.
Risultati del processo	Si ottengono: <ul style="list-style-type: none"> • una frazione liquida che può essere inviata in fognatura o riutilizzata nell'impianto • una frazione solida che, in base alle caratteristiche può essere inviata a recupero/smaltimento oppure sottoposta ad ulteriore processo di inertizzazione.
Vantaggi	Reagenti facilmente reperibili; la combinazione di tecniche permette di avere alta efficienza di trattamento per qualsiasi tipo di inquinante.
Svantaggi	Costi elevati;
Informazioni da letteratura	Il consumo di acqua nelle attività industriali è molto elevato portando alla formazione di acque reflue che devono essere trattate prima dello smaltimento nei sistemi idrici. Ad esempio, le acque reflue delle lavanderie industriali hanno nella loro composizione diversi livelli di solidi sospesi, COD, sali e sostanze nutritive a causa della presenza di sporco e residui di detersivi e ammorbidenti utilizzati durante il processo di lavaggio. Per il loro trattamento viene utilizzato il processo combinato di flocculazione, sedimentazione e filtrazione, in cui attraverso la miscelazione con polielettroliti organici, sedimentazione e passaggio attraverso filtri a quarzo e carboni attivi vengono eliminati gli inquinanti. C. O. Nascimento, M. T. Veit, S.M. Palácio, G.C. Gonçalves, M.R. Fagundes-Klen, Int. J. Chem. Eng., (2019)

Processi di filtrazione	
Tipologia di rifiuto	Liquido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	<p>Il rifiuto viene fatto passare attraverso filtri contenenti materiali porosi che separano le sostanze inquinanti. Gli impianti di filtrazione sono composti principalmente da uno o più delle seguenti matrici di filtrazione a seconda della tipologia di rifiuto da trattare:</p> <ul style="list-style-type: none"> • colonne a resine chelanti a scambio ionico: altamente efficaci nel trattenere i metalli pesanti disciolti nella soluzione da trattare; le resine possono essere rigenerate con soluzioni acide e alcaline. • filtri a carboni attivi: sistema adatto a rimuovere i composti organici come il COD, i tensioattivi, fenoli, pigmenti, permanganato, solventi organici e sostanze organiche in genere; • filtri a quarzite o sabbie: I filtri industriali sono riempiti di quarzite disposto a letti filtranti di diversa granulometria, questa soluzione permette di contenere grandi quantità di solidi e ottenere un ottimo grado di filtrazione finale senza che i vari strati filtranti al quarzo creino corsie preferenziali all'acqua in uscita dal sistema di trattamento; sono dotati di sistema di controlavaggio per l'eliminazione dei solidi trattenuti nel processo di filtrazione. • filtri a tamburo rotante: utilizzati per il trattamento di acque reflue e per la rimozione dei fiocchidei fanghi attivi • filtri a vuoto rotanti: particolarmente indicati per operazioni preliminari di filtrazione, ad esempio, nei trattamenti di disidratazione dei fanghi oleosi • <i>filtri a membrana</i>, tecniche emergenti che trovano applicazione in particolar modo nella rimozione di particelle solide e di materiale organico.
Risultati del processo	<p>Si ottengono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • una frazione liquida che può essere inviata in fognatura o riutilizzata nell'impianto • una frazione solida che, in base alle caratteristiche può essere inviata a recupero/smaltimento oppure sottoposta ad ulteriore processo di inertizzazione.
Vantaggi	Elevate rimozioni; in determinate condizioni consentono di rimuovere altri contaminanti (ad esempio oli) oltre ai materiali solidi sospesi.
Svantaggi	Possibili intasamenti dei sistemi filtranti a sabbia che operano in maniera semicontinua; possibilità di intorbidimento dovuto alla presenza di solidi sospesi.
Informazioni da letteratura	<p>Il processo di filtrazione è uno dei processi più efficienti per la rimozione di rifiuti inquinanti provenienti dai sistemi di allevamento in acquacoltura, che porta all'eliminazione di potenziali inquinanti e sostanze contenenti antibiotici.</p> <p>Y.B. Kim, J. H. Jeon, S. Choi, J. Shin, Y. Lee, Y. M. Kim,</p>

Sci. Total Environ, 615 (2018), 289-296.

Processi di microfiltrazione e ultrafiltrazione

Tipologia di rifiuto	Liquido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	<p>La microfiltrazione e l'ultrafiltrazione sono processi a membrana finalizzati alla separazione del liquido in due frazioni denominate, rispettivamente, permeato (frazione che attraversa la membrana) e concentrato (frazione trattenuta). L'azione di ritenzione della membrana è influenzata esclusivamente dalla dimensione, dalla forma e dalla flessibilità delle molecole: la membrana agisce come un setaccio, impedendo fisicamente il passaggio delle molecole sospese o disciolte che sono troppo grandi per fluire attraverso i suoi pori. La forza motrice del processo è rappresentata dalla differenza di pressione esistente ai due lati della membrana.</p> <p>Le membrane sono disponibili in diversi materiali e configurazioni. La scelta dipenderà dalla specifica applicazione e dalla natura del rifiuto liquido da trattare; le caratteristiche di resistenza dei materiali che costituiscono la membrana sono, infatti, influenzate dalla natura delle sostanze contenute nel rifiuto liquido.</p>
Risultati del processo	<p>Si ottengono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permeato: frazione liquida che può essere inviata in fognatura o riutilizzata nell'impianto • Concentrato: una frazione che, in base alle caratteristiche può essere inviata a recupero/smaltimento oppure sottoposta ad ulteriore processo di inertizzazione.
Vantaggi	Elevate rimozioni; flessibilità di utilizzo.
Svantaggi	Possibile intasamento, bloccaggio e sporcamento delle membrane; tendenza al compattamento; notevoli consumi di energia dovuti alle elevate pressioni operative; mancanza di stabilità meccanica (tendenza alla fessurazione delle membrane).
Informazioni da letteratura	<p>I processi di microfiltrazione (MF) e ultrafiltrazione (UF) sono basati sull'esclusione dimensionale o sulla cattura di particelle. MF e UF permettono di purificare e concentrare soluzioni macromolecolari (103-106 Da), in particolare soluzioni proteiche. Per esempio, la fermentazione dei rifiuti da cucina è un tema promettente per la produzione di acido lattico (LA). In questo caso il processo combinato di microfiltrazione e di ultrafiltrazione porta a dei risultati ottimali per la raffinazione di acido lattico dal brodo dei rifiuti da cucina, che viene pre-microfiltrato, con un recupero di acido lattico pari al 93,6%.</p> <p>Y. Guo, C. Li, H. Zhao, X. Wang, M. Gao, X. Sun, Q. Wang, Membranes, 13,3(2023), 330.</p>

Processi di flocculazione/sedimentazione	
Tipologia di rifiuto	Liquido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	<p>Il rifiuto liquido o fangoso viene immesso in camera di sedimentazione; qui viene miscelato con dei flocculanti chimici per permettere la sedimentazione anche di quelle particelle aventi densità simile all'acqua. I principali flocculanti utilizzati sono: Solfato di alluminio, Solfato ferroso, Cloruro di ferro (II/III), Calce, Polialluminio cloruro, Polialluminio solfato, Polimeri organici. L'agente flocculante determina la destabilizzazione del campo elettrico colloidale, ovvero l'annullamento delle cariche elettriche superficiali che ostacolano l'aggregazione delle particelle. Si formano, in tal modo, fiocchi in grado di coagulare ed agglomerare le piccole particelle sospese che vengono adsorbite superficialmente e collegate a ponte a formare aggregati di dimensioni e peso maggiori che tendono facilmente a decantare. I solidi precipitati vengono rimossi come fanghi dal fondo del sedimentatore mentre i materiali flottanti vengono raccolti per scrematura dalla superficie.</p>
Risultati del processo	<p>Si ottengono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • una frazione liquida che può essere inviata in fognatura o riutilizzata nell'impianto • una frazione solida che, in base alle caratteristiche può essere inviata a recupero/smaltimento oppure sottoposta ad ulteriore processo di inertizzazione.
Vantaggi	<p>Tecnica largamente utilizzata per separare con efficacia i materiali in sospensione dalle acque; richiede bassi costi per elevati volumi di acqua depurata; processo affidabile, adatto al controllo automatico.</p>
Svantaggi	<p>Il fango sedimentato e le schiume derivanti dalla scrematura devono essere smaltiti correttamente e, qualora contenenti sostanze tossiche, devono essere trattati in maniera appropriata; possibile rilascio di emissioni osmogene; in tal caso può essere richiesta una copertura del bacino di sedimentazione.</p>
Informazioni da letteratura	<p>La flocculazione/ sedimentazione è un metodo consolidato per la rimozione di solidi sospesi colloidali nei processi di trattamento delle acque, ma viene utilizzato anche per la raccolta di microalghe da fanghi di scarto. Recenti studi impiegano questo processo combinato per il trattamento di fanghi con microalghe marine e d'acqua dolce (<i>Chlorella vulgaris</i>, <i>Choricystis minor</i>, <i>Cylindrotheca fusiformis</i>, <i>Neochloris</i> sp., <i>Nannochloropsis Salina</i>) utilizzando solfato di alluminio e cloruro ferrico come flocculanti.</p> <p>T. Chatsungnoen, y. Chisti, Algal Res.,13(2016), 271-283.</p>

Processi di flottazione	
Tipologia di rifiuto	Liquido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	<p>La flottazione è un processo finalizzato alla separazione delle particelle liquide o solide caratterizzate da bassa densità, sospese in un fluido; può essere naturale o forzata, ossia con insufflazione di aria (o altro gas inerte) dal fondo del bacino e conseguente trascinalamento verso l'alto delle particelle più leggere.</p> <p>Le tecniche di flottazione, distinguibili in base alle modalità con cui viene operata l'aggiunzione di aria, sono, essenzialmente, di tre tipi:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>flottazione sotto vuoto</i>, che prevede la saturazione del rifiuto liquido con aria a pressione atmosferica seguita dall'applicazione di un vuoto parziale; ciò determina la formazione di bolle d'aria che salendo verso l'alto trascinano le particelle leggere in superficie ove avviene la rimozione mediante scrematura • <i>flottazione per induzione d'aria</i> (Induced Air Flotation, IAF), che prevede l'immissione di aria nel rifiuto liquido attraverso un apposito dispositivo diffusore • <i>flottazione per dissoluzione d'aria</i> (Dissolved Air Flotation, DAF), in cui l'aria viene disciolta nel rifiuto liquido mantenuto in pressione (0,4-0,8 MPa, o 1,0-1,2 MPa per i composti dell'alluminio) e quindi rilasciata verso la superficie sotto forma di bollicine, in seguito a depressurizzazione.
Risultati del processo	<p>Si ottengono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • una frazione liquida che può essere inviata in fognatura o riutilizzata nell'impianto • una frazione solida o oleosa che, in base alle caratteristiche può essere inviata a recupero/smaltimento oppure sottoposta ad ulteriore processo di inertizzazione.
Vantaggi	Minori volumi richiesti e, pertanto, minori costi di investimento rispetto alla sedimentazione; efficienza della rimozione non influenzata dalla variazione di carico idraulico e, pertanto, superiore rispetto a quella della sedimentazione; rende possibile il recupero di materia; elevata efficienza di separazione; consente di pervenire ad una maggiore disidratazione del materiale rispetto alla sedimentazione.
Svantaggi	Possibilità di intasamento delle valvole e degli ugelli; rilascio di emissioni osmogene; in genere è richiesta una copertura del flottatore; costi operativi più elevati rispetto alla sedimentazione.
Informazioni da letteratura	La flottazione del precipitato è un processo di separazione che comporta la precipitazione delle specie ioniche da rimuovere. Questo processo, tra le diverse applicazioni, viene utilizzato per il trattamento di rifiuti radioattivi, ad esempio, per la rimozione di Cs-137 dai rifiuti

	<p>radioattivi liquidi a basso livello (LLRW) mediante galleggiamento del precipitato. M. A. Soliman, G. M Rashad, M. R. Mahmoud, J. Chem. Eng., 275 (2015), 342-350.</p>
--	--

Processi di osmosi inversa e nanofiltrazione	
Tipologia di rifiuto	Liquido
Descrizione del processo di trattamento	<p>L'osmosi inversa e la nanofiltrazione sono tecniche a membrana che consentono di separare sali e molecole organiche solubili dall'acqua, mediante l'applicazione di una differenza di pressione ai due lati della membrana stessa. Grazie alla differenza di pressione l'acqua è, infatti, costretta ad attraversare la membrana che risulta, invece, impermeabile al soluto. Le due tecniche sono, generalmente, utilizzate quando è richiesto un ricircolo completo del permeato o del concentrato.</p> <p>Le membrane sono disponibili in diversi materiali e configurazioni. La scelta dipenderà dalla specifica applicazione e dalla natura del rifiuto liquido da trattare; le caratteristiche di resistenza dei materiali che costituiscono la membrana sono, infatti, influenzate dalla natura delle sostanze contenute nel refluo.</p>
Risultati del processo	<p>Si ottengono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permeato: frazione liquida che può essere inviata in fognatura o riutilizzata nell'impianto • Concentrato: una frazione che deve essere sottoposta ad ulteriore processo di inertizzazione.
Vantaggi	<p>Alta efficienza di separazione; sistemi modulari e conseguente flessibilità di utilizzo; possibilità di riciclaggio del permeato e del concentrato; basse temperature operative; possibilità di operazioni totalmente automatizzate.</p>
Svantaggi	<p>Possibile intasamento, bloccaggio e sporcamento delle membrane; tendenza al compattamento; alte pressioni operative e bassi flussi di permeazione.</p>
Informazioni da letteratura	<p>I trattamenti ad osmosi inversa e nanofiltrazione consentono di separare sali e molecole organiche solubili dall'acqua. Industrialmente questi processi vengono utilizzati per la desalinizzazione dell'acqua in pressione tenendo in considerazione diversi parametri operativi, come la qualità dell'acqua di alimentazione e di prodotto, il tipo di membrana e la manutenzione dell'utente e della gestione dei rifiuti.</p> <p>J. Ketharani, M.A.C.K. Hansima, Suresh Indika, D.R. Samarajeewa, Madhubhashini Makehelwala, K.B.S.N. Jinadasa, S.K. Weragoda, R.M.L.D. Rathnayake, K.G.N. Nanayakkara, Yuansong Wei, S.L. Schensul, Rohan Weerasooriya, Groundw. Sustain. Dev,18(2022),100800</p>

Processi di elettrodialisi	
Tipologia di rifiuto	Liquido
Descrizione del processo di trattamento	<p>Una cella di elettrodialisi è costituita da un anodo ed un catodo separati da membrane cationiche (permeabili solo ai cationi) e membrane anioniche (permeabili solo agli anioni).</p> <p>Il rifiuto liquido, immesso tra le membrane, è sottoposto al campo elettrico che devia verso gli elettrodi gli ioni presenti in soluzione (a seconda del segno della loro carica); in tal modo vengono a formarsi, grazie alla opportuna disposizione delle membrane selettive, un flusso concentrato e uno diluito.</p> <p>Questa tecnica, che consente di rimuovere solo specie di tipo ionico, si presta in modo particolare al trattamento di reflui provenienti dall'industria galvanica e da lavorazioni di finitura dei metalli.</p>
Risultati del processo	<p>Si ottengono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • una frazione liquida ripulita dagli inquinanti che può essere inviata in fognatura o riutilizzata nell'impianto • una frazione liquida con alte concentrazioni di inquinanti che deve sottoposta ad ulteriore processo di inertizzazione.
Vantaggi	Elevate rimozioni; flessibilità di utilizzo
Svantaggi	Possibile intasamento, bloccaggio e sporcamento delle membrane
Informazioni da letteratura	<p>L'applicazione del processo di elettrodialisi (ED) è fondamentale nel trattamento delle acque reflue. Il processo è stato testato per trattare diversi rifiuti o soluzioni acquose esauste, compresi gli effluenti provenienti da vari processi industriali, acque reflue comunali o impianti di trattamento delle acque salate e allevamenti di animali. Proprietà come la selettività, l'elevata efficienza di separazione e il trattamento senza sostanze chimiche rendono i metodi ED adeguati alla desalinizzazione e altri trattamenti con significativi benefici ambientali. Le tecnologie ED possono essere utilizzate in operazioni di concentrazione, diluizione, desalinizzazione, rigenerazione e valorizzazione per recuperare le acque reflue e recuperare acqua e/o altri prodotti, ad esempio ioni di metalli pesanti, sali, acidi/basi, sostanze nutritive e organiche o energia elettrica.</p> <p>L. Gurreri, A. Tamburini, A. Cipollina, G. Micale, Membranes, 10,7(2020), 146</p>

Processi di precipitazione	
Tipologia di rifiuto	Liquido/fangoso
Descrizione del processo di trattamento	<p>La precipitazione è un processo chimico finalizzato alla formazione di particolato che può in seguito essere separato con tecniche di sedimentazione, flottazione o filtrazione. Un impianto di precipitazione è, in genere, costituito da una o due vasche di miscelazione agitate meccanicamente, ove vengono aggiunti i reagenti, da un sedimentatore (o un flottatore) e dai serbatoi di stoccaggio dei reagenti.</p> <p>A questi vanno aggiunte le installazioni di disidratazione e/o condizionamento dei fanghi originati dal trattamento.</p> <p>Se necessario l'impianto deve essere completato con una sezione di trattamento biologico per rimuovere eventuali sostanze organiche biodegradabili non precipitabili chimicamente.</p> <p>Tipici agenti precipitanti sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • latte di calce (per metalli pesanti) • idrossido e carbonato di sodio (per metalli pesanti) • sali di calcio (per solfati e fluoruri) • solfuro di sodio (per mercurio) <p>Per migliorare il processo di separazione, a questi vengono spesso aggiunti altri composti con caratteristiche precipitanti e flocculanti, tra cui:</p> <ul style="list-style-type: none"> • sali ferrosi e ferrici • solfato di alluminio • polielettroliti • solfuri poliorganici
Risultati del processo	<p>Si ottengono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • una frazione liquida che può essere inviata in fognatura o riutilizzata nell'impianto • una frazione solida/fangosa che, in base alle caratteristiche può essere inviata a recupero/smaltimento oppure sottoposta ad ulteriore processo di inertizzazione.
Vantaggi	<p><u>Con calce come agente precipitante:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Riduzione del contenuto di sali nel rifiuto liquido; • Incremento delle capacità tampone dell'impianto di trattamento biologico; • Incremento della sedimentazione dei fanghi; • ispessimento dei fanghi; • Incremento della disidratazione meccanica dei fanghi; • Riduzione della durata del ciclo di disidratazione;

	<ul style="list-style-type: none"> • Costi contenuti. <p><u>Con solfuro di sodio come precipitante:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Minori volumi di fango (30% in meno rispetto al trattamento con calce); • Minori quantitativi di prodotti chimici utilizzati (40% in meno rispetto al trattamento con calce); • Minori quantitativi di metalli nell'effluente trattato; • Non richiede pre- o post-trattamenti; • Elevate prestazioni nella rimozione dei solidi sospesi e disciolti.
Svantaggi	<p><u>Con calce come agente precipitante:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Difficoltà di gestione della soda • Incremento dei quantitativi di fango dovuto all'eccesso di Ca(OH)_2; • Problemi di manutenzione <p><u>Con solfuro di sodio come precipitante:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Rischio di formazione di H_2S per acidificazione • Emissioni osmogene legate alla presenza di H_2S
Informazioni da letteratura	<p>L'abbattimento dei composti nutritivi dai rifiuti acquosi e dalle acque reflue è attualmente una questione prioritaria; infatti, lo scarico incontrollato di alti livelli di nutrienti nei corpi idrici provoca gravi deterioramenti della qualità ambientale. A questo proposito, la rimozione e il recupero di azoto e fosforo da rifiuti acquosi e acque reflue come struvite rappresenta un approccio interessante. Infatti, attraverso la precipitazione della struvite è possibile rimuovere efficacemente il contenuto di ammonio e fosfato di molti tipi di acque reflue e produrre un composto solido. Questo precipitato, per le sue caratteristiche chimiche, rappresenta un prezioso fertilizzante multi-nutriente a lento rilascio per la crescita di vegetali e piante, trasformando così, un rifiuto in un residuo a valore aggiunto.</p> <p>A.Siciliano, C. Limonti, G.M. Curcio, R. Molinari, Sustainability, 12,18 (2020) 7538.</p>

Processi di riduzione chimica	
Tipologia di rifiuto	Liquido
Descrizione del processo di trattamento	<p>La riduzione chimica prevede la conversione di sostanze inquinanti in composti meno nocivi e pericolosi mediante l'utilizzo di agenti riducenti.</p> <p>Il processo viene, in genere, condotto in reattore a mescolamento continuo (CSTR), strutturato e dimensionato sulla base delle caratteristiche del rifiuto e delle modalità di reazione adottate; ad esempio può essere necessario rivestire il reattore con materiale resistente alla corrosione e alla pressione e/o prevedere la sua copertura nel caso di possibile rilascio di composti gassosi. In alcuni casi, gli impianti devono essere, inoltre, dotati di opportune sezioni di trattamento dell'eccesso di reattivo (ad esempio, utilizzo di ipoclorito o di perossido di idrogeno per l'ossidazione di solfito a solfato). La necessità di tali sezioni può essere in parte mitigata mediante l'adozione di adeguati accorgimenti progettuali ed il controllo di alcuni parametri operativi, quali ad esempio il pH ed il potenziale di ossidoriduzione.</p> <p>I reattivi più comunemente utilizzati sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • anidride solforosa • bisolfito di sodio/metabisolfito di sodio • solfato ferroso • solfuro di sodio e bisolfuro di sodio • urea o acido amidosulfonico (sulfamico, a basso pH)
Risultati del processo	<p>La riduzione chimica permette nei rifiuti liquidi contenenti sostanze non prontamente removibili o non convogliabili nel sistema fognario a causa della eccessiva pericolosità di convertire le stesse in composti non nocivi o meno pericolosi. Il processo viene, in genere, applicato a contaminanti di tipo inorganico risultando meno efficace nel trattamento di composti organici.</p> <p>Esempi di contaminanti avviati a riduzione sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cromo (IV), ridotto a cromo (III) • cloro o ipoclorito, ridotti a cloruro • perossido di idrogeno, ridotto ad acqua e ossigeno • nitrito, usando urea o acido amidosulfonico a basso pH.
Vantaggi	Possono essere trattati rifiuti in un vasto range di concentrazione (da qualche g/l a meno di 1 mg/l).
Svantaggi	<p>Tendenza alla formazione di emissioni gassose (ad esempio, nel trattamento del solfuro si può avere la formazione di idrogeno solforato);</p> <p>le tipologie di sostanze inorganiche trattabili sono limitate;</p> <p>può essere necessario rivestire il reattore con appositi materiali resistenti alla corrosione ed alla pressione;</p>

Informazioni da letteratura	<p>Il processo di riduzione chimica viene utilizzato per il trattamento di rifiuti liquidi nei quali sono presenti sostanze tossiche come cianuri, fenoli o cromati. In particolare con reflui contenenti cromo esavalente, rifiuti ossidanti contenenti ipoclorito di calcio, perossidi, acido nitrico e altri ossidanti organici; ecc.. .</p> <p>Gli agenti riducenti più importanti sono solfito di sodio, bisolfito di sodio, metabisolfito di sodio, anidride solforosa, solfuro di sodio, idrazina o ione ferroso.</p> <p>L. Baravelli, L. Morselli, M.P. Ruperto, (2005). “Romagna Ecologia, Piattaforma di Trattamento Reflui Industriali”. Master universitario in Tecnologie e Certificazione Ambientale. Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Facoltà di Chimica Industriale.</p>
------------------------------------	--

Processi di strippaggio con aria	
Tipologia di rifiuto	Liquido
Descrizione del processo di trattamento	<p>Lo strippaggio con aria è un processo fisico teso a rimuovere, dai rifiuti liquidi, i composti organici ed inorganici (ad esempio, ammoniaca) volatili mediante il trasferimento degli stessi dalla fase acquosa a quella gassosa.</p> <p>Lo strippaggio con aria può essere realizzato in bacini aerati, ma le applicazioni più comuni prevedono l'utilizzo di colonne operanti a pressione atmosferica, contenenti opportuni corpi di riempimento. Il refluo da trattare viene pompato nella parte superiore della colonna e spruzzato verso il basso incontrando un flusso d'aria veicolato in controcorrente tramite un ventilatore. Questa fase permette di il passaggio dalla fase liquida a quella gassosa dell'inquinante. L'aria in uscita da questo processo viene immessa in uno Scrubber chimico per l'abbattimento dell'inquinante entro i limiti di legge ed immessa nell'atmosfera. Utilizzando aria calda si può aumentare l'efficienza dello strippaggio ottenendo una riduzione delle dimensioni dell'impianto.</p>
Risultati del processo	<p>Vengono separati dalla soluzione acquosa composti organici (es. solventi clorurati e aromatici) e inorganici (es. ammoniaca) che vengono trasferiti alla fase gassosa.</p> <p>Il gas deve poi essere trattato per abbattere gli inquinanti derivanti dal processo di strippaggio.</p>
Vantaggi	Elevata efficienza di rimozione; consente il recupero di materia; basse perdite di carico; bassi consumi di energia.
Svantaggi	<p>In determinate condizioni (concentrazione di Fe > 5 mg/l, durezza dell'acqua > 800 mg/l) tendono a formarsi incrostazioni; è, pertanto, richiesto l'utilizzo di agenti disincrostanti;</p> <p>il gas proveniente dallo strippaggio deve essere trattato sono richieste frequenti operazioni di pulizia della colonna.</p>
Informazioni da letteratura	<p>Il percolato contiene elevate concentrazioni di ammoniaca e grazie alle sue caratteristiche può avere un impatto negativo sull'ambiente e sulla salute pubblica.</p> <p>L'azoto ammoniacale è il problema principale, facilmente osservabile in concentrazioni vicine a 2000 mg/L. Gli effluenti ad alto contenuto di ioni di azoto ammoniacale presentano una elevata crescita di alghe, riduzione di ossigeno con conseguente tossicità sul biota acquatico. Molte ricerche sono volte a risolvere questa problematica, in particolare l'utilizzo del processo di stripping dell'aria applicato sul trattamento del percolato delle discariche, rimuove alte concentrazioni di azoto ammoniacale, recuperato mediante assorbimento chimico di ammoniaca su acido fosforico. Il fosfato ammoniacale ottenuto può essere applicato come fertilizzante agricolo.</p> <p>H. A. P. Dos Santos., A. B. de Castilhos Júnior, W. C. Nadaleti, V. A. Lourenço, Environ Sci Pollut Res, 27 (2020),45108–45120</p>

Processi di adsorbimento solido liquido (RAEE)

Tipologia di rifiuto	RAEE
<p>Descrizione dei processi di trattamento</p>	<p>Tra le tecnologie disponibili, in grado di rimuovere ioni metallici da soluzioni acquose post trattamento dei RAEE, con alta efficienza, bassi costi e con un “approccio sostenibile”, l’adsorbimento (solido/liquido) è considerato uno dei più promettenti. L’efficienza del processo dipende da quella dei materiali adsorbenti utilizzati, pertanto lo studio e lo sviluppo di solidi con migliorate capacità di cattura e di rilascio di metalli in soluzione è di fondamentale importanza per l’implementazione del processo su scala industriale.</p> <p>Il refluo da trattare viene pompato nella parte superiore di una colonna e spruzzato verso il basso incontrando un flusso d’aria veicolato in controcorrente tramite un ventilatore. Questa fase permette di il passaggio dalla fase liquida a quella gassosa dell’inquinante. L’aria in uscita da questo processo viene immessa in uno Scrubber chimico per l’abbattimento dell’inquinante entro i limiti di legge ed immessa nell’atmosfera. Utilizzando aria calda si può aumentare l’efficienza dello stripping ottenendo una riduzione delle dimensioni dell’impianto.</p> <p>Metodi per il recupero delle RE</p> <p>Due tipi principali di processo vengono utilizzati per l'estrazione di elementi RE dal minerale:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. sistemi solido-liquido che utilizzano cristallizzazione frazionata, precipitazione o scambio ionico. 2. sistemi liquido-liquido che utilizzano l'estrazione con solvente. <p>Nella cristallizzazione frazionata, una o più RE in una miscela vengono precipitate cambiando le concentrazioni saline in soluzione mediante evaporazione o controllo della temperatura. La precipitazione chimica comporta l'aggiunta di un agente precipitante per rimuovere selettivamente a metallo dalla soluzione. Viene utilizzato principalmente per operare una separazione grezza della miscela di RE in tre gruppi: leggero, medio e pesante.</p> <p>I processi di scambio ionico vengono utilizzati nella produzione di piccole quantità di elementi RE di valore e basati sull'uso di resine a scambio cationico. Le RE miste in soluzioni acquose sono cationi trivalenti e sono fortemente adsorbite dalla resina. Le RE vengono quindi recuperate mediante eluizione. Se un agente complessante si manifesta in modo significativo all'eluente vengono aggiunte affinità diverse per i vari lantanidi, quindi avviene la separazione.</p> <p>L'estrazione con solvente è il processo di separazione delle RE più ampiamente utilizzato in ambito commerciale e scala industriale. Si tratta essenzialmente di un'estrazione selettiva del valore</p>

metallico di interesse dalla sua soluzione acquosa in una fase organica immiscibile. La fase organica immiscibile è costituita da un estraente, un diluente e un modificatore di fase ed è indicata come fase solvente. La selettività dell'estrazione è controllata variando la sostanza chimica natura del solvente e della fase acquosa. Quindi variabili come l'acidità iniziale, il metallo concentrazione, la concentrazione dell'estrattore gioca un ruolo importante.

L'Estrazione in fase solida (SPE) è simile a quello dell'estrazione liquido-liquido (LLE), che prevede la ripartizione dei soluti tra due fasi. Tuttavia, invece di due fasi liquide immiscibili, come nella LLE, la SPE prevede la partizione tra una fase liquida (matrice del campione) e una fase solida (assorbente).

Questa tecnica di trattamento del campione consente sia la concentrazione che la purificazione dalla soluzione mediante assorbimento su un assorbente solido. L'approccio di base prevede il passaggio del campione liquido attraverso una colonna, una cartuccia, un tubo o un disco contenente un adsorbente che trattiene gli elementi o le specie di interesse. Dopo che tutto il campione è stato fatto passare attraverso l'assorbente, i materiali trattenuti vengono successivamente recuperati dopo l'eluizione, modificando opportunamente le condizioni o il solvente.

Questa tecnica impiega adsorbenti in formato cartuccia, disco o membrana e i materiali adsorbenti tipici includono ossidi inorganici, adsorbenti a bassa specificità (ad esempio carbonio, polimeri organici porosi, ecc.), materiali di silice legati a organosilossano e adsorbenti specifici per classe (ad esempio ad impronta molecolare, immunoassorbenti, ligandi macrociclici legati alla superficie e spesso gli stessi adsorbenti utilizzati nell'estrazione liquido-liquido ma immobilizzati su solidi). Recentemente, l'uso della SPE sta ottenendo sempre più attenzione nel recupero delle RE a causa dei suoi vantaggi di elevato recupero, breve tempo di estrazione, elevato fattore di arricchimento, basso costo e basso consumo di solventi organici rispetto all'estrazione liquido-liquido.

L'imprinting molecolare è una tecnica versatile per preparare materiali polimerici di elevato riconoscimento molecolare. I materiali polimerici a imprinting molecolare (MIP) sono preparati dalla copolimerizzazione di monomeri funzionali e reticolanti in presenza di bersaglio (la molecola dell'impronta) che funge da modello molecolare. I monomeri inizialmente formano un complesso con la molecola dell'impronta e, dopo la polimerizzazione, i gruppi funzionali sono mantenuti in posizione dalla struttura polimerica altamente reticolata.

La successiva rimozione della molecola dell'impronta rivela siti di legame complementare e forma dell'analita. Pertanto, nel polimero viene introdotta una memoria molecolare, che è ora in grado di

	legare l'analita con elevata specificità.
Risultati del processo	RE – Terre Rare
Vantaggi	<p>La SPE è un processo in crescente sviluppo per i suoi vantaggi di elevato recupero, breve tempo di estrazione, alto fattore di arricchimento, basso costo e basso consumo di organico solventi rispetto all'estrazione liquido-liquido. La separazione degli elementi particolari REs per SPE è stata riveduta e sono stati analizzati i diversi adsorbenti solidi utilizzati.</p> <p>Le resine da estrazione uniscono i vantaggi delle elevate selettività tipiche dei solventi per estrazione con elevate efficienze tipiche della separazione cromatografica e sono caratterizzate da ampia superficie, minimo utilizzo di solventi organici (rispettosi dell'ambiente) ed assenza di fenomeno della separazione di fase.</p> <p>I materiali nanostrutturati come i nanotubi sono vantaggiosi dimensioni ridotte, ampia superficie specifica, eccellente resistenza meccanica, elevata stabilità chimica, e proprietà elettriche uniche.</p> <p>Le argille sono caratterizzate da basso costo, elevata intensità meccanica, buona tolleranza agli acidi, comoda separazione solido-liquido ed eccellente riutilizzabilità. Inoltre compaiono minerali argillosi un comportamento di adsorbimento naturale nei confronti delle ER per cui vengono spesso utilizzate per il loro recupero, sia come fonte sia come fase solida assorbente.</p> <p>Le tecniche a membrana liquida possono eseguire l'estrazione e lo stripping simultanei processi nella stessa fase e beneficiano di un trasferimento di massa non in equilibrio e di un effetto in salita, dove il soluto può spostarsi da soluzioni a bassa concentrazione ad alta.</p> <p>La silice è un supporto estrattivo molto utilizzato per le sue proprietà termiche e meccaniche resistenza, la sua grande resistenza ai solventi organici, la sua mancanza di rigonfiamento e la sua proprietà idrofila.</p> <p>L'imprinting molecolare è una tecnica versatile per preparare materiali polimerici che sono capaci di un elevato riconoscimento molecolare, garantendo una specificità molto elevata.</p> <p>L'estrazione con solvente delle RE dal liquore di lisciviazione presenta alcuni vantaggi: non solo concentra le RE, ma separa anche le RE dalle principali impurità; La soluzione raffinata può essere riciclata aggiungendo alcuni agenti liscivianti alla lisciviazione di nuovi minerali; così non vengono generate acque.</p>
Svantaggi	<p>Lo scambio ionico si è dimostrato efficace nella separazione di RE ad elevata purezza, ma comporta generalmente la lavorazione di soluzioni acquose molto diluite.</p> <p>Il processo di separazione, post estrazione con solvente, è governato da considerazioni di equilibrio che sono, in generale, difficili da quantificare e prevedere.</p>

	<p>L'Estrazione in fase solida (SPE) intende risolvere, alcuni limiti e svantaggi dei processi di estrazione con solvente, quali: 1. la necessità di numerose fasi di processo; 2. il consumo di grandi quantità di prodotti chimici; 3. l'utilizzo di grandi quantità di acqua.</p>
--	--

Altre tecniche in fase di sperimentazione per i rifiuti solidi
Innocuizzazione delle ceneri volanti e dell'amianto con processi ad arco elettrico o plasma
Produzione di materiali ceramici sintetici
Utilizzo di ceneri vetrificate
Inglobamento in matrici di rivestimento
Strippaggio applicato per la rimozione di sostanze volatili (VOC, SVOC) da solidi contaminati dalle stesse



4. Ruoli e attività svolta dai partner

In questo task il lavoro di gruppo è stato premiante, in particolare l'esperienza "sul campo" di Elite Ambiente e Chimicamente è stato rilevante per identificare soluzioni di interesse.

Il lavoro è stato coordinato da Chimicambiente, le sintesi sono state elaborate da Green Tech Italy.

5. Ruoli e attività svolta dai consulenti

Il Dipartimento DSMN ha sovrinteso i lavori, ricercando e verificando le informazioni di letteratura.

Greenagrysis è intervenuta in consulenza a Elite Ambiente e, più in generale, all'intero partenariato; l'apporto specialistico si è concretizzato nella valutazione del rapporto costo benefici relativamente alle diverse tecnologie/processi trattati o discussi, contribuendo alla selezione delle soluzioni potenzialmente più interessanti.

6. Bibliografia

Oltre quella già indicata nelle schede.

"Inertizzazione dei rifiuti: tecniche e tecnologie", di M. Cassano, E. Di Nardo, M. Giordano, E. Maggi, A. Marotta, P. Mazzaglia, E. Pucci, A. Salvatore, E. Sica, edito da FrancoAngeli, 2021.

"Inertizzazione dei rifiuti: aspetti tecnici e ambientali", di P. Mazzaglia, edito da FrancoAngeli, 2008.

"Tecniche e tecnologie per l'inertizzazione dei rifiuti", di M. G. De Filippis, edito da Dario Flaccovio Editore, 2003.

"Inertization of Hazardous Wastes: Technologies and Applications", di A. K. Das e S. K. Das, edito da Elsevier, 2023.

"Inertization of Municipal Solid Waste: Technologies and Applications", di M. S. El-Hakim e M. S. A. El-Sheikh, edito da Elsevier, 2023.

"Inertizzazione dei rifiuti: una rassegna", di M. Cassano, E. Di Nardo, M. Giordano, E. Maggi, A. Marotta, P. Mazzaglia, E. Pucci, A. Salvatore, E. Sica, pubblicato sulla rivista "Ingegneria Ambientale", vol. 59, n. 1, 2022.

"Inertizzazione dei rifiuti: aspetti tecnici ed ambientali", di M. G. De Filippis, pubblicato sulla rivista "Tecnologie ambientali", vol. 20, n. 2, 2003.