



DESORBIMENTO TERMICO E BONIFICA DI SUOLI CONTAMINATI DA IDROCARBURI. IL PROCESSO DI I.T.T.

Per alcuni processi di bonifica di terreni contaminati da idrocarburi, può essere utilizzata la tecnologia del desorbimento termico, con la quale si intende il processo con cui la matrice contaminata viene sottoposta ad un riscaldamento che permette la migrazione in fase gassosa dell'inquinante organico, con successivi trattamenti dell'effluente gassoso. Il desorbimento termico consente di trattare una vasta gamma di contaminanti organici anche con alte concentrazioni in ingresso e garantisce un'elevata efficienza di rimozione.

Con il termine “sito contaminato” ci si riferisce a tutte quelle aree nelle quali, in seguito ad attività umane, è stata accertata un'alterazione delle caratteristiche qualitative dei terreni, delle acque superficiali e sotterranee, le cui concentrazioni superano quelle imposte dalla normativa. Per quanto riguarda le tecniche di bonifica, esse si distinguono in biologiche, chimiche, fisiche e termiche, in funzione delle metodologie utilizzate:

- nelle prime vengono generalmente impiegati microrganismi per i quali l'inquinante costituisce nutrimento ottenendo la degradazione dello stesso in anidride carbonica e acqua;
- le seconde, sfruttando specifiche reazioni chimiche, scompongono gli agenti inquinanti in sostanze meno tossiche;
- i trattamenti fisici, sfruttando le differenti caratteristiche del contaminante rispetto al mezzo inquinato, consentono una separazione della fase inquinante, la sua rimozione ed il successivo trattamento;
- attraverso i trattamenti termici si mira alla distruzione della sostanza inquinante o alla immobiliz-

zazione nel mezzo che la contiene, per procedere alla successiva rimozione.

Inoltre, esse possono essere ulteriormente suddivise in base al luogo in cui viene effettuato l'intervento. Il testo unico ambientale [1] distingue le tecnologie di bonifica: interventi *in situ*, oppure interventi *ex situ*.

Nella Fig. 1 sono riportate le principali tecniche di bonifica suddivise secondo i canoni appena descritti e che vengono riportati anche in una pubblicazione dell'ISAPRA [2].

La scelta del metodo di bonifica varia in funzione di:

- tipologia di inquinante;
- estensione e concentrazione;
- tipologia di matrice contaminata;
- risultati che si devono raggiungere per il risanamento da conseguire.

Nel caso di contaminazioni vaste e con inquinanti variegati vengono generalmente integrate più tecnologie; in particolare, le attività di bonifica che comportano lo scavo del terreno, è rappresentato dai volumi di terreno da movimentare, dalla sua collocazione, dalla profondità alla quale si trova la



Tecnica	Localizzazione	Metodologia utilizzata	Intervento	Matrice ambientale
Separazione (l'inquinante è separato dal mezzo inquinato e trattato)	In situ	Chimico-fisica	soil flushing; soil vapor extraction; dual phase extraction; air sparging; vagliatura; pump & treat	Suolo; Suolo-Acque; Sottosuolo; Acque sotterranee
		Termica	desorbimento; thermal enhanced (TEVES)	Suolo
		Biologica	soil washing	Suolo
	Ex situ	Chimico-fisica	soil washing; estrazione con solventi	Suolo
		Termica	desorbimento	Suolo
Trasformazione (l'inquinante è trasformato in sostanze meno pericolose o innocue)	In situ	Biologica	bioventing; biosparging; natural attenuation; barriere biologiche	Suolo; Suolo-Acque; Sottosuolo; Acque sotterranee
		Chimico-fisica	barriere permeabili reattive	Acque sotterranee
	Ex situ	Biologica	landfarming; biopile; bioslurry; inertizzazione	Suolo
		Chimico-fisica	trattamenti chimici; inertizzazione	Suolo
		Termica	incenerimento; pirolisi	Suolo
Immobilizzazione (l'inquinante viene immobilizzato o in una matrice o tramite trasformazione in sostanze meno mobili)	In situ	Chimico-fisica	solidificazione; contenimento	Suolo
		Termica	vetrificazione	Suolo
	Ex situ	Chimico-fisica	solidificazione	Suolo
		Termica	vetrificazione	Suolo

Fig. 1 - Tecniche di bonifica

contaminazione e dalla necessità di trattamento e/o smaltimento della matrice.

Gli interventi di bonifica devono tenere presenti alcuni criteri generali, come ad esempio:

- preferire bonifiche che eliminino l'inquinante o ne riducano la concentrazione;
- privilegiare le tecniche di bonifica che permettono di riutilizzare il suolo *in situ* evitando il costo di trasporti e movimentazioni di grandi volumi;
- individuare le tecniche che permettano il trattamento e il riutilizzo, se non nel sito, almeno come materiali di riempimento;
- evitare rischi igienico-sanitari per la popolazione durante lo svolgimento degli interventi;
- adeguare gli interventi di ripristino ambientale alla destinazione d'uso finale tenendo conto anche delle caratteristiche morfologiche dell'area.

La scelta della tecnologia di ripristino ambientale viene studiata sulla base dei parametri che condizionano l'applicabilità dei diversi processi, quali:

- caratteristiche chimico-fisiche e biologiche della matrice (distribuzione granulometrica, contenuto di argilla e frazione di carbonio organico, umidità, pH, ecc.);

- tipologia del sito (superficie e volume da risanare, profondità della contaminazione, presenza di falde, ecc.).

Come scritto in precedenza, il primo fondamentale elemento per la definizione delle più idonee tecnologie di bonifica applicabili parte dalla conoscenza delle principali caratteristiche chimico-fisiche, tossicologiche ed ambientali dei contaminanti presenti nella matrice oggetto di bonifica. Parallelamente si procede ad un'accurata attività di caratterizzazione del sito inquinato e dell'area soggetta agli effetti dell'inquinamento.

La scelta della migliore tecnica di bonifica disponibile non può prescindere da un'approfondita valutazione ed un bilanciamento dei vari interessi tecnico-strategici e dall'analisi delle numerose variabili, quali ad esempio: lo stato del sito (dismesso o attivo), eventuali progetti di riutilizzo del sito, il livello di protezione dell'ambiente che si vuole conseguire, la sostenibilità ambientale delle tecnologie di bonifica selezionate.

Le principali classi di contaminanti presenti sono soprattutto due:

- composti organici;
- composti inorganici.

Il processo di individuazione della migliore tecnologia o delle tecnologie che dovranno operare in sinergia è un processo molto lungo ed articolato che deve bilanciare rischi, costi e traguardi raggiungibili in tempi certi, così che il beneficio sia il migliore possibile.

La corretta definizione e la successiva realizzazione degli interventi di bonifica devono essere preceduti da un'accurata attività di caratterizzazione del sito inquinato e dell'area soggetta agli effetti dell'inquinamento.

Composti organici

I principali composti organici che si trovano nei terreni sono gli idrocarburi che derivano dalle attività umane legate all'utilizzo di prodotti petroliferi (carburanti, lubrificanti ecc.). Gli idrocarburi si differenziano principalmente per il loro numero di atomi di carbonio e di idrogeno, ma anche per la presenza di ramificazioni (alifatici), anelli benzenici (aromatici) e con sostituenti di varia natura (alogeni, ossidrilici ecc.) e, infine, composti metallo-organici (Pb ecc.).

Solitamente in un sito contaminato si trovano miscele di idrocarburi in quanto i prodotti commerciali sono comunque una miscela eterogenea e con il passare del tempo, subisce una distribuzione differenziata nell'ambiente dei singoli composti della miscela di partenza, che, per le loro proprietà chimico-fisiche, si ripartiscono in misura differente nelle varie matrici ambientali, subendo specifici processi di degradazione o modifica.

Composti inorganici

Sebbene tra le sostanze inorganiche che interessano le contaminazioni ambientali esistano anche composti quali fluoruri, solfati, nitriti, boro e cianuri, i contaminanti prevalenti appartengono alla famiglia dei metalli.

Quelli che meritano una maggiore attenzione sono: mercurio, arsenico, manganese, piombo, cadmio, cromo, tallio.

In particolare, va ricordato che il mercurio viene rinvenuto in aree industriali sia dove vi erano processi che lo utilizzavano come catalizzatore sia perché presente all'interno di termometri e barometri analogici. Il piombo viene spesso trovato in suoli industriali in quanto il piombo tetraetile, sostanza tossica appartenente ai metallorganici, veniva utilizzato come additivo della benzina come antidetonante e per questo se ne trovano in grandi quantità.

I trattamenti di bonifica

I trattamenti di bonifica sono classificati in funzione della natura del processo o del meccanismo previsto per il trattamento degli inquinanti:

- biologico;
- chimico;
- fisico.

Per tecnologie biologiche, si intendono quei trattamenti che utilizzano l'attività metabolica di microrganismi autoctoni presenti nel sottosuolo, oppure introdotti al suo interno, che riescono a decomporre le molecole organiche. Scopo di questa tecnologia consiste nell'incrementare la crescita microbica, garantendo la presenza di nutrienti e di adeguate condizioni ambientali (come ad es. pH, temperatura), al fine di velocizzare i processi.

Tra i trattamenti biologici sono inclusi anche quelli noti come Phytoremediation, che si basano sulla capacità di alcune piante di estrarre dal suolo i

contaminanti, concentrandoli principalmente nelle parti aeree (fusto e foglie). Una volta accumulato il contaminante, le piante devono essere avviate a smaltimento controllato. Questa tecnica risulta particolarmente adatta per il trattamento dei composti inorganici come i metalli pesanti; che si trovano nel primo metro del sottosuolo.

I metodi chimico-fisici sono quelli più variegati e sfruttano le proprietà chimiche e fisiche del contaminante, o della matrice contaminata, per individuare la tecnica migliore per la riduzione della concentrazione degli inquinanti e/o ridurre la loro diffusione.

A seconda del principio di funzionamento, possiamo avere:

- riduzione: vengono utilizzati degli agenti chimici che permettono la trasformazione della struttura dei composti inquinanti al fine di ottenere una minore tossicità rispetto alle relative forme ossidate;
- ossidazione: l'utilizzo di agenti ossidanti può avvenire sia iniettando miscele ossidanti all'interno della matrice ambientale interessata, sia con l'esposizione del terreno ad aria compressa tra i 90 e i 550 °C. In ambedue i casi il processo ossidativo trasforma l'inquinante organico, in acqua e anidride carbonica o, nel caso di soluzioni, in una sostanza con una minore tossicità (es.: da idrocarburo ad alcool);
- fissazione: si utilizza in prevalenza per ridurre la mobilità dei contaminanti (ad es. dei metalli pesanti) tramite l'iniezione di agenti chimici chelanti, che si accumulano in determinate porzioni di suolo e vengono quindi rimosse e trattate;
- estrazione: si utilizzano iniezioni con solventi per trasferimento degli inquinanti dalla fase solida a quella liquida, i quali vengono successivamente rimossi dal sottosuolo e trattati.

I trattamenti fisici hanno come obiettivo il mutamento dello stato fisico degli inquinanti attraverso:

- inertizzazione/stabilizzazione: l'utilizzo di particolari agenti chimici di varia natura determina la formazione di una massa stabile a ridotta permeabilità;
- termici: viene utilizzato il calore al fine di aumentare la volatilità, bruciare, decomporre o fondere i inquinanti, producendo composti inorganici (ad es. CO₂, H₂O, ossidi di azoto ecc.). All'interno di tale categoria rientra la tecnica della vetrificazione che consiste nella creazione di una matrice solida amorfa, ricca in inquinanti immobilizzati all'interno di una matrice molto resistente.



	Composti Inorganici							Composti Organici											Tempi	Necessità di manutenzione/ monitoraggio a lungo termine	Impatti a breve e lungo termine sulle risorse naturali
	Arsenico	Cadmio	Cromo	Piombo	Mercurio	Zinco	Altri metalli e composti inorganici	Idrocarburi Aromatici	Idrocarburi Policiclici Aromatici	Idrocarburi Alifatici clorurati cancerogeni	Idrocarburi Alifatici clorurati non cancer.	Idrocarburi Alifatici alogenati cancer.	Nitrobenzeni	Clorobenzeni	Fenoli non clorurati	Fenoli clorurati	Ammine aromatiche	Fitofarmaci			
Suolo																					
- trattamento biologico in situ																					
- Bioventing	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Bioremediation (aerobica)	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Bioremediation (anaerobica)	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Phytoremediation	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- trattamento chimico-fisico in situ																					
- Ossidazione chimica	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Ossidazione elettrochimica	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Separazione elettrocinetica	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Soil Flushing	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Soil Vapour Extraction	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Solidificazione/Stabilizzazione	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- trattamento termico in situ																					
- Trattamento termico	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- trattamento biologico ex situ (con escavazione)																					
- Biopile	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Compostaggio	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Landfarming	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Bioreattori	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- trattamento chimico-fisico ex situ (con escavazione)																					
- Estrazione chimica	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Ossidazione/riduzione chimica	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Dealogenazione	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Separazione (Gravità, Magnetica, Fisica)	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Soil Washing	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Solidificazione/Stabilizzazione	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- trattamento termico ex situ (con escavazione)																					
- Incenerimento/Pirolisi	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		
- Desorbimento termico	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘		

Fig. 2 - Matrice di screening realizzata da ISPRA [2, 3]

Solitamente come riferimento conosciuto ed utilizzato a livello nazionale ed internazionale sono stati utilizzati, a seguito di modifiche sia la matrice di screening realizzata da ISPRA [2, 3] (Fig. 2), sia la matrice di screening sviluppata dalla Federal Remediation Technologies Roundtable [4].

Trattamento termico - Desorbimento

Come si evince dalla matrice di screening relativa alle tecnologie di bonifica, il desorbimento termico risulta essere il più veloce e a minor costo tra i trattamenti termici utili per le bonifiche di suoli contaminati. Nell'insieme dei trattamenti di desorbimento termico si intendono, generalmente, processi che consentono di bonificare suoli, fanghi ecc. in matrici solide palabili (terreni, fanghi, sedimenti) contaminate da sostanze organiche vaporizzabili (idrocarburi, pesticidi, diossine ecc.).

Nei processi di desorbimento termico si sottopone la matrice contaminata ad un riscaldamento (diretto o indiretto) in modo da provocare la migrazione dell'inquinante verso la fase gassosa, che verrà successivamente sottoposta ad idonei trattamenti di decontaminazione. L'utilizzo del sistema indiretto è favorito

in particolari condizioni, come quando la concentrazione dell'idrocarburo supera il 5% e non è possibile mescolare il terreno impregnato con altro pulito per diluire la presenza dell'inquinante. Le temperature di trattamento impiegate sono molto variabili, ma generalmente comprese tra 90 e 550 °C: in queste condizioni è possibile avere una parziale decomposizione (pirolisi/ossidazione) della sostanza organica desorbita. Trattamenti operanti a più alte temperature (>1.000 °C), che comportano una simultanea distruzione dell'inquinante, vengono general-

mente classificati quali trattamenti di termodistruzione. La configurazione tipica prevede che il materiale contaminato attraversi il forno e fuoriesca dalla parte opposta. Il flusso gas-materiali, può essere di tipo equicorrente o controcorrente, a seconda del tipo di materiale e delle temperature che si desidera raggiungere. I gas prodotti dal riscaldamento vengono inviati a un ciclone e successivo filtro a maniche, per l'abbattimento delle polveri e, successivamente, alla camera di postcombustione per eliminare gli eventuali prodotti incombusti.

La temperatura, il tempo di residenza e il grado di vuoto all'interno dell'unità di desorbimento sono tali da consentire la separazione dell'acqua e degli inquinanti, dalla sostanza solida.

Il trattamento di desorbimento termico consta, normalmente, di 4 fasi principali:

- 1) pre-trattamento del materiale contaminato;
- 2) fase di desorbimento;
- 3) post-trattamento del materiale solido trattato.
- 4) trattamento delle emissioni gassose con espulsione in atmosfera, e di eventuali residui (smaltimento) derivanti dal sistema di trattamento delle emissioni.

La temperatura, il tempo di residenza e il grado di vuoto nell'unità di desorbimento sono tali da consentire la separazione dell'acqua e degli inquinanti, dalla sostanza solida.

I gas e i vapori che vengono liberati nel desorbitore sono convogliati, con un sistema a vuoto o per mezzo di un gas di trasporto, ad un sistema di filtrazione per il trattamento di tutte le polveri, con recupero e ricircolo nella zona di trattamento. Successivamente gas e micro-particelle residue sono convogliati, con un sistema a vuoto o per mezzo di un gas di trasporto, in un'unità di trattamento dove vengono distrutti termicamente o adsorbiti su carbone attivo. L'acqua recuperata nell'unità di trattamento vapori può essere condensata con recupero energetico e aggiunta al materiale bonificato in uscita dal desorbitore.

Il calore necessario al desorbimento può essere fornito essenzialmente in due modi diversi:

- a) diretto: con una fiamma posizionata direttamente sulla superficie del materiale contaminato; in questo caso, alcuni composti possono subire un'ossidazione termica. Questo tipo di sistema è più efficiente dal punto di vista energetico ed economico, poiché è in grado di trattare portate maggiori di terreno (2-50 t/h) e ha costi operativi inferiori. Queste unità sono ideali per il trattamento di matrici con un potere calorifico di 900-2400 kJ/kg, un contenuto organico non superiore al 5% e con contenuto di umidità relativamente basso (<25%);
- b) indiretto: con un bruciatore che riscalda preventivamente il gas di trasporto, che poi viene inviato nel desorbitore, dove avviene il trasferimento di calore al materiale contaminato; oppure con riscaldamento delle lamiere del desorbitore, all'interno del quale viene mantenuta un'atmosfera con aria o inerte. I gas in uscita dall'unità di desorbimento sono costituiti (oltre che dal gas vettore) dal vapore acqueo e dagli inquinanti rilasciati, mentre i gas di combustione del combustibile seguono percorsi differenti. La capacità del sistema indiretto varia tra 2 e 15 t/h, solitamente non supera il 50% della rimozione, mentre non ha limitazioni relativamente al potere calorifico e al contenuto di umidità del materiale da trattare. In ambedue i casi, aria o gas inerte, il volume delle emissioni inquinate è ridotto e i contaminanti sono più concentrati, mentre le temperature raggiungibili sono più basse rispetto allo scambio diretto.

A seconda della temperatura alla quale viene condotto il trattamento, si distinguono il desorbimento termico a bassa o ad alta temperatura.

Nel primo caso, le temperature operative sono comprese tra 90 e 350 °C, valori sufficienti nel caso di inquinamento da idrocarburi leggeri ($C < 12$), ed il principale obiettivo sono i composti organici volatili non alogenati e i combustibili.

Nel secondo caso, nell'eventualità di inquinamento da idrocarburi pesanti ($C > 12$), si opera tra 320 e 550 °C ed è applicato alla rimozione dei composti organici semivolatili, dei composti policiclici aromatici, dei PCB e dei pesticidi.

Minore è la temperatura operativa più il suolo bonificato conserverà la propria struttura fisica e, in una certa misura, il proprio contenuto di sostanze umiche. Le tipologie di desorbimento sono descritte di seguito.

Unità di desorbimento diretto a tamburo rotante (rotary dryer)

È una tecnologia utilizzata sia in impianti fissi che mobili. Consiste in un reattore cilindrico metallico (tamburo), lievemente inclinato rispetto all'orizzontale per favorire l'avanzamento del materiale. La configurazione tipica prevede che il materiale contaminato attraversi il forno e fuoriesca dalla parte opposta. Il flusso gas-materiali, può essere di tipo equicorrente o controcorrente, a seconda del tipo di materiale e delle temperature che si desidera raggiungere. Mentre i gas prodotti dal riscaldamento vengono inviati a un ciclone e/o successivo filtro a maniche, per l'abbattimento delle polveri e, successivamente, alla camera di postcombustione per eliminare gli eventuali prodotti incombusti.

Unità di desorbimento indiretto a tamburo rotante (rotary dryer)

È una tecnologia utilizzata sia in impianti fissi che mobili. Consiste in un reattore cilindrico metallico (tamburo), lievemente inclinato rispetto all'orizzontale per favorire l'avanzamento del materiale. La configurazione tipica prevede che il materiale contaminato attraversi il forno e fuoriesca dalla parte opposta, mentre i gas e vapori prodotti dal riscaldamento materiale, vengono inviati a un ciclone e poi ad uno scrubber e/o filtro a maniche, per l'abbattimento delle polveri e, successivamente, alla camera di postcombustione per eliminare gli eventuali



	Alogenati volatili Volatile halogenated	Alogenati semivolatili Semi-volatile halogenated	Non alogenati volatili Volatile non-halogenated	Non alogenati semivolatili Semi-volatile non-	PCB	PCBs	Pesticidi Pesticides	Diossine/Furani Dioxins / Furans	Cianuri organici Organic cyanides	Metalli Volatili (Hg) Volatile metals (Hg)	Metalli Volatili (escluso Hg) Volatile metals (excl. Hg)	Metalli non volatili Non-volatile metals	Amianto Asbestos	Materiali radioattivi Radioactive materials	Corrosivi inorganici Inorganic corrosive	Cianuri inorganici Inorganic cyanides
	ORGANICI ORGANIC										INORGANICI INORGANIC					
TERRENO SOIL	■	■	■	■	■	■	▲	■	■	□	□	□	□	□	□	□
FANGO SLUDGE	■	■	■	■	■	▲	▲	■	▲	□	□	□	□	□	□	□
SEDIMENTO SILT	▲	▲	▲	▲	■	▲	▲	■	■	□	□	□	□	□	□	□

■ Efficacia dimostrata (prove di trattabilità eseguito con successo a diverse scale)
Proven (treatability tests successfully performed at different scales)

▲ Efficacia potenziale
Potential efficacy

□ Nessuna efficacia
No effective

Fig. 3 - Elenco materiali trattabili con il desorbimento termico

prodotti incombusti. Mentre i fumi di combustione, vengono emessi o convogliati a sistemi di scambio, per ottimizzare il rendimento termico, e poi vengono emessi in atmosfera.

Unità di desorbimento a coclee (thermal screw)

Consiste in una serie di coclee cave che, avanzando, movimentano, miscelano e riscaldano il materiale contaminato. Il riscaldamento è realizzato facendo circolare all'interno delle coclee un fluido (di solito olio, vapore o sali fusi, o in alternativa è possibile un riscaldamento diretto, di tipo distribuito prevalentemente nella zona dove scorre il materiale da trattare). Il materiale in uscita dall'unità di desorbimento è raffreddato, solitamente con acqua, per abbattere le polveri. Mentre i gas e vapori prodotti dal riscaldamento materiale, vengono inviati a un ciclone e poi ad uno scrubber e/o filtro a maniche, per l'abbattimento delle polveri e, successivamente, alla camera di postcombustione per eliminare gli eventuali prodotti incombusti. La tipologia di riscaldamento dipende molto dalla concentrazione degli idrocarburi presente nel terreno; solitamente se inferiore al 5% si utilizza il sistema diretto, che garantisce prestazioni e consumi migliori. Il desorbimento termico è spesso utilizzato in combinazione con il *soil washing* o l'inertizzazione.

L'economia del processo risente del contenuto di umidità del materiale da trattare, come pure del contenuto di limi, argille e materiale umico, in quanto tendono a legare i contaminanti organici.

Per queste ragioni il terreno, prima di essere inviato all'impianto di TD, viene trattato in modo da evitare l'ingresso di zolle di dimensioni maggiori di 100 mm, che ridurrebbero la possibilità di un desorbimento degli inquinanti al loro interno.

I materiali trattabili con il desorbimento termico o Thermal Desorption (TD) sono riportati nella Fig. 3.

Anche la quantità di fini è un fattore importante per giudicare l'efficacia di una tecnologia piuttosto che di un'altra. In particolare, la percentuale massima di filler (la frazione granulometrica con dimensioni inferiori o uguali a 0,075 mm), non dovrebbe essere superiore al 15% in peso. Resta però inteso che il TD può trattare terreni con granulometria inferiore a 0,075 mm e con percentuali superiori al 15% (massimo 35% in peso), ma ciò determinerà una riduzione della capacità di trattamento del TD. Come si evince dal grafico della Fig. 4, all'aumentare della percentuale di filler (a parità di umidità del terreno), si riduce la potenzialità di resa della macchina. È anche importante determinare il grado di argilla, limo, sabbia e ghiaia del terreno. La composizione ideale per il trattamento tramite desorbimento termico è un terreno sabbioso non consolidato che può presentare un po' di ghiaia. Le argille e i limi sono

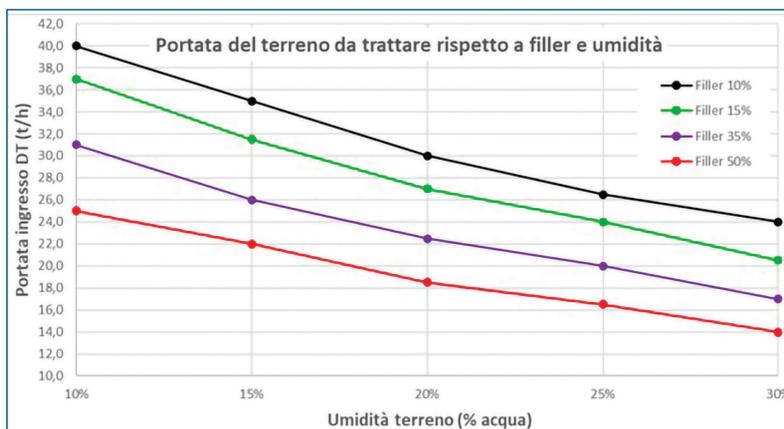


Fig. 4 - Potenzialità macchina in base ad umidità e contenuto di filler

meno ideali perché tendono ad agglomerarsi in particelle più grandi che sono meno suscettibili al trasferimento completo di calore e quindi i contaminanti non sono completamente volatilizzati.

Tra i produttori di questa tipologia di sistemi di TD vi è una realtà tutta italiana.

I.T.T. Srl è una società italiana attiva nella progettazione e realizzazione di impianti di disinquinamento di materiali di varia natura e per il loro riutilizzo. La società nasce dalla fusione delle esperienze dei soci nel campo della tecnica di bonifica, meccanica di precisione, costruzione di impianti e controllo degli stessi, disponendo già di installazioni e referenze in Italia e all'estero.

Come già illustrato il TD dal punto di vista costruttivo è costituito da un forno cilindrico metallico (tamburo rotante con tenute a labirinto), costruito in modo tale da favorire l'avanzamento del materiale il forno è fatto in modo tale poter avere un recupero energetico importante a differenza di altre tecnologie concorrenti. La configurazione prevede che il materiale contaminato attraversi il forno e fuoriesca in prossimità del punto di ingresso. Il flusso gas-matrice è solitamente controcorrente. I gas prodotti dal riscaldamento vengono inviati ad un filtro a maniche, per l'abbattimento delle polveri e, successivamente, alla camera di post-combustione per eliminare i prodotti desorbiti. La temperatura, il tempo di residenza all'interno dell'unità di desorbimento sono tali da consentire la separazione dell'acqua e degli inquinanti, dalla sostanza solida e con una temperatura di trattamento che può arrivare anche ai 500 °C, essendo un processo controcorrente, la temperatura dei fumi in uscita, dal lato opposto rispetto al bruciatore, è di circa 140-180 °C.

Lo schema dell'impianto (Fig. 5) sviluppato per poter affrontare al meglio le problematiche sopra riportate è il seguente:

- 1) tramoggia/e di carico dell'impianto (dove viene inserita la matrice da trattare);
- 2) essiccatore tramite Thermal Desorber;
- 3) raccolta dei fumi in uscita dal TD ed invio dei gas al filtro a maniche (separazione gas-polveri). In questo passaggio è possibile eliminare le polveri contenute nei fumi prima dell'invio dei gas al post combustore rigenerativo;
- 4) i gas, purificati dalle polveri, finiscono all'interno di un post combustore rigenerativo,

dove i residui desorbiti vengono decomposti in acqua e anidride carbonica. I gas depurati finiscono sul camino di espulsione;

- 5) le polveri raccolte nel filtro sono raccolte su big-bag per altra destinazione (Es.: inertizzazione o smaltimento);
- 6) per quanto riguarda il terreno, in uscita dal TD, questo viene raffreddato, con acqua, all'interno di un mixer ed inviato, tramite un nastro trasportatore brandeggiante, in un cumulo per essere raccolto;
- 7) il processo è corredato di:

- uno scrubber venturi che abbatte la polvere proveniente dal sistema di raffreddamento dei terreni, mentre l'aria pulita prosegue fino al camino di uscita principale.

- una torre di lavaggio in grado di abbattere eventuali emissioni acide che possono svilupparsi all'interno del TD.

La temperatura del TD, il tempo di residenza al suo interno ed il grado di vuoto nell'unità di desorbimento sono tali da consentire la separazione dell'acqua e degli inquinanti, dalla matrice solida. Con temperature operative comprese tra 90 e 350 °C, queste sono sufficienti a far desorbire la totalità degli idrocarburi leggeri ($C < 12$) ed il principale obiettivo sono i composti organici volatili compresi gli alogenati. Nel momento in cui l'inquinamento è dato da idrocarburi pesanti ($C > 12$) e composti alogenati, ma anche composti organici come policiclici aromatici, PCB e pesticidi, è necessario aumentare la temperatura fino a 500 °C.

Il desorbimento termico è spesso utilizzato in combinazione con i procedimenti di *soil washing* o di inertizzazione.

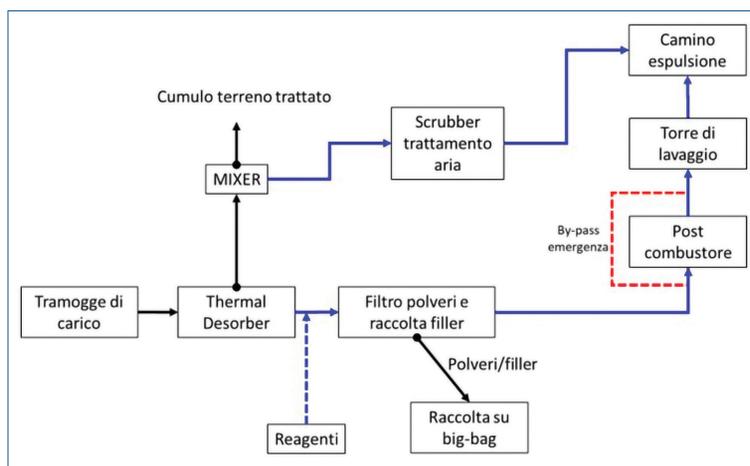


Fig. 5 - Schema dell'impianto

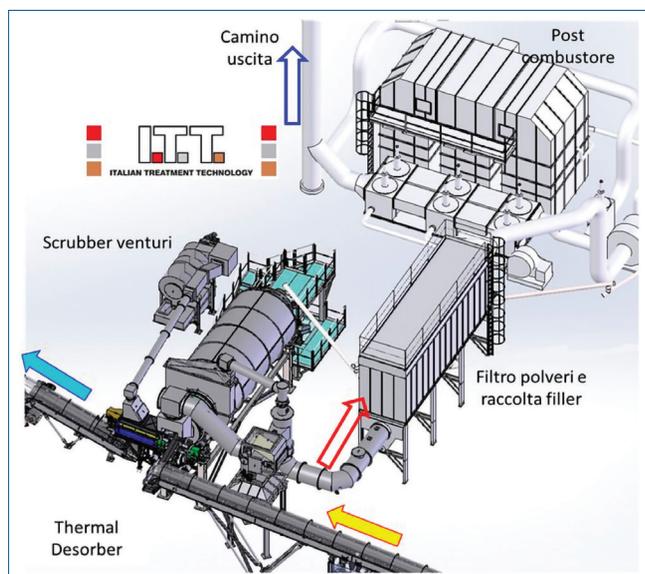


Fig. 6 - Particolare dell'impianto.
Thermal Desorber, filtro e post-combustore

L'economia del processo risente del contenuto di umidità del materiale da trattare, come pure del contenuto di limi, argille e materiale umico, in quanto tendono a legare i contaminanti organici alla matrice solida.

Nella Fig. 6 viene riportata la vista dell'impianto rispetto allo schema precedentemente riportato ed oggetto della presente relazione.

Nella rappresentazione grafica dell'impianto sono riportati i principali apparecchi: alimentazione del TD, TD con raccolta dei fumi ed invio dei gas ad un filtro a maniche. I gas, purificati dalle polveri, finiscono all'interno di un post combustore rigenerativo. Il terreno in uscita dal TD, viene raffreddato, con acqua, all'interno di un mixer ed inviato, tramite un nastro trasportatore brandeggiante, in un cumulo per essere raccolto. Il processo è corredato di uno scrubber Venturi che abbate la polvere proveniente dal sistema di raffreddamento dei terreni.

Fase di desorbimento

Una volta che il materiale entra all'interno del TD il materiale viene investito da un flusso che aumenta la sua temperatura man mano che il terreno procede all'interno del forno rotativo; così si ottiene l'evaporazione dell'acqua interstiziale e dei contaminanti. Gli inquinanti organici vaporizzati vengono aspirati ed inviati all'interno di un post-combustore rigenerativo. Il disegno interno del TD studiato da I.T.T. impedisce alla matrice di non entrare in diret-

to contatto con la fiamma; così da poter mantenere il più possibile inalterate le proprietà del terreno di partenza. L'impianto è stato realizzato in modo da evitare, in ogni suo punto, potenziali fuoriuscite di polveri e degli inquinanti desorbiti.

Funzionalità

Considerando che, generalmente, l'umidità del terreno è compresa nel range 15-25% e con un limite di idrocarburi massimi contenuti nel materiale da trattare max 5% (considerando C<12 e C>12), un impianto dotato di un bruciatore a gas metano da 8 MW ha una capacità di trattare materiali che varia da 20-45 t/h (inteso come materiale vergine in ingresso) ed una produzione di materiale secco che sarà compresa tra 14 t/h e 30 t/h. Attraverso un recupero termico, studiato da I.T.T., i consumi di combustibile primario si riducono da un 20% a un 35% rispetto agli altri impianti che utilizzano la stessa tecnologia. Per quanto riguarda la % di abbattimento si fa presente che:

- per gli idrocarburi C<12 questi desorbono nella parte iniziale TD, fino a raggiungere il post combustore con i fumi,
- per gli idrocarburi C>12, il desorbimento avviene in prossimità della zona fiamma senza che il terreno sia a contatto diretto con la stessa.

L'abbattimento è quello previsto dal D.Lgs. 152/06 (Allegato 4/14 - Allegato 5 al Titolo V della Parte quarta) ed in base al grado di inquinamento iniziale, è possibile determinare se il prodotto in uscita dal TD avrà le caratteristiche della colonna A (verde pubblico/residenziale) oppure nella B (terreni commerciali/industriali) del D.Lgs. 152/06.

Il materiale verrà trattato ad una temperatura massima di 500 °C e, nel caso in cui gli idrocarburi non venissero desorbiti, in prossimità dalla fiamma, decomporranno (Tab. 1).

Inquinante	Concentrazione ingresso al TD (% p/p)	Concentrazione uscita dal TD (% p/p)
Idrocarburi TOC IPA PCB PCDD/PCDF Altri organici	Concentrazione massima 5%*	Concentrazione massima 0,005%*
*sommatoria di inquinanti a base idrocarburo		

Tab. 1 - Abbattimento idrocarburi risultante del 99,9%. Umidità massima prevista nel terreno in ingresso 25%

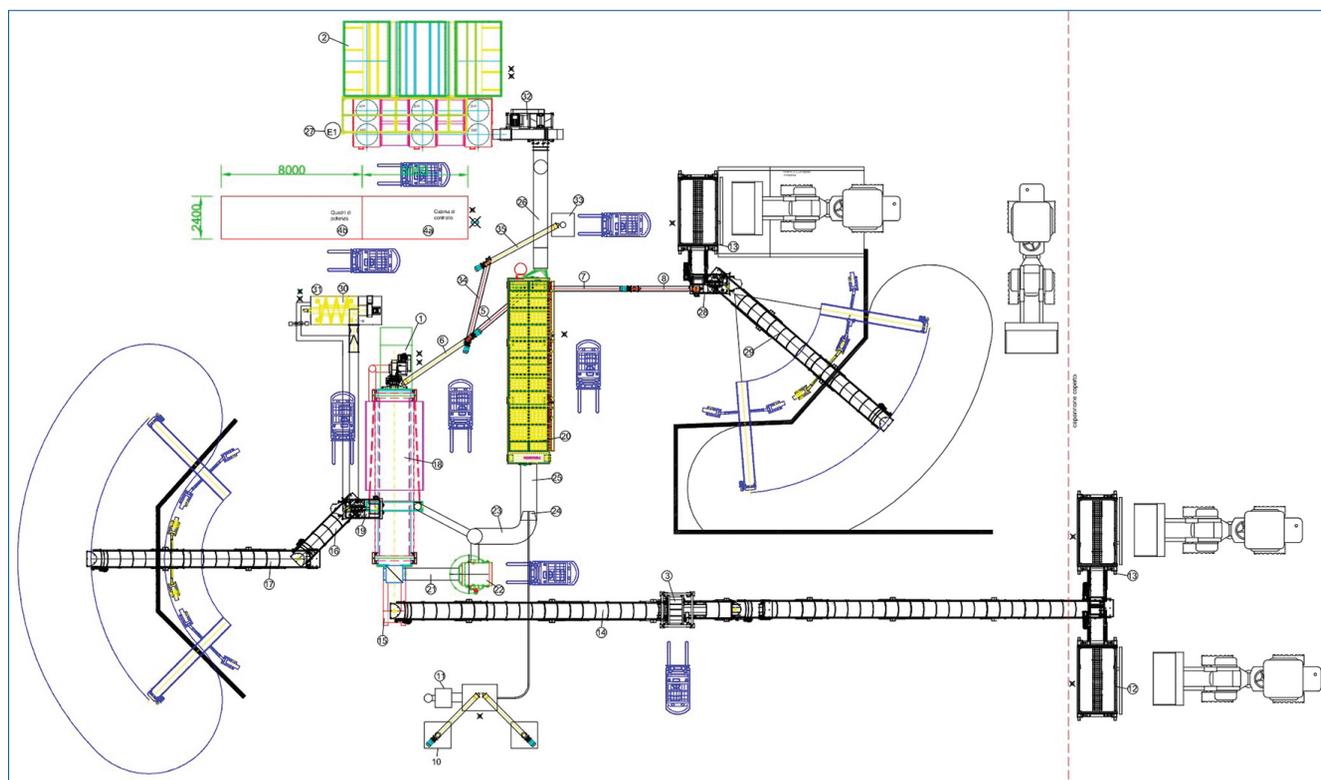


Fig. 7 - Rappresentazione dell'impianto con vista dall'alto

Desorbitore termico

Il cilindro rotante viene montato su n. 2 anelli forgiati e torniti, in acciaio ad elevate prestazioni, che sono fatti ruotare da 4 rulli di sostegno motorizzati ciascuno da un motoriduttore. Il cilindro è dotato di avanzato forno porta bruciatore, con tenuta di tipo a labirinto, tra parte fissa e rotante.

Il desorbitore è inoltre dotato di un particolare sistema di raffreddamento con recupero di calore, che preriscalda il materiale da trattare in ingresso, con un notevole risparmio energetico.

La temperatura di trattamento e la portata di gas al bruciatore sono variate in automatico in funzione del quantitativo di composti organici in ingresso che determinano maggiori o minori apporti termici (Fig. 7).

Thermal Desorber I.T.T. e normativa di riferimento

Il processo del desorbimento termico è, come detto, derivato dal processo di essiccazione e riscaldamento di inerti idonei alla produzione di conglomerati bituminosi richiamato dalla D.Lgs. 152/06. In particolare, il forno di essiccazione degli aggregati, come il TD, è dotato di un bruciatore in cui la fiamma e i prodotti della combustione vengono in con-

tatto con il prodotto da essiccare, in questo caso con il terreno, con camera di combustione mantenuta in depressione per evitare qualsiasi fuoriuscita di polveri, vapori o altro durante il trattamento. Per queste peculiari caratteristiche l'impianto del TD è tecnologicamente assolutamente diversa rispetto a quella a cui si applica l'Allegato I, alla Parte V del D.Lgs. 152/06 - alla Parte III del paragrafo 1 "impianti di combustione con potenza termica inferiore a 50 MW", tanto è vero che al medesimo paragrafo il legislatore ha stabilito che il paragrafo 1 non si applica ai seguenti impianti: "impianti in cui i prodotti della combustione sono utilizzati prevalentemente per il riscaldamento diretto, l'essiccazione o qualsiasi altro trattamento degli oggetti o dei materiali, come forni di riscaldamento e forni di trattamento termico".

Sempre per le caratteristiche tecnologiche particolari, anche il D.M. 133/05, che fa riferimento all'incenerimento e al co-incenerimento, non trova applicazione per questa tipologia di impianti. È comunque possibile effettuare un monitoraggio, sia in continuo sia tramite campionamento, delle emissioni di questo impianto: - misure in continuo di: O₂, CO, NO_x, SO₂, HF, H₂O, HCl, TOC e polveri totali, grazie ad una centralina



CODICE CER	DESCRIZIONE RIFIUTO
CC-220	terra e rocce, contenenti sostanze pericolose
CC-92480	terra e rocce, diverse da quelle di cui alla voce 170503*
CC-90009	fanghi di dragaggio, contenenti sostanze pericolose
CC-99282	fanghi di dragaggio, diversi da quelli di cui alla voce 170505*
CFT7455	pietrisco per massicciate ferroviarie, contenente sostanze pericolose
DKY709	pietrisco per massicciate ferroviarie, diverso da quello di cui alla voce 1 70507*
CC-220	fanghi prodotti da trattamenti chimico-fisici, contenenti sostanze pericolose
CC-92480	fanghi prodotti da trattamenti chimico-fisici, diversi da quelli di cui alla voce 19 02 05
CC-90009	fanghi prodotti dal trattamento biologico delle acque reflue industriali, diversi da quelli di cui alla voce 19 08 11
CC-99282	rifiuti solidi prodotti dalle operazioni di bonifica dei terreni, contenenti sostanze pericolose
CFT7455	rifiuti solidi prodotti dalle operazioni di bonifica dei terreni, diversi da quelli di cui alla voce 19 13 01*
DKY709	fanghi prodotti dalle operazioni di bonifica dei terreni, contenenti sostanze pericolose
CC-90009	fanghi prodotti dalle operazioni di bonifica dei terreni, diversi da quelli di cui alla voce 191303*
CC-99282	fanghi prodotti dalle operazioni di risanamento delle acque di falda, contenenti sostanze pericolose
CFT7455	fanghi prodotti dalle operazioni di risanamento delle acque di falda, diversi da quelli di cui alla voce 19 13 05*
DKY709	rifiuti liquidi acquosi e concentrati acquosi prodotti dalle operazioni di risanamento delle acque di falda, contenenti sostanze pericolose
MRT-2359	rifiuti liquidi acquosi e concentrati acquosi prodotti dalle operazioni di risanamento delle acque di falda

*costo della fitodepurazione "escluso l'apporto di terreno vegetale"

Tab. 2

di misura installata sul camino dopo il post-combustore;
- campionamento in discontinuo dei metalli (Cd, Tl, Hg, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V), diossine e furani, IPA, benzene.

Elenco Codici CER autorizzati

La tipologia di rifiuti che possono essere trattati nell'impianto proposto da I.T.T., vi è una grande varietà di terre contenenti rifiuti è riassunto nella Tab. 2. Le soluzioni tecniche individuate da I.T.T., con portate che vanno da 3 a 50 t/h ed un ventaglio di matrici in ingresso estremamente variabili, con elevate percentuali di rimozione ed un risparmio energetico superiore, per tonnellata di matrice trattata, gli consente di trovare applicazione in importanti siti di bonifica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Decreto Legislativo 152/2006 (Allegato III al Titolo V).
- [2] ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Dipartimento Stato

dell'Ambiente e Metrologia Ambientale, Annuario e Statistiche ambientali, 2010.

- [3] <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/siti-contaminati/tecnologie-di-bonifica>
- [4] https://www.frtr.gov/matrix2/section3/table3_2.pdf

Thermal Desorption and Remediation of Hydrocarbon-Contaminated Soils. The I.T.T. Process

For some remediation processes of soil contaminated by hydrocarbons, thermal desorption technology can be used, which means the process by which the contaminated matrix is subjected to heating that allows the migration of the organic pollutant into the gaseous phase, with subsequent treatments of the gaseous effluent. Thermal desorption allows to treat a wide range of organic contaminants even with high inlet concentrations and ensures high removal efficiency.