



CONVEGNO
**SCARTI MINERARI:
DA RIFIUTO A RISORSA**

6/7 ottobre 2022
📍 Stava di Tesero (TN), Italy

Stabilizzazione di fanghi e sterili di cava con leganti

Prof. Ing. Quintilio Napoleoni

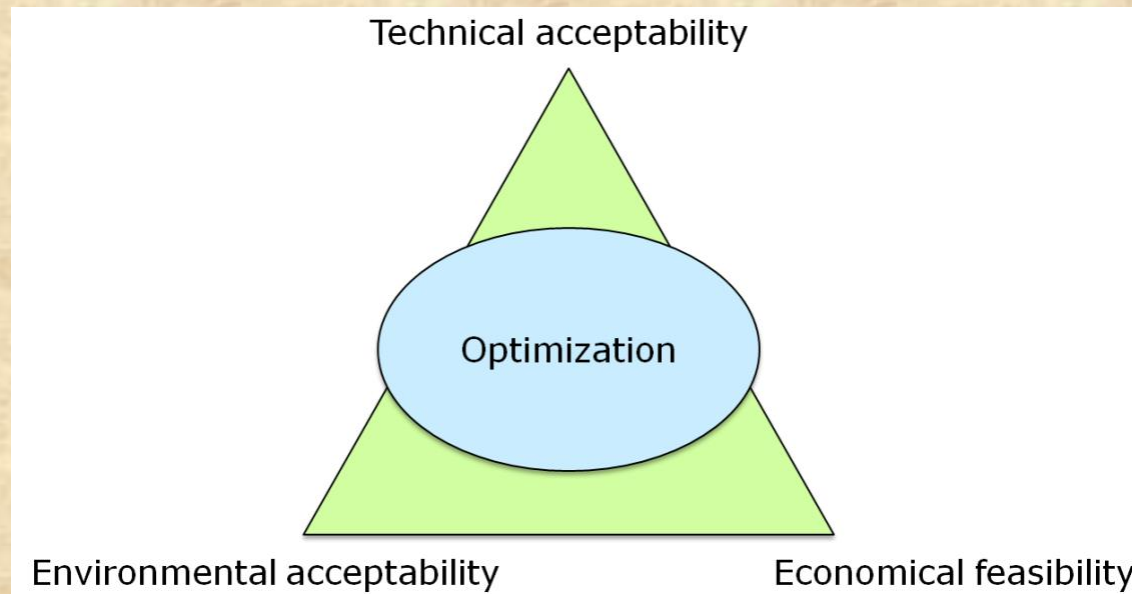
*Facoltà di Ingegneria - Università "Sapienza"
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale*

Introduzione

- La gestione dei fanghi e sterili di cava o miniera è spesso condizionante l'attività di coltivazione e/o di recupero delle vecchie aree
- L'eventuale riutilizzo dei materiali di scarto è condizionato dalle caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche dei fanghi
- La normativa sulla gestione dei fanghi «preferisce» una diretta classificazione dei materiali come rifiuti
- L'eventuale possibilità di riutilizzo dei fanghi, quindi, deve considerare la destinazione finale in relazione a:
 - ✓ Compatibilità ambientale dei sedimenti
 - ✓ Caratteristiche meccaniche dei sedimenti

Introduzione

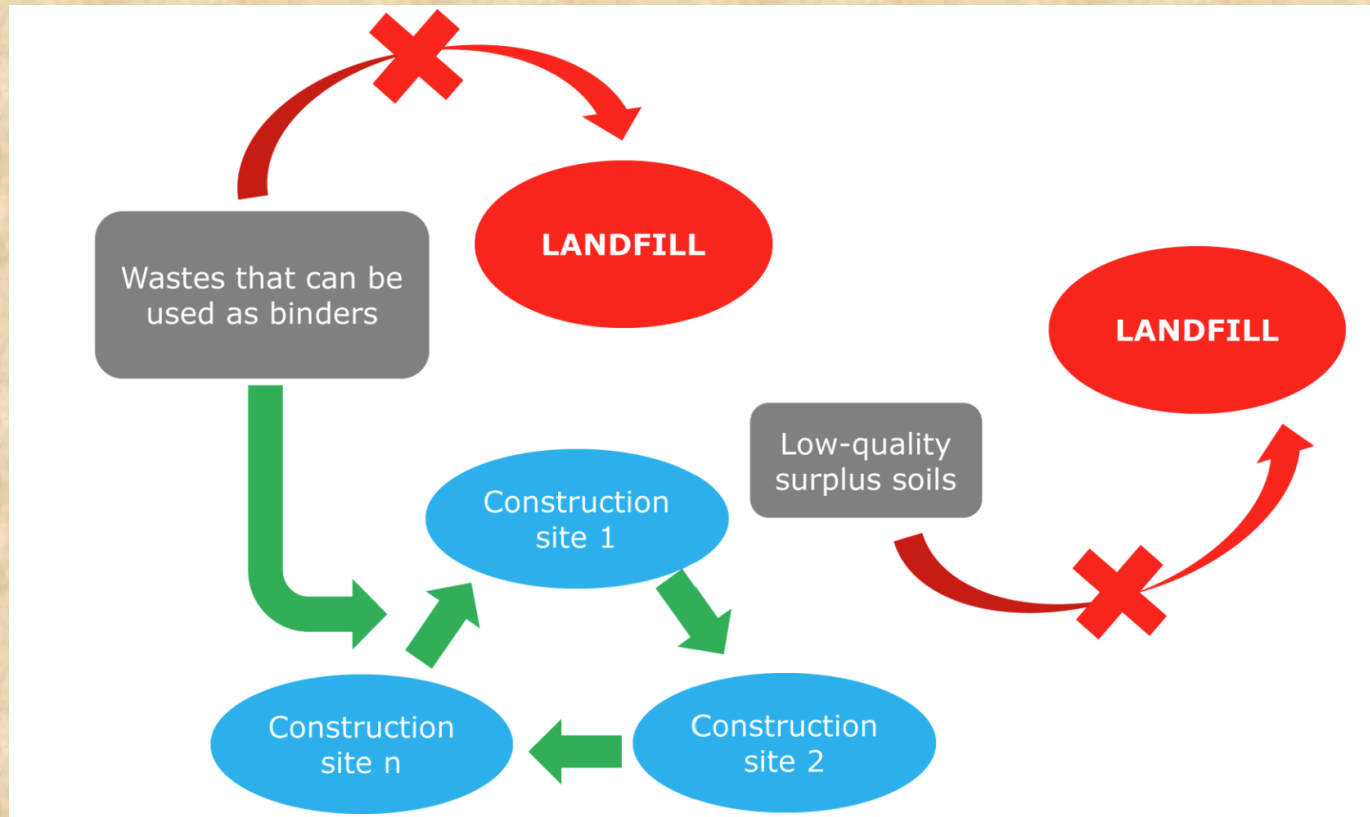
Obiettivi del trattamento: scelta della miscela e della tecnologia



(Ramboll, 2015)

Introduzione

Obiettivi del trattamento: ottimizzazione delle risorse



(Ramboll, 2015)

Introduzione

Obiettivi del trattamento: riuso delle aree e/o dei materiali



Descrizione della tecnologia

La stabilizzazione di massa costituisce un metodo rapido ed economico per intervenire su grandi volumi di terreno, direttamente in sito.

COME SI REALIZZA

- Il consolidamento dei terreni avviene essenzialmente attuando una miscelazione meccanica in situ (preferibilmente a secco) dei terreni stessi con l'aggiunta di leganti opportunamente individuati (solitamente cemento o miscele di calce e cemento).
- La miscela farà poi presa grazie all'acqua naturalmente presente nel suolo

TEST PRELIMINARI

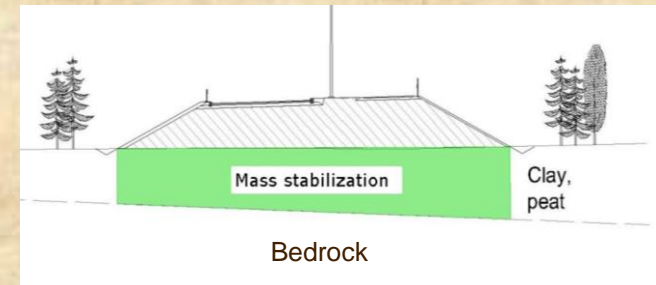
- L'intervento di stabilizzazione è preceduto da una campagna di investigazione iniziale mediante verifiche sulle caratteristiche chimico-fisiche del terreno da trattare.
- I risultati dei test preliminari costituiscono la base per la scelta della tipologia della miscela di leganti e della quantità da impiegare per la stabilizzazione.

Descrizione della tecnologia

- Il consolidamento di massa può essere utilizzato tal quale (in situ o ex situ), o progettato in combinazione al consolidamento in colonne, relativamente alle condizioni stratigrafiche e alla destinazione d'uso del sito su cui si è intervenuti

CASO A

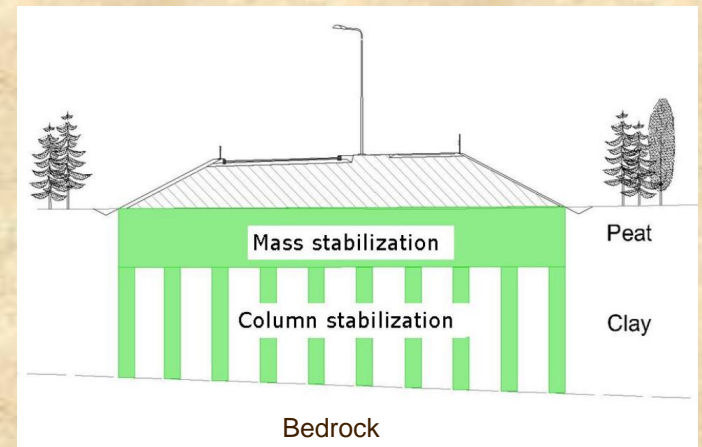
- Strato di torba o materiale poco consistente superficiale su uno strato di buone caratteristiche meccaniche («bedrock»)
- In questo caso il consolidamento di massa per migliorare la qualità del terreno viene eseguito in maniera omogenea



Descrizione della tecnologia

CASO B

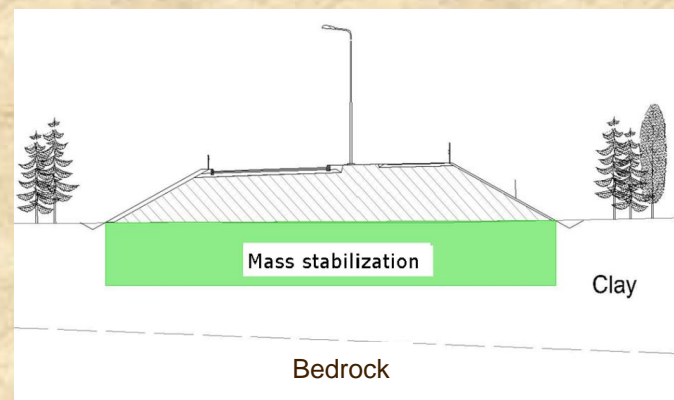
- Strato sottile di torba o materiale poco consistente su strato di terreno compressibile di spessore maggiore che poggiano su uno strato di buone caratteristiche meccaniche («bedrock»)
- In questo caso è possibile progettare una «soletta» creata tramite consolidamento di massa nello strato con qualità meccaniche scadenti e delle colonne di terreno consolidato (deep mix o colonne di ghiaia) nello spessore relativo allo strato compressibile, che vadano a poggiare direttamente sul bedrock



Descrizione della tecnologia

CASO C

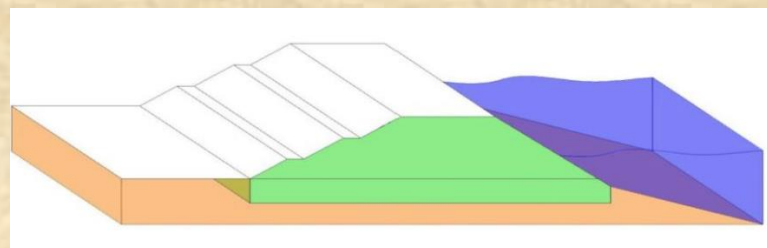
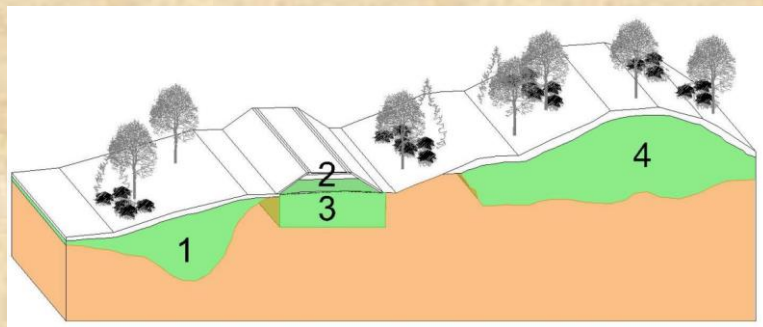
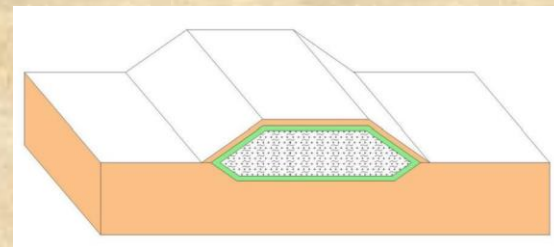
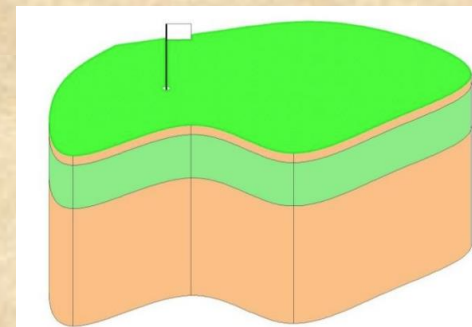
- Strato sottile di torba o materiale poco consistente su strato di terreno compressibile di spessore maggiore
- In questo caso è possibile progettare una «soletta» creata tramite consolidamento di massa nello strato con qualità meccaniche scadenti che rimane «in galleggiamento» sullo strato compressibile



Descrizione della tecnologia

CASO D

- Materiale trattato e poi riutilizzato ex-situ al di fuori dell'area di produzione/stoccaggio
- In questo caso, si deve considerare anche la necessità del trasferimento del materiale già trattato che implica la compatibilità con i tempi di presa



Descrizione della tecnologia

CAMPI DI APPLICAZIONE

- Aumento della resistenza meccanica del terreno
- Miglioramento delle caratteristiche di deformabilità dei suoli (riduzione dei cedimenti)
- Aumento della rigidità dinamica dei suoli
- Trattamento dei suoli contaminati (microincapsulamento)

VANTAGGI

- E' un metodo particolarmente rapido per il miglioramento geotecnico del terreno e può essere adattato al variare delle condizioni chimico-fisiche del terreno da stabilizzare
- E' un processo economicamente vantaggioso sia in termini energetici sia in riferimento al recupero dei materiali in situ
- E' una tecnologia sviluppata in situ, pertanto consente di eliminare i costi di trasporto del materiale da trattare, i costi di conferimento in discarica controllata, nonché l'impatto legato all'inquinamento provocato dai mezzi per il trasporto del materiale stesso
- Consente di disporre delle aree consolidate in tempi molto brevi (anche dopo qualche giorno)

Progettazione della stabilizzazione

Fasi del progetto di stabilizzazione di massa

- Raccolta di informazioni e dati iniziali
- Indagini iniziali e progettazione comprese le **prove iniziali di stabilizzazione (mix design)**
- Dimensionamento e prove di stabilizzazione vera e propria (campo prove)
- Progettazione, disegni tecnici, Capitolato Speciale di Appalto, piano di garanzia della qualità (CQA)
- Gara di Appalto
- Lavori di stabilizzazione e controllo qualità (QA)
- Collaudo

Procedure di progettazione della miscela



Tecniche di stabilizzazione di massa

TECNICHE ESECUTIVE

Le tecniche esecutive si dividono in due categorie:

- Ex situ
 - ✓ Miscelazione con attrezzature in superficie
- In situ
 - ✓ Miscelazione con utensile ad asse verticale (tipo deep mix)
 - ✓ Miscelazione con utensile ad asse orizzontale

Tecniche di stabilizzazione di massa

TECNICHE ESECUTIVE

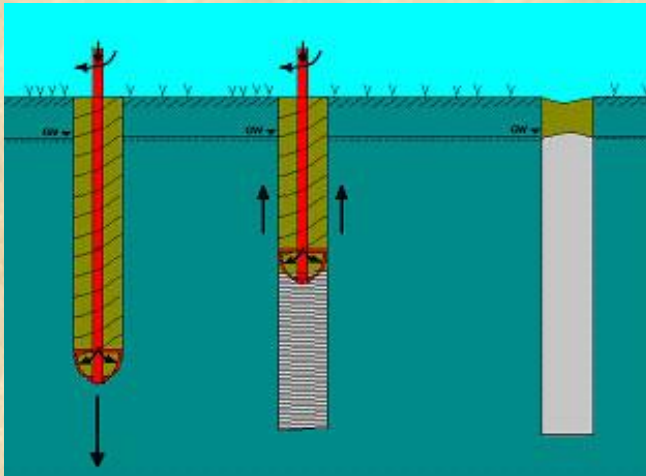
- Ex situ
 - ✓ Miscelazione con attrezzature in superficie



Tecniche di stabilizzazione di massa

TECNICHE ESECUTIVE

- In situ
 - ✓ Miscelazione con utensile ad asse verticale (tipo deep mix)



Tecniche di stabilizzazione di massa

TECNICHE ESECUTIVE

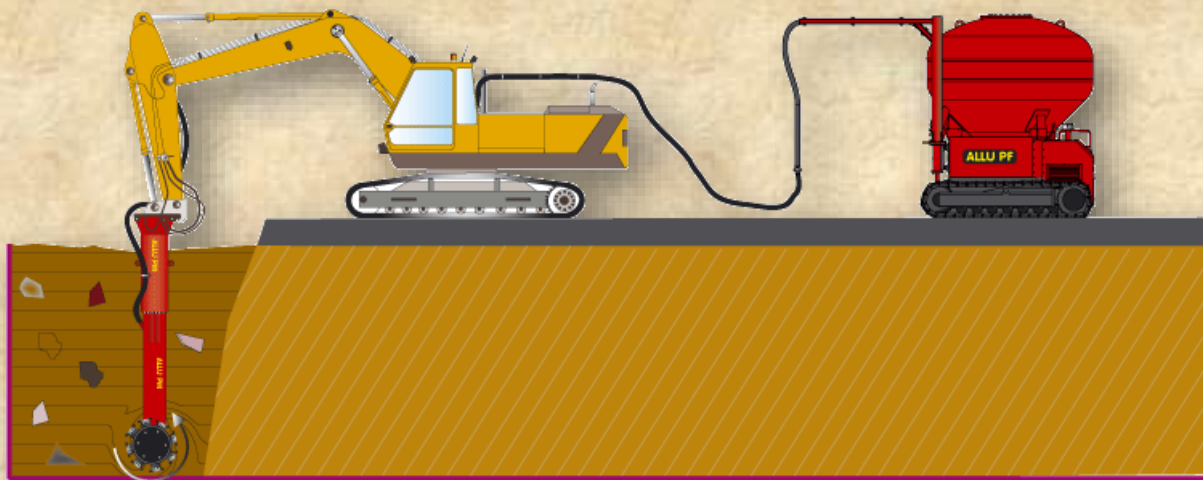
- In situ
 - ✓ Miscelazione con utensile ad asse verticale (tipo deep mix)



Tecniche di stabilizzazione di massa

TECNICHE ESECUTIVE

- In situ
 - ✓ Miscelazione con utensile ad asse orizzontale



Sistema di stabilizzazione ALLU

- Il sistema di stabilizzazione di massa PM-PF è un metodo poco invasivo per l'ambiente in grado di consolidare i terreni poco consistenti come aree paludose, fanghi di dragaggio, fanghi e sterili da miniera o incapsulare terreni contaminati tramite l'aggiunta di un agente legante.



Sistema di stabilizzazione ALLU

- In particolare, la tecnologia in esame è stata applicata alla stabilizzazione di massa in un'ampia casistica:
 - ✓ Solidificazione/stabilizzazione di sedimenti dragati (da mare e/o da lago)
 - ✓ Solidificazione/stabilizzazione di fanghi e sterili di cava o miniera
 - ✓ Trattamento di rifiuti e di suoli contaminati: solidificazione, isolamento e neutralizzazione
 - ✓ Piazzali, aree di parcheggio, campi sportivi e aree di magazzino
 - ✓ Rilevati per costruzioni stradali e ferroviarie;
 - ✓ Fondazioni per strutture industriali, ponti, piscine e discariche
 - ✓ Barriere antirumore e sponde di fiumi, laghi, scarpate stradali ecc.
 - ✓ Eliminazione delle vibrazioni da traffico
 - ✓ Stabilizzazione di suoli per la successiva perforazione di tunnel
 - ✓ Creazione di sottofondi per la posa di tubazioni sotterranee
 - ✓ Protezione di strutture adiacenti ai cantieri
 - ✓ Riduzione della spinta delle terre
 - ✓ Strati di protezione per acque di falda
 - ✓ Protezione dal gelo

Sistema di stabilizzazione ALLU

- Il sistema di stabilizzazione ALLU è costituito da tre componenti:
 - ✓ PM Power Mix, un accessorio idraulico per escavatori.
 - ✓ PF Pressure Feeder, che pressurizza e inietta l'agente legante attraverso la tubazione all'interno del terreno.
 - ✓ DAC, sistema di acquisizione dati in grado di misurare, controllare e relazionare il progetto di stabilizzazione.



Applicazioni a carattere strutturale

OBIETTIVO

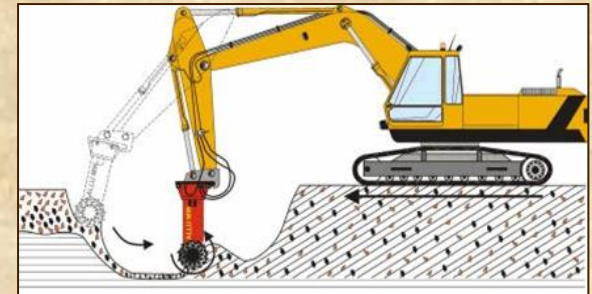
Rendere utilizzabili terreni con scarse caratteristiche meccaniche quali resistenza e deformabilità (torbe o fanghi)

APPLICAZIONE

Siti dove, in superficie, sono presenti strati di piccolo spessore (< 5.0 m) costituiti da torba, argilla ed altre miscele di terreno poco consistenti

MODALITA' OPERATIVE

- quando il suolo è poco consistente, può essere aggiunta sabbia in superficie ed il legante è alimentato direttamente in testa al miscelatore, mentre i tamburi ruotano. Il materiale poi così miscelato, è tirato verso l'escavatore dall'operatore e portato al livello desiderato, così da poter avanzare sul terreno trattato
- quando il terreno è molto umido (torba, fango o argilla soffice), il legante è sempre alimentato attraverso il miscelatore mentre è in movimento; l'operatore esegue il lavoro per blocchi sequenziali per evitare che vi siano dispersioni laterali di additivi; completato un allineamento si passa a quello successivo



Applicazioni a carattere ambientale

OBIETTIVO

Bonificare siti contaminati, impedendo agli inquinanti di migrare nei terreni limitrofi non contaminati

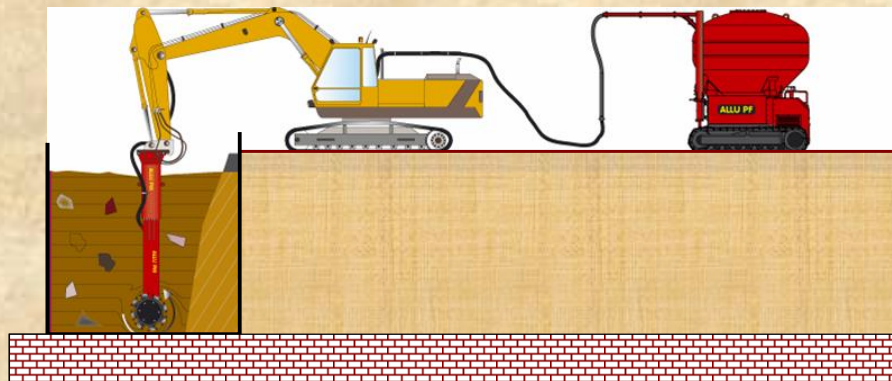
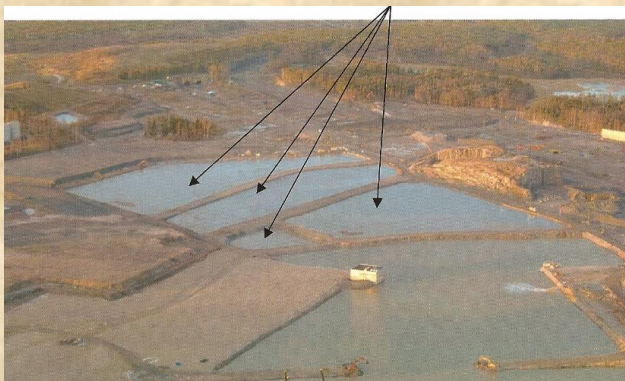
APPLICAZIONE

Molto efficace nel trattamento di fanghi portuali dragati o fanghi di miniera considerati inutilizzabili per ogni tipo di costruzione.

MODALITA' OPERATIVE

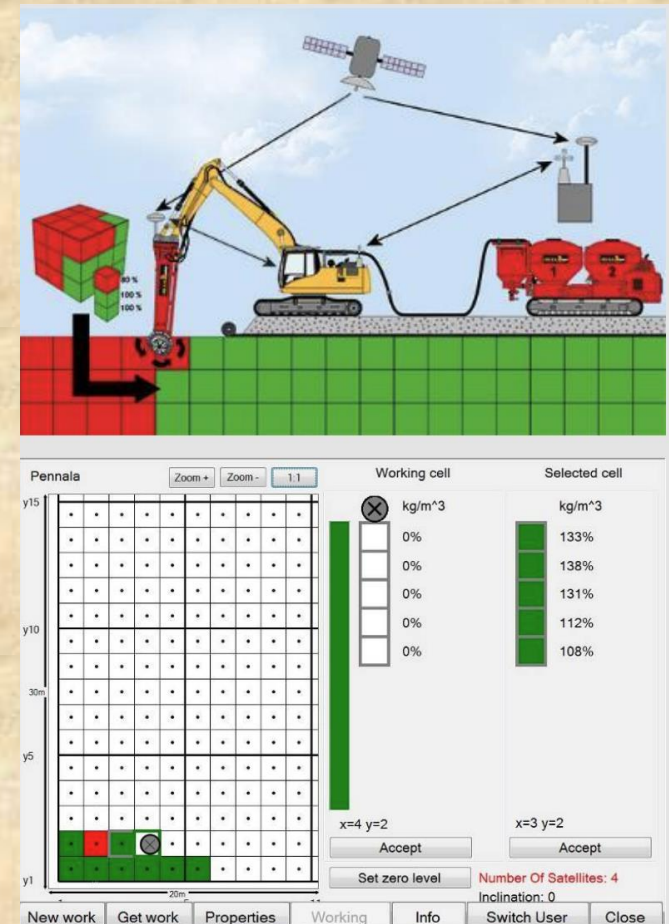
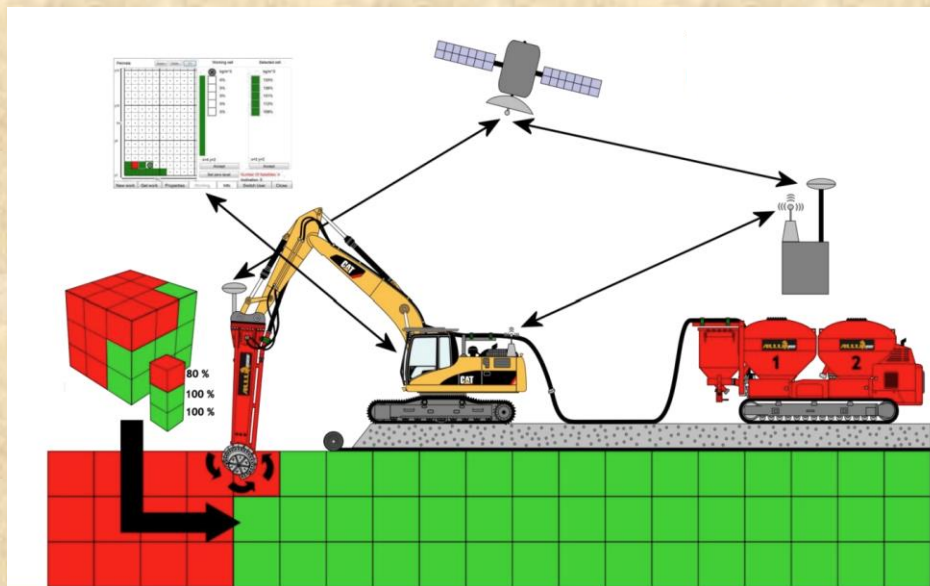
L'intervento tipo avviene realizzando bacini confinati dove disporre i sedimenti dragati o raccogliendo i fanghi in vasche.

Atteso un primo periodo di consolidazione naturale dovuto ai processi di sedimentazione, si procede come negli altri casi alla miscelazione del terreno con il mixer utilizzando le quantità di leganti necessarie che variano di caso in caso.



Controlli di qualità sul trattamento

Verifica dell'omogeneità del trattamento



Leganti

Per leganti si intendono i diversi additivi utilizzabili per il consolidamento, capaci di costituire uno scheletro solido all'interno del terreno miscelato

L. IDRAULICI

Maturano a contatto con l'acqua. Sono pressoché adatti ad ogni tipo di terreno, ma se la miscelazione meccanica non è avvenuta con accuratezza, il risultato sarà eterogeneo

L. NON IDRAULICI

Non idraulici, se ha bisogno di un catalizzatore per avviare la maturazione. Reagiscono generalmente con i minerali argillosi presenti nel terreno, i quali ne migliorano le caratteristiche geotecniche

ALTRI ADDITIVI

Sono ricavati da processi industriali (sottoprodotti). Possono essere utilizzati per consolidamento di massa e profondo.

Leganti

Leganti nella stabilizzazione di massa

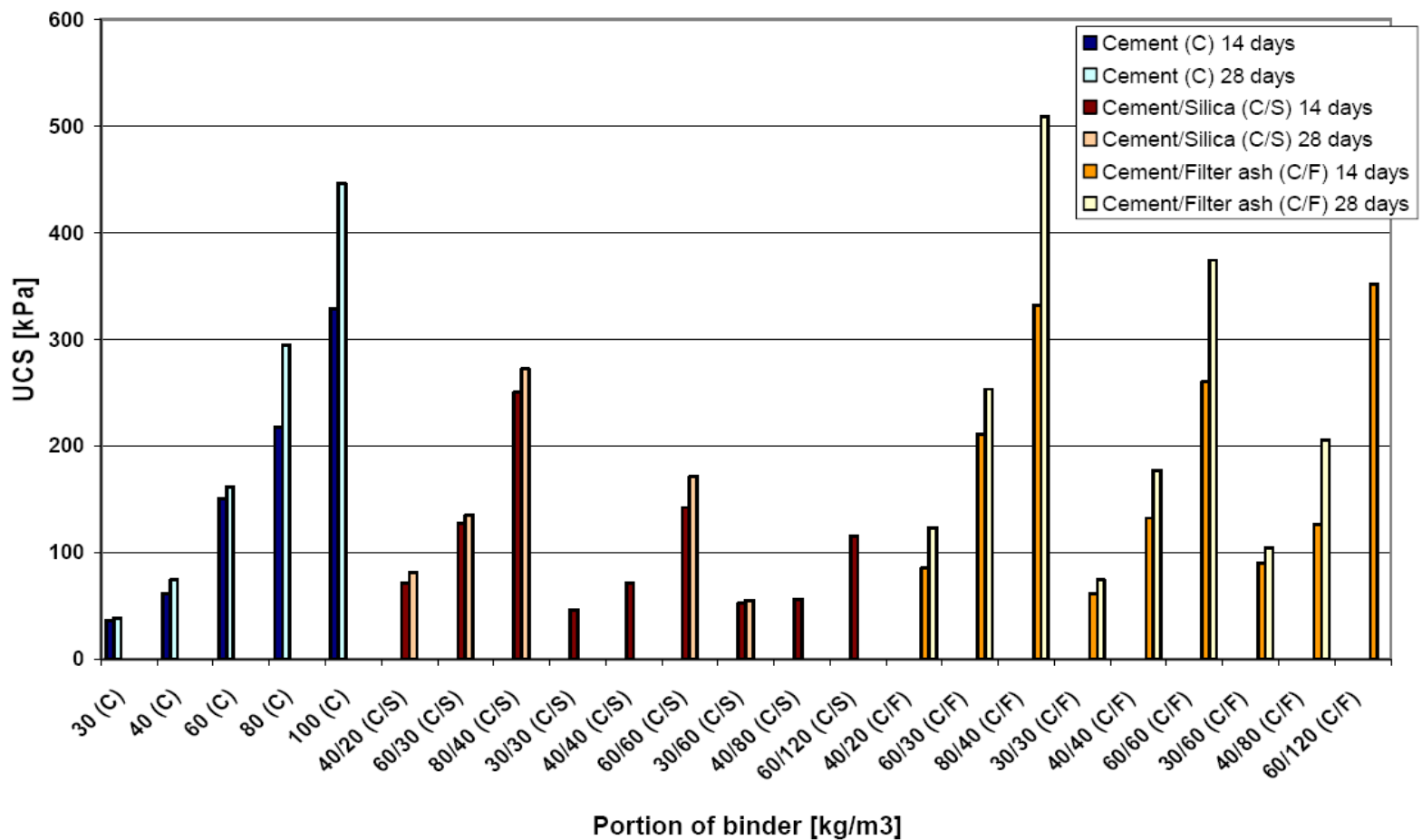
- Il costo dei leganti costituisce una parte considerevole del costo della stabilizzazione della massa
- **Cemento, calce o loro miscele** sono i leganti più comunemente usati
- In alcuni situazioni possono essere utilizzate come leganti **scorie, ceneri volanti e materiali gessosi**
- La selezione del legante è influenzata da fattori quali, la resistenza, la deformabilità, le caratteristiche di lisciviazione e permeabilità, così come la velocità di presa iniziale e la velocità di maturazione complessiva
- L'utilizzo di sottoprodotti industriali come leganti consente di ottenere risultati economici ottimali nel trattamento di grandi masse di terreno

Leganti per differenti terreni

- I parametri geotecnici e chimici del suolo e la scelta appropriata della miscela da utilizzare hanno un ruolo fondamentale al fine del risultato di consolidamento
- I valori tipici di quantità di legante variano da un minimo di 100 kg/mc ad un massimo di 250 kg/mc
- Le miscele di materiali di due componenti sono largamente utilizzate, ma tre componenti sono più versatili e più efficaci in molti casi

Terreno (Contenuto organico)	Fango limoso (CO 0-2%)	Fango argilloso (CO 0-2%)	Suoli e fanghi organici (CO 2-30%)	Suoli torbosi, torba (CO 50-100%)
Cemento	★★	★	★	★★
Cemento + gesso	★	★	★★	★★
Cemento + loppa	★★	★★	★★	★★★★
Calce + cemento	★★	★★	★	×
Calce + gesso	★★	★★	★★	×
Calce + loppa	★	★	★	×
Calce + gesso + loppa	★★	★★	★★	×
Calce+gesso+cemento	★★	★★	★★	×
Calce	×	★★	×	×

Efficacia dosaggio/leganti (resistenza)



Efficacia dosaggio/leganti (test cessione)

analita	U.M.	limite A*	limite B**	limite C***	bianco, non trattato		200 kg/m ³	150 kg/m ³	100 kg/m ³
					B2	B1	DOS1 A	DOS2 A	DOS3 A
azoto ammoniacale	mg/L	15	30	-	<0.011	0.207	3.47±0.87	3.68±0.92	3.52±0.88
solfiti	mg/L	1	2	-	<0.016	<0.016	1.17	1.49	2.63
pH	unità pH	5.5-9.5	5.5-9.5	5.5-12.0	10.60	10.50	8.80±0.17	8.60±0.17	8.90±0.17
colore	diluizione	20	40	-	2	2	0	0	0
odore	-	-	-	-	1	3	2	2	2
tipologia odore	-	-	-	-	nessun odore	aromatico	aromatico	aromatico	aromatico
materiali grossolani	-	assenti	assenti	-	assenti	assenti	assenti	assenti	assenti
solidi sospesi totali	mg/L	80	200	-	189	58100	<0.50	<0.50	<0.50
BOD5	mg/L	40	250	-	16.0	1000	6.0±1.3	4	4
COD	mg/L	160	500	30	44.8	1200	92±23	89±22	101±25
cromo VI	mg/L	0.2	0.2	-	<0.00049	<0.00049	<0.00049	<0.00049	<0.00049

analita	U.M.	limite A*	limite B**	limite C***	bianco, non trattato		200 kg/m ³	150 kg/m ³	100 kg/m ³
					B2	B1	DOS1 A	DOS2 A	DOS3 A
alluminio	mg/L	1	2	-	5.0	511	0.60±0.15	0.88±0.22	1.84±0.46
arsenico	mg/L	0.5	0.5	0.05	0.00343	0.268	<0.0015	0.00178	0.00228
bario	mg/L	20	-	1	0.0195	0.94	0.208±0.052	0.125±0.031	0.046±0.011
boro	mg/L	2	4	-	1.02	1.12	0.0621	0.069	0.0769
cadmio	mg/L	0.02	0.02	0.005	<0.00061	0.0103	<0.00061	<0.00061	<0.00061
cromo	mg/L	2	4	0.05	0.0183	1.76	0.00299	0.004	0.00342
ferro	mg/L	2	4	-	6.8	1000	0.0809	0.110±0.028	0.126±0.031
manganese	mg/L	2	4	-	0.121	17.5	<0.0015	<0.0015	<0.0015
mercurio	mg/L	0.005	0.005	0.001	0.000726	0.059	0.000231	0.000227	<0.00019
nicel	mg/L	2	4	0.01	0.0133	1.34	0.047±0.012	0.042±0.010	0.041±0.010
piombo	mg/L	0.2	0.3	0.05	0.0115	1.49	0.00267	0.00282	<0.00094
stagno	mg/L	10	-	-	0.000446	0.045	<0.00018	<0.00018	<0.00018
rame	mg/L	0.1	0.4	0.05	0.0132	1.43	0.0161	0.0214±0.0053	<0.0016
selenio	mg/L	0.03	0.03	0.01	<0.0017	0.0367	<0.0017	<0.0017	<0.0017
zinco	mg/L	0.5	1	3	0.0614	4.4	0.0231	0.035	0.0397
cianuri totali	mg/L	0.5	1	0.05	<0.029	<0.029	<0.0024	<0.0024	<0.0024

- Cemento/calce 80/20
- Test di cessione in blocco. UNI 10802

Esempi di resistenza raggiungibile

Tipo di suolo	Legante aggiunto (kg/m ³)	Resistenza a compressione uniassiale, 28 d (kPa)
Fanghi e dragaggi	200 - 400	70 - 350
Limi e argille organiche	150 - 260	350 - 1400
Limi	120 - 240	700 - 2100
Torbe	150 - 300	150 - 650

Costi - benefici

- Economicità
- Versatilità e flessibilità
- Drastica riduzione dell'impatto sull'ambiente rispetto ad altre tecniche utilizzate (es. sostituzione dei terreni o discarica)
- Minimizzazione dell'impianto cantiere (tempi, attrezzature...)
- Riduzione delle aree di cantiere
- Disponibilità delle aree sottoposte a consolidamento in tempi brevi

Possibili campi di applicazione

Possibili (e teorici) campi di applicazione per **fanghi e sterili di cava o miniera** stabilizzati:

- Miglioramento del sottofondo per progetti di strade, ferrovie etc.. (come materiale di bonifica)
- Riempimenti di colmate (anche a mare)
- Ripristini ambientali (cave e miniere)
- Riempimenti nella realizzazione di aree sportive all'aperto
- Coperture di discariche ed aree contaminate
- Riempimenti di cavità sotterranee
- Riempimenti di trincee per la posa di sottoservizi (betonabile)

Il trattamento dei fanghi e sterili



Il trattamento dei fanghi e sterili



Il trattamento dei fanghi e sterili



Il trattamento dei fanghi e sterili



Il trattamento dei fanghi e sterili



Il trattamento dei fanghi e sterili



Case history

Repubblica Ceca: fanghi di miniera

Circa 400.000 mc di fanghi

Legante: calce



(Mass Stabilization Manual, 2015)

Case history

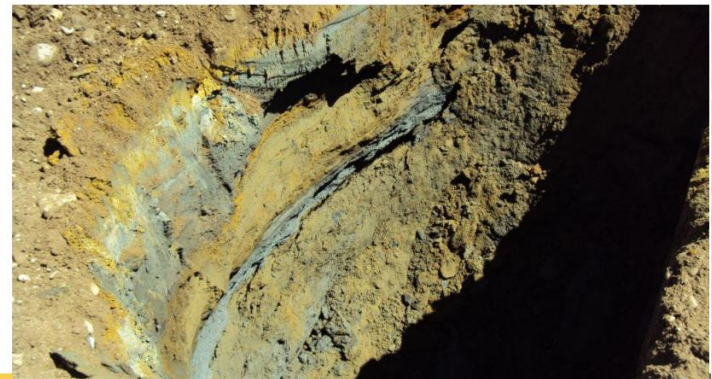
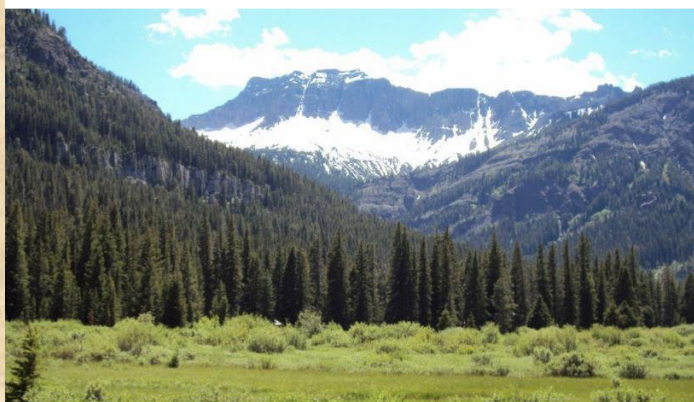
Repubblica Ceca: sterili di miniera



(Mass Stabilization Manual, 2015)

Case history

USA: Montana: miniera d'oro



(Mass Stabilization Manual, 2015)

Case history

Montenegro: sterili di Bauxite



(Mass Stabilization Manual, 2015)

Case history

Inghilterra: catrame acido da miniera di carbone



(Mass Stabilization Manual, 2015)

Case history

Spagna: terre miste ad idrocarburi



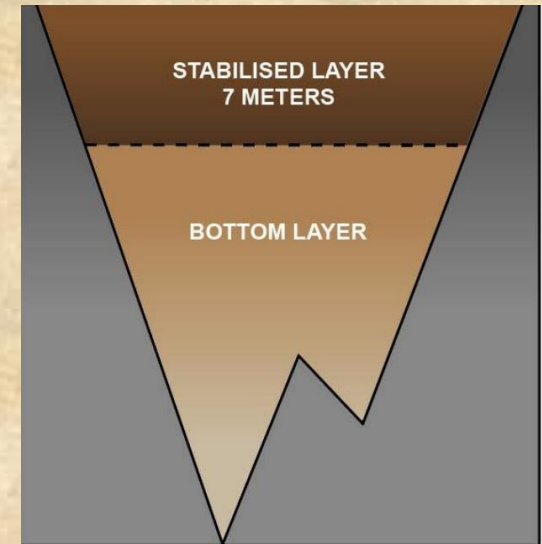
(Mass Stabilization Manual, 2015)

Case history

Turchia: fanghi di cava

Circa 150.000 mc di fanghi

Legante: calce



(Mass Stabilization Manual, 2015)

Case history

Repubblica Ceca: sterili miniera



(Mass Stabilization Manual, 2015)



Case history

Australia: sterili di miniera



(Keller, 2015)

Conclusioni

- Tecnologia molto versatile in relazione sia alle caratteristiche dei terreni che alle condizioni di utilizzo
- Tecnologia che riduce gli impatti ambientali sul consolidamento fanghi (immobilizzazione, riduzione trasporti etc..)
- Caratteristiche meccaniche del terreno trattato molto buone e tali da poter trasformare le superfici in aree utilizzabili
- Costi relativamente contenuti e ridotti rispetto a soluzioni equivalenti

Conclusioni

- Velocità elevata di esecuzione del trattamento (> 500 mc/d)
- Riduzione dei volumi delle discariche
- Riqualficazione delle discariche o dei lagunaggi
- Molto delicato (purtroppo) è l'aspetto normativo che non facilita l'impiego dei fanghi e sterili anche dopo stabilizzazione