



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

**TECNOLOGIE PER LA MESSA IN SICUREZZA DI SITI
INQUINATI MEDIANTE CINTURAZIONE
PERIMETRALE**

Technologies for securing polluted sites by perimeter cut-off walls

Relatore: Chiar.ma

Prof.ssa Evelina FRATALOCCHI

Tesi di Laurea di:

Rossella SELVAGGIO

Anno Accademico 2023/2024

*Ai 3 Capolavori che hanno impegnato
ed animato i miei anni più belli:*

Antonio, Francesco ed Alice.

*“Il nostro dovere reale è quello di
preservare il nostro sogno.”*

Amedeo Modigliani

INDICE

INQUADRAMENTO e SCOPO della TESI	1
INTRODUZIONE	3
CAPITOLO 1: La messa in sicurezza	7
1.1 Messa in sicurezza d'urgenza (art. 240, lett. m)	7
1.2 Messa in sicurezza operativa (art. 240, lett. n)	8
1.3 Messa in sicurezza permanente (art. 240, lett. o)	9
1.4 Bonifica e ripristino ambientale	11
1.5 Inquadramento Normativo: definizioni	12
CAPITOLO 2: Diaframmi plastici	13
2.1 Impiego e requisiti	13
2.2 Tipologie di diaframmi e relative prestazioni	16
2.2.1 <i>Diaframmi senza asportazione di terreno</i>	17
2.2.2 <i>Diaframmi con materiali di risulta</i>	21
2.2.3 <i>Diaframmi con scavo e sostituzione</i>	27
CAPITOLO 3: Diaframmi autoindurenti	31
3.1 Le miscele autoindurenti	31
3.1.1 <i>Composizione</i>	32
3.1.2 <i>Cemento</i>	34
3.1.3 <i>Bentonite</i>	36
3.1.4 <i>Acqua</i>	38
3.2 Diaframmi acqua-cemento-bentonite	39
3.3 Proprietà delle miscele allo stato fluido	43
3.3.1 <i>Viscosità</i>	43
3.3.2 <i>Peso di volume</i>	45
3.3.3 <i>Resa volumetrica</i>	46

3.4 Proprietà e comportamento delle miscele allo stato indurito	46
3.4.1 <i>Resistenza meccanica.</i>	47
3.4.2 <i>Deformabilità</i>	48
3.5 Prestazioni idrauliche	49
3.5.1 <i>Fattori intrinseci</i>	51
3.5.2 <i>Controllo della conducibilità idraulica</i>	57
3.5.3 <i>L'impiego di additivi</i>	57
3.5.4 <i>Fattori esecutivi</i>	59
3.6 Compatibilità chimica e durabilità	63
3.7 Diaframma composito	68
3.8 Vantaggi e limiti applicativi	71
CAPITOLO 4: Jet- grouting	73
4.1 Cos'è il Jet-Grouting	73
4.2 Fasi del processo esecutivo	74
4.3 Tecnologie	76
4.4 Parametri operativi	79
4.5 Resistenza a compressione e jet-grouting	81
4.6 Compatibilità chimica	82
4.7 Impianto in cantiere	83
4.8 Vantaggi e limiti applicativi	84
CAPITOLO 5: Considerazioni conclusive	87
BIBLIOGRAFIA	
GRAZIE	

INQUADRAMENTO e SCOPO della TESI

La presenza in Italia di numerosi siti di deposito non controllato di rifiuti, di discariche che manifestano criticità o di siti contaminati per pregresse o presenti attività industriali rappresenta un grave problema sanitario, sociale, ambientale ed economico.

In Europa esistono circa 1 mln di siti potenzialmente contaminati e sono stati stimati ulteriori 1,5 mln di siti contaminati non identificati (non tutte le nazioni europee hanno effettuato un censimento dei siti potenzialmente contaminati). Nella sola penisola italiana sono stati accertati circa 12.500 siti contaminati che stanno provocando ingenti danni all'uomo e all'ambiente. Dalle statistiche risulta evidente l'estrema necessità di rafforzare le politiche per la tutela ambientale e gli investimenti nel settore. Dal punto di vista normativo, vi è stato in Italia un notevole passo avanti con l'entrata in vigore del D.Lgs. 152/2006 - "Testo unico in materia ambientale", che disciplina, tra l'altro, la caratterizzazione e le procedure per stabilire se un sito risulta contaminato ed i criteri per gli interventi di bonifica o di messa in sicurezza. È stato in particolare riconosciuto che le migliori tecnologie attualmente disponibili per gli interventi di bonifica possono non essere efficaci (per contaminazione pluritipo e/o in situazioni litostratigrafiche complesse) o che tali tecnologie, pur efficaci, possono avere costi non sostenibili. In tutti i suddetti casi, purtroppo molto frequenti, è indispensabile il ricorso ad **interventi di messa in sicurezza** atti ad isolare il sito contaminato dai possibili bersagli della contaminazione (acque di falda, flora, fauna, esseri umani). Le stesse soluzioni possono essere adottate per discariche non controllate o per le quali i sistemi di rivestimento non siano più efficienti, essendo improponibile, dal punto di vista economico ed ambientale, la rimozione dei rifiuti per il conferimento in idonei impianti, peraltro sempre più rari.

Il presente lavoro di ricerca si inquadra nell'ambito della messa in sicurezza di siti contaminati e riguarda gli interventi di cinturazione perimetrale.

I diaframmi aventi bassa conducibilità idraulica costituiscono una misura di contenimento passiva ampiamente adottata per la cinturazione di siti contaminati, per evitare la migrazione dei contaminanti in falda.

L'efficacia e in generale le prestazioni dei diaframmi sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche idrauliche, chimiche e meccaniche del materiale costituente il diaframma e dalla continuità del diaframma stesso, dipendente dalla tipologia e tecnologia esecutiva. Per quanto riguarda il materiale, è di fondamentale importanza lo studio della sua interazione con gli inquinanti da contenere e la previsione della sua durabilità, nonché la determinazione dei parametri di diffusione e assorbimento.

Di seguito saranno illustrate le principali tecnologie disponibili per la realizzazione di diaframmi, puntualizzandone aspetti salienti, vantaggi e limiti. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla bibliografia di riferimento. Saranno poi trattati con maggiore dettaglio i diaframmi plastici costituiti da miscele acqua-cemento-bentonite (cosiddetti autoindurenti) e i diaframmi con tecnologia jet-grouting, ponendo l'accento su alcuni aspetti peculiari della loro progettazione e costruzione.

INTRODUZIONE

Il Titolo V del **Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 “Norme in Materia Ambientale”**, successivamente modificato ed integrato dal Decreto Legislativo 16 gennaio 2008 n. 4, **costituisce il riferimento legislativo nazionale per gli interventi di bonifica e ripristino ambientale dei siti contaminati**. La sua entrata in vigore ha profondamente mutato l'impostazione normativa originariamente introdotta dal Decreto Ministeriale 25 ottobre 1999 n. 471.

Per una corretta comprensione degli aspetti tecnici e legislativi è opportuno riportare alcune definizioni sui principali termini che verranno utilizzati: **Sito Contaminato** secondo il testo del D. Lgs. 152/2006 è “un sito nel quale i valori delle Concentrazioni Soglia di Rischio (**CSR**) determinati con l'applicazione della procedura di analisi di rischio (...) sulla base dei risultati del Piano di caratterizzazione, risultano superati”, cioè un sito dove l'inquinamento comporta rischi per la sicurezza dell'ambiente e della salute umana. **Bonifica** è il termine utilizzato per definire “l'insieme degli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti o a ridurre le concentrazioni delle stesse presenti nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee ad un livello uguale o inferiore ai valori delle Concentrazioni Soglia di Rischio (**CSR**)”, quindi tutti gli interventi necessari ad eliminare o a limitare i rischi per la salute umana e per l'ambiente. **Analisi di rischio sanitario e ambientale sito specifica** è definita come “analisi sito specifica degli effetti sulla salute umana derivanti dall'esposizione prolungata all'azione delle sostanze presenti nelle matrici ambientali contaminate (...)”, ossia la determinazione delle condizioni del sito che ne quantificano la pericolosità.

L'analisi di rischio sanitaria sito specifica (**AdR**) viene adottata come strumento per definire la necessità di interventi di bonifica sui siti potenzialmente inquinati, cioè i siti le cui matrici ambientali, per effetto delle attività antropiche, hanno registrato un superamento delle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (**CSC**) anche in uno solo dei parametri riportati nell'allegato 5, alla Parte IV, Titolo V del decreto. I siti potenzialmente inquinati dovranno

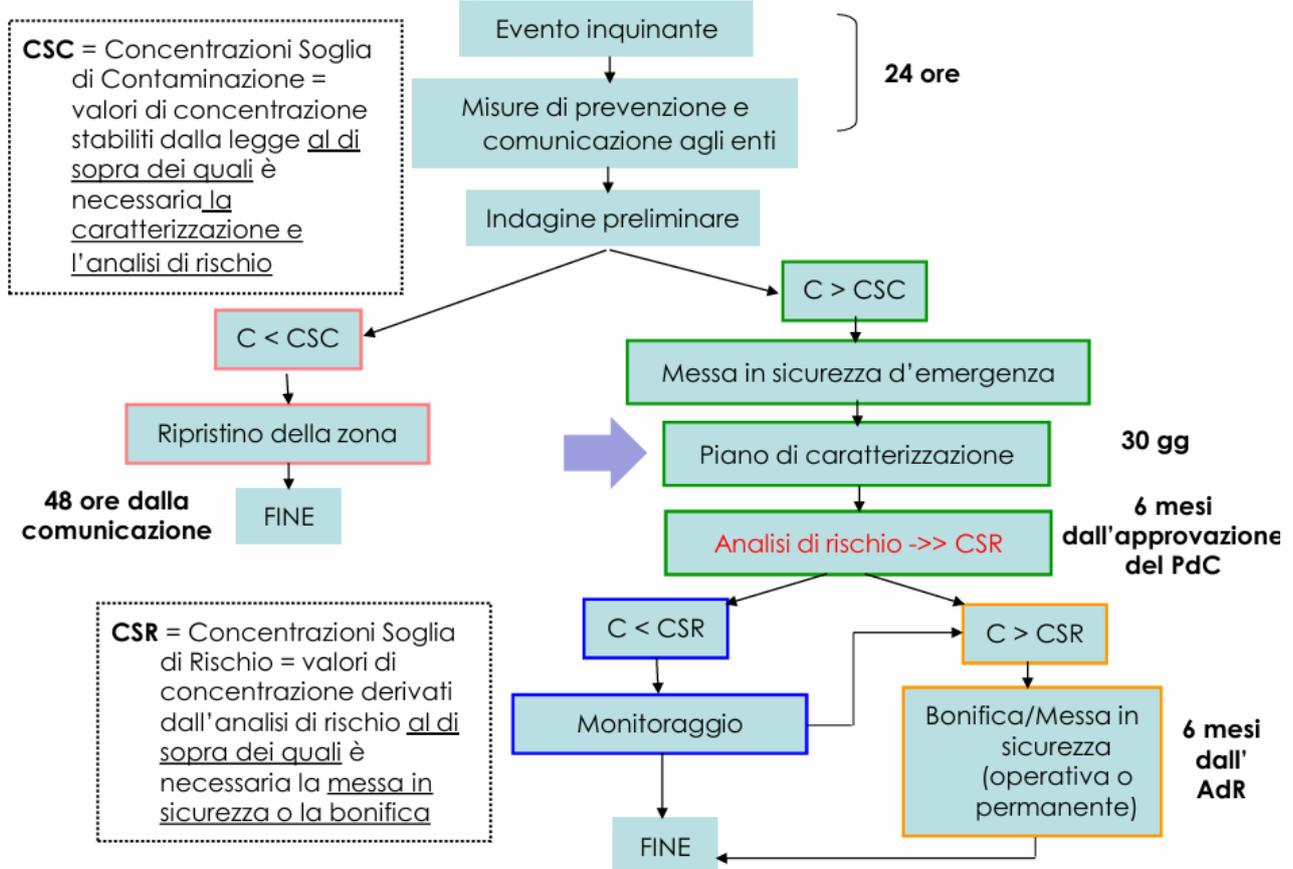
essere sottoposti ad apposita caratterizzazione e ad un'accurata analisi di rischio con lo scopo di definire, per lo specifico sito, le Concentrazioni Soglia di Rischio (CSR). Solo il superamento dei valori CSR comporta l'obbligo della bonifica che, per i siti in cui sono in corso attività produttive, può essere sostituita con una **messa in sicurezza operativa** a tutela delle persone e dell'ambiente, ma che possa garantire allo stesso tempo la produttività dell'azienda. Un aspetto che il legislatore ha voluto ampiamente sottolineare nel testo del decreto, riguarda la caratterizzazione dei siti contaminati, i cui criteri generali sono stati dettagliatamente riportati nell'allegato II alla Parte 4, Titolo V, del decreto stesso (impostazione ereditata dal D.M. 471/99). Infatti il piano di caratterizzazione rappresenta il documento base per la realizzazione dell'AdR sito specifica e per l'eventuale progetto di bonifica e dovrà quindi essere effettuato con il maggiore dettaglio possibile, per poter definire, nella sua completezza, le interazioni degli inquinanti con le matrici ambientali.



Sito Contaminato

INQUADRAMENTO NORMATIVO

Procedura operativa secondo il Dlgs 152/2006



Gli **interventi di messa in sicurezza**, a differenza di quelli di bonifica, che vanno ad eliminare la sorgente di contaminazione, hanno lo scopo di ridurre la mobilità degli inquinanti e la diffusione dei contaminanti dal sito all'ambiente, mediante l'isolamento del sito stesso, questo per impedirne il contatto con l'uomo e con i recettori ambientali circostanti.

Si affronterà lo studio degli interventi di messa in sicurezza attraverso l'adozione di tecniche di ingegneria ambientale nell'ambito della normativa Italiana. A tal fine, verranno analizzate le principali tecniche di messa in sicurezza attualmente disponibili.

CAPITOLO 1: La messa in sicurezza

Ciò che riguarda gli interventi di messa in sicurezza dei siti inquinati ricade nell'Allegato 3 (Criteri generali per la selezione e l'esecuzione degli interventi di bonifica e ripristino ambientale, di messa in sicurezza - d'urgenza, operativa o permanente - nonché per l'individuazione delle migliori tecniche di intervento a costi sopportabili) della parte IV, titolo V, del D. Lgs. 152/06, e definisce tre modalità di interventi di messa in sicurezza.

1.1 Messa in sicurezza d'urgenza (art. 240, lett. m)

Gli interventi di messa in sicurezza d'urgenza sono l'insieme delle misure applicabili a siti potenzialmente contaminati o contaminati e sono mirati alla rimozione delle fonti inquinanti primarie e secondarie, ad evitare la diffusione dei contaminanti dal sito verso zone non inquinate, ad impedire il contatto diretto della popolazione con la contaminazione presente.

Gli interventi di messa in sicurezza d'urgenza devono essere attuati tempestivamente a seguito di incidenti o all'individuazione di una chiara situazione di pericolo di inquinamento dell'ambiente o di rischio per la salute umana, al fine di rimuovere o isolare le fonti di contaminazione e attuare azioni mitigative per prevenire ed eliminare pericoli immediati verso l'uomo e l'ambiente circostante.

Le principali tipologie di messa in sicurezza d'urgenza sono:

- *rimozione dei rifiuti ammassati in superficie, svuotamento di vasche, raccolta di sostanze pericolose sversate;*
- *pompaggio dei liquidi inquinanti galleggianti, disciolti o dispersi in acquiferi superficiali o sotterranei;*
- *installazione di recinzioni, segnali di pericolo e altre misure di sicurezza e sorveglianza;*
- *installazione di trincee drenanti di recupero e controllo;*

- *costruzione o stabilizzazione degli argini;*
- *copertura o impermeabilizzazione temporanea di suoli e fanghi contaminati;*
- *rimozione o svuotamento di bidoni o container abbandonati, contenenti materiali o sostanze potenzialmente pericolose.*

Operativamente le attività di messa in sicurezza d'urgenza vanno in deroga a qualsiasi autorizzazione, concessione, o nulla osta eventualmente necessari per lo svolgimento delle attività inerenti l'intervento; per quanto riguarda la gestione amministrativa, il controllo è demandato al Comune, che può avvalersi di ARPA e Provincia.

1.2 Messa in sicurezza operativa (art. 240, lett. n)

Gli interventi di messa in sicurezza operativa costituiscono l'insieme di azioni effettuate su siti contaminati con attività produttive in esercizio con l'obiettivo di minimizzare o ridurre il rischio per la salute umana o ambientale, attraverso il contenimento dei contaminanti all'interno dei confini del sito, la protezione delle matrici ambientali e la graduale eliminazione delle sorgenti inquinanti secondarie, mediante tecniche che siano compatibili con il proseguimento delle attività produttive svolte nel sito.

Le principali tipologie di misure di messa in sicurezza operativa sono suddivise in:

- *misure mitigative*: si intendono gli interventi finalizzati ad isolare, immobilizzare e rimuovere gli inquinanti dispersi nel suolo, sottosuolo, acque superficiali e sotterranee ad esempio con sistemi fissi o mobili di emungimento e recupero, trincee drenanti, sistemi di ventilazione del sottosuolo insaturo e degli acquiferi ed estrazione dei vapori;
- *misure di contenimento*: possono essere di tipo *passivo*, come barriere o diaframmi verticali in acciaio o in altri materiali impermeabili o sistemi di impermeabilizzazione sotterranei e di immobilizzazione degli inquinanti; di tipo *attivo*, come sbarramenti realizzati con pozzi di emungimento con pompaggio oppure trincee di drenaggio delle acque sotterranee; infine misure di tipo *reattivo*, che operano l'abbattimento delle concentrazioni degli inquinanti nelle acque di falda mediante sistemi costituiti da sezioni filtranti in cui vengono inseriti materiali in grado di degradare i contaminanti (barriere reattive permeabili).

1.3 Messa in sicurezza permanente (art. 240, lett. o)

Gli interventi di messa in sicurezza permanente sono l'insieme delle misure per isolare in modo definitivo le fonti inquinanti rispetto alle matrici ambientali circostanti e garantire così un elevato e definitivo livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente. I valori di concentrazione delle sostanze inquinanti nelle matrici ambientali contaminate non devono comunque superare i valori limite previsti per legge.

E' considerata una soluzione alternativa alla bonifica da realizzarsi su un sito non interessato da attività produttive in esercizio, applicabile in un qualunque contesto indipendentemente dalla presenza o meno di rifiuti.

La messa in sicurezza permanente prevede piani di monitoraggio per verificarne l'efficacia e possibili limitazioni d'uso rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici.

Un'applicazione classica della messa in sicurezza permanente sono le *discariche incontrollate* (discariche vecchie ed esaurite, o abusive), che in Italia rappresentano la tipologia più diffusa di siti potenzialmente inquinati, ossia "siti in cui è molto probabile la presenza di sostanze contaminanti in concentrazioni tali da costituire un pericolo" (D.M. 471/99).

In questi casi l'intervento di bonifica più ovvio è la rimozione dei rifiuti e il loro trasferimento in una nuova discarica controllata, previo eventuale trattamento (recupero di materiali riciclabili es. vetro, metalli e incenerimento del residuo). Questa soluzione risulta tuttavia spesso impraticabile a causa di costi elevati, dato che si tratta di trasferire volumi ingenti di rifiuti; rischi per l'uomo e per l'ambiente, connessi all'escavazione e al trasporto di materiali contaminati; difficoltà di reperire un nuovo sito idoneo dove costruire una discarica controllata, a cui si aggiunge spesso l'opposizione dei cittadini residenti.

Esclusa la possibilità di trasferire i rifiuti in un nuovo sito controllato, ne deriva la necessità di mettere in sicurezza quello esistente, tramite sistemi di contenimento in situ.

L'isolamento si ottiene generalmente mediante barriere fisiche (es. isolamenti superficiali) e/o idrauliche (es. pozzi di emungimento e trincee drenanti).

Le tecniche di isolamento consistono nel confinare i volumi contaminati, impermeabilizzandone la superficie, i lati e il fondo. Si classificano perciò in:

- *sistemi di isolamento superficiale;*
- *sistemi di isolamento laterale o cinturazioni perimetrali;*
- *sistemi di isolamento del fondo.*

Si parla di **confinamento completo** quando questi tre sistemi vengono usati insieme, in modo tale che la massa contaminata si trova totalmente isolata dall'ambiente circostante. E' il sistema migliore e più sicuro, ma è anche spesso il più costoso.

In *Fig. 1.1* viene riportata una sezione dell'opera completata, all'interno della quale si possono individuare i principali elementi strutturali.



Fig.1.1 – Sezione verticale di un sistema di incapsulamento completo (Daniel e Bowders, 1994).

La copertura dell'opera viene realizzata mediante un materiale impermeabile, successivamente ricoperto da uno strato drenante e da una copertura di terreno vegetale. La funzione principale di questo elemento è la captazione dell'acqua piovana, in quanto se dovesse entrare all'interno del sottosuolo contaminato, si trasformerebbe in acqua contaminata per lisciviazione. Nel caso delle discariche potrebbe causare la formazione di percolato, infatti, la filtrazione dell'acqua piovana tra i rifiuti ha come risultato la formazione di questo fluido contaminante.

La barriera di fondo e le barriere verticali sono utilizzate per bloccare o comunque diminuire sensibilmente la migrazione dei contaminanti. Senza questi elementi, il contaminante migrerebbe dalla zona dove ha una concentrazione più alta verso le zone meno contaminate.

Questi elementi devono presentare una bassa conducibilità idraulica e una forte resistenza agli attacchi chimici; infatti queste barriere subiscono un attacco chimico continuo per tutto l'arco della vita dell'opera. Dal punto di vista meccanico, il materiale utilizzato deve avere un comportamento plastico, in quanto si vuole evitare che a causa di deformazioni del terreno circostante le barriere vadano a rottura o si fessurino. La fessurazione di un solo elemento comporterebbe una via preferenziale per la migrazione dell'agente contaminante al di fuori della struttura, che quindi, perderebbe di efficacia.

Gli studi condotti sulle barriere per le cinturazioni perimetrali hanno portato ad una evoluzione della fase di progetto: si è passati da una fase di realizzazione dell'opera in completa assenza di pianificazione e specifiche, ad un piano di lavoro ben strutturato ed al dimensionamento ingegneristico di geometrie e procedure costruttive, con precisi riferimenti per il controllo di qualità ed il collaudo delle opere. (Daniel, 1993; Manassero et al.,1995). Ciononostante, il comportamento a lungo termine di queste opere non è ancora completamente noto.

In generale, le operazioni che si devono eseguire per la messa in sicurezza di un sito contaminato mediante incapsulamento prevedono la valutazione dell'inquinamento del sito mediante indagini di sito e di laboratorio, questo per determinare il tipo di inquinante e la sua possibile propagazione nel tempo. Una volta identificato l'agente contaminante, si può procedere con la definizione della miglior tipologia costruttiva e del materiale da utilizzare per la creazione delle barriere. Il passo successivo è la progettazione geometrica delle barriere e del loro posizionamento. Come ultime fasi operative si andranno ad effettuare delle prove in situ dell'opera, con le quali si valideranno i risultati ottenuti in fase di progettazione e dimensionamento, quindi si procederà con la progettazione e la stesura di un piano di monitoraggio a lungo termine.

1.4 Bonifica e ripristino ambientale

Per bonifica si intendono tutti gli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti o a ridurre la contaminazione del sito a livelli tali da non costituire rischio per la salute della popolazione.

Gli obiettivi di bonifica sono determinati dall'analisi di rischio sito specifica, che tiene conto anche della specifica destinazione d'uso del sito.

Le principali tipologie di intervento sono:

- *interventi in-situ*: effettuati senza movimentazione o rimozione del suolo;
- *interventi ex-situ on site*: con movimentazione e rimozione dei materiali e suolo inquinato, ma con trattamento nell'area del sito stesso e possibile riutilizzo;
- *interventi ex-situ off-site*: con movimentazione e rimozione dei materiali e suolo inquinato fuori dal sito stesso, per avviare i materiali negli impianti di trattamento autorizzati o in discarica.

1.5 Inquadramento Normativo: definizioni

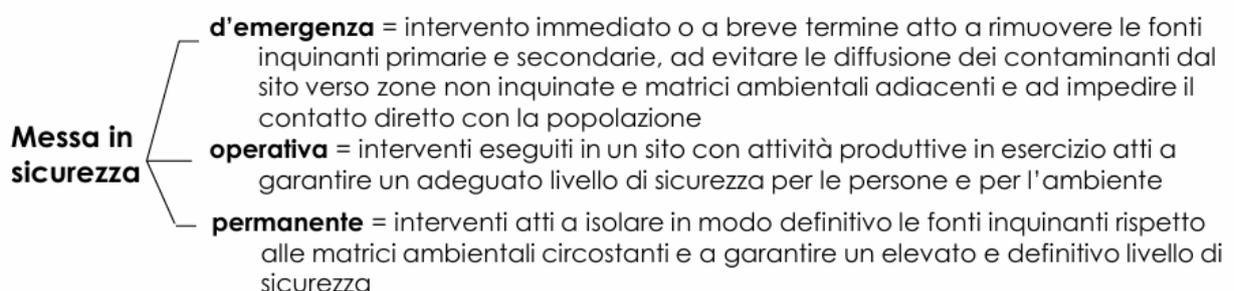
CSC : Concentrazioni Soglia di Contaminazione = valori di screening al di sopra dei quali è necessaria **la caratterizzazione del sito e l'analisi di rischio sito specifica**

CSR : Concentrazioni Soglia di Rischio = valori definiti dalla stessa analisi di rischio sito specifica, il loro superamento richiede la messa in sicurezza e la bonifica

In relazione alle due suddette definizioni, un sito si definisce:



Le CSR sono sia valori intervento che valori obiettivo!



Bonifica : Interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti o a ridurre le concentrazioni delle stesse ad un livello $< o =$ alle CSR

4

CAPITOLO 2: Diaframmi plastici

2.1 Impiego e requisiti

Le *cinturazioni perimetrali* sono una tipologia di contenimento fisico, per isolare un'area inquinata e contenerne i contaminanti. Si tratta di sistemi per l'isolamento laterale del volume contaminato, al fine di evitare la diffusione degli inquinanti nel terreno circostante e la contaminazione di acquiferi.

Si distinguono, a seconda della vista planimetrica che si utilizza per rappresentare l'area contaminata, in: *cinturazioni verticali* (vista dello spaccato del terreno su cui è situata la discarica) o *orizzontali* (vista dall'alto della discarica). Le **cinturazioni verticali** consistono in barriere verticali (*vertical cut-off walls*), dette **diaframmi plastici** che possono essere:

- *immorsati fin dentro il substrato impermeabile del terreno*: si applicano quando si deve isolare un terreno contaminato da sostanze di peso specifico superiore a quello dell'acqua e/o solubili, soggette quindi al dilavamento (*Fig.2.1-a*);
- *sospesi*: si usano in caso di inquinanti a bassa densità e insolubili in acqua, che quindi non percolano in profondità. Il diaframma isola solo la parte superficiale del terreno in quanto la contaminazione rimane circoscritta ai primi orizzonti del suolo (*Fig.2.1-b*).

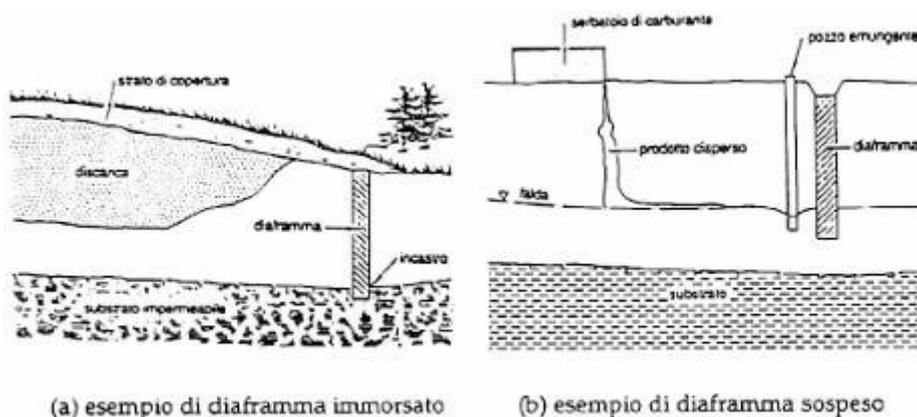


Fig. 2.1 - Schemi di un possibile impiego di Diaframma Plastico.

Con riferimento alla configurazione planimetrica, si distinguono tre tipologie di cinturazioni:

- *completa*: è la configurazione più diffusa e sicura perché isola il volume contaminato da tutti i lati (Fig. 2.2);
- *parziale, a monte della zona inquinata*: consente di deviare il flusso dell'acquifero a monte della zona inquinata, prevenendo quindi la contaminazione dello stesso. Richiede che ci sia un discreto gradiente idraulico dell'acquifero per poter deviare in modo efficace il flusso (Fig.2.3);
- *parziale a valle della zona inquinata*: non previene la contaminazione delle acque, ma consente solo il loro contenimento; in associazione devono perciò essere realizzati dei pozzi di emungimento per l'estrazione e il trattamento delle acque (Fig. 2.4).

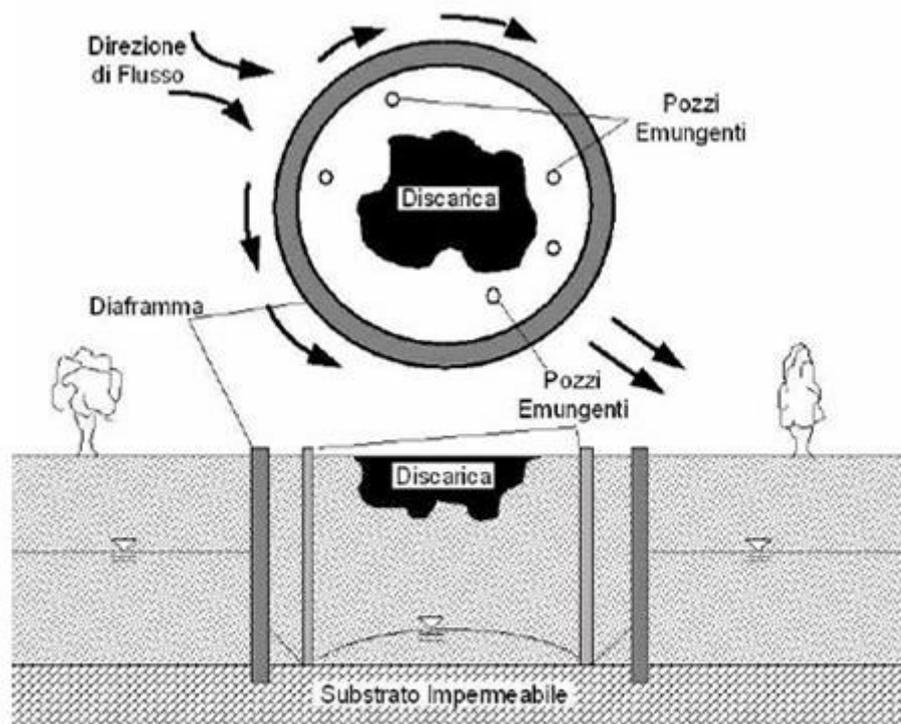


Fig. 2.2 – Cinturazione Completa del sito contaminato; si possono aggiungere dei pozzi di emungimento.

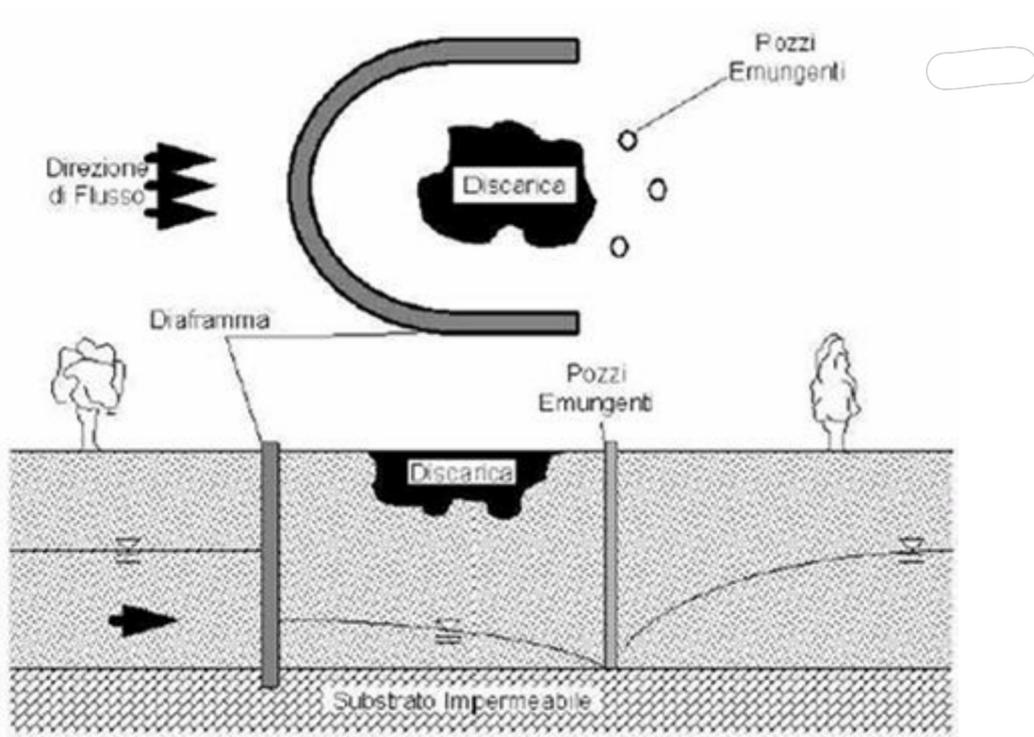


Fig. 2.3 – Cinturazione Parziale a Monte della zona inquinata.

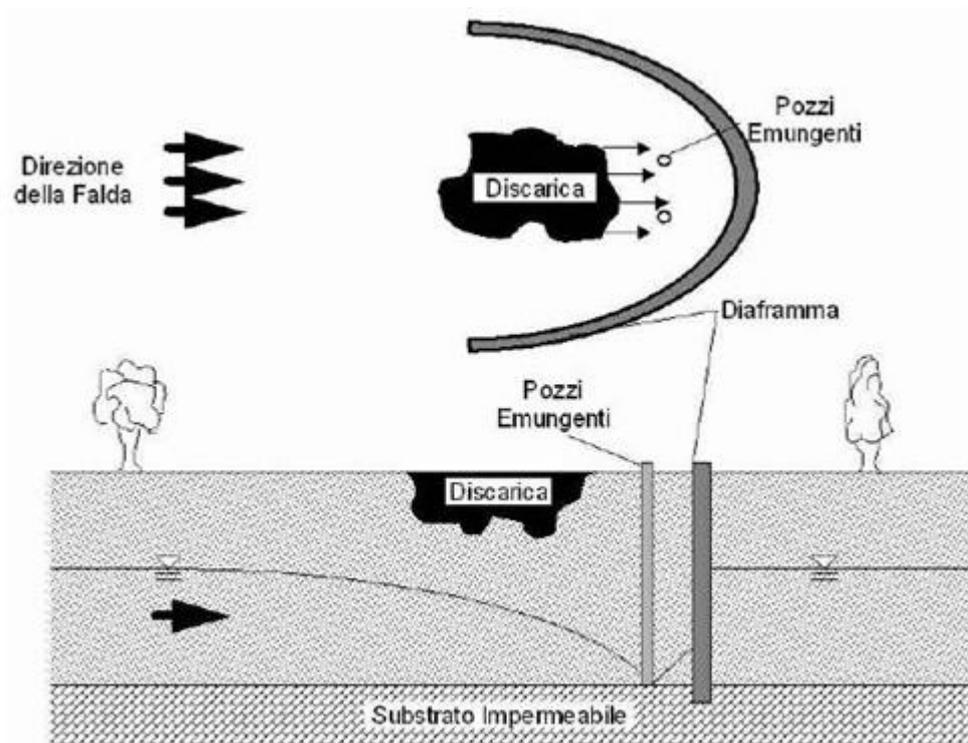


Fig. 2.4 – Cinturazione Parziale a Valle della zona inquinata.

Nel caso di completa o parziale cinturazione, l'intervento di messa in sicurezza viene completato realizzando anche una barriera di copertura (*capping*) in modo tale da evitare l'infiltrazione di acque di origine meteorica e impedire possibili migrazioni dei contaminanti verso l'atmosfera, se volatili.

2.2 Tipologie di diaframmi e relative prestazioni

L'applicazione geotecnica del diaframma plastico è basata sulla necessità di contenere o ridurre sensibilmente un possibile flusso idrico che può attivarsi nel terreno in conseguenza alla comparsa di un gradiente idraulico nella falda ed evolvere con modalità diverse dipendenti dal grado di permeabilità del mezzo.

La Tab. 2.1 riassume le principali tecnologie di diaframma evidenziandone le caratteristiche essenziali, i possibili problemi esecutivi legati alla natura del terreno e ponendo l'accento sul materiale di risulta dalla costruzione del diaframma, aspetto importante per le implicazioni gestionali ed economiche che ciascuna tecnologia comporta. Sulla base del suddetto criterio si possono distinguere le seguenti tipologie di diaframmi:

- *senza asportazione di terreno*: palancole o elementi prefabbricati infissi, diaframmi sottili, diaframmi ottenuti per iniezione o per congelamento;
- *con materiale di risulta*: miscelazione in sito, jet-grouting, sistemi combinati di scavo e iniezione, diaframmi in terreno-bentonite;
- *scavo e sostituzione*: diaframmi autoindurenti o in calcestruzzo plastico, pali secanti.

Costruire un diaframma per spiazzamento del terreno significa non avere terreno di scavo né materiale di risulta da smaltire o trattare, mentre quelle con scavo e sostituzione richiedono la gestione temporanea e finale del materiale scavato, potenzialmente contaminato, e il trattamento dei fanghi di stabilizzazione dello scavo, se necessari.

A fronte dello svantaggio della necessità di smaltimento del terreno scavato, i diaframmi con scavo e sostituzione garantiscono omogeneità e adeguato spessore rispetto alle altre tecnologie, caratteristiche entrambe fondamentali per la tenuta nei confronti della migrazione di contaminanti.

Tipologia	Dimensioni (m)	Terreno/materiale di risulta	Limitazioni esecutive
autoindurenti	$s_{\text{min}} = 0.6$ $d_{\text{max}} > 100$	100% scavo + fango se bifase	ghiaie ciottoli con k elevata
autoindurenti compositi	$s_{\text{min}} = 0.6$ $d_{\text{max}} = 30-35$	100% scavo + fango se bifase	ghiaie ciottoli con k elevata
pali secanti	$s_{\text{min}} = 0.5$ $d_{\text{max}} = 30-40$	100% scavo	blocchi, trovanti
terreno-bentonite	$s_{\text{min}} = 0.6$ $d_{\text{max}} = 20-25$	fango di perforazione	ghiaie ciottoli con k elevata
diaframmi "sottili"	$s_{\text{min}} = 0.15$ $d_{\text{max}} = 25$	no	terreni molto compatti
per iniezione	$s = 1-2$ $d_{\text{max}} = 20-80$	no	terreni con k elevata
Fresatura e miscelazione in sito, CSM	$s_{\text{min}} = 0.8$ $d_{\text{max}} = 40$	25-75% del volume del diaframma	
jet-grouting colonne secanti	$s_{\text{min}} = 0.4$ $d_{\text{max}} = 70-80$	> 30% del volume del diaframma	terreni molto compatti
congelamento	$s_{\text{min}} = 0.7$ $d_{\text{max}} = 50-100$	no	

Tab. 2.1 – Tipologie di diaframmi e caratteristiche essenziali (s =spessore; d =profondità; k =conducibilità idraulica), Pasqualini et al., 2011.

2.2.1 Diaframmi senza asportazione di terreno

Con i diaframmi senza asportazione di terreno, pur con il vantaggio dell'assenza di materiale di risulta e di omogeneità di composizione, si può ottenere uno spessore assai modesto ed anche la continuità del diaframma non è sempre garantita.

Fra i diaframmi senza asportazione di terreno vi sono i tradizionali **palancolati metallici**, utilizzati in ambito ambientale, soprattutto per terreni sciolti, prevalentemente per interventi di messa in sicurezza di emergenza o per costruire vasche di colmata per sedimenti contaminati, per il vantaggio di un'agevole e rapida infissione (tranne che in terreni molto addensati o compatti). Sono realizzati mediante pannelli di acciaio (palancole), come mostrato in *Fig. 2.5*, assemblati fuori terra ed infissi nel terreno con un martello a pressione (profondità massima raggiungibile: 10 metri) o a vibrazione (profondità: 20 metri). Gli aspetti critici della loro applicazione sono rappresentati dall'aggancio e quindi dalla tenuta degli elementi di giunzione, che possono comunque essere garantiti mediante l'impiego di speciali resine sigillanti (*Fig. 2.5, sinistra, schema B*) e di sistemi di controllo di aggancio (Pasqualini et al., 2014).

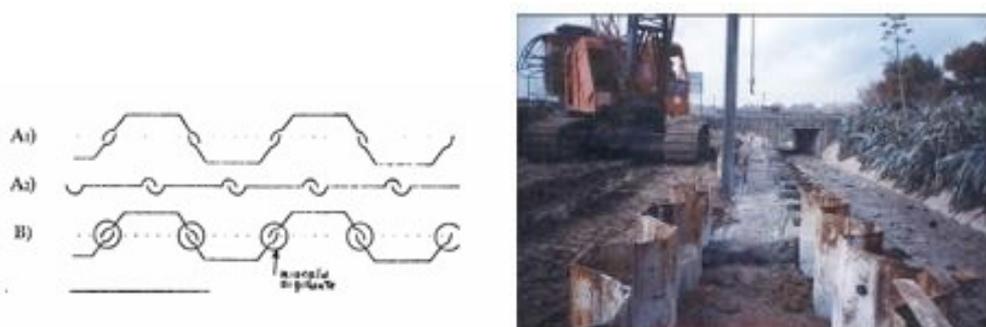


Fig. 2.5 – Palancolati metallici; l'efficienza può essere migliorata iniettando materiale sigillante (schema B) tra le giunzioni.

Sono documentati in letteratura diaframmi senza asportazione di terreno realizzati mediante l'inserimento di teli di **geomembrana in HDPE** (o altro materiale, come vinile) dello spessore di circa 1 cm, muniti di giunti, che tuttavia non garantiscono prestazioni idrauliche adeguate a un diaframma definitivo e comportano notevoli difficoltà di installazione (Koerner e Guglielmetti, 1995).

Un'altra tipologia di **diaframma sottile** è quella che si realizza mediante l'infissione di profili in acciaio muniti di iniettori alla base, i quali, in fase di risalita (o anche di infissione), iniettano miscele bentonitiche e/o cementizie che occupano lo spazio lasciato dal profilo e formano il diaframma definitivo (*Fig. 2.6*). Tale tipologia, fattibile fino a profondità di circa 25 m, ha il vantaggio di una rapida esecuzione (da alcuni metri a qualche decina di metri al giorno, a seconda della profondità). Il diaframma si realizza mediante pannelli adiacenti creati in sequenza e parzialmente sovrapposti per almeno 20 cm, in modo da assicurare la continuità dell'opera (*Fig. 2.6*). Le tecnologie disponibili sono in grado di garantire la verticalità dell'infissione. Possono essere alloggiati all'interno del diaframma profili in acciaio o teli di geomembrana, opportunamente giuntati. La posa del telo è un'operazione estremamente delicata e difficoltosa.

Il principale svantaggio di tale tecnologia è rappresentato dal modesto spessore (≤ 15 cm), con possibili problemi prestazionali a causa del rischio di discontinuità (nel caso di franamento locale prima dell'indurimento della miscela, o di fessurazione) e di migrazione per diffusione, dipendente in ogni caso dalla tipologia di materiale che costituisce il diaframma stesso.

Nei terreni compattati o addensati, al procedere dell'infissione della trave, l'operazione diventa sempre più difficoltosa. In questi casi si deve rimescolare il suolo prima di continuare le operazioni di infissione.



Fig. 2.6 – Perforazione ed attrezzatura per diaframmi sottili e foto di una porzione di diaframma.

Fra le tecnologie che non richiedono l'asportazione di terreno si può annoverare anche la **tecnica del congelamento** che può essere applicata in un opportuno volume del terreno attorno al sito contaminato da isolare (Peterson e Landis, 1995). Si tratta di una tecnica innovativa applicata al contenimento sia di fondo che laterale e consiste nel congelare un opportuno volume di terreno attorno al sito contaminato. A tale scopo si installa nell'area interessata un sistema di tubazioni di refrigerazione, realizzate in doppia camicia (involucro) concentrica in acciaio: il fluido refrigerante (salamoia, ammoniaca, azoto liquido), alla temperatura di circa $-300\text{ }^{\circ}\text{C}$, circola nello spazio compreso tra le due camicie per poi risalire in superficie dalla cavità più interna. La barriera si forma per congelamento dell'umidità presente nel terreno, quindi per migliorare l'efficienza si può incrementare il contenuto idrico del suolo attraverso tubazioni forate installate ad hoc (*Fig.2.7*).

Il dispositivo è permanente, in quanto anche dopo congelamento bisogna mantenere un flusso minimo di refrigerazione. E' prevista anche l'installazione di sensori di temperatura per monitorare nel tempo la tenuta della barriera.



Fig. 2.7 – Tecnica del congelamento del suolo.

I lunghi tempi di realizzazione, funzione della granulometria, della composizione e del contenuto d'acqua del terreno, e gli elevati costi anche di manutenzione rendono tale tecnologia poco competitiva rispetto ad altre. Si può prendere in esame come applicazione temporanea durante la rimozione in sicurezza di un terreno contaminato. Sono documentati pochi casi di applicazioni di congelamento come confinamento laterale o di fondo, ai quali si rimanda per un'analisi di prestazioni e costi (Sayles e Iskandar, 1995; Pearlman, 1999).

Infine, anche i **diaframmi** realizzati **mediante iniezione di miscele impermeabili** a base cementizia e/o bentonitica o silicatica, resine organiche o miscele espansive (descritte in dettaglio da Manassero, 1999), sono tipologie di diaframmi che non producono materiali di risulta. Le iniezioni eseguite per permeazione del terreno sono applicabili in terreni caratterizzati da permeabilità medio-alta, nonostante sia possibile ridurre apprezzabilmente la viscosità delle miscele di iniezione mediante superfluidificanti o utilizzando speciali sospensioni bentonitiche (Hwang et al., 2011). Per evitare il rischio di fratturazione idraulica garantendo iniezioni sufficientemente rapide, si procede con la contemporanea iniezione da più punti dello stesso foro, eseguita in modo selettivo per poter valutare l'efficienza del trattamento eseguito mediante il controllo dei parametri di iniezione (Granata e Vanni, 2011).

Il raggio d'influenza delle iniezioni per permeazione dipende essenzialmente dalla permeabilità intrinseca del terreno, dalla viscosità della miscela di iniezione, dalla pressione e dal tempo di iniezione; per trattamenti in roccia, di fondamentale importanza sono le aperture delle discontinuità o delle fessure. Un ulteriore aspetto da considerare è la compatibilità chimica delle miscele di iniezione nei confronti degli inquinanti da contenere;

a tale riguardo dalla letteratura è noto che le miscele a base di silicati o di acrilamide soffrono ambienti acidi o fortemente alcalini, mentre non sembra vi siano effetti negativi in presenza di solventi.

Alla luce delle esperienze documentate in letteratura si può assumere una riduzione di conducibilità idraulica del terreno dopo il trattamento di non più di 2-3 ordini di grandezza anche con iniezioni molto fitte (interasse < 1 m). Il rischio di scarsa omogeneità del trattamento esclude spesso questa tecnologia da quelle per diaframmi di cinturazione perimetrale.

2.2.2 Diaframmi con materiali di risulta

I diaframmi che producono materiale di risulta sono quelli che richiedono la stabilizzazione dello scavo con fango bentonitico (diaframmi terreno-bentonite) o che comportano un refluo a boccaforo (jet-grouting, sistemi combinati jetting-scavo). Si ottiene in ogni caso un diaframma costituito da una miscela del terreno in sito con il materiale iniettato (miscela cementizia o bentonitica) che ne riduce la conducibilità idraulica a valori dipendenti dalla miscela aggiunta, dalle caratteristiche del terreno di base e dalla tecnologia di miscelazione. Mediante miscelazione meccanica si possono ottenere **diaframmi con colonne accostate**, Questa tecnica consiste nell'infissione nel terreno di un sistema multiplo di alberi rotanti (generalmente tre) cavi e dotati all'estremità inferiore di eliche miscelatrici: una volta infisso nel terreno alla profondità voluta, dal dispositivo viene emessa, a bassa pressione, una miscela fangosa acqua-bentonite all'1% o acqua-bentonite-cemento, mentre la rotazione delle eliche determina il rimescolamento del terreno e la sua miscelazione con il fluido cementante (Fiorotto et al., 2004). La contemporanea risalita del sistema rotante porta alla formazione di una colonna impermeabile. Ripetendo l'operazione nelle sezioni adiacenti si ottiene una barriera continua dello spessore di 50-90 cm. La continuità del diaframma si ottiene per parziale sovrapposizione delle colonne, con profondità massima di 12-15 m.

La conducibilità idraulica dei diaframmi per miscelazione dipende fortemente dal tipo di terreno e dalla tipologia di miscela aggiunta. Si ottiene, nella migliore delle ipotesi, una k di 10^{-6} cm/s, quindi inadeguata per le applicazioni di messa in sicurezza permanente. Vi è inoltre il rischio di disomogeneità del trattamento, per cui questa tecnologia è opportuna per

interventi di stabilizzazione/solidificazione o di miglioramento delle caratteristiche meccaniche del terreno.

Il **jet-grouting** è una tecnologia ben nota in campo geotecnico (Croce et al., 2004), utilizzabile anche per la realizzazione di diaframmi con funzione di barriera idraulica mediante la realizzazione di colonne secanti. In tali applicazioni (ma non solo), la corretta previsione del diametro delle colonne rappresenta il requisito progettuale di maggiore importanza per la continuità e quindi la tenuta del diaframma. Le correlazioni empiriche disponibili in letteratura (basate principalmente sulla tecnologia e sul tipo di terreno) lasciano margini di incertezza; modelli teorici (Croce et al., 2004; 2011; Ho, 2005) consentono, tenendo conto dei fenomeni meccanici indotti dal trattamento, una previsione più affidabile del diametro delle colonne.

I diaframmi con jet-grouting possono anche essere realizzati con getto unidirezionale (jet-grouting lamellare), cioè senza rotazione del dispositivo di iniezione; in tal caso è raccomandata la realizzazione di più serie di pannelli adiacenti in quanto con un'unica sequenza si avrebbe un diaframma di spessore modesto (5-20 cm) e con rischio di scarsa compenetrazione.

Esiste una versione di jet-grouting, nota come jet-ellittico o anche **candy-jet** (*Fig. 2.8*), che consente di ottenere per ogni verticale di iniezione una colonna centrale con estensione in una direzione, riducendo così il numero di giunzioni rispetto al trattamento colonnare e garantendo adeguati spessori. Ulteriori vantaggi sono il minor consumo di cemento, la riduzione dei tempi di trattamento e la diminuzione del materiale di risulta.

Per le applicazioni in campo ambientale il fluido di iniezione è costituito solitamente da una miscela ternaria acqua-cemento-bentonite, cui possono essere aggiunti additivi con funzioni fluidificanti. Si possono impiegare altresì speciali miscele chimiche con elevate capacità sigillanti (Wang, 1995). I coefficienti di permeabilità che si possono ottenere dipendono principalmente dalla compenetrazione delle colonne (interasse delle perforazioni), dal tipo di iniezione (è preferibile la tecnica trifluido per maggiore garanzia di omogeneità) e dalla miscela di iniezione. Si raggiungono comunque valori di $k \geq 10^{-7}$ cm/s. Valori inferiori sono relativi a campioni indisturbati, non rappresentativi delle prestazioni globali del diaframma.



*Fig. 2.8 – Trattamento con jet-grouting colonnare e nella versione “Candy jet”
(www.trevispa.com).*

Oltre al jet-grouting, negli ultimi anni sono state collaudate tecnologie che consentono la combinazione di utensili di scavo dentati coadiuvati da sistemi di iniezione noti con denominazioni diverse a seconda dell’azienda di produzione (Cutter Soil Mixing, CSM, Cutter turbo-jet, **CT-Jet**, *Fig. 2.9*) così da ottenere una migliore uniformità del terreno trattato ed una geometria precisa, a vantaggio della impermeabilità del diaframma, che viene realizzato mediante pannelli adiacenti. Anche i tempi di realizzazione vengono significativamente ridotti e si ha anche un risparmio in termini di terreno trattato rispetto al diaframma con colonne secanti di jet-grouting.



Fig. 2.9 – Esempio di tecnologia di jet-iniezione combinata (CTJet, www.trevispa.com).

Così come per il jet-grouting, il sistema è applicabile in qualsiasi tipo di terreno. Lo svantaggio principale è legato alla presenza di materiale di risulta dal trattamento, stimabile in almeno il 30% del volume di terreno trattato, con percentuali maggiori per terreni fini, e variabile in funzione delle portate di iniezione. La permeabilità che si ottiene è dell'ordine di 10^{-7} cm/s (Pasqualini et al., 2011), comunque dipendente dal tipo di miscela, dalla pressione di iniezione e dal tipo di terreno.

I **diaframmi in terreno-bentonite** consistono nello scavo della trincea, generalmente in presenza di fango bentonitico, nella miscelazione sul piano campagna del terreno scavato con bentonite e nel successivo riempimento della trincea con la miscela (*Fig. 2.10*), inizialmente condotto depositando il materiale a partire dal fondo dello scavo fino al suo affioramento in superficie, realizzando un primo strato inclinato di terreno-bentonite. I riempimenti successivi vengono condotti mediante scivolamento dal piano campagna nella trincea, lungo la superficie dello strato inclinato precedentemente costituito. La miscela di riempimento (acqua-terreno-bentonite) deve essere sufficientemente fluida durante la stesura (consistenza di una malta) per consentirne lo scivolamento nella trincea.

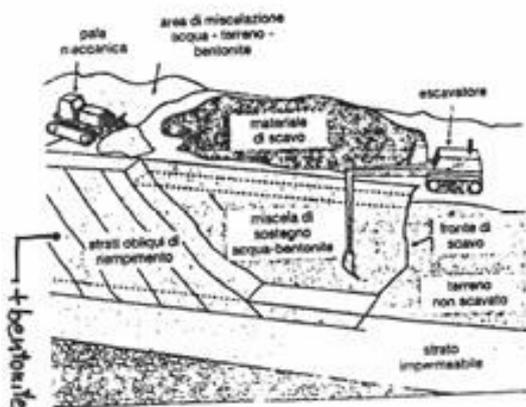


Fig. 2.10 – Realizzazione di un diaframma terreno-bentonite.

Il vantaggio principale di questa tecnologia sta nella sua economicità rispetto ad altre tecnologie, mentre i principali svantaggi sono il rischio di scarsa omogeneità del trattamento e la necessità di spazio per le operazioni di miscelazione.

La conducibilità idraulica che si ottiene, dell'ordine di 10^{-7} – 10^{-8} cm/s, è dovuta sia alla percentuale di bentonite aggiunta al terreno (k diminuisce all'aumentare della percentuale di bentonite), sia alla formazione del "filter cake" sulle pareti di scavo. Maggiore è la frazione fine del terreno, minore sarà la percentuale di bentonite da aggiungere; orientativamente per terreni sabbiosi è necessaria una percentuale di bentonite sodica di almeno il 5%.

I diaframmi in terreno-bentonite consentono anche l'alloggiamento di teli di geomembrana per avere un diaframma composito: la realizzazione prevede la posa dei teli all'interno dello scavo stabilizzato a fango, con la successiva posa della miscela terreno-bentonite. Nel caso di diaframma a profondità non superiore alla larghezza dei rulli di geomembrana, si può calare il rullo stesso all'interno dello scavo con opportuna attrezzatura e stendere la geomembrana lungo lo scavo (*Fig.2.11*), riducendo considerevolmente il numero di giunti.



Fig. 2.11 – Diaframma terreno–bentonite: posa della geomembrana.

Per quanto riguarda le prestazioni dei **diaframmi compositi in terreno-bentonite**, sulla base di prove in sito è stato osservato (Lee e Benson, 2000) che la presenza della geomembrana nel diaframma, purché correttamente immorsato, consente una riduzione della portata di un ordine di grandezza.

Poiché la funzione impermeabilizzante è affidata alla bentonite, è di fondamentale importanza la verifica della compatibilità chimica del diaframma nei confronti delle sostanze da

contenere, in base alle quali si deve selezionare la tipologia (sodica, calcica) e la percentuale di bentonite idonea a raggiungere lo scopo (*Fig. 2.12*).

In generale, è noto che il contatto della miscela terreno-bentonite con acidi e basi forti, composti organici, soluzioni concentrate di cationi monovalenti, soluzioni moderatamente concentrate di cationi bivalenti, genera un aumento di permeabilità anche superiore ad un ordine di grandezza (La Grega et al., 1994). In queste condizioni, compatibilmente con i costi necessari, si devono prevedere misure idrauliche atte a minimizzare la possibilità del contatto diretto contaminanti-barriera oppure si deve ricorrere ad altra tipologia di diaframma.

Un utile metodo di screening della compatibilità, prima di eseguire prove di compatibilità chimica quali column tests, consiste nella valutazione del volume di rigonfiamento libero della bentonite, V_{FS} (Kolstad et al., 2004): se $V_{FS} < 20$ ml/2g, la bentonite è con tutta probabilità non compatibile (*Fig. 2.13*), per cui non sono necessari ulteriori accertamenti, mentre in caso contrario si può procedere con una sperimentazione più approfondita.

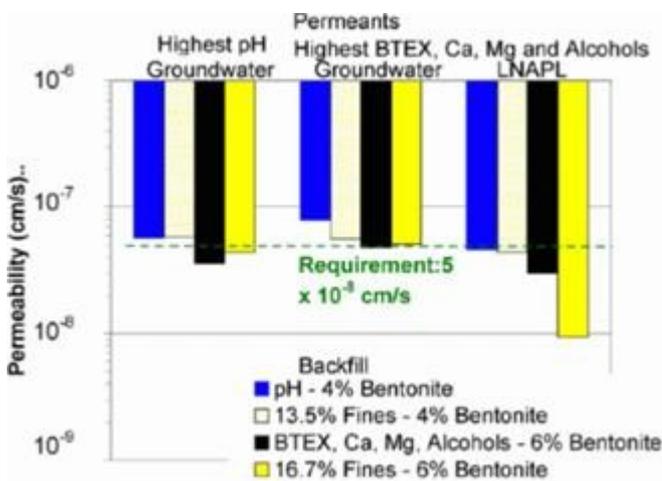


Fig. 2.12 – Conducibilità idraulica di un terreno additivato con diverse percentuali di bentonite e permeato con diversi liquidi inquinanti (Shulemberg e Breslin, 2005).

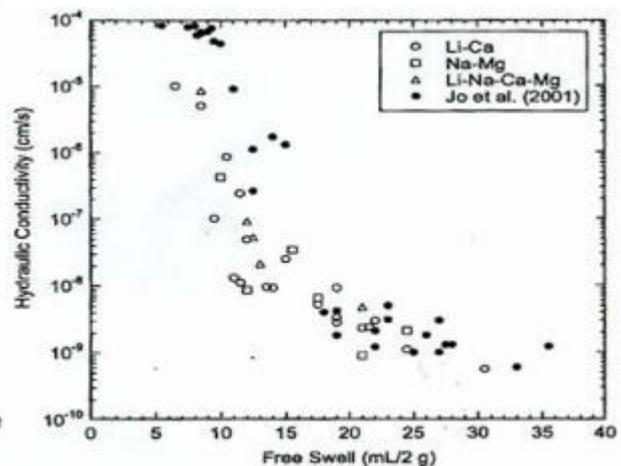


Fig. 2.13 – Conducibilità idraulica di bentoniti sodiche in funzione del volume di rigonfiamento libero (Kolstad et al., 2004).

2.2.3 Diaframmi con scavo e sostituzione

Le metodologie esecutive per la realizzazione di diaframmi con sostituzione totale del terreno scavato si distinguono a seconda che il riempimento con il materiale che costituirà il diaframma sia successivo allo scavo (bifase) o contemporaneo (monofase); ciò dipende dal tipo di materiale impiegato, dalla tecnologia esecutiva e dalle profondità da raggiungere. La tecnica bifase (scavo e successivo riempimento) prevede lo scavo in presenza di fanghi a base bentonitica o di tubo di rivestimento (pali secanti), per garantire la stabilità delle pareti, e il successivo riempimento con materiali diversi (ad esempio: calcestruzzo plastico, miscele acqua-cemento-bentonite, miscele terreno-bentonite; Evans, 1993).

Lo scavo può essere eseguito in modo continuo (per profondità fino a circa 5-6 m, con escavatore) oppure a pannelli primari ai quali si interpone una successiva serie di pannelli secondari, parzialmente sovrapposti per garantire la continuità della cinturazione (con benna guidata o con idrofresa a seconda del tipo di terreno/roccia). La possibilità di controllare la verticalità dei pannelli durante la costruzione è di fondamentale importanza per la continuità dell'opera. Anche nel caso di **pali secanti** si garantisce la continuità mediante parziale sovrapposizione fra pali primari e secondari (*Fig. 2.14*). L'impiego del rivestimento consente elevata precisione sulla geometria (spessore e verticalità) ed evita l'utilizzo dei fanghi bentonitici di perforazione. Si possono eseguire in tal modo pali fino a profondità di 20 m e diametro di 1 m con il quale, con opportuno interasse, si crea un diaframma di adeguato spessore minimo.

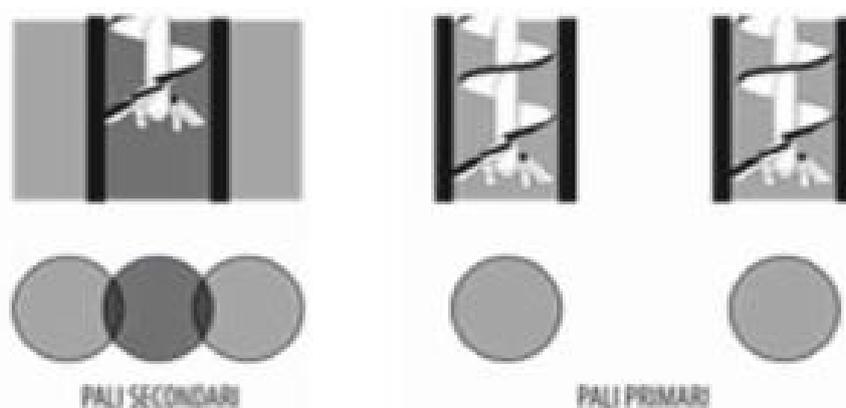


Fig. 2.14 - Diaframma mediante pali secanti (CSP, www.trevispa.com).

La procedura di costruzione monofase è basata sull'impiego delle **miscele ternarie acqua-cemento-bentonite (CB)**, cosiddette "**autoindurenti**" che, in fase fluida, stabilizzano le pareti della trincea e poi, a seguito dell'indurimento del cemento, formano il diaframma definitivo. L'impiego delle miscele autoindurenti offre la possibilità di ottenere diaframmi senza giunti poiché la consistenza plastica della miscela consente lo scavo di parte dei tratti già in opera e l'immorsamento tra pannelli adiacenti. Nel caso di diaframmi profondi (indicativamente oltre i 30 m) è difficile mantenere la miscela fluida per il tempo necessario all'esecuzione dello scavo, anche mediante l'uso di additivi fluidificanti; si devono quindi separare nuovamente le fasi di scavo e di getto, iniettando la miscela alla base della trincea.

I diaframmi autoindurenti sono ad oggi la tecnologia più utilizzata per la realizzazione di cinturazioni di siti contaminati per numerosi vantaggi: si tratta di una tecnologia collaudata, rapida e con prestazioni ottime in termini di conducibilità idraulica ($k \leq 10^{-8}$ cm/s) e di diffusione dei contaminanti, anche grazie alla possibilità di realizzare una **barriera composita con geomembrana**. La posa dei teli di geomembrana (*Fig. 2.15*) richiede maggiori oneri e tempi legati alla necessità di saldare i giunti ai teli di geomembrana, di agganciare e calare ciascun telo ancorato ad un telaio e di sostenere i teli fino all'avvenuto indurimento della miscela.

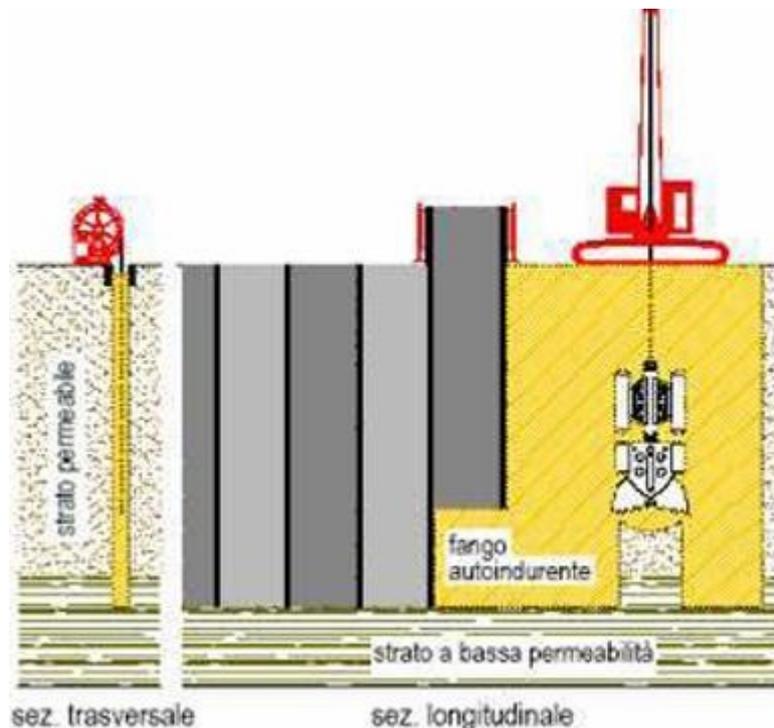




Fig. 2.15 – Realizzazione di diaframma CB composito.

Di seguito sono analizzati alcuni aspetti peculiari relativi alla progettazione e realizzazione di tale tipologia di diaframma, evidenziandone criticità e recenti sviluppi di ricerca finalizzati al miglioramento delle prestazioni e della previsione delle prestazioni delle miscele ternarie, rimandando ai riferimenti bibliografici per ulteriori approfondimenti.

CAPITOLO 3: Diaframmi autoindurenti

3.1 Le miscele autoindurenti

Le **miscele acqua-cemento-bentonite**, note anche come **miscele autoindurenti** o **miscele ternarie**, sono costituite da una sospensione di acqua, cemento e bentonite.

La preparazione richiede una preventiva miscelazione ad alta turbolenza dell'acqua di impasto con la bentonite, al fine di ottenere una dispersione omogenea delle particelle colloidali indispensabile per mantenere in sospensione il cemento che viene aggiunto successivamente, fino al suo indurimento. Il fango bentonitico deve essere preferibilmente lasciato in idratazione per almeno una notte per ottenere la completa idratazione della bentonite. Il cemento può quindi essere aggiunto e miscelato ad alta turbolenza per il successivo immediato invio allo scavo.

La necessità di semplificare le operazioni di miscelazione e di garantire al contempo le prestazioni idrauliche richieste ha portato, negli ultimi anni, alla nascita di prodotti anidri premiscelati, costituiti da cemento e bentonite, da miscelare in acqua per ottenere *miscele ternarie* che possiamo definire "*speciali*". Tale caratteristica rappresenta un vantaggio importante perché limita il numero di attrezzature in cantiere (non è necessario lo stoccaggio del fango bentonitico), la manodopera ed i controlli in fase di preparazione della miscela.

Inoltre, la composizione del materiale e la sua prestazione in termini di conducibilità idraulica sono garantite, a differenza di una miscela ternaria che deve essere messa a punto mediante una fase di pre-qualifica (in laboratorio e in cantiere), con possibili variazioni della composizione legate alla possibile seppur minima variabilità della composizione dei componenti (cemento e bentonite) e dei rispettivi dosaggi in corso d'opera.

In Europa le miscele acqua-cemento-bentonite sono il materiale più utilizzato per l'isolamento dei siti inquinati.

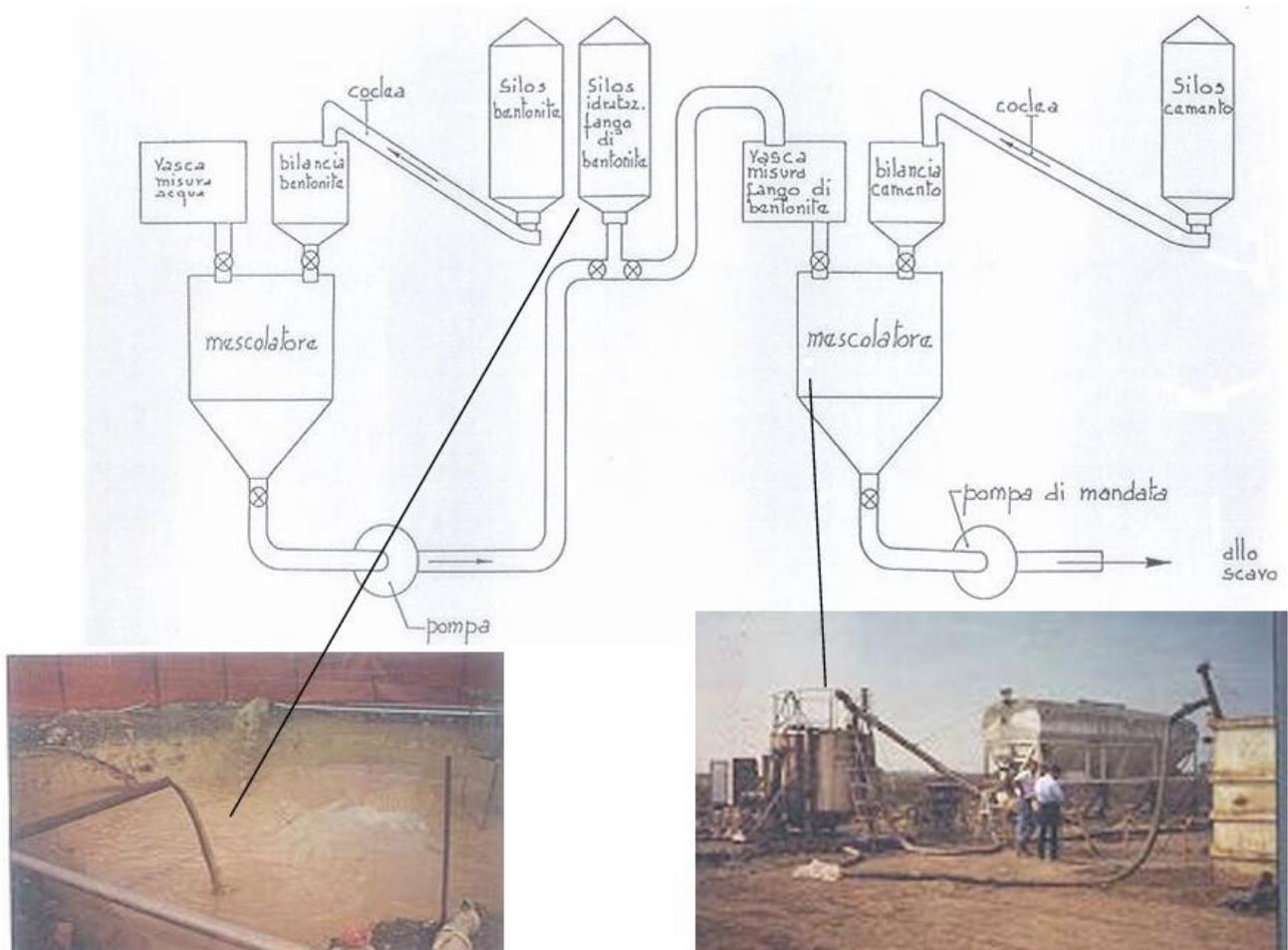


Fig. 3.1 – Preparazione miscela – Impianto in cantiere.

3.1.1 Composizione

Il tipo e il dosaggio dei materiali utilizzati per il confezionamento delle miscele acqua-cemento-bentonite sono definiti in funzione delle prestazioni richieste (idrauliche e meccaniche), ma anche da vincoli pratici legati alla tecnologia di scavo utilizzata, alla consistenza del terreno e alla viscosità richiesta per la posa di un'eventuale geomembrana.

La *Fig. 3.2* mostra il campo di variabilità dei dosaggi per il confezionamento di miscele autoindurenti di tipo tradizionale. La regione indicata come “cut-off slurries” evidenzia un range molto ristretto, che corrisponde ai mix-design che possono soddisfare le esigenze esecutive e prestazionali dei diaframmi plastici.

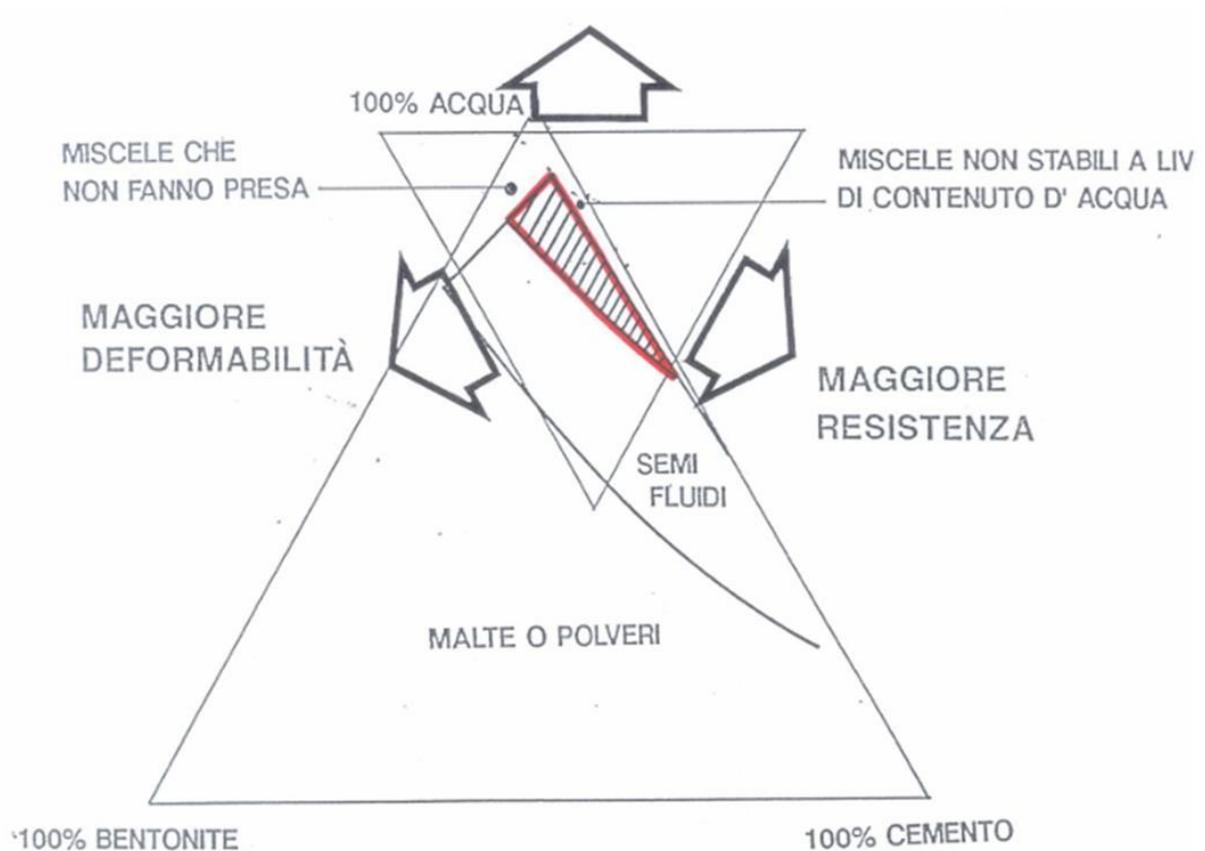


Fig. 3.2 - Diagramma Triangolare per l'Individuazione dei possibili Dosaggi di una Miscela Autoindurente (Doran & Cather (2013) riadattato da Jefferis (1981)).

I dosaggi delle miscele ternarie sono generalmente compresi nei seguenti intervalli di valori:

- bentonite/acqua = 0,04 ÷ 0,07
- cemento/acqua = 0,15 ÷ 0,30

Le miscele sono quindi costituite orientativamente da circa il 75% (in peso) di acqua, dal 5% di bentonite e dal 20% di cemento. Le miscele possono essere considerate materiali saturi (mantenendo idonee condizioni di umidità durante la stagionatura) e caratterizzati da una elevata porosità (la porosità efficace risulta tuttavia ridotta).

Nonostante il campo di variabilità dei dosaggi sia molto contenuto, a causa della notevole variabilità delle tipologie di cemento e di bentonite disponibili in commercio, le prestazioni idrauliche di una miscela ternaria possono essere marcatamente diverse: ad esempio, variando il tipo di cemento, si possono ottenere valori di conducibilità idraulica di 2-3 ordini di

grandezza differenti. È pertanto indispensabile, per questo tipo di miscele, una fase di pre-qualifica, allo scopo di selezionare materiali e dosaggi che consentano di ottenere le prestazioni richieste, sia allo stato fluido, sia a lungo termine.

Come evidenziato da Rafalski (1994), bisogna sottolineare che i range indicati, così come il diagramma triangolare (Jefferis, 1981), non tengono conto dell'influenza degli additivi chimici (generalmente fluidificanti) che possono far variare considerevolmente le proporzioni fra cemento e bentonite, pur rimanendo in un campo ottimale di lavorabilità e conducibilità idraulica.

Al fine di migliorare le caratteristiche idrauliche delle miscele, il cemento può essere parzialmente sostituito con filler quali loppa d'altoforno o cenere volante; i dosaggi consigliabili, a partire dalle percentuali raccomandate in EPA et al., 1985 (*Tab. 3.1*), sono aumentati nel corso degli anni sulla base di una sempre maggiore disponibilità di dati di letteratura.

<u>Constituent</u>	<u>Percentage in Slurry</u>
Bentonite	4-7
Water	68-88
Cement	
without replacements	8-25
when blast furnace slag added, minimums	1-3
when fly ash added, minimums	2-7
Blast furnace slag, maximums, if used	7-22
Fly ash, maximums, if used	6-18

Tab. 3.1 – Range consigliati per il confezionamento di miscele autoindurenti (EPA et al., 1985).

3.1.2 Cemento

Il legante tipicamente utilizzato nelle miscele ternarie è il cemento Portland, parzialmente rimpiazzato con percentuali di loppa d'altoforno variabili dal 35% (classe CEM III-A) fino all'80% (classe CEM III-B) o, più raramente, da cenere volante. Tali cementi, in particolare quelli d'altoforno, hanno in generale elevata resistenza all'aggressione chimica, quindi sono particolarmente idonei alle applicazioni in cui il diaframma viene a contatto con sostanze

potenzialmente aggressive, come nel caso dei terreni contaminati (Fratalocchi et al., 2013). Più raramente si utilizza cemento pozzolanico il quale, a fronte di una elevata resistenza all'aggressione chimica, consente però di ottenere valori di conducibilità idraulica ben superiori, a parità di dosaggio, rispetto ai CEM III-A o III-B (Fratalocchi & Pasqualini, 2007).

Il cemento Portland, che costituisce la base di tutti i suddetti cementi, è una miscela di clinker e di gesso biidrato. Chimicamente il clinker di cemento Portland è composto da una miscela di:

- silicato tricalcico $3CaO.SiO_2$ (C_3S)
- silicato bicalcico $2CaO.SiO_2$ (C_2S)
- alluminato tricalcico $3CaO.Al_2O_3$ (C_3A)
- ferro-alluminato di calcio $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ (C_4AF)

Oltre ai suddetti componenti principali vi sono altri componenti minori (Collepari, 2009), fra i quali il gesso, che viene aggiunto in percentuali del 4-8 % come regolatore di presa al fine di rallentare l'idratazione del clinker.

Dei quattro principali composti, solamente i silicati contribuiscono decisamente allo sviluppo della resistenza meccanica del cemento, mentre gli alluminati regolano la presa e le caratteristiche reologiche della miscela fluida.

Al fine di limitare i costi e l'impatto ambientale causato dalla produzione di cemento (carbon footprint), i produttori hanno progressivamente sostituito parte del cemento Portland con residui di produzioni industriali di diversa natura, quali loppa d'altoforno (sottoprodotto del processo di produzione della ghisa), o cenere volante (sottoprodotto della combustione di carbone nelle centrali termoelettriche).

A seguito di numerosi studi condotti su queste tipologie di cementi, si è visto che tali sostituzioni permettono di ottenere paste cementizie e quindi calcestruzzi caratterizzati da bassa porosità ed elevata resistenza all'aggressione chimica, in particolare nei confronti di sostanze acide e solfati.

Come riportato da Jefferis (2012), gli stessi effetti benefici ottenibili per i calcestruzzi strutturali sono stati riscontrati, in linea generale, anche nelle miscele autoindurenti; tuttavia l'elevato rapporto acqua/cemento porta ad avere caratteristiche e quindi prestazioni molto

differenti. La cenere volante è in grado di aumentare sensibilmente la resistenza delle miscele autoindurenti nei confronti di acidi e solfati, ma a fronte dell'impiego di dosaggi molto elevati (rapporto Portland/pfa < 0,30).

La loppa d'altoforno, se usata in sostituzione di almeno il 40% del cemento Portland, permette di ottenere miscele autoindurenti con permeabilità inferiore a 10^{-9} m/s, anche con basso dosaggio di cemento (Fratalocchi, 1996; Jefferis, 2012). Quantitativi maggiori di loppa d'altoforno possono incrementare la resa volumetrica della miscela aumentarne la resistenza meccanica e migliorarne notevolmente la resistenza ai solfati.

Dai dati di letteratura emerge in generale che la tipologia di cemento influenza sensibilmente le prestazioni idrauliche e meccaniche delle miscele ternarie in contatto con soluzioni considerate "aggressive" e quindi la durabilità di un diaframma di cinturazione.

3.1.3 *Bentonite*

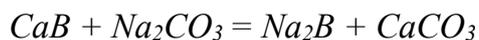
La bentonite è un materiale argilloso composto prevalentemente da montmorillonite e altri componenti minori quali beidellite, metalli alcalini e alcalino-terrosi. La sua capacità di assorbire acqua e impurità, nonché le sue proprietà leganti e stabilizzanti, ne fanno un materiale versatile e pregiato. Essa ha la capacità unica di gonfiarsi e formare gel quando idratata (*Fig. 3.3*). Questa proprietà è dovuta alla struttura delle particelle di argilla ed alla loro interazione con le molecole di acqua. Una volta essiccate, le particelle di argilla nella bentonite sono strettamente impaccate ed hanno una piccola superficie esposta all'ambiente circostante. Tuttavia, quando idratate, le molecole d'acqua sono in grado di entrare negli interstizi tra le particelle di argilla, facendole espandere e creando una superficie più ampia.



Fig.3.3 – Capacità della bentonite di rigonfiarsi e formare gel quando idratata.

Visto l'elevato rapporto acqua/cemento delle miscele autoindurenti, l'utilizzo della bentonite risulta di fondamentale importanza per evitare la rapida decantazione del cemento prima del suo indurimento. Il comportamento e le caratteristiche fisico-chimiche della bentonite (in particolare del suo costituente principale, la montmorillonite) sono ampiamente descritte in letteratura (Mitchell, 1976), quindi si riportano di seguito gli aspetti essenziali riguardo alle proprietà della bentonite, con riferimento al suo impiego nelle miscele ternarie.

La bentonite sodica è attualmente la principale tipologia di bentonite utilizzata per le miscele autoindurenti. Da decenni, in Europa, risulta impossibile estrarre bentonite sodica naturale e quindi si ricorre all'attivazione della bentonite calcica, attraverso un processo chimico di scambio ionico fra gli ioni calcio e gli ioni sodio presenti all'interno del carbonato di sodio, secondo la seguente reazione:



dove *B* rappresenta la bentonite. Il processo di conversione è di tipo reversibile, ma la bassa solubilità del carbonato di calcio ($CaCO_3$) assicura che la reazione avvenga a favore della formazione di bentonite sodica. Per ottenere una bentonite con elevata capacità di scambio ionico, e.g. 80 milliequivalenti/100 g, la quantità di carbonato di calcio che precipita sarà circa il 4% della massa di bentonite. Questo composto ha solitamente una bassa influenza sulla bentonite così attivata ma, in ambiente fortemente acido, può dissolversi e quindi invertire nuovamente la reazione descritta in precedenza. La suddetta reazione di equilibrio potrebbe essere invertita se la bentonite sodica attivata fosse posta in ambiente alcalino; questo è il caso della bentonite sodica attivata utilizzata nelle miscele ternarie. Infatti, il gesso (utilizzato regolatore di presa del cemento) e l'idrossido di calcio (principale prodotto dell'idratazione del cemento) determinano un'elevata concentrazione cationica di ioni bivalenti, in particolare di Ca^{2+} , nell'acqua interstiziale (si ha sovrasaturazione in calce nella prima parte del processo di idratazione del cemento) tale da invertire i processi di attivazione della bentonite, che quindi, all'interno di una miscela ternaria, torna ad essere calcica. Anche nel caso di impiego di bentonite sodica naturale, l'elevata concentrazione di ioni Ca^{2+} in soluzione nell'acqua interstiziale delle miscele ternarie, comporta la trasformazione della bentonite da sodica a calcica.

Esperienze condotte da Card (1981) e da Plee et al. (1990) su sospensioni bentonitiche in acqua alcalina ricca di calcio e su miscele cemento-bentonite dimostrano che la bentonite risulta assimilabile ad una bentonite calcica. Questo fenomeno determina sia una riduzione della capacità di rigonfiamento sia una contrazione degli spazi di interstrato, con un conseguente incremento di conducibilità idraulica rispetto allo stato di predominanza dei cationi Na^+ (Egloffstein, 1995).

Secondo Jefferis (2012), una concentrazione superiore a 250 mg/l di calcio potrebbe inibire la capacità rigonfiante della bentonite sodica anche se, nel caso di bentoniti sodiche attivate, l'eccesso di carbonato di sodio, derivante dal processo di attivazione, potrebbe in parte compensare lo scambio cationico.

In presenza di elevate concentrazioni di anioni (Cl^- , SO_4^{2-}) nell'acqua interstiziale non sono da attendersi interazioni di tipo elettrico con la montmorillonite, essendo le particelle cariche negativamente, in quanto l'effetto della concentrazione elettrolitica sul doppio strato diffuso e sulla capacità di rigonfiamento viene di fatto inibita per concentrazioni superiori a 0,1 M, anche se i cationi associati sono monovalenti (Jo et al., 2001).

3.1.4 Acqua

L'acqua costituisce circa il 70% di una miscela ternaria e la sua qualità può influenzare fortemente le prestazioni di un diaframma plastico. Innanzitutto, deve consentire alla bentonite di idratarsi e di rigonfiare per poter mantenere in sospensione le particelle di cemento fino a che i suoi prodotti di idratazione non creano una struttura in grado di autosostenersi e solidificare. Ciò significa che l'acqua deve possedere una bassa concentrazione elettrolitica. La sua composizione deve inoltre costituire la condizione ideale per lo sviluppo del processo di idratazione del cemento, evitando in particolare la presenza di composti organici che possono rallentare tale processo. Di seguito si riportano dei valori limite per un'acqua considerata idonea (EPA et al., 1985):

- durezza dell'acqua inferiore a 50 ppm;
- totale di solidi disciolti minore di 500 ppm;
- contenuto organico inferiore a 50 ppm;
- $\text{pH} \approx 7.0$

3.2 Diaframmi acqua-cemento-bentonite

Le miscele acqua-cemento-bentonite sono il materiale più utilizzato per l'isolamento dei siti inquinati. L'incapsulamento laterale viene realizzato mediante lo scavo di pannelli alternati o di una trincea continua (*Fig. 3.4*). La scelta di una delle due tipologie costruttive è dettata solo dal parco macchine presente in situ, in quanto questo materiale non necessita di giunti speciali tra un pannello ed il successivo ad esso affiancato. Infatti la consistenza plastica del materiale consente un perfetto immorsamento reciproco tra i pannelli adiacenti.

La messa in opera di questi diaframmi può essere effettuata in **monofase** o in **bifase**. Per entrambe le procedure andrà gestita la problematica legata al terreno di risulta che si otterrà dallo scavo della trincea. Infatti questo materiale dovrà dapprima trovare un luogo di stoccaggio all'interno del cantiere, e successivamente dovrà essere smaltito o riutilizzato. Le due tipologie costruttive si differiscono per la metodologia e la tempistica di messa in opera. La **prima soluzione** vede l'utilizzo della miscela finale durante lo scavo, dunque si procede con la stabilizzazione delle pareti della trincea direttamente mediante la miscela acqua-cemento-bentonite. Dopo la colata del materiale si attende la maturazione della miscela. In questo lasso di tempo si svilupperà la fase di presa del cemento, andando a far solidificare la miscela.

Per quanto riguarda la **soluzione bifase**, differisce nel fatto che l'operazione di stabilizzazione dello scavo è affidata ad una miscela bentonitica (acqua-bentonite), successivamente rimossa e sostituita con la miscela cemento-bentonite.

Questa seconda soluzione presenta alcuni limiti e complessità aggiuntive, la scelta della miscela da utilizzare per l'impermeabilizzazione dovrà essere caratterizzata da una densità ed una viscosità maggiore dei fanghi bentonitici impiegati per sostenere lo scavo. Per via di queste considerazioni le miscele a base cemento bentonite vengono completate con l'immissione di filler o inerti di varia pezzatura per aumentarne la densità. Mediante questa variazione della miscela il materiale finale che si otterrà dopo l'indurimento sarà riconducibile ad un calcestruzzo plastico. Un'altra problematica riconducibile alla messa in opera bifase è la profondità raggiungibile. Infatti mediante questa tipologia costruttiva, le altezze massime dei diaframmi vengono ridotte rispetto a quelle raggiunte mediante la tipologia monofase.

Questo perché le operazioni di rimpiazzo dei fanghi bentonitici con la miscela cemento-bentonite definitiva sono molto delicate, infatti se ci fosse una persistenza del materiale da rimpiazzare all'interno del foro, le prestazioni meccanico ed idrauliche dell'intero diaframma verrebbero compromesse.

Dunque i diaframmi plastici sono comunemente realizzati in acqua-cemento-bentonite, materiale particolarmente adatto per semplicità e velocità esecutiva per la sua bassa permeabilità ed il limitato degrado in ambienti chimicamente aggressivi, oltre ad un importante beneficio dal punto di vista esecutivo, legato alla possibilità di eseguire scavo e getto contemporaneamente in quanto la miscela allo stato fluido è in grado di sostenere lo scavo al pari di un fango bentonitico per poi indurire all'interno dello scavo e costituire così il diaframma definitivo (procedura nota come monofase, *Fig. 3.4*).

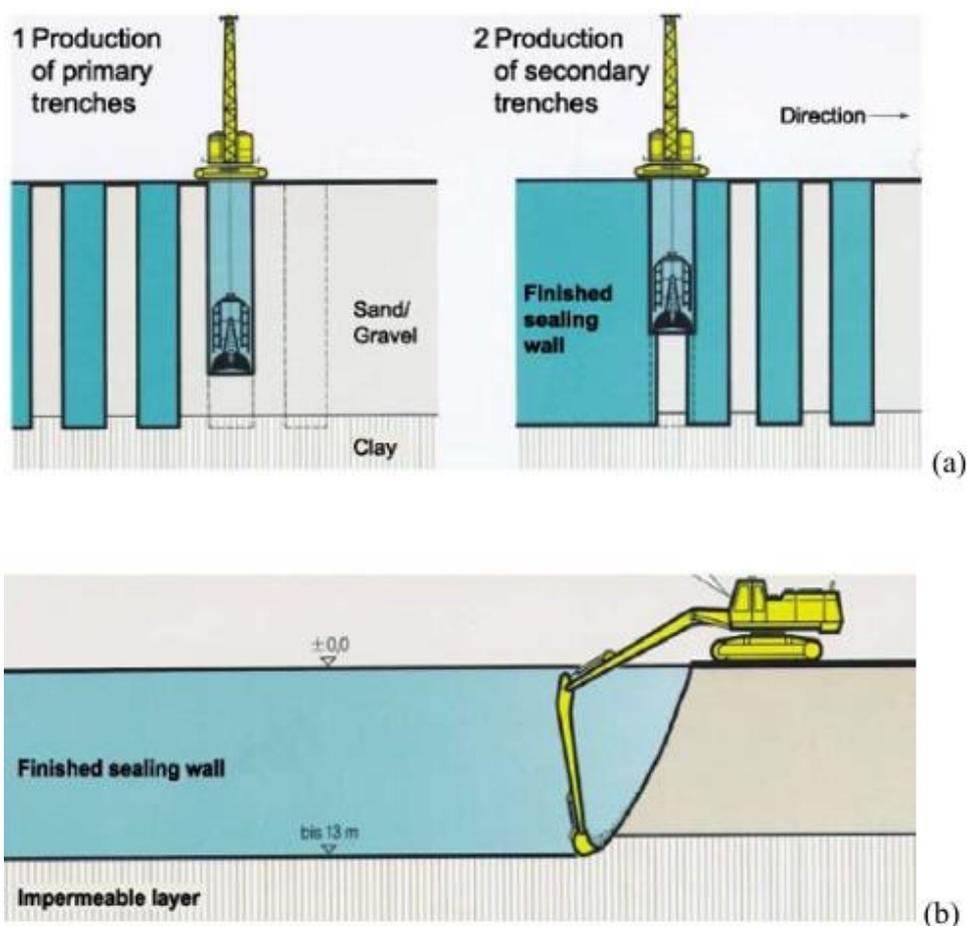


Fig. 3.4 – Schema di scavo monofase a pannelli (a) ed in continuo (b) (Koch, 2002).

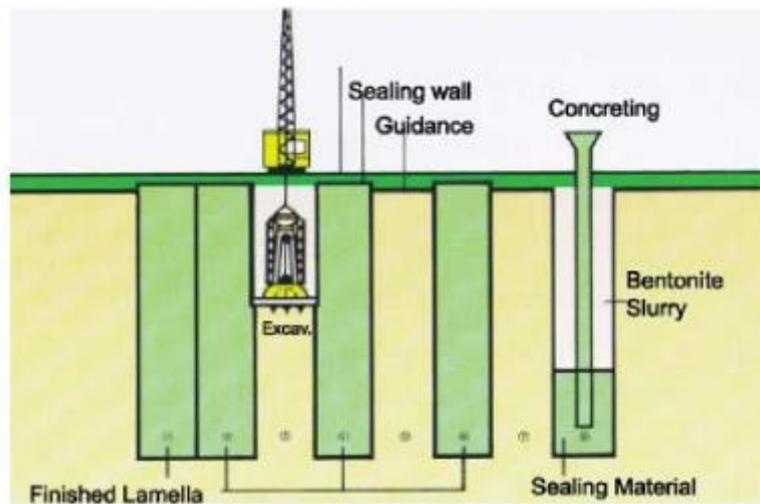


Fig. 3.5 – Diaframma plastico realizzato con procedura bifase (Koch, 2002).

Lo spessore minimo di un diaframma plastico è legato alle dimensioni delle attrezzature di scavo (50-60 cm). Utilizzando escavatori a braccio rovescio non si possono raggiungere profondità superiori a 5-6 m (*Fig.3.4-b*). Per maggiori profondità, sino a 30-40 m, vengono utilizzati sistemi a benna mordente guidata (*Fig. 3.6-sinistra*); con l'impiego di idrofresse si può arrivare anche oltre i 100 metri, ma si perde la possibilità dello scavo monofase in quanto il fango bentonitico assolve la funzione di asportazione del materiale scavato. L'idrofresa è comunque necessaria qualora si debbano scavare strati particolarmente consistenti, come ad esempio strati rocciosi (*Fig. 3.6-destra*).



Fig. 3.6 – Benna mordente (sinistra); Idrofresa (destra).

La conducibilità globale di un diaframma plastico in acqua-cemento-bentonite può essere notevolmente ridotta (di almeno 2 ordini di grandezza) inserendo nello scavo, con la miscela ancora allo stato fluido, teli di geomembrana in HDPE (High-Density Polyethylene, *Fig. 3.7*) premuniti di speciali giunti, creando una vera e propria barriera composita. Tali diaframmi possono essere realizzati sino a profondità massime di circa 25 m in quanto, per profondità superiori, risulta impossibile garantire la continuità dei giunti fra i teli di geomembrana. Per la realizzazione di un diaframma composito si richiede un'elevata lavorabilità della miscela cioè che la miscela si mantenga fluida fino al completamento della posa dei teli.



Fig. 3.7 - - Telo in HDPE per la realizzazione di un diaframma composito con giunto a pettine all'estremità del telo (sinistra); telaio in acciaio per il collocamento del telo nello scavo, per tutta la profondità del diaframma (destra).

Essendo la miscela impermeabile a consistenza semi-rigida, il diaframma acqua-cemento-bentonite può essere realizzato anche in aree a forte pendenza, laddove la costruzione della barriera terreno-bentonite risulta non prevedibile a causa della maggiore fluidità della miscela di sostegno.

Altra applicazione dei diaframmi plastici utilizzati per la bonifica prevedono la realizzazione dello scavo verticale di profondità in funzione delle proprietà geologiche del terreno con miscela plastica e successivamente inserimento di pannello in HDPE con giunti ad incastro che si saturano nella miscela plastica. Dopo l'inserimento del telo con apposito telaio, quest'ultimo viene sganciato ed il telo sostenuto fino alla presa con cavalletti.

MISCELE AUTOINDURENTI



3.3 Proprietà delle miscele allo stato fluido

Le proprietà allo stato fluido delle miscele autoindurenti devono essere modulate in funzione di diversi fattori quali: tecnica di scavo, tipologia di diaframma (semplice o composto), prestazioni idrauliche, ecc. Un corretto mix-design deve quindi raggiungere un compromesso fra le performance richieste all'opera da realizzare e le esigenze pratiche di cantiere. Risulta evidente la necessità di avere prove rapide, ripetibili e di semplice esecuzione, da poter realizzare in laboratorio e in cantiere, per il controllo delle principali caratteristiche allo stato fluido delle miscele, quali viscosità, peso di volume e resa volumetrica.

3.3.1 *Viscosità*

La viscosità è uno dei parametri fondamentali soprattutto per quanto riguarda gli aspetti pratici legati a tempi e modalità di scavo. La viscosità aumenta all'aumentare del contenuto di solidi e dipende dal tipo e dalla durata della miscelazione (*Fig. 3.8*).

Oltre che sul contenuto di solidi, si può agire sulla quantità e tipologia di additivo fluidificante che si può eventualmente aggiungere in fase di miscelazione, prima dell'aggiunta del cemento.

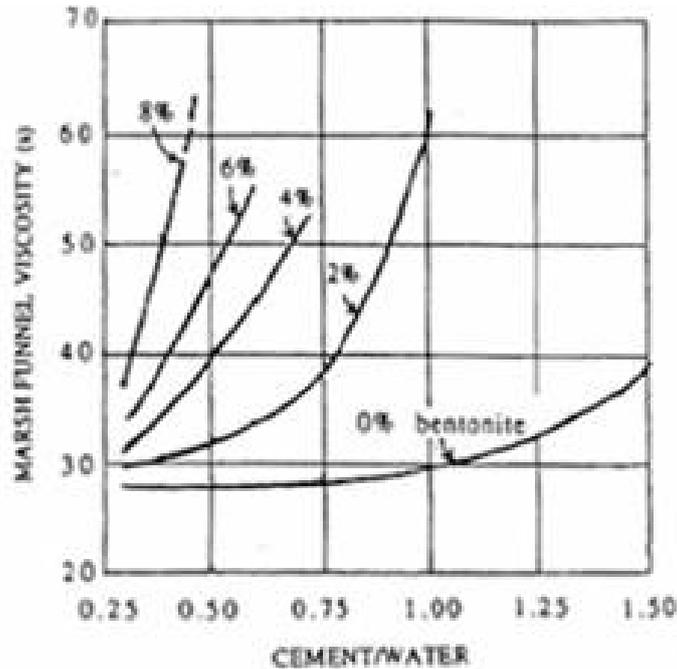


Fig. 3.8 – Influenza sulla viscosità del rapporto cemento/acqua al variare della percentuale di bentonite (Jepsen & Place, 1985).

La viscosità delle miscele autoindurenti viene indirettamente misurata attraverso il Cono Marsh. Tale prova consiste nel misurare il tempo di fuoriuscita di 1000 ml di miscela da un cono standard con apertura pari a 4,75 mm, una volta riempito con 1500 ml di miscela (metodo europeo, *Fig. 3.9*). La prova fornisce un indice per la valutazione e il confronto della viscosità con altre miscele misurate con la stessa strumentazione standard. Infatti, essendo disponibili numerose attrezzature per la misurazione della viscosità dei fluidi, è fondamentale specificare lo standard adottato.

Questo test ha un largo impiego, soprattutto per le miscele autoindurenti, in quanto risulta molto semplice nell'esecuzione, richiede attrezzatura economica, facilmente reperibile e i risultati sono immediati e ripetibili.

Generalmente i valori di viscosità misurati devono essere compresi tra i 35 e i 55 secondi. Valori superiori possono creare problemi durante la fase di scavo (procedura monofase) tenendo conto dell'inevitabile presenza di terreno in sospensione. L'aumento della viscosità a causa dell'inglobamento di terreno aumenta sensibilmente in presenza di terreni a grana fine

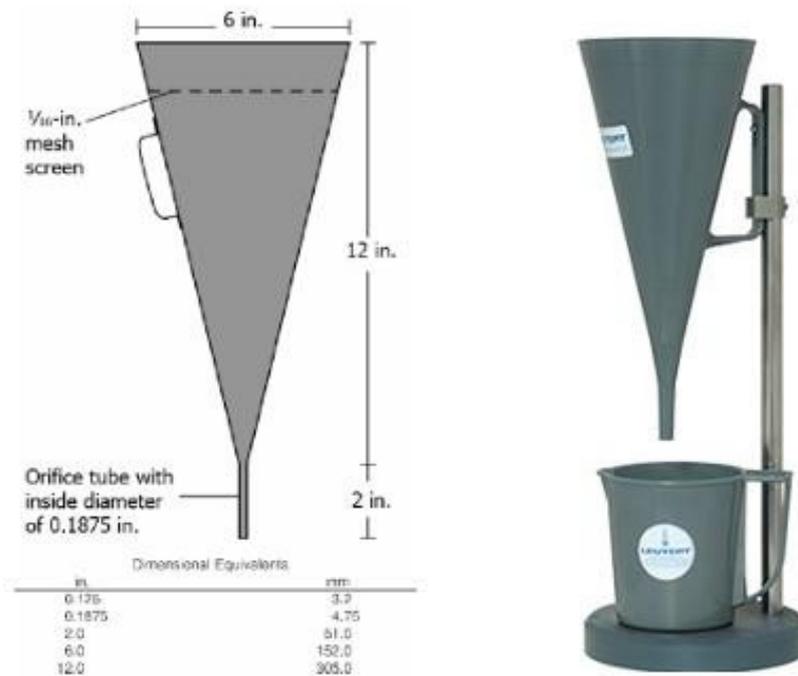


Fig. 3.9 – Cono Marsh dimensioni standard secondo ASTM D6910

3.3.2 Peso di volume

La misura del peso di volume è un'altra proprietà importante per valutare se la miscela sia adatta alla tipologia di diaframma da realizzare e alla metodologia di scavo adottata; inoltre è fondamentale come controllo indiretto del dosaggio in corso d'opera. La prova si effettua attraverso l'utilizzo di una bilancia per fluidi (*Fig. 3.10*). Il peso di volume è direttamente proporzionale alla percentuale di solidi della miscela. Considerando il massimo rapporto solidi/acqua per una miscela ternaria, il peso di volume non dovrebbe superare il valore di $1,30 \text{ g/cm}^3$ ($12,75 \text{ kN/m}^3$).

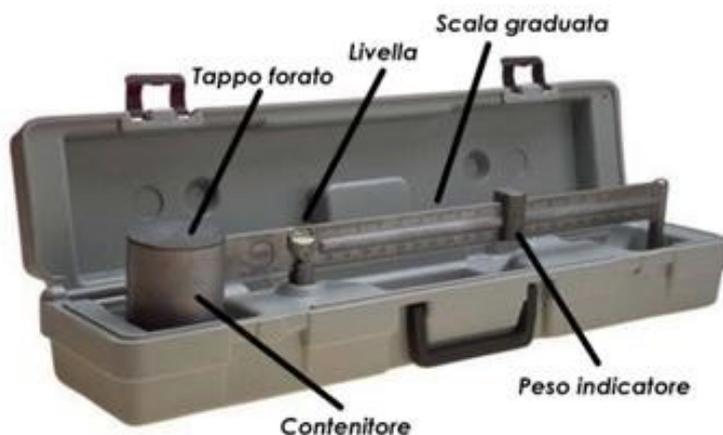


Fig. 3.10 – Bilancia per fluidi.

3.3.3 Resa volumetrica

La resa volumetrica di una miscela ternaria misura la capacità della bentonite di mantenere in sospensione il cemento fino al suo indurimento e quindi valuta la correttezza del mix-design in relazione al rapporto bentonite/cemento. La sua determinazione consiste nel misurare l'acqua di bleeding che si forma, dopo 24 ore dal getto, sulla superficie di una colonna di miscela all'interno di un cilindro della capacità di 1000 ml. Generalmente le letture intermedie a 2 e 4 ore permettono già di valutare se la miscela possa essere adeguata per la realizzazione di un diaframma plastico.

Il mix-design risulta corretto se l'acqua di bleeding è inferiore al 5% (Ciria et al., 1999), anche se è preferibile non superare il 2% per una resa ottimale.

3.4 Proprietà e comportamento delle miscele allo stato indurito

Le miscele autoindurenti, essendo a base cementizia, iniziano il loro processo di presa e indurimento dal momento in cui viene aggiunta l'acqua al composto. Ai fini pratici, risulta molto importante capire quali fattori governano l'indurimento del materiale. La principale causa è sicuramente da imputare alla presenza del cemento; infatti, la miscela tende ad essere più rigida all'aumentare del quantitativo di cemento e della stagionatura. Per ritardare la presa del cemento possono essere inseriti degli additivi fluidificanti (Ciria et al., 1999), oppure si può sostituire parte del cemento con dei filler, quali: cenere volante o loppa d'altoforno. Nel caso in cui vengano aggiunti degli additivi, la resistenza a breve termine diminuisce; al contrario, l'aggiunta di filler, seppur ritardando la presa, aumenta la resistenza a lungo termine e la resistenza contro gli agenti aggressivi.

La fase di indurimento della miscela può essere influenzata anche da una perdita d'acqua per presso-filtrazione della miscela; infatti, la pressione che il fango esercita sulle pareti dello scavo, può determinare il drenaggio di acqua nel terreno circostante, andando così a diminuire il rapporto acqua/cemento e aumentare più rapidamente la resistenza della miscela a breve termine. Tale fenomeno tende a diminuire nel tempo con l'aumentare dello spessore della cake che rende le pareti meno permeabili. Il fenomeno è più evidente nel caso delle miscele autoindurenti, rispetto ad un fango bentonitico, in quanto si ha un peso specifico maggiore.

Si riportano in Tab. 3.2 i valori ottimali per il confezionamento di una miscela cemento-bentonite di tipo tradizionale.

PROPRIETA'	VALORI
<i>densità</i>	1,1-1,3 g/cm ³
<i>densità in situ</i>	< 1,39 g/cm ³
<i>viscosità Marsh</i>	35-50 s
<i>viscosità Marsh in situ</i>	40-80 s
<i>bleeding</i>	1-2 %
<i>pH</i>	10-13

Tab. 3.2 – Valori ottimali per il confezionamento di una miscela cemento-bentonite tradizionale.

3.4.1 Resistenza meccanica.

Tradizionalmente, in fase di controllo, la resistenza meccanica rappresenta un indice per la valutazione della qualità del mix-design e dei materiali che compongono la miscela stessa. Vi è la tendenza nelle specifiche tecniche ad indicare un valore minimo di resistenza meccanica da garantire, nonostante tale caratteristica non sia direttamente correlata alle prestazioni idrauliche della miscela. Per questa tipologia di miscele, si raccomandano valori minimi di resistenza a compressione di 100 kPa, misurati con prove di compressione non confinata (UC) a velocità di deformazione assiale di 0,1 % al minuto (Ciria et al., 1999), anche se, per garantire condizioni non drenate in fase di rottura, sarebbe più utile il ricorso a prove di compressione triassiale non consolidate non drenate (UU).

Il ricorso a prove triassiali consolidate non drenate, fino a pressioni di consolidazione di 100 kPa, è in ogni caso consentito su campioni aventi almeno 28 giorni di stagionatura, per i quali la rigidità a compressione è elevata e la consolidazione è trascurabile (Fratolocchi, 1996; Fratolocchi & Pasqualini, 2007). L'esecuzione di prove triassiali su campioni consolidati a pressioni superiori può essere di interesse nel valutare il comportamento meccanico della miscela, al variare della profondità del diaframma, per la determinazione della rigidità del diaframma in relazione a quella del terreno (Mahboubi & Ajorloo, 2005).

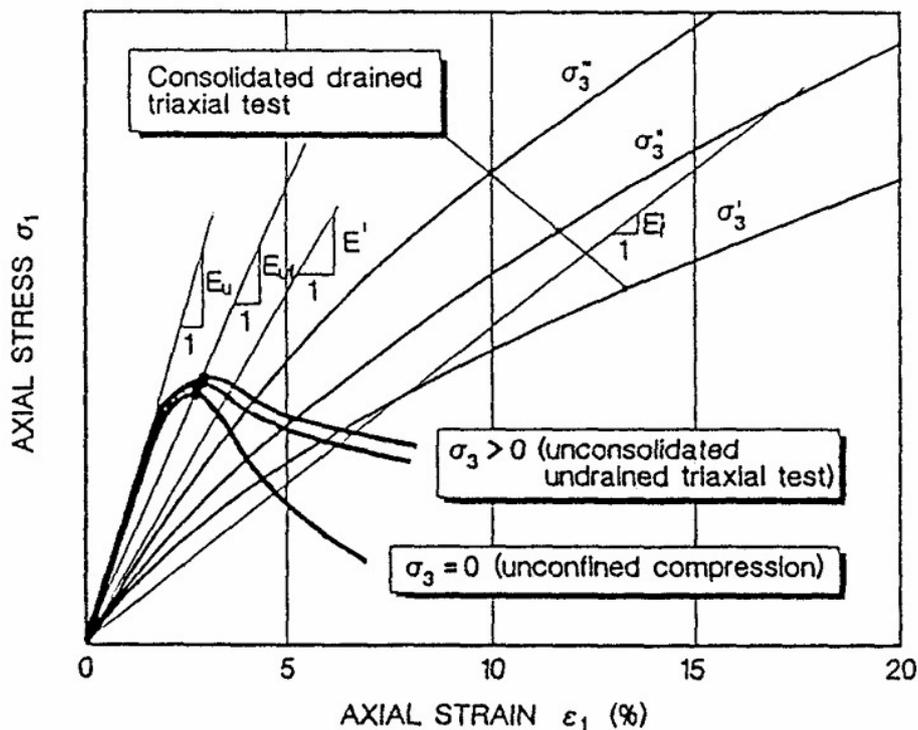


Fig. 3.11 – Comportamento Meccanico.

3.4.2 Deformabilità

Fino agli anni '90, le specifiche tecniche di progetto dei diaframmi autoindurenti richiedevano, a garanzia di una adeguata deformabilità del materiale, che fosse ottenuta una deformazione a rottura non inferiore al 5% a 30 o a 90 giorni, spesso senza che fossero specificate le condizioni di drenaggio in fase di rottura. Numerose ricerche (Manassero, 1991; Manassero et al., 1995; Fratolocchi, 1996) hanno evidenziato che le condizioni di sollecitazione e di drenaggio in fase di rottura condizionano fortemente il comportamento meccanico delle miscele ternarie, che tende ad essere di tipo duttile alle brevi stagionature ed in condizioni drenate, mentre risulta di tipo fragile per alte stagionature e soprattutto se il materiale viene sollecitato in condizioni non drenate. È fondamentale quindi, nella valutazione della deformabilità del materiale, definire le suddette condizioni ed anche il livello tensionale di indagine. Infatti, Mahboubi & Ajorloo (2005) hanno osservato che la deformazione a rottura e la resistenza meccanica tendono ad aumentare sensibilmente con l'aumentare della tensione di confinamento.

In virtù dell'importanza dei suddetti fattori nel condizionare la deformabilità di una miscela ternaria e delle conseguenze in termini di conducibilità idraulica di una rottura di tipo fragile, Mahboubi & Ajourloo (2005) hanno proposto un criterio di controllo basato sulla misurazione della deformazione al raggiungimento del valore limite di conducibilità idraulica ritenuto accettabile per la miscela in esame (i.e. $k = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$).

In generale, sulla base di quanto riportato in letteratura (Ciria et al., 1999; Jepsen & Place, 1985; Manassero et al., 1995), si può riassumere che una miscela autoindurente con dosaggi che rientrano nei range ordinari, può raggiungere deformazioni a rottura anche superiori al 5% senza alcuna fessurazione se sollecitata a taglio in condizioni drenate e consolidata a livelli tensionali almeno pari al 50% della sua resistenza a compressione non confinata. Al di sotto di questo valore di confinamento bisogna aspettarsi un comportamento di tipo fragile con deformazioni a rottura dell'ordine dello 0,5% - 2%. Per avere deformazioni compatibili fra diaframma plastico e terreno circostante, ICOLD (1985) suggerisce un rapporto massimo di 5:1 fra i moduli elastici della miscela e del terreno.

3.5 Prestazioni Idrauliche

Il **principale requisito richiesto a un diaframma plastico**, utilizzato per il confinamento di siti inquinati, è **sicuramente una bassa conducibilità idraulica**, al fine di limitare la migrazione dei contaminanti per flusso convettivo. La prescrizione generalmente richiesta nelle specifiche tecniche di progetto è di avere una conducibilità idraulica non superiore a $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ ad un tempo di stagionatura della miscela pari a 30 o a 90 giorni. La necessità di definire uno specifico tempo di stagionatura deriva dal fatto che la conducibilità idraulica delle miscele ternarie si riduce significativamente (di alcuni ordini di grandezza) fino ad almeno un anno di maturazione. Tale comportamento è associabile alla durata del processo di idratazione del cemento e risulta ancora più evidente nel caso in cui vengano utilizzati cementi di altoforno (Fratolocchi & Pasqualini, 2007).

L'ispessimento e l'intreccio delle fibre del gel di cemento che si idrata comporta una riduzione della porosità totale e della porosità efficace delle miscele ternarie (*Fig. 3.12*).

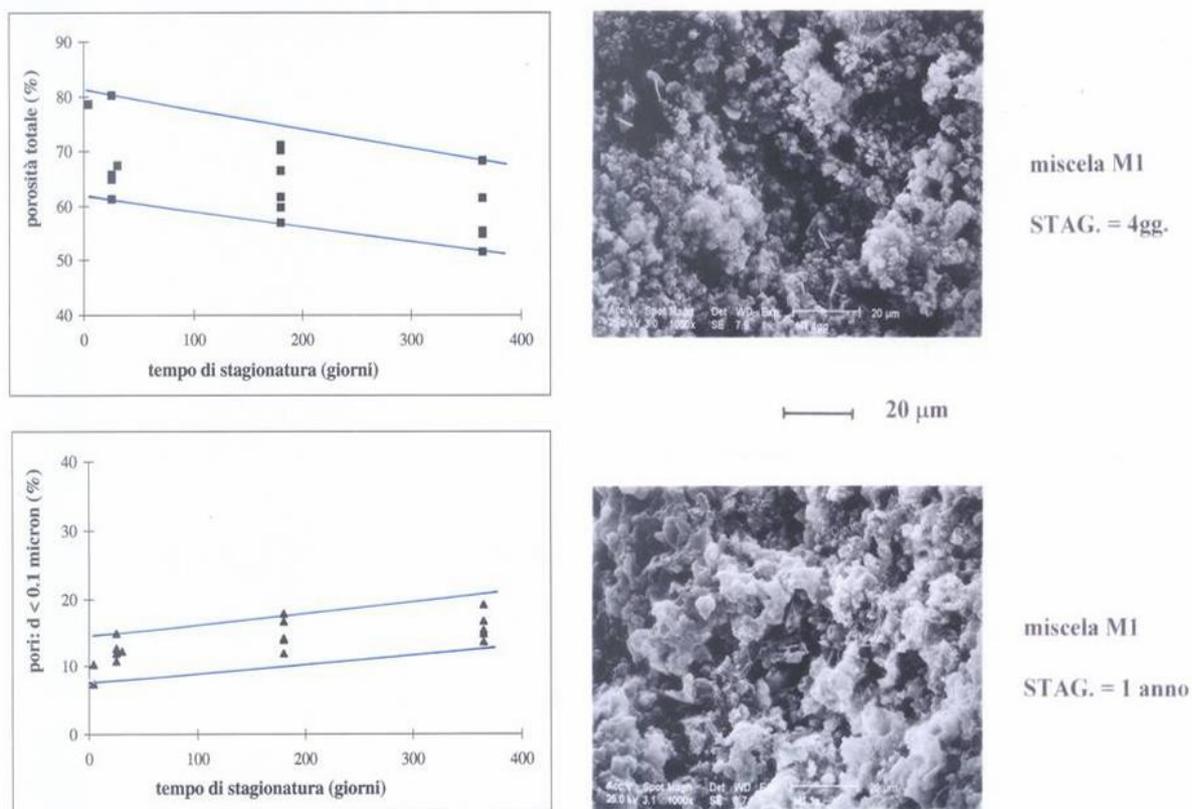


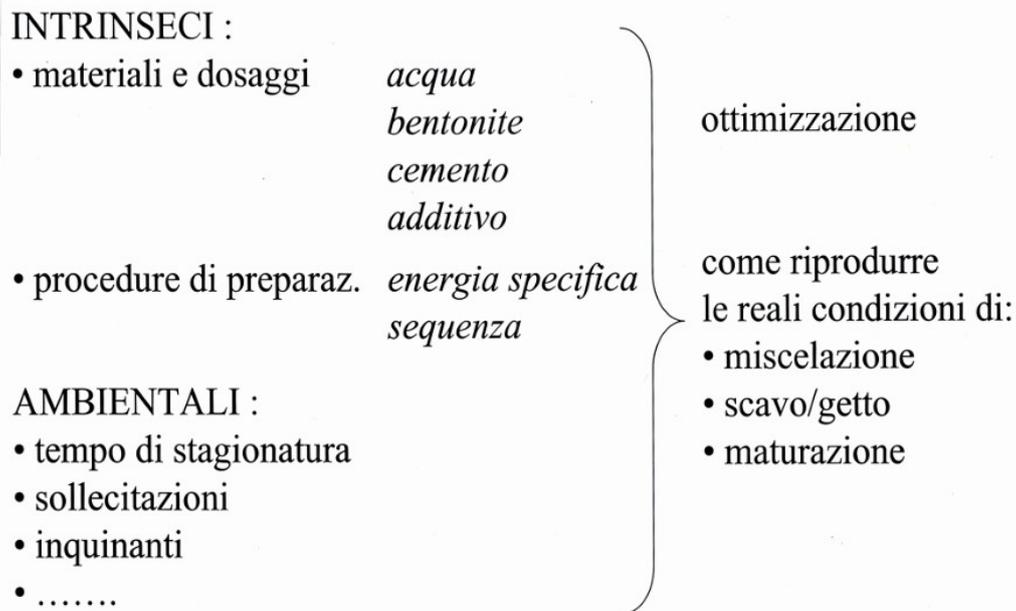
Fig. 3.12 – Porosità della miscela autoindurente (MI) al variare della stagionatura dei campioni (Fratalocchi, 1996).

In fase di progetto è necessario considerare tutti i fattori che possono influenzare la conducibilità idraulica di un diaframma autoindurente in modo tale da ottimizzare le prestazioni del diaframma, selezionando i componenti ed i dosaggi più idonei e valutando mediante opportuna sperimentazione e leggi di previsione le prestazioni del diaframma in funzione delle procedure esecutive e delle condizioni ambientali in cui il diaframma si troverà una volta posto in opera. A tale scopo nei paragrafi seguenti sono analizzati e discussi in dettaglio i principali fattori che possono influenzare le prestazioni idrauliche di un diaframma plastico, anche con la finalità di porre l'accento su possibili problemi che possono essere trascurati e riconosciuti solo dopo che si siano manifestati.

I fattori sono distinti fra intrinseci, costruttivi ed ambientali. I *fattori intrinseci*, oggetto di scelta diretta, sono legati alla composizione della miscela (materiali e dosaggi) ed alle procedure di miscelazione. I *fattori costruttivi* riguardano le procedure esecutive e le conseguenti possibili modifiche alla composizione, mentre i *fattori ambientali* riguardano

l'ambiente fisico-chimico che il diaframma dovrà affrontare. Sono altresì fornite alcune raccomandazioni per la valutazione degli effetti dei suddetti fattori.

FATTORI CHE INFLUENZANO LE PRESTAZIONI DELLE MISCELE CB



3.5.1 Fattori intrinseci

Il tipo ed il dosaggio dei componenti delle miscele ternarie vengono selezionati sulla base dei requisiti necessari allo stato fluido, ovvero stabilità alla decantazione, resa volumetrica, lavorabilità, ed allo stato indurito, principalmente bassa conducibilità idraulica e durabilità.

Per garantire al contempo un'adeguata lavorabilità e stabilità alla decantazione, il dosaggio dei componenti può variare in un range piuttosto ristretto: cemento/acqua = 0.2-0.3; bentonite/acqua = 0.04-0,07. Nonostante ciò, la conducibilità idraulica può variare in modo molto evidente (persino di 3-4 ordini di grandezza) anche in funzione del tipo di componenti.

È ben noto che un incremento del contenuto di solidi riduce la permeabilità. È in ogni caso molto più conveniente incrementare la quantità di cemento anziché di bentonite (entro i limiti tali da garantire la lavorabilità) poiché in tal modo si ottiene anche una più rapida riduzione della permeabilità nel tempo (Fratolocchi e Pasqualini, 2007).

Per quanto concerne il tipo di componenti, per ottenere valori più bassi di permeabilità a parità di dosaggio senza modificare significativamente la rigidità e la resistenza, sono da preferire bentoniti sodiche e cementi d’altoforno. In particolare, si possono ottenere valori di conducibilità idraulica già bassi alle brevi stagionature (k dell’ordine di 10^{-8} cm/s a 30-60 giorni) impiegando cemento d’altoforno, il quale, oltre a dare benefici in termini di resistenza all’aggressione chimica e minore viscosità a parità di dosaggio, consente di incrementare la velocità di riduzione della permeabilità nel tempo rispetto ad altri tipi di cemento.

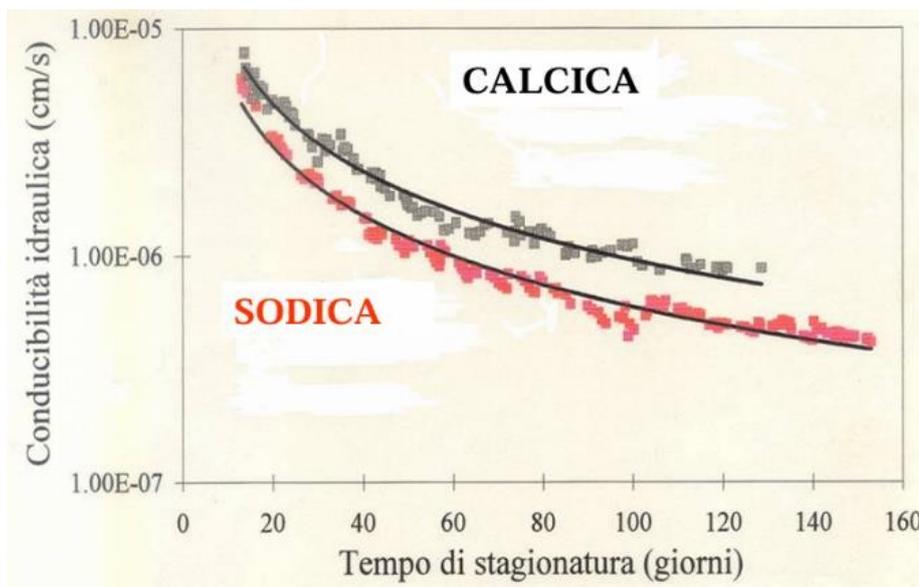


Fig. 3.13 – Tipo di bentonite.

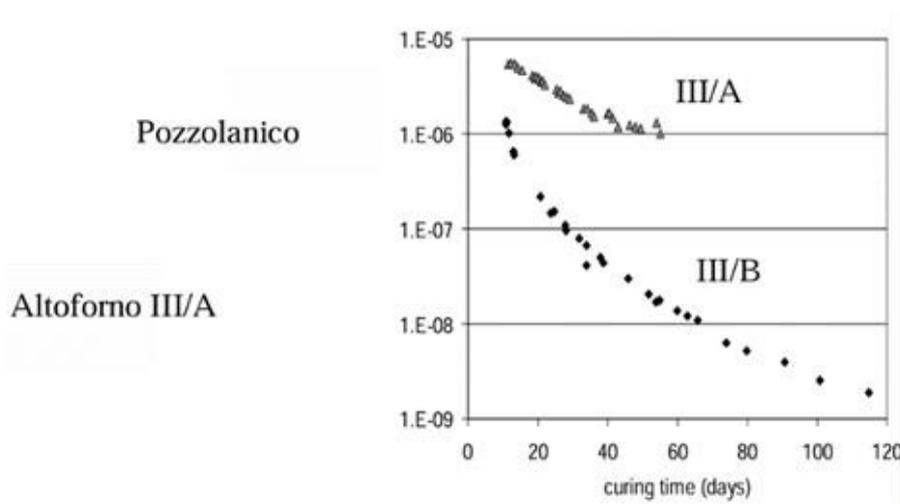


Fig. 3.14 – Tipo di cemento.

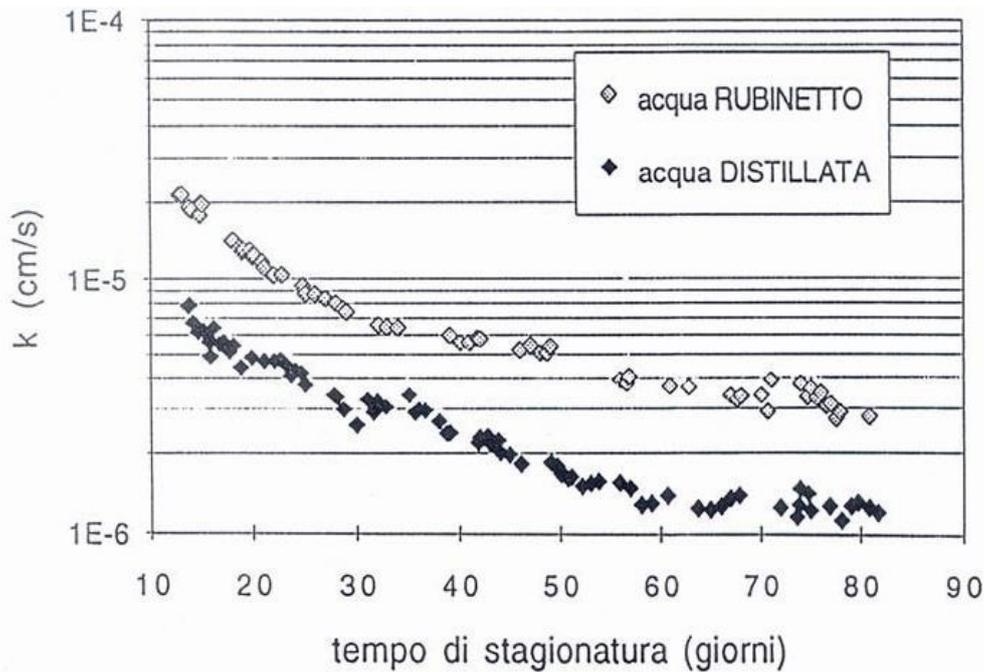


Fig. 3.15 – Tipo di acqua.

In considerazione dell'ampia gamma di bentoniti e cementi disponibili, la valutazione delle potenziali prestazioni idrauliche del tipo di materiale da impiegare, richiede una sperimentazione di laboratorio per selezionare il tipo di componenti in grado di garantire a priori le migliori prestazioni del materiale una volta posto in opera, tenendo conto dei requisiti idraulici e meccanici richiesti per l'opera a breve e a lungo termine. In considerazione dei tempi di progetto, la selezione dei materiali si basa necessariamente su misure eseguite su campioni alle brevi stagionature (al massimo di 1-2 mesi). Tenendo conto che la conducibilità idraulica tende a diminuire nel tempo per stagionature ben superiori a quelle generalmente indagate in fase di progetto e che il tipo e dosaggio dei componenti influenza in modo determinante anche le prestazioni idrauliche a lungo termine, risulta utile la correlazione, proposta da Fratolocchi (1996) e riportata anche in ICE (1999), che consente di **stimare la conducibilità idraulica delle miscele autoindurenti a lungo termine** in funzione del dosaggio dei singoli componenti.

Tale correlazione esprime il coefficiente di permeabilità, k , in funzione del tempo di stagionatura, t :

$$k = k_r(t/t_r)^{-\alpha} \quad (1)$$

nella quale il coefficiente k_r [L/T] rappresenta il valore della conducibilità idraulica al tempo t_r , mentre il coefficiente α [-] esprime la riduzione di conducibilità idraulica all'aumentare del tempo di stagionatura e varia tipicamente tra 1 e 4, in relazione al contenuto ed al tipo di cemento e non risulta apprezzabilmente dipendente dalla percentuale di bentonite, da cui invece dipende la k . Tale riduzione è tanto maggiore quanto maggiore è il contenuto di cemento nella miscela (*Fig. 3.16*) e, a parità di contenuto di cemento, è maggiore per cementi d'altoforno e con maggiore contenuto di loppa.

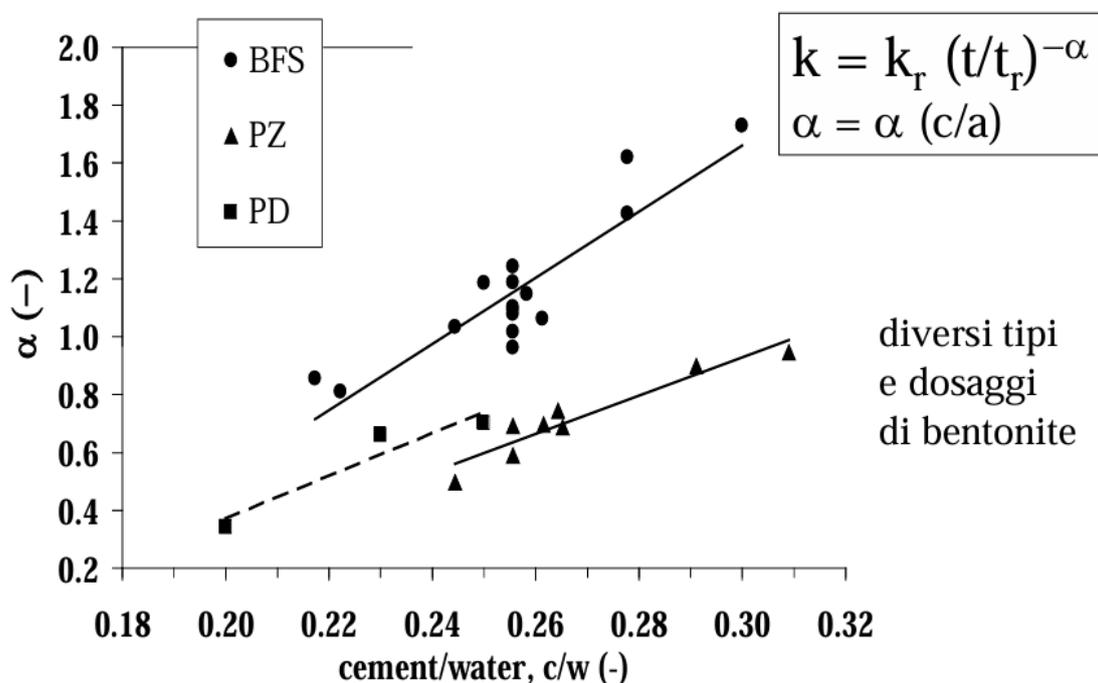
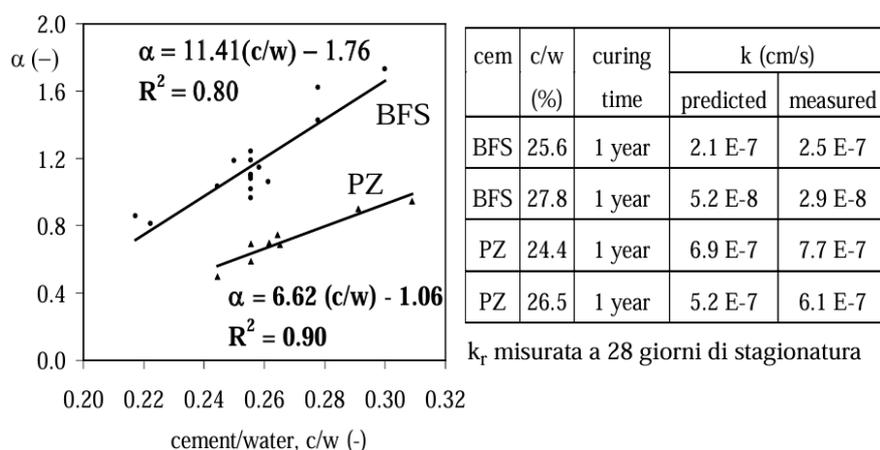


Fig. 3.16 - Previsione della Permeabilità: influenza del cemento su α .

La stima della conducibilità idraulica a breve e lungo termine delle miscele autoindurenti mediante l'eq. (1) richiede l'esecuzione di prove di laboratorio su campioni aventi pochi giorni di maturazione, per poter definire con sufficiente attendibilità il valore dei coefficienti k_r e α . Se l'interpolazione è relativa a misure continue di k in un arco di tempo di almeno 3-4 settimane, i valori di conducibilità idraulica stimati a lungo termine sono in buon accordo con quelli misurati (Fratolocchi e Pasqualini, 2007).

k_r misurata and α stimato dal rapporto c/a



k_r e α dall'interpolazione dei valori di k misurati per 3-4 settimane

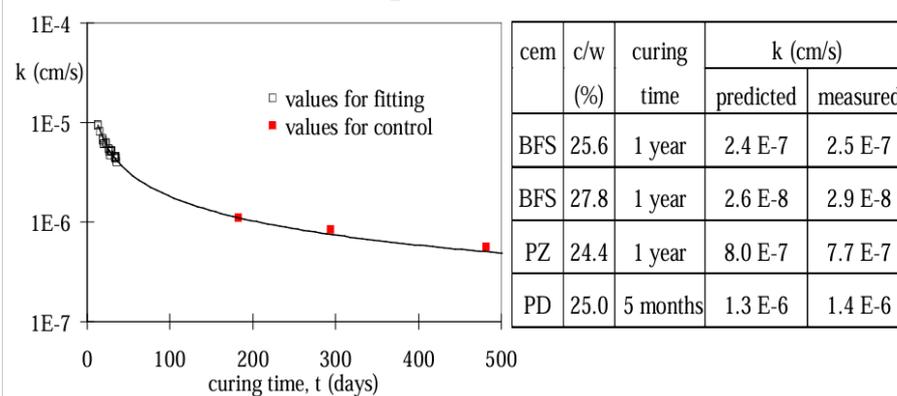


Fig. 3.17 – Affidabilità della previsione della k a lungo termine.

Poiché la riduzione di k delle miscele CB non dipende dal tipo e dal dosaggio di bentonite, in base ai risultati di *Fig. 3.16* è possibile stimare il coefficiente α , per particolari tipi di cemento, dal rapporto cemento/acqua della miscela. In particolare, interpolando linearmente i valori di α in funzione del rapporto cemento/acqua (c/a), sono state ottenute le seguenti correlazioni, a seconda del tipo di cemento (Fratalocchi e Pasqualini, 2007):

- cemento d'altoforno, classe III/A: $\alpha = 11.4 c/a - 1,76$ (2)
- cemento d'alto forno, classe III/B: $\alpha = 26,4 c/a - 3,16$ (3)
- cemento pozzolanico: $\alpha = 6.6 c/a - 1.0$ (4)

In tal modo, misurando un valore di permeabilità ad un qualsiasi tempo di stagionatura (a breve stagionatura in fase di progetto), si può stimare il valore di permeabilità della miscela a lungo termine mediante l'eq. (1). Tale stima può essere utilizzata sia per la previsione della permeabilità a lungo termine fino ad un anno di maturazione delle miscele, sia come andamento di riferimento della permeabilità della miscela in acqua, evitando una sperimentazione prolungata, da confrontare con l'andamento della conducibilità idraulica misurata permeando la stessa miscela con il liquido inquinante da contenere (prove di compatibilità chimica e durabilità).

Il controllo della conducibilità idraulica di un diaframma può essere effettuato mediante prove di laboratorio su campioni di miscela prelevati dall'impianto o dallo scavo, allo stato fluido, oppure mediante prove in sito (prove in foro, sonde porose, piezocono o prove di pompaggio) (Grisolia & Napoleoni, 1997). Il prelievo di campioni indisturbati direttamente dal diaframma a miscela indurita non risulta affidabile in quanto la rigidezza del materiale determina il disturbo in fase di campionamento (Fratolocchi & Pasqualini, 1998).

Il tempo di stagionatura è uno dei fattori che maggiormente influenzano la permeabilità delle miscele cemento-bentonite. La *Fig. 3.18* mostra che la conducibilità idraulica tende a diminuire all'aumentare del tempo di stagionatura e che il maggior decremento avviene entro i primi 2-3 mesi di stagionatura. Si può avere una riduzione sino a 2 ordini di grandezza con tempi di stagionatura che vanno dai dagli 8 ai 12 mesi.

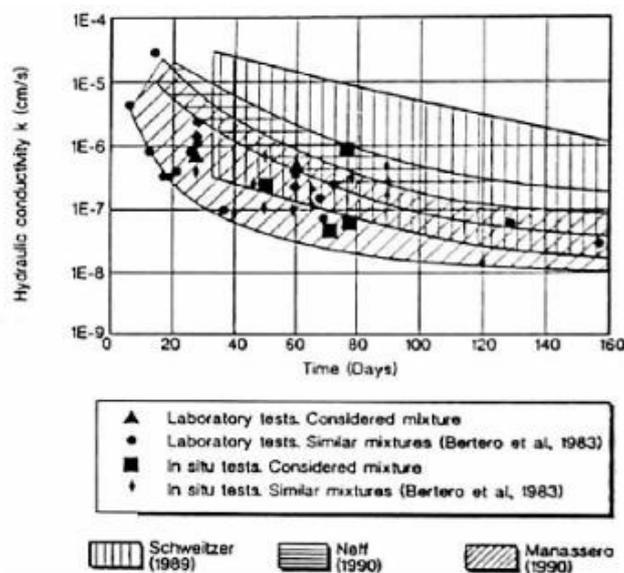


Fig.3.18 – Conducibilità idraulica in funzione del tempo di stagionatura.

3.5.2 – Controllo della conducibilità idraulica

L'utilizzo di prove di laboratorio, indispensabile in fase di progettazione, pone il problema della rappresentatività del volume permeato qualora le si utilizzi come controllo in corso d'opera o finale (Grisolia, Napoleoni, & D'Aprile, 2000).

Secondo alcuni autori (Ryan, 1987) le miscele sono materiali omogenei e scarsamente influenzati dalla variabilità delle procedure esecutive. Altri autori (Manassero, 1994; Jefferis, 2012) sostengono che le prove di laboratorio non possano rappresentare le condizioni globali del diaframma realizzato, a causa della possibile presenza di difetti macroscopici, quali: variazioni accidentali della composizione della miscela, frammenti localizzati del terreno circostante, inglobamento di terreno durante lo scavo del diaframma o fessure per essiccamento.

Pur potendo prevenire, con appropriate procedure esecutive, alcune delle cause dei possibili difetti macroscopici sopra elencati, le prove in sito permettono di ottenere risultati certamente più attendibili rispetto alle prove di laboratorio, in quanto il volume di diaframma sottoposto a prova è sicuramente maggiore; tuttavia, essendo generalmente più costose, non è sempre possibile effettuare un numero di prove statisticamente significativo. Le prove in sito più diffuse consistono nel posizionare piezometri all'interno del diaframma per eseguire prove di infiltrazione. Sulla base di quanto riportato da Ryan (1987), Leps (1991) e da Manassero (1991), la prova di pompaggio è una delle prove in sito che fornisce i risultati più attendibili. Manassero (1994) propone l'utilizzo di prove con il piezocono (CPTU), utili per indagare difetti localizzati e per stimare il comportamento idraulico e meccanico delle miscele cemento-bentonite in sito.

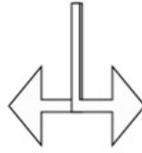
3.5.3 – L'impiego di additivi

L'impiego di additivi ritardanti di presa (ICE, 1999), con dosaggi di 1-3 l/m³, può rendersi necessario per aumentare il tempo di lavorabilità della miscela, nel caso ad esempio di scavi profondi e/o in terreni particolarmente consistenti o per diaframmi compositi per i quali la posa dei teli di geomembrana al termine dello scavo richiede che la miscela abbia una consistenza fluida.

ADDITIVO

DISPERDENTE DELLA FRAZIONE SOLIDA

**AUMENTO DELLA
LAVORABILITÀ**



**RIDUZIONE DELLA
PERMEABILITÀ**

aumento del tempo di presa,
riduzione viscosità

riduzione dimensione
media dei pori

Poiché l'additivo ha anche un'azione disperdente sulla bentonite, la sua aggiunta (che avviene al latte di bentonite, secondo la sequenza standard) comporta una riduzione della dimensione media dei pori e quindi si può ottenere una riduzione di permeabilità anche di 2 ordini di grandezza con un dosaggio di circa 3 litri di additivo per m³ di miscela (Fratolocchi e Pasqualini, 2007) (*Fig. 3.19*).

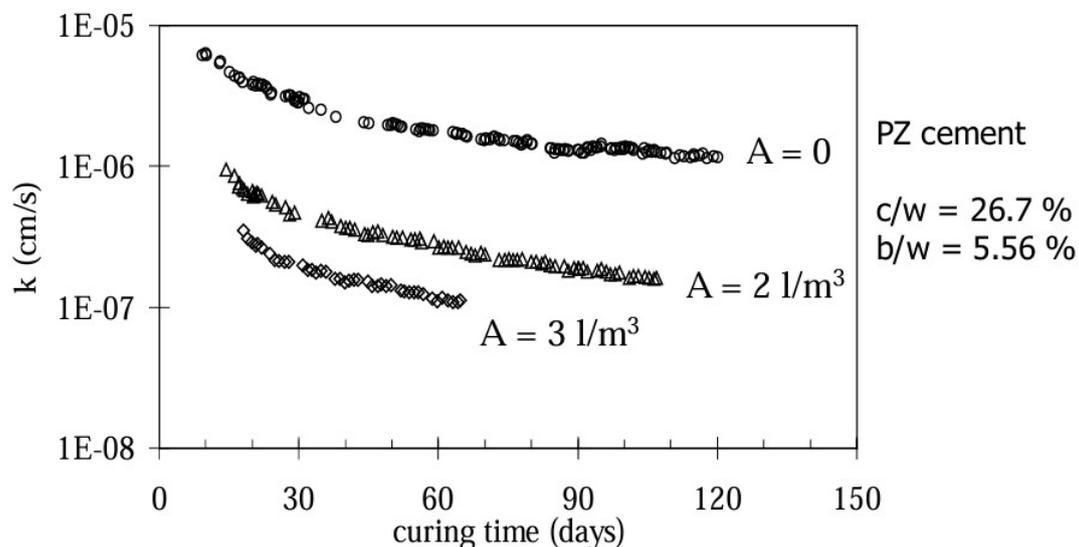


Fig. 3.19 – Additivo e permeabilità.

Variando la sequenza di miscelazione, ovvero aggiungendo l'additivo dopo aver aggiunto il cemento al latte di bentonite, si può ulteriormente incrementare il tempo di lavorabilità di una miscela additivata, rispetto alle usuali 3-6 ore, anche in presenza di percentuali di cemento piuttosto elevate (*Fig. 3.20*), senza modificare la conducibilità idraulica. Ciò comporta

importanti vantaggi pratici: si può scavare con procedura monofase, più rapida, evitando di dover predisporre, gestire e smaltire il fango di stabilizzazione dello scavo; inoltre nel caso di posa della geomembrana si ha più tempo a disposizione prima dell'indurimento della miscela.

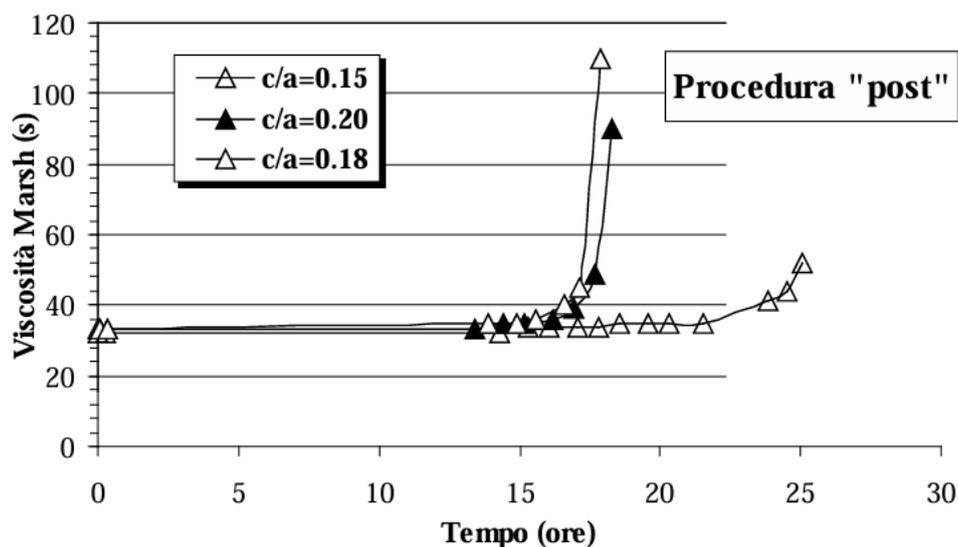


Fig. 3.20 – Tempo di lavorabilità di una miscela ternaria (cemento III-B, additivo=2 l/m³ di miscela) con additivo aggiunto come ultimo componente (Fratolocchi e Pasqualini, 2007).

3.5.4 Fattori esecutivi

La sequenza di preparazione di una miscela in laboratorio è la stessa che viene seguita in sito, ma le quantità in gioco e la potenza degli impianti di miscelazione, quindi l'energia specifica, risultano ben diverse. I risultati riportati in letteratura (Fratolocchi e Pasqualini, 1998) dimostrano che in generale, quando le miscele non contengono additivi, si nota un buon accordo fra i valori di permeabilità della miscela di progetto, confezionata in laboratorio, e della stessa miscela preparata in impianto di cantiere. Se invece la miscela è additivata, si possono avere valori di permeabilità inferiori, quindi a sfavore di sicurezza, rispetto a quelli della stessa miscela di cantiere. La differenza risiede probabilmente nella diversa omogeneità: in laboratorio, dove sono preparate quantità molto minori rispetto al sito e in condizioni altamente controllate, è possibile ottenere una più uniforme miscelazione fra bentonite, acqua e additivo, e quindi una migliore dispersione delle particelle di bentonite e di cemento. È

quindi opportuno adottare un coefficiente di sicurezza sulla conducibilità idraulica, che si suggerisce sia almeno pari a 2, nel selezionare una miscela additivata.

Per ottenere bassi valori di conducibilità idraulica fin dalle brevi stagionature ed avere garanzia, in fase di progetto, delle effettive prestazioni delle miscele in relazione al controllo dei dosaggi ed alle modalità di miscelazione, recentemente sono stati introdotti sul mercato premiscelati anidri costituiti da bentonite sodica, cemento, loppa d'altoforno (dosata nel range della classe III/B) e filler argillosi di diversa composizione mineralogica. Le speciali attrezzature di miscelazione predisposte per tali prodotti in laboratorio e in cantiere consentono di ottenere miscele con contenuto di solidi superiore rispetto alle tradizionali miscele ternarie e rendono possibile un'unica fase di miscelazione fra acqua e prodotto premiscelato, per cui la miscela risulta precisa nella composizione e nei dosaggi, omogenea e pronta in breve tempo, senza necessità di preidratazione. A titolo di esempio, la *Fig. 3.21* mostra l'andamento della conducibilità idraulica con la stagionatura di una miscela ternaria tradizionale (non additivata, confezionata con cemento III/B e avente elevato dosaggio di componenti solidi) e di due premiscelati, Solidur® A (SA) e B (SB).

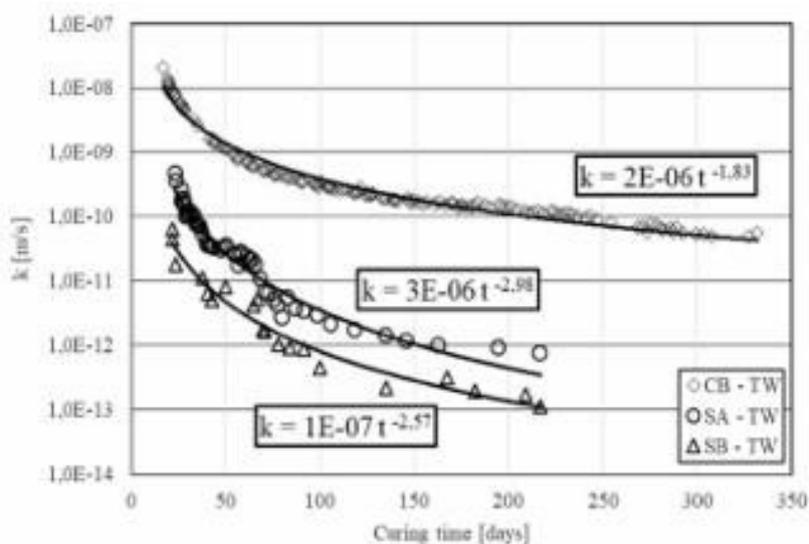


Fig. 3.21 - Confronto fra la conducibilità idraulica di una tipica miscela ternaria CB e di miscele speciali (SA e SB), al variare della stagionatura (Fratolocchi et al., 2013).

La costruzione del diaframma mediante procedura monofase (ed in minima parte anche per quella bifase) implica la “contaminazione” della miscela ternaria con l’acqua di falda e con il terreno durante lo scavo. È quindi importante in fase di progetto valutarne gli effetti sulle prestazioni idrauliche e meccaniche.

La presenza di acqua tende a far peggiorare le prestazioni idrauliche in quanto si riduce il rapporto solidi/acqua ed inoltre vi può essere un effetto negativo legato all’interazione con la miscela fluida. Non essendo disponibili in letteratura dati in merito, si suggerisce (Fratolocchi e Pasqualini, 2007) di aggiungere una modesta quantità di acqua di falda nella miscela appena confezionata in fase di progetto e di valutarne la permeabilità parallelamente alla stessa miscela cui viene aggiunta acqua di rubinetto, così da verificare gli eventuali effetti di interazione, specialmente qualora l’acqua di falda sia contaminata da sostanze che possono compromettere la presa o l’indurimento del cemento. Si deve comunque tener presente che tale effetto negativo può essere almeno in parte compensato da un incremento della quantità di solidi per inglobamento del terreno nella miscela durante lo scavo, che si stima possa essere almeno del 10% (Jefferis, 1981; Rodrigues Carreto, 2013).

Nel caso di scavo in terreni a grana fine (non contaminati) i risultati di letteratura mostrano che a causa della presenza di terreno nella miscela, la conducibilità idraulica si riduce (nell’ordine di grandezza) rispetto alla miscela prelevata da impianto (*Fig. 3.22*)

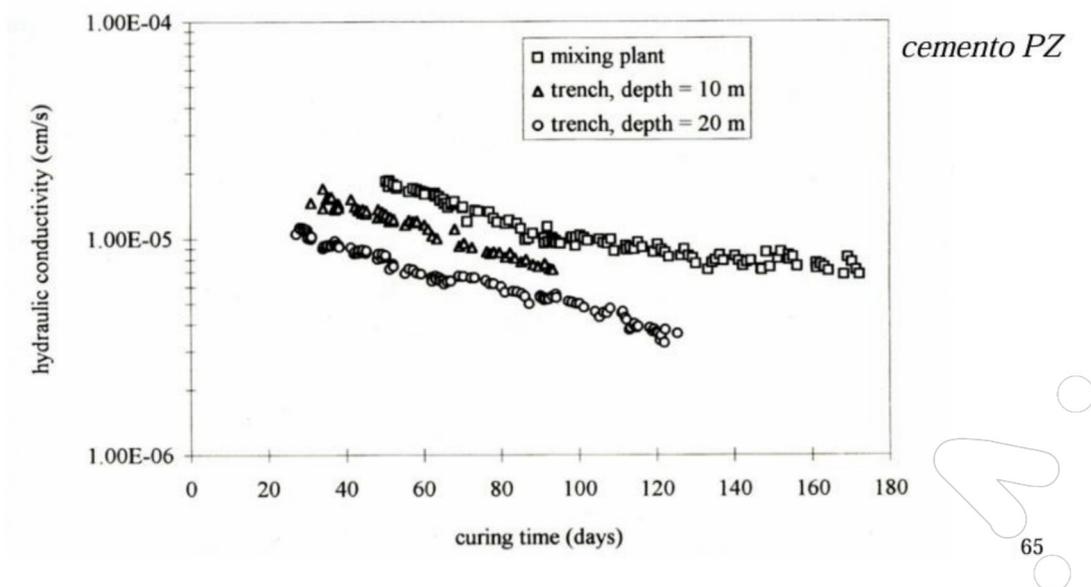


Fig. 3.22 - Confronto fra conducibilità idraulica di una miscela CB prelevata da impianto e da diaframma al termine dello scavo, a diverse profondità (Fratolocchi e Pasqualini, 1998).

Nel caso invece di terreni grossolani, non sembra si abbiano modifiche significative, a patto che ovviamente il terreno sia omogeneamente distribuito nella miscela (Fratolocchi e Pasqualini, 2007). Joshi et al. (2010) documentano un caso in cui la conducibilità idraulica della miscela si incrementa a causa della presenza di acqua e terreno fine inglobato (*Fig. 3.23*) ma, trattandosi di un diaframma in un sito contaminato è ragionevole supporre che tale incremento possa essere almeno in parte dovuto all'interazione fra miscela, terreno e acqua contaminati.

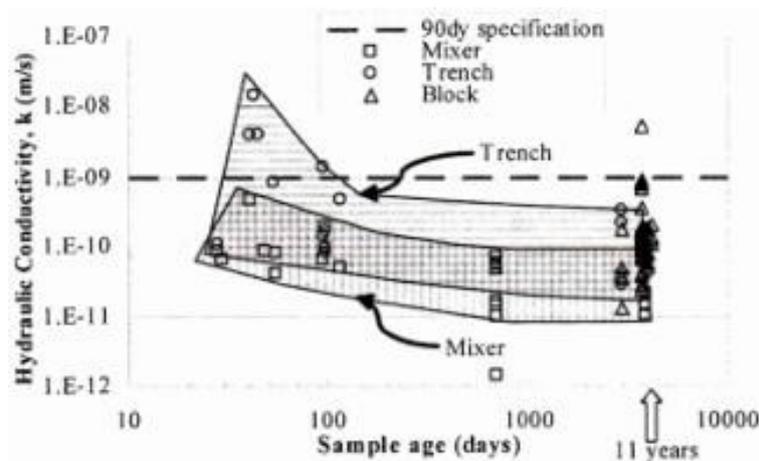


Fig. 3.23 - Confronto fra la conducibilità idraulica di una miscela prelevata da impianto e da diaframma al termine dello scavo (Joshi et al., 2010).

L'esecuzione di diaframmi plastici di profondità considerevoli (50 m e oltre) comporta problematiche tecniche ed economiche importanti, legate innanzitutto alla necessità di ricorrere ad attrezzature più sofisticate (idrofresa), con costi fino a 5 volte superiori a quelli delle attrezzature tradizionali (benna a fune o guidata); inoltre, non essendo possibile realizzare un diaframma composito a tali profondità, è necessario che la miscela abbia una densità sufficientemente maggiore del fango di perforazione e nel contempo garantisca prestazioni idrauliche non inferiori a quelle delle miscele autoindurenti tradizionali. A tale scopo, si possono utilizzare prodotti premiscelati oppure occorre predisporre miscele ternarie con inerti opportunamente dosati e selezionati dal punto di vista granulometrico per ottenere prestazioni idrauliche equivalenti a quelle delle miscele CB, seppure con una rigidità superiore. Il fatto che si possano contenere incrementi della resistenza a compressione (in dipendenza ovviamente dal rapporto inerti/miscela) può essere importante alla luce del

requisito (discutibile) frequentemente richiesto alla miscela di non superare specifici valori di resistenza a compressione (generalmente 1 MPa a 28 giorni di stagionatura).

I suddetti requisiti possono essere garantiti a patto che la miscela con inerti possa essere omogenea, il che richiede un adeguato sistema di miscelazione di cantiere, un corretto rapporto inerti/miscela ed una corretta esecuzione del getto per evitare segregazione o vespai.

3.6 Compatibilità chimica e durabilità

Con riferimento alle prestazioni nei confronti dell'interazione con i contaminanti, è noto che le miscele ternarie, così come qualsiasi miscela a base cementizia, soffrono gli ambienti solfatici, acidi e le sostanze organiche, in misura diversa a seconda del tipo, del livello e della combinazione fra tali sostanze.

Come conseguenza della filtrazione di **soluzioni solfatiche saline**, le miscele mostrano tipicamente un'iniziale riduzione della permeabilità dovuta al clogging (intasamento) per la formazione di gesso, seguita da rigonfiamento per formazione di ettringite che determina una fitta rete di fessure interconnesse tale da incrementare la conducibilità idraulica e la diffusione effettiva (*Fig. 3.24*).

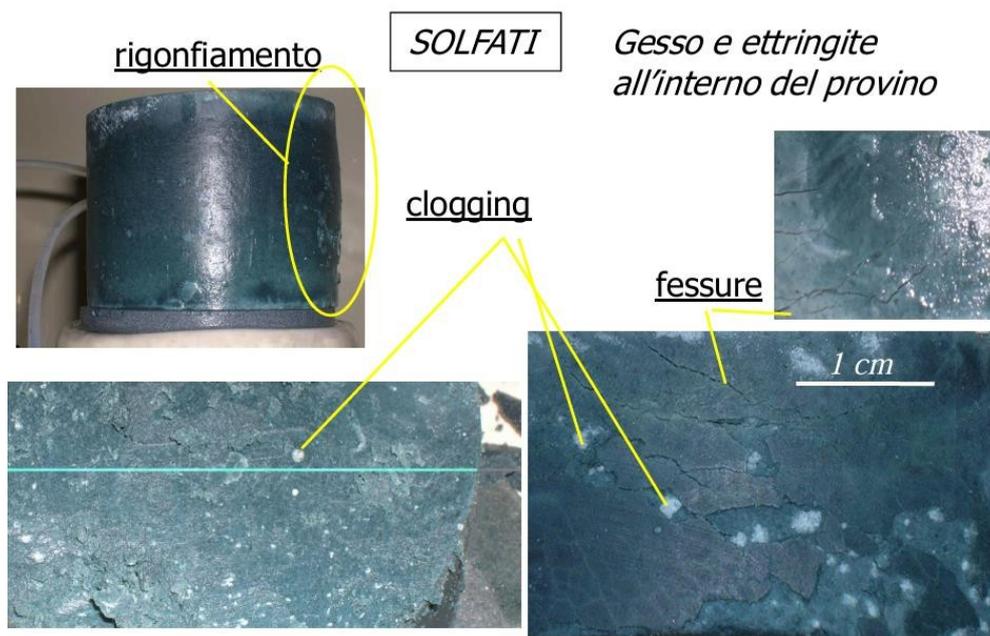


Fig. 3.24 - Conseguenze della filtrazione di soluzioni solfatiche su una miscela ternaria.

In particolare, i risultati pubblicati da Fratalocchi et al. (2013) hanno mostrato che la permeazione continua di soluzioni solfatiche saline a concentrazione ≥ 15 g/l incrementa la conducibilità idraulica già dopo pochi pore volumes (qualche settimana) di permeazione (*Fig.3.25*). Gli effetti di clogging e di fessurazione sono tanto più rapidi quanto maggiore è la concentrazione di solfati in soluzione. La conducibilità idraulica a lungo termine si attesta su un valore dell'ordine di 10^6 cm/s, tale da non rendere più idoneo il diaframma di cinturazione. Per concentrazioni inferiori, il comportamento idraulico nei confronti delle soluzioni solfatiche è migliore (*Fig. 3.25*); tuttavia, anche in questo caso, si osserva un incremento della conducibilità idraulica a lungo termine, simile a quello osservato con le soluzioni a maggiore concentrazione a breve termine.

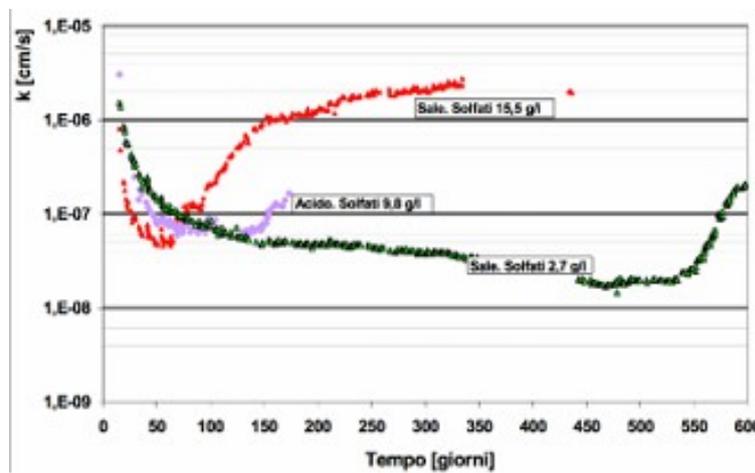


Fig. 3.25 – Conducibilità idraulica di una miscela autoindurente al variare della concentrazione di SO_4^{2-} in soluzione (acido solforico, solfato di potassio, Fratalocchi et al., 2013).

Sulla base di tali andamenti, Fratalocchi et al. (2013; 2016) hanno correlato il numero di pore volumes critico (PV^*), ovvero in corrispondenza del quale si verifica l'incremento di permeabilità, alla concentrazione di solfato in soluzione. Il grafico di *Fig.3.26* consente di stimare la durabilità della miscela sulla base della portata prevista attraverso il diaframma. Si tratta di un criterio a favore di sicurezza sia perché riferito ad un valore di k che diventa crescente ma non necessariamente inaccettabile, sia soprattutto perché nella realtà il progetto di una cinturazione prevede l'aggettamento dell'acqua di falda per controbilanciare il flusso diffusivo e pertanto l'acqua di falda che permea un diaframma non è contaminata.

Come suggerito da diversi autori (Fratolocchi, 1996; Jefferis, 2012), l'utilizzo di cementi d'altoforno può garantire una maggiore resistenza all'aggressione solfatica e il contenuto di C_3A (alluminati di calcio) dovrà essere limitato a seconda della concentrazione di solfati in soluzione.

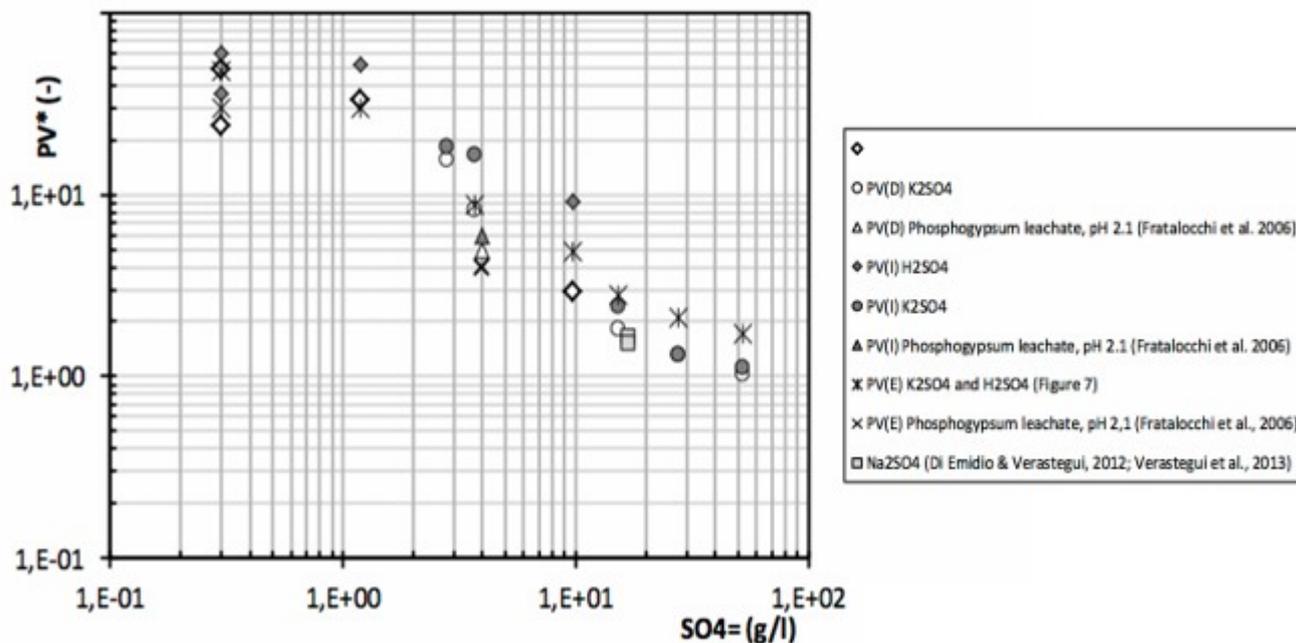
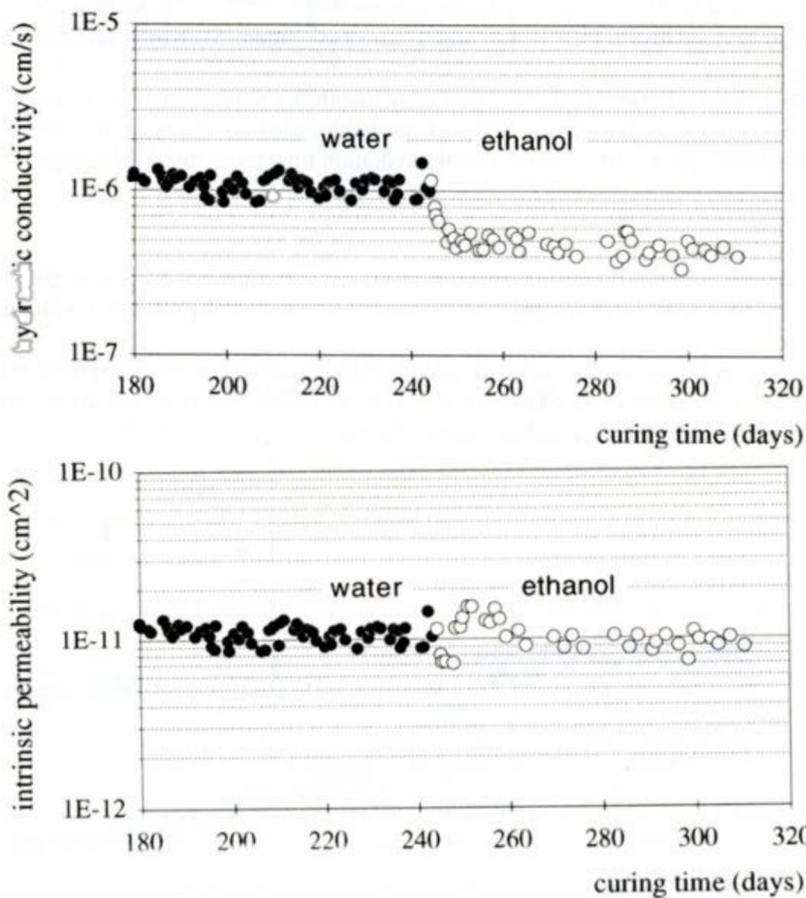


Fig. 3.26 - Numero di pore volumes critico (PV) in funzione della concentrazione di SO_4^{2-} in soluzione (Fratolocchi et al., 2016).*

La presenza di **sostanze organiche** nell'acqua di miscelazione o di permeazione può essere deleteria poiché è in grado di rallentare o addirittura inibire, in funzione della concentrazione, l'idratazione del cemento, processo che determina la riduzione della conducibilità idraulica nel tempo. La stagionatura alla quale avviene il contatto gioca un ruolo fondamentale. Dal punto di vista pratico, un tale effetto deve essere opportunamente valutato e ritardato quanto più possibile, ad esempio, aggotando acqua contaminata all'interno della cinturazione (procedura comunque necessaria per controbilanciare il flusso diffusivo verso l'esterno) subito dopo la realizzazione dell'opera, così da garantire una sufficiente stagionatura in acqua (*Fig. 3.27*).



SOSTANZE ORGANICHE

lunga stagionatura

Fig. 3.27 - Compatibilità chimica e durabilità associata alle sostanze organiche (lunga stagionatura).

Come riportato da Garvin & Hayles (1999) le miscele cemento-bentonite hanno una buona compatibilità chimica con le soluzioni organiche, soprattutto nei confronti di fenoli e altre sostanze che costituiscono degli acidi deboli. Altre molecole organiche quali ad esempio l'anilina sono risultate deleterie in quanto possono portare alla disgregazione dei provini e ad un aumento della porosità (Brown & Daniel, 1988); tuttavia, la presenza di cemento fa sì che la resistenza nei confronti di soluzioni organiche venga sensibilmente incrementata se paragonata a quella delle miscele terreno-bentonite per le quali si registra un incremento sino a 4 ordini di grandezza (dopo circa 3 mesi) per campioni permeati con sola anilina (Evans, Fang, & Kugelman, 1985).

Secondo gli studi condotti da Fratolocchi (1996), l'etanolo provoca un rallentamento dei processi di idratazione del cemento sino ad arrivare alla completa inibizione degli stessi, se il contatto avviene a breve stagionatura. L'entità del fenomeno è direttamente collegata alla

concentrazione di etanolo presente all'interno della soluzione permeata. Tali effetti sono ritenuti reversibili e legati alla stagionatura della miscela (*Fig. 3.28*)

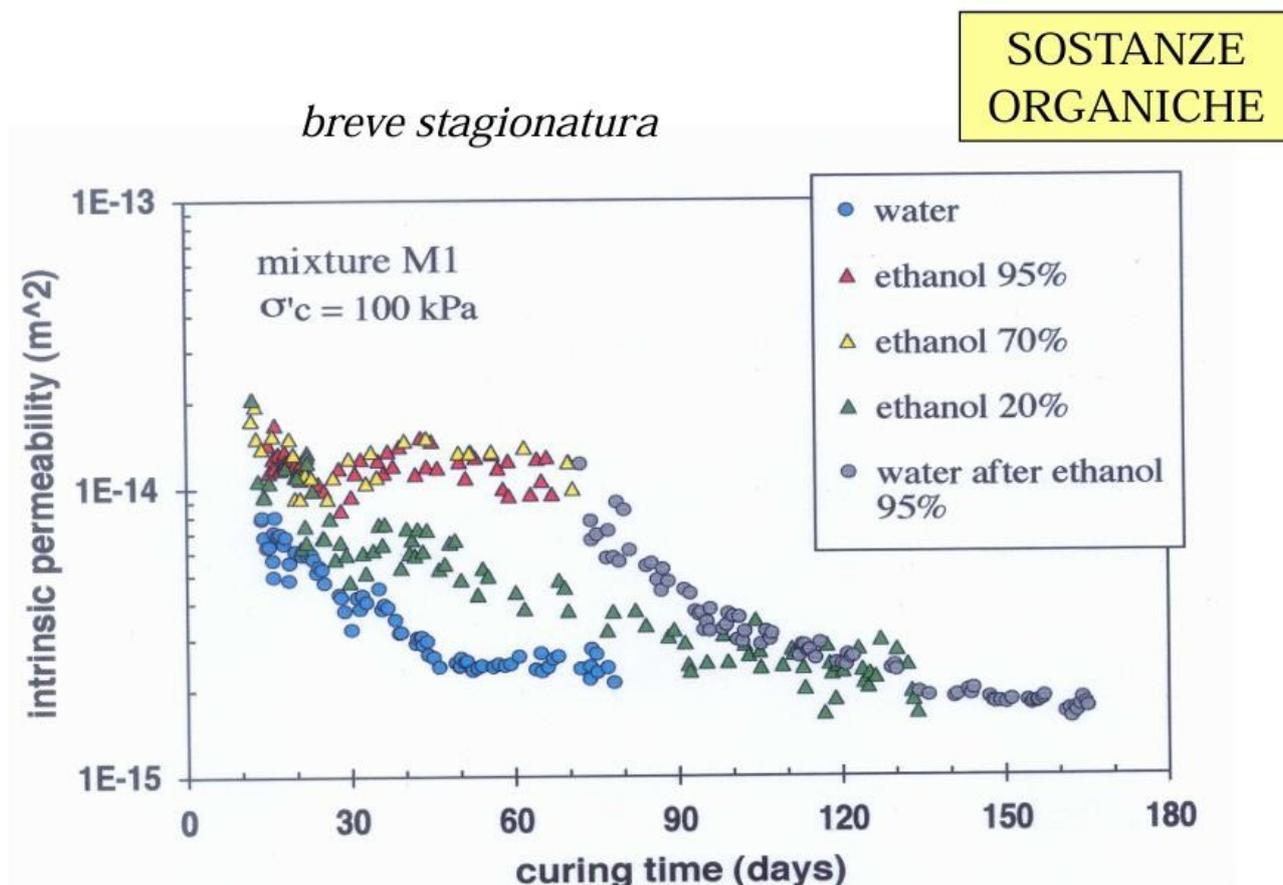


Fig. 3.28 – Compatibilità chimica e durabilità associata alle sostanze organiche (breve stagionatura).

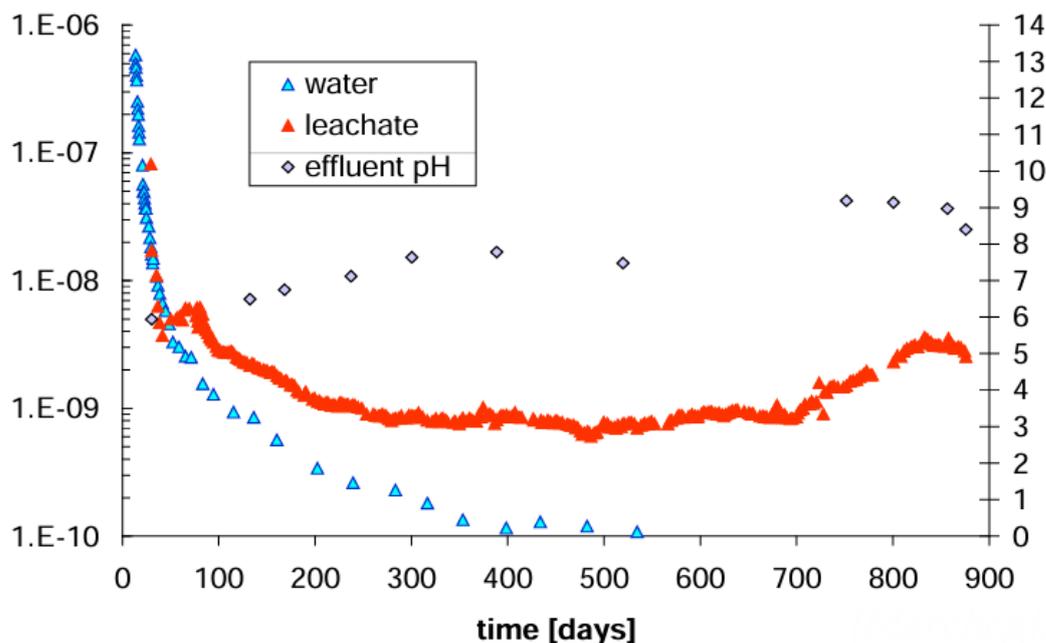
Gli **acidi** sono in grado di dissolvere i prodotti di reazione del cemento (idrosilicati e idroalluminati di calcio, idrossido di calcio) e quindi di danneggiare i diaframmi (*Fig. 3.25*). Jefferis (2003) e Fratalocchi et al. (2005) descrivono casi “clinici” di diaframmi autoindurenti utilizzati per la cinturazione di siti contaminati da solfati e fosfati (acqua di falda con concentrazioni dell’ordine dei g/l) con elevate acidità ($\text{pH} = 2\text{-}3$).

Si segnala comunque che gli effetti deleteri della dissoluzione dei composti di idratazione possono essere almeno in parte compensati dalla precipitazione di idrossidi conseguente alla neutralizzazione degli acidi operata dalla miscela fortemente alcalina e/o dalla formazione di sali insolubili, che occludono parzialmente i pori (*Fig. 3.29*).

Per la valutazione della durabilità di una miscela in fase di progetto, si possono eseguire semplici prove di immersione di campioni in acqua di falda contaminata, con ricambio continuo: la misura della variazione di peso, la comparsa di fessure e il controllo dell'indurimento (con penetrometro tascabile) forniscono indicazioni importanti delle possibili conseguenze a lungo termine del contatto con sostanze potenzialmente aggressive. In caso di buon esito delle prove di immersione, si dovrebbero eseguire prove di permeazione diretta con l'acqua di falda. Per accelerare i meccanismi di interazione e quindi stimare la durabilità in tempi compatibili con quelli di progetto, le prove possono essere eseguite con gradiente idraulico elevato per avere un maggior numero di pore volumes filtrati.

Dissolution => buffering (effluent pH >7)
=> precipitation of hydroxides (Fe, Zn)
=> pore clogging

**SOSTANZE
ACIDE**



109

Fig. 3.29 - Compatibilità chimica e durabilità associata agli acidi.

3.7 Diaframma composito

La geomembrana esercita indubbiamente un'azione di protezione nei confronti della porzione di diaframma non a diretto contatto con il terreno contaminato e pertanto migliora notevolmente le prestazioni del diaframma nel breve e lungo termine. Tale effetto benefico è

comunque legato alla scelta ottimale della geomembrana (polimero, giunto fra i teli), alla corretta posa in opera dei teli ed ai fattori ambientali (fisici e chimici). A tale riguardo si evidenzia che è fortemente raccomandato l'impiego di geomembrane in HDPE, materiale intrinsecamente impermeabile (k al vapor acqueo = $10^{-12} - 10^{-14}$ cm/sec); tuttavia la sua posa in opera non lo rende esente da difetti, legati principalmente al possibile mancato aggancio dei giunti lungo porzioni adiacenti dei teli e in minor misura a difetti di saldatura fra telo e giunto. Pertanto, la migrazione dei contaminanti attraverso una geomembrana può avvenire per flusso convettivo attraverso tali difetti, oltre che per diffusione molecolare.

Possibili danneggiamenti legati allo stress cracking o al decadimento delle proprietà del polimero per ossidazione o degradazione (Rowe, 2005; Needham et al., 2006) sono molto meno rilevanti rispetto a quelli che si possono avere nelle applicazioni sul fondo delle discariche controllate, soprattutto perché in un diaframma composito la geomembrana non è a diretto contatto con gli inquinanti e le sollecitazioni di trazione e la temperatura sono inferiori.

Per quanto riguarda i pannelli in polietilene ad alta densità (HDPE=High-Density Polyethylene) il loro inserimento avviene con cautela e i vari teli devono essere collegati gli uni agli altri tramite particolari giunti, alcuni tipi vengono mostrati in *Fig. 3.30*.

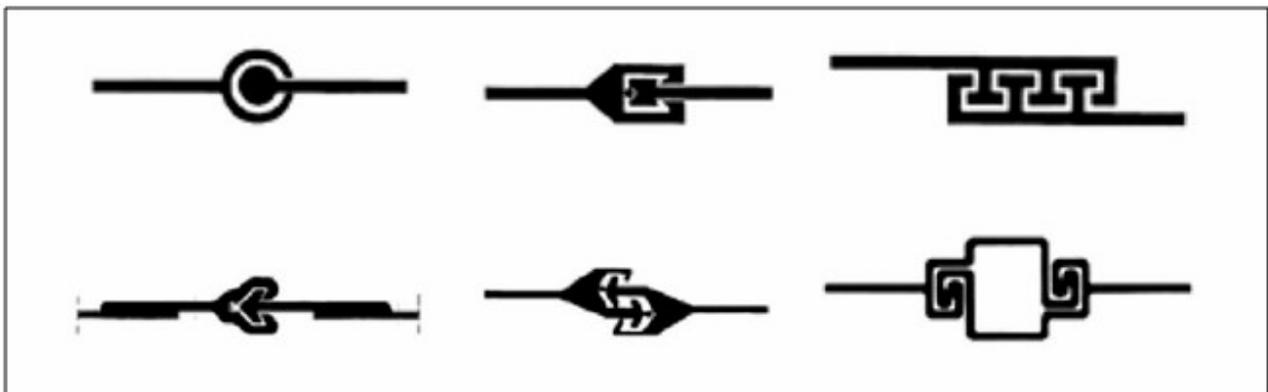


Fig. 3.30 – Diversi tipi di giunti utilizzati nei diaframmi compositi.

L'operazione di giunzione è fondamentale perché permette la buona riuscita dell'opera; basta considerare che un'unione fatta male potrebbe far passare i flussi idrici e/o le sostanze attraverso il setto e non garantirne così l'impermeabilità. In *Fig. 3.31 – sinistra*, è possibile

visionare un telo in HDPE pronto per l'operazione di saldatura dei giunti mentre in *Fig. 3.31* - *destra* si può osservare da un'altra angolatura il macchinario che permette l'unione.



Fig. 3.31 – Telo in HDPE pronto per l'operazione di saldatura dei giunti (sinistra); macchinario che permette la saldatura del giunto sul telo in HDPE (destra).

Il principale problema rimane il mancato aggancio fra i giunti o la scelta di un giunto di prestazioni scadenti, per cui è opportuno utilizzare giunti che abbiano installazione sufficientemente agevole e al contempo buone prestazioni di tenuta, quali ad esempio quelli con nucleo ad espansione o quelli a labirinto (*Fig. 3.30*). Si possono ad ogni modo eseguire prove di tenuta al variare della differenza di pressione attraverso il giunto (Koerner e Guglielmetti, 1995). Sono disponibili in letteratura equazioni ed analisi parametriche per determinare il flusso attraverso difetti di geomembrane accoppiate a materiali di dimensioni e caratteristiche quali quelle dei diaframmi compositi (Giroud e Bonaparte, 1989. a,b; Manassero et al., 1995; Rowe, 2005).

Per quanto concerne la durabilità, vi sono numerose esperienze di laboratorio ed anche osservazioni del comportamento di geomembrane in servizio per anni in ambienti aggressivi (Rowe, 2005; 2007; e molti altri) che si sono rivelate positive, ma è ancora difficile fare previsioni nel lungo termine. Assumendo che le condizioni di una geomembrana in un

diaframma composito siano assimilabili, dal punto di vista dell'esposizione, a quelle del rivestimento secondario di una doppia barriera di fondo di discarica, si può fare una stima di durabilità dell'ordine delle centinaia di anni con una temperatura non superiore a 20°C (Rowe, 2005).

3.8 Vantaggi e limiti applicativi

I **diaframmi autoindurenti** sono ad oggi la tecnologia più utilizzata per la realizzazione di cinturazioni di siti contaminati, per numerosi **vantaggi**:

- elevata resistenza meccanica;
- basso costo del materiale;
- prestazioni ottime in termini di conducibilità idraulica ($k \leq 10^8$ cm/sec → bassa conducibilità idraulica) e di diffusione dei contaminanti, anche grazie alla possibilità di realizzare una barriera composita con geomembrana;
- possibilità di realizzazione anche in terreni a forte pendenza;
- ridotto modulo elastico (se paragonato a quello del calcestruzzo o del jet -grouting);
- semplicità e velocità esecutiva (soprattutto per i diaframmi realizzati con tecnica monofase);
- comportamento duttile (in condizioni drenate).

Il limite di questa tecnologia è rappresentato dal materiale di scavo da smaltire, in quanto il terreno non viene utilizzato per la formazione della miscela.

CAPITOLO 4: Jet- grouting

4.1 Cos'è il Jet-grouting

Con il termine di **jet-grouting** si definisce l'iniezione nel terreno di una miscela cementizia ad alta pressione (fino a 600 atmosfere) attraverso piccoli ugelli, con la quale il terreno viene disgregato e mescolato in-situ, a formare, una volta decorso il tempo di presa della miscela, un elemento di terreno conglomerato (elemento o colonna jetting) con caratteristiche meccaniche migliorate rispetto alle condizioni iniziali. La sua finalità è quindi di consolidare, stabilizzare, rinforzare od impermeabilizzare i terreni direttamente in-situ.

Questa tecnica ha avuto origine ed è stata sviluppata in Giappone alla fine degli anni '60, introdotta in Europa qualche anno più tardi (primi anni '70), la metodologia jet-grouting si è poi largamente diffusa in tutto il mondo.



Fig. 4.1 – Macchina perforatrice per jet-grouting.

4.2 Fasi del processo esecutivo

Le fasi realizzative del jet-grouting possono essere sommariamente così descritte:

- *perforazione del terreno* con trivelle perforanti sottoposte a spinta e rotazione sino alla quota desiderata. La perforazione avviene con circolazione di acqua oppure, qualora sia necessario sostenere le pareti del foro, di fango bentonitico o materiale analogo;
- *iniezione della miscela impermeabilizzante* ad alta pressione (200–600 atm) mediante ugelli posti sul fondo della colonna perforante;
- *miscelazione* che avviene per effetto dell'elevata pressione: il terreno si frantuma e si mescola con la miscela impermeabilizzante iniettata e si procede sino al raggiungimento della quota del piano campagna;
- *giunti in sommità si ripetono le operazioni per colonne attigue di jet-grouting*, avendo cura di eseguire delle sovrapposizioni e compenetrazioni tra le colonne (qualora previste) così da ottenere un unico corpo finale compatto.

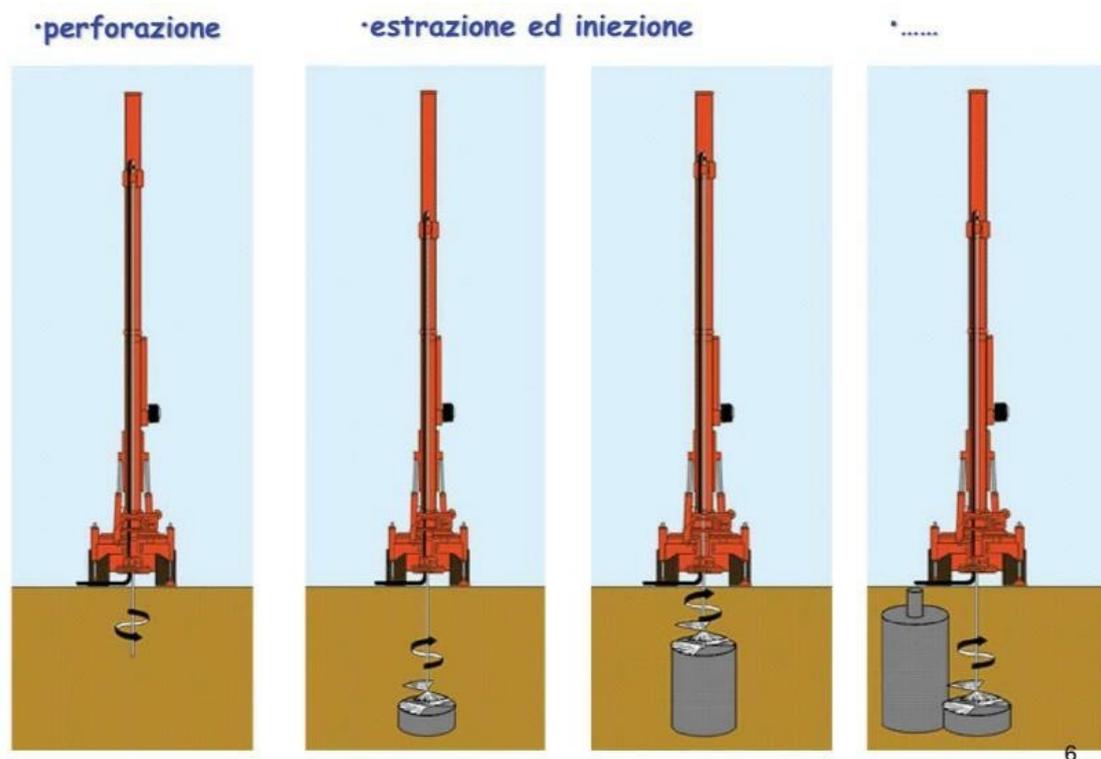


Fig. 4.2 – Esecuzione del jet-grouting.

Laddove sono previste *colonne compenstrate* si possono eseguire due modalità:

- *sequenza a fresco* (fresh in fresh): le colonne sono realizzate in successione senza attendere la presa della miscela cementizia negli elementi adiacenti e sovrapposti. La fase di perforazione deve essere molto accurata per evitare il dilavamento della malta delle colonne adiacenti precedentemente realizzate (*Fig. 4.3-a*);
- *sequenza primaria – secondaria* (fresh in hard): la realizzazione di una colonna si effettua dopo aver atteso la presa delle colonne adiacenti (*Fig. 4.3-b*).

Le colonne possono essere armate per aumentare la loro resistenza meccanica; l'armatura può essere inserita nella colonna prima della presa della miscela o successivamente previa perforazione e successiva cementazione.

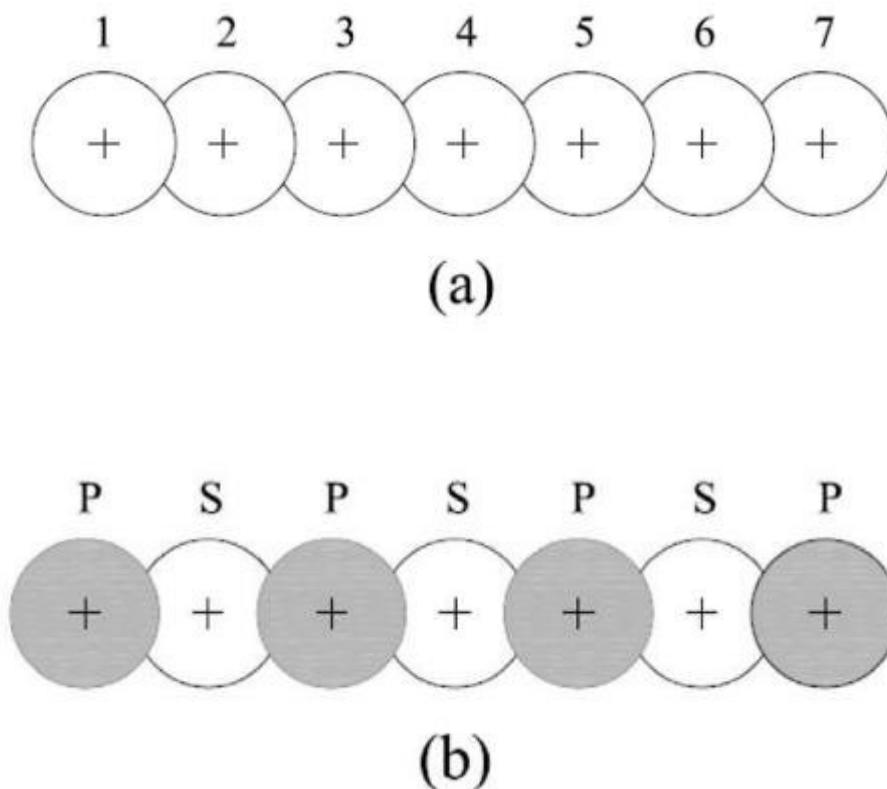
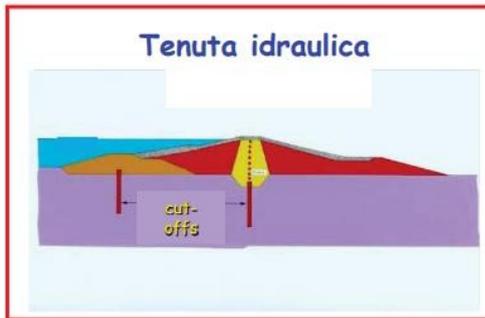


Fig. 4.3 – Realizzazione di colonne compenstrate.

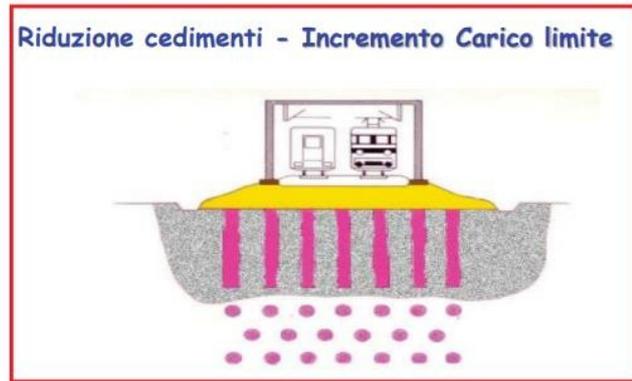
Il jet-grouting, che prevede diverse tipologie di trattamenti di consolidamento, consente di operare in una gamma di terreni estremamente ampia ed offre una notevole flessibilità di

applicazioni (*Fig. 4.4*). Consente, inoltre, l'ottenimento di colonne di terreno consolidato aventi diametri da un minimo di 60 fino ad arrivare ad oltre 200 cm.

• **DIAFRAMMI IMPERMEABILI**



• **FONDAZIONI**



• **OPERE DI SOSTEGNO**



• **GALLERIE**



Fig. 4.4 - Campi di Applicazione del jet-grouting.

4.3 Tecnologie

La jet-iniezione può essere realizzata con diverse tecniche, a seconda dell'applicazione e dei tipi di terreno; sulla base del numero di fluidi utilizzati, la normativa europea EN 12716 distingue *tre principali tecniche di trattamento (Fig. 4.5)*.

- *Monofluido*, in cui la disgregazione e la contemporanea miscelazione del terreno in situ viene effettuata mediante un getto di miscela acqua/cemento. I diametri ottenibili sono mediamente compresi fra 0,4 e 1 m.
- *Bifluido*, in cui la disgregazione e la contemporanea miscelazione del terreno in situ viene effettuata mediante un getto combinato di miscela acqua/cemento ed aria. I diametri ottenibili sono compresi fra 0,8 e 2,5 m.

- *Trifluido*, in cui la disgregazione e la parziale rimozione del terreno in situ viene eseguita per mezzo di un getto combinato di aria ed acqua, mentre la contemporanea miscelazione del terreno in situ viene affidata ad un sottostante getto di miscela acqua/cemento.

Il jetting trifluido è quello più potente e porta ad un raggio d'azione maggiore e ad una più accentuata rimozione della componente fine del terreno. Esso è indicato per i terreni più consistenti.

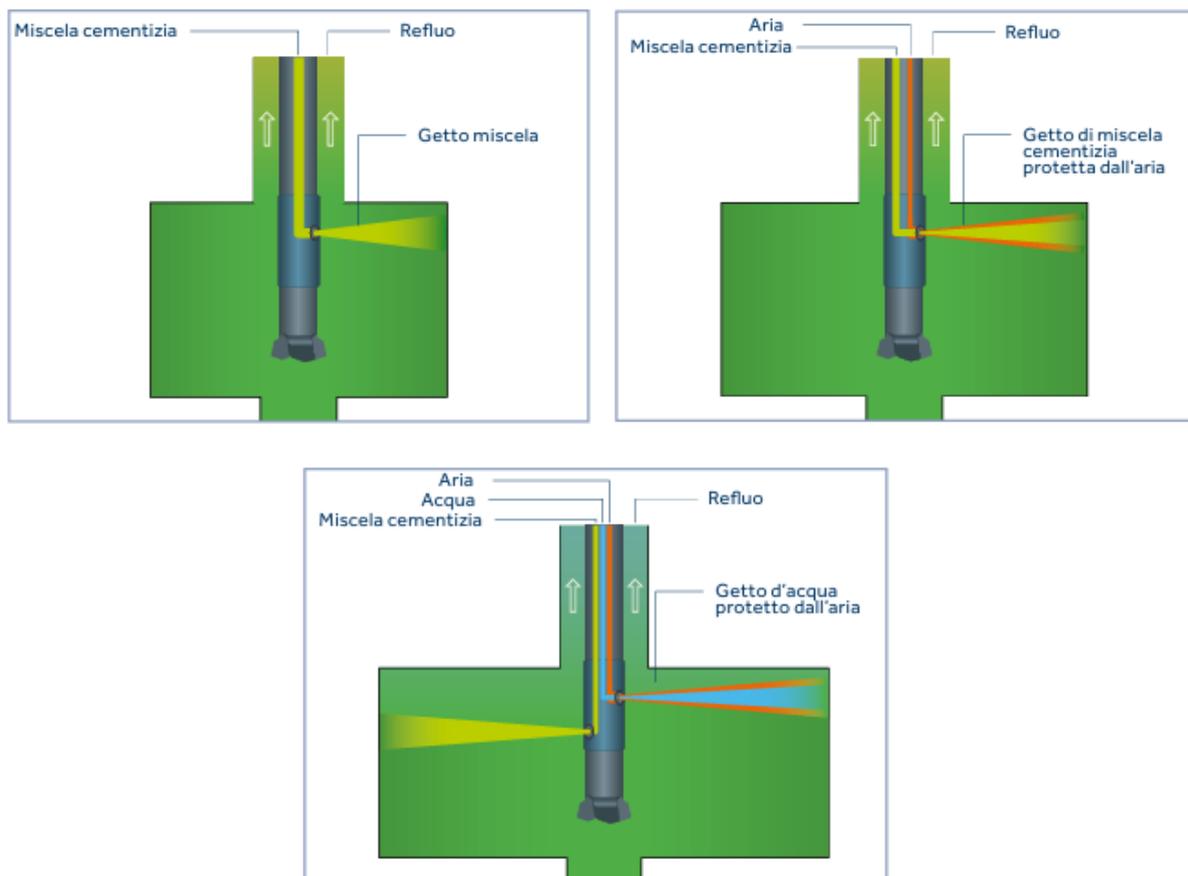


Fig. 4.5 – Sistemi di trattamento monofluido, bifluido, trifluido.

Tutte le tecniche prevedono una prima fase di perforazione, seguita da una fase di risalita e rotazione a valori predeterminati con simultanea iniezione ad alta pressione dei fluidi utilizzati.

I diametri delle colonne ottenibili sono variabili: da 60 a 80 cm (per interventi monofluido), da 100 a 200 cm (per realizzazioni che combinano aria, acqua e cemento).

La resistenza alla compressione che si ottiene varia tra i 2 e i 4 Mpa su terreni fini; tra i 10 e i 20 Mpa e più per i terreni sabbiosi e ghiaiosi.

Gli elementi del jet-grouting sono realizzati in varie forme geometriche (*Fig. 4.6*) mediante il movimento delle aste di perforazione che possono essere combinati in vari modi:

- *estrazione + rotazione completa* per la creazione di colonne complete;
- *estrazione + parziale rotazione* per la creazione di segmenti e mezza colonne;
- *estrazione con rotazione alternata* di pochi gradi per la formazione di lamelle. Se si utilizzano più ugelli si possono produrre varie lamelle.

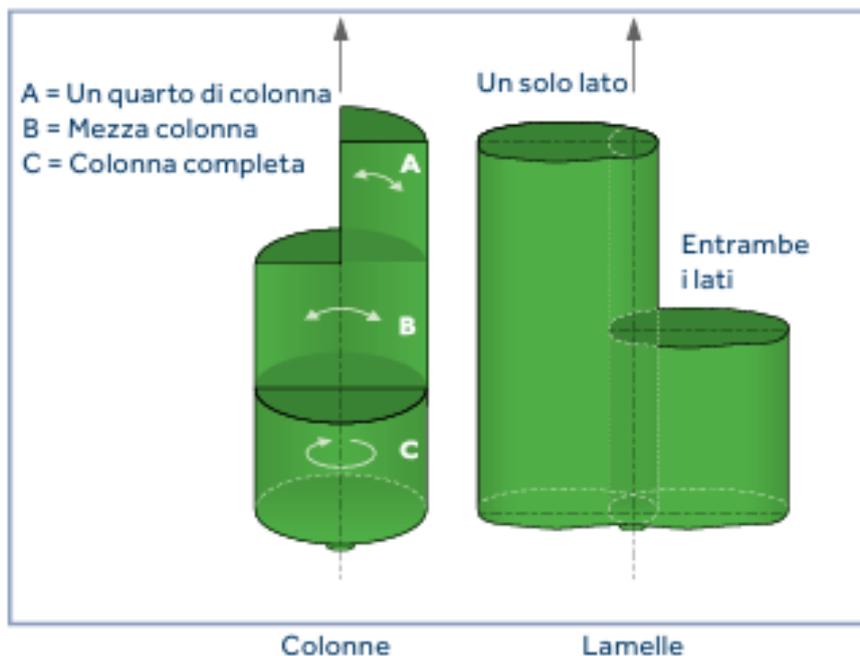


Fig. 4.6 – Forme geometriche del jet-grouting.

La jet-iniezione è applicata a colonne accostate così da ottenere il trattamento efficace su volumi più ampi e possono essere considerate come delle palificazioni e trova applicazione sia su terreni incoerenti sia su formazioni coesive o rocce decomposte.

4.4 Parametri operativi

I principali parametri operativi sono:

- *pressione d'iniezione;*
- *numero e diametro degli ugelli;*
- *rapporto acqua/cemento della miscela d'iniezione;*
- *tempo d'insistenza del getto.*

La *pressione d'iniezione* viene controllata con manometri. Da essa dipende l'energia del getto e quindi il suo raggio di azione. Il limite di pressione raggiungibile è essenzialmente legato alle possibilità delle pompe impiegate ed alla tenuta della linea. Generalmente vengono utilizzate pressioni d'esercizio pari a 40-60 Mpa.

Il *numero ed il diametro degli ugelli* determinano, con la *pressione*, la portata d'iniezione, cioè il volume di miscela immessa nel terreno nell'unità di tempo, e di conseguenza, la velocità di trattamento. Naturalmente portate elevate esigono anche pompe di grande potenza per ottenere le pressioni richieste. L'incremento della sezione degli ugelli favorisce lo sfruttamento delle potenze impiegate, mentre l'utilizzo di un maggior numero di ugelli, a parità di portata totale, diminuisce il rendimento, in quanto comporta maggiori perdite concentrate di carico.

La miscela di iniezione è costituita da acqua (w) e cemento (c), con rapporto w/c in peso compreso tra 0,5 e 1,25.

Il *rapporto acqua/cemento della miscela d'iniezione* è il parametro che principalmente influenza le proprietà meccaniche della colonna e le caratteristiche iniziali della massa terreno-miscela. Un basso rapporto acqua/cemento e quindi un elevato peso specifico della miscela assume estrema importanza in presenza di moti di filtrazione, che potrebbero dilavare il trattamento appena eseguito. In generale, *riducendo il rapporto w/c*, aumenta la densità della miscela ed il terreno trattato acquista migliori proprietà meccaniche; *aumentando il rapporto w/c*, si riduce la viscosità della miscela, si riducono quindi le perdite di carico ed aumenta l'efficacia del getto.

Prove in laboratorio ed in situ mostrano che il valore della resistenza alla compressione semplice è in stretta relazione con il rapporto acqua/cemento.

Il tempo d'insistenza del getto dipende dalla velocità di estrazione della batteria d'aste e dalla velocità di rotazione della stessa. La velocità d' estrazione, con passo solitamente pari a 4 cm., è regolata da un temporizzatore, posto sulla sonda, che fissa il tempo di sosta degli ugelli ad una determinata profondità, quindi il tempo di insistenza del getto ad un determinato livello. Essa incide sul diametro del trattamento e sulle sue caratteristiche meccaniche, oltre che, naturalmente, sul tempo d'esecuzione. Esiste un valore limite al di sotto del quale, in relazione al tipo di terreno da trattare ed ai valori di portata e pressione utilizzati, non conviene operare. Si verifica infatti che, se la velocità d' estrazione è eccessivamente ridotta, il getto non avendo energia sufficiente per creare ulteriore diametro, fuoriesce attraverso l'intercapedine aste-foro. La velocità di rotazione delle aste deve essere regolata in funzione della velocità di estrazione in modo da ottimizzare la capacità perforante del getto. Esiste un limite inferiore per la velocità di rotazione, al di sotto del quale si hanno effetti di riflessione del getto che ne diminuiscono l'efficienza, a meno che non vengano adottati particolari accorgimenti che sono oggetto di recenti ricerche.

Parametri di Trattamento	Simbolo	Unità di Misura	Sistema		
			monofluido	Bifluido	trifluido
Passo di sollevamento	Δs	mm	40 ÷ 50	40 ÷ 80	40 ÷ 100
Velocità media di risalita	v_r	mm/s	4 ÷ 10	1÷8	0,5÷5
Velocità di rotazione	ω	giri/min	5 ÷ 40	3÷30	1÷40
Diametro ugelli	d	mm	2 ÷ 8.0	2 ÷ 8	2 ÷ 8
Numero ugelli	M	-	1 ÷ 2	1 ÷ 2	1 ÷ 2
Pressione miscela cementizia*	p_m	MPa	30 ÷ 55	20 ÷ 40	2 ÷ 10
Pressione aria*	p_a	MPa	NA	0.5 ÷ 2.0	0.5 ÷ 2.0
Pressione acqua*	p_w	MPa	NA	NA	20÷55
Portata miscela cementizia	Q_m	l/s	2 ÷ 10	2 ÷ 10	2.0 ÷ 5
Portata aria	Q_a	l/s	NA	200 ÷ 300	200 ÷ 300
Portata acqua	Q_w	l/s	NA	NA	0.5 ÷ 2.5
Rapporto ponderale acqua/cemento	A/C	-	0.60 ÷ 1.25	0.60 ÷ 1.25	0.40 ÷ 1.0

* Valori misurati alla perforatrice.

Tab. 4.1 – Parametri operativi - Valori tipici.

Nella *Tab. 4.1*, sono riportati i campi di variabilità dei principali parametri operativi generalmente adottati in funzione del sistema di trattamento impiegato.

4.5 Resistenza a compressione e jet-grouting

Il parametro più usuale per la valutazione qualitativa del jet-grouting è la resistenza a compressione (R_{ck}), che può variare in un campo assai ampio in funzione del tempo di stagionatura (*Fig. 4.7*).

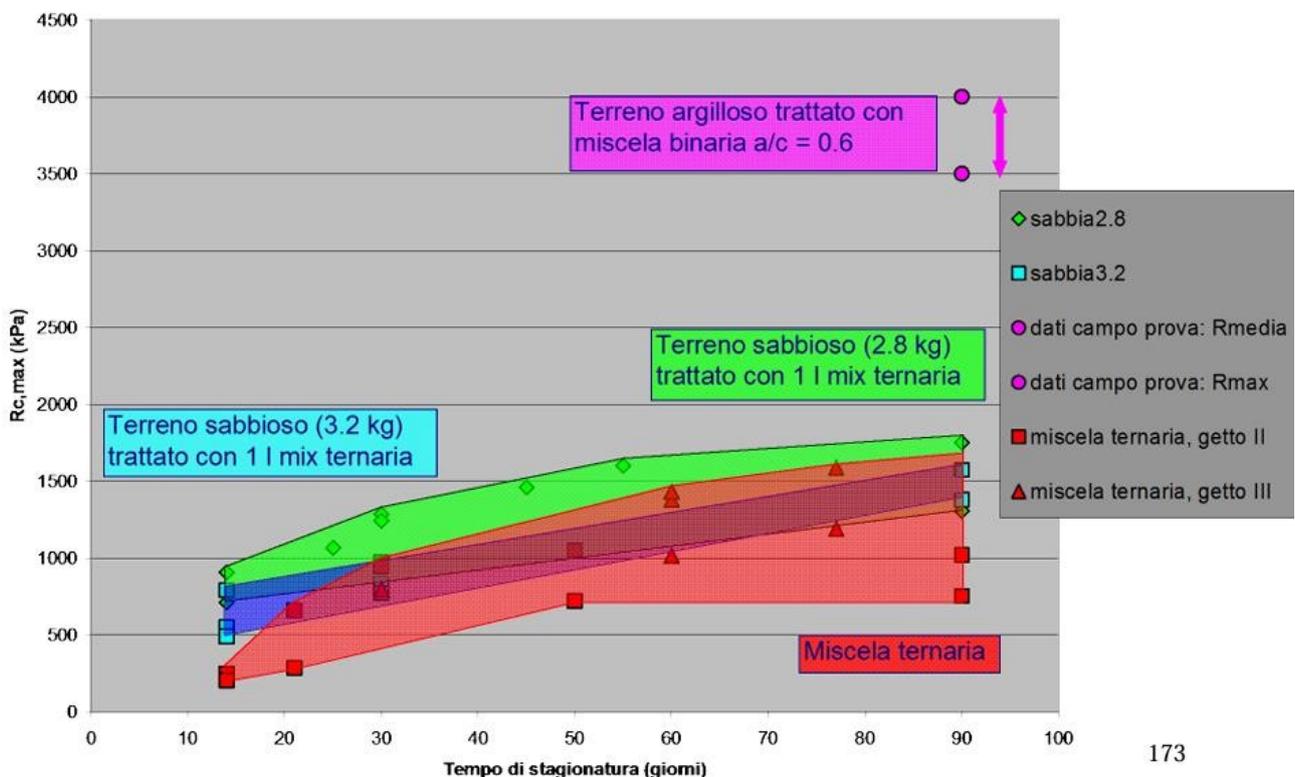


Fig. 4.7 – Resistenza a compressione in funzione del tempo di stagionatura.

La resistenza meccanica a compressione delle colonne è, normalmente, funzione del rapporto acqua-cemento della miscela eiettata e della curva granulometrica del terreno naturale. Cresce in genere andando dalle argille alle ghiaie. Si sono raggiunti valori di 50 Mpa ed oltre in sabbie e ghiaie, mentre in terreni fini con presenza di sostanze organiche è già difficile raggiungere valori 10 volte inferiori.

In generale, con il sistema monofluido e miscele a base di solo cemento e acqua, in ghiaie e sabbie i valori di resistenza a lungo termine variano da 12 a 19 Mpa.

In terreni fini, si ottengono valori di resistenza soddisfacenti solamente ricorrendo a dosaggi cemento/acqua elevati (almeno 1,2 - 1,3): in questo caso i valori vanno da 2 a 14 Mpa.

Con il sistema trifluido è possibile raggiungere resistenze anche superiori, grazie alla maggior purezza della colonna ottenibile, mentre il sistema bifluido è leggermente penalizzato, a questo riguardo, dalla possibile presenza di bolle d'aria imprigionate nel getto.

4.6 Compatibilità chimica

La compatibilità chimica del jet-grouting riguarda la reazione tra il terreno e la miscela cementizia, poiché le caratteristiche chimiche di entrambi possono influenzare il risultato finale. Ecco alcuni fattori da considerare per la compatibilità chimica nel jet-grouting:

- *pH del terreno*: La maggior parte delle miscele di cemento funziona bene con terreni neutri o leggermente alcalini. Terreni molto acidi ($\text{pH} < 5$) possono attaccare il cemento, riducendone la durabilità. In questi casi, potrebbero essere necessari additivi resistenti agli acidi.

- *Contenuto di solfati*: i solfati presenti nel terreno possono reagire con l'idrato di calcio del cemento, formando ettringite, una fase minerale espansiva che può deteriorare il materiale. In presenza di alti livelli di solfati, si utilizzano cementi resistenti ai solfati o additivi specifici.

- *Contaminanti*: Alcuni terreni possono contenere contaminanti come metalli pesanti, idrocarburi o composti organici, che potrebbero influenzare negativamente la presa e la resistenza del cemento. In questi casi, è essenziale condurre test chimici preliminari e, se necessario, adottare tecniche di trattamento specifiche.

- *Tipologia di terreno*: La natura geotecnica del terreno (argilloso, sabbioso, limo, ecc.) influisce sull'interazione con la miscela di jet-grouting. Terreni a grana fine, come le argille, possono richiedere una miscela più densa o con particolari additivi chimici per migliorare la penetrazione e l'adesione.

Per garantire la compatibilità chimica del jet-grouting con il terreno, vengono generalmente eseguiti test preliminari di laboratorio, come: analisi chimiche del terreno, test di

compatibilità con la miscela cementizia (inclusi test di resistenza alla compressione), test di durabilità per verificare la resistenza a lungo termine delle strutture trattate.

4.7 Impianto in cantiere

I macchinari da impiegare in cantiere sono, nel caso di una semplice perforazione e getto con aste mono-fluido (ossia, tramite l'iniezione di miscela cementizia senza l'apporto di altri fluidi come acqua, aria, o polimeri):

- *Silo*, contenente il materiale per la composizione della miscela.
- *Impianto di miscelazione* (detto anche "*mixer*"), per la creazione della miscela. Si tratta di solito di un sistema containerizzato.
- *Impianto di pompaggio* (anche "*pompa jet*"), in grado di iniettare la miscela alla pressione di progetto. Anche la pompa, come l'impianto di miscelazione, è in genere containerizzato.
- *Macchina perforatrice*, che esegue la perforazione e la successiva risalita con iniezione. Le perforatrici sono macchine cingolate, quasi sempre non cabinate, la cui taglia può variare tra le 10 e le 30 tonnellate. In funzione anche dell'allestimento e, soprattutto, della profondità di progetto richieste

A queste attrezzature possono aggiungersene altre, a seconda dei casi, come ad esempio il compressore per l'aggiunta di aria in iniezione, oppure una pompa per l'aggiunta di polimeri.

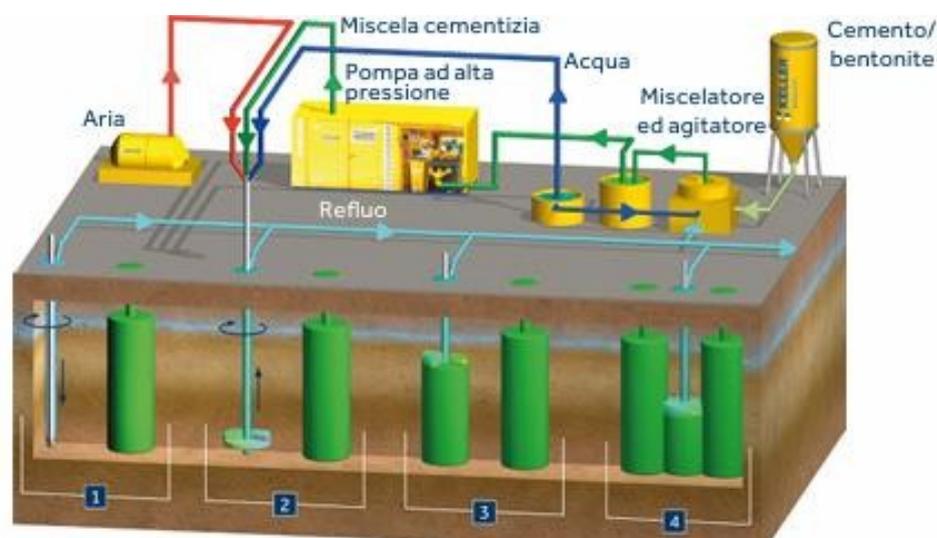


Fig. 4.8 – Impianto di jet-grouting.

4.8 Vantaggi e limiti applicativi

La capacità di impermeabilizzazione del jet-grouting si ottiene con l'eliminazione del volume dei vuoti nel terreno sostituendolo con il materiale cementizio. L'omogeneità nel processo di trattamento determina il grado di riduzione della permeabilità. A seconda della natura dei terreni, dei materiali iniettati e dell'omogeneità ottenuta, le paratie nel jet-grouting possono ridurre il coefficiente di permeabilità di diversi ordini di grandezza. E' possibile ottenere ottimi risultati per quanto riguarda il miglioramento della permeabilità scegliendo materiali e parametri operativi adeguati, insieme all'applicazione di accurati standard di controllo di qualità in corso d'opera.

I coefficienti di permeabilità che si possono ottenere dipendono principalmente dalla compenetrazione delle colonne (interasse delle perforazioni), dal tipo di iniezione (è preferibile la tecnica trifluido per maggiore garanzia di omogeneità) e dalla miscela di iniezione. Si raggiungono comunque valori di $k \geq 10^{-7}$ cm/s. Valori inferiori sono relativi a campioni indisturbati, non rappresentativi delle prestazioni globali del diaframma.

In molte applicazioni gli elementi del jet-grouting vengono utilizzati sia per il supporto/rinforzo strutturale che per garantire il controllo e la drastica riduzione dell'entrata di acqua.

La tecnica del jet-grouting è una tecnica di isolamento innovativa e versatile (è efficace su una vasta tipologia di terreni, compresi limi e argille) veloce e poco costosa e si raggiungono profondità anche di 30 m.

Il **vantaggio associato al jet grouting** riguarda il modesto ingombro delle attrezzature (operatività anche in zone spazialmente limitate) e la possibilità di eseguire il trattamento in direzione sub-orizzontale con sistema monofluido, utile, ad esempio, per realizzare l'isolamento artificiale di fondo per incapsulamenti di discariche incontrollate, senza attraversare il corpo rifiuti, operando all'interno di trincee perimetrali. Nel caso in cui sia richiesto l'isolamento di fondo e sia possibile l'attraversamento del terreno contaminato, il jet-grouting può essere utilmente applicato in quanto il trattamento che si effettua in risalita dopo la perforazione può essere eseguito per lo spessore necessario a creare la barriera di fondo. Molto importante è in tal caso la sovrapposizione delle colonne (interasse di

perforazione) e quindi la valutazione del diametro delle colonne, per garantire l'uniformità dello strato che si viene a creare.

Può essere realizzato senza interrompere le normali operazioni quotidiane e può portare a risparmi sui tempi di realizzazione.

Le attrezzature di supporto si possono stoccare in container, riducendo i costi ed i tempi di mobilitazione e smobilitazione.

Tra le **peculiarità** va ricordato che il diaframma che si forma è rigido e quindi suscettibile ai cedimenti ed alle deformazioni del terreno circostante e inoltre possono non essere raggiunti coefficienti di permeabilità sufficientemente bassi.

CAPITOLO 5: Considerazioni conclusive

Tra le diverse tecnologie per la realizzazione di diaframmi di cinturazione perimetrale per la messa in sicurezza di siti contaminati, la tipologia più frequentemente utilizzata ad oggi è sicuramente il diaframma autoindurente, per i suoi notevoli vantaggi rispetto ad altre tecnologie, sia economici, sia prestazionali. Si tratta di una tecnologia ad oggi ben collaudata, che consente di combinare lo scavo ed il getto in un'unica fase e di ottenere valori di permeabilità ben inferiori a quelli richiesti per le cinturazioni dei siti inquinati ($k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s). La possibilità di creare una barriera composita mediante l'inserimento di teli di geomembrana ne migliora decisamente le prestazioni in termini di tenuta idraulica. Il principale svantaggio è legato alla necessità di gestire il terreno scavato, che richiede lo smaltimento, anche se è possibile, nel caso di significativa frazione grossolana nel terreno, il recupero mediante opportuni trattamenti.

I diaframmi in jet-grouting rappresentano una valida alternativa ai diaframmi autoindurenti nei casi in cui si debba eseguire la cinturazione in terreni grossolani molto permeabili, dove la miscela autoindurente durante lo scavo si infiltrerebbe attraverso il terreno e non consentirebbe la stabilizzazione dello scavo. Può essere inoltre una soluzione nel caso di lavori da eseguire in siti in cui sono richieste attrezzature poco ingombranti. Il jet-grouting è comunque indispensabile per la realizzazione delle barriere artificiali di fondo. Il suo principale svantaggio, oltre alla produzione di materiale di risulta (stimabile nel 30% del volume del diaframma creato) riguarda la difficoltà di ottenere valori di permeabilità particolarmente bassi, per cui è necessario aumentare lo spessore del diaframma, con incremento dei costi.

Per entrambe le tecnologie suddette, poiché le prestazioni idrauliche e meccaniche dei diaframmi possono essere fortemente condizionate dall'interazione con i contaminanti (in relazione al livello, alla tipologia ed alla combinazione dei contaminanti), è di fondamentale importanza per il successo dell'opera che, in fase di progetto, sia programmata un'adeguata

sperimentazione di laboratorio finalizzata a simulare le reali condizioni in cui si troverà un diaframma una volta posto in opera ed in base alla quale sia possibile valutarne la compatibilità chimica e la durabilità. Solo in tal modo ed abbinando una corretta progettazione ed esecuzione, l'opera può garantire le prestazioni richieste.

BIBLIOGRAFIA

- Andini Salvatore, Università degli Studi di Napoli Federico II. Materiale didattico, Corso di Chimica Ambientale 2010/2011, *Cinturazione perimetrale*, Contenuti Multimediali.
<https://www.docenti.unina.it/webdocentibe/allegati/materialedidattico/7318>
- AGI, Associazione Geotecnica Italiana, *Jet-Grouting*, linee guida. Patron Editore, Bologna (2012).
- ARPA Veneto, *Tipologie di Intervento*, ultimo aggiornamento: 09-12-2022.
<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/siti-contaminati/vecchio-sito/tipologie-di-intervento>
- Card G. B. (1981). *The properties and performance of bentonite-cement slurries for use as hydraulic cut-offs*. PhD Thesis, University of London, King's College.
- CIRIA, (Construction Industry Research and Information Association), ICE, (Institution of Civil Engineers), & BRE, (Building Research Establishment). (1999). *Specification for the construction of slurry trench cut-off walls: As barriers to tipolluon. migration*. <https://doi.org/10.1680/sftcostcw.26254>
- Collepari M., Collepari S. & Troli R. (2009). *Il nuovo calcestruzzo*. Tintoretto.
- Croce P., Flora A. & Modoni G. (2004). *Jet-Grouting – Tecnica, progetto e controllo*. Hevelius Ed.
- Croce P., Modoni G. & Carletto M.F.W. (2011). *Correlazioni per la previsione del diametro delle colonne di jet-grouting*. Proc. XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica, Napoli.
- Croce P. (2019). *Jet Grouting – Tecnica, progetto e controllo*. Imola 15-16 ottobre 2019.

- Cusmano Giacomo (2008). *Rivista Specializzata*, aprile 2008, n°173.
- Daniel D.E. (1993). *Pollution Prevention in Landfills Using Engineed Final Covers*. General Report. Proc., International Conference Green '93, R.W. Sarsby editor, Bolton, UK, Balkema, Rotterdam.
- Daniel D.E., Bowders J.J. (1994). *In Situ Confinement of Contaminated Lands*. Atti, Meeting di Ingegneria Geotecnica. La geotecnica nella progettazione e costruzione delle discariche controllate. Associazione Politecnici Riuniti, Milazzo (ME), pp. 128-148.
- Domizi J. (2019). *Studio delle prestazioni di miscele cemento-bentonite tradizionali e speciali in soluzioni solfatiche*. Tesi di Dottorato, Dipartimento SIMAU, Università Politecnica delle Marche.
- Doran D. & Cather B. (2013). *Construction materials reference book*. Routledge.
- Egloffstein T. (1995). *Properties and test methods to assess bentonite used in geosynthetic clay liners*. Geosynthetic Clay Liners Koerner R.M., 51–72.
- ENEA - Cappucci S., Levizzari R., Maffucci M., *Metodologie di messa in sicurezza e bonifica dei siti contaminati*, Roma, Enea, 2002.
- EPA, Spooner P., Wetzel R., Spooner C., Furman C., Tokarski E., ... Robinson T. (1985). *Slurry trench construction for pollution migration control*. In Park Ridge, U.S.A., Noyes Publications, 1985.
- Evans J.C. (1993). *Vertical cut-off walls*. Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapman & Hall Inc., London, 430-454.
- Fiorotto R., Bringiotti G., Bringiotti M. & Nicastro D. (2004). *Dal cutter soil mix al triple auger*. Quarry and Construction, 09/2004, pp. 61-69.

- Fratalocchi E. (1996). *Comportamento idraulico delle miscele ternarie acqua-cemento bentonite*. Tesi di Dottorato, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Torino.
- Fratalocchi E., Pasqualini E., Balboni P. & Mozzi R. (2005). *Durability assessment of the confinement cut-off wall for a phosphogypsum landfill*. 16th ICSMGE, Osaka, 2257-2260.
- Fratalocchi E., Brianzoni V., Di Sante M., Mazzieri F. & Pasqualini, E. (2013). *Migration of aggressive solutions through cement-bentonite slurry walls*. 1st CPEG, Torino, pp. 243-252.
- Fratalocchi E., Brianzoni V., Mazzieri, F. & Pasqualini E. (2016). *Durability of Cement-Bentonite Cut-Off Walls in Sulphate Solutions*. Geo-Chicago 2016, ASCE GSP 271. <https://doi.org/10.1061/9780784480168.068>.
- Fratalocchi E. & Pasqualini E. (1998). *Permeability over time of cement-bentonite slurry walls*. III ICEG, Lisbona, Vol. 2, 509-514.
- Fratalocchi E. & Pasqualini E. (2007). *Vertical barriers for side containment*. XXI Ciclo di Conferenze di Geotecnica di Torino, Novembre 2007.
- Fratalocchi E., Pasqualini E. & Balboni P. (2006). *Performance of a cement-bentonite cut-off wall in an acidic sulphate environment*. 5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics: Proceedings of the ISSMGE's Fifth International Congress Organized by the Geoenvironmental Research Centre, Cardiff University and Held at Ca, 133-139. Thomas Telford Publishing.
- Granata R. & Vanni D. (2011). *Nuove tecnologie per l'iniezione di terreni fini*. XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica, Napoli.

- Grisolia M. & Napoleoni Q. (1997). *Esempio di controllo di qualità di un diaframma plastico a protezione di una discarica di rifiuti*. Proceedings ANDIS '97-IV SIBESA Italian-Brazilian Symposium on Sanitary and Environmental Engineering, Ravello (Italia).
- Ho C.E. (2005). *Turbulent fluid jet-excavation in cohesive soil with particular application to jet-grouting*. Thesis (Sc. D.) Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering.
- Hwang H., Yoon J., Rugg D. & El Mohtar C.S. (2011). *Hydraulic conductivity of bentonite grouted sand*. Geo-Frontiers 2011, ASCE GSP 211, pp. 1372-1381.
- ICE, Institution of Civil Engineers (1999). *Specifications for the constructions of slurry trench cut-off walls*.
- ICOLD (1985). *Filling materials for watertight cut-off walls*. International Committee of Large Dams, 51.
- Ippolito E. F. (2022). *Cantierizzazione e realizzazione di diaframmi strutturali in ambito urbano*. Tesi di Laurea di Secondo Livello, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Politecnico di Torino.
- Jefferis S.A. (1981). *Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs*. X ICSMFE, Stockholm, 435-440.
- Jefferis S.A. (2003). *Long term performance of grouts and the effects of grout by-products*. 3rd Int. Conf. on Grouting & Ground Treatments, ASCE GSP 120.
- Jefferis S.A. (2012). *Cement-Bentonite Slurry Systems*. Grouting and Deep Mixing 2012, pp. 1–24. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784412350.0001>
- Jepsen C. P. & Place M. (1985). *Evaluation of Two Methods for Constructing Vertical Cut-Off Walls at Waste Containment Sites*. In A. I. Johnson, R. K. Frobel, N. J.

Cavalli & C. B. Pettersson (Eds.), *Hydraulic Barriers in Soil and Rock* (pp. 45–60).
<https://doi.org/10.1520/STP34565S>

- Jo H. Y., Katsumi T., Benson C. H. & Edil T. B. (2001). *Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 557–567.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(557\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(557))
- Joshi K., Kechavarzi C., Sutherland K., Ng M.Y.A., Soga K. & Tedd P. (2010). *Laboratory and in situ tests for long-term hydraulic conductivity of a cement-bentonite cut-off wall*. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 136(4), 562-572
- Koch D. (2002). *Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls*. *Applied Clay Science*, 21(1–2), 1–11.
[https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(01\)00087-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00087-4)
- Koerner R.M. & Guglielmetti J.L. (1995). *Vertical barriers: geomembranes*. *Int. Confinement Technology Workshop*, Baltimore, Section 5.
- Kolstad D.C., Benson C.H. & Edil T.B. (2004). *Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geo-synthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions*. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130(12), 1236-1249.
- La Grega M.D., Buckingham P.L. & Evans J.C. (1994). *Hazardous Waste Management*. McGraw-Hill Inc., New York.
- Lee T. & Benson C.H. (2000). *Flow past bench-scale vertical groundwater cut-off walls*. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126 (6), 511-520.
- Lunardi P. (1992). *Il Consolidamento del Terreno mediante Jet-Grouting*. Università di Parma.

- Mahboubi A. & Ajorloo A. (2005). *Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression*. Cement and Concrete Research, 35(2), 412–419. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.09.011>
- Manassero M. (1991). *Metodologie di Intervento nei Terreni Inquinati*. Proc., 15th Conferences of Geotechnics of Torino, Società Ingegneri e Architetti in Torino.
- Manassero M. et al. (1995). *A Look at Performance with Particular Emphasis to Cement-Bentonite Slurry Walls*. Draft, International Containment Technology Workshop Session: Design, Construction and Performance of Soil- and Cement- Based Vertical Barriers, sponsored by USEPA, USDOE, DuPont, August 29th-31st, Baltimore, Maryland.
- Manassero M. (1999). *I sistemi di incapsulamento dei siti contaminati*. XVII Conferenze di Geotecnica di Torino (17-04-1999).
- Needham A.D., Smith J.W.N. & Gallagher E.M.G. (2006). *The service life of polyethylene geomembrane barriers*. Engineering Geology, 85(1-2), 82-90.
- Pasqualini E., Fratolocchi E. & Mazzieri F. (2011). *Discariche controllate e siti contaminati: aspetti critici e tecnologici*. Relazione Generale XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica, Napoli.
- Pearlman L. (1999). *Frozen barriers*. In: Subsurface containment and monitoring systems: barriers and beyond. Overview Report per US EPA.
- Peterson M.E. & Landis R.C. (1995). *Artificially employed floors and bottom barriers*. [http://www.epa.gov/epaosopr/odpd/contaminantfocus/dnapl/Treatment Technologies/Containment-1995.pdf](http://www.epa.gov/epaosopr/odpd/contaminantfocus/dnapl/Treatment%20Technologies/Containment-1995.pdf)
- Plee D., Lebedenko F., Obrecht F., Letellier M., & Van Damme H. (1990). *Microstructure, permeability and rheology of bentonite-cement slurries*. Cement and Concrete Research, 20(1), 45–61. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90115-E](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90115-E)

- Rafalski L. (1994). *Designing of Composition of Bentonite-Cement Slurry for Cut-Off Walls Constructed by the Monophase Method*. Archives of Hydro engineering and Environmental Mechanics, 41, 7–23.
- Rodrigues Carreto J.M. (2013). *Self-hardening slurry walls. A contribution for design, quality control and performance monitoring*. Ph.D. Thesis, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Tecnico.
- Rowe R.K. (2005). *Long-term performance of contaminant barrier systems*. 45th Rankine Lecture. Géotechnique, 55(9), 631-678.
- Rowe R.K. (2007). *Advances and remaining challenges for geosynthetics in geoenvironmental engineering applications*. Soils and Rocks, 30(1), 3-30.
- Rumor Clelia, Università di Padova. *Corso di depurazione chimica: La messa in sicurezza*, marzo 2007.
- Russo Rinaldi Ana Lucia. *Uno sguardo agli interventi di messa in sicurezza per la bonifica dei siti contaminati*, Authorea, October 23, 2020.
- Sayles F.N. & Iskandar I.K. (1995). *Ground freezing for containment of hazardous waste*. International Confinement Technology Workshop, Baltimora.
- Schulenberg J. & Breslin J. (2005). *Soil bentonite cut-off wall through free product at Indiana Harbor CDF*. US Army Corps of Engineers.
<https://www.dtic.mil/ndia/2005triservice/track6/schulenberg.pdf>
- T.U. Ambiente - D. lgs. n.152/2006.
- Visudmedanukul P., Kamon M. & Katsumi T. (2007). *Chloride transport through cement-bentonite barriers*. J. Geotech. Geoenv. Eng., 133 (2), 175-185.

GRAZIE

Desidero esprimere la mia più profonda gratitudine a tutte le persone che hanno contribuito, nel corso di tutti questi anni, al raggiungimento di questo traguardo.

Prima di tutto alla *mia relattrice*, Prof.ssa **Evelina Fratolocchi**, per la grande disponibilità, professionalità e umanità dimostratami in questi ultimi mesi di lavoro, per avermi sempre sostenuta e supportata, non sarei mai riuscita a raggiungere questo traguardo senza la sua preziosa collaborazione.

A *tutti i docenti* che hanno accompagnato il mio corso di studi, alcuni dei quali, purtroppo, non ci sono più e, soprattutto, a quelli che, in questo ultimo anno, mi hanno dato la possibilità e tutta la loro disponibilità, per ultimare il mio percorso di studi.

Ai *miei genitori*, Franco e Silvana, per i preziosi insegnamenti che hanno saputo darmi, questa laurea dà un valore concreto e reale anche ai loro sacrifici, oltre che ai miei.

Alla *mia famiglia*, mio marito, che mi ha sempre incoraggiata, sostenuta, compresa e, a volte, anche sopportata, soprattutto in questo ultimo anno di studi; i miei unici ed insostituibili figli, insieme alla cara Melissa, per loro spero di essere stata un esempio sia come madre, sia come figlia e spero di avergli insegnato l'amore e la passione per lo studio, oltre alla perseveranza nel raggiungimento dell'obiettivo.

Alla *mia madrina*, l'insostituibile e unica Zia Soccorso, sempre pronta a dare una mano a tutti, è stata per noi una spalla su cui appoggiarci nei momenti di difficoltà.

A coloro con i quali ho condiviso gli anni più belli della mia vita universitaria, le *mie coinquiline*, le Mitiche di Via Fiorini 24 ed i *miei compagni di corso*.

Alla *mia collaboratrice domestica*, la cara Maria, per essersi sempre adoperata, con la sua disponibilità, al buon funzionamento della casa.

Ed infine a **me stessa** ed all'**averci creduto fino in fondo**, perché posso dire che, con sacrificio e determinazione, si può raggiungere ogni traguardo e nonostante la vita cerca di crearti ostacoli, nonostante tutto, **io ce l'ho fatta**.