



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso Di Laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**APPROFONDIMENTO SUI FLUIDI DI PERFORAZIONE PER  
FONDAZIONI PROFONDE**

**IN-DEPTH STUDY OF DRILLING FLUIDS FOR DEEP FOUNDATIONS**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. Ing. **IVO BELLEZZA**

Tesi di Laurea di:

**ANTONIO DI COSMO**

**A.A. 2019/2020**

**A mio nonno,  
In Memoriam**

## Sommario

1- DISPOSIZIONI GENERALI .....	5
1.1 INTRODUZIONE.....	5
2 - CONSIDERAZIONI DI PROGETTO.....	7
2.1 INTRODUZIONE.....	7
2.2 ANALISI DEL SITO .....	7
2.3 FUNZIONI DEL FLUIDO DI SUPPORTO.....	7
2.4 STABILITA' TEMPORANEA .....	12
3 - LE PROPRIETA' DEI FLUIDI DI SUPPORTO .....	14
3.1 INTRODUZIONE.....	14
3.2 LA REOLOGIA.....	14
3.3 PROVE SUI FLUIDI DI SUPPORTO .....	20
4 - MATERIE PRIME.....	21
4.1 BENTONITE .....	21
4.2 POLIMERI.....	24
4.3 FLUIDI MISCELATI .....	26
4.4 CONSIDERAZIONI AMBIENTALI.....	26
4.5 SCELTA DEL TIPO DI FLUIDO E VALUTAZIONE DEI COSTI.....	28
4.6 ACQUA DI MISCELAZIONE.....	31
4.7 UTILIZZO DELL'ACQUA COME FLUIDO DI PERFORAZIONE .....	33
5 - ATTREZZATURE DI CANTIERE.....	34
5.1 MISCELAZIONE E STOCCAGGIO.....	34
5.2 POMPAGGIO.....	37
5.3 SCAVO E PULIZIA.....	39

5.4	INTERAZIONI TRA FLUIDO DI PERFORAZIONE E TERRENO .....	41
5.5	TRATTAMENTO E RECUPERO .....	44
5.6	GETTO DEL CALCESTRUZZO .....	45
5.7	SICUREZZA E SMALTIMENTO .....	46
5.8	CONSIDERAZIONI SULLA SICUREZZA .....	49
6	– PROVE SU SCALA REALE .....	51
7	– VALORI DI ACCETTAZIONE .....	53
7.1	INTRODUZIONE .....	53
7.2	FREQUENZA DELLE PROVE .....	56
7.3	STANDARD ESISTENTI .....	57
8	– BIBLIOGRAFIA .....	64
9	– SITOGRAFIA .....	67

# 1- DISPOSIZIONI GENERALI

## 1.1 INTRODUZIONE

I fluidi di supporto o fanghi, nell'ambito dell'ingegneria civile, sono dei materiali che vengono prodotti e miscelati con acqua o con oli (minerali, sintetici, diesel) per produrre un composto che serve a sostenere le pareti degli scavi eseguiti per la realizzazione delle fondazioni profonde, come illustrato in figura 1. Si hanno inoltre fluidi pneumatici (gassosi, in forma di schiuma), raramente utilizzati. In questa tesi si tratteranno soltanto i fluidi miscelati con acqua, costituiti da bentonite e da polimeri, rispettivamente.

I fluidi di supporto "bentonitici" sono utilizzati sin dagli anni sessanta e, con il passare del tempo, sono stati resi sempre più adatti alla realizzazione di scavi più profondi e periodi di getto più lunghi. Le innovazioni della tecnologia di scavo hanno favorito l'utilizzo di particolari attrezzature come l'idrofresa che permette lo scavo in terreni rocciosi.

I fluidi di supporto "polimerici" sono stati sviluppati di recente e per poterli utilizzare è necessario che le proprietà siano pienamente note.

In Europa e Nord America i fluidi di supporto sono normalmente a base di bentonite, di polimeri (naturali o sintetici) o di una miscela di bentonite e polimeri. Le norme richiedono determinati criteri che devono essere soddisfatti sia per i fluidi di supporto che per il calcestruzzo. Tuttavia, la normativa standard potrebbe non essere sufficiente a progettisti e imprese per risolvere il problema del controllo delle proprietà dei fluidi, al fine non solo di supportare in modo affidabile uno scavo ma anche per evitare di influenzare le proprietà del calcestruzzo.

Tra le caratteristiche principali dei fluidi di supporto, vi è sicuramente il mantenimento delle proprietà nel tempo. Essi non devono reagire con il terreno e con il calcestruzzo né fisicamente né chimicamente. Sostanzialmente, a causa degli alti costi sia dei fluidi che del calcestruzzo, anche in termini di smaltimento, è impossibile pensare che la reazione chimica e fisica dovuta all'interazione dei materiali apportino effetti indesiderati.

L'ottima conoscenza delle proprietà dei fluidi di supporto è essenziale per garantire la qualità delle opere realizzate. L'utilizzo corretto dei fluidi richiede anche una conoscenza base dei principi e delle proprietà geotecniche dei terreni.



*Figura 1. Costruzione delle fondazioni profonde*

## 2 - CONSIDERAZIONI DI PROGETTO

### 2.1 INTRODUZIONE

L'effetto dei fluidi di supporto sulle prestazioni degli elementi di fondazioni profonde deve essere considerato sia in fase di progettazione che in fase di esercizio. È inoltre essenziale rispettare la metodologia di costruzione adeguata e utilizzare fluidi di supporto ad alta qualità per limitare gli effetti negativi, i quali, comunque non si possono eliminare definitivamente.

### 2.2 ANALISI DEL SITO

Le scelte del fluido di supporto e l'attrezzatura di scavo dipendono dalle condizioni del terreno e per questo sono opportune anche delle indagini in sito con l'esecuzione di prove SPT e CPT (*standard penetration test e cone penetration test*).

### 2.3 FUNZIONI DEL FLUIDO DI SUPPORTO

Lo scopo fondamentale di un fluido di supporto è quello di garantire la stabilità del foro durante tutto il processo di scavo e fino a quando viene sostituito dal calcestruzzo. Per alcuni tipi di apparecchiature da scavo come l'idrofresa, il fluido ha un ruolo supplementare nel trasportare i detriti dalla testa dell'idrofresa all'impianto di separazione dei detriti solidi da quelli liquidi.

La stabilità del foro è garantita dalla differenza tra la pressione esercitata dal fluido all'interno dello scavo e la pressione esterna dovuta all'acqua sotterranea, come illustrato in figura 2.

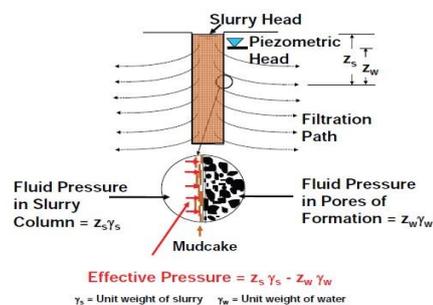


Figura 2. Effetti del fluido di perforazione sulle pareti di scavo (Brown et al.,2010)

Come illustrato in figura 3, i fluidi includono acqua o acqua con additivi come bentonite e polimeri. Gli additivi vengono utilizzati per aiutare a contenere i fluidi all'interno del foro e minimizzare le perdite dovute alle infiltrazioni attraverso le pareti e la base dello scavo, consentendo in tal modo di mantenere una pressione positiva in testa.

L'acqua può funzionare come fluido di perforazione per trasportare detriti di perforazione, specialmente quando si usano strumenti di perforazione a circolazione inversa.

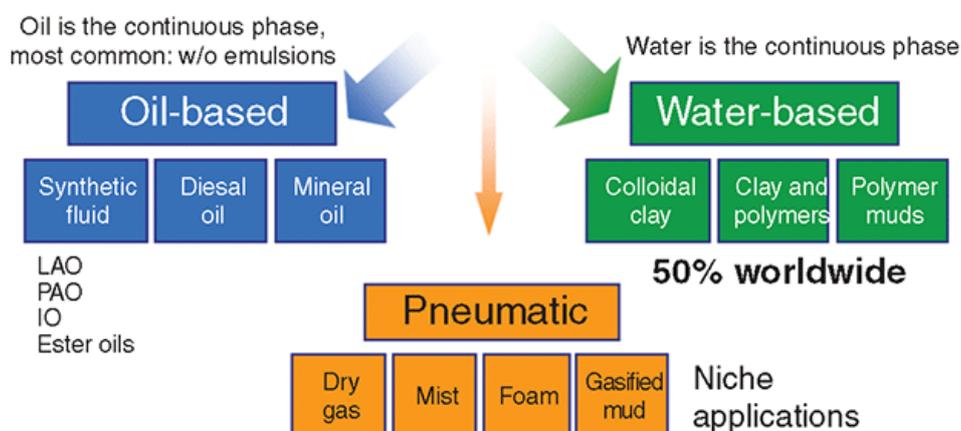


Figura 3. Classificazione dei fluidi di perforazione ([www.drillingfluid.org](http://www.drillingfluid.org), 2015)

### 2.3.1 FLUIDI BENTONITICI

Bentonite è il nome commerciale di una serie di argille naturali caratterizzate dalla capacità di assorbire acqua rigonfiando. Il componente principale della bentonite è la montmorillonite, un minerale argilloso appartenente alla classe dei fillosilicati chiamati smectiti. Nella bentonite la montmorillonite si accompagna sempre ad altri minerali argillosi (caolino, mica, illite, ecc.) e non argillosi (quarzo, feldspato, calcite e gesso). La presenza o meno di questi minerali può influenzare la qualità della bentonite e renderla più o meno idonea per determinate applicazioni.

Allo stato naturale la bentonite grezza è una roccia tenera friabile ed untuosa, di colore variabile.

**Assorbimento d'acqua e rigonfiamento:** una proprietà fondamentale della bentonite è quella di assorbire acqua rigonfiando, non tutte le bentoniti però hanno uguale capacità di assorbimento. Il grado di idratazione ed il potere rigonfiante dipendono dai tipi di cationi scambiabili presenti, possedendo ciascuno di essi un diverso potere idrofilo e solvatante. Il rigonfiamento è dovuto a due cause principali: all'assorbimento di acqua alla superficie delle lamelle cristalline ed a forze repulsive di tipo osmotico, per le quali le lamelle unitarie sono forzate a staccarsi l'un l'altra aprendosi a "fisarmonica". La bentonite sodica, con prevalenza di catione sodio ( $\text{Na}^+$ ), permette all'acqua di entrare profondamente tra le lamelle, separandole fino all'unità elementare e dando così luogo al caratteristico rigonfiamento. Al contrario, la bentonite calcica, con prevalenza di catione calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), si idrata in modo del tutto simile ma ha minori proprietà assorbenti essendo caratterizzata da una forte carica positiva che non consente alle molecole di acqua di penetrare tra le lamelle e quindi anziché il rigonfiamento si ha il ritiro.

**Viscosità e Tixotropia delle sospensioni acquose:** la bentonite dispersa in acqua dà luogo a sospensioni colloidali molto stabili caratterizzate da viscosità e tixotropia, queste sospensioni alle giuste concentrazioni costituiscono veri e propri gel. La formazione della sospensione è dovuta alla penetrazione di molecole di acqua negli interspazi presenti tra le lamelle cristalline: tra questi strati si stabiliscono dei ponti in cui l'acqua è vincolata da legami idrogeno. Le singole lamelle restano pertanto isolate le une dalle altre e contemporaneamente legate tra loro attraverso gli strati di acqua di associazione. Quando il sistema viene lasciato in quiete si ha la formazione di un reticolo che ingloba l'acqua assumendo quindi la consistenza di una gelatina; quando il sistema è sottoposto ad una sollecitazione meccanica si osserva una parziale rottura dei legami che consente una maggiore mobilità delle singole lamelle facendo sì che il sistema acquisti una viscosità inferiore a quella propria dello stato di riposo. Questa trasformazione è reversibile ed è nota come tixotropia. Le proprietà delle sospensioni acquose di bentonite trovano impiego principalmente nei fluidi di scavo.

**Proprietà gelificante ed impermeabilizzante:** l'assorbimento di acqua da parte della bentonite porta alla formazione di gel semisolidi capaci di resistere anche a forti pressioni idrostatiche. Una particella di montmorillonite si può considerare costituita da un sottile pacchetto di strati elementari con carica negativa. A causa di questa carica ogni particella è

capace di respingerne un'altra dando adito alla penetrazione ed all'assorbimento di molecole di acqua attirate attorno al reticolo elementare; per questo motivo, mentre il pacchetto si espande dando luogo al rigonfiamento, attorno ad ogni particella si forma un involucro stabile che, raggiunto il suo limite di saturazione, respinge altra acqua anche quando è sottoposto a pressione. Grazie a tali caratteristiche la bentonite trova impiego per arrestare infiltrazioni d'acqua ed impermeabilizzare terreni, discariche, laghetti e bacini.

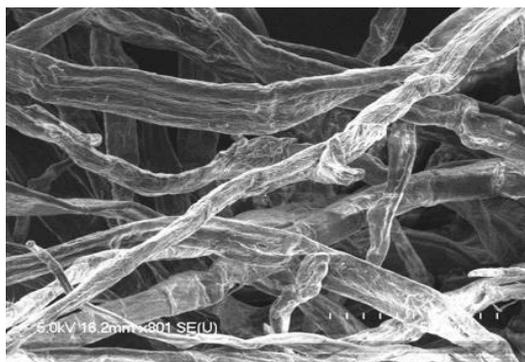
**Proprietà di superficie (coagulazione – assorbimento – adsorbimento):** le proprietà di assorbimento e adsorbimento della bentonite sono dovute alla notevole superficie specifica, dell'ordine di  $500/600 \text{ m}^2 / \text{g}$ , e dalle cariche libere presenti su ogni particella. La coagulazione, ovvero la capacità delle particelle di aggregarsi per formare un unico fiocco, è causata dall'adsorbimento degli ioni di segno opposto da quello della particella colloidale. Il gruppo di particelle, divenuto più pesante a seguito della coagulazione, sedimenta più velocemente, in accordo con la legge di Stokes. ( Per approfondimenti su tale legge si rimanda il lettore ad un qualsiasi libro di fluidodinamica).

### 2.3.2 FLUIDI POLIMERICI

I polimeri vengono sempre più utilizzati per la realizzazione di fluidi di supporto che presentano un comportamento diverso rispetto ai fluidi di supporto bentonitici. Solitamente si utilizzano polimeri sintetici a catena lunga e ad alto peso molecolare (tipicamente parzialmente poliaccrilamidi o PHPA) anche se si possono usare anche altri tipi di polimeri.

#### **Polimeri sintetici ad alto peso molecolare**

I polimeri sintetici, come illustrato in figura 4, sono lunghe molecole di idrocarburi concatenati che interagiscono tra loro, con il terreno e con l'acqua per aumentare efficacemente la viscosità del fluido. L'aspetto di un fluido polimerico è quello di un materiale viscoso e viscido.



*Figura 4. Microfotografia elettronica a scansione di un fluido polimerico (University of Missouri-Columbia, 1995)*

La funzione di un fluido di supporto si basa quindi su una combinazione di fattori: viscosità del polimero, capacità di formare una membrana all'interfaccia dello scavo (filter cake) per cui le particelle fini contenute nel fango si depositano sulle pareti di scavo e creano una membrana impermeabile che blocca un ulteriore flusso. La formazione della gelatina è relativamente associata all'utilizzo di fanghi bentonitici o polimerici con PHPA.

La viscosità del fluido polimerico e la resistenza di attrito viscoso ( $Pa \cdot s$ ) sono indispensabili per limitare la perdita di fluido e per mantenere una pressione idrostatica costante. I filamenti polimerici tendono a formare una struttura reticolare tridimensionale simile ad una membrana. Tuttavia, una certa perdita di fluido nel terreno circostante è inevitabile e può essere necessario aggiungere fluidi per tutta la durata del lavoro, fino al getto del calcestruzzo per mantenere una pressione idrostatica in testa positiva, la quale, fornisce supporto e stabilità.

Sebbene alcuni fluidi polimerici possano formare una membrana all'interfaccia, con l'utilizzo di PHPA, la formazione del gel tende ad essere limitata rispetto all'utilizzo dei fluidi bentonitici. Inoltre, i fluidi polimerici non trattengono a lungo i detriti fini in sospensione. Quindi questi detriti si depositano sul fondo dello scavo e ciò può portare a riduzione della portata di base mobilitata (maggiore importanza della pulizia del fondo foro).

## Polimeri naturali modificati

I polimeri naturali modificati, come le cellulose (PAC) sono utilizzati con successo nel processo a circolazione inversa dell'idrofresa, specialmente quando si incontrano terreni chimicamente aggressivi, poiché tendono a non reagire facilmente con il suolo e con l'acqua.

### 2.4 STABILITA' TEMPORANEA

Per garantire la stabilità dello scavo, il fluido deve rispettare un principio di base: fornire una pressione netta che è sempre maggiore della somma della pressione atmosferica e della pressione orizzontale dovuta al sovraccarico del terreno circostante, figura 5. La pressione netta del fluido è la differenza tra la pressione del fluido nello scavo e la pressione interstiziale esterna. Tale pressione netta fornisce un effetto stabilizzante sulle pareti dello scavo. Se, però, il terreno ha un'alta permeabilità, il fluido defluisce nel terreno circostante e l'effetto stabilizzante viene perduto. L'aggiunta all'acqua di additivi come bentonite o polimeri facilita il mantenimento dell'effetto stabilizzante, limitando la perdita di fluido dallo scavo.

Qualsiasi flusso di acque sotterranee nello scavo ha un effetto destabilizzante che può causare il collasso, ed è proprio per questo che sono indispensabili sia un'attenta pulizia del fondo che una accurata analisi della qualità del fluido per ridurre al minimo il rischio di tale collasso.

Nel pianificare il processo costruttivo, per mantenere l'effetto stabilizzante è necessario conoscere con precisione il livello della falda freatica.

Se il fluido di supporto è contenuto nello scavo, sotto forma di membrana sul fianco dello scavo stesso e soggetto ad una minima penetrazione nel terreno circostante, la pressione idrostatica massima agisce sul fondo.

Se il livello di fango è mantenuto a quota superiore di quello piezometrico, si crea una **pressione positiva** sulle pareti dello scavo (ossia maggiore nel lato interno della membrana e minore nel lato della membrana verso il terreno).

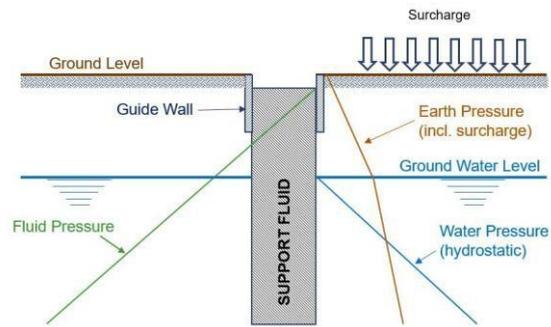


Figura 5. *Schema di funzionamento del fango bentonitico (Deep Foundation Institute, 2019)*

## 3 - LE PROPRIETA' DEI FLUIDI DI SUPPORTO

### 3.1 INTRODUZIONE

Le proprietà dei fluidi di supporto sono analizzate mediante una serie di prove standard. L'ordine di importanza di tali prove varia a seconda del tipo di fluido di supporto considerato. Vi sono tre tipologie diverse di fluidi di supporto (con minerali, con polimeri naturali o naturali modificati, con polimeri sintetici) e, per ogni tipo di fluido esistono prove specifiche.

### 3.2 LA REOLOGIA

La reologia è un ramo della fisica che studia l'origine, la natura e le caratteristiche di deformazione dei corpi sotto l'azione di forze esterne. La reologia dei fluidi di supporto influenza molti aspetti del loro comportamento, tra cui: il pompaggio del fluido da e verso lo scavo, le sovrappressioni nello scavo quando l'attrezzo viene abbassato e sollevato, la sedimentazione dei solidi derivanti dallo scavo, la separazione di questi solidi con il dissabbiatore. La reologia di tali fluidi può avere effetti secondari quali: stabilità dello scavo, spessore del "cake" e possibili effetti dannosi sulla resistenza, disposizione non desiderata del fluido al termine dei lavori.

Il comportamento dei fluidi di supporto può essere analizzato tracciando il diagramma che mette in relazione lo sforzo di taglio con la velocità di taglio, come mostrato in figura 7.

Come da prassi, la viscosità apparente e la tensione di snervamento sono misurate e fornite in accordo con *l'ISO 10414, parte prima*, usando due frequenze (300 e 600 giri/minuto).

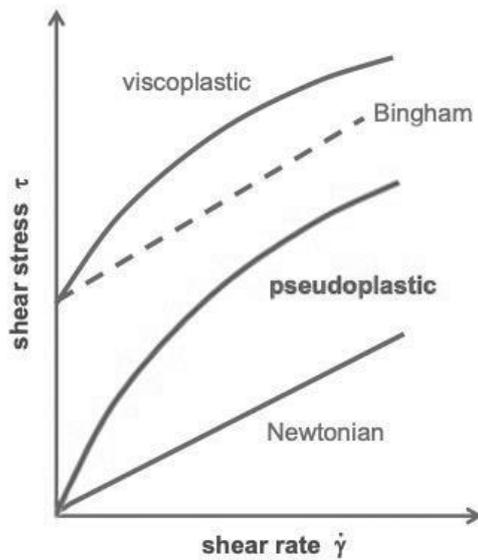


Figura 7. *Velocità di deformazione (derivata della deformazione angolare rispetto al tempo)* (Duk, 2004)

Tra i modelli reologici si hanno quelli di fluido “Newtoniano”, fluido di “Bingham”, fluido che segue una legge di potenza “power law model”.

Un fluido si definisce *newtoniano* quando la velocità di flusso aumenta linearmente con l'aumentare dello sforzo applicato. In questo caso la viscosità è costante e dipende solo da pressione e temperatura:

$$\sigma = \partial\gamma/\partial t \eta$$

dove:

- $\sigma$  è lo sforzo applicato (espresso in Pa);
- $\eta$  è la viscosità (espressa in Pa·s);
- $\gamma$  è la deformazione di taglio (%);
- $\partial\gamma/\partial t$  è la velocità di deformazione di taglio ( $s^{-1}$ ).

I fluidi che presentano comportamento di tipo plastico iniziano a scorrere solo dopo che la forza di taglio ha superato un certo valore soglia,  $\sigma_0$ , che prende il nome di "limite di scorrimento". Superato questo valore, il fluido si comporta come Newtoniano. L'equazione che rappresenta questo comportamento è l'equazione di *Bingham*:

$$\sigma = \partial\gamma/\partial t \eta + \sigma_0$$

Utilizzando il modello “*power law*”, pur di natura totalmente empirica, si riesce a descrivere il flusso di tutti i sistemi newtoniani e non newtoniani:

$$(\sigma - \sigma_0) = K \cdot D^n$$

Dove

$\sigma$  è lo sforzo di taglio;

$\sigma_0$  è la tensione di snervamento;

$D$  è la costante chiamata velocità di taglio;

$K$  è una costante chiamata anche *power law viscosity*;

$n$  è un coefficiente indicativo del tipo di comportamento del sistema.

Il coefficiente  $K$  è utilizzato come indice di viscosità e per il confronto di materiali differenti (anche con caratteristiche di flusso differenti).  $K$  ha le dimensioni di  $(Pa \cdot s^n)$ .

$n$  è una grandezza adimensionale indicativa del tipo di comportamento del materiale:

- $n=1$  fluidi newtoniani o fluido di Bingham (se  $\sigma_0$  è  $>0$ );
- $n>1$  fluidi dilatanti;
- $n<1$  fluidi pseudoplastici o fluidi viscoplastici (se  $\sigma_0$  è  $>0$ );

A causa della curvatura del diagramma sforzo di taglio-velocità di taglio, la tangente alla curva non passerà per l'origine, perciò i fluidi che seguono tale legge sono detti pseudo

plastici. A questo gruppo appartengono di solito le dispersioni di polimeri a catena lunga (colloidi idrofilici) oppure il PHPA.

Come mostrato in figura 8, a riposo o per deboli forze di taglio, le molecole si trovano disperse nel solvente in uno stato disordinato e più o meno intrecciate tra loro. Man mano che si applica uno sforzo crescente, cioè, all'aumentare del gradiente di velocità, si ha il “disintrecciamento” delle catene polimeriche che si orientano tutte verso la direzione della forza impressa. L'allineamento delle particelle o delle molecole consente loro di scivolare le une sulle altre e questo comporta una diminuzione della viscosità. Per la maggior parte dei liquidi la diminuzione di  $\eta$  al crescere della velocità di taglio è reversibile, magari in un certo lasso di tempo, cioè il liquido riacquista la sua elevata viscosità originale per cessazione dello sforzo applicato: le catene molecolari tornano al loro primitivo stato di non orientamento, le goccioline deformate tornano alla loro forma sferica, si formano nuovamente gli aggregati dovuti al moto Browniano. Tecnicamente, questo significa che sotto l'azione di una determinata forza (o pressione) una maggiore quantità di materiale può essere soggetta allo scorrimento.



Figura 8. *Comportamento delle catene polimeriche soggette ad uno sforzo (Guidotti, 2003)*

All'aumentare del gradiente di deformazione, le particelle con forma a bastoncino sospese in un fluido si orienteranno con il lato lungo in direzione del flusso, facilitando lo scivolamento delle une sulle altre.

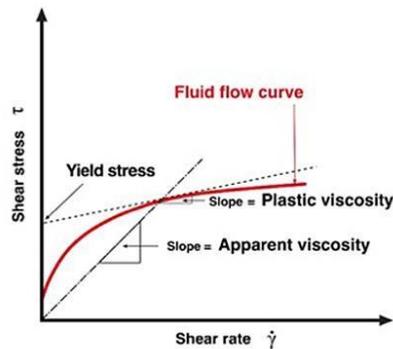


Figura 9. Proprietà reologiche e loro andamento al variare della velocità di taglio e dello sforzo di taglio (Maglione et al.2012)

Come si deduce dalla figura 9, la viscosità plastica è la pendenza della tangente alla curva sforzo di taglio-velocità di taglio in un qualsiasi gradiente di velocità. Per fluidi minerali, fluidi polimerici e fluidi non-Newtoniani in generale, questa pendenza non è una costante ma dipende dalla velocità di deformazione. La tensione di snervamento è l'intercetta sull'asse  $\tau$  tra l'asse stesso e la tangente alla curva. Come per la viscosità plastica, anche la tensione di snervamento dipenderà dalla velocità di deformazione. La viscosità apparente è la velocità che si ottiene se il fluido è considerato newtoniano. È quindi, la pendenza della retta che passa per l'origine e per un punto della curva. Ad eccezione dei fluidi newtoniani la viscosità apparente varierà molto con la velocità di deformazione di taglio ( $\dot{\gamma}$ ).

Vi sono anche dei fluidi il cui comportamento dipende dal tempo, per cui al cessare della forza di taglio non riassumono necessariamente la struttura iniziale. Per questi sistemi, la curva di ritorno (a velocità di taglio zero) spesso non coincide con quella di andata, bensì è spostata a sinistra o a destra. Questo significa che il materiale presenta consistenza diversa nel riprendere le condizioni iniziali: il processo è **temporaneamente** irreversibile. Ad esempio, il calcestruzzo passa da una condizione di semi-fluido a solido, man mano che scorre un lasso di tempo. I fluidi bentonitici possono mostrare irrigidimento nel tempo e hanno un comportamento detto tixotropico.

I fluidi tixotropici presentano una struttura che si disgrega gradualmente per effetto di uno sforzo tangenziale, quindi presentano una diminuzione della viscosità “ $\eta$ ” nel tempo. Quindi

tali fluidi sottoposte a sforzi di taglio aumentano la loro fluidità passando da uno stato pastoso allo stato liquido. Tale comportamento è reversibile.

I fluidi minerali, in genere, hanno modesta viscosità la quale, può essere incrementata con l'aggiunta di polimero cellulosico a tali fluidi minerali. Se l'acqua di falda ha un alto contenuto di sali, si può avere flocculazione delle particelle della miscela, allora, si può usare l'attapulgitite al posto della bentonite poiché quest'ultima non deve essere idratata e **non tende alla flocculazione** in ambiente salino.

Sebbene la reologia del fluido abbia un forte effetto sul rendimento dei fluidi di supporto, è raro che i parametri reologici vengano utilizzati nei calcoli di progetto.

Tipicamente, in casi estremi, il fornitore di un impianto può indicare:” Questa pompa può gestire fluidi di viscosità fino a...”. I parametri reologici come la viscosità e la tensione di snervamento, sono valutati mediante procedure standardizzate.

Il tasso di sedimentazione in un fluido di supporto dipende dalla dimensione delle particelle e dalle proprietà del fluido stesso. In genere, a maggiore viscosità del fluido corrisponde minore velocità di sedimentazione, come mostrato in Tabella 1.

Tabella 1. *Velocità di sedimentazione delle particelle di terreno in un fluido caratterizzato da una viscosità nota (Deep Foundation Institute,2019)*

Tipo di terreno	Dimensione delle particelle	Dimensione particelle	Velocità di sedimentazione in acqua, viscosità 1 cP	Velocità di sedimentazione in un fluido di supporto newtoniano, viscosità 15 cP	Velocità di sedimentazione in un fluido di supporto polimerico con PHPA
	$\mu$	mm	m/h	m/h	m/h
<b>Argilla</b>	2	0.002	<0.1	<0.1	<0.1
<b>limi</b>	6	0.006	0.12	<0.1	<0.1
“	10	0.01	0.32	<0.1	<0.1
“	20	0.02	1.29	<0.1	<0.1
“	60	0.06	12	0.8	<0.1
<b>Sabbie</b>	100	0.1	32	2.2	<0.1
“	200	0.2	95	8.6	<0.1
“	600	0.6	>200	78	4
“	1000	1	>200	170	40
“	2000	2	>200	>200	>200
<b>Ghiaie</b>	6000	6	>200	>200	>200
“	10000	10	>200	>200	>200
“	20000	20	>200	>200	>200

*NOTE: A) le particelle con velocità di sedimentazione maggiore di 200 m/h sedimentano in maniera sufficientemente rapida e sono rimosse con i normali metodi di pulizia del fondo dello scavo. B) le particelle con velocità minore di 0.1 m/h sedimentano lentamente ed è pertanto improbabile che sul fondo si depositi una grande quantità di queste ultime. I diametri sono quelli di Stokes, cioè, per particelle non sferiche, i diametri sono quelli della sfera equivalente, avente uguale velocità di sedimentazione. C) l'unità di misura della viscosità è il poise "cP".*

### 3.3 PROVE SUI FLUIDI DI SUPPORTO

Il controllo dei fluidi di supporto richiede una serie di prove da eseguire. Alcune prove semplici relative ad alcuni parametri reologici, fisici e chimici sono riportate in tabella 2. Tali parametri devono rientrare in appositi intervalli che sono forniti direttamente dalle norme *UNI- EN 1536 (2015)* e *UNI-EN 1538 (2015)*. Si vedrà la frequenza di tali prove in tab. 7.

I limiti di accettabilità di tali parametri saranno trattati nel capitolo 7.

Tabella 2. *Prove di controllo sui fluidi di perforazione (Deep Foundation Institute, 2019)*

<b>Proprietà</b>	<b>Metodo di prova</b>
Densità (g/ml)	Densimetro
Viscosità (s/qt)	Cono di Marsh
Contenuto in sabbia (% volume)	Test del contenuto in sabbia
Perdita per filtrazione (ml dopo 30 min)	Test di perdita dei fluidi dell'API
Spessore del "cake" (mm a 30 min)	Test di perdita dei fluidi dell'API
pH	pHmetro elettrico o cartine indicatrici

## 4 - MATERIE PRIME

### 4.1 BENTONITE

#### 4.1.1 STRUTTURA E COMPOSIZIONE

La bentonite commerciale è composta prevalentemente da montmorillonite, appartenente al gruppo delle smectiti, unita ad altri materiali come quarzo e feldspati.

Le proprietà fisiche e le caratteristiche della bentonite sono relazionate a quelle della montmorillonite. Nella maggior parte dei casi le bentoniti sono formate dall'alterazioni di cenere vulcanica e rocce, dopo il contatto diretto con l'acqua, come mostrato in figura 10.



Figura 10. *Cava di bentonite (Guzman,2013)*

Le varie bentoniti possono essere ricondotte ad una struttura elementare comune, tuttavia esistono notevoli differenze tra le varie tipologie, sia relativamente alla costituzione chimica che allo stato fisico dei costituenti. Il costituente montmorillonitico è caratterizzato da un aggregato di particelle di forma lamellare, riunite in pacchetti legati da forze elettrochimiche e contenenti acqua di interposizione. Ogni unità lamellare risulta costituita schematicamente da tre strati disposti parallelamente a “sandwich”, come mostrato in figura 11. Lo strato centrale, a forma ottaedrica, è composto da allumina ( $Al_2O_3$ ); i due strati periferici, a forma tetraedrica, sono costituiti da silice ( $SiO_2$ ). Spesso lo ione silicio e lo ione alluminio

subiscono delle sostituzioni isomorfe, ciascuno con altri metalli a valenza inferiore come magnesio e ferro. Queste sostituzioni generano scompensi di cariche che vengono bilanciati assumendo cationi scambiabili, in particolare ioni: calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e sodio ( $\text{Na}^+$ ) accompagnati da molecole di acqua tenute insieme da legami di tipo ione-dipolo. Gli ioni, non trovando posto all'interno della struttura reticolare, occupano posizioni prossime agli strati esterni di silice, e sono i principali responsabili dell'importante fenomeno di idratazione del reticolo cristallino. Per una data argilla la massima quantità di cationi che può essere sostituita è costante ed è individuata dalla capacità di scambio cationico (CEC, cation exchange capacity) misurata in milliequivalenti per grammo (meq/g) o più frequentemente su 100 grammi (meq/100g). La CEC di una bentonite varia in funzione del grado di sostituzioni isomorfe avvenute nel reticolo. La quantità e la qualità delle basi scambiabili sono un importante elemento di distinzione dal punto di vista chimico di una bentonite: in particolare si distinguono le bentoniti calciche e le bentoniti sodiche, a seconda che il catione scambiabile predominante sia rispettivamente il calcio od il sodio. Le bentoniti calciche, i cui giacimenti sono più diffusi nel mondo, risultano caratterizzate da una minore capacità di idratazione e rigonfiamento rispetto alle bentoniti sodiche.

Uno dei minerali del gruppo delle smectiti che più abbonda è la montmorillonite diottaedrica, in cui una parte di alluminio contenuta negli strati ottaedrici è sostituita da magnesio e ferro e un'ulteriore carica elettrica è generata nello strato tetraedrico dalla sostituzione di silicio con alluminio.

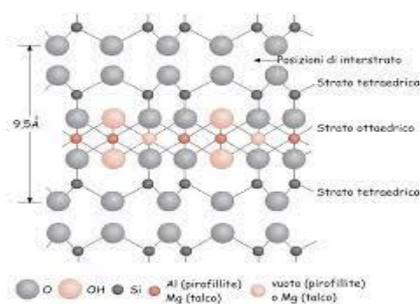


Figura 11. *Struttura della montmorillonite* ([www.difesa.it](http://www.difesa.it), 2017)

Le bentoniti commerciali disponibili per i fluidi di supporto sono:

- 1) Bentoniti sodiche (naturali o attivate) che vengono usate in fluidi di supporto sulla base della disponibilità locale. Le bentoniti sodiche attivate provengono da bentoniti a cui sono stati sostituiti i cationi  $[[Ca]]^{+}$  o  $[[Mg]]^{(2+)}$  con gli anioni  $[[Na]]^{-}$  mediante trattamento con carbonato di sodio. Dopo la modifica, tali bentoniti presentano tra le caratteristiche alto rigonfiamento e alto potere gelificante;
- 2) Bentoniti mescolate con polimeri: molte bentoniti sono trattate con polimeri differenti come i derivati della cellulosa, poliacrilammidi o gomme, per garantire migliori caratteristiche reologiche e di filtrazione, o per una migliore stabilità specialmente nel caso di terreni contaminati.

#### 4.1.2 DOCUMENTAZIONE DEI FORNITORI

I fornitori di bentonite devono fornire la scheda tecnica e la scheda di sicurezza del prodotto. La scheda tecnica fornisce informazioni sul prodotto e sulle sue prestazioni.

È essenziale che il fornitore definisca la composizione dell'acqua utilizzata, il tempo di miscelazione e idratazione considerato, così come il dispositivo di miscelazione utilizzato per preparare la sospensione.

L'utente deve leggere attentamente questa documentazione poiché le prestazioni ottenute sul posto possono differire notevolmente da quelli indicati nella scheda tecnica.

La scelta di una bentonite non può essere fatta solo sulla base di una scheda tecnica. Questo documento raramente fornisce informazioni precise circa l'andamento delle proprietà come la viscosità, la perdita per filtrazione, il valore dello snervamento alle differenti concentrazioni e con diverse acque di miscelazione. Se necessario, devono essere svolte prove di laboratorio complementari con il fornitore per sviluppare una panoramica completa delle prestazioni del prodotto, considerando le reali condizioni del sito, consentendo quindi un approccio più sicuro per la progettazione.

Le sospensioni bentonitiche sono dunque preparate utilizzando acqua di miscelazione avente una conduttività elettrica media di 500-600  $\mu\text{S/m}$ . La dispersione e la miscelazione della bentonite vengono eseguite utilizzando un miscelatore tipo "Rainery" dotato di una turbina deflocculante avente diametro di 80 mm e frequenza di rotazione di 1500 giri/minuto. Il tempo di miscelazione non deve superare i 3 minuti per rispettare le condizioni di cantiere.

Le misure della viscosità, dello spessore del “cake”, della perdita per filtrazione, possono essere fatte dopo la miscelazione (dopo 1 ora e dopo 24 ore per evidenziare la variazione dei valori con il passare del tempo). Possono essere eseguite altre prove aggiuntive che servono a valutare prevalentemente il comportamento del fluido in presenza di contaminanti come cemento e sali.

## 4.2 POLIMERI

Esistono centinaia di prodotti polimerici approvati dall'industria petrolifera e del gas. I polimeri, naturali, naturali modificati o sintetici, vengono utilizzati specialmente per la loro capacità di ridurre la perdita di fluido e perché minimizzano il rigonfiamento delle argille. I fluidi polimerici possono usare un solo tipo di polimero sebbene le miscele di più polimeri possano migliorare le capacità del fluido. Sistemi polimerici a carica multipla (anionici, non ionici, cationici) sono invece in grado di fornire prestazioni aggiuntive a seconda delle condizioni del suolo.

I polimeri sono disponibili in polvere secca e il processo di completa idratazione varia da 30 minuti ad un'ora a seconda della temperatura e della qualità dell'acqua di miscelazione. Sono disponibili come emulsione in acqua/olio o in emulsione salata. I polimeri liquidi sono più facili da utilizzare a livello di preparazione con un rapido sviluppo di viscosità, ma sono più costosi rispetto ai polimeri in polvere.

### 4.2.1 POLIMERI NATURALI (GOMMA)

La gomma di Guar viene utilizzata nella perforazione di pozzi d'acqua dall'avvento delle trivelle negli impianti di perforazione. La gomma di Guar e l'idrossipropil (un suo derivato) sono buoni prodotti da utilizzare dove esiste il rischio di una grande perdita di fluido di supporto perché consente una facile trasformazione del fluido in un gel spesso.

La gomma di xantano è una gomma prodotta da colture batteriche. Appartiene alla categoria dei polimeri costosi ma può agire come sostituto della bentonite, con un forte comportamento pseudo-plastico e con la capacità di sostenere sabbie e particelle fini. Il peso molecolare rimane basso.

### 4.2.2 POLIMERI NATURALI MODIFICATI

I polimeri polisaccaridici appartengono alla categoria dei polimeri cellulosici. Questi polimeri possono essere non ionici o anionici.

La carbossimetilcellulosa (CMC) è il tipo principale di polimero utilizzato in diversi settori ed è essenzialmente un buon “viscosificatore” che può mitigare la perdita di fluido. I polimeri “CMC” con un grado di sostituzione, cioè contenenti un solo gruppo acetilico (monoacetilcellulosa, sono chiamati “PAC”, hanno una carica anionica e sono disponibili in vari pesi molecolari.

I polimeri cellulosici come (CMC) e idrossietilcellulosa (HEC) rendono viscosi i fluidi senza alcuna significativa forza del gel sebbene offrano una buona lubrificazione. Essi si combinano con le particelle di minerali (bentonite, terreno, ecc...) per formare un fluido omogeneo pur consentendo a tutte le altre particelle di dimensioni maggiori di sedimentare.

I fluidi di supporto polimerici con i derivati della cellulosa sono stati utilizzati con successo negli scavi eseguiti con idrofresa. In questo caso, il fango, per trasportare i detriti di perforazione in superficie, viene usato a circolazione inversa (figura 12) e, prima dell’uso, devono essere noti viscosità, densità, ecc.

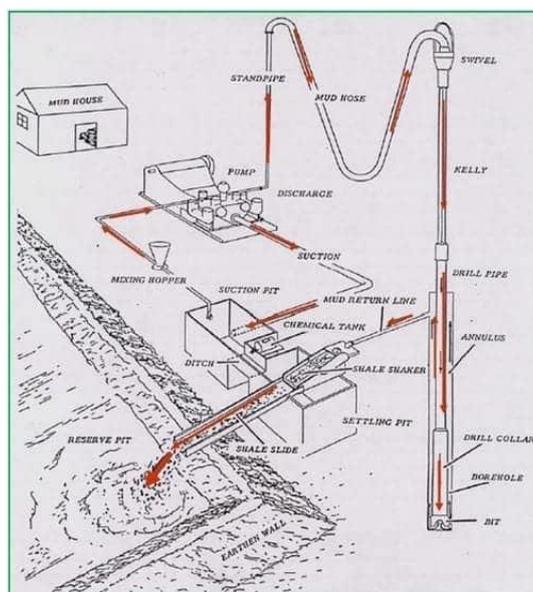


Figura 12. Schema della perforazione con circolazione inversa dei fluidi di supporto (Massenza, 2018)

#### 4.2.3 POLIMERI SINTETICI (PHPA)

Il polimero parzialmente idrolizzato del poliacrilammide (PHPA) è diventato il tipo più comune di polimero utilizzato nell'industria petrolifera e del gas. Questi polimeri alcune volte sono indicati come "HPAM". Di questi tipi di polimeri ne esistono molti con differenti pesi molecolari, anche se i più utilizzati sono quelli ad alto peso molecolare per la capacità di garantire elevate viscosità. Inoltre, più è alto il peso molecolare più pulito è il fluido di supporto. Questi polimeri sono anionici con un livello di carica variabile che è indipendente dal peso molecolare. La carica ha anche un ruolo importante nel prevenire la dispersione delle particelle di argilla. Tali polimeri con alto peso molecolare sono molto adatti per pali trivellati e diaframmi le cui pareti sono scavate con benna, mentre, funzionano meno bene nel caso di utilizzo dell'idrofresa poiché riducono la capacità delle apparecchiature di separazione dei solidi di rimuovere i solidi stessi.

#### 4.3 FLUIDI MISCELATI

Il concetto di miscelazione di particelle minerali con polimero risale alla fine degli anni '60. L'idea è quella di realizzare una miscela per creare un fluido di supporto traendo benefici dai vari materiali per garantire più flessibilità progettuale relativa alle diverse condizioni che si possono attendere in sito. Una miscela di particelle minerali come argilla e calcare può essere usata con i polimeri sintetici ad alto peso molecolare per aumentare la densità del fluido o per aiutare a prevenire la perdita di fluido nella formazione.

Un'altra opzione possibile consiste nell'associare un polimero alla bentonite commerciale in modo da formare una miscela in cui la bentonite rimane la fase continua e il polimero aiuta a migliorare le proprietà reologiche, a controllare la perdita di fluido e a diminuire l'inquinamento.

#### 4.4 CONSIDERAZIONI AMBIENTALI

L'uso di un fluido di supporto richiede una attenta valutazione dell'ambiente in cui dovrà essere utilizzato. È obbligatorio eseguire una valutazione ambientale in termini di:

- 1) salute e sicurezza nella manipolazione, movimentazione e conservazione dei materiali;
- 2) impatto ambientale del fluido di supporto sul suolo e sulle acque sotterranee;

3) movimentazione, stoccaggio e smaltimento del fluido di supporto e dei materiali scavati.

Nella fase preliminare del progetto è importante analizzare la situazione, considerando il tipo di fondazione profonda da realizzare, la geometria del sito, le condizioni del terreno (caratteristiche fisiche e chimiche), l'acqua di falda, la sensibilità all'impatto ambientale (fiumi, mari, ecc.), il potenziale trattamento preliminare del terreno (inquinamento da parte dell'uomo, ecc.).

Attraverso l'analisi ambientale e le condizioni in sito, la scelta dei materiali e degli additivi per il fluido di supporto può essere fatta considerando:

- 1) le prestazioni tecniche del fluido;
- 2) la minimizzazione delle perdite di fluido nel terreno;
- 3) l'impatto ambientale del fluido e degli additivi considerando la normativa;
- 4) l'impatto e la reazione del terreno al fluido di supporto;
- 5) il modo più appropriato per smaltire i materiali scavati e il fluido di supporto.

Le considerazioni sulla salute e sulla sicurezza dei lavoratori deve far parte di un "piano di salute e sicurezza". La valutazione del rischio deve essere effettuata prima dell'esecuzione in base ai dati presenti sulle schede di sicurezza di tutti i componenti utilizzati per la realizzazione del fluido. Anche l'eventuale terreno contaminato deve essere indicato sul piano di salute e sicurezza poiché tale contaminazione si potrebbe trasferire al fluido di supporto e provocare rischi per gli operai. L'uso del fluido di supporto, la movimentazione, lo stoccaggio e lo smaltimento dei liquidi di scarto e dei materiali scavati, sono tutte operazioni guidate da un regolamento ambientale come, ad esempio, le direttive per il trattamento delle acque reflue.

Chiaramente, non è importante soltanto considerare il rischio associato all'ingresso di materiali estranei nel fluido di supporto, ma anche come questi materiali potrebbero modificare le caratteristiche fisico-chimiche del terreno. La minimizzazione della perdita di fluido nella formazione è un parametro chiave per ridurre l'impatto ambientale.

L'impatto ambientale di bentonite, polimeri e additivi è, in genere, basato su informazioni date dalla scheda di dati di sicurezza, come dal regolamento n. 1907/2006 del Parlamento Europeo del Consiglio del 18 dicembre 2006, o dai dati eco-tossicologici.

Lo stesso approccio si applica quando si tratta di smaltimento dei materiali di scavo e dei liquidi di scarto. I test di lisciviazione sono normalmente richiesti per determinare il rilascio degli inquinanti da parte dei materiali.

#### 4.5 SCELTA DEL TIPO DI FLUIDO E VALUTAZIONE DEI COSTI

La scelta del fluido di supporto non si basa solo sulla condizione del terreno, ma anche sulla praticità del fluido, sul livello tecnico del personale, sulle questioni ambientali e sulle condizioni di smaltimento. Quando si sceglie il fluido di supporto, dovrebbero essere considerate, almeno, le seguenti condizioni:

- 1) dimensione degli elementi di fondazione;
- 2) attrezzature di scavo, pompaggio, trattamento e la lunghezza dell'eventuale rivestimento;
- 3) metodo di scavo;
- 4) condizioni del terreno (tipo di suolo, permeabilità, coesione, chimica), livello delle acque sotterranee e la loro chimica;
- 5) qualità dell'acqua di miscelazione;
- 6) requisiti del fluido;
- 7) problemi ambientali (contaminanti);
- 8) requisiti e restrizioni relative allo smaltimento;
- 9) spese.

Non esiste un fluido di perforazione ideale per tutti i tipi di progetti e la giusta scelta può essere fatta solo dopo aver considerato tutti i parametri precedenti. Ad esempio, i fluidi bentonitici non sono idonei in terreni chimicamente aggressivi o in terreni argillosi. In tali condizioni possono funzionare meglio i fluidi polimerici. Dall'altra parte, i fluidi polimerici

non sono adatti a terreni fessurati a causa della scarsa forza del gel. A questo si può rimediare usando agenti

“intasanti” come i rigonfianti. L’uso degli additivi è un modo per rendere idonei i diversi tipi di fluido ai diversi tipi di terreno.

#### 4.5.1 PREPARAZIONE DEI FLUIDI DI PERFORAZIONE

Per i fluidi di supporto bentonitici, la concentrazione di bentonite è tipicamente compresa nell’intervallo tra 20 e 60  $kg/m^3$  di acqua (dal 2 % al 6 %). L’impianto comprende un miscelatore ad elevata azione di taglio, dei serbatoi di idratazione e un sistema di ricircolo dei fluidi. Un fluido bentonitico non sviluppa le sue proprietà appena viene a contatto con l’acqua, allora è necessario un tempo di idratazione (da 4 a 12 ore) tra la miscelazione e l’uso. Il tempo di idratazione dipende dal tipo di bentonite e dal miscelatore utilizzato. Le bentoniti da perforazione possono essere classificate in base alla loro resa in volume e in base alle caratteristiche chimiche come proposto dall’”API”. Ad esempio (bentoniti sodiche naturali, bentoniti sodiche attivate, bentoniti non trattate). Per la realizzazione di fondazioni profonde, questo tipo di classificazione non aiuta l’appaltatore a selezionare il giusto tipo di bentonite a causa dell’assenza di proprietà misurate in sito alle diverse condizioni del terreno come la qualità dell’acqua di miscelazione che raramente viene distillata sul posto di lavoro e il tempo di miscelazione che raramente eccede “i pochi minuti”.

Solitamente, in laboratorio:

- 1) le sospensioni di bentonite vengono preparate usando acqua di rubinetto come acqua di miscelazione con conduttività elettrica media di 500/600  $\mu S/cm$ ;
- 2) la dispersione e la miscelazione della bentonite è ottenuta utilizzando un miscelatore tipo “Rainery” dotato di turbina deflocculante di diametro 80 mm che gira con frequenza di 1550 giri al minuto;
- 3) il tempo di miscelazione non deve superare i 3 minuti per rispecchiare le condizioni di cantiere;
- 4) le misure di viscosità, così come altri parametri tipo la perdita per filtrazione, possono essere fatte subito dopo la miscelazione: 1 ora e 24 ore per valutare le variazioni nel tempo di queste proprietà;

- 5) possono essere eseguite prove aggiuntive per evidenziare il comportamento della bentonite in presenza di cemento e di eventuali contaminanti;
- 6) la concentrazione di bentonite deve essere tale da permettere il raggiungimento di una certa viscosità in sito e, per questo motivo, non viene indicata basandosi sulla resa in volume.

I fluidi di perforazione ottenuti da polimeri naturali modificati vengono preparati in una concentrazione da 1.5 a 5  $kg/m^3$  (da 0.15% a 0.5%), con le stesse modalità dei fluidi bentonitici ma con un tempo di idratazione più veloce.

I fluidi con polimero PHPA sono tipicamente utilizzati in una concentrazione da 0.5 a 2  $kg/m^3$  (da 0.05% a 2%), quindi in percentuali molto inferiori rispetto alla bentonite.

#### 4.5.2 ADDITIVI CHIMICI

Gli additivi chimici possono essere quelli aggiunti all'acqua di miscelazione per aumentare il pH (carbonato di sodio) o, quelli usati durante l'intero procedimento di scavo per ripristinare le proprietà del fluido (fluidificanti, disperdenti, ecc.).

#### 4.5.3 TASSO DI RIUTILIZZO

Il tasso di riutilizzo è la capacità di utilizzare il fluido di supporto più volte quando viene miscelato e trattato correttamente. Dipende da molti fattori, tra cui le condizioni del suolo, i metodi di scavo e l'efficienza delle operazioni.

#### 4.5.4 COSTI

Il costo complessivo dei fluidi di perforazione dipende da una serie di fattori, tra cui:

- 1) costo delle materie prime (per tonnellata o metro cubo); Circa Euro 1,4-1,5 al kg ([www.albaedile.it](http://www.albaedile.it)). Quindi per un mc di fango bentonitico, assumendo un 5% di concentrazione (50 Kg) si stima un costo di circa 70 Euro per la materia prima.
- 2) resa in volume della materia prima (quantità di materia prima per metro cubo di fluido);  
Ad esempio, il polimero naturale Carbocel AG/EHV prodotto dalla [www.adriatech.com](http://www.adriatech.com)

ha una resa pari a  $10 \text{ Kg}/\text{m}^3$ . La bentonite sodica naturale invece ha una resa di circa  $35 \text{ Kg}/\text{m}^3$ .

- 3) additivi chimici per il pretrattamento, trattamento e smaltimento. Ad esempio, una quantità pari a *grammi 50* di polvere addensante di Idrossietilcellulosa ad alta viscosità ha un costo pari a *Euro 4.99*, in accordo con [www.zenstore.it](http://www.zenstore.it).
- 4) costo dell'acqua di miscelazione (acqua di rete, di falda, di mare); Per quanto concerne l'utilizzo delle acque provenienti dai bacini superficiali e dalle falde, bisogna richiedere un permesso specifico al servizio di tutela e gestione del territorio della regione. Infatti le acque marittime sono demaniali. È necessario inviare alla regione un modulo apposito : “domanda di concessione di derivazione di acqua pubblica da fiume ,torrente, sorgente, falda sotterranea, invaso”. Nel caso delle acque provenienti da reti idriche, la società *VIVA SERVIZI*, ad esempio, per l'anno 2020 indica per metro cubo di acqua, una tariffa pari a *Euro 0.3813* per il caso delle acque a uso pubblico e non domestico.
- 5) tasso di utilizzo del fluido di supporto; *I solidi destinati al riutilizzo possono essere collocati nella stessa area di cantiere (dopo l'autorizzazione). Altrimenti si conferiscono a costi contenuti con codice C.E.R. 170504.*
- 6) costi dedicati alle attrezzature (pompe, dissabbiatori, centrifughe, filtropresse, serbatoi di stoccaggio, ecc.); In base al Prezzario della regione Marche il costo per il trasporto e l'approntamento dell'attrezzatura per i fanghi di perforazione si aggira attorno a 1500 Euro.
- 7) costi di smaltimento per i materiali scavati e i liquidi di scarto; Circa 2-4 Euro al metro cubo. Tale costo può variare in base alla distanza dal sito di conferimento.
- 8) costi associati ai lavori di manutenzione. Quantità : ora di lavoro di un singolo professionista. Spesa : Euro 22.00 circa. (da calcoli derivanti direttamente da [www.lavoro.gov.it](http://www.lavoro.gov.it)).

#### 4.6 ACQUA DI MISCELAZIONE

L'acqua di miscelazione ha una grande influenza sulla qualità e sulle prestazioni del fluido di supporto, perciò, dovrebbero essere considerati: la provenienza, la durezza, il pH (da 6.5

a 11.5), la composizione chimica, i contaminanti, la presenza di flocculanti (se l'acqua è trattata), il contenuto di sali.

È sempre consigliabile analizzare la fonte di provenienza dell'acqua, eseguendo prove di laboratorio per misurare il pH, la conducibilità, il contenuto di calcio, magnesio, cloro, idrocarburi, metalli pesanti. Se la fonte è comunale, sicuramente vi sono già dei risultati a disposizione.

#### 4.6.1 BENTONITE

Le proprietà di una sospensione bentonitica sono fortemente influenzate dai costituenti dell'acqua di miscelazione e in particolare dal contenuto di elettroliti e dalla presenza delle sostanze organiche perché possono influenzare dispersione e rigonfiamento. Deve essere data particolare attenzione alla scelta dell'acqua di miscelazione preferendo quella a più basso contenuto medio di elettroliti (ad esempio acqua di rete quando è disponibile). Altrimenti si utilizzano acque sotterranee, fluviali e lacustri con una conducibilità elettrica al di sotto di 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 4.6.2 POLIMERI

L'acqua di miscelazione influenza sempre il dosaggio necessario di polimero per permettere al fluido polimerico di raggiungere una certa viscosità. Meno dura è l'acqua, più alta è la viscosità che si raggiunge con dosaggi più bassi, più dura è l'acqua e più polimero serve per raggiungere una specifica viscosità. Se l'acqua è erogata da idranti che utilizzano vecchie tubazioni, si può avere la presenza di ferro in sospensione. Anche con un'analisi chimica può essere difficile valutare se un'acqua è adatta ad essere usata come acqua di miscelazione.

Le proprietà dei fluidi polimerici ottenuti con PHPA possono essere influenzate dalla presenza di sali sia nell'acqua di miscelazione che nel terreno. I sali possono influenzare la fase iniziale durante l'idratazione e possono avere un effetto negativo sulla viscosità. Maggiore è il contenuto di sali disciolti nell'acqua di miscelazione, minore è la viscosità del fluido di perforazione.

I polimeri naturali e modificati (PAC o CMC), di solito, tollerano bene la presenza dei sali.

In conclusione, la scelta dell'acqua di miscelazione ha un impatto diretto sulla miscelazione.

## 4.7 UTILIZZO DELL'ACQUA COME FLUIDO DI PERFORAZIONE

L'acqua, in alcune condizioni, può essere usata senza l'aggiunta di bentonite o polimeri. È usata più frequentemente per i pali trivellati che per i diaframmi.

L'acqua è chiaramente più economica rispetto ad altri fluidi, ma il suo utilizzo è limitato a formazioni sufficientemente stabili che non crollano durante la perforazione. Questo perché l'acqua "pulita", così come i fluidi polimerici non forma il cake sulle pareti dello scavo, quindi è difficile mantenere una pressione netta positiva del fluido nello scavo. Ciò significa che le pressioni dell'acqua nel terreno sono simili al livello dell'acqua nello scavo (alle pressioni idrostatiche). La tensione efficace minima nel terreno eguaglia tale pressione: *il tal caso la meccanica delle terre e i numerosi studi condotti sul tema ci indicano che si raggiunge la condizione di rottura con il cerchio di Mohr che diventa tangente gli assi delle tensioni normali e tangenziali (si rimanda il lettore ad un qualsiasi libro di geotecnica e/o meccanica delle terre)*. Perciò, l'acqua senza additivi è solitamente utilizzata solo in argille dure, formazioni rocciose o, nel caso in cui si usano anche rivestimenti temporanei o permanenti.

Occorre, inoltre, considerare la fase di getto quando si esegue la perforazione usando acqua (l'acqua è un fluido newtoniano e non ha una resistenza del gel). A causa della bassa viscosità l'acqua non riesce a trattenere a lungo in sospensione le particelle di sabbia e limo grosso e tali particelle possono sedimentare nelle fasi successive alla scavo (pulizia del fondo foro, inserimento della gabbia e getto).

## 5 – ATTREZZATURE DI CANTIERE

### 5.1 MISCELAZIONE E STOCCAGGIO

#### 5.1.1 INTRODUZIONE

L'uso dei fluidi di perforazione, rispetto ad altri metodi di stabilizzazione (rivestimento), comporta un'organizzazione del cantiere più complessa che prevede l'utilizzo di una serie di attrezzature per la preparazione e il trattamento dei fluidi di perforazione stessi. Un efficace sistema di miscelazione deve attivare tutta la materia prima per avere un buon rapporto costo-efficacia tra la materia prima stessa e il tempo di miscelazione. Una miscelazione efficiente dipende dal contatto iniziale tra l'acqua di miscelazione e la materia prima, con quest'ultima che deve essere aggiunta lentamente affinché non si formino blocchi di polvere secca.

La preparazione del fluido di supporto prevede generalmente tre fasi:

- 1) dispersione;
- 2) idratazione ;
- 3) omogeneizzazione.

#### 5.1.2 PREPARAZIONE DEL FANGO BENTONITICO

Il fluido bentonitico viene normalmente preparato in un apposito impianto costituito da un miscelatore ad alto taglio, serbatoi di idratazione e un sistema di ricircolo del fluido. Tra la miscelazione e l'utilizzo deve intercorrere un certo lasso di tempo. Tale tempo, detto di idratazione, dipende dal tipo di bentonite e dalla forza di taglio nel miscelatore. L'idratazione avviene nei serbatoi dell'impianto e solitamente interessa un periodo compreso tra 4 e 12 ore.

I parametri chiave da considerare nella miscelazione dei fluidi bentonitici sono:

- 1) qualità dell'acqua (pH e sali disciolti);
- 2) tempo di miscelazione (influenza l'idratazione e lo sviluppo delle proprietà);

3) potenza del miscelatore (per garantire la dispersione delle particelle).

In genere, quando il fluido è stato miscelato per il tempo richiesto, la pompa invia il fluido miscelato al serbatoio o ai serbatoi di idratazione. I fluidi bentonitici vengono miscelati utilizzando strumenti ad elevata turbolenza.

### 5.1.3 PREPARAZIONE DEI FANGHI POLIMERICI

Per la miscelazione dei fluidi polimerici si utilizzano in genere una maggiore varietà di miscelatori. Le tecniche inappropriate di miscelazione possono portare a problemi che includono la formazione di agglomerato e, nel caso dei polimeri liquidi alle emissioni di solventi. Vista la gamma di polimeri disponibili, il fornitore deve specificare il tipo di miscelazione adatta ai diversi tipi di prodotto.

Il modo più semplice per idratare un polimero in polvere è l'alimentazione a gravità (versare lentamente la polvere in un flusso di acqua che esce da un tubo). Se il flusso viene fatto passare su una piastra, la superficie di dispersione aumenta. L'utente deve allora cospargere con cura la polvere sulla piastra, evitando accumuli. Questo metodo non favorisce il dosaggio di grandi volumi di polvere (cioè non sono adatti per la bentonite ma possono essere usati per i fluidi polimerici che richiedono circa 1/50 di quantità di materiale secco rispetto ai fluidi bentonitici stessi).

Per grandi volumi di fluido può essere preferita una tramoggia di "Venturi", mostrata in figura 13. Le versioni più rudimentali hanno solo una riduzione della sezione trasversale della linea di alimentazione (un ugello) che sostanzialmente fa aumentare la velocità dell'acqua e quindi crea una zona a bassa pressione attorno all'ugello stesso. L'ugello è incorporato nella base della tramoggia in cui viene introdotta la polvere secca. La polvere viene aspirata appena esce dalla tramoggia e si mescola all'acqua.



Figura 13. *La tramoggia Venturi* ([www.formedil.it](http://www.formedil.it), 2012)

L'alimentazione può avvenire manualmente, può essere controllata da una valvola o da una saracinesca scorrevole alla base della tramoggia (figura 14-b si ha una valvola a farfalla) o, si può utilizzare la vite di Archimede (figura 14-c). La figura 14-a mostra una tramoggia riempita leggermente più della metà per evitare una sovralimentazione dell'ugello.

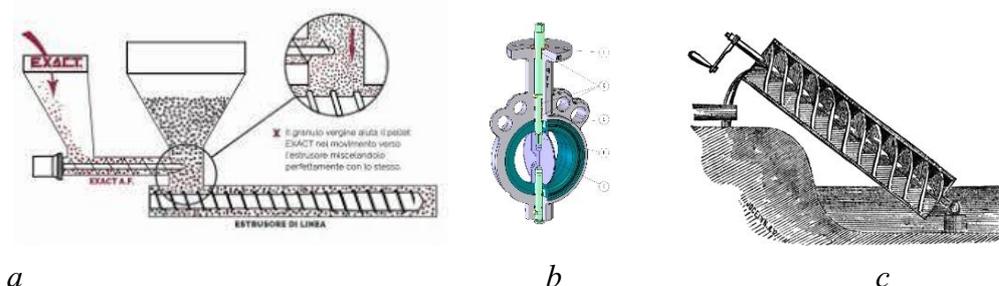


Figura 14. (a) Particolari della miscelazione con tramoggia (Pellenc,2019), (b) valvola a farfalla ([www.brandonivalves.com](http://www.brandonivalves.com), 2019), (c) vite di Archimede ([www.brandonivalves.com](http://www.brandonivalves.com), 2019)

Le tipiche tramogge Venturi utilizzano linee di alimentazione da 50 a 75 mm, ma sono disponibili sistemi più grandi con linee fino a 150 mm di diametro, con sezioni ridotte (diametro dell'ugello di 100 mm). Maggiore è il diametro della linea di alimentazione, maggiore è il volume che si può trattare.

I polimeri in polvere richiedono un'attenta dispersione iniziale e tempi di idratazione più lunghi (in genere da 30 a 60 minuti) rispetto ai polimeri liquidi. I polimeri liquidi possono richiedere una miscelazione iniziale più lunga per raggiungere omogeneità durante la diluizione. L'omogeneizzazione e il ricircolo dei fluidi con polimeri sintetici devono evitare l'uso delle pompe centrifughe a causa dell'elevato taglio, preferendo pompe a diaframma.

I polimeri naturali a base di cellulosa (CMC, PAC) non soffrono del problema dell'alto taglio e possono essere utilizzate pompe centrifughe e miscelatori ad elevata turbolenza.

#### 5.1.4 CONSERVAZIONE

Le apparecchiature di stoccaggio vengono utilizzate per conservare il fluido di supporto, far sviluppare le sue proprietà e renderlo idoneo al riutilizzo. Tra queste apparecchiature si

hanno: serbatoi quadrati/rettangolari, serbatoi circolari, serbatoi gonfiabili, silos verticali, fosse con rivestimento.

I serbatoi di stoccaggio del fluido minerale devono contenere pale mobili o agitatori per controllare la sedimentazione dei prodotti minerali che sono sospesi e non disciolti (come i polimeri sintetici). Inoltre, si preferisce usare serbatoi con fondi inclinati proprio per favorire la raccolta del materiale sedimentato.

La figura 15 mostra dei serbatoi di stoccaggio che incorporano i sistemi di agitazione del fondo del serbatoio. I serbatoi di stoccaggio per fluidi polimerici possono incorporare tubi gorgogliatori collegati al fondo del serbatoio per mantenere omogeneo il fluido.



Figura 15. Esempio di serbatoi per lo stoccaggio dei liquidi di perforazione (Bindi, 2018)

## 5.2 POMPAGGIO

### 5.2.1 INTRODUZIONE

Le pompe vengono utilizzate per trasferire fluidi o mantenerli in movimento e, possono essere “centrifughe” o “a diaframma”.

I fluidi bentonitici vengono movimentati mediante pompe centrifughe.

Per fluidi polimerici sintetici ad alto peso molecolare la turbolenza della miscelazione dovrebbe essere ridotta al minimo, infatti, *Lame et al. (2010)*, hanno dimostrato che a causa di tale fattore si può avere una riduzione di proprietà.

Dalla figura 16 si può notare che nel caso di fluidi polimerici con PHPA, una volta iniziato il pompaggio, la viscosità Marsh tende a diminuire nel tempo (il tempo di miscelazione). Infatti, all'aumentare del tempo di miscelazione, si ha un'omogeneizzazione delle varie componenti del fluido, con eventuali parti solide che vengono ridotte in termini di dimensioni. Entrambi i fluidi in esame hanno un elevato peso molecolare (molecole a catena lunga) e sembra che il calo di viscosità sia dovuto alla rottura di tali catene, a causa del taglio nella pompa centrifuga e nelle tubazioni. Il danno è maggiore per il fluido B, infatti, al tempo iniziale del pompaggio, la viscosità Marsh era 65 s, mentre dopo 8 ore circa di ricircolo è arrivata a 35 s.

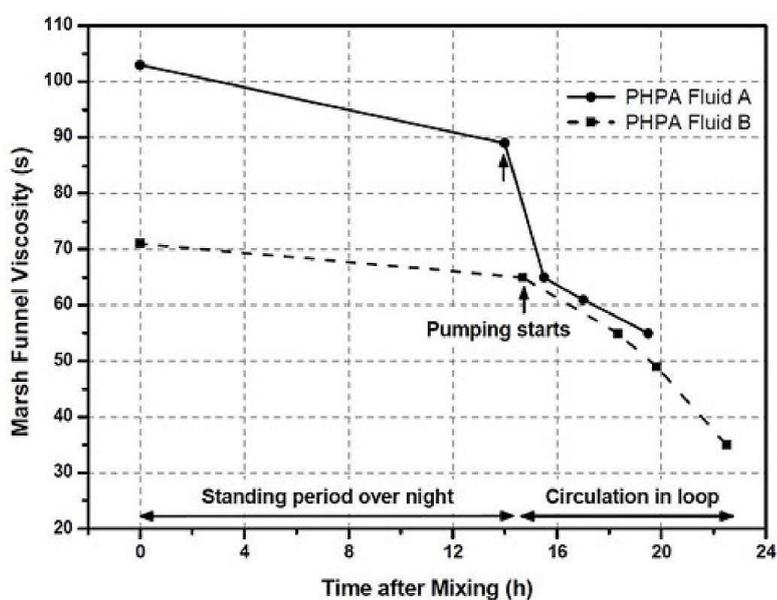


Figura 16. Esempi di andamento della viscosità Marsh nel tempo (Wiley et al, 2016)

Per evitare la brusca riduzione della viscosità dovuta all'elevata turbolenza delle pompe centrifughe, si raccomandano le pompe a diaframma nel caso dei fluidi polimerici con PHPA.

Le pompe centrifughe vengono generalmente utilizzate per rimuovere i fluidi polimerici dagli scavi durante il getto del calcestruzzo.

## 5.2.2 POMPE DI TRASFERIMENTO E ALIMENTAZIONE

La scelta del tipo di pompa dipende dalla velocità di scavo. In generale, più profondo sarà lo scavo, più lenti saranno i progressi. I primi 10-20 metri di scavo sono più veloci. Più duro e compatto è il terreno e/o maggiore è la sezione dello scavo, più lento è lo scavo. Con i sistemi a circolazione inversa (quando si utilizzano idrofresce), i materiali scavati vengono rimossi pompando il fluido dal basso, quindi, la velocità di scavo è maggiore. Per le pompe che lavorano a circolazione diretta la portata è  $100 - 150 \text{ m}^3/\text{h}$ , mentre a circolazione inversa è  $200 - 300 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### 5.2.3 POMPE PER IL RECUPERO DEI FLUIDI

La portata della pompa per il recupero dei fluidi è regolata dalla velocità di colata del calcestruzzo (in genere, non più di  $80 \text{ m}^3/\text{h}$ ), mentre la prevalenza dipende dalla distanza alla quale il fluido deve essere pompato. Il compito di tali pompe è far muovere il fluido intrappolando un certo volume e spingendolo verso il tubo di scarico. La quantità iniziale di calcestruzzo gettato è generalmente quella che determina la portata della pompa. Quando si effettua il getto dal basso (metodo *tremie*) è richiesto un volume fisso di calcestruzzo da gettare senza interruzione per garantire l'integrità dell'elemento di fondazione. Maggiore è la sezione da riempire, maggiori e migliori dovranno essere le proprietà della pompa.

### 5.3 SCAVO E PULIZIA

Gli strati di sabbia asciutta o sciolta assorbono facilmente i fluidi minerali con bassa densità fino a quando non si crea il "cake" che riduce la perdita di fluido e stabilizza lo scavo. Gli elementi di fondazione di grande dimensione devono essere scavati più lentamente così da consentire al fluido di supporto di funzionare correttamente.

Oltre allo scopo di stabilizzazione delle pareti, i fluidi di supporto devono anche garantire diversi requisiti specifici per le varie tecniche di scavo, come mostrato in tabella 3.

Tabella 3. Funzione del fluido in base al metodo di scavo

<b>Metodo di scavo</b>	<b>Funzione dei fluidi di supporto</b>
Trivella	Legare il materiale in modo che non scivola dalla coclea
Benna	Consentire la sedimentazione in modo che la maggior parte dei solidi si accumula sul fondo dello scavo e non lungo tutto il foro
Idrofresa	Aiutare a mantenere sospesi i solidi durante il trasporto all'impianto di separazione
Perforazione a percussione	Lubrificazione i martelli

Se viene utilizzato il rivestimento permanente o temporaneo, lo scopo principale del fluido è quello di contrastare la pressione delle acque sotterranee. Poiché il rivestimento viene inserito contemporaneamente o subito dopo lo scavo, è chiaro che il fluido comunque partecipa in parte alla stabilizzazione.

La pulizia della base avviene normalmente alla fine dello scavo per evitare interruzioni. Per la maggior parte dei polimeri, l'aggiunta di flocculanti aiuta il processo di pulizia, facilitando la sedimentazione delle particelle fini che si aggregano, sedimentano e vengono raccolte. Quando si utilizzano metodi di circolazione inversa, la pulizia del fluido avviene durante lo scavo poiché i fluidi sono fatti circolare in superficie e possono essere puliti di volta in volta prima di rientrare nello scavo.

Tipicamente, per la pulizia della base si utilizzano: il secchione speciale a lame piatte che serve a raccogliere i detriti fini, pompe sommerse e potenti, dispositivi di sollevamento aereo o pompe di aspirazione che si possono connettere direttamente al tubo di getto.

Nel metodo a circolazione inversa, il fluido pulito o riciclato viene pompato nello scavo e, successivamente, pompato in superficie fino a quando l'operazione di pulizia termina, prima di inserire la gabbia metallica. Il tempo che intercorre tra la fine della pulizia e l'inizio del getto deve essere breve. Quando gli scavi sono molto profondi, l'inserimento della gabbia può provocare l'accumulo di altri detriti sul fondo e potrebbe essere necessaria una ulteriore procedura di pulizia della base mediante aspirazione attraverso il tubo di getto.

Una buona pulizia della base è essenziale per garantire una buona resistenza di base, indipendentemente dal tipo di fluido utilizzato. L'accuratezza del processo di pulizia della base deve essere un argomento da discutere già in fase di progettazione e da verificare sul posto.

## 5.4 INTERAZIONI TRA FLUIDO DI PERFORAZIONE E TERRENO

### 5.4.1 INTRODUZIONE

Le prestazioni del fluido di supporto si riducono durante i processi di scavo, specialmente se il fluido viene utilizzato ripetutamente. È possibile anche che il fluido venga contaminato dalle acque sotterranee. Proprio per questi motivi va monitorato misurandone la viscosità, il contenuto in sabbia, la densità (questi valori aumentano man mano che il fluido si “sporca”, quando i fini si disperdono al suo interno). L'accumulo di solidi nel fluido si verifica generalmente quando si utilizzano fluidi minerali perché questi riescono a mantenere in sospensione particelle più grossolane.

### 5.4.2 CONTAMINAZIONE FISICA

Nei terreni coesivi con alto contenuto di argilla o limo, la presenza di particelle fini sospese aumenta la viscosità e il peso specifico del fluido. Il fluido “sporco” di fini è causa di usura per perni, puleggia, cuscinetti e fune metallica.

La contaminazione fisica con sabbia si misura facilmente con una prova specifica.

Alcuni fluidi polimerici hanno il vantaggio di trasportare pochi fluidi sospesi, di limitare il rigonfiamento dei terreni argillosi e, per questo motivo, sono utili anche per prevenire l'usura delle attrezzature. Il fluido polimerico può tuttavia assorbire particelle di terreno riducendo la concentrazione di polimero attivo. Infatti, è usuale aumentare la concentrazione di polimero dopo ogni utilizzo specialmente quando il fluido è costituito da PHPA. Testando continuamente il fluido prima del getto si capisce se questo necessita dell'aggiunta di polimero, di additivi o della sostituzione completa.

### 5.4.3 REAZIONI CHIMICHE

I fluidi di supporto possono interagire con le sostanze chimiche presenti nelle acque sotterranee o nel terreno (come mostrato in tabella 4). Durante l'utilizzo i fluidi di perforazione vengono a contatto con diversi materiali:

- 1) cemento (dal getto);
- 2) acqua di mare;
- 3) gesso (raramente);
- 4) composti organici volatili, idrocarburi, metalli pesanti, solventi, soluzioni acide o basiche.

Tabella 4. *Influenza della contaminazione fisica e delle reazioni chimiche sulle proprietà del fluido (Deep Foundation Institute, 2019)*

	<b>Contaminazione fisica</b>	<b>Reazioni chimiche</b>
<b>Viscosità</b>	P	P
<b>Densità</b>	S	
<b>Perdita per filtrazione</b>	P	P
<b>Spessore del filtro</b>	S	P
<b>pH</b>		P
<b>Contenuto in sabbia</b>	S	
<b>Inquinanti</b>	Sabbia, limo, argilla	pH( torba, suolo, cemento), sali, acqua di mare, gesso
<b>Trattamento (pre o post trattamento)</b>	Poliacrilato a basso peso molecolare, dissabbiamento, pulizia del fluido	Carbonato di sodio, bicarbonato di sodio, polimero CMC, poliacrilato a basso peso molecolare

NOTE: P=possibile, S=sicuro.

Gli additivi chimici possono essere aggiunti per compensare gli effetti negativi dovuti all'interazione con alcune sostanze. Tra questi si hanno idrossidi e carbonato di sodio (per il trattamento delle acque), bicarbonato di sodio (per la contaminazione da cemento).

#### 5.4.4 PERDITA DEL FLUIDO DI SUPPORTO

La quantità del fluido di supporto può, talvolta, diminuire in modo repentino o graduale, durante o dopo lo scavo. Questo può essere dovuto alla presenza di fessurazioni sotterranee, cavità e gallerie che comportano il rischio di crollo delle pareti dello scavo.

Il capitolo 8.4.3 della norma UNI-EN 1538 (2015) afferma che: *“quando si verifica una improvvisa e significativa perdita del fluido di supporto, lo scavo deve essere riempito immediatamente con un’ulteriore volume di fluido di supporto, eventualmente contenente materiale sigillante”*.

Dove vi è un elevato rischio di perdita, si può effettuare una operazione preliminare di saturazione dello scavo. Si possono utilizzare una varietà di materiali, suddivisi in quattro categorie:

- 1) materiali fibrosi (minerali o organici), come le fibre di cellulosa;
- 2) materiali granulari come sabbia, ghiaia, poliacrilammide reticolato;
- 3) trucioli di legno tagliuzzati;
- 4) additivi viscosizzanti come cellulosa polianionica altamente concentrata (aumentano localmente la viscosità del fluido per formare una massa semi-solida e occludere i vuoti che causano la perdita).

Quando la repentina perdita di calcestruzzo durante il getto evidenzia la presenza di una cavità nel terreno, in genere questa viene riempita con calcestruzzo magro prima di continuare il getto normale.

Quando si fanno operazioni di pre-saturazione del terreno che ricopre le pareti e il fondo dello scavo è molto importante che non avvenga la contaminazione del fluido.

## 5.5 TRATTAMENTO E RECUPERO

### 5.5.1 BENTONITE, POLIMERI NATURALI E POLIMERI NATURALI MODIFICATI

Nel caso di contaminazione fisica, l'attrezzatura meccanica può aiutare, anche, a rimuovere le particelle di terreno dal fluido di supporto. Tra tali attrezzature, le più comuni e usuali, sono riportate in tabella 5.

Tabella 5. *Attrezzature per la pulizia dei fanghi di perforazione dopo il loro uso (Deep Foundation Institute, 2019)*

<b>Tipo di attrezzatura</b>	<b>D<sub>50</sub></b>	<b>Capacità tipica massima</b>
<b>Vagliatore primario</b>	<3 mm	1000 m <sup>3</sup> /h
<b>Vagliatore secondario</b>	Da 0.2 mm a 0.4 mm	500 m <sup>3</sup> /h
<b>Cycloni dissabbiatori</b>	80 μm	250 m <sup>3</sup> /h
<b>Cycloni per rimozione limi</b>	20 μm	150 m <sup>3</sup> /h
<b>Centrifuga</b>	>5 μm	25 m <sup>3</sup> /h
<b>Filtropressa</b>	>5 μm	25 m <sup>3</sup> /h

*NOTE: D<sub>50</sub> = setaccio con il 50 % di passante.*

L'efficienza di tutti i tipi di impianti di separazione diminuisce significativamente con l'aumentare della densità del fluido. Quindi per scegliere l'attrezzatura di separazione è importante valutare il tipo e la quantità di materiale che dovrà essere rimosso dal fluido di supporto. Sotto i 20-30 μm è quasi impossibile rimuovere le particelle senza degradare il fluido di supporto. Le centrifughe e le filtropresse sono spesso utilizzate per trattare il fluido prima dello smaltimento.

### 5.5.2 POLIMERO SINTETICO PHPA

I fluidi polimerici con PHPA tendono a non trattenere i solidi in sospensione. Di conseguenza, la sedimentazione dei fini come il limo, può verificarsi dopo il completamento dello scavo se il fluido non viene adeguatamente pulito. L'impianto di separazione utilizzato per la pulizia dei fluidi bentonitici non è adatto per i fluidi polimerici perché l'elevata turbolenza indotta dall'attrezzatura tende a rompere le catene del polimero. Il metodo

tipicamente utilizzato per la pulizia dei fluidi polimerici con PHPA consiste nell'aggiunta di agenti flocculanti che aiutano a far sedimentare i solidi sospesi. Talvolta è necessario sostituire completamente il fluido utilizzato con fluido pulito, mediante pompaggio dalla base dello scavo e successivo scarico in appositi serbatoi in cui avviene la sedimentazione.

## 5.6 GETTO DEL CALCESTRUZZO

### 5.6.1 SEDIMENTAZIONE DEL FLUIDO DI SUPPORTO

Limi e argille possono essere sospesi nei fluidi minerali e, tale sospensione, è generalmente stabile nel tempo, dalla pulizia della base fino al getto del calcestruzzo (non si verifica alcuna separazione). Si possono verificare dei depositi solidi minimi solo sulle armature: si creano così degli accumuli che possono intrappolare il fluido. L'alta concentrazione di calcio e l'alto pH del calcestruzzo rompono la maggior parte dei polimeri e, qualunque fluido rimasto intrappolato nello scavo, dopo il getto rimarrà lì.

### 5.6.2 DISPOSIZIONE INIZIALE DEL CALCESTRUZZO

Quando inizia il getto, il fluido di supporto e il calcestruzzo versato nel tubo, devono essere mantenuti separati.

### 5.6.3 STRATO DI INTERFACCIA

Affinché si crei un "confine" tra il fluido di perforazione e il calcestruzzo, è necessario che sia garantita una differenza di densità tra i due fluidi.

Lo strato di interfaccia tra fluido di perforazione e calcestruzzo è formato da:

- 1) detriti che sedimentano alla base del palo. Quando il calcestruzzo ha una densità troppo bassa, risalendo nel tubo, lascia in profondità tali detriti;
- 2) materiale in calcestruzzo proveniente dai fenomeni di bleeding e segregazione;
- 3) materiale raschiato durante l'inserimento della gabbia di armatura;
- 4) materiale presente nel fluido di supporto che sedimenta a causa della mancata separazione tra fluido e calcestruzzo (specialmente quando l'operazione di getto è lenta).

## 5.7 SICUREZZA E SMALTIMENTO

### 5.7.1 INTRODUZIONE

Tutti i fluidi di supporto devono essere maneggiati con cura e, senza trattamento, non è permesso sversarli nel terreno o nelle acque superficiali e, per questo motivo, si usano sistemi a circuito chiuso.

Per minimizzare le fuoriuscite durante le operazioni di scavo con benne e secchione (bucket), si possono utilizzare misure di contenimento come le barriere.

Una buona pratica per proteggere l'ambiente circostante è quella di installare una barriera di contenimento, come illustrato in figura 17, in combinazione con le balle di paglia lungo il perimetro del sito.



Figura 17. *Esempio di perimetrazione dell'area di lavoro in presenza di fluidi di perforazione* ([www.soeg.it](http://www.soeg.it), 2017)

Quando si lavora sull'acqua, da chiatte o cavalletti, sono richieste ulteriori misure di contenimento. Le pompe vengono generalmente utilizzate per trasportare il fluido di supporto in serbatoi di contenimento in sito. Tali sistemi chiusi ad anello permettono anche il condizionamento continuo dei fluidi e il riutilizzo per ridurre al minimo il costo del materiale e di smaltimento.

Nonostante la disponibilità di metodi trattamento o pulizia o recupero o riutilizzo, efficaci per tutti i tipi di fluido, alla fine di ogni processo, è comunque richiesto lo smaltimento. Per lo smaltimento e la gestione dei fluidi e dei solidi, in Europa e Nord America bisogna seguire rigorosamente delle linee guida.

Lo smaltimento di rifiuti liquidi in discarica è vietato o limitato in molti paesi. Alcune autorità richiedono che il liquido di scarico sia trasportato in un impianto per il trattamento delle acque reflue, mentre altre consentono lo smaltimento direttamente in fognatura. Per la discarica, in genere, si richiedono analisi chimico-fisiche di campioni di fluidi di scarto reali, prima del rilascio dei permessi. I permessi richiedono dei tempi non proprio brevi, allora, bisogna richiederli con sufficiente anticipo.

L'UE definisce i rifiuti nella Direttiva Quadro sui Rifiuti (DQA) come: “qualsiasi sostanza o oggetto che il titolare rifiuta o intende scartare o è necessario scartare”. Il significato della parola “rifiuto” ai sensi della DQA sui rifiuti è particolare e può discostarsi dalla definizione data dal dizionario comune. La Commissione Europea ha fornito una guida sull'interpretazione delle disposizioni chiave della Direttiva 2008/98/CE relativa ai rifiuti.

In Nord America i rifiuti e il loro deposito in discarica sono regolati dall'EPA (agenzia statunitense per la protezione dell'ambiente). Le autorità locali potrebbero richiedere requisiti aggiuntivi relativi allo smaltimento dei rifiuti in discarica.

In generale, tutti i permessi richiedono quanto segue:

- 1) classificazione del rifiuto in pericoloso o non pericoloso;
- 2) la provenienza del rifiuto;
- 3) la quantità approssimativa del rifiuto;
- 4) il nome della sostanza o delle sostanze;
- 5) il processo che ha prodotto il rifiuto;
- 6) analisi chimico-fisiche;
- 7) eventuali problemi, requisiti o conoscenze speciali relative al rifiuto.

La definizione di “rifiuto pericoloso” è generalmente legata alla percentuale di sostanze pericolose (metalli pesanti e idrocarburi) e alle relative proprietà potenzialmente nocive per la salute.

La gestione adeguata della separazione dei solidi dal fluido di supporto, la composizione della miscela e il trattamento fisico, sono molto utili a ridurre significativamente la quantità di materiale da smaltire. Di norma, ridurre al minimo la quantità di materiale da smaltire significa separare l'acqua dai componenti solidi mediante appositi metodi di trattamento, differenti nel caso di fluido polimerico o bentonitico.

#### 5.7.2 SMALTIMENTO DEI FLUIDI POLIMERICI

Si elencano di seguito una serie di operazioni indispensabili:

- 1) sedimentazione per gravità dei solidi sospesi e rimozione;
- 2) trattamento chimico di fluidi a basso contenuto di solidi (regolazione del pH) e scarico come acque reflue (dopo approvazione);
- 3) trattamento meccanico del polimero mediante centrifuga o filtropressa che separa i fini dall'acqua.

#### 5.7.3 SMALTIMENTO DEI FANGHI BENTONITICI

Si elencano, operazioni comuni per la riuscita dell'intervento:

- 1) fluido miscelato con cemento e rimozione come rifiuto solido dopo l'idratazione;
- 2) fluido miscelato con calce e disidratazione attraverso una filtropressa o una pressa a nastro;
- 3) sedimentazione per gravità dei solidi sospesi dopo flocculazione e rimozione dei fanghi come rifiuti solidi (figure 18- a e 18- b);
- 4) trattamento meccanico mediante centrifughe e apparecchiature di decantazione che rilasciano acqua pulita e solidi.

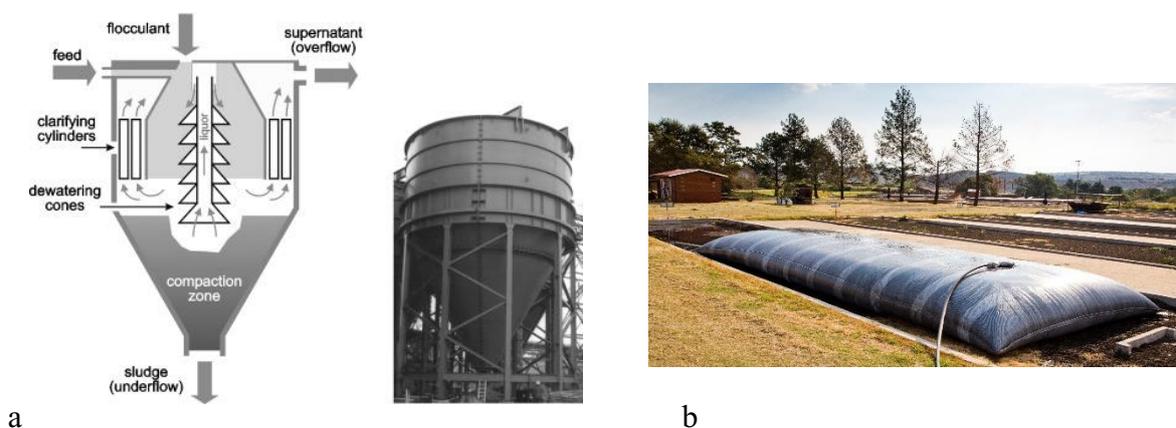


Figure 18. *Schema di trattamento dei fanghi di perforazione prima dello smaltimento: (a) attrezzatura per sedimentazione ([www.poggi-spa.com](http://www.poggi-spa.com), 2017), (b) rimozione dei fanghi solidi ([www.acquaculturealliance.org](http://www.acquaculturealliance.org), 2011)*

I fluidi bentonici, anche dopo un considerevole trattamento, sono considerati come “rifiuti speciali” da smaltire in siti appositi. La bentonite può essere dannosa per la vita dei pesci se viene scaricata in corpi idrici. Lasciando essiccare i fluidi bentonici si può recuperare l’argilla, la quale, può essere utilizzata in agricoltura. In questo caso, chiaramente, gli additivi chimici e il pH devono essere entro limiti.

## 5.8 CONSIDERAZIONI SULLA SICUREZZA

### 5.8.1 INTRODUZIONE

Le questioni relative alla sicurezza devono essere considerate sia nel caso di fluidi polimerici che bentonitici. La “scheda di sicurezza” del materiale deve riportare e identificare la maggior parte dei problemi relativi alla sicurezza stessa. Entrambi i tipi di fluido sono irritanti per gli occhi e richiedono l’ausilio di particolari occhiali di protezione quando vengono manipolati (specialmente durante la miscelazione). Devono essere a disposizione le bottiglie contenenti il liquido per il lavaggio oculare e il collirio. Questi prodotti possono provocare problemi anche all’apparato respiratorio. Nel Regno Unito, l’esposizione deve essere inferiore a  $4 \mu\text{g}$  per  $1\text{m}^3$  respirabile e inferiore a  $10 \mu\text{g}$  per  $1\text{m}^3$  inalabile.

Tutti i fluidi di supporto possono contenere additivi che possono causare gravi reazioni ai dipendenti che li manipolano. Possono provocare il rischio di scivolamento sulle aree di lavoro (specialmente quelli polimerici).

#### 5.8.2 BENTONITE IN POLVERE

La bentonite è irritante per le vie respiratorie e, durante la miscelazione, i dipendenti devono utilizzare maschere con filtro antiparticolato P-100. Contiene silice in piccole quantità che è considerata cancerogena. Contiene, solitamente, meno dell'1% di silice cristallina respirabile (RCS) e, se supera il 10% viene considerata e classificata come pericolosa. Per quanto concerne il contatto con la pelle non vi sono rischi particolari.

#### 5.8.3 POLIMERO IN POLVERE

Il polimero è irritante per le vie respiratorie e, durante le operazioni, gli operatori, devono essere muniti di maschere P-100.

Il fatto che per un fluido polimerico è richiesto che il pH venga mantenuto alto rappresenta una significativa preoccupazione a livello di sicurezza. Nelle principali miscele polimeriche si usa HCl (acido cloridrico) per abbassare il pH e liquidi caustici per aumentarlo. Queste sostanze vengono aggiunte manualmente dagli operatori e perciò possono rappresentare un problema per la sicurezza.

L'esposizione diretta della pelle a tali sostanze chimiche è causa di gravi ustioni:

- 1) devono essere disponibili i liquidi per il lavaggio oculare;
- 2) sono necessari indumenti impermeabili, guanti resistenti agli agenti chimici, occhiali di protezione.

Per abbassare la viscosità del polimero, invece, si usa ipoclorito di sodio (NaClO). Tale sostanza chimica è irritante per la pelle, può causare ustioni e richiede le stesse protezioni relative alla manipolazione di HCl e liquidi caustici.

Per garantire una sicurezza ancora maggiore, si possono installare o noleggiare le docce di sicurezza. L'acqua per le docce deve essere mantenuta tiepida. Le docce non devono essere esposte direttamente al sole e devono essere facilmente accessibili.

## 6 – PROVE SU SCALA REALE

Un modo eccellente per ottenere importanti informazioni sugli aspetti costruttivi di una fondazione profonda e per valutare la qualità del lavoro consiste nell' esecuzione di prove su scala reale su elementi appositi. Alcuni esempi includono:

- 1) prove di carico su pali pilota per valutare la resistenza di un palo trivellato realizzato con fluidi di perforazione;
- 2) scavi per valutare lo spessore del filtro ed eventuali imperfezioni del calcestruzzo;
- 3) prove per valutare la pulizia della base, la fase iniziale del getto con metodo "tremie" e, lo sviluppo dell'interfaccia, valutando e registrando i profili di densità. Quando il getto del calcestruzzo avviene sulla superficie del terreno, lo spessore dell'interfaccia tra fluido di perforazione e calcestruzzo può essere valutato direttamente a livello del suolo, quindi senza indagare in profondità.

Per ottenere il massimo beneficio, gli elementi di prova devono essere realizzati utilizzando le stesse tecniche, le stesse attrezzature e gli stessi materiali degli elementi reali. Tali prove offrono anche dei vantaggi per perfezionare i processi costruttivi. L'idoneità e le prestazioni del fluido di supporto scelto costituiscono solo una parte di tali prove.

Le dimensioni e la portata dei pali di prova devono essere proporzionali a quelle dei pali "reali" di progetto. Con riferimento specifico ai fluidi di supporto, una prova su scala reale, permette di indagare le seguenti aree:

- 1) *progetto temporaneo*: stabilità durante la fase di scavo, perdita di fluido dal palo, spostamento di terreno durante le operazioni di scavo;
- 2) *progetto definitivo*: spessore del filtro e interazione di esso con il calcestruzzo e il terreno (potrebbe richiedere prove di laboratorio);
- 3) *controllo di qualità*: stabilità del fluido di supporto e movimenti di terreno durante le operazioni di scavo e getto, idoneità del fluido di supporto, campionamento e collaudo, parametri del fluido di supporto da conoscere ai fini dello smaltimento, caratteristiche

gestionali del fluido di supporto come quantità e qualità, valutazione e controllo della superficie di interfaccia, (la zona di contatto tra il fluido e il calcestruzzo), qualità del lavoro completato.

Nella pratica, tali prove sono eseguite prima della realizzazione delle opere definitive. Il tempo e i costi della prova e della rettifica di eventuali problemi derivanti dalla prova stessa, devono essere noti al cliente e i requisiti devono essere specificati in dettaglio. Tali prove possono svolgere un ruolo significativo nella riduzione dei rischi e nel fornire maggiori dettagli costruttivi.

È importante utilizzare il fluido di supporto in qualsiasi prova che è rappresentativa del fluido nelle condizioni in cui verrà utilizzato durante i lavori. Poiché la prova utilizzerà fluido “pulito”, potrebbe essere necessario arricchirlo con materiale di scavo per cercare di rappresentare le condizioni in cui lavorerà realmente il fluido.

Quando i limiti economici e temporali non consentono l’esecuzione di campi prova, si consiglia di eseguire solo le prove in sito sul fluido di supporto.

## 7 – VALORI DI ACCETTAZIONE

### 7.1 INTRODUZIONE

Il fluido di supporto appropriato può essere scelto in base alle caratteristiche dello scavo, all'efficienza, alla disponibilità di risorse e alle esperienze precedenti. Le proprietà che caratterizzano un fluido di supporto, come le caratteristiche chimiche e reologiche, possono essere influenzate da: condizioni del terreno, considerazioni ambientali, metodo e ciclo di costruzione della fondazione.

Le prove eseguite sul fluido di supporto in base alla fase del ciclo costruttivo della fondazione profonda sono riportate in tabella 6.

Tabella 6. Prove da eseguire sui fluidi di perforazione nelle diverse fasi ( Deep Foundation Institute, 2019)

	Attività	Descrizione	Prove
1	Preparazione del fluido	Miscelazione del fluido pulito	pH, viscosità, densità, perdita per filtrazione
2	Scavo	Stabilizzazione dello scavo	Densità, perdita per filtrazione
3	Separazione dei solidi	Trattamento meccanico, chimico e per gravità del fluido	pH, viscosità, densità, contenuto in sabbia
4	Ispezione della base dello scavo	Ispezione dopo il posizionamento dell'armatura	Contenuto in sabbia, contenuto in argilla, cake
5	Getto del calcestruzzo	Ritorno del fluido	Controlli per la contaminazione del calcestruzzo
6	Rigenerazione del fluido	Trattamento meccanico, chimico e per gravità del fluido	pH, viscosità, densità, contenuto in sabbia, contenuto in argilla
7	Separazione del fluido	Separazione dei fluidi di scarto	Contenuto in sabbia, contenuto in argilla, viscosità
8	Smaltimento del fluido	Smaltimento dei fluidi e dei solidi di scarto	Ph, contenuto in sabbia, contenuto in argilla, COD E BOD

I fluidi di supporto vengono di norma utilizzati per realizzare più di un palo trivellato e, come descritto in precedenza, sono sottoposti a trattamenti per garantire i requisiti richiesti dalle tabelle 9 e 10. Il riutilizzo dei fluidi è condizionato al rispetto di tali requisiti.

#### 7.1.1 PRIMA FASE: FLUIDO DI SUPPORTO PULITO

Gli additivi alcune volte sono utilizzati già in questa fase per migliorare le proprietà iniziali del fluido. Deve essere analizzata anche l'acqua di miscelazione.

#### 7.1.2 SECONDA FASE: SCAVO CON FLUIDO DI SUPPORTO

Una volta a contatto con il terreno, il fluido di supporto è soggetto a molteplici effetti, tra cui: la filtrazione nel terreno (dipende dalla permeabilità dello strato), la dispersione di solidi in sospensione, l'eventuale sviluppo del "cake", l'effetto dovuto all'interazione con sali disciolti e contaminanti, la diluizione (quando si hanno terreni saturi di acqua).

#### 7.1.3 TERZA FASE: PULIZIA DEL FLUIDO

La qualità di un elemento di fondazione finito è estremamente dipendente dalla pulizia del fluido di supporto prima del getto del calcestruzzo. I fluidi di supporto minerali vengono puliti mediante additivi chimici. La rimozione della sabbia rappresenta la parte più semplice del processo di trattamento mentre la rimozione delle particelle fini sospese è un processo più laborioso. La separazione dei solidi dai fluidi di supporto polimerici è più facile, si ha una rapida segregazione dei solidi, sebbene le particelle fini in sospensione in fluidi altamente viscosi abbiano una velocità di sedimentazione maggiore. Per accelerare il processo vengono utilizzati additivi cationici sia durante che dopo lo scavo.

Negli scavi profondi, il tempo di sedimentazione potrebbe ritardare il processo, allora una opzione potrebbe essere quella di sostituire totalmente o parzialmente il fluido.

#### 7.1.4 QUARTA FASE: ISPEZIONE DOPO IL POSIZIONAMENTO DELL'ARMATURA

Uno scavo può essere caratterizzato dalla presenza sul fondo di depositi indesiderati dovuti all'introduzione della gabbia di armatura. Le cause sono: gabbia leggermente fuori piombo a causa dello scarso sollevamento, scavo non perfettamente verticale, distanziatori inadeguati, eccessivo spessore del filtro. La quantità di accumulo sul fondo deve essere

determinata mediante misurazione e campionamento per decidere se sono necessarie o meno ulteriori misure di pulizia. Una piccola quantità di materiale può essere rimossa con una pompa, aspirando dal tubo di getto.

#### 7.1.5 QUINTA FASE: RITORNO DEL FLUIDO DI SUPPORTO

Il fluido di supporto, durante il getto, viene spostato dal calcestruzzo e ritorna in superficie in una condizione probabilmente differente rispetto alla terza fase. In caso di fluido polimerico, il limo che si deposita, viene rimosso in una vasca di sedimentazione. Se la contaminazione da cemento è eccessiva, si raggiungono elevati valori di pH che possono rovinare il fluido polimerico.

#### 7.1.6 SESTA FASE: RIGENERAZIONE DEL FLUIDO POLIMERICO

L'obiettivo è quello di riportarlo, il più vicino possibile, ad una condizione di fluido "pulito", in modo che può essere riutilizzato, limitando le quantità da smaltire.

#### 7.1.7 SETTIMA FASE: PROCESSO DI SMALTIMENTO DEL FLUIDO DI SCARTO

Quando la rigenerazione è sconsigliata o alla fine del processo costruttivo della fondazione, i fluidi di supporto devono essere "lavorati", per consentire uno smaltimento economico rispettando le normative ambientali in vigore. I fluidi minerali hanno bisogno di un condizionamento, sia chimico che meccanico, per consentire la separazione della fase acquosa dalla fase solida. Il caso estremo è la solidificazione con un additivo cementizio.

I fluidi di supporto polimerici possono essere preparati per lo smaltimento utilizzando agenti ossidanti che rompono le lunghe catene polimeriche e riducono la viscosità, portandola vicina a quella dell'acqua, permettendo una sedimentazione veloce delle particelle fini sospese.

Gli impianti di depurazione accettano i fluidi polimerici residui purché vengano rispettati i requisiti della normativa "*D. Lgs 152/06 (Parte terza, Allegato 5, Tabella 3)*".

#### 7.1.8 OTTAVA FASE: SMALTIMENTO FUORI SEDE PER I RESIDUI DEL FLUIDO DI SUPPORTO

L'acqua residua dalla disidratazione dei fluidi bentonitici o polimerici è tipicamente autorizzata al trattamento negli impianti locali di depurazione. I solidi non contaminati sono trattati come terreno e smaltiti in discarica oppure vengono riutilizzati.

## 7.2 FREQUENZA DELLE PROVE

Esistono poche norme o guide che riguardano e trattano le frequenze delle prove. Le tabelle 7 e 8 forniscono metodi di prova per ogni fase sia per fluidi polimerici che bentonitici, con le relative frequenze minime raccomandate. Le prove più frequenti sono richieste all'inizio del lavoro.

Tabella 7. *Controlli sul fango bentonitico (Deep Foundation Institute, 2019)*

Prova	Metodo di prova	Fluido "pulito"	Fluido utilizzato per lo scavo	Fluido prima del getto del calcestruzzo	Fluido per il riutilizzo
<b>Frequenza</b>		Giornaliera	Una volta	Prima del getto	Giornaliera
<b>Viscosità</b>	Cono di Marsh	M	R	M	M
<b>Densità</b>	Densimetro	M	R	M	M
<b>Contenuto in sabbia</b>	Kit per il contenuto in sabbia	N/A	R	M	R
<b>pH</b>	Cartine	M	R	M	R
<b>Perdita per filtrazione</b>	Filtropressa dell'API	M	R	M	M
<b>Spessore del filtro</b>	Filtropressa dell'API	M	R	M	M
<b>Contenuto di limo</b>	Calcolo	N/A	N/A	O	O

**LEGENDA:** M=OBBLIGATORIA, R= RACCOMANDATA, O= OPZIONALE, N/A= NON APPLICABILE.

Tabella 8. Controlli sui fluidi polimerici (Deep Foundation Institute, 2019)

<b>Prova</b>	<b>Metodo di prova</b>	<b>Fluido “pulito”</b>	<b>Fluido utilizzato per lo scavo</b>	<b>Fluido prima del getto</b>	<b>Fluido per il riutilizzo</b>
<b>Frequenza</b>		Giornaliera	Una volta per ogni elemento (palo o diaframma)	Prima del getto	giornaliera
<b>Viscosità</b>	Cono di Marsh	M	R	M	M
<b>Densità</b>	Densimetro	M	R	M	R
<b>Contenuto in sabbia</b>	Kit per il contenuto in sabbia	N/A	R	M	R
<b>pH</b>	Cartine	M	R	R	M
<b>Perdita per filtrazione</b>	Filtropressa dell’API	N/A	N/A	N/A	N/A
<b>Spessore del filtro</b>	Filtropressa dell’API	N/A	N/A	N/A	N/A
<b>Contenuto di limo</b>	Calcolo	N/A	N/A	O	O

*LEGENDA: M= OBBLIGATORIA, R= RACCOMANDATA, O= OPZIONALE, N/A= NON APPLICABILE.*

L’acqua di miscelazione deve essere testata prima di iniziare il progetto, in termini di pH, conducibilità elettrica, calcio, magnesio, cloro.

### 7.3 STANDARD ESISTENTI

La necessità di avere “standards” unificati è sicuramente auspicabile ma è difficile da realizzare. Per “standards” si intendono un certo numero di proprietà misurabili che caratterizzano la natura del fluido di supporto.

Tali proprietà, una volta misurate, devono rientrare in determinati intervalli stabiliti dalle differenti normative per i diversi Paesi, come illustrato nella tabella 9.

Tabella 9. Intervalli di accettazione per i fanghi bentonitici, polimerici con polimeri naturali e naturali modificati

Proprietà	Viscosità Marsh	Resistenza al taglio	Densità	Perdita del fluido	Filtro	pH	Contenuto in sabbia
	s/qt	$N/m^2$	g/ml	ml ogni 30 min	mm ogni 30 min		%
<b>APPENA MISCELATO</b>							
<b>EN1536/1538</b>	32-50		<1.1	<30	<3	7-11	
<b>ACI 336.1</b>	26-50						
<b>FPS</b>	32-50		1.1	<30		7-11	
<b>FHWA/AASHTO</b>	28-50		1.03-1.11			8-11	
<b>DFI MANUAL</b>	>32		>1.03	<25		7-11.5	
<b>Caltrans</b>	28-50		1.03-1.11			8-10.5	

<b>Proprietà</b>	<b>Viscosità Marsh</b>	<b>Resistenza al taglio</b>	<b>Densità</b>	<b>Perdita del fluido</b>	<b>Filtro</b>	<b>pH</b>	<b>Contenuto in sabbia</b>
\	s/qt	<i>N/m<sup>2</sup></i>	g/ml	ml ogni 30 min	mm ogni 30 min		%
<b>PRONTO PER IL RIUTILIZZO</b>							
<b>EN1536/1538</b>	32-60		<1.25	<50	<6	7-12	
<b>ICE SPERW</b>	30-60	4-40	<1.08	<50	<6	7.5-12	
<b>ACI 336.1</b>							
<b>FPS</b>	32-60		1.25	<50		7-12	
<b>FHWA/AASHTO</b>	28-50		1.03-1.15			8-11	
<b>DFI Manual</b>							
<b>Caltrans</b>	28-50		1.03-1.11			8-10.	

<b>Proprietà</b>	<b>Viscosità Marsh</b>	<b>Resistenza al taglio</b>	<b>Densità</b>	<b>Perdita del fluido</b>	<b>Filtro</b>	<b>pH</b>	<b>Contenuto in sabbia</b>
	<i>s/qt</i>	<i>N/m<sup>2</sup></i>	<i>g/ml</i>	<i>ml ogni 30 min</i>	<i>mm ogni 30 min</i>		<i>%</i>
<b>DURANTE LO SCAVO</b>							
<b>EN1536/1538</b>							
<b>ICE SPERW</b>			<1.35		<15	7.5-12	
<b>ACI 336.1</b>						7-12	
<b>FPS</b>							
<b>FHWA/AASHTO</b>	28-50		1.03-1.15			8-11	
<b>DFI Manual</b>	<50		<1.12				
<b>Caltrans</b>	28-50		1.03-1.11			8-10.5	

<b>Proprietà</b>	<b>Viscosità Marsh</b>	<b>Resistenza al taglio</b>	<b>Densità</b>	<b>Perdita del fluido</b>	<b>Filtro</b>	<b>pH</b>	<b>Contenuto in sabbia</b>
	s/qt	<i>N/m<sup>2</sup></i>	g/ml	ml ogni 30 min	mm ogni 30 min		%
<b>PRIMA DEL GETTO</b>							
<b>EN1536/1538</b>	32-50		<1.15*				4
<b>ICE SPERW</b>	30-50	4-40	<1.10		<3	7.5-12	<2**
<b>ACI 336.1</b>			<1.36				<20/<4
<b>FPS</b>	32-50		<1.15				<4
<b>FHWA/AASHTO</b>	25-50		1.03-1.15			8-11	<4
<b>DFI Manual</b>	<50		<1.12				<5***
<b>Caltrans</b>	28-50		1.03-1.11			8-10.5	<4

Note:

*\*una densità di 1.20 è accettabile in acqua salata o in terreni soffici; e il 6% di contenuto in sabbia in calcestruzzo non armato.*

*\*\*il contenuto di sabbia al 4% è consentito laddove la pulizia della base non è fondamentale.*

*\*\*\*il contenuto in sabbia può essere ridotto all'1-2 % nel caso di fondazioni profonde;*

Oltre alle proprietà riportate nelle tabelle precedenti sono allo studio anche proprietà che potrebbero essere utili per una migliore comprensione del comportamento dei fanghi di perforazione. Ad esempio, il “*Field Research Study*” intende valutare:

- 1) contenuto di limo: può essere la causa di vari difetti di costruzione. Attualmente, viene determinato indirettamente misurando la densità. Una misurazione diretta può avvenire con l'ausilio di una centrifuga;
- 2) tensione di snervamento: specialmente per i fluidi minerali;
- 3) resistività: rileva la presenza di elettroliti che possono influenzare la maggior parte dei fluidi di supporto;
- 4) contaminazione da cemento del fluido bentonitico durante il getto: l'aumento del pH è l'indicatore più semplice;
- 5) cloro residuo (solo per i fluidi polimerici): il cloro residuo (ossidante) può distruggere parte del polimero.

L'andamento dei valori durante le varie fasi costruttive è ancora più importante di un valore in una singola fase. Determinare il perché di tale andamento è cruciale e, potrebbe richiedere una maggiore capacità interpretativa che può dare, ad esempio, un ingegnere più esperto.

Attualmente non vi è una guida riguardo l'ordine di importanza delle prove da eseguire e dei valori da determinare, sebbene una revisione approfondita di tutti i risultati sia fondamentale per la gestione di tutti i fluidi:

- 1) densità: influisce sulla stabilità dello scavo;

- 2) perdita per filtrazione: riduce la stabilità dello scavo;
- 3) spessore del filtro: influenza la resistenza laterale e l'interfaccia;
- 4) contenuto in sabbia: influenza lo spessore del filtro e la qualità della base;
- 5) contenuto in limo: può essere importante quanto il contenuto di sabbia, in particolare con fluidi polimerici, ma attualmente non ci sono prove standard;
- 6) pH: è un indicatore utile ma non un controllo.

## 8– BIBLIOGRAFIA

American Petroleum Institute (API) 13B (2003) Recommended practice for field testing water-based drilling fluids, 3rd Edn., Washington, DC, USA.

Bowen, (2014) The effects of drilling slurry on reinforcement in drilled shaft construction, Master's Thesis, University of South Florida, Tampa.

Brown et al, (2002) The effect of drilling fluid on axial capacity, Cape Fear River, NC, Proceedings of DFI 27th Annual Meeting in San Diego.

Brown, Turner, & Castelli (2010) "Drilled Shafts: Construction Procedures and LRFD Design Methods. Report FHWA NHI-10-016.

Chhabra R.P. and Richardson, J.F. (1999) Non-Newtonian flow in the process industries, Butterworth Heineman

Costello, K., Mobley, S., Bowen, J. and Mullins, G. (2019). "Rebar Pullout Bond in Tremie-Placed Concrete Cast in Drilling Slurry Environments." ACI Structural Journal, Farmington Hills, MI, (in press).

Costello, K. (2018). "A Theoretical and Practical Analysis of the Effect of Drill Fluid on Rebar Bond Strength" Doctoral Dissertation, University of South Florida, Tampa, 128pp.

Davies, R.V. and Henkel, D.J. (1980) Geotechnical problems associated with the construction of Chater Station, Hong Kong, Proc. Conf. on transportation in Asia, Hong Kong, J3/02/31. (Also Arup Journal Vol 17 no 1 April 1982).

DFI (2019) Guide to support fluids for deep foundations. Deep Foundation Institute.

Ding, J.Z. McIntosh, K.A. and Simon, R.M. (2015) New devices for measuring drilled shaft bottom sediment thickness, The Journal of the Deep Foundation Institute, Vol 9, No 1, pp42 to 47.

Fellenius B.H. (2019). Basics of Foundation Design. Pile Buck International, Inc., Vero Beach, FL, Electronic Edition, www.Fellenius.net, 484 p.

Fleming, Weltman, Randolph & Elson (2009) "Piling Engineering". 3a ed. Taylor & Francis.

- Huder, J. (1972) Stability of bentonite slurry trenches with some experiences in Swiss practice, Int Conf SMGE IV-9, Proc 5th European Conference in SM and FE, Madrid, Vol 1, pp 517-522.
- Hutchinson, MT, Daw, GP, Shotton, P. and James AN (1975) The properties of bentonite slurries used in diaphragm walling and their control, Institution of Civil Engineers Conference on diaphragm walls and anchorages.
- Jefferis, S.A. (2014). Grouts and slurries, in: The Construction Materials Reference Book, second edition, Doran, D.K. and Cather, R., Editors, Routledge.
- Jefferis and Lam, (2013) Polymer support fluids : use and misuse of innovative fluids in geotechnical works, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
- Jefferis, S.A. and Lam, C. (2017) Using density to determine the solids content of construction slurries, Proc 19th Int. Conf. on SM and GE, Seoul, S Korea, pp1695 – 1698.
- Jones, A.E.K and Holt, D.A (2004) Design of laps for deformed bars in concrete under bentonite and polymer drilling, The Structural Engineer. Vol 82. No 18.
- Lake, Lam, Troughton, Jefferis, Suckling, The effect of support fluid on pile performance – a field trial in east London, Technical Paper, Ground Engineering, 2010.
- Lam, C. Jefferis, S.A. and Martin, C.M. (2014) Effect of polymer and bentonite support fluid on concrete – sand interface shear strength, Geotechnique 64, No. 1.28-39.
- Lam, C. Jefferis S.A. and Goodhue Jr, K.G. (2010) Observations on viscosity reduction of PHPA polymer support fluids, In Proceeding of International conference sessions of GeoShanghai 2010, 3-5 June 2010, Shanghai, China.
- Lancellotta & Cavalera (1999) Fondazioni. MacGraw-Hill.
- Lesemann et al, (2016) Analytical stability checks for diaphragm wall trenches and boreholes supported by polymer solutions, Proceedings of 13th Baltic Sea geotechnical conference, Lithuania.
- Permien and Lagaly, (1995) The rheological and colloidal properties of bentonite dispersions in the presence of organic compounds, Clays and Clay Minerals, Vol. 43, No.

2, 229-236.

Terzaghi, K. (1936). "Stress distribution in dry and saturated sand above a yielding trapdoor." Proc., 1st Int. Conf. on Soil Washbourne (1985) The stability of vertical shaft excavations, Ground Engineering, July 1985, 16-19.

Tomlinson & Woodward (2008) "Pile Design and Construction Practice" 5a Ed. Taylor & Francis.

UNI EN 1536 Lavori geotecnici speciali – pali trivellati.

Viggiani, Mandolini, Russo (2012) Piles and Pile Foundations. Spon Press.

## 9– SITOGRAFIA

[www.bentonite.it](http://www.bentonite.it) [www.inftub.com](http://www.inftub.com) [www.laviosa.com](http://www.laviosa.com)

[www.univpm.it/Entra//Ingegneria\\_1/docname/Alleg](http://www.univpm.it/Entra//Ingegneria_1/docname/Alleg)

[ati](http://ati) [www.96.unimol.it](http://www.96.unimol.it)

[www.lavoro.gov.it](http://www.lavoro.gov.it)

[www.regionemarche.it](http://www.regionemarche.it)

[www.zenstore.it](http://www.zenstore.it)

[www.albaedile.it](http://www.albaedile.it)

[www.adriatech.com](http://www.adriatech.com)

[www.formedil.it](http://www.formedil.it)

[www.soeg.it](http://www.soeg.it)

[www.brandonivalves.com](http://www.brandonivalves.com)

[www.poggi-spa.com](http://www.poggi-spa.com)

[www.aquaculturealliance.org](http://www.aquaculturealliance.org)