

# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE**

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

**CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E CONTROLLO DI FANGHI DI**

**PERFORAZIONE PER IL MICROTUNNELING**

**Relatore: Prof.ssa Simonetta Cola**

**Laureando: Francesco Mardollo**

**Anno Accademico 2012/2013**



<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>MICROTUNNELING .....</b>	<b>7</b>
2.1	STORIA ED CARATTERISTICHE DEL MICROTUNNELING .....	8
2.1.1	<i>Sistema di rimozione dello smarino</i> .....	12
2.1.2	<i>Sistema di guida</i> .....	17
2.1.3	<i>Sistema di lubrificazione</i> .....	18
2.2	DESCRIZIONE ATTREZZATURE E METODO DI SCAVO .....	20
2.3	PARTICOLARI DELLA PERFORAZIONE.....	28
2.3.1	<i>Confinamento del fronte</i> .....	29
<b>3</b>	<b>REOLOGIA .....</b>	<b>31</b>
3.1	SOLLECITAZIONI CHE PRODUCONO SFORZI .....	32
3.2	VISCOSITÀ .....	33
3.3	CLASSIFICAZIONE DEI FLUIDI .....	35
3.3.1	<i>Fluidi newtoniani</i> .....	35
3.3.2	<i>Fluidi non newtoniani</i> .....	36
<b>4</b>	<b>FANGHI DI PERFORAZIONE .....</b>	<b>41</b>
4.1	FUNZIONI DEI FANGHI DI PERFORAZIONE .....	43
4.1.1	<i>Rimozione smarino dal fronte</i> .....	43
4.1.2	<i>Controllo pressione del fronte</i> .....	46
4.1.3	<i>Mantenere la stabilità del foro</i> .....	46
4.1.4	<i>Ridurre al minimo l'impatto ambientale</i> .....	47
4.2	IL COMPONENTE PRINCIPE DEL FANGO DI PERFORAZIONE: LA BENTONITE .....	48
4.3	ALTRI COMPONENTI DEI FANGHI DI PERFORAZIONE .....	54
4.4	PROVE SU FANGHI DI PERFORAZIONE .....	57
4.4.1	<i>Densità</i> .....	58
4.4.2	<i>Viscosità</i> .....	60
4.4.3	<i>Filtrazione</i> .....	63
4.4.4	<i>Contenuto in sabbia</i> .....	65
4.4.5	<i>Kugel Harp</i> .....	66
4.4.6	<i>Controllo pH</i> .....	67
4.4.7	<i>Controllo durezza e conducibilità elettrica</i> .....	69
<b>5</b>	<b>CANTIERE DI MICROTUNNELING.....</b>	<b>71</b>

<b>6</b>	<b>PROVE SU FANGHI DI PERFORAZIONE .....</b>	<b>75</b>
6.1	PROVE IN SITO.....	75
6.1.1	<i>Cantiere numero 1.....</i>	<i>76</i>
6.1.2	<i>Cantiere numero 2.....</i>	<i>83</i>
6.1.3	<i>Confronto tra bentonite A e bentonite B.....</i>	<i>89</i>
6.2	PROVE IN LABORATORIO.....	90
6.2.1	<i>Analisi chimica.....</i>	<i>90</i>
6.2.2	<i>Determinazione dei Limiti di Atterberg .....</i>	<i>92</i>
6.2.3	<i>Aerometria .....</i>	<i>93</i>
6.2.4	<i>Analisi reometrica delle bentoniti A e B.....</i>	<i>93</i>
6.2.5	<i>Analisi reometrica approfondita della bentonite B .....</i>	<i>95</i>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>101</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>103</b>
<b>9</b>	<b>INDICE DELLE FIGURE .....</b>	<b>105</b>
	<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>109</b>

# **1 INTRODUZIONE**

Al giorno d'oggi le tecnologie per la realizzazione di opere sotterranee in ambito civile sono molteplici, ma principalmente si differenziano in due categorie: quelle "tradizionali" che prevedono uno scavo aperto fino alla superficie (scavo in trincea) o quelle più avanzate in grado di realizzare l'opera senza bisogno di compiere uno scavo a cielo aperto (tecnologie *trenchless* o *no-dig*) e che operano con macchine di scavo quasi completamente automatizzate.

Lo scavo "senza trincea" rappresenta un'ottima alternativa al cantiere "tradizionale", con vantaggi notevoli che vanno da una semplificazione della gestione logistica del cantiere (ridotto movimento di terra, cantiere con dimensioni molto contenute e fisso, ecc.), ai tempi di esecuzione contenuti, fino al quasi annullamento dell'impatto ambientale. Inoltre, permette l'installazione o la ristrutturazione di condotte limitando i disagi causati all'ambiente sovra-terra, in particolare ai residenti e alla mobilità in aree urbane.

Grazie a questi e a molti altri aspetti positivi, lo sviluppo del *no-dig* ruota sulla possibilità di eseguire interventi importanti, per lunghezze considerevoli e a profondità rilevanti, senza che in superficie si risenta degli effetti collaterali di uno scavo sotterraneo.

Una delle tecnologie più importanti è sicuramente il Microtunneling, nato alla fine degli anni settanta e in costante sviluppo da allora.

Questa tecnica è attualmente utilizzata per la posa sotterranea di servizi (condotte forzate, tubazioni, fognature) anche in aree urbane.

Il Microtunneling, per sua stessa natura tecnologica, si avvale dei fanghi di perforazione (*Drilling Mud*) essenziali per lo svolgimento delle lavorazioni di scavo.

Questi fanghi giocano un ruolo fondamentale nello svolgimento dell'opera in quanto assolvono diverse mansioni. Per questo le caratteristiche del fango di perforazione devono essere valutate accuratamente sia nella fase di scelta del fango più adeguato sia durante tutta la realizzazione dei lavori al fine di ottenere un risultato che soddisfi le premesse elencate.

Nello studio svolto ho analizzato nel dettaglio la tecnologia del microtunneling, grazie anche all'esperienza acquisita durante uno stage trascorso in due cantieri di perforazione

in Nord Italia. La mia attenzione si è concentrata in particolare sullo studio dei fanghi di perforazione, esaminando le caratteristiche che essi devono avere e quali variabili possono influenzarle durante la realizzazione dell'opera. Ho infine svolto alcune prove di controllo in sito e in laboratorio sui fanghi utilizzati nei cantieri visitati.

## 2 MICROTUNNELING

Il Microtunneling è una delle tecniche di perforazione trenchless maggiormente utilizzata nel campo delle costruzioni in sotterraneo.

È attualmente molto usata per attraversamenti (stradali, ferroviari e fluviali) e in particolare nelle aree urbane [1].

I principali interventi possibili con questa tecnica sono: la posa di condotte idriche e fognarie, sia a gravità che in pressione, e l'installazione nel sottosuolo di condotte multiservizi.

Sono utilizzati anche per applicazioni di tipo geotecnico, tra cui la realizzazione di sistemi di drenaggio per la stabilizzazione di versanti e di interventi di bonifica di siti inquinati.

L'impatto ambientale di questa tecnica è minimo, il che la rende adatta anche a interventi in aree protette o comunque vincolate; inoltre ha una produzione ridotta di materiale di scavo, con conseguente convenienza anche economica per il loro smaltimento.

L'abbattimento dei costi è reso ancora più convincente se poi si considera che le tecniche *trench-less* sono del tutto insensibili alle sospensioni altrimenti imposte da avverse condizioni climatiche o da fasce orarie di rispetto, perciò il lavoro può essere distribuito in tutto l'arco delle 24 ore riducendo la durata complessiva dei lavori.

Anche dal punto di vista logistico, gli spazi necessari sono molto ridotti rispetto a quelli propri delle tecniche tradizionali a cielo aperto e sono sufficienti dai quattro ai sei addetti per il corretto svolgimento di tutte le operazioni di cantiere.

Tutti questi aspetti, contribuiscono a dare un'idea di quali vantaggi sia possibile ottenere facendo ricorso al *no-dig*.

Di contro si evidenzia comunque che l'investimento economico iniziale per le aziende è molto rilevante rispetto alle tecniche di scavo tradizionali, anche se il mercato, di recente, sembra aver manifestato un certo interesse, grazie ai notevoli pregi propri del *no-dig*, tale da accrescerne la competitività.

## 2.1 STORIA ED CARATTERISTICHE DEL MICROTUNNELING

La tecnica del Microtunneling (figura 1) è relativamente recente: le prime macchine sono state utilizzate in Giappone nel corso del 1970. In Italia, il primo cantiere risale alla metà degli anni ottanta.



Figura 1Cantiere di Microtunneling.

Rispetto alle tecniche di scavo in trincea, le quali richiedono in genere dei metodi tradizionali di natura tecnica piuttosto bassa, la tecnica *trench-less* si accostano ai metodi di lavoro in sotterraneo e quindi richiedono un approccio altamente tecnico e specifico.

La tecnica del Microtunneling consente l'installazione di condotte in tratti rettilinei di lunghezza che vanno da una decina fino a diverse centinaia di metri.

Essendo possibile modificare la direzione e la pendenza, questa procedura è particolarmente indicata per reti di acque reflue con flusso a gravità, così come per reti di acqua potabile, gasdotti e telecomunicazioni.



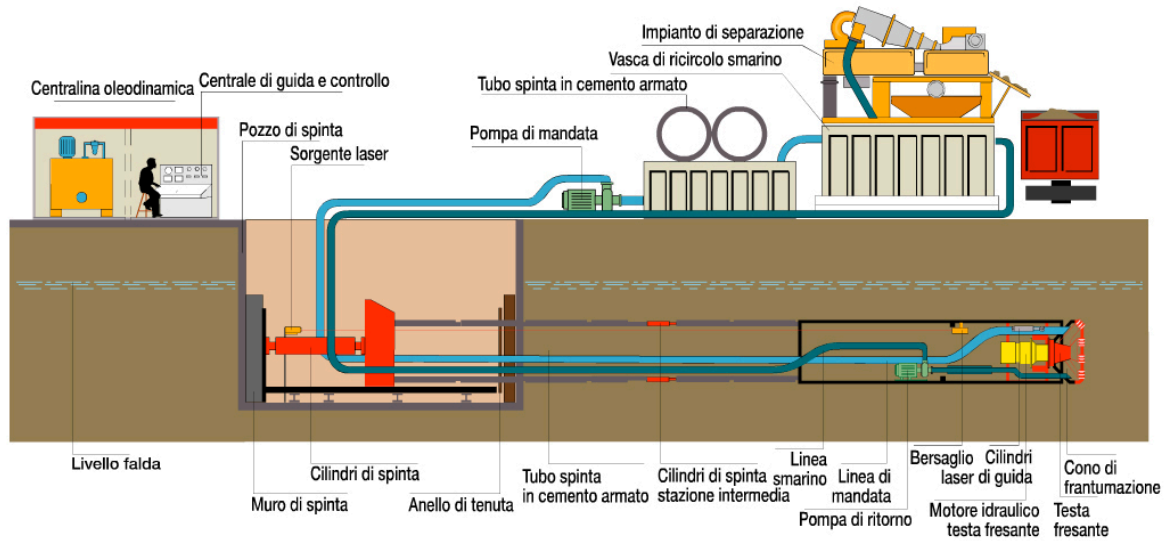


Figura 2 Schema cantiere di Microtunneling.

Il principio del Microtunneling è simile a quello della TBM (Tunnel Boring Machine), come si vede in figura 2, il sistema è composto dai seguenti sotto-sistemi cooperanti [1]:

- Sistema MTBM (MicroTunnel Boring Machine), ossia l'unità operativa che provvede allo scavo vero e proprio;
- Sistema di spinta;
- Sistema di rimozione del materiale scavato (smarino);
- Sistema di guida laser e controllo remoto dell'MTBM;
- Sistema di lubrificazione

Il sistema MTBM, a seconda dei sistemi di rimozione del materiale, si distingue in [1]:

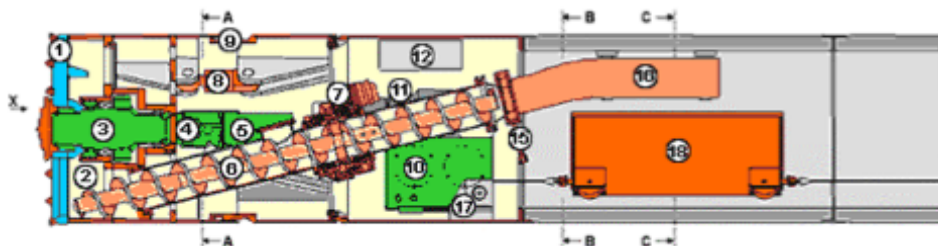


Figura 3 Schema del sistema Auger Boring (fonte Herrenknecht.com).

#### a) Auger Boring

Il sistema Auger (letteralmente “trivella”) Boring vede alloggiata una coclea all’interno del tubo (figura 3); il materiale scavato dalla testa passa attraverso lo scudo e, trasportato grazie alla rotazione della vite, può essere raccolto in un apposito recipiente che va svuotato nel momento in cui la trivellazione è sospesa per il posizionamento del conico successivo. Infine, il materiale rimosso è fatto risalire in superficie attraverso il pozzo di spinta e adeguatamente smaltito.

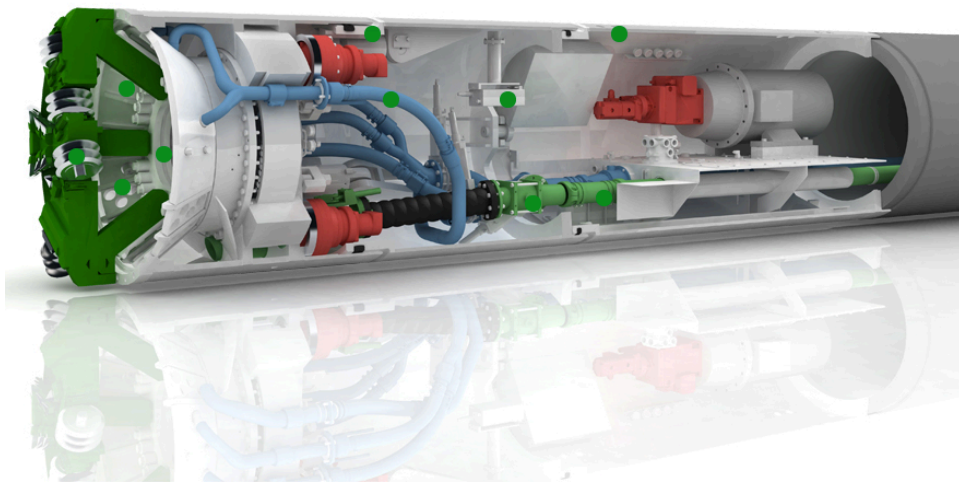


Figura 4 Particolare sistema perforatrice Slurry System (fonte Herrenknecht.com).

#### b) Slurry System (o Vacuum System)

Il metodo slurry system utilizza il fluido di perforazione: il circuito di circolazione si compone del tratto di mandata, in cui il fluido “pulito” è spruzzato avanti dalla testa attraverso ugelli, opportunamente regolati in direzione e pressione (figura 4). Contestualmente si esegue lo scavo determinando, in tal modo, il rimescolamento del terreno frantumato con il fluido stesso. La sospensione che si crea può, a questo punto, essere pompata all’interno del circuito di ritorno che termina, in superficie, in vasche di sedimentazione o di centrifuga; qui avviene la “ripulitura”, in seguito alla quale il fluido è reimmesso nel circuito una volta che abbia assunto caratteristiche chimico-fisiche più simili possibile a quelle della miscela iniziale. Su uno schema operativo di questo tipo si basa ad esempio la trivellazione mediante EPBM (figura 5),

che consente la modulazione della pressione del fluido in uscita per realizzare il bilanciamento della spinta idrostatica e del terreno, agenti sullo scudo in avanzamento.

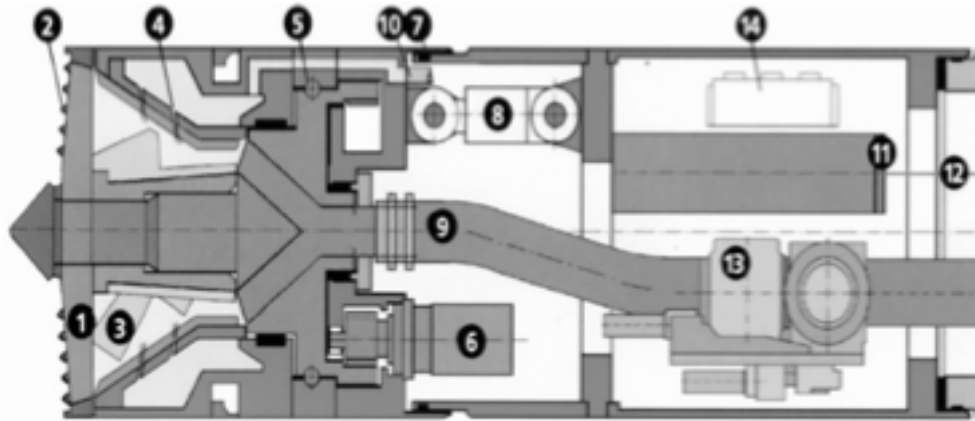


Figura 5 Particolare di macchina perforatrice con sistema EPBM.

In alternativa al pompaggio, nel vacuum system si prevede di rimuovere il materiale scavato per aspirazione, creando condizioni di vuoto nel tratto di ritorno del circuito di circolazione del fango di perforazione.

#### c) Pilot Tube MicroTunneling (PTMT)

Il Pilot Tube MicroTunnelling (PTMT), infine, è un sistema che potremmo definire ibrido: infatti, la tecnica esecutiva è la stessa del microtunnelling (figura 6), però utilizza una testa fresante tipica del Directional Drilling, retraibile all'indietro nella condotta. La peculiarità del PTMT risiede proprio in quest'ultimo aspetto: il fatto che la fresa possa essere movimentata in entrambi i sensi lungo la direzione di perforazione rende superfluo l'allestimento di un pozzo di arrivo per il recupero dell'attrezzatura e consente l'esecuzione di trivellazioni cieche.

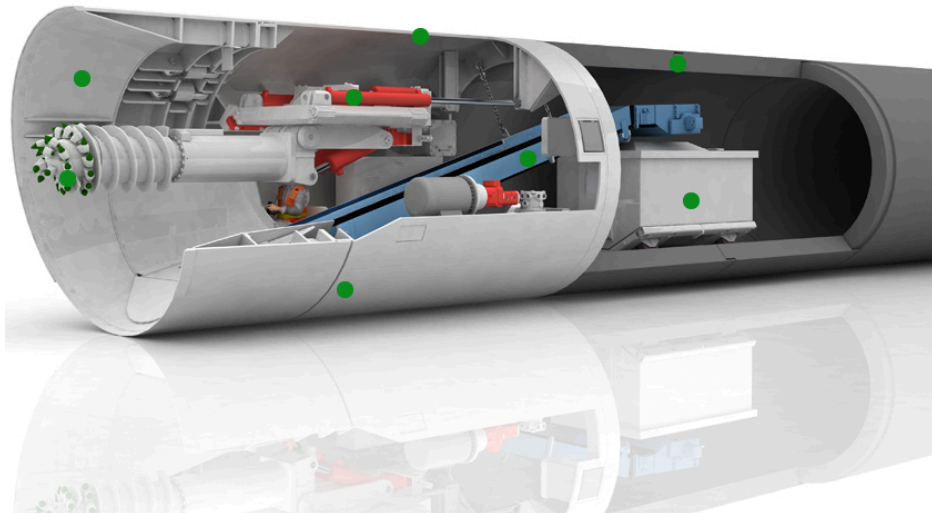


Figura 6 Particolare del sistema PTMT (fonte Herrenknecht.com)

### 2.1.1 SISTEMA DI RIMOZIONE DELLO SMARINO

Lo smarino è mescolato con il fango di perforazione e trasportato dalle pompe nella condotta in pressione attraverso il tunnel fino in superficie [2]. La velocità delle pompe è regolata a seconda della velocità di trivellazione, della tipologia di materiale scavato e dalla pressione che si deve mantenere sul fronte di scavo. La velocità è monitorata costantemente e variata a seconda delle condizioni di trivellazione, che durante le manovre possono variare repentinamente. Una volta giunto in superficie, il fango di perforazione viene inviato all'impianto di separazione (figura 7).

L'impianto di separazione ha la funzione di separare la parte fluida (fango di perforazione) dalla parte solida (detrito di scavo o, comunemente detto, smarino). Una volta separato, il fango di perforazione torna in pressione alla macchina perforatrice con percorso a ciclo chiuso. Lo smarino invece, separato dall'impianto, viene stoccato nel piazzale pronto per essere allontanato dal cantiere.



*Figura 7 Impianto di separazione*

L'impianto si occupa di separare meccanicamente lo smarino dal fango di perforazione.

È suddiviso in varie parti a seconda della granulometria dello smarino [3].

La funzione dell'impianto è quella di far tornare il fango di perforazione qualitativamente uguale a quello inizialmente immesso nel circuito di scavo, quindi di estrarre completamente ogni traccia di solido all'interno. Per fare ciò l'impianto è composto da vari stadi, disposti "a cascata", per separare dai solidi con granulometria più grande (ciottoli e ghiaia in figura 8), fino ai solidi più piccoli (sabbia fine e limo).



*Figura 8 Particolare dell'impianto di separazione dello smarino, a sinistra due unità che separano la sabbia in parallelo, a destra per la ghiaia anch'esse in parallelo ma disposte una sopra l'altra*

Le prime due unità di separazione operano sulla frazione granulare e sono munite di vagli di maggior diametro.

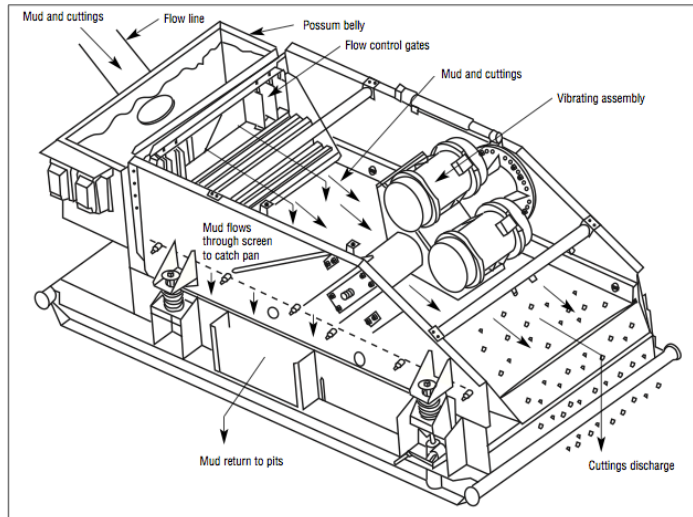


Figura 9 Schema del tappeto vibrante per sabbie e ghiaie.

Il sistema funziona mediante vibrazione di un tappeto forato (vaglio) posto in posizione leggermente inclinata (circa 15°) rispetto all'orizzontale come si vede nella figura 9. La parte filtrata viene trattenuta ed espulsa all'esterno mentre il fango prosegue in suo percorso nell'impianto per gravità. A seconda della granulometria del terreno perforato è possibile aumentare il numero di vagli dissabbiatori e variare la dimensione dei vagli.



Figura 10 Particolare dell'impianto di separazione: il Desilter.

Per eliminare la parte limosa dal fango bentonitico è utilizzato il *Desilter* (figura 10).

Questo tipo di vaglio è costituito anch'esso da un tappeto vibrante inclinato ma prevede un sistema diverso per l'introduzione del materiale.

Nella parte alta presenta un grande numero di separatori a idro-ciclone disposti in parallelo tra loro.

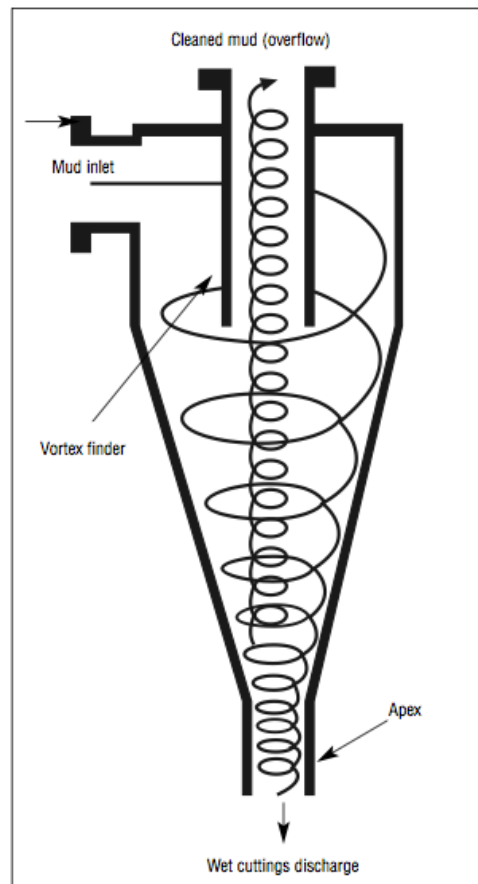


Figura 11 Schema funzionamento dell'idro-ciclone.

Il fango di perforazione, precedentemente ripulito dalla parte granulare, viene inserito all'interno del ciclone ad asse verticale (figura 11). Soggetto a traiettoria curvilinea e a forza di gravità, il fango perde la sua parte solida più pesante nella parte bassa del ciclone mentre esce "alleggerito" dalla parte alta [3].



Figura 12 Particolare dell'impianto di separazione: la centrifuga.

Infine, in presenza di una frazione argillosa all'interno del terreno è opportuno usare anche la centrifuga (figura 12). A differenza dei vibrovagli, la centrifuga separa la parte argillosa dal fango grazie alla forza centrifuga sprigionata dalla rotazione del cestello (figura 13).

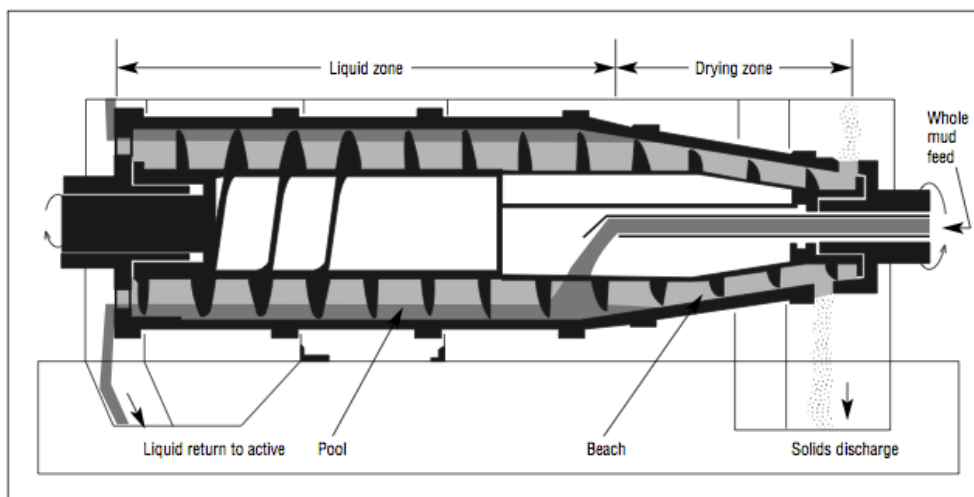


Figura 13 Schema centrifuga.



La velocità di rotazione della centrifuga si attesta attorno ai 2000 giri al minuto. Questo dato è da tenere in considerazione dal momento che, un'eccessiva velocità di rotazione romperebbe i legami tra bentonite ed acqua e andrebbe ad inficiare la qualità del fango di perforazione. Questo e altri dettagli verranno analizzati nel capitolo seguente [3].

### 2.1.2 SISTEMA DI GUIDA

Il controllo costante della traiettoria della macchina perforatrice, è svolto utilizzando un raggio laser posto nel pozzo di partenza sul muro di spinta che, riflettendo su un apposito bersaglio presente sulla sonda, aiuta a visualizzare la deviazione della traiettoria così da monitorare gli spostamenti verticali e orizzontali (figura 14).

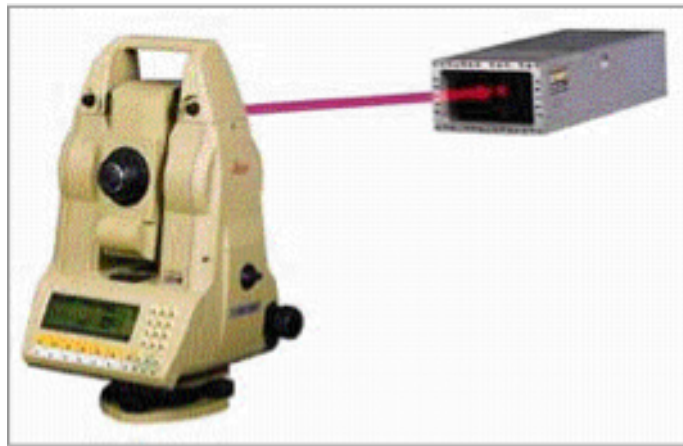


Figura 14 Sistema di guida laser: strumento di misura a sinistra e target sulla destra (fonte Herrenknecht.com).

Nel caso la deviazione diventi eccessiva è possibile correggere la traiettoria della macchina perforatrice operando sui pistoni idraulici posti al suo interno (sezione A-A della figura 15).

Generalmente si tratta di 4 cilindri collocati a 90° tra loro e consentono, tramite la loro apertura e chiusura, di gestire e correggere in continuo la traiettoria della macchina [1].

Il monitoraggio può essere svolto manualmente dall'operatore della macchina, ma è possibile anche impostare all'inizio dell'opera il tracciato di progetto e tarare la correzione e la variazione della pendenza in automatico.

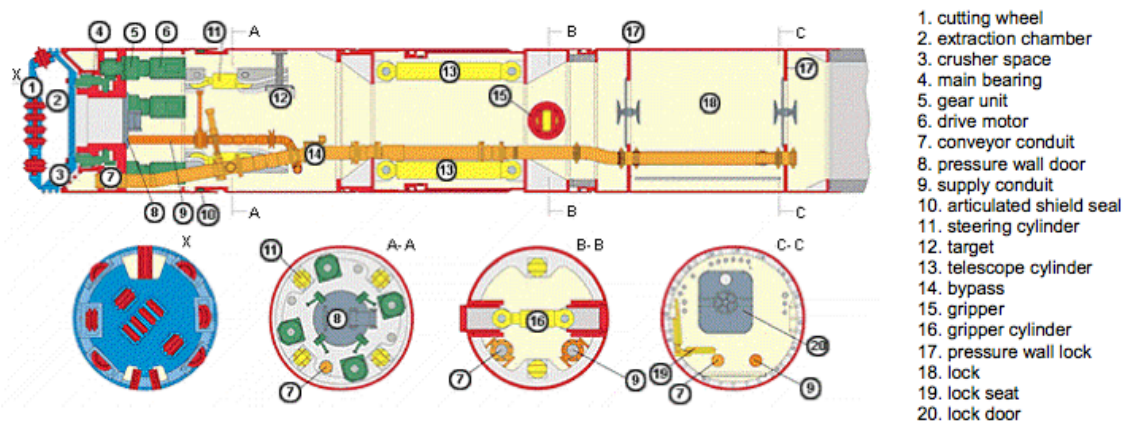


Figura 15 Particolare del microtunneler: nella sezione A-A si notano i cilindri di regolazione per la correzione della traiettoria (fonte Herrenknecht.com).

Per i tratti di tracciato nei quali, per conformazione geometrica, la visuale all'esterno del pozzo è impedita, i riferimenti per il sistema di guida sono costituiti da punti mobili solidali alle tubazioni in moto. In questo caso le coordinate di riferimento vengono dedotte da approssimazioni sulla base del tracciato di perforazione reimpostate, delle tendenze di guida e della progressiva di avanzamento rilevata tramite una rotella metrica. Come risultato, ciascuna misurazione viene effettuata dal pozzo di spinta fino alla macchina perforatrice. A intervalli prestabiliti di tempo o distanza il sistema si orienta automaticamente in relazione al bersaglio e determina la posizione del tubo di riferimento e della macchina.

Le correzioni al sistema di guida vengono fatte ad intervalli regolari misurando, tramite rilievo topografico, la posizione effettiva della fresa e correggendo le coordinate indicate dal sistema. A quel punto, in caso di deviazioni, è possibile solo introdurre delle contromisure tali da recuperare la direzione corretta riducendo l'effetto dell'errore commesso.

### 2.1.3 SISTEMA DI LUBRIFICAZIONE

Durante la trivellazione l'intero tratto di condotta inserita fino a quel momento nel terreno viene movimentata. Nel caso di condotte molto lunghe e di impiego di stazioni intermedie, come sarà spiegato in seguito, solo una parte della condotta inserita sarà mossa, ma tale parte ha lo stesso una lunghezza rilevante (circa 100 m) [1].

Il risultato di questo movimento è l'attivazione di un attrito radente dinamico sulla parte esterna della condotta a contatto con il terreno. È indispensabile tener conto di questo attrito durante la realizzazione dell'opera, pena il verificarsi di un aumento considerevole delle tensioni di spinta e, nel peggiore dei casi, del blocco completo della condotta.

Per ovviare al problema, durante la perforazione una miscela di bentonite ed acqua, con una concentrazione solida pari a circa il 9%, è utilizzata come lubrificante. La pressione di iniezione varia a seconda della contropressione esercitata dal terreno e dalla falda (figura 16).

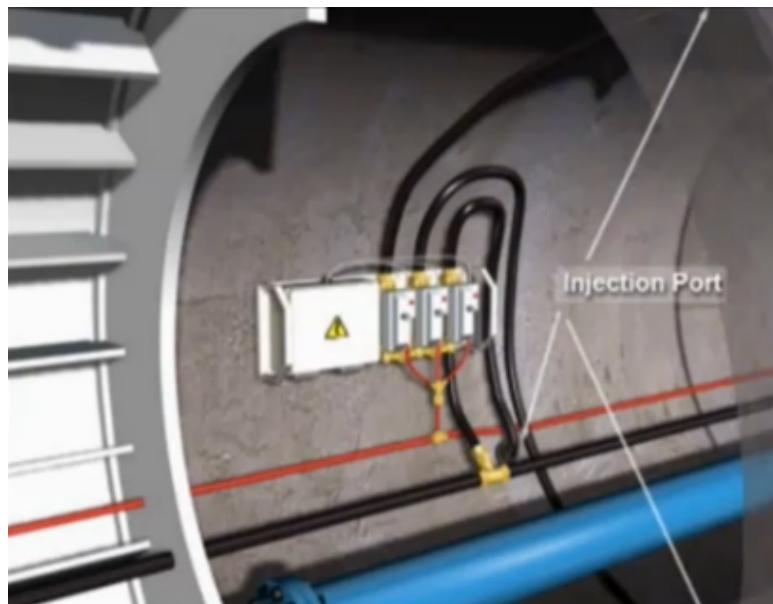


Figura 16 Particolare del sistema di lubrificazione: stazione di iniezione all'interno della condotta (fonte Herrenknecht.com).

Il lubrificante si dispone attorno alla condotta rivestendola esternamente e andando ad occupare lo spazio anulare libero dovuto alla differenza tra i diametri della testa fresante e della condotta in calcestruzzo. Questa zona è definita *Overcut* (letteralmente "sovrascavo"). Lo spessore del vuoto creato sulla superficie laterale della colonna dipende da vari fattori (diametro di perforazione, tipologia di testa fresante, caratteristiche del materiale ecc.); in genere si attesta tra i 2 e i 5 cm.

Il fluido di lubrificazione ha lo scopo di stabilizzare le pareti dello scavo evitando la chiusura del foro e riducendo gli attriti, diminuendo conseguentemente la forza complessivamente esercitata dal sistema di spinta (figura 17).



Figura 17 Overcut con fluido di lubrificazione in pressione (fonte Herrenknecht.com).

Al fine di evitare il rischio di subsidenza è necessario che lo spazio tra terreno e condotta sia sempre occupato dalla miscela di lubrificazione.

Una volta terminata la perforazione, in particolari condizioni geologiche o zone sensibili, può essere necessario iniettare delle miscele cementizie nel sovrascavo per evitare fenomeni di subsidenza.

## 2.2 DESCRIZIONE ATTREZZATURE E METODO DI SCAVO

La gran parte dell'attività lavorativa legata all'avanzamento della perforazione con la tecnica del microtunnel viene svolta nel così detto "pozzo di spinta". La sua funzione è quella di alloggiamento della stazione principale di spinta e di base di partenza della perforazione ad un livello inferiore a quello del piano campagna. Il pozzo è progettato per contrastare la spinta imposta alla tubazione durante l'avanzamento e per avere un franco minimo di copertura evitando cedimenti in fase di partenza.

La postazione di spinta può essere realizzata in vari modi, sfruttando le tecniche note in ambito di fondazioni superficiali (palancolati, strutture autoaffondanti, pali secanti, diaframmi, ecc.). Il progettista, assieme all'impresa esecutrice, ha il compito di definire la tipologia di struttura più adatta sulla base di considerazioni tecniche ed economiche.

Nel caso in oggetto, data l'elevata permeabilità degli strati superficiali di suolo e la modesta pressione idrostatica (0,2-0,3 bar), l'impresa esecutrice ha optato per il pozzo palancolato.



Figura 18 Pozzo di spinta.

Il pozzo di spinta (figura 18) viene realizzato mediante l'infissione preliminare di palancole. Una volta infisse, si rimuove il terreno all'interno fino alla profondità di progetto.

In presenza di falda vi sono alcuni accorgimenti da prendere preliminarmente. Prima dello scavo è opportuno realizzare un tappo di fondo con tecnica *jet grouting* al fine di assicurare l'impermeabilità del pozzo di spinta per tutta la durata della costruzione dell'opera.

Dal pozzo di spinta inizia la perforazione vera e propria, realizzata con una testa fresante (*Microtunnel*) che avanza a spinta. Man mano che la perforazione ha luogo, vengono aggiunti i conci della condotta, fino al raggiungimento della lunghezza di progetto dove il *Microtunnel* è fatto risalire in superficie (figura 19).



*Figura 19 Microtunneler in superficie al termine dei lavori.*

Il pozzo di spinta presenta generalmente pareti rivestite per garantire sia la sicurezza rispetto alla spinta delle terre sia l'impermeabilità.

Il pozzo di partenza deve essere opportunamente dimensionato, visto che al suo interno deve esservi predisposto il muro di contropinta, generalmente in calcestruzzo armato, e un'opportuna slitta su cui far scorrere i conchi di condotta, oltre ai collegamenti con gli impianti per il controllo della direzione e il circuito del fango di perforazione (figura 20).



*Figura 20 Particolare del pozzo di spinta: muro di contropinta e slitta con martinetti idraulici.*

Ogni concio di calcestruzzo (figura 21), una volta calato fino alla base del pozzo di spinta, è posizionato sulla parete di approccio in corrispondenza di un elemento detto anello di centraggio; esso è dotato di guarnizioni necessarie per la prevenzione di venute d'acqua dal terreno, soprattutto se il microtunnel è realizzato sotto falda.



*Figura 21 Concio di calcestruzzo posizionato nel pozzo di spinta.*

Il gruppo di spinta idraulico, costituito da quattro pistoni ad escursione indipendente, esercita la spinta necessaria all'avanzamento della macchina perforatrice, mediante interposizione di un anello di tenuta, opportunamente dimensionato.

La funzione dell'anello è quella di mantenere il fluido di lubrificazione in pressione all'interno del sovrascavo, evitando cedimenti in corrispondenza della zona di uscita dal pozzo di spinta e conseguenti riflussi di materiale all'interno della postazione.

L'azione dei pistoni durante la fase di spinta è la medesima per ciascun pistone.

L'esecuzione di tracciati curvilinei è resa possibile dal controllo di quattro pistoni idraulici all'interno della sonda che, a necessità, sono regolati per impostare le opportune curvature.

Il controllo è svolto in modo automatizzato da un software interfacciato in continuo con il puntatore laser ed analizza l'avanzamento della perforazione.

In questo senso, il Microtunneling può essere annoverato tra le tecniche di perforazione a controllo attivo della traiettoria, quest'ultimo realizzato generalmente tramite un sistema

di puntamento laser che, durante tutta l'operazione di scavo, colpisce un bersaglio fotosensibile posto sullo scudo e a sua volta invia i dati di spostamento rispetto alla traiettoria impostata all'unità di controllo computerizzata posta in un container in superficie.

In tal modo è possibile monitorare, durante tutta la trivellazione, la posizione relativa tra la testa fresante e il punto fisso localizzato nel muro di contropinta. I dati trasmessi in tempo reale alla centrale di guida e controllo, permettono di garantire il rispetto delle imposizioni e delle tolleranze progettuali, e di provvedere, se necessario, alla correzione di scostamenti dal tracciato previsto [1].

All'inizio della perforazione, la spinta è esercitata direttamente sul *microtunneler*, che procede all'escavazione del terreno attraverso lo scudo fresante; quando la sezione terminale della sonda ha attraversato la parete di approccio del pozzo, si arretrano il gruppo di spinta e l'anello di distribuzione, si posiziona il primo concio e si riprende la perforazione (figura 22);



Figura 22 Fase di inserimento del nuovo tratto di condotta al termine della manovra di perforazione



Non appena anche il primo concio di condotta è inserito completamente nel terreno, si ripete l'arretramento e si aggiunge un successivo concio e così via finché il microtunneler non avrà raggiunto la distanza di progetto.

Essendo, a questo punto, terminata la perforazione, il dispositivo fresante può essere sganciato e riportato in superficie, mentre le pareti dello scavo rimangono sostenute dalla condotta infissa.

Una tecnica esecutiva di questo tipo mette in risalto come, al procedere della perforazione, la sezione su cui si applica la spinta di infissione sia via via più lontana dalla testa fresante, dove tale spinta "serve". Avviene infatti una dissipazione per attrito laterale dell'energia fornita, dissipazione il cui valore è proporzionale alla superficie laterale, ai parametri caratteristici di terreno e condotta; questa, di per se stessa, deve essere in grado di resistere alla spinta di infissione. Per questa ragione il materiale utilizzato è il calcestruzzo armato centrifugato.

Quando l'attrito è particolarmente elevato, la pratica esecutiva del microtunneling prevede l'inserimento, in sezioni prestabilite, di gruppi idraulici di spinta intermedi (detti anche stazioni intermedie o *Intermediate Jacking Stations*). (figura 23).



Figura 23 *Intermediate Jacking Station*.

C'è da osservare che il ricorso a questo accorgimento è condizionato dal diametro della perforazione: non è sempre possibile ricorrere ai gruppi intermedi, in quanto necessitano

di sufficiente spazio per essere materialmente posizionati. La pratica costruttiva ha mostrato come il sistema si adatti alla realizzazione di tunnel con lunghezze che variano da poche decine di metri ad oltre un chilometro. L'aumentare della lunghezza richiesta in genere coincide con un aumento del diametro di perforazione; i fattori che incidono in tale scelta sono:

- Necessità di accesso alla condotta per rilievi, manutenzioni e verifiche (necessità per tunnel al di sopra dei 100 m);
- Aumento delle forze di spinta in relazione alla lunghezza; questo comporta un incremento della sezione di spinta per ottenere maggiore resistenza;
- Attraversamento di formazioni geologiche complesse (ad esempio tratti in roccia);

Le applicazioni di microtunnelling in generale coinvolgono diametri di perforazione variabili da 150 mm a 3000 mm.

Altro aspetto rilevante riguarda il ricoprimento minimo da garantire, cioè lo spessore minimo di terreno al di sopra del tetto della condotta. Esso può stimarsi dell'ordine di 2 ÷ 3 volte il diametro del foro [1].

Sulla base delle esigenze richieste dall'opera, a differenza degli scavi meccanizzati realizzati con i sistemi a concetti e TBM, la tecnica del microtunnel consente di affrontare tratte curvilinee sia sull'orizzontale che sul piano verticale. Data l'assenza di impiego di mezzi all'interno della condotta, le pendenze di progetto possono spingersi a valori anche oltre il 30% sulla livelletta sia in salita che in discesa.

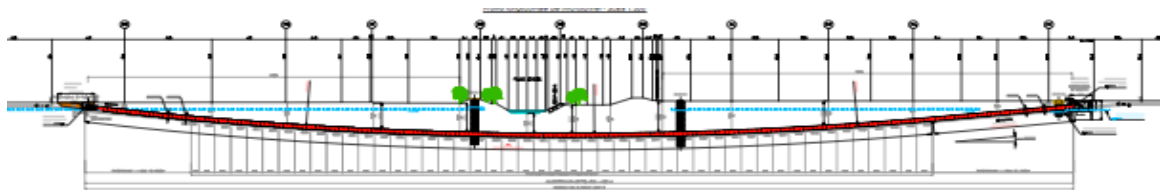


Figura 24 Esempio di progetto di microtunnel con tracciato curvilineo.

Si sono realizzati comunque anche attraversamenti con tracciato in tre dimensioni, cioè presentanti curvature nel piano orizzontale e verticale, sfruttando la deformabilità del giunto dei tubi costituenti la condotta (esempio in figura 24). Quando la perforazione è

stata ultimata, l'intercapedine tra tubo e terreno viene intasata con sabbia oppure con materiali opportunamente studiati, quali miscele di bentonite cemento ed acqua o fluidi a composizione più complessa, come le miscele auto-indurenti composte da inerte fine, cemento, acqua e polimero aerante - fluidificante.

In conclusione, il Microtunneling è una tecnica trenchless che si avvale di tecnologie derivate da quelle in uso per le grandi gallerie a sezione piena, di macchine concettualmente analoghe, per esempio, alla TBM, inferiori solo nelle dimensioni (MTBM).

### 2.3 PARTICOLARI DELLA PERFORAZIONE

La testa della macchina è dotata di una ruota tagliente composta da diversi strumenti utilizzati per far sgretolare il terreno sotto l'azione combinata di rotazione e spinta.

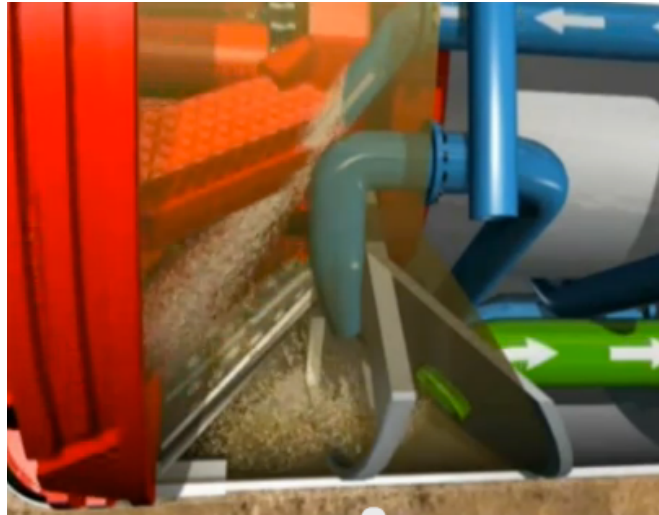


Figura 25 Particolare cono di perforazione (fonte Herrenknecht.com).

Un cono di frantumazione (figura 25), presente nella parte retrostante alla ruota di taglio, è destinato a ridurre la dimensione degli elementi più grandi per permettere la loro asportazione.

Esistono varie teste di taglio per vari tipi di terreno. Esse possono essere distinte dai loro utensili di taglio e dalla geometria della ruota, in particolare le dimensioni delle aperture per la compensazione della spinta del suolo (figura 26) [1].

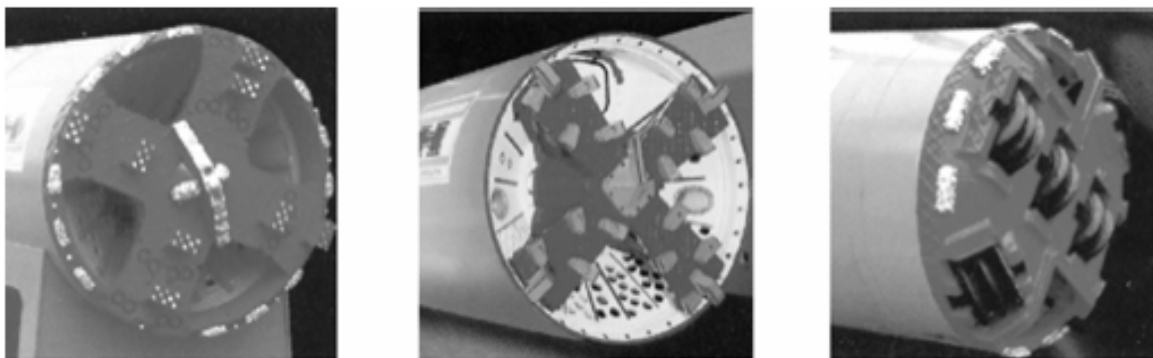


Figura 26 Differenti tipologie di teste fresanti: a sinistra per terreni granulari; al centro per terreni coesivi; a sinistra per ammassi rocciosi.

Per terreni di tipo sabbioso o ghiaioso (in particolare alluvionale), le ruote di taglio sono dotate di denti. Nel terreno accidentato questi denti hanno il compito di disgregare i blocchi, che poi vengono frantumati.

Per terreni coesivi (limi, argille e marne), le ruote di taglio sono dotate di strumenti (picconi o "scrappers"), che disgregano il terreno in chips, poi trasportare dal fango. Su alcune sonde, getti d'acqua ad alta pressione vengono spruzzati nelle feritoie delle ruote per evitare che l'argilla si impacchi ed intasi l'impianto.

Infine per le rocce, le teste di taglio sono dotate di frese rotative con piccole aperture. Con l'aiuto della spinta, le frese schiacciano la roccia mediante sforzi di taglio e trazione, che creano crepe e frammenti.

Queste macchine possono attraversare terreni rocciosi con una resistenza a compressione di 200 MPa. Questo tipo di fresa, utilizzata anche in terreni con importante presenza di trovanti rocciosi, non è adatta per terreni argillosi.

### 2.3.1 CONFINAMENTO DEL FRONTE

Per garantire la stabilità del fronte, la pressione di contatto della testa e la pressione di confinamento devono essere uguali rispettivamente alla pressione della terra e alla pressione dei pori d'acqua, se la perforazione viene effettuata sotto falda (figura 27).

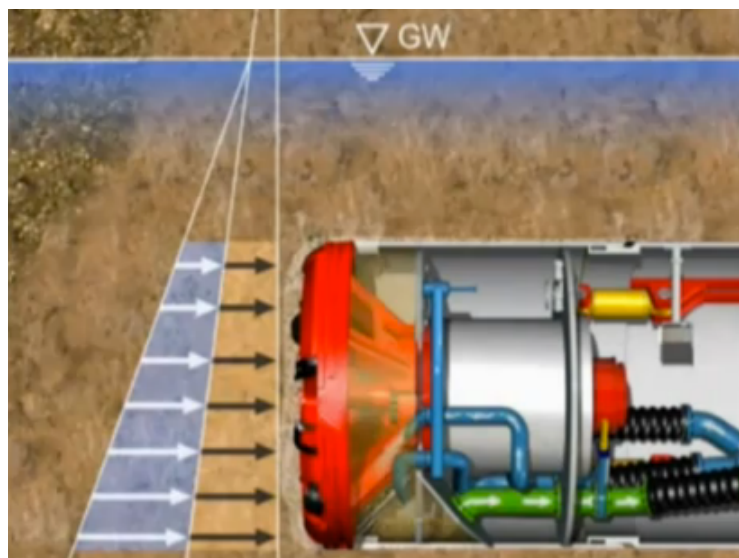


Figura 27 Schema delle pressioni che la sonda deve bilanciare durante la perforazione (fonte Herrenknecht.com).

La pressione totale così applicata sulla testa deve essere:

- Maggiore della pressione attiva della terra in modo da evitare sovra escavazione superficiale o nel peggiore dei casi subsidenza
- Inferiore della pressione passiva della terra in modo da evitare compattazione del terreno

La pressione idrostatica viene bilanciata attraverso la gestione della pressione del fango di perforazione iniettato sul fronte attraverso la testa della sonda. Così facendo, il controllo della pressione è più semplice e si può procedere a variazioni o arresti istantanei.

In funzione della permeabilità del suolo, e più precisamente della sua porosità, così come la pressione di supporto, il fluido di perforazione invaderà in modo differente l'intera superficie scavata secondo due processi susseguenti interdipendenti e simultanei: la filtrazione sotto pressione e la resistenza al taglio del fango [1].

La conseguenza di questi due processi è un deposito solido sulla superficie dello scavo: il così detto pannello di fango. Questo pannello è generalmente di due tipi:

- **Il pannello membrana o pannello esterno (alla formazione):** Consiste in una membrana sottile e impermeabile ottenuta in un terreno a bassa permeabilità: l'invasione del fango è veramente limitata
- **Il pannello a impregnazione o pannello interno (alla formazione):** Questo pannello si ottiene in più terreni aperti. In questo caso, il fango di perforazione penetra più in profondità nel terreno, da alcuni centimetri a diversi metri in terreni altamente permeabili. Questa zona impregnata costituisce appunto il pannello di fango interno.

Il tipo di pannello e l'efficienza nel bloccare l'invasione del fango di perforazione dipende direttamente dalla natura del terreno, dal supporto di pressione così come dalle caratteristiche reologiche e filtranti del fango di perforazione. Le caratteristiche reologiche sono ristrette generalmente al carico di snervamento, alla viscosità plastica e alla forza gel, come verrà spiegato nel capitolo successivo.

### **3 REOLOGIA**

Affrontando uno studio sui fanghi di perforazione, è opportuno dedicare preliminarmente ampio spazio allo studio della reologia, scienza fondamentale per questa tipologia di miscele.

La reologia è la scienza che studia la deformazione ed il flusso dei corpi: solidi, liquidi e gassosi [4].

Più propriamente si occupa delle relazioni tra sforzo applicato – deformazione – tempo.

Un corpo, soggetto ad una forza esterna, si deforma o altera la sua forma, temporaneamente o permanentemente; se la sua forma cambia continuamente in funzione del tempo si dice che scorre.

Un flusso è la deformazione a taglio plastica (irreversibile) che si verifica con una sollecitazione tagliante di intensità costante, conosciuta anche come deformazione viscosa [4].

Questo è il caso che riguarda i fluidi di perforazione e che andremo ad esaminare nel dettaglio.

*“Lo scopo della reologia è di individuare il sistema di forze necessario a causare una data deformazione o un flusso in un corpo, oppure di individuare la deformazione o il flusso risultante dall'applicazione di un dato sistema di forze ad un corpo”. (Fredrickson)*

### 3.1 SOLLECITAZIONI CHE PRODUCONO SFORZI

Consideriamo un fluido contenuto in un cubo trasparente deformabile:

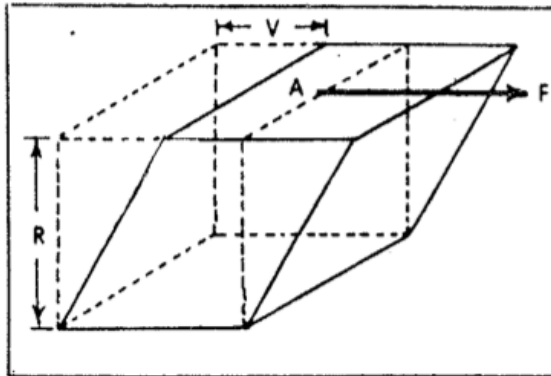


Figura 28 Cubo trasparente deformabile soggetto a forza  $F$ .

La forza  $F$ , applicata sulla faccia superiore del cubo, provocherà, nell'unità di tempo, lo spostamento  $V$  di detta faccia rispetto alla faccia inferiore (figura 28). Essendo uguali tutte le altre condizioni, è evidente che lo spostamento  $V$  diventerà maggiore all'aumentare della forza  $F$ , ma sarà minore se aumenta la superficie dell'area  $A$ . Lo spostamento sarà maggiore anche se l'altezza  $R$  aumenta.

La relazione tra spostamento  $V$ , la forza  $F$ , l'altezza  $R$  e l'area  $A$  può essere matematicamente così espressa:

$$V = f\left(R \frac{F}{A}\right)$$

Introducendo un coefficiente  $K$  che tiene conto delle diverse unità di misura, possiamo scrivere:

$$\frac{V}{R} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A} \cdot \frac{1}{K}$$

L'espressione  $\frac{V}{R}$  è la misura dello *shear*, cioè del valore del taglio del cubo.



La quantità:

$$S_r = \frac{V}{R}$$

è detta *shear rate* o velocità di taglio.

La quantità:

$$S_s = \frac{F}{A}$$

si chiama *shear stress* o sforzo di taglio (o scorrimento).

Pertanto si può riassumere:

$$S_r = S_s \frac{1}{K} \quad ; \quad \frac{S_r}{S_s} = \frac{1}{K}$$

$$\frac{S_s}{S_r} = K$$

Nel caso dei solidi, il coefficiente  $K$  è chiamato modulo di rigidità; nel caso dei fluidi è chiamato “viscosità” [4].

### 3.2 VISCOSITÀ

La viscosità è la più importante proprietà reologica di un fluido.

Poiché la classificazione reologica dei fluidi è basata soprattutto su di essa, è bene definire chiaramente il termine. Una delle definizioni più antiche (risalenti ad Isaac Newton) cita “*la resistenza che sorge dalla mancanza di slittamento delle parti di un liquido a parità di tutte le altre condizioni, è proporzionale alla velocità con cui le parti del liquido vengono separate le une dalle altre*”. Intesa come “mancanza di slittamento” proprio la viscosità [4].

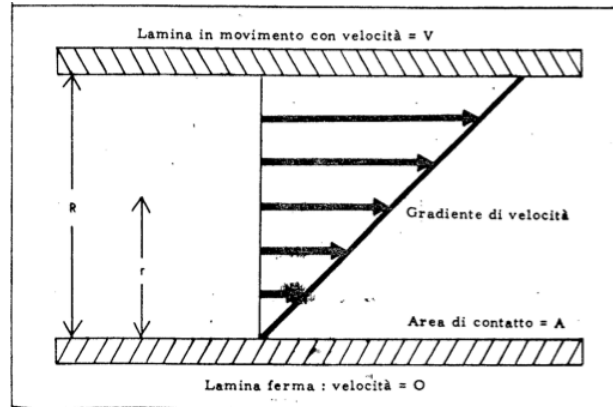


Figura 29 Coppia di lamine in movimento una rispetto all'altra.

Nella figura 29 è presente un liquido contenuto tra due lamine, una ferma e l'altra in movimento con velocità  $V$ .

Il gradiente di viscosità risulta:

$$G = \frac{V}{R} \cong \frac{dv}{dr}$$

Se l'area di contatto delle due "parti del liquido" è  $A$ , allora la "resistenza che risulta dalla mancanza di slittamento" è data dall'espressione:

$$F = A\mu \left( \frac{dv}{dr} \right)$$

dove:

$F$  è la forza necessaria per lo scorrimento

$\frac{dv}{dr}$  è la velocità di scorrimento o *shear rate*

$A$  è l'area di contatto

$\mu$  è la costante di proporzionalità chiamata coefficiente di viscosità o semplicemente viscosità.

Il coefficiente di viscosità quindi è noto come:

$$\mu = \frac{S_s}{S_r} = \frac{\text{sforzo di scorrimento}}{\text{velocità di scorrimento}}$$

Il coefficiente di viscosità è quindi la forza richiesta, per un'unità di area, per mantenere un gradiente di velocità unitario [4].

### 3.3 CLASSIFICAZIONE DEI FLUIDI

I fluidi sono stati classificati in due grandi classi [4]:

- Fluidi Newtoniani
- Fluidi non Newtoniani

#### 3.3.1 FLUIDI NEWTONIANI

I fluidi che seguono la legge di Newton della “Resistenza viscosa” sono definiti fluidi Newtoniani. Per questi fluidi, a pressione e temperatura costanti, lo sforzo di taglio è direttamente proporzionale alla velocità di taglio. Tali fluidi iniziano il loro movimento non appena viene loro applicata una forza di poco superiore allo zero.

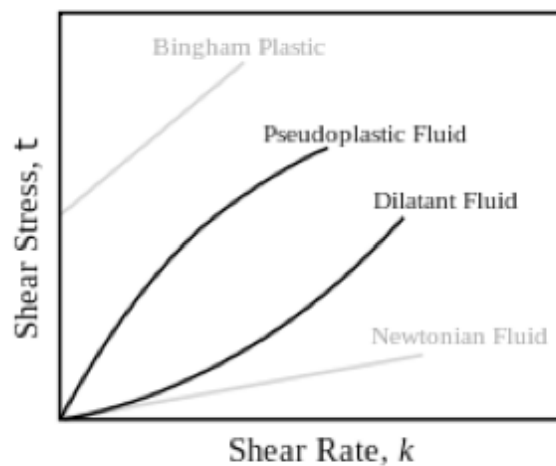


Figura 30 confronto dei diagrammi sforzo di taglio (shear stress) e velocità di taglio (shear rate) dei diversi fluidi.

Nella figura 31, il flusso dei fluidi Newtoniani è rappresentato da una retta che passa per l'origine e la sua inclinazione è proporzionale alla viscosità.

La viscosità di un fluido Newtoniano, sotto determinate condizioni di pressione e di temperatura, è una quantità costante ed è indipendente dallo sforzo di scorrimento. Essa caratterizza completamente il comportamento di un fluido Newtoniano ed è espressa dall'equazione:

$$\mu = \frac{S_s}{S_r}$$

Esempi di fluidi Newtoniani sono i gas, l'acqua, l'olio diesel e la glicerina.

### 3.3.2 FLUIDI NON NEWTONIANI

I fluidi che non seguono la legge di Newton sono chiamati Non Newtoniani a causa della loro non diretta proporzionalità tra sforzo e velocità di scorrimento. Infatti, per questi fluidi il rapporto sforzo-velocità di scorrimento non è costante, ma varia con la velocità di scorrimento; per questo il suddetto rapporto è chiamato "viscosità apparente" invece di viscosità [2].

I fluidi non Newtoniani vengono classificati in quattro principali categorie [2]:

- Fluidi le cui proprietà sono indipendenti dal tempo
- Fluidi le cui proprietà dipendono dal tempo
- Fluidi che dimostrano molte caratteristiche relative ai solidi
- Fluidi complessi

#### 3.3.2.1 FLUIDI NON NEWTONIANI INDIPENDENTI DAL TEMPO

I fluidi Non Newtoniani indipendenti dal tempo sono stati suddivisi in tre classi:

- Fluidi plastici di Bingham
- Fluidi pseudo-plastici
- Fluidi dilatanti

### **Fluidi plastici di Bingham**

I fluidi plastici di Bingham sono rappresentati, nel diagramma velocità-sforzo di scorrimento, da una retta che non passa per l'origine. Per iniziale il flusso è necessario un determinato sforzo di scorrimento il cui valore è conosciuto come "Yield Point" ( $S_{sy}$ ).

Il comportamento del fluido plastico di Bingham è rappresentato dall'equazione seguente:

$$(S_s - S_{sy}) = \mu_p \cdot S_r ; S_s > S_{sy}$$

dove:

$S_s$  è lo sforzo di scorrimento

$S_{sy}$  è lo Yield Point o limite di scorrimento

$\mu_p$  è la pendenza della curva sforzo di scorrimento in funzione della velocità di scorrimento, conosciuta come "viscosità plastica"

$S_r$  è la velocità di scorrimento

Esempi di fluidi che seguono il comportamento del modello plastico di Bingham sono certe sospensioni acquose di rocce e fanghi.

### **Fluidi pseudo-plastici**

I fluidi pseudo-plastici sono caratterizzati dalla curva rappresentata nella figura 30.

Il comportamento di questi fluidi è espresso dall'equazione seguente:

$$S_s = K(S_r)^n$$

dove  $n < 1$

$S_s$  è lo sforzo di scorrimento

$S_r$  è la velocità di scorrimento

$K$  e  $n$  sono costanti per un particolare fluido.

$K$  è la misura della consistenza, cioè più grande è il suo valore, più la viscosità del fluido è alta.  $n$  è la misura dell'indice di comportamento dei fluidi non Newtoniani. Per  $n=1$  il fluido è Newtoniano.

L'equazione che descrive i fluidi pseudo-plastici è nota anche come legge di potenza. La relazione tra sforzo e velocità di scorrimento, per quanto riguarda questa tipologia di fluidi, può essere espressa se si scelgono appropriati valori di  $K$  ed  $n$ .

La viscosità apparente diminuisce con l'aumentare della velocità di scorrimento. Esempi di fluidi pseudo-plastici sono soluzioni o fusioni di polimeri, sospensioni di pasta di carta o pigmenti.

### **Fluidi dilatanti**

Il comportamento reologico dei fluidi dilatanti, la cui curva è rappresentata della figura 30, è diverso da quello dei fluidi pseudo-plastici.

Essi si possono rappresentare con la seguente legge di potenza:

$$S_s = K(S_r)^n$$

dove  $n > 1$

La viscosità apparente dei fluidi dilatanti aumenta con l'aumentare della velocità di scorrimento.

Esempi di fluidi dilatanti sono le sospensioni in acqua di amido o mica, sabbie mobili o di spiaggia.

### 3.3.2.2 FLUIDI NON NEWTONIANI DIPENDENTI DAL TEMPO

Vi sono molti fluidi che non si possono rappresentare con le semplici equazioni date precedentemente a proposito dei fluidi non Newtoniani dipendenti dal tempo. La viscosità apparente dei fluidi non Newtoniani dipendenti dal tempo è in funzione non solo della velocità di scorrimento, ma anche del tempo di applicazione della forza. Questi fluidi si possono dividere in due classi:

- Fluidi tixotropici
- Fluidi reopectici

#### **Fluidi tixotropici**

I fluidi tixotropici possiedono una struttura la cui rottura dipende sia dal tempo sia dalla velocità di scorrimento. Tenendo quest'ultima come costante, la forza di scorrimento diminuisce quando la struttura inizia a rompersi. Essa può ricostruirsi se non intervengono forze esterne che lo impediscono.

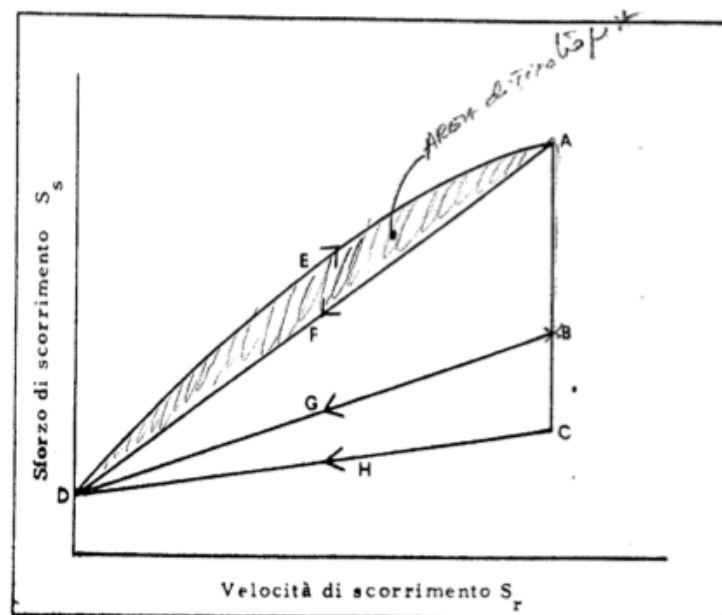


Figura 31 Reogramma di un fluido tixotropico.

La figura 31 mostra un esempio di reogramma di un fluido tixotropico ottenuto con un viscosimetro rotazionale [4].

L'area contenuta nei punti DEAFD è un'indicazione dell'entità di tixotropia. Se si tiene costante la velocità dopo il punto A, questo viene dapprima raggiunto mediante la curva DEA, quindi lo sforzo di scorrimento decresce lungo la retta AB fino a che non si raggiunge il punto più basso C. Nessuna altra rottura strutturale avviene al di sotto del punto C per quella velocità di scorrimento costante. Se questa velocità viene ridotta, si ottiene la curva CHD, però sono possibili un numero infinito di curve intermedie, come ad esempio la curva BGD.

Esempi di fluidi tixotropici sono la maionese, le vernici, gli inchiostri e i fanghi di perforazione.

### **Fluidi reopectici**

I fluidi reopectici tendono a costruire una struttura quando sono fatti scorrere a basse velocità; la loro viscosità apparente, a queste condizioni, aumenta. Se la bassa velocità contribuisce a costruire la struttura, l'alta velocità tende a distruggerla.

Esempi di tali fluidi sono le sospensioni di gesso in acqua.

### *3.3.2.3 FLUIDI COMPLESSI*

Vi sono molti fluidi che non rientrano in nessuna delle categorie discusse; il loro legame sforzo-velocità di scorrimento non si può esprimere con un'equazione matematica.

Un moderno fluido di perforazione, sotto variabili condizioni di pressione, temperatura, velocità di scorrimento e tempo, si può catalogare come un fluido complesso.

Proprio per la complessità nello studio dei fluidi di perforazione, questi vengono trattati come un ideale fluido plastico di Bingham.



## 4 FANGHI DI PERFORAZIONE

Si definisce fango una miscela nella quale un materiale particellare solido (organico o inorganico) sia disperso all'interno di una matrice acquosa.

Si definisce fango di perforazione quella tipologia di miscela creata artificialmente dall'unione di acqua e solidi (bentonite ed eventuali additivi specifici) ed utilizzato per le opere di trivellazione come il Microtunneling, ma anche per l'estrazione petrolifera, l'HDD (*Horizontal Directional Drilling*) e molte altre tecniche per la realizzazione di opere geotecniche [3].



Figura 32 Fango di perforazione.

I fanghi di perforazione (figura 32) presentano il vantaggio di essere economici e dalla facile realizzazione. La base è proprio la miscela di acqua e bentonite. In caso si richiedano particolari proprietà o specifiche per una determinata opera, è possibile migliorare il fluido con l'aggiunta di additivi (ad esempio polimeri) che mirano ad incrementare alcune delle caratteristiche base richieste al fluido in fase di perforazione (controllo della filtrazione, viscosità, trasporto ecc.).

Il fluido di perforazione svolge funzioni molteplici e variabili a seconda dell'opera da realizzare, dalla fase di realizzazione e dei terreni da attraversare; non è possibile, perciò, pensare ad un fluido "universale", rispondente a tutte le esigenze operative. Inoltre, dato che la composizione stessa del fango è soggetta a modificazioni durante la perforazione,

per il rimescolamento con i detriti rimossi, si rende necessaria una rimodulazione in corso d'opera, affinché sia mantenuta l'efficacia del trasporto dei solidi in sospensione.

È proprio questa, infatti, la funzione primaria del circuito idraulico e avviene attraverso la circolazione del fluido, espulso da appositi ugelli posti in corrispondenza del dispositivo di taglio, regolabili sia relativamente alla pressione che alla direzione del getto del fluido, nell'intercapedine tra la condotta e il terreno, in direzione contraria a quella di avanzamento dello scavo. La capacità di trasporto del fluido è direttamente proporzionale alla sua densità, che condiziona sia l'effetto di galleggiamento nei confronti dei detriti trasportati che la viscosità del fluido stesso; il corretto bilanciamento di queste caratteristiche, perciò, contribuisce a massimizzare l'efficacia del trasporto, in funzione della velocità di circolazione. Basse capacità di trasporto determinano fenomeni di sedimentazione del materiale in sospensione, con l'inevitabile conseguenza dell'ostruzione del foro; lo stesso inconveniente, tuttavia, può presentarsi anche nei momenti di sospensione dei lavori, quando il circuito idraulico è fermo: pertanto il fluido deve possedere anche le caratteristiche tixotropiche delle quali si è discusso in precedenza, così da strutturarsi con sufficiente forza di gel nella fase di arresto del flusso ma, al contempo, non arrivare alla gelificazione eccessiva, che risulterebbe onerosa sia per il circuito idraulico che per i dispositivi, come il vibrovaglio, che assolvono la funzione di "ripulitura" del fluido prima del suo riutilizzo.

Il tipico fango di perforazione a base d'acqua è una sospensione colloidale, cioè una sostanza in stato finemente disperso, intermedio tra la soluzione omogenea e la dispersione eterogenea. Questo stato "micro-eterogeneo" consiste di una fase solida costituita da minerali argillosi di dimensioni microscopiche, dispersa in una fase continua, composta da acqua con funzione di fase liquida disperdente. I sistemi colloidali si presentano torbidi e hanno peculiarità che li differenzia da quelle che genericamente si dicono soluzioni.

## 4.1 FUNZIONI DEI FANGHI DI PERFORAZIONE

Le funzioni del fango bentonitico descrivono i compiti che esso è in grado di eseguire [3]:

- Rimozione smarino dal fronte
- Controllare la pressione del fronte di scavo
- Mantenere in sospensione e rilasciare lo smarino
- Formare isolamento impermeabile
- Mantenere la stabilità del fronte di scavo
- Minimizzare l'usura di ciascun componente interessato allo scavo (pompe, condotte,...)
- Raffreddare e lubrificare la testa fresante e i suoi componenti
- Trasmettere energia idraulica agli strumenti taglienti
- Controllare la corrosione
- Facilitare la cementazione al termine della perforazione
- Ridurre al minimo l'impatto ambientale

Di seguito vediamo nel dettaglio le funzioni più rilevanti, in particolare per il Microtunneling.

### 4.1.1 RIMOZIONE SMARINO DAL FRONTE

La trivellazione per la realizzazione di un'opera in sottoterraneo genera materiale di scarto, lo smarino appunto, che necessita di essere rimosso dal sottosuolo e portato in superficie. Per fare questo, il fango di perforazione viene iniettato, attraverso la condotta di mandata, sul fronte di scavo e trascina il materiale, attraverso la condotta di ritorno, fino in superficie, presso l'impianto di separazione (figura 33).



Figura 33 Panoramica di cantiere: a destra l'impianto di separazione, a sinistra il piazzale, dove è temporaneamente stoccato lo smarino.

La rimozione dello smarino, e quindi la pulizia del foro, è in funzione della granulometria dello smarino, forma e densità combinata a velocità di penetrazione, viscosità e velocità del "drilling mud".

La viscosità e le proprietà reologiche dei fanghi di perforazione hanno un effetto significativo sull'asporto dello smarino.

Lo smarino si deposita rapidamente in fluidi poco viscosi (come ad esempio l'acqua) e difficilmente riesce ad essere asportato agevolmente dal pozzo. In generale, fluidi ad alta viscosità migliorano il trasporto del materiale scavato.

La maggior parte dei fluidi di perforazione sono tixotropici, ciò significa che in condizioni stazionarie assumono uno stato di gel. Questa caratteristica può mantenere in sospensione il materiale scavato quando il fluido non può circolare per questioni tecniche (ad esempio per la connessione di un nuovo troncone di condotta nel Microtunneling).

Generalmente, una maggiore velocità di circolazione del fango di perforazione aiuta nella rimozione dello smarino. Eppure, per fanghi leggeri, alte velocità possono creare un flusso turbolento, che da una parte aiuta nella pulizia del foro, ma dall'altra può causare problemi durante la perforazione e nel pozzo di scavo.

La velocità con la quale lo smarino è trasportato in superficie è detta velocità di scorrimento.

La velocità di scorrimento per la perforazione è in funzione della densità e dalla viscosità del fango, dalla dimensione e dalla forma del materiale che deve essere trasportato. Se la velocità del fluido di perforazione risulta superiore alla velocità di scorrimento, lo smarino sarà trasportato in superficie. La velocità con la quale il materiale scavato viene portato in superficie è detta velocità di trasporto.

Il trasporto del materiale è più complicato per condotte non lineari (angoli, curve) ed orizzontali; più semplice risulta il trasporto verticale.

Nelle condotte orizzontali, il materiale si deposita nella parte bassa della condotta, creando uno strato di materiale. Questo strato restringe la sezione della condotta, diminuendo la portata stessa, e risulta complicato in seguito da rimuovere.

Nel microtunneling, essendo la condotta pseudo-orizzontale, il problema risulta maggiormente rilevante.

Inoltre, fluidi ad alta densità aiutano nella rimozione del materiale. Una maggiore densità sviluppa forze di galleggiamento superiori che agiscono sul materiale scavato, contribuendo alla sua asportazione. Rispetto ai fluidi a bassa densità, questi fluidi possono lavorare a una velocità più bassa e con proprietà reologiche inferiori. Tuttavia, un eccesso di densità può creare notevoli problemi per l'impianto di rimozione. L'aumento di peso va infatti, a gravare sulle pompe della circolazione del fango, mettendone in crisi i vari componenti e aumentando i costi di manutenzione e il rischio di rottura dell'impianto.

Ultimo accorgimento utile per la rimozione dello smarino è l'aumento della velocità di rotazione della macchina fresante. Una maggior velocità di rotazione, infatti, permette al fluido di lavorare uniformemente su tutto il fronte di scavo, in particolare sui bordi esterni, zone dove si può verificare un maggiore deposito di materiale scavato.

Infine, la rotazione può essere invertita durante la manovra di perforazione, tecnica che può essere anch'essa vantaggiosa al fine di ottenere una maggiore pulizia.

#### 4.1.2 CONTROLLO PRESSIONE DEL FRONTE

Come accennato in precedenza, una delle funzioni di un fluido di perforazione è quella di controllare la formazione di sovrappressioni per garantire la sicurezza durante le fasi di perforazione.

Per agevolare la fase di rimozione di scavo possono essere impiegati espedienti quali l'immissione di filler per la riduzione meccanica della filtrazione o additivi per l'aumento della viscosità. Nel caso di perforazioni verticali profonde (quali ad esempio le perforazioni petrolifere) possono essere impiegati additivi quali la barite per aumentare notevolmente la densità e vincere le elevate pressioni idrostatiche.

Anche per questo aspetto quindi, il peso del fango assume un'importanza fondamentale per la sicurezza e la buona riuscita dell'opera.

#### 4.1.3 MANTENERE LA STABILITÀ DEL FORO

La stabilità del foro di scavo è un complesso equilibrio di fattori meccanici (tensioni e pressioni) e chimici.

La composizione chimica e le proprietà del fango devono essere combinate al fine di mantenere la stabilità fino al termine dell'opera.

Il peso del fango deve essere mantenuto all'interno di un range necessario per bilanciare le forze applicate al foro (pressione di scavo, stress in funzione delle spinte e delle vibrazione della macchina).

La stabilità è ottimale quando lo scavo è mantenuto alla dimensione originaria (non ha subito contrazione) e la forma è cilindrica. Una volta che il buco va incontro ad erosione o si allarga rispetto all'inizio, è difficile riuscire a mantenere la stabilità.

L'allargamento di un foro può causare molti problemi, quali una diminuzione della velocità del fango, una scarsa pulizia del foro e un aumento dei possibili distacchi di materiale dalle pareti di scavo.

Vi sono numerosi inibitori chimici e additivi utili a controllare l'interazione tra fango e terreno. Sistemi con elevato contenuto di calcio o calcio sono ottimi per la perforazione di terreni "sensitivi".

Sali, polimeri, glicoli, oli, ed altri inibitori prevengono l'erosione e la "mutazione" del foro.

#### 4.1.4 RIDURRE AL MINIMO L'IMPATTO AMBIENTALE

Il fango di perforazione, al termine dell'opera, è considerato un rifiuto e come tale deve essere trattato nel rispetto delle leggi locali che ne regolano lo smaltimento.

Da un punto di vista economico, per via dello smaltimento, vengono preferiti i fanghi a minor impatto ambientale.

Nella maggior parte dei paesi, sono state stabilite le norme locali per la regolamentazione dei fluidi di perforazione. A seconda delle componenti presenti all'interno dei fanghi, lo smaltimento segue un suo percorso prestabilito e non vi è un unico trattamento per tutti i tipi di fanghi. Ciò è dovuto principalmente alle condizioni, mutevoli e complesse, presenti nel mondo: la posizione dell'opera e la relativa densità abitativa circostante, la posizione geografica (a terra o in piattaforma, offshore), la distanza dal luogo di smaltimento, la fauna e la flora circostante, ecc.

In sintesi, la scelta di un determinato fluido di perforazione dovrebbe essere basata sulla capacità del fluido di soddisfare le funzioni essenziali richieste al fine di minimizzare i problemi durante la fase realizzativa dell'opera. Le funzioni descritte in precedenza sono solo alcune di quelle richieste ad un buon fango. Oltre a queste, la scelta deve essere guidata da una fondamentale esperienza e la conoscenza della migliore soluzione possibile. Le considerazioni maggiori ruotano attorno ai fattori ambientali del cantiere, del costo dei fanghi e della loro disponibilità.

Per trivellazioni di grande importanza viene occupato anche il mud engineer, "l'ingegnere del fango". Questa figura, esperta di fanghi di perforazione, si occupa della scelta, della gestione e del monitoraggio dei fanghi. Nel suo compito, fondamentale per la buona riuscita di un'opera e per la soluzione dei problemi delle trivellazioni profonde, si avvale della sua esperienza nel campo dei materiali e della loro reologia.

L'esistenza di una tale figura fa capire quanto siano di fondamentale importanza i fluidi di perforazione nelle trivellazioni e nella realizzazione di opere in sotterraneo.

Una scelta precisa e ragionata di un determinato fluido da come risultato:

- Diminuzione dei costi di realizzazione, manutenzione e smaltimento
- Maggiore rapidità di realizzazione dell'opera, con conseguente risparmio di tempo
- Maggior controllo e sicurezza di eventuali problemi realizzativi
- Diminuzione sostanziale di imprevisti in corso d'opera

#### **4.2 IL COMPONENTE PRINCIPE DEL FANGO DI PERFORAZIONE: LA BENTONITE**

I fanghi di perforazione, come detto in precedenza, sono una miscela di acqua e solidi.

In particolare, la bentonite ha un ruolo di protagonista per questa tipologia di fluidi [2].

La Bentonite, rappresentata in figura 34, è un tipo di argilla naturale che ricevette il suo nome da un geologo Americano che scoprì depositi di quest'argilla vicino a Fort Bentos nello stato di Wyoming, USA intorno al 1890 [5].



*Figura 34 Bentonite in polvere.*

Egli chiamò l'argilla "bentonite" in seguito al luogo dove fu trovata. E' costituita principalmente da montmorillonite, minerale dell'argilla, che riveste un ruolo importante nel determinare le proprietà dell'argilla ed è a sua volta chiamata Montmorillon nella Francia del Sud, dove, per la prima volta in Europa, fu scoperto un deposito di questo minerale.



Bentonite, infatti, è il termine usato per un minerale industriale che, oltre al suo componente principale, la montmorillonite, contiene inoltre altri minerali ausiliari, come quarzo, mica, feldspato, pirite e, a volte, calce.

I depositi di Bentonite commercialmente validi si trovano non solo negli Stati Uniti, ma quasi ovunque nel mondo.

In Europa esistono depositi di Bentonite degni di nota intorno al Mediterraneo, es. Sardegna, Spagna, Francia, Germania, isole Greche, Turchia e Marocco.

In Germania, i depositi commerciali più importanti e quelli più estesi scoperti finora, sono situati in Bavaria, sulle due sponde del fiume Isar, nella zona che circonda Mainburg, Moosburg e Landshut. Esistono anche depositi insignificanti dal punto di vista commerciale in Swabia e nella Bassa Bavaria.

In Sardegna i depositi commerciali più importanti e quelli più estesi, sono situati nel Nord Sardegna, tra Sassari e Alghero, nella zona di Oristano, e nel Sulcis nei pressi di Giba, altri piccoli depositi di scarsa qualità s'incontrano nella quasi totalità della Sardegna.

I depositi di bentonite della Sardegna sono sparsi su tutta l'area dell'isola, la loro linea di orizzonte sta a un'altitudine compresa tra 50 e 280 metri sul livello del mare.

Le condizioni idrotermali favorevoli, ossia gli effetti dell'acqua e della temperatura, hanno fatto in modo che gli odierni letti di Bentonite della Sardegna emergessero per un lungo periodo di tempo.

La maggior parte di questi letti si trovano sotto forma di lenti isolate avendo gli strati uno spessore compreso tra 0.5 e 3 m.

I depositi di bentonite lenticolari in Sardegna hanno normalmente un diametro che va da molte centinaia di metri a molti chilometri (figura 35).

Al giorno d'oggi, sono stati identificati depositi di bentonite di circa 10 milioni di tonnellate che sono ritenuti adatti per attività mineraria in Sardegna.

Sulla base di un tasso d'estrazione annua di 350.000 tonnellate, e forniture sono assicurate per altri 25 – 30 anni.



*Figura 35 Cava di bentonite in Sardegna.*

L'attività mineraria di Bentonite nella zona dell'Iglesiente ebbe inizio agli albori del 20° secolo, solo alcuni anni dopo che la bentonite fu scoperta per la prima volta negli Stati Uniti.

La bentonite è essenzialmente silicato di alluminio, cioè è formato in gran parte sia da atomi di silice sia di alluminio. Appartiene al gruppo dei così detti silice triplo-strato.

Nella figura 36 si può osservare che lo strato centrale generalmente è formato da alluminio e circondato da un ottaedro di ioni di ossigeno. I due terzi dello spazio totale disponibile nell'ottaedro sono occupati da ioni di alluminio. I restanti strati, superiore e inferiore, sono costituiti da ioni di silice e da ioni di ossigeno come coordinate tetraedriche.

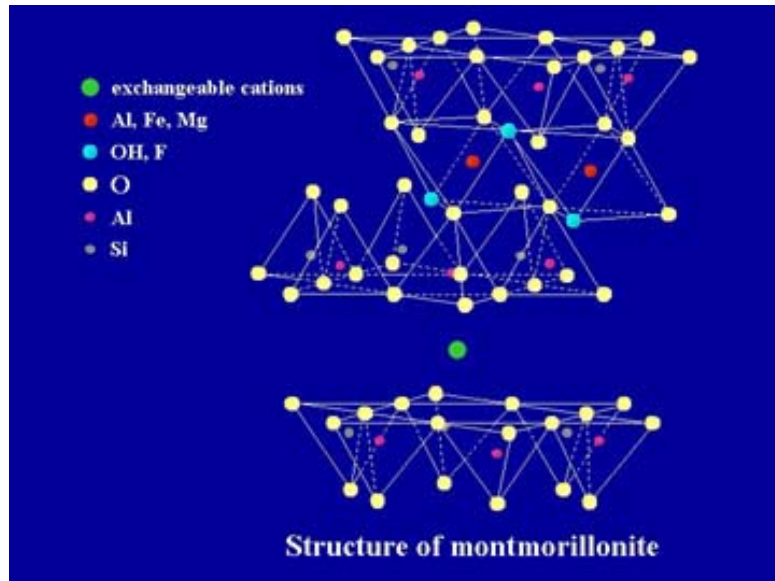
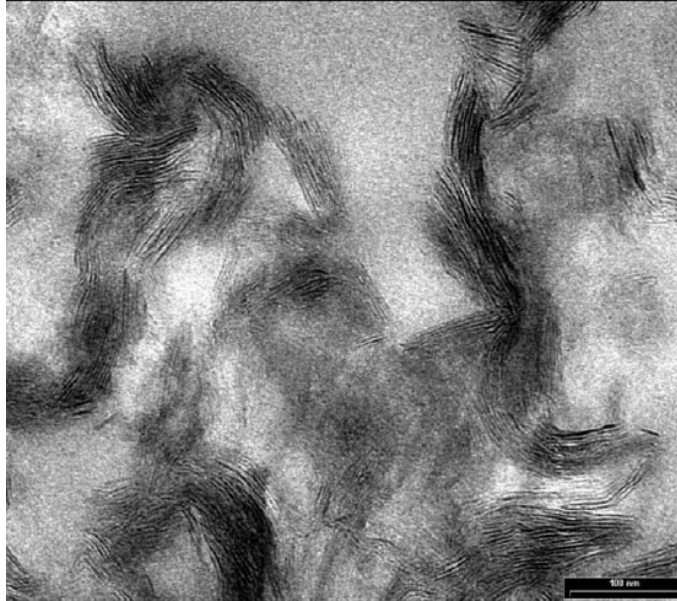


Figura 36 Molecola di montmorillonite.

La sostituzione isomorfa di una porzione minore di cationi ottaedri trivalenti con cationi bivalenti, come magnesio, dà origine a effetto di carica, che a sua volta comporta una carica negativa degli strati di silice separati. Entro la struttura cristallina, questi strati caricati negativamente vengono compensati dall'incorporamento dei così detti cationi di strato-intermedio o interstrato che possono comprendere ioni di sodio monovalenti o ioni bivalenti di calcio o magnesio [6].

La maggior parte della bentonite Sarda è alcalino terrosa contenente ioni di calcio o magnesio interscambiabili con legami polari E' eterogenea, ossia la sua composizione mineraria e chimica, può variare, così come il colore, consistenza e soprattutto spessore degli strati adatta per uso industriale. La bentonite si differenzia notevolmente per colore, con sfumature che vanno dal color crema all'ocra e rosso-marrone, o da tinte variabili da verde-grigio a blu scuro. Nella maggior parte dei casi, queste differenze di colore non influenzano la qualità della bentonite.

In seguito alla loro forma stratificata i cristalli montmorillonitici hanno una struttura a lamelle. Lo spessore di queste lamelle cristalline misura 1 nanometro (*nm*), ossia un millesimo di millimetro. Il diametro delle lamelle può fluttuare tra 100 e 800 *mm*.



*Figura 37 Montmorillonite osservata al microscopio elettronico (3700 ingrandimenti).*

La struttura stratificata della bentonite e della montmorillonite che contiene viene mostrata nella foto sopra scattata attraverso un microscopio elettronico (figura 37).

Il loro spessore, l'area della superficie flessibile e estesa sono le caratteristiche più evidenti dei cristalli montmorillonitici.

Un cristallo montmorillonitico è formato da molti fasci stratificati. La presenza dell'acqua ne provoca il rigonfiamento poiché le molecole dell'acqua si accumulano tra i fasci separati. Ne consegue che la distanza tra due lamelle individuali montmorillonitiche cresce e si può anche duplicare, anche in caso di montmorillonite di calcio [5]. Per la bentonite a base sodica (tipica del Wyoming) questo fenomeno è accentuato fino a 8-10 volte.

I cationi negli strati intermedi sono responsabili delle ottime proprietà rigonfianti della montmorillonite in acqua. In presenza d'acqua, queste tendono a idratare, con la conseguenza che l'acqua viene conservata tra gli strati di silicati, aumentando la distanza tra gli strati. Allo stesso tempo, la forza coesiva tra i fasci stratificati individuali diminuisce, concedendo agli strati una certa quantità di movimento tra loro.

Di conseguenza, appena l'acqua viene immagazzinata, il cristallo non costituisce più una rigida entità. Se vi è sufficiente acqua, si può avere anche la separazione completa degli strati individuali.

In questa forma, la bentonite può avere effetti sostenuti sulla viscosità della soluzione acquosa, che è di grande importanza per molte delle sue applicazioni tecniche.

Quando è immersa nell'acqua, la debole interazione tra i silicati stratificati individuali dà luogo alla formazione dei così detti gel tixotropici.

Allo stato grezzo, questi gel dimostrano proprietà elastiche solide con un carico di snervamento che rappresenta una viscosità quasi infinita. Tuttavia se si applica una sollecitazione meccanica questi gel (ossia centrifugazione, agitazione, etc.) la loro così detta struttura "house of cards" collassa e il grado di viscosità diminuisce di molti gradi [5].

Le proprietà tixotropiche di queste dispersioni di bentonite acquose sono fondamentali per le perforazioni.

A seconda dei diversi utilizzi, la bentonite ha bisogno di essere attivata, ossia essere trattata con determinate sostanze per migliorare alcune sue peculiarità.

Nel caso d'impiego per perforazioni sotterranee, il trattamento più indicato è l'attivazione alcalina [2].

### Attivazione alcalina

Scopo dell'attivazione alcalina è quello di aumentare ulteriormente le già rimarcate proprietà rigonfianti in acqua della bentonite naturale al calcio e magnesio.

L'attivazione alcalina della bentonite si basa essenzialmente su una reazione di scambi di ioni durante la quale i cationi alcalino-terrosi negli strati intermedi della montmorillonite sono sostituiti da ioni di sodio. Per assicurarsi che questo processo di scambio sia più efficace possibile, la bentonite umida viene mescolata con la soda in un'apposita impastatrice. Durante la reazione di scambio, si forma il carbonato di calcio insolubile convergendo il bilanciamento chimico nella direzione desiderata.

Seguendo l'attivazione con impasto di soda, il processo industriale comprende una fase di asciugamento per rimuovere l'acqua in esso e facilitare la molatura della bentonite al sodio.

La bentonite alcalino-attivata viene utilizzata principalmente nell'industria di fonderia e nelle perforazioni.

Per completezza, le altre attivazioni applicabili alla bentonite sono: attivazione acidogena e attivazione organofila. La prima è utilizzata nell'industria alimentare, la seconda nel settore siderurgico.

### **4.3 ALTRI COMPONENTI DEI FANGHI DI PERFORAZIONE**

Vi sono casi in cui la "semplice" miscela acqua – bentonite non è sufficiente a soddisfare i requisiti richiesti per l'opera da realizzare [2].

Il sistema colloidale bentonitico utilizzato come fango di perforazione mostra scarsa tollerabilità ai solidi e ai comuni contaminanti chimici: ciò lo rende inadeguato per condizioni diverse da quelle d'inizio perforazione in quanto il suo mantenimento richiederebbe eccessive diluizioni, comportando la produzione di notevoli volumi di fango da smaltire. Nelle condizioni d'impiego tipiche di inizio perforazione, il fango bentonitico è un sistema semplice ed economico; ad alte concentrazioni di bentonite fornisce un'accettabile capacità di trasporto anche in presenza di detriti di notevoli dimensioni, come ghiaie e ciottoli, ed è anche convertibile, se necessario, in un sistema diverso.

Infine, il fango bentonitico può essere utilizzato anche con funzione unicamente di "cuscino viscoso" non inquinante per limitare gli assorbimenti di fango ed il rischio di inquinamento degli acquiferi superficiali nell'attraversamento di terreni incoerenti o poco consolidati; in questi casi, possono essere aggiunti additivi viscosizzanti (polimeri, bentonite), flocculanti (cemento, idrato di calcio) o materiali di diversa natura (fibre), in ogni caso tutti con funzione di incremento della capacità intasante. Altri numerosi additivi si possono aggiungere, allo stato di sospensione o di soluzione, allo scopo di migliorarne le caratteristiche, però è opportuno anche non dimenticare che il fluido è soggetto a variazioni costanti della sua composizione, per i composti e i detriti (frammenti di rocce o di suoli, sali, liquidi o gas, ecc.) che intercetta durante la perforazione.

Per variare le caratteristiche del fango è necessario agire con correzioni progressive, fino ad arrivare alla formulazione ottimale per le specifiche applicazioni d'interesse. I principali additivi che vengono utilizzati sono [3]:

- additivi di appesantimento (barite, carbonato di calcio, galena, ecc): materiali inerti finemente macinati che sedimentano facilmente; hanno la funzione di incrementare la densità del fluido;
- additivi viscosizzanti (quali bentonite, attapulgite, ecc);
- additivi disperdenti e fluidificanti (quali ferro-cromo-lignosulfonato, cromo-lignine, ligniti, composti tannici, ecc);
- additivi riduttori del filtrato, per l'incremento dell'impermeabilità del fluido (sodio-carbossimetilcellulosa detto anche CMC, amido pretrattato, polimeri, ecc);
- additivi battericidi;
- additivi stabilizzanti per le alte temperature;
- lubrificanti;
- additivi intasanti, per l'ostruzione di fratture o di strati molto permeabili, per limitare le perdite di circolazione; essi sono materiali di varia natura, lamellari come la mica, fibrosi (residui di lavorazione di canapa, cotone, juta, ecc) o anche granulari (gusci di mandorle, di noci, ecc);

La CMC (Carboxyl Methyl Cellulosa) è un polimero largamente utilizzato sia in perforazione che per il controllo della filtrazione e/o della reologia del fango sia in acqua dolce che in acqua salata. Esistono due tipi di CMC, a seconda del peso molecolare del polimero [2]:

- CMC HV (high viscosity) è polimero ad alto peso molecolare: interviene sia sulle proprietà di filtrazione che sui valori di viscosità.
- CMC LV (low viscosity) è polimero a basso peso molecolare: agisce solo sulle proprietà di filtrazione senza modificare le proprietà reologiche del fango

Il limite principale per fluidi additivati con CMC risiede nell'elevata sensibilità alle contaminazioni chimiche mentre, per contro, il vantaggio è rappresentato dalla sua economicità di costo. Altra variante del fango bentonitico "standard" è caratterizzata da un basso contenuto di solidi con "bentonite extender". Si distingue dal fango precedente in quanto contiene una quantità molto più bassa di argilla. L'azione sospendente e viscosizzante della bentonite, infatti, viene potenziata dalla presenza di un additivo detto extender (come per esempio alcuni additivi polimerici) che interagisce con la bentonite ottenendo elevata tixotropia e forza di gel anche a basse concentrazioni di bentonite. L'obiettivo principale nella scelta di questo fango è il perseguimento della massima velocità di avanzamento e pulizia foro, senza sacrificare la stabilità delle formazioni attraversate. In questi fanghi, la viscosità è inversamente proporzionale alla velocità di taglio, pertanto è possibile perforare con alta velocità di avanzamento cui corrisponde un ottimo trasporto dei detriti nell'intercapedine e bassa velocità nel resto del circuito, con perdite di carico contenute.

Possibili variazioni nella formulazione dei fanghi a basso contenuto di solidi includono in particolare i fanghi ai biopolimeri, che assolvono alle funzioni viscosizzante e sospendente. L'evoluzione tradizionale dei fanghi bentonitici per le fasi più profonde della perforazione prevede l'utilizzo di fanghi ai lignosolfonati (FCL) come additivi disperdenti; in essi la tolleranza ai solidi del sistema bentonitico è maggiore che nel fango non additivato e s'impiega dove non esistono particolari problemi di impatto ambientale e/o formazioni instabili e/o reattive. In generale i fanghi ai lignosolfonati sono sistemi molto versatili che presentano buona stabilità alla temperatura, elevata resistenza ai contaminanti chimici o fisici e sono facilmente convertibili in fanghi alla calce o al gesso. L'efficacia degli additivi e l'effettiva rispondenza alla funzione per cui sono pensati dipendono dalle condizioni di lavoro, come il livello di pressione, di temperatura, di pH, ecc. e, specie nei materiali organici, hanno durata limitata.



### **Fanghi a base acquosa inibenti**

Durante la perforazione avviene il contatto fra il fluido e il terreno circostante. Attraversando formazioni argillose, le interazioni con la fase acquosa del fango causano stress nella matrice argillosa con conseguente instabilità del foro che portano al deterioramento delle condizioni di trivellazione. Inoltre, il rimescolamento di argilla plastica e idratata all'interno del fango può provocare un aumento della viscosità e della densità, per l'impossibilità di rimuoverli al vibrovaglio. Per far fronte a questi inconvenienti si ricorre spesso a fluidi inibenti che minimizzano l'idratazione dell'argilla all'interno del fango, stabilizzando le pareti del foro e favorendo la rimozione dei detriti mediante meccanismi diversi. I fanghi inibenti maggiormente utilizzati possono essere classificati in tre categorie principali: a base potassica, calcica o polimerica [2].

### **Fanghi a base gassosa: schiume**

Questo tipo di fluidi è costituito da una schiuma compatta e stabile nel tempo, ottenuta iniettando in un flusso d'aria una piccola quantità di fango contenente schiumogeno. Si ottengono buone capacità di trasporto dei detriti e protezione sulle pareti del foro; tra gli altri, gli impieghi d'interesse sono destinati a perforazioni in formazioni non consolidate e a bassa pressione, o ancora in argille sensibili all'acqua che hanno la tendenza a franare. Per completezza d'informazione occorre precisare che esistono numerose altre formulazioni per i fanghi di trivellazione e spesso sono le Aziende produttrici stesse a brevettare ed immetterle nel mercato di nuovi [2].

## **4.4 PROVE SU FANGHI DI PERFORAZIONE**

I fanghi perforazione, come visto nel paragrafo precedente, assumono un ruolo molto importante nella fase realizzativa di un'opera d'ingegneria geotecnica.

Essendo soggetti a molteplici variabili controllabili e non, misurabili e non, è nella loro natura una variazione continua delle loro caratteristiche principali. Da quest'aspetto nasce la necessità di un monitoraggio che va di pari passo con la perforazione.

Le prove sui fanghi sono separabili in due parti distinte a livello temporale:

- I controlli pre-opera, ossia per stabilire che tipologia di bentoniti utilizzare a seconda delle condizioni ambientali, della tipologia di terreno del sito dell'opera, dell'acqua presente in sito. Queste prove sono svolte in laboratorio o in cantiere prima dell'inizio della perforazione;
- I controlli in opera, eseguiti durante la trivellazione. Servono per monitorare i cambiamenti all'interno dei fanghi di perforazione nel momento esatto dello scavo. I fanghi subiscono una variazione continua durante l'operazione di scavo, sia per loro stessa natura (maturazione e decadimento), sia per la continua variazione del terreno scavato.

A differenza di altri controlli che sono svolti durante la realizzazione di opere d'ingegneria, i test svolti sui fanghi di perforazione non sono soggetti a normative ma sono effettuati solo per garantire degli standard tecnici adeguati. Alcuni controlli sono standardizzati e diffusi a livello internazionale, altri (come il Kugel Harp) sono stati "inventati" dalle stesse aziende produttrici delle macchine di perforazione.

#### 4.4.1 DENSITÀ

La densità, comunemente intesa come peso del fango, è misurata con una bilancia per fango con una precisione di  $0,01 \text{ g/cl}$  (figura 38) [3].

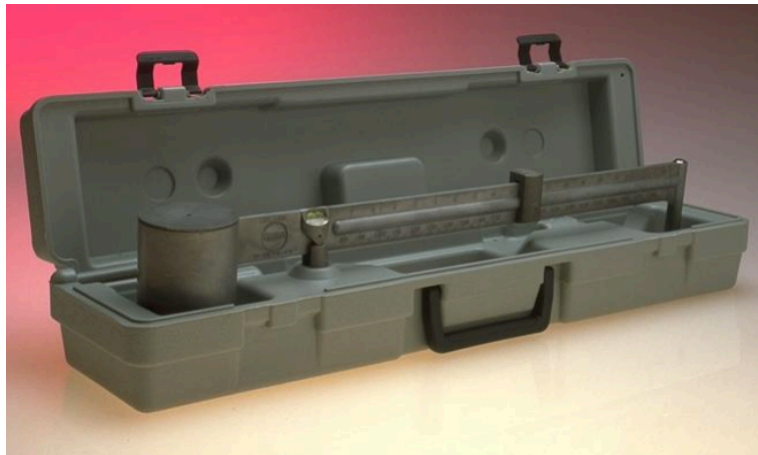


Figura 38 Bilancia per fango di perforazione (fonte Fann.com).

La bilancia per fango è costituita principalmente da una base sulla quale poggia un braccio graduato con tazza, un coperchio, una bolla livellatrice, un cursore e un contrappeso.

La coppa a volume costante è fissata a un estremo dell'asta graduata, la quale presenta un contrappeso in posizione opposta. La coppa e il braccio oscillano in un piano perpendicolare al bordo dell'asta graduata, che poggia sul supporto, e sono bilanciati spostando il cursore lungo l'asta.

### Calibrazione

- Togliere il coperchio dalla coppa e riempire completamente la tazza con acqua pura o distillata;
- Riposizionare il coperchio ed asciugare completamente;
- Posizionare la barra graduata sul supporto, con il fulcro della barra sul centro del supporto;
- La bolla deve essere in posizione centrale quando il cursore indica *1,00 g/cl*. In caso contrario è necessario agire sui registri per tarare la bilancia e trovare l'equilibrio.

### Misura

- Rimuovere il coperchio dalla tazza e riempirla completamente con il fango da testare;
- Riposizionare il coperchio, avendo cura che il fango fuoriesca dal buco superiore al fine di riempire esattamente il volume della tazza;
- Lavare e asciugare l'esterno della tazza avendo cura di non far uscire il fango e di non far entrare acqua all'interno;
- Posizionare l'asta sul fulcro della base;
- Spostare il cursore lungo la barra graduata fino al raggiungimento dell'equilibrio, indicato dalla bolla livellatrice;
- Quando la barra ha raggiunto l'equilibrio, leggere il valore indicato dal cursore.

#### 4.4.2 VISCOSITÀ

La viscosità, caratteristica “principe” dei fanghi di perforazione, ha vari modi per essere misurata. Nel caso s’intenda misurare in modo rapido, speditivo, in miglior strumento è il cono di Marsh. Una misura più precisa invece consiste nell’utilizzo del viscosimetro. Vediamo di cosa si tratta per entrambe le strumentazioni [3].

##### **Marsh Funnel**

Il cono di marsh consiste in un cono di plastica dalle dimensioni standardizzate (figura 39).

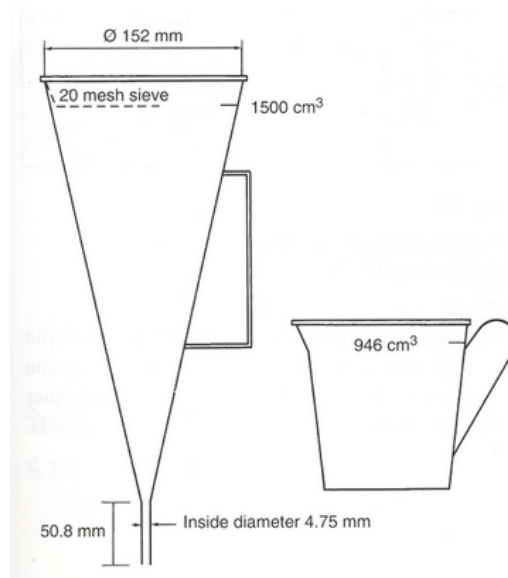


Figura 39 Cono di Marsh.

Il cono è caratterizzato da un diametro superiore di circa 152 mm ed un'altezza di 304 mm. Nella parte inferiore, è presente un'apertura di diametro 4,75 mm lunga 50,8 mm. Nella parte superiore è presente una griglia utile per trattenere i detriti o gli elementi con dimensioni superiori ai 5 mm che andrebbero ad otturare l'apertura inferiore durante lo svolgimento della prova. Inoltre, per compiere la misurazione, si utilizza un recipiente, anch'esso standardizzato, del volume di 946 ml.

La prova consiste nella misurazione del tempo necessario al fluido per fluire dal cono e riempire il recipiente fino al volume stabilito.

##### **Calibrazione**

Per eseguire la calibrazione è necessario riempire il cono con acqua a temperatura ambiente (20°) fino al bordo superiore indicato dalla griglia metallica (1,5 litri di volume

totale). Il tempo richiesto deve essere di circa 26 secondi. Nel caso risulti superiore è necessario pulire accuratamente il cono ed in modo particolare l'apertura inferiore per verificare non vi sia un restringimento della sezione. Nel caso di tempo inferiore, sarà necessario sostituire il cono in quanto non è prevista la possibilità di apportare regolazioni.

#### Misura

- Mantenere in posizione verticale il cono con la parte larga rivolta verso l'alto e l'apertura rivolta verso il basso, sopra il recipiente di misura, e con un dito a tappare l'apertura inferiore;
- Riempire il cono con il fluido di perforazione, avendo cura di campionarlo in un punto in cui sia in movimento e versandolo attraverso la griglia per evitare l'ingresso di materiale granulare e, sempre tenendo tappata l'apertura con un dito;
- Rimuovere velocemente il dito e contemporaneamente far partire il cronometro;
- Quando il volume di fango fluito dal cono raggiunge il segno presente sul recipiente, fermare il tempo ed annotare la misura.

#### **Viscosimetro rotazionale**

Il viscosimetro rotazionale (figura 40), o reometro, è uno strumento per le indagini dirette sui fluidi che si presta perfettamente ai test sui fanghi di perforazione.

Lo strumento è mosso da un motore elettrico regolabile.



Figura 40 Viscosimetro rotazionale (fonte Fann.com).

Il fluido di perforazione si dispone nell'intercapedine anulare compresa tra il cilindro esterno, che contiene il fluido, e il cilindro interno, detto rotore, responsabile del movimento e della misura.

La rotazione del rotore è regolabile ed una volta impostata si mantiene costante.

Il viscosimetro in pratica misura la coppia necessaria a far ruotare il rotore immerso nel fluido che si vuole indagare.

Vi sono molteplici tipologie di viscosimetri, sia per dimensioni del rotore sia per numero di giri ottenibili. L'intercapedine nella quale è contenuto il fango generalmente si attesta nell'ordine del millimetro o due.

La velocità di rotazione, misurata in giri al minuto (RPM), è regolabile ed i valori utilizzati nel campo dei fanghi di perforazione sono: 3, 6, 100, 200, 300, 600 giri al minuto.

Il viscosimetro rotazionale è inoltre utilizzato, in maniera indiretta, per misurare lo Yield Point. Ciò è possibile misurando il valore di viscosità a 300 e 600 giri al minuto e in seguito effettuando un'interpolazione lineare.

Lo Yield Point (o tensione di snervamento) è definito come il valore della tensione alla quale un materiale elastico sotto stress cessa di comportarsi in modo elastico ed inizia a deformarsi in maniera plastica, cambiando il suo comportamento da elastico reversibile a plastico irreversibile.

Reometri sul mercato ve ne sono di molti modelli, dai più semplici, come appena descritto, ai più complessi, con possibilità di far variare la temperatura di esecuzione dei test. Reometri più complessi danno la possibilità di analizzare in modo più completo un fluido ed in particolare per quelli di perforazione, acquisire una buona quantità di dati, specialmente in laboratorio, utili successivamente durante le fasi di perforazione.

Il viscosimetro rotazionale, unito al cono di Marsh, sono i due più importanti strumenti per il monitoraggio dei fanghi di perforazione.

#### 4.4.3 FILTRAZIONE

La proprietà di filtrazione dei fanghi di perforazione è determinata per mezzo della filtropressa (figura 41) [3].

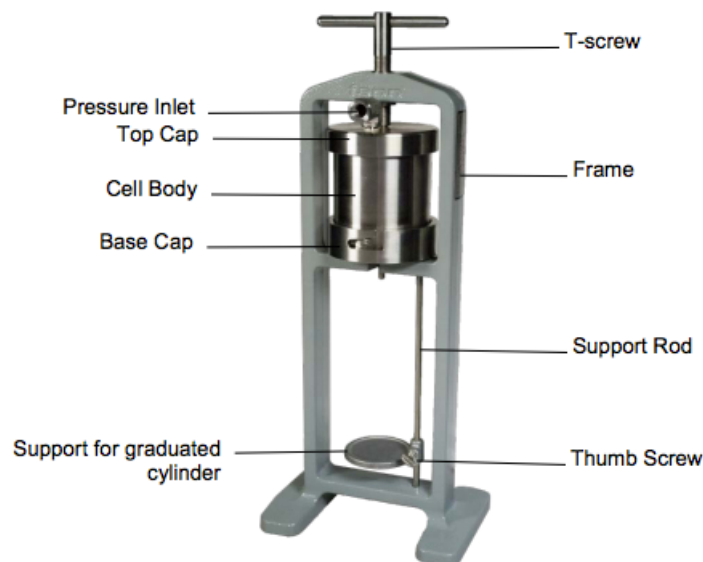


Figura 41 Filtropressa per fanghi di perforazione (fonte Fann.com).

La prova consiste nel determinare la velocità con cui il fluido viene forzato ad attraversare una carta-filtro. Il test è eseguito con temperatura, pressione e tempo prestabiliti.

Lo spessore dello strato solido depositato viene misurato al termine della prova.

La filtropressa, per lo studio dei fanghi di perforazione, deve rispondere alle indicazioni dell'API (*American Petroleum Institute*). Lo stesso istituto ha standardizzato la procedura con la quale la prova deve essere svolta.

Lo strumento è composto da una cella di carico dove viene posto il fango da testare, un regolatore di pressione e un manometro posto sulla parte superiore.

La cella è collegata al regolatore mediante un adattatore di accoppiamento semplice maschio-femmina. La cella è chiusa inferiormente da un coperchio munito di griglia. Tra il fango e la griglia viene posta la carta filtro per fare in modo di rimanere in posizione durante la prova e far fuoriuscire il fango. La pressione viene immessa tramite una piccola bombola di anidride carbonica.

### Misura

- Assicurarsi che la bombola disponga di una pressione di almeno 100 *psi* (circa 6,8 *atm*);
- Togliere il coperchio inferiore della cella, pulirla e asciugarla. Verificare che l'O-ring non sia danneggiato;
- Riempire la cella, da capovolta, con il fango di perforazione, quindi posizionare il filtro di carta, la griglia, l'O-ring e il coperchio. Serrare manualmente con forza;
- Portata in posizione la cella, posizionarvi al di sotto un cilindro graduato per misurare il materiale che verrà espulso dalla cella durante la prova;
- Aprire la valvola della bombola in modo tale da mettere in pressione al cella. Mantenere la pressione per 30 minuti;
- Al termine misurare l'altezza di fango contenuto all'interno del cilindro graduato.

Questa è solo una delle diverse tipologie di prove che possibile svolgere con l'utilizzo della filtropressa. Variando la pressione, il tempo di prova e la tipologia di carta filtro è possibile svolgere test differenti per poter caratterizzare al meglio il fluido.

Per questo tipo di prove si rimanda agli standard dettati dall'API in materia di prove sui fluidi di perforazione.



#### 4.4.4 CONTENUTO IN SABBIA

Il contenuto di sabbia nel fluido di perforazione è misurato con l'utilizzo di un apposito filtro (figura 42) [3].



Figura 42 Kit per la misurazione del contenuto in sabbia (fonte Fann.com).

La prova, per la sua semplicità di funzionamento, è ampiamente utilizzata sul campo e risulta essere di estrema importanza.

Durante la perforazione il controllo del contenuto in sabbia del fango risulta essenziale per poter valutare con precisione l'operato dell'impianto di separazione dello smarino.

Questa prova, infatti, risulta essere una buona "cartina tornasole" del lavoro dell'impianto. Se durante la perforazione il contenuto in sabbia tende ad aumentare, significa che l'impianto di separazione riesce ad espellere meno materiale rispetto a quanto viene assorbito dal fango. Se, viceversa, la quantità di sabbia rimane costante sarà evidente che l'impianto è in grado di svolgere il lavoro richiesto.

Il kit per il test è costituito da un setaccio, diametro 200 ( $75 \mu m$ ), un imbuto e un tubo di misurazione di vetro contrassegnato per il volume di fango da misurare. Il tubo di vetro, standardizzato, presenta una scala graduata sul fondo per misurare la percentuale di sabbia compresa tra 0 e 20%.

#### Misurazione

- Riempire il tubo di vetro con il fango fino al primo segno e aggiungere acqua fino al secondo. Poi tappare e agitare vigorosamente;

- Versare il contenuto nel filtro e attendere che il fango filtri e resti depositato. Lavare la sabbia con acqua;
- Capovolgere il filtro, con l'apposito imbuto e, con l'ausilio dell'acqua, riportare la sabbia all'interno del tubo di vetro;
- Lasciar depositare la sabbia ed in seguito leggere il valore indicato sulla scala graduata del campionatore di vetro.

#### 4.4.5 KUGEL HARP

Il Kugel Harp, noto anche come "arpa di palline", (figura 43) è uno strumento creato appositamente per poter misurare lo Yield Point effettivo di un fluido in modo rapido ed eseguibile in sito.



*Figura 43 Kugel Harp.*

Lo strumento è composto di un disco sul quale sono appese 10 sferette, 5 in metallo e 5 in ceramica, dal peso e dal diametro diverso. Ciascuna pallina è calibrata per determinare un certo Yield Point di un fluido. Le palline sono numerate con un numero crescente da 1 a 10 e crescente è anche il valore dello Yield Point a loro assegnato. Così l'effettivo Yield Point del fluido analizzato è compreso tra il critico Yield Point della palla più pesante immersa nel fluido e il critico Yield Point della palla che resta sospesa in superficie.

## Misurazione

- Assicurarsi della presenza delle 10 sfere vincolate al disco e verificare che sia asciutte;
- Campionare un secchio di fango di perforazione, assicurandosi che sia in moto agitato. È necessario che il fluido sia miscelato da almeno 1 minuto per garantire la distruzione dei legami tixotropici che andrebbero ad annullare la prova;
- Appena campionato il fango, immergere le sfere rapidamente nel fango, avendo cura di non farle vibrare e che entrino tutte nello stesso istante;
- Una volta immerse, leggere il numero della palla più grande che galleggia ed annotarlo (numero di Kugel).

Il numero della palla che galleggia rappresenta lo Yield Point di un fluido con un dato peso specifico

Un valore elevato di Yield Point è necessario per prevenire una penetrazione profonda (e quindi una perdita) di fluido di perforazione nel terreno.

In generale lo Yield Point è in funzione della permeabilità del terreno. Se il valore del Kugel risulta essere troppo elevato, si incontreranno problemi nel pompaggio del fango all'interno delle pompe e una diffusione peggiore sul fronte di scavo. Se, viceversa, il valore di questo test risulta essere troppo basso, potrebbero sorgere problemi di pulizia del fronte causati da una inferiore capacità di trasporto del fango.

### 4.4.6 CONTROLLO PH

Misure come quelle appena descritte vanno unite ai test sulle caratteristiche chimiche dei fanghi.

Il pH del fango è responsabile dell'interazione con l'argilla, della solubilità di determinati solidi e dell'efficacia degli additivi utilizzati [3].

Due sono i metodi utilizzati per misurare il pH: un metodo colorimetrico utilizzando delle cartine tornasole, ed un metodo potenziometrico, impiegando un pHmetro con vetro elettrodo elettronico. Il metodo colorimetrico è il più utilizzato ed il più semplice, ma anche il meno preciso. Le cartine tornasole vanno bene nel caso di fanghi molto chiari o

per la caratterizzazione dell'acqua. I fanghi di perforazione sono generalmente scuri e possono causare errori nella lettura delle strisce colorate.

Il valore ottimale dell'acqua per la miscelazione dei fluidi di perforazione deve essere compreso tra 7 e 9 e deve essere monitorato ad ogni nuova miscelazione del fango.

### **Strisce indicatrici**

Le cartine tornasole, figura 44, sono rivestite con indicatori colorati tali che il colore dipende dal pH della soluzione nella quale sono immerse.

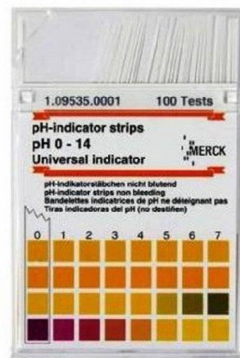


Figura 44 Cartine tornasole per misura pH.

Sono inoltre fornite delle tabelle che consentono di effettuare la stima, con precisione di 0,5 unità di pH per tutta la gamma.

### **Misura**

- Collocare la striscia all'interno del fango e mantenerla immersa per un minuto circa, fino a che il colore non si è stabilizzato
- Sciacquare con acqua deionizzata senza strofinare
- Confrontare il colore assunto dalla striscia con la tabella fornita ed identificare il valore del pH

### **pH-metro**

Il metodo migliore per identificare il valore del pH di un fango di perforazione è il pH-metro con vetro elettrodo elettronico.

Questo strumento è in grado di stabilire con precisione il valore del pH, eliminando tutte le possibili interferenze. Le misurazioni possono essere svolte rapidamente,

automaticamente e con la possibilità di aggiustare la misurazione in base alla temperatura del fluido.

#### 4.4.7 CONTROLLO DUREZZA E CONDUCIBILITÀ ELETTRICA

Acqua contenente una grande quantità di calcio disciolto e sali, come ad esempio il magnesio, è indicata come “acqua dura”. L’effetto più evidente di questa tipologia di acqua si ha strofinando il sapone tra le mani ed esso non sviluppa schiuma [3].

I fanghi di perforazione presentano un basso Yield Point se miscelati con questo tipo di acqua. Più l’acqua si presenta dura, più bentonite sarà necessaria per creare un fango soddisfacente. In casi estremi si è arrivati a trattare chimicamente l’acqua prima della miscelazione, ma questo metodo risulta essere fortemente anti-economico.

In generale però è bene effettuare un test sulla durezza dell’acqua che si intende utilizzare per la miscelazione dei fanghi.

Anche per quanto riguarda la conducibilità elettrica vale lo stesso principio della durezza appena descritto. Una conducibilità elettrica troppo elevata può inficiare la stabilità del fluido di perforazione. In casi estremi, per migliorare la qualità dell’acqua si può ricorrere all’aggiunta cenere di soda per trasformare il calcio disperso in carbonato di calcio.

Nella tabella 1 sono riportati i valori della conducibilità elettrica e della durezza dell’acqua.

<b>Durezza dell’acqua [<math>^{\circ}dH</math>]</b>	<b>Conducibilità elettrica [<math>\mu S/cm</math>]</b>	<b>Valutazione</b>
< 10° dH – dolce	< 500 $\mu S/cm$	Ottimale
≤ 20° dH – media	< 1000 $\mu S/cm$	Sufficiente
> 20° dH - dura	1000 – 2000 $\mu S/cm$	Necessaria correzione

*Tabella 1 Valori di durezza dell’acqua e conducibilità elettrica dei fanghi di perforazione.*

Le misure della conducibilità elettrica e della durezza sull’acqua sono svolte in modo analogo alla misurazione del pH. Vi sono sia metodi speditivi (cartine tornasole per la durezza), sia metodi più precisi con strumenti elettronici per avere una valutazione più accurata.



## 5 CANTIERE DI MICROTUNNELING

Al fine di svolgere uno studio sui fanghi di perforazione mi è stata data la possibilità di seguire personalmente la realizzazione di alcuni attraversamenti fluviali svolti mediante la tecnica del Microtunneling.



*Figura 45 Panoramica del cantiere 2.*

Entrambi gli attraversamenti, svolti con la tecnica no-dig descritta nel secondo capitolo, sono classificati come “utility tunnel”, cioè sono stati realizzati per la posa di tubazioni e cavidotti di progetto.

La società che si è occupata della realizzazione dei Microtunnel è la ICOP, azienda friulana con sede a Basiliano (UD) che opera da oltre cinquant'anni nel settore delle costruzioni stradali, delle fondazioni e delle opere speciali e si occupa da oltre vent'anni della realizzazione di opere trenchless. (figura 45)

Durante lo stage, svolto nel periodo compreso tra giugno e settembre, mi è stata data l'opportunità di seguire la realizzazione di due tunnel e di seguire le varie fasi esecutive.

Oltre ad aver conosciuto la tecnica di realizzazione di una condotta sotterranea, ho avuto modo di analizzare i problemi di questa tecnica ed in particolare i problemi relativi all'utilizzo dei fanghi di perforazione.

Per lo studio dei fanghi di perforazione ho avuto la possibilità di effettuare alcune analisi in sito, svolte personalmente in contemporanea alla realizzazione delle opere. (figura 46) Inoltre, per completare lo studio sui fanghi ed in particolare sulla bentonite utilizzata in cantiere per la miscelazione di quest'ultimi, ho effettuato dei test in laboratorio volti a caratterizzare la natura del materiale utilizzato. Questa parte di lavoro è stata fondamentale per avere una panoramica più completa sulla natura dei fanghi ed in particolare per analizzare nel dettaglio gli aspetti più importanti della bentonite.



*Figura 46 Panoramica cantiere 1.*

La ditta presso cui ho effettuato questo tirocinio aveva in cantiere due tipologie diverse di bentonite, provenienti da due differenti produttori. Per motivi di segretezza professionale i nomi saranno omessi, sia la denominazione dei prodotti che i nomi delle ditte produttrici. Per semplicità le due bentoniti saranno indicate come BENTONITE A e BENTONITE B.

È noto solo che queste due bentoniti provengono entrambe da cave italiane, precisamente dalla Sardegna; i processi produttivi effettuati su di esse dopo l'estrazione,



le particolari attenzioni riposte, le additivazioni e l'aggiunta di specifici additivi non mi sono state fornite e per questo non si conoscono le specifiche a riguardo.

Inoltre, per la miscelazione dei fanghi bentonitici in cantiere queste due differenti bentoniti sono state utilizzate indifferentemente assieme, cioè miscelate entrambe all'interno del circuito di rimozione dello smarino.

Questo particolare risulta rilevante per lo studio delle caratteristiche del fango proprio perché non si conoscevano le percentuali di utilizzo di una bentonite piuttosto che dell'altra all'interno della miscela di perforazione.

Quindi gli studi di laboratorio, svolti solo sulle BENTONITE A e B in modo separato, miravano a definire le proprietà individuali dei due prodotti ed evidenziare le eventuali differenze, ma non a fornire un confronto con i dati ottenuti dalle prove in sito dove s'impiegava una miscela dei due prodotti.

Per le prove in sito sono state utilizzate le attrezzature messe a disposizione dalla ditta realizzatrice. Questi strumenti sono stati descritti nel capitolo precedente e rispondevano agli standard richiesti dall'API.

Per le prove in laboratorio invece, sono state svolte prove di classificazione geotecnica (determinazione dei limiti di Atterberg e della granulometria), prove mineralogiche e prove più classiche del mondo delle perforazioni, quali ad esempio misure di viscosità con viscosimetri rotazionali (reometri).



## **6 PROVE SU FANGHI DI PERFORAZIONE**

Le prove sui fanghi di perforazione sono state eseguite in cantiere durante la realizzazione delle opere di microtunneling. In seguito, con campioni di bentonite prelevati in cantiere, sono state svolte delle prove in laboratorio per completare lo studio ed avere un quadro più chiaro sulle caratteristiche reologiche dei fluidi di perforazione.

### **6.1 PROVE IN SITO**

Le prove svolte in sito sono quelle descritte nel capitolo relativo ai fanghi di perforazione. La prova più importante è considerata la misurazione della viscosità con l'utilizzo del cono Marsh. Inoltre, per ogni campionamento di fluido effettuato, è stata misurata la densità del fango unita al contenuto in sabbia. Solo per alcuni campionamenti è stato possibile effettuare la misura con il Kugel Harp.

Come è stato descritto nel capitolo sui fanghi di perforazione, le caratteristiche di questi fluidi variano continuamente e non vi è un unico fango di perforazione che vada bene in qualsiasi condizione. I test svolti in cantiere hanno quindi lo scopo di monitorare l'evoluzione del fango, segnalare eventuali problemi dell'impianto e danno la possibilità, ricorrendo all'insostituibile esperienza, di compiere variazioni repentine sulla qualità o la tipologia di solidi utilizzati.

Al fine di rendere confrontabili i dati ottenuti dal campionamento e dai test in sito, ho scelto di fare i campionamenti del fango in modo sistematico seguendo i seguenti criteri:

- Il prelievo avveniva sempre dallo stesso punto dell'impianto, cioè da un rubinetto lungo la condotta di mandata che garantiva sempre la presenza di fango in movimento e non sedimentato (per evitare problemi di tixotropia che potevano inficiare i risultati dei test);
- Il prelievo era effettuato sempre in due momenti precisi delle operazioni di trivellazione: un campionamento all'inizio delle operazioni d'infissione del tratto di condotta, il secondo subito al termine dell'operazione;

- I test sono stati svolti sempre subito dopo il campionamento, per far in modo di non permettere al fluido lo sviluppo di legami tixotropici che avrebbero potuto inficiare i risultati ottenuti;
- La calibrazione degli strumenti utilizzati era fatta come prima operazione della giornata per assicurare la precisione delle misure.

### 6.1.1 CANTIERE NUMERO 1

Il primo cantiere analizzato si riferisce alla realizzazione di un microtunnel di lunghezza complessiva pari a 559,17 m.

Il tunnel si compone di tre tratti: un primo tratto rettilineo di lunghezza pari a 79,86 m, con pendenza del 10,34 % ( $5^{\circ}54'21''$ ) verso il basso; il secondo, curvo con raggio pari a 2000 m, presenta una lunghezza pari a 419,13 m; l'ultimo tratto rettilineo, di lunghezza pari a 60,18 m, con pendenza pari a 13,84 % verso l'alto. (figura 47)

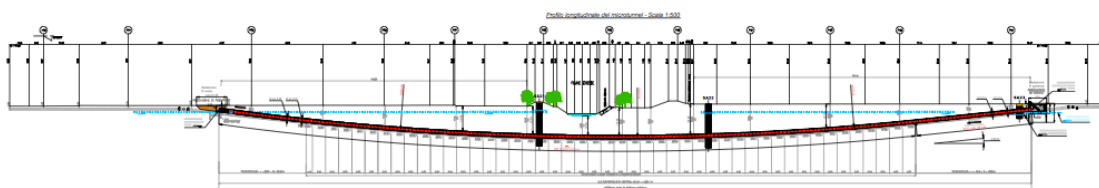


Figura 47 Profilo di progetto del microtunnel del cantiere 1.

Il tunnel è stato realizzato con conci di calcestruzzo armato di lunghezza pari a 3 m, diametro interno di 2,10 m ed esterno di 2,50 m.

In media la velocità di avanzamento, durante la fase di perforazione, è stata di circa 70 mm/min.

La realizzazione del microtunnel (esclusi i tempi di apprestamento cantiere e realizzazione del pozzo di spinta) è durata circa 4 settimane.

Il terreno attraversato presentava un'alta percentuale di materiale fine (sabbia medie e ghiaie piccole) e una ridotta quantità di materiale fine.

Nella figura 48 si può osservare il particolare dalla planimetria del cantiere 1. Nella parte arancione si trova il pozzo di spinta, nella parte gialla l'impianto di separazione.



Data	Ora	Pipe	Indicazione	Marsh	Kugel Harp	Sabbia	Densità	Note
				[s]	[Nr]	[%]	[Kg/l]	
11/6	17.20	15		42		1	1,16	
	17.55	16	I	41		0,5	1,13	
	18.35	16	F	41		1	1,14	
12/6	08.05	17	I	39		0,8	1,13	
	08.45	17	F	39		0,8	1,13	
	09.50	18	I	39		0,5	1,13	
	10.30	18	F	39		0,5	1,14	
	11.50	19	I	38		0,5	1,12	
	15.40	19	F	49	4	0,5	1,13	Ore 14: Aggiunto 1 m <sup>3</sup> di bentonite
	16.45	20	I	47	4	0,5	1,13	
	17.35	20	F	45	4	0,8	1,14	
	18.20	21	I	45	5	0,5	1,13	
	19.00	21		43	4/5	0,7	1,13	Interruzione causa eccessiva perdita fanghi
19.40	21	F	94	6	0,5	1,13	Ore 19: Aggiunto 1 m <sup>3</sup> di bentonite	
13/6	09.30	22	I	62	4	0,5	1,12	
	10.05	22	F	57	3	0,7	1,13	
	11.33	23	I	55	2	0,5	1,13	
	12.11	23	F	51	2	0,8	1,13	
	14.35	24	F	67	3	0,8	1,14	Ore 13.30: Aggiunto 0,5 m <sup>3</sup> di bentonite
	15.24	25	I	64	3	0,8	1,14	
	16.01	25	F	60	2	0,8	1,14	
	17.10	26	I	58	2	0,8	1,14	
	19.25	26	F	69	3	0,8	1,14	
14/6	08.45	27	I	58	3	0,8	1,13	
	09.30	27	F	54	2/3	0,8	1,13	
	10.10	28	I	61	2/3	0,8	1,12	
	10.45	28	F	59	2	0,8	1,12	
	11.23	29	I	61	2	0,8	1,13	
	12.05	29	F	58	2	0,8	1,13	
	13.47	30	F	59	2	0,8	1,13	
	14.40	31	I	96	4	0,8	1,13	Ore 14: Aggiunto 0,5 m <sup>3</sup> di bentonite
	15.15	31	F	90	4	1	1,13	
	16.20	32	I	113	4/5	0,8	1,13	
16.50	32	F	111	4	1	1,13		

Tabella 2 Report risultati analisi condotte nel cantiere 1.

È stato indicato con **I** il test effettuato all'inizio della manovra d'infissione del troncone di condotta e con **F** la fine dell'operazione.

Il tempo che intercorre tra l'inizio e la fine di un tratto di condotta è il lavoro di trivellazione mentre tra la fine di un tratto e l'inizio del successivo è il tempo necessario per le operazioni di giunzione dei vari elementi del sistema del microtunneling. Questo intervallo è necessario agli operai per collegare il nuovo tratto di condotta.

È stato deciso questo intervallo di campionamento per monitorare il lavoro svolto dall'impianto di separazione del fango.

In questo modo il campionamento svolto all'inizio della "manovra", analizza il fango "pulito" dall'impianto durante l'interruzione della trivellazione; il test effettuato al termine della trivellazione studia il fango "sporcato" dalla manovra. In seguito, essendo il lavoro ciclico, vi sarà un nuovo tempo di fermo dei lavori nel quale l'impianto avrà la possibilità di lavorare senza ulteriore apporto di materiale.

In realtà l'impianto di separazione lavora in continuo mentre la trivellazione procede a cicli di lavoro-non lavoro. Quindi l'impianto sarà maggiormente sotto stress nel periodo della perforazione vera e propria; al termine invece, il fango continua nella sua circolazione ma, non perforando, non viene sfruttato e viene solo vagliato.

In questo cantiere (come nel cantiere 2) il lavoro è stato svolto con turni diurni. L'impianto di separazione del fango era spento durante la notte. Ogni mattina, prima dell'inizio della trivellazione, l'impianto viene avviato e fatto girare per circa mezz'ora. In questo modo i legami tixotropici sono distrutti e il fango riprende la sua circolazione "a regime".

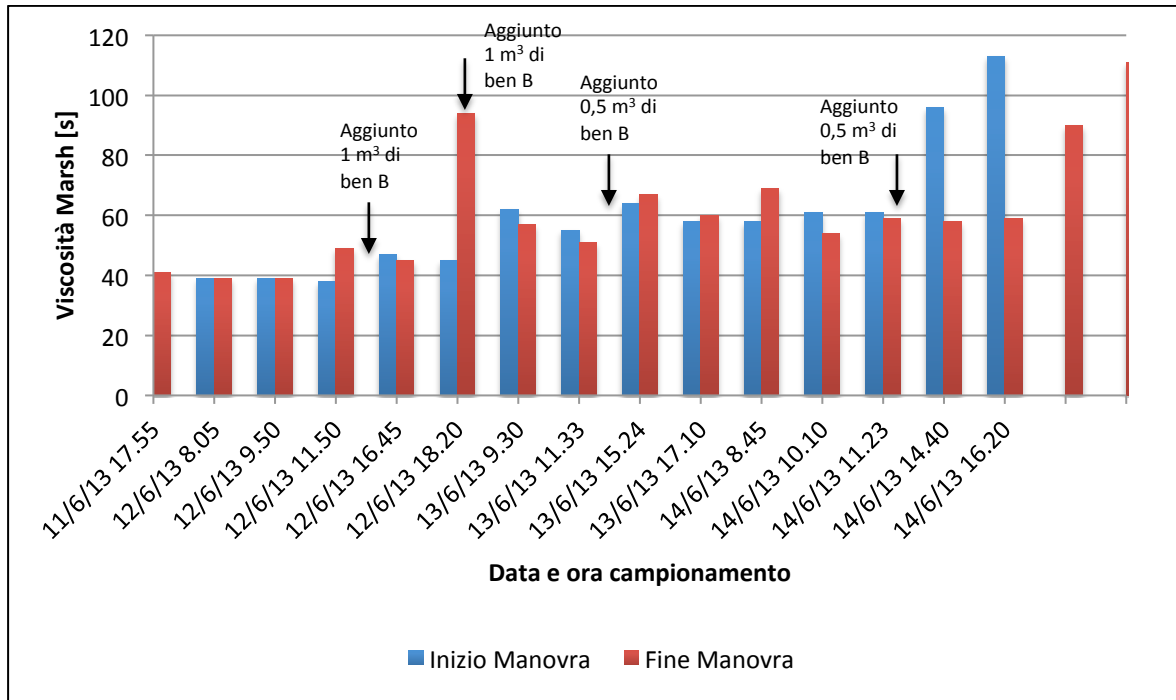


Figura 49 Report prove di viscosità in cantiere 1.

Questa è la spiegazione del perché i valori di viscosità sono per la maggior parte più alti alla fine rispetto all'inizio della perforazione (figura 49).

In questo cantiere essendovi una prevalenza di materiale granulare, anche di grande pezzatura, i fanghi hanno avuto problemi di diluizione: non essendovi materiale "fine", non vi sono stati problemi di appesantimento ma, viceversa, una tendenza costante alla perdita di viscosità dovuta al richiamo di acqua di falda.

Questo fatto è evidenziato anche dalle aggiunte extra di bentonite per riuscire a contrastare la diminuzione di viscosità.

È stata, infatti, riscontrata una perdita costante di fango di perforazione e proprio questo aspetto è da imputare alla natura fortemente granulare dell'ammasso perforato.

La perdita di una certa quantità di fango è tollerata durante la perforazione (circa 5-10 m<sup>3</sup>); il fango viene costantemente rigenerato dall'impianto di miscelazione. Nel caso di perdita superiore a quella tollerata, si ricorre all'introduzione di bentonite direttamente nell'impianto, quindi andando ad incrementarne la percentuale per aumentare la viscosità. Questo rimedio è guidato dall'esperienza della squadra addetta alla perforazione.



Un ulteriore riscontro a quanto affermato si può avere analizzando l'andamento degli altri parametri analizzati, ossia il contenuto in sabbia e la densità del fango.

Come descritto nel capitolo relativo alle prove sui fanghi, la misura del contenuto in sabbia viene effettuata con un filtro ASTM 200.

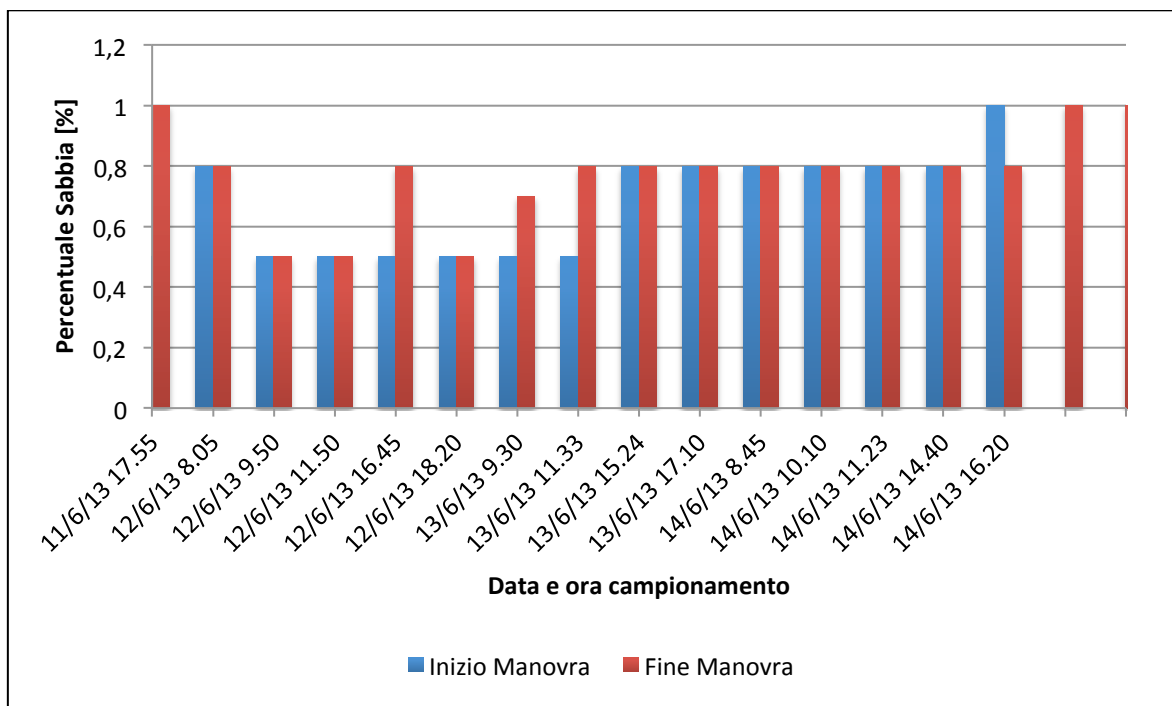


Figura 50 Report prove di contenuto in sabbia in cantiere 1.

Dai dati riportati in figura 50 si osserva che il contenuto in sabbia del fango non subisce sostanziali variazioni. Ciò significa che l'impianto di rimozione dello smarino è correttamente dimensionato e funziona in modo regolare per questa tipologia di terreno.

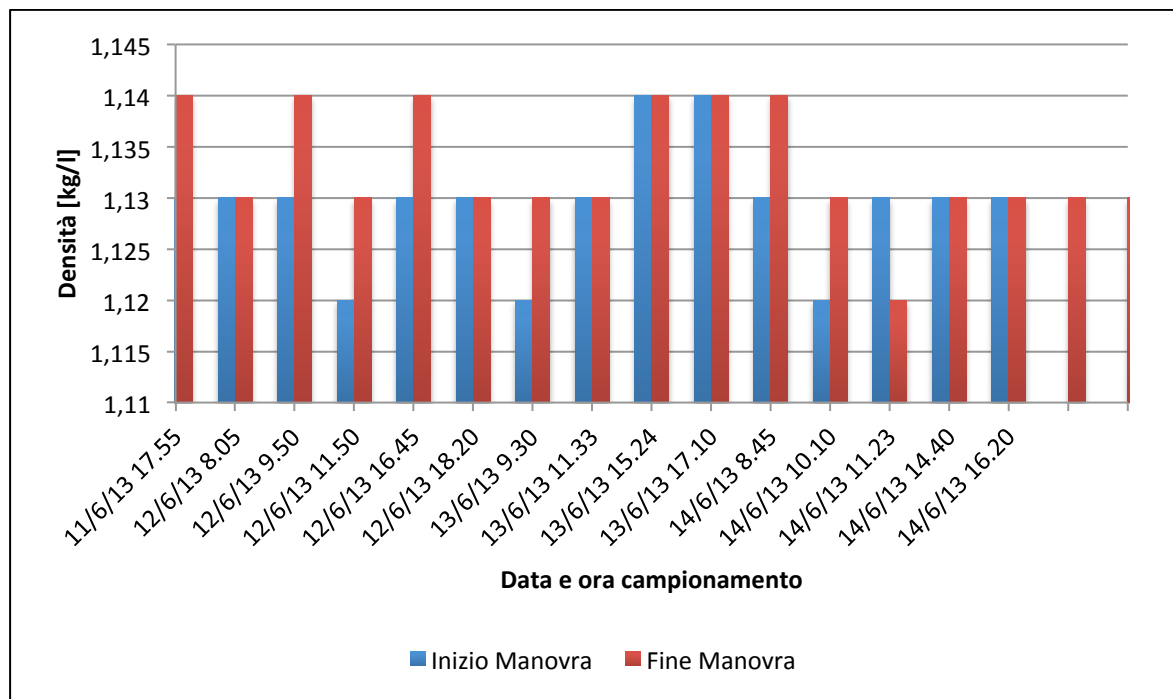


Figura 51 Report prove di densità in cantiere 1.

Stesso discorso del contenuto in sabbia lo si può fare per la densità del fango. Dalla tabella 4 si può vedere che la densità del fluido si mantiene costante durante tutto il periodo d'indagine.

Confrontando la figura 51 con la figura 50 si può notare che la densità e il contenuto in sabbia sono strettamente legate.

La viscosità invece risente maggiormente della quantità di bentonite solida disciolta. Una piccola variazione di quantità di bentonite all'interno del fango fa variare sensibilmente il valore della viscosità, mentre è poco apprezzato se misurato dal punto di vista della densità.

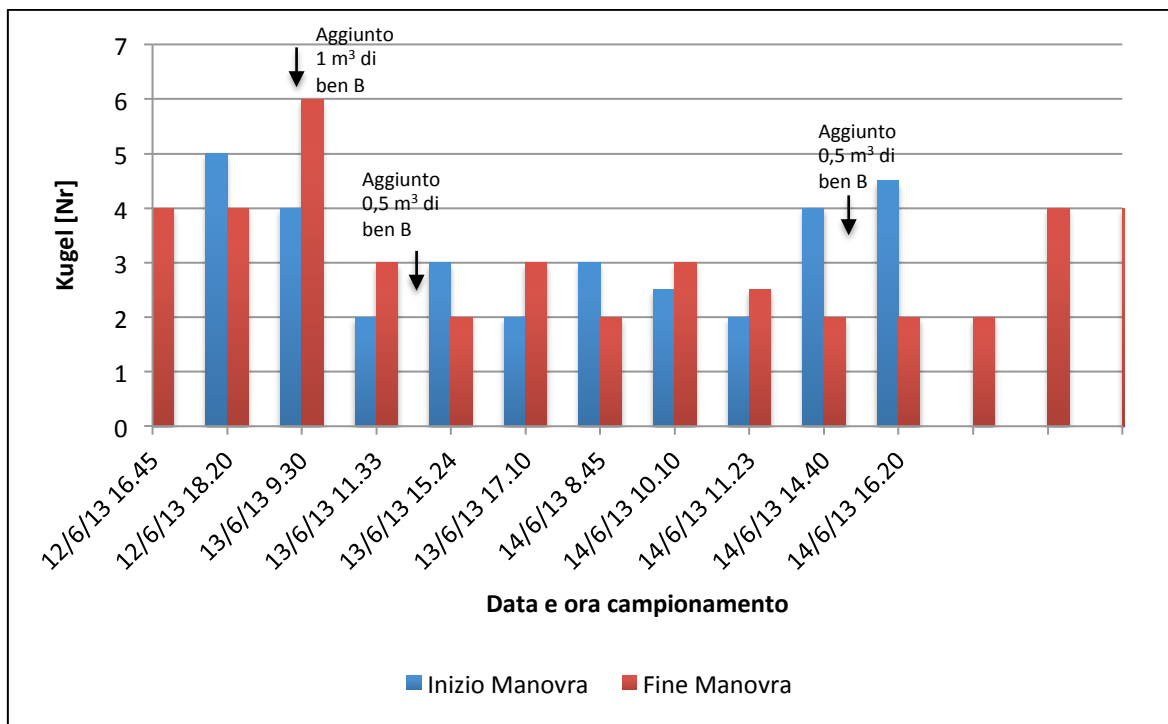


Figura 52 Report prove di Kugel in cantiere 1.

Diverso il discorso che riguarda il test del “Kugel Harp” (figura 52). Anche se non sempre disponibile, lo stesso ha permesso di poter classificare la capacità di trasporto del fango, in relazione con i dati ottenuti con il cono Marsh.

La costante tendenza alla diminuzione del valore conferma l’ipotesi espressa in precedenza in merito alla perdita dei fanghi dovuta alla natura granulare del terreno.

### 6.1.2 CANTIERE NUMERO 2

Il secondo cantiere analizzato si riferisce alla realizzazione di un microtunnel di lunghezza complessiva pari a 501,09 m.

Il tunnel si compone di tre tratti: un primo tratto rettilineo di lunghezza pari a 43,48 m, con pendenza del 10,51 % (6°0’05”) verso il basso; il secondo, curvo con raggio pari a 2000 m, presenta una lunghezza pari a 418,96 m; l’ultimo tratto rettilineo, di lunghezza pari a 38,65 m, con pendenza pari a 12,48 % verso l’alto. (figura 53)

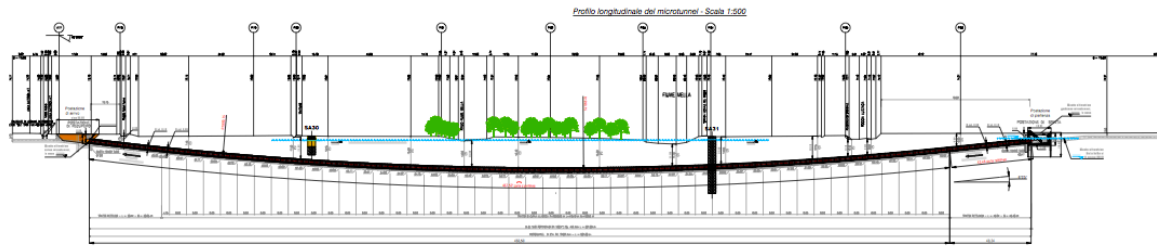


Figura 53 Profilo di progetto del cantiere 2.

Il tunnel, come per il cantiere 1, è stato realizzato con conci di calcestruzzo armato di lunghezza pari a 3 m, diametro interno di 2,10 m e esterno di 2,50 m.

Anche in questo cantiere in media la velocità di avanzamento, durante la fase di perforazione, è stata di circa 70 mm/min.

La realizzazione del microtunnel (esclusi i tempi di apprestamento cantiere e realizzazione del pozzo di spinta) è durata circa 4 settimane.

Il terreno attraversato presentava un'alta percentuale di materiale fine (sabbia medie e ghiaie piccole) e una percentuale di materiale fine superiore a quella incontrata nel precedente cantiere.

Nella figura 54 si può osservare il particolare dalla planimetria del cantiere 2. Nella parte arancione si trova il pozzo di spinta, nella parte gialla l'impianto di separazione.

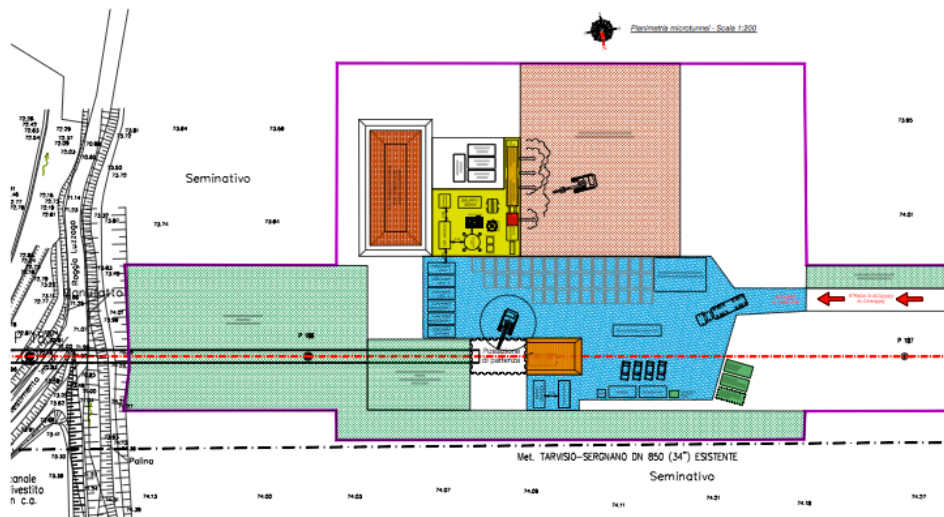


Figura 54 Planimetria cantiere 2.

Anche il secondo cantiere riguardava la realizzazione di un attraversamento fluviale per la posa di servizi.

Le indagini geognostiche preliminari hanno evidenziato che in questo cantiere vi è una percentuale di materiale fine superiore rispetto al primo.

L'impianto di separazione predisposto in cantiere è identico a quello presente nel primo lavoro ma, a causa della differente granulometria del terreno attraversato, si è dovuto successivamente apportare una modifica al sistema, come verrà specificato in seguito.

I test sono stati svolti secondo i criteri indicati nel paragrafo precedente.

In seguito sono riportati i dati ottenuti dai campionamenti svolti nel secondo cantiere.

Per completezza sono stati raggruppati assieme i dati di tutte le prove svolte per poterle analizzare in complesso ed evidenziare l'interazione dei vari fattori:

Data	Ora	Pipe	Indicazione	Marsh	Sand	Density	Note
				[s]	[%]	[Kg/l]	
16/7	14.20	20	I	100	1,5	1,19	
	15.10	20	F	108	3,5	1,21	
	16.00	21	I	96	2	1,18	
	16.35	21	F	99	2,5	1,2	
	17.40	22	I	110	2	1,19	
	18.15	22	F	96	4,5	1,21	
17/7	08.35	23	I	70	2	1,18	
	09.15	23	F	85	4,5	1,21	
	09.50	24	I	80	3	1,19	
	10.30	24	F	95	5	1,22	
	11.10	25	I	90	4	1,21	
	11.45	25	F	88	5	1,2	
	13.35	26	F	75	6	1,23	
	14.35	27	I	68	2,5	1,2	Ore 14.00: Cambio pannello dissabbiatore
	15.50	28	I	65	1,5	1,2	
	16.35	28	F	65	5,5	1,23	
	17.10	29	I	71	3	1,21	
	17.50	29	F	64	5	1,24	
18/7	07.40	30	I	60	3,5	1,22	
	08.20	30	F	64	4,5	1,24	
	08.40	31	I	61	4,5	1,23	
	09.15	31	F	67	5,5	1,25	
	10.35	32	I	64	4	1,23	

Tabella 3 Report risultati analisi svolte nel cantiere 2.

Come si nota dai dati riportati in tabella 3, si notano importanti variazioni nelle caratteristiche dei fanghi rispetto quelli impiegati al cantiere 1.

In questo cantiere il test del Kugel Harp non era disponibile e quindi non è stato svolto.

Anche per questo cantiere valgono le stesse considerazioni elencate nel paragrafo precedente in merito alle regole e alle tempistiche di campionamento.

Analizziamo con ordine i vari parametri.

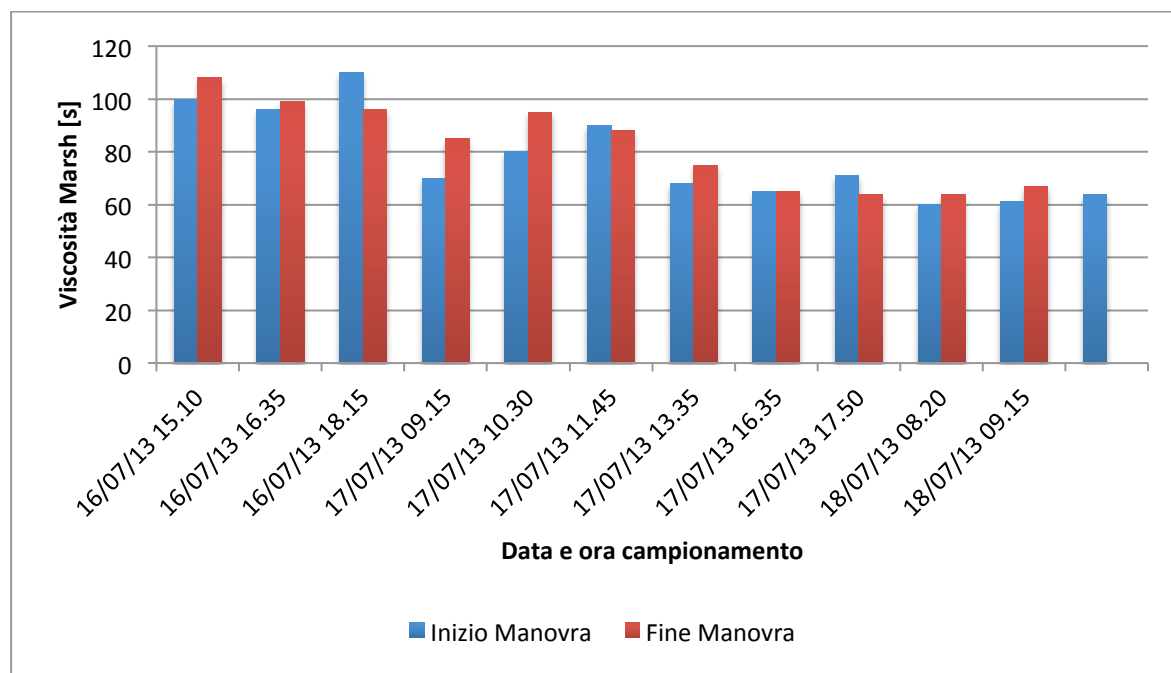


Figura 55 Report prove di viscosità con cono Marsh in cantiere 2.

Dalla figura 55 si osserva che la viscosità Marsh del fango bentonitico diminuisce con il passare del tempo. I valori di viscosità tendono a una diminuzione costante con il passare del tempo, indice della tendenza al decadimento del fango.

In sintesi dal grafico si può intuire che il parametro della viscosità è soggetto a variazioni continue. Ciò è dovuto all'eterogeneità del terreno trivellato, unita a una costante tendenza al decadimento del fango di perforazione.

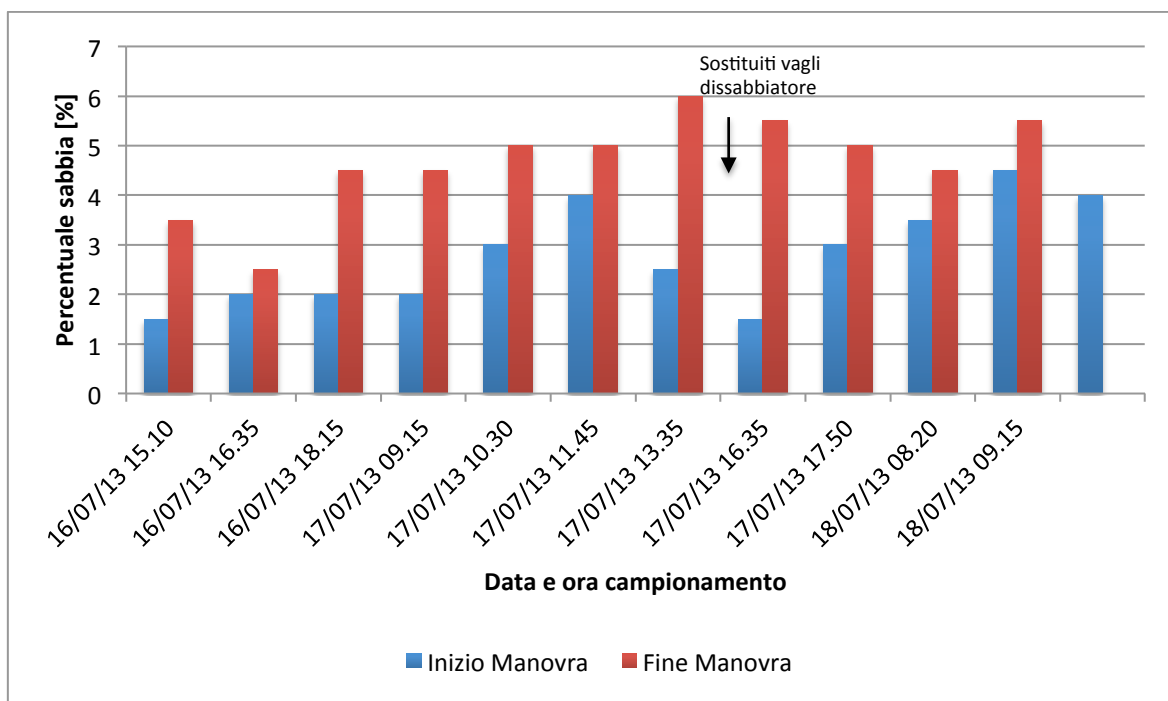


Figura 56 Report prove di contenuto in sabbia in cantiere 2.

Anche in questo grafico (figura 56), a differenza del cantiere precedente, si nota che il contenuto in sabbia subisce una continua variazione, al pari della viscosità.

Essendo la percentuale fine superiore rispetto al caso analizzato in precedenza, il contenuto di sabbia rappresenta un problema per lo svolgimento dello scavo. Si ricorda che, maggiore è il contenuto percentuale di sabbia nel fango di perforazione, maggiore è il peso stesso del fluido e di conseguenza il sistema è soggetto a stress maggiori. Come limite tecnico si considera un valore massimo dell'8% del contenuto in sabbia. Oltre a questo valore, di norma, si ricorre alla sostituzione dei fanghi, pratica economicamente molto svantaggiosa.

Dal grafico si nota come la percentuale di sabbia ha una tendenza costante all'incremento, indice che l'impianto di separazione estrae dal fango meno materiale di quanto non è inglobato.

In particolare si nota che nella fase di "non scavo" l'impianto non è in grado di riportare i valori del fluido a quelli dell'inizio "scavo" precedente. Inoltre si è osservato che, riducendo il tempo di "non scavo" l'impianto di separazione va in crisi.

Per migliorare il sistema e rendere più efficace il lavoro del dissabbiatore è stato modificato il set di vagli del dissabbiatore sostituendo il gruppo dei vagli (pannelli filtranti) con un altro a trama più fitta, per vagliare anche la frazione da pezzatura più piccola.

Il risultato, come si osserva dal grafico, è stata una diminuzione della percentuale di sabbia. Ciò indica che, adeguando l'impianto alle caratteristiche del terreno perforato, si ha un miglioramento della sua resa.

Lo stesso discorso vale per la densità del fluido di perforazione.

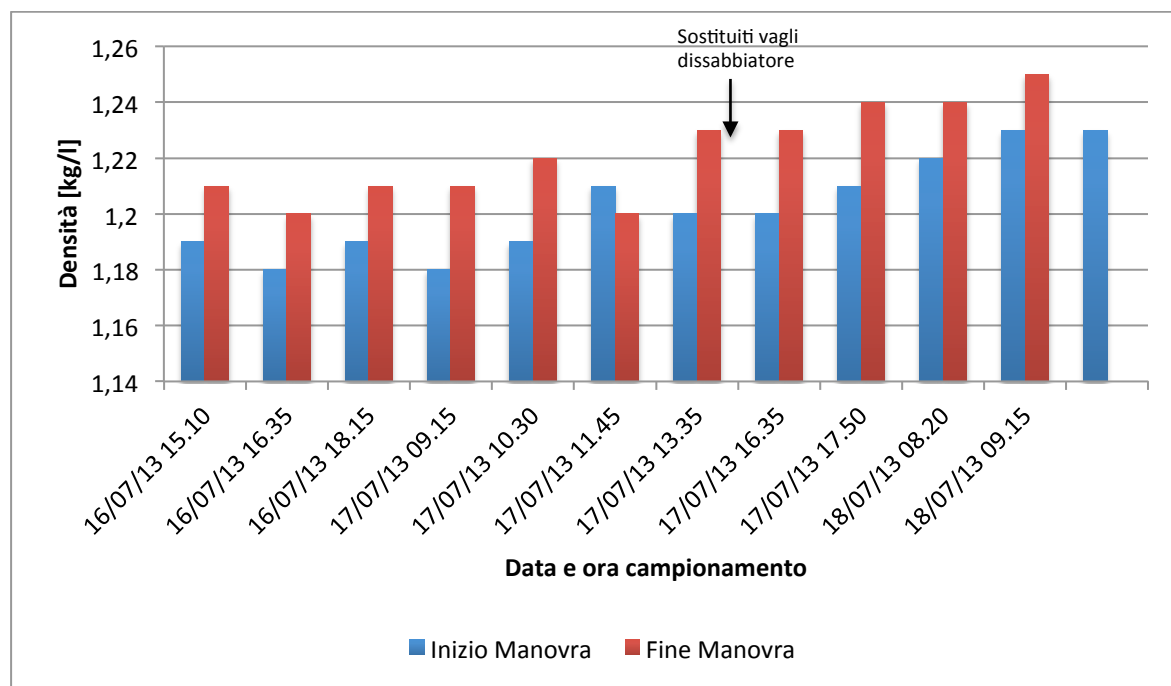


Figura 57 Report prove di densità in cantiere 2.

Nella figura 57 si nota che la densità del materiale subisce variazioni concordi alle variazioni della percentuale di sabbia.

Il peso del fango aumenta all'aumentare della quantità di sabbia presente in esso, quindi il suo monitoraggio risulta importante per avere un riscontro sui valori precedentemente analizzati.



### 6.1.3 CONFRONTO TRA BENTONITE A E BENTONITE B

Negli attraversamenti analizzati in precedenza, i fanghi di perforazione utilizzati erano simili, ma non perfettamente uguali.

La diluizione con acqua era la stessa, mentre le percentuali relative alle due bentoniti erano diverse e non misurabili. L'unico valore noto, nella miscelazione acqua-bentonite, era la concentrazione solida, risultata pari al 7% in peso di solido.

La composizione precisa del fango preparato in cantiere non è nota.

Per avere indicazioni circa il comportamento delle due bentoniti si è deciso di ripetere gli stessi test svolti sul fango in circolazione anche sulle due bentoniti miscelate con acqua ma testate separatamente.

Le due bentoniti sono state miscelate nello stesso miscelatore, adottando gli stessi tempi di miscelazione, la stessa percentuale d'acqua e diluizione (concentrazione solida pari a 7%) e lo stesso procedimento per svolgere le prove. Tutto ciò al fine di ottenere due valori di viscosità confrontabili tra loro.

Essendo solo miscelazione di bentonite e acqua non si è stato misurato il contenuto in sabbia ed essendo uguale la diluizione in acqua e il tempo di miscelazione, la densità risultava identica.

La viscosità è stata misurata utilizzando il cono Marsh e il Kugel Harp.

Campione	Data	Ora	Densità	Marsh	Kugel
			[kg/l]	[s]	[Nr]
A	12/6	17:00	1,03	47	4
B			1,03	> 150	6

Tabella 4 Report test di confronto tra bentonite A e B.

I risultati dei test effettuati indicano (tabella 4) una notevole differenza tra le bentoniti. A parità di concentrazione la bentonite B sviluppa una viscosità fino a sei volte superiore alla bentonite A.

Questo test rende chiara l'importanza della qualità dei componenti per la miscelazione dei fanghi bentonitici ma, per esprimere giudizi più precisi è necessaria un'analisi comparativa più dettagliata, magari svolta in laboratorio.

## 6.2 PROVE IN LABORATORIO

Le prove di laboratorio sono state svolte per ottenere maggiori informazioni circa le proprietà reologiche dei fanghi di perforazione.

In laboratorio sono state analizzate miscele di acqua e bentonite, cioè prive di materiale scavato.

Come abbiamo visto nei paragrafi precedenti, i fanghi di perforazione sono miscele in costante mutazione, definibili, non solo in un esatto cantiere, ma anche in una stessa fase di trivellazione, in un determinato istante temporale.

Sono state svolte differenti analisi di laboratorio per descrivere ulteriormente le due bentoniti utilizzate in cantiere; in particolare è stata svolta anche un'analisi chimica con diffrattometro a raggi x per individuare la differente composizione delle due.

Un approfondito studio reologico è stato eseguito sulla bentonite B, mentre è stato possibile svolgere un solo confronto tra la A e la B.

### 6.2.1 ANALISI CHIMICA

È stata svolta un'analisi chimica con diffrattometro a raggi x sui due campioni di bentonite (A e B) per confrontare la loro composizione chimica.

Dai risultati dell'analisi diffrattometrica, in figura 58 si può affermare che le due bentoniti risultano simili tra loro, considerazione che conferma la provenienza di entrambe dalle stesse cave. Le piccole variazioni presenti nel grafico si possono ritenere imputabili agli additivi aggiunti in seguito all'estrazione e ai trattamenti di lavorazione di entrambe.

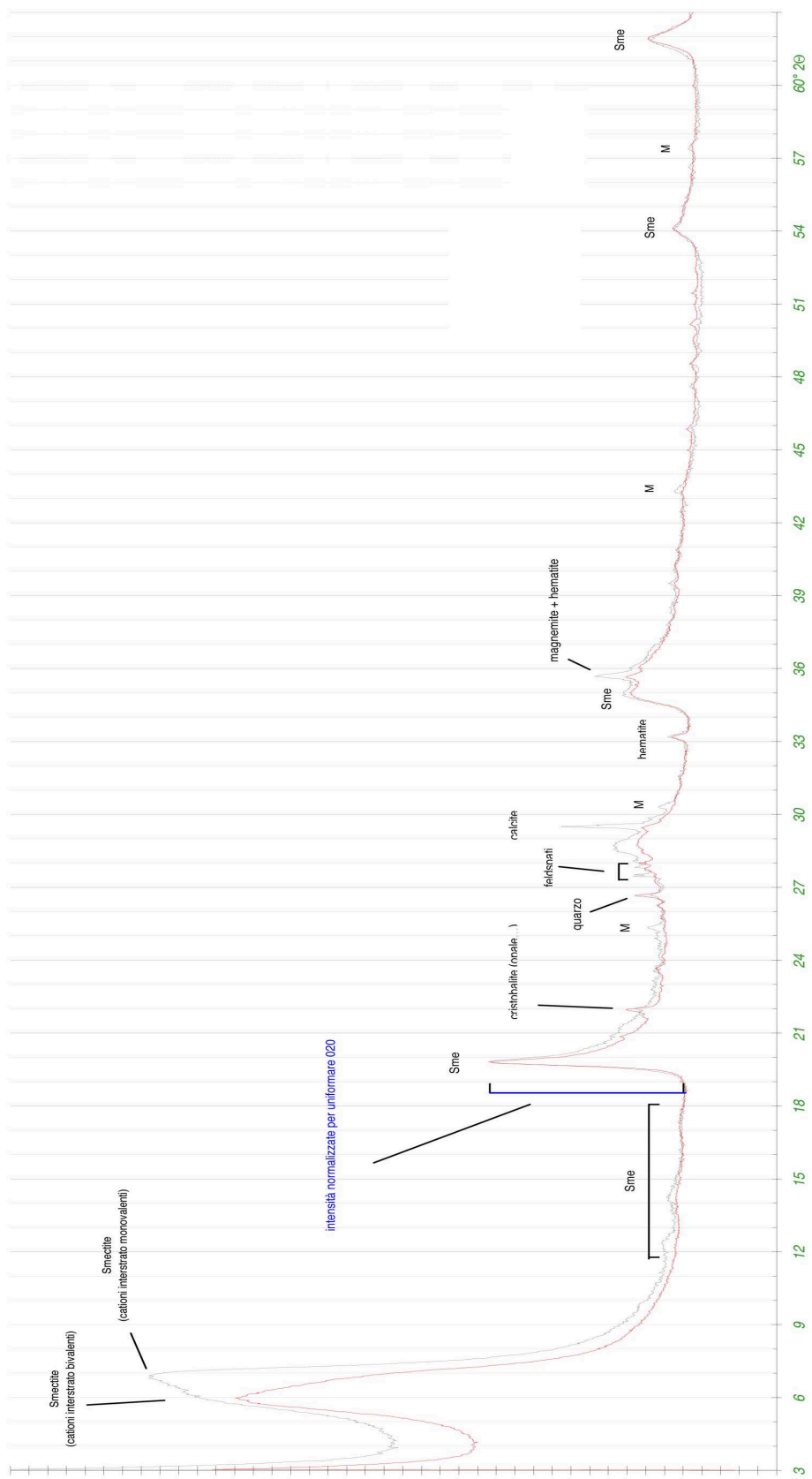


Figura 58 Difrattogramma delle bentoniti A e B.

<b>Minerali</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
Smectite	90	92
Feldspati	4	4
Quarzo	t	t
Calcite	2	1
Hematite	t	t
Magnetite	5	2
Cristobalite	t	1

*Tabella 5 Percentuali elementi riscontrati dall'analisi diffrattometrica.*

Dalla tabella 5 si può apprezzare inoltre la qualità dei due campioni: entrambi presentano una elevata percentuale di Smectite (circa 90%) mentre presentano percentuali trascurabili degli altri minerali.

#### 6.2.2 DETERMINAZIONE DEI LIMITI DI ATTERBERG

Lo studio condotto presso il laboratorio di Geotecnica dell'Università degli Studi di Padova ha dato i risultati riportati in tabella 6.

<b>Campione</b>	<b>Limite di Liquidità</b>	<b>Limite di Plasticità</b>	<b>Indice di Plasticità</b>
	<b>W<sub>L</sub></b>	<b>W<sub>P</sub></b>	<b>I<sub>P</sub></b>
A	514 %	50 %	464
B	474 %	73 %	401

*Tabella 6 Risultati dei limiti delle due bentoniti.*

I valori dei limiti rientrano nell'intervallo riportato in letteratura [7], permettendo di riscontrare la natura montmorillonitica dei due materiali. In realtà, anche se la determinazione dei limiti di Atterberg è una prova fondamentale per la classificazione geotecnica dei terreni, con riferimento all'utilizzo quale fango bentonitico per questo tipo di materiale, questa prova perde di significatività.

### 6.2.3 AEROMETRIA

Presso lo stesso laboratorio è stata eseguita anche una prova per la determinazione della curva granulometrica per sedimentazione in acqua (aerometria) delle due bentoniti (figura 59) [7].



*Figura 59 Prove di aerometria: al centro bentonite A, a sinistra bentonite B.*

Nello svolgimento della prova si è giunti alla conclusione che, in entrambi i casi, questa tipologia di prova non è effettuabile per la natura stessa del materiale analizzato.

Essendo una prova svolta in condizioni statiche, le proprietà tixotropiche delle bentoniti hanno fatto sì che i campioni analizzati sono passati da liquidi a gel rendendo inutile qualsiasi tipo di misurazione.

### 6.2.4 ANALISI REOMETRICA DELLE BENTONITI A E B

Presso il laboratorio di chimica dei materiali di dell'Università degli studi di Modena e Reggio Emilia sono stati svolti dei test con reometro su entrambe le bentoniti.

A differenza dell'altro reometro descritto in precedenza a 6 velocità, lo strumento utilizzato per questi test ha la particolarità di poter impostare la velocità desiderata su di un range molto vasto (da 150 a 6000 giri al minuto).

I test, condotti identici sulle due bentoniti, sono stati svolti a velocità costante pari a 150 e 600 giri al minuto (RPM).

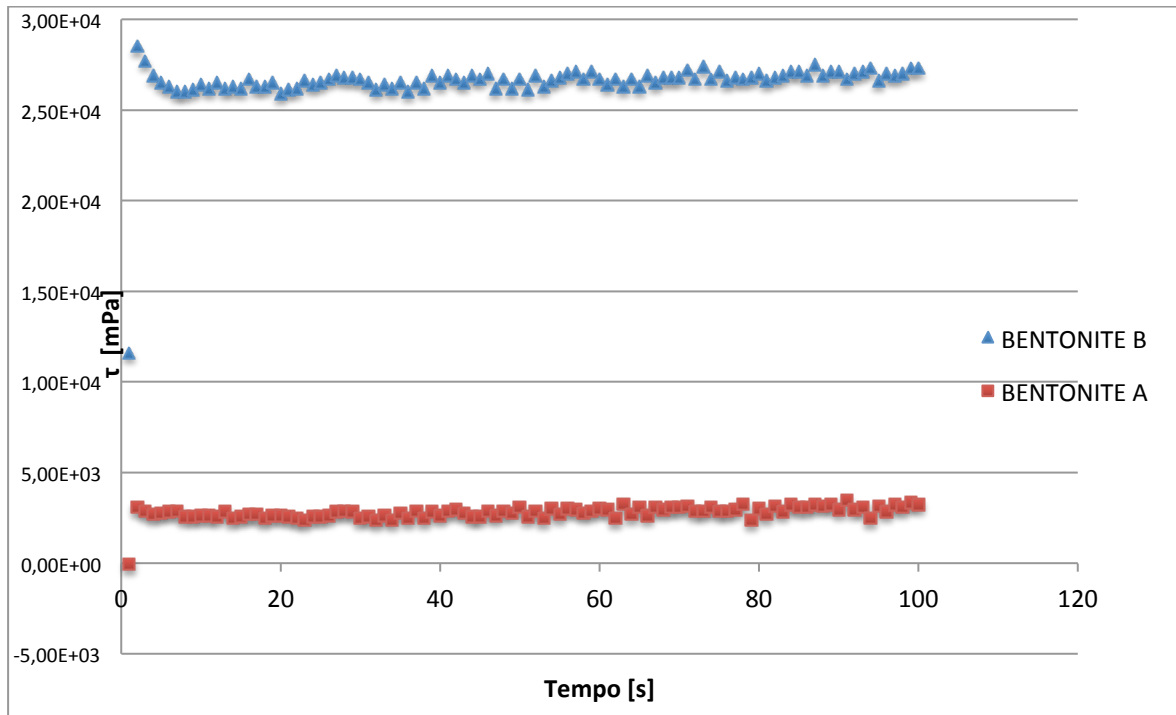


Figura 60 Risultati viscosimetro a 150 RPM.

I dati ottenuti dalla prova svolta a 150 RPM (figura 60) confermano i risultati ottenuti in sito con il test del cono Marsh, evidenziando nuovamente che la bentonite B ha viscosità superiore rispetto alla A, in questo caso di circa un ordine di grandezza, a parità di concentrazione.

Similmente i risultati del test, condotto a 600 giri al minuto e riportati nel seguente grafico di figura 61, evidenziano la netta differenza di viscosità tra le due bentoniti studiate.

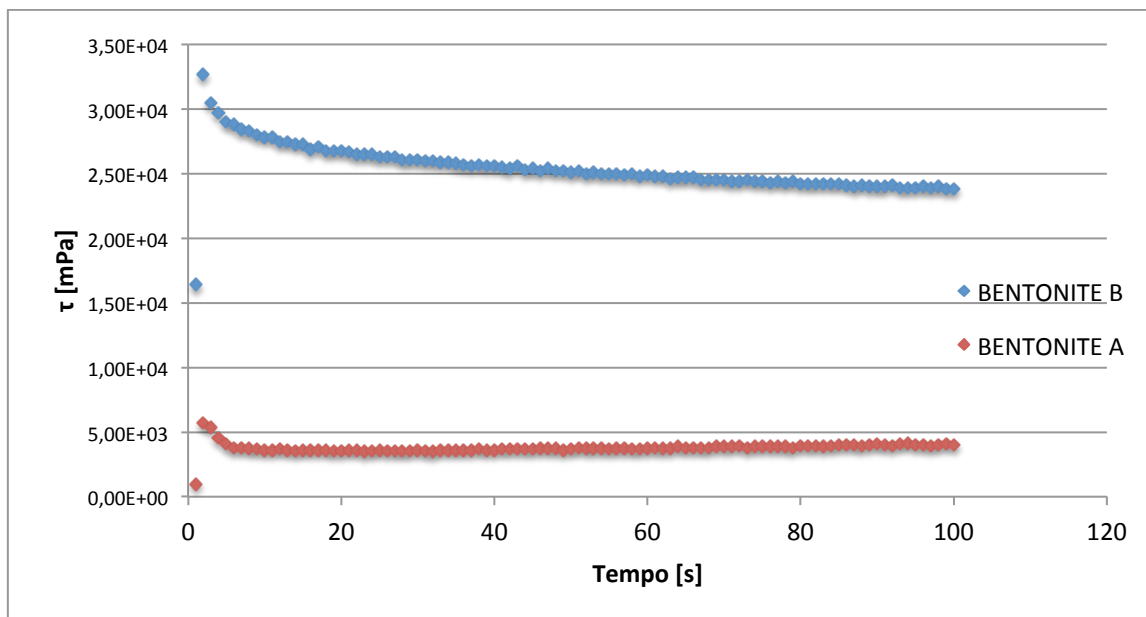


Figura 61 Risultati viscosimetro a 600 RPM.

Nonostante il regime di rotazione del reometro sia quattro volte maggiore rispetto alla prova precedente, la differenza tra i due valori resta sempre di un ordine di grandezza (circa 5 volte superiore la bentonite B rispetto alla A).

Dai grafici delle due prove condotte si può osservare il comportamento dei fluidi in questo tipo di reometro.

In particolare si osserva che, partendo da fermo, il reometro deve vincere una resistenza inizialmente superiore per riuscire a muoversi. Questa maggiore resistenza è dovuta ai legami tixotropici che tendono a formarsi nei fluidi bentonitici non appena si ritrovano in una condizione di quiete. In seguito, mantenendo una velocità di rotazione costante, la resistenza diminuisce asintoticamente a un valore costante. Tutte le prove sono state condotte per circa 5 minuti ma si osserva che il decadimento della viscosità dal valore di picco a quello residuo è molto rapido.

#### 6.2.5 ANALISI REOMETRICA APPROFONDATA DELLA BENTONITE B

È stato possibile svolgere una caratterizzazione più approfondita della bentonite B. Sono stati svolti test in laboratorio sia con apparecchi già visti (cono Marsh), sia con un reometro a 6 velocità (descritto nei capitoli precedenti). Inoltre è stata fatta una prova utilizzando la filtropressa (descritta in precedenza)

La bentonite B è stata miscelata con concentrazione solida pari a 4,5%. L'umidità è stata mantenuta costante durante lo svolgimento delle prove.

La bentonite B è stata analizzata con il reometro descritto nella parte introduttiva.

Lo strumento permette di svolgere il test rapidamente.

È caratterizzato da 6 velocità di rotazione: 3, 6, 100, 200, 300 e 600 giri al minuto. Per ciascun valore di velocità lo strumento misura la viscosità in Poise ( $P$ ), pari a un decimo di Pascal al secondo ( $0,1 Pa s$ )

Si dice che un fluido ha viscosità di 1 Poise quando è necessario applicare la forza di 1 dyne ( $10^{-5} N$ ) in un secondo due strati contigui con una superficie di  $1 cm^2$  e distanti tra loro 1 cm. L'acqua pura a  $20^\circ$  ha viscosità di 0,01 Poise.

Inoltre, per ottenere una maggiore indicazione sulle capacità reologiche di questa bentonite è stata svolta una prova di viscosità con il cono Marsh.

L'intercetta della retta passante per i valori di 300 e 600 giri individua lo Yield Point (misura indiretta) risultato pari a  $17,1 lb/100ft^2$ .

La viscosità apparente è pari al valore indicato a 600 RPM diviso due [3].

La viscosità plastica è pari alla differenza tra i valori di 600 e 300 RPM.

<b>BENTONITE B</b>		
<b>42,3</b>	<b>Cono Marsh</b> tempo	s
	<b>Viscosimetro 1 h</b>	
<b>37,3</b>	600 RPM	-
<b>27,2</b>	300 RPM	-
<b>18,7</b>	200 RPM	-
<b>15,2</b>	100 RPM	-
<b>10,6</b>	6 RPM	-
<b>8,2</b>	3 RPM	-
	<b>Valori calcolati</b>	
<b>18,7</b>	Viscosità apparente	[mPa s]
<b>10,1</b>	Viscosità plastica	[mPa s]
<b>17,1</b>	Yield Point	[lb/100ft <sup>2</sup> ]
<b>30</b>	<b>Tempo di filtrazione</b>	[min]
<b>≤20</b>	<b>Filtrato</b>	[ml]
<b>≤ 1</b>	<b>Percentuale decantata</b>	%

Tabella 7 Risultati prove di laboratorio su bentonite B.

Nella tabella 7 sono riportati i valori ottenuti dalle due prove di viscosità e della prova di filtrazione effettuata con l'utilizzo della filtropressa.

In seguito sono rappresentati nel grafico i valori ottenuti dal viscosimetro rotazionale.



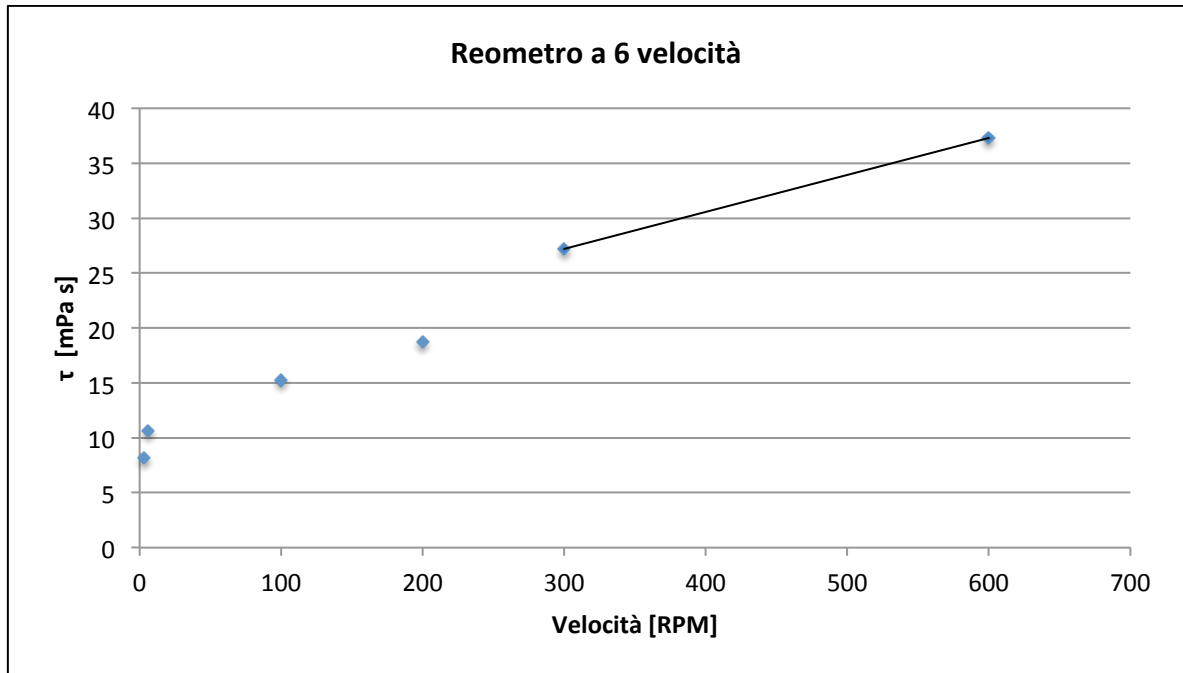


Figura 62 Risultati prova con reometro a 6 velocità su bentonite B.

Dalla figura 62 velocità-tensione si nota la relazione direttamente proporzionale delle due grandezze con andamento lineare. Inoltre, grazie all'interpolazione dei valori ottenuti a 300 e a 600 RPM, si individua sull'asse delle ordinate il valore di Yield Point della bentonite B, miscelata con concentrazione solida pari a 4,5%.

Sono stati condotti successivi test sempre sulla bentonite B, miscelata con concentrazione solida pari a 5% per valutare l'effetto di questo parametro sulle caratteristiche reologiche della miscela. Inoltre i test sono stati condotti con concentrazione di 4,5%, e 5%, in 3 tempi diversi: un test appena dopo la miscelazione del fluido, uno dopo 1 ora e un terzo dopo 20 ore.

Per ciascun caso, prima di svolgere i test, le miscele sono state agitate (circa 5 minuti) per assicurarsi l'eliminazione totale dei legami tixotropici che avrebbero causato una falsificazione dei risultati.

Il terzo test a 20 ore è stato scelto considerando tale tempo come intervallo sufficiente per la completa idratazione della bentonite.

Campione		B	B
Concentrazione	g/l	45	50
<b>Tempo post miscelazione 0h</b>			
Cono Marsh	s	43,25	47,87
<b>Reometro</b>			
600 RPM	-	38	46
300 RPM	-	27,5	33,5
200 RPM	-	22,5	28
100 RPM	-	17,5	22,5
6 RPM	-	10	14
3 RPM	-	9,5	13
<b>Valori calcolati</b>			
Viscosità apparente (AV)	mPa s	19	23
Viscosità plastica (PV)	mPa s	10,5	12,5
Yield Point	lb/100ft <sup>2</sup>	17	21
<b>Tempo post miscelazione 1h</b>			
Cono Marsh	s	43,53	50,75
<b>Reometro</b>			
600 RPM	-	41	52,5
300 RPM	-	30	38
200 RPM	-	25	31,5
100 RPM	-	19,5	25
6 RPM	-	11	15
3 RPM	-	10	14,5
<b>Valori calcolati</b>			
Viscosità apparente (AV)	mPa s	20,5	26,25
Viscosità plastica (PV)	mPa s	11	14,5
Yield Point	lb/100ft <sup>2</sup>	19	24
<b>Tempo post miscelazione 20 h</b>			
Cono Marsh	s	51,68	67,50
<b>Reometro</b>			
600 RPM	-	50,5	66
300 RPM	-	37	47,5
200 RPM	-	31	40
100 RPM	-	24	31,5
6 RPM	-	13,5	19
3 RPM	-	12,5	18
<b>Valori calcolati</b>			
Viscosità apparente (AV)	mPa s	25,25	33
Viscosità plastica (PV)	mPa s	13,5	18,5
Yield Point	lb/100ft <sup>2</sup>	24	29
Acqua libera dopo 20 h	%	0	0

Tabella 8 Risultati test reologici su bentonite B con differenti concentrazioni e al variare del tempo.

Nella tabella 9 sono riportati tutti i valori ottenuti sia dal reometro che dal cono Marsh. Considerando ciascuna concentrazione analizzata, risulta evidente che, il tempo è un parametro che influenza molto la reologia di un fluido bentonitico. Con il passare del tempo la bentonite s'idrata progressivamente e dopo 20 ore raggiunge valori superiori sia per quanto riguarda lo Yield Point, sia per le viscosità, apparente e plastica. Si può notare che, per entrambe le miscele analizzate, la presenza di acqua libera all'interno dei fluidi, passate 20 ore dalla miscelazione, è pari a zero.

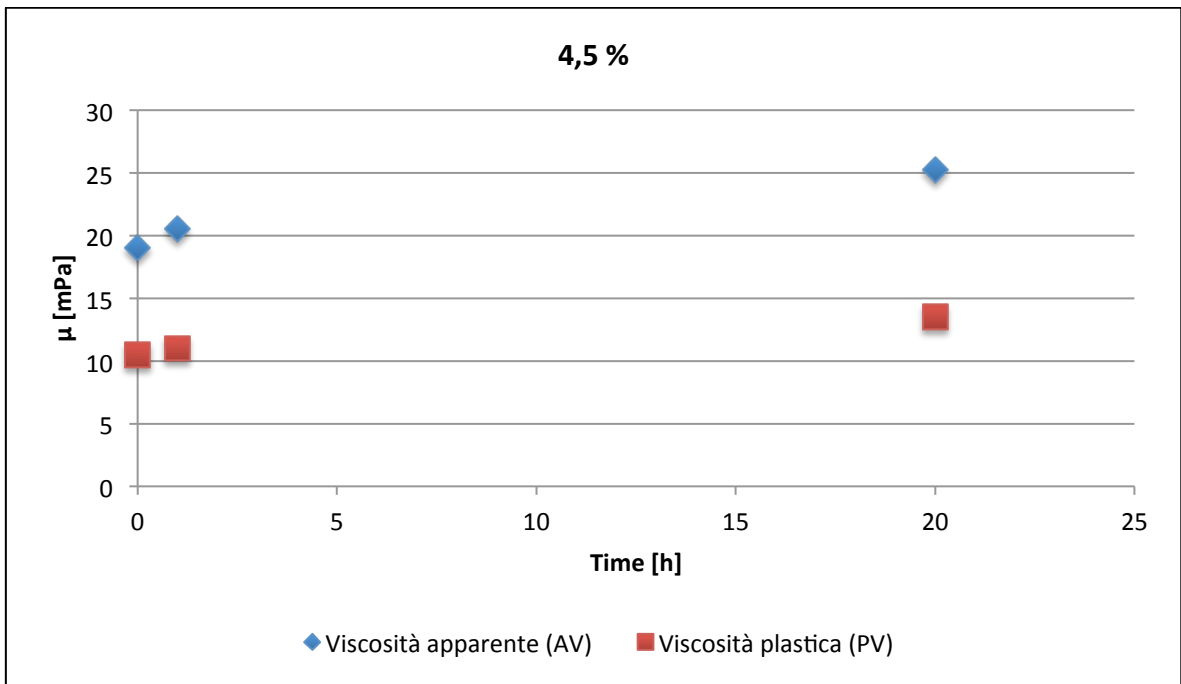


Figura 63 Report prove con reometro a concentrazione 4,5%.

Dalla figura 63 si osserva che, sia la viscosità apparente che la viscosità plastica subiscono un lieve incremento già 2 ore dopo la miscelazione mentre dopo 20 ore l'incremento è più marcato.

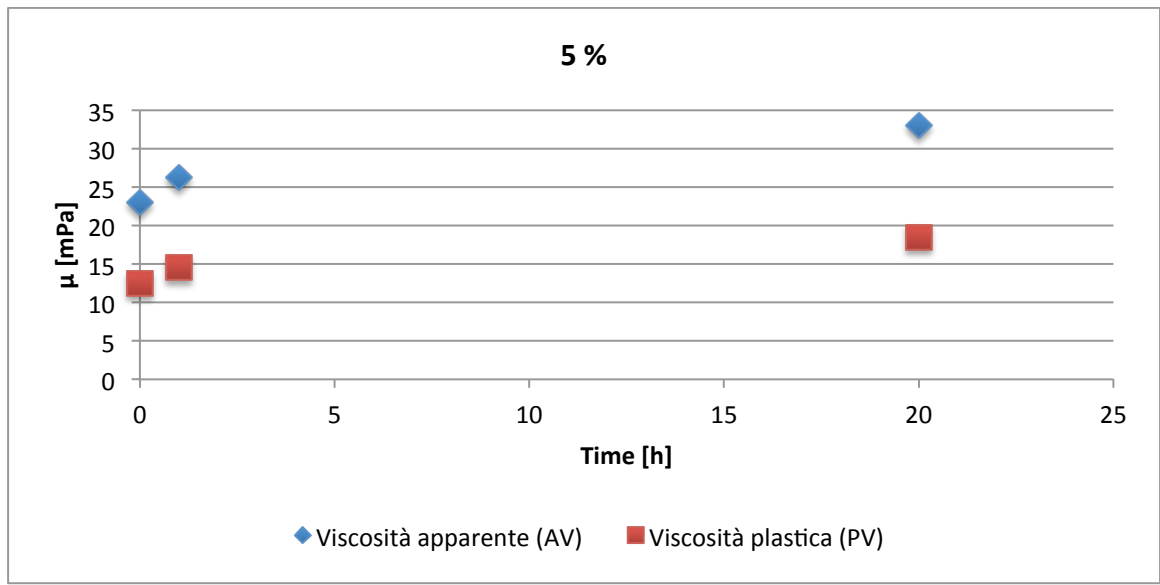


Figura 64 Report prove con reometro a concentrazione 5%.

Anche nel caso di concentrazione al 5% (figura 64) si soluzione solida risulta che i valori sono accentuati dopo il passaggio di 20 ore dopo la miscelazione.

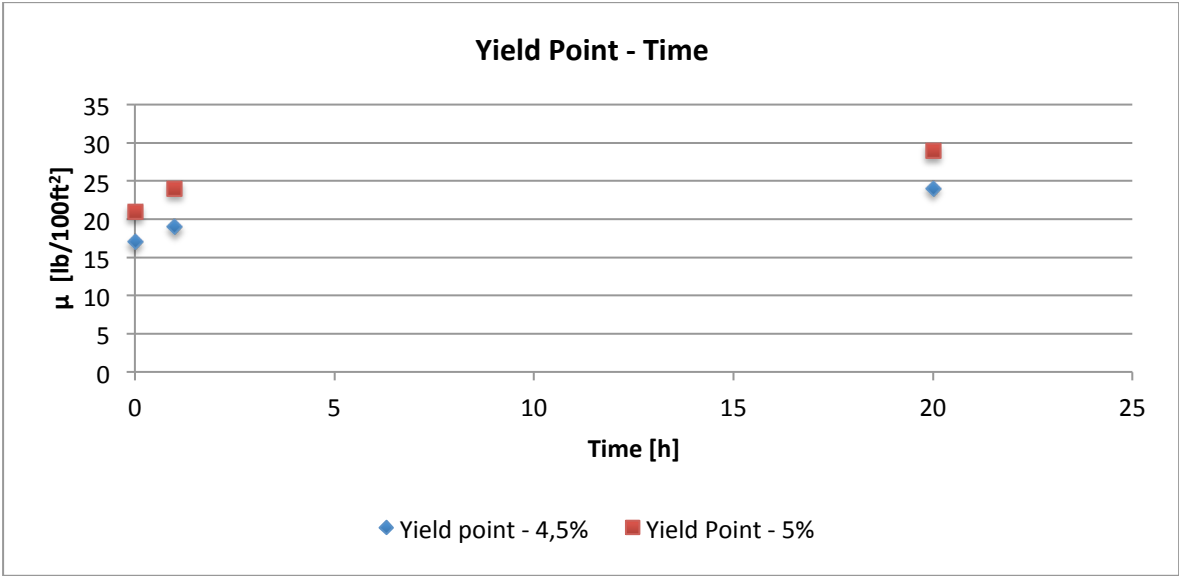


Figura 65 Analisi dello Yield Point in funzione di concentrazione e tempo.

Dalla figura 65 si osserva che un piccolo aumento di concentrazione (0,5% in più) genera un buon aumento dello Yield Point ma si nota anche che è più importante una corretta maturazione del fluido per sviluppare una migliore viscosità.

## **7 CONCLUSIONI**

Le tecnologie *no-dig*, soprattutto se applicate in ambito urbano, costituiscono una valida alternativa alle tecniche tradizionali per risolvere il problema del giusto equilibrio tra la necessità della realizzazione di servizi interrati e il rispetto dell'ambiente. Il confronto economico con le tecniche tradizionali deve essere fatto di volta in volta, calato sulle singole situazioni puntuali, tenendo anche conto dei costi indiretti, che comunque ricadono sulla società e a cui l'Amministrazione dovrebbe porre la giusta attenzione.

In molte situazioni e contesti realizzativi queste nuove tecnologie risultano nettamente vantaggiose.

Nell'analisi di questa "nuova" tecnologia è emersa l'importanza primaria dei fanghi di perforazione, in quanto che condizione necessaria, ma non sufficiente, per la realizzazione di un'opera trenchless è la qualità del fluido utilizzato.

I fanghi di perforazione sono particolari miscele che svolgono diversi compiti di fondamentale importanza. Ne risulta come sia fondamentale necessaria una scelta oculata dei componenti del fluido e, non da meno, il monitoraggio da svolgere durante il suo impiego.

Il lavoro svolto con questa tesi ha illustrato come non esista un fango di perforazione "Perfetto" che preparato all'inizio dell'opera possa essere mantenuto tale, ma piuttosto che il fango è in costante mutazione con l'evolversi dei lavori di scavo.

Ne discende che in cantiere sia necessario attuare un monitoraggio del fango avente il compito di garantire in ogni momento un fluido adeguato alle caratteristiche del materiale scavato. Infatti, essendo il terreno scavato non omogeneo, il monitoraggio deve essere continuo e mirato; se i controlli sono svolti con continuità è possibile anche riuscire a descrivere il comportamento della macchina trivellatrice e identificare i cambiamenti del terreno in contemporanea con l'escavazione.

Oltre al monitoraggio durante la fase di trivellazione, è importante anche il controllo e la caratterizzazione preliminare dei componenti che si intende utilizzare per la miscelazione dei fanghi di perforazione.

L'analisi di laboratorio quindi è necessaria a indicare le precise caratteristiche reologiche della bentonite. Queste caratteristiche poi sono tenute in considerazione al momento di scegliere una determinata bentonite, un determinato additivo o più semplicemente la concentrazione di miscelazione.

A conclusione del lavoro svolto si può affermare che per il monitoraggio durante la realizzazione dell'opera sono fondamentali l'esecuzione frequente di misure in sito al fine di controllare l'efficienza dell'impianto di separazione e il mantenimento delle capacità reologiche dei fanghi in opera. Sono altresì importanti i test svolti in laboratorio, utili a caratterizzare i materiali e fornire una base di dati da applicare in seguito alle scelte di cantiere.

Nella realizzazione di un'opera *trench-less* è indispensabile quindi pianificare inizialmente i controlli e i test da svolgere sui fanghi di perforazione per garantire un adeguato indice di sicurezza dei lavori e diminuire i rischi di perdite di tempo e denaro.

## **8 BIBLIOGRAFIA**

- [1] "Microtunneling and Horizontal Drilling Recommendations", French Society for Trenchless Technology, 2004.
- [2] Maglione R. - Romagnoli R.; "Reologia ed idraulica dei fluidi di perforazione", Cusl editore, 1999.
- [3] Annis M. – Smith M.; "Drilling Fluids Technology", Exxon Company U.S.A., 1996.
- [4] Ghetti A.; "Idraulica", Edizioni libreria Cortina, 1996.
- [5] Collura P.; "Argille fanghi e tecnica d'impiego nelle perforazioni", Stediv Editrice, 1959.
- [6] Mottana A., Crespi R., Liborio G.; "*Minerali e Rocce*", Mondadori, 2009.
- [7] Lancellotta R.; "Geotecnica", Zanichelli, 1991.





## 9 INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Cantiere di Microtunneling. ....	8
Figura 2 Schema cantiere di Microtunneling. ....	9
Figura 3 Schema del sistema Auger Boring (fonte Herrenknecht.com). ....	9
Figura 4 Particolare sistema perforatrice Slurry System (fonte Herrenknecht.com). ....	10
Figura 5 Particolare di macchina perforatrice con sistema EPBM. ....	11
Figura 6 Particolare del sistema PTMT (fonte Herrenknecht.com).....	12
Figura 7 Impianto di separazione.....	13
Figura 8 Particolare dell'impianto di separazione dello smarino, a sinistra due unità che separano la sabbia in parallelo, a destra per la ghiaia anch'esse in parallelo ma disposte una sopra l'altra.....	13
Figura 9 Schema del tappeto vibrante per sabbie e ghiaie. ....	14
Figura 10 Particolare dell'impianto di separazione: il Desilter.....	14
Figura 11 Schema funzionamento dell'idro-ciclone. ....	15
Figura 12 Particolare dell'impianto di separazione: la centrifuga.....	16
Figura 13 Schema centrifuga.....	16
Figura 14 Sistema di guida laser: strumento di misura a sinistra e target sulla destra (fonte Herrenknecht.com). ....	17
Figura 15 Particolare del microtunneler: nella sezione A-A si notato i cilindri di regolazione per la correzione della traiettoria (fonte Herrenknecht.com). ....	18
Figura 16 Particolare del sistema di lubrificazione: stazione di iniezione all'interno della condotta (fonte Herrenknecht.com). ....	19
Figura 17 Overcut con fluido di lubrificazione in pressione (fonte Herrenknecht.com). ...	20
Figura 18 Pozzo di spinta.....	21
Figura 19 Microtunneler in superficie al termine dei lavori.....	22
Figura 20 Particolare del pozzo di spinta: muro di controspinta e slitta con martinetti idraulici.....	22
Figura 21 Concio di calcestruzzo posizionato nel pozzo di spinta. ....	23

Figura 22 Fase di inserimento del nuovo tratto di condotta al termine della manovra di perforazione.....	24
Figura 23 Intermediate Jacking Station. ....	25
Figura 24 Esempio di progetto di microtunnel con tracciato curvilineo.....	26
Figura 25 Particolare cono di perforazione (fonte Herrenknecht.com).....	28
Figura 26 Differenti tipologie di teste fresanti: a sinistra per terreni granulari; al centro per terreni coesivi; a sinistra per ammassi rocciosi. ....	28
Figura 27 Schema delle pressioni che la sonda deve bilanciare durante la perforazione (fonte Herrenknecht.com). ....	29
Figura 28 Cubo trasparente deformabile soggetto a forza F. ....	32
Figura 29 Coppia di lamine in movimento una rispetto all'altra.....	34
Figura 30 confronto dei diagrammi sforzo di taglio (shear stress) e velocità di taglio (shear rate) dei diversi fluidi. ....	35
Figura 31 Reogramma di un fluido tixotropico. ....	39
Figura 32 Fango di perforazione. ....	41
Figura 33 Panoramica di cantiere: a destra l'impianto di separazione, a sinistra il piazzale, dove è temporaneamente stoccato lo smarino.....	44
Figura 34 Bentonite in polvere. ....	48
Figura 35 Cava di bentonite in Sardegna. ....	50
Figura 36 Molecola di montmorillonite. ....	51
Figura 37 Montmorillonite osservata al microscopio elettronico (3700 ingrandimenti)....	52
Figura 38 Bilancia per fango di perforazione (fonte Fann.com). ....	58
Figura 39 Cono di Marsh.....	60
Figura 40 Viscosimetro rotazionale (fonte Fann.com).....	62
Figura 41 Filtropressa per fanghi di perforazione (fonte Fann.com). ....	63
Figura 42 Kit per la misurazione del contenuto in sabbia (fonte Fann.com). ....	65
Figura 43 Kugel Harp.....	66
Figura 44 Cartine tornasole per misura pH.....	68
Figura 45 Panoramica del cantiere 2. ....	71
Figura 46 Panoramica cantiere 1. ....	72

Figura 47 Profilo di progetto del microtunnel del cantiere 1.....	76
Figura 48 Planimetria cantiere 1. ....	77
Figura 49 Report prove di viscosità in cantiere 1. ....	80
Figura 50 Report prove di contenuto in sabbia in cantiere 1.....	81
Figura 51 Report prove di densità in cantiere 1. ....	82
Figura 52 Report prove di Kugel in cantiere 1. ....	83
Figura 53 Profilo di progetto del cantiere 2. ....	84
Figura 54 Planimetria cantiere 2. ....	84
Figura 55 Report prove di viscosità con cono Marsh in cantiere 2. ....	86
Figura 56 Report prove di contenuto in sabbia in cantiere 2. ....	87
Figura 57 Report prove di densità in cantiere 2. ....	88
Figura 58 Difrattogramma delle bentoniti A e B. ....	91
Figura 59 Prove di aerometria: al centro bentonite A, a sinistra bentonite B. ....	93
Figura 60 Risultati viscosimetro a 150 RPM. ....	94
Figura 61 Risultati viscosimetro a 600 RPM. ....	95
Figura 62 Risultati prova con reometro a 6 velocità su bentonite B. ....	97
Figura 63 Report prove con reometro a concentrazione 4,5%. ....	99
Figura 64 Report prove con reometro a concentrazione 5%. ....	100
Figura 65 Analisi dello Yield Point in funzione di concentrazione e tempo. ....	100



## **RINGRAZIAMENTI**

Alla Prof.ssa Simonetta Cola, grazie alla sua disponibilità e alla sua pazienza ho potuto portare a termine il mio percorso di studi

A ICOP, in particolare all' Ing. Yuri Picco, per avermi dato la possibilità di svolgere lo stage che ha dato vita a questa tesi e mi ha fatto conoscere la tecnologia del Microtunneling

Al Dott. Fabio Tateo, per l'aiuto fondamentale nell'interpretazione delle prove diffrattometriche

A Francesco Loi e Michela Albini per il materiale e le conoscenze fornitemi sulla bentonite

Alla Prof.ssa Fernanda Andreola, per l'aiuto fornito nelle prove reologiche presso il suo laboratorio

Alla mia famiglia, tutti compresi, nonna Antonia, zia Giulia, zia Rita, mamma Ilda, Gian Paolo, Marco, Alessandra, Gaia, Raffaele e Caterina, che mi hanno supportato, e sopportato, in questi anni carichi di emozioni e impegni. Senza di voi non sarei mai arrivato dove sono. Grazie per aver creduto in me

Ringraziamento speciale al mio padrino Carletto, è merito anche tuo se sono qui oggi e per me sei più di un padrino, ti mancherebbe solo un ducato e saresti perfetto!

A tutti i miei amici, che non smetterò mai di ringraziare per tutto quello che hanno fatto e continuano a fare per me. In particolare (l'ordine è proprio a caso): a Edo Sex perché la crocifissione te la sei meritata tutta, a Fabione, anche se non ci siamo più visti molto in questi anni siamo sempre uniti e legati, a Brumandorla Nicolangelo, maledetto camminatore notturno del viale Borri, i viaggi in vespa ci hanno uniti un sacco, ma anche un sacco di altre cazzate, a Luke, per avermi aiutato nei momenti no e avermi insegnato

un sacco di cose, molte delle quali totalmente inutili, a Inve, che basta andare arrampicare con te per star bene, a lunga, che senza lui e le cena a casa sua non avremmo mai visto Edo Sex nel suo momento più "alto", a Ratun, che un paio di workout in più e ti tocca mangiare con la cannuccia, a Ghella, pericolosissimo e temutissimo fisioterapista che mi ha più di una volta rimesso insieme, senza di lui probabilmente sarei ancora rotto, o forse no?, alla Fede, Sara e Rossellina, le povere donne dello Zoccolo, a Bizzo, per la nostra incredibile avventura portoghese, che ripeterei anche domani con lui, a Pipetta, che se non c'era lui con il suo camion sarei ancora in quell'area di servizio..., ma anche per tutte le cose fatte insieme, talmente tante da poter scrivere un libro, a Boban, temutissimo pugile dal cuore buono, ma dal KO facile, a Rocchi, il cane sciolto sempre in agguato, a Omar, l'arciere vice campione italiano che ha molestato le mie giornate di studio, e io le sue, a Giulio, con un gran in bocca al lupo per la sua avventura inglese, a Mattia e Monica, anche a loro un in bocca al lupo ancora più grande per la nuova vita canadese, a Andrea, che quando si va a far cross mi da paga ma senza di lui non avrei passato giornate stupende, a Ale, che se vedo un onda lo chiamo e si va a surfare insieme, poesia. Ne avrei ancora troppi da elencare, ma chi c'è stato deve sapere che è stato fondamentale per me e non smetterò mai di ringraziarlo.

A Giulia

A Massimo, ogni giorno ti penso e ti immagino con me in giro in moto, I wish you were here...

A Bott, ti porto sempre con me e sappi che il ricordo di te mi da un sacco di forza