



Posa di tubazioni a spinta mediante perforazioni orizzontali

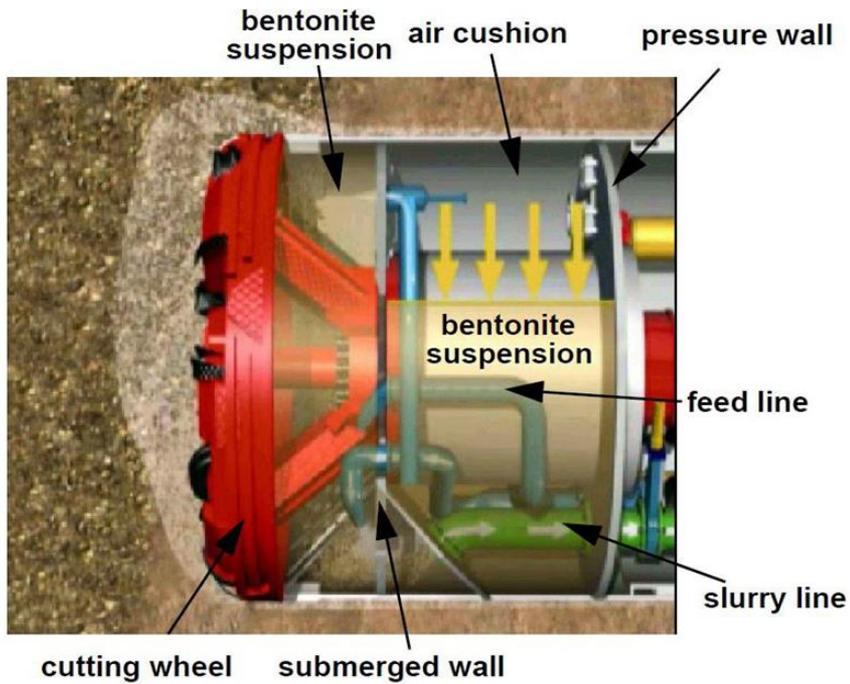
Sistemi e modalità di lubrificazione e gestione dei fanghi

Prof. Ing. Quintilio Napoleoni

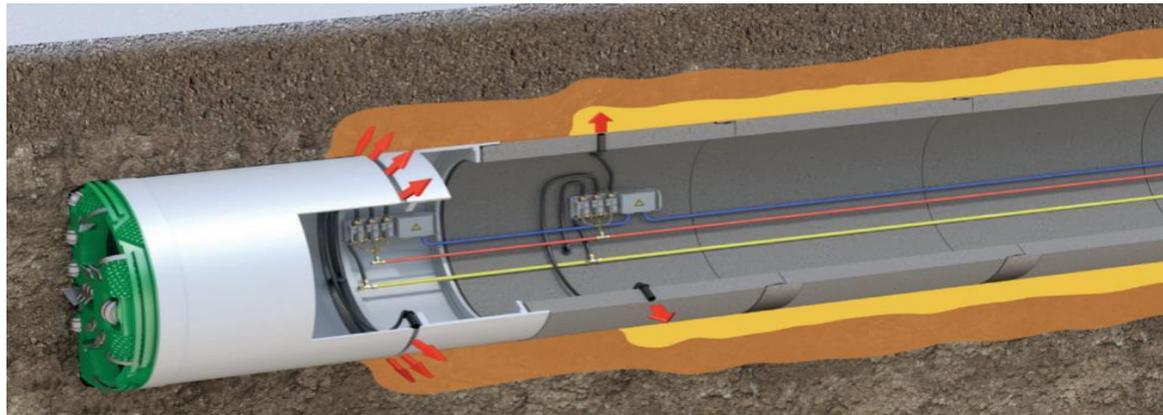
04 Dicembre 2020



- Cosa sono i fanghi di perforazione
- Il fango di perforazione viene pompato nella testa di scavo durante la perforazione con **TBM, Microtunnel e HDD** dove:
 - Lava, lubrifica e raffredda gli utensili
 - Trasporta all'esterno i detriti di perforazione.
 - Impermeabilizza le pareti dello scavo (formazione del **filter cake**)
 - In alcune attrezzature per HDD genera anche la forza motrice nell'utensile di scavo (Mud Motor)
- Il fango bentonitico viene utilizzato anche per lubrificare l'interfaccia tubo-terreno
- Il fango depurato dai detriti e dal gas disciolto, viene nuovamente pompato nella testa di perforazione
- Questi reflui, una volta destinati allo smaltimento, sono attualmente classificabili come rifiuti speciali non pericolosi



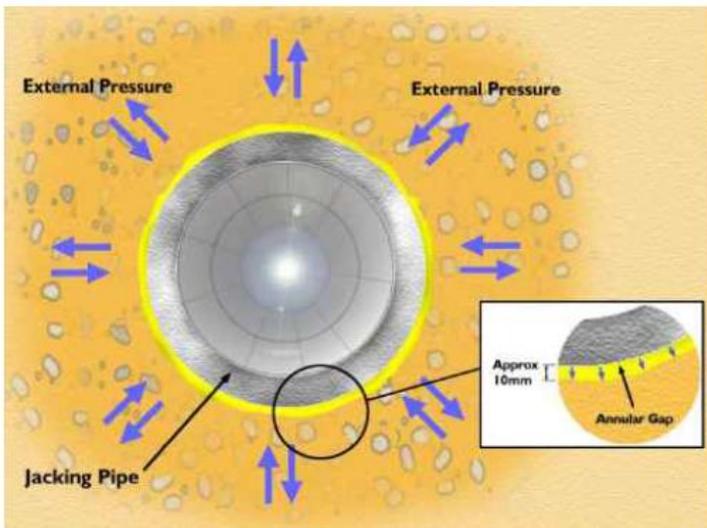
Fango bentonitico sulla testa di perforazione



Fango bentonitico per la lubrificazione

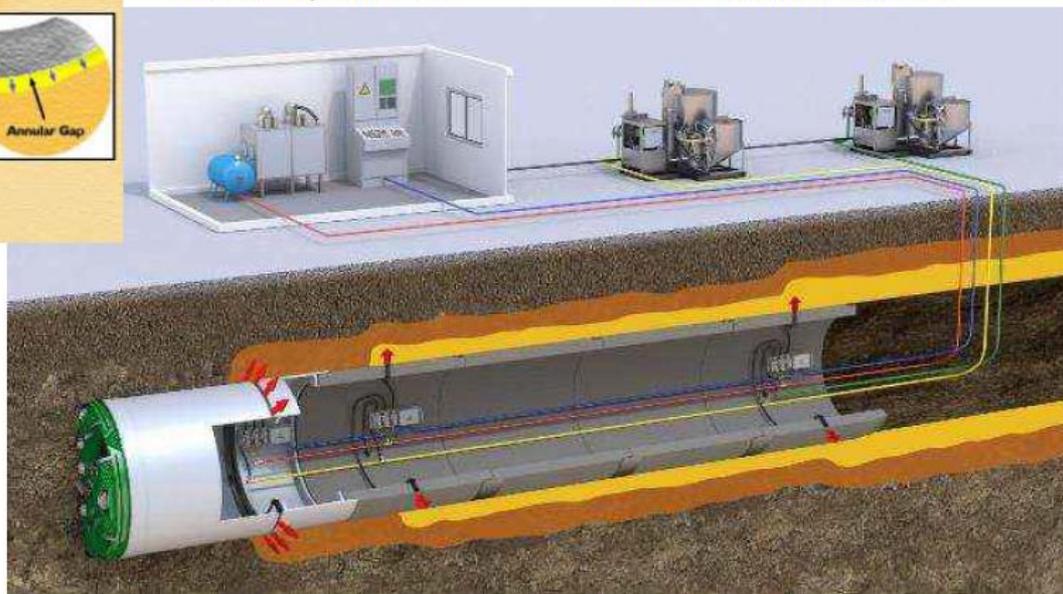


Sistema di gestione ed iniezione



cabina
comando/controllo

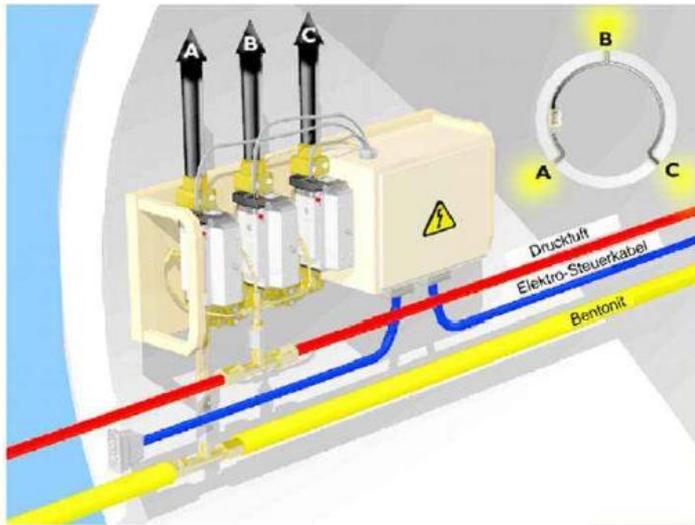
mixer
fluido di lubrificazione



linea fluido lubrificazione

sovrascavo (overcut)
↓
fluido di lubrificazione
(miscela bentonitica)
↓
riduzione attrito
↓
contenimento delle spinte
↓
iniezione controllata nel sovrascavo

Sistema di gestione ed iniezione



Sistema controllo valvole

miscelatore in superficie



valvole di iniezione nella TBM e nei tubi



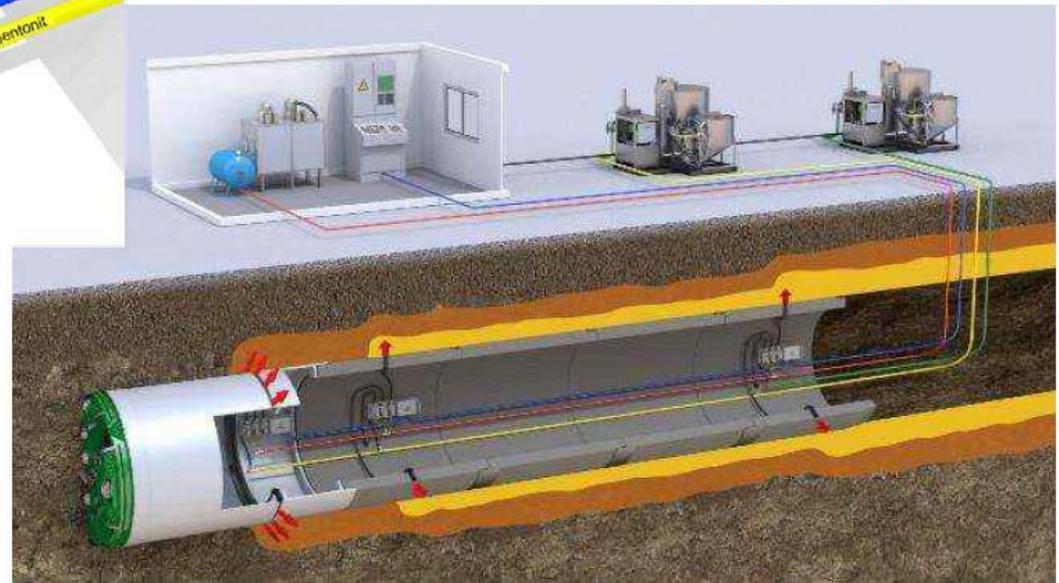
sistema di comando/controllo dell'apertura delle valvole



collegamento con la cabina comando in superficie

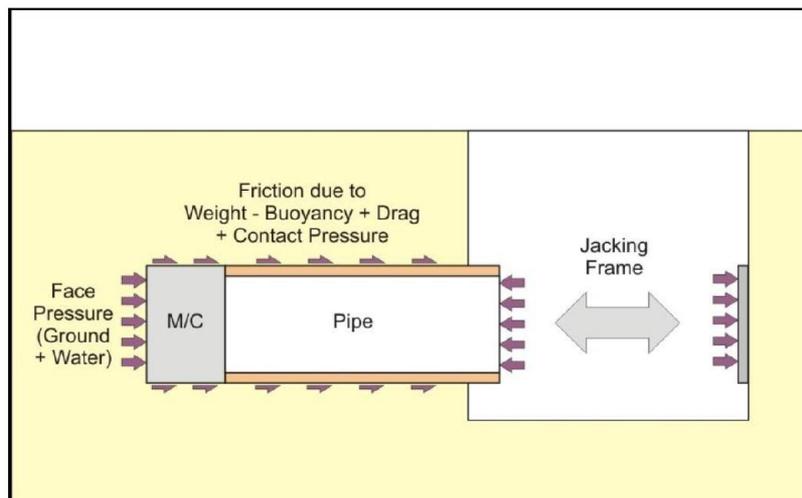
cabina comando/controllo

mixer fluido di lubrificazione



linea fluido lubrificazione

Effetti della lubrificazione sulla spinta necessaria



$$F_s = F_{fr} + F_p + F_{sup}$$

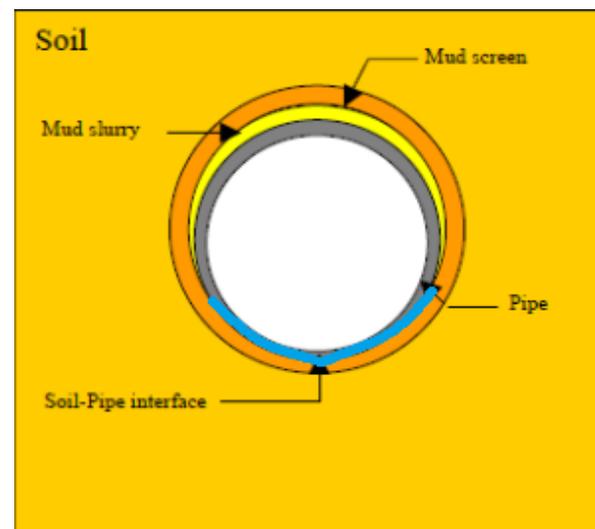
- F_{fr} rappresenta la risultante delle forze d'attrito dinamico generate lungo la superficie laterale della testa fresante e del treno di tubazioni [N];
- F_p rappresenta la resistenza che il terreno esercita sul fronte di perforazione [N];
- F_{sup} rappresenta la risultante delle forze d'attrito addizionali legate ai periodi di interruzione dei lavori [N].



Effetti della lubrificazione sulla spinta necessaria

Calcolo della forza di attrito lungo il tubo

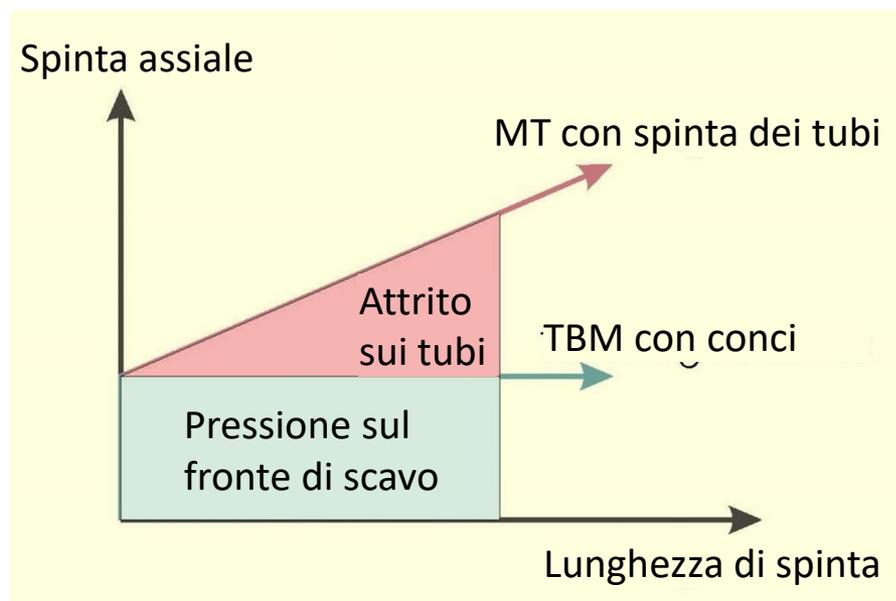
- Esistono in bibliografia diverse formulazioni
- L'approccio di Matsui & Shimada (2002) consente di tenere conto del contatto tubazione terreno all'interno del foro eseguito e della presenza del fluido lubrificante
- Il fatto che la tubazione tenda a «strisciare» sulla generatrice inferiore, riduce l'effetto della lubrificazione nelle tratte lunghe



Effetti della lubrificazione sulla spinta necessaria

Contributo dell'attrito sui tubi alla spinta totale necessaria

- Stima dell'attrito sui tubi
 - Materiali
 - Geologia
 - Scelta della tecnologia di MT
 - Lubrificazione

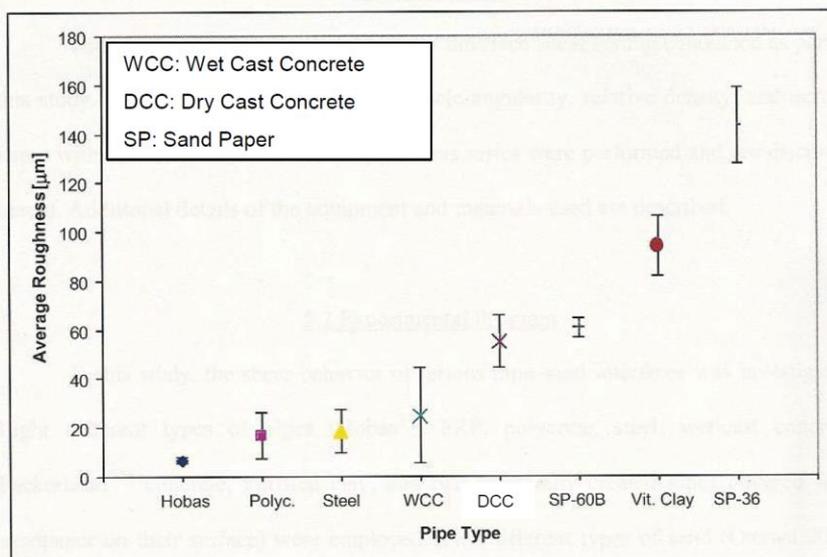




Effetti della lubrificazione sulla spinta necessaria

Stima dell'attrito sui tubi in relazione al materiale utilizzato per le tubazioni

Parameter	Hobas CCRFP	Polycrete	Permalok	Wet Cast Concrete	Dry Cast Concrete	Vitrified Clay Pipe	No. 60 Sand-paper	No. 36 Sand-paper
Average R_a	6.5	16.9	18.7	24.8	55.1	93.8	60.8	143.2
STDEV	1.2	9.4	8.8	19.5	10.6	12.2	4.1	15.7
% Stdev /Aver	18.3%	55.3%	47.2%	78.5%	19.2%	13.0%	6.7%	11.0%
Repeatability	2.7%	1.5%	4.4%	3.7%	2.5%	1.9%	5.7%	1.3%



Valutazioni della scabrezza

WCC = Tubo in cls lubrificato
DCC = Tubo in cls prefabbricato

(Staheli et al. 2006)

Effetti della lubrificazione sulla spinta necessaria

Stima dell'attrito sui tubi in relazione al materiale utilizzato per le tubazioni

Pipe Material	Coefficient of Friction					
	N = 40 kPa		N = 80 kPa		N = 120 kPa	
	Peak	Residual	Peak	Residual	Peak	Residual
Hobas CCRFP	0.51	0.43	0.50	0.44	0.48	0.42
Polycrete	0.50	0.42	0.49	0.43	0.47	0.43
Permalok	0.68	0.49	0.62	0.44	0.62	0.47
Wet Cast Concrete	0.68	0.49	0.65	0.48	0.63	0.45
Vitrified Clay	0.71	0.50	0.63	0.48	0.65	0.49
Packerhead Concrete	0.81	0.54	0.73	0.53	0.73	0.52
Sandpaper No. 60	0.80	0.60	0.77	0.55	0.75	0.55
Sandpaper No.36	0.82	0.61	0.76	0.56	0.74	0.54

(Iscimen,.2004)

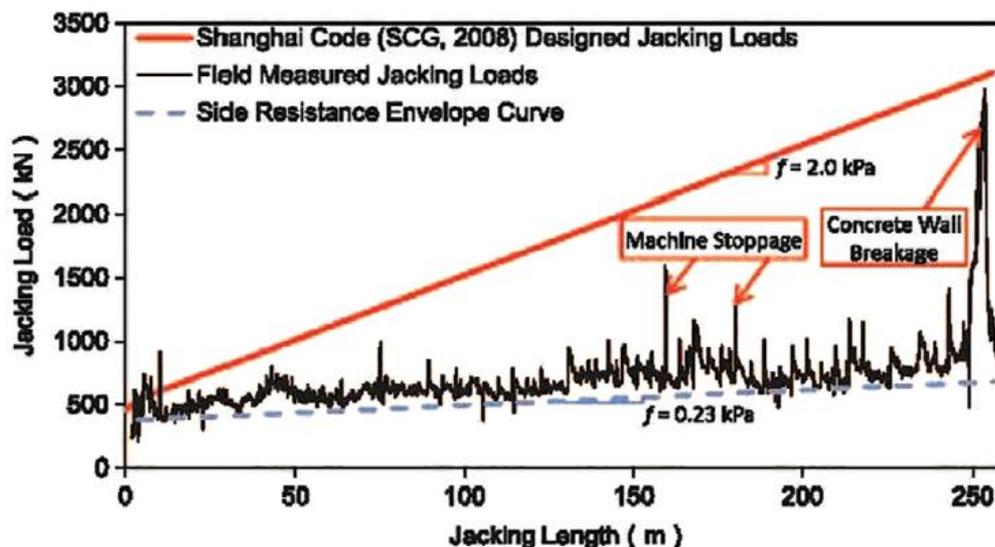
WCC = Tubo in cls lubrificato

Packerhead Concrete = Tubo in cls prefabbricato

Valutazioni dell'attrito di interfaccia con sabbia al variare della tensione normale al tubo

Effetti della lubrificazione sulla spinta necessaria

Stima dell'attrito sui tubi



(Staheli et al. 2006)

Comparazione fra spinta misurata e spinta di progetto

- E' sicuramente molto importante approfondire lo studio sui modelli di interazione per una stima più corretta della spinta necessaria

Effetti della lubrificazione sulla spinta necessaria

Stima dell'attrito sui tubi

Author	M (kN/m ²)	Remarks
Krebs	15–30	
Herrenknecht	20–30	Rough surface
	12–15	Smooth surface
Hafelin	20–40	
	25–50	
Scherle	10–20	Use of lubrication and support media, jacking in groundwater
	12–15	
Szechy	100	For concrete/fine sand with pipe coating
	15–50	
Hahn	10	
Weber	8.4 ± 2	Gravel, sand
	9.3 ± 1	Loamy sand
	7.3 ± 1	Loam
	5.7 ± 4	Loam, cobbles
Australische Werte	16	Sand
	5–6	Soft clay
	5–8	Hard clay
ISTT	7.0	Clay
	7.5	Sand, sand/gravel
Stein	10	
	5	Use of lubrication and support media

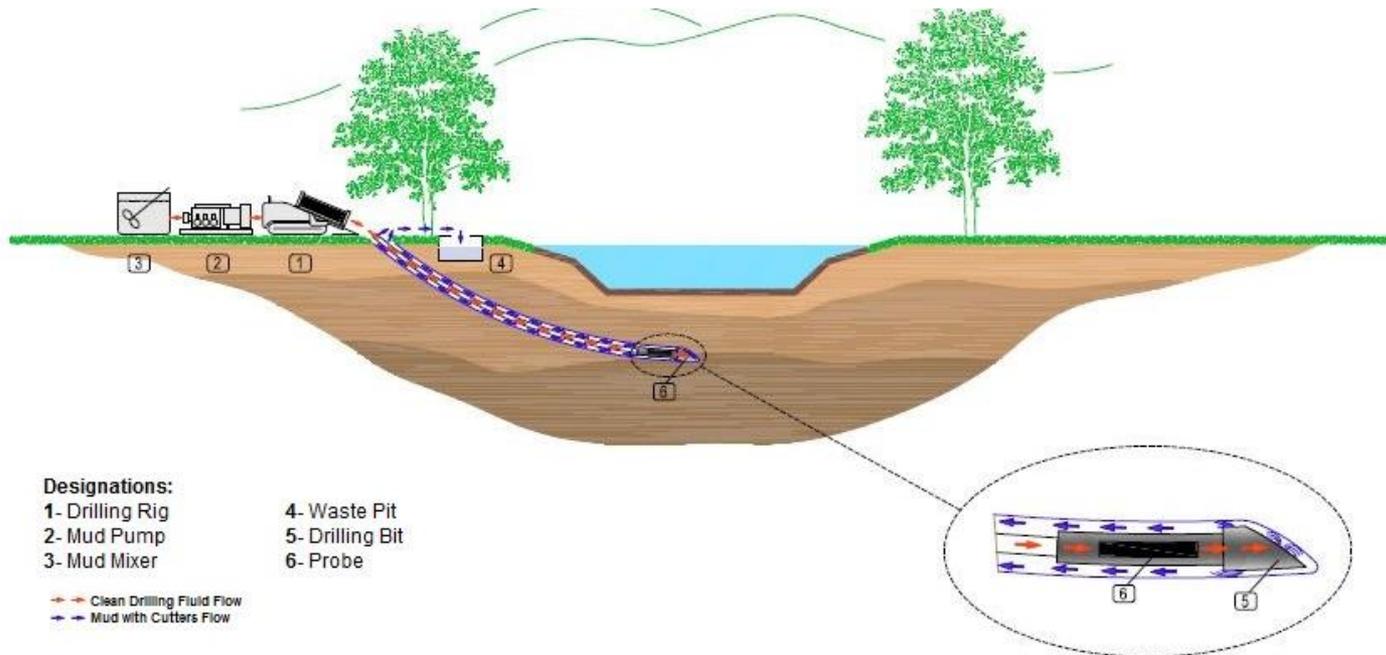
(Staheli et al. 2006)

Resistenza di attrito unitaria misurata su in campo

- E' sicuramente molto importante approfondire lo studio sui modelli di interazione per una stima più corretta della spinta necessaria



Il fango di perforazione nelle tecniche HDD



Designations:

- 1- Drilling Rig
- 2- Mud Pump
- 3- Mud Mixer
- 4- Waste Pit
- 5- Drilling Bit
- 6- Probe

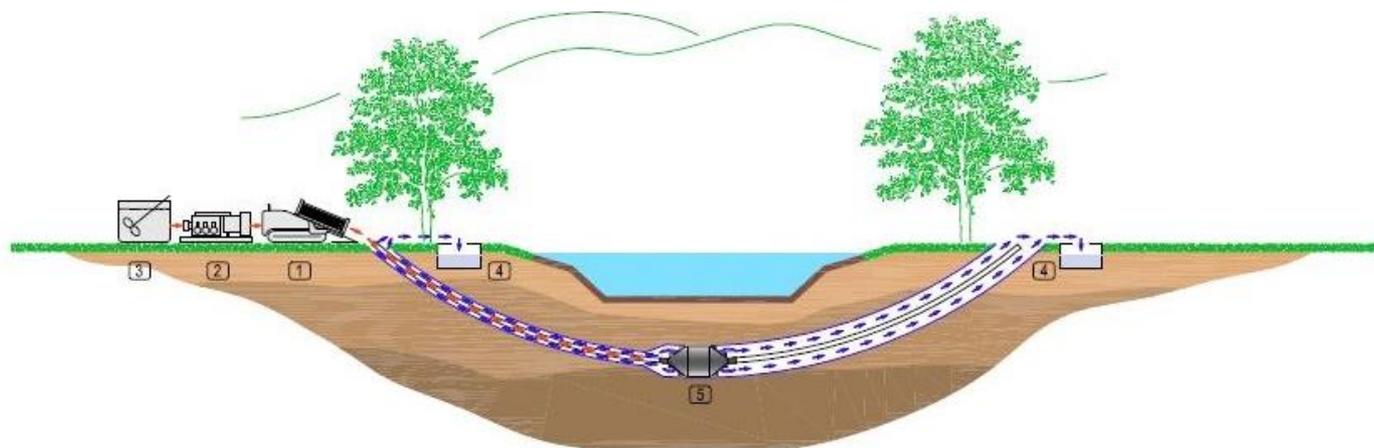
- Clean Drilling Fluid Flow
- Mud with Cutters Flow

- Fango «pulito»
- Fango con detriti

Fango bentonitico per il sostegno dello scavo, lubrificazione e smarino



Il fango di perforazione nelle tecniche HDD



Designations:

- 1- Drilling Rig
- 2- Mud Pump
- 3- Mud Mixer
- 4- Mud Pit
- 5- Reamer

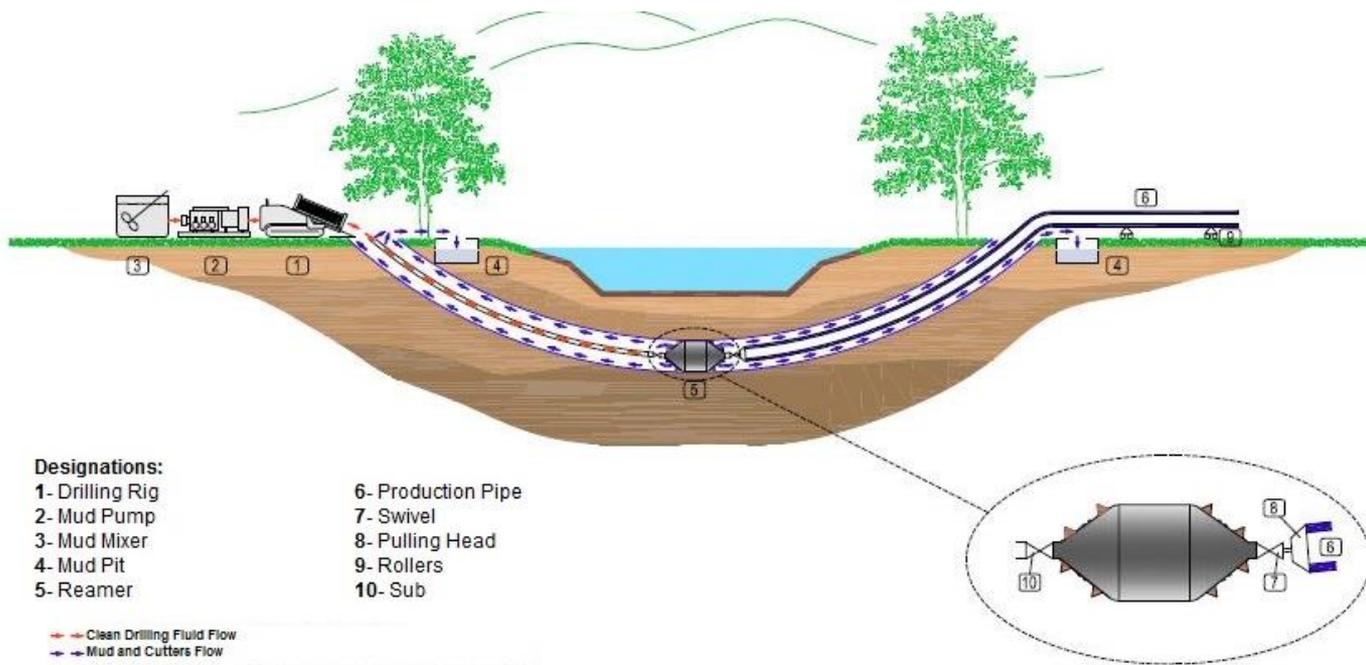
- Clean Drilling Fluid Flow
- Mud and Cutters Flow

- Fango «pulito»
- Fango con detriti

Fango bentonitico per il sostegno dello scavo, lubrificazione e smarino



Il fango di perforazione nelle tecniche HDD



- Fango «pulito»
→ Fango con detriti

Fango bentonitico per il sostegno dello scavo, lubrificazione e smarino



Il fango di perforazione nelle tecniche HDD



La pressione di iniezione del fango nel corpo della testa di perforazione fa girare un rotore collegato con l'utensile

Fango bentonitico per il funzionamento della testa di perforazione (Mud Motor)



Come è composto un fango di perforazione

- I fanghi di perforazione hanno sempre una componente solida ed una fluida
- Dal punto di vista della composizione, i fanghi possono essere distinti nel seguente modo:
 - A base acquosa:
 - composti di argille (prevalenza **bentonite**);
 - polimeri speciali;
 - ad emulsione di olio minerale;
 - Areati
 - aria,
 - gas e/o schiumogeni



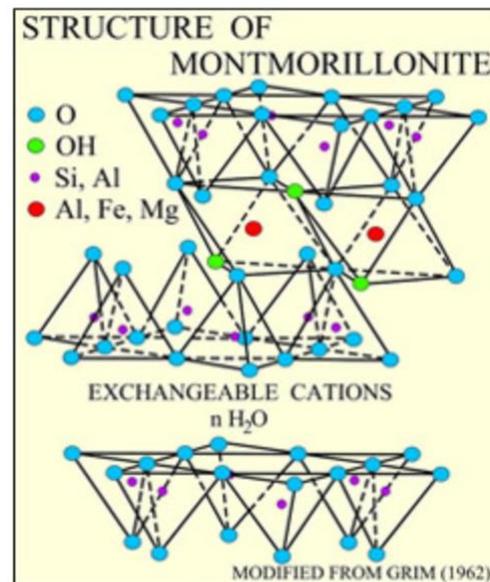
Che cosa è la Bentonite

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



Che cosa è la Bentonite

- Il costituente montmorillonitico è caratterizzato da un aggregato di particelle di forma lamellare, riunite in pacchetti legati da forze elettrochimiche e contenenti acqua di interposizione
- Ogni unità lamellare risulta costituita schematicamente da tre strati disposti parallelamente a sandwich.
- Lo strato centrale, a forma ottaedrica, è composto da allumina (Al_2O_3);
- I due strati periferici, a forma tetraedrica, sono costituiti da silice (SiO_2).





Che cosa è la Bentonite

- Spesso lo ione silicio e lo ione alluminio subiscono delle sostituzioni isomorfe ciascuno con altri metalli a valenza inferiore come magnesio e ferro.
- Queste sostituzioni generano scompensi di cariche che vengono bilanciati assumendo cationi scambiabili, in particolare ioni: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) e sodio (Na^{+}) accompagnati da molecole di acqua tenute insieme da legami di tipo ione-dipolo.
- Gli ioni, non trovando posto all'interno della struttura reticolare, occupano posizioni prossime agli strati esterni di silice, e sono i principali responsabili dell'importante fenomeno di idratazione del reticolo cristallino



Che cosa è la Bentonite

- La quantità e la qualità delle basi scambiabili sono un importante elemento di distinzione dal punto di vista chimico di una bentonite: in particolare si distinguono le **bentoniti calciche e le bentoniti sodiche**, a seconda che il catione scambiabile predominante sia rispettivamente il calcio od il sodio.
- Le bentoniti calciche, i cui giacimenti sono più diffusi nel mondo, risultano caratterizzate da una minore capacità di idratazione e rigonfiamento rispetto alle bentoniti sodiche.



Proprietà della Bentonite nei fanghi

- **Assorbimento d'acqua e rigonfiamento**
 - Una proprietà fondamentale della bentonite è quella di assorbire acqua rigonfiando, non tutte le bentoniti però hanno uguale capacità di assorbimento.
 - Il rigonfiamento è dovuto a due cause principali: all'assorbimento di acqua alla superficie delle lamelle cristalline ed a forze repulsive di tipo osmotico, per le quali le lamelle unitarie sono forzate a staccarsi
 - La bentonite sodica, con prevalenza di catione sodio (Na^+), permette all'acqua di entrare profondamente tra le lamelle, separandole fino all'unità elementare e dando così luogo al caratteristico rigonfiamento. Al contrario, la bentonite calcica, con prevalenza di catione calcio (Ca^{2+}), si idrata in modo del tutto simile ma ha minori proprietà assorbenti e non consente alle molecole di acqua di penetrare tra le lamelle; le particelle quindi si sfaldano a pacchetti anziché rigonfiare.



Proprietà della Bentonite nei fanghi

- **Viscosità e Tixotropia delle sospensioni acquose**

- La bentonite dispersa in acqua dà luogo a sospensioni colloidali molto stabili caratterizzate da **viscosità** e **tixotropia**.
- La formazione della sospensione è dovuta alla penetrazione di molecole di acqua negli interspazi presenti tra le lamelle cristalline: tra questi strati si stabiliscono dei ponti in cui l'acqua è vincolata da legami idrogeno. Le singole lamelle restano pertanto isolate le une dalle altre e contemporaneamente legate tra loro attraverso gli strati di acqua di associazione.
- Quando il sistema viene lasciato in quiete si ha la formazione di un reticolo che ingloba l'acqua assumendo quindi la consistenza di una gelatina; quando il sistema è sottoposto ad una sollecitazione meccanica si osserva una parziale rottura dei legami che consente una maggiore mobilità delle singole lamelle.
- Questa trasformazione sol-gel-sol è reversibile ed è nota come **tixotropia**.



Proprietà della Bentonite nei fanghi

- **Proprietà gelificante ed impermeabilizzante**
 - L'assorbimento di acqua da parte della bentonite porta alla formazione di geli semisolidi capaci di resistere anche a forti pressioni idrostatiche.
 - Una particella di montmorillonite si può considerare costituita da un sottile pacchetto di strati elementari a carica negativa. A causa di questa carica ogni particella è capace di respingerne un'altra dando adito alla penetrazione ed all'assorbimento di molecole di acqua attratte attorno al reticolo elementare; per questo motivo, mentre il pacchetto si espande dando luogo al rigonfiamento, attorno ad ogni particella si forma un involucro stabile che, raggiunto il suo limite di saturazione, respinge altra acqua anche quando è sottoposto a pressione.
 - La formazione di un gel è legata anche alla velocità di filtrazione della bentonite nel terreno: quando essa si riduce la soluzione di bentonite tenderà a gelificare (e quindi a formare il filter-cake)



Proprietà della Bentonite nei fanghi

- **Proprietà legante**

- Questa caratteristica della bentonite trova la sua principale applicazione nella capacità di trasporto solido delle soluzioni di acqua e bentonite
- La bentonite correttamente idratata ricopre i granelli di terreno e funge da tessuto connettivo dell'intera massa.
- Tale rivestimento è sostanzialmente omogeneo e c'è la tendenza a formare dei fiocchi di bentonite idratata+terreno che tendono a «galleggiare» all'interno del fluido
- La velocità di trasferimento del fluido all'interno del circuito fanghi impedisce la formazione di gel e, quindi, consente il trasporto dello smarino in sospensione anche a grandi distanze



Come è composto un fango di perforazione

- Le principali caratteristiche fisiche dei fanghi sono:
 - la densità
 - la viscosità
 - la tixotropia
 - la resistenza al taglio del gel
 - l'acqua libera (bleeding)
 - capacità di formare un filter cake
- Una buona perforazione si basa su un fango che **mantiene le proprie caratteristiche** durante tutto il ciclo di lavoro e, quindi, sarà necessario «depurarlo» dagli inquinanti che raccoglie durante la perforazione



Come è composto un fango di perforazione

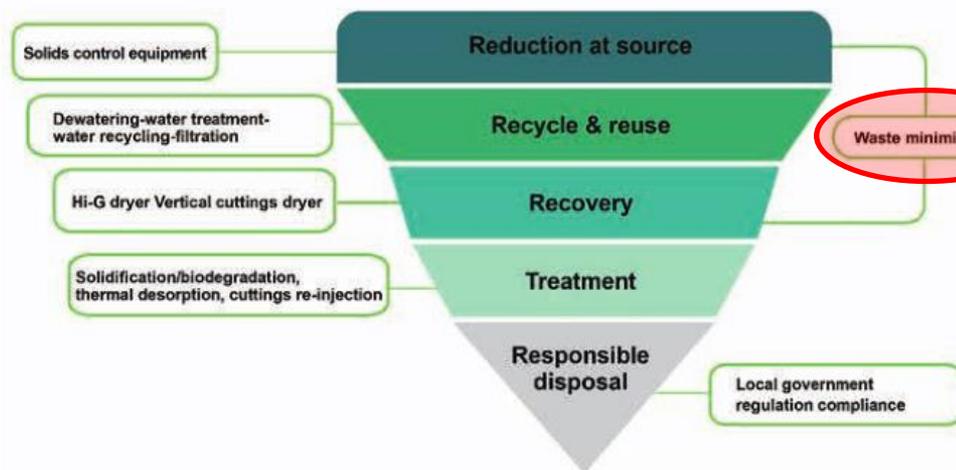
- Gli additivi biodegradabili:
 - la ricerca nel campo dei fluidi di perforazione in fase liquida ha condotto alla formulazione di fluidi che non hanno alcun contenuto in argilla (i cosiddetti fluidi clay-free), chiamati ancora “fanghi”, destinati ad applicazioni in cui l’elevata **biodegradabilità** è fondamentale
 - In genere sono additivi polimerici che hanno un tempo di decadimento abbastanza lungo (anche di 40 gg)
 - E’ necessario, quindi, disporre di **vaste aree** per la maturazione del fango



Gestione dei fanghi

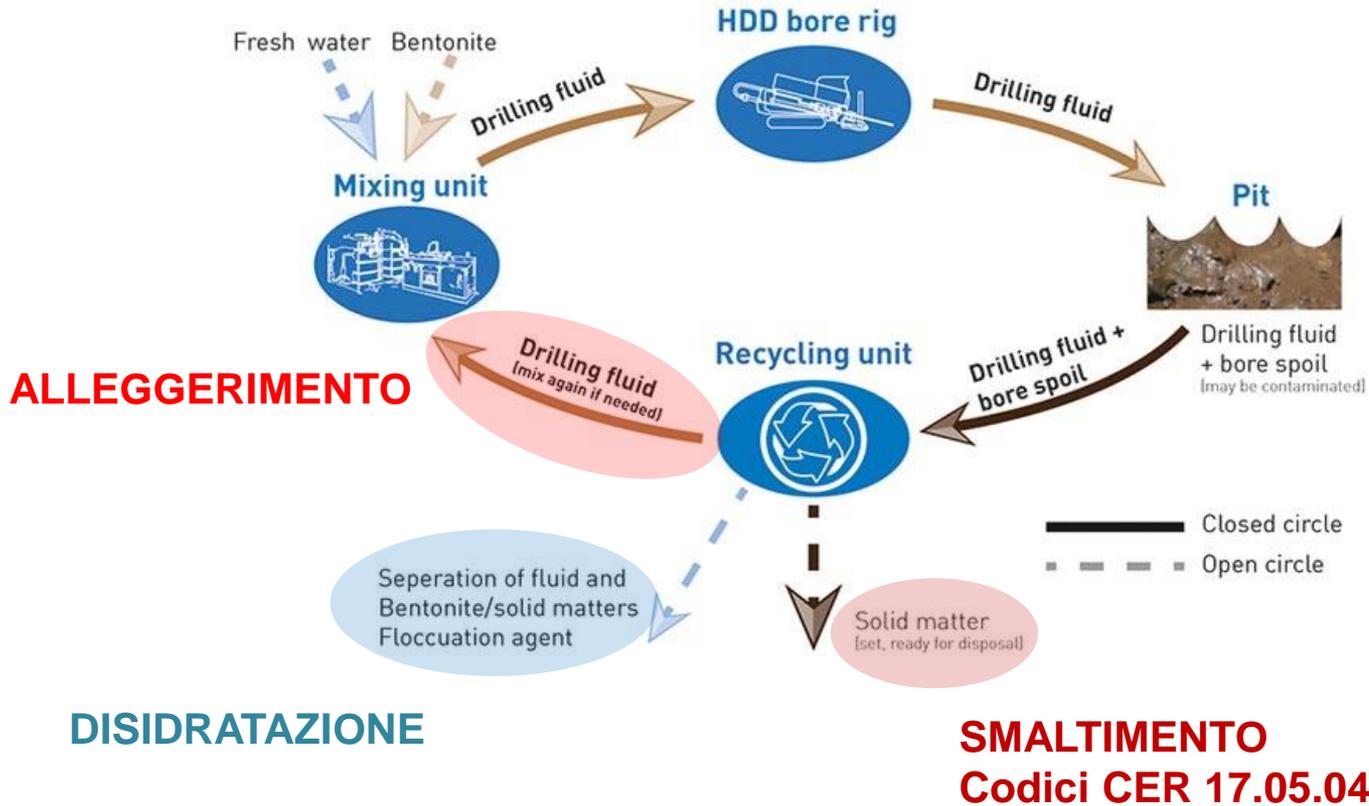
La gestione dei fanghi in accordo con i criteri di sostenibilità ambientale

Drilling Waste Management System



Gestione dei
fanghi in
cantiere

Ciclo di fanghi in HDD/MT/TBM





Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

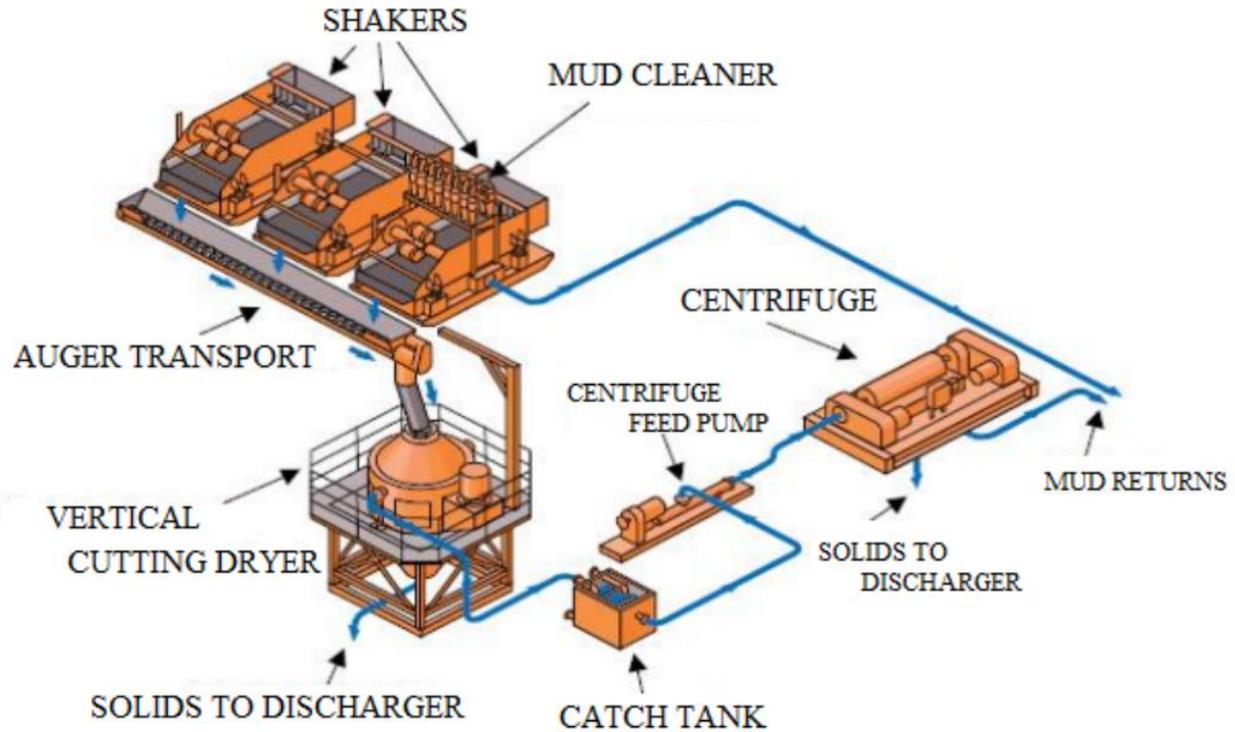
- Il fango viene confezionato all'inizio della perforazione e si cerca di riutilizzarlo più volte (in genere 3-4 volte) rimuovendo i detriti trasportati ed gli eventuali gas disciolti per poi ripomparlo nella testa di scavo
- Il fango, quindi, subisce un primo trattamento di separazione solido/liquido durante le lavorazioni: questa operazione si chiama **ALLEGGERIMENTO DEL FANGO**.
- Alla fine del ciclo di utilizzo (quando il fango ha perso le sue caratteristiche e/o quando il lavoro è finito), è necessario smaltire la miscela di acqua e bentonite. In questa fase è necessario adottare un processo di **DISIDRATAZIONE DEL FANGO** al fine di ridurre i volumi di materiale da avviare a discarica.



Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

- Un sistema completo di separazione solido/liquido consente di preservare le caratteristiche del fluido di scavo consentendone un riutilizzo quasi integrale (per un certo numero di cicli), (**alleggerimento**) minimizzando anche lo smaltimento del fluido non più utilizzabile (**disidratazione**)
- Il sistema tipo è composto da:
 - vagli primari e secondari per rimuovere la frazione più grossolana (**> 100 μm**)
 - Sistema di rimozione dei fini (**< 100 μm**):
 - Cicloni (alleggerimento)
 - Centrifughe (alleggerimento e disidratazione)
 - Filtropresse (disidratazione)

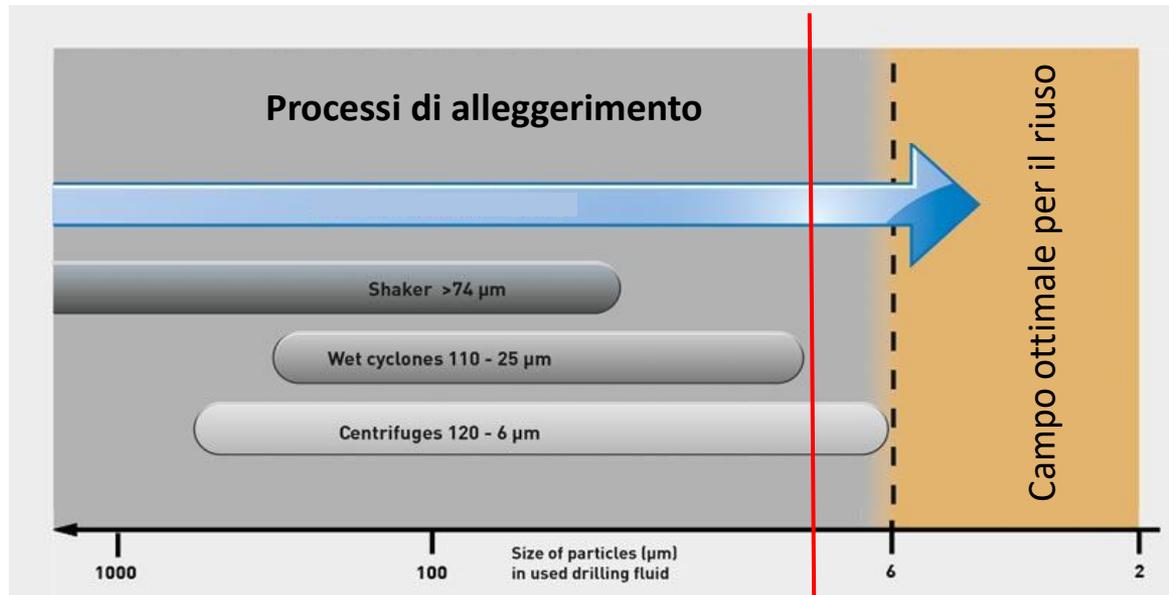
Impianti di trattamento dei fanghi perforazione



(Sharif et al. 2017)

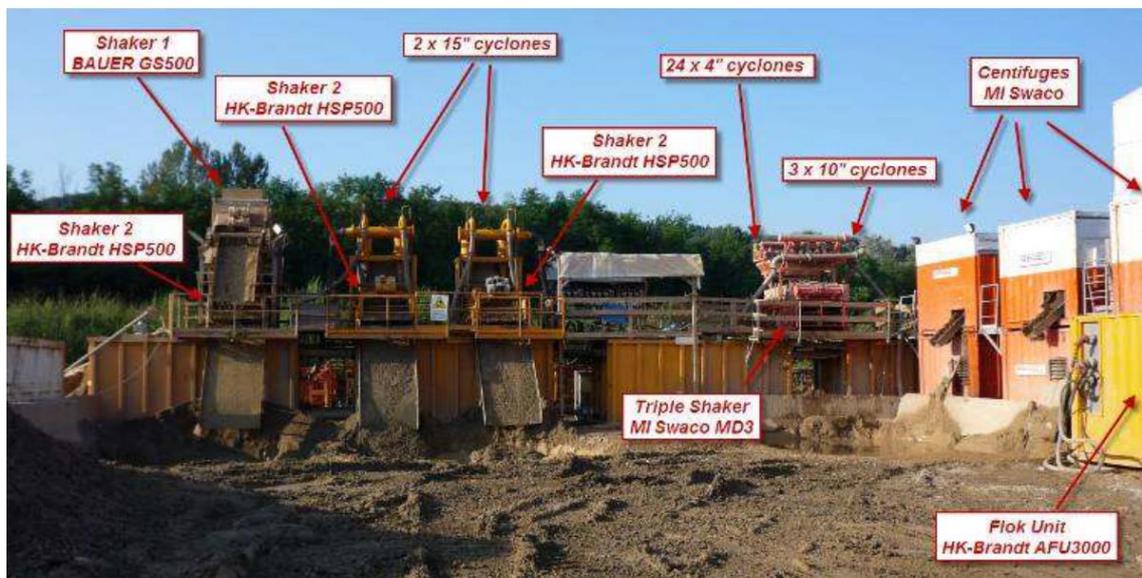
Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Granulometria del fango trattato durante il processo di alleggerimento



- Campi ottimali di lavoro:
 - Vagli (> 80÷100 µm)
 - Filtropresse (> 80 µm)
 - Cicloni (> 50 µm)
 - Centrifughe (> 20 µm)
- Flocchi di Bentonite ≈ 20 µm
- Materiale > 20 µm è tutto «inquinante» del fango di perforazione

Impianti di trattamento dei fanghi perforazione



Impianto tipo

Saipem, 2017

- Utilizzando vibrovagli e cicloni, le particelle più grandi di $50\div 60\ \mu\text{m}$ saranno rimosse dallo smarino, mentre le particelle più piccole possono essere separate solo da una centrifuga (**fase di alleggerimento**).
- L'unità di centrifugazione può anche essere utilizzata in combinazione con un sistema di flocculazione per rimuovere «virtualmente» tutti i solidi dai fanghi (**fase di disidratazione**)



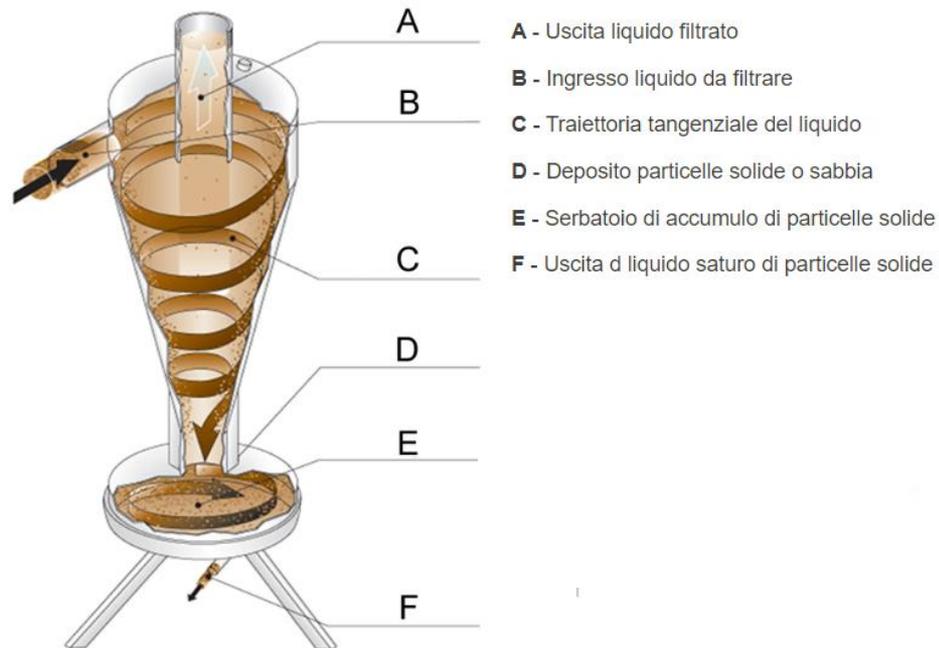
Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

- La rimozione della frazione più fina avviene tramite due processi:
 - coagulazione: destabilizzazione della sostanza colloidale;
 - flocculazione: agglomerazione di particelle destabilizzate in microfocchi e poi in fiocchi grossolani che possono sedimentare
- Coagulazione
 - aggiunta dei reattivi (sali di alluminio o di ferro, idrossido di calcio, ossido di calcio)
 - mescolamento rapido
- Flocculazione
 - aggiunta dei reattivi (elettroliti inorganici o polielettroliti organici)
 - mescolamento rapido

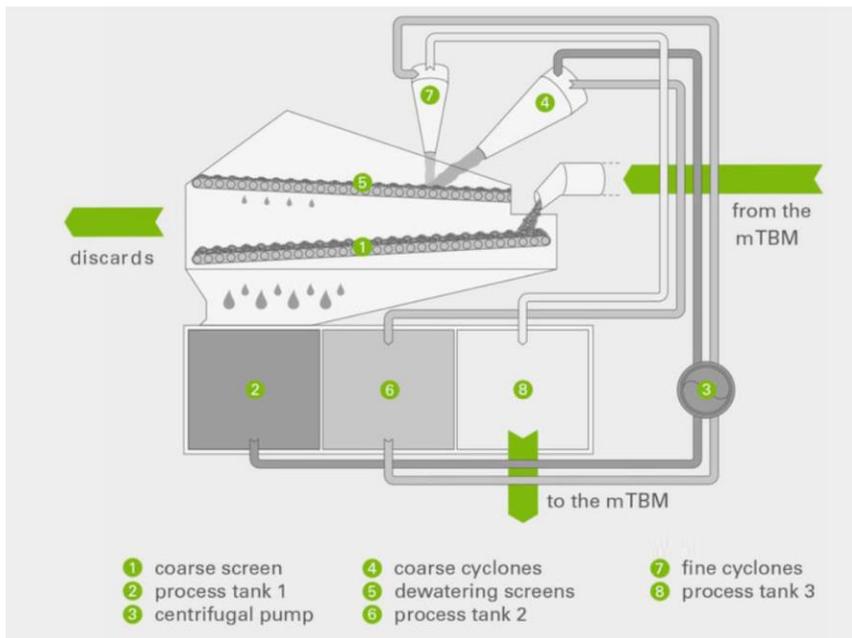
Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Impianto con ciclone – Principio di funzionamento

- Le acque in entrata, per effetto della forza centrifuga, depositano sulle pareti esterne del filtro le particelle più pesanti che si accumulano nella zona o nel serbatoio sottostante.
- L'acqua pulita viene sospinta verso l'alto e convogliata all'uscita.
- La perdita di pressione dovuta alla forza centrifuga è molto bassa.



Impianti di trattamento dei fanghi perforazione



Herrenknecht.com

Impianto tipo con due gruppi di cicloni in serie

- Fango in arrivo contenuto di solidi di circa 20-50% (SS 20-50%)
- Frazione solida in uscita (SS max 70-80%) in discarica
- Frazione liquida in uscita: bentonite + acqua + fini (SS ≈ 30%) ricircolata all'attrezzatura di scavo



Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

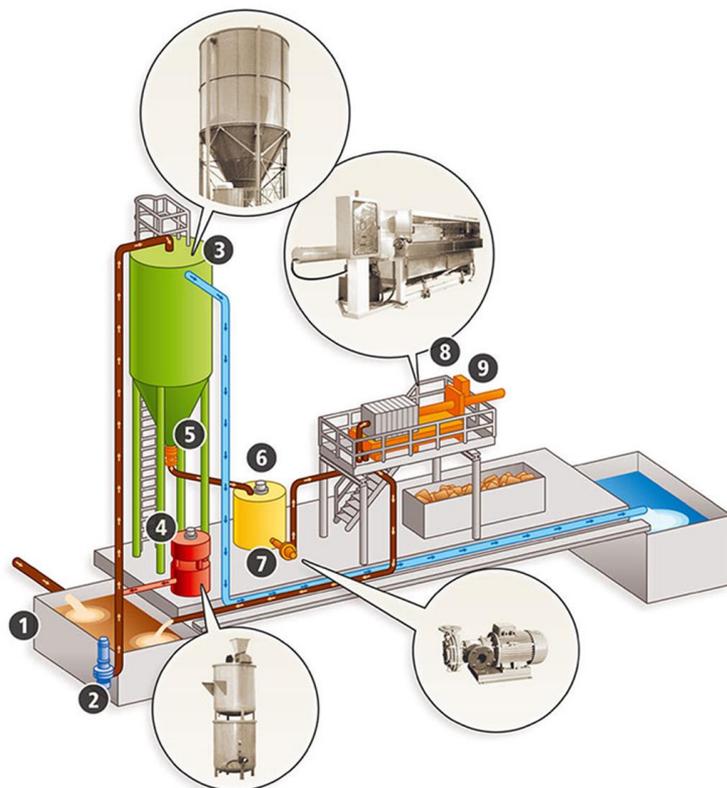
Impianto con filtropressa – Principio di funzionamento

- Viene immesso il fango misto ad acqua (SS <math><10\%</math>) all'interno di pannelli filtranti posti in serie (capacità di selezione > 80 μm)
- Il fango viene poi compresso ad alte pressioni (10-50 bar) e «strizzato»
- L'acqua è raccolta e deve essere trattata per rimozione dei fini o ricircolata
- Il materiale pressato è reso palabile e raccolto da una tramoggia (SS \approx 30).



Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Impianto con filtropressa – Principio di funzionamento



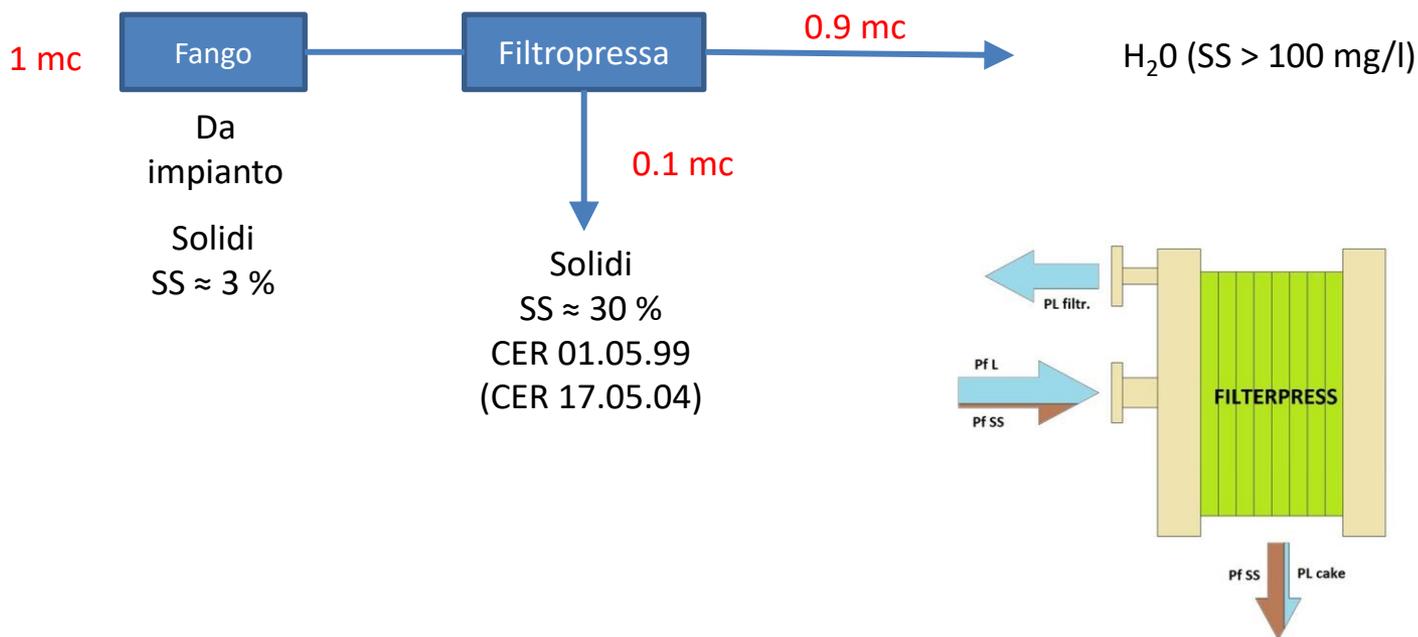
Componenti

1. Pozzo di raccolta
2. Pompa sommersa
3. Chiarificatore
4. Centralina preparazione e dosaggio polielettrolita
5. Valvola pneumatica scarico fanghi
6. Vasca accumulo fanghi
7. Pompa filtro
8. Filtropressa
9. Quadro elettrico
10. Vasca stoccaggio acqua chiarificata



Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

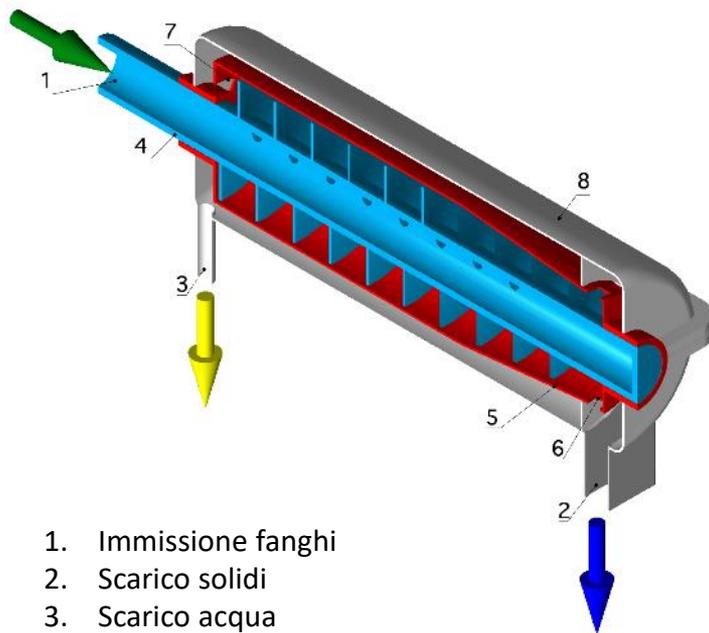
Impianto con filtropressa – Bilancio di massa





Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Impianto con centrifuga – Principio di funzionamento



1. Immissione fanghi
2. Scarico solidi
3. Scarico acqua

- Il processo consiste nel far separare l'acqua dal fango mediante l'applicazione di una forza centrifuga, grazie al **diverso peso specifico dei grani**.
- Nello schema di centrifugazione più semplice il fango viene immesso nella centrifuga attraverso un tubo fisso che corre al centro di un tamburo cilindrico (con un'estremità troncoconica) in rotazione a un elevato numero di giri (ad una velocità di circa 800-2.000 giri/min si ottiene una forza centrifuga > 600 volte quella di gravità).

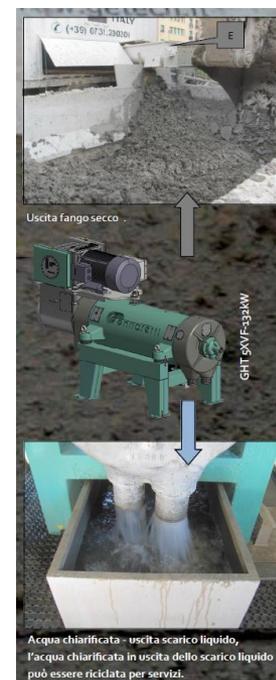


Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Impianto con Centrifuga



Gennaretti, 2019

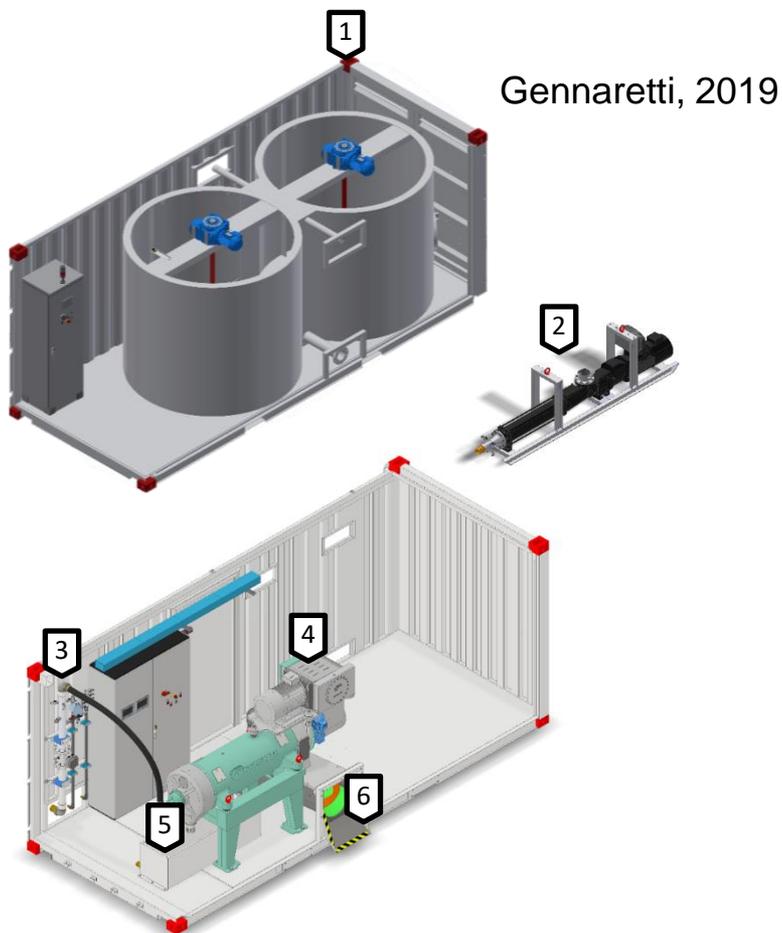


Scarico solidi

Scarico acqua chiarificata

Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Configurazione di un impianto a centrifuga per l'**alleggerimento** dei fanghi

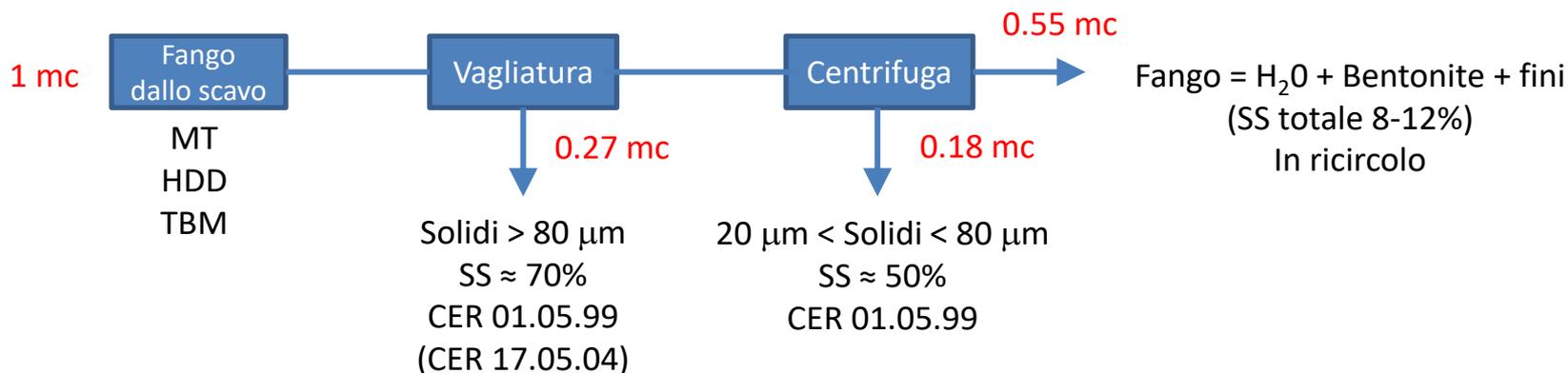


Parti fondamentali dell'impianto:

1. Impianto per omogeneizzazione fango
2. Pompa fango alimento impianto
3. Linea fango con misuratore di portata elettromagnetico
4. Centrifuga
5. Scarico solidi disidratati (SS=45÷55%)
6. Scarico fango (SS=8÷12%) da ricircolare all'impianto di miscelazione

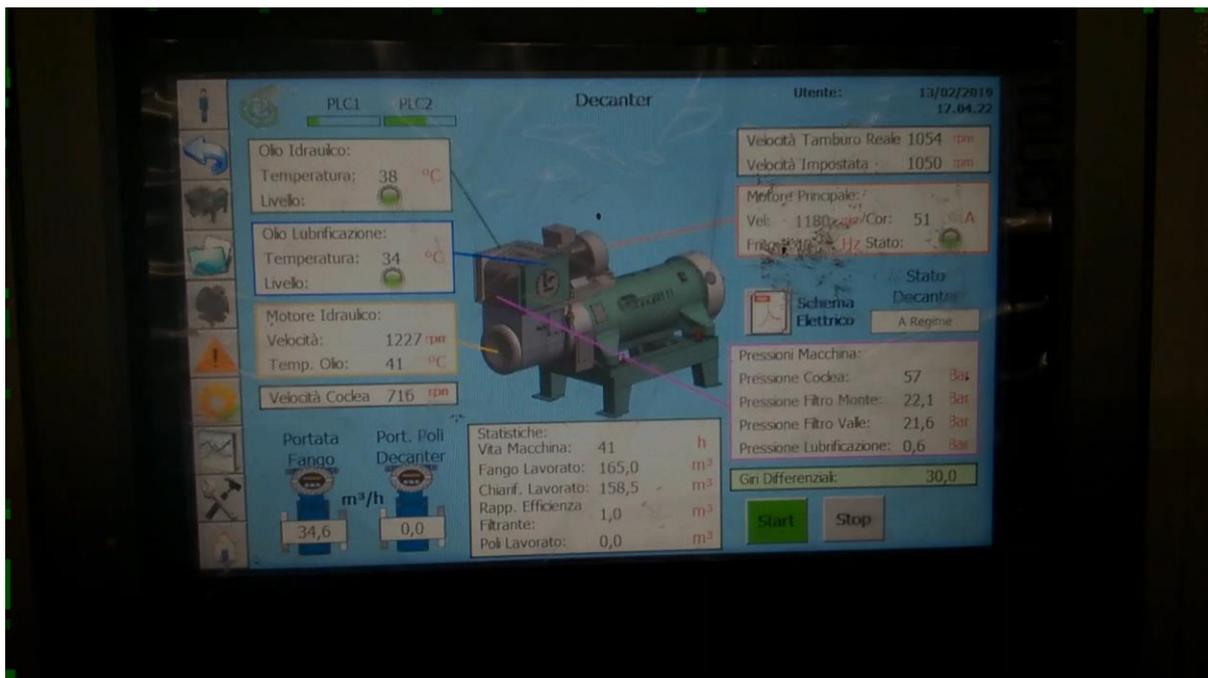
Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Bilancio di massa nel processo di alleggerimento



Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Impianto funzionante durante processo di alleggerimento

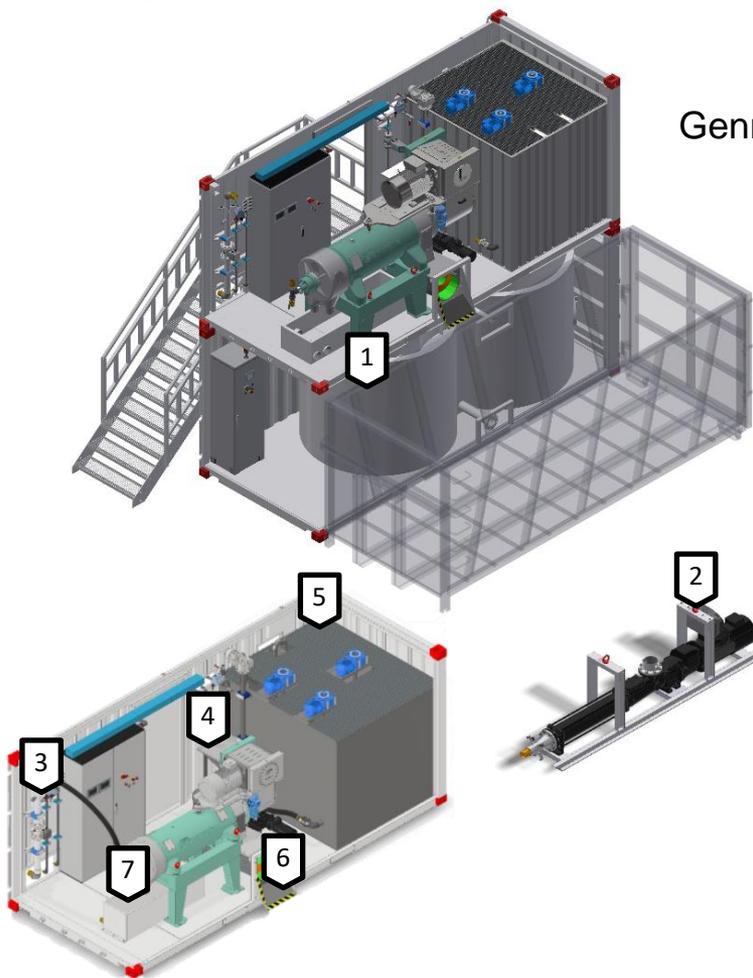


Gennaretti, 2019

Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Configurazione di un impianto a centrifuga per la disidratazione finale

Gennaretti, 2019



Parti fondamentali dell'impianto:

1. Impianto per omogeneizzazione fango
2. Pompa fango alimento impianto
3. Linea fango con misuratore di portata elettromagnetico
4. Centrifuga
5. Stazione di preparazione polielettrolita.
6. Scarico solidi disidratati (SS 70-75%)
7. Scarico acque trattate (SS < 100 mg/l)

Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

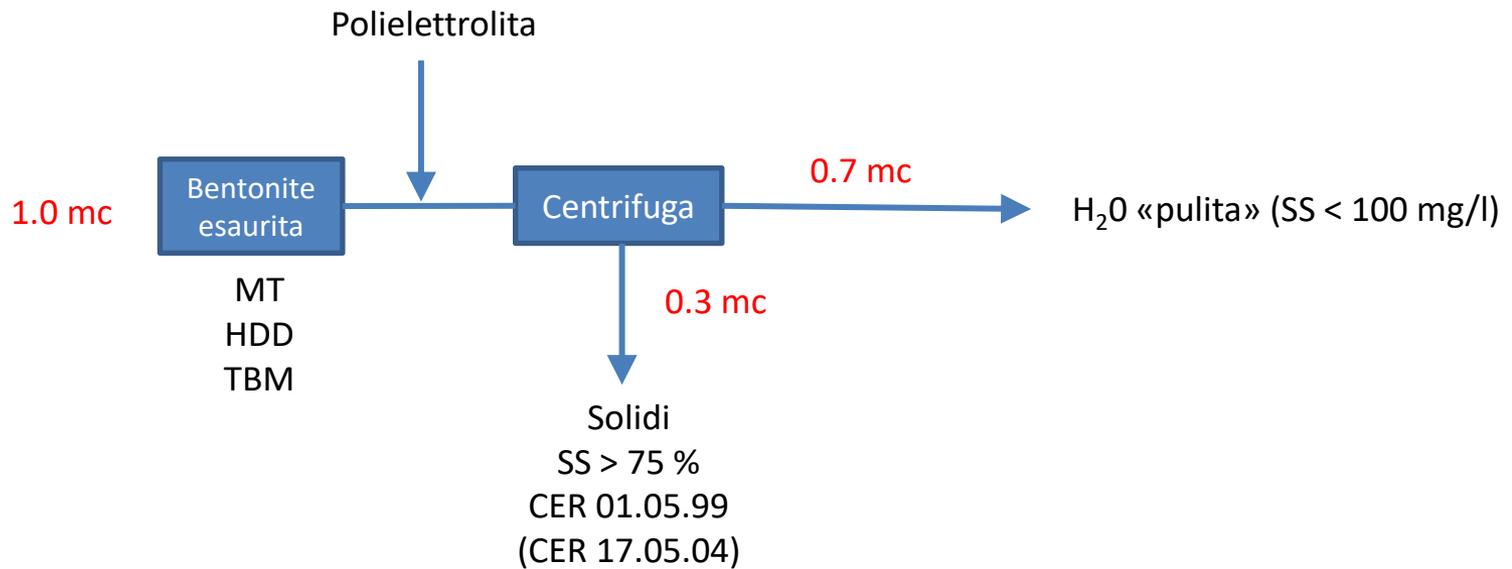
Impianto funzionante durante processo di disidradazione



Gennaretti, 2019

Impianti di trattamento dei fanghi perforazione

Bilancio di massa nel processo di disidratazione





Conclusioni

- I **fanghi di perforazione** sono un elemento fondamentale del processo di perforazione
- La loro composizione dipende dalla natura dei terreni attraversati e dalla tecnica di perforazione
- La **gestione dei fanghi** di perforazioni rappresenta una voce importante nei **costi** di un lavoro NO-DIG
- Il processo di **alleggerimento** deve contribuire alla riduzione dei volumi di fango da utilizzare e ottimizzare l'impiego dei fanghi
- La **disidratazione** finale del fango «esaurito» deve mirare a ridurre il volume di smarino da smaltire in discarica ed ottenere delle acque con contenuti solidi ridotti al minimo
- Le tecniche di trattamento dovrebbero privilegiare le soluzioni che garantiscono **flessibilità, garanzia di risultati e costi ridotti** della gestione complessiva del sistema di trattamento e smaltimento



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

