



Politecnico di Torino

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.A 2018/2019

STUDIO DEL CONDIZIONAMENTO DI FORMAZIONI
MORENICHE COMPLESSE PER LO SCAVO CON MACCHINE
EPB

Candidato:

Amoroso Cristina

Relatori:

Ing. Daniele Martinelli

Prof. Daniele Peila

Aprile 2019

Indice

Premessa	1
Introduzione	2
Capitolo 1: Tecnologia degli Earth Pressure Balance Shields	3
1. Principi operativi	3
2. Configurazioni per l'avanzamento dello scavo	5
3. Ciclo produttivo della EPB	6
4. I parametri di controllo	8
5. L'intasamento a tergo del rivestimento.....	9
6. Il rivestimento in conci prefabbricati.....	10
7. Campi di applicabilità della EPB.....	11
Capitolo 2: Condizionamento del terreno.....	14
1. Cosa significa e quali sono i risultati attesi.....	14
2. Agenti condizionanti e proprietà	15
2.1. Acqua.....	15
2.2. Schiuma	16
2.2.1. Parametri della schiuma	17
2.3. Polimeri.....	18
2.4. Bentonite.....	19
3. Prove di laboratorio	19
3.1. Slump Test	19
3.2. Test di permeabilità.....	21
3.3. Test di semivita	22
3.4. Influenza del tempo e della temperatura.....	23
4. Prova di estrazione.....	24
Capitolo 3: Caratteristiche del materiale oggetto di indagine.....	26
1. Inquadramento Geologico-Geomorfologico-Idrogeologico	26
1.1. Sequenza stratigrafica.....	27
1.2. Parametri del materiale nel tratto della galleria	30
1.2.1. Composizione granulometrica.....	30
1.2.2. Stato di addensamento naturale	31
1.2.3. Permeabilità e resistenza al taglio.....	31

1.2.4.	Deformabilità.....	31
1.2.5.	Livello di falda.....	32
1.3.	Litotipi oggetto di studio	32
1.3.1.	Limiti di Atterberg	35
1.3.2.	Curve Granulometriche	34
Capitolo 4:Caratterizzazione degli agenti schiumogeni utilizzati.....		37
1.	Generatore di schiuma adottato	37
2.	Parametri di caratterizzazione della schiuma	38
3.	Caratterizzazione degli agenti schiumogeni utilizzati mediante determinazione del tempo di semivita	40
Capitolo 5: Prove per lo studio del condizionamento a mezzo di schiume		41
1.	Prove di slump	41
2.	Caratterizzazione del terreno condizionato senza tensioattivi	41
3.	Caratterizzazione del terreno condizionato con schiuma.....	44
4.	Risultati della sperimentazione.....	44
4.1.	Prove di slump con schiumogeno A sopra falda.....	44
4.1.1.	Commenti relativi al sopra falda	52
4.2.	Prove di slump con schiumogeno A sotto falda.....	52
4.2.1.	Commenti relativi al sotto falda	55
4.3.	Prove di slump con schiumogeno B sopra falda.....	56
4.3.1.	Commenti relativi al sopra falda	61
4.4.	Prove di slump con schiumogeno B sotto falda.....	62
4.4.1.	Commenti relativi al sotto falda	64
5.	Risultati delle prove di slump – Caratterizzazione dopo un’ora	64
5.1.	Prove di slump t=1 ora con schiumogeno A.....	64
5.2.	Prove di slump t=1 ora con schiumogeno B	66
5.2.1.	Commenti relativi alle prove a t=1 ora	68
6.	Conclusioni campagna di slump test	69
Capitolo 6: Prove di estrazione		71
1.	Caratteristiche dell’apparato sperimentale	71
2.	Prova di taratura dell’apparato sperimentale di estrazione	73
3.	Prove di estrazione con coclea da camera in pressione per il terreno studiato	73
3.1.	Risultati delle prove di estrazione effettuate utilizzando l’agente schiumogeno A.....	73
3.2.	Risultati delle prove di estrazione effettuate utilizzando l’agente schiumogeno B	80

4. Commenti ai risultati delle prove di estrazione	85
4.1. Prova di estrazione con coclea da camera in pressione effettuata sul terreno “FUM” condizionato con il prodotto A.	85
4.2. Prova di estrazione con coclea da camera in pressione effettuata sul terreno “FUM” condizionato con il prodotto B.	85
4.3. Conclusioni generali.....	86
Capitolo 7: Conclusioni	87
Bibliografia	89

Premessa

L'impossibilità di conoscere con certezza i parametri e le caratteristiche meccaniche in ogni punto del mezzo entro cui si scava conduce inevitabilmente a considerare tutti i possibili scenari che si possono incontrare durante lo scavo meccanizzato di una galleria. I motivi di successo o insuccesso nella realizzazione di tali opere vanno ricercati proprio nello stato di conoscenza dei principi e condizioni al contorno che governano il materiale di scavo, in particolar modo se si tratta di un percorso che si sviluppa in un tratto della Valle d'Astico che ha dimostrato di aver conservato significative tracce di fluttuazioni glaciali anche minori, in risposta a sottili cambiamenti climatici, che possono essere difficili da distinguere nei maggiori ghiacciai alpini. Il presente lavoro si pone come obiettivo quello di analizzare il comportamento del terreno condizionato nello scavo meccanizzato con tecnologia EPB. Il lavoro di sperimentazione svolto nella presente tesi, è sviluppato presso il dipartimento DIATI del Politecnico di Torino, con lo scopo di studiare, mediante prove in laboratorio, il condizionamento del terreno che sarà attraversato dalla galleria "Cogollo". La sperimentazione svolta all'interno del laboratorio "Gallerie e Opere in Sottterraneo" del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture del Politecnico di Torino, segue una procedura consolidata e già verificata per lo studio del condizionamento di numerose gallerie scavate o in fase di scavo con la tecnologia EPBS. Tramite una campagna di prove effettuate per differenti livelli di condizionamento, per mezzo di schiume e agenti condizionanti di due diversi produttori, si vogliono definire i campi ottimali di condizionamento per la formazioni geologica presa in esame. Una volta trovato il punto di ottimo mediante prove di slump speditive, si vuole studiarne il comportamento a grande scala utilizzando l'attrezzatura sperimentale di estrazione del materiale mediante coclea.

Introduzione

La realizzazione di una galleria porta con sé delle difficoltà intrinseche che però non hanno impedito all'uomo di spingersi oltre i propri limiti. La necessità di analizzare le prestazioni tecniche e le possibilità di controllo degli effetti ambientali di più tipologie di macchinari presenti sul mercato adatti allo scavo meccanizzato, nasce dall'esigenza di prevenire gravi inconvenienti, sia per la sicurezza degli operai, sia per quella delle utenze. E' proprio la scelta del tipo di scavo che, in fase preliminare, incide sulle problematiche legate non solo alla tipologia di terreno entro cui si scava, ma anche alla cantierizzazione che si rende necessaria per le fasi di assemblaggio, traslazione e smontaggio delle TBM (Tunnel Boring Machines) lungo il tracciato della galleria. E' importante dunque fornire una descrizione di quelli che sono gli aspetti operativi delle macchine di scavo e come queste, a contatto con l'ambiente circostante, debbano risultare flessibili alle diverse condizioni incontrate durante la realizzazione di una galleria. Si spiegano i diversi tipi di scavo, ponendo attenzione su quello del caso in esame (EPB) e su come, mediante condizionamento, è possibile operare in condizioni meno favorevoli allo scavo. Nello scavo meccanizzato di gallerie EPB il corretto condizionamento del terreno assume un ruolo spesso decisivo garantendo buone e costanti performance di scavo, la corretta applicazione della pressione al fronte necessaria a contenere i cedimenti in superficie e la riduzione della usura degli utensili di scavo o di adesione del terreno a grana fine (clogging). Tra le incertezze intrinseche del modello, le prove di laboratorio si pongono l'obiettivo di fornire alle diverse figure professionali impegnate nell'opera di scavo di una galleria, un primo aiuto nella comprensione del comportamento del terreno di scavo trattato con agenti condizionanti, fornendo altresì utili indicazioni sulle caratteristiche e sulle quantità degli agenti condizionanti da utilizzare. Le prove di laboratorio, così come sono state studiate e realizzate presso il Laboratorio TUSC del Politecnico di Torino, forniscono una serie di dati tali per cui risulti più agevole interpretare le possibili variazioni di comportamento del materiale condizionato durante le reali operazioni di scavo.

Capitolo 1: Tecnologia degli Earth Pressure Balance Shields

1. Principi operativi

La realizzazione di gallerie mediante TBM-EPB si basa sul principio del sostegno del fronte di scavo con il medesimo materiale scavato, transitante nella “camera di scavo”, pressurizzato mediante la spinta della macchina ed un sistema controllato di evacuazione dalla stessa camera di scavo. Il materiale nella camera di scavo è pressurizzato opportunamente in funzione delle condizioni al contorno (caratteristiche geotecniche dei terreni, quota della falda rispetto alla quota dell’asse del tunnel, gradienti idraulici di filtrazione dell’acqua, permeabilità del terreno, eventuale presenza di strutture potenzialmente interferenti, ecc.). Sotto l’impulso applicato allo scudo della TBM e, quindi, alla testa di scavo in rotazione, il terreno viene asportato dal fronte fluendo nella camera di scavo da cui viene estratto mediante la coclea nei volumi voluti. In questo processo, il materiale riceve costantemente la compressione necessaria tale che la pressione esercitata sia proprio quella necessaria a sostenere il fronte di scavo. Contemporaneamente allo scavo, lo scudo della TBM si sfilava dall’anello formato da elementi prefabbricati in calcestruzzo (conci) costituente il rivestimento definitivo, precedentemente montato, ed il vuoto anulare tra la superficie di estradosso dell’anello di rivestimento e il profilo naturale del terreno vengono riempiti con iniezioni di malta a pressione fino alla completa saturazione del vuoto anulare anzidetto. Gli ugelli di iniezione della malta sono montati alla fine dello scudo il quale è protetto verso l’interno dal potenziale ingresso della malta, mediante diverse file di spazzole tra le quali è iniettato in continuo grasso con specifiche caratteristiche. Durante l’avanzamento deve essere estratto il volume di materiale che entra nella camera di scavo, ossia il volume teorico più gli eventuali additivi iniettati sul fronte o nella camera. È fondamentale, pertanto, controllare il volume estratto attraverso la coclea per poter intervenire nel caso in cui si estragga più materiale del teorico (sovra scavo) o meno materiale del teorico (sotto scavo). Di seguito si riporta la rappresentazione di una macchina EPB fornita dal sito di Herrenknecht (Figura 1.1) per descriverne il funzionamento. In particolare:

1. **Testa di scavo:** è costituita da cutters che permettono lo scavo mediante tre movimenti principali. La rotazione attorno all’asse di scavo, la rotazione attorno al proprio asse e l’applicazione della pressione al fronte.

2. **Camera di scavo:** all'interno di essa ricade il materiale scavato che permette di applicare la pressione al fronte necessaria a garantire l'equilibrio.
3. **Bracci di miscelazione:** questi permettono di miscelare il materiale presente in camera per ottenere la consistenza richiesta.
4. **Bulkhead:** trasferisce la forza di spinta al terreno nella camera di scavo dove viene controllata tramite sensori di pressione.
5. **Screw conveyor:** mediante la velocità di rotazione della coclea si determina quanto materiale è stato rimosso dalla camera di scavo.
6. **Erettore:** braccio meccanico utilizzato per il posizionamento dei segmenti lungo la circonferenza di scavo.
7. **Scudo:** ha la funzione di proteggere la macchina da eventuali cedimenti del terreno.
8. **Backfilling:** è definito come il gap tra lo scudo della macchina e il rivestimento della galleria riempito di fango bentonitico per evitare cedimenti nella struttura di terreno circostante.
9. **Rivestimento in CLS:** insieme di conci in calcestruzzo prefabbricati che completano l'anello dello scavo.

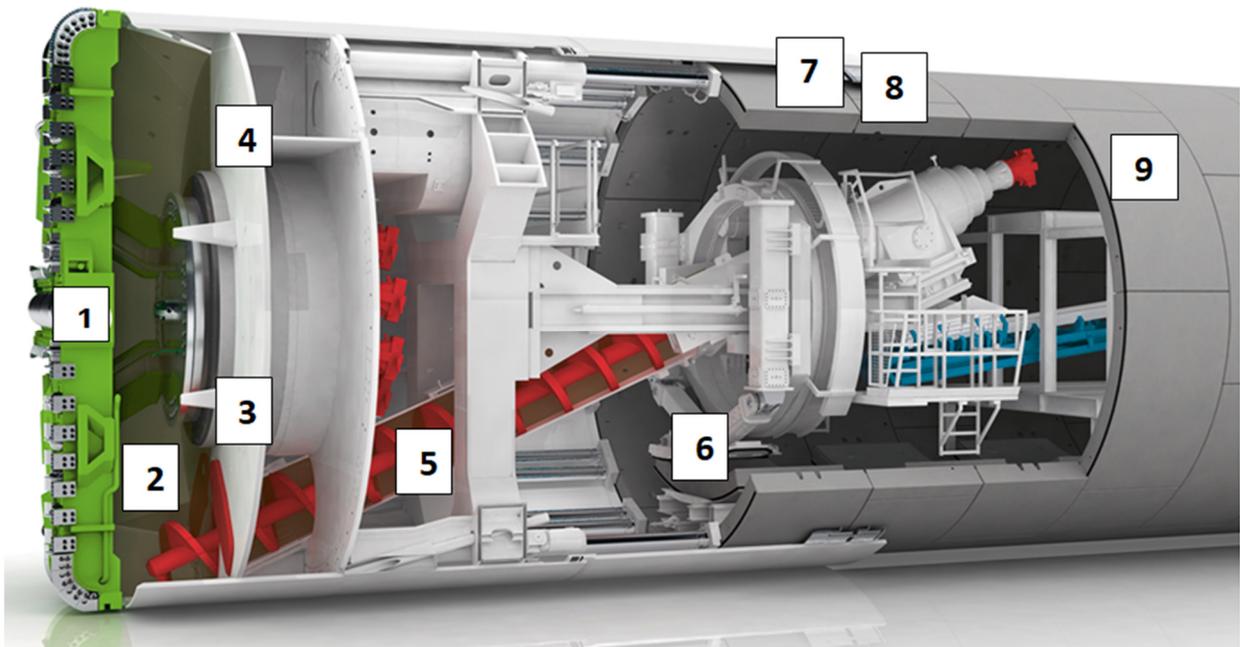


Figura 1.1- Rappresentazione delle caratteristiche principali di una macchina EPB
(<https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/epb-shield/>)

2. Configurazioni per l'avanzamento dello scavo

Le configurazioni/condizioni considerate per l'avanzamento dello scavo sono le seguenti:

- condizioni normali;
- fermi macchina e ripresa avanzamenti dopo manutenzione;
- condizioni anomale.

Si considerano condizioni normali di scavo tutte le condizioni che presentano i parametri caratteristici dello scavo con TBM entro i limiti di attenzione. Tra le condizioni di scavo normali sono comprese anche quelle conseguenti alla ripresa degli avanzamenti dopo interventi di manutenzione nella camera di scavo (per esempio, la sostituzione di cutters). Si considerano condizioni anomale, invece, quelle di seguito riportate:

- venute d'acqua in pressione attraverso la coclea di estrazione;
- oscillazioni improvvise del valore della coppia sulla testa di scavo;
- blocco della testa di scavo;
- anomali valori delle pressioni in camera di scavo;
- improvvise e significative variazioni della densità del materiale presente nella camera di scavo;
- peso del materiale estratto dalla coclea oltre i limiti di attenzione;
- mancato raggiungimento della pressione di iniezione e/o del volume di malta iniettata a tergo del rivestimento definitivo in conci prefabbricati.

3. Ciclo produttivo della EPB

In condizioni normali le tre principali operazioni che compongono il ciclo produttivo sono:

- scavo di avanzamento;
- montaggio dell'anello di rivestimento in conci prefabbricati;
- intasamento con malta cementizia a tergo del rivestimento (avviene contemporaneamente allo scavo).

In questa situazione, la sequenza delle operazioni preliminari che l'operatore della TBM pone in essere è la seguente:

- avviamento dei motori elettrici e delle centraline idrauliche;
- avviamento dell'impianto per l'iniezione di schiume e/o polimero e/o bentonite direttamente sul fronte di scavo e/o nella camera di scavo e/o nella coclea di estrazione;
- avviamento della testa fresante fino al raggiungimento della velocità di rotazione prevista; messa in pressione dei cilindri di spinta.

Con l'avviamento della coclea di estrazione inizia l'evacuazione controllata del materiale dalla camera di scavo. Il controllo della portata, che avviene tramite regolazione della velocità di rotazione (generalmente variabile da 0 a 20 rpm per una TBM di diametro fino a 10 m ed in relazione al tipo di terreno attraversato), è finalizzato al mantenimento nella camera di scavo della pressione prevista in progetto per il sostegno del fronte di scavo (Figura 1.2). L'operatore regolerà la velocità di estrazione della coclea in funzione della velocità di perforazione della TBM, al fine di mantenere la pressione di progetto sul fronte (Figura 1.3). Si impone alla TBM direzione e posizione regolando la pressione sui cilindri di spinta. Il sistema di guida della macchina visualizza in continuo, sia graficamente che numericamente, la posizione della TBM (asse geometrico) in relazione all'asse del tracciato della galleria.

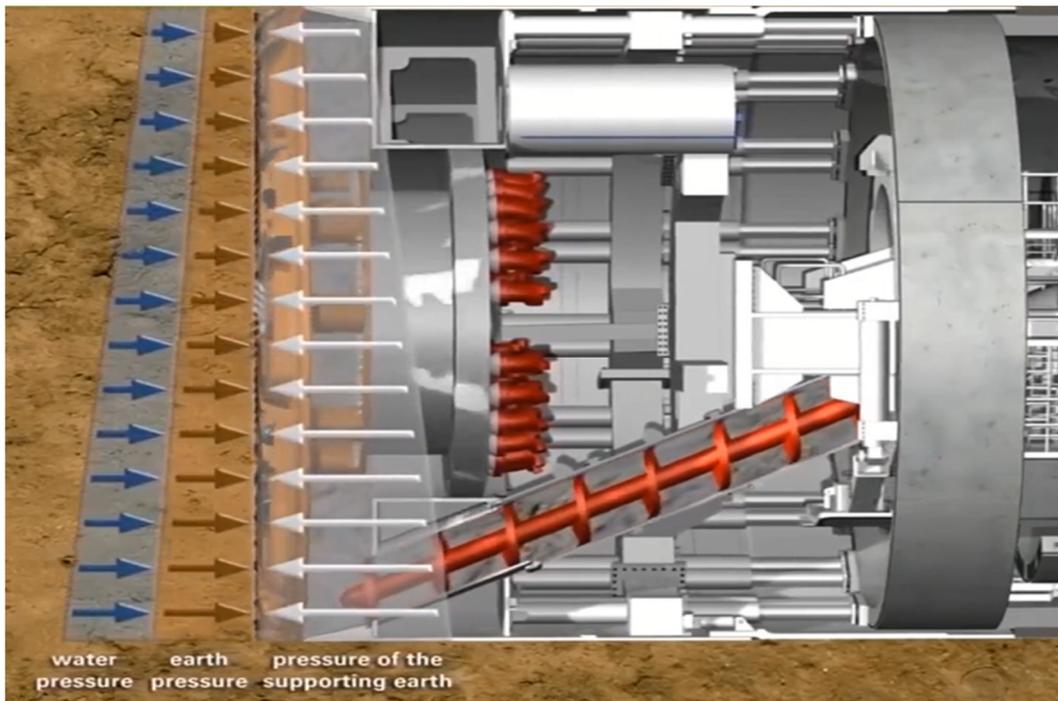


Figura 1.2- Rappresentazione della spinta fornita dalla camera di scavo (Herrenknecht)

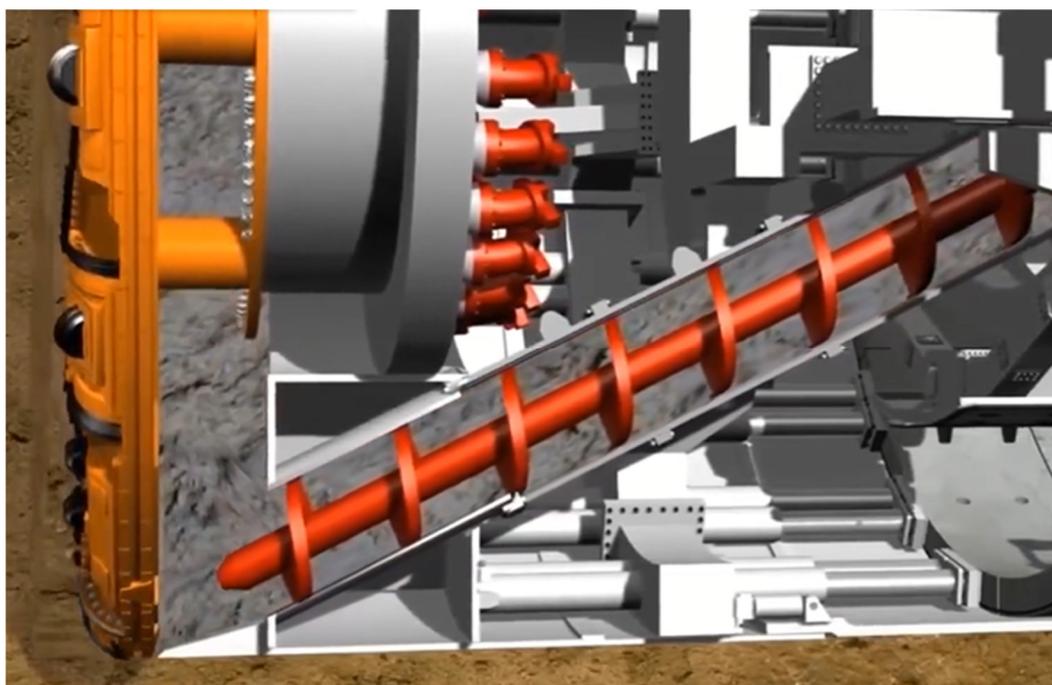


Figura 1.3- Particolare del passaggio del materiale dalla camera di scavo al nastro trasportatore (Herrenknecht)

Il sistema di guida fornisce inoltre la posizione assoluta di un punto in asse posto sulla coda dello scudo e di un punto in asse posto in prossimità della testa di scavo, l'inclinazione verticale e orizzontale dell'asse della TBM (relativamente alla posizione teorica dell'asse), nonché la

rotazione dello scudo intorno al proprio asse. Nello specifico, l'operatore può visualizzare, istante per istante, lo scostamento (verticale ed orizzontale) del centro della testa di scavo dal punto dell'asse teorico della galleria su un piano perpendicolare allo stesso. Viene calcolato e visualizzato anche lo scostamento del centro della sezione terminale dello scudo dal centro teorico del tunnel per ogni sezione presa in esame. In pratica, il sistema di guida visualizza graficamente e numericamente la "tendenza" verticale ed orizzontale della TBM, riferita all'asse teorico, calcolando l'eventuale curva di correzione visualizzando la posizione della TBM relativamente a detta curva. Nonostante tutte queste informazioni, il controllo dell'asse reale della galleria sarà effettuato mediante periodici rilievi topografici atti a verificare che questo rientri all'interno delle tolleranze stabilite.

4. I parametri di controllo

Attraverso l'esame dei parametri di controllo dello scavo e dei relativi limiti di soglia e di allarme, si verifica se si sta procedendo in una condizione normale o anomala. I parametri da verificare attraverso sensori e attrezzature di rilevamento sono i seguenti:

- valore di pressione di contropinta di sostegno del fronte di scavo (pressione del materiale all'interno della camera di scavo);
- pressione e volume della malta di intasamento del vuoto anulare compreso tra l'estradosso del rivestimento in conci prefabbricati ed il profilo di scavo;
- peso del materiale estratto con i relativi valori di attenzione e allarme;
- verifica periodica della taratura della bilancia impiegata per la misura del peso del materiale estratto dalla coclea, affinché i valori misurati siano sempre attendibili.

L'inizio delle operazioni di scavo è, quindi, subordinato alla verifica di eventuali anomalie meccaniche o elettriche e dei dati sopra menzionati. Se i parametri di controllo dello scavo raggiungono i valori di allarme, lo scavo stesso deve essere arrestato al fine di poter adottare le relative contromisure; analogamente, se nella fase di intasamento a tergo del rivestimento in conci prefabbricati non si dovessero raggiungere le quantità e/o le pressioni stabilite.

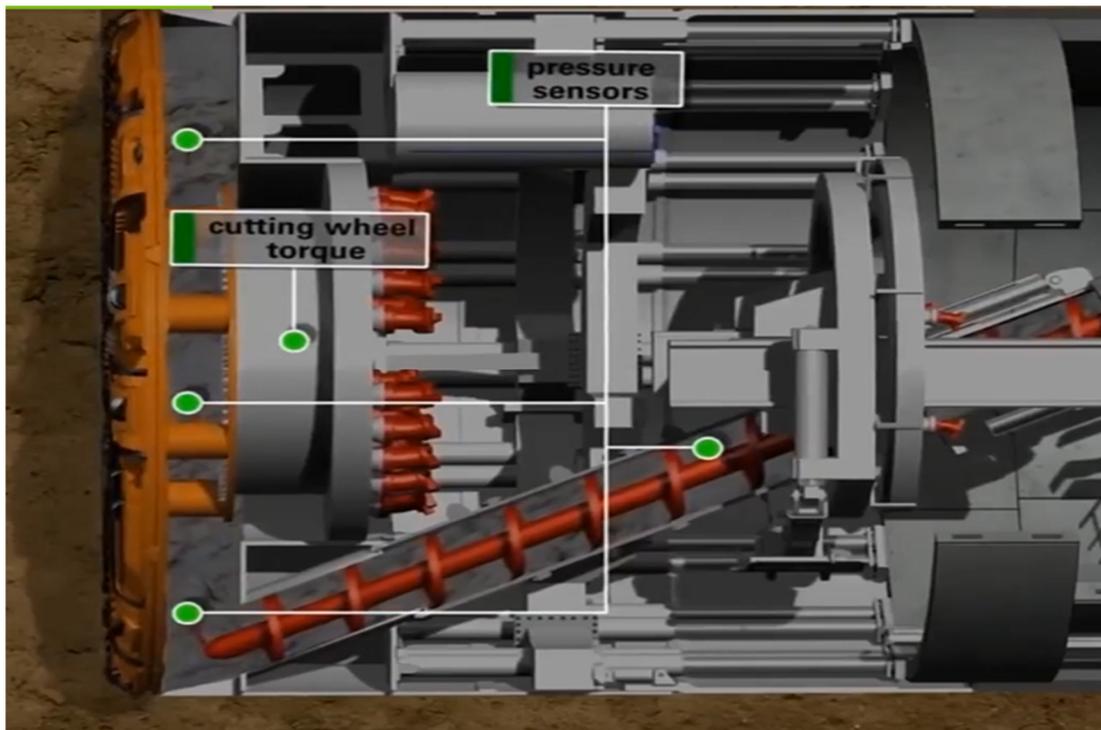


Figura 1.4- Rappresentazione dei principali parametri di controllo durante la fase di scavo mediante sensori (Herrenknecht)

5. L'intasamento a tergo del rivestimento

Durante l'intera fase di scavo e continuativamente con l'avanzare della TBM, viene iniettata una miscela bicomponente a tergo del rivestimento in conci prefabbricati. Tramite le pompe di iniezione si inietta la miscela attraverso delle linee costituite da tubazioni terminanti, oltre a una serie di spazzole metalliche montate sulla circonferenza dello scudo tra le quali è iniettato con continuità grasso. L'iniezione avviene in corrispondenza dell'estremità dello scudo, direttamente sulla superficie esterna del rivestimento definitivo della galleria. Il controllo dei volumi di malta iniettata a tergo dei conci è fondamentale per il controllo degli assestamenti del terreno in superficie. Il quantitativo di malta iniettata varia in funzione della lunghezza realmente scavata (in genere circa 1,50 m), del tracciato rettilineo o curvilineo, del comportamento del materiale scavato, del consumo dei denti perimetrali montati sulla testa fresante. La variabile più importante può essere il consumo dei denti, che può far variare il consumo teorico di malta; più i denti si consumano e meno consumo teorico di malta si avrà. A titolo indicativo e per un diametro di scavo della macchina di 9 m (inclusi anche i denti perimetrali), un consumo dei denti di cinque centimetri fa diminuire il consumo teorico di malta di circa 1 m³ per ogni anello di larghezza 1 m di rivestimento definitivo. L'iniezione a tergo dei conci prefabbricati si fa

usualmente attraverso sei posizioni di iniezione: due poste a ore 12, due a ore 10 e 14 e due a ore 16 e 20. Tubazioni di riserva sono previste in ciascuna posizione nel caso in cui quelle utilizzate normalmente si dovessero ostruire. Il sistema di pompaggio è dotato di una valvola di massima pressione che interrompe il funzionamento della pompa al raggiungimento del valore massimo di sicurezza, mentre non c'è ripresa automatica di pompaggio della malta al calare della pressione. I valori di pressione minimi e massimi, stabiliti in fase progettuale ed affinati in fase esecutiva, sono disponibili per tratta omogenea e forniti insieme ai valori di pressione di sostegno al fronte. Per l'iniezione della malta di intasamento vengono calcolati e resi disponibili valori di pressione differenziati in funzione della posizione dei punti di iniezione e, quindi, in funzione del carico litostatico ed idraulico (se presente).

6. Il rivestimento in conci prefabbricati

I rivestimenti definitivi i conci prefabbricati utilizzati in galleria sono a sezione circolare e sono realizzati mediante lo scavo meccanizzato. Il sistema di guida della TBM è dotato di software che consente di calcolare la posizione ottimale dell'anello da montare, in modo da garantire la corrispondenza dell'asse della galleria all'asse teorico entro le tolleranze di progetto secondo il criterio dell'anello universale. Il rivestimento è posto in opera mediante l'erettore posto all'interno dello scudo. Questo svolge le funzioni di:

- contenimento dei carichi a lungo termine durante la vita dell'opera;
- contrasto delle azioni transitorie in fase di spinta della macchina;
- tenuta idraulica;
- rispetto dell'andamento teorico del tracciato.

La tecnologia generalmente utilizzata detta ad anello universale ha la caratteristica forma dell'anello troncato obliquamente che, non prevedendo pezzi speciali con posizioni prefissate, consente una notevole flessibilità nell'andamento delle differenti condizioni plano-altimetriche del tracciato. L'anello universale è costituito da conci rettangolari e trapezoidali in chiave. Vi sono inoltre due conci in controchiave. Questi sono destinati a sostenere sforzi di compressione e di taglio generati sia dalla spinta della TBM sia dai carichi indotti dal terreno. Tale tecnologia permette di seguire l'andamento del tracciato per successive approssimazioni semplicemente assemblando i diversi anelli nella sequenza di volta in volta più appropriata. Dal punto di vista

pratico il tutto si riassume nelle seguenti operazioni: l'operatore inserisce nel computer della TBM i dati che gli consentiranno di valutare la "posizione" con la quale dovrà essere montato l'anello di rivestimento; in output il computer fornisce la posizione del concio di chiave cui corrisponde una data sequenza di montaggio dell'anello; i conci di rivestimento sono posizionati, alla fine dello scavo e secondo la corretta sequenza di montaggio (calcolata dal computer della TBM), attraverso l'erettore; si procede con il montaggio dell'anello con il concio che si trova in posizione opposta alla chiave; mediante l'erettore viene agganciato il concio e contemporaneamente vengono retratti i cilindri di spinta in corrispondenza della posizione in cui andrà montato detto concio; il concio è accostato all'anello precedentemente montato nella posizione in cui dovrà essere fissato mediante spinotti di acciaio/bulloni passanti tra anelli consecutivi; i cilindri, precedentemente retratti, vengono riaccostati sul nuovo concio appena montato; con la medesima procedura si esegue il montaggio degli altri conci fissandoli all'anello precedente e tra di loro; come ultimo elemento si monta l'elemento di chiave fissandolo sempre all'anello che lo precede. Grazie ai vantaggi offerti dalla meccanizzazione spinta di questi processi costruttivi, è oggi possibile realizzare scavi a piena sezione con TBM-EPB avanzando in condizioni geologico-geotecniche difficili e in presenza di falda conseguendo produzioni in termini di avanzamento eccellenti.

7. Campi di applicabilità della EPB

Le EPB sono state sviluppate per i tunnel in terreni coesivi capaci di un riempimento totale della precamera di scavo in modo da garantire una contropressione positiva nei confronti dei cedimenti del fronte. E' comunque molto raro trovare situazioni di scavo in cui si incontrano terreni puramente coesivi o puramente non coesivi, pertanto vi è la necessità di estendere l'applicabilità delle Slurry Shields in terreni coesivi con la necessità di impianti di separazione più estesi, e viceversa estendere l'applicabilità delle EPB in terreni senza coesione con la necessità di iniettare dei polimeri e delle schiume sia nella precamera che nella coclea per produrre uno smarino fluido e plasticizzato. Nella figura seguente si riportano le distribuzioni granulometriche ideali per l'adattabilità delle EPB o Slurry.

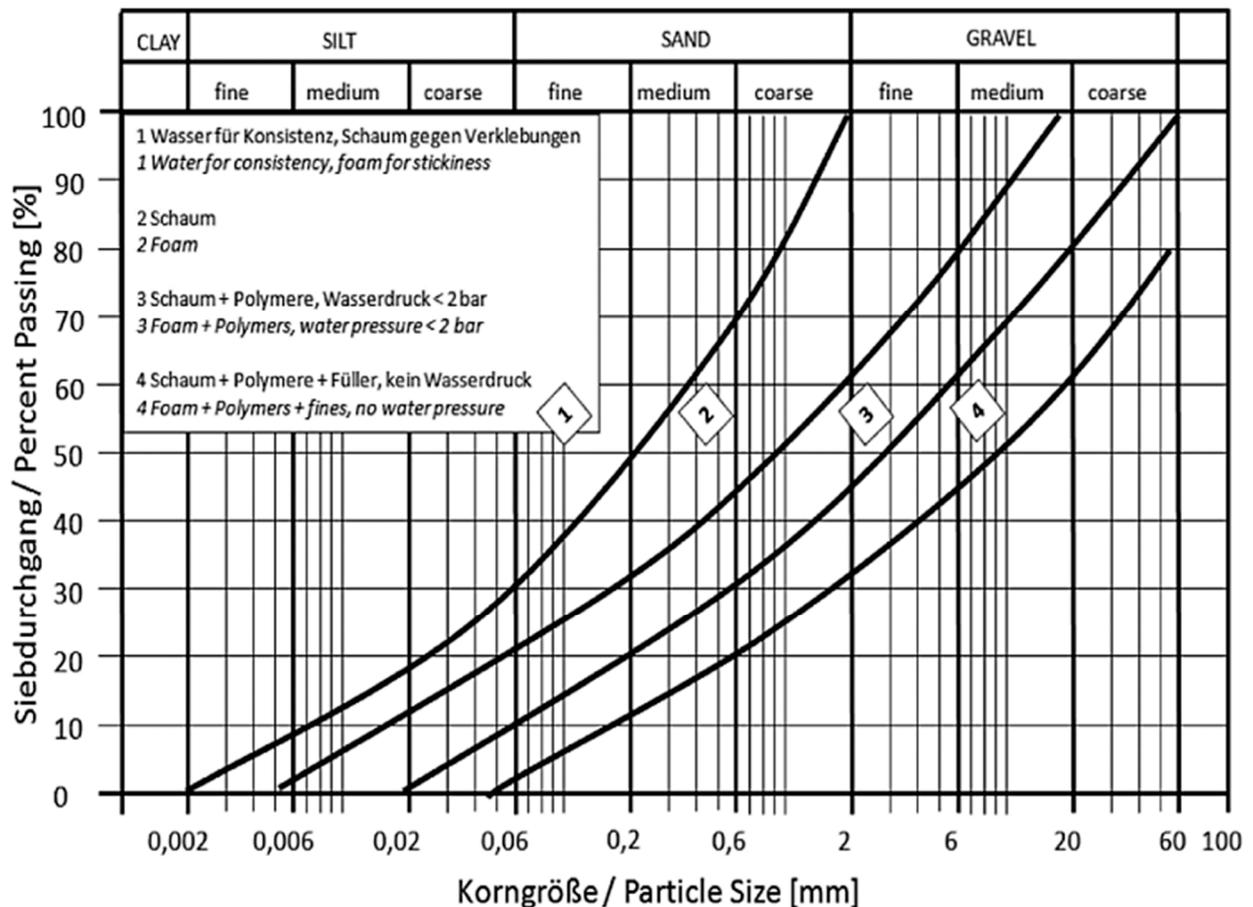


Figura 1.5- Range di applicabilità per una EPB (Thewes & Budach, 2010)

Per le EPB un contenuto di fino inferiore al 10% può causare problematiche che porta a costi eccessivi soprattutto per il grande impiego di condizionanti del materiale di smarino. Un alto valore di PI, indice di plasticità, classico delle argille appiccicose, può causare fenomeni di creazione di “palle di argilla” difficilmente gestibili e può essere problematico anche per le EPB per le quali è necessario l’utilizzo di agenti chimici particolari. Oltre la distribuzione granulometrica occorre tenere in considerazione la permeabilità del materiale scavato. La bibliografia e le diverse esperienze sembrano affermare che :

- Permeabilità $> 1 \times 10^{-5}$ m/s, si consiglia una Slurry shield
- Permeabilità $< 1 \times 10^{-5}$ m/s, si consiglia una EPB che può essere utilizzata anche in campi di permeabilità tipici delle Slurry con l’impiego di maggiori quantità di additivi.

Nelle circostanze in cui vi è una elevata tensione idrostatica al fronte, a causa soprattutto di elevate flussi d’acqua, spesso associati a situazioni di elevata permeabilità e fessurazione, le

Slurry shield sono le macchine che meglio si adattano a tali difficoltà soprattutto con l'uso di un fango bentonitico che in caso di interventi al fronte con aria compressa garantiscono una completa sigillatura del fronte. Le EPB non sarebbero in grado di formare il cosiddetto cake, smarino denso, e portarlo fuori dalla coclea. Al fine di rendere più chiaro il concetto di smarino denso si riporta in Figura 1.6 l'andamento della pressione lungo la coclea; in particolare è bene ricordare che la pressione in camera di scavo si mantiene costante se il punto di estrazione del materiale della camera di scavo è dotato di un sistema di guarnizione adeguato. A tal proposito la coclea è progettata con una riduzione di diametro interno e con aperture ad azionamento idraulico in grado di aumentare la pressione o diminuirla in caso di necessità.

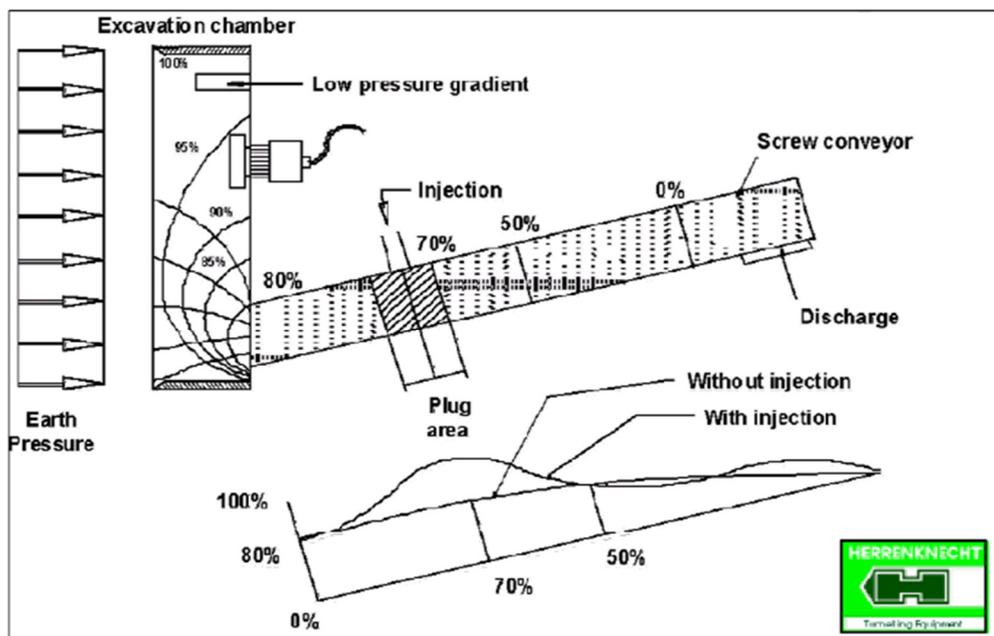


Figura 1.6- Andamento della pressione lungo la coclea (Herrenknecht)

Capitolo 2: Condizionamento del terreno

1. Cosa significa e quali sono i risultati attesi

Condizionare il terreno da scavare significa modificare le sue proprietà in termini di plasticità, permeabilità e consistenza, al fine di rendere più agevole lo scavo anche in condizioni non del tutto idonee alla macchina EPB. Come già visto, le prestazioni della macchina di scavo dipendono fortemente dalle condizioni entro cui avviene lo scavo e dalle caratteristiche meccaniche del terreno, in particolar modo questo deve formare una massa plastica adatta di consistenza morbida e basso attrito in modo da poter essere facilmente estrusa dalla camera, mediante trasportatore a coclea. Per ottenere una tecnologia di successo è necessario iniettare additivi al terreno che ne trasformano le caratteristiche rendendolo un materiale plastico e di maggiore consistenza. Per migliorare il terreno è importante che vi sia un controllo continuo del flusso, cioè bisogna garantire che la coclea funga da “tappo” in modo che il trasportatore sia sempre pieno e non vi siano vuoti intergranulari tali da ridurre la pressione lungo la coclea. Questi additivi possono essere iniettati :

- **alla testa della fresa rotante:** iniettati direttamente nel terreno attraverso la testa di scavo questi impregnano il terreno del fronte e migliorano la ritenzione idrica del terreno;
- **nella camera pressurizzata:** in questa zona l’alto mixing del materiale scavato migliora l’omogeneità del materiale che viene poi condotto alla coclea e la distribuzione all’interno della camera di scavo è tale da garantire l’equilibrio al fronte;
- **lungo lo screw conveyor:** all’interno del trasportatore il materiale fluisce più facilmente e la lubrificazione all’interno della coclea determina un elevato calo della domanda di energia della coppia torcente.

Nello scavo con EPB il condizionamento del terreno si propone i seguenti obiettivi:

- Riduzione dell’usura delle parti meccaniche della macchina a contatto con il terreno;
- Migliore uniformità di distribuzione della pressione nella camera di scavo e conseguente miglioramento della stabilità del fronte e del controllo delle subsidenze;

- Controllo del flusso del materiale scavato attraverso la coclea;
- Riduzione della potenza richiesta alla testa in seguito alla riduzione di attrito di frizione;
- Riduzione dell'attrito all'interno della camera di scavo con conseguente riduzione del calore generato;
- Riduzione della permeabilità con conseguente miglior controllo del flusso d'acqua;
- Smarino più agevole.

2. Agenti condizionanti e proprietà

Gli additivi maggiormente utilizzati appartengono alle seguenti categorie:

- Schiume : fornite in cantiere vengono successivamente miscelate con aria e acqua;
- Polimeri: servono a migliorare la stabilità della schiuma e le caratteristiche del materiale da scavare;
- Anti-amalgamanti: utilizzati nei terreni argillosi per evitare impaccamenti;
- Anti abrasivi;
- Bentonite;
- Filler;
- Acqua: può essere usata per limitare il quantitativo di schiuma richiesta.

2.1.Acqua

Il contenuto d'acqua naturale e le caratteristiche dei materiali descritte dai limiti di Atterberg influenzano il comportamento del terreno durante la fase di scavo. A tal proposito è possibile condizionare il terreno variando il suo contenuto d'acqua in modo da renderlo più o meno consistente. Inoltre, aggiunta ad un altro agente condizionante come la schiuma, questa può completarne le funzionalità attivando la frazione più fine presente nel terreno oppure, se utilizzata da sola, può modificare il limite plastico.

2.2.Schiuma

Le schiume sono definite come una dispersione di bolle di gas in un liquido o in un solido, dove almeno una delle dimensioni cade nel range dei colloidali (1- 1000 μ m). La fase dispersa della schiuma è di solito detta fase interna, mentre la fase continua è detta fase esterna. La schiuma può essere rappresentata bi-dimensionalmente come una struttura nella quale la schiuma è posizionata tra due fasi: sul fondo, c'è la maggior parte di liquido e sopra di esso, in una seconda grande fase, il gas.

Essa è composta da aria e fluido che a sua volta è composto da acqua e surfattante (Figura 2.1)

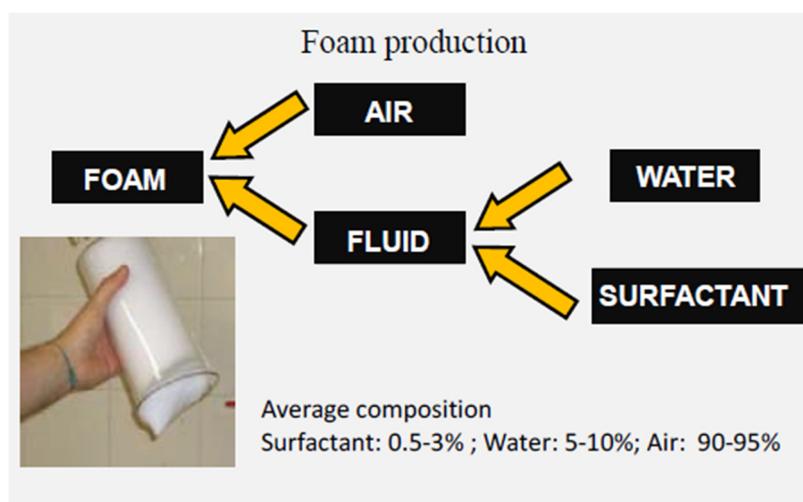


Figura 2.1- Composizione della schiuma

Come già detto, durante la fase di scavo con EPB, è fondamentale mantenere la pressione al fronte costante ed evitare che vi siano depressioni dovute alla presenza di spazi vuoti nella camera pressurizzata. Lo scopo principale dell'agente schiumogeno è quello di creare una pasta capace di applicare una pressione al fronte che ne garantisce la stabilità e l'impermeabilità. Il modo con cui questo avviene è semplice: l'agente condizionante va a modificare la reologia del terreno. Il tensioattivo è in grado di invertire la forza elettrostatica presente tra le particelle portando ad una repulsione tra queste: in questo modo, grazie all'effetto della capillarità, la forza con la quale le particelle tenderebbero a legare diminuisce, facendo così ridurre anche la tensione superficiale dell'acqua. Questi effetti però variano in base alla tipologia di tensioattivo utilizzato; in Figura 2.2 è possibile vedere come la tensione superficiale diminuisca al crescere della percentuale di tensioattivo introdotto e come la repulsione tra le particelle permetta l'inserimento dell'agente condizionante tra i pori capillari.

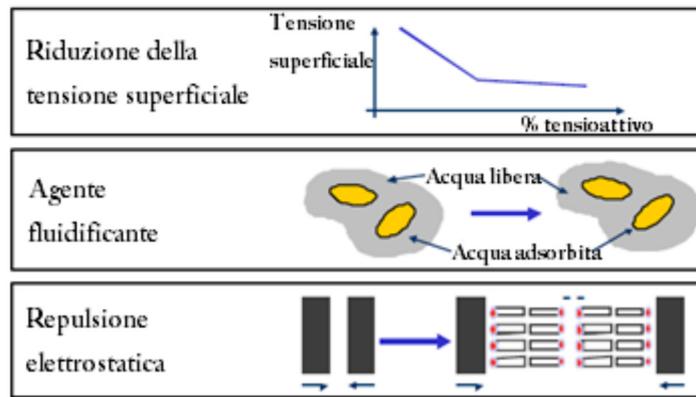


Figura 2.2- Effetti dell'agente condizionante sul terreno

Convenzionalmente una molecola di tensioattivo viene schematizzata da una "testa" idrofila a cui è legata una "coda" idrofoba.

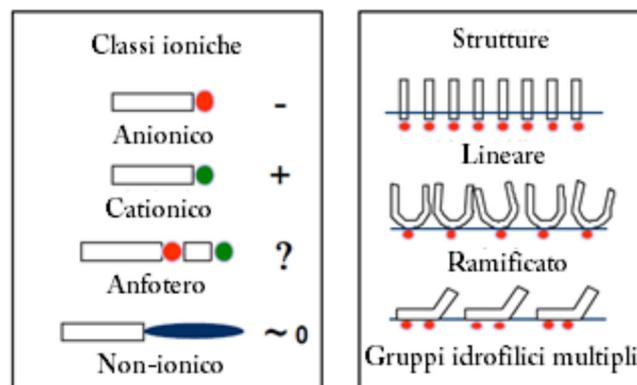


Figura 2.3- Classificazione e strutture dei tensioattivi

Per ogni tipologia di terreno, secondo le caratteristiche chimiche dei suoi costituenti, è necessario un diverso tipo di tensioattivo al fine di ottimizzarne l'interazione con il suolo da condizionare (Langmaack, 2002).

2.2.1. Parametri della schiuma

Per la corretta produzione dell'agente schiumogeno è fondamentale identificare dei parametri di progetto in grado di indicare sia la qualità della schiuma che la sua quantità di iniezione. Tali parametri dipendono essenzialmente dalla percentuale in volume di schiuma rispetto al terreno scavato e al liquido generatore. In particolare si definiscono i seguenti parametri di progetto:

- concentrazione dello schiumogeno: esprime la percentuale in peso di tensioattivo all'interno del fluido generatore;

- Foam Expansion Ratio (FER): indica il rapporto tra il volume della schiuma e il volume del liquido generatore dal quale è stata generata;
- Foam Injection Ratio (FIR): rapporto percentuale del volume di schiuma utilizzato sul volume di terreno da condizionare;
- T₅₀ (semivita): tempo in cui un campione di schiuma rilascia la metà del proprio liquido generatore.

2.3. Polimeri

I polimeri sono essenzialmente lunghe catene di molecole formate dall'unione di un ampio numero di monomeri. I più utilizzati nel campo del condizionamento sono i bio-polimeri, creati sulla base di catene di idrocarburi e prodotti con l'aiuto della fermentazione, in tal modo il prodotto è biodegradabile e non presenta problemi di stoccaggio. I polimeri sono solitamente usati come additivi per migliorare la prestazioni di slurry o impasti, e più precisamente per aumentare la lubrificazione, aumentare la tendenza a creare un elemento filtrante o mantenere una struttura dispersa.

I polimeri sono quindi riscontrabili in una grande varietà di forme, ma solitamente sono solidi che vengono poi dispersi in acqua o oli. I polimeri asciutti possono incontrare difficoltà nello sciogliersi velocemente e tendono a creare uno strato di gel sulla superficie esterna, che impedisce l'ingresso dell'acqua. Una possibile soluzione sarebbe il mescolamento, ma si corre il rischio di rompere le catene di molecole. Nello scavo con macchine EPB i polimeri ricoprono quindi queste funzioni:

- aumentare la viscosità dell'acqua nel terreno vicino il fronte di scavo
- incrementare il legame tra le parti fini del limo e della sabbia per ridurre la permeabilità
- aumentare la rigidità del terreno e aiutare a formare un "tappo" nella coclea
- incrementare la capacità della schiuma a prevenire dissesti durante le pause di lavoro
- lubrificare il terreno nella fase di convogliamento dalla camera di pressione alla vite senza fine della coclea
- prevenire o ridurre l'adesione agli utensili o ai dischi o altre superfici metalliche
- ridurre la coppia torcente della testa per una minor manutenzione e aumentare la velocità di avanzamento

2.4. Bentonite

E' impiegata con la funzione di lubrificante per la coclea, stabilizzazione del fronte d'attacco, lubrificazione della camicia dello scudo e contro le possibili venute di acqua in galleria.

3. Prove di laboratorio

Risulta chiaro che ogni materiale di scavo ha le sue proprietà e necessita di un tipo di condizionamento che dipende dalle condizioni entro cui si scava. A tal proposito è impossibile definire a priori quali siano i quantitativi ottimali di condizionamento per il terreno da scavare e risulta dunque necessario effettuare dei test in laboratorio che possano fornire un range di valori da poter poi utilizzare in camera di scavo. E' proprio questo l'obiettivo di tali test, di poter comprendere il comportamento del terreno di scavo trattato con agenti condizionanti nei vari scenari che possono presentarsi durante le fasi di scavo. Quindi, una volta note le caratteristiche del terreno in termini di contenuto d'acqua, indice plastico, peso in volume e definito il condizionamento, l'obiettivo delle prove è definire il comportamento globale del terreno condizionato in funzione della sua curva granulometrica al variare della quantità e del tipo di agente condizionante.

3.1. Slump Test

La prova che viene eseguita, sia in cantiere che in laboratorio, utilizzando il cono di Abrams prende il nome di slump test o prova di abbassamento al cono ed è una valutazione della deformazione che un impasto subisce per effetto del proprio peso, quando viene privato del recipiente che lo sostiene. Inizialmente si inumidisce lo stampo e lo si pone su una superficie rigida, liscia, umida e non assorbente. Si mantiene immobile il cono durante la fase di riempimento gravando con i piedi sulle due staffe di base. Il recipiente tronco-conico viene riempito rapidamente, mediante cazzuola o sessola con tre strati successivi assestati, pari ciascuno a circa 1/3 dell'altezza dello stampo. Valori di abbassamento al cono compresi tra 12 e 20 cm sono suggeriti come ottimi in letteratura tecnica e confermati dalle ricerche effettuate presso il Politecnico di Torino (Peila et al., 2007; 2009).

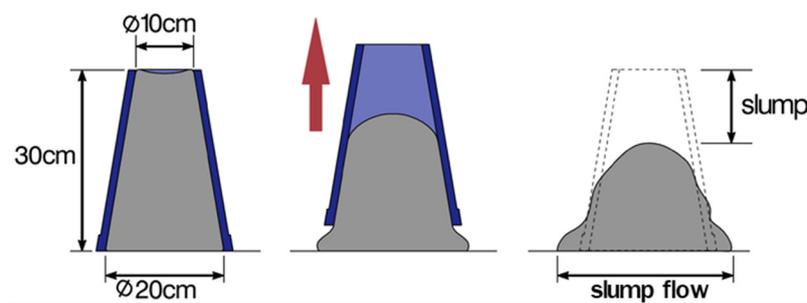


Figura 2.4- Rappresentazione dello slump test

Possono essere identificate cinque tipologie di comportamento:

- Il collasso è irregolare e non si forma un materiale “plastico”. Questo può essere dovuto a un contenuto d’acqua e/o di schiuma insufficiente, a un eccesso di schiuma con carenza d’acqua o a una curva granulometrica non adatta al condizionamento;
- Il materiale manifesta un comportamento rigido con un valore di slump basso. Questo è un comportamento limite tendenzialmente dovuto a un FIR troppo basso;
- Il materiale è troppo fluido e segrega acqua e/o schiuma per via di una presenza eccessiva di tali componenti;
- Il comportamento è “plastico” e si ha una modesta segregazione di acqua. In questo caso il terreno manifesta un comportamento limite;
- Il materiale è “plastico”, non segrega acqua o schiuma e non si hanno rotture della massa. Se queste condizioni si verificano il condizionamento è ottimale (Peila e Oggeri, 2008).

Più in generale è possibile definire dei comportamenti «standard» che consentono una classificazione immediata del materiale condizionato, come mostrato in Figura 2.5.

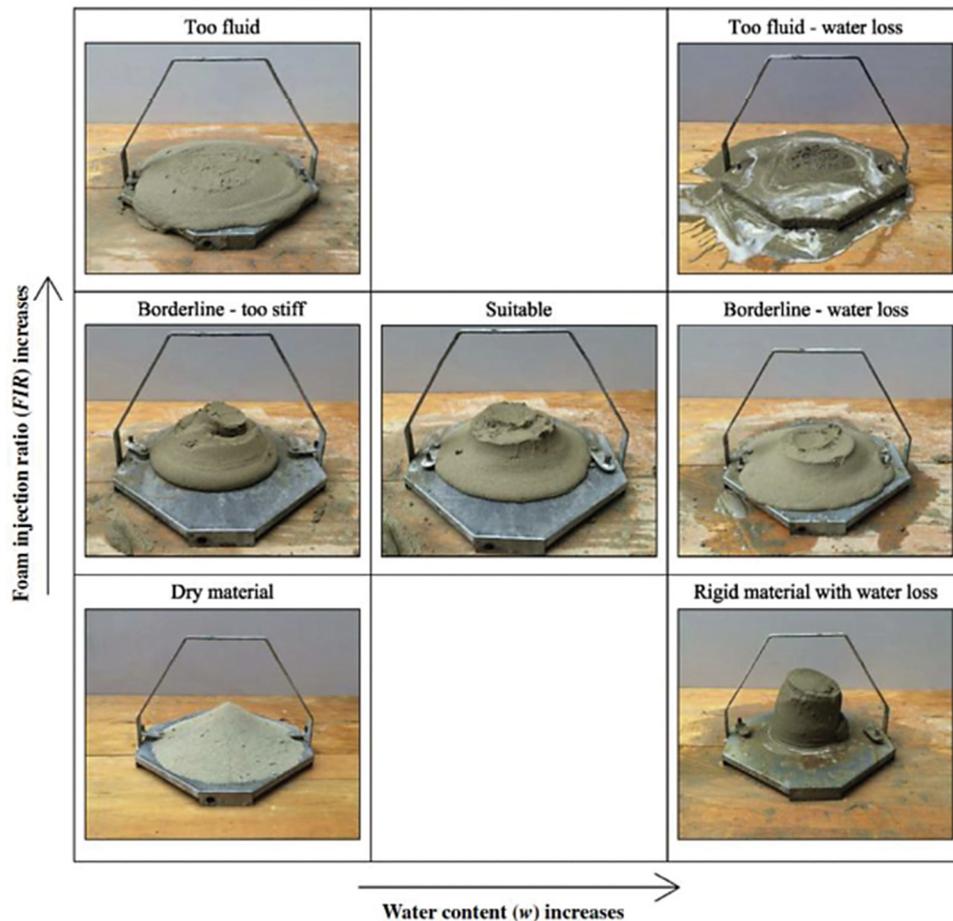


Figura 2.5-Diagramma di correlazione tra FIR e contenuto d'acqua . E' evidente la diretta correlazione tra i due fattori nell'ottica di conseguire un adeguato condizionamento per lo scavo con EPB.

3.2. Test di permeabilità

La permeabilità influenza l'abilità del terreno nel saper trasmettere la corretta contro pressione al fronte e una graduale riduzione della pressione attraverso la coclea. Al fine di impedire flussi liberi di acqua all'interno della camera di scavo, la permeabilità deve essere mantenuta al di sotto di 10-5m/s. La prova consiste nella valutazione del tempo impiegato da 2 litri di acqua a passare attraverso il campione in esame. Tale valore è definito come indice di permeabilità (Borio & Peila, 2010): maggiore è il tasso di condizionamento, maggiore sarà il valore di tale indice. Le prove sono simili, nella loro esecuzione, a quelle eseguite su campioni di terreno (Cella di Rowe o permeametro a battente idraulico costante). Sono state misurate riduzioni di due ordini di grandezza della permeabilità grazie al condizionamento del terreno. Bezuijen (1999) ha rilevato l'importanza della sostituzione dell'acqua nei pori con la schiuma relativamente alla permeabilità

ottenibile. La prova può essere realizzata a diversi battenti idraulici e differenti condizionamenti, mantenendo fissa la procedura di prova.

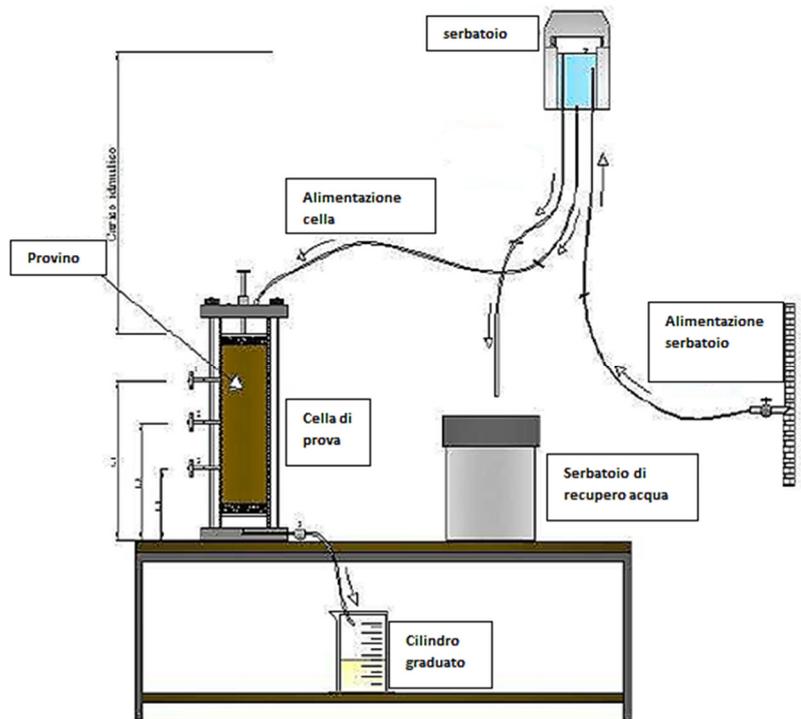


Figura 2.6- Attrezzatura per test di permeabilità

3.3. Test di semivita

La prova di semivita, come descritta dall'EFNARC nelle sue linee guida (2003), viene utilizzata per determinare le caratteristiche di stabilità della schiuma e consiste nella misurazione del tempo impiegato a drenare il 50% del peso del liquido generatore di un quantità prestabilita di schiuma.

Tale valore varia in funzione del tasso di espansione della schiuma stessa e della concentrazione di agente schiumogeno all'interno del liquido generatore. Più è stabile la schiuma, più il tempo è lungo. Questo parametro sottolinea il fatto che il contenuto d'acqua e il quantitativo di schiuma non sono indipendenti: come mostrato in Figura 2.7 tale valore diminuisce se il FER diminuisce.

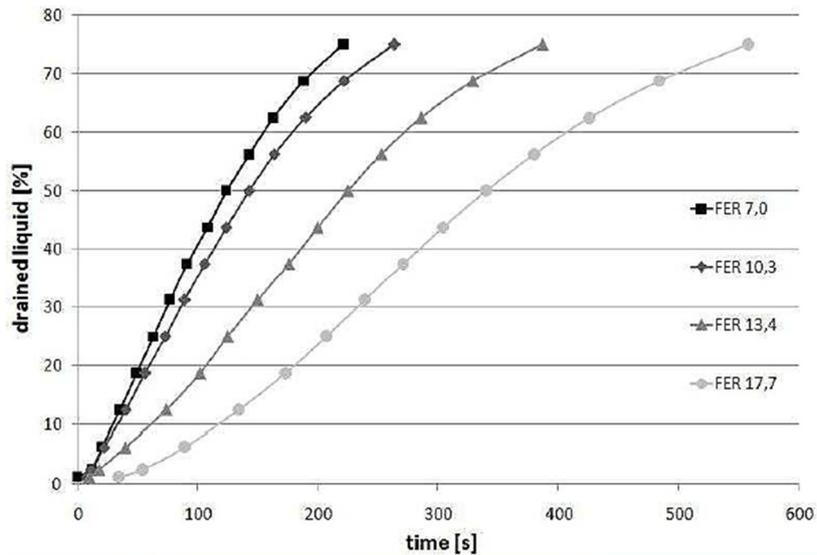


Figura 2.7- Valori del t_{50} in funzione del FER (Borio L. (2010) – *Soil conditioning for cohesionless soils. PhD thesis*, Politecnico di Torino).

3.4. Influenza del tempo e della temperatura

La qualità del materiale condizionato decade nel tempo, ed è quindi importante stimare per “quanto tempo” il materiale studiato ed additivato possa mantenere le caratteristiche richieste per lo scavo con EPB. Il materiale rimane in media 45-60 min all’interno della camera di scavo prima di essere estratto attraverso la coclea, e tale lasso di tempo può aumentare nel caso si verificassero problemi o ritardi nel normale ciclo di scavo. La velocità di decadimento della qualità del terreno condizionato dipende

fondamentalmente dalla granulometria del materiale stesso e naturalmente dalla quantità di schiuma iniettata. La temperatura dell’ambiente all’interno del quale il materiale viene conservato è risultato essere un ulteriore fattore che può influenzare il comportamento del terreno. Più alta è la temperatura dell’ambiente, ed assimilabile con le temperature che possono svilupparsi all’interno della camera di scavo (40° - 50°C), più risulta veloce la perdita di plasticità del terreno condizionato (Peila et al., 2009).

4. Prova di estrazione

Al fine di simulare in maniera maggiormente esaustiva il lavoro di una macchina EPB e per ottenere un maggior numero di informazioni sulla qualità del condizionamento ed in particolare sulla capacità del materiale di trasmettere pressione e di essere estratto con un flusso costante attraverso una coclea in tutto simile a quelle installate su macchine reali, è stato costruito un macchinario che simuli, come detto, l'estrazione del materiale condizionato da camera in pressione (Vinai et al., 2007; Peila et al. 2007; Borio et al., 2010).

Durante la prova vengono registrati diversi parametri che possono fornire preziose indicazioni sul comportamento del materiale:

- Valori di pressione nel bidone;
- Valori di pressione lungo la coclea;
- Valore di coppia nella coclea;
- Peso del materiale estratto;
- Velocità di abbassamento del pistone di trasmissione di pressione;
- Qualità del materiale condizionato in uscita dalla coclea

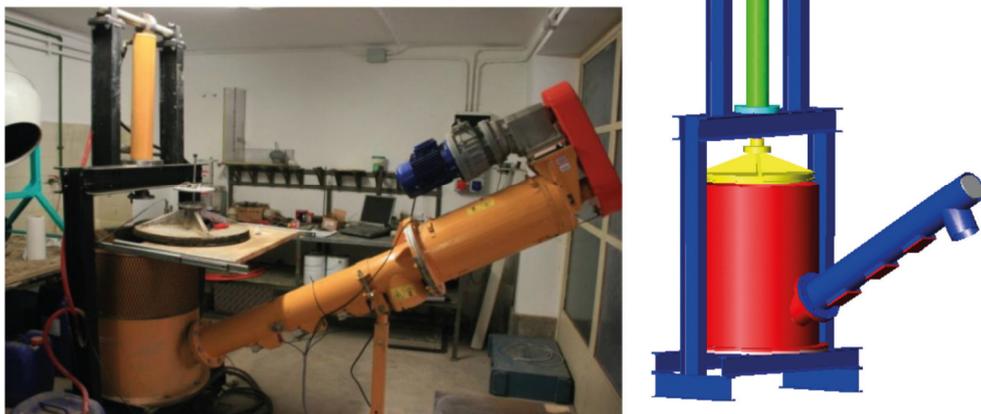


Figura 2.8- Fotografia e schema dell'attrezzatura per la prova di estrazione da camera in pressione utilizzata nel Laboratorio "Gallerie ed Opere Sotterranee" del Politecnico di Torino. (*Moderno approccio per lo studio del condizionamento dei terreni granulari non coesivi per lo scavo con macchine EPB – D.Martinelli*)

L'apparato concepito originariamente da Merritt & Mair cerca di simulare le complesse operazioni che coinvolgono il terreno condizionato durante l'estrazione lungo la coclea. Nel

seguito sono riportate le caratteristiche tecniche dell'attrezzatura utilizzata nel Laboratorio con al quale sono state eseguite oltre 100 prove su differenti tipologie di terreno (Figura 2.8). L'attrezzatura è costituita da un serbatoio in acciaio di altezza 800 mm con un diametro nominale di 600 mm, su cui è fissata una piastra in grado di comprimere il terreno in modo omogeneo. Il piattello è collegato ad un martinetto idraulico che muove la piastra stessa verso il basso per applicare la pressione. Un trasportatore a vite (coclea), lungo 1500 mm e vincolato al serbatoio con un'inclinazione di 30° rispetto orizzontale, è installato alla base del serbatoio. Il diametro interno della coclea è di 162 mm e le spire hanno un passo di 100 mm. Il trasportatore a coclea è equipaggiato con tre celle di pressione lungo la coclea e un torsionmetro in linea con l'albero della vite. Le prove vengono eseguite con la seguente procedura (D. Martinelli et al., 2018):

- viene preparato il terreno condizionato in betoniera analogamente a quanto già descritto per le prove di slump ma utilizzando una quantità variabile tra 25-30 kg per ogni impasto (in questo caso dato il volume importante da condizionare per ogni prova è necessario accelerare la procedura di produzione del campione condizionato);
- viene versato il terreno condizionato nel serbatoio ripetendo quest'operazione fino a quando il serbatoio è pieno (circa 450 kg);
- viene applicata mediante il piattello superiore la pressione sulla massa condizionata fino al raggiungimento della pressione di prova che è stata normalizzata e pari ad 1 bar;
- viene attivata la coclea nel contempo il piattello viene abbassato per mantenere la pressione costante nel serbatoio.

Sul terreno condizionato in uscita dalla coclea vengono regolarmente effettuate prove di slump per verificare la qualità nel tempo del materiale estratto. I parametri registrati durante la prova permettono di ottenere importanti indicazioni sulla qualità del condizionamento e sulla capacità dello stesso di produrre un materiale sufficientemente pastoso. Questo valore è un indice utile a valutare se il terreno condizionato è in grado o meno di applicare un'adeguata contropressione. Il grafico mostra chiaramente come nel caso del condizionamento con il dosaggio B, per il quale il valore di FIR e la concentrazione del liquido generatore erano molto più bassi, la pressione non è stata trasmessa efficacemente alla parte inferiore attraverso la massa condizionata. Questo risultato ha quindi portato ad escludere il dosaggio anche se il risultato delle prove di slump poteva essere considerato positivo. L'esempio sottolinea l'importanza di questa prova di estrazione con coclea da camera in pressione per una corretta e completa interpretazione delle prove di slump.

Capitolo 3: Caratteristiche del materiale oggetto di indagine

1. Inquadramento Geologico-Geomorfologico-Idrogeologico

Di seguito si riportano in sintesi le caratteristiche geologico-strutturali del tratto di galleria interessato nello studio. Una caratteristica peculiare delle zone in cui si sviluppa il tracciato è l'assetto morfologico generale, dominato da ampi altopiani aventi quote variabili fra 900 - 1.300 metri circa, che bordano la piana alluvionale del torrente d'Astico che rimane invece a quote comprese fra 250 e 400 m s.l.m.m. Nel tratto in argomento la valle dell'Astico risulta stretta e profondamente incisa, delimitata da ripide pareti rocciose, a nord dell'abitato di Arsiero e decisamente più aperta e ampia, a valle. Procedendo da sud verso nord, nel senso delle progressive crescenti, la prima parte del tracciato, si snoda per circa 4.500 m all'aperto in un contesto sostanzialmente sub pianeggiante. Il tracciato autostradale si addentra in un contesto francamente montuoso per l'attraversamento del quale il progetto prevede la successione di alcune gallerie naturali. Di seguito si riporta in Figura 3.1 un inquadramento geografico dell'area, seguito poi da un inquadramento generale delle caratteristiche geologiche, morfologiche e stratigrafiche dell'area.

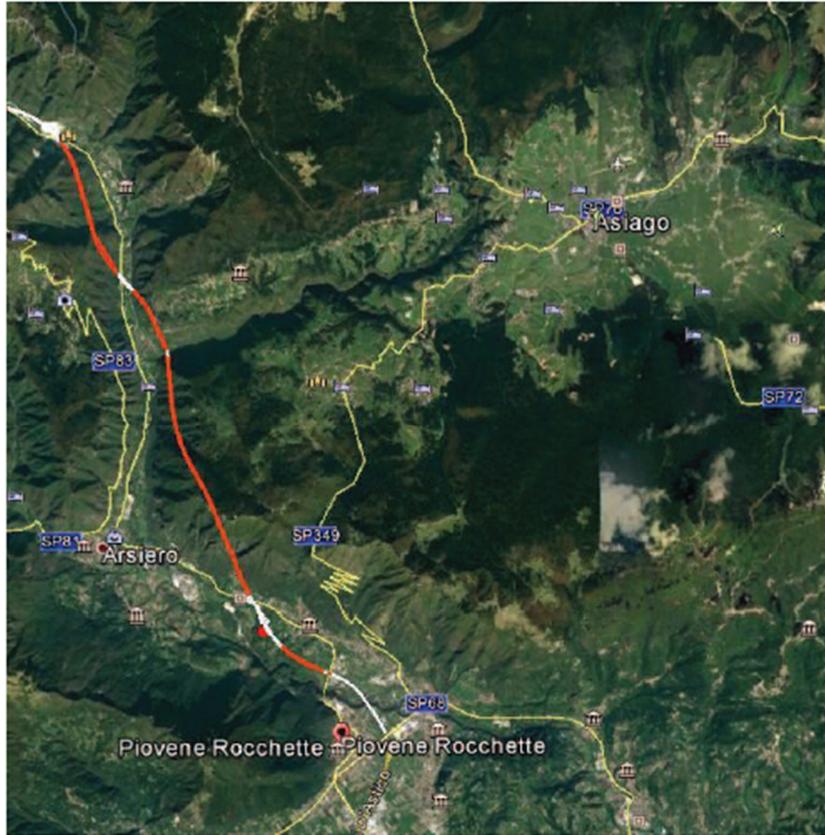


Figura 3.1- Inquadramento geografico dell'area (Google Maps)

1.1. Sequenza stratigrafica

La successione stratigrafica affiorante entro e nell'intorno dell'area in studio è rappresentata da formazioni rocciose di età compresa tra il Triassico medio ed il Cretaceo inferiore, ovvero fra le vulcaniti ladiniche poste al letto della Dolomia Principale lungo la valle dell'Astico e la Maiolica sugli altipiani di Asiago e Tonezza, con coperture quaternarie continentali riconducibili essenzialmente a depositi glaciali, fluviali, fluvio glaciali e di versante. La sequenza litologico-stratigrafica che interessa il tracciato autostradale è così rappresentata, dalla formazione più antica alla più recente:

- Vulcaniti indifferenziate, riolitico-dacitiche, affioranti nella Valdastico in lembi isolati; la loro genesi è collegata a colate sottomarine, sono fortemente fratturate e/o alterate e localmente possono presentare fenomeni di argillificazione. La loro età è ascrivibile all'acme vulcanico del Ladinico superiore.

- Dolomia principale che affiora estesamente nella Valdastico ed interessa il 90% del tracciato autostradale. E' costituita da dolomie chiare, da grigio a biancastre, ben stratificate, lo spessore varia da 500 a 600 metri circa
- Gruppo dei Calcari grigi, costituito da sequenze di calcari micritici. Gli strati hanno colore prevalentemente grigio, grigio-bruno o nocciola, talora bianco avorio o più raramente su toni rosati.

La successione è ben stratificata. L'età del gruppo dei calcari grigi è da attribuire al Lias medio ed inferiore. Lo spessore complessivo della formazione nell'area dell'altopiano di Folgaria e della Vigolana meridionale è stimato attorno ai 330 metri circa. Questa litologia non interseca mai il tracciato autostradale perché si sviluppa nella porzione superiore dei versanti che delimitano gli altopiani strutturali dell'area di studio.

L'oggetto di studio della relazione è mostrato in Figura 3.2. Sono stati eseguiti vari sondaggi lungo il tracciato al fine di determinarne le caratteristiche geomeccaniche: in prossimità dell'imbocco sud della galleria fra le pk 5+000 e 6+000 la carta di pericolosità geologica del PAI riporta alcuni dissesti franosi non delimitati, e la perimetrazione di una zona di attenzione. Essi in ogni caso non incidono in alcun modo con le opere in quanto il tracciato si sviluppa in galleria ed a profondità tali da non essere interessato da eventuali dinamiche di superficie.

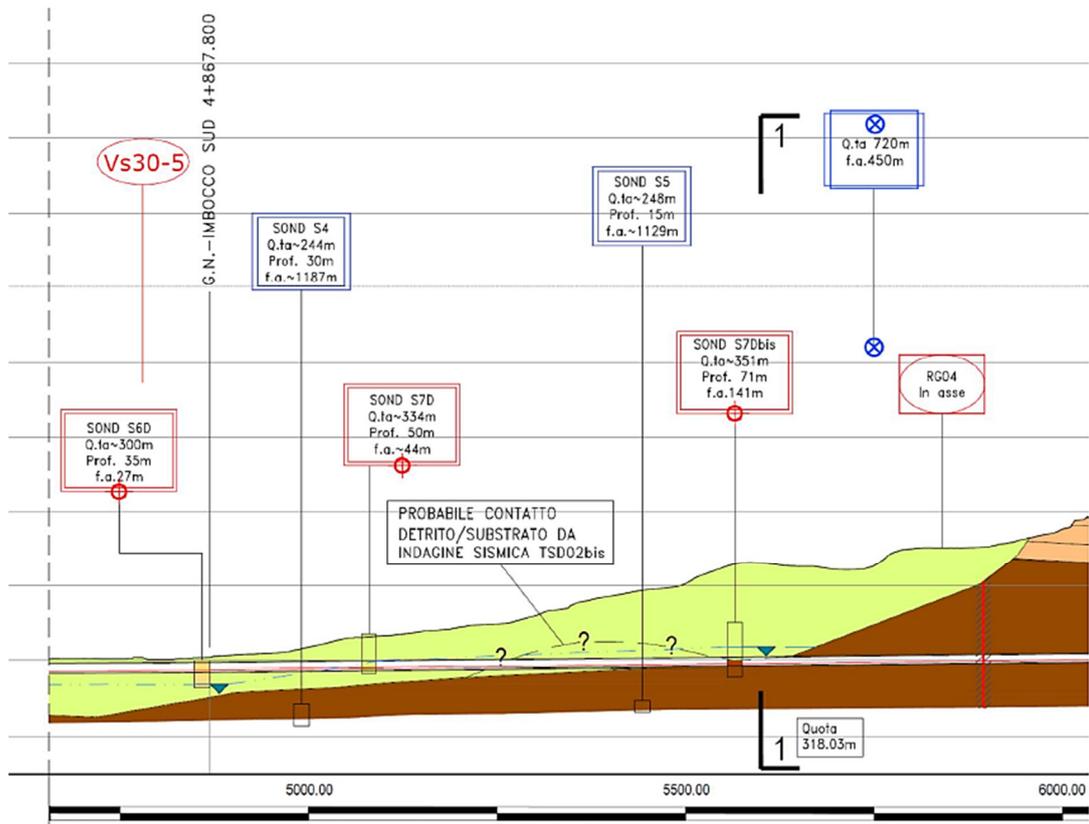


Figura 3.2- Estratto dal Profilo longitudinale in asse al tracciato, in corrispondenza della zona Galleria, tratto da pk 5+000 a pk 5+700 circa

Si può dunque concludere che i primi 2.800 m circa di tracciato si sviluppano prevalentemente in scavo nei depositi fluvio-glaciali ed alluvionali terrazzati granulari. La carta geologica permette di osservare come la profonda forra dell’Astico sia scavata entro gli stessi depositi fluvio-glaciali, che evidenziano condizioni di sostanziale stabilità anche in presenza di scarpate di altezza pluridecimetrica e di pendenze molto accentuate (fino a pareti subverticali). Ciò è dovuto alle buone caratteristiche dei materiali, sottoposti peraltro a pressioni enormi in epoca geologicamente recente (come testimoniato anche da tension cracks riscontrate durante i rilievi) e caratterizzati da un grado di cementazione difficilmente quantificabile dovuto alle acque d’infiltrazione. Localmente nella forra, non in asse stradale, alle quote più basse affiora il substrato roccioso, in forma di Dolomia Principale o Calcari Grigi.

1.2. Parametri del materiale nel tratto della galleria

I Primi 800 m circa a partire da imbocco Sud di entrambe le canne della galleria sono caratterizzati dalla presenza di depositi detritici di versante, che presentano spessori variabili da 40 a 110 m circa.

Per caratterizzare tali depositi sono stati realizzati i sondaggi a carotaggio continuo denominati S6D, S7D ed S7Dbis, nel corso dei quali sono state eseguite prove in sito (prove SPT e prove LE FRANC) e prelevati campioni per l'esecuzione di prove granulometriche. I piezometri S6D e S7Dbis sono stati attrezzati con piezometro a tubo aperto. Infine per la determinazione dei moduli elastici sono state eseguite apposite stese sismiche.

1.2.1. Composizione granulometrica

Come si evince dalle stratigrafie, la documentazione fotografica e le prove granulometriche eseguiti tali depositi risultano essere composti da ghiaie eterometriche sabbiose in abbondante matrice limoso-argillosa che frequentemente supera il 25-30%.



Figura 3.1- Sondaggio S7D – imbocco sud galleria

1.2.2. Stato di addensamento naturale

Le prove SPT eseguite nel sondaggio S6D hanno restituito sempre rifiuto indicando che i depositi risultano essere molto addensati ($D_r = 80-100\%$).

1.2.3. Permeabilità e resistenza al taglio

In virtù dell'abbondante matrice limoso-argillosa e dell'elevato addensamento naturale la permeabilità dei depositi si attesta a valori di 5×10^{-6} m/sec.

Lo stato di addensamento elevato unito alle granulometrie portano ad angoli di attrito dei materiali prossimi a 40° (assunti cautelativamente in progetto nel range $35-37^\circ$). In virtù di tale addensamento che, in base alle risultanze delle indagini sismiche parrebbe anche aumentare con la profondità, nelle verifiche alle più alte coperture è stata assunto un contributo coesivo fino ad un max di $c = 50$ kPa.

1.2.4. Deformabilità

Da indagini eseguite con sismica a rifrazione si è ottenuto il valore di modulo elastico in MPa come riportato in Figura 3.2 alle varie profondità di scavo.

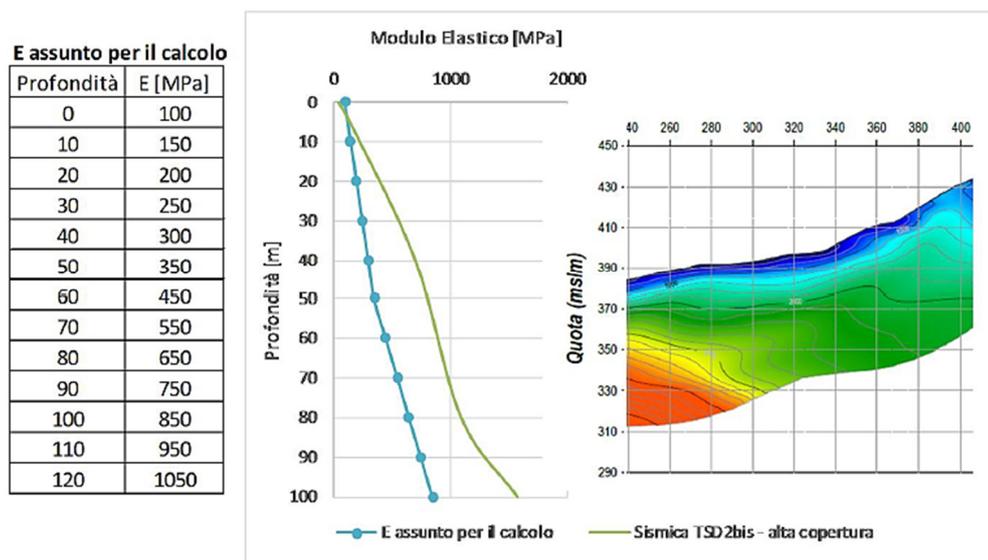


Figura 3.2- Valori di progetto del modulo elastico in funzione della profondità

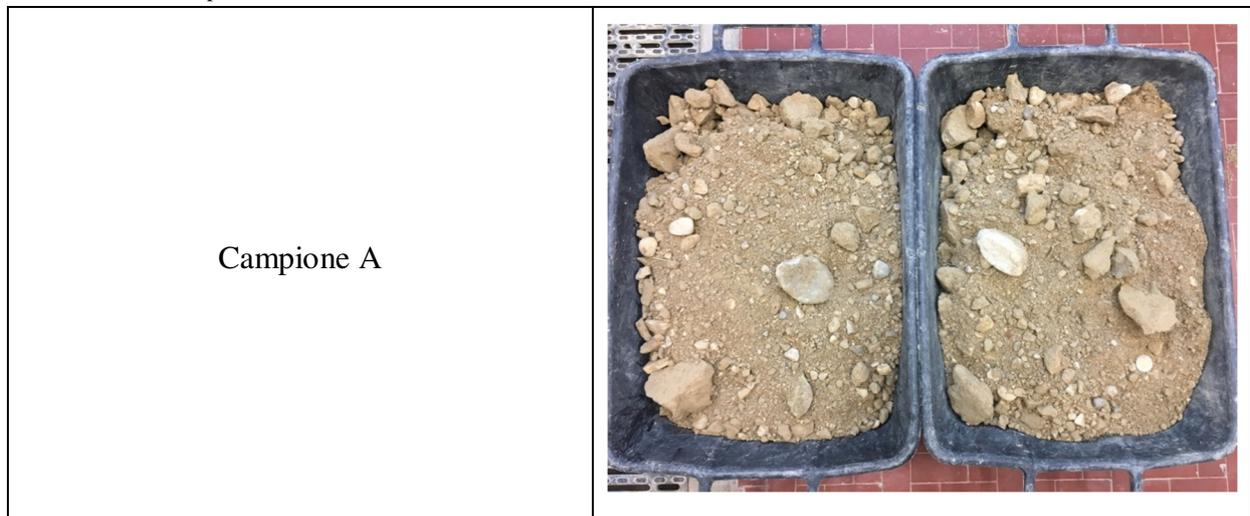
1.2.5. Livello di falda

Sulla base delle misure eseguite sui piezometri installati nei sondaggi S6 e S7bis, all'imbocco e per i primi 100 m ca lo scavo della EPB dovrebbe avvenire interamente sopra falda per poi incontrare un livello di falda che sale progressivamente fino a raggiungere un'altezza sopra la calotta pari a valori massimi di circa 20 m alla fine degli 800 m di scavo in detrito.

1.3. Litotipi oggetto di studio

I campioni di terreno sono stati consegnati dal Committente presso il Laboratorio di Gallerie e Opere in Sotterraneo in 40 sacchi da 20 kg l'uno disposti su 5 bancali (denominati A, B, C, D ed E). Al fine di valutare l'omogeneità del terreno consegnato sono stati prelevati in modo casuale 2 sacchi da ciascun bancale. Ciascuna coppia è stata miscelata ottenendo dei campioni a cui viene assegnata una denominazione equivalente a quella del bancale di provenienza. Dei campioni è stato valutato il contenuto d'acqua.

Tabella 3.1 – Campioni di terreno



Campione B



Campione C



Campione D



Campione E



Per la sperimentazione tutto il terreno è stato quindi vagliato con soglia dimensionale di 20 mm e miscelato al fine di ottenere dei campioni omogenei e conformi alle caratteristiche richieste per il corretto svolgimento delle prove. Tale miscelazione è stata effettuata al fine di simulare l'azione di miscelazione della testa di scavo. Tenendo conto delle differenze riscontrate tra i campioni si è deciso di studiare il comportamento di due tipologie di terreno, denominati rispettivamente Fronte Unico Misto (FUM), con un'alta percentuale di materiale grossolano, ed uno Argilloso (ARG) caratterizzato da una percentuale di argilla non trascurabile.

1.3.1. Curve Granulometriche

Dai sondaggi effettuati lungo il tratto di gallerie è stato possibile ricostruire le curve granulometriche del materiale di scavo. Tali curve mostrano come sia difficile definire un unico litotipo da studiare. Se si fa riferimento ai risultati del sondaggio S6D, si può notare come il materiale risulti costituito da una percentuale di fine intorno 10% (valore medio), mentre per quelli del sondaggio S7DBis, questo risulta costituito da una percentuale di materiale fine di oltre il 50%. A tal proposito si è scelto di suddividere il materiale di partenza in due materiali rappresentativi, di cui uno con denominazione ARG sta ad indicare quello con alta percentuale di fine. L'altro, FUM, quello contenente più materiale grossolano.

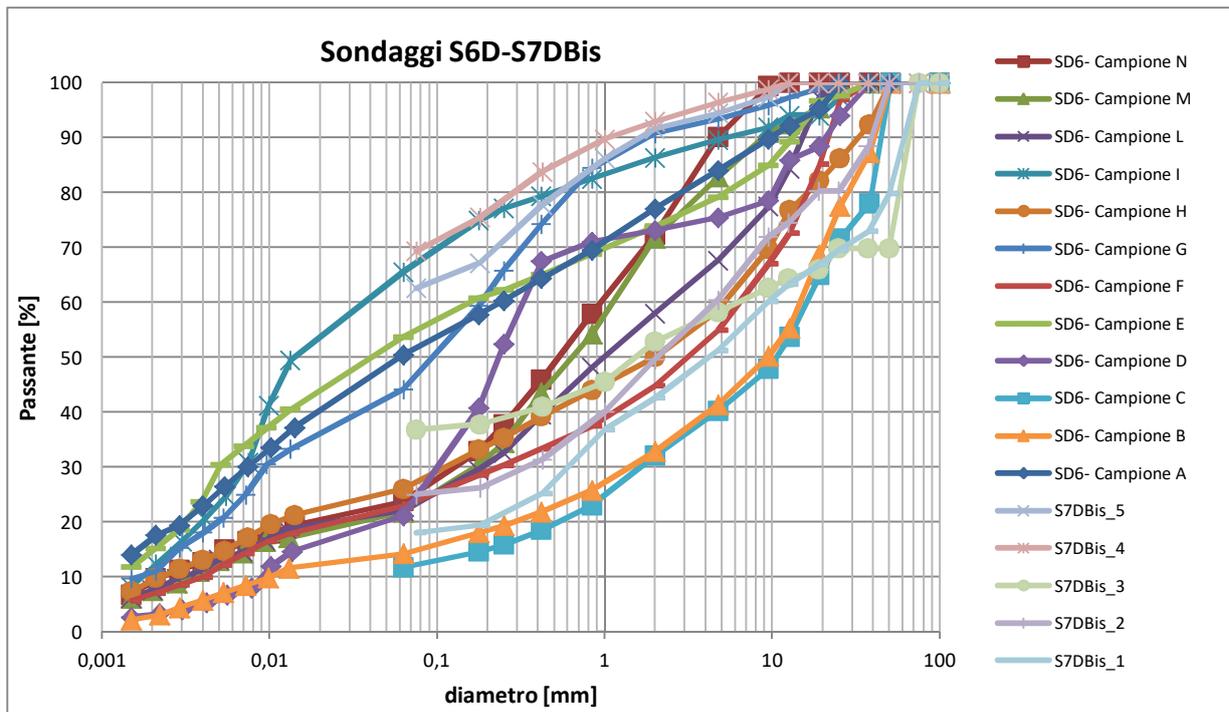


Figura 3.3- Curve granulometriche ottenute dai sondaggi S6D – S7DBis

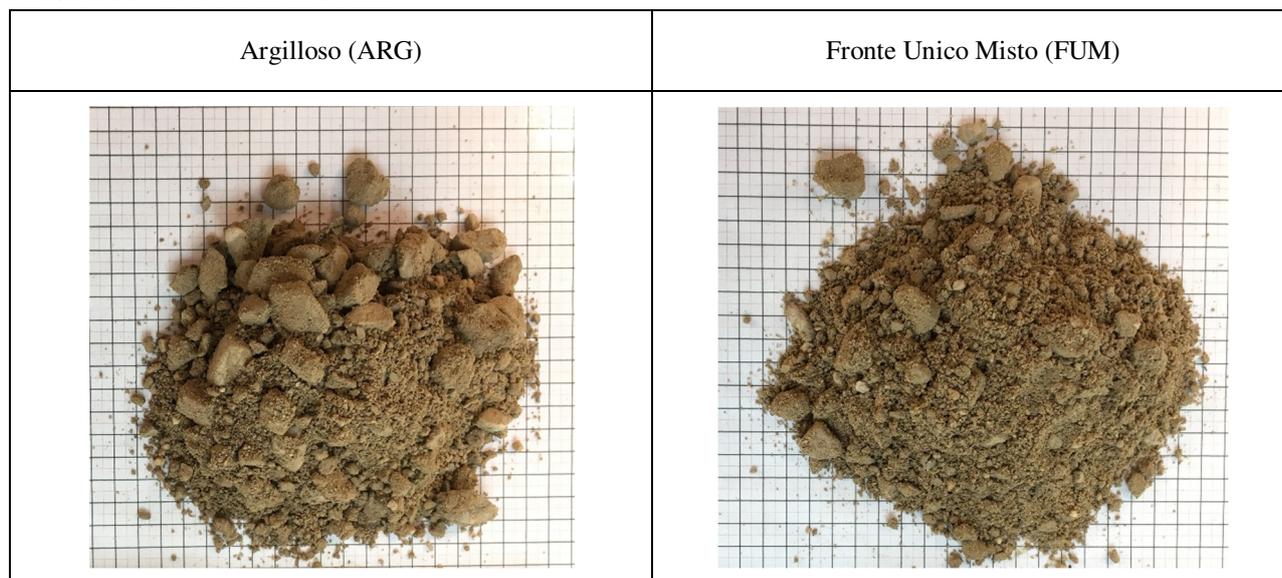
1.3.2. Limiti di Atterberg

I valori relativi ai limiti di Atterberg sono stati ricavati dai sondaggi S6D ed S7D mediati alla quota della galleria. Poiché tali sondaggi non riportano informazioni circa il peso specifico del terreno alla quota della galleria, il valore espresso in Tabella 3.2 è stato ricavato dal sondaggio S7DBis. Da evidenziare tuttavia che il sondaggio S7DBis non attraversa la profondità della galleria, fermandosi ad una quota massima di 57m, a fronte di una copertura di circa 140m. Il valore del contenuto d'acqua naturale sopra falda è stato ricavato dal sondaggio S7DBis, considerando i dati risultanti dai campioni alle quote più superficiali. Il terreno è stato studiato sia con un contenuto d'acqua per la condizione sopra falda, che per contenuti d'acqua prossimi al valore di saturazione per simulare le condizioni di scavo sotto falda.

Tabella 3.2 – Caratteristiche geotecniche dei terreni

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE E LIMITI DI ATTERBERG					
TERRENO	Valori medi				
	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)	W_n (%)	γ (kN/m³)
Fronte Unico Misto (FUM), Argilloso (ARG)	19,6	14,5	5	7,6	19,9

Tabella 3.3 – Foto dei terreni studiati



Capitolo 4:Caratterizzazione degli agenti schiumogeni utilizzati

1. Generatore di schiuma adottato

Il generatore di schiuma utilizzato (Figura 4.1) è prodotto dalla SPOILMASTER LIMITED, Berwick-upon-Tweed (UK) e permette il controllo sia della portata di acqua (portata massima di 15 l/min) sia della portata di aria (portata massima di 150 n.l/min), nonché il controllo del dosaggio dell'agente schiumogeno. Nella Figura 4.2 è riportato lo schema del processo di generazione della schiuma. Una volta impostati i parametri di funzionamento del generatore, a meno di oscillazioni modeste, è possibile ottenere campioni regolari di schiuma con il tasso di espansione (FER) definito a priori. Al fine di ottimizzare la qualità della ricerca, prima dell'esecuzione di ogni set di prove si esegue un controllo del FER della schiuma.



Figura 4.1 - Generatore di schiuma utilizzato presso il laboratorio TUSC del DIATI. Unità di generazione di schiuma (sinistra). Pannello di controllo dei parametri di generazione della schiuma (destra)

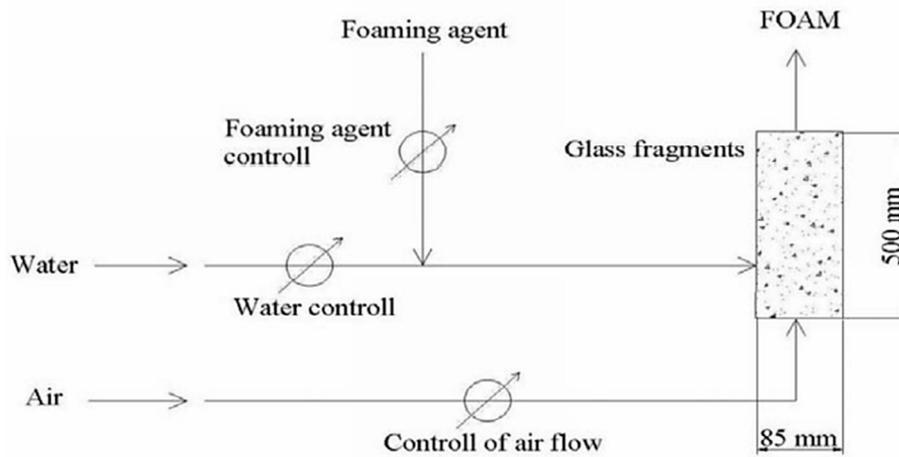


Figura 4.2 – Schema di processo della generazione dello schiumogeno

2. Parametri di caratterizzazione della schiuma

Le caratteristiche principali che descrivono le schiume utilizzate nell'ambito del condizionamento del terreno per scavo con EPB sono:

1) Concentrazione dell'agente schiumogeno (c): percentuale di sostanza schiumogena presente nel liquido generatore di schiuma, formato da acqua e sostanza schiumogena stessa. Il range usuale per questo parametro è 0,5 – 5%. La scelta del valore da utilizzare in fase di generazione della schiuma dipende soprattutto dalle caratteristiche dell'agente schiumogeno stesso e da fattori tecnologici di applicazione (tipologia e caratteristiche del generatore di schiuma, chimismo dell'acqua utilizzata, ecc.), pertanto si suggerisce che il valore di progetto venga definito in sede operativa tenendo conto delle caratteristiche del generatore di schiuma presente sulla macchina..

2) Tasso di espansione (Foam Expansion Ratio – FER): rapporto tra il volume finale raggiunto dalla schiuma e il volume iniziale di liquido generatore utilizzato. Per tale parametro si considera usualmente un range “bagnato” (dalla dizione anglosassone “wet”) pari a circa 8 – 12, e un range “asciutto” (“dry”), nell'ordine 12 -20.

La procedura eseguita in laboratorio per la determinazione di questo fondamentale parametro è la seguente:

- 1) Il generatore viene impostato ad una certa portata di liquido;
- 2) Viene aggiunto il flusso d'aria ad una certa pressione e portata;
- 3) Dopo qualche minuto di produzione di schiuma viene prelevato un campione con un contenitore di volume e peso noti;
- 4) Il campione viene pesato ed il valore registrato;
- 5) Viene calcolato il FER con la seguente relazione:

$$FER = \frac{V_{contenitore}}{P_{totale} - P_{contenitore}}$$

3) Tasso di iniezione del terreno (Foam Injection Ratio - FIR): rapporto tra il volume di schiuma immesso per condizionare il terreno e il volume del terreno stesso. Esso rappresenta il consumo effettivo di schiuma per m³ di terreno trattato. E' funzione del contenuto d'acqua presente nel terreno e della quantità d'acqua impiegata nell'iniezione.

4) Tempo di semivita della schiuma (t₅₀): tempo necessario alla schiuma per drenare il 50% del liquido generatore utilizzato (EFNARC, 2005). Si ricorda però che la stabilità della schiuma quando miscelata con il terreno è di gran lunga superiore rispetto al valore ottenuto con la procedura di calcolo del tempo di semivita. Tale prova quindi ha funzione comparativa tra diversi agenti schiumogeni e diversi tassi di espansione. Gli agenti schiumogeni utilizzati nel corso della ricerca sono riportati nel presente elaborato con la dicitura agente A, agente B; essi sono stati forniti da due diversi produttori, che hanno indicato prima dell'esecuzione delle prove i valori di concentrazione dell'agente schiumogeno ottimale per il loro prodotto ed hanno preso visione diretta della qualità della schiuma utilizzata nella ricerca.

3. Caratterizzazione degli agenti schiumogeni utilizzati mediante determinazione del tempo di semivita

La procedura seguita nel laboratorio per la determinazione del tempo di semivita (t_{50}) è la seguente:

- 1) il generatore di schiuma viene impostato ad una certa portata di liquido;
- 2) viene attivato il flusso d'aria ad una certa pressione e portata;
- 3) dopo qualche minuto di produzione di schiuma viene prelevato un campione con un contenitore di volume e peso noti;
- 4) viene prelevato un campione avendo cura di utilizzare un contenitore che presenti la possibilità di spillare liquido in maniera controllata dal fondo;
- 5) viene determinato il volume del liquido generatore ottenuto come differenza tra il peso del campione e il peso del contenitore vuoto;
- 6) mediante l'utilizzo di un cronometro vengono registrati i tempi via via impiegati dal liquido che drena dal contenitore per cadere in un cilindro graduato ad intervalli di volumi scelti;
- 7) viene costruito il grafico del tempo di drenaggio del liquido riferito alla percentuale di volume drenato;
- 8) viene determinato graficamente il tempo richiesto per drenare il 50% del liquido generatore iniziale.

Si riportano in Tabella 4.1 i risultati medi dei test di semivita effettuati sui due diversi agenti schiumogeni.

Tabella 4.1 – Tempo di semivita determinato per le schiume utilizzate nella presente ricerca e caratteristiche di concentrazione e FER adottate per la loro produzione.

Agente schiumogeno	c (%)	FER (-)	Tempo di semivita (s)
A	1.5	15	302
	1	20	380
B	1.5	12	259
	1.5	15	278

Capitolo 5: Prove per lo studio del condizionamento a mezzo di schiume

1. Prove di slump

Nel presente rapporto per la caratterizzazione preliminare del condizionamento è stata svolta una campagna di prove di slump. La procedura adottata è basata sulle esperienze acquisite presso il laboratorio, con l'esecuzione di specifiche ricerche finalizzate alla definizione di un protocollo di prova, e sulle base di indicazioni di letteratura sebbene in assenza di specifiche normative. Per l'interpretazione dei risultati ottenuti dalle prove di slump è stata usata la tabella interpretativa riportata in Figura 2.5, già utilizzata in numerosi lavori e pubblicazioni e determinata anche sulla base delle esperienze riportate in letteratura tecnica. Nelle prove sono stati analizzati i seguenti aspetti tecnici ritenuti essenziali per un buon comportamento dei materiali condizionati per nell'uso di un EPB: la presenza di una condizione di plasticità che renda idoneo il terreno condizionato alla trasmissione delle pressioni in camera di scavo e lungo la coclea, nonché all'estrazione controllata con la coclea stessa; una caduta al cono dell'ordine di 12-20 cm; un ridotto rilascio di acqua e schiuma dalla massa del terreno condizionato.

2. Caratterizzazione del terreno condizionato senza tensioattivi

Una campagna preliminare di slump è stata eseguita condizionando i terreni esclusivamente mediante l'aggiunta di acqua. Lo scopo delle prove è stato quello di avere una valutazione preliminare circa i dosaggi di tensioattivi da utilizzare. I principali risultati sono riportati nel seguito. Si evince che il condizionamento ottenuto con solo aggiunta di acqua non risulta sufficiente per ottenere le caratteristiche richieste in quanto il materiale non è lavorabile in termini di pastosità. Come mostrato nelle tabelle 5.1 e 5.2 per il materiale FUM, per il tratto sopra falda il cono dello slump si presenta rotto e non pastoso, mentre sotto falda la pastosità migliora leggermente ma il terreno è chiaramente troppo rigido. Per il terreno ARG la situazione è molto simile: anche in questo caso non risulta ben condizionato con solo acqua ed è rigido se si lascia inalterato il valore di w_n pari a 16%.

Tabella 5.1 – Condizionamento FUM sopra falda con acqua.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		1	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	12	
Schiumogeno		-	
c	(%)	-	
FER	(-)	-	
FIR	(%)	-	
Slump	(cm)	/	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	-	
Note			
Cono rotto e non pastoso.			

Tabella 5.2 – Condizionamento FUM sotto falda con acqua.

Terreno		FUM Sotto falda	Foto
Campione		2	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.27	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	16	
Schiumogeno		-	
c	(%)	-	
FER	(-)	-	
FIR	(%)	-	
Slump	(cm)	0	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	-	
Note			
Cono rotto. Poco pastoso.			

Tabella 5.3 – Condizionamento ARG sopra falda con acqua.

Terreno		ARG	Foto
Campione		Sopra falda	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w _n	(%)	7	
w _{tot}	(%)	16	
Schiumogeno		-	
c	(%)	-	
FER	(-)	-	
FIR	(%)	-	
Slump	(cm)	/	
T _{R,schiuma}	(l/m ³)	-	
Note			
Cono rigido.			

Tabella 5.4 – Condizionamento ARG sotto falda con acqua.

Terreno		ARG	Foto
Campione		Sotto falda	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.23	
w _n	(%)	16	
w _{tot}	(%)	16	
Schiumogeno		-	
c	(%)	-	
FER	(-)	-	
FIR	(%)	-	
Slump	(cm)	8	
T _{R,schiuma}	(l/m ³)	-	
Note			
Materiale omogeneo, rigido e poco pastoso.			

3. Caratterizzazione del terreno condizionato con schiuma

Procedura seguita:

- 1) un quantitativo di terreno necessario al corretto riempimento del cono, circa 13 kg per i terreni studiati, viene posizionato nel dispositivo di miscelazione che è costituito da un mixer per calcestruzzo standard con capacità di $\frac{1}{4}$ m³;
- 2) viene generata la schiuma con il FER desiderato;
- 3) il campione viene miscelato con l'acqua e la schiuma secondo il FIR previsto all'interno del mixer fino al raggiungimento di una buona miscelazione;
- 4) il materiale ottenuto a seguito della miscelazione viene immesso in un cono di slump standard (UNI EN 12350-2:2009) il quale viene sollevato immediatamente;
- 5) viene quindi misurato l'abbassamento al cono e si prende visione delle caratteristiche del materiale mediante confronto con la tabella di riferimento (Figura 2.5).

Nel caso delle prove sviluppate per simulare le condizioni sotto falda il terreno viene miscelato con un quantitativo d'acqua tale da ripristinare il contenuto d'acqua naturale e viene lasciato ad idratarsi per non meno di 24 ore in un recipiente chiuso prima di iniziare la procedura di condizionamento. Questa procedura è stata scelta per cercare di simulare al meglio le condizioni reali che la macchina si troverà ad affrontare nella realtà dello scavo.

4. Risultati della sperimentazione

Nel seguito si riportano i principali risultati delle prove di slump effettuate con l'obiettivo di identificare un set di condizionamento ottimale (concentrazione volumetrica di agente schiumogeno sul liquido generatore, FER, FIR, contenuto d'acqua aggiunta) del terreno studiato. Si sono eseguite prima delle prove sopra falda, poi sotto falda con i rispettivi produttori A e B.

4.1. Prove di slump con schiumogeno A sopra falda

I due condizionamenti per il sopra falda vogliono mostrare come, nonostante il ridotto contenuto di acqua aggiunta, il materiale risulti eccessivamente fluido a causa di un contenuto di schiumogeno elevato (Tabella 5.4 con FIR=50%) rispetto allo slump ottenuto con un

condizionamento effettuato con maggiore acqua aggiunta, ma minor quantitativo di schiumogeno (Tabella 5.3 con FIR=30%).

Tabella 5.3 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		2	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	16	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	30	
Slump	(cm)	18	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.24	
Note			
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: buona. Terreno ben condizionato.			

Tabella 5.4 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		4	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	12	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	5	
FIR	(%)	50	
Slump	(cm)	N.D.	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	1.20	
Note			
Materiale eccessivamente fluido. La foto è presa nel mixer dove è evidente l'impossibilità di eseguire una prova di slump.			

Tabella 5.5 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		1	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	15	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	10	
FIR	(%)	30	
Slump	(cm)	15	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.36	
Note			
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: buona.			

Tabella 5.6 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		3	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	18	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	22	
FIR	(%)	25	
Slump	(cm)	18	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.14	
Note			
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Leggero rilascio di fluido. Pastosità: buona.			

Tabella 5.7 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto	
Campione		5		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	12		
Schiumogeno		A		
c	(%)	1.2		
FER	(-)	7		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	14		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.51		
Note				
Cono leggermente aperto, materiale leggermente rigido. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: moderata.				

Tabella 5.8 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto	
Campione		6		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	15		
Schiumogeno		A		
c	(%)	1		
FER	(-)	10		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	13		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.30		
Note				
Cono leggermente aperto, materiale leggermente rigido. Pastosità: moderata.				

Tabella 5.9 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto	
Campione		7		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	17		
Schiumogeno		A		
c	(%)	1		
FER	(-)	10		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	19		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.30		
Note				
Materiale slegato. Leggero rilascio di fluido. Pastosità: moderata.				

Tabella 5.10 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto	
Campione		8		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	15		
Schiumogeno		A		
c	(%)	1		
FER	(-)	8		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	14		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.38		
Note				
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: moderata.				

Tabella 5.11 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		12		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	17		
Schiumogeno		A		
c	(%)	1.2		
FER	(-)	10		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	19		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.36		
Note				
Materiale disgregato. Leggero eccesso di schiuma. Pastosità: moderata.				

Tabella 5.12 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		13		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	13		
Schiumogeno		A		
c	(%)	1.2		
FER	(-)	10		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	15		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.36		
Note				
Materiale disgregato. Caduta al cono leggermente irregolare. Leggero rilascio di fluido. Pastosità: moderata.				

Tabella 5.12 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		14		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	17		
Schiumogeno		A		
c	(%)	1.2		
FER	(-)	15		
FIR	(%)	25		
Slump	(cm)	19		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.20		
Note				
Materiale omogeneo. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: moderata. Terreno ben condizionato.				

Tabella 5.13 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto
Campione		15	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	13	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	8	
FIR	(%)	35	
Slump	(cm)	18	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.53	
Note			
Materiale omogeneo. Leggerissimo rilascio di schiuma. Pastosità: buona.			

Tabella 5.14 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		16		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	15		
Schiumogeno		A		
c	(%)	1.0		
FER	(-)	12		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	/		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.25		
Note				
Cono rotto.				

Tabella 5.15 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto
Campione		17	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	17	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.0	
FER	(-)	12	
FIR	(%)	30	
Slump	(cm)	16	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.25	
Note			
Materiale omogeneo. Caduta al cono leggermente irregolare. Leggerissimo rilascio di fluido. Pastosità: moderata.			

4.1.1. Commenti relativi al sopra falda

Il condizionamento sopra falda per il terreno FUM è stato condotto mantenendo circa costante il valore del FIR pari al 30% e facendo variare sia il FER che il contenuto d'acqua. E' importante sottolineare come un unico parametro non basti per trovare il condizionamento ottimale, infatti, come si evince dai risultati, in tabella 5.8 e 5.9 tale differenza è visibile. Una variazione piccola di contenuto di acqua aggiunta, lasciando invariati il FIR e il FER, porta il materiale da ben condizionato a mal condizionato. Per quanto riguarda il condizionamento del terreno ARG si nota come il FER sia rimasto circa costante pari a 10, mentre il contenuto d'acqua, pur variando leggermente, influenza particolarmente il condizionamento in quanto l'argilla fa più o meno fatica ad assorbirla. Con un contenuto d'acqua minimo del 15% si verifica un leggero rilascio di fluido. Il cono si presenta rotto, invece, con un FER maggiore di 10, quindi andando verso una schiuma più asciutta.

4.2. Prove di slump con schiumogeno A sotto falda

Allo stesso modo sono state condotte prove di slump per il materiale sotto falda, partendo da un contenuto d'acqua iniziale pari al 16%. Di seguito i risultati.

Tabella 5.16 – Condizionamento FUM sotto falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sotto falda	Foto
Campione		10	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.27	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	18	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	20	
Slump	(cm)	18	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.16	
Note			
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: buona. Terreno ben condizionato.			

Tabella 5.17 – Condizionamento FUM sotto falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sotto falda	Foto
Campione		11	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.27	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	18	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	20	
Slump	(cm)	16	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.13	
Note			
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Cono leggermente aperto. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: discreta.			

Tabella 5.18 – Condizionamento FUM sotto falda con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sotto falda	Foto
Campione		9	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.27	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	18	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	20	
FIR	(%)	20	
Slump	(cm)	15	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.12	
Note			
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: buona.			

Tabella 5.19 – Condizionamento ARG sotto falda con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sotto falda	Foto
Campione		18	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.23	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	20	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.0	
FER	(-)	20	
FIR	(%)	20	
Slump	(cm)	16	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.10	
Note			
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: buona. Terreno ben condizionato.			

Tabella 5.20 – Condizionamento ARG sotto falda con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sotto falda	Foto
Campione		19	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.23	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	22	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.0	
FER	(-)	20	
FIR	(%)	15	
Slump	(cm)	20	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.08	
Note			
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: discreta.			

Tabella 5.21 – Condizionamento ARG sotto falda con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sotto falda	Foto
Campione		20	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.23	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	20	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	28	
FIR	(%)	15	
Slump	(cm)	15	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.06	
Note			
Materiale omogeneo. Caduta al cono leggermente irregolare. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: discreta.			

4.2.1. Commenti relativi al sotto falda

Il condizionamento sotto falda per il terreno FUM è stato condotto mantenendo circa costante il valore del FIR pari al 20% e facendo variare sia il FER. A differenza del sopra falda, il contenuto d'acqua naturale più elevato influenza notevolmente i parametri della schiuma. Si è scelto di aggiungere solo il 2% di acqua altrimenti il materiale sarebbe risultato eccessivamente fluido. In questo modo, invece, il terreno risulta ben condizionato. Il terreno ARG sotto falda necessita invece di una schiuma più asciutta, infatti i valori del FER restano nell'intorno del 20. La percentuale di schiuma non è molto diversa da quella utilizzata per il FUM, restando comunque nell'intorno del 15-20%.

4.3. Prove di slump con schiumogeno B sopra falda

I condizionamenti riportati di seguito mostrano la differenza di comportamento del materiale proprio in funzione dello schiumogeno: per il primo caso (Tabella 5.22) il cono di slump risulta rotto; questo risultato sta ad indicare che il condizionamento sicuramente non è corretto poiché non si è ottenuta una pastosità ed una omogeneità del materiale tale da garantirne il giusto abbassamento. Nel secondo caso, al contrario, pur presentando un leggero eccesso di schiuma, il materiale risulta comunque ben condizionato.

Tabella 5.22 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		1	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	12	
Schiumogeno		B	
c	(%)	1.5	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	20	
Slump	(cm)	/	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.20	
Note			
Cono rotto.			

Tabella 5.23 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		4	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	18	
Schiumogeno		B	
c	(%)	1.5	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	35	
Slump	(cm)	20	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.35	
Note			
Materiale omogeneo. Leggero eccesso di schiuma. Pastosità: discreta. Terreno ben condizionato.			

Tabella 5.24 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto	
Campione		2		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	16		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	13		
FIR	(%)	40		
Slump	(cm)	18		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.46		
Note				
Caduta al cono leggermente irregolare. Leggero eccesso di schiuma. Pastosità: moderata.				

Tabella 5.25 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		3	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	14	
Schiumogeno		B	
c	(%)	1.5	
FER	(-)	11	
FIR	(%)	40	
Slump	(cm)	17	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.55	
Note			
Materiale omogeneo, leggermente appiccicoso. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: discreta.			

Tabella 5.26 – Condizionamento FUM sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto	
Campione		5		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	17		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	15		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	17		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.30		
Note				
Materiale omogeneo, non appiccicoso. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: moderata.				

Tabella 5.27 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto
Campione		8	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	16	
Schiumogeno		B	
c	(%)	1.5	
FER	(-)	12	
FIR	(%)	40	
Slump	(cm)	/	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.50	
Note			
Cono rotto.			

Tabella 5.28 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		9		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	12		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	12		
FIR	(%)	40		
Slump	(cm)	20		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.50		
Note				
Materiale eccessivamente fluido e disaggregato. Pastosità: assente.				

Tabella 5.29 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		10		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	17		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	12		
FIR	(%)	40		
Slump	(cm)	19		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.50		
Note				
Materiale omogeneo. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: buona.				

Tabella 5.30 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		11		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	17		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	12		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	17		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.38		
Note				
Materiale omogeneo. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: ottima. Terreno ben condizionato.				

Tabella 5.31 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		12		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	17		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	10		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	18		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.45		
Note				
Materiale omogeneo. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: buona.				

Tabella 5.32 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		13		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	17		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.2		
FER	(-)	10		
FIR	(%)	30		
Slump	(cm)	16		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.36		
Note				
Materiale colloso, rigido. Cono leggermente aperto. Pastosità: assente.				

Tabella 5.33 – Condizionamento ARG sopra falda con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto	
Campione		14		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	1.74		
w_n	(%)	7		
w_{tot}	(%)	15		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	10		
FIR	(%)	40		
Slump	(cm)	18		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.60		
Note				
Materiale omogeneo. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: moderata.				

4.3.1. Commenti relativi al sopra falda

A differenza dello schiumogeno A, per lo schiumogeno B si sono utilizzati dei valori di parametri della schiuma più elevati. Ovviamente tali valori dipendono appunto dall'agente utilizzato e dalle sue caratteristiche. E' importante notare anche le diverse concentrazioni tra i due agenti.

4.4. Prove di slump con schiumogeno B sotto falda

Tabella 5.34 – Condizionamento FUM sotto falda con schiumogeno B.

Terreno		FUM Sotto falda	Foto	
Campione		6		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	2.27		
w_n	(%)	16		
w_{tot}	(%)	18		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	15		
FIR	(%)	25		
Slump	(cm)	17		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.25		
Note				
Materiale omogeneo. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: ottima. Terreno ben condizionato.				

Tabella 5.35 – Condizionamento FUM sotto falda con schiumogeno B.

Terreno		FUM Sotto falda	Foto	
Campione		7		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	2.27		
w_n	(%)	16		
w_{tot}	(%)	19		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	15		
FIR	(%)	20		
Slump	(cm)	18		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.20		
Note				
Materiale omogeneo. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: buona.				

Tabella 5.36 – Condizionamento ARG sotto falda con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sotto falda	Foto	
Campione		15		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	2.23		
w_n	(%)	16		
w_{tot}	(%)	19		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	14		
FIR	(%)	25		
Slump	(cm)	14		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.27		
Note				
Materiale omogeneo. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: buona.				

Tabella 5.37 – Condizionamento ARG sotto falda con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sotto falda	Foto	
Campione		16		
Massa	(g)	13000		
γ	(g/cm ³)	2.23		
w_n	(%)	16		
w_{tot}	(%)	20		
Schiumogeno		B		
c	(%)	1.5		
FER	(-)	15		
FIR	(%)	25		
Slump	(cm)	18		
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.25		
Note				
Materiale omogeneo. Assenza di rilascio di fluido. Pastosità: ottima. Terreno ben condizionato.				

4.4.1. Commenti relativi al sotto falda

Anche per lo schiumogeno B, nel caso del sotto falda, il parametro che più sembra incidere sul comportamento del terreno è proprio il contenuto d'acqua da cui si parte. Il valore di acqua aggiunta non ha comunque superato il 3% portando a dei risultati di condizionamento abbastanza omogenei e concordi con le prove effettuate con lo schiumogeno A. In queste prove il materiale è risultato omogeneo e con una buona pastosità.

5. Risultati delle prove di slump – Caratterizzazione dopo un'ora

Al fine di verificare che i terreni condizionati in modo ottimale conservino le proprietà di pastosità, omogeneità e caduta al cono per tempi soddisfacenti allo scavo con macchina, un'ulteriore campagna di prove di slump è stata eseguita dopo un'ora di tempo dall'esecuzione delle prime prove. Nel seguito si riportano i risultati ottenuti. I campioni sono numerati in modo analogo alla campagna di prova precedente, a cui è stata aggiunta la dicitura "BIS".

5.1. Prove di slump t=1 ora con schiumogeno A

Tabella 5.38 – Condizionamento FUM sopra falda t=1 ora con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		2 BIS	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	16	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	30	
Slump	(cm)	16	
$T_{R,schiuma}$	(l/m ³)	0.24	
Note			
Terreno che conserva soddisfacenti proprietà di pastosità, omogeneità e caduta al cono.			

Tabella 5.39 – Condizionamento FUM sotto falda t=1 ora con schiumogeno A.

Terreno		FUM Sotto falda	Foto
Campione		10 BIS	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.27	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	18	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	20	
Slump	(cm)	17	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.16	
Note			
Terreno che conserva buone proprietà di pastosità, omogeneità e caduta al cono.			

Tabella 5.40 – Condizionamento ARG sopra falda t=1 ora con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto
Campione		14 BIS	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	17	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.2	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	25	
Slump	(cm)	15	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.20	
Note			
Terreno che conserva soddisfacenti proprietà di pastosità, omogeneità e caduta al cono.			

Tabella 5.41 – Condizionamento ARG sotto falda t=1 ora con schiumogeno A.

Terreno		ARG Sotto falda	Foto
Campione		18 BIS	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.23	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	20	
Schiumogeno		A	
c	(%)	1.0	
FER	(-)	20	
FIR	(%)	20	
Slump	(cm)	14	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.10	
Note			
Terreno che conserva buone proprietà di pastosità, omogeneità e caduta al cono.			

5.2. Prove di slump t=1 ora con schiumogeno B

Tabella 5.42 – Condizionamento FUM sopra falda t=1 ora con schiumogeno B.

Terreno		FUM Sopra falda	Foto
Campione		4 BIS	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	18	
Schiumogeno		B	
c	(%)	1.5	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	35	
Slump	(cm)	17	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.35	
Note			
Terreno che conserva soddisfacenti proprietà di pastosità, omogeneità e caduta al cono.			

Tabella 5.43 – Condizionamento FUM sotto falda t=1 ora con schiumogeno B.

Terreno		FUM Sotto falda	Foto
Campione		6 BIS	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.27	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	18	
Schiumogeno		B	
c	(%)	1.5	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	25	
Slump	(cm)	17	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.25	
Note			
Terreno che conserva buone proprietà di pastosità, omogeneità e caduta al cono.			

Tabella 5.43 – Condizionamento ARG sopra falda t=1 ora con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sopra falda	Foto
Campione		11 BIS	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	1.74	
w_n	(%)	7	
w_{tot}	(%)	17	
Schiumogeno		B	
c	(%)	1.5	
FER	(-)	12	
FIR	(%)	30	
Slump	(cm)	15	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.38	
Note			
Terreno che conserva soddisfacenti proprietà di pastosità, omogeneità e caduta al cono.			

Tabella 5.44 – Condizionamento ARG sotto falda t=1 ora con schiumogeno B.

Terreno		ARG Sotto falda	Foto
Campione		16 BIS	
Massa	(g)	13000	
γ	(g/cm ³)	2.23	
w_n	(%)	16	
w_{tot}	(%)	20	
Schiumogeno		B	
c	(%)	1.5	
FER	(-)	15	
FIR	(%)	25	
Slump	(cm)	17	
T_{R,schiuma}	(l/m ³)	0.25	
Note			
Terreno che conserva buone proprietà di pastosità, omogeneità e caduta al cono.			

5.2.1. Commenti relativi alle prove a t=1 ora

Sono stati scelte per le prove a t=1 ora quei campioni che sono stati ritenuti più consoni alle prestazioni attese dalle prove di slump. Si riportano nelle tabelle di seguito i valori di slump ottenuti a t=0 e t=1 al fine di mostrarne le differenze.

Tabella 5.45 – Parametri riassuntivi delle prove a t=0 e t=1h per prodotto A.

PRODOTTO	TERRENO	CONDIZIONE	CAMPIONE	w _{tot} (%)	c (%)	FER (-)	FIR (%)	SLUMP (cm)
A	FUM	Sopra falda	2	16	1,2	15	30	18
			2 BIS	16	1,2	15	30	16
		Sotto falda	10	18	1,2	15	20	18
			10 BIS	18	1,2	15	20	17
A	ARG	Sopra falda	14	17	1,2	15	25	19
			14 BIS	17	1,2	15	25	15
		Sotto falda	18	20	1	20	20	16
			18 BIS	20	1	20	20	14

Tabella 5.46 – Parametri riassuntivi delle prove a t=0 e t=1h per prodotto B.

PRODOTTO	TERRENO	CONDIZIONE	CAMPIONE	W _{tot} (%)	c (%)	FER (-)	FIR (%)	SLUMP (cm)
B	FUM	Sopra falda	4	18	1,5	15	35	20
			4 BIS	18	1,5	15	35	17
		Sotto falda	6	18	1,5	15	25	17
			6 BIS	18	1,5	15	25	17
B	ARG	Sopra falda	11	17	1,5	12	30	17
			11 BIS	17	1,5	12	30	15
		Sotto falda	16	20	1,5	15	25	18
			16 BIS	20	1,5	15	25	17

Dai valori ottenuti per la campagna di slump dopo un'ora si può concludere che i condizionamenti ritenuti ottimali in una prima fase di prove, sono stati convalidati dalla seconda campagna di prove svolta a distanza di un'ora. Oltre alla differenza di concentrazione adottata per i diversi schiumogeni, il terreno sembra mantenere proprietà soddisfacenti anche per i provini denominati "BIS". Infatti i valori di slump non si discostano in maniera significativa da quelli ottenuti per t=1 ora.

6. Conclusioni campagna di slump test

Sulla base delle prove eseguite è stato quindi possibile identificare i condizionamenti ritenuti ottimali mediante prove di slump come mostrato dalla tabella seguente. In conclusione entrambi i prodotti testati hanno evidenziato buona attitudine al condizionamento dei terreni studiati e che per entrambi i produttori le condizioni di sopra falda richiedono quantitativi di schiumogeno più elevati al fine di ottenere un condizionamento ottimale. I valori ottenuti dalla presente sperimentazione saranno ulteriormente confermati mediante prove di estrazione con coclea da camera in pressione. Tali prove saranno eseguite sulla litologia più rappresentativa per lo scavo della galleria (FUM) ed adottando per entrambi i produttori il dosaggio corrispondente alle condizioni sopra falda che rappresentano le condizioni maggiormente complesse per il condizionamento e richiedono un maggior quantitativo di agenti schiumogeni.

Tabella 5.27 – Condizionamenti ottimali per entrambi gli schiumogeni

PRODOTTO	TERRENO	CONDIZIONE	CAMPIONE	w_{tot} (%)	c (%)	FER (-)	FIR (%)
A	FUM	Sopra falda	2	16	1,2	15	30
		Sotto falda	10	18	1,2	15	20
	ARG	Sopra falda	14	17	1,2	15	25
		Sotto falda	18	20	1,0	20	20
B	FUM	Sopra falda	4	18	1,5	15	35
		Sotto falda	6	18	1,5	15	25
	ARG	Sopra falda	11	17	1,5	12	30
		Sotto falda	16	20	1,5	15	25

Capitolo 6: Prove di estrazione

1. Caratteristiche dell'apparato sperimentale

Per la valutazione dell'idoneità del materiale condizionato, definito mediante prove di slump, ad essere estratto mediante coclea, e quindi per una migliore simulazione del comportamento durante lo scavo di una macchina EPB, presso il Laboratorio Gallerie ed Opere in Sotterraneo del DIATI del Politecnico di Torino è stato utilizzato un apposito apparato sperimentale. L'apparecchiatura è stata realizzata in modo da riprodurre, alla scala del laboratorio (e quindi con i limiti relativi all'effetto scala), le condizioni di estrazione del materiale dalla camera di scavo di una macchina EPB. In dettaglio l'apparecchiatura consiste, in un cilindro metallico (di seguito denominato serbatoio) di diametro nominale 600 mm al quale si accoppia una coclea di estrazione di diametro esterno 168 mm e lunghezza della vite di 1500 mm. Nella prova la velocità di rotazione della coclea è stata fissata pari a 8 rpm. Al fine di rilevare i parametri di funzionamento, la coclea è equipaggiata con sensori di pressione totale e con un torsionmetro per misurare il momento torcente sull'albero. Il serbatoio ha un sensore di pressione totale posizionato sul fondo in modo da valutare il grado di omogeneità e trasmissione degli sforzi nel materiale, mentre un sensore di posizione segue il movimento del cilindro idraulico di carico durante la sua azione. Tutte le informazioni acquisite dai sensori sono raccolte mediante una centralina di acquisizione dati in modo automatico. I risultati ottenibili dall'apparato sono stati preliminarmente verificati mediante una campagna di prove su una sabbia campione, che viene riportata per fornire valori di riferimento. La prova descritta, pur avendo i limiti connessi alle prove di laboratorio e quindi a scala ridotta rispetto alla dimensione reale della macchina ed operando a pressioni nel serbatoio standardizzate (pari circa 1 bar), fornisce indicazioni sulle I risultati ottenibili dall'apparato sono stati preliminarmente verificati mediante una campagna di prove su una sabbia campione, che viene riportata per fornire valori di riferimento. La prova descritta, pur avendo i limiti connessi alle prove di laboratorio e quindi a scala ridotta rispetto alla dimensione reale della macchina ed operando a pressioni nel serbatoio standardizzate (pari circa 1 bar), fornisce indicazioni sulle caratteristiche dei materiali condizionati e sulle loro capacità di controllare e gestire la pressione nella camera di scavo con EPBS.

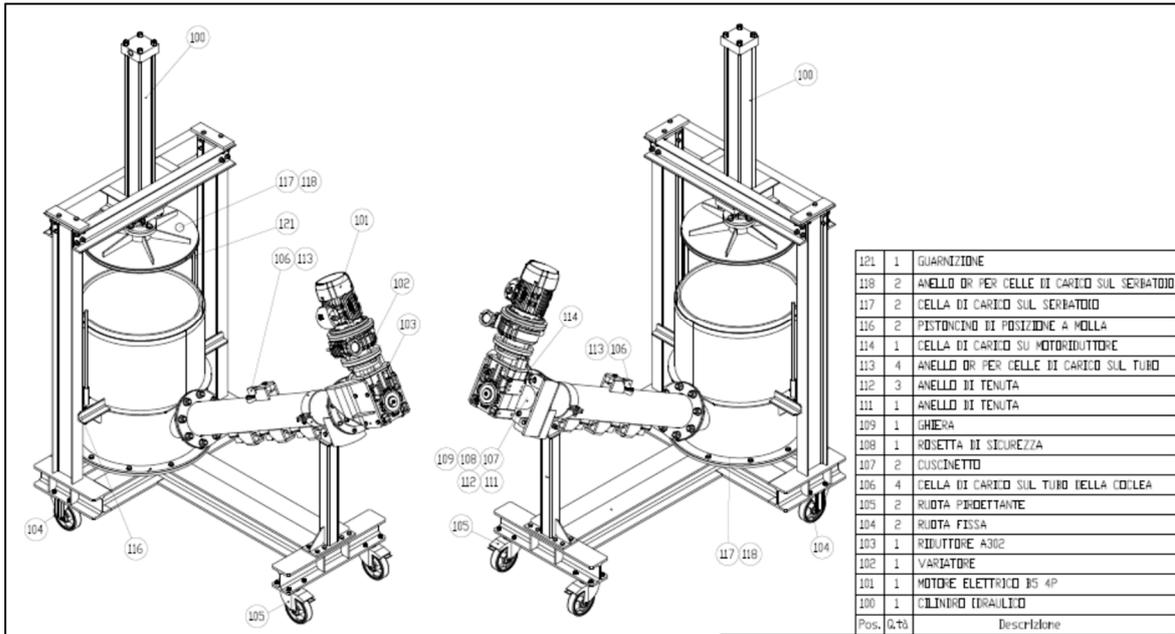


Figura 6.1 – Vista di insieme dell'apparato sperimentale di estrazione e disposizione della strumentazione installata.

Tabella 6.1 - Procedura per la prova di estrazione.

Fasi di prova

La centralina viene impostata per l'avvio della procedura di acquisizione.

Un quantitativo di materiale campione, con una determinata umidità, viene posizionato nel dispositivo di miscelazione.

La schiuma viene prodotta impostando sull'unità di generazione i parametri necessari per ottenere il tasso di espansione richiesto, e successivamente viene aggiunta nel mixer nel quantitativo necessario ad ottenere il FIR desiderato.

Il materiale così ottenuto viene immesso nel serbatoio. L'operazione di miscelazione e di scarico viene ripetuta finché il serbatoio non raggiunge il prescritto livello di riempimento. La coclea viene riempita avviandola. Viene quindi successivamente reintegrato il volume all'interno del serbatoio.

Il piattello viene connesso al pistone dopo averne preventivamente ingrassato il bordo esterno al fine di limitarne gli attriti durante lo scorrimento all'interno del serbatoio.

Attraverso la centralina oleodinamica si attiva il movimento del pistone finché non si raggiunge all'interno del serbatoio la pressione di prova assunta in modo standard di 1 bar.

Si avvia la prova azionando la coclea di estrazione mantenendo la pressione all'interno del pistone al valore desiderato mediante un controllo manuale.

Il materiale estratto viene raccolto avendo cura di prelevare regolarmente campioni di terreno per una successiva campagna di slump.

La prova continua finché il pistone non giunge a fine corsa.

2. Prova di taratura dell'apparato sperimentale di estrazione

La taratura dell'apparato di estrazione con coclea è stata realizzata con una prova su una sabbia campione condizionata. Nel seguito si riportano i risultati per la sabbia condizionata in condizioni di ottimo: FER=16; FIR=30%; c=2%, acqua totale=12% con un agente schiumogeno commerciale.

Tabella 6.2 - Risultati della pressione in camera e della coppia torcente sull'albero della coclea ricavati dalle prove sulla sabbia condizionata di riferimento.

Pressione ottenuta (kPa)		Coppia (Nm)	$\dot{\delta}$ spost. (mm/s)
Top	Bottom		
80-110	70-90	30-40	0.66

3. Prove di estrazione con coclea da camera in pressione per il terreno studiato

I parametri di condizionamento definiti nelle prove di slump sulla litologia FUM, in condizione di "sopra falda" sono stati verificati mediante prove di estrazione con coclea da camera in pressione delle quali, per i prodotti A e B, si riportano i dati nel seguito. La pressione teorica iniziale di prova all'interno del serbatoio è stata impostata per tutte le prove compresa tra 0,9 e 1 bar e durante lo sviluppo della prova si è cercato di mantenere costante manualmente il valore della pressione nella centralina oleodinamica.

3.1. Risultati delle prove di estrazione effettuate utilizzando l'agente schiumogeno A

La prova di estrazione è stata condotta sul terreno condizionato secondo i parametri ritenuti ottimale in precedenza. In seguito alle prove di estrazione si procede con le prove di slump del materiale estratto dalla coclea confrontando i risultati con quelli ottenuti nella prima campagna di prove. Inoltre, i parametri che si controllano durante la prova in coclea sono le pressioni lungo la

coclea e la coppia. Di seguito si riassumono in tabella i parametri del condizionamento e i grafici con le pressioni e la coppia.

Tabella 6.3 - Dosaggio per il condizionamento del materiale con agente A

<u>Materiale</u>	<u>FUM Sopra falda</u>	<u>Foto</u>
NUMERO SLUMP	2	
agente schiumogeno	A	
concentrazione tensioattivo (% in volume sull'acqua)	1,2	
FER	15	
FIR (%)	30	
T_R (l/m ³)	0,24	
w naturale (% sul terreno)	7	
w aggiunta (% sul terreno)	9	
w totale (% sul terreno)	16	
γ terreno non condizionato (kg/l)	1,74	
<i>Caduta al cono (cm)</i>	<i>18</i>	

Dal grafico mostrato in Figura 6.2 è possibile analizzare due parametri importanti durante la fase di carico del materiale, in particolare la pressione registrata al fondo del serbatoio dell'apparecchiatura e la coppia della coclea. Come ci si aspettava il valore di pressione bottom cresce nel tempo durante la fase di carico fino a raggiungere un valore massimo di circa 11kPa al riempimento. E' importante notare che all'istante $t=1265$ secondi è stata avviata la coclea al fine di ottenere una condizione di riempimento della stessa in modo da non creare depressioni durante la prova.

Nel momento in cui la coclea è piena si è raggiunto un valore di coppia pari a 20 Nm ($t=1400$ sec).

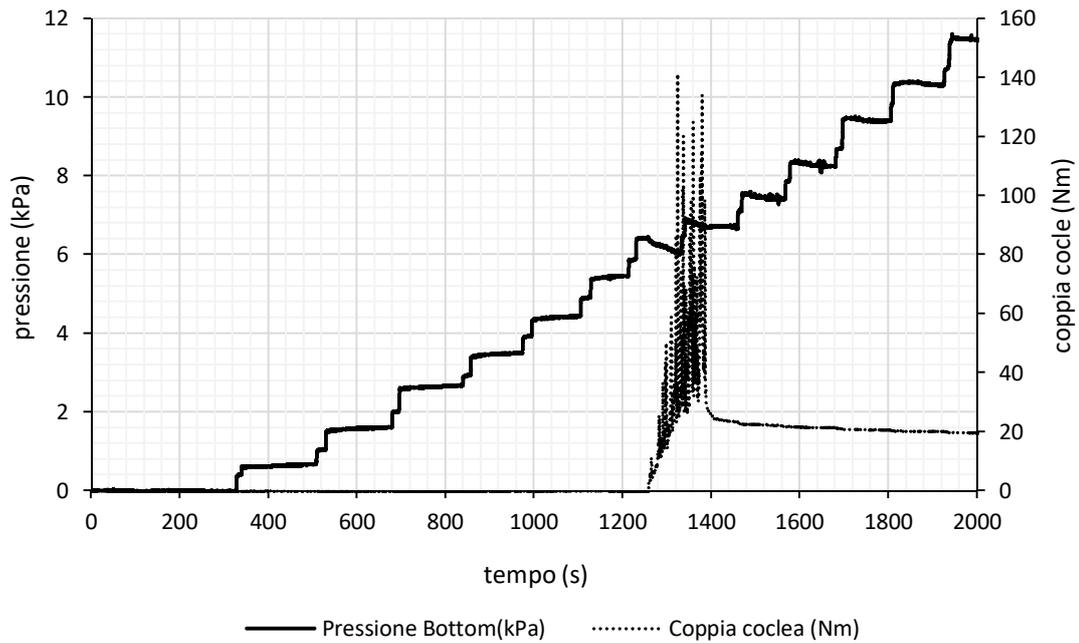


Figura 6.2 – Andamento della pressione sul fondo del serbatoio durante la fase di caricamento del terreno “FUM – sopra falda” condizionato con agente A.

In Figura 6.3 è mostrato l’andamento della coppia torcente della coclea durante la fase di estrazione del terreno: come già visto si parte da un valore di 20 Nm ottenuto in precedenza nella fase di caricamento e si raggiungono valori di picco fino ad un massimo di circa 430 Nm. Tali valori vanno via via diminuendo poiché mentre il serbatoio si scarica, arriva meno materiale alla coclea e dunque la coppia torcente decresce nel tempo. Questa situazione si verifica poiché il serbatoio non è continuamente riempito, dunque tale prova tende a fornire quelli che sono i valori massimi di coppia che possono presentarsi nella condizione reale di scavo.

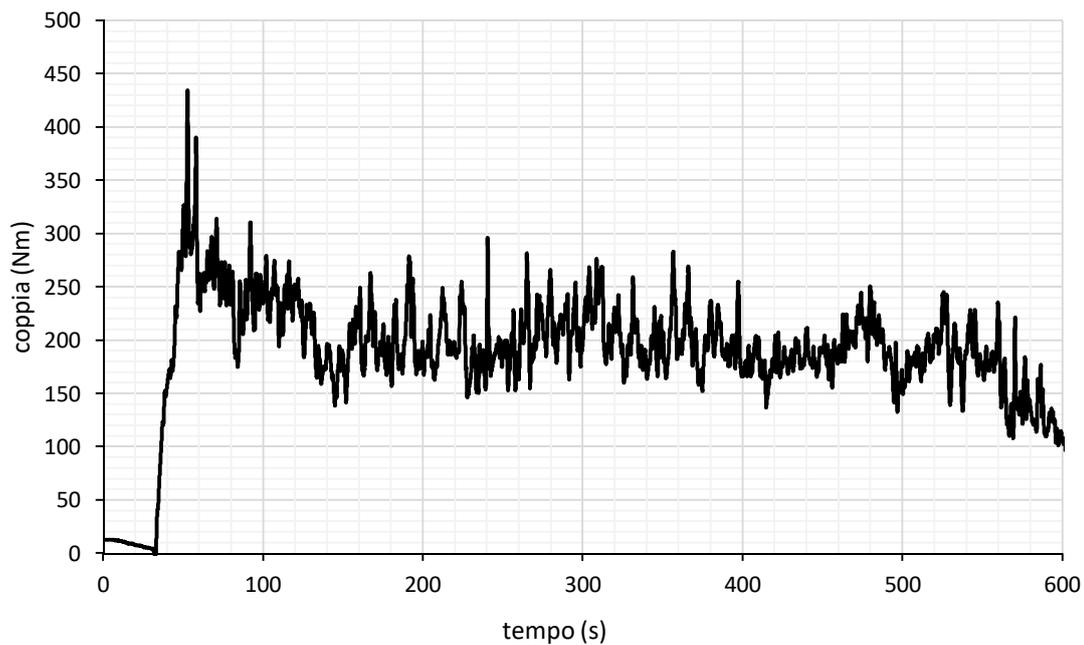


Figura 6.3 – Andamento della coppia torcente della coclea durante la prova di estrazione del terreno “FUM – sopra falda” condizionato con agente A.

In Figura 6.4 è riportato l’andamento dello spostamento del pistone durante la prova. Come si evince dal grafico, al tempo iniziale $t=0$ il pistone non registra alcuno spostamento. Non vi è una fase di assestamento poiché la registrazione è stata avviata nel momento in cui il pistone era al bordo del serbatoio.

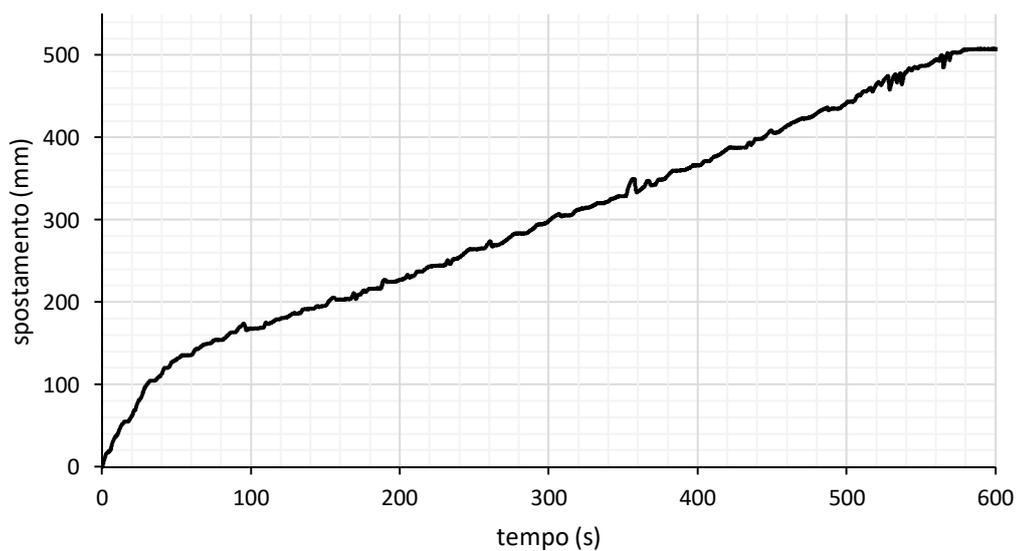


Figura 6.4 – Spostamento del pistone durante la prova di estrazione del terreno “FUM – sopra falda” condizionato con agente A.

In Figura 6.5 si riportano gli andamenti delle pressioni al top e bottom: il valore registrato al fondo per t=0 secondi corrisponde a quello registrato e mostrato in Figura 6.2 per t=2000 secondi corrispondente al termine del caricamento del materiale nel serbatoio. Il valore di pressione al top parte da zero e cresce in maniera concorde con quello al fondo.

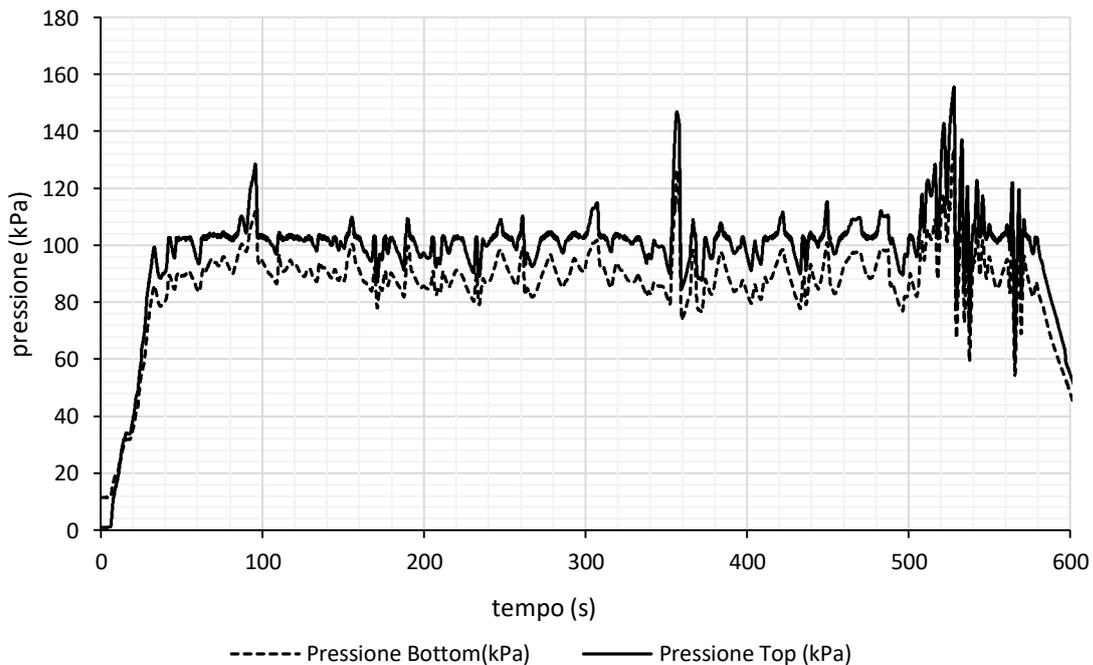


Figura 6.5 – Andamento delle pressioni all’interno del serbatoio durante la prova di estrazione del terreno “FUM – sopra falda” condizionata con agente A.

Una volta conclusa la prova di estrazione con lo scopo di simulare ciò che avviene a grande scala, si procede con delle prove di slump sul materiale estratto. Di seguito si riportano in tabella i valori di abbassamento del cono ottenuti dal materiale estratto dalla coclea. In tali prove il primo sacco estratto non viene preso in considerazione poiché non è ritenuto rappresentativo.

Tabella 6.4- Risultati delle prove di slump eseguite sul terreno “FUM – sopra falda” condizionato con agente A estratta durante la prova (ogni sacco ha un peso di circa 15kg).

Sequenza	Slump (cm)	Fotografia
Sacco 1 Dopo l'estrazione	17	
Sacco 2 Dopo l'estrazione	10	
Sacco 3 Dopo l'estrazione	13	
Sacco 4 Dopo l'estrazione	13	

Sacco 5
Dopo l'estrazione

13



Sacco 6
Dopo l'estrazione

13



Sacco 7
Dopo l'estrazione

13



3.2. Risultati delle prove di estrazione effettuate utilizzando l'agente schiumogeno B

La prova di estrazione è stata eseguita anche con lo schiumogeno B al fine di confrontare poi i risultati tra i due produttori. Anche in questo caso si riporta una tabella riepilogativa dei parametri di condizionamento definiti ottimali.

Tabella 6.5- Dosaggio per il condizionamento del materiale con agente B.

<u>Materiale</u>	<u>FUM Sopra falda</u>	<u>Foto</u>
NUMERO SLUMP	4	
agente schiumogeno	B	
concentrazione tensioattivo (% in volume sull'acqua)	1,5	
FER	15	
FIR (%)	35	
T_R (l/m ³)	0,35	
w naturale (% sul terreno)	7	
w aggiunta (% sul terreno)	11	
w totale (% sul terreno)	18	
γ terreno non condizionato (kg/l)	1,74	
<i>Caduta al cono (cm)</i>	20	

In Figura 6.6 si riportano gli andamenti della pressione al fondo del serbatoio e della coppia in coclea. Anche in questo caso, durante la fase di caricamento del materiale, si è registrata una pressione di circa 11 kPa al tempo $t=3500$ secondi (istante in cui il serbatoio è pieno) con un valore di coppia pari a 20 Nm.

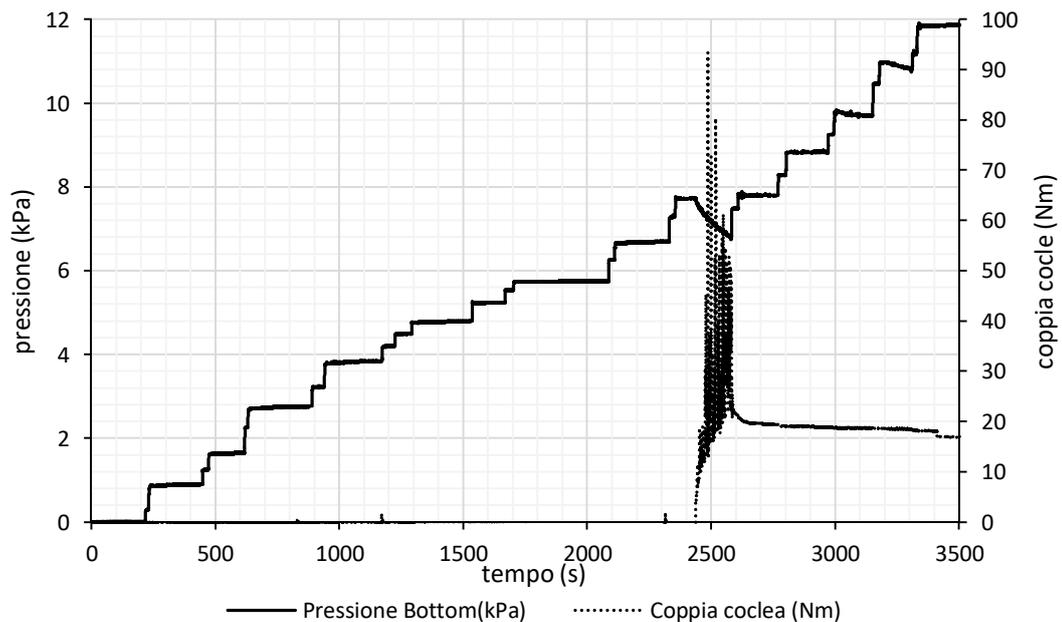


Figura 6.6 – Andamento della pressione sul fondo del serbatoio durante la fase di caricamento del terreno “FUM – sopra falda” condizionato con agente B.

In Figura 6.7 si riporta l’andamento della coppia torcente della coclea durante la prova di estrazione. Questa volta, a differenza dei valori ottenuti con lo schiumogeno A, la coppia non supera i 350 Nm.

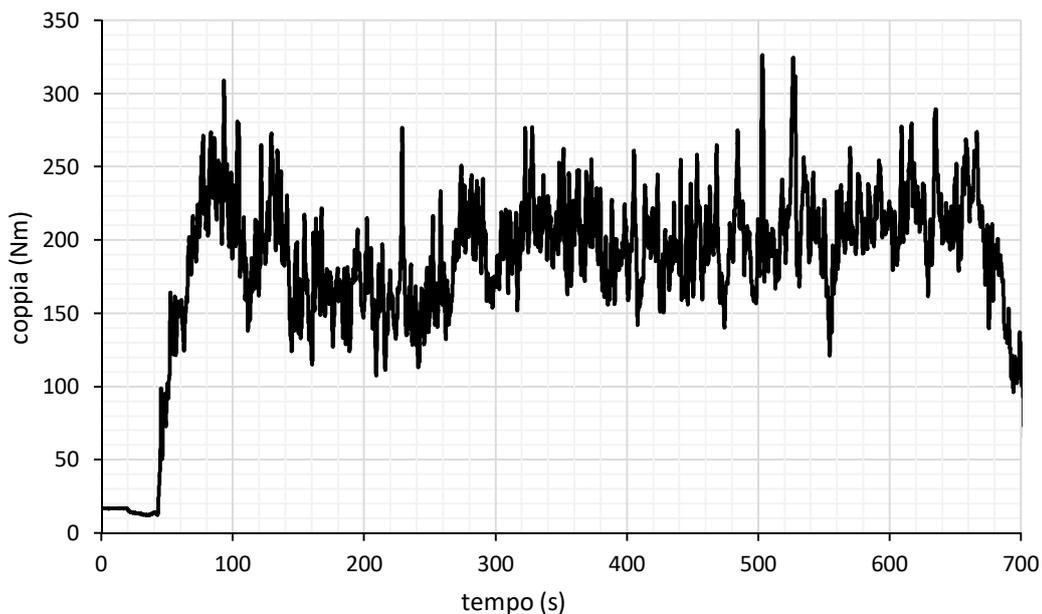


Figura 6.7 – Andamento della coppia torcente della coclea durante la prova di estrazione del terreno “FUM – sopra falda” condizionato con agente B.

Per quanto riguarda lo spostamento del pistone mostrato in Figura 6.8 i valori coincidono con quelli registrati in precedenza con lo schiumogeno A, ottenendo un valore massimo di circa 500 mm.

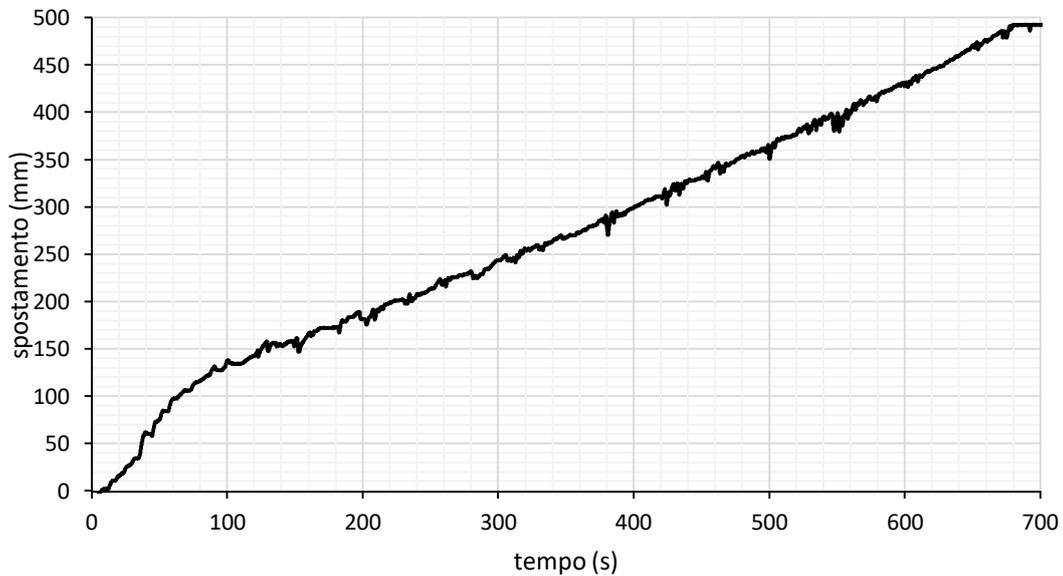


Figura 6.8 – Spostamento del pistone durante la prova di estrazione del terreno “FUM – sopra falda” condizionato con agente B.

In Figura 6.9 sono riportati gli andamenti delle pressioni al top e bottom: come nel caso precedente si parte da un valore di pressione al fondo pari a quello ottenuto alla fine del caricamento del serbatoio fino a dei valori leggermente inferiori rispetto al condizionamento ottenuto con l’agente A.

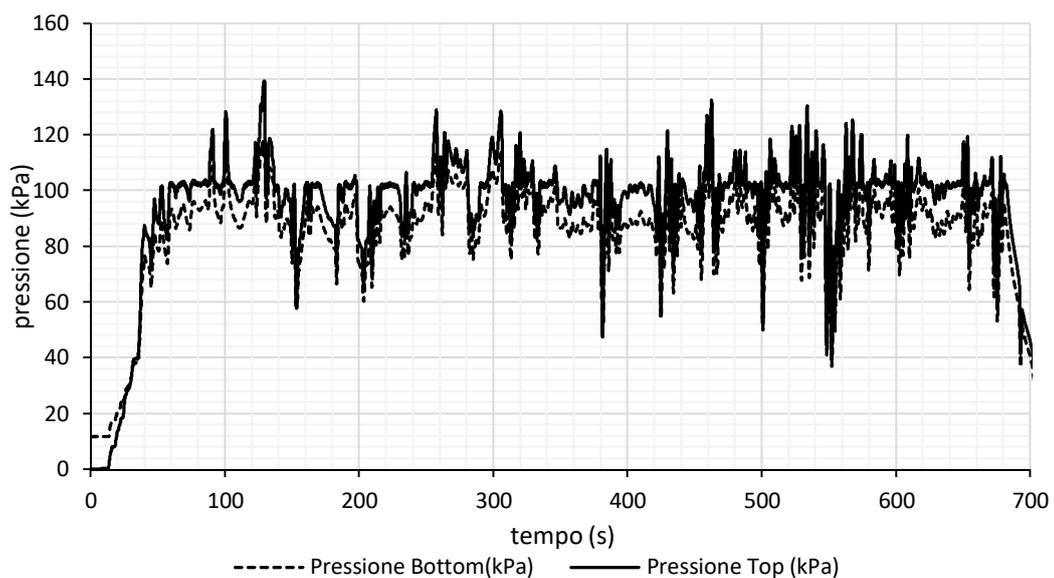


Figura 6.9 – Andamento delle pressioni all’interno del serbatoio durante la prova di estrazione del terreno “FUM – sopra falda” condizionata con agente B.

Di seguito si riportano i valori di slump ottenuti dopo la prova di estrazione.

Tabella 6.6- Risultati delle prove di slump eseguite sul terreno “FUM – sopra falda” condizionato con agente B estratta durante la prova (ogni sacco ha un peso di circa 15kg).

Sequenza	Slump (cm)	Fotografia
Sacco 1 Dopo l'estrazione	18	
Sacco 2 Dopo l'estrazione	14	
Sacco 3 Dopo l'estrazione	14	

Sacco 4
Dopo l'estrazione

15



Sacco 5
Dopo l'estrazione

15



Sacco 6
Dopo l'estrazione

13



Sacco 7
Dopo l'estrazione

10



4. Commenti ai risultati delle prove di estrazione

4.1. Prova di estrazione con coclea da camera in pressione effettuata sul terreno “FUM” condizionato con il prodotto A.

Si osserva che, nel corso della prova, la pressione misurata nel serbatoio è mediamente omogenea, il che indica una buona ed omogenea distribuzione della pressione da parte del materiale condizionato. L'operatore non ha riscontrato particolari difficoltà a mantenere costante la pressione intorno al valore di riferimento di 1 bar. La coppia torcente ha un valore più alto delle prove con sabbia campione, con un valore medio calcolato sulla durata della prova di circa 198 Nm. Il valore non è costante per l'intera prova in relazione alla presenza di ciottoli che tendono a fare ingranare la coclea stessa. Questo problema è relativo all'attrezzatura di laboratorio ma dovrebbe essere meno significativo alla scala reale della macchina. Lo spostamento del piattello nel tempo è abbastanza regolare. L'analisi delle prove di slump eseguita su campioni via via estratti durante la prova dalla coclea evidenzia come il condizionamento rimane di sufficiente qualità anche dopo l'estrazione. È importante sottolineare che queste prove sono state mediamente eseguite circa 1 ora dopo il condizionamento, il che è un ulteriore indice della qualità e della stabilità del materiale condizionato. L'osservazione del serbatoio dopo l'estrazione ha evidenziato un omogeneo movimento del materiale e l'assenza di vuoti localizzati.

4.2. Prova di estrazione con coclea da camera in pressione effettuata sul terreno “FUM” condizionato con il prodotto B.

Si osserva che, nel corso della prova, la pressione misurata nel serbatoio è mediamente omogenea, il che indica una buona ed omogenea distribuzione della pressione da parte del materiale condizionato. L'operatore non ha riscontrato particolari difficoltà a mantenere costante la pressione intorno al valore di riferimento di 1 bar. La coppia torcente ha un valore più alto della prova con sabbia campione, con un valore medio, calcolato sulla durata della prova, di circa 193 Nm. Il valore non è costante per l'intera prova in relazione alla presenza di ciottoli che tendono a fare ingranare la coclea stessa. Questo problema è relativo all'attrezzatura di laboratorio ma dovrebbe essere meno significativo alla scala reale della macchina. Lo spostamento del piattello nel tempo è regolare, il che è indice di un materiale che fluisce bene dal

serbatoio alla coclea. L'analisi delle prove di slump eseguita su campioni via via estratti durante la prova dalla coclea evidenzia come il condizionamento rimane di buona qualità anche dopo l'estrazione. È importante sottolineare che queste prove sono state mediamente eseguite circa 1 ora dopo il condizionamento, il che è un ulteriore indice della qualità e della stabilità del materiale condizionato. L'osservazione del serbatoio dopo l'estrazione ha evidenziato un omogeneo movimento del materiale e l'assenza di vuoti localizzati.

4.3. Conclusioni generali

Sulla base delle prove di estrazione eseguite si può concludere che il condizionamento definito come ottimale è determinato mediante la precedente campagna di prove di slump per i due produttori è confermato in quanto è possibile estrarre il terreno in modo omogeneo e con relativa facilità mediante coclea da un serbatoio in pressione. Fermi restando i limiti relativi all'effetto scala della prova già indicati nella premessa, la prova ha confermato l'applicabilità nello scavo con EPB dei dosaggi ottenuti dalla campagna di prove di slump.

Capitolo 7: Conclusioni

La ricerca sviluppata nella tesi ha come obiettivo la verifica dell'applicabilità della tecnologia EPB nello scavo di una galleria in formazioni moreniche complesse. Il lavoro svolto ha riguardato la fattibilità, mediante l'uso di prove di laboratorio, del condizionamento del materiale da scavare, al fine di garantire il riempimento della camera di scavo e la possibilità di applicare una contropressione al fronte. Le prove eseguite sono state le seguenti: prove di slump e prove di estrazione da camera in pressione mediante coclea con l'attrezzatura sviluppata dal Laboratorio di "Gallerie e Opere in Sottterraneo" del DIATI del Politecnico di Torino. La prima fase dello studio ha riguardato la verifica dell'applicabilità della EPB: i risultati delle curve granulometriche fornite dal geologo hanno evidenziato una difficoltà evidente nella classificazione del materiale. A tal proposito, il terreno è stato suddiviso in due categorie più significative, denominate FUM (Fronte unico misto) con maggiore presenza di materiale grossolano e ARG (Argilloso), con una percentuale di fine più significativa. Tale campagna di condizionamento è stata eseguita utilizzando due fornitori differenti dell'agente condizionante, confrontando successivamente i risultati. Oltre alla distinzione tra un materiale più grossolano e uno più argilloso, per simulare la situazione reale durante lo scavo, le prove sono state effettuate sia per una condizione sopra falda con valore di w_n pari al 7%, che per la condizione sotto falda con valore di w_n pari al 16%. Dalla campagna di prove di slump si può concludere che, per entrambi i produttori, i risultati ottenuti sono stati ritenuti soddisfacenti e dunque il materiale è risultato idoneo al condizionamento (sia per ARG che FUM). Per simulare ciò che avviene in camera di scavo è necessario che sia eseguita la prova di estrazione, in cui il materiale condizionato viene estratto attraverso la coclea che registra il valore di coppia (in Nm) necessario per il trasporto del materiale dalla camera di scavo al nastro trasportatore. Questa prova è di fondamentale importanza per verificare che le caratteristiche del materiale condizionato ottenute in camera di scavo siano mantenute anche durante la fase di estrazione nel trasportatore a coclea: i risultati ottenuti sono da considerarsi idonei per tale scavo. Per tale prova è stato scelto il materiale più rappresentativo della situazione reale, dunque sul terreno FUM, i risultati della prova di estrazione e della successiva campagna di slump sul materiale estratto, hanno confermato i valori precedenti. In conclusione la ricerca ha evidenziato come la caratterizzazione di formazioni moreniche complesse, costituite dalla mescolanza caotica di vari materiali solidi (massi, ciottoli, sabbie e limi) non sia possibile mediante definizione di un unico litotipo su cui effettuare il condizionamento. Considerando che i campi di applicabilità delle

macchine EPB non prevedono lo scavo in tali formazioni, la distinzione di un materiale più o meno grossolano, ha permesso il condizionamento del terreno nelle due situazioni limite. Per un futuro sviluppo della ricerca, eseguire altre campagne di prova con diversi terreni e diverse tipologie di condizionamento, permetterà di individuare altri parametri significativi e di sviluppare degli indici che siano rappresentativi del comportamento dei terreni studiati.

Bibliografia

- ASTM D422-63(2007)e2. “Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils” (Withdrawn 2016)
- Bezuijen A., Schaminée P.E.L., “Model experiments using foam simulation the drilling with an EPB shield”, 2000, GeoDelft Report No. BF 51010;
- Borio L., Peila D. (2011) – “Laboratory test for EPB tunnelling assessment: results of test campaign on two different granular soils”. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 27:85-100.
- Chiarelli M. (2015) – “La realizzazione di tunnel mediante scavo meccanizzato TBM-EPB garantisce la stabilità del fronte di scavo per mezzo dello stesso materiale di scavo mantenuto in pressione con la spinta della macchina”. *Strade e autostrade*.
- EFNARC (2003) – “Specification and guidelines for the use of specialist products for Soft Ground Tunnelling”. Technical report, EFNARC specification.
- Langmaack L., “Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunneling”, TBM Project Manager, MBT International, Zurich (CH);
- Martinelli D., Todaro C., Luciani A., Peila L., Carigi A., Peila D. (2018)- “Moderno approccio per lo studio del condizionamento dei terreni granulari non coesivi per lo scavo con macchine EPB”. *Gallerie e grandi opere sotterranee*, n. 128 – dicembre 2018.
- Peila D., Oggeri C., “Influence of Granulometry, time and temperature on soil conditioning for EPBs applications”;
- Peila D., Oggeri, C., Vinai, R. (2007) – “Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(12): 1622-1625.
- Rivas J.L., Jiménez A., Videra O., Gégout P., Vallon F., Pegon J.-L. (2009) – Reducing the environmental impact of tunnel boring (OSCAR). In *Technology Innovation in Underground Construction* (ed. Beer). Pag. 239-259.
- Vinai R., Oggeri C., Peila D., “*Soil conditioning of sand for EPB applications: A laboratory research*”, 2008, *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 (2008) 308-317;