

POLITECNICO DI TORINO



Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Anno accademico 2020/2021

STUDIO DELLA QUALITÀ DEL CONDIZIONAMENTO DI  
TERRENI TRAMITE PROVE DI PERMEABILITÀ

Candidato:

Giuseppe Cotugno

Relatori:

Prof. Daniele Martinelli

Prof. Daniele Peila

Ing. Andrea Carigi

Luglio 2021

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Scavo meccanizzato con EPB Shields</b>	<b>9</b>
2.1	Cenni storici . . . . .	9
2.1.1	Macchine scudate ad aria compressa . . . . .	11
2.1.2	Dallo scavo convenzionale allo scavo meccanizzato . . . . .	12
2.2	Slurry Shield TBM . . . . .	12
2.3	Earth Pressure Balance Shield . . . . .	13
2.3.1	Architettura di una macchina da scavo di tipo EPB . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Il condizionamento dei terreni</b>	<b>19</b>
3.1	Principali agenti condizionati . . . . .	19
3.2	La natura di una schiuma . . . . .	19
3.3	Parametri di progetto della schiuma . . . . .	21
3.4	Prove di caratterizzazione del terreno condizionato . . . . .	22
3.4.1	Test di semivita . . . . .	22
3.4.2	Slump test . . . . .	23
3.4.3	Prove di estrazione . . . . .	25
3.4.4	Prove di permeabilità . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Prove di permeabilità su terreni condizionati</b>	<b>28</b>
4.1	Cenni teorici di idraulica dei terreni . . . . .	28
4.1.1	Il gradiente idraulico . . . . .	28
4.2	Legge di Darcy . . . . .	30
4.2.1	La permeabilità del terreno . . . . .	31
4.2.2	Permeabilità di un terreno condizionato . . . . .	32
4.3	Misura della permeabilità . . . . .	34
4.3.1	Condizioni di prova . . . . .	34
4.3.2	Requisiti permeametro . . . . .	34
4.4	Strumentazione sperimentale . . . . .	36
4.4.1	Impianto idraulico . . . . .	36

4.4.2	Celle porta provini . . . . .	37
4.4.3	Sistema di acquisizione automatico . . . . .	38
4.5	Protocollo di prova . . . . .	39
4.6	Calibrazione . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Risultati</b>	<b>50</b>
5.1	Caratterizzazione dei terreni da testare . . . . .	50
5.1.1	Caratterizzazione del contenuto in acqua . . . . .	51
5.1.2	Caratterizzazione granulometrica . . . . .	52
5.1.3	Condizionamento dei terreni . . . . .	53
5.2	Valutazione della riduzione di permeabilità . . . . .	59
5.2.1	Intepretazione dei risultati . . . . .	64
5.3	Influenza del FIR . . . . .	68
5.3.1	Intepretazione dei risultati . . . . .	74
5.4	Prove di lavaggio . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>78</b>
	<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>79</b>

## Elenco delle figure

2.1	Schema dello scudo per perforazioni usato per il Tunnel del Tamigi [1]	10
2.2	Range di applicabilità per una EPB [5]	14
2.3	Utensili da scavo [3]	15
2.4	Schema delle pressioni sul fronte di scavo [3]	15
2.5	Struttura di una macchina di tipo EPB [3]	16
3.1	Componenti della schiuma	19
3.2	Interazioni tra tensioattivo e terreno	20
3.3	Tipologie di tensioattivi	20
3.4	Strumento per la determinazione del tempo di semivita [14]	22
3.5	Valutazione del $t_{50}$ in funzione del FER [18]	23
3.6	Slump test [15]	24
3.7	Valutazione della qualità degli slump [7]	25
3.8	Foto dell'estrattore con coclea [16]	26
4.1	Perdita di carico di un provino di terreno [12]	29
4.2	Schema della velocità e del percorso di filtrazione [12]	31
4.3	Foto di un terreno condizionato in laboratorio	33
4.4	Percorso di filtrazione ostacolato dalle bolle [12] - Modificata da Giuseppe Cotugno	33
4.5	Esempio di permeametro a carico costante [11]	35
4.6	Apparato sperimentale	36
4.7	Impianto idraulico	37
4.8	Foto della cella e della pietra porosa	38
4.9	Sistema di acquisizione automatico	39
4.10	Riempimento della cella per strati	40
4.11	Schema della saturazione dei provini	40
4.12	Installazione della cella porta provini	41
4.13	Output del peso cumulato di una generica prova	43
4.14	Output della permeabilità di una generica prova	43
4.15	Curve granulometriche dei terreni testati	44
4.16	Confronto delle misure	47

4.17	Confronto tra le velocità di flusso . . . . .	48
5.1	Terreni utilizzati per la prove di permeabilità . . . . .	50
5.2	Curve granulometriche delle miscele di terreni . . . . .	52
5.3	Generatore di schiuma prodotta da Spoilmaster Ltd (GB) . . . . .	53
5.4	Particolare della prova di slump del Terreno A . . . . .	63
5.5	Permeabilità delle miscele a $p=0,4$ bar . . . . .	64
5.6	Permeabilità delle miscele a $p=0,8$ bar . . . . .	65
5.7	Permeabilità delle miscele a $p=1,2$ bar . . . . .	65
5.8	Permeabilità delle miscele a $p=1,6$ bar . . . . .	66
5.9	Permeabilità delle miscele a $p=2,0$ bar . . . . .	66
5.10	Schemi di impacchettamento dei grani . . . . .	67
5.11	Valutazione delle permeabilità del Terreno A65B35 in funzione del FIR . . .	74
5.12	Valutazione delle permeabilità del Terreno A35B65 in funzione del FIR . . .	75
5.13	Valutazione del lavaggio del Terreno A35B65 . . . . .	76
5.14	Valutazione del lavaggio del Terreno A35B65 . . . . .	77

## Elenco delle tabelle

4.1	Ordini di grandezza del coefficiente di permeabilità [13]	32
4.2	Terreni utilizzati per la calibrazione	44
4.3	Valori di permeabilità del Terreno 1	45
4.4	Valori di permeabilità del Terreno 2	46
4.5	Valori di permeabilità del Terreno 3	46
4.6	Valori di permeabilità del Terreno 4	47
5.1	Terreni utilizzati per la prove di permeabilità	50
5.2	Valutazione dei pesi specifici delle miscele	51
5.3	Contenuto in acqua dei terreni	52
5.4	Valori delle prove di semivita	54
5.5	Parametri del condizionamento	54
5.6	Prova di slump del Terreno A	55
5.7	Prova di slump del Terreno A80B20	55
5.8	Prova di slump del Terreno A65B35	56
5.9	Prova di slump del Terreno A50B50	56
5.10	Prova di slump del Terreno A35B65	57
5.11	Prova di slump del Terreno A20B20	57
5.12	Prova di slump del Terreno B	58
5.13	Valori di permeabilità del Terreno B non condizionato	59
5.14	Valori di permeabilità del Terreno B condizionato	60
5.15	Valori di permeabilità del Terreno A20B80 non condizionato	60
5.16	Valori di permeabilità del Terreno A20B80 condizionato	60
5.17	Valori di permeabilità del Terreno A35B65 non condizionato	61
5.18	Valori di permeabilità del Terreno A35B65 condizionato	61
5.19	Valori di permeabilità del Terreno A50B50 non condizionato	61
5.20	Valori di permeabilità del Terreno A50B50 condizionato	62
5.21	Valori di permeabilità del Terreno A65B35 non condizionato	62
5.22	Valori di permeabilità del Terreno A65B65 condizionata	62
5.23	Valori di permeabilità del Terreno A80B20 non condizionato	63
5.24	Valori di permeabilità del Terreno A non condizionato	63

5.25	Parametri del condizionamento FIR = 10% - 15%	68
5.26	Parametri del condizionamento FIR = 20%	68
5.27	Parametri del condizionamento FIR = 30%	69
5.28	Parametri del condizionamento FIR = 40%	69
5.29	Parametri del condizionamento FIR = 50%	69
5.30	Parametri del condizionamento FIR = 60%	70
5.31	Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=10%	70
5.32	Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=20%	70
5.33	Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=30%	71
5.34	Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=40%	71
5.35	Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=50%	71
5.36	Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=60%	72
5.37	Valori di permeabilità A35B65 FIR=15%	72
5.38	Valori di permeabilità A35B65 FIR=20%	72
5.39	Valori di permeabilità A35B65 FIR=30%	73
5.40	Valori di permeabilità A35B65 FIR=40%	73
5.41	Valori di permeabilità A35B65 FIR=50%	73
5.42	Valori di permeabilità A35B65 FIR=60%	74

# 1 Introduzione

La costruzione di gallerie rappresenta una delle sfide più avvincenti nel ambito dell'ingegneria civile. La realizzazione di queste grandi opere può essere affrontata tramite diverse tecniche di costruzione, lo scavo meccanizzato è una di queste. In questa tecnica, una macchina nota come talpa meccanica (TBM) scava la galleria a piena sezione. Quando lo scavo avviene nei terreni, la tecnologia Earth Pressure Balance è la più utilizzata. Affinché l'efficienza di queste macchine sia ottimale e per fronteggiare alcune problematiche, vengono utilizzati degli agenti condizionati (in base alla granulometria) aggiunti al terreno scavato tramite l'iniezione da diverse zone della macchina.

Un terreno condizionato presenta una consistenza che permette di applicare una pressione omogenea sul fronte, necessaria per evitare cedimenti in superficie durante lo scavo. Inoltre, il condizionamento dei terreni riduce l'usura delle componenti meccaniche, riempie l'estrattore con coclea garantendo il controllo della pressione in camera di scavo ed evita l'adesione del terreno scavato sulle superfici della coclea. In aggiunta, la presenza di bolle nei vuoti interstiziali riduce la permeabilità del terreno prevenendo moti di filtrazione all'interno della macchina. Attualmente non esistono norme che regolano il condizionamento, di conseguenza la caratterizzazione tramite prove di laboratorio è di fondamentale importanza al fine di verificare la necessità di aggiungere agenti condizionati.

In questo lavoro di tesi sperimentale, si studia la qualità del condizionamento tramite prove di permeabilità, valutando quanto le prestazioni idrauliche di un terreno possono essere migliorate. La valutazione dell'abbassamento della permeabilità è un aspetto chiave in fase di progettazione preliminare che permette di scegliere o meno una tecnologia EPB. Lo studio consiste nell'osservare il miglioramento dal punto di vista idraulico al variare della granulometria. Oltre a ciò viene esaminato, il lavaggio ovvero la rimozione del condizionante dovuto al moto di filtrazione, che porta ad una evoluzione della permeabilità nel tempo. Le permeabilità sono analizzate a diverse pressioni poiché la pressione è una variabile che influenza fortemente il moto di filtrazione all'interno di un terreno. In fine, si valuta l'influenza del FIR (parametro del condizionamento) sulla permeabilità.

Le prove di permeabilità, eseguite presso il laboratorio TUSC del Politecnico di Torino, forniscono indicazioni sul condizionamento ideale per massimare le performance idrauliche.

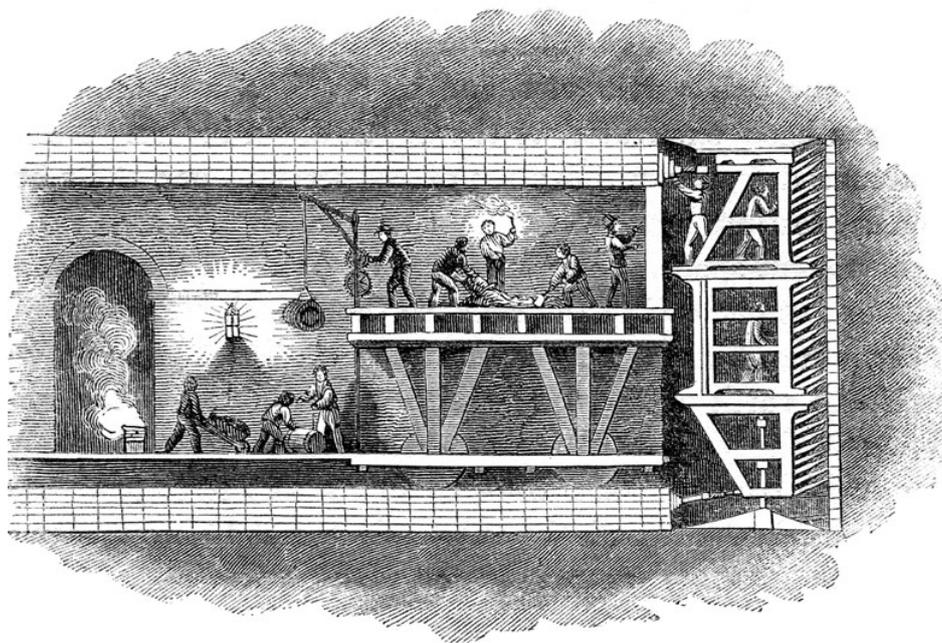
## 2 Scavo meccanizzato con EPB Shields

### 2.1 Cenni storici

Nel passato, i metodi più utilizzati per la costruzione di gallerie prevedevano la presenza di operai che si occupavano dello scavo manuale dell'opera. La tecnica Cut and Cover prevedeva la rimozione del terreno dalla superficie e scavando fino alla profondità desiderata, si procedeva con la costruzione della galleria in muratura dopodichè si ricopriva la struttura con il terreno scavato. Un'altra tecnica, era quella di partire con lo scavo da una certa profondità scendendo da un pozzo o scavo dalla superficie. In questo modo, la presenza di supporti in legno era indispensabile per garantire la stabilità della galleria prima della realizzazione del rivestimento finale in muratura. Gli scavi avvenivano in terreni sia granulari che coesivi e spesso bisognava fronteggiare la presenza dell'acqua che filtrava attraverso i rivestimenti. Per questo motivo, gli scavi sotto falda non erano mai stati realizzati perchè fino ad allora non era presenti tecnologie che potessero risolvere il problema.

Nel 1805 a Londra fù costituita una società per la costruzione di un tunnel che passasse sotto il Tamigi. La costruzione dell'opera era soggetta a condizioni di lavoro che mettevano in pericolo gli operai. Era indispensabile la presenza di uno scudo che proteggesse gli operai all'interno della galleria durante lo scavo. Marc Isambard Brunel nel 1818 brevettò uno scudo per perforazioni, realizzato in ghisa e ispirato a un mollusco la cui testa rivestita da un rigido guscio era capace di perforare gli scafi di legno.

Il progetto iniziò nel febbraio 1825 ed era caratterizzato da una struttura verticale cilindrica di 16 metri di diametro che attraversava la costa di Rotherhithe. Questo venne fatto creando un anello metallico con un diametro di 16 metri e costruendo su di esso una torre circolare in mattoni. L'elevazione della torre con il suo peso spingeva l'anello nel terreno e, allo stesso tempo, i lavoratori scavano il terreno al centro del cerchio. La struttura circolare fu completata nel novembre 1825 e uno scudo perforato realizzato a Lambeth nell'officina di Henry Maudslay fu assemblato nella parte inferiore della struttura. La sezione trasversale dello scudo era rettangolare (Figura 2.1) ed era composta da dodici scompartimenti affiancati a due altezze, ciascuno dei quali può spostarsi in avanti indipendentemente l'uno dall'altro. Ogni scomparto contiene tre scomparti, uno sopra l'altro, sufficienti per ospitare una persona che scava il fronte del tunnel.



**Figura 2.1:** Schema dello scudo per perforazioni usato per il Tunnel del Tamigi [1]

Man mano che lo scavo procedeva, il tunnel era rivestito da un anello di muratura in mattoni dietro lo scudo. Con una larghezza di circa 11 m, altezza di 7 m e lunghezza di 2.50 m lo scudo avanzava in modo incrementale con l'ausilio di martinetti manuali che reagivano contro il rivestimento in muratura completato situato dietro lo scudo.

Questa tecnologia ha permesso di ottenere una produzione massima di circa 4 metri per settimana. L'incremento della produttività, la sicurezza e l'impermeabilità dello scudo erano aspetti da migliorare e alcuni inventori si proposero per farlo. Samuel Dunn nel 1849 fù uno di questi, brevettò uno scudo capace di avanzare a piena sezione. Successivamente nel 1864, Peter W. Barlow consigliò di colmare con una boiaccia cementizia l'intercapedine tra il terreno e il rivestimento.

L'invenzione dello scudo di Brunel fu ulteriormente migliorata con l'intervento di James Henry Greathead, aiutato da Peter W. Barlow, nel corso della costruzione della Tower Subway sotto il fiume Tamigi nella città di Londra che ebbe inizio nel 1869. L'aspetto più rilevante dello scudo di Barlow-Greathead era la sezione trasversale circolare, che semplificava la costruzione del rivestimento permanente ed era in grado di sostenere meglio il carico del terreno circostante sfruttando la resistenza strutturale di un arco. Inoltre, il peso proprio dello scudo era significativamente inferiore a quella di Brunel, rendendo molto più facile l'avanzamento. Nonostante i consecutivi progressi delle macchine da scavo

scudate, la stabilità del fronte rimaneva un aspetto da migliorare. Con l'introduzione di camere ad aria compressa si cercò di controllare il problema delle venute d'acqua. Nella costruzione dell'Antwerp Dock tunnel (1879) e successivamente nell'Hudson river tunnel, New York (1880) furono adottate queste camere pressurizzate.

### **2.1.1 Macchine scudate ad aria compressa**

Lo scudo impediva al terreno intorno alla galleria di collassare sui lavoratori, le camere iperbariche creavano un ambiente di lavoro ad aria compressa che garantiva la stabilità del fronte. Queste tecnologie insieme diedero origine alle prime macchine scudate ad aria compressa. In particolare, l'aria compressa serviva a bilanciare la distribuzione della pressione dell'acqua derivante dalla presenza di falda in terreni permeabili. L'ingegnere svizzero Jean Daniel Colladon suggerì l'utilizzo di camere pressurizzate a Sir Marc Isambard Brunel per la costruzione del primo tunnel sotto il Tamigi nel 1829, ma questa soluzione non fu adottata. Nel 1830, Lord Thomas Cochrane ottenne il primo brevetto per utilizzare l'aria compressa per prevenire le venute d'acqua in costruzioni di gallerie e pozzi. Il primo utilizzo dell'aria compressa nel Regno Unito fu per la realizzazione degli appoggi del Rochester Bridge nel 1851. Passarono molti anni e il primo utilizzo dell'aria compressa per la costruzione di gallerie avvenne solo nel 1879 con il tunnel Kattendyk ad Anversa, in Belgio (Caiden, D., 2009). Successivamente nello stesso anno, l'aria compressa fu utilizzata anche per ripartire con i lavori del tunnel ferroviario sotto il fiume Hudson nel New Jersey a New York. L'uso dell'aria compressa nei progetti sotterranei comportava diversi problemi. Lavorare in condizioni iperbariche comprometteva la salute degli operai già quando la pressione superava circa 14 psi, o 1 atmosfera. La malattia da decompressione (nota anche come "the Bends" o Caisson Disease) consisteva nella precipitazione di gas disciolti in bolle all'interno del corpo dei lavoratori dopo depressurizzazione (Vann, 1989). Questa malattia fu scoperta durante i primi giorni della costruzione della galleria che ha portato a un numero impressionante di vittime. Oggi con i progressi nello scavo meccanizzato il lavoro in condizioni iperbariche è strettamente limitato per la sostituzione degli utensili da scavo.

### **2.1.2 Dallo scavo convenzionale allo scavo meccanizzato**

Prima della scoperta dello scavo meccanizzato, la rimozione e lo scavo manuale del terreno da parte degli operai rendeva il processo di costruzione della galleria un'operazione molto lenta. Dopo anni di ricerca si scoprirono le soluzioni per rendere lo scavo un'operazione industrializzata.

Nel 1896 per la realizzazione della Central London Railway Line fu sperimentata una delle prime macchine da scavo meccanizzata. La macchina era composta da una testa di scavo equipaggiata da raschiatori che scavavano e raccoglievano il terreno. Una volta avvenuta la rimozione, il materiale veniva trasportato tramite dei carrelli verso l'esterno. Questo progresso portò un aumento della produzione. L'evoluzione dello scavo meccanizzato partì dall'esemplare di macchina progettato da Grethead e negli anni con i successivi scavi di gallerie fu necessaria la distinzione tra le macchine per lo scavo in roccia e le macchine per lo scavo nei terreni. Questa distinzione era dovuta principalmente alle diverse condizioni di stabilità presenti negli ammassi rocciosi e nei terreni.

Le macchine per lo scavo in roccia erano aperte poiché la problematica più rilevante era lo scavo e non la stabilità quindi non era necessaria la presenza di uno scudo. Successivamente per affrontare stratigrafie eterogenee, furono adottati scudi singoli che richiedevano la costruzione del rivestimento a conci per generare la spinta necessaria all'avanzamento della macchina e scudi doppi con i quali la macchina avanzava in assenza del rivestimento. Le macchine per lo scavo in terreni, come detto in precedenza, richiedono sempre uno scudo poiché la problematica principale da affrontare è la stabilità del fronte di scavo ed evitare la presenza di cedimenti elevati in superficie.

In funzione del tracciato della galleria, si predilige una tipologia di macchina rispetto l'altra.

## **2.2 Slurry Shield TBM**

Nella prima metà del 900 si pensò di aumentare la densità del fluido che applicava la pressione sul fronte, che fino ad allora era aria compressa e permetteva ai lavoratori di scavare manualmente la galleria. Fu così che si arrivò alle innovative macchine EPB e Slurry. Una TBM di tipo Slurry applica la pressione sul fronte grazie a una miscela tra un fango bentonitico e il terreno scavato. Il fango bentonitico rende omogeneo il materiale

in camera di scavo e grazie alla sua mineralogia vengono sfruttate le sue caratteristiche tixotropiche. La miscela dev'essere progettata in funzione della granulometria dei terreni affinché si possa garantire durante l'avanzamento una applicazione continua della pressione per la stabilità del fronte. In questa tipologia di macchina l'estrazione del materiale scavato dalla camera di scavo avviene tramite delle condotte che destinano la miscela in un impianto di separazione recuperando la bentonite utilizzata. Il recupero della bentonite non sempre è un'operazione fattibile. Tramite vagli, separazioni chimiche e centrifughe si cerca di separare la bentonite dal terreno scavato ma la presenza di materiale fine complica il processo e lo rende costoso. Per la separazione è richiesta una area adibita in cantiere per questa lavorazione. La Slurry Shield inoltre, dev'essere dotata di un frantumatore per la rottura di eventuali blocchi che sarebbero in grado di ostruire le condotte per il trasporto del materiale.

### **2.3 Earth Pressure Balance Shield**

Le macchine scudate di tipo EPB nascono dall'idea di applicare una pressione sul fronte di scavo utilizzando il terreno scavato per evitare cedimenti in superficie. Sono utilizzate per lo scavo di gallerie in terreni prevalentemente coesivi. Durante la realizzazione di una galleria è raro ritrovarsi in zone geologiche omogenee, pertanto bisogna continuamente adattare la macchina in base alla granulometria per massimizzare la produzione garantendo comunque una contropressione sul fronte.

Il condizionamento del terreno, che consiste nell'aggiunta di polimeri o schiuma, permette a una macchina EPB di avanzare in condizioni ottimali. La differenza principale da una Slurry Shield sta nell'estrazione del materiale che in questo caso non avviene con un impianto di pompaggio con delle condotte ma con una coclea. Il controllo della pressione in camera è regolato dalla velocità di estrazione della coclea, che deve necessariamente essere piena di materiale.

Come detto precedentemente, durante lo scavo di una galleria il tracciato da seguire raramente si presenta con una geologia omogenea, di conseguenza bisogna estendere l'applicabilità di una EPB entro dei limiti granulometrici. Nella Figura 2.2 è possibile osservare delle indicazioni sulla tipologia di condizionamento da adottare in funzione della granulometria.

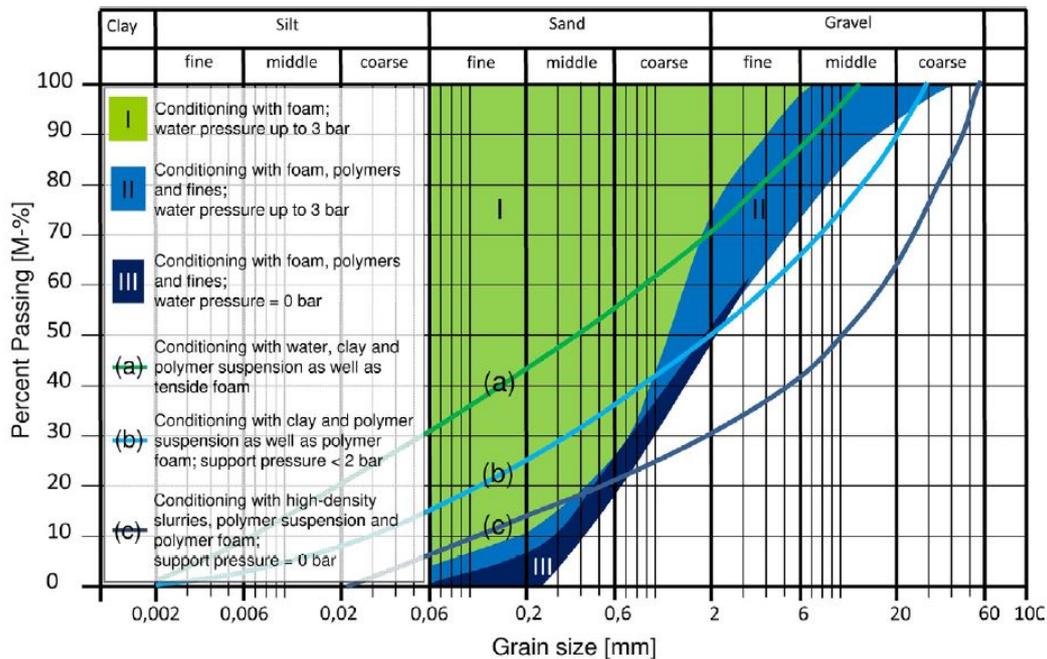


Figura 2.2: Range di applicabilità per una EPB [5]

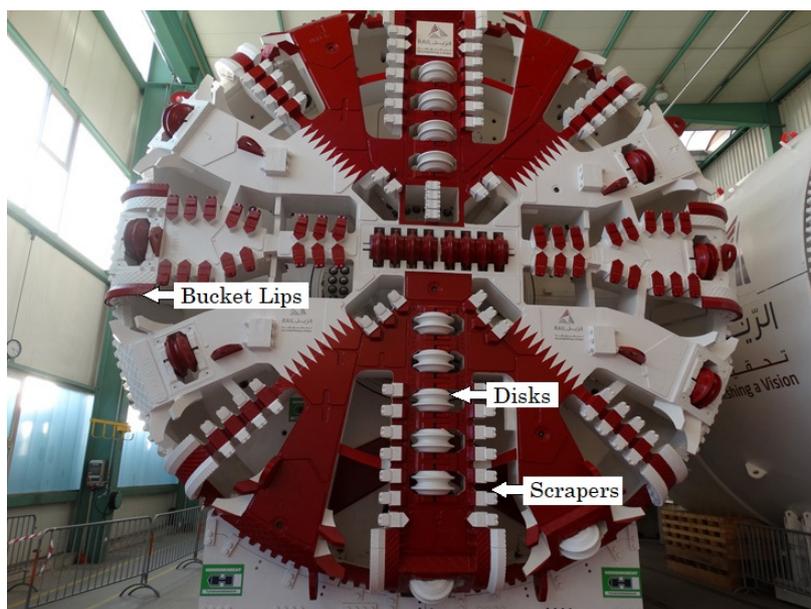
### 2.3.1 Architettura di una macchina da scavo di tipo EPB

Durante la rotazione della testa di scavo, gli utensili installati sulla medesima, rimuovono il terreno grazie alla pressione applicata sul fronte. Dopodichè, lo smarino entra in camera di scavo e con un idoneo condizionamento diventa un fango plastico capace di attuare la pressione richiesta per la stabilizzazione del fronte.

La scelta degli utensili dipende dalla varietà di terreni che si incontreranno lungo il tracciato. Gli aspetti più importanti da tenere in conto in fase di progettazione sono:

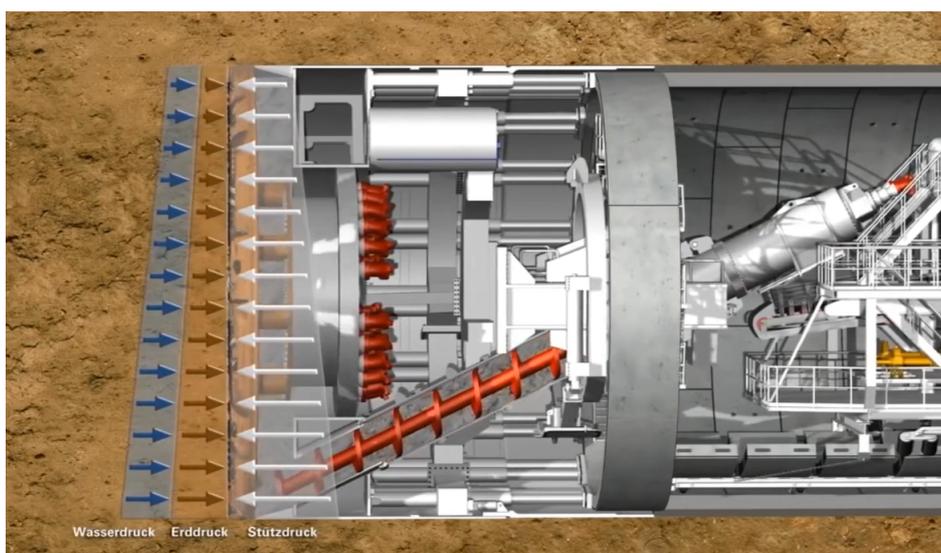
- tipologia/granulometria del terreno;
- abrasività delle formazioni rocciose;
- contenuto di minerali duri;
- usura degli utensili;
- capacità di spinta della macchina;

Nella seguente Figura 2.3 si mostrano gli utensili installati sulla testa di scavo:



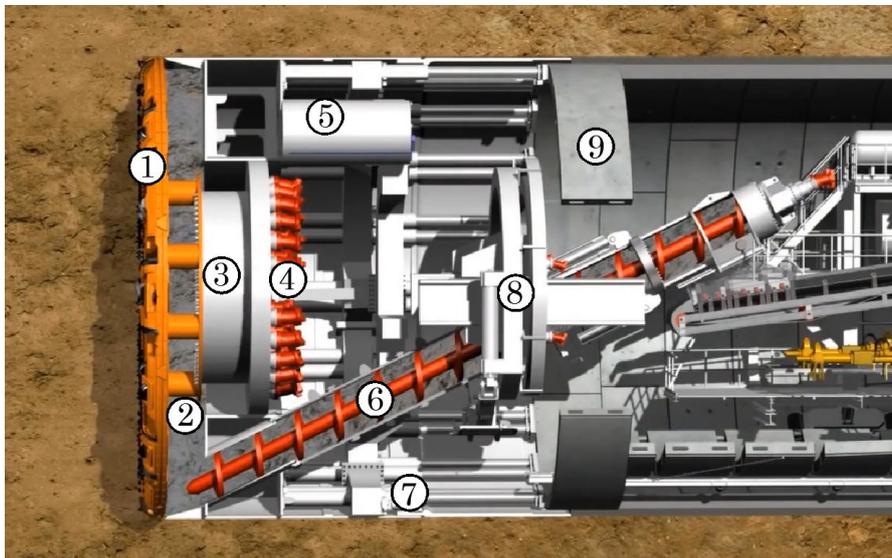
**Figura 2.3:** Utensili da scavo [3]

La contropressione da bilanciare è data dalla distribuzione delle tensioni geostatiche orizzontali e di pressione dell'acqua dovuta all'eventuale presenza di falda. La macchina con il materiale in camera di scavo contrasta queste distribuzioni regolando la pressione tramite la coclea. Affinchè si possa raggiungere la pressione desiderata all'interno della camera la coclea deve necessariamente essere riempita. Il controllo della pressione dipende dal volume trasportato in coclea. La seguente Figura 2.4 mostra il principio di funzionamento di una EPB:



**Figura 2.4:** Schema delle pressioni sul fronte di scavo [3]

Di seguito si riportano le componenti principali di una macchina EPB descrivendo il loro funzionamento:



**Figura 2.5:** Struttura di una macchina di tipo EPB [3]

1. Testa di scavo: è composta dagli utensili che permettono lo scavo grazie alla rotazione e alla pressione applicata sul fronte. Le teste di scavo non sono uguali per tutte le tipologie di macchina, necessitano una apposita progettazione che dipende dal terreno da scavare in sito. In particolare, si stabiliscono le posizioni e la distanza tra gli utensili. Ogni utensile seguirà la propria traiettoria e l'insieme delle traiettorie dovrà ricoprire l'intera sezione. Le aperture permettono al terreno scavato di entrare in camera, quanto più grandi sono meno utensili si potranno installare.
2. Camera di scavo: contiene lo smarino rimosso dal fronte utilizzato per bilanciare le distribuzioni di pressione (tensioni geostatiche e pressione dell'acqua). All'interno della camera sono presenti dei bracci di miscelazione che rendono omogeneo il terreno scavato. Il terreno nella camera viene progressivamente rimosso tramite la coclea situata nella parte inferiore.
3. Cuscinetto reggispinta: è l'elemento meccanico che permette sia la rotazione che l'applicazione della pressione sul fronte di scavo. Trattandosi di un elemento dalle dimensioni notevoli, non è possibile garantire una tenuta stagna quindi il terreno può facilmente entrare all'interno di questo componente e comprometterne il funzio-

namento. Per evitare l'infiltrazione del terreno, il cuscinetto reggispira è dotato di un impianto che ingrassa continuamente il sistema e impedisce l'entrata del terreno.

4. Motori elettrici: tramite una ruota dentata, trasferiscono la coppia alla testa di scavo. Lavorano in parallelo fornendo la potenza richiesta per la rotazione della testa. L'utilizzo di più motori ottimizza lo spazio all'interno della macchina riducendo l'ingombro.
5. Camera iperbarica: situata nella parte superiore della macchina, consente agli operatori specializzati di entrare in camera di scavo per la manutenzione/sostituzione degli utensili da scavo. Il suo scopo principale è quello di permettere agli operatori di effettuare una decompressione per poter affrontare le condizioni iperbariche all'interno della camera.
6. Coclea: composta da un trogolo tubolare inclinato e da una vite senza fine rimuove il terreno dalla camera di scavo. La parte inferiore è collegata alla camera di scavo mentre sull'estremità opposta è presente l'apertura dalla quale il materiale rimosso cade per gravità su un nastro trasportatore. Il terreno all'interno della coclea è soggetto a un gradiente di pressione. Un motore elettrico mette in azione il sistema dando la possibilità di regolare la velocità di estrazione e quindi controllare la pressione in camera.
7. Pistoni idraulici: permettono alla macchina di avanzare utilizzando come contrasto l'anello di conci di calcestruzzo installato precedentemente. Sono disposti in parallelo lungo la circonferenza interna dello scudo. I pistoni idraulici possono muoversi singolarmente permettendo l'installazione dell'anello concio per concio. Una volta che l'anello è installato, si procede con l'avanzamento facendo allungare contemporaneamente tutti i pistoni.
8. Erettore: composto da un braccio meccanico munito di un sistema a ventosa che aspirando l'aria (sistema vacuum) solleva i conci di rivestimento della galleria. Prelevando il concio dalla slitta, l'erettore ha la capacità di ruotare intorno l'asse della galleria e quindi posizionare l'elemento nella sua sede.
9. Conci in calcestruzzo prefabbricato: realizzati in calcestruzzo armato sono dotati di alloggi per tasselli che permettono il fissaggio con i conci adiacenti. Sui bordi ester-

ni del concio sono presenti delle guarnizioni che garantiranno una tenuta idraulica quando l'interno anello è installato. In base al tracciato si utilizzano diverse forme di concio capaci di creare curvature dell'asse della galleria.

10. Backfilling: durante l'avanzamento della macchina, delle pompe di iniezione installate nell'estremità interna dello scudo iniettano una malta per riempire il vuoto creato tra la sezione realmente scavata e quella costruita con i conci. Il riempimento è importante per il controllo dei cedimenti in superficie. Per evitare il ritorno della malta all'interno della macchina delle spazzole metalliche sono posizionate in serie sulla circonferenza interna. Lo scopo delle spazzole è quello di trattenere del grasso iniettato in continuo creando un anello impermeabilizzante.

### 3 Il condizionamento dei terreni

#### 3.1 Principali agenti condizionati

Le caratteristiche del terreno da scavare e le condizioni geologiche che bisogna affrontare determinano la tipologia di schiuma o polimeri da adoperare in macchina. Inoltre, il condizionamento dipende anche dalla tipologia di macchina che si utilizza. In base all'apertura della testa di scavo, per esempio, sono suggeriti determinati tipi di condizionamento che possono essere inadeguati per altre tipologie di macchina. La schiuma e i polimeri sono i principali agenti condizionati grazie ai quali si controlla la consistenza del materiale scavato. Talvolta, vengono utilizzati anche additivi per ridurre l'usura delle parti meccaniche ed evitare l'adesione delle argille sulle componenti della macchina.

#### 3.2 La natura di una schiuma

Una schiuma è il prodotto di una dispersione di aria in un liquido. Questa dispersione avviene miscelando il liquido generatore con aria in pressione. È necessario un moto turbolento affinché questa avvenga. La sua composizione media è data da aria (90÷95%), acqua (5÷10%) e tensioattivo (0,5÷3%) (Figura 3.1).

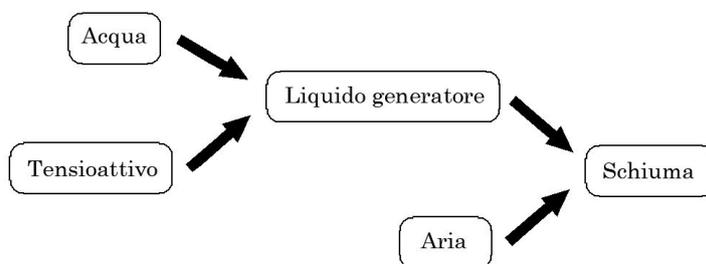
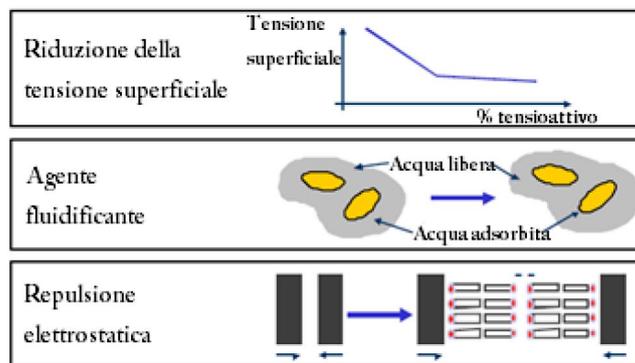


Figura 3.1: Componenti della schiuma

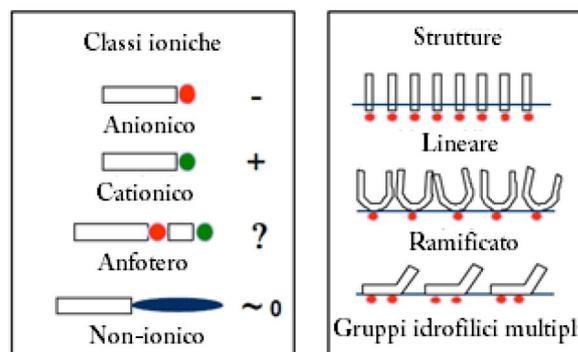
Il condizionamento con schiuma crea un materiale capace di applicare e tenere una pressione sul fronte garantendo stabilità e impermeabilità durante lo scavo. L'aggiunta degli agenti condizionanti migliorano il comportamento del terreno, la loro presenza trasformano la sua reologia offrendo uno scavo e trasporto più agevole.

Inoltre, l'utilizzo degli agenti chimici permette di lubrificare le componenti meccaniche diminuendo il momento torcente richiesto per lo scavo. Per capire come la schiuma migliora il materiale scavato, bisognerebbe innanzitutto esaminare qual è l'effetto di un tensioattivo in un terreno.



**Figura 3.2:** Interazioni tra tensioattivo e terreno

Come mostrato in Figura 3.2, la riduzione della tensione superficiale dell'acqua che lega le particelle dipende dalla concentrazione di tensioattivo. Questo agente chimico ha la capacità di mutare la forza elettrostatica generando una repulsione tra le particelle. Gli effetti possono variare in funzione della tipologia di tensioattivo che si utilizza. In Figura 3.3 si mostrano le principali classi ioniche e strutture dei tensioattivi.



**Figura 3.3:** Tipologie di tensioattivi

L'unione tra una testa idrofilica e una coda idrofobica è alla base di un tensioattivo. Modificando le caratteristiche di queste molecole, come la struttura o lunghezza della coda, la carica della testa idrofilica si ottengono modifiche sulle proprietà chimiche come:

- forza disperdente;
- tensione superficiale;
- capacità di generare schiuma;
- stabilità della schiuma.

### 3.3 Parametri di progetto della schiuma

I parametri più importanti che fornisco informazioni sulle proprietà delle schiume per il condizionamento dei terreni sono:

- Concentrazione  $c$  [%]: rappresenta la percentuale in peso di tensioattivo nel 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;

$$FER = \frac{V_{foam}}{V_{l.g.}} [-]$$

- Foam Injection Ratio (FIR): rapporto percentuale del volume di schiuma utilizzato sul volume di terreno da condizionare;

$$FIR = \frac{V_{foam}}{V_{soil}} \cdot 100 [\%]$$

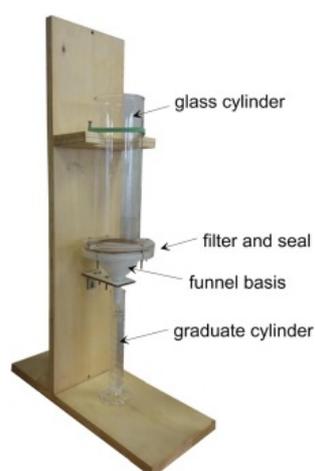
- Semivita  $T_{50}$  [s]: tempo in cui un campione di 80g di schiuma rilascia la metà del proprio liquido generatore.

### 3.4 Prove di caratterizzazione del terreno condizionato

Ogni terreno scavato con una macchina EPB richiede una precisa tipologia di condizionamento che dipende dalla granulometria, contenuto d'acqua, indice plastico, peso di volume e condizioni geologiche in situ. Di conseguenza, è possibile definire preliminarmente le quantità ideali per un condizionamento adeguato del terreno. Queste quantità, definite tramite prove di laboratorio, forniscono delle linee guida da seguire in macchina durante lo scavo. Grazie alle prove di laboratorio, si possono valutare i possibili comportamenti del terreno scavato facendo variare i parametri degli agenti condizionanti. La variazione dei parametri nelle prove di laboratorio, consente di simulare determinati scenari che possono verificarsi in macchina.

#### 3.4.1 Test di semivita

La semivita di un campione di schiuma si determina con uno strumento di laboratorio mostrato in Figura 3.4. In un contenitore si inserisce il campione di schiuma di cui sono noti FER, concentrazione e peso. Nella parte inferiore del contenitore è presente una apertura nella quale è posizionata una pietra porosa. Sotto la pietra porosa, un imbuto raccoglie il liquido drenato della schiuma e lo convoglia in un contenitore posto inferiormente. La prova inizia quando la schiuma entra a contatto con il recipiente, noto il peso iniziale della schiuma si misura il tempo necessario per riempire il contenitore inferiore di liquido drenato con un peso pari al 50% del peso iniziale.



**Figura 3.4:** Strumento per la determinazione del tempo di semivita [14]

Il tempo misurato dipende da quanto la schiuma è espansa e dalla concentrazione del tensioattivo nel liquido generatore. Una schiuma stabile ha un tempo di semivita più lungo e viceversa. Uno studio in funzione del FER (L. Borio 2010) dimostra che schiume con elevato contenuto d'acqua sono meno stabili a parità di concentrazione di conseguenza fornisco semivite più brevi.

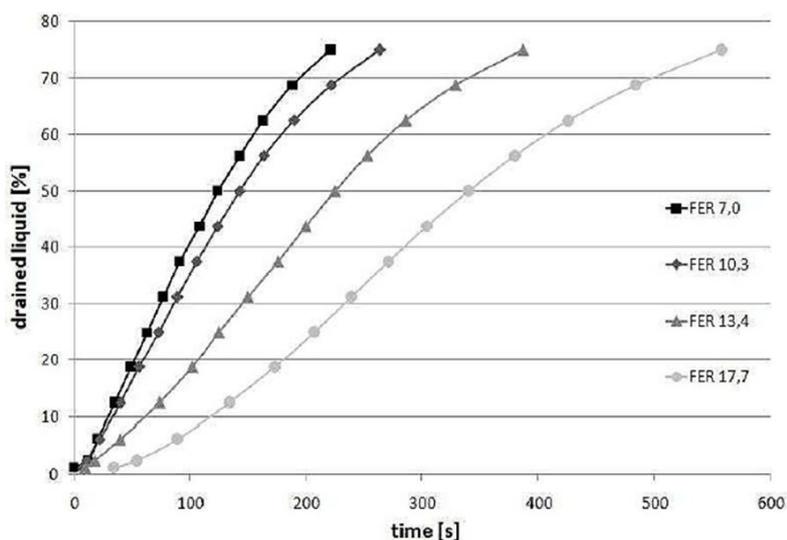
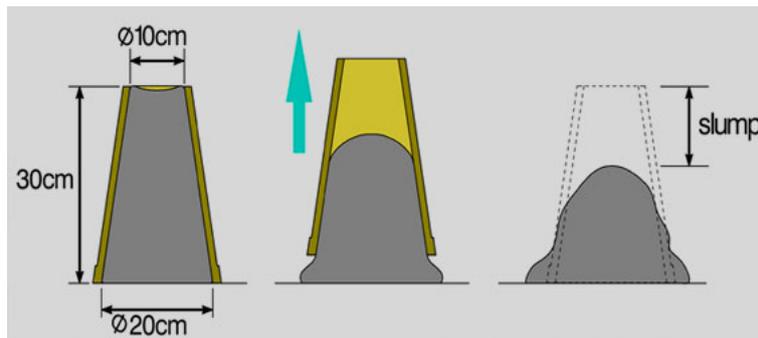


Figura 3.5: Valutazioni del  $t_{50}$  in funzione del FER [18]

### 3.4.2 Slump test

Si tratta di una prova pratica eseguibile sia in laboratorio che in cantiere, usufruendo del cono di Abrams si valuta lo slump o abbassamento rispetto all'altezza del cono. In questa prova si valuta la deformazione che il terreno condizionato subisce per effetto del peso proprio, nel momento in cui il cono viene rimosso. La procedura della prova prevede di inumidire il cono e la piastra metallica sotto di esso per evitare effetti di bordo, il materiale deve essere libero di scivolare lungo le superfici. Con l'ausilio di apposti ganci presenti sulla piastra, il cono viene vincolato per poi essere riempito. Tramite una sessola, si inserisce il materiale dall'apertura superiore per strati. Si riempie il cono con 3 strati pari circa a un terzo dell'altezza del cono assestandoli. Una volta riempito, si svincola il cono e si solleva delicatamente verso l'alto in direzione verticale, lasciando deformare il materiale sulla piastra. I valori di slump ottimali suggeriti da letteratura sono compresi tra 12 e 20 cm (Peila et al., 2007;2009).

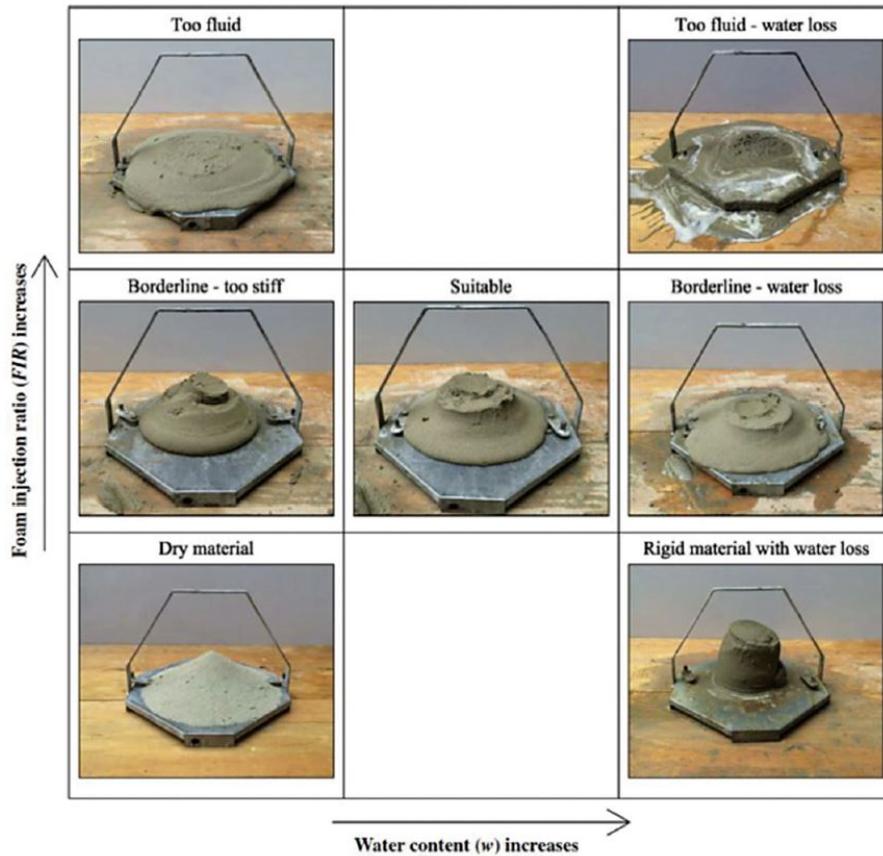


**Figura 3.6:** Slump test [15]

Sollevando il cono è possibile osservare diversi tipi di comportamento del materiale:

- collasso irregolare, quando il materiale non ha un comportamento plastico. La carenza di acqua o abbondanti quantitativi di schiuma restituiscono questo risultato;
- comportamento rigido, quando il materiale non si deforma o mostra degli slump molto piccoli. È un tipico comportamento quando il FIR è basso;
- comportamento fluido, l'eccesso di acqua o schiuma azzerava completamente la resistenza al taglio dell'impasto.
- comportamento plastico con segregazione d'acqua. È un buon risultato anche se considerato un comportamento;
- comportamento plastico senza segregazione d'acqua, il materiale non si rompe e si presenta con un comportamento ideale (Peila, Oggeri, 2008).

La Figura 3.7 mostra i comportamenti del materiale in funzione del contenuto d'acqua e del FIR. Questa classificazione permette di individuare rapidamente la qualità del condizionamento.



**Figura 3.7:** Valutazione della qualità degli slump [7]

### 3.4.3 Prove di estrazione

Per riprodurre il lavoro effettuato da una macchina EPB e al fine di ottenere ulteriori risultati utili per la valutazione della bontà del condizionamento, la realizzazione di un estrattore con coclea ha permesso di approfondire lo studio. Grazie a questo apparato sperimentale, è possibile valutare l'andamento della pressione lungo la coclea in fase di estrazione, il flusso del materiale condizionato e la capacità di quest'ultimo di applicare una pressione (Vinai et al., 2007; Peila et al. 2007; Borio et al.,2010). I parametri che vengono raccolti durante la prova sono:

- Valori di pressione in camera;
- Valori di pressione in coclea;
- Valori del torcente necessario per l'estrazione;

- Peso del terreno estratto;
- Abbassamento del pistone in camera durante l'estrazione;
- Valutazione del condizionamento post prova;



**Figura 3.8:** Foto dell'estrattore con coclea [16]

La procedura della prova (D. Martinelli et al., 2018) prevede di riempire il serbatoio, che simula la camera di una EPB, gradualmente con terreno condizionato. Una volta che il serbatoio è pieno, si procede con la chiusura facendo abbassare il piattello tramite il pistone posto superiormente. Il serbatoio chiuso dal piattello è sottoposto ad una pressione costante di 1 bar e nel mentre la coclea attivata estrae il materiale. Durante l'estrazione, affinché la pressione resti costante nel serbatoio, il piattello viene abbassato progressivamente. Il terreno condizionato estratto, viene poi testato con delle prove di slump al fine di valutare il condizionamento post prova.

#### **3.4.4 Prove di permeabilità**

Nello scavo meccanizzato capita di avanzare in condizioni geologiche particolari, come gli scavi sotto falda. L'obbiettivo del condizionamento è anche quello di abbassare la permeabilità in modo da evitare moti di filtrazione all'interno della macchina ed eliminare forze destabilizzanti indotte dal moto stesso. In letteratura scientifica, un valore comunemente accettato per la permeabilità di un terreno condizionato inferiore a  $10^{-5}$  m/s (Anagnostou and Kovari, 1996) risolve le problematiche sopra citate.

Nel prossimo capitolo si andrà a discutere il concetto di permeabilità e il suo inquadramento teorico al fine di introdurre più compiutamente le prove di permeabilità che costituiscono la parte sperimentale del presente lavoro di tesi.

## 4 Prove di permeabilità su terreni condizionati

### 4.1 Cenni teorici di idraulica dei terreni

Quando si affronta la maggior parte dei problemi di Ingegneria geotecnica, la presenza di acqua non può essere ignorata. L'acqua direttamente a contatto con la superficie o raccolta da fiumi e laghi tende a infiltrarsi nel sottosuolo per gravità colmando parzialmente o completamente i vuoti interstiziali del terreno. In funzione della permeabilità dei terreni ci sono diverse condizioni di flusso che determinano alcune tipologie di falda. La presenza di uno strato impermeabile che non permette l'infiltrazione inferiore dell'acqua determina una falda freatica, la superficie di questa falda è a pressione atmosferica. Quando l'acqua si presenta in due strati impermeabili la falda è detta artesianiana e la pressione è maggiore di quella atmosferica. La pressione dell'acqua gioca un ruolo fondamentale nei terreni poiché influenza i moti di filtrazione che possono essere dipendenti dal tempo. Si parla di flusso stazionario quando i parametri sono costanti nel tempo e flusso non stazionario quando variano nel tempo.

#### 4.1.1 Il gradiente idraulico

Un fluido per spostarsi necessita di un quantitativo di energia, un moto di filtrazione tra due punti avviene se c'è un gradiente idraulico ovvero una differenza energetica. L'energia in un punto è data dalla somma di diversi contributi e viene espressa come carico o altezza cioè un'energia per unità di peso del liquido. Nello specifico i contributi sono:

- altezza geometrica  $z$ : la quota del punto rispetto a un piano orizzontale di riferimento;
- altezza di pressione  $p/\gamma_w$ : la quota rispetto a un riferimento raggiunta dal fluido per effetto della pressione;
- altezza di velocità  $v^2/2g$ : contributo cinetico dovuto alla velocità del fluido;

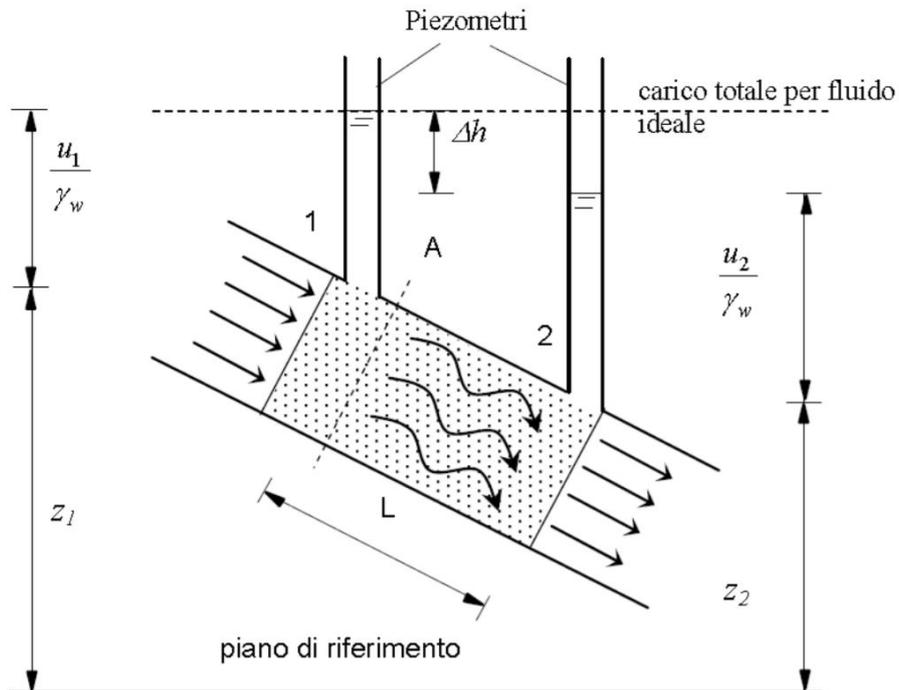
Sommando i tre termini si ottiene l'altezza totale o carico totale:

$$H = z + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (4.1)$$

mentre la formula (4.2) rappresenta il carico piezometrico:

$$h = z + \frac{p}{\gamma_w} \quad (4.2)$$

Se un fluido è in moto permanente, incomprimibile e soggetto solo all'azione di gravità allora il carico totale rimane costante lungo un certo percorso (Teorema di Bernoulli). Nella Figura 4.1 si mostra lo schema di un campione di terreno attraversato da un flusso d'acqua. All'estremità del campione due piezometri misurano il carico piezometrico trascurando il contributo cinetico dato che le velocità di filtrazione nel terreno sono basse.



**Figura 4.1:** Perdita di carico di un provino di terreno [12]

È possibile osservare una diminuzione del carico piezometrico nel piezometro 2 dovuto a una perdita di carico  $\Delta h$ . La perdita di carico rappresenta l'energia utilizzata dal fluido per poter superare le resistenze al moto attraverso il campione di terreno. Distribuendo la perdita di carico lungo il campione si ottiene il gradiente idraulico (4.3):

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (4.3)$$

## 4.2 Legge di Darcy

Il moto di filtrazione è governato da una differenza di energia in 2 punti distinti del terreno. La velocità del moto può essere legata alle caratteristiche del terreno e alla perdita di carico. Grazie allo studio del flusso monodimensionale (in condizioni di moto laminare) attraverso terreni, Darcy scoprì una relazione tra la portata specifica, la lunghezza del campione e la perdita di carico. In particolare, la portata specifica è inversamente proporzionale alla lunghezza del campione e direttamente proporzionale alla perdita di carico (4.4):

$$\frac{Q}{A} = v = k \cdot \frac{\Delta h}{L} = k \cdot i \quad (4.4)$$

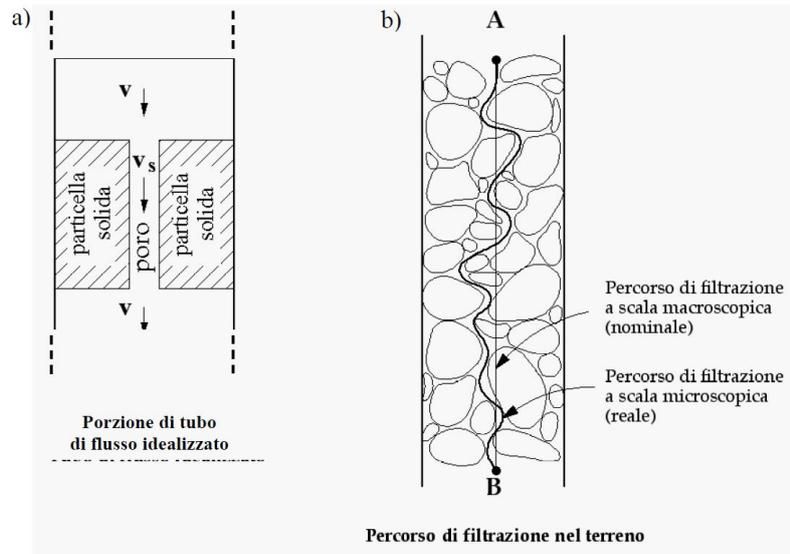
dove:

- $\frac{Q}{A}$  rappresenta la portata specifica;
- $v$  la velocità di filtrazione apparente;
- $L$  la lunghezza del provino;
- $\Delta h$  la perdita di carico;
- $k$  il coefficiente di permeabilità;

La legge di Darcy considera la velocità apparente  $v_a$  poichè la velocità reale  $v_r$  nei vuoti interstiziali è maggiore. L'acqua attraversa un'area minore  $A_v$  (vuoti intergranulari) rispetto all'area effettiva di una generica sezione del campione di terreno. Misurando la portata  $Q$  come:

$$Q = v_a \cdot A = v_r \cdot A_v \quad (4.5)$$

è possibile osservare che  $\frac{v_a}{v_r} = \frac{A_v}{A} = n$  ovvero la velocità apparente  $v_a$  è proporzionale alla porosità  $n$  del mezzo. Inoltre, è doveroso fare alcune considerazioni anche sul percorso di filtrazione. La Figura 4.2 mostra il percorso della generica particella da A verso B, la distanza percorsa è decisamente più lunga della lunghezza del campione.



**Figura 4.2:** Schema della velocità e del percorso di filtrazione [12]

#### 4.2.1 La permeabilità del terreno

Come visto nell'equazione (4.4) la permeabilità si presenta dimensionalmente come una velocità. In ingegneria geotecnica, la permeabilità è considerata costante ma in realtà è una funzione che dipende da:

- densità del fluido;
- viscosità del fluido;
- dimensioni dei vuoti intergranulari;
- mineralogia.

Per il range di temperature d'interesse, la temperatura ha un'influenza limitata su densità e viscosità dell'acqua pertanto la permeabilità dipende esclusivamente dalle caratteristiche del terreno. Il parametro principale che influisce sulla permeabilità è la dimensione dei vuoti intergranulari che costituiscono i canali attraverso cui si sviluppa il moto. Nel caso di terreni a grana fine (Argille, Limi) intervengono anche le interazioni elettrochimiche tra la microstruttura del terreno e l'acqua. Inoltre, anche il grado di saturazione influenza il coefficiente di permeabilità.

In Tabella 4.1 si mostrano i valori tipici di permeabilità dei terreni:

Tipologia di terreno	k [m/s]
Ghiaie pulita	$10^{-2} \div 1$
Sabbia grossa pulita	$10^{-5} \div 10^{-2}$
Sabbia fine	$10^{-6} \div 10^{-4}$
Limo	$10^{-8} \div 10^{-6}$
Argilla tenera	$< 10^{-9}$
Argilla consistente fessurata	$10^{-8} \div 10^{-4}$

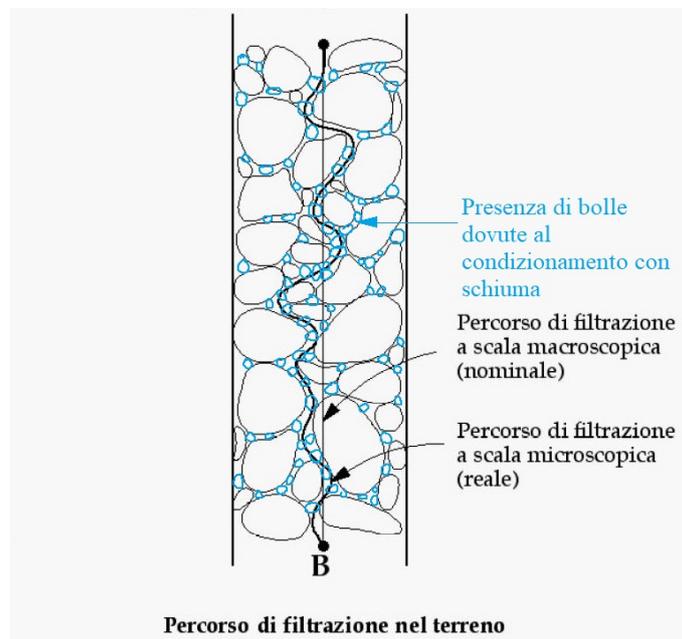
**Tabella 4.1:** Ordini di grandezza del coefficiente di permeabilità [13]

#### 4.2.2 Permeabilità di un terreno condizionato

Un terreno condizionato con schiuma presenta un comportamento diverso da un terreno non condizionato. La presenza di bolle all'interno dello scheletro solido del terreno modifica temporaneamente la sua struttura. In particolare, ci sono bolle che occupano i vuoti interstiziali e bolle che si interpongono tra i grani del terreno separandoli. La separazione riduce la resistenza al taglio del terreno e permette di ottenere un comportamento ideale per applicare la pressione sul fronte. Facendo riferimento alla Figura 4.4, si osserva che le bolle ostacolano il percorso di filtrazione dell'acqua pertanto un terreno condizionato si presenta con una permeabilità più bassa. La permeabilità di un terreno condizionato dipende dal tempo, l'evoluzione è legata a fenomeni che portano alla rimozione della bolla, uno di questi è proprio il percorso di filtrazione. L'acqua che filtra attraverso il terreno può rompere l'interfaccia della bolla oppure trasportarla lungo un canale preferenziale. Questi fenomeni combinati nel tempo ripristinano la struttura del terreno portando la permeabilità a un valore ottenuto da un terreno non condizionato.



**Figura 4.3:** Foto di un terreno condizionato in laboratorio



**Figura 4.4:** Percorso di filtrazione ostacolato dalle bolle [12] - Modificata da Giuseppe Cotugno

### **4.3 Misura della permeabilità**

Come già detto precedentemente, la permeabilità dipende dalla granulometria del campione e in funzione della tipologia di terreno la normativa tecnica ASTM D2434 introduce due tipi di prova. Le prove di permeabilità si suddivono in:

- Prove a carico variabile ;
- Prove a carico costante.

La prova a carico variabile è utilizzata per terreni a bassa permeabilità mentre quella a carico costante permette la misura di un range più ampio di permeabilità. Pertanto, nel presente lavoro di tesi si è scelto di utilizzare quest'ultima tipologia di prova.

#### **4.3.1 Condizioni di prova**

Le condizioni ideali per una prova a carico costante richiedono un flusso laminare dell'acqua che attraverserà il campione. Durante la prova, il flusso dev'essere costante e non sono ammesse variazioni di volume pertanto l'altezza del provino deve rimanere invariata. La presenza di bolle d'aria influisce sulla misura di conseguenza è necessaria una completa saturazione del provino. La condizione di prova a carico costante si basa sull'ipotesi che non ci siano variazioni di carico quindi la misura dev'essere eseguita in regime stazionario.

#### **4.3.2 Requisiti permeametro**

Il diametro minimo del permeametro dev'essere almeno pari a 8-12 volte le dimensioni della particella più grande del terreno da testare. All'interno del permeametro si posiziona una pietra porosa che abbia una permeabilità più elevata del provino e delle aperture piccole per evitare lo spostamento della frazione fine che porterebbero a un disturbo del campione. È necessaria la presenza di manometri in testa e alla base del permeametro che permettono il calcolo della perdita di carico lungo il campione di terreno. La lunghezza del campione dev'essere almeno una volta il diametro. In testa al provino si posiziona un'altra pietra porosa e per evitare variazioni di lunghezza si consiglia l'utilizzo di un sistema che impedisca tale fenomeno. Il permeametro è collegato ad un serbatoio e riempito continuamente durante la prova, è posto ad un'altezza nota che determina il carico idraulico. È

consigliato l'utilizzo di una pompa sottovuoto per saturare d'acqua il provino prima della prova. Lo schema in Figura 4.5 mostra un esempio di apparecchiatura:

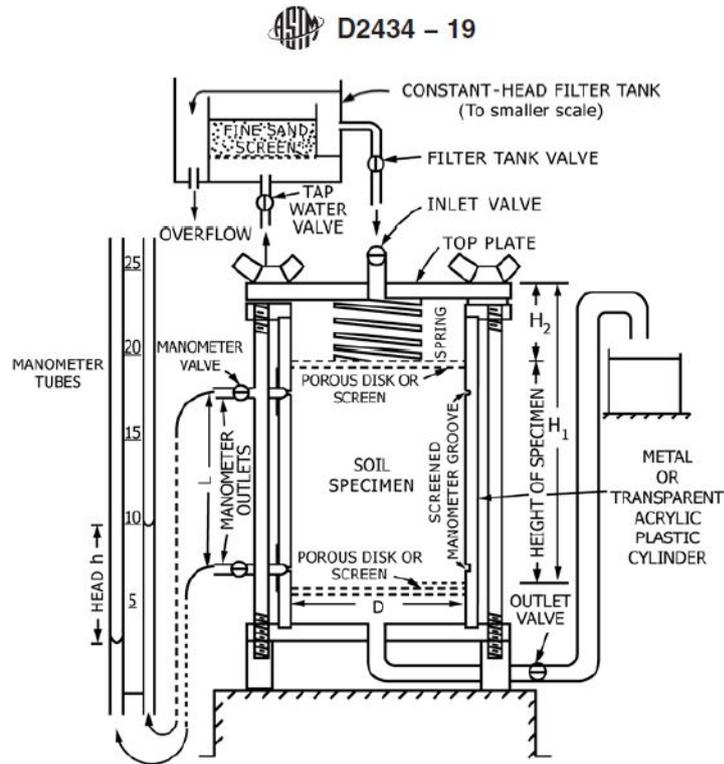


Figura 4.5: Esempio di permeametro a carico costante [11]

## 4.4 Strumentazione sperimentale

L'apparato sperimentale formato da 5 permeametri in parallelo permette di ottenere delle misure robuste dei valori di permeabilità. In particolare, la strumentazione è composta da un impianto idraulico, celle porta provini e sistema di acquisizione automatico come mostrato in Figura 4.6.

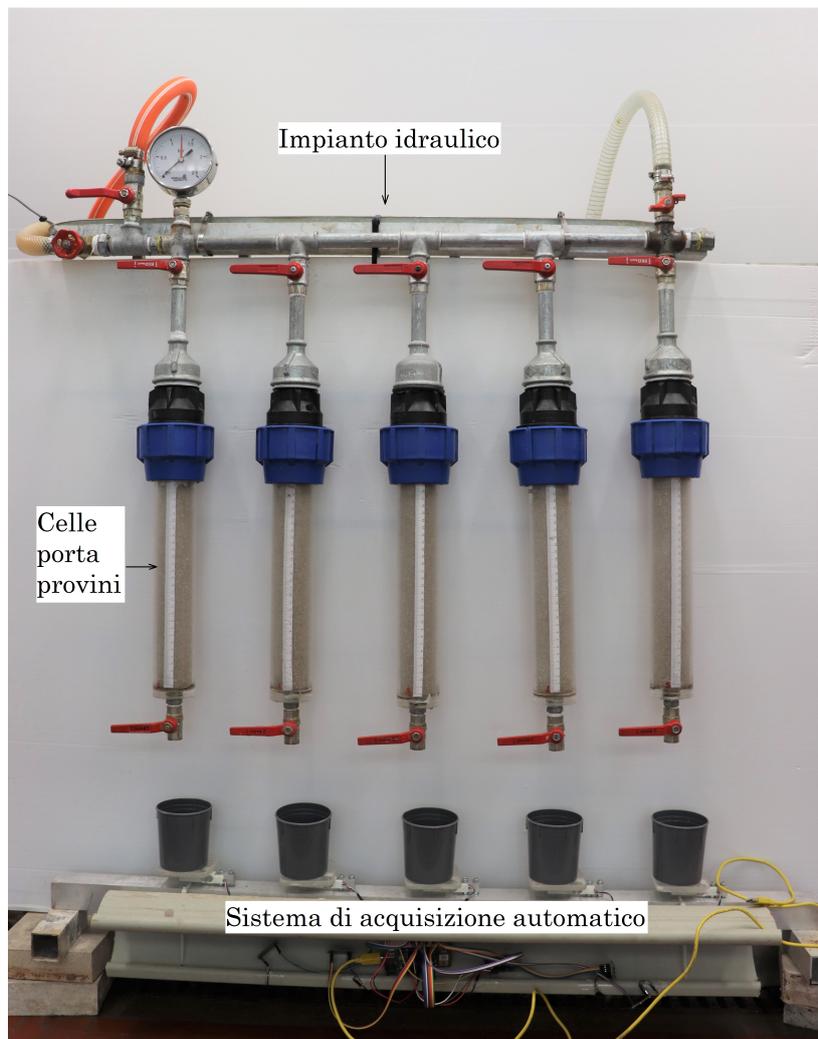
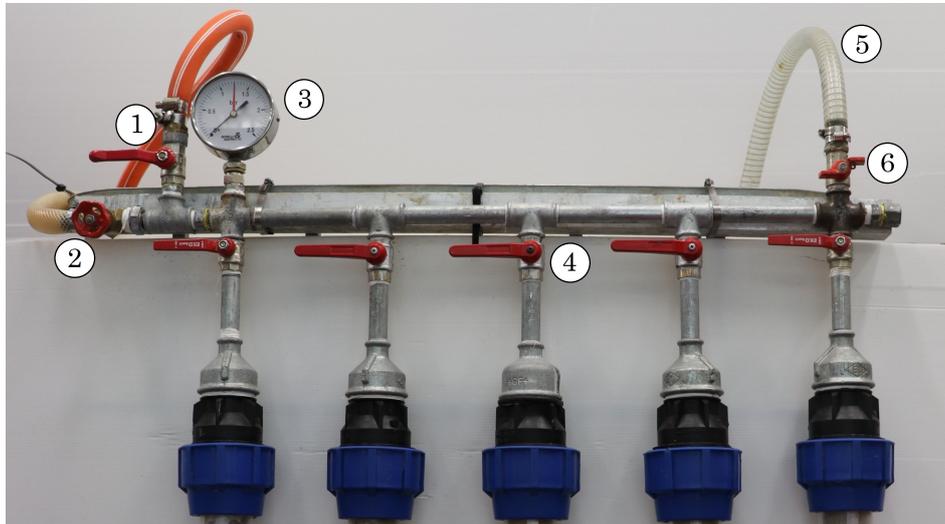


Figura 4.6: Apparato sperimentale

### 4.4.1 Impianto idraulico

L'impianto idraulico realizzato con condotte e raccordi in acciaio zincato dal diametro nominale di 1/2" può essere isolato grazie alla presenza di 8 volvole. Sono presenti 5 devia-

zioni verticali alle quali sono collegati i permeametri. La Figura 4.7 mostra le componenti principali:



**Figura 4.7:** Impianto idraulico

dove:

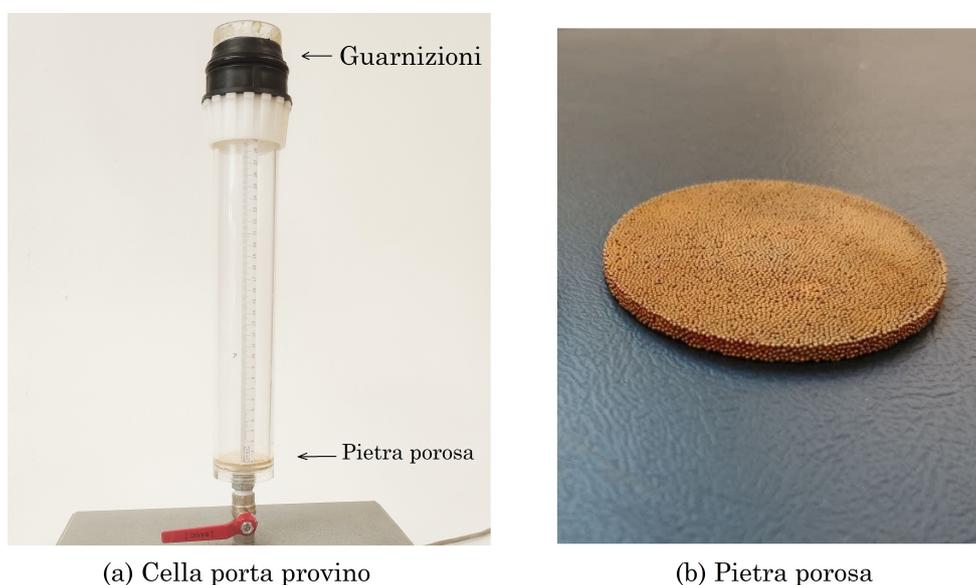
1. Valvola inlet;
2. Valvola outlet;
3. Manometro;
4. Valvole superiore;
5. Piezometro;
6. Valvola di sfiato.

La valvola di inlet collega l'impianto dell'apparato all'acquedotto raggiungendo una pressione massima di 3,4 bar. La valvola di outlet permette la regolazione della pressione all'interno dell'impianto mentre la valvola di sfiato è utilizzata in fase di riempimento per permettere la fuoriuscita di bolle d'aria.

#### **4.4.2 Celle porta provini**

Le celle, che ospitano i campioni di terreno durante la prova, sono state realizzate con un tubo di plexiglass dal diametro interno di 50 mm, spessore di 5 mm e lunghezza di 380 mm.

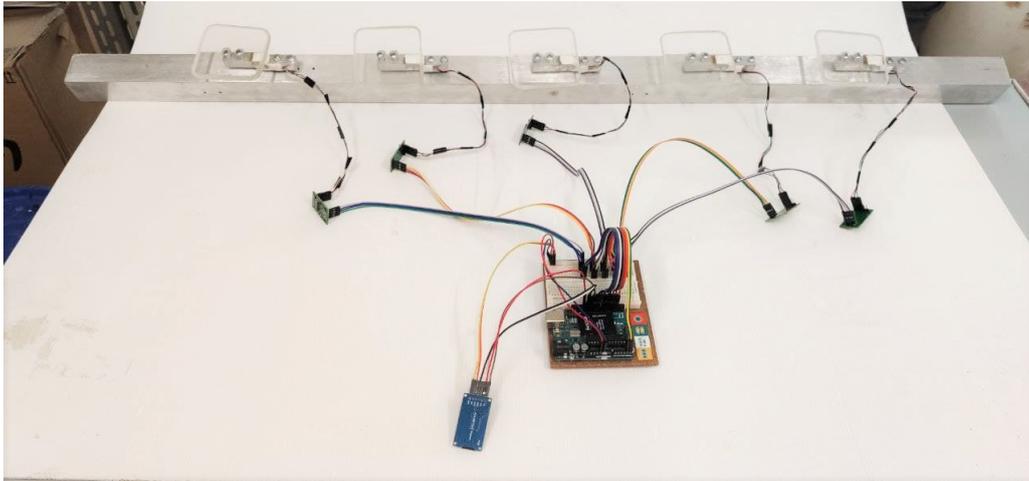
Sull'estremità inferiore è presente un disco di plexiglass sigillato dello stesso diametro del tubo. Nella parte centrale del disco c'è un foro filettato nel quale si innesta inferiormente una valvola. L'estremità superiore si innesta in un raccordo a compressione e grazie a un sistema di guarnizioni la tenuta idraulica e meccanica sono garantite. Dato il diametro interno della cella e facendo riferimento ai requisiti imposti dalla normativa tecnica ASTM [11], il diametro massimo della particella del terreno da caratterizzare dev'essere minore di 5 mm. Sulla superficie cilindrica esterna della cella sono incollate delle strisce millimetriche che permettono la lettura dell'altezza del provino. All'interno della cella è posizionata una pietra porosa alla base, in Figura 4.8 si mostrano la cella e la pietra porosa:



**Figura 4.8:** Foto della cella e della pietra porosa

#### 4.4.3 Sistema di acquisizione automatico

L'acquisizione automatica permette di monitorare la permeabilità nel tempo. Il sistema è composto da un profilato metallico sul quale sono state installate 5 celle di carico con una capacità di 3 kg. Dopodiché, una piastra è stata bullonata sulla parte superiore della cella di carico per appoggiare i contenitori che raccolgono l'acqua. Ogni cella è collegata a una scheda programmabile come mostrato in Figura 4.9. Durante la misura, è possibile visualizzare i trend dei pesi cumulati nel tempo in tempo reale per tutte le celle, i dati sono salvati su una scheda SD collegata alla scheda programmabile. La frequenza di acquisizione è di 1 Hz.



**Figura 4.9:** Sistema di acquisizione automatico

#### 4.5 Protocollo di prova

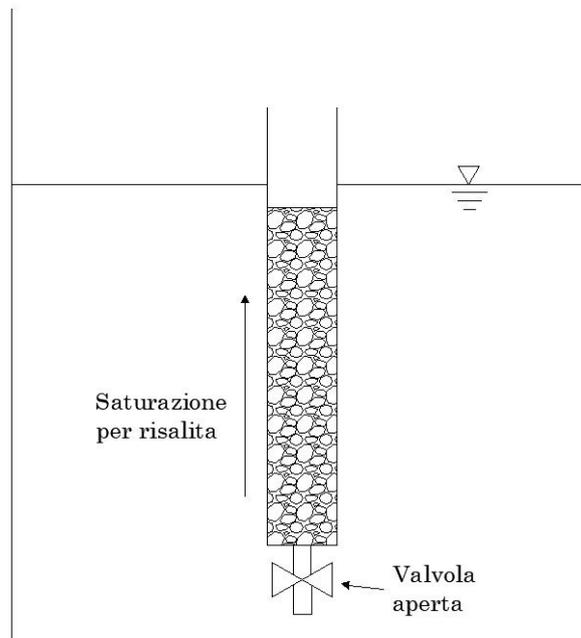
Le prove di permeabilità sono state eseguite su campioni non condizionati e su campioni condizionati seguendo una procedura ben definita. La procedura è uguale per entrambe le tipologie di campione. In particolare, il protocollo seguito prevede:

- Preparazione del terreno: il terreno da caratterizzare viene prelevato da cassette a tenuta ermetica per preservarne il contenuto d'acqua naturale. Il quantitativo di terreno da preparare dev'essere sufficiente a riempire il permeametro.
- Riempimento e compattazione: al fine di evitare la formazione di canali preferenziali i campioni vengono compattati all'interno del permeametro tramite 5 colpi di un maglio di massa  $m$  fatto cadere da altezza  $h$  ogni 5 cm di materiale sciolto introdotto. In particolare, l'energia di compattazione per singolo colpo è data una massa  $m = 433$  g lasciata cadere da un'altezza  $h = 51$  cm. Quantificando l'energia come  $E = m \cdot h \cdot n_{c/s} \cdot n_s$ , dove  $n_{c/s}$  rappresenta il numero di colpi per strato e  $n_s$  il numero di strati (7 strati per riempire un permeametro), si ottiene  $E = 75,81$  J ;



**Figura 4.10:** Riempimento della cella per strati

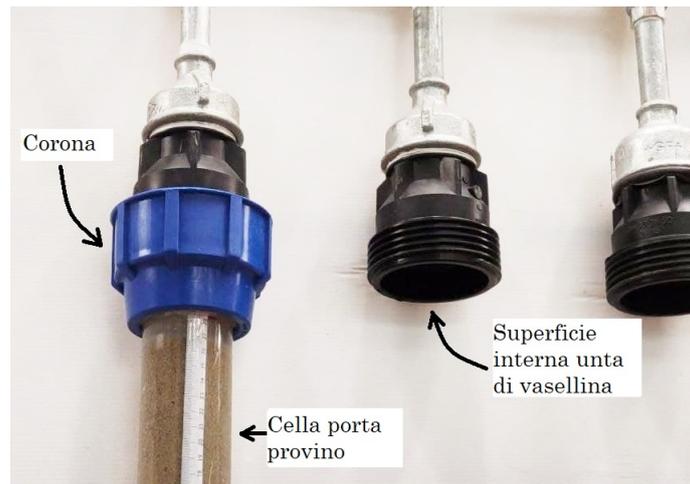
- Posizionamento pietra porosa: una volta riempito il permeametro, si posiziona una pietra porosa superiormente. Lo strumento dispone già di una pietra porosa nella parte inferiore (vedi Figura 4.8);
- Saturazione dei campioni: per le prove su campioni non condizionati, si procede con la saturazione aprendo la valvola inferiore della cella porta provini e immergendo la cella all'interno di una vasca piena d'acqua come mostrato in Figura 4.11;



**Figura 4.11:** Schema della saturazione dei provini

Per quanto riguarda i provini condizionati, questi si ritengono già saturi in quanto l'aria presente all'interno del materiale è dovuta al condizionamento.

- Installazione delle celle porta provino: per garantire un'installazione più agevole delle celle nei raccordi a compressione, si unge la parte interna del raccordo con della vasellina. Dopodiché, si avvita la corona che serra la cella all'impianto idraulico;



**Figura 4.12:** Installazione della cella porta provini

- Pre-riempimento dell'impianto idraulico: una volta installati tutti i permeametri si configurano le valvole per riempire l'impianto d'acqua. La configurazione in questa fase è la seguente:
  - Valvole inferiori chiuse;
  - Valvole superiore aperta;
  - Valvola di sfiato aperta;
  - Valvola outlet aperta;
- Riempimento dell'impianto idraulico: aprendo gradualmente la valvola inlet, l'impianto comincia a riempirsi d'acqua. Quando è visibile il battente d'acqua nel piezometro si chiude la valvola di sfiato.
- Applicazione della pressione: chiudendo la valvola outlet, la pressione aumenta nell'impianto fino a raggiungere la pressione di prova prestabilita (le pressioni utilizzate sono 0,4 bar, 0,8 bar, 1,2 bar, 1,6 bar e 2,0 bar);

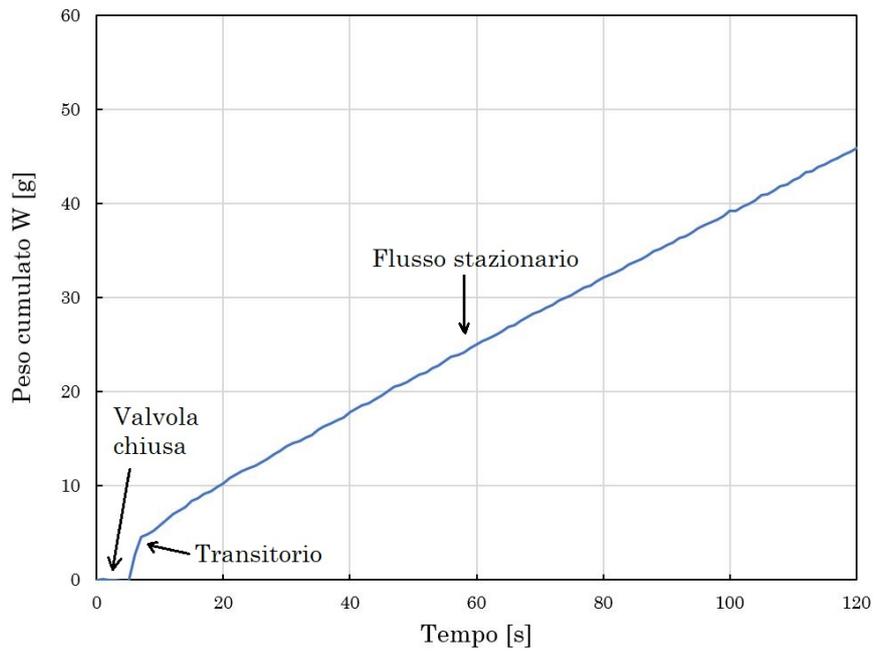
- Posizionamento del sistema di acquisizione: si colloca inferiormente ai permeametri facendo coincidere l'asse verticale del generico permeametro con la corrispondente cella di carico;
- Posizionamento di contenitori sulle celle di carico;
- Avviamento dell'acquisizione;
- Apertura delle valvole inferiori;
- Letture dell'altezza del provino.

Una volta aperte le valvole inferiori, nei contenitori si raccoglie l'acqua che attraversa i campioni di terreno e le celle di carico ne misurano il peso cumulato con frequenza di 1Hz.

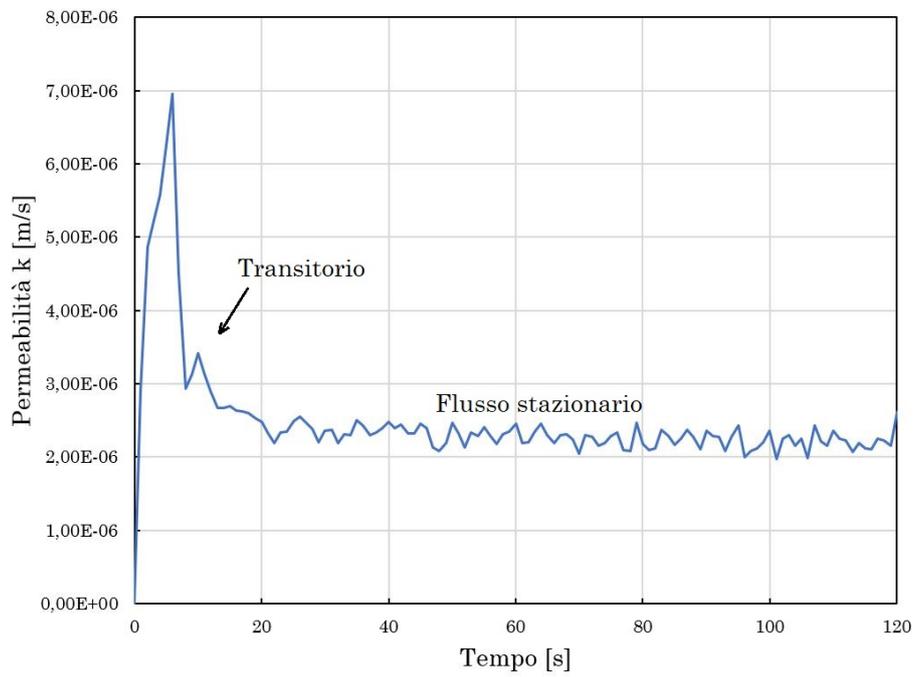
La permeabilità viene calcolata con la formula (4.4) descritta nel paragrafo 4.2. La portata  $Q$  si ricava dalla pendenza del peso cumulato nel tempo, ponendo particolare attenzione alla scelta dell'intervallo temporale. Osservando un output di prova, si possono identificare 3 finestre temporali:

- Valvola chiusa: il peso cumulato è nullo;
- Transitorio: il peso cumulato ha un andamento non lineare per via dell'apertura della valvola;
- Flusso stazionario: il peso cumulato ha un andamento lineare.

Un esempio di output è riportato nella Figura 4.13. Nota la geometria del permeametro, la lunghezza del campione di terreno, il carico idraulico e il peso cumulato nel tempo è possibile ricavare la permeabilità nel tempo (Figura 4.14). Il valore di permeabilità rappresentativo del campione è dato dalla media dei valori di permeabilità in condizione di flusso stazionario.



**Figura 4.13:** Output del peso cumulato di una generica prova



**Figura 4.14:** Output della permeabilità di una generica prova

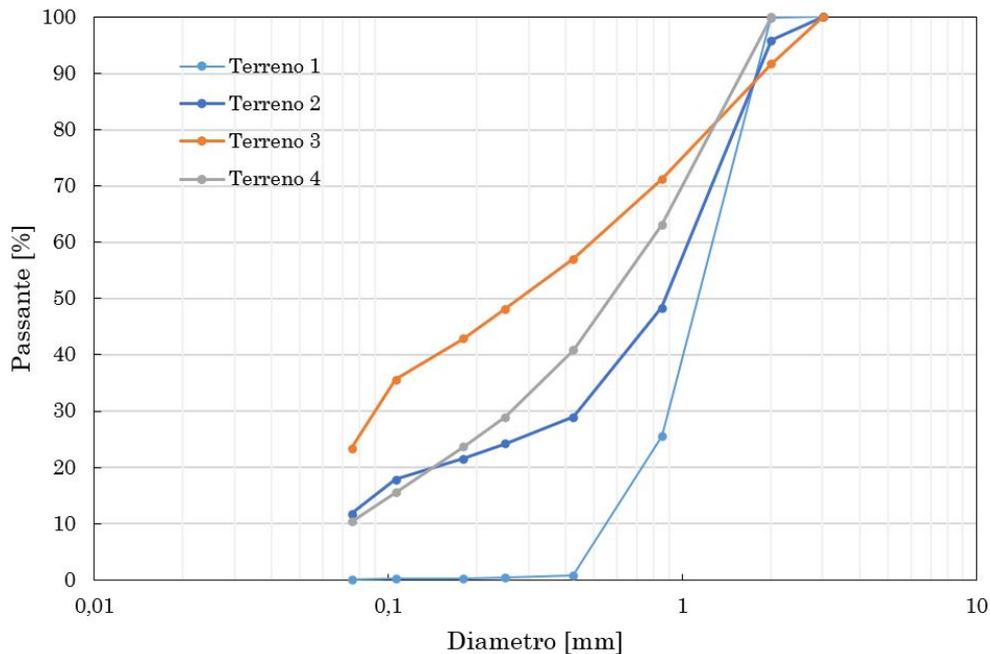
## 4.6 Calibrazione

La calibrazione ha come obiettivo la ricerca di eventuali limiti della strumentazione sperimentale. Come visto nel paragrafo precedente, la differenza tra il permeametro standard e l'apparato sperimentale è il diametro della cella che ospita il provino di terreno. Per la valutazione delle misure con i due strumenti sono stati analizzati 4 tipologie differenti di terreno. Rispettando il vincolo sulla granulometria, il diametro massimo del grano dev'essere compreso tra 8-12 volte il diametro dello strumento, i 4 terreni sono stati setacciati con un vaglio di 3mm prima delle prove. Le tipologie di terreno sono elencate nella seguente tabella:

Denominazione	Tipologia di terreno
Terreno 1	Sabbia monogranulare
Terreno 2	50% Sabbia monogranulare + 50% Terreno vulcanico
Terreno 3	Terreno vulcanico
Terreno 4	Terreno morenico

**Tabella 4.2:** Terreni utilizzati per la calibrazione

Si riportano le curve granulometriche dei terreni nella seguente figura:



**Figura 4.15:** Curve granulometriche dei terreni testati

Per ogni tipologia di terreno sono stati realizzati 6 campioni di cui 3 testati con il permeametro standard e 3 testati con il permeametro sperimentale. Facendo riferimento alla normativa ASTM D2434, la procedura di riempimento del permeametro consiste nell'introdurre il terreno per strati e compattarli di volta in volta. La procedura di compattazione è di tipo proctor, l'obbiettivo non è il raggiungimento del massimo grado di addensamento ma creare campioni di terreno omogenei. La pressione di tutte le prove è di  $p=0,5$  bar. In queste prove il sistema di acquisizione automatico non è stato utilizzato e si è adottato il classico metodo ovvero raccogliendo l'acqua infiltrata nel campione con un contenitore posto inferiormente ai permeametri. Noti tutti i parametri, sono stati misurati i grammi di acqua raccolti durante la prova e il tempo di riempimento. I valori di permeabilità sono riportati nelle seguenti tabelle:

Misure con il permeametro standard								
t [s]	W [g]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	A [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	L [m]	i [-]	k [m/s]
33,60	3077,00	9,16E-05	5,00	0,010	8,97E-03	0,380	13,16	6,82E-04
18,78	1787,00	9,52E-05	5,00	0,010	9,32E-03	0,380	13,16	7,09E-04
20,96	2017,00	9,62E-05	5,00	0,010	9,43E-03	0,345	14,49	6,51E-04
Misure con il permeametro sperimentale								
t [s]	W [g]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	A [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	L [m]	i [-]	k [m/s]
5,97	1190,00	1,99E-04	5,00	0,002	1,02E-01	0,260	76,92	1,32E-03
22,89	2881,00	1,26E-04	5,00	0,002	6,41E-02	0,270	18,52	3,46E-03
20,05	2032,00	1,01E-04	5,00	0,002	5,16E-02	0,275	18,18	2,84E-03

**Tabella 4.3:** Valori di permeabilità del Terreno 1

Misure con il permeametro standard								
t [s]	W [g]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	A [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	L [m]	i [-]	k [m/s]
71	199,13	2,80E-06	5,00	0,010	2,75E-04	0,285	17,54	1,57E-05
62	175,44	2,83E-06	5,00	0,010	2,77E-04	0,280	17,86	1,55E-05
85	203,78	2,40E-06	5,00	0,010	2,35E-04	0,270	18,52	1,27E-05
Misure con il permeametro sperimentale								
t [s]	W [g]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	A [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	L [m]	i [-]	k [m/s]
70	39,02	5,57E-07	5,00	0,002	2,84E-04	0,265	18,87	1,50E-05
65	43,73	6,73E-07	5,00	0,002	3,43E-04	0,240	20,83	1,64E-05
80	41,12	5,14E-07	5,00	0,002	2,62E-04	0,250	20,00	1,31E-05

**Tabella 4.4:** Valori di permeabilità del Terreno 2

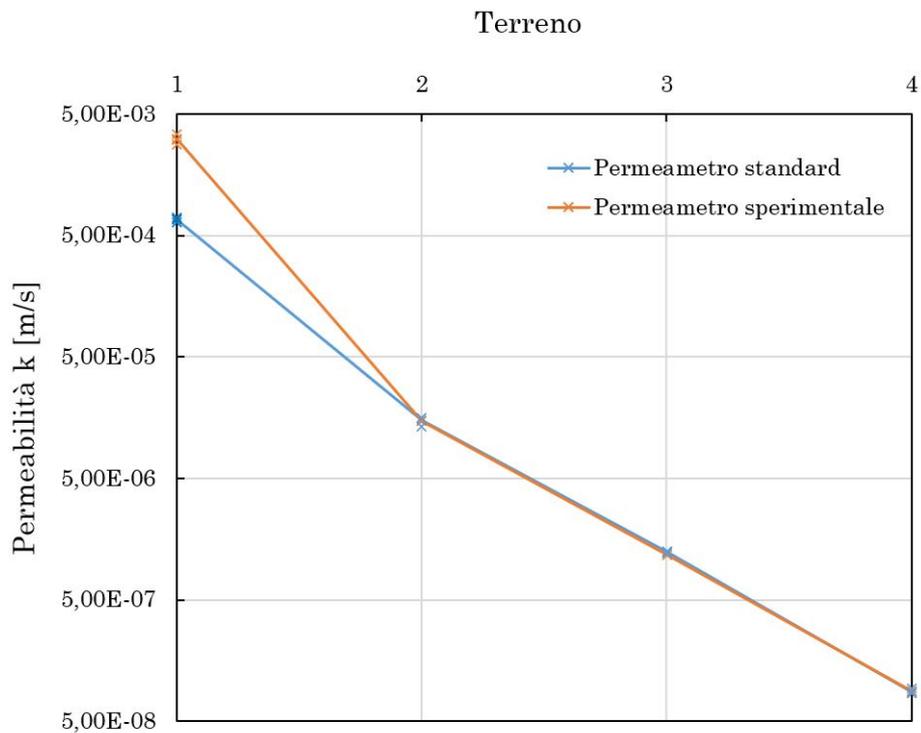
Misure con il permeametro standard								
t [s]	W [g]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	A [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	L [m]	i [-]	k [m/s]
600	130,9	2,18E-07	5,00	0,010	2,14E-05	0,290	17,24	1,24E-06
600	132,6	2,21E-07	5,00	0,010	2,17E-05	0,290	17,24	1,26E-06
600	127,5	2,13E-07	5,00	0,010	2,08E-05	0,290	17,24	1,21E-06
Misure con il permeametro sperimentale								
t [s]	W [g]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	A [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	L [m]	i [-]	k [m/s]
600	29,30	4,88E-08	5,00	0,002	2,49E-05	0,240	20,83	1,19E-06
600	28,86	4,81E-08	5,00	0,002	2,45E-05	0,230	21,74	1,13E-06
600	28,41	4,74E-08	5,00	0,002	2,41E-05	0,250	20,00	1,21E-06

**Tabella 4.5:** Valori di permeabilità del Terreno 3

Misure con il permeametro standard								
t [s]	W [g]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	A [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	L [m]	i [-]	k [m/s]
1200	16,08	1,34E-08	5,00	0,010	1,31E-06	0,325	15,38	8,53E-08
1200	17,21	1,43E-08	5,00	0,010	1,41E-06	0,330	15,15	9,27E-08
1200	16,78	1,40E-08	5,00	0,010	1,37E-06	0,310	16,13	8,49E-08
Misure con il permeametro sperimentale								
t [s]	W [g]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	A [m <sup>2</sup> ]	v [m/s]	L [m]	i [-]	k [m/s]
1200	4,37	3,64E-09	5,00	0,002	1,85E-06	0,235	21,28	8,72E-08
1200	4,03	3,36E-09	5,00	0,002	1,71E-06	0,245	20,41	8,38E-08
1200	4,78	3,98E-09	5,00	0,002	2,03E-06	0,230	21,74	9,33E-08

**Tabella 4.6:** Valori di permeabilità del Terreno 4

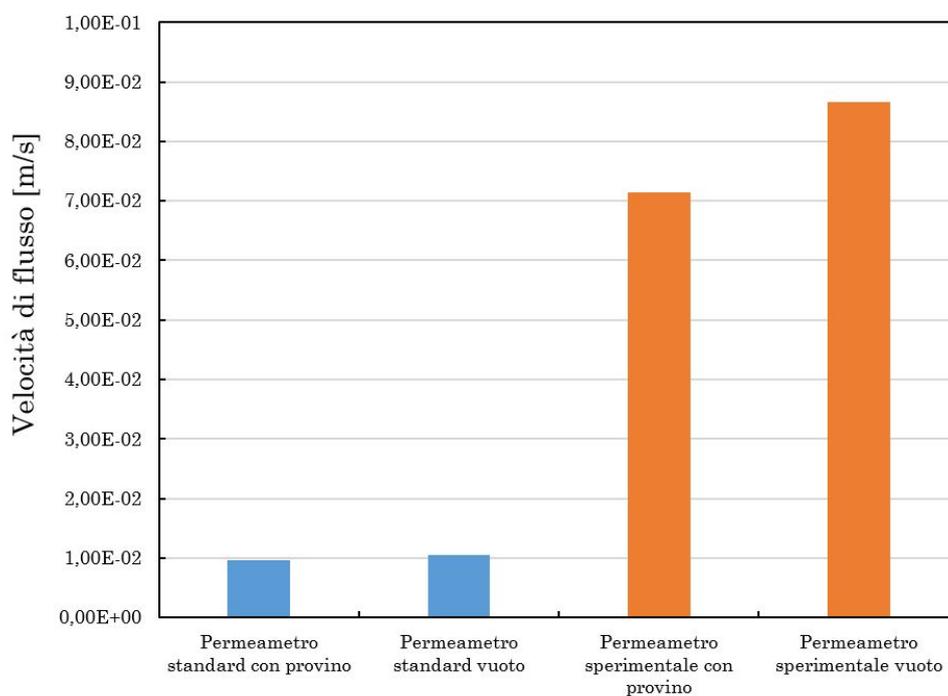
Nella Figura 4.16 si riassumono i valori di permeabilità delle 4 tipologie di terreno. Dal grafico si evince un discostamento della misura di permeabilità per il Terreno 1, indagando con ulteriori prove si è giunti alla conclusione che per terreni con permeabilità elevata come il caso del Terreno 1 c'è un'influenza da parte dello strumento.



**Figura 4.16:** Confronto delle misure

La valutazione dell'influenza dello strumento è avvenuta analizzando indirettamente le perdite di carico registrate in due configurazioni differenti. Valutando la velocità di deflusso attraverso il solo permeametro e attraverso il permeametro riempito di terreno è possibile scorporare i due contributi per valutarne l'entità. Infatti, quanto più le velocità di deflusso nelle due configurazioni sono simili tanto minore è il contributo del terreno e minore è la precisione di misura.

La pressione di prova è  $p = 0,5$  bar, in una prima fase è stata misurata la velocità di flusso del permeametro standard facendo passare acqua in pressione senza il campione di terreno. La stessa procedura è stata eseguita per l'apparato sperimentale. Il risultato è mostrato in Figura 4.17:



**Figura 4.17:** Confronto tra le velocità di flusso

Innanzitutto, è possibile osservare una differenza tra le velocità di flusso del permeametro standard e quelle del permeametro sperimentale dovute alle differenti geometrie.

Il permeametro sperimentale, a parità di carico idraulico, ha una velocità di filtrazione più elevata a causa della sezione più grande della luce di fondo (3/8" per il permeametro sperimentale e 1/4" per il permeametro standard). Le velocità di flusso nel permeametro standard sono uguali indipendentemente dalla presenza o meno di Terreno 1.

Da questo risultato si evince che il permeametro standard non è idoneo per la valutazione della permeabilità nel Terreno 1.

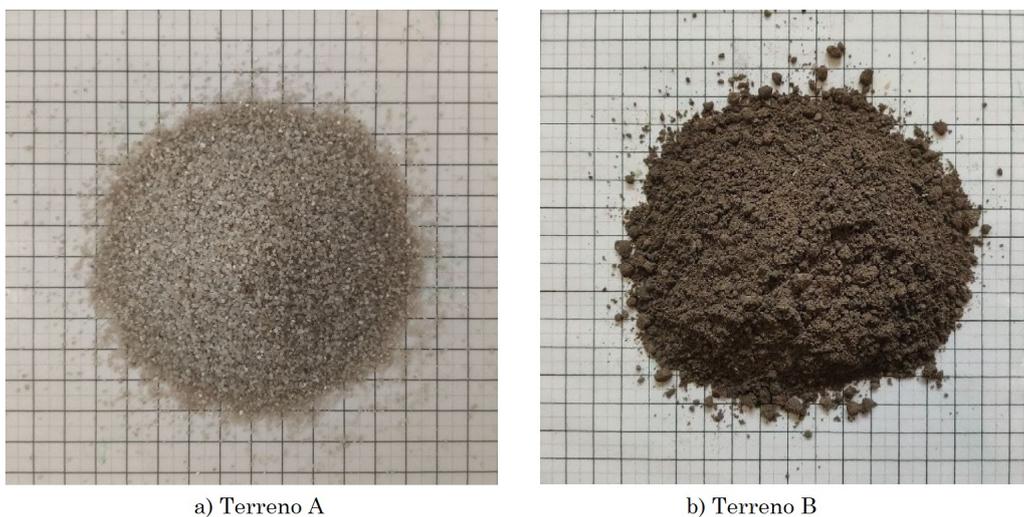
## 5 Risultati

### 5.1 Caratterizzazione dei terreni da testare

I terreni utilizzati per confezionare le miscele da utilizzare nelle prove sono stati scelti in quanto le loro caratteristiche sono molto diverse. Le due tipologie di terreno sono riportate nella seguente tabella:

Denominazione	Tipologia di terreno
Terreno A	Sabbia monogranulare
Terreno B	Terreno vulcanico

**Tabella 5.1:** Terreni utilizzati per la prove di permeabilità



**Figura 5.1:** Terreni utilizzati per la prove di permeabilità

Miscelando il terreno A con il terreno B, si sono ottenute diverse varianti di terreno. Le miscele tra le due tipologie di terreno, sono state definite sulla base di uno studio preliminare. La miscelazione è avvenuta secondo diverse percentuali in peso del terreno A e del terreno B. I terreni ottenuti da questa combinazione d'ora in poi saranno denominati nel seguente modo:

Terreno AxxByy

dove:

- xx rappresenta la percentuale in peso del terreno A;
- yy rappresenta la percentuale in peso del terreno B.

Per ogni terreno, la densità è stata determinata con la media di 3 valori ottenuti come segue. La procedura per la determinazione della densità prevede di riempire un contenitore di volume noto. Il riempimento avviene in modo graduale assicurandosi di introdurre il materiale per strati omogenei. Rapportando il peso misurato con il volume noto del contenitore si ottengono i valori di densità.

I valori delle densità si riferiscono a terreni con un contenuto in acqua naturale riportato nel paragrafo successivo (Tabella 5.3). In Tabella 5.2 si riportano i valori:

Terreno	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	Volume	Densità
[%]	[g]	[g]	[g]	[cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
B	1351,41	1278,83	1318,88	913	1,43
A20B80	1383,10	1371,08	1408,49	913	1,63
A35B65	1450,53	1438,07	1422,46	913	1,52
A50B50	1496,94	1515,75	1471,95	913	1,57
A65B35	1483,77	1475,37	1479,65	913	1,63
A80B20	1505,68	1503,90	1463,55	913	1,62
A	1509,38	1471,62	1478,88	913	1,63

**Tabella 5.2:** Valutazione dei pesi specifici delle miscele

### 5.1.1 Caratterizzazione del contenuto in acqua

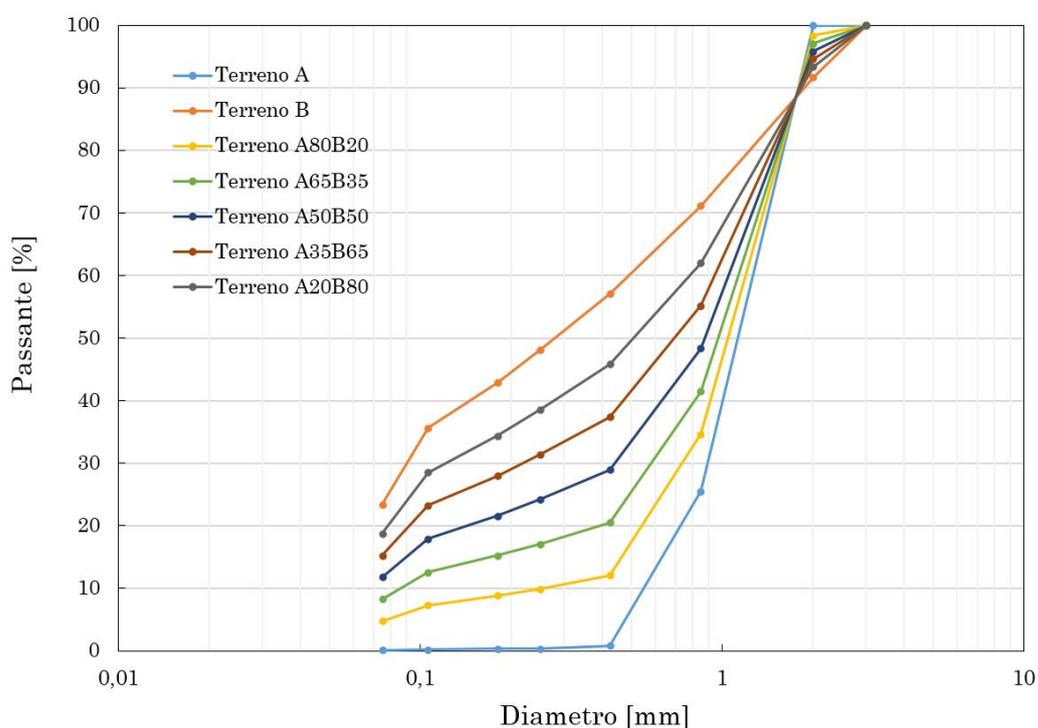
Come già detto precedentemente, il terreno B si presenta con un certo contenuto d'acqua che bisogna calcolare al fine di ottenere tutte le informazioni utili per un buon condizionamento. Prelevando dei campioni di rappresentativi di terreno A e di terreno B si è valutato il contenuto d'acqua secondo quanto prescritto dalla norma ASTM. I valori sono riportati in Tabella 5.3:

Campione	Tara	Lordo iniziale	Lordo finale	Netto iniziale	Netto finale	Variazione	Contenuto in acqua
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]
A	14,78	177,32	176,96	162,54	162,18	0,34	0,2
B	12,37	130,26	123,53	117,89	111,16	6,73	6,0

**Tabella 5.3:** Contenuto in acqua dei terreni

### 5.1.2 Caratterizzazione granulometrica

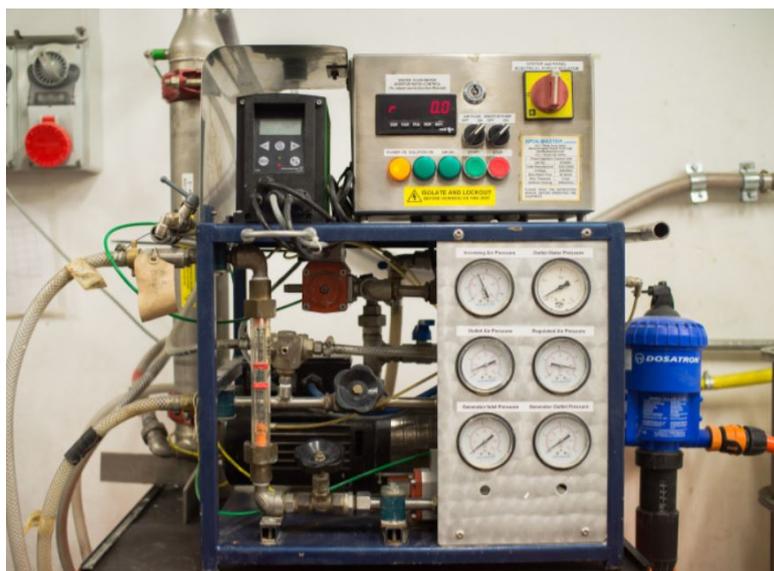
La sabbia monogranulare, denominata come terreno A ha le dimensioni massime dei grani minori di 2 mm mentre il terreno B ha frazioni granulometriche grossolane maggiori di 20 mm. Affinché i terreni possano essere testati con l'apparato sperimentale, il diametro massimo dev'essere inferiore a 5 mm. Dopo la miscelazione, si sono ricavate le curve granulometriche per ogni terreno considerato. Le curve granulometriche del terreno A e del terreno B e quelle delle miscele ottenute sono riportate in Figura 5.2.



**Figura 5.2:** Curve granulometriche delle miscele di terreni

### 5.1.3 Condizionamento dei terreni

Per le prove di permeabilità su terreni condizionati è stata utilizzata della schiuma prodotta da un generatore presente in laboratorio. L'apparecchiatura mostrata in Figura 5.3, permette di controllare la porta d'acqua e aria necessarie per creare la schiuma. Sulla destra del generatore, una pompa per il dosaggio permette la regolazione della concentrazione volumetrica di tensioattivo. È possibile generare campioni di schiuma con Foam Expansion Ratio (FER) definito settando i parametri del generatore. Per evitare piccole fluttuazioni del FER durante la generazione di schiuma è importante tenere sotto controllo tale parametro. In particolare, il valore del FER valutato come rapporto tra il peso e il volume di schiuma (si considera un peso specifico del liquido generatore unitario). Poiché questa misura può essere seguita solo in batch viene eseguita una misura prima e dopo la generazione di schiuma.



**Figura 5.3:** Generatore di schiuma prodotta da Spoilmaster Ltd (GB)

Per il condizionamento di tutti i campioni di terreno, si è utilizzata una concentrazione del tensioattivo  $c = 2\%$  e un  $FER = 15$ .

Il tensioattivo utilizzato per generare la schiuma è un prodotto commerciale ampiamente utilizzato nelle industrie dello scavo di gallerie. I test di semivita sulla schiuma hanno fornito i seguenti valori:

Concentrazione	FER	t <sub>50,1</sub>	t <sub>50,2</sub>	t <sub>50,3</sub>	t <sub>50</sub>
[%]	[-]	[s]	[s]	[s]	[s]
2	15	184	166	169	173

**Tabella 5.4:** Valori delle prove di semivita

Il condizionamento dei terreni richiede un valore minimo di contenuto d'acqua aggiunto che dipende dalla granulometria del terreno. Insieme al Foam Injection Ratio (FIR), la quantità d'acqua aggiunta determina il comportamento del materiale condizionato. Facendo riferimento alla Figura 3.7, si può osservare come sia importante inserire le quantità di acqua e di schiuma corrette.

Per questa campagna di prove, si è scelto un contenuto d'acqua aggiunto  $w_{add} = 5\%$  per il Terreno 1 e  $w_{add} = 10\%$  per il Terreno 2. Di conseguenza, per ogni miscela si è scelto di aggiungere un contenuto d'acqua proporzionale alle frazioni costituenti. In Tabella 5.29 si mostrano i parametri del condizionamento per campioni di 2700 g:

Terreno	B	A20B80	A35B65	A50B50	A65B35	A80B20
W [g]	2700	2700	2700	2700	2700	2700
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,43	1,52	1,57	1,63	1,62	1,63
Volume [cm <sup>3</sup> ]	1888,11	1776,32	1719,75	1656,44	1666,67	1656,44
FER [-]	15	15	15	15	15	15
FIR [%]	30%	30%	30%	30%	30%	30%
W <sub>foam</sub> [g]	37,76	35,53	34,39	33,13	33,33	33,13
w <sub>add</sub> Terreno B [g]	254,72	203,77	165,57	127,36	89,15	50,94
w <sub>add</sub> Terreno A [g]	0,00	27,00	47,25	67,50	87,75	108,00
w <sub>add</sub> [g]	254,72	230,77	212,82	194,86	176,90	158,94

**Tabella 5.5:** Parametri del condizionamento

Nelle seguenti tabelle si mostrano i risultati delle prove di slump eseguite sui terreni condizionati come descritto in Tabella 5.29 utilizzando la procedura definita da (Peila 2014).

Terreno A		Foto
Peso del campione [kg]	8	
Acqua aggiunta [%]	5,00	
Acqua aggiunta [g]	400,00	
c [%]	2,00	
FER	15	
FIR [%]	30	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,63	
<b>Slump [cm]</b>	<b>22</b>	

**Tabella 5.6:** Prova di slump del Terreno A

Terreno A80B20		Foto
Peso del campione [kg]	8	
Acqua aggiunta [%]	6,00	
Acqua aggiunta [g]	470,94	
c [%]	2,00	
FER	15	
FIR [%]	30	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,63	
<b>Slump [cm]</b>	<b>21</b>	

**Tabella 5.7:** Prova di slump del Terreno A80B20

Terreno A65B35		Foto
Peso del campione [kg]	8	
Acqua aggiunta [%]	6,70	
Acqua aggiunta [g]	524,15	
c [%]	2,00	
FER	15	
FIR [%]	30	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,62	
<b>Slump [cm]</b>	<b>19</b>	

**Tabella 5.8:** Prova di slump del Terreno A65B35

Terreno A50B50		Foto
Peso del campione [kg]	8	
Acqua aggiunta [%]	7,40	
Acqua aggiunta [g]	577,36	
c [%]	2,00	
FER	15	
FIR [%]	30	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,62	
<b>Slump [cm]</b>	<b>18</b>	

**Tabella 5.9:** Prova di slump del Terreno A50B50

Terreno A35B65		Foto
Peso del campione [kg]	8	
Acqua aggiunta [%]	8,20	
Acqua aggiunta [g]	630,57	
c [%]	2,00	
FER	15	
FIR [%]	30	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,57	
<b>Slump [cm]</b>	<b>14</b>	

**Tabella 5.10:** Prova di slump del Terreno A35B65

Terreno A20B80		Foto
Peso del campione [kg]	8	
Acqua aggiunta [%]	9,00	
Acqua aggiunta [g]	683,77	
c [%]	2,00	
FER	15	
FIR [%]	30	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,52	
<b>Slump [cm]</b>	<b>13</b>	

**Tabella 5.11:** Prova di slump del Terreno A20B20

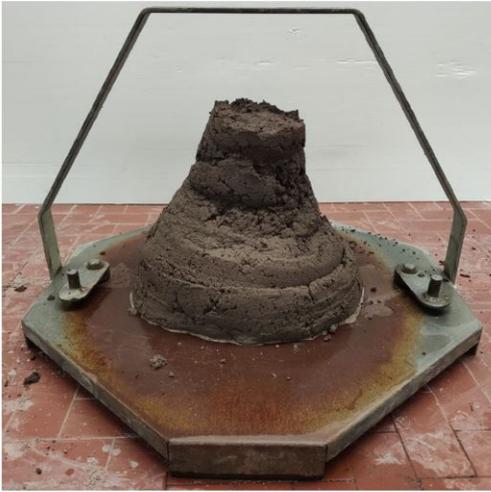
Terreno B		Foto
Peso del campione [kg]	8	
Acqua aggiunta [%]	10,00	
Acqua aggiunta [g]	754,72	
c [%]	2,00	
FER	15	
FIR [%]	30	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,43	
<b>Slump [cm]</b>	<b>11</b>	

Tabella 5.12: Prova di slump del Terreno B

## 5.2 Valutazione della riduzione di permeabilità

La riduzione della permeabilità, discussa nel capitolo 4.2.2, è stata valutata tramite prove di permeabilità sia su campioni di terreno non condizionato che su campioni condizionanti. Le prove sono state eseguite seguendo la procedura descritta nel paragrafo 4.5 utilizzando la strumentazione sperimentale. In particolare, sono state misurate le permeabilità di 3 campioni per ogni tipologia di terreno e per ogni carico idraulico. I risultati ottenuti sono mostrati nelle seguenti tabelle, dove le seguenti quantità rappresentano:

- $p$  la pressione di prova;
- $k_i$  la permeabilità dell' $i$ -esimo campione;
- $k_m = \sum_i^N k_i$  la permeabilità media, con  $N = 3$ ;
- $\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_i^N (k_i - k_m)^2}{N}}$  la deviazione standard delle misure.

Il parametri del condizionamento delle seguenti prove sono mostrati nella Tabella 5.5.

$p$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_m$	$\sigma_k$
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	7,60E-07	4,61E-07	1,49E-06	6,10E-07	5,27E-07
1,6	7,57E-07	5,18E-07	1,43E-06	6,37E-07	4,76E-07
1,2	7,48E-07	5,42E-07	1,33E-06	6,45E-07	4,11E-07
0,8	7,72E-07	5,73E-07	1,31E-06	6,72E-07	3,83E-07
0,4	7,64E-07	5,88E-07	1,08E-06	6,76E-07	2,50E-07

**Tabella 5.13:** Valori di permeabilità del Terreno B non condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	1,54E-07	1,13E-07	1,77E-07	1,48E-07	3,27E-08
1,6	1,63E-07	1,40E-07	1,79E-07	1,61E-07	1,98E-08
1,2	1,51E-07	1,54E-07	1,85E-07	1,63E-07	1,86E-08
0,8	1,52E-07	1,51E-07	1,90E-07	1,64E-07	2,23E-08
0,4	1,60E-07	1,73E-07	2,28E-07	1,87E-07	3,61E-08

**Tabella 5.14:** Valori di permeabilità del Terreno B condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	1,39E-06	1,35E-06	1,32E-06	1,32E-06	3,21E-08
1,6	1,23E-06	1,19E-06	1,15E-06	1,21E-06	3,56E-08
1,2	1,15E-06	1,08E-06	1,07E-06	1,12E-06	4,25E-08
0,8	1,12E-06	1,09E-06	1,09E-06	1,10E-06	1,82E-08
0,4	9,86E-07	9,41E-07	9,47E-07	9,63E-07	2,46E-08

**Tabella 5.15:** Valori di permeabilità del Terreno A20B80 non condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	3,65E-07	3,44E-07	3,06E-07	3,06E-07	3,01E-08
1,6	2,88E-07	2,30E-07	2,24E-07	2,59E-07	3,55E-08
1,2	2,08E-07	1,80E-07	1,79E-07	1,94E-07	1,65E-08
0,8	2,02E-07	1,72E-07	1,73E-07	1,87E-07	1,69E-08
0,4	2,11E-07	1,82E-07	2,13E-07	1,97E-07	1,75E-08

**Tabella 5.16:** Valori di permeabilità del Terreno A20B80 condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	1,89E-06	2,05E-06	2,28E-06	2,07E-06	1,96E-07
1,6	1,71E-06	1,89E-06	2,09E-06	1,90E-06	1,89E-07
1,2	1,57E-06	1,68E-06	1,91E-06	1,72E-06	1,73E-07
0,8	1,54E-06	1,53E-06	1,77E-06	1,61E-06	1,38E-07
0,4	1,42E-06	1,57E-06	1,81E-06	1,60E-06	1,94E-07

**Tabella 5.17:** Valori di permeabilità del Terreno A35B65 non condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	3,48E-07	4,49E-07	4,19E-07	4,05E-07	5,20E-08
1,6	3,37E-07	3,57E-07	3,58E-07	3,50E-07	1,17E-08
1,2	3,21E-07	3,20E-07	3,07E-07	3,16E-07	7,60E-09
0,8	3,23E-07	2,78E-07	2,92E-07	2,98E-07	2,27E-08
0,4	2,74E-07	2,30E-07	3,17E-07	2,74E-07	4,35E-08

**Tabella 5.18:** Valori di permeabilità del Terreno A35B65 condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	3,60E-06	3,62E-06	3,51E-06	3,61E-06	6,01E-08
1,6	3,16E-06	3,10E-06	3,02E-06	3,13E-06	7,24E-08
1,2	2,99E-06	2,92E-06	2,82E-06	2,95E-06	8,41E-08
0,8	2,88E-06	2,86E-06	2,77E-06	2,87E-06	6,08E-08
0,4	3,18E-06	2,99E-06	2,92E-06	3,09E-06	1,35E-07

**Tabella 5.19:** Valori di permeabilità del Terreno A50B50 non condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	8,39E-07	9,33E-07	7,27E-07	8,33E-07	1,03E-07
1,6	8,5E-07	9,42E-07	7,5E-07	8,47E-07	9,59E-08
1,2	6,67E-07	9,06E-07	7,27E-07	7,66E-07	1,24E-07
0,8	5,78E-07	8,24E-07	6,59E-07	6,87E-07	1,25E-07
0,4	5,54E-07	7,84E-07	8,1E-07	7,16E-07	1,41E-07

**Tabella 5.20:** Valori di permeabilità del Terreno A50B50 condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	4,59E-06	5,70E-06	4,78E-06	5,15E-06	5,90E-07
1,6	4,32E-06	5,57E-06	4,91E-06	4,95E-06	6,25E-07
1,2	4,06E-06	5,01E-06	4,83E-06	4,53E-06	5,01E-07
0,8	4,17E-06	5,21E-06	4,87E-06	4,69E-06	5,31E-07
0,4	4,90E-06	5,65E-06	5,50E-06	5,28E-06	3,93E-07

**Tabella 5.21:** Valori di permeabilità del Terreno A65B35 non condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	6,87E-07	4,84E-07	6,44E-07	5,85E-07	1,07E-07
1,6	5,29E-07	3,18E-07	4,46E-07	4,23E-07	1,06E-07
1,2	4,37E-07	2,45E-07	3,37E-07	3,41E-07	9,61E-08
0,8	3,51E-07	2,06E-07	2,42E-07	2,79E-07	7,56E-08
0,4	3,17E-07	1,89E-07	2,11E-07	2,53E-07	6,85E-08

**Tabella 5.22:** Valori di permeabilità del Terreno A65B65 condizionata

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	3,99E-05	3,95E-05	4,33E-05	3,97E-05	2,09E-06
1,6	3,10E-05	3,69E-05	3,94E-05	3,40E-05	4,32E-06
1,2	3,29E-05	4,79E-05	5,18E-05	4,04E-05	9,95E-06
0,8	4,08E-05	5,57E-05	5,83E-05	4,83E-05	9,44E-06
0,4	5,02E-05	7,96E-05	7,31E-05	6,49E-05	1,55E-05

**Tabella 5.23:** Valori di permeabilità del Terreno A80B20 non condizionato

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	-	-	-	-	-
1,6	1,85E-03	1,75E-03	1,40E-03	1,80E-03	2,39E-04
1,2	2,08E-03	1,98E-03	1,58E-03	2,03E-03	2,65E-04
0,8	2,34E-03	2,28E-03	1,84E-03	2,31E-03	2,76E-04
0,4	2,93E-03	2,81E-03	2,31E-03	2,87E-03	3,27E-04

**Tabella 5.24:** Valori di permeabilità del Terreno A non condizionato

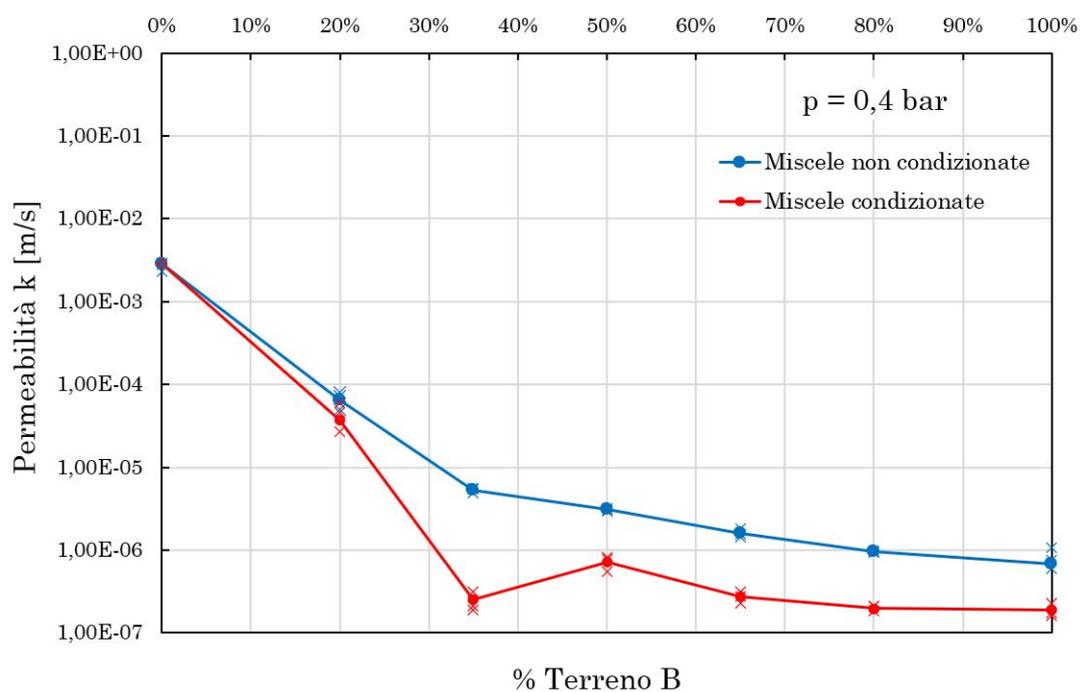
Il Terreno A risulta non condizionabile (Tabella 5.7). Infatti, la sua granulometria non permette di trattenere il condizionante e la separazione è stata osservata nella prova di slump (Figura 5.4). Di conseguenza, i valori di permeabilità inerenti ai campioni condizionati non sono riportati.



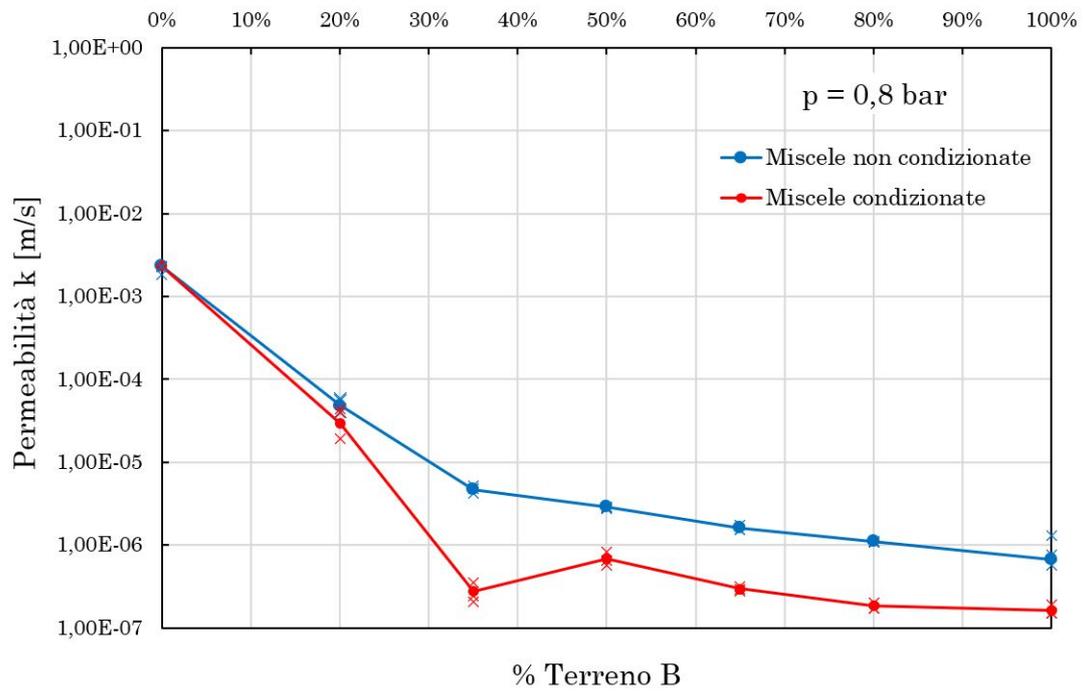
**Figura 5.4:** Particolare della prova di slump del Terreno A

### 5.2.1 Interpretazione dei risultati

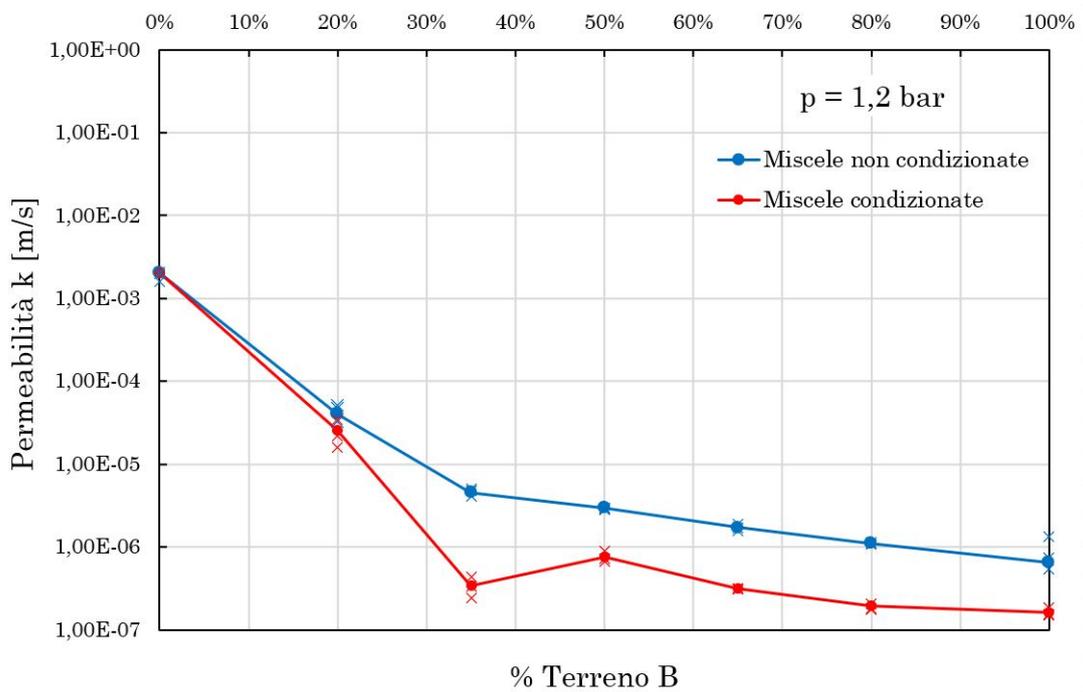
Noti i valori di permeabilità di tutti i campioni, si mostrano i risultati su grafici nei quali si osserva l'andamento della permeabilità in funzione della percentuale di Terreno B nella miscela (Figure 5.5 - 5.9). I valori estremi nel grafico rappresentano le permeabilità dei terreni costituenti. Per ogni carico idraulico, la permeabilità decresce all'aumentare della percentuale del Terreno B.



**Figura 5.5:** Pemeabilità delle miscele a  $p=0,4$  bar



**Figura 5.6:** Pemeabilità delle miscele a  $p=0,8 \text{ bar}$



**Figura 5.7:** Pemeabilità delle miscele a  $p=1,2 \text{ bar}$

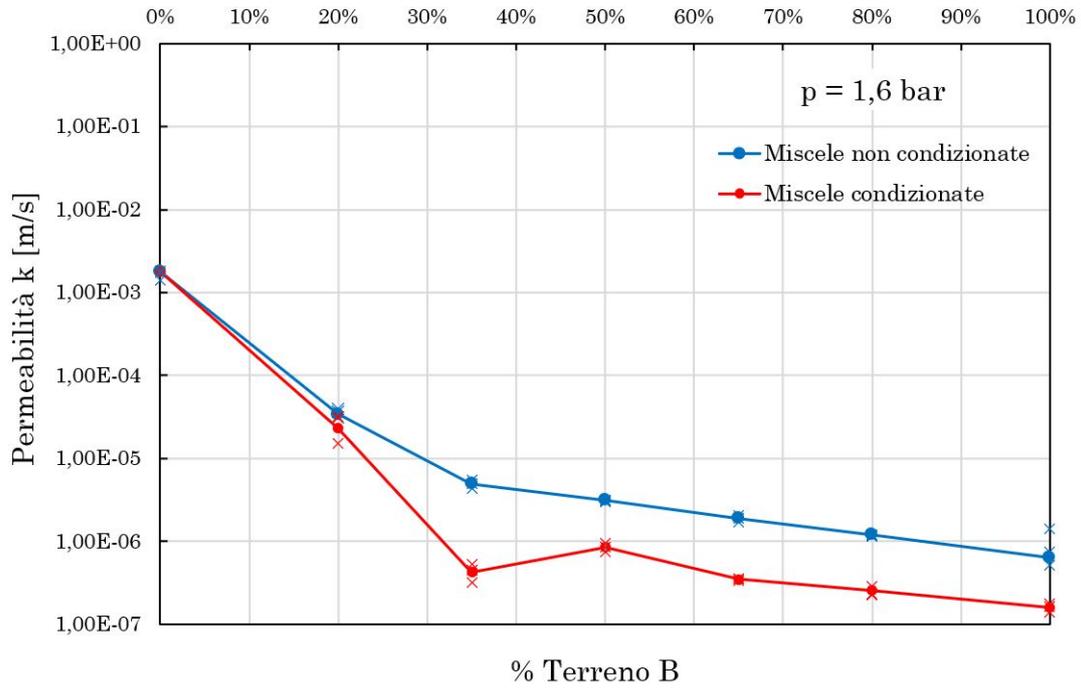


Figura 5.8: Pemeabilità delle miscele a  $p=1,6$  bar

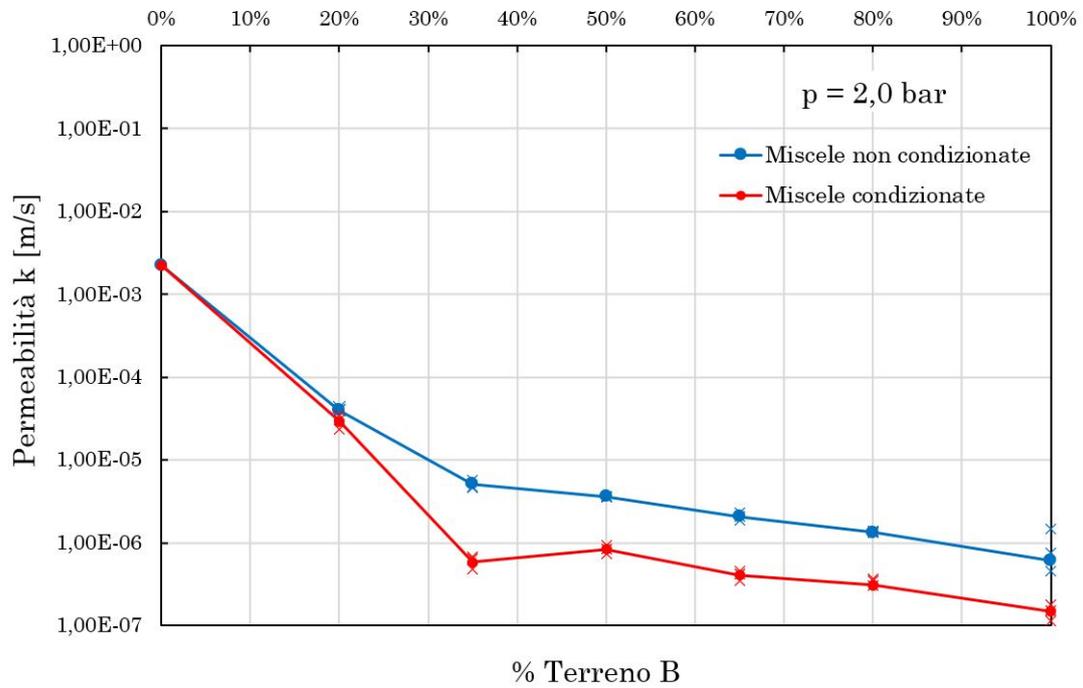
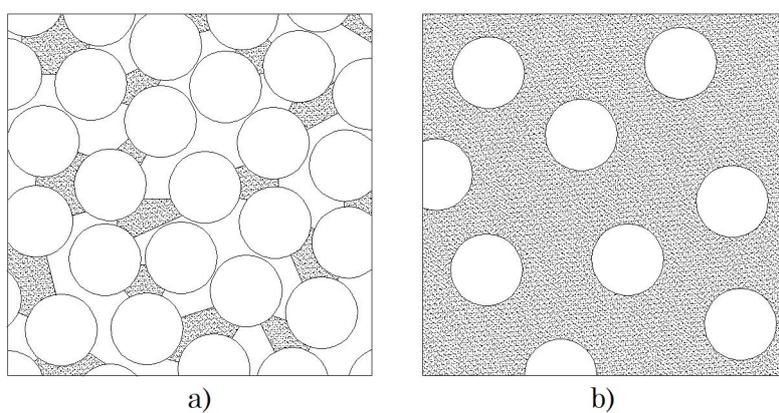


Figura 5.9: Pemeabilità delle miscele a  $p=2,0$  bar

Da questi risultati, si ipotizza che l'andamento decrescente sia dovuto all'interazione tra il Terreno A e il Terreno B. La Figura 5.10 mostra una rappresentazione sintetica di ciò che si ipotizza che possa succedere al variare della percentuale di B. In particolare, in Figura 5.10a si riporta la situazione a basso contenuto di Terreno B che per via della sua scarsa quantità non è in grado di riempire i vuoti interstiziali tra i grani del Terreno A lasciando così una serie di canali di filtrazione. In Figura 5.10b, la percentuale di Terreno B è dominante e riempie i vuoti interstiziali poichè i grani del Terreno A sono dispersi nel campione.



**Figura 5.10:** Schemi di impacchettamento dei grani

La riduzione della permeabilità, per terreni condizionati con una percentuale di Terreno B superiore al 50%, ha lo stesso andamento dei campioni non condizionati. Il Terreno A65B35 presenta una riduzione della permeabilità più accentuata rispetto a quanto avviene per gli altri terreni. Questo fenomeno avviene presumibilmente per via di un maggiore grado di impacchettamento tra Terreno A, Terreno B e bolle d'aria del condizionamento.

### 5.3 Influenza del FIR

Per la valutazione dell'influenza del Foam Injection Ratio (FIR) è stata effettuata una serie di prove su due terreni. Le prove consistono nel condizionare il Terreno A35B65 e il Terreno A65B35 utilizzando diversi FIR. Sono stati realizzati 3 campioni per tipologia di terreno per ciascun FIR utilizzato. Le permeabilità sono state misurate con carichi idraulici definiti nel capitolo 4.5.

I parametri del condizionamento sono riassunti nelle seguenti tabelle:

Terreno	A35B65	A65B35
W [g]	2700	2700
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,57	1,62
Volume [cm <sup>3</sup> ]	1719,75	1666,67
FER [-]	15	15
FIR [%]	10%	15%
W <sub>foam</sub> [g]	11,46	17,20
w <sub>add</sub> [g]	212,82	176,90

**Tabella 5.25:** Parametri del condizionamento FIR = 10% - 15%

Terreno	A35B65	A65B35
W [g]	2700	2700
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,57	1,62
Volume [cm <sup>3</sup> ]	1719,75	1666,67
FER [-]	15	15
FIR [%]	20%	20%
W <sub>foam</sub> [g]	22,93	22,22
w <sub>add</sub> [g]	212,82	176,90

**Tabella 5.26:** Parametri del condizionamento FIR = 20%

Terreno	A35B65	A65B35
W [g]	2700	2700
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,57	1,62
Volume [cm <sup>3</sup> ]	1719,75	1666,67
FER [-]	15	15
FIR [%]	30%	30%
W <sub>foam</sub> [g]	34,39	33,33
w <sub>add</sub> [g]	212,82	176,90

**Tabella 5.27:** Parametri del condizionamento FIR = 30%

Terreno	A35B65	A65B35
W [g]	2700	2700
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,57	1,62
Volume [cm <sup>3</sup> ]	1719,75	1666,67
FER [-]	15	15
FIR [%]	40%	40%
W <sub>foam</sub> [g]	45,86	44,44
w <sub>add</sub> [g]	212,82	176,90

**Tabella 5.28:** Parametri del condizionamento FIR = 40%

Terreno	A35B65	A65B35
W [g]	2700	2700
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,57	1,62
Volume [cm <sup>3</sup> ]	1719,75	1666,67
FER [-]	15	15
FIR [%]	50%	50%
W <sub>foam</sub> [g]	57,32	55,55
w <sub>add</sub> [g]	212,82	176,90

**Tabella 5.29:** Parametri del condizionamento FIR = 50%

Terreno	A35B65	A65B35
W [g]	2700	2700
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,57	1,62
Volume [cm <sup>3</sup> ]	1719,75	1666,67
FER [-]	15	15
FIR [%]	60%	60%
W <sub>foam</sub> [g]	68,79	66,66
w <sub>add</sub> [g]	212,82	176,90

**Tabella 5.30:** Parametri del condizionamento FIR = 60%

Si riportano i valori di permeabilità misurati per le due tipologie di terreno nelle seguenti tabelle:

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	6,82E-07	7,85E-07	9,01E-07	7,89E-07	1,10E-07
1,6	5,31E-07	5,79E-07	7,35E-07	6,15E-07	1,07E-07
1,2	4,34E-07	4,61E-07	5,95E-07	4,97E-07	8,63E-08
0,8	3,64E-07	3,81E-07	5,16E-07	4,20E-07	8,35E-08
0,4	2,22E-07	3,22E-07	5,56E-07	3,67E-07	1,71E-07

**Tabella 5.31:** Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=10%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	6,42E-07	7,26E-07	6,26E-07	6,26E-07	5,39E-08
1,6	4,90E-07	5,41E-07	4,48E-07	5,15E-07	4,63E-08
1,2	3,48E-07	4,06E-07	3,15E-07	3,77E-07	4,60E-08
0,8	2,85E-07	3,12E-07	2,49E-07	2,98E-07	3,13E-08
0,4	2,52E-07	2,78E-07	2,51E-07	2,65E-07	1,55E-08

**Tabella 5.32:** Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=20%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	6,87E-07	4,84E-07	6,44E-07	5,85E-07	1,07E-07
1,6	5,29E-07	3,18E-07	4,46E-07	4,23E-07	1,06E-07
1,2	4,37E-07	2,45E-07	3,37E-07	3,41E-07	9,61E-08
0,8	3,51E-07	2,06E-07	2,42E-07	2,79E-07	7,56E-08
0,4	3,17E-07	1,89E-07	2,11E-07	2,53E-07	6,85E-08

**Tabella 5.33:** Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=30%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	6,32E-07	5,23E-07	7,43E-07	6,33E-07	1,10E-07
1,6	5,12E-07	4,15E-07	7,56E-07	4,64E-07	1,76E-07
1,2	4,39E-07	3,09E-07	5,28E-07	3,74E-07	1,10E-07
0,8	3,58E-07	2,49E-07	4,08E-07	3,04E-07	8,11E-08
0,4	2,60E-07	2,53E-07	3,94E-07	2,57E-07	7,92E-08

**Tabella 5.34:** Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=40%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	6,61E-07	5,45E-07	6,48E-07	6,03E-07	6,35E-08
1,6	4,97E-07	3,88E-07	4,87E-07	4,42E-07	5,99E-08
1,2	3,86E-07	2,78E-07	3,85E-07	3,32E-07	6,18E-08
0,8	3,21E-07	2,16E-07	3,27E-07	2,68E-07	6,20E-08
0,4	2,42E-07	1,78E-07	2,46E-07	2,10E-07	3,80E-08

**Tabella 5.35:** Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=50%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	6,71E-07	7,76E-07	7,64E-07	7,37E-07	5,76E-08
1,6	4,05E-07	6,18E-07	5,88E-07	5,37E-07	1,15E-07
1,2	3,31E-07	4,96E-07	4,68E-07	4,32E-07	8,82E-08
0,8	2,44E-07	3,88E-07	3,55E-07	3,29E-07	7,56E-08
0,4	1,58E-07	2,70E-07	2,31E-07	2,20E-07	5,68E-08

**Tabella 5.36:** Valori di permeabilità del Terreno A65B35 FIR=60%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	4,67E-07	4,74E-07	4,22E-07	4,54E-07	2,78E-08
1,6	4,56E-07	4,50E-07	4,45E-07	4,50E-07	5,32E-09
1,2	5,11E-07	4,61E-07	5,02E-07	4,91E-07	2,65E-08
0,8	6,22E-07	5,02E-07	5,98E-07	5,74E-07	6,32E-08
0,4	6,53E-07	4,65E-07	5,87E-07	5,68E-07	9,52E-08

**Tabella 5.37:** Valori di permeabilità A35B65 FIR=15%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	5,29E-07	5,63E-07	4,24E-07	5,05E-07	7,24E-08
1,6	5,43E-07	5,87E-07	4,48E-07	5,26E-07	7,07E-08
1,2	5,32E-07	5,91E-07	4,50E-07	5,24E-07	7,12E-08
0,8	4,64E-07	7,47E-07	3,98E-07	5,36E-07	1,85E-07
0,4	5,88E-07	6,53E-07	4,44E-07	5,62E-07	1,07E-07

**Tabella 5.38:** Valori di permeabilità A35B65 FIR=20%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	3,48E-07	4,49E-07	4,19E-07	4,05E-07	5,20E-08
1,6	3,37E-07	3,57E-07	3,58E-07	3,50E-07	1,17E-08
1,2	3,21E-07	3,20E-07	3,07E-07	3,16E-07	7,60E-09
0,8	3,23E-07	2,78E-07	2,92E-07	2,98E-07	2,27E-08
0,4	2,74E-07	2,30E-07	3,17E-07	2,74E-07	4,35E-08

**Tabella 5.39:** Valori di permeabilità A35B65 FIR=30%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	5,06E-07	5,50E-07	4,64E-07	5,07E-07	4,29E-08
1,6	5,66E-07	4,70E-07	3,91E-07	4,76E-07	8,75E-08
1,2	4,55E-07	4,27E-07	3,11E-07	3,97E-07	7,63E-08
0,8	4,60E-07	4,21E-07	2,99E-07	3,93E-07	8,37E-08
0,4	4,30E-07	4,34E-07	2,96E-07	3,86E-07	7,87E-08

**Tabella 5.40:** Valori di permeabilità A35B65 FIR=40%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	3,78E-07	4,26E-07	3,44E-07	3,83E-07	4,11E-08
1,6	4,37E-07	4,97E-07	3,76E-07	4,37E-07	6,03E-08
1,2	5,15E-07	5,65E-07	4,38E-07	5,06E-07	6,43E-08
0,8	4,47E-07	5,19E-07	3,83E-07	4,50E-07	6,81E-08
0,4	4,99E-07	5,90E-07	3,88E-07	4,92E-07	1,01E-07

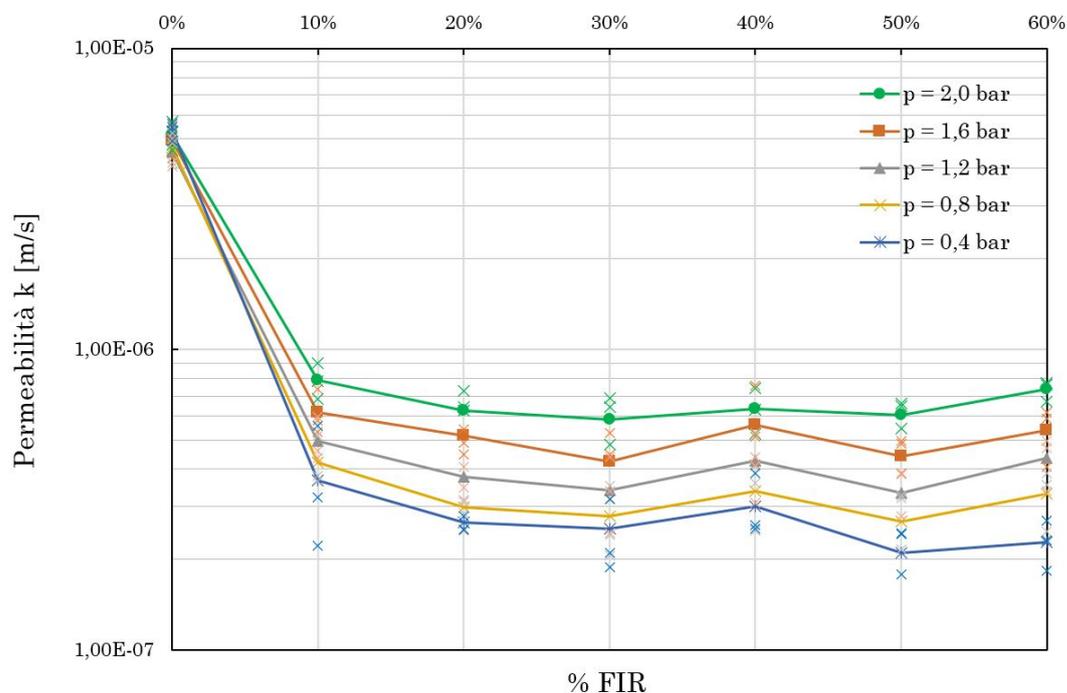
**Tabella 5.41:** Valori di permeabilità A35B65 FIR=50%

p	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>m</sub>	σ <sub>k</sub>
[bar]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
2,0	2,67E-07	1,96E-07	2,53E-07	2,39E-07	3,77E-08
1,6	2,73E-07	2,51E-07	2,68E-07	2,64E-07	1,15E-08
1,2	2,40E-07	2,42E-07	2,55E-07	2,46E-07	7,85E-09
0,8	2,37E-07	2,23E-07	2,46E-07	2,35E-07	1,20E-08
0,4	2,57E-07	2,60E-07	3,13E-07	2,77E-07	3,16E-08

**Tabella 5.42:** Valori di permeabilità A35B65 FIR=60%

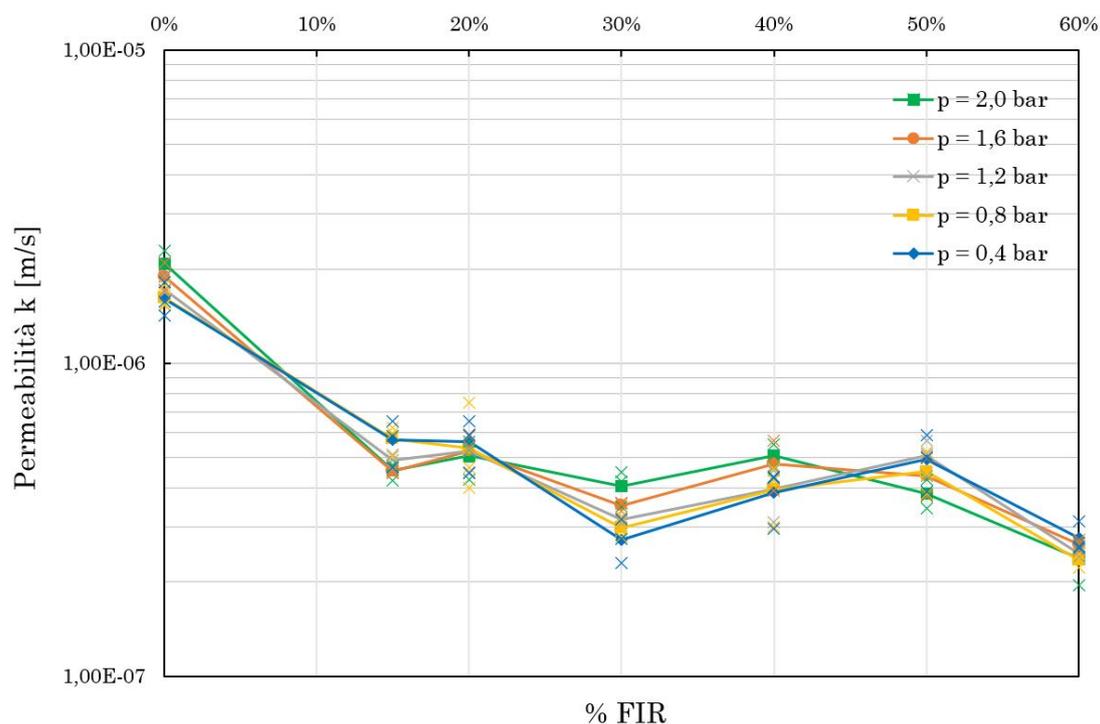
### 5.3.1 Intepretazione dei risultati

La Figura 5.11 mostra i risultati ottenuti sul Terreno A65B35. Le prove con FIR nullo sono prove di campioni non condizionati. È possibile notare un abbassamento repentino della permeabilità al passaggio da campioni non condizionati a campioni con FIR = 10% dopodichè l'andamento diventa pressochè costante per FIR superiori. Le permeabilità misurate si mostrano disperse al variare del carico idraulico utilizzato nelle prove.



**Figura 5.11:** Valutazione delle permeabilità del Terreno A65B35 in funzione del FIR

I risultati derivati dal Terreno A35B65 illustrati nella Figura 5.12 evidenziano un andamento progressivamente decrescente all'aumentare del FIR per poi raggiungere un plateau ad un FIR di circa 30%. Di conseguenza, per questo terreno è necessario un condizionamento con un FIR minimo più elevato per ottenere delle riduzioni di permeabilità massime. Inoltre, per effetto dell'elevata percentuale di Terreno B si osserva un comportamento più regolare e una dispersione meno accentuata delle misure al variare dei carichi idraulici. I risultati presentanti sono in accordo a quanto descritto da Peila & Borio (2010).



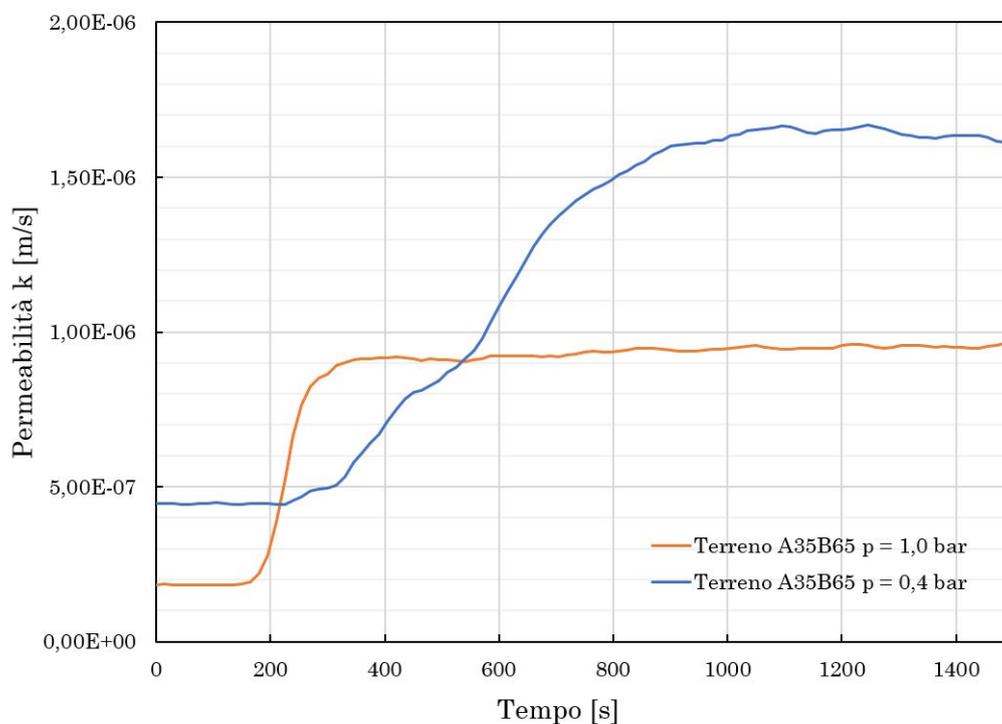
**Figura 5.12:** Valutazione delle permeabilità del Terreno A35B65 in funzione del FIR

## 5.4 Prove di lavaggio

In questa campagna di prove, l'obiettivo è stato quello di osservare l'evoluzione della permeabilità nel tempo tramite prove di permeazione continua e di validare la procedura utilizzata verificando che i tempi di prova non siano troppo lunghi. La procedura adottata resta quella descritta nel capitolo 4 con la sola differenza sul tempo di prova.

Il monitoraggio è avvenuto in una finestra temporale più ampia per poter valutare gli effetti del lavaggio del condizionamento. Infatti, la rimozione del condizionante nei campioni di terreno, descritta da Peila & Borio (2010) è dovuta al moto di filtrazione il quale sposta le bolle d'aria trascinandole nei canali interstiziali. Le bolle che restano nei vuoti interstiziali contribuiscono all'impermeabilizzazione del terreno finché non saranno trasportate anch'esse dal moto di filtrazione.

La valutazione del lavaggio è stata eseguita su 5 campioni di Terreno A35B65 condizionato con i parametri in Tabella 5.27 per ogni carico idraulico. Nella Figura 5.13 si mostrano gli andamenti medi di permeabilità nel tempo. In una prima fase stazionaria, i valori di permeabilità si riferiscono ai campioni condizionati per poi raggiungere una seconda fase stazionaria nella quale il valore di permeabilità è diverso dal valore di partenza.



**Figura 5.13:** Valutazione del lavaggio del Terreno A35B65

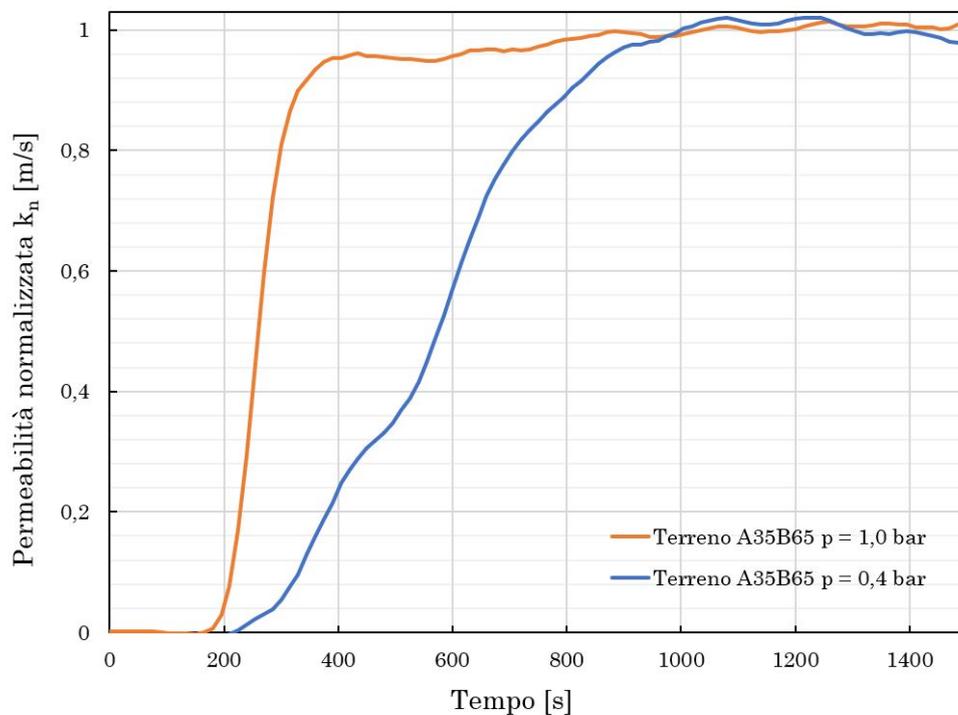
L'evoluzione della permeabilità ha un andamento diverso in base al carico idraulico utilizzato durante la prova. Con un carico  $p = 0,4$  bar, la crescita avviene in maniera graduale nel tempo mentre con un carico  $p = 1,0$  bar si nota un cambiamento più repentino. I valori di permeabilità sono stati normalizzati. Per ogni andamento medio relativo al singolo carico idraulico la permeabilità normalizzata è stata calcolata come:

$$k_n(t) = \frac{k(t) - k_{min}}{k_{max} - k_{min}} \quad (5.1)$$

dove:

- $k_n(t)$  è la permeabilità monitorata nel tempo;
- $k_{min}$  è il valore minimo di permeabilità monitorato;
- $k_{max}$  è il valore massimo di permeabilità monitorato.

Il risultato illustrato nella Figura 5.14, evidenzia la differenza in termini di evoluzione e mette in luce che indipendentemente dalla pressione il valore di permeabilità misurato nei primi 200 secondi di prova è costante e pari alla permeabilità del terreno condizionato.



**Figura 5.14:** Valutazione del lavaggio del Terreno A35B65

## 6 Conclusioni

Il condizionamento del terreno è un'operazione indispensabile per lo scavo di galleria con macchine EPB. Individuare la tipologia di condizionamento tramite prove di laboratorio è fondamentale per massimizzare le prestazioni dello scavo.

In questo lavoro di tesi, si è analizzato il condizionamento con schiuma per la valutazione delle performance idrauliche di terreni condizionati. Grazie alle prove di permeabilità, è stato possibile misurare gli effetti del condizionamento sulla permeabilità di terreni.

L'apparato sperimentale utilizzato ha permesso di effettuare prove in parallelo, riducendo la variabilità dovuta alle condizioni di impianto e di allestimento delle prove, e il sistema di acquisizione automatico ha permesso di descrivere il processo di permeazione in modo accurato anche a piccole scale temporali.

La permeabilità è influenzata dalla percentuale di Terreno B il quale riempie i vuoti interstiziali tra i grani del Terreno A. Si è osservato che esiste una fase di transizione al variare della percentuale delle due componenti che delimita due comportamenti differenti. Questo è presumibilmente dovuto alla possibilità o impossibilità di riempire i vuoti interstiziali e chiudere i canali di filtrazione preferenziali.

Il FIR influisce sull'abbassamento della permeabilità e tale influenza dipende dalla granulometria del terreno condizionato. Terreni con alti contenuti di fine trattengono un volume maggiore di schiuma che permette di ostacolare il moto di filtrazione dell'acqua. Nel caso di terreni con basso contenuto di fine la schiuma necessaria ad impermeabilizzare il materiale, la quale interagisce proprio con le particelle più fini, è molto minore.

In aggiunta, al variare della pressione le misure ottenute su miscele con minor contenuto di fine sono più disperse. Tale risultato è da attribuire alla maggiore omogeneità strutturale ottenibile con una maggior quantità di fine.

Dalle prove di permeazione continua si è preliminarmente validata la durata delle prove al fine di verificare che il fenomeno di lavaggio dell'agente condizionante descritto da Peila & Borio non influisse sulle proprietà del terreno condizionato.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Tunneling Shield. ”[https://en.m.wikipedia.org/wiki/Tunnelling\\_shield](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Tunnelling_shield)”
- [2] Andrew G. Cushing, Nikolas K. Sokol - ”History of Subaqueous Tunneling in New York City”, 2009
- [3] EPB Shield Herrenknecht - ”<https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/epb-shield/>”
- [4] Langmaack L., “Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunneling”, TBM Project Manager, MBT International, Zurich (CH)
- [5] Christoph Budach and Markus Thewes - ”Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research”, 2015
- [6] Luca Borio and Daniele Peila - ”Study of the Permeability of Foam Conditioned Soils with Laboratory Tests”, 2010
- [7] D. Peila, C. Oggeri, L. Borio - Using the Slump Test to Assess the Behavior of Conditioned Soil for EPB Tunneling, 2009
- [8] EFNARC (2003) – “Specification and guidelines for the use of specialist products for Soft Ground Tunnelling”. Technical report, EFNARC specification
- [9] 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
- [10] Shuo Huang\*, Shuying Wang\*\*, Changjie Xu\*\*\*, Yufeng Shi\*\*\*, and Fei Ye\*\*\* - ”Effect of Grain Gradation on the Permeability Characteristics of Coarse-grained Soil Conditioned with Foam for EPB Shield Tunneling”, 2019
- [11] ASTM D2434 19 - ”Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)”
- [12] J. Facciorusso, C. Madiani, G. Vannucchi - Dispense di Geotecnica - Università degli studi di Firenze, 2011

- [13] Renato Lancellotta - Geotecnica - Quarta edizione, Giugno 2012
- [14] D. Sebastiani, G. Vilaridi, I. Bavasso, L. Di Palma, S. Miliziano - Classification of foam and foaming products for EPB mechanized tunnelling based on half-life time, Ottobre 2019
- [15] <https://mastourreadymix.files.wordpress.com/2013/02/slump-test.jpg>
- [16] [https://www.diati.polito.it/estrattore\\_da\\_camera\\_in\\_pressione\\_full.jpg](https://www.diati.polito.it/estrattore_da_camera_in_pressione_full.jpg)
- [17] D. Peila - Soil Conditioning for EPB Shield Tunnelling, Gennaio 2014
- [18] L. Borio – Soil conditioning for cohesionless soils. PhD thesis, Politecnico di Torino - 2010
- [19] ASTM C143/C 143M – 00, “Standard test method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete”, 2003