

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – DICEA  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di studi Laurea Triennale in Ingegneria Civile

## **INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI PERMEABILITA' ESEGUITE IN SITO SU TERRENI GRANULARI TRAMITE UN PERMEAMETRO SPERIMENTALE**

Relatore: Chiar.ma PROF.SSA COLA SIMONETTA

Correlatore:

Dott.ssa DALLA SANTA GIORGIA

Ing. FABBIAN NICOLA

Candidato: **BRIGHT KWAKU FRIMPONG**

Anno Accademico 2021-2022



# 1. Contents

1. Contents.....	3
INDICE DELLE FIGURE.....	5
INDICE DEI GRAFICI.....	6
INDICE DELLE TABELLE .....	8
INTRODUZIONE .....	10
1. L'ARGINE E LA RELATIVA CARATTERIZZAZIONE.....	11
1.1. ELEMENTI E TIPOLOGIE DEGLI ARGINI .....	13
1.2. CARATTERIZZAZIONE .....	14
1.3. COLLASSO ARGINALE .....	15
2. MISURA IN SITO DELLA PERMEABILITÀ DEI DIVERSI LIVELLI COSTITUENTI IL CORPO ARGINALE.....	17
2.1. CALCOLO DELLA PERMEABILITÀ A PARTIRE DALLA GRANULOMETRIA ATTRAVERSO CORRELAZIONI .....	17
2.2. IL PERMEAMETRO SPERIMENTALE .....	22
2.2.1 PERMEAMETRO BAT.....	22
2.2.2 DESCRIZIONE DEL PERMEAMETRO SPERIMENTALE.....	25
2.2.2.1 ESECUZIONE DELLA PROVA IN SITO .....	32
2.2.2.2 CALCOLO DELLA PERMEABILITÀ DALLE MISURE OTTENUTE CON PERMEAMETRO BAT .....	35
3. SITO SPERIMENTALE E MISURE ESEGUITE.....	37
3.1. DESCRIZIONE DEI SITI SPERIMENTALI .....	39
4. DESCRIZIONE DELLE PROVE ESEGUITE IN SITO E RISULTATI OTTENUTI .....	49
4.1. ELABORAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI DAL PERMEAMETRO SPERIMENTALE .....	50
4.2. 4.1.1 SCELTA DEI LIVELLI SU CUI ESEGUIRE I CALCOLI .....	53

4.3. CLASSIFICAZIONE GRANULOMETRICA DEI CAMPIONI.....	67
4.4. RISULTATI DI PERMEABILITA' CALCOLATI DALLE CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE OTTENUTE IN LABORATORIO 82	
CONCLUSIONI.....	88
BIBLIOGRAFIA .....	90

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 Tratto arginale del fiume Adige, in località Salorno (BZ).....	12
Figura 1.2 Generica sezione arginale con definizione degli elementi che la compongono (CIRIA et al 2013).....	14
Figura 2.1 Forme dei grani di sabbia [15]. .....	19
Figura 2.2 Schema punta filtrante [12]. .....	23
Figura 2.3 Tipi di installazione punta BAT [12].....	24
Figura 2.4 da sinistra è: La pompa a vuoto, batteria e datalogger. ....	27
Figura 2.5 Schematizzazione dello strumento oggetto di studio. [14] .....	28
Figura 2.6 Primo prototipo. [14].....	28
Figura 2.7 Pietra porosa coperta. [14] .....	29
Figura 2.8 Pietra porosa scoperta. [14].....	29
Figura 2.9 Filtro poroso da pulire dopo opera (a) Filtro poroso pulito dopo opera (b)..	34
Figura 3.1 Sito sperimentali di Salorno (BZ). .....	38
Figura 3.2 Sito sperimentali di Laghetti (BZ). .....	39
Figura 3.3 Dislocazione delle aree di studio 1 e 2.....	40
Figura 3.4 Sezione planimetrica dei cinque pozzi. ....	41
Figura 3.5 Riferimento delle stratigrafie nella Figura 3.6. ....	42
Figura 3.6 Sezioni dei cinque pozzi e le loro stratigrafie nel sito Laghetti. ....	44
Figura 4.1 Strumento sperimentale in opera nel sito di Laghetti.....	50
Figura 4.2 Dati di alcune pressioni fornito dallo strumento sperimentale in centiBar. ....	52
Figura 4.3 Valori tipici del coefficiente di permeabilità dei terreni .....	59

## INDICE DEI GRAFICI

Grafico 2.1 Granometria dei campioni analizzati [14].	30
Grafico 4.1 Grafici interpretazione BAT L2 : 13.5 – Laghetti.	61
Grafico 4.2 Grafici interpretazione BAT L2 : 23.5 – Laghetti.	62
Grafico 4.3 Grafici interpretazione BAT L2 : 26 – Laghetti.	63
Grafico 4.4 Grafici interpretazione BAT L4 : 21 – Laghetti.	64
Grafico 4.5 Grafici interpretazione BAT L5 : 21 – Laghetti.	65
Grafico 4.6 Grafici interpretazione BAT L5 : 24 – Laghetti.	66
Grafico 4.7 Granulometria del campione L1 – 22.4m; Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media-grossa.	68
Grafico 4.8 Granulometria del campione <b>L2 - 5.3m</b> $\cong$ <b>L2 - 6.5m</b> ; Sabbia fine con limo.	69
Grafico 4.9 Granulometria del campione L2 - 7.1m; Sabbia fine con presenza di limo, sabbia media-grossa e tracce di ghiaia fine e media.	70
Grafico 4.10 Granulometria del campione L2 - 13.0m $\cong$ L2 - 13.5m, Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media.	71
Grafico 4.11 Granulometria del campione L2 - 14.0m $\cong$ L2 - 13.5m; Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media.	72
Grafico 4.12 Granulometria del campione <b>L2 - 16.3m</b> $\cong$ <b>L2 - 16.5m</b> ; Limo con sabbia fine.	73
Grafico 4.13 Granulometria del campione L2 - 24.5m $\cong$ L2 - 23.5m $\cong$ L2 - 26m; Sabbia media-grossa con limo, presenza di sabbia fine e tracce di ghiaia medio-fine.	74
Grafico 4.14 Granulometria del campione L4 – 21m; Sabbia fine con sabbia media e limo.	75
Grafico 4.15 Granulometria del campione L5 – 5.0m; Ghiaia medio-grossa con sabbia grossa e media e presenza di ghiaia fine.	76
Grafico 4.16 Granulometria del campione L5 – 5.8m; Sabbia media con sabbia fine e presenza di limo, sabbia grossa e ghiaia media.	77
Grafico 4.17 Granulometria del campione L1 - 10.5m $\cong$ L4 - 6m $\cong$ L5 - 6; Ghiaia medio-grossa con presenza di sabbia grossa, ghiaia fine, sabbia media e limo e tracce di sabbia fine.	78

Grafico 4.18 Granulometria del campione L5 – 7.5m; Ghiaia fine con sabbia grossa e presenza di ghiaia media e sabbia media. ....	79
Grafico 4.19 Granulometria del campione <b>L5 - 12m</b> $\cong$ <b>L5 - 15m</b> ; Limo con sabbia fine. ....	80
Grafico 4.20 Granulometria del campione <b>L5 - 21.0m</b> ; Sabbia media con limo e presenza di sabbia fine-grossa. ....	81

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 Rapporto permeabilità calcolata tramite correlazioni e valori formula BAT. [14] .....	30
Tabella 2.2 Rapporto permeabilità calcolata tramite “permeometro” e valori formula BAT. [14] .....	31
Tabella 4.1 campioni che riporta i parametri relativi alle prove “a filtro intasato” .....	56
Tabella 4.2 Tabella che riporta i campioni e i parametri relativi alle prove ‘a filtro aperto subito’ .....	58
Tabella 4.3 Valori di permeabilità ricavati con la formula di BAT. ....	59
Tabella 4.4 Percentuali in peso dei diversi terreni di <b>L1 - 22.4m</b> . ....	68
Tabella 4.5 Percentuali in peso dei diversi terreni di L2 - 5.3m $\cong$ L2 - 6.5m.....	69
Tabella 4.6 Percentuali in peso dei diversi terreni di L2 - 7.1m.....	70
Tabella 4.7 Percentuali in peso dei diversi terreni di L2 - 13.0m $\cong$ L2 - 13.5m.....	71
Tabella 4.8 Percentuali in peso dei diversi terreni di L2 - 14.0m $\cong$ L2 - 13.5m.....	72
Tabella 4.9 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L2 - 16.3m $\cong$ L2 - 16.5m. ....	73
Tabella 4.10 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L2 - 24.5m $\cong$ L2 - 23.5m $\cong$ L2 - 26m. ....	74
Tabella 4.11 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L4 – 21m.....	75
Tabella 4.12 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L5 – 5.0m.....	76
Tabella 4.13 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L5 – 5.8m.....	77
Tabella 4.14 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L1 - 10.5m $\cong$ L4 – 6m $\cong$ L5 - 6m. ....	78
Tabella 4.15 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L5 - 7.5m. ....	79
Tabella 4.16 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L5 - 12m $\cong$ L5 - 15m. ....	80
Tabella 4.17 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L5 - 21.0m. ....	81
Tabella 4.18 Proprietà geotecniche dei campioni.....	82
Tabella 4.19 Valori dei parametri utilizzati nei calcoli delle correlazioni. ....	83
Tabella 4.20 Valori di permeabilità ricavati tramite correlazioni e le loro differenze percentuale dei valori di Terzaghi rispetto alle altre tre formulazioni. ....	84
Tabella 4.21 Valori di permeabilità ricavati tramite correlazioni e le loro rapporti.....	84



Tabella 4.22 Valori di permeabilità ricavati con la formula di BAT e differenze percentuali con i valori di k BAT tratto costante (a), e rapporti tra i valori ottenuti con le tre formulazione di permeabilità (b)..... 85

## INTRODUZIONE

Le frequenti inondazioni di aree interessate da alvei fluviali continuano a generare, in ogni parte del mondo, perdite di vite umane e ingenti danni economici. L'ufficio Bacini Montani della protezione Civile della Provincia di Bolzano ha avviato una collaborazione con il dipartimento di Ingegneria geotecnica dell'Università di Padova e CNR di Padova per lo studio della stabilità arginale del fiume Adige lungo l'autostrada Brennero (A22) nella zona di Salorno (prov. di Bolzano) poiché in caso di ipotetica rottura, avverrebbe la chiusura di uno dei più importanti assi del trasporto europeo.

Lo studio viene effettuato conoscendo le caratteristiche dei geomateriali costituenti l'argine e la sua fondazione. Il terreno viene esplorato eseguendo dei siti sperimentali in cui sono stati realizzati 5 sondaggi, dove poi è stata installata una strumentazione geotecnica innovativa, come fibra ottica e strumentazione ERT, per il monitoraggio della filtrazione per verificare la stabilità dell'argine durante una piena. Inoltre da questi sondaggi sono stati prelevati campioni di terreno per eseguire la classificazione geotecnica dei terreni in sito.

Inoltre in questo sito è stato testato un strumento sperimentale per misurare la permeabilità degli strati di terreno. L'idea di base per la realizzazione dello strumento sperimentale è quella di adattare il permeometro BAT, realizzato per lo studio di terreni argillosi, al fine di poterlo utilizzare su terreni sabbiosi. Scopo della seguente tesi è l'elaborazione dei dati di permeabilità ottenuti dalle misure in sito con lo strumento sperimentale, ed il loro confronto con i valori della permeabilità ricavati dalle formule che utilizzano le caratteristiche granulometriche ricavate dai campioni, per la verifica del funzionamento in sito dello strumento sperimentale.

# 1. L'ARGINE E LA RELATIVA CARATTERIZZAZIONE

L'argine è un'opera di difesa passiva del territorio, atta ad impedire lo straripamento dei corsi d'acqua (come illustrato nella Figura 1.1). Esso ha un comportamento che dipende da diversi fattori, quali:

- la sua ubicazione, determinata dall'andamento del corso d'acqua e dalle opere presenti sul territorio;
- le caratteristiche dei terreni di fondazione locali;
- il terreno con cui è costruito, in genere proveniente da zone o cave poste nelle vicinanze;
- i successivi interventi di modifica e rinforzo che si rendono necessari nel tempo e che sono eseguiti con materiali di volta in volta diversi.

L'argine è costituito da una porzione alla quale sono assegnati specifiche funzioni nel sistema di difesa e che presenta una sezione trasversale omogenea. La sezione è l'insieme di diversi elementi e ciascuno ha una particolare funzione per il mantenimento dell'integrità dell'intero tratto arginale, come ad esempio la protezione contro l'erosione superficiale, resistenza all'erosione interna, stabilità dell'intero rilevato e del terreno di fondazione. I componenti della sezione devono garantire le seguenti funzioni [1]:

- **Impermeabilità:** è la funzione primaria di un tratto arginale, che deve limitare il flusso di filtrazione attraverso il corpo arginale e nel terreno di fondazione. La filtrazione genera forze di volume che, nei terreni granulometricamente eterogenei, possono indurre la migrazione di particelle più fini del terreno stesso (erosione interna), causando un incremento della permeabilità locale e riducendo la resistenza meccanica. Inoltre, le forze di filtrazione possono innescare instabilità locali. Al fine di prevenire tali effetti si inseriscono nel sistema di difesa elementi di impermeabilizzazione;

- **Drenaggio:** come gli elementi d'impermeabilizzazione, i sistemi di drenaggio hanno lo scopo di limitare le pressioni dell'acqua nella zona lato campagna per evitare crolli locali ed erosione interna. Agiscono indirizzando il moto di filtrazione verso zone dove l'acqua può essere raccolta e allontanata senza danni;
- **Stabilità:** l'instabilità meccanica del sistema arginale può verificarsi con crolli parziali più o meno profondi. Deve essere evitata in tutte le condizioni di esercizio, sicché entrambi i costituenti del sistema (terreno di fondazione e corpo arginale) devono possedere sufficiente resistenza sia quando il fiume è in regime di magra che quando è in piena;
- **Protezione esterna:** gli argini sono esposti a vari tipi di azioni esterne (impatto delle onde e dei filoni di corrente, azione degli animali, attività umane ecc.) che generano effetti meccanici e/o idraulici che, a loro volta, possono causare l'erosione del corpo arginale. Al fine di evitare tali effetti è importante mettere in opera interventi di difesa sulla superficie esterna



Figura 1.1 Tratto arginale del fiume Adige, in località Salorno (BZ)

## 1.1. ELEMENTI E TIPOLOGIE DEGLI ARGINI

Durante la fase di progettazione di un argine è importante considerare i seguenti fattori:

- il regime idraulico del fiume,
- l'altezza dell'argine in relazione alle esigenze di sicurezza idraulica,
- eventuali vincoli di carattere geometrico o idraulico,
- le caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione e loro regime idraulico,
- i tipi di terreni disponibili per la costruzione.

La Figura 1.2 (CIRIA et al., 2013) mostra i principali elementi che possono essere presenti in una sezione arginale [1]:

1. il terreno di fondazione: è lo strato del terreno su cui viene costruito il rilevato, deve assicurare impermeabilità e un supporto stabile al corpo arginale.
2. il corpo: la parte principale dell'argine che è composto da materiali del tipo sabbia, argilla e limo. Ha il compito di contrastare le forze derivanti dall'acqua ed impedire la filtrazione.
3. Nucleo impermeabile: realizzato nella parte centrale costituita da materiale impermeabile (argilla).
4. Il rivestimento spondale; sono rivestimenti di rocce e pietrisco che impediscono l'erosione del rilevato.
5. Le zone di transizione/filtri; è la zona costituita da materiali permeabili affiancati al nucleo impermeabile.
6. I sistemi di drenaggio: sono costituiti da materiali granulari, come ghiaie, per raccogliere le acque di filtrazione e condurla al piede del rilevato al lato campagna.
7. Berme: è l'estensione dell'argine, può essere sia lato fiume che lato campagna, per aumentare la stabilità dell'opera e aumentare il contrasto alla filtrazione, viene costruito con materiale di riporto e riduce l'erosione nel caso di sormonto.

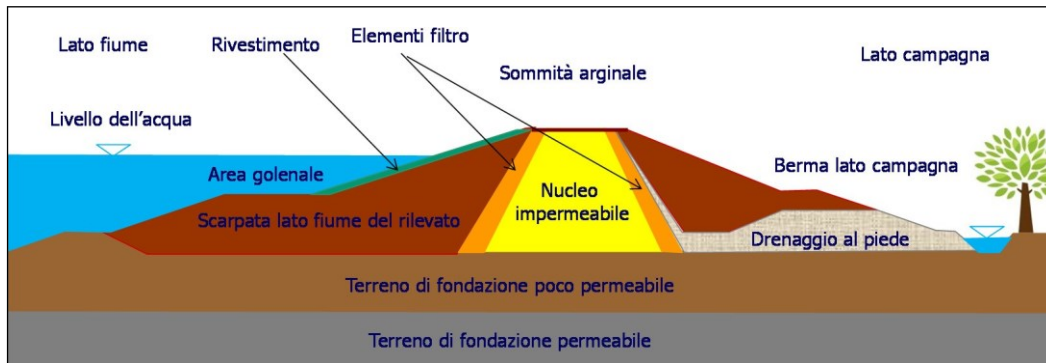


Figura 1.2 Generica sezione arginale con definizione degli elementi che la compongono (CIRIA et al 2013).

## 1.2. CARATTERIZZAZIONE

Lo studio necessario a valutare la stabilità geotecnica e idraulica del sistema di un rilevato arginale esistente e della sua fondazione dipende da una caratterizzazione più dettagliata, per cui servono informazioni:

- sulla geometria;
- sulla natura;
- sullo stato fisico;
- sulle proprietà dei materiali costituenti la struttura in elevazione e la fondazione.

Questi indagini devono essere eseguite in tre fasi [2 e 3]:

- Nella prima fase; vengono raccolte tutte le informazioni riguardanti la morfologia, la geologia dell'area, la struttura e la storia dell'opera di difesa, l'evoluzione del corso d'acqua, l'evoluzione della struttura nel tempo, le caratteristiche dei manufatti esistenti in intersezione del corpo arginale o in adiacenza, comprese vecchie strutture abbandonate oppure distrutte delle quali può essere rimasta traccia.

- La seconda fase; prevede una zonizzazione del manufatto in tratti omogenei, da individuare a seconda delle caratteristiche sopra evidenziate

▪ Nella terza fase; vengono previste e analizzate adeguate prove geotecniche in sito e laboratorio, al fine di aumentare il dettaglio di caratterizzazione in specifiche sezioni.

Generalmente una particolare attenzione dev'essere posta nello studio di discontinuità o punti di debolezza dell'argine, come la presenza di manufatti in calcestruzzo, di alberi con apparati radicali, cunicoli di tane di animali di grandi dimensioni, fenomeni erosivi in atto ecc. Questi elementi possono essere già presenti al momento della costruzione dell'argine, ma anche formarsi successivamente [2].

La definizione di una stratigrafia dettagliata è uno dei problemi di maggior importanza nello studio degli argini. Esso ha una forte influenza sulle caratteristiche idrauliche del terreno oltre che sulla resistenza al taglio dei depositi. Le condizioni idrauliche di filtrazione più gravose che si possono formare è in relazione alle caratteristiche di permeabilità dei terreni presenti.

In particolare, come descritto in seguito, l'oggetto di questa tesi è proprio lo studio e il confronto tra dati di permeabilità acquisiti con tecniche diverse nella sezione dell'argine sul fiume Adige, nel tratto vicino a Laghetti di Salorno (BZ), In questo sito, per studiare la permeabilità dei depositi costituenti l'argine e il suo terreno di fondazione, sono state eseguite prove con un Permeometro sperimentale sviluppato dal permeometro Bat, che sono poi stati confrontati con la permeabilità ricavata dalle più note formule basate sulle analisi granulometriche su campioni prelevati dai sondaggi a carotaggio continuo. [1]

### **1.3. COLLASSO ARGINALE**

Per collasso arginale si intende l'incapacità di impedire l'inondazione di una determinata area. Esso è attivato da un'azione che può essere: un sovraccarico, un livello dell'acqua eccessivo o una rapida variazione dello stesso, dalla forza di filtrazione o un'anormale crescita del flusso idraulico. Queste azioni possono agire su un singolo elemento o su più elementi arginali.

Ci sono 2 tipi di rotture [1]:

- Rottura Idraulica: inondazione del territorio che avviene senza danno per la struttura arginale ma dovuta ad esempio al sormonto della sommità arginale per un difetto progettuale di elevazione della struttura arginale.
- Collasso strutturale: inondazione per effettiva perdita di resistenza di uno o più elementi che compongono la struttura arginale o il terreno di fondazione.

I processi che comportano la rottura di un argine possono essere di vari tipi [1]:

- Erosione esterna: consiste nell'erosione della sponda lato fiume e/o lato campagna, erosione per sormonto.
- Erosione interna: l'asportazione allontano delle particelle fini del terreno nel corpo arginale o negli strati di fondazione per effetto delle forze idrodinamiche di filtrazione.
- Instabilità del paramento esterno ed interno dovuto al regime di filtrazione.
- Instabilità al piede per sifonamento dovuta ai processi di filtrazione.



## **2. MISURA IN SITO DELLA PERMEABILITÀ DEI DIVERSI LIVELLI COSTITUENTI IL CORPO ARGINALE**

Nel sito in esame sono state eseguite diverse tipologie di prove sperimentali sia in sito che in laboratorio, allo scopo di definire la permeabilità dei diversi depositi che costituiscono il corpo arginale.

In particolare, in questo sito sperimentale è stato testato un nuovo strumento sperimentale fino ad ora testato unicamente in laboratorio in condizioni note, basato sull'idea del permeometro Bat. L'idea fondamentale per la costruzione di un nuovo strumento è quello di adattare il permeometro BAT, che è stato realizzato nel 1984 per misurare la permeabilità dei terreni argillosi, per misurare la permeabilità in sito di terreni incoerenti [14]. Per la verifica dei valori di permeabilità ottenuti dalle prove in sito, dopo l'elaborazione dei dati sperimentali, i risultati ottenuti vengono confrontati con i valori di permeabilità calcolati a partire dalle granulometrie eseguite su campioni di terreno, attraverso le formule più utilizzate, come sopraccitato.

Nella prova in sito lo strumento è in grado di contenere e sopportare le azioni dovute al peso del campione di sabbia, al peso dell'acqua, allo sforzo per azionare lo strumento [14].

### **2.1. CALCOLO DELLA PERMEABILITÀ A PARTIRE DALLA GRANULOMETRIA ATTRAVERSO CORRELAZIONI**

Ci sono diversi modi per calcolare la permeabilità di un generico terreno a partire dalle caratteristiche granulometriche, come illustrato in letteratura attraverso diverse formule che consistono nel calcolo del coefficiente di permeabilità. I terreni granulari hanno una permeabilità che dipende dalla distribuzione granulometrica, attraverso il valore del

diametro  $d_i$  tale che  $i$  è la percentuale in peso dei grani con dimensione inferiore  $d$ , anche detto 'passante' [14].

Nel corso degli anni, i ricercatori hanno proposto formule empiriche che mettono in relazione la permeabilità  $k$  con il passante  $d_i$ , tra cui si riportano le principali:

a) Formula di **Hazen** [4]:

$$k = C \cdot d_{10}^2$$

Dove:

- $k$  è coefficiente di permeabilità in (cm/s);
- $d_{10}$  è il diametro in cui il 10% del peso delle particelle è più *piccolo*, (mm).
- $C$  è una costante empirica

Applicabile in terreni granulari sciolti se  $0,1\text{mm} < d_{10} < 3\text{mm}$  e se  $C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 5$ . Secondo Hazen, la permeabilità varia con il valore di  $d_{10}$ . Il valore di  $C$  varia in base alle unità di misura che si scelgono e, nel caso sopracitato, assume valori compresi tra 0.4 e 1.2 con un valore medio pari a 1 [14].

b) Formula di **Terzaghi** [8]:

$$k = C_0 \cdot \frac{\mu_{10}}{\mu_T} \cdot \left( \frac{n - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \cdot d_{10}^2$$

Dove:

- $k$  è coefficiente di permeabilità in (cm/s);
- $d_{10}$  è il diametro in cui il 10% del peso delle particelle è più *piccolo*, (mm)
- $\mu_{10}$  e  $\mu_T$  rappresentano la viscosità dell'acqua a 10°C e T (°C) *rispettivamente*;

- $C_0$  varia in base alla forma dei grani;
- $n$  è il valore di porosità.

La costante  $C_0$  da un valore pari a 8 per grani arrotondati e lisci a 4.6 per grani a forma irregolare (*Angular* in Figura 2.1). La viscosità dell'acqua a  $10^\circ\text{C}$  risulta pari a  $\mu_{10} = 1.307 \cdot 10^{-3} \text{ (kg / m} \cdot \text{s)}$ , i test di laboratorio sono eseguiti solitamente ad una temperatura di circa  $T = 20^\circ\text{C}$  con un valore di  $\mu_T = 1.002 \cdot 10^{-3} \text{ (kg / m} \cdot \text{s)}$ . Da queste considerazioni si ricava che il rapporto di viscosità risulta pari a  $\frac{\mu_{10}}{\mu_T} = 1.30$ .

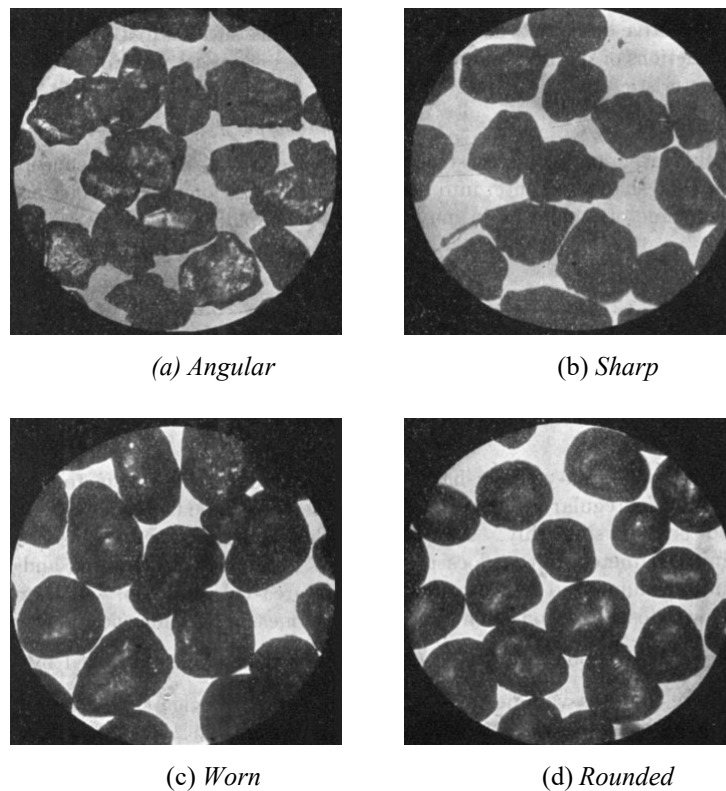


Figura 2.1 Forme dei grani di sabbia [15].

c) Formula di **Chapuis** [10]:

$$k = 2,4622 \cdot \left[ d_{10}^2 \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \right]^{0,7825}$$

Dove:

- $k$  è coefficiente di permeabilità, (cm/s);
- $d_{10}$  è il diametro in cui il 10% del peso delle particelle è più *piccolo*, (mm)
- $e$  è l'indice dei vuoti.

La relazione proposta da Chapuis per terreni uniformi sabbiosi o ghiaiosi naturali può essere usata per prevedere valori di  $k$  compresi tra  $10^{-1}$  e  $10^{-3}$  cm/s. Inoltre la formulazione proposta rappresenta un buon metodo previsionale per sabbie e ghiaie naturali uniformi con  $C_U < 12$ ,  $0,003 < d_{10} < 3$  mm e  $0,3 \leq e \leq 1$  [10].

d) Formula di **Mbonimpa et al.** [11]:

$$k = C_G \cdot \frac{\gamma_w}{\mu_w} \cdot C_U^{1/3} \cdot d_{10}^2 \cdot \frac{e^{3+x}}{1+e}$$

Dove:

- $k$  è coefficiente di permeabilità in (cm/s);
- $d_{10}$  è il diametro in cui il 10% del peso delle particelle è più *piccolo*, (mm)
- $\mu_w$  è la viscosità dell'acqua;
- $C_G$  è una costante adimensionale (circa 0.1) che include i fattori legati alla tortuosità del mezzo poroso e al diametro dei grani;
- $e$  è l'indice dei vuoti;
- $\gamma_w$  è il peso di volume dell'acqua;
- $C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$  è la coefficiente di uniformità.

Mbonimpa et al. nel 2002 proposero una formula che mette in relazione il coefficiente di permeabilità con le proprietà del fluido, la geometria dello spazio poroso e le caratteristiche della superficie dei grani.  $C_G$  è una costante adimensionale che include i fattori legati alla tortuosità del mezzo poroso e al diametro effettivo dei grani. Un'analisi basata su numerose prove sperimentali indica che può essere fissato un valore di  $C_G$  pari a 0.1. Il parametro  $x$  è considerato costante e non dipende dal tipo di materiale testato, risulta pari a 2. Infine,  $\gamma_w = 9.81 \text{ (KN / m}^3\text{)}$ ,  $\mu_w \approx 10^{-3} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$ , il diametro  $d_{10}$  delle particelle è espresso in cm e il coefficiente di permeabilità è espresso in cm/s.

Si osserva che tutte quattro formule sono dipendente dalla parte fina del materiale (*infatti dipende dal  $d_{10}$* ) questo deduce che nelle proprietà dei terreni, le particelle più fini vanno a intasare i vuoti tra le particelle grossi e quindi a ridurre la permeabilità. Inoltre Terzaghi e Mbonimpa tiene conto anche della viscosità del acqua. Altre magari richiedono molti parametri e quindi sembrano più precise, ma poi sono invece parametri difficili da determinare.

Nel sito considerato sono stati prelevati svariati campioni di materiale dagli stessi livelli in cui sono state eseguite le prove sperimentali di permeabilità in sito. Di questi materiali sono state svolte in laboratorio l'analisi della curva granulometrica, come descritto nel cap.3. Dall'analisi delle varie curve granulometriche ottenute sono poi stati stimati i valori di permeabilità con le formule elaborate da Hazen, Terzaghi e Chapuis. In questo modo sono stati ottenuti 3 valori di permeabilità stimati, da confrontare con quelli ottenuti dalle misure effettuate in sito.

## 2.2. IL PERMEAMETRO SPERIMENTALE

Primo dell'introduzione e definizione del permeametro sperimentale che è stato testato nel sito allo studio per la prima volta, è necessario enunciare le varie caratteristiche del permeametro BAT, che è lo strumento su cui si basa la costruzione del nuovo permeametro.

### 2.2.1 PERMEAMETRO BAT

Il permeametro BAT utilizza una punta filtrante collegata ad un tubo di acciaio o PVC. L'installazione viene effettuata inserendo la punta nel terreno fino alla profondità desiderata per estrarre un volume d'acqua dal terreno e tale volume viene raccolto in campionatori cilindrici sigillati sterilizzati.

La punta filtrante (come illustra nella Figura 2.2) è costituita da un corpo plastico rigido ed un filtro composto da plastica porosa o ceramica sinterizzata. Esso è sigillato con una guarnizione a disco di gomma sintetica o naturale, montato su un ugello con funzione sia di sigillante che di valvola di nonritorno. La punta può essere installata in diversi modi ad esempio [12]:

- Installazione di una **serie** punte filtranti inserite a diverse profondità per campionare le acque sotterranee e misurare la pressione interstiziale in diversi strati di terreno (Figura 2.3 a);
- Installazione **inclinata** per fare misurazioni al di sotto di un'opera interrata (Figura 2.3 b);
- Installazione **orizzontale** al di sotto di una discarica o sotto una struttura simile (Figura 2.3 c).

Il Permeametro BAT viene utilizzato per le seguenti funzioni:

- Prelevare campioni di acqua da diversi tipi di terreno;
- Misurare la pressione interstiziale dell'acqua;
- Misurare la permeabilità in sito;
- Monitoraggio delle acque sotterranee.

La prova può essere condotta come [12]:

- *Inflow test*: il contenitore è completamente riempito di gas all'inizio del test, questo tipo di test può essere eseguito in contemporanea ad un'estrazione per il campionamento dell'acqua interstiziale;
- *Outflow test*: la fiala viene in parte riempita con acqua e in parte con gas compresso. Può essere utile anche per iniettare un fluido tracciante che sarà successivamente intercettato da altre punte filtranti installate a diverse distanze dal punto di iniezione al fine di controllare la diffusione del fluido nel terreno.

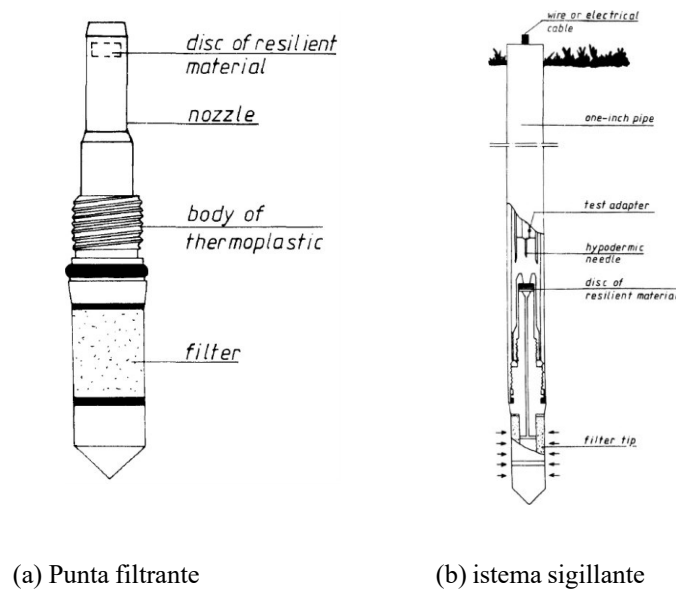


Figura 2.2 Schema punta filtrante [12].

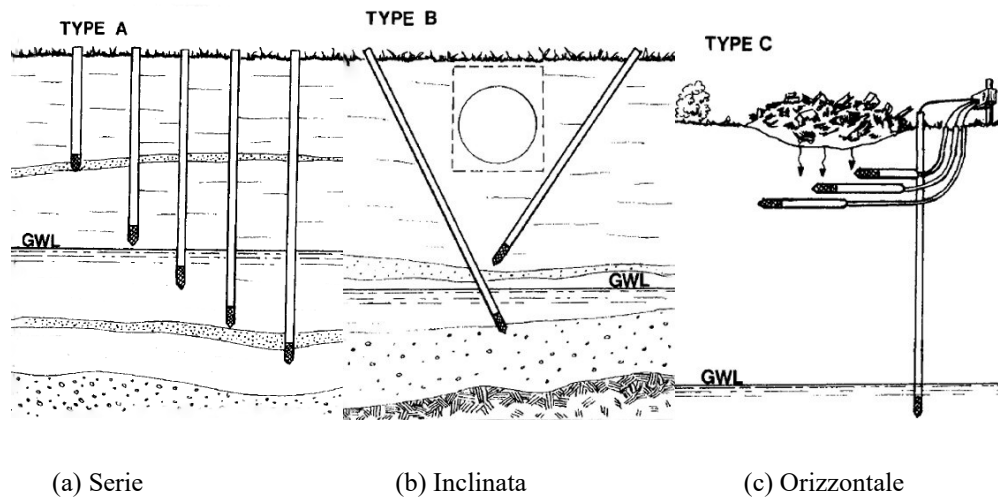


Figura 2.3 Tipi di installazione punta BAT [12].

Per misurare la conducibilità idraulica, il sistema é composto da un contenitore e un adattatore equipaggiato con un ago che collega il campionatore e la punta filtrante. La pressione nella fiala viene misurata tramite un trasduttore di pressione. Prima di connettere la provetta con la pietra porosa tramite il sistema di doppio ago ipodermico, viene equalizzata la temperatura. Abbassando l'adattatore sull'ago la punta filtrante è automaticamente connessa, dopo di ciò viene misurata l'andamento della variazione delle pressioni nel tempo.

Il ricercatore Bengt Torstenson nel 1984 ha ricavato il seguente formulazione per il calcolo della permeabilità a partire dalla misura delle pressioni all'interno della fiala [12]:

$$k = \frac{P_0 \cdot V_0}{F \cdot t} \cdot \left[ \frac{1}{P_1 P_0} - \frac{1}{P_1 P_t} + \frac{1}{P_1^2} \cdot \left( \ln \frac{P_0 - P_1}{P_0} \cdot \frac{P_t}{P_t - P_1} \right) \right] \quad (2.1)$$

Dove:

- $k$  è il coefficiente di permeabilità  $\left(\frac{cm}{s}\right)$ ;



- $P_0$  è la pressione iniziale nella fiala, può essere scelta a priori ( $mH_2O$ );
- $V_0$  è il volume iniziale della fiala ( $ml$ );
- $P_1$  è la pressione neutrale all'equilibrio nel terreno che viene calcolata considerando la posizione della fiala ( $mH_2O$ );
- $F$  è il valore del fattore di forma ( $m$ );
- $P_t$  è pressione nel contenitore al tempo  $t$  ( $mH_2O$ ).

### 2.2.2 DESCRIZIONE DEL PERMEAMETRO SPERIMENTALE

Lo strumento sperimentale per la misura della permeabilità è composto principalmente dalla fiala e dal sistema di celle di pressione, che permettono di misurare la pressione nella fiala durante il suo riempimento.

La misura avviene in due fasi [14]:

- Nella prima fase lo strumento viene montato sull'asta della macchina perforatrice ed inserito nel terreno alla quota a cui si vuole effettuare la misura di permeabilità, mantenendo la pietra porosa coperta da un rivestimento spostabile.
- Dopo che è stato posizionato, il rivestimento viene sollevato e la piastra porosa entra in contatto con il terreno. L'acqua interstiziale viene estratta attraverso la pietra porosa, attirata dalla differenza di pressione all'interno della fiala.

Il primo prototipo inventato (come illustrato nella Figura 2.6) è stato riprogettato, a causa della scarsa resistenza della fiala in plexiglas, che è stata sostituita con una in acciaio sebbene così lo strumento non possa essere utilizzato per il campionamento delle acque per analisi di tipo chimico.

Si descrive qui lo strumento (illustrato in Figura 2.5) in modo più dettagliato [14]:

- Punta perforatrice ad elica e manicotto scorrevole di occlusione del filtro;
- Filtro poroso in TEFLON;
- Corpo con elemento filettato per il carotiere;
- Corpo con connettore per fiala, tale giunzione è a baionetta per garantire una connessione sicura anche sotto l'azione di macchinari per l'infissione;
- Due sensori di pressione in corrispondenza degli estremi, denominati *Sensore 1* e *Sensore 2*, posizionati rispettivamente nella parte inferiore e nella parte superiore all'interno della fiala;
- Connessione tra campionatore e tubo contenente l'elettronica in cui sono presenti due viti a brugola per la depressurizzazione (D) e la pressurizzazione (P);
- Tubo con gli apparati elettronici in cui si trovano un connettore inferiore, per la connessione alle celle di pressione, e uno superiore con attacco per il cavo;
- Carotiere in acciaio con funzione di protezione dello strumento e di connessione dello stesso alla punta ad elica;
- Cavo multipolare con spinotto per connessione allo strumento;
- Data logger per la raccolta dei dati e la connessione al computer (illustrato in Figura 2.2.2.1);
- Pompa a vuoto "12 V, con attacchi a morsetto per batteria e manometro di controllo pressione" (illustrato in Figura 2.4).



Figura 2.4 da sinistra è: La pompa a vuoto, batteria e datalogger.

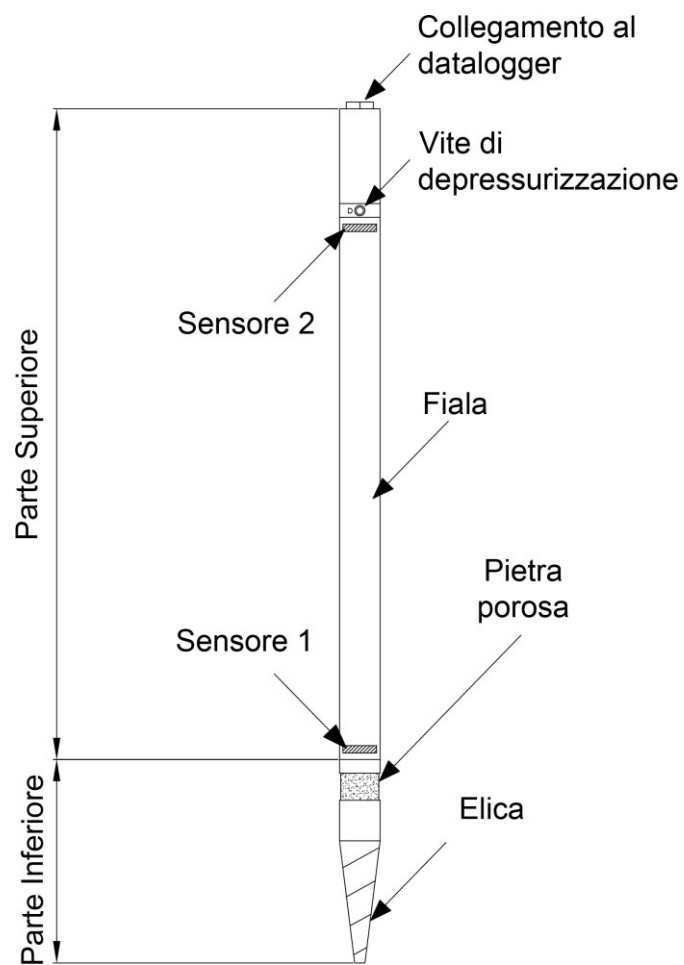


Figura 2.5 Schematizzazione dello strumento oggetto di studio. [14]



Figura 2.6 Primo prototipo. [14]



Figura 2.7 Pietra porosa coperta. [14]



Figura 2.8 Pietra porosa scoperta. [14]

Le prove possono essere eseguite sia in sito che in laboratorio. In una precedente tesi [14] sono stati effettuati delle prime prove in laboratorio con quattro diversi tipi di terreni granulari (la cui granulometria è riportata nel Grafico 2.1):

- campioni di terreni da Brenta (Sabbia con ghiaia);
- campioni di terreni da Adige (Sabbia media e fine);
- Ghiaino (Ghiaia);
- Stabilizzato Rosso (Ghiaia con sabbia).

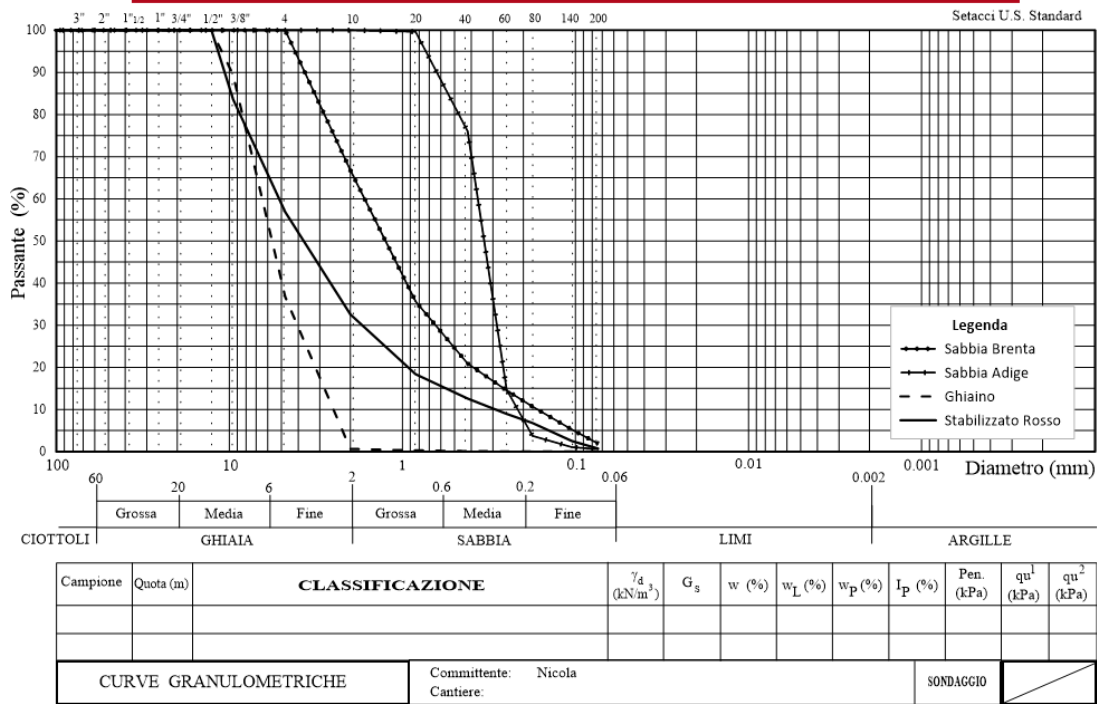


Grafico 2.1 Granometria dei campioni analizzati [14].

Tabella 2.1 Rapporto permeabilità calcolata tramite correlazioni e valori formula BAT. [14]

Terreno	Prova	k correlazioni		k "BAT media troncata"		k "BAT tratto costante"		k "BAT $P_{80}$ "	
		$k_c$	$k_c/k_{S2}$	$k_c/k_{S1}$	$k_c/k_{S2}$	$k_c/k_{S1}$	$k_c/k_{S2}$	$k_c/k_{S1}$	
-	-	[m/s]	-	-	-	-	-	-	-
Sabbia "Brenta"	4	2,71E-04	13,50	7,15	26,35	11,90	3,15	2,47	
	5	1,95E-04	6,40	3,76	11,23	7,03	-	1,06	
	6	2,11E-04	3,57	2,23	4,42	3,42	0,97	0,80	
Sabbia "Adige"	7	4,50E-04	0,44	0,14	-	-	-	0,08	
	8	3,14E-04	0,54	0,05	-	0,35	-	0,16	
	9	2,96E-04	0,31	0,12	-	0,16	0,31	0,12	
Ghiaino	10	-	-	-	-	-	-	-	
	11	-	-	-	-	-	-	-	
	12	-	-	-	-	-	-	-	
Stabilizzato rosso	13	5,34E-04	4,51	0,86	161,63	40,24	1,61	1,43	

Tabella 2.2 Rapporto permeabilità calcolata tramite “permeometro” e valori formula BAT. [14]

Terreno	Prova	k "Fusto"	k "BAT media troncata"		k "BAT tratto costante"		k "BAT P <sub>80</sub> "	
		$k_f$ [m/s]	$k_f/k_{S2}$	$k_f/k_{S1}$	$k_f/k_{S2}$	$k_f/k_{S1}$	$k_f/k_{S2}$	$k_f/k_{S1}$
-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sabbia "Brenta"	4	7,38E-04	36,81	19,48	71,83	32,43	8,59	6,72
	5	7,05E-04	23,13	13,60	40,59	25,43	-	3,83
	6	7,72E-04	13,05	8,14	16,13	12,49	3,54	2,93
Sabbia "Adige"	7	2,27E-04	0,22	0,07	-	-	-	0,04
	8	2,22E-04	0,38	0,04	-	0,25	-	0,11
	9	2,35E-04	0,25	0,10	-	0,13	0,25	0,10
Ghiaino	10	1,18E-03	7,96	2,87	-	6,39	-	2,65
	11	1,23E-03	7,51	2,43	-	7,39	4,15	2,56
	12	1,35E-03	20,96	7,99	48,14	17,60	-	5,07
Stabilizzato rosso	13	1,18E-03	9,97	1,89	357,35	88,97	3,56	3,16

Come sopra descritto; i risultati ottenuti della prova eseguita in laboratorio con lo strumento sperimentale sono stati poi confrontati con i valori ricavati utilizzando le correlazioni per il calcolo la permeabilità già descritti (illustrato nella Tabella 2.1 e Tabella 2.2 ). Confrontando i valori ottenuti si osserva:

- le prove sui terreni granulari hanno mostrato un sostanziale allineamento con le aspettative;
- nei campioni poco compatti, con dimensioni dei grani modeste e monogranulari la prova fallisce. Questo è probabilmente dovuto alle forze di filtrazione che diminuiscono eccessivamente le tensioni efficaci nel campione e alla formazione di vie preferenziali all’interfaccia tra strumento e terreno.

I valori ottenuti con le diverse interpretazioni risultano abbastanza soddisfacenti considerando il numero di test effettuati e tenendo conto dell’alta variabilità dei valori del parametro del terreno misurato.

Per comprendere in modo più approfondito il funzionamento dello strumento sperimentale e definire le reali potenzialità e limiti si è quindi deciso di testare lo strumento in sito in funzione di diversi gradienti idraulici, diverse compattazioni e diverse tipologie di terreno [14].

### 2.2.2.1 ESECUZIONE DELLA PROVA IN SITO

La prova viene eseguita in tre fasi:

- I. Fase di **montaggio e depressurizzazione**: in cui viene preparato lo strumento per esecuzione della prova, facendo riferimento ai seguenti punti:
  - Se il filtro è scoperto è necessario chiudere il manicotto (illustrato in Figura 2.7 e Figura 2.8) ruotando l'elica in senso antiorario guardando il sistema dall'alto (con l'elica rivolta verso il basso) al fine di bloccare l'innesto a baionetta del manicotto per evitare che il filtro si scopra durante il posizionamento;
  - Innestare la fiala completa attraverso l'attacco a baionetta nel corpo inferiore (punta ad elica con pietra porosa);
  - Far passare il cavo attraverso l'apposita fessura nell'adattatore fra aste e carotiere e all'interno del carotiere facendo attenzione alla corretta posizione dei filetti (una freccia indica il verso in cui inserire il carotiere);
  - Connettere lo spinotto con la strumentazione;
  - Svitare la vite a brugola D e collegare la pompa a vuoto (senza forzare per non rovinare la madrevite dell'elemento di ottone);
  - Inizializzare il sistema di registrazione avviando l'acquisizione dei dati nel data logger. In questo modo viene settato il valore di pressione di riferimento ( $P_{atm}$ ) ponendolo pari a zero;
  - Collegare la pompa alla batteria (pinza rossa al polo positivo, la nera al polo negativo);
  - Azionare la pompa a vuoto finché il manometro non segna il valore di pressione prescelto e tappare il foro D con vite a brugola. A questo punto assicurarsi, attraverso la lettura delle pressioni dal data logger e dal manometro meccanico, che il sistema mantenga invariato tale valore di pressione (indicativamente dovranno leggersi dei valori per sensore 1 e sensore 2 di circa  $-0.80$  Bar);
  - Scollegare la pompa a vuoto e avvitare la vite a brugola D;
  - Agganciare la fiala alla punta ad elica tramite l'attacco a baionetta, inserire il carotiere e avvitarlo al filetto del corpo inferiore.



2) Fase di **abbassamento** dello strumento ed **esecuzione** della prova; in cui si calerà lo strumento a fondo foro e si azionerà il meccanismo per l'esecuzione del test, facendo riferimento ai seguenti punti:

- Abbassare il permeametro a fondo foro senza girare le aste, nella prima asta sopra il permeametro è opportuno posizionare dei distanziatori per evitare danneggiamenti del cavo. Il cavo verrà passato all'interno della tubazione di rivestimento fissandolo alle aste con nastro adesivo di carta. Dal momento che le aste di perforazione girano in senso orario (guardandole dall'alto) così come l'elica per avvitare il permeametro, il cavo dovrà essere avvolto attorno alle aste in senso antiorario per tanti giri quanti si prevede debbano essere quelli per infliggere l'elica a fondo foro (almeno quattro).
- Appoggiato il permeametro a fondo foro, questo dovrà essere abbassato nel terreno lentamente, curando che l'avanzamento e la velocità di rotazione siano congruenti con il passo dell'elica (il sondatore dovrà prendere alcune misure);
- Apertura dell'innesto a baionetta, avviene in automatico nel momento in cui viene spinta la punta nel terreno avvitandola;
- Una volta posizionata l'elica alla profondità preventivata è necessario attendere almeno 30 secondi dando modo al terreno di assestarsi attorno all'elica e permettendo la stabilizzazione della temperatura;
- Alzare la batteria di aste lentamente per l'esatta lunghezza del filtro, a questo punto ha inizio la prova vera e propria con il sistema che richiama acqua dal terreno.

3) Fase di **recupero** dello strumento e ulteriore avanzamento del foro:

- Terminata la prova, lo strumento dovrà essere recuperato applicando lentamente tiro alle aste evitando, se possibile, qualsiasi operazione di rotazione.
- Una volta che l'elica non è più nel terreno, lo strumento dovrà essere recuperato senza girare le aste, avendo cura di non battere i

filetti con il martello affinché le vibrazioni non danneggino i sensori.

- Una volta portato lo strumento in superficie il carotiere dovrà essere svitato gentilmente, dovrà essere sconnesso il cavo e la fiala dalla punta, in questo modo verrà anche svuotata.
- La parte inferiore dovrà, quindi, essere pulita a mezzo di acqua ed aria compressa (illustrato nella Figura 2.9).

In queste ultime fasi avanzerà il foro per eseguire la successiva prova di permeabilità. [14].

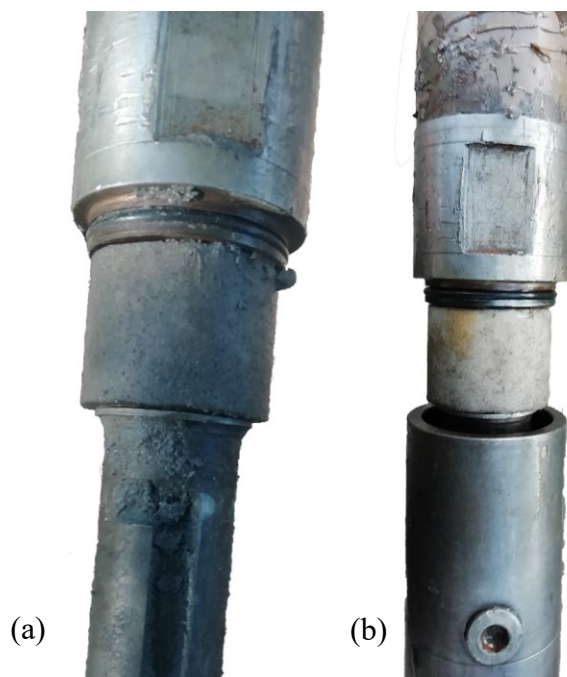


Figura 2.9 Filtro poroso da pulire dopo opera (a) Filtro poroso pulito dopo opera (b)

### 2.2.2.2. CALCOLO DELLA PERMEABILITA' DALLE MISURE OTTENUTE CON PERMEAMETRO BAT

Come già descritto, lo strumento sperimentale utilizzato è stato ideato e realizzato come un adattamento del permeametro BAT per terreni incoerenti; è possibile quindi utilizzare la medesima equazione di BAT (Eq. (2.1)) per calcolo della permeabilità, procedendo con i seguenti punti:

- viene calcolato il fattore di forma  $F$ , che è di circa 310 (m);
- Il Volume iniziale della fiala  $V_0$  è di circa 1368 (ml);
- La pressione idrostatica  $P_1$  viene calcolata come la differenza tra la profondità del test e la profondità della falda stessa ( $mH_2O$ );
- $P_t$  come riportato in precedenza è la pressione misurata al tempo  $t$  di un secondo ( $mH_2O$ );
- $P_0$  come riportato in precedenza è la pressione iniziale nella fiala misurata quando la pietra porosa viene scoperta ( $mH_2O$ ).

Quindi per calcolare il coefficiente di permeabilità nel tempo, durante tutto il corso della prova, a partire dalla variazione della pressione interna alla fiala, sono state valutate [14]:

- la media troncata dei valori ricavati in ogni secondo, eliminando il 15% dei valori iniziale e finale, per scartare dal calcolo i valori estremi.
- la media aritmetica dei valori corrispondenti al tratto costante, l'operazione è da eseguire manualmente definendo l'intervallo di valori da considerare.
- Nel manuale [2] realizzato specificamente per il permeametro BAT, si fa riferimento al valore di  $P_{80}$ , corrispondente all' 80% del valore di **Pressure recovery**. Tale pressione è indicata come quella raccomandata per il calcolo del coefficiente di permeabilità. Viene, inoltre, fornita la seguente relazione per il calcolo della  $P_{80}$ :

$$P_{80} = P_0 + 0,8 \cdot (P_1 - P_0)$$

Dove:

- $P_0$  è la pressione iniziale nella fialla, può essere scelta apriori ( $mH_2O$ );
- $P_1$  è il valore della pressione dei pori all'equilibrio ( $mH_2O$ ).

Si otterranno così da ciascuna prova in sito, per ciascun livello investigato 3 diversi valori stimati di permeabilità, da confrontare poi con quelli stimati attraverso le formule dalle granulometrie dei campioni svolte in laboratorio.

### 3. SITO SPERIMENTALE E MISURE ESEGUITE

Il fiume Adige nasce nella provincia di Bolzano, nord Italia, poi sbocca in pianura padana nei pressi di Verona, per poi sfociare in mare a sud della laguna di Venezia. Il sito allo studio si trova nel primo tratto, in provincia di Bolzano, dove per diversi tratti il fiume scorre parallelo all'autostrada del Brennero.

Nella lunga storia del sito, numerose modifiche nel paesaggio (nello stato naturale) sono state eseguite dall'uomo per adattarlo alle proprie esigenze. In particolare, negli anni Ottocento furono realizzati argini per confinare il fiume che hanno modificato il regime delle acque e trasformato l'habitat naturale. Prima infatti il corso del fiume era caratterizzato da meandri e spesso cambiava tracciato, come si può vedere ancora adesso dalla presenza nel sottosuolo di paleo-canali (come illustrato nella Figura 3.4). Nel recente passato, moderati fenomeni di sifonamenti e allagamenti hanno colpito un tratto dell'argine destro (che affianca l'autostrada A22) di circa 350 m di lunghezza.

L'autostrada del Brennero è uno dei più importanti assi del trasporto europeo ed in caso di ipotetica rottura arginale, l'autostrada viene chiusa per motivi di sicurezza. Per rinforzare il sistema di protezione ed evitare l'erosione interna, il rilevato è stato recentemente rinforzato in alcuni tratti. Tuttavia, nell'area persistono ancora moderati fenomeni di sifonamenti, quando il livello dell'acqua nel fiume è elevato.

Lungo il tratto di argine destro, tra gli abitati di Laghetti e Salorno in provincia di Bolzano, sono stati individuati 2 siti sperimentali dove eseguire un'indagine multidisciplinare con una serie di campagne di misura volte a caratterizzare il regime di filtrazione ed individuare le aree più soggette ad erosione interna . .

In ciascun sito sono stati realizzati:

- 5 sondaggi a carotaggio continuo lungo tutta la verticale (30m circa)
- prove SPT in foro,
- prove di laboratorio sul materiale campionato dal carotaggio continuo,
- prove Lefranc e prove con permeametro sperimentale per determinare la permeabilità dei livelli più grossolani,

- prove ERT in foro e misure di temperatura con fibra ottica lungo tutta la verticale durante immissione di acqua con sale tracciante, per misurare il campo di filtrazione 3D interno al corpo arginale.

Le misure eseguite in questi due siti sperimentali quindi combinano tecniche di indagine tradizionali con altre più sperimentali ed innovative, come la fibra ottica installata sulla verticale all'interno dei pozzi, per misurare la temperatura del terreno in profondità e la sua variazione a causa della filtrazione, in modo da caratterizzare il regime di filtrazione arginale per poter valutare la stabilità degli argini durante una possibile piena [13].



Figura 3.1 Sito sperimentali di Salorno (BZ).

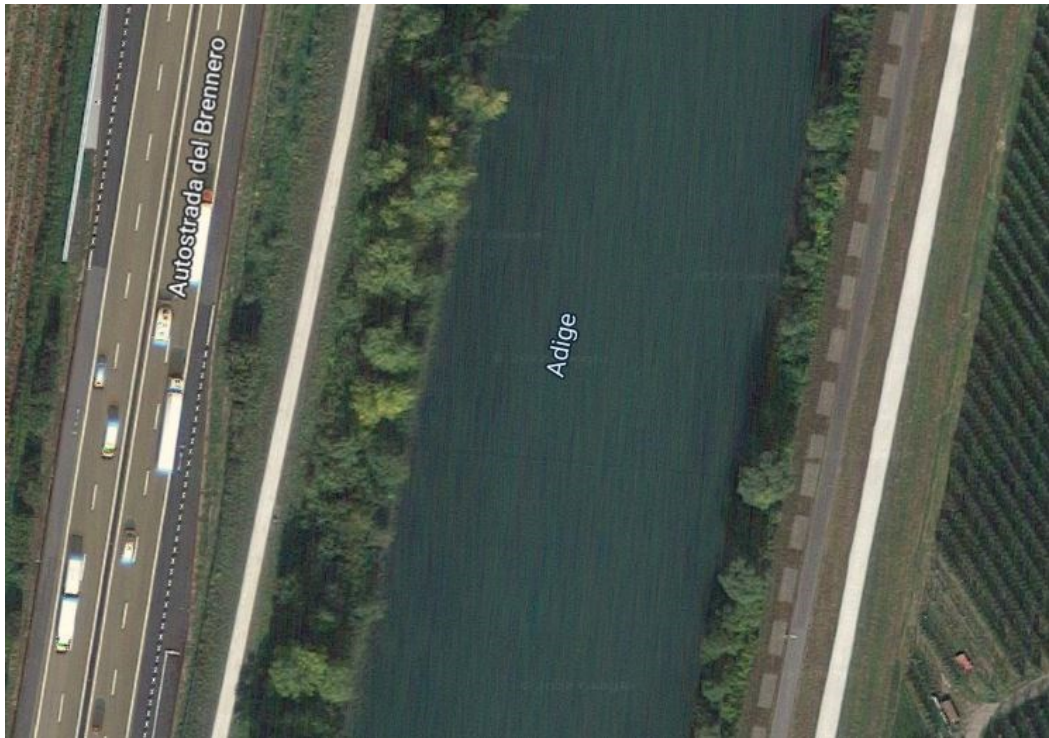


Figura 3.2 Sito sperimentali di Laghetti (BZ).

### **3.1. DESCRIZIONE DEI SITI SPERIMENTALI**

I due siti sperimentali scelti per analizzare il regime di filtrazione interno e la stabilità dell'argine destro dell'Adige lungo l'autostrada A22 si trovano nella località Salorno mentre il secondo sito è nella località Laghetti, a distanza di circa 4 km (illustrato nella Figura 3.2).

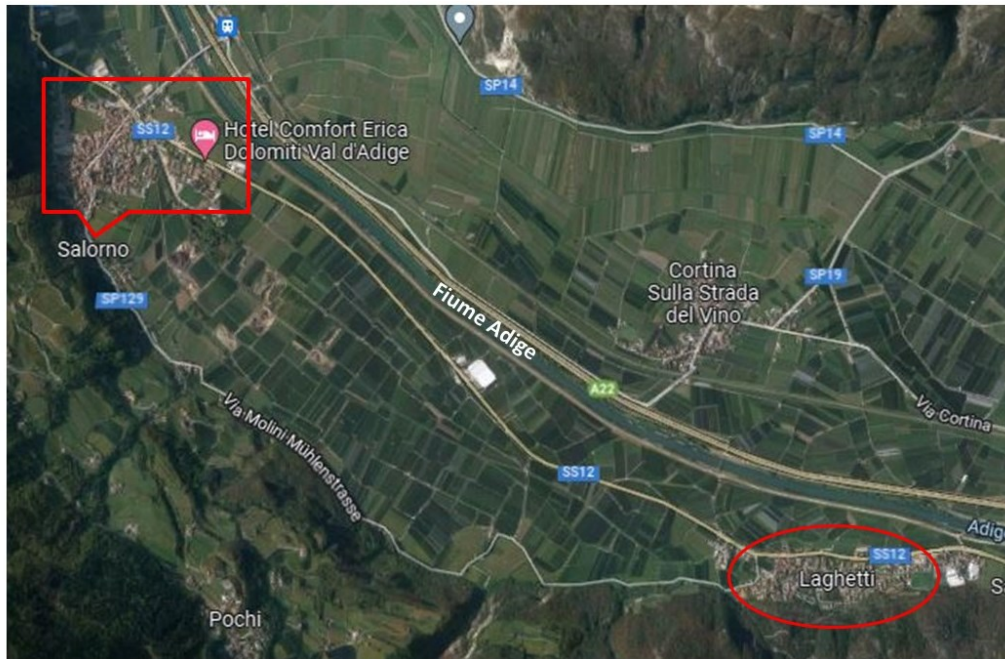


Figura 3.3 Dislocazione delle aree di studio 1 e 2.

I due siti sono caratterizzati da due stratigrafie diverse, il primo sito “Salorno” con dominanza di terreni fini (come limo e argilla ) ed il secondo sito “Laghetti” caratterizzato dalla presenza di terreni incoerenti (come sabbia e ghiaia), come indicato dalla presenza nel sottosuolo di un paleo-canale .

Lo scopo è misurare la permeabilità degli strati di materiale più grossolano interni all’argine, per capire meglio la situazione della filtrazione in condizione di piena. Viene eseguito un campo prove con cinque pozzi, nel quale:

- quattro sono disposti nei vertici di un quadrato sia nel lato campagna verso l’autostrada, che sul lato fiume (illustrato nella Figura 3.3 e 3.4);
- l’ultimo pozzo è al centro dei quattro pozzi, situato sulla cresta arginale (illustrato nella Figura 3.3 e 3.4).

Nei quattro pozzi dei vertici sono state installate delle fibre ottiche lungo tutta la verticale e degli elettrodi (1 al metro), allo scopo di eseguire delle misure ERT in foro. La misura avviene inserendo una salamoia (acqua ad alto contenuto di sale) che funziona da tracciante nel pozzo centrale (foro di immissione) e contemporaneamente misurare le variazioni di temperatura lungo tutta la profondità con la fibra ottica e le variazioni di



resistività in tutto il volume di terreno compreso nel campo prove tramite gli elettrodi inseriti nei pozzi, per determinare il campo di filtrazione tridimensionale interno al corpo arginale.

Come emerso dalle misure già effettuate nel primo sito test, questa tecnica sembra essere più adatta al sito di "Lagheti", caratterizzato da materiali più grossolani (sabbiosi e ghiaiosi), piuttosto che al sito "Salorno", caratterizzato da materiali poco permeabili.

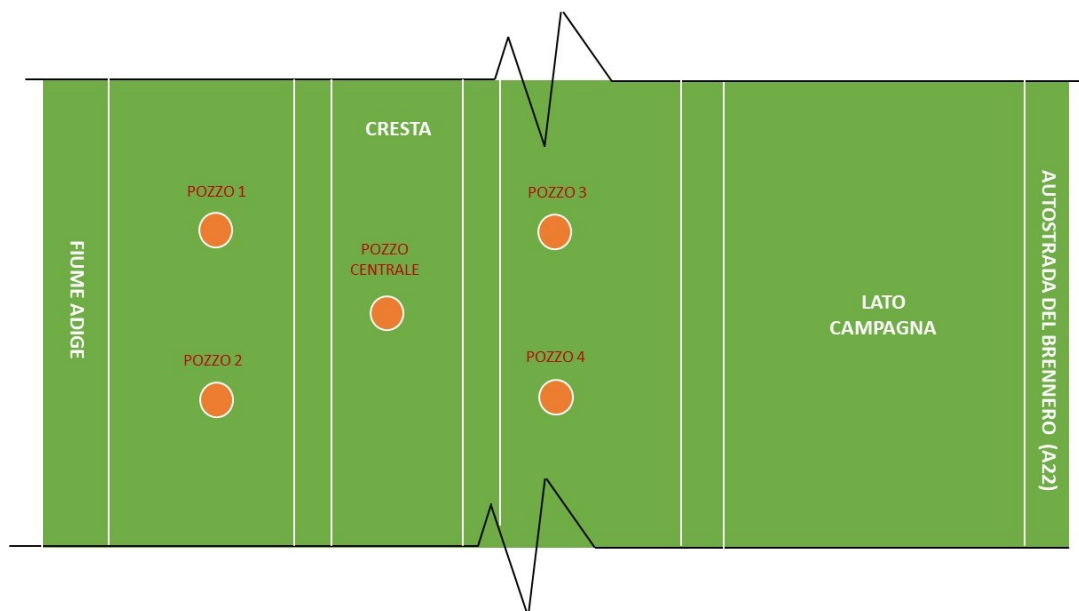
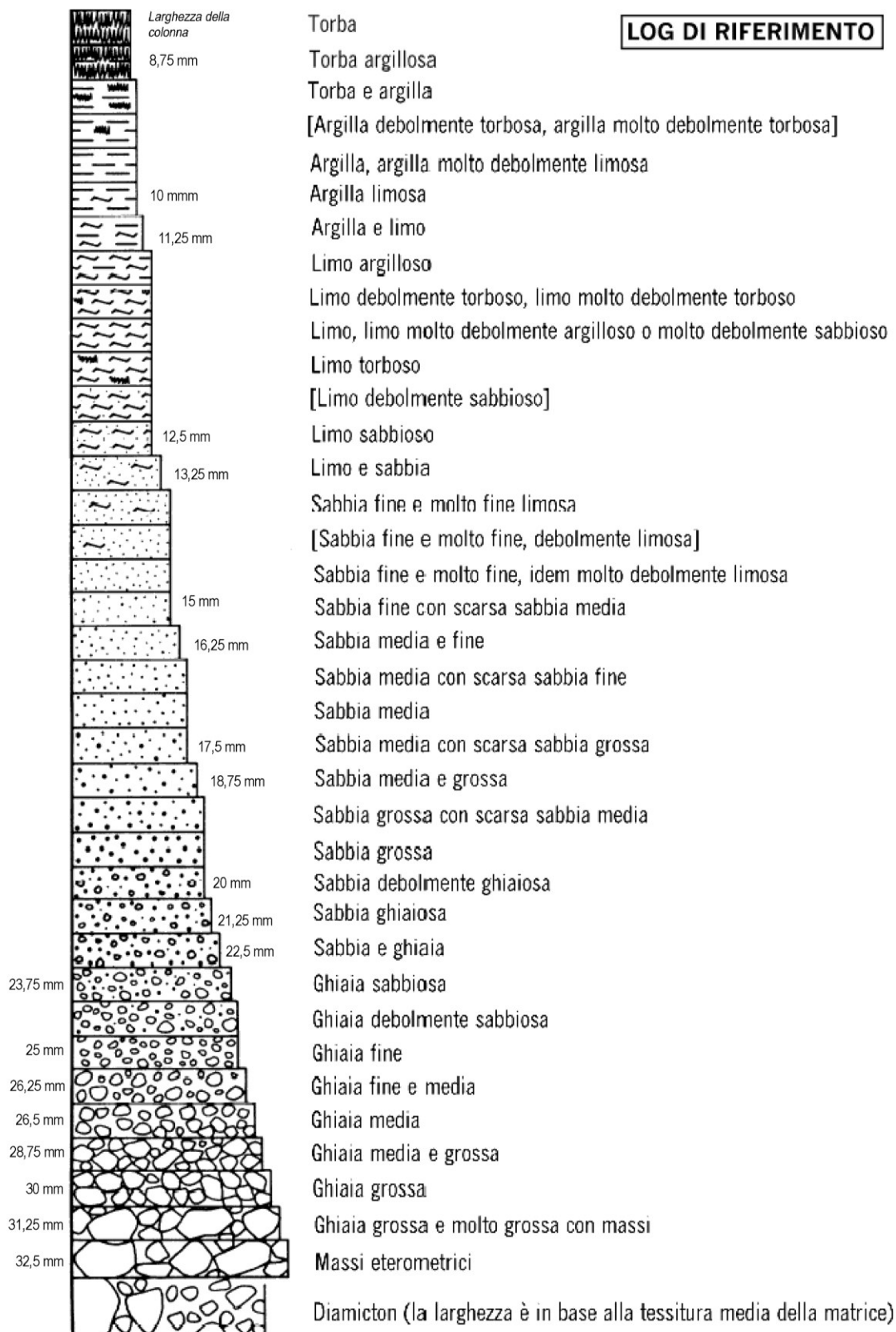


Figura 3.4 Sezione planimetrica dei cinque pozzi.

Di seguito si riporta il modello stratigrafico del sito sperimentale di 'Lagheti', come è stato ricavato dai sondaggi eseguiti.



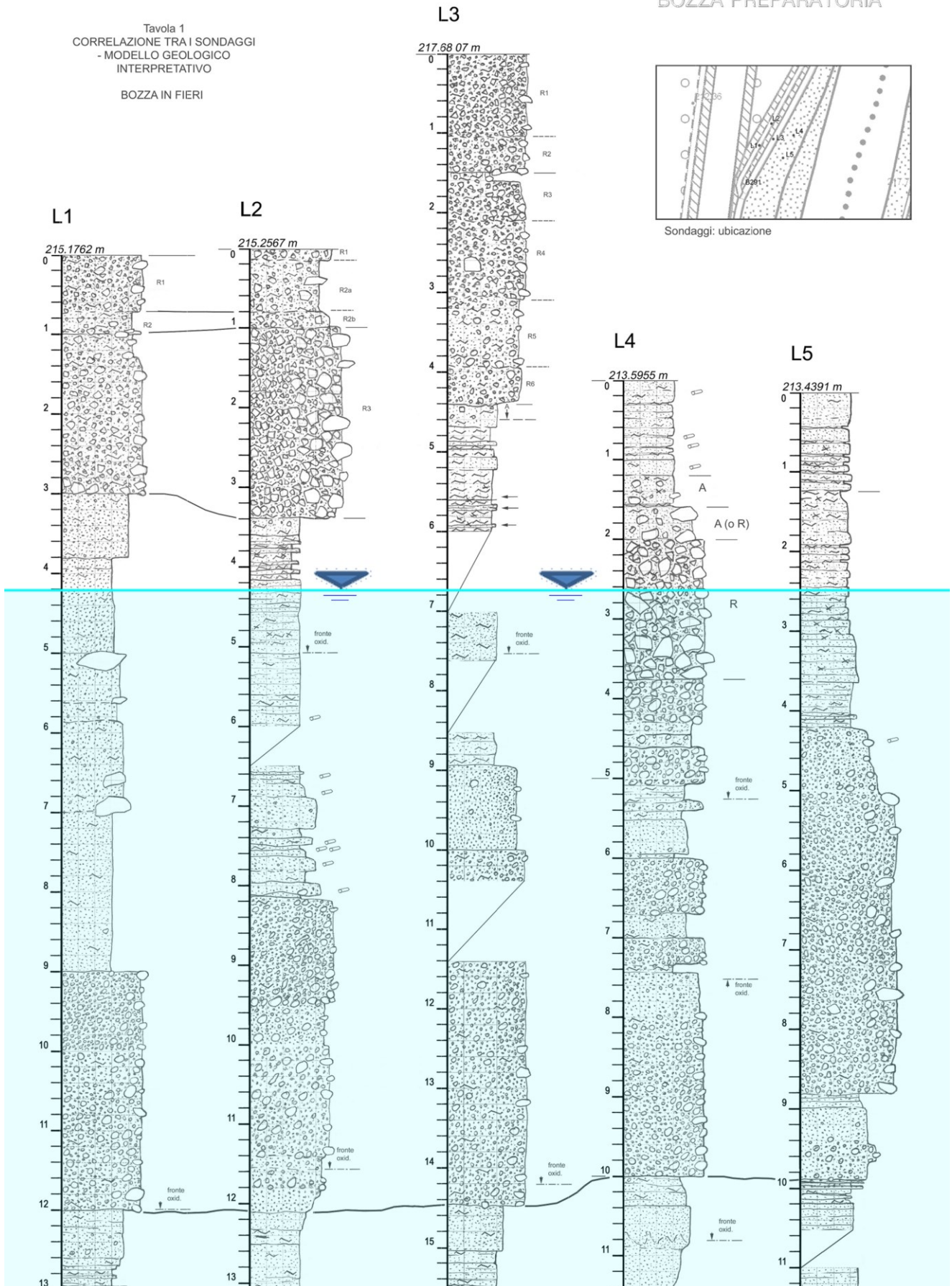
© 2000 - by Maurizio Cucato

Figura 3.5 Riferimento delle stratigrafie nella Figura 3.6.

Sito di studio: argine dx F. Adige di fronte a Laghetti di Egna (BZ)

BOZZA PREPARATORIA

Tavola 1  
CORRELAZIONE TRA I SONDAGGI  
- MODELLO GEOLOGICO  
INTERPRETATIVO  
BOZZA IN FIERI



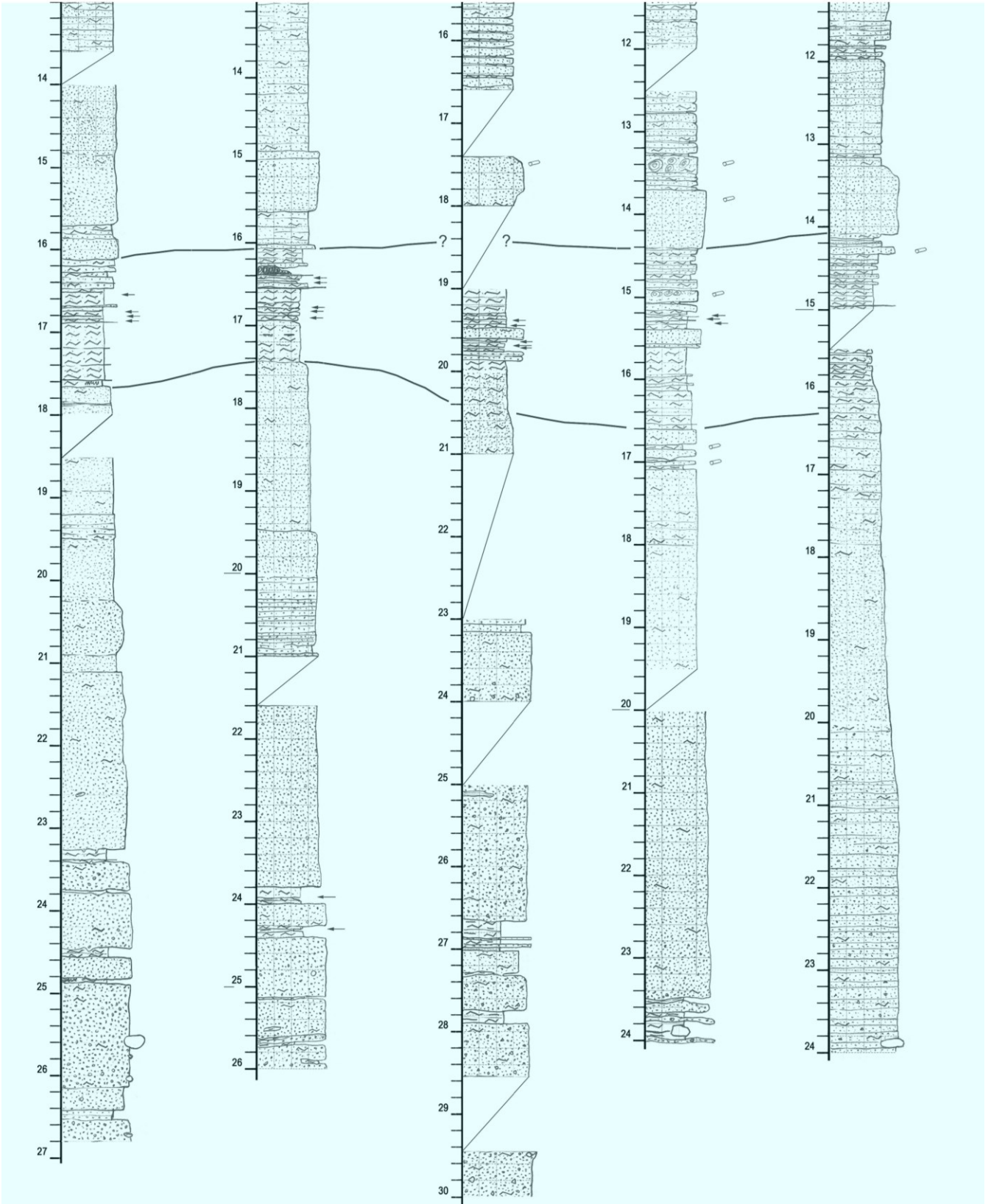


Figura 3.6 Sezioni dei cinque pozzi e le loro stratigrafie nel sito Laghetti.

### Stratigrafia del sondaggio L1:

P.C. – 3m = Ghiaia media-grossa con presenza di sabbia grossa, ghiaia fine, sabbia media, limo e tracce di sabbia fine.

3.0m – 3.8m = Sabbia fine con presenza di limo, sabbia media-grossa e tracce di ghiaia media-fine.

3.8m – 5.0m = Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media-grossa.

5.0m – 7.0m = Sabbia media con limo e presenza di sabbia media-fine con tracce di ghiaia grossa-media.

7.0m – 9.0m = Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media-grossa.

9.0m – 10.0m = Ghiaia media-fine con sabbia grossa-media.

10.0m – 12.0m = Ghiaia media-fine con sabbia grossa-media e tracce di limo.

12.0m – 12.80m = Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media-grossa e tracce di ghiaia fine-media.

12.80m – 13.60m = Sabbia fine e presenza di sabbia media.

13.60m – 15.0m = Sabbia fine-media con tracce di limo.

15.0m – 15.70m = Sabbia fine-media.

15.70m – 15.85m = Sabbia media-fine con limo.

15.85m - 16.10m = Sabbia media-fine.

16.10m – 17.70m = Limo debolmente sabbioso.

17.70m – 18.0m = Sabbia fine con tracce di limo.

18.0m – 23.20m = Sabbia fine-media e tracce di limo e ghiaia fine.

23.20m – 23.45m = Limo.

24.45m – 24.80m = Sabbia fine-media.

24.80m – 24.90m = Limo.

24.90m – 26.80m = Sabbia grossa-media-fine e presenza di limo e tracce di ghiaia grossa-media-fine.

### Stratigrafia del sondaggio L2:

P.C. – 1.0m = Ghiaia media-grossa con presenza di sabbia media-grossa-fine, ghiaia fine e limo.

1.0m – 3.40m = Ghiaia grossa-media-fine con sabbia grossa-media-fine e tracce di limo.

3.40m – 6.0m = Sabbia fine con limo.  
6.0m – 8.10m = Sabbia media-fine con limo e tracce di ghiaia fine.  
8.10m – 12.0m = Ghiaia grossa-media-fine con sabbia grossa-media e tracce di sabbia fine.  
12.0m – 15.0m = Sabbia fine con limo.  
15.0m – 15.60m = Sabbia fine-media.  
15.60m - 16.0m = Limo con sabbia fine.  
16.00 – 17.20 = Limo con tracce di sabbia fine ed argilla.  
17.20m – 21.0m = Sabbia fine-media.  
21.0m – 23.80m = Sabbia grossa-media-fine.  
23.80m – 24.0m = Limo con sabbia.  
24.0m – 24.23m = Sabbia grossa-media-fine.  
24.23m – 26.0m = Sabbia grossa-media con tracce di limo.

### Stratigrafia del sondaggio L3:

P.C. – 1.0m = Ghiaia media-fine con presenza di sabbia grossa-media-fine e tracce di limo.  
1.0m – 1.50m = Ghiaia media-fine con presenza di sabbia grossa-media-fine.  
1.50m – 2.10m = Ghiaia media-fine con presenza di sabbia grossa-media-fine e tracce di limo.  
2.10m – 3.10m = Ghiaia media-grossa e presenza di sabbia grossa-media-fine e tracce di limo.  
3.10m – 3.90m = Ghiaia media-fine e sabbia grossa-media-fine con presenza di limo.  
3.90m – 4.40m = Ghiaia media-fine e sabbia grossa-media-fine con tracce di limo.  
4.40 – 4.60 = Sabbia media-fine con limo e tracce di ghiaia fine.  
4.60m – 7.50m = Limo con sabbia media-fine.  
7.50m – 14.45m = Ghiaia media-fine con sabbia grossa-media-fine e limo e tracce di ghiaia grossa.  
14.45m – 19.0m = Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media.  
19.0m – 23.0m = Limo con sabbia fine.  
23.0m – 24.0m = Sabbia media-grossa-fine e tracce di limo e ghiaia fine.

24.0m – 26.60m = Sabbia grossa-media-fine con ghiaia fine e presenza di limo.

26.60m – 27.0m = Limo con sabbia fine.

27.0m – 27.30m = Sabbia fine con limo.

27.30m – 27.70m = Sabbia media-fine e presenza di ghiaia fine e limo.

27.70m – 27.90m = Limo..

27.90m – 30.0m = Sabbia grossa-media-fine e presenza di ghiaia fine e limo.

#### Stratigrafia del sondaggio L4:

P.C. – 1.20m = Sabbia fine con limo.

1.20m – 2.0m = Sabbia fine con ghiaia grossa-media-fine e presenza di limo.

2.0m – 3.80m = Ghiaia grossa-media-fine con sabbia media-fine e limo.

3.80m – 4.30m = Ghiaia media-fine con sabbia grossa-media-fine.

4.30m – 4.60m = Sabbia grossa-media-fine con presenza di ghiaia fine e limo.

4.60m – 5.10m = Ghiaia media-fine con presenza di sabbia grossa-media-fine.

5.10m – 5.40m = Sabbia fine con limo e ghiaia fine.

5.40m – 6.0m = Sabbia grossa-media-fine con tracce di ghiaia fine e limo.

6.0m - 6.70m = Ghiaia grossa-media con presenza di sabbia grossa, ghiaia fine, sabbia media e tracce di sabbia fine e limo.

6.70m – 7.0m = Sabbia grossa-media-fine con presenza di limo e tracce di ghiaia fine.

7.0m – 7.40m = Ghiaia media-grossa con presenza di sabbia grossa, limo, ghiaia fine, sabbia media e tracce di sabbia fine.

7.40m – 8.0m = Sabbia grossa-media-fine con presenza di ghiaia fine.

8.0m – 10.0m = Ghiaia media-grossa con presenza di sabbia grossa, limo, ghiaia fine, sabbia media e tracce di sabbia fine.

10.0m – 10.40m = Sabbia media-fine con limo.

10.40 – 11.50 = Sabbia media-fine con tracce di ghiaia fine.

11.50m – 13.70m = Sabbia fine con limo,

13.70m – 14.40m = Sabbia media-fine.

14.40m – 15.40m = Limo con Sabbia fine.

15.40m – 15.60m = Sabbia media-fine.

15.60m – 16.60m = Limo con Sabbia fine.

16.60m – 20.0m = Sabbia fine con limo.

20.0m – 23.40m = Sabbia fine con sabbia media e limo.

23.40m – 24.0m = Sabbia fine-media con limo e ghiaia grossa e fine.

#### Stratigrafia del sondaggio L5:

P.C. – 4.20m = Sabbia fine con limo.

4.20m – 5.0m = Ghiaia media-grossa con sabbia grossa e media e presenza di ghiaia fine.

5.0m – 5.80m = Sabbia media con sabbia fine e presenza di limo, sabbia grossa e ghiaia media.

5.80m - 6.20m = Ghiaia media-grossa con presenza di sabbia grossa, ghiaia fine, sabbia media elimo e tracce di sabbia fine.

6.20m – 8.90m = Ghiaia fine con sabbia grossa e presenza di ghiaia media e sabbia media.

8.90m – 9.90 = Sabbia fine-media-grssa e presenza di ghiaia media-fine.

9.90m – 11.70m = Sabbia fine con limo.

11.70m – 12.0m = Limo con sabbia fine.

12.0m – 14.30m = Sabbia media-fine.

14.30m – 16.0 = Limo con sabbia fine.

16.0m – 20.0m = Sabbia fine-media con presenza di limo e sabbia grossa.

20.0m – 24.0m = Sabbia media con limo e preenza di sabbia fine-grossa.



## 4. DESCRIZIONE DELLE PROVE ESEGUITE IN SITO E RISULTATI OTTENUTI

Per effettuare l'interpretazione delle prove di permeabilità eseguite in sito su terreni granulari tramite il permeometro sperimentale è stato realizzato un campo prove nel sito di Laghetti, come precedentemente descritto, dove sono stati realizzati cinque pozzi in cui sono state realizzate le prove di permeabilità a determinate profondità, ed inoltre sono stati prelevati dei campioni di materiale appartenente ai medesimi livelli testati, con la tecnica del cosiddetto *gel push sampler*. Questa tecnica, nata in Giappone, consente di portare alla luce campioni di terreno granulare in modo tale che mantengano inalterate le loro caratteristiche strutturali di tensione efficace, l'indice dei vuoti, porosità ecc., per poterli testare in laboratorio. Inoltre, dall'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo, il materiale è stato depositato nelle cassette catalogatrici e portato in laboratorio per eseguire la classificazione granulometrica, prove di permeabilità, deformabilità e prove triassiali per misurare i parametri di resistenza.

Lo strumento sperimentale per la misura di permeabilità descritto nel precedente capitolo è stato quindi utilizzato nel sito di Laghetti in corrispondenza degli strati sabbiosi: in sintesi, esso è caratterizzato da una fiala di circa 1m di lunghezza dove inizialmente viene creato il vuoto, che viene installata sulle aste di perforazione ed inserita alla profondità del livello da testare, mantenendo il filtro poroso chiuso. Nel momento in cui inizia la misura il filtro viene aperto e l'acqua presente nell'acquifero filtra all'interno della fiala: la variazione di pressione nel misurata all'interno viene quindi elaborata in modo da stimare la permeabilità dello strato testato.



Figura 4.1 Strumento sperimentale in opera nel sito di Laghetti

#### **4.1. ELABORAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI DAL PERMEAMETRO SPERIMENTALE**

Come descritto nel capitolo 2, per testare il funzionamento del permeametro sperimentale in modo più approfondito e definirne le reali potenzialità e limiti, sono state eseguite 23 prove in sito alla profondità corrispondente a diversi tipi di terreno in cantiere, e ad ogni livello di profondità lo strumento fornisce valori di pressione che sono stati utilizzati per calcolare la permeabilità di quello strato, attraverso l'interpretazione della formula BAT.

I due sensori disposti alle due estremità della fiala (sopra e sotto) insieme con la datalogger forniscono i valori ( in formato .log ) di pressione nel tempo con la frequenza di 1 secondo in unità di misura *centiBar* , che poi vengono trasformati in *mH<sub>2</sub>O* per effettuare i calcoli in excel ( *il software scelto per l'esecuzione della formula di BAT* ). In ogni file sono riportati i valori di pressione registrati (come ad esempio riportato nella Figura 4.2), ogni colonna riporta la serie misurata da un sensore. Il sensore 2 è risultato più affidabile dell'altro, e viene quindi utilizzato per il calcolo. Nel tempo è possibile riconoscere tre diversi andamenti della pressione:

- i valori iniziali di pressione 0 oppure 1 centiBAR con la pompa a vuoto spenta (illustrato in Figura 4.2 (a) tratto rosso);
- accendendo la pompa a vuoto estraggo aria, l'acqua inizia ad entrare nella fiala e si misurano pressioni negative decrescenti (illustrato in Figura 4.2 (a) e (b) tratto giallo);
- la pressione misurata continua a crescere sempre più rapidamente (illustrato in Figura 4.1 (c) tratto verde) fino alla stabilizzazione dei valori che viene raggiunta al termine della prova (illustrato in Figura 4.2 (d) tratto rosso).

01090

Pres2, Pres1

+0001;+0000

+0001;+0000

+0001;-0000

+0001;+0000

+0001;-0000

+0001;-0000

+0001;-0000

+0001;+0000

+0001;-0000

+0001;-0000

-0003;-0004

-0008;-0009

-0015;-0015

-0019;-0019

-0024;-0024

-0027;-0027

-0030;-0030

-0034;-0033

-0036;-0036

-0039;-0039

-0041;-0041

-0043;-0043

-0046;-0046

-0047;-0047

-0050;-0049

-0051;-0051

-0053;-0053

-0054;-0054

-0055;-0055

-0057;-0056

-0058;-0057

-0059;-0059

-0060;-0060

-0072;-0071

-0072;-0071

-0073;-0072

-0073;-0073

-0073;-0072

-0074;-0073

-0074;-0073

-0074;-0074

-0074;-0073

-0075;-0074

-0075;-0074

-0075;-0074

-0075;-0075

-0075;-0074

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0076

-0076;-0076

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0076

-0077;-0076

-0077;-0076

-0077;-0076

-0077;-0076

-0077;-0076

-0077;-0076

-0077;-0077

-0077;-0077

-0077;-0076

-0078;-0076

-0078;-0076

-0078;-0076

-0078;-0077

-0078;-0077

-0078;-0076

-0078;-0076

-0078;-0076

-0078;-0076

-0078;-0076

-0078;-0076

-0078;-0076

-0077;-0076

-0077;-0076

-0077;-0076

-0077;-0075

-0077;-0075

-0077;-0075

-0077;-0075

-0077;-0075

-0077;-0075

-0077;-0075

-0077;-0075

-0077;-0075

-0077;-0075

-0077;-0075

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0075

-0076;-0074

-0076;-0074

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

+0000;+0002

Eof

(a)

(b)

(c)

(d)

● Tratto iniziale e finale;

● Tratto di preparazione;

● Tratto in opera.

Figura 4.2 Dati di alcuni pressioni fornito dallo strumento sperimentale in centiBar.

Per l'elaborazione in excel vengono scelte dieci o quindici righe delle pressione a pressione costante nel tempo (come esempio illustrato in Grafico 4.2 (b)). Si procede quindi a calcolare la permeabilità tramite l'Eq. ( 2.1 ), calcolandone poi la media troncata e media aritmetica come già descritto nel Cap.2.

Dall'altra parte, sono state eseguite in laboratorio le prove di classificazione granulometrica a secco tramite setacciatura dei campioni di terreno prelevati dalle cassette catalogatrici alla medesima profondità a cui era stata eseguita la prova in sito con il permeametro sperimentale.

## **4.2. 4.1.1 SCELTA DEI LIVELLI SU CUI ESEGUIRE I CALCOLI**

E' stato scelto di analizzare i risultati ottenuti in sito alla profondità corrispondente al medesimo strato di da 23 campioni, definiti con codice del pozzo (L1, L2 ecc..) e profondità: (L1 - 10.5) ; (L1 - 22.4) ; (L2 - 5.3) ; (L2 - 6.5) ; (L2 - 7.1) ; (L2 -13) ; (L2 - 13.5) ; (L2 - 14) ; (L2 - 16.3) ; (L2 - 16.5) ; (L2 - 23.5) ; (L2 - 24.5) ; (L2 - 26) ; (L4 - 6) ; (L4 - 21) ; (L5 -5) ; (L5 -5.8) ; (L5 - 6) ; (L5 - 7.5) ; (L5 - 12) ; (L5 - 15) ; (L5 - 21) ; (L5 - 24).

L'andamento dei dati di pressione misurati mette subito in evidenza il fatto che il permeametro sperimentale ha un campo di funzionamento limitato a determinate classi di terreno, cosicché vengono distinte tre categorie, convenzionalmente chiamate:

- Prova '**ottima**';
- Prova 'a filtro **intasato**';
- Prova 'a filtro **aperto subito**'.

La prova **ottima** (come quella riportata ed illustrata nella Tabella 4.3) è tipica dei livelli di sabbia grossa-media-fine con la presenza di limo e tracce di ghiaia, cioè che ha una percentuale del peso di sabbia preponderante rispetto alla percentuale di peso di limo e

ghiaia. Tra le 23 prove campioni scelti, questo tipo di risultato si è ottenuto nei seguenti campioni, di cui si riporta il risultato della classificazione eseguita in laboratorio tramite setacciatura a secco,:

- L1 – 22.4m:  
Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media-grossa (illustrata nel Grafico 4.7);
- L2 -7.1m:  
Sabbia fine con presenza di limo, sabbia media-grossa e tracce di ghiaia fine e media. (illustrata nel Grafico 4.9)
- L2 - 13.0m:  
Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media. (illustrata nel Grafico 4.10)
- L2 - 13.5m:  
Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media. (illustrata nel Grafico 4.10 e 4.11);
- L2 – 14.0m:  
Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media. (illustrata nel Grafico 4.11);
- L2 - 23.5m:  
Sabbia media-grossa con limo, presenza di sabbia fine e tracce di ghiaia medio-fine. (illustrata nel Grafico 4.13);
- L2 – 24.5m:  
Sabbia media-grossa con limo, presenza di sabbia fine e tracce di ghiaia medio-fine. (illustrata nel Grafico 4.13);
- L2 – 26m:  
Sabbia media-grossa con limo, presenza di sabbia fine e tracce di ghiaia medio-fine. (illustrata nel Grafico 4.13);
- L4 – 21m:  
Sabbia fine con sabbia media e limo. (illustrata nel Grafico 4.14);
- L5 – 5.8m:  
Sabbia media con sabbia fine e presenza di limo, sabbia grossa e ghiaia media. (illustrata nel Grafico 4.16)
- L5 – 21m:  
Sabbia media con limo e presenza di sabbia fine-grossa. (Grafico 4.20);

- L5 – 24m:

Sabbia media con limo e presenza di sabbia fine-grossa. (Grafico 4.20);

Viene osservato considerando la Figura 3.6 che alcuni campioni presentano caratteristiche geotecniche molto simili, e appartengono infatti al medesimo livello stratigrafico individuato nella stratigrafia di cantiere:

- L2 – 13m  $\cong$  L2 - 13.5m  $\cong$  L2 – 14m;
- L2 - 23.5m  $\cong$  L2 - 24.5m  $\cong$  L2 – 26m;
- L5 – 21m  $\cong$  L5 – 24m.

Perciò, di questi, viene scelto solo un campione per ciascun livello stratigrafico per la stima della permeabilità a partire dalle caratteristiche granulometriche.

Il permeametro sperimentale funziona bene e fornisce valori di pressione coerenti solo nei livelli sopraindividati.

La prova ‘a filtro **intasato**’ (come illustrata nella Tabella 4.1) si verifica nei terreni limosi con sabbia fine cioè che hanno una maggior percentuale del peso di limo e minor percentuale del peso di sabbia fine. Si tratta dei seguenti campioni, tra i 23 campioni scelti:

- ❖ L2 – 5.3m:  
Sabbia fine con limo. (come riportato nel Grafico 4.8);
- ❖ L2 - 6.5m:  
Sabbia fine con limo. (come riportato nel Grafico 4.8);
- ❖ L2 - 16.3m:  
Limo con sabbia fine (come riportato nel Grafico 4.12);
- ❖ L2 - 16.5m:  
Limo con sabbia fine (come riportato nel Grafico 4.12);
- ❖ L5 – 12m:  
Limo con sabbia fine (come riportato nel Grafico 4.19);
- ❖ L5 – 15m:  
Limo con sabbia fine. (come riportato nel Grafico 4.19).

Questi campioni hanno le particelle molto piccole che causano un intasamento del filtro poroso (come illustrato nella Figura 2.9 (a)) durante l'estrazione dell'acqua sotterranea. Appare quindi confermato anche nelle prove in sito che il permeametro sperimentale non può essere adeguatamente utilizzato in terreni con particelle fini, come i campioni sopra nominati.

Tabella 4.1 campioni che riporta i parametri relativi alle prove “a filtro intasato”

<b>INTASATO</b>						
SONDAGGIO ▼	PROFONDITÀ dal P.C. ▼	PROFONDITÀ della FALDA dal P.C. ▼	DURATA ▼	MATERIALE GRANOMETRIA ▼	PRESSIONE INIZIAE ▼	PRESSIONE FINALE ▼
num.	m	m	sec	/	mH <sub>2</sub> O	mH <sub>2</sub> O
L2	6.5	4	501	Sabbia fine con presenza di limo.	-7.7	-0.3
L2	16.5	4	454	Limo con sabbia fine.	-7.9	-7.9
L5	12	2.2	2217	Limo con sabbia fine.	-3.9	-2.9

Osservando le stratigrafie riportate nella Figura 3.6 si nota che, anche in questo gruppo di campioni, alcuni hanno caratteristiche geotecniche simili e sono appartengono allo stesso livello di terreno:

- L2 – 6.5m  $\cong$  L2 – 5.3m;
- L2 – 16.5m  $\cong$  L2 - 16.3m;
- L5 – 12m  $\cong$  L5 – 15m.

Perciò, come prima, viene scelto solo un campione per ogni gruppo, per l'esecuzione dei calcoli per la stima della permeabilità a partire dalle caratteristiche granulometriche.

Al contrario, la prova risulta ‘a filtro **aperto subito**’ (come illustrata nella Tabella 4.2) nei terreni di ghiaia medio-grossa con presenza di sabbia grossa, oppure ghiaia fine, sabbia media e limo e tracce di sabbia fine, oppure sabbia grossa-media-fine con la presenza di limo e tracce di ghiaia. Si verifica quindi nei terreni che hanno percentuale



preponderante del peso di ghiaia e una scarsa percentuale del peso di sabbia e limo. Sono i seguenti campioni tra i 23 scelti :

- L1 - 10.5m:  
Ghiaia medio-grossa con presenza di sabbia grossa, ghiaia fine, sabbia media e limo e tracce di sabbia fine (come rappresentata nel Grafico 4.17);
- L4 – 6m:  
Ghiaia medio-grossa con presenza di sabbia grossa, ghiaia fine, sabbia media e limo e tracce di sabbia fine (come rappresentata nel Grafico 4.17);
- L5 – 5.0m:  
Ghiaia medio-grossa con sabbia grossa e media e presenza di ghiaia fine (come rappresentata nel Grafico 4.15);
- L5 – 6.0m:  
Ghiaia medio-grossa con presenza di sabbia grossa, ghiaia fine, sabbia media e limo e tracce di sabbia fine (come rappresentata nel Grafico 4.17);
- L5 – 7.5m:  
Ghiaia fine con sabbia grossa e presenza di ghiaia media e sabbia media (come rappresentata nel Grafico 4.18).

Si osserva dalla sezione stratigrafica (come illustrato nella Figura 3.6) che tutti e tre i campioni provenienti dal sondaggio L5 hanno quasi le stesse caratteristiche granulometriche e sono stati campionati dal medesimo strato di terreno. Perciò nuovamente è stato utilizzato solo uno per il calcolo della permeabilità con la formulazione di Permeometro BAT.

Data la maggior percentuale del peso di ghiaia, essi sono caratterizzati da grani di maggiori dimensioni, maggiore indice dei vuoti e più elevata permeabilità, tanto che la misura condotta con il permeometro sperimentale si conclude in pochi secondi. Di nuovo quindi il permeometro risulta non adatto ad essere utilizzato in questi tipi di terreni.

Tabella 4.2 Tabella che riporta i campioni e i parametri relativi alle prove ‘a filtro aperto subito’.

<b>APERTO SUBITO</b>				
<b>SONDAGGIO</b>	<b>PROFONDITÀ dal P.C.</b>	<b>PROFONDITÀ della FALDA dal P.C.</b>	<b>DURATA</b>	<b>MATERIALE GRANUMETRIA</b>
num.	m	m	sec	/
L1	10.5	4	2	Ghiaia fine, media e grossa con sabbia media.
L4	6	2.3	2	Ghiaia sabbiosa.
L5	6	2.2	2	Ghiaia media - grossa con presenza di sabbia grossa, ghiaia fine, sabbia media e limo e tracce di sabbia fine.

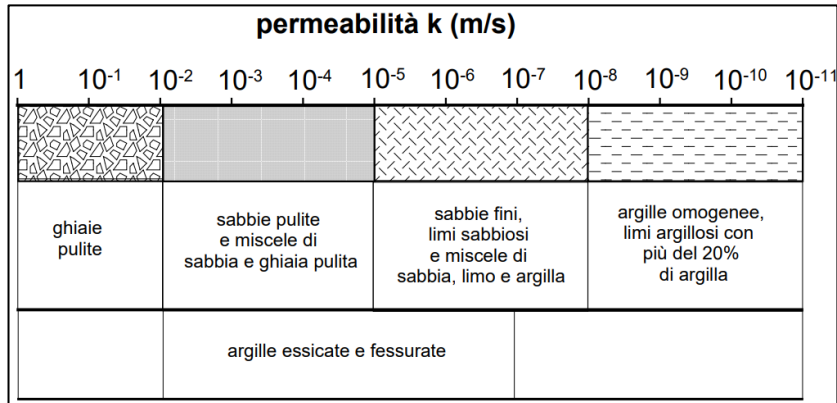
Per tutti gli altri campioni, i dati di pressione misurati durante la prova sono stati elaborati come sopra descritto, e nella seguente tabella si riportano i valori di permeabilità ricavati.

A seguire, si riportano i grafici che mostrano, per ciascuna prova, l'andamento nel tempo della pressione misurata e della permeabilità calcolata.

Tabella 4.3 Valori di permeabilità ricavati con la formula di BAT.

Terreno	Prova e Profondità	Falda da P.C.	k BATT media (kM')	k BAT tratto costante (kT')	k BAT P <sub>80</sub> (kP')	Diff. % di k BAT media rispetto k BAT tratto costante	Diff. % di k BAT P <sub>80</sub> rispetto k BAT tratto costante	Rapporto kM' / kT'	Rapporto kP' / kT'
/	/ - m	m	m/s	m/s	m/s	%	%	/	/
LAGHETTI	L2 - 13.5	4	9.85E-06	8.82E-06	1.80E-05	12%	104%	1.12	2.04
	L2 - 23.5		3.55E-07	3.42E-07	8.81E-07	4%	158%	1.04	2.58
	L2 - 26		7.14E-07	5.56E-07	2.28E-06	28%	310%	1.28	4.10
	L4 - 21	2.3	1.19E-06	1.02E-06	3.53E-06	17%	246%	1.17	3.46
	L5 - 21	2.2	1.05E-06	8.94E-07	2.74E-06	17%	206%	1.17	3.06
	L5 - 24		2.62E-06	2.22E-06	6.71E-06	18%	202%	1.18	3.02

Figura 4.3 Valori tipici del coefficiente di permeabilità dei terreni



- L2 - 13.5m:  
Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media. (illustrata nel Grafico 4.10 e 4.11);
- L2 -23.5m:  
Sabbia media-grossa con limo, presenza di sabbia fine e tracce di ghiaia medio-fine. (illustrata nel Grafico 4.13);
- L2 – 26m:

Sabbia media-grossa con limo, presenza di sabbia fine e tracce di ghiaia medio-fine. (illustrata nel Grafico 4.13);

○ L4 – 21m:

Sabbia fine con sabbia media e limo. (illustrata nel Grafico 4.14);

○ L5 – 21m:

Sabbia media con limo e presenza di sabbia fine-grossa. (Grafico 4.20);

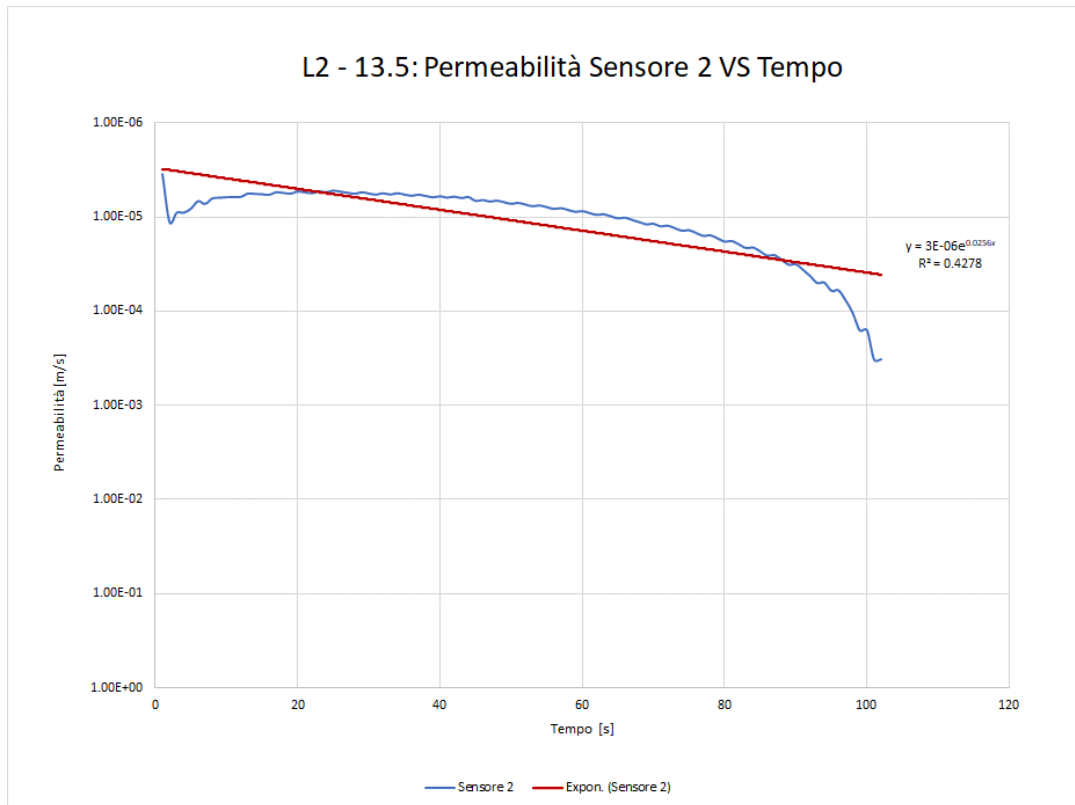
○ L5 – 24m:

Sabbia media con limo e presenza di sabbia fine-grossa. (Grafico 4.20);

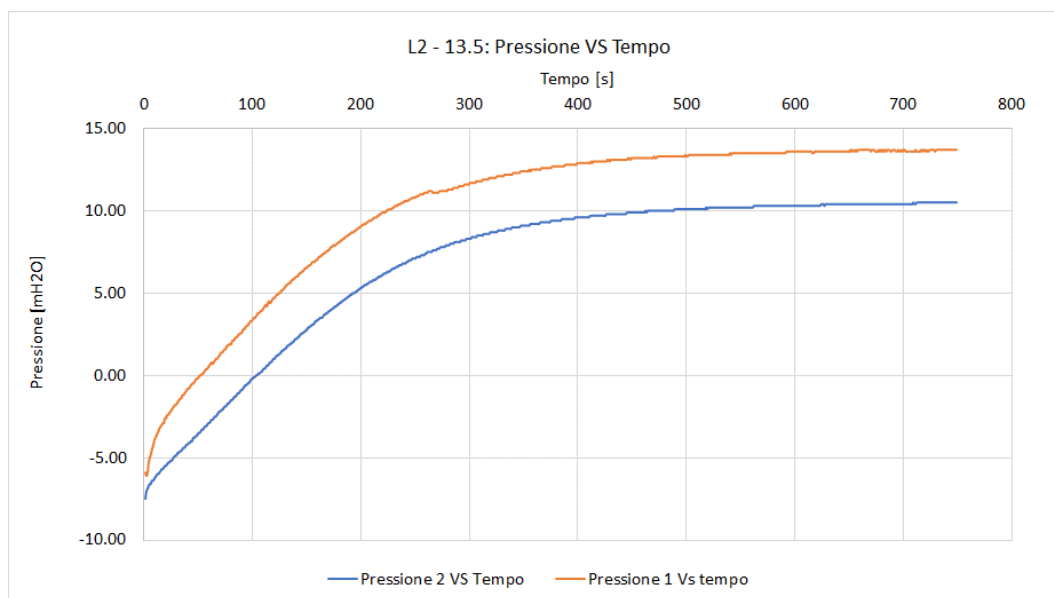
Considerando come valori di riferimento il valore di permeabilità calcolata con la formulazione BAT nel tratto costante, i valori di permeabilità ricavati (illustrata nella Tabella 4.3) mostrano che:

- i valori di  $k$  BAT media mostrano valori di permeabilità leggermente maggiore da un minimo di 1.04 volte ad un massimo di 1.28 volte della permeabilità di riferimento.
- i valori ricavati in corrispondenza della permeabilità  $k$  BAT  $P_{80}$  sono invece maggiori dell'unità: variano da un minimo di 2.04 volte ad un massimo di 4.10 volte dei valori di permeabilità del tratto costante, si conclude quindi che la permeabilità del  $k$  BAT  $P_{80}$  risulta meno rappresentativa del valore di permeabilità.

Inoltre, confrontando i valori di permeabilità ricavati con il permeametro sperimentale (che sono di ordine tra  $10^{-5} > k \text{ BAT (m/s)} > 10^{-7}$ ) con i coefficienti di permeabilità generali riportati nella Figura 4.3 si ricava che essi rientrano nei valori tipici dei terreni testati.

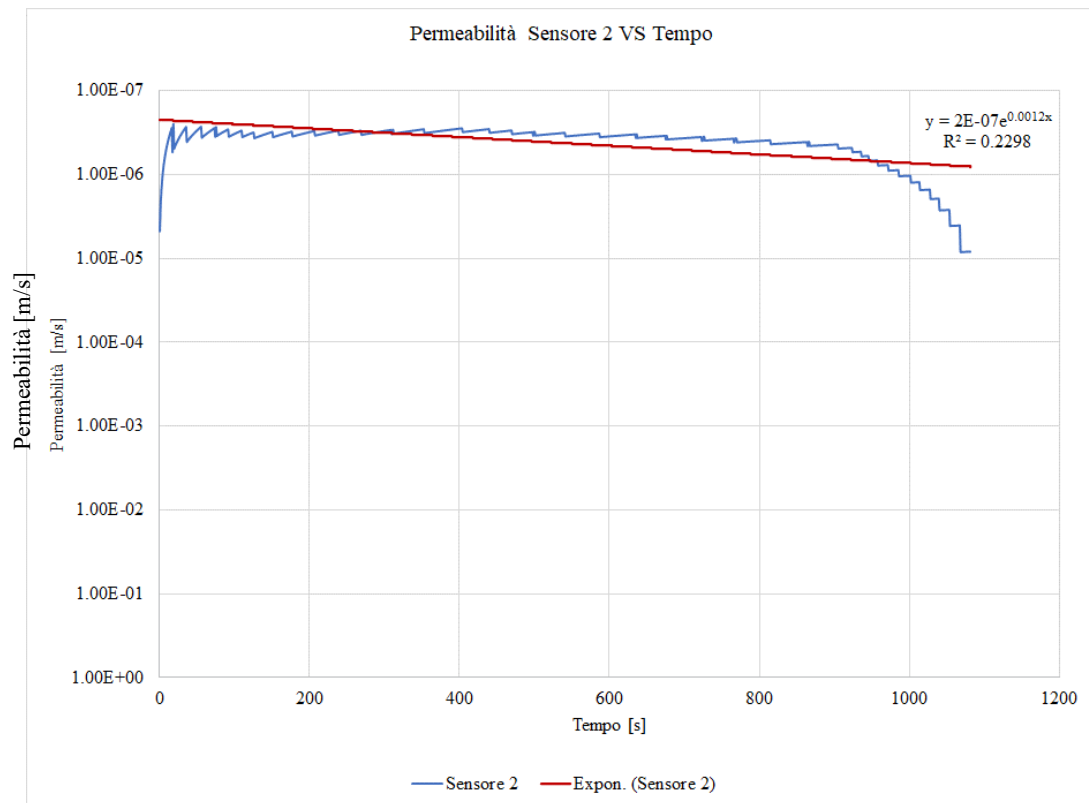


(a) permeabilità in relazione con tempo.

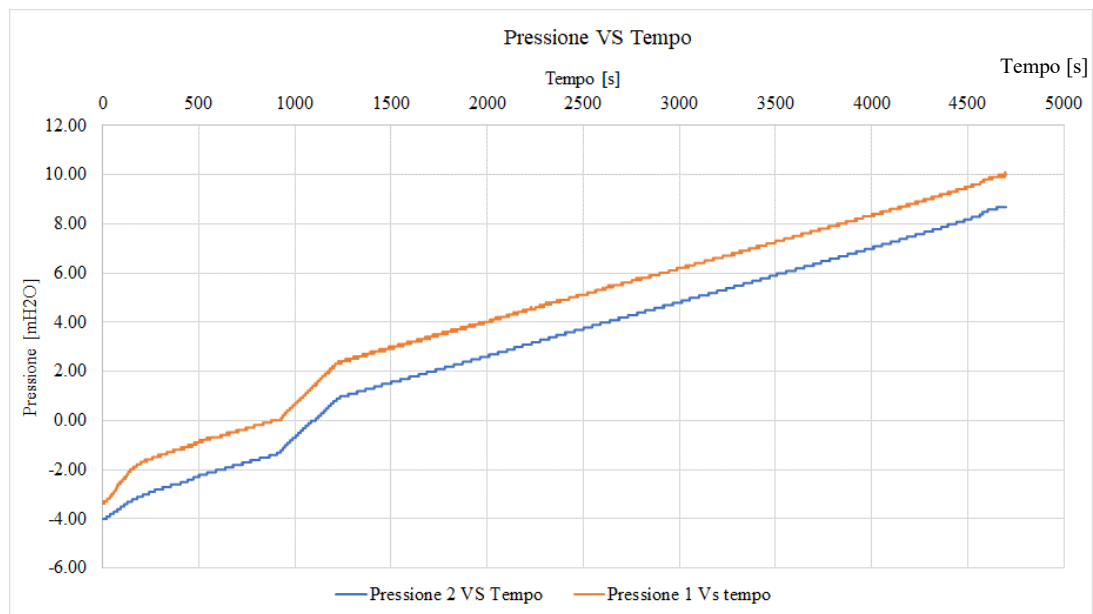


(b) pressione in relazione con tempo.

Grafico 4.1 Grafici interpretazione BAT L2 : 13.5 – Laghetti.

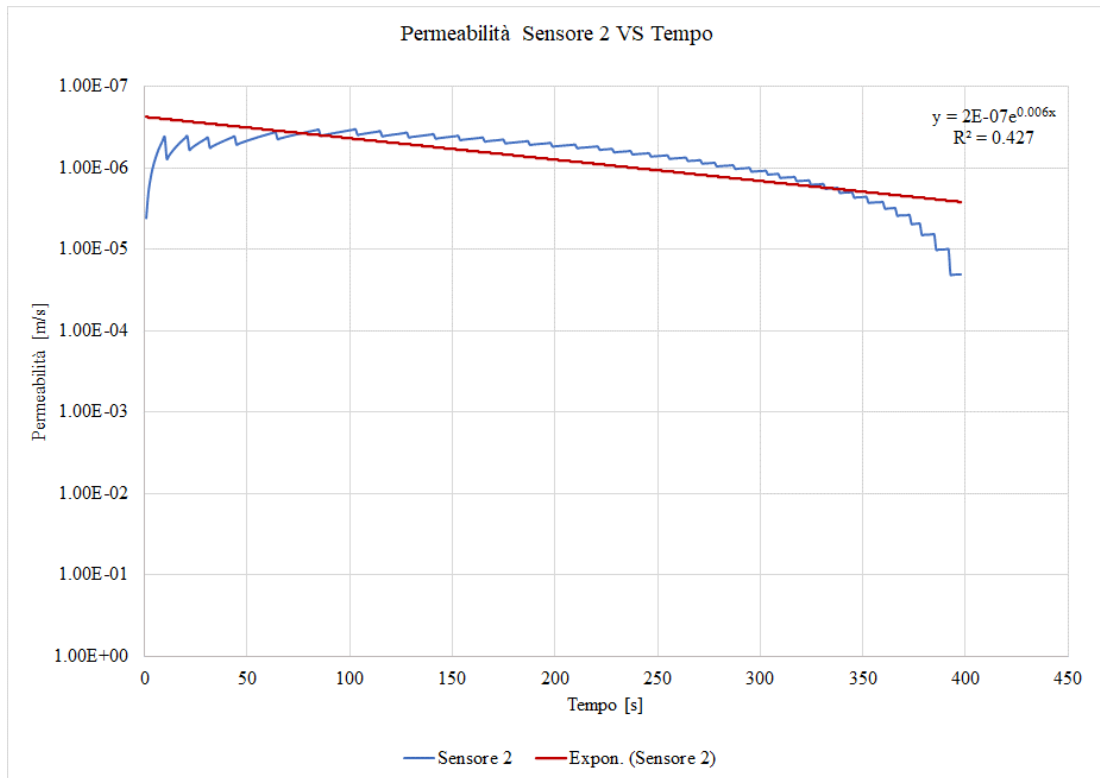


(a) permeabilità in relazione con tempo.

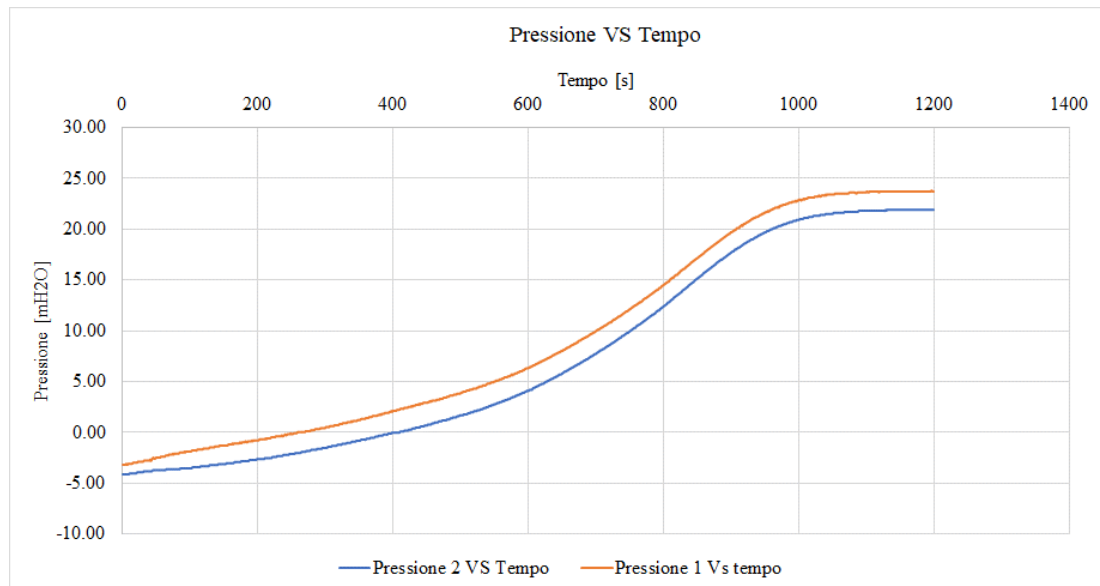


(b) pressione in relazione con tempo.

Grafico 4.2 Grafici interpretazione BAT L2 : 23.5 – Laghetti.

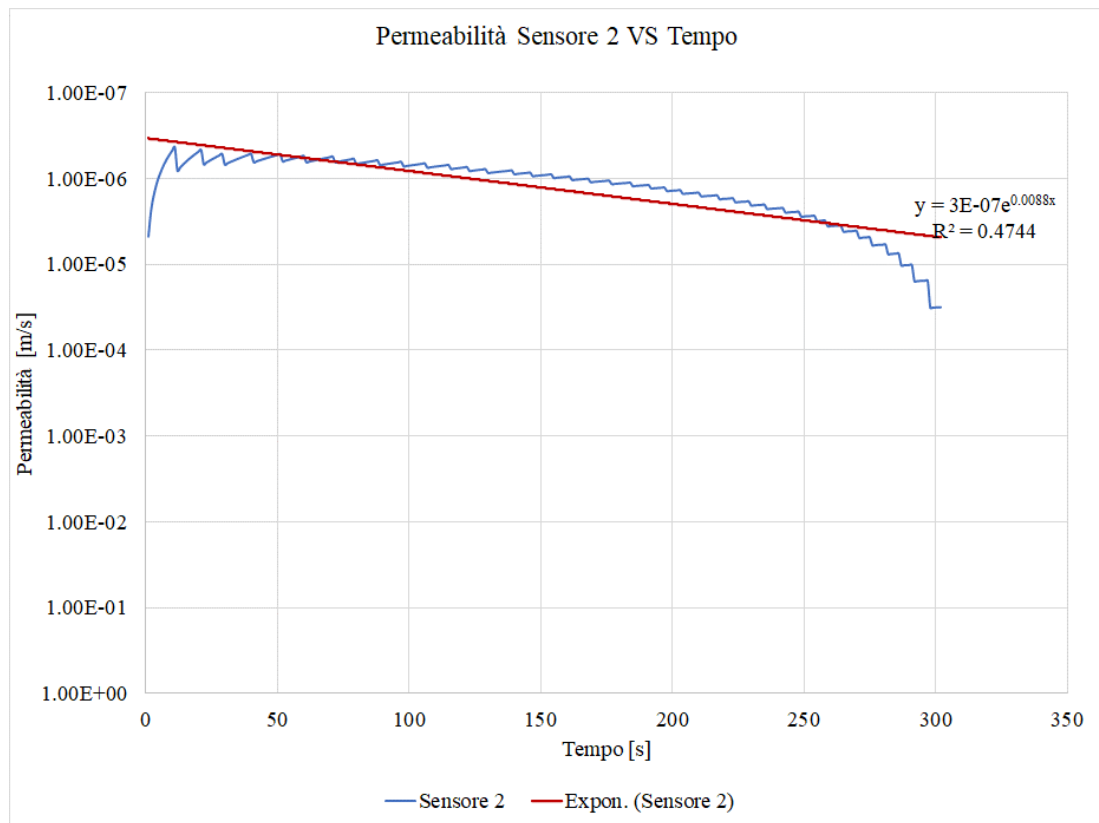


(a) permeabilità in relazione con tempo.

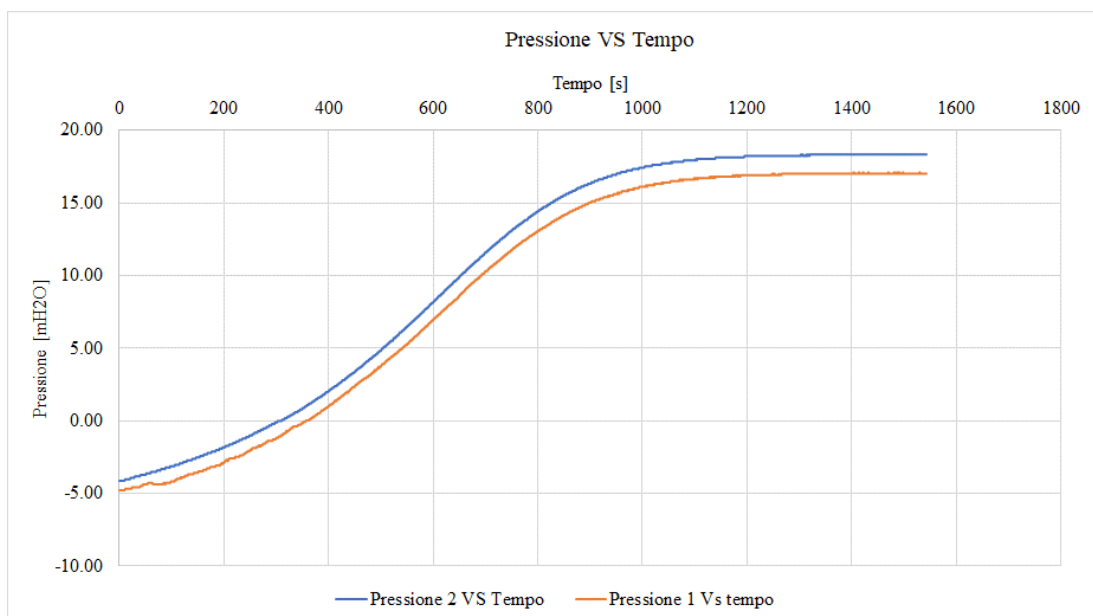


(b) pressione in relazione con tempo.

Grafico 4.3 Grafici interpretazione BAT L2 : 26 – Laghetti.



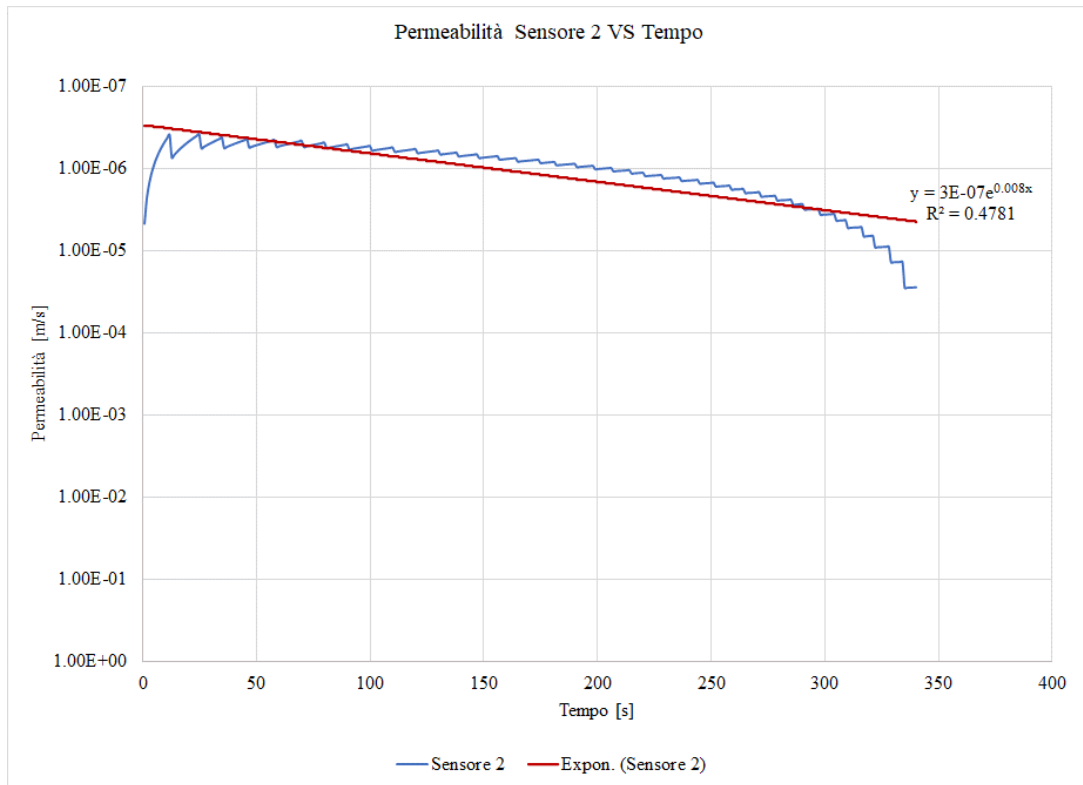
(a) permeabilità in relazione con tempo.



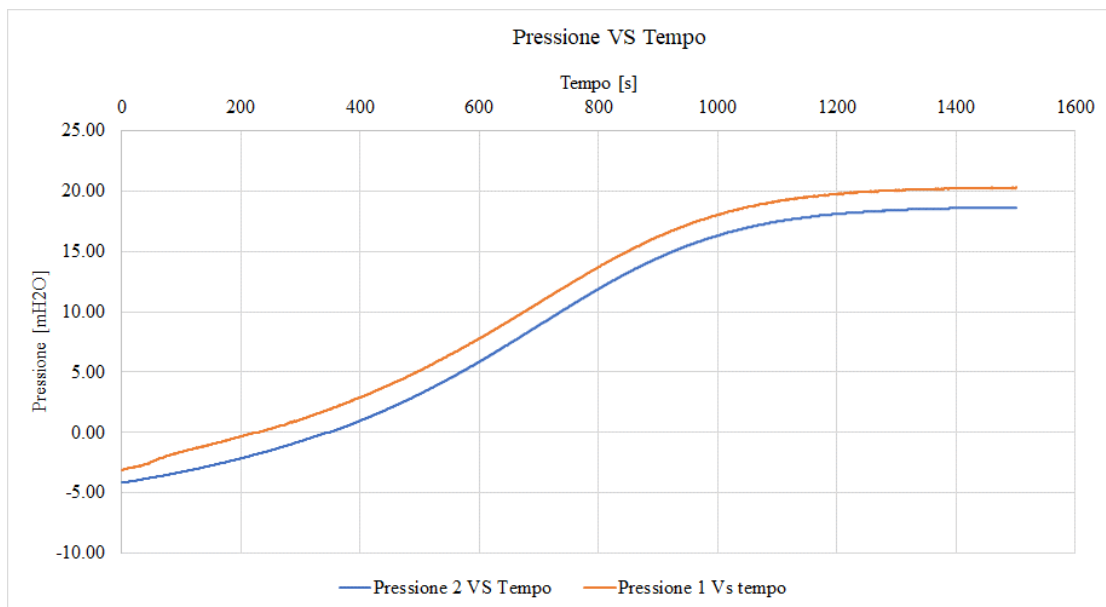
(b) pressione in relazione con tempo.

Grafico 4.4 Grafici interpretazione BAT L4 : 21 – Laghetti.



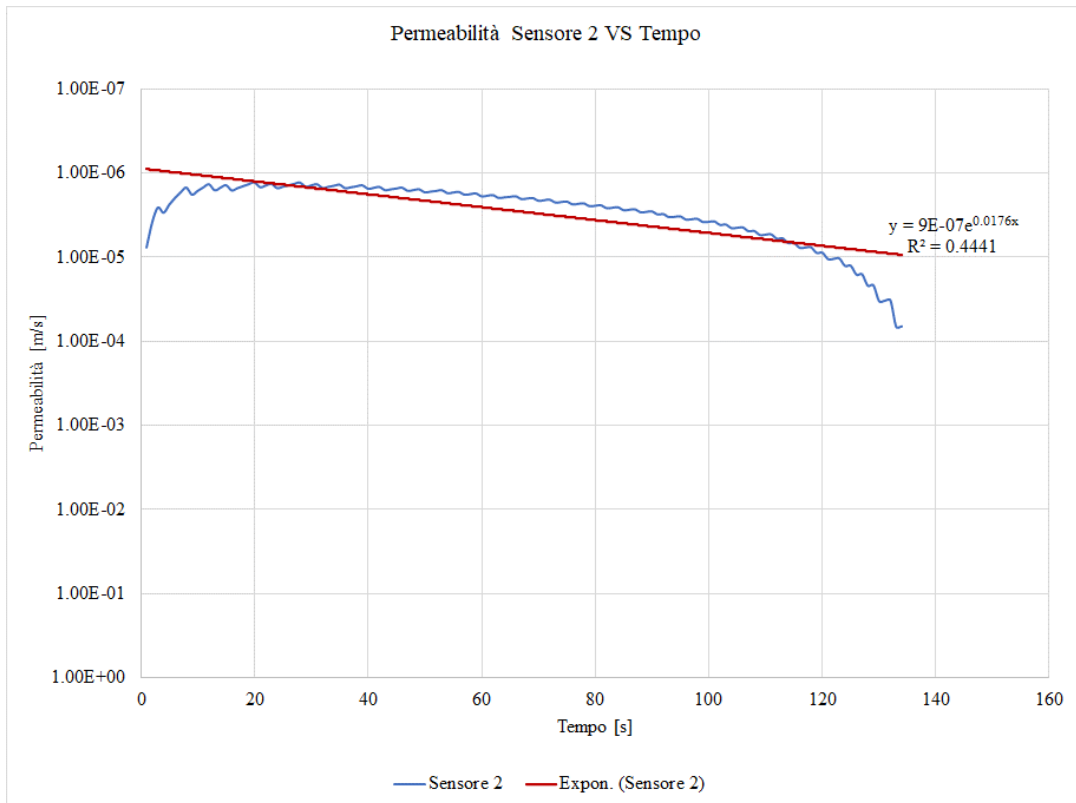


(a) permeabilità in relazione con tempo.

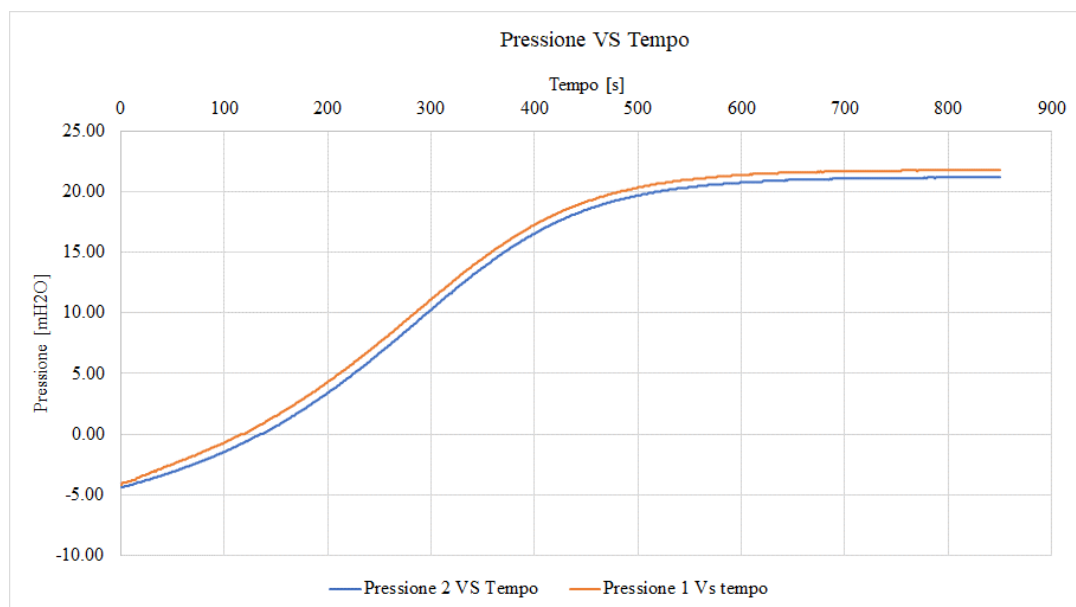


(b) pressione in relazione con tempo.

Grafico 4.5 Grafici interpretazione BAT L5 : 21 – Laghetti.



(a) permeabilità in relazione con tempo.



(b) pressione in relazione con tempo.

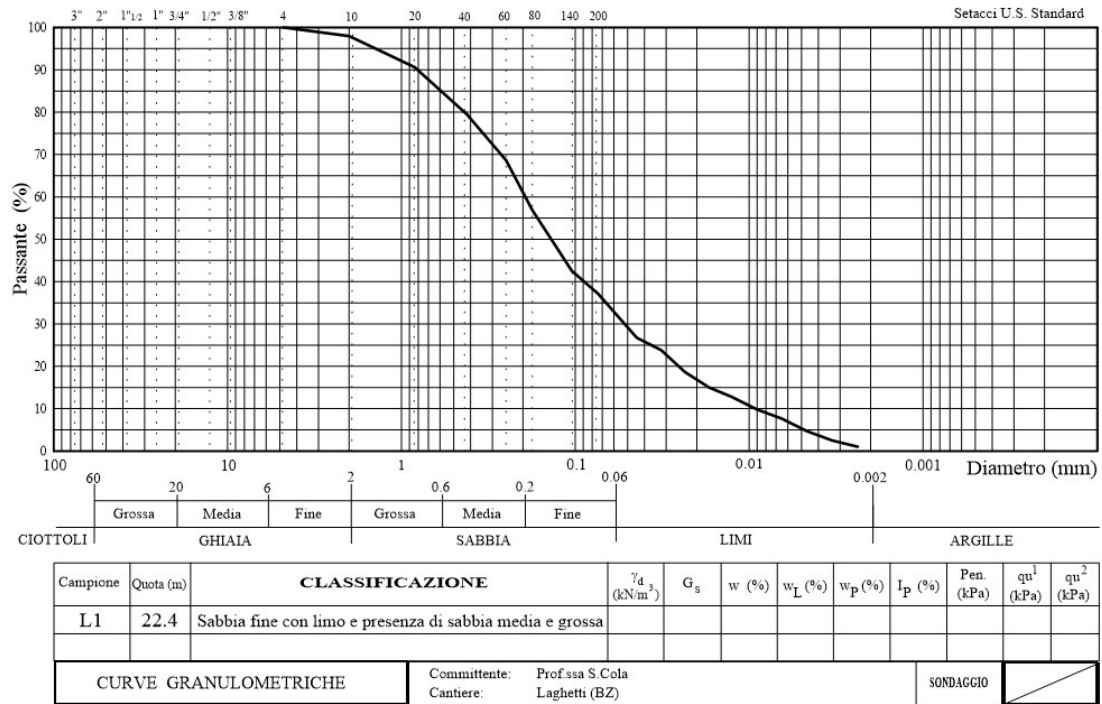
Grafico 4.6 Grafici interpretazione BAT L5 : 24 – Laghetti.

### **4.3. CLASSIFICAZIONE GRANULOMETRICA DEI CAMPIONI**

I sistemi di classificazione hanno lo scopo di identificare e di collocare in una determinata classe un campione di terreno. I campioni prelevati con la tecnica di “gel push sampler” sono stati portati in laboratorio per la classificazione dei terreni, che è stata eseguita in due modi:

- L’analisi granulometrica per strecciatura: viene utilizzata una serie di setacci sovrapposti, in modo da suddividere le componenti in peso delle varie classi granulometriche, nell’ambito di terreni a grana grossa come ghiaia e sabbia;

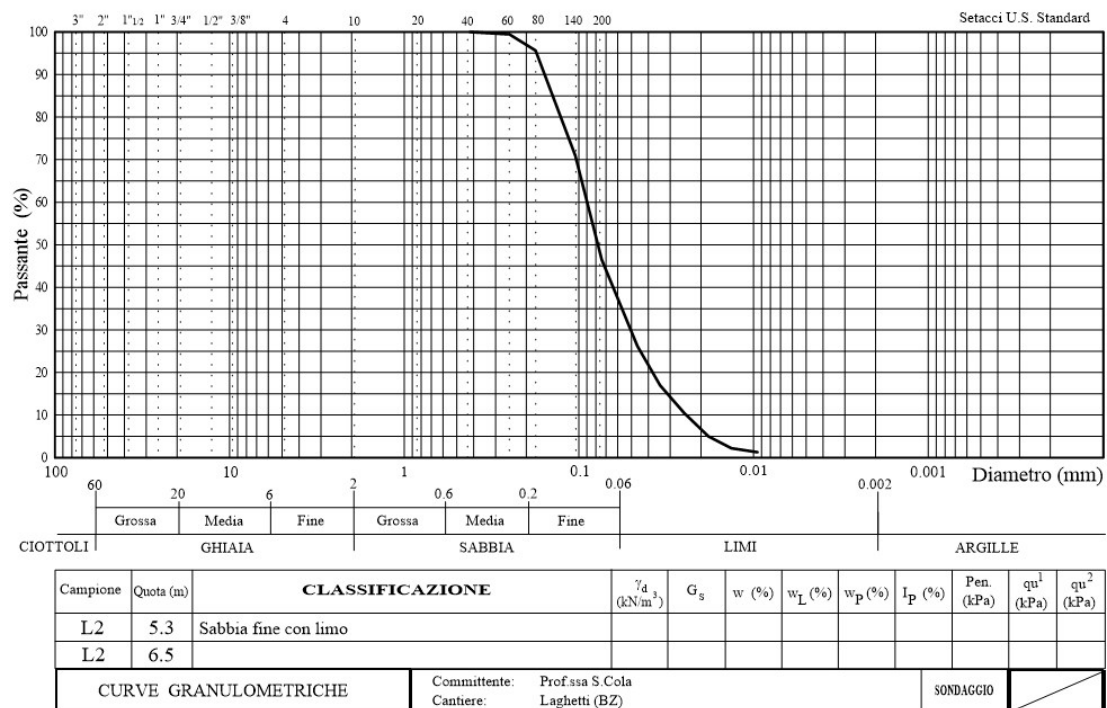
L’analisi granulometrica per sedimentazione: applicata alla frazione fine come limo e argilla, I risultati sono riportati nei seguenti grafici:



Padova, 21/12/2021  
 **Grafico 4.7 Granulometria del campione L1 – 22.4m; Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media-grossa.**

**Tabella 4.4 Percentuali in peso dei diversi terreni di L1 - 22.4m.**

L1 - 22.4	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	0
		FINE	2
	SABBIA	GROSSA	13
		MEDIA	25
		FINE	27
LIIMO	/	33	



Padova, 21/12/2021

Grafico 4.8 Granulometria del campione **L2 - 5.3m**  $\cong$  **L2 - 6.5m**; Sabbia fine con limo.

Tabella 4.5 Percentuali in peso dei diversi terreni di **L2 - 5.3m**  $\cong$  **L2 - 6.5m**.

<b>L2 - 5.3m</b> $\cong$ <b>L2 - 6.5m</b>	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	0
		FINE	0
	SABBIA	GROSSA	0
		MEDIA	8
		FINE	55
LIIMO	/	37	

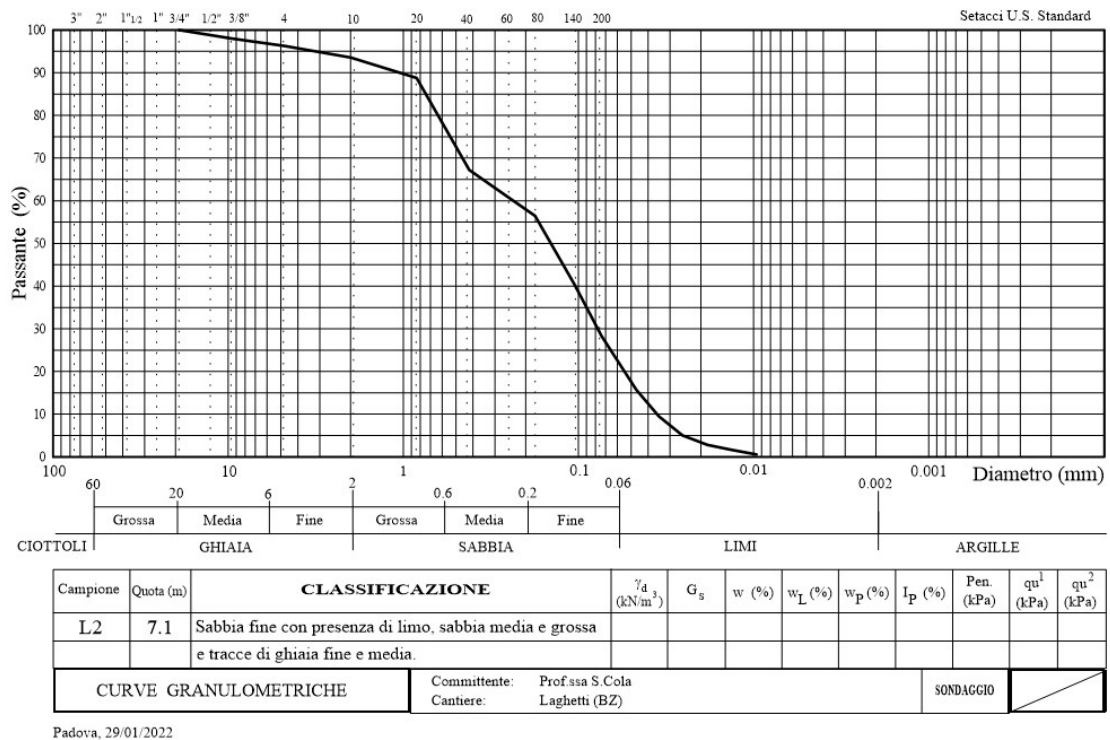


Grafico 4.9 Granulometria del campione **L2 - 7.1m**; Sabbia fine con presenza di limo, sabbia media-grossa e tracce di ghiaia fine e media.

**Tabella 4.6** Percentuali in peso dei diversi terreni di **L2 - 7.1m**.

<b>L2 - 7.1</b>	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	3
		FINE	4
	SABBIA	GROSSA	15
		MEDIA	20
		FINE	36
LIIMO	/	22	

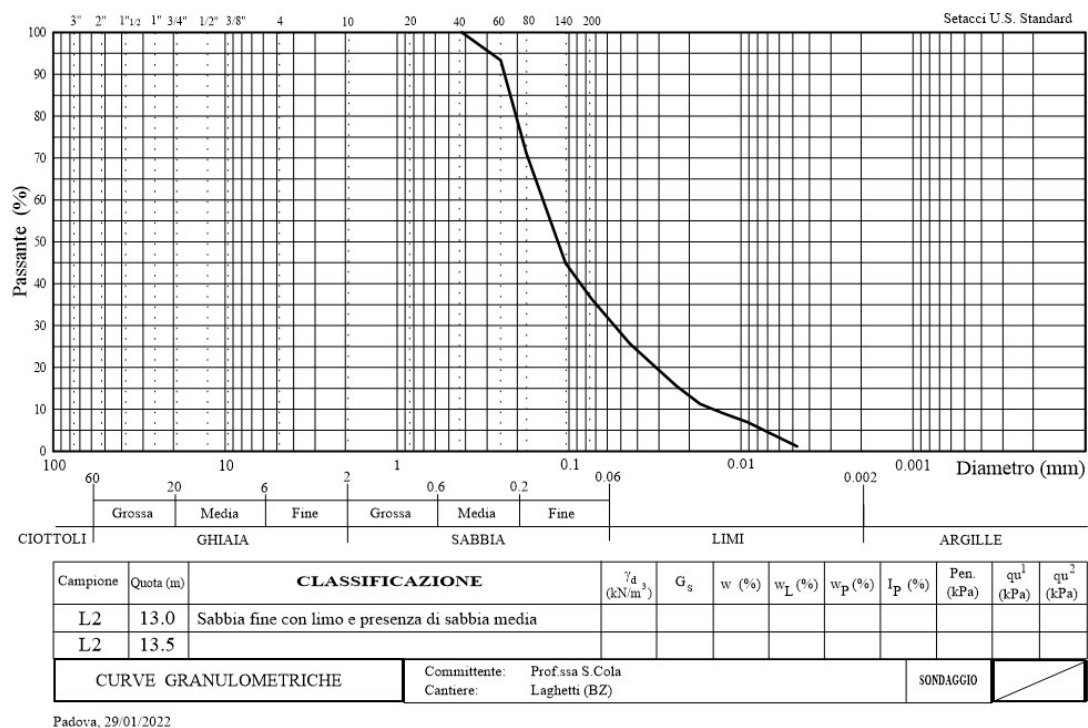
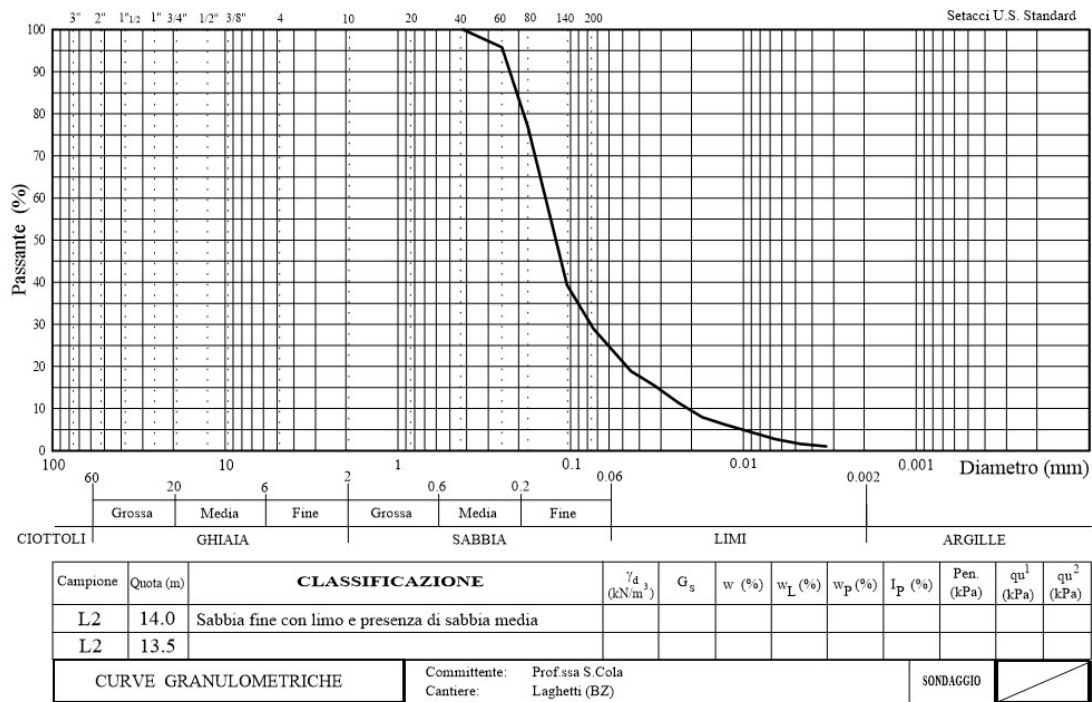


Grafico 4.10 Granulometria del campione L2 - 13.0m  $\cong$  L2 - 13.5m, Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media.

Tabella 4.7 Percentuali in peso dei diversi terreni di L2 - 13.0m  $\cong$  L2 - 13.5m.

L2 - 13.0m $\cong$ L2 - 13.5m	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	0
		FINE	0
	SABBIA	GROSSA	0
		MEDIA	21
		FINE	47
LIIMO	/	32	



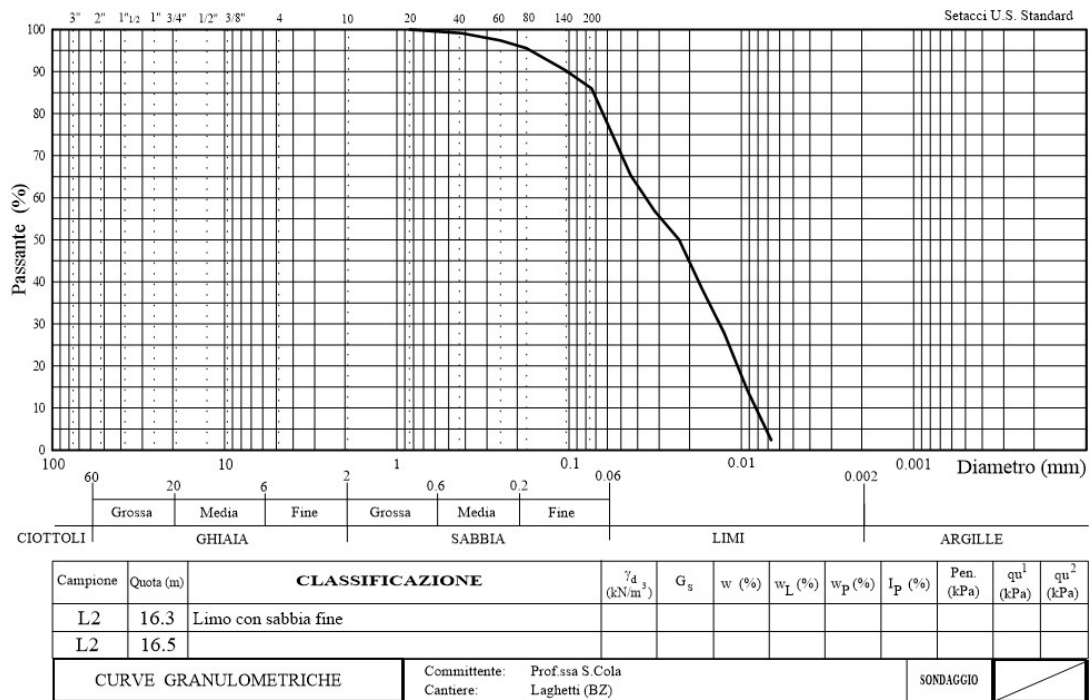
Padova, 29/01/2022

Grafico 4.11 Granulometria del campione **L2 - 14.0m**  $\cong$  **L2 - 13.5m**; Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media.

Tabella 4.8 Percentuali in peso dei diversi terreni di **L2 - 14.0m**  $\cong$  **L2 - 13.5m**.

<b>L2 - 13.5m</b> $\cong$ <b>L2 - 14.0m</b>	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	0
		FINE	0
	SABBIA	GROSSA	0
		MEDIA	16
		FINE	59
LIIMO	/	25	





Padova, 29/01/2022

Grafico 4.12 Granulometria del campione L2 - 16.3m  $\cong$  L2 - 16.5m; Limo con sabbia fine.

Tabella 4.9 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L2 - 16.3m  $\cong$  L2 - 16.5m.

L2 - 16.3m $\cong$ L2 - 16.5m	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	0
		FINE	0
	SABBIA	GROSSA	1
		MEDIA	3
		FINE	21
LIIMO	/	75	

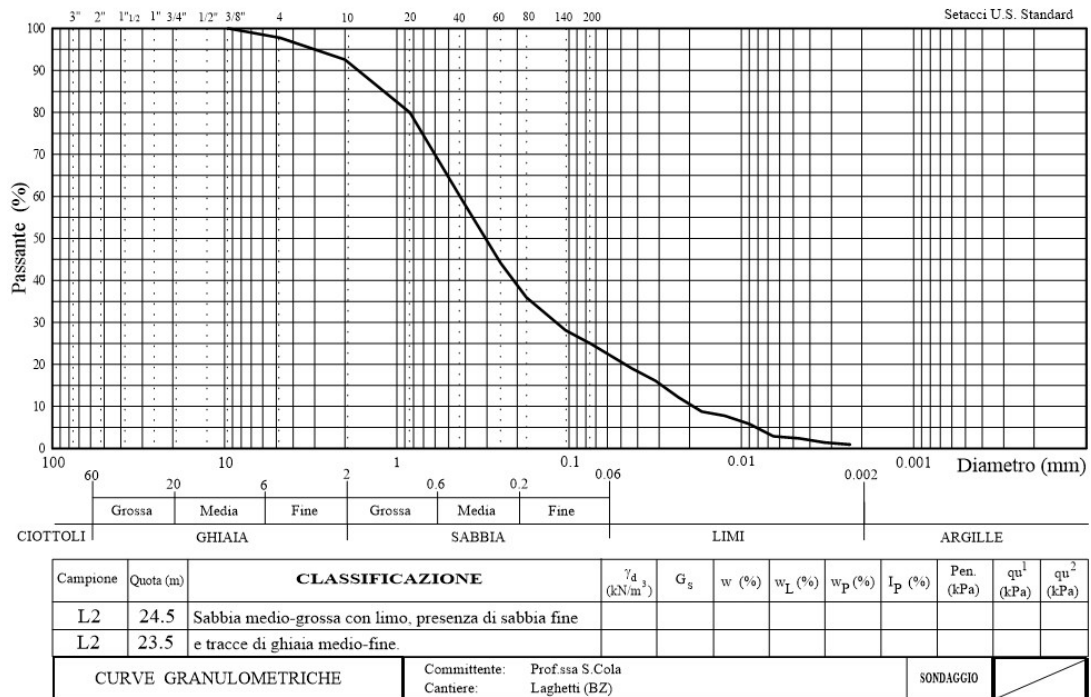
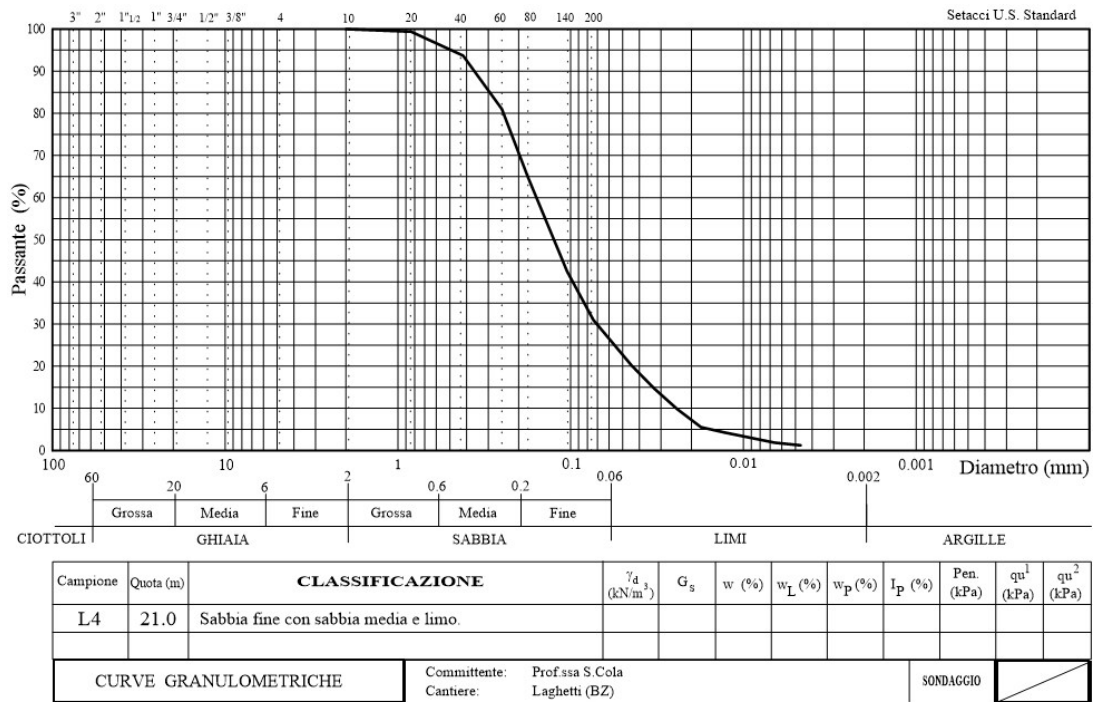


Grafico 4.13 Granulometria del campione **L2 - 24.5m**  $\cong$  **L2 - 23.5m**  $\cong$  **L2 - 26m**;  
Sabbia media-grossa con limo, presenza di sabbia fine e tracce di ghiaia medio-fine.

Tabella 4.10 P Percentuali in peso dei diversi terreni di **L2 - 24.5m**  $\cong$  **L2 - 23.5m**  $\cong$  **L2 - 26m**.

<b>L2 - 24.5m</b> $\cong$ <b>L2 - 23.5m</b> $\cong$ <b>L2 - 26m</b>	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	2
		FINE	6
	SABBIA	GROSSA	22
		MEDIA	31
FINE		16.5	
LIIMO	/	22.5	



Padova, 29/01/2022

Grafico 4.14 Granulometria del campione L4 – 21m; Sabbia fine con sabbia media e limo.

Tabella 4.11 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L4 – 21m.

L4 - 21m	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	0
		FINE	0
	SABBIA	GROSSA	3.5
		MEDIA	26.5
		FINE	44
LIIMO	/	26	

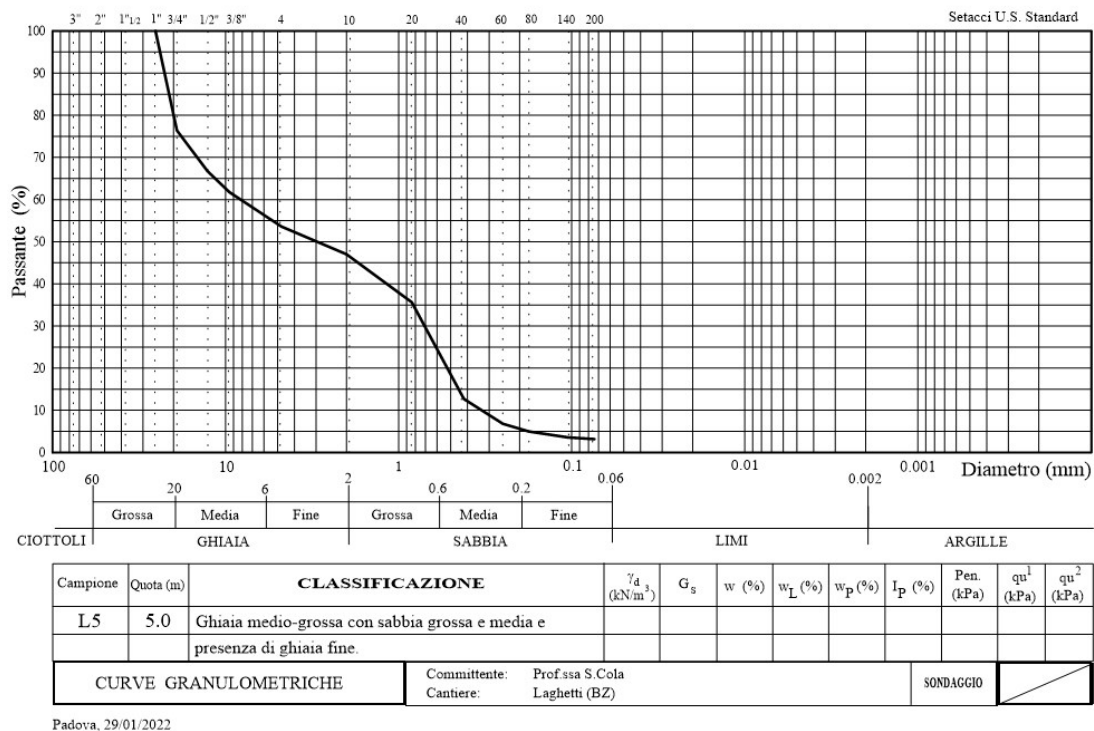


Grafico 4.15 Granulometria del campione **L5 – 5.0m**; Ghiaia medio-grossa con sabbia grossa e media e presenza di ghiaia fine.

Tabella 4.12 P Percentuali in peso dei diversi terreni di **L5 – 5.0m**.

<b>L5 - 5m</b>	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	20
		MEDIA	24
		FINE	9
	SABBIA	GROSSA	23
		MEDIA	18.5
		FINE	5.5
LIIMO	/	0	

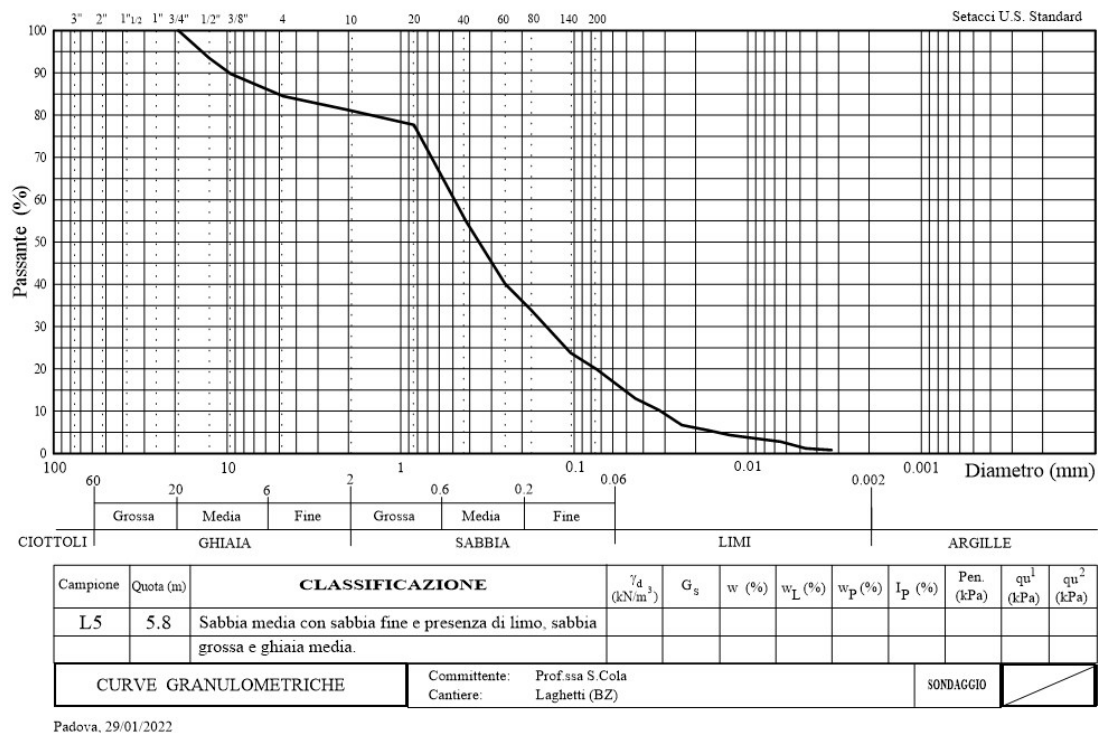


Grafico 4.16 Granulometria del campione **L5 – 5.8m**; Sabbia media con sabbia fine e presenza di limo, sabbia grossa e ghiaia media.

Tabella 4.13 P Percentuali in peso dei diversi terreni di **L5 – 5.8m**.

	TERRENI		%
<b>L5 - 5.8m</b>	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	14
		FINE	5
	SABBIA	GROSSA	15
		MEDIA	30
		FINE	19
LIIMO	/	17	

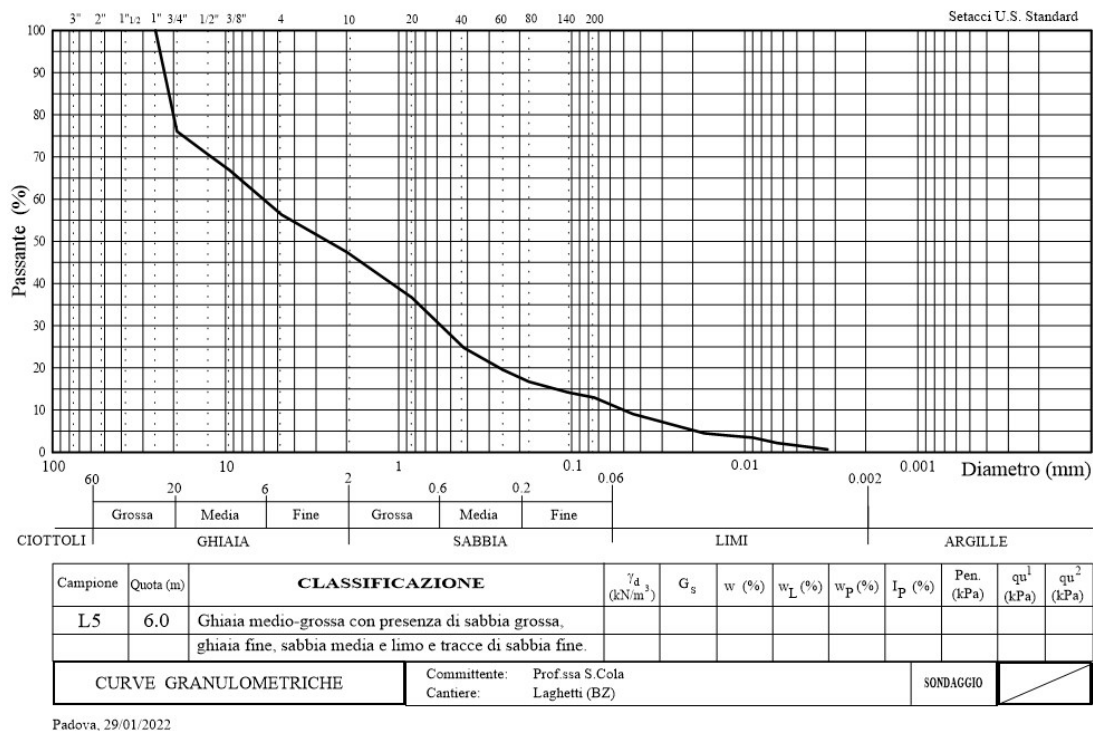
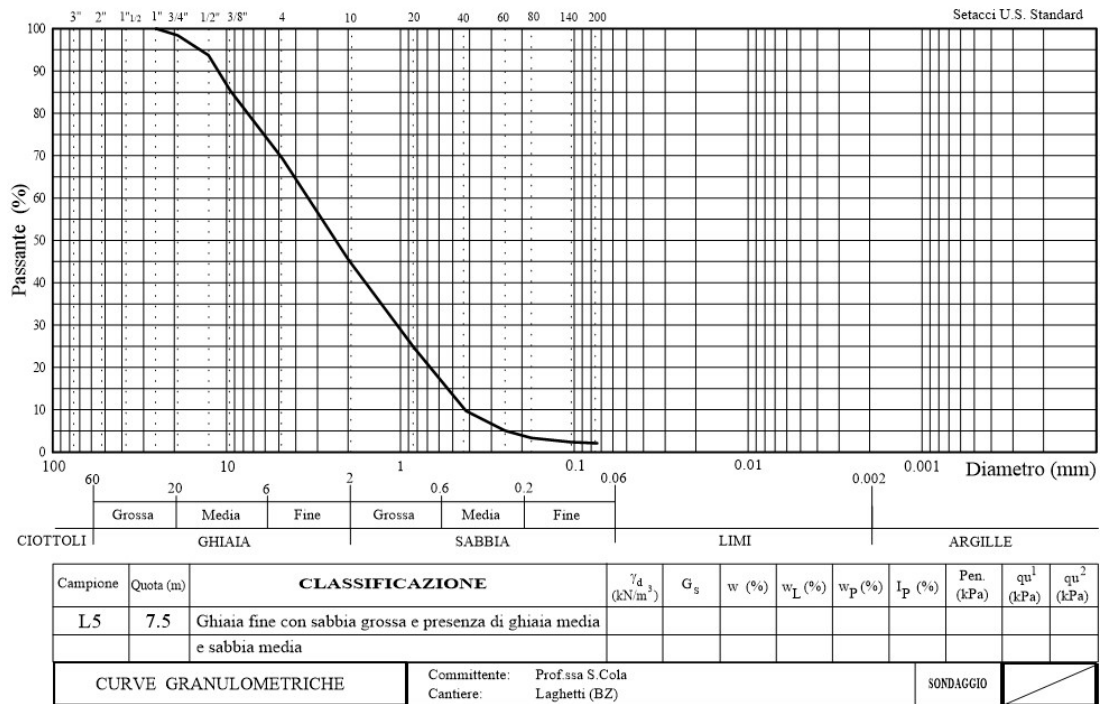


Grafico 4.17 Granulometria del campione **L1 - 10.5m**  $\cong$  **L4 - 6m**  $\cong$  **L5 - 6**; Ghiaia medio-grossa con presenza di sabbia grossa, ghiaia fine, sabbia media e limo e tracce di sabbia fine.

Tabella 4.14 P Percentuali in peso dei diversi terreni di **L1 - 10.5m**  $\cong$  **L4 - 6m**  $\cong$  **L5 - 6m**.

<b>L1 - 10.5m</b> $\cong$ <b>L4 - 6.0m</b> $\cong$ <b>L5 - 6.0m</b>	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	20
		MEDIA	20
		FINE	13
	SABBIA	GROSSA	16
		MEDIA	13
		FINE	7
LIIMO	/	11	



Padova, 29/01/2022

Grafico 4.18 Granulometria del campione **L5 – 7.5m**; Ghiaia fine con sabbia grossa e presenza di ghiaia media e sabbia media.

Tabella 4.15 P Percentuali in peso dei diversi terreni di **L5 - 7.5m**.

<b>L5 - 7.5m</b>	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	1.5
		MEDIA	23.5
		FINE	30
	SABBIA	GROSSA	27.5
		MEDIA	13.5
		FINE	4
LIIMO	/	0	

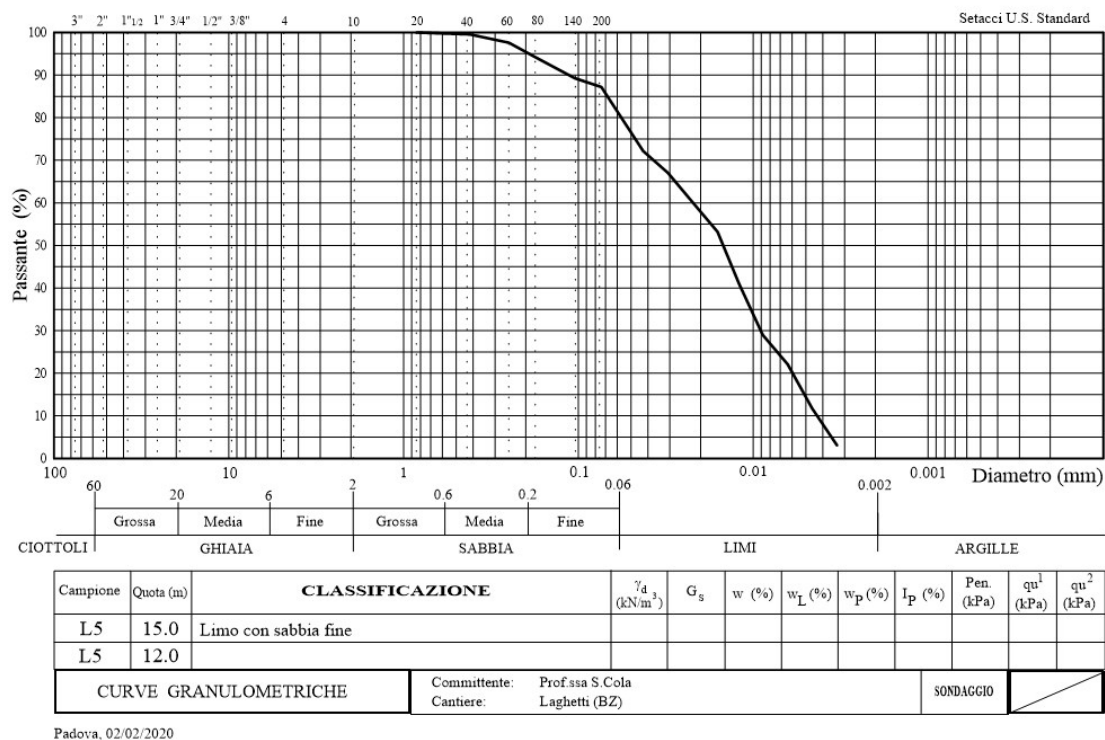
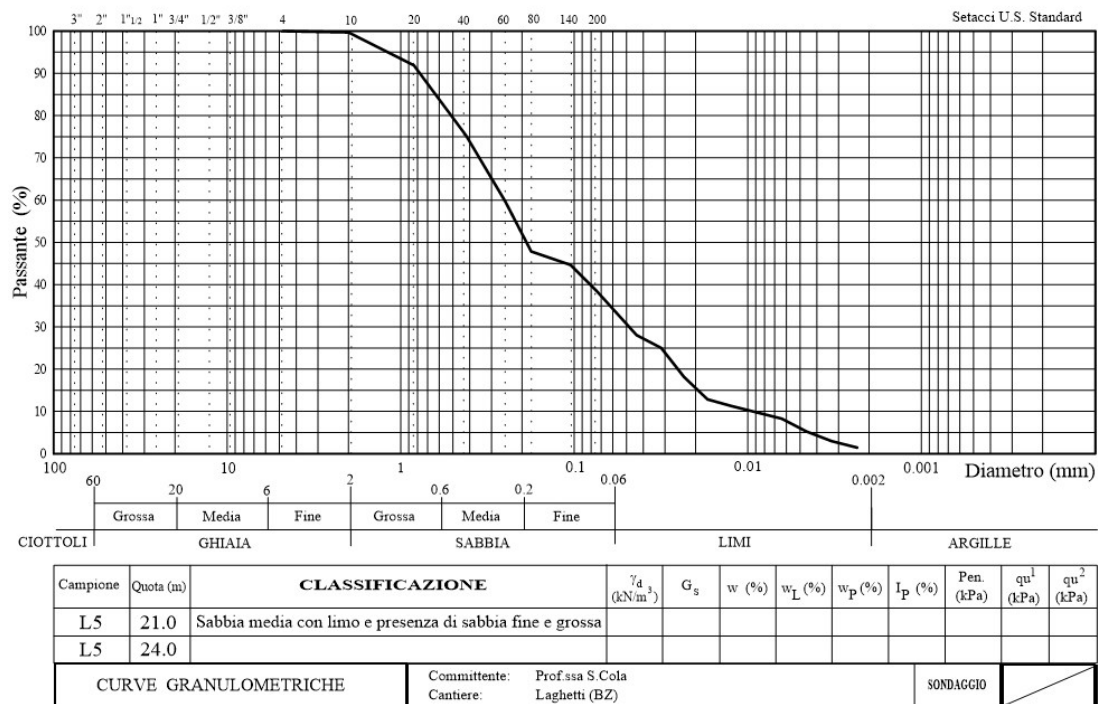


Grafico 4.19 Granulometria del campione L5 - 12m  $\cong$  L5 - 15m; Limo con sabbia fine.

Tabella 4.16 P Percentuali in peso dei diversi terreni di L5 - 12m  $\cong$  L5 - 15m.

L5 - 12.0m $\cong$ L5 - 15.0m	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	0
		FINE	0
	SABBIA	GROSSA	0
		MEDIA	5
		FINE	15
LIIMO	/	80	





Padova, 02/02/2022

Grafico 4.20 Granulometria del campione **L5 - 21.0m**; Sabbia media con limo e presenza di sabbia fine-grossa.

Tabella 4.17 P Percentuali in peso dei diversi terreni di **L5 - 21.0m**.

<b>L5 - 21.0m</b> $\cong$ <b>L5 - 24.0m</b>	TERRENI		%
	GHIAIA	GROSSA	0
		MEDIA	0
		FINE	0
	SABBIA	GROSSA	16
		MEDIA	32
FINE		18	
LIIMO	/	34	

#### 4.4. RISULTATI DI PERMEABILITA' CALCOLATI DALLE CARATTERISTICHE GRANULOMETRICHE OTTENUTE IN LABORATORIO

Utilizzando correlazioni in excel, a partire dalle caratteristiche granulometriche ottenute in laboratorio, è stato poi eseguita la valutazione della permeabilità utilizzando le formule prima descritte solo per i campioni corrispondenti ai livelli in cui, in sito, il permeametro sperimentale aveva restituito le prove 'ottime', che sono: L2-13.5 ; L2-23.5 ; L2-26 ; L4-21 ; L5-21 ; L5-24 (come illustrate nella Tabella 4.3).

Tabella 4.18 Proprietà geotecniche dei campioni.

Campione e profondità	$d_{10}$	$d_{60}$	$C_u$	$n$	$e$
/ - m	mm	mm	/	%	/
L1 - 22.4	0.0095	0.2	21.05	44.44	0.8
L2 - 5.3	0.025	0.09	3.60	44.44	0.8
L2 - 7.1	0.036	0.24	6.67	44.44	0.8
L2 - 13.5	0.016	0.15	9.38	44.44	0.8
L2 - 14	0.021	0.16	7.62	44.44	0.8
L2 - 16.3	0.0082	0.037	4.51	44.44	0.8
L2 - 23.5	0.019	0.44	23.16	44.44	0.8
L2 - 26					
L4 - 21	0.025	0.16	6.40	44.44	0.8
L5 - 5	0.34	8.20	24.12	44.44	0.8
L5 - 5.8	0.033	0.50	15.15	44.44	0.80
L5 - 6	0.05	6.10	122.00	44.44	0.8
L5 - 7.5	0.42	3.50	8.33	44.44	0.80
L5 - 15	0.0044	0.02	5.00	44.44	0.8
L5 - 21	0.0095	0.26	27.37	44.44	0.8
L5 - 24.0					

Tabella 4.19 Valori dei parametri utilizzati nei calcoli delle correlazioni.

Campione e profondità	$\frac{\gamma_{\omega}}{\mu_{\omega}}$	$C_o$	$C_G$	$\frac{\mu_{10}}{\mu_T}$
/ - m	/	/	/	/
L1 - 22.4	9810	8	0.1	1.3
L2 - 5.3				
L2 - 7.1				
L2 - 13				
L2 - 14				
L2 - 16.3				
L2 - 24.5				
L4 - 21				
L5 - 5				
L5 - 5.8				
L5 - 6				
L5 - 7.5				
L5 - 15				
L5 - 21				

Osservando il valore di  $d_{10}$  nella Tabella 4.18, si deduce che i campioni che hanno fornito risultati delle prove ‘ottime’ non soddisfano il campo di validità della formula di Hazen, che può essere applicata solo ai terreni granulari sciolti, con  $0.1mm < d_{10} < 3mm$ . Nella tabella 4.20 viene calcolato anche il valore fornito dalla formula di Hazen unicamente per dimostrare appunto che i risultati di permeabilità forniti non sono affidabili e sono molto diversi da quelli ottenuti con le altre tre formulazioni empiriche (i valori della permeabilità di Terzaghi (kT) risulta circa 3 ordini di grandezza maggiore dei valori della permeabilità ricavati dalla formula di Terzaghi).

Il calcolo viene eseguito solo con le formule sviluppate da Terzaghi, Chapuis e Mbonimpa et al. I risultati ottenuti per tutti i campioni sono riportati in Tabella 4.20 dove vengono confrontate con la differenza percentuale e anche in Tabella 4.21, dove vengono confrontati con i loro rapporti rispetto la formulazione di Terzaghi e nella successiva

Tabella 4.22 vengono confrontati con i valori di permeabilità ricavati dalle misure di campo.

Tabella 4.20 Valori di permeabilità ricavati tramite correlazioni e le loro differenze percentuale dei valori di Terzaghi rispetto alle altre tre formulazioni.

Campione e profondità	$d_{10}$	$d_{60}$	k Hazen	k Terzaghi	k Chapuis	k Mbonimpa	Diff. % di k Chapuis rispetto k Terzaghi	Diff. % di k Mbonimpa rispetto k Terzaghi
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	%	%
L1 - 22.4	9,50E-06	2,00E-04	9,03E-11	1,50E-07	1,27E-08	4,45E-08	-92%	-70%
L2 - 5.3	2,50E-05	9,00E-05	6,25E-10	1,04E-06	5,78E-08	1,71E-07	-94%	-84%
L2 - 7.1	3,60E-05	2,40E-04	1,30E-09	2,15E-06	1,02E-07	4,36E-07	-95%	-80%
L2 - 13	1,60E-05	1,50E-04	2,56E-10	4,24E-07	2,87E-08	9,64E-08	-93%	-77%
L2 - 14	2,10E-05	1,60E-04	4,41E-10	7,31E-07	4,40E-08	1,55E-07	-94%	-79%
L2 - 16.3	8,20E-06	3,70E-05	6,72E-11	1,11E-07	1,01E-08	1,98E-08	-91%	-82%
L2 - 24.5	1,90E-05	4,40E-04	3,61E-10	5,99E-07	3,76E-08	1,84E-07	-94%	-69%
L4 - 21	2,50E-05	1,60E-04	6,25E-10	1,04E-06	5,78E-08	2,07E-07	-94%	-80%
L5 - 5	3,40E-04	8,20E-03	1,16E-07	1,92E-04	3,43E-06	5,96E-05	-98%	-69%
L5 - 5.8	3,30E-05	5,00E-04	1,09E-09	1,81E-06	8,92E-07	4,81E-07	-51%	-73%
L5 - 6	5,00E-05	6,10E-03	2,50E-09	4,15E-06	1,71E-07	2,21E-06	-96%	-47%
L5 - 7.5	4,20E-04	3,50E-03	1,76E-07	2,93E-04	4,78E-06	6,39E-05	-98%	-78%
L5 - 15	4,40E-06	2,20E-05	1,94E-11	3,21E-08	3,81E-09	5,91E-09	-88%	-82%
L5 - 21	9,50E-06	2,60E-04	9,03E-11	1,50E-07	1,27E-08	4,86E-08	-92%	-68%

Tabella 4.21 Valori di permeabilità ricavati tramite correlazioni e le loro rapporti.

Campione e profondità	k Terzaghi (kT)	k Chapuis (kC)	k Mbonimpa (kM)	Rapporto kC / kT	Rapporto kM / kT
<i>/ - m</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
L1 - 22.5	1,50E-07	1,27E-08	4,45E-08	0,085	0,297
L2 - 5.4	1,04E-06	5,78E-08	1,71E-07	0,056	0,164
L2 - 7.2	2,15E-06	1,02E-07	4,36E-07	0,047	0,203
L2 - 13	4,24E-07	2,87E-08	9,64E-08	0,068	0,227
L2 - 14	7,31E-07	4,40E-08	1,55E-07	0,060	0,212
L2 - 16.4	1,11E-07	1,01E-08	1,98E-08	0,091	0,178
L2 - 24.6	5,99E-07	3,76E-08	1,84E-07	0,063	0,307
L4 - 22	1,04E-06	5,78E-08	2,07E-07	0,056	0,199
L5 - 6	1,92E-04	3,43E-06	5,96E-05	0,018	0,310
L5 - 5.9	1,81E-06	8,92E-07	4,81E-07	0,493	0,266
L5 - 7	4,15E-06	1,71E-07	2,21E-06	0,041	0,533
L5 - 7.6	2,93E-04	4,78E-06	6,39E-05	0,016	0,218
L5 - 15	3,21E-08	3,81E-09	5,91E-09	0,119	0,184
L5 - 21	1,50E-07	1,27E-08	4,86E-08	0,085	0,324

I valori di permeabilità ottenuti con la formula di Chapuis sono minori di uno o due ordini di grandezza rispetto i valori di permeabilità ottenuti con la formulazione di Terzaghi. Infine, si osserva che i valori di permeabilità ottenuti con la formula di Mbonimpa sono anche essi minori rispetto i valori della permeabilità ottenuti con la formula di Terzaghi. Chapuis e Mbonimpa mostrano solitamente lo stesso ordine di grandezza, ma il secondo ha valori maggiori.

Tabella 4.22 Valori di permeabilità ricavati con la formula di BAT e differenze percentuali con i valori di k BAT tratto costante (a), e rapporti tra i valori ottenuti con le tre formulazione di permeabilità (b).

(a)

Prova e Profondità	k BAT tratto costante (kB)	k Terzaghi (kT)	k Chapuis (kC)	k Mbonimpa (kM)	Diff. % di k Terzaghi rispetto k BAT tratto costante	Diff. % di k Chapuis rispetto k BAT tratto costante	Diff. % di k Mbonimpa rispetto k BAT tratto costante
/ - m	m/s	m/s	m/s	m/s	%	%	%
L2 - 13.5	8,82E-06	4,24E-07	2,08E-08	9,64E-08	-95%	-100%	-99%
L2 - 23.5	3,42E-07	5,99E-07	3,76E-08	1,84E-07	75%	-89%	-46%
L2 - 26	5,56E-07				8%	-93%	-67%
L4 - 21	1,02E-06	1,04E-06	5,78E-08	2,07E-07	2%	-94%	-80%
L5 - 21	8,94E-07	1,50E-07	1,27E-08	4,86E-08	-83%	-99%	-95%
L5 -24	2,22E-06				-93%	-99%	-98%

(b)

Prova e Profondità	k BAT tratto costante (kB)	k Terzaghi (kT)	k Chapuis (kC)	k Mbonimpa (kM)	Rapporto kB/kT	Rapporto kB/kC	Rapporto kB/kM
/ - m	m/s	m/s	m/s	m/s	/	/	/
L2 - 13.5	8,82E-06	4,24E-07	2,08E-08	9,64E-08	20,8	424,0	91,5
L2 - 23.5	3,42E-07	5,99E-07	3,76E-08	1,84E-07	0,6	9,1	1,9
L2 - 26	5,56E-07				0,9	14,8	3,0
L4 - 21	1,02E-06	1,04E-06	5,78E-08	2,07E-07	1,0	17,6	4,9
L5 - 21	8,94E-07	1,50E-07	1,27E-08	4,86E-08	6,0	70,4	18,4
L5 -24	2,22E-06				14,8	174,8	45,7

Considerando il valore di **k BAT del tratto costante** come riferimento della permeabilità fornita dallo strumento sperimentale, sono state calcolate le differenze percentuali e i rapporti con le permeabilità stimate dalle curve granulometriche, riportate in Tabella 4.22. In questo caso è stato mantenuto costante il valore di riferimento al numeratore, per evidenziare maggiormente le differenze. Si può osservare che:

Campione **L2 - 13.5**, definito *Sabbia fine con limo e presenza di sabbia media*: questo campione mostra valori di permeabilità ottenuti dallo strumento sperimentale ( $k_{BAT}$  del tratto costante  $k_{BAT} = 0,00000882$  m/s) un ordine di grandezza maggiore di Terzaghi e due ordini di grandezza maggiori delle altre due formulazioni (Chapuis e Mbonimpa). Il valore della permeabilità di  $k_{BAT}$  tratto costante sono:

- 20 volte maggiore del valore di permeabilità della formula di Terzaghi;
- 424 volte maggiore del valore di permeabilità della formula di Chapuis;
- 91 volte maggiore del valore di permeabilità della formula di Mbonimpa.

Tra le correlazioni solo Terzaghi restituisce valori di permeabilità pressoché in linea con le aspettative, mentre i valori di permeabilità calcolati con le formulazioni proposte da Chapuis e Mbonimpa et al. sono troppo piccoli al confronto ai valori di riferimento.

Campione **L2 - 23.5**, definito *Sabbia media-grossa con limo, presenza di sabbia fine e tracce di ghiaia medio-fine*: in questo caso risulta che sia la formulazione di Terzaghi che Mbonimpa hanno il medesimo ordine di grandezza di  $k_{BAT}$ , sebbene Terzaghi fornisca un valore di permeabilità maggiore di 0.6 volte e Mbonimpa un valore quasi doppio del valore di permeabilità fornito dallo strumento sperimentale. Invece il valore di riferimento “ $k_{BAT}$ ” è 9 volte maggiore del valore di permeabilità della formula Chapuis, che infatti risulta un ordine di grandezza minore.

Anche il campione **L2 – 26** è stato campionato dal medesimo livello *Sabbia media-grossa con limo, presenza di sabbia fine e tracce di ghiaia medio-fine*: infatti la permeabilità fornita dalle misure in sito è praticamente la medesima. Questo conferma il buon funzionamento dello strumento in questo tipo di terreno. Anche il confronto con le permeabilità fornite dalle formulazioni sono paragonabili.

Il campione **L4 – 21** è stato classificato come *Sabbia fine con sabbia media e limo* e la sua granulometria risulta molto più omogenea di quella del campione precedente: la sua permeabilità misurata in campo risulta maggiore del precedente, e anche in questo

campione risulta che formula di Terzaghi fornisce valore di permeabilità praticamente identici al valore di permeabilità fornito dallo strumento sperimentale. Mentre il valore fornito da Chapuis è 2 ordini di grandezza minore (“k BAT” è 17 volte il valore di permeabilità della formula Chapuis) e Mbonimpa fornisce un valore di permeabilità di 1 ordine di grandezza minore (il valore di riferimento “k BAT” è 5 volte del valore di permeabilità della formula Mbonimpa).

Gli ultimi due campioni appartengono al medesimo livello, definito come *Sabbia media con limo e presenza di sabbia fine-grossa*. Per il campione **L5 – 21** a cui effettivamente corrisponde la curva granulometrica i valori di permeabilità ottenuti dallo strumento sperimentale (k BAT del tratto costante) è ancora dello stesso ordine di grandezza della formula di Terzaghi, anche se ha un valore 6 volte maggiore. Rispetto ai valori forniti dalle altre due formule (Chapuis e Mbonimpa) il valore della permeabilità di k BAT tratto costante è un ordine di grandezza maggiore (70 volte maggiore del valore di permeabilità fornita dalla formula di Chapuis e 18 volte maggiore del valore di permeabilità fornita dalla formula di Mbonimpa).

Per il campione **L5 – 24**, le misure di campagna forniscono un valore di permeabilità maggiore del precedente ( $k_{BAT} = 2,22 \cdot 10^{-6}$  m/s) attribuibile ad una maggiore presenza di materiale più grossolano a questa profondità. Infatti, questo valore risulta uno e due ordini di grandezza superiore ai valori calcolati dalla curva granulometrica. (15 volte maggiore del valore di permeabilità fornita dalla formula di Terzaghi; 175 volte maggiore del valore di permeabilità fornita dalla formula di Chapuis; 46 volte maggiore del valore di permeabilità fornita dalla formula di Mbonimpa.)

Si può quindi concludere che:

1. la formulazione di Terzaghi è quella che restituisce valori di permeabilità più vicini ai valori di permeabilità forniti dallo strumento sperimentale k BAT del tratto costante.
2. Viene anche osservato che tutte e tre le formule considerate dipendono dal valore del  $d_{10}$  ma, mentre la formulazione di Terzaghi dipende solo dal valore di porosità (stimato pari a 0.44 e mantenuto costante per tutti i campioni), da un coefficiente di forma dei grani, qui mantenuto sempre costante e pari a 8, la formula di Chapuis dipende dal valore di indice dei vuoti (stimato pari a 0.8 e mantenuto costante per tutti i campioni) e Mbonimpa considera anche il valore del coefficiente di uniformità  $C_u$ .

## CONCLUSIONI

L'obiettivo di questa tesi è quello di testare la potenzialità del permeametro sperimentale tipo BAT in sito confrontando i valori di permeabilità ottenuti con quelli calcolabili a partire dalle caratteristiche granulometriche dei campioni utilizzando diverse formule di natura empirica. Lo strumento sperimentale è stato valutato precedentemente in laboratorio con campioni di ghiaia pulita, sabbia e miscele di ghiaia e sabbia, arrivando alle seguenti conclusioni [14]:

- Lo strumento sperimentale non riesce a ricare la corretta coefficiente di permeabilità dei terreni più permeabili come quelli ad esempio ghiaie pulite.
- Le prove sui terreni granulari come sabbia e miscele di sabbia hanno mostrato un sostanziale allineamento con le aspettative.

Il permeametro sperimentale è stato quindi testato nel sito sperimentale di Laghetti (BZ) su alcuni livelli stratigrafici in corrispondenza dei quali sono stati prelevati 23 campioni di terreno. I risultati ottenuti dalle prove sperimentali sono poi stati elaborati per solo 12 diversi campioni di terreno, dei quali:

- 6 tra i diversi 12 campioni sono prelevati negli strati di terreni dove lo strumento sperimentale funzionava in modo **ottimale**. Questi campioni hanno la maggior percentuale del peso di sabbia e minore percentuale del peso di limo e ghiaia, che viene individuato dei seguenti casi:
  - nei casi di sabbia e limo: la percentuale del peso di limo dev'essere minore uguale di 32% mentre la percentuale del peso di sabbia varia tra 68% a 99.9%.
  - nei casi di sabbia con miscele di ghiaia e limo: la percentuale del peso di ghiaia dev'essere minore uguale di 20% e limo dev'essere minore uguale di 17% mentre varia la percentuale del peso di sabbia tra 64% a 99.9%.
- 3 tra i diversi 12 campioni di terreni sono prelevati dagli strati dove lo strumento sperimentale risultava dare una prova '**a filtro intasato**'. Questi campioni hanno un range del peso percentuale della sabbia minore uguale di 63% mentre il peso percentuale di limo varia tra 37% a 99.9%.



- Gli ultimi 3 tra i diversi 12 campioni sono prelevati dagli strati dove lo strumento sperimentale terminava la misura in pochissimo tempo (prove dette ‘**filtro aperto subito**’), circa 2 secondi. Questi campioni hanno la percentuale del peso di ghiaia maggiore uguale di 53% mentre la percentuale del peso di sabbia varia tra 36% 47% e di limo tra 0% a 11%.

Infine, confrontando i valori della permeabilità ricavati dalle misure di pressione fornite dal permeametro sperimentale con quelle ottenute dalle correlazioni basate sulle caratteristiche granulometriche dei campioni prelevati alla profondità corrispondente, si osserva che la formulazione proposta da Terzaghi fornisce i valori di permeabilità più simili a quelli dello strumento sperimentale nell’elaborazione della pressione nel tratto in cui si mantiene costante.

Si deduce che lo strumento sperimentale funziona bene nei terreni con peso percentuale di sabbia maggiore uguale di 64% mentre la percentuale del peso di ghiaia è tra 0% a 20% e limo tra 0% a 32%.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Simonini P., Cola S., Bersan S., 2014, *Caratterizzazione geotecnica, meccanismi di collasso e monitoraggio degli argini fluviali*. Atti del XXV convegno Italiano di Geotecnica., Ed AGI 229-268, ISBN: 9788897517030.
- [2] CIRIA, Ministry of Ecology of the United Kingdom, USACE, 2013. *The International Levee Handbook*. CIRIA, London 2013, ISBN: 978-0-86017-734-0.
- [3] Fauchard C., Me'riaux P., 2007. *Geophysical and Geotechnical Method for Diagnosing Flood Protection Dikes – Guide for Implementation and Interpretation*, translated by Turner R. ISBN: 978-2-7592-0035-1.
- [4] W. David Carrier. Goodbye, hazen; hello, kozeny-carman. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(11):1054–1056, 2003.
- [5] Robert P Chapuis and Michel Aubertin. *On the use of the kozeny carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils*. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(3):616–628, 2003.
- [6] Robert P Chapuis. *Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review*. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 71(3):401–434, 2012.
- [7] Donald W Taylor. *Fundamentals of soil mechanics*, volume 66. LWW, 1948.
- [8] Robert P Chapuis. *Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review*. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 71(3):401–434, 2012.
- [9] Robert P Chapuis, Denis E Gill, and Karsten Baass. *Laboratory permeability tests on sand: influence of the compaction method on anisotropy*. *Canadian Geotechnical Journal*, 26(4):614–622, 1989.

- [10] Robert P Chapuis. *Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. Canadian geotechnical journal*, 41(5):787–795, 2004.
- [11] M Mbonimpa, M Aubertin, RP Chapuis, and B Bussière. *Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. Geotechnical & Geological Engineering*, 20(3):235–259, 2002.
- [12] Bengt-Arne Torstensson. *A new system for ground water monitoring. Groundwater Monitoring & Remediation*, 4(4):131–138, 1984.
- [13] S. Bonelli et al. (Eds.): EWG – IE 2018, LNCE 17, pp. 234 – 244, 2019, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99423-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99423-9_22).
- [14] E. Fiorini, *Costruzione e calibrazione di un nuovo permeametro per la determinazione in situ della permeabilità di terreni granulari. Tesi di Laurea Magistrale*, 2021.
- [15] Gordon M. Fair, Loranus P. Hatch, and Herbert E. Hudson. Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand [with discussion]. *Journal (American Water Works Association)*, 25(11):1551–1565, 1933.