



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE E DI INGEGNERIA DELLA MATERIA  
DELL'AMBIENTE E URBANISTICA**

---

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE**

**Caratterizzazione geotecnica di un terreno sabbioso**

**Geotechnical characterization of a sandy soil**

Relatore:

***Prof. Francesco Mazzieri***

Tesi di Laurea di:

***Luca Miliozzi***

*Anno Accademico*

**2023/2024**



# Sommario

<b>1. OGGETTO E SCOPO DELLA TESI.....</b>	<b>4</b>
<b>2. METODI DI CLASSIFICAZIONE .....</b>	<b>5</b>
<b>3. CLASSIFICAZIONE DEL TERRENO TRAMITE ASTM D2487 – 17 .....</b>	<b>6</b>
3.1 TERMINOLOGIA ALL’ INTERNO DELLA PROCEDURA .....	6
3.2 DIAGRAMMI PER LA CLASSIFICAZIONE E CARTA DI PLASTICITÀ.....	8
3.3 PROCEDURA.....	11
3.3.1 <i>Procedura per terreni a grana fine</i> .....	11
3.3.2 <i>Procedura per terreni a grana grossa</i> .....	13
3.4 DETERMINAZIONE DELLA CURVA GRANULOMETRICA .....	15
3.5 RISULTATI SPERIMENTALI .....	17
3.6 ASTM D4318 – 17E1 “STANDARD TEST METHODS FOR LIQUID LIMIT, PLASTIC LIMIT AND PLASTICITY INDEX” .....	23
3.6.1 <i>Terminologia</i> .....	23
3.6.2 <i>Limite Liquido</i> .....	25
3.6.3 <i>Limite Plastico</i> .....	29
3.6.4 <i>Indice di plasticità</i> .....	30
3.7 RISULTATI SPERIMENTALI .....	31
<b>4. CONTENUTO D’ACQUA OTTIMO .....</b>	<b>33</b>
4.1 ASTM D698 – 12 “STANDARD TEST METHODS FOR LABORATORY COMPACTION CHARACTERISTICS OF SOIL USING STANDARD EFFORT” .....	33
4.1.1 <i>Terminologia</i> .....	34
4.1.2 <i>Attrezzatura</i> .....	34
4.1.3 <i>Procedura</i> .....	36
4.1.4 <i>Ottenimento curva di compattazione</i> .....	38
4.2 RISULTATI SPERIMENTALI .....	38
<b>5. PROVA DI PERMEABILITÀ .....</b>	<b>40</b>
5.1 PERMEAMETRO A PARETI FLESSIBILI.....	40
5.1.1 <i>Preparazione e posizionamento del campione nella cella</i> .....	41
5.1.2 <i>Esecuzione della prova</i> .....	42
5.1.3 <i>Calcolo del coefficiente di permeabilità</i> .....	43
5.2 RISULTATI SPERIMENTALI .....	44
<b>6. CONCLUSIONI .....</b>	<b>46</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>47</b>

# 1. Oggetto e scopo della tesi

La caratterizzazione di un terreno è un processo fondamentale in quella che è la geotecnica in quanto ricondurlo ad una macrogruppo ci permette di avere un'indicazione su quelle che sono le caratteristiche fisiche, meccaniche ed ingegneristiche. Nell'ambito ingegneristico, i terreni possono essere suddivisi in quattro categorie in funzione della dimensione dei grani:

- ghiaia
- sabbia
- limo
- argilla

La ghiaia e la sabbia sono considerati terreni incoerenti o a grana grossa, mentre rientrano nei terreni coesivi o a grana fine, il limo e l'argilla. Caratterizzare un terreno però non vuol dire soltanto determinarne che tipologia ma è andare appunto a ricavare quelle che sono le sue proprietà anche a livello meccanico, per fare ciò sono state ideate delle prove sia di laboratorio sia in situ, ossia effettuate in cantiere, che ci permettono di ottenere dei dati necessari per poter prevedere il comportamento del terreno. All'interno di questa tesi ci concentreremo sulla caratterizzazione di un terreno sabbioso in particolare effettuando analisi per la tipologia di terreno, il contenuto d'ottimo d'acqua e la permeabilità. Gli standard di riferimento utili a tale scopo sono ASTM D2487 – 17 "Classification of Soil for Engineering Purpose" e ASTM D4318 – 17e1 "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index" per la determinazione di tipologia di terreno, e la ASTM D698 – 12 "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort".



Figura 1.1, terreno sabbioso oggetto di studio

## 2. Metodi di classificazione

Nello scorso secolo sono stati sviluppati diversi sistemi di classificazione in parallelo sia livello nazionale che internazionale, in particolare in Italia abbiamo sviluppato il sistema UNI di cui vedremo un breve cenno, mentre a livello internazionale si è affermato quello che il Sistema di Classificazione Unificato USCS.

Fattore comune a entrambi i metodi di classificazione è l'analisi della composizione granulometrica del terreno. La terra risulta quindi divisa in frazioni granulometriche ognuna con un diametro massimo e un diametro minimo dei granuli tale suddivisione avviene tramite un'analisi granulometrica tramite vagliatura meccanica e sedimentazione.

Il sistema di classificazione UNI prevede la suddivisione di un terreno in 7 gruppi principali (A1 – A7) in base a granulometria e ai limiti di consistenza, con un gruppo aggiuntivo A8 per terreni ad alto contenuto di materiale organico. Ottenendo due macrofamiglie: le terre granulari (A1 – A3) e le terre fini (A4 – A7).

Il Sistema di Classificazione Unificato delle Terre U.S.C.S. invece prevede la suddivisione delle terre in tre gruppi:

- Terre organiche
- Terre grosse: con più del 50% trattenuto al setaccio N200 ASTM, suddivise in Ghiaie (G) e Sabbie (S) in base al setaccio N4 ASTM, sabbie se il passante è maggiore del 50% o ghiaie in caso opposto.
- Terre fini: con più del 50% passante al setaccio N200 ASTM, suddivise in Limi (L) e Argille (C) attraverso la carta di plasticità

Inoltre sono presenti ulteriori suddivisioni in funzione della forma della curva granulometrica attraverso il coefficiente di uniformità  $C_u$  e il coefficiente di curvatura  $C_e$ .

## 3. Classificazione del terreno tramite ASTM D2487 – 17

Come detto precedentemente al fine di classificare il terreno andremo ad utilizzare un procedura discussa all'interno degli standard ASTM, in particolare ci rifacciamo allo standard ASTM D2487 – 17 "Classification of Soil for Engineering Purpose", che descrive un sistema per classificare i minerali e i terreni organo minerali per scopi ingegneristici basati su determinazione in laboratorio delle caratteristiche granulometriche, limite liquido e indice di plasticità.

Questo standard è la versione ASTM del Sistema di Classificazione dei Terreni Unificato (U.S.C.S.). La base per lo schema di classificazione è l'Airfield Classification System sviluppato da A. Casagrande nei primi anni 40 del novecento che poi divenne noto come Unified Soils Classification System in seguito all'adozione di tale metodo da parte di numerosi governi degli U.S.A..

### 3.1 Terminologia all' interno della procedura

- Argille: terreno passante al setaccio n. 200 (75  $\mu$ m) che mostra una buona resistenza quando asciutto.
- Ghiaia: particelle minerali che passano al setaccio da 3 pollici (75 mm) e trattenuta al setaccio n. 4 (4.75) con la seguente suddivisione : Grossa se passante al setaccio da 3 pollici (75 mm) e trattenuta al setaccio da  $\frac{3}{4}$  di pollice (19 mm); Fine se passante al setaccio da  $\frac{3}{4}$  di pollice (19 mm) e trattenuta al setaccio n.4 (4.75 mm)
- Argilla organica: un argilla con un contenuto organico sufficiente a influenzarne le proprietà, ai fini della classificazione la si considera comunque un argilla eccetto che il valore del limite liquido dopo l'asciugatura in forno è meno del 75% del suo limite liquido prima dell'asciugatura.
- Limo organico: un limo con un contenuto organico sufficiente a influenzarne le proprietà, ai fini della classificazione la si considera comunque un limo eccetto che il valore del limite liquido dopo l'asciugatura in forno è meno del 75% del suo limite liquido prima dell'asciugatura.
- Torba: composta da tessuto vegetale in vari stati di decomposizione solitamente con un odore organico con un colore dal marrone scuro al nero.
- Sabbia: particelle minerali passanti al setaccio n.4 (4.75 mm) e trattenute al setaccio n.200 (75  $\mu$ m) con la seguente suddivisione: Grossa se passante al setaccio n.4 (4.75 mm) e trattenuta al setaccio n.10 (2.00 mm); Media se passante al setaccio n.10 (2.00 mm) e trattenuta al setaccio n.40 (425  $\mu$ m); Fine se passante al setaccio n.40 (475  $\mu$ m) e trattenuta al setaccio n.200 (75  $\mu$ m).
- Limo: terra passante al setaccio n.200 (75  $\mu$ m) non plastica o molto poco plastica e che mostra poca o nulla resistenza quando asciutta. Ai fine della classificazione il

limo è un terreno a grana fine, o un porzione del terreno a grana fine, con un indice di plasticità minore di 4 o se nella carta indice di plasticità-limite liquido cade al di sotto della linea "A".

- Coefficiente di curvatura "Cc": è il rapporto  $\frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$  dove  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{60}$  sono la dimensione delle particelle rispettivamente corrispondenti al 10, 30, 60 del passante cumulativo nella distribuzione della curva granulometrica.
- Coefficiente di curvatura "Cc": è il rapporto  $\frac{D_{60}}{D_{10}}$  dove  $D_{10}$  e  $D_{60}$  sono la dimensione delle particelle rispettivamente corrispondenti al 10, 30, 60 percento del passante cumulativo nella distribuzione della curva granulometrica.

## 3.2 Diagrammi per la classificazione e Carta di plasticità

Riporto i diagrammi di flusso e la carta di plasticità utilizzata ai fini della classificazione

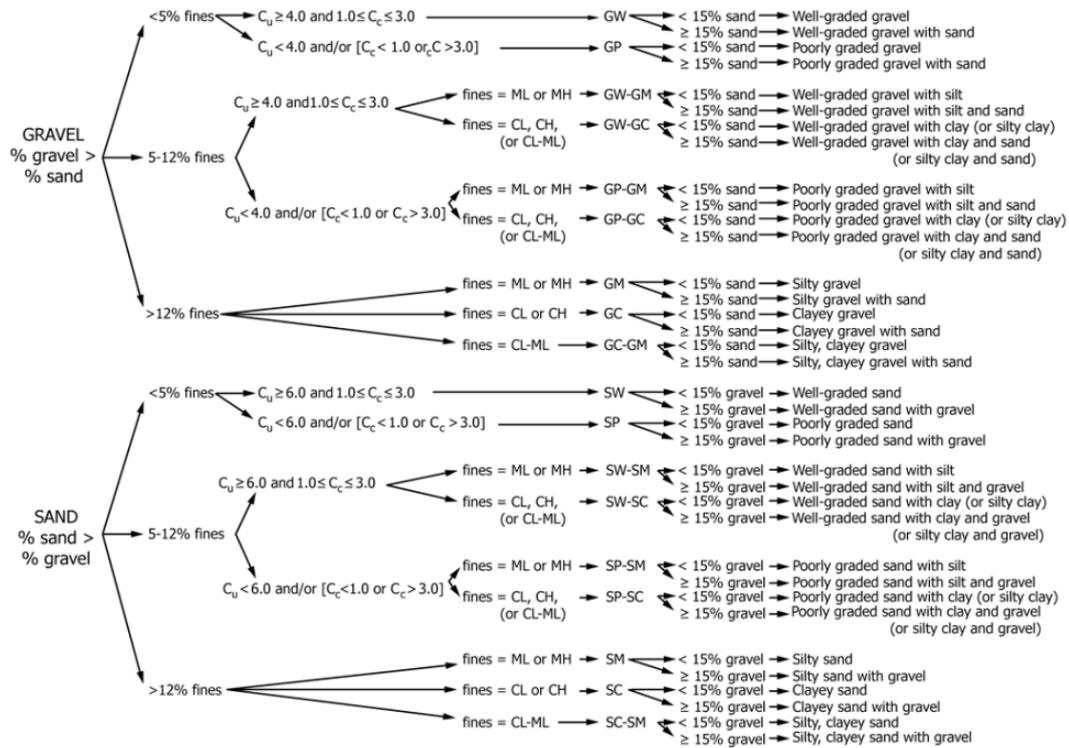


Figura 3.1, diagramma di flusso per la classificazione di terreni a grana grossa (Sabbia e Ghiaia), fonte ASTM D2487 – 17

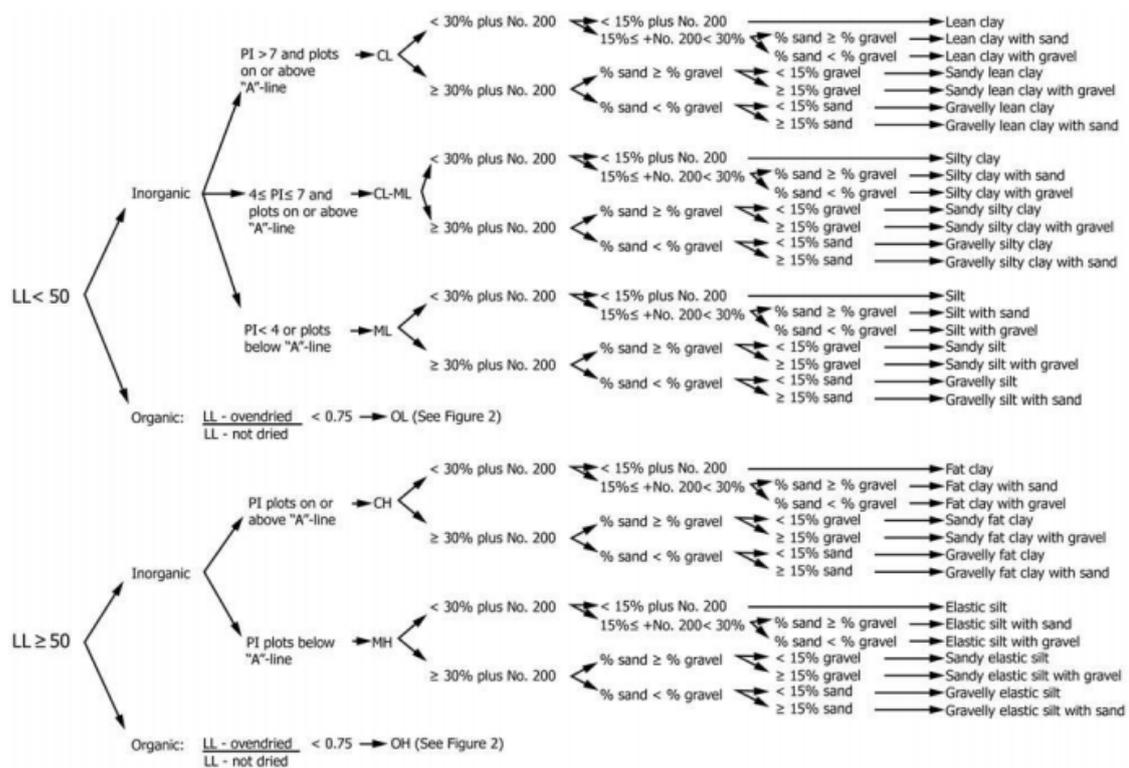


FIG. 1 Flow Chart for Classifying Fine-Grained Soil (50 % or More Passes No. 200 Sieve)

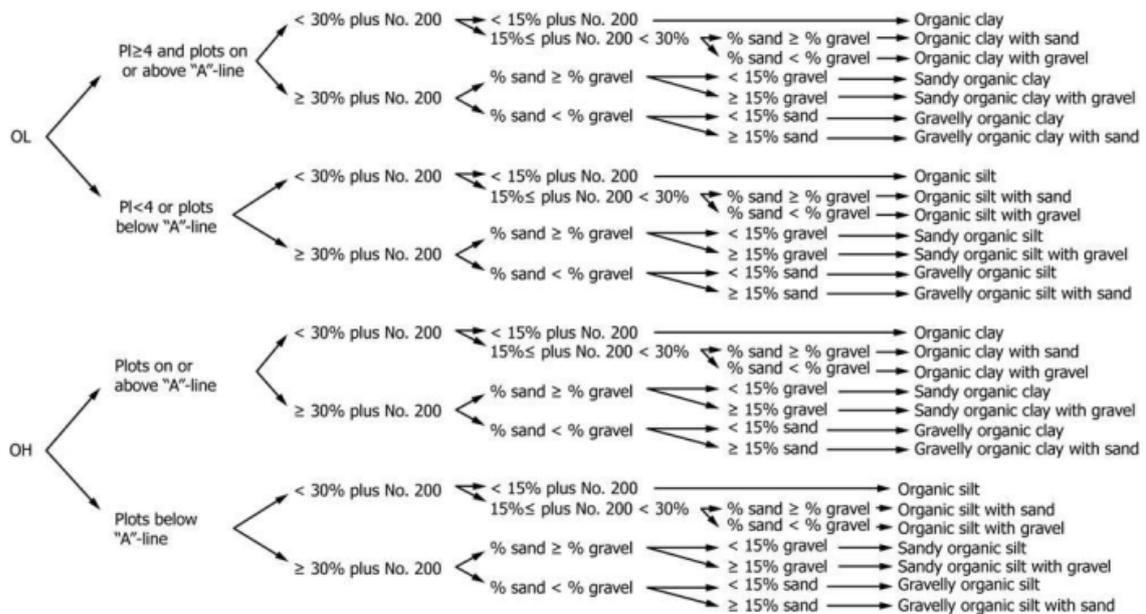


FIG. 2 Flow Chart for Classifying Organic Fine-Grained Soil (50 % or More Passes No. 200 Sieve)

Figura 3.2, diagramma di flusso per la classificazione di terreni a grana fine (Argille e Limi),  
 fonte ASTM D2487 – 17

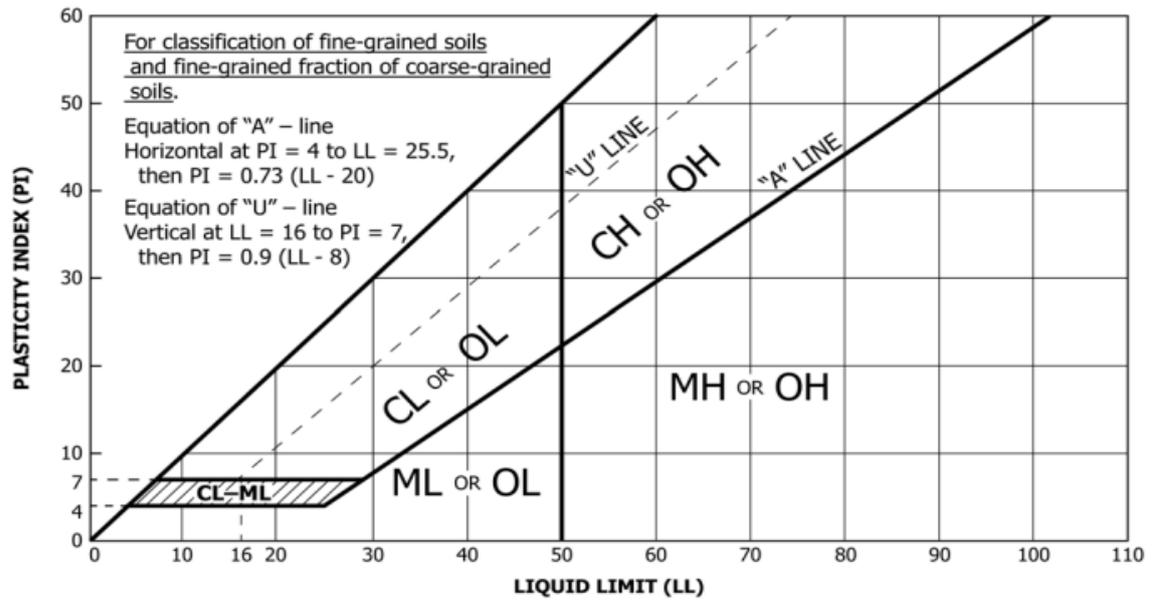


FIG. 4 Plasticity Chart

Figura 3.3, Carta di plasticità per la classificazione dei terreni fini, fonte ASTM D2487 – 17

## 3.3 Procedura

All'interno dello standard sono presenti due procedure distinte, una per i terreni a grana fine ossia con più del 50% passante al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ) e una per i terreni a grana grossa ossia con più del 50% trattenuto al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ).

### 3.3.1 Procedura per terreni a grana fine

Il terreno è considerato Argilla inorganica se la sua posizione nella carta di plasticità ricade al di sopra della linea "A", l'indice di plasticità è maggiore di 4 e la presenza di materiale organico non influisce sul limite liquido.

Considero dunque il terreno Argilla "magra" (CL) se il limite liquido è minore di 50, lo considero invece Argilla "grassa" (CH) se il limite liquido è pari o maggiore di 50.

Classifico un terreno come Argilla limosa (CL-ML) se la sua posizione nella carta di plasticità ricade al di sopra della linea "A", l'indice di plasticità è minore di 4 e la presenza di materiale organico non influisce sul limite liquido.

Il terreno è un Limo inorganico se la sua posizione nella carta di plasticità ricade al di sotto della linea "A", l'indice di plasticità è minore di 4 e la presenza di materiale organico non influisce sul limite liquido.

Se il limite liquido è minore di 50 considero il terreno un Limo (ML).

Se il limite liquido è pari o maggiore di 50 considero il terreno come Limo elastico (MH).

Il terreno è considerato un Argilla o un Limo organico se il materiale organico influenza il limite liquido. Nel caso in cui il terreno abbia un colore scuro e un odore organico quando umido, bisogna determinare un secondo limite liquido su del materiale precedentemente asciugato in forno a  $110 \pm 5^\circ$  a massa costante. Se valore del limite liquido così ottenuto è minore del 75% del limite liquido del campione originale allora classifico il terreno come Limo organico o Argilla organico.

Nel caso in cui la riduzione del limite liquido è minore del 50% allora:

- Il terreno è un Limo organico (OL) se la sua posizione nella carta di plasticità ricade al di sotto della linea "A" o se l'indice di plasticità è minore di 4 .
- Il terreno è considerato Argilla organica (OL) se la sua posizione nella carta di plasticità ricade al di sopra della linea "A" o se l'indice di plasticità è pari o maggiore di 4.

Nel caso in cui la riduzione del limite liquido è maggiore o pari del 50% allora:

- Il terreno è un Limo organico (OH) se la sua posizione nella carta di plasticità ricade al di sotto della linea "A".
- Il terreno è considerato Argilla organica (OH) se la sua posizione nella carta di plasticità ricade al di sopra della linea "A".

Se meno del 30% ma più del 15% del campione è trattenuto al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ) allora la parola "con sabbia" o "con ghiaia" deve essere aggiunta al nome del gruppo.

Se più del 30% del campione è trattenuto al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ) la parola "sabbioso" o "ghiaioso" deve essere aggiunta al nome del gruppo. Nel caso in cui il trattenuto al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ) sia prevalentemente sabbia si aggiunge "sabbioso" se prevalentemente ghiaia si aggiunge "ghiaioso".

### 3.3.2 Procedura per terreni a grana grossa

Come abbiamo già visto i terreni a grana grossa sono suddivisi in sabbie e ghiaie, dove in particolare definiamo ghiaie i terreni il cui trattenuto, della frazione grossa, al setaccio n.4 (4.75 mm) è maggiore del 50%, mentre definiamo sabbie i terreni il cui passante, della frazione grossa, al setaccio n.4 (4.75 mm) è maggiore del 50%.

Se il 12% o meno del campione è passante al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ), si andrà a definire la curva granulometrica, e si determina il coefficiente di curvatura "Cc" e il coefficiente di uniformità "Cu" tramite le formule precedentemente indicate.

Se il 5% o meno del campione è passante al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ), classifichiamo il terreno come Ghiaia ben-gradata (GW) o Sabbia ben-gradata (SW) se Cu è pari o maggiore di 4 per le ghiaie e se è maggiore di 6 per le sabbie, e se Cc è compreso tra 1.0 e 3.0.

Se il 5% o meno del campione è passante al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ), classifichiamo il terreno come Ghiaia scarsamente-gradata (GP) o Sabbia scarsamente-gradata (SP) se i criteri riguardanti Cu e/o Cc per i terreni ben gradati non sono rispettati.

Se più del 12% del campione è passante al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ), il terreno deve essere considerato "terreno a grana grossa con fine". Il fine può essere limo o argilla e viene determinato basandosi sulla carta di plasticità.

Il terreno è definito Ghiaia-argillosa "GC" o Sabbia-argillosa "SC" se il fine è argilloso ossia se la sua posizione sulla carta di plasticità è al di sopra della linea "A" e se l'indice di plasticità è maggiore di 7.

Il terreno è definito Ghiaia-limosa "GM" o Sabbia-limosa "SM" se il fine è limoso ossia se la sua posizione sulla carta di plasticità è al di sotto della linea "A" o se l'indice di plasticità è minore di 4.

Se la carta di plasticità definisce il fine come Argilla-limosa CL-ML classifichiamo il terreno come Ghiaia limosa argillosa "GC-GM" se è una Ghiaia, o come Sabbia limosa argillosa "SC-SM" se è una Sabbia.

Se il passante al setaccio n.200 (75  $\mu\text{m}$ ) è compreso tra il 5 e il 12% al terreno viene assegnato una doppia classificazione usando due gruppi di simboli: il primo gruppo corrisponde ai simboli usati per i terreni con meno del 5% di fine (GW, GP, SW e SP), il secondo gruppo corrisponde ai simboli usati per i terreni con più del 12% di fine (GC, GM, SC e SM). Il nome del gruppo dovrà corrispondere al simbolo del primo gruppo con l'aggiunta di "con argilla" o di "con limo" per indicare la plasticità della frazione fine.

Se il campione è principalmente sabbia o ghiaia ma contiene il 15% o più dell'altra frazione grossa allora è prevista l'aggiunta di "con ghiaia" o di "con sabbia" al nome del gruppo.

Infine se il campione contiene ciottoli o massi o entrambi allora è prevista l'aggiunta di "con ciottoli" o di "con ciottoli e massi" al nome del gruppo.

### 3.4 Determinazione della curva granulometrica

Come già precedentemente detto la determinazione della curva granulometrica risulta fondamentale al fine di classificare il terreno, per poterla determinare ci avvaliamo di due tecniche, una per la frazione grossa e una per la frazione fine; per quanto riguarda la frazione grossa useremo la setacciatura tramite vagli standard, mentre se risulterà necessario andremo a usare la tecnica della sedimentazione anche se solitamente per motivi di praticità, nei terreni grossolani la curva granulometrica al di sotto dei  $75\ \mu\text{m}$  non viene ottenuta via sperimentale (sedimentazione) ma viene dedotta.

Il terreno in questione si presenta come sabbioso con relativamente poco fine, dunque presa la serie di vagli standard ASTM andremo a utilizzare solo i vagli di nostro interesse (Figura 3.4), prendendo come diametro massimo il setaccio n10 (2 mm) in quanto possiamo osservare l'assenza della frazione ghiaiosa, mentre come diametro minimo selezioniamo il setaccio n. 200 ( $75\ \mu\text{m}$ ) in quanto la classificazione del terreno non necessita altri vagli di dimensioni minori.



Figura 3.4, pila dei setacci utilizzata

Prelevato il campione possiamo procedere per due metodologie, la via secca e la via umida, la via secca ci permette di eseguire la prova in tempi molto ridotti in quanto non prevede una preparazione del terreno ma non risulta accurata nel caso in cui il terreno sia ricco in fine e anche se sono presenti dei "grumi" nel terreno dovuti alla coesione o ad altri fattori, d'altro canto la via umida è un processo più lungo che però ci assicura una determinazione più esatta della curva granulometrica. In questo caso abbiamo optato per utilizzare entrambe le metodologie anche per poter evidenziare eventuali differenze nei risultati.

## VAGLIATURA PER VIA SECCA

La vagliatura per via secca consiste nel eseguire appunto la vagliatura del terreno così come si presenta dopo il campionamento, il campione, dopo essere stato in forno di asciugatura per 24 ore e pesato, viene posizionato sul setaccio con la maglia più grande ossia quello posto in cima e viene posizionato il tappo, che è presente anche alla base dopo l'ultimo setaccio questo ci permette di ricavare il peso della porzione fine, inoltre il materiale raccolto può essere utilizzato per eseguire ulteriori prove esempio la sedimentazione.

Fatto ciò si procede allo scuotimento della pila di vagli, questo può avvenire in modi diversi a seconda se viene effettuato manualmente o tramite un macchinario (vibrovaglio), possiamo individuare 4 tipi di vagliatura per via secca in base ai movimenti eseguiti durante lo scuotimento:

- Setacciatura oscillatoria di tipo tridimensionale: si applicano al setaccio movimenti verticali e rotazioni sul piano orizzontale, il moto verticale ci assicura che le particelle abbiano modo di cambiare la propria posizione e orientamento ogni volta e questo ci assicura il passaggio di tutte le particelle che abbiano almeno un diametro minore della dimensione del setaccio.
- Setacciatura circolare orizzontale: la pila di setacci viene mossa solamente tramite movimenti di rotazione sul piano orizzontale.
- Setacciatura con movimento sussultorio e rotatorio: si applicano oscillazioni verticali di piccola ampiezza e contemporaneamente la pila viene fatta ruotare.
- Setacciatura a colonna d'aria: sfrutta l'azione combinata di un flusso d'aria e del movimento meccanico e permette la setacciatura di particelle molto fini, anche fino a 5  $\mu\text{m}$

Una volta eseguita la vagliatura ogni setaccio viene svuotato all'interno di un recipiente di peso noto e si pesa ogni frazione granulometrica. Conoscendo il peso totale del campione e conoscendo il peso di ogni frazione granulometrica possiamo determinare il passante percentuale e quindi anche il trattenuto ad ogni setaccio e inserendo i dati raccolti in un grafico che ha come ascissa le dimensioni dei granuli in scala logaritmica e in ascissa il passante da 0 a 100% possiamo ottenere la curva granulometrica.

## VAGLIATURA VIA UMIDA

Nella vagliatura per via umida a differenza di quella per via secca il campione viene sottoposto a un trattamento con un sale che ha la funzione di agente deflocculante al fine di ottenere una curva granulometrica più accurata.

Il campione viene prima messo in forno ad una temperatura di 105° per 24 ore al fine di determinarne il peso secco totale, poi si aggiunge una soluzione ottenuta disciogliendo 5 grammi di sale deflocculante per ogni litro di acqua fino a ricoprire completamente il terreno, e si lascia il tutto a temperatura ambiente per 24 ore. L'azione del deflocculante è fondamentale in quanto va a rompere tutte quelle forze che mantengono coesi gli eventuali grumi nel terreno che andrebbero dunque a falsare l'esito della vagliatura.

Si procede quindi a quella che è la vagliatura vera e propria dove il campione viene rovesciato sulla pila di vaglia che viene precedentemente posizionata sul un lavandino e inoltre non sarà presente né il tappo alla base della pila né quello che si posiziona in cima ad essa, infatti nella vagliatura per via umida per separare le varie frazioni granulometriche si sfrutta l'azione dell'acqua che verrà irrorata tramite uno spruzzatore sul vaglio di dimensione maggiore e che poi percolerà sui vagli sottostanti.

Continueremo quindi ad irrorare acqua fino a quando non avremo un flusso uscente dall'ultimo vaglio limpido e senza traccia di particelle di terreno, il tempo necessario può variare da alcuni minuti fino anche a quasi un'ora in funzione della tipologia di terreno. Fatto ciò andremo a risciacquare accuratamente ogni setaccio all'interno di vaschette (Figura 3.5), annotandoci per ogni setaccio la vaschetta corrispondente, e le andremo a posizionare in forno per 24 ore fino a completa asciugatura; si procederà quindi con lo stesso procedimento della vagliatura per via secca a determinare la curva granulometrica.



Figura 3.5, risciacquo dei setacci

### 3.5 Risultati sperimentali

Come precedentemente detto abbiamo eseguito sia una vagliatura per via secca sia una vagliatura per via umida, in particolar modo abbiamo osservato grosse differenze tra le

due curve granulometriche per quanto riguarda la quantità di fino, infatti per via secca otteniamo un contenuto di fine del 4.46% mentre per via umida si ha un contenuto in fine del 36.71%; questo ribadisce ancora una volta l'importanza del deflocculante. Ai fini della caratterizzazione è stato quindi presa la curva granulometrica ottenuta per via umida.

Tabella 3.1, frazioni granulometriche ottenute per via secca

SET. N.	APERTURA [mm]	TARA [g]	PLS [g]	TRATT. Singolo setaccio(g)
	19	0,00	0	0,00
	9,5	0,00	0	0,00
	4,75	0,00	0	0,00
10	2,000	401,13	435,13	34,00
20	0,850	343,37	369,45	26,08
40	0,425	306,93	342,36	35,43
60	0,250	300,67	397,53	96,86
80	0,180	388,30	511,09	122,79
140	0,106	272,36	333,82	61,46
200	0,075	268,21	289,77	21,56
<b>GROSSOLANO</b>				<b>398,18</b>
FINE				19,12
<b>TOTALE</b>				<b>417,30</b>

Curva granulometrica di tutto il terreno				
SET. N.	TRATT. CUM. [g]	TRATT. CUM. %	PASS. CUM. [g]	PASS. CUM. %
	0	0,00	417,30	100,00
	0	0,00	417,30	100,00
	0	0,00	417,30	100,00
10	34,52	8,27	382,78	91,73
20	60,60	14,52	356,70	85,48
40	96,03	23,01	321,27	76,99
60	192,89	46,22	224,41	53,78
80	315,68	75,65	101,62	24,35
140	377,14	90,38	40,16	9,62
200	398,70	95,54	18,60	4,46
fondo	417,30	100,00	0,00	0,00

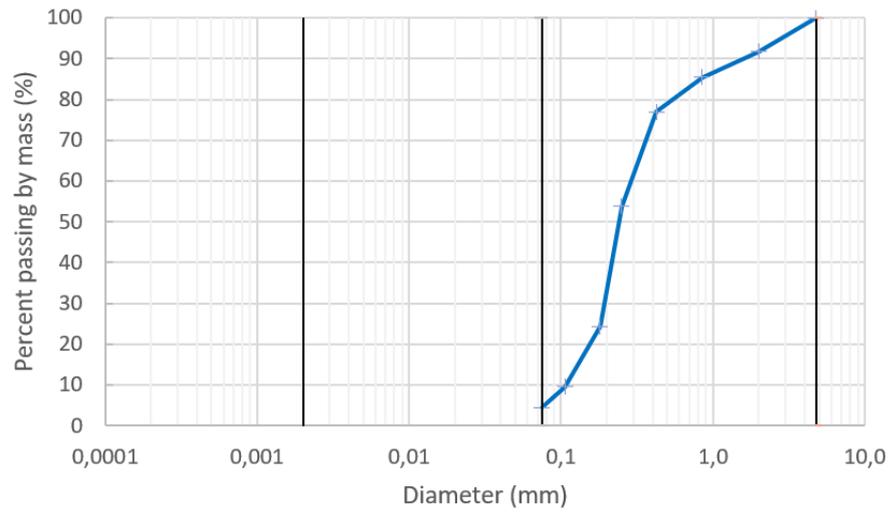


Figura 3.6, Curva granulometrica vagliatura secca

RISULTATI VAGLIATURA VIA UMIDA

Tabella 3.2, frazioni granulometriche ottenute per via umida

SET. N.	APERTURA [mm]	TARA [g]	PLS [g]	TRATT. Singolo setaccio[g]
	19	0,00	0	0,00
	9,5	0,00	0	0,00
	4,75	0,00	0	0,00
10	2,000	12,03	13,37	1,34
20	0,850	12,04	15,28	3,24
40	0,425	12,21	21,61	9,40
60	0,250	12,23	34,20	21,97
80	0,180	12,16	66,21	54,05
140	0,106	12,23	69,25	57,02
200	0,075	12,13	46,43	34,30
<b>GROSSOLANO</b>				<b>181,32</b>
FINE				105,16
<b>TOTALE</b>				<b>286,48</b>

Curva granulometrica di tutto il terreno				
SET.N.	TRATT. CUM. [g]	TRATT. CUM. %	PASS. CUM. [g]	PASS. CUM. %
	0	0,00	286,48	100,00
	0	0,00	286,48	100,00
	0	0,00	286,48	100,00
10	1,34	0,47	285,14	99,53
20	4,58	1,60	281,90	98,40
30	13,98	4,88	272,50	95,12
60	35,95	12,55	250,53	87,45
80	90,00	31,42	196,48	68,58
140	147,02	51,32	139,46	48,68
200	181,32	63,29	105,16	36,71
fondo	286,48	100,00	0,00	0,00

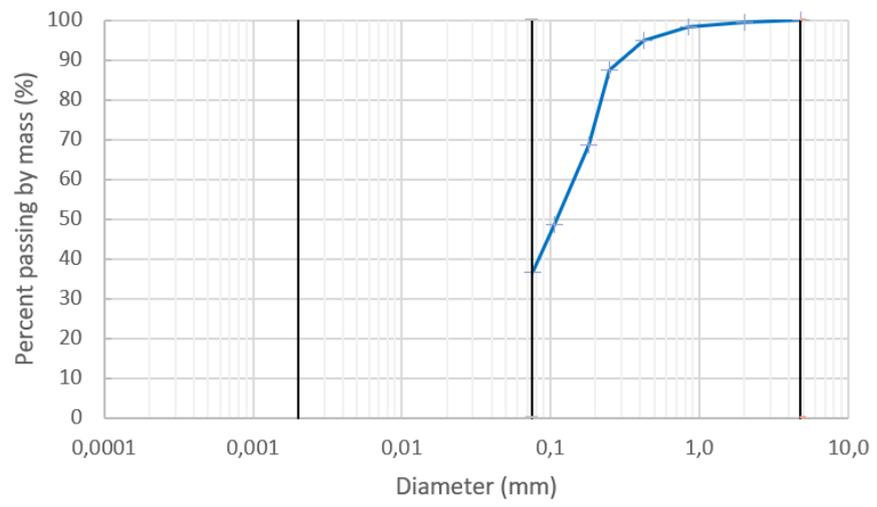


Figura 3.7, Curva granulometrica vagliatura umida

Come già detto in precedenza consideriamo valido il risultato ottenuto tramite la vagliatura per via umida, ottenendo così un terreno con una percentuale di fino del 36,71%, rifacendoci alle tabelle fornite dallo standard, possiamo dunque classificare il terreno come sabbia in quanto la percentuale di sabbia presente nel terreno è preponderante sulle altre componenti (ghiaia e fino), e inoltre sappiamo anche che si ha un quantità di fino maggiore del 12%. Questo implica che, seguendo la procedura indicata (Figura 3.3), per classificare in modo completo il terreno dobbiamo andare ad utilizzare la Carta di Plasticità e dunque determinare il Limite Liquido (LL) e l'Indice di Plasticità (PI). Introduciamo quindi lo standard ASTM D4318 – 17e1 “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index”.

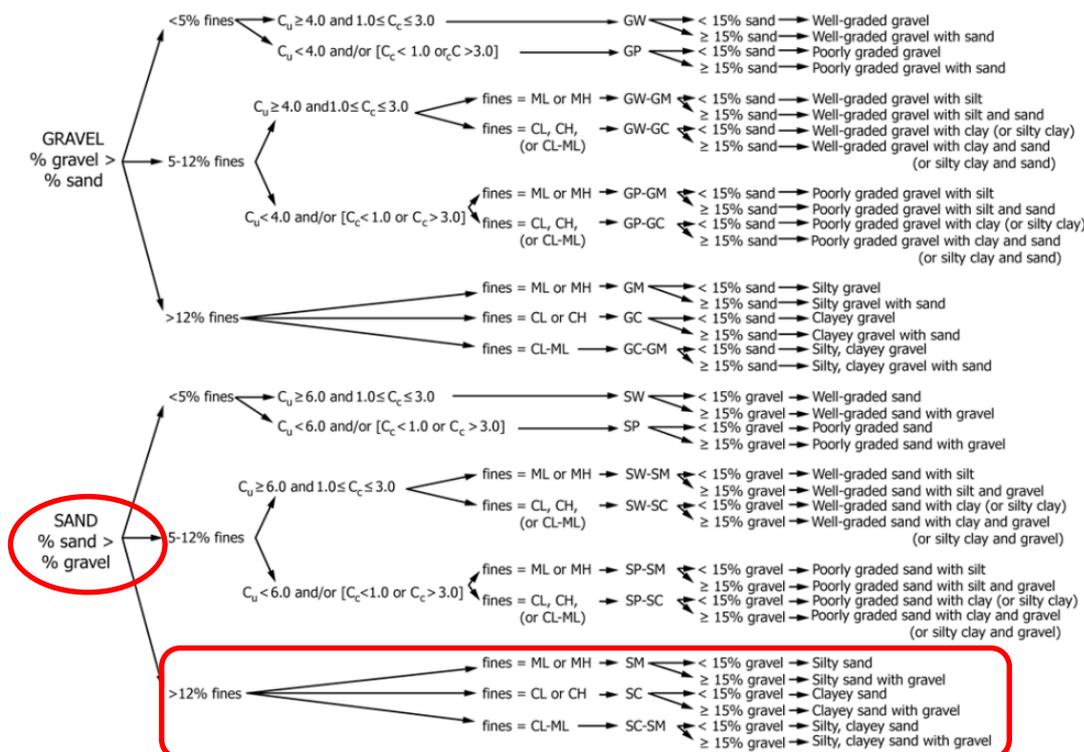


FIG. 3 Flow Chart for Classifying Coarse-Grained Soils (More Than 50 % Retained on No. 200 Sieve)

Figura 3.8

### 3.6 ASTM D4318 – 17e1 “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index”

Questo standard contiene i metodi per la determinazione del limite liquido, limite plastico e indice di plasticità, detti Limiti di Atterberg, attraverso procedure standard, per quanto riguarda la determinazione del limite liquido vengono forniti due metodi: Metodo A detto metodo a punti multipli, e Metodo B detto metodo a punto singolo, il metodo da utilizzare viene indicato all'interno del capitolato e se non specifica si deve usare il Metodo A. Il test per il limite plastico viene eseguito sul materiale utilizzato per il limite liquido e anche in questo caso sono presenti due procedure: Procedura 1 eseguita manualmente e Procedura 2 eseguita con uno strumento apposito.

Tutte le procedure sopra elencate vengono eseguite solamente sulla porzione di terreno passante al setaccio n.40 (425  $\mu\text{m}$ ) (Figura 3.9). Dunque il contributo relativo di questa porzione di terreno alle proprietà del campione nella sua interezza deve essere considerato quando si determinano le proprietà del terreno.

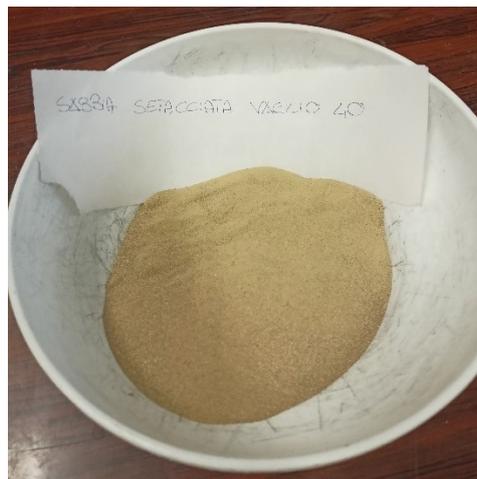


Figura 3.9, frazione passante al setaccio n40

#### 3.6.1 Terminologia

- Limiti di Atterberg: originalmente Alber Atterberg definisce sei “limiti di consistenza”: limite superiore del flusso viscoso, limite liquido, limite di collosità, limite di coesione, limite plastico e limite di ritiro. Nel uso corrente il termine si riferisce solamente al limite liquido e al limite plastico e a volte anche al limite di ritiro.
- Limite Liquido (LL),  $W_L$ : definisce il contenuto d’acqua, in percentuale, per cui il terreno si trova al “limite” tra lo stato semiliquido e quello plastico.
- Limite Plastico (PL),  $W_P$ : definisce il contenuto d’acqua, in percentuale, per cui il terreno si trova al “limite” tra lo stato plastico e quello semisolido.

- Terreno Plastico: un terreno che possiede un range di contenuto d'acqua nel quale risulta plastico e una volta asciugato mantiene la forma data.
- Indice di Plasticità (PI): Il range di contenuto d'acqua nel quale il terreno si comporta in modo plastico. E' la differenza tra li Limite Liquido e il Limite Plastico.

$$IP = LL - LP$$

- Consistenza: la relativa facilità con cui una terra può essere deformata.
- Consistenza relativa  $I_c$ : il rapporto tra Il limite liquido meno il contenuto d'acqua normale e l'indice plastico.

$$I_c = \frac{LL - W}{PI}$$

- Indice di liquidità  $I_L$ : il rapporto tra il contenuto d'acqua normale meno il limite plastico e l'indice di plasticità.

$$I_L = \frac{W - LP}{PI}$$

### 3.6.2 Limite Liquido

#### APPARATO

Al fine della determinazione del Limite Liquido si utilizza il “Cucchiaio di Casagrande” (Figura 3.10), un dispositivo meccanico costituito un coppa in ottone sospesa su un carrello disegnato al fine di controllarne la caduta che avviene su di un blocco di materiale sufficientemente resistente che funge da base del dispositivo. Può essere operato sia manualmente sia attraverso un motore elettrico. Inoltre ai fini dell'utilizzo corretto per tracciare il “solco” si utilizza un utensile in materiale plastico o in metallo non corrodibile il cui design può variare purché vengano mantenute delle dimensioni caratteristiche, può essere presente una tacca per la regolazione dell'altezza di caduta del cucchiaio (Figura 3.11).

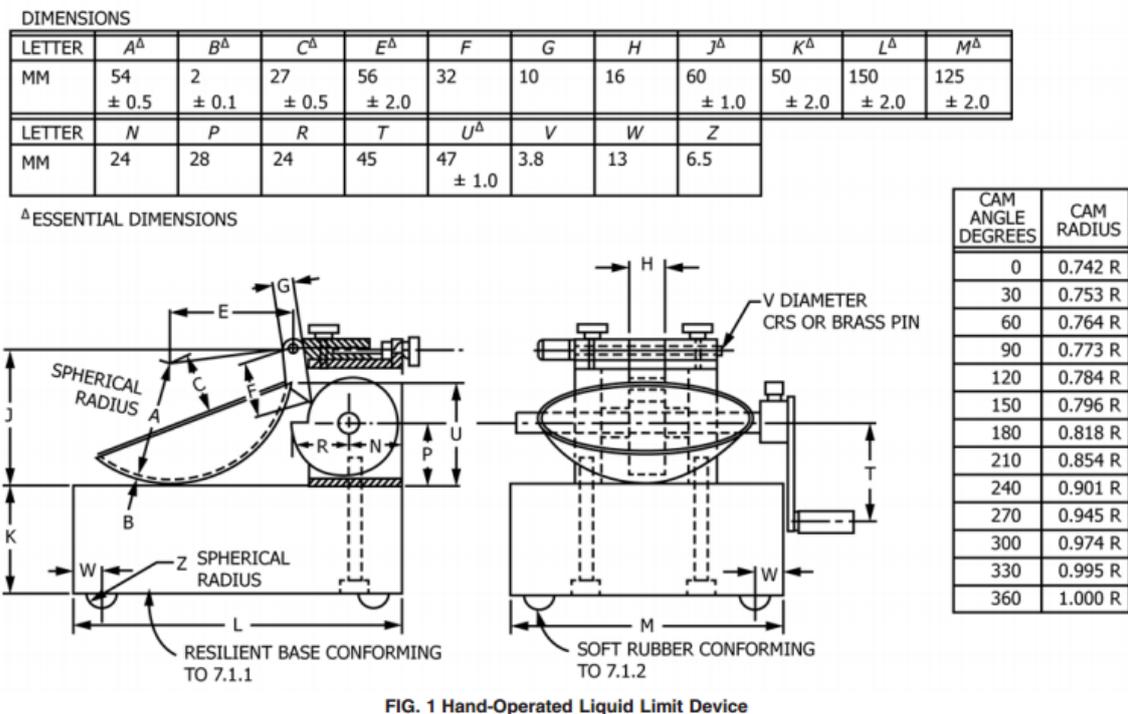


Figura 3.10, Cucchiaio di Casagrande, fonte ASTM D4318 – 17e1

DIMENSIONS

LETTER	A <sup>Δ</sup>	B <sup>Δ</sup>	C <sup>Δ</sup>	D <sup>Δ</sup>	E <sup>Δ</sup>	F <sup>Δ</sup>
MM	2 ± 0.1	11 ± 0.2	40 ± 0.5	8 ± 0.1	50 ± 0.5	2 ± 0.1
LETTER	G	H	J	K <sup>Δ</sup>	L <sup>Δ</sup>	N
MM	10 MINIMUM	13	60	10 ± 0.05	60 DEG ± 1 DEG	20

<sup>Δ</sup> ESSENTIAL DIMENSIONS

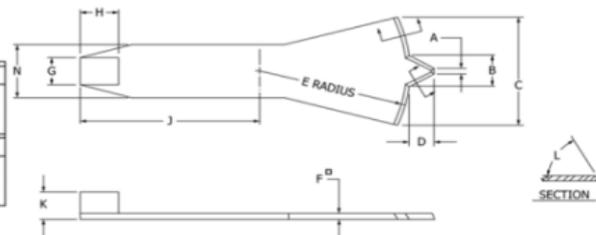


FIG. 3 Grooving Tool (Optional Height Gauge Attached)

Figura 3.11, utensile per la realizzazione del solco, fonte ASTM D4318 – 17e1

### PREPARAZIONE DEL TERRENO

Per prima cosa si procede alla setacciatura del terreno al setaccio n.40 (425  $\mu\text{m}$ ) fino al raccoglimento di almeno 150-200 grammi di frazione passante, questa fase non risulta necessaria se da un'analisi visiva o da prove precedenti si sa già che il trattenuto al setaccio sarebbe minimo. Fatto ciò si procede con l'aggiunta di acqua distillata o demineralizzata su campione ottenuto fino al raggiungimento di una consistenza che si pensa possa richiedere un numero di colpi compreso tra 25 e 30 se si utilizza il metodo A, e tra 20 e 30 se si utilizza il metodo B.

### PROCEDURA PER LA DETERMINAZIONE DEL LIMITE LIQUIDO: METODO A

1. Prelevare una parte del campione ottenuto nella preparazione e usando una spatola posicionarla nella coppa del Cucchiaino di Casagrande fino ad ottenere uno spessore di 10 mm nel punto più profondo e una superficie il più orizzontale possibile. In questa fase sarà molto importante evitare la formazione di bolle d'aria e anche essere il più rapidi possibile; inoltre al fine di mantenere l'umidità del campione inutilizzato bisognerà coprirlo con un panno umido o della pellicola.
2. Formare quindi il solco tramite lo strumento apposito formando una linea a continua che unisce il punto più alto a quello più basso del bordo della coppa. Quando si procede al taglio, mantenere la punta dello strumento a contatto con la superficie in modo perpendicolare e tracciare un arco, se risulta necessario eseguire più passaggi dello strumento fino ad ottenere un solco ben delineato. (Figura 3.12)
3. Verificare che non siano presenti granuli di terreno al disotto della coppa o sulla base della strumentazione, quindi sollevare e abbassare la coppa attraverso la manovella ad una velocità tra 1.9 e 2.1 colpi per secondo finché e due metà del terreno non entrano in contatto alla base del solco per una lunghezza di 13mm (1/2 pollice). Si controlla nuovamente che nessuna bolla d'aria abbia causato il contatto prematuro; se il contatto è stato causato da una bolla allora sarà

- necessario ricoprire il solco e ripetere la procedura, se il terreno ai lati scivola sulle superfici bisognerà ripetere la prova ad un contenuto d'acqua maggiore.
4. Prendere quindi nota del numero di colpi  $N$  necessari a richiudere il solco; prelevare quindi una parte del terreno dalla coppa con l'uso di una spatola e posizionarlo all'interno di un contenitore di massa nota e tapparlo.
  5. Riposizionare il terreno rimasto nella coppa all'interno della ciotola contenete il campione ottenuto nella preparazione, rimescolare il tutto aggiungendo acqua distillata per incrementare il contenuto d'acqua e quindi diminuire il numero di colpi necessario per richiudere il solco.
  6. Ripetere i punti 1-2-3-4-5 per almeno altre due volte con contenuti d'acqua sempre maggiore. Almeno uno dei test deve avere un numero di colpi  $N$  compreso tra 25 e 30, uno tra 20 e 30 e uno tra 15 e 25.
  7. Determinare il contenuto d'acqua  $w^n$  per ogni test tramite il campione prelevato alla fine di ogni prova. (Figura 3.13)

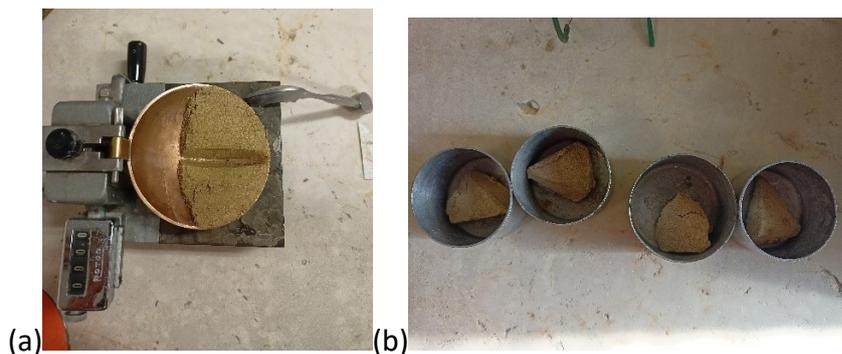


Figura 3.12, dettaglio del solco (a). Figura 3.13, campioni post essiccazione (b).

#### CALCOLO DEL LIMITE LIQUIDO: METODO A

Inserire la relazione tra il contenuto d'acqua  $w^n$  e il corrispondente numero di colpi  $N$  in un grafico semilogaritmico con il contenuto d'acqua alle ordinate e il numero di colpi alle ascisse in scala logaritmica. Tracciare quindi una linea che interpola i tre o più punti così ottenuti. Il Limite Liquido sarà il contenuto d'acqua che corrisponde ad un numero di colpi pari a 25.

#### PROCEDURA PER LA DETERMINAZIONE DEL LIMITE LIQUIDO: METODO B

Si procede come nei punti da 1 a 4 della procedura descritta nel Metodo A eccetto che per il numero di colpi richiesto che deve essere tra 20 e 30. Se sono necessari più di 30 colpi o

meno di 20 colpi bisognerà aggiustare il contenuto d'acqua, diminuendolo nel primo caso o incrementandolo nel secondo.

Immediatamente dopo avere rimosso il campione per il contenuto d'acqua, riposizionare il terreno nella coppa e ripetere nuovamente i punti da 2 a 4 senza però prelevare il campione, se alla seconda prova si ottiene lo stesso numero di colpi della prima o si ha una differenza di non più di 2 colpi prelevare un secondo campione per la determinazione del contenuto d'acqua come descritto del punto 4. Se la differenza tra la prima e la seconda prova è maggiore di 2 colpi allora rimescolare tutto il terreno e ripetere la procedura fino all'ottenimento di due risultati consecutivi con una differenza di colpi pari o inferiore a 2; determinarne quindi il contenuto d'acqua.

Si determina quindi il Limite Liquido LL del terreno utilizzando una delle due formule qui riportate:  $LL_n = w_n * \left(\frac{N_n}{25}\right)^{0.121}$  oppure  $LL_n = w_n * k$  con k coefficiente che viene fornito dalla seguente tabella.

Tabella 3.3, fonte ASTM D4318 – 17e1

N (Number of Drops)	k (Factor for Liquid Limit)
20	0.973
21	0.979
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

Mentre :

- $LL_n$  = limite liquido per la prova n espresso in %
- $N_n$  = numero di colpi che causano la chiusura del solco per la prova n
- $w_n$  = contenuto d'acqua espresso in %

### 3.6.3 Limite Plastico

#### PREPARAZIONE PER IL LIMITE PLASTICO

Selezionare almeno 20 grammi del terreno utilizzato per la determinazione del limite liquido o del terreno setacciato al setaccio n.40 (425  $\mu\text{m}$ ). Nel caso in cui si usi il terreno del limite liquido ridurre il contenuto d'acqua del materiale fino ad una consistenza che non attacchi alle mani andandolo a mescolare sul piano di lavoro, per accelerare tale processo si può andare ad utilizzare un phon o andare ad esporre il terreno alla luce solare. Mentre se si parte dal terreno setacciato sarà sufficiente aggiungere acqua distillata fino al raggiungimento della consistenza sopra descritta.

#### PROCEDURA PER LA DETERMINAZIONE DEL LIMITE PLASTICO

Dal terreno ottenuto nella preparazione prelevare una porzione di 1.5-2 grammi, da qui possono essere eseguite due procedure : la Procedura 1 è quella effettuata manualmente mentre la Procedura 2 prevede l'utilizzo di uno strumento apposito per la "rollatura".

##### PROCEDURA 1

1. Rollare la porzione prelevata tra il palmo o le dita e il piano di lavoro con una pressione sufficiente da modellare la massa fino alla forma di uno spaghetti di diametro uniforme nella sua lunghezza, bisognerà poi ridurre ulteriormente la sezione fino ad un diametro di 32mm (1/8 di pollice) non impiegando più di 2 minuti. La pressione che dovrà essere esercitata varia a seconda del terreno e solitamente aumenta con l'aumentare della plasticità del terreno.
2. Quando il diametro raggiunge i 3.2 mm rompere lo spaghetti in più parti, ricompattare le parti premendole con i polpastrelli fino a ad una forma ellissoidale e rollare nuovamente.
3. Ripetere il punto 2 fino non è più possibile raggiungere un diametro di 3.2 mm, nel caso in cui il materiale si rompa durante la formazione dello spaghetti proseguire comunque andando a lavorare ogni parte singolarmente fino a 3.2 mm. È importante che l'operatore non cambi ne la pressione applicata durante la prova ne la velocità che usa per rollare.
4. Raccogliere le porzioni prodotte e posizionarne in un contenitore di massa nota e chiuderlo immediatamente.
5. Selezionare un'altra porzione sempre d 1.5-2 grammi e ripetere i punti da 1 a 4 fino a quando nel contenitore non ci saranno almeno 6 grammi di terreno.
6. Ripetere i punti da 1 a 5 posizionando il terreno in un secondo contenitore sempre di massa nota.
7. Determinare il contenuto d'acqua del terreno in entrambi i contenitori.

## PROCEDURA 2

1. Attaccare un foglio di carta sia sulla piastra superiore che su quella inferiore dello strumento per la determinazione del limite liquido.
2. Posizionare la porzione di terreno prelevata nel punto centrale della piastra inferiore, posizionare quindi la piastra superiore a contatto con il campione e simultaneamente applicare una forza verso il basso e uno scorrimento avanti e indietro affinché la piastra superiore entri in contatto con le rotaie entro due minuti, se alla fine di questo processo il campione è entrato in contatto con le rotaie laterali ripetere la prova con un quantitativo minore di terreno.
3. Ripetere i punti da 2 a 7 della Procedura 1.

## CALCOLO DEL LIMITE PLASTICO

Noti i contenuti d'acqua del terreno nei due contenitori farne la media e arrotondarne il valore al numero intero più vicino. Questo valore è il Limite Plastico PL.

### 3.6.4 Indice di plasticità

L'Indice di Plasticità, PI, viene calcolato come :  $PI = LL - PL$  , dove LL è il limite liquido espresso come numero intero e PL è il limite plastico.

Se il limite liquido o il limite plastico non possono essere determinati, o il limite plastico è pari o maggiore al limite liquido allora il terreno è definito come non plastico, NP.

### 3.7 Risultati sperimentali

Per quanto riguarda la determinazione del limite liquido, in quanto non era specificata la modalità di esecuzione, seguendo lo standard prima descritto, abbiamo optato per il Metodo A. Sono state eseguite 4 prove a diversi contenuti d'acqua, dove, probabilmente per un errore di esecuzione, la prima prova ha fornito un valore fortemente discorde da gli altri (24 colpi con un contenuto d'acqua del 19.6%), è stata quindi considerata non rappresentativa e non utilizzata nel calcolo. Come poi riportato in tabella si determinato un limite liquido pari al 17.6% (Figura 3.14).

È risultato invece impossibile determinare il limite plastico del terreno in quanto si è dimostrato privo di coesione, questo ha comportato la classificazione del terreno come Non Plastico ,NP, e dunque è stato impossibile determinare l'indice di plasticità, PI.

Tabella 3.4

05/12/2023	LIMITE LIQUIDO			
N. colpi	24	12	26	21
Contenitore	118	161	128	8
Tara (g)	30,72	32,73	29,91	28,63
P <sub>tot1</sub> (g)	45,96	47,64	42,87	45,95
P <sub>tot2</sub> (g)	43,46	45,10	41,02	43,14
P <sub>w</sub> (g)	2,50	2,54	1,85	2,81
P <sub>s</sub> (g)	12,74	12,37	11,11	14,51
<b>W (%)</b>	<b>19,6</b>	<b>20,5</b>	<b>16,7</b>	<b>19,4</b>

LL (%)	PL (%)	PI (%)
17,6	#DIV/0!	#DIV/0!

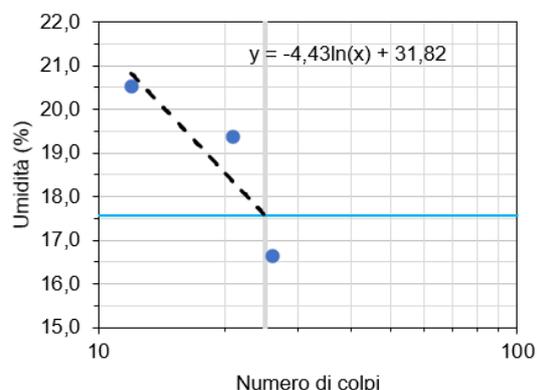


Figura 3.14

Possiamo quindi terminare la classificazione del terreno inserendo all'interno della Carta di Plasticità (Figura 3.15) i risulti sopra descritti (IP=0, LL=17.6), determinando quindi che la frazione fine è composta da Limo, ML non essendo organico.

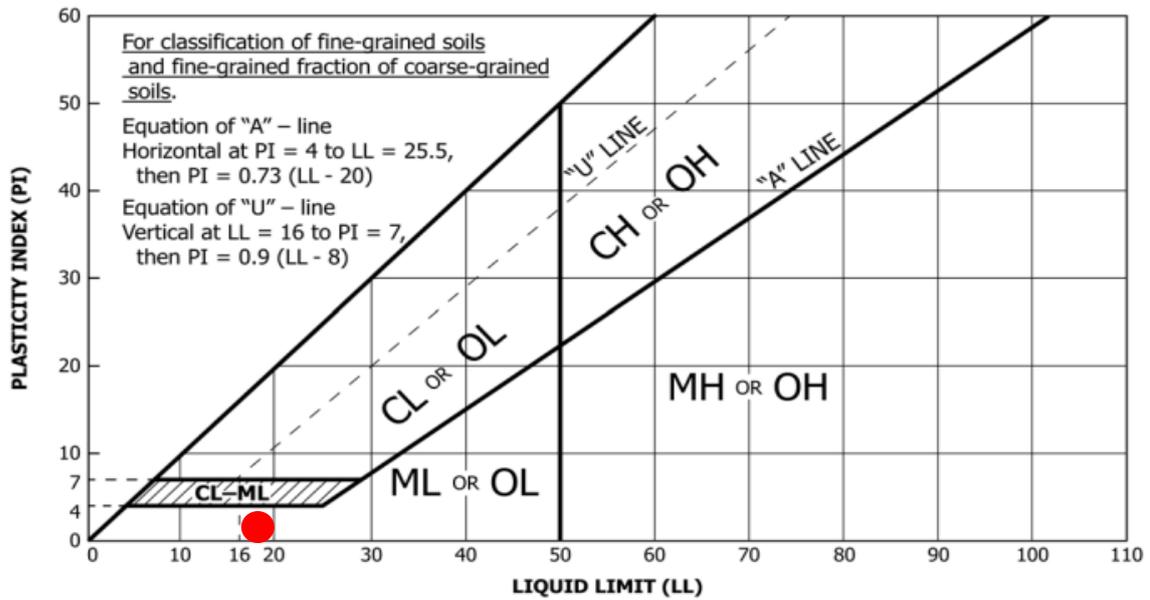


FIG. 4 Plasticity Chart

Figura 3.15

Dunque riprendendo lo standard ASTM D2487 – 17 definiamo il terreno come una **Sabbia Limosa, SM** (Tabella 3.16).

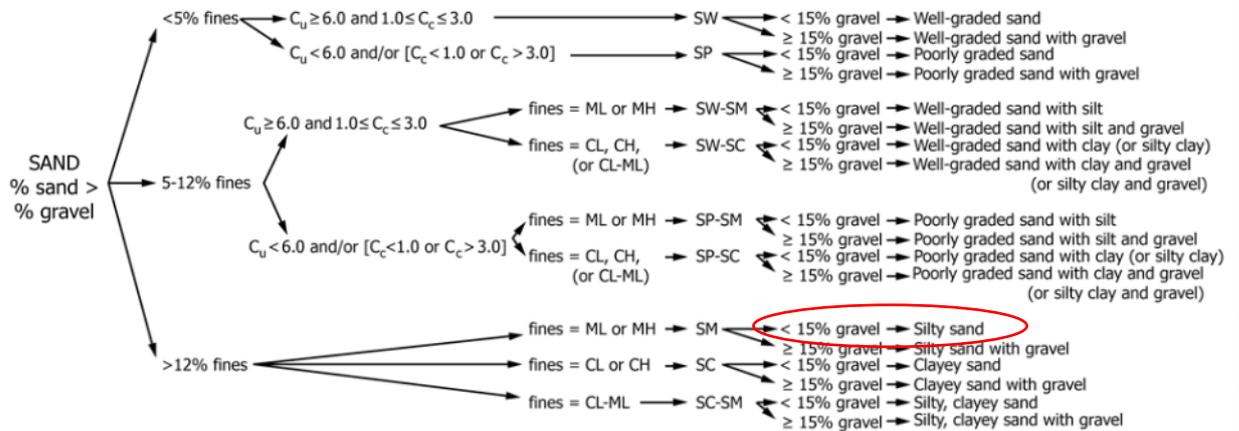


Figura 3.16

## 4. Contenuto d'acqua ottimo

Il contenuto ottimo d'acqua come dice la parola stessa non è altro che il contenuto d'acqua che permette di raggiungere la massima compattazione di un terreno per un prefissato sforzo di compattazione, ossia di ottenere la massima densità secca. Tale informazione risulta di fondamentale importanza in tutte quelle situazioni in cui il terreno deve garantire una prestazione ben definita ad esempio nei rilevati stradali dove il terreno viene compattato sia per prevenire cedimenti che per evitarne la rottura.

Non a caso la procedura che viene utilizzata per determinare l'ottimo d'acqua nasce per applicazioni stradali, ossia la prova "proctor", descritta nello standard ASTM D698 – 12 "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort".

### 4.1 ASTM D698 – 12 "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort"

Questa procedura di compattazione in laboratorio nasce in una versione molto simile negli anni 30' per mano di R. R. Proctor, che non prevedeva una caduta libera del maglio ma bensì prevedeva la spinta di esso, al fine di determinare la relazione tra contenuto d'acqua e compattabilità di un terreno. Originariamente tale relazione veniva utilizzata con lo scopo di ottimizzare la compattazione di terreni di riporto come rilevati stradali, fondazioni o sbancamenti, oggi giorno la procedura viene utilizzata anche per la produzione di campioni che poi verranno utilizzati in altre procedure come nel caso di questa tesi.

La procedura può essere eseguita solamente su terreni con un trattenuto pari o inferiore al 30% al setaccio con maglie di 19.00 mm e non deve essere eseguita su un terreno che ha già subito una procedura di compattazione. In particolare esistono tre metodologie per l'esecuzione della prova, e se nel capitolato non è specificata quale usare la si sceglie in funzione della granulometria del terreno.

- METODO A: fustella di diametro 10.16 mm, il materiale usato è il passante al setaccio n.4 (4.75mm), 3 strati, 25 colpi per strato.
- METODO B: fustella di diametro 10.16 mm, il materiale usato è il passante al setaccio da 9.5 mm, 3 strati, 25 colpi per strato.
- METODO C: fustella di diametro 15.24 mm, il materiale usato è il passante al setaccio da 19.00 mm, 3 strati, 56 colpi per strato.

Tutte e tre le metodologie sono accumulate dall'energia totale trasmessa, che nella procedura "standard" è pari a  $600 \text{ kNm}/\text{m}^3$ , ed ottenuta facendo cadere da un'altezza di 305 mm un maglio dal peso di 24.5 N.

### 4.1.1 Terminologia

- Sforzo standard: lo sforzo di compattazione applicato dall'apparato durante la prova, il suo valore esatto è: a  $600 \text{ kNm/m}^3$ .
- Massimo peso secco standard,  $\gamma_{d,max}$ : è il valore massimo espresso dalla curva di compattazione usando uno sforzo standard, viene espresso in  $\text{kN/m}^3$ .
- Contenuto ottimo d'acqua standard,  $w_{opt}$ : espresso in %, è il contenuto d'acqua che ci permette di ottenere un campione con il "massimo peso secco standard".
- Frazione *oversize*,  $P_C$ : la porzione di terreno che non può essere usata per l'esecuzione della prova, dipende dal metodo usato (A, B o C).
- Frazione testata,  $P_F$ : la porzione del terreno utilizzata per l'esecuzione della prova, anche essa dipende dalla metodologia utilizzata.

### 4.1.2 Attrezzatura

Come abbiamo accennato precedentemente al fine di standardizzare la procedura la prova deve essere eseguita utilizzando fustelle cilindriche le cui dimensioni dipendono dalla metodologia utilizzata (A, B o C). Le pareti della fustella devono essere solide o separabili, dove tale separazione consiste o in due sezioni semicircolari o tramite il sezionamento orizzontale della fustella, dove gli elementi possono essere bloccati tra di loro a formare un cilindro che rispetta le dimensioni richieste (Figura 4.1). Ogni fustella deve avere una piastra di base e un collare di estensione, entrambi realizzati in metallo rigido e progettati in modo che siano facilmente fissabili e smontabili (Figura 4.2). Il collare deve avere un'altezza di almeno 51 mm e può presentare una svasatura in testa per facilitare l'inserimento del terreno, in tal caso deve comunque esserci una sezione dritta di almeno 19 mm. Indipendentemente dal tipo di collare è importante che questo sia allineato con l'interno della fustella.

As an option to the full length stud, a 2 1/2" x 3/8" stud may be used. Then as an alternative construction, the collar may be held down with a slotted bracket attached to the collar and a pin in the mold.

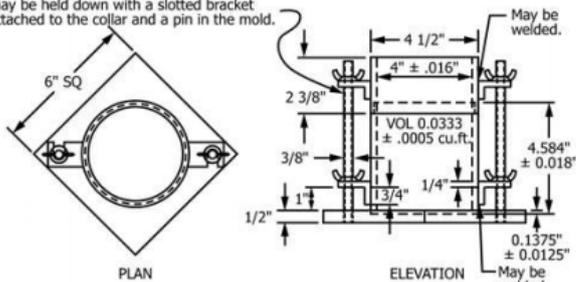


FIG. 1 4.0-in. Cylindrical Mold

As an option to the full length stud, a 2 1/2" x 3/8" stud may be used. Then as an alternative construction, the collar may be held down with a slotted bracket attached to the collar and a pin in the mold.

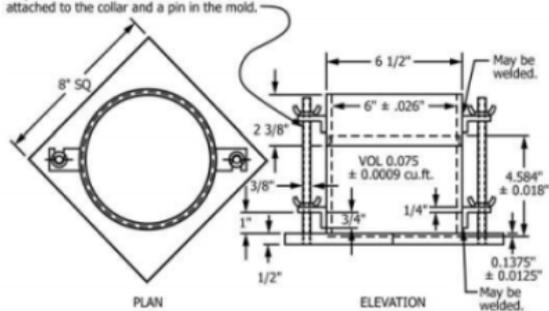


FIG. 2 6.0-in. Cylindrical Mold

TABLE 1 Metric Equivalents for Figs. 1 and 2

in.	mm
0.016	0.41
0.026	0.66
0.032	0.81
0.028	0.71
1/2	12.70
2 1/2	63.50
2 3/4	66.70
4	101.60
4 1/2	114.30
4.584	116.43
4 3/4	120.60
6	152.40
6 1/2	165.10
6 3/4	168.30
6 3/4	171.40
8 1/4	209.60
ft <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>
1/30 (0.0333)	943
0.0005	14
(0.0750)	2,124
0.0011	31

Figura 4.1, fonte ASTM D698 – 12

Un altro elemento è il maglio (Figura 4.3) che può essere operato manualmente o meccanicamente, in entrambi i casi il maglio deve cadere da un'altezza di 12.0 in (304.8 mm) dalla superficie del campione. Il peso del maglio è di 5.5 lb (24.47 N), nel caso di maglio meccanico ci possono essere variazioni nella massa, in ogni caso la superficie che impatta con il terreno deve essere piana e circolare con un diametro di 2.0 in (50.8 mm). Nel caso in cui in seguito all'utilizzo il maglio si deformi o si usuri deve essere sostituito. Al fine di un utilizzo corretto del maglio manuale quest'ultimo deve essere dotato di una guida che abbia una tolleranza sufficiente da non rallentarne la caduta, deve essere dotata di 4 fori di ventilazione alla base e 4 in testa di diametro minimo di 9.5 mm.

Un altro componente necessario è l'estrusore idraulico (Figura 4.4), che ci permetterà di estrarre i campioni compattati dalla fustella. Infatti la metodologia della prova Proctor viene utilizzata anche per la produzione di campioni cilindrici da usare in altre prove e dunque il campione va rimosso mantenendolo intatto. Infine, per assicurare il mantenimento delle condizioni standard tra diverse prove è importante che la strumentazione sia soggetta a calibrazione con cadenza annuale e in ogni caso in seguito a riparazioni dell'apparato.

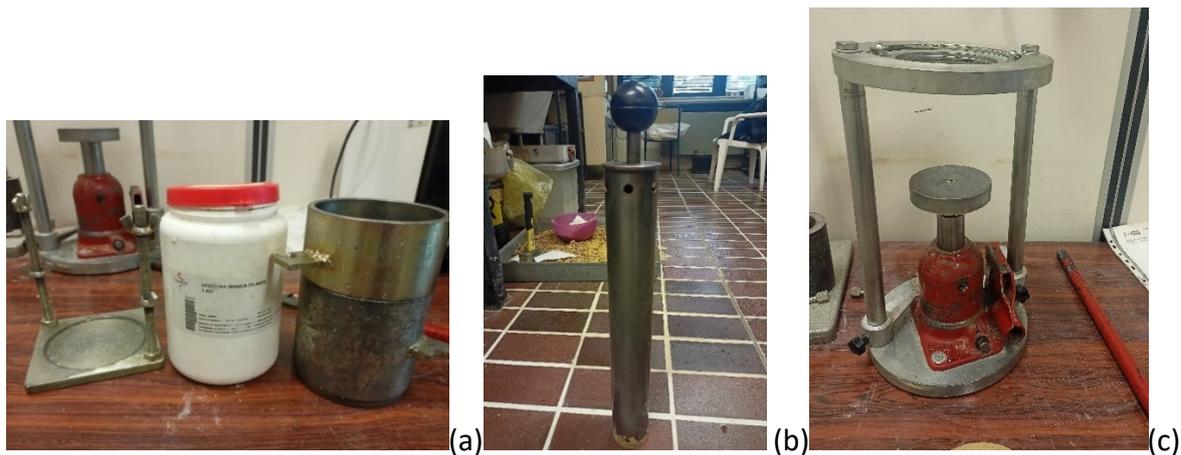


Figura 4.2, fustella (a). Figura 4.3, maglio (b). Figura 4.4, estrattore (c).

### 4.1.3 Procedura

Per prima cosa bisognerà, sulla base dell'esperienza, fare una previsione su quello che potrebbe essere il contenuto d'ottimo d'acqua e definire 4 contenuti d'acqua, due maggiori dell'ottimo e due minori dell'ottimo, con uno scarto tra di loro del 2% considerando anche il valore ottimo.

Prelevare ,dalla frazione granulometrica prevista dalla metodologia, 2.3 kg di terreno se si sta utilizzando il Metodo A/B o 5.9 kg se si utilizza il Metodo C, e in funzione del contenuto d'acqua del terreno aggiungere o eliminare acqua per ottenere uno dei valori sopra descritti. Nel caso in cui si debba aggiungere acqua lo si fa tramite un pulverizzatore, mentre per eliminarla o la si può lasciar asciugare a temperatura ambiente o si può utilizzare un phon senza però far superare al campione i 60°C. In entrambi i casi è importante mescolare il terreno frequentemente al fine di uniformare il contenuto d'acqua, infine posizionare il tutto in un contenitore ermetico.

Assemblare quindi l'apparato in funzione della tipologia di fustella assicurandosi che poggi su una base uniforme e rigida, pesare l'apparato senza il collare e infine montarlo.

Procedere alla compattazione (Figura 4.7), che deve avvenire in 3 strati che a fine prova dovranno essere approssimativamente dello stesso spessore, per ottenere ogni strato posizionare il terreno sciolto nella fustella in modo uniforme e costiparlo leggermente. Compattare quindi ogni strato con 25 colpi per la fustella da 4 pollici o con 56 colpi nel caso della fustella da 6 pollici. Nel caso in cui si utilizzi un maglio manuale bisognerà prestare attenzione ad evitare sollevamenti della guida durante la caduta del maglio e essa va mantenuta perpendicolare alla fustella con un angolo massimo di 5°. In ogni caso i colpi dovranno essere eseguiti con una velocità di circa 25 colpi/minuto e il pattern da

utilizzare dipende anche in questo caso dalla dimensione della fustella ed è descritto dalle figure sottostanti.

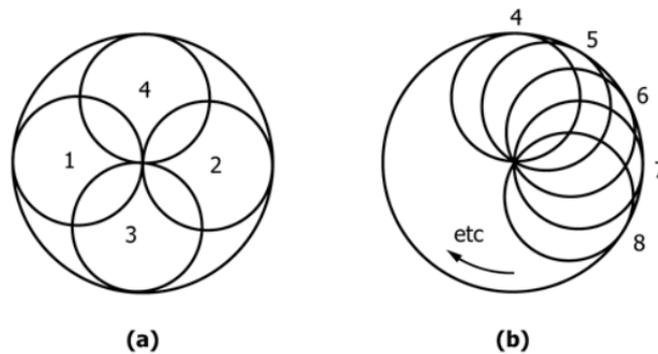


Figura 4.5, pattern fustella da 4", ASTM D698 – 12

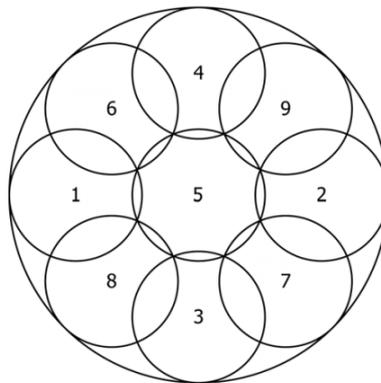


Figura 4.6, pattern fustella da 6", ASTM D698 – 12

Una volta aver compattato l'ultimo strato rimuovere il collare e rifilare il terreno con un coltello fino a portarlo al bordo della fustella nel caso in cui si creino dei buchi sulla superficie riempirli con la terra appena rimossa premendo con le dita (Figura 4.8), infine determinare la massa del campione compreso di fustella e base, rimuovere quindi una porzione del campione o dal terreno rifilato e posizionarlo in un contenitore di massa nota, pesare nuovamente, e posizionarlo in forno a 110°C al fine di determinare il contenuto d'acqua.

Eeguire lo stesso procedimento per i restanti contenuti d'acqua e verificare che l'andamento del peso dei campioni ottenuti rispetti la previsione fatta inizialmente sul contenuto ottimo d'acqua, nel caso in cui la previsione non fosse rispettata bisognerà eseguire altre prove fino ad ottenere 2 campioni con un contenuto d'acqua minore dell'ottimo e 2 con un contenuto maggiore.

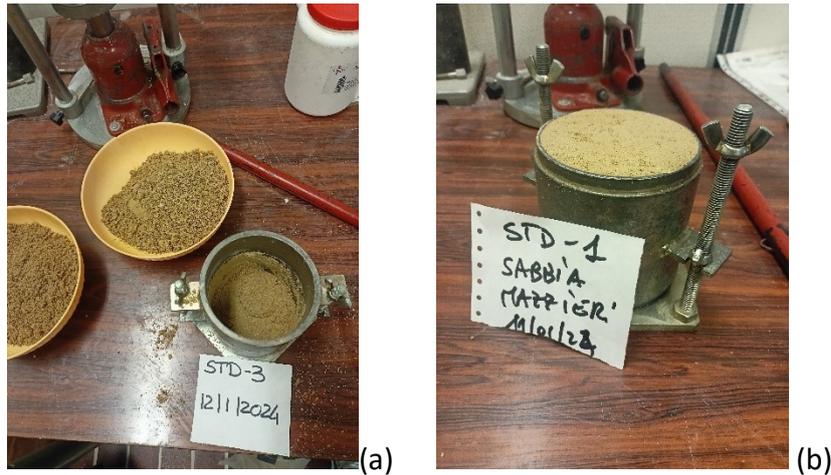


Figura 4.7, compattazione strati (a).

Figura 4.8, campione post compattazione e rifilatura (b).

#### 4.1.4 Ottenimento curva di compattazione

- Al fine di tracciare la curva di compattazione necessitiamo per ogni campione di:
- CONTENUTO D'ACQUA "w": ottenuto tramite il campione prelevato a fine compattazione;
- MASSA DEL CAMPIONE "M": massa del campione ottenuto tramite la compattazione;
- VOLUME DELLA FUSTELLA "V": è standard ed è in funzione della fustella usata;
- DENSITA' UMIDA:  $\rho_m = \frac{M}{V}$  ;
- DENSITA' SECCA:  $\rho_d = \rho_m / (1 + \frac{w}{100})$ ;
- PESO SECCO PER UNITA' DI VOLUME:  $\gamma_d = K \times \rho_d$  dove K dipende dall'unità di misura utilizzata per la densità secca, 9.8066 per g/cm<sup>3</sup> o 0.0098066 per kg/m<sup>3</sup>.

Noti quindi il contenuto d'acqua e i peso di volume secco di ogni campione si possono inserire i valori di ognuno di essi in un grafico che ha come ordinata il contenuto d'acqua "w" e in ascissa l'unità di peso secco " $\gamma_d$ ", tracciando la curva che interpola i punti così inseriti si ottiene la Curva di Compattazione, l'Ottimo d'acqua può essere quindi ottenuto graficamente e corrisponderà all'apice della curva di compattazione.

## 4.2 Risultati sperimentali

Per quanto riguarda questa tesi, in vista anche della produzione di campioni per la prova di permeabilità che vedremo nel prossimo capitolo, abbiamo optato per il Metodo A ossia è stata utilizzata la fustella da 4 pollici, con 3 strati ognuno compattato da 25 colpi e per quanto riguarda la frazione utilizzata, avendo il terreno un diametro massimo dei granuli

inferiore a 4.75 mm, abbiamo optato per l'utilizzo di quest'ultimo nella sua interezza senza vagliarlo.

Sono state realizzate 5 prove con i seguenti contenuti d'acqua: STD-1: 14.93%, STD-2: 19.13%, STD-3: 9.94%; STD-4: 18.01% e STD-5: 16.94% (Tabella 4.1).

Tali prove ci hanno portato a determinare un **contenuto d'acqua ottimo del 13.6%** a cui corrisponde un **peso secco  $\gamma_d = 17.6 \text{ kN/m}^3$**  (Figura 4.9).

Tabella 4.1

	<b>STD-1</b>	<b>STD-2</b>	<b>STD-3</b>	<b>STD-4</b>	<b>STD-5</b>
PLU (g)	90,94	68,88	67,54	89,96	74,02
PLS (g)	82,94	62,53	64,35	80,75	67,63
TARA (g)	29,35	29,33	32,26	29,60	29,91
<b>W (%)</b>	<b>14,93%</b>	<b>19,13%</b>	<b>9,94%</b>	<b>18,01%</b>	<b>16,94%</b>
Diam (cm)	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
H (cm)	11,64	11,64	11,64	11,64	11,64
Vol (cm <sup>3</sup> )	943,69	943,69	943,69	943,69	943,69
Terr+fust (g)	4915,63	4797,91	4770,69	4851,21	4856,36
Fustella (g)	2975,29	2975,82	2977,06	2976,34	2976,09
P umido (g)	1940,34	1822,09	1793,63	1874,87	1880,27
P secco (g)	1688,31	1529,54	1631,45	1588,79	1607,88
$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,06	1,93	1,90	1,99	1,99
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20,16	18,94	18,64	19,48	19,54
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,79	1,62	1,73	1,68	1,70
<b><math>\gamma_d</math> (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>17,54</b>	<b>15,89</b>	<b>16,95</b>	<b>16,51</b>	<b>16,71</b>

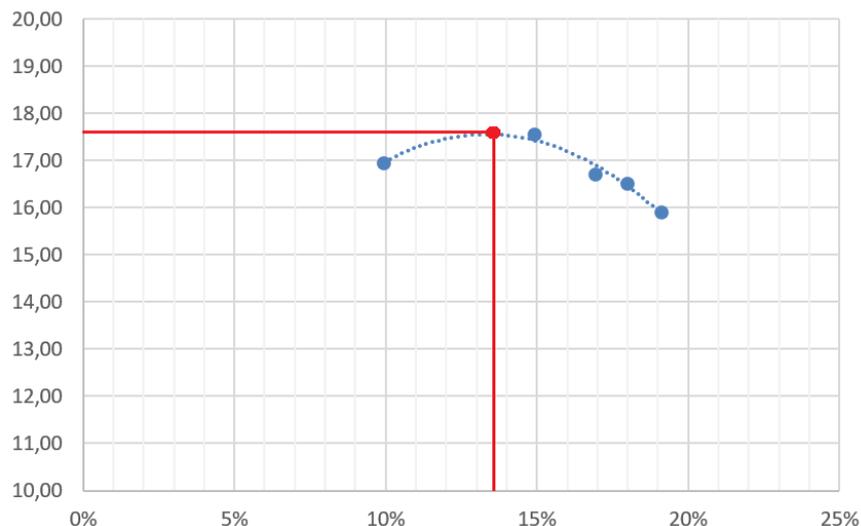


Figura 4.9, equazione utilizzata:  $y = -507,2x^2 + 135,38x + 8,5226$ .

## 5. Prova di permeabilità

Le prove di permeabilità hanno lo scopo di determinare il coefficiente di permeabilità del terreno detta anche conducibilità idraulica “K”, ossia ottenere parametro della velocità con cui un fluido, in questo caso l’acqua, attraversa il terreno. Ovviamente eseguendo la prova in laboratorio il risultato ottenuto fornisce solamente un’indicazione, soprattutto a causa di possibili caratteristiche macro-strutturali dovute a difetti di compattazione o di estrazione del campione.

Per la prova di permeabilità è stato usato un permeametro a pareti flessibili (Figura 5.1) ed è stata eseguita su due provini prodotti quando abbiamo determinato l’ottimo d’acqua, in particolare il provino STD-1 (14.93%) e STD-5 (16.94%), dove il primo, avendo un contenuto d’acqua molto vicino all’ottimo, verrà utilizzato per determinare la conducibilità idraulica all’ottimo, mentre il secondo per determinarla al ramo wet.

### 5.1 Permeametro a pareti flessibili

Questa attrezzatura di laboratorio ci permette di determinare la permeabilità di un terreno per via diretta attraverso l’applicazione di un gradiente idraulico alle due estremità del provino e la misurazione del flusso idraulico attraverso il provino viene effettuata tramite due burette che misurano i volumi entranti ed uscenti dal provino.

L’apparato è composto da una cella cilindrica di materiale acrilico e tale cella è serrata da due blocchi di alluminio dove in ognuno di essi un circuito idraulico permette l’ingresso e la fuoriuscita dell’acqua dal campione. Ogni circuito risulta collegato a una buretta graduata che permette la misurazione del flusso idraulico, all’interno di ogni buretta ne è presente una più piccola per effettuare misurazioni più precise. Per quanto riguarda il gradiente idraulico è ottenuto attraverso una differenza di pressurizzazione tra il circuito di entrata e quello di uscita. Andiamo a vedere nel dettaglio l’esecuzione della prova.



Figura 5.1, permeametro montato

### 5.1.1 Preparazione e posizionamento del campione nella cella

Una volta estratto, tramite l'utilizzo di un estrattore idraulico, il provino dalla fustella questo deve essere posto tra due pietre porose, su cui è stata applicata precedentemente della carta filtro, e inserito in una guaina siliconica che aderirà alle pareti al fine di evitare percorsi preferenziali dell'acqua durante la prova, per l'applicazione di tale guaina si va ad utilizzare una guida che dilata la guaina per poi rilasciarla una volta posizionata. L'utilizzo di tale guaina implica che il campione sia sufficientemente coerente altrimenti potrebbe essere disturbato durante la preparazione, in tal caso bisognerà ricorrere all'utilizzo del permeametro a pareti rigide, che però non risulta altrettanto affidabile in quanto non riesce a garantire l'assenza di formazione di percorsi preferenziali lungo lo spazio compreso tra il campione e le pareti dello strumento.



Figura 5.2, provino estratto



Figura 5.3, provino avvolto dalla guaina

Prima di poter posizionare il campione all'interno della cella è necessario procedere alla saturazione dei circuiti, questo può essere fatto saturando il circuito di ingresso e quello

della cella separatamente o mettendoli in collegamento e saturandoli contemporaneamente (Figura 5.4).

Si procede quindi al posizionamento del campione sul blocco di base facendo aderire la guaina anche su di essa, e fare lo stesso per il blocco di testa collegando in questo caso il circuito d'uscita (Figura 5.5).

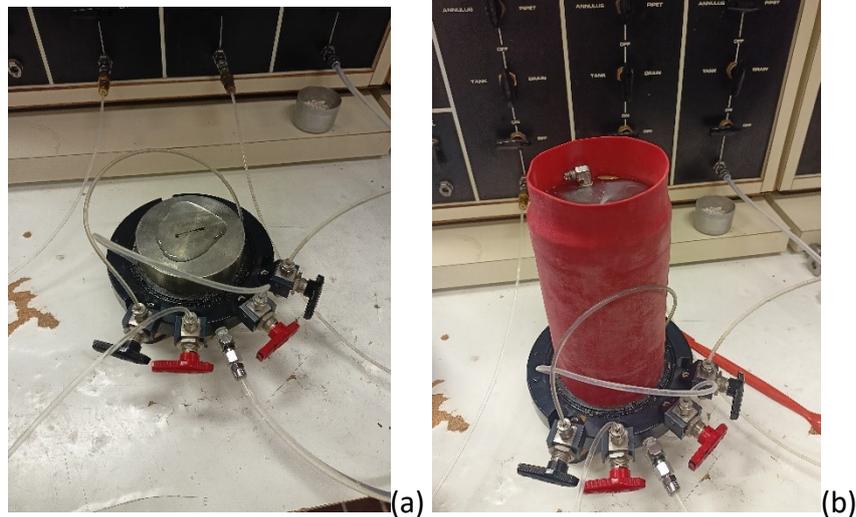


Figura 5.4, saturazione dei circuiti (a).

Figura 5.5, posizionamento della guaina sul blocco di base e di testa (b).

Fatto ciò, dopo aver accertato il corretto posizionamento delle guarnizioni si posiziona il cilindro in acrilico della cella e si serra il tutto con gli appositi sostegni metallici.

### 5.1.2 Esecuzione della prova

1. La cella viene riempita completamente di acqua a pressione atmosferica prestando attenzione che non rimangano bolle d'aria all'interno di essa.
2. Si impostano le pressioni di ingresso, di uscita, e della cella dove quella della cella dovrà essere la maggiore di quella di ingresso e a sua volta maggiore di quella d'uscita.
3. Il campione viene consolidato attraverso l'incremento della pressione all'interno della cella, questa fase garantisce anche l'adesione della guaina.
4. Apertura dei circuiti di ingresso e di uscita e inizio della prova.

### 5.1.3 Calcolo del coefficiente di permeabilità

Per determinare la conducibilità idraulica la base è la legge di Darcy per il caso di flusso monodimensionale, che in questo caso viene garantito dalla guaina:

$$Q = k \cdot A \cdot i$$

Dove :

- Q è la portata di deflusso;
- A è l'area della sezione trasversale del campione ossia la sezione attraversata dal fluido;
- K è il coefficiente di permeabilità detto anche coefficiente di conducibilità idraulica.

Dunque k può essere banalmente ottenuto tramite la formula inversa:

$$k = \frac{Q}{A \cdot i}$$

La portata di deflusso Q viene ricavata attraverso le letture delle burette, che fungono da misuratori di volume, come rapporto tra di volume di fluido che permea nel provino nell'intervallo  $\Delta t$  e l'intervallo  $\Delta t$  stesso:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Il gradiente idraulico "i" viene ricavato tramite la differenza di pressione  $\Delta u$  tra il circuito di ingresso e quello di uscita:

$$i = \frac{\Delta u / \gamma_w}{L}$$

Dove:

- $\Delta u$  è la differenza di pressione tra il circuito di ingresso e quello di uscita;
- $\gamma_w$  è il peso specifico dell'acqua;
- L è l'altezza del campione ossia la lunghezza del drenaggio.

Nel momento in cui si assegna il carico idraulico il flusso che attraversa il campione non sarà costante e uniforme. Infatti si leggeranno due valori diversi di volume di fluido in entrata ed in uscita. Questa lettura è dovuta dal fatto che la tensione di confinamento data dalla cella è uniforme su tutto il campione mentre la pressione interstiziale varia tra la base. Ciò comporterà un'ulteriore processo di consolidazione e solo dopo il termine di quest'ultimo il flusso comincerà ad assestarsi. Il reale valore di conducibilità idraulica si ha

solo nel momento in cui il flusso che si è instaurato risulta essere costante e le portate, in entrata ed uscita, coincidenti.

## 5.2 Risultati sperimentali

Come detto inizialmente la prova è stata effettuata su due campioni, dove però nel primo ( STD-1 ) la prova è stata svolta con due combinazioni di pressioni (graficamente delineate da una linea rossa) :

- La prima combinazione: Pressione Entrata 31 psi, Pressione Uscita 29 psi, e Pressione Cella 45 psi.
- La seconda combinazione: Pressione Entrata 43 psi, Pressione Uscita 40 psi, e Pressione Cella 45 psi.

Mentre nel secondo campione ( STD-2 ) abbiamo usato solamente la seconda combinazione (PE= 43 psi, PU=40psi, PC=45 psi).

All'interno della tabella sottostante le lettere valide sono quelle indicate con la lettera "P", mentre la lettera "R" indica che è stata effettuata una ricarica ai livelli della buretta.

**STD-1** media 3.43E-08 m/s

data e ora	lettura E	lettura U	volume E (ml)	volume U (ml)	gradiente idraulico (-)	tempo dalla compattaz.(gg)	k (cm/s)	k (m/s)	Temp (°C)	R <sub>T</sub>	k <sub>20</sub> (cm/s)	k <sub>20</sub> (m/s)
16/1/24 8.25	R 1,0	R 24,0			14,35	5,4			20	0,999		
16/1/24 8.52	P 7,5	P 17,8	6,5	6,2	13,11	5,4	3,52E-06	3,52E-08	20	0,999	3,52E-06	3,52E-08
17/1/24 9.05	R 2,2	R 23,4			14,18	6,4			20	0,999		
17/1/24 9.38	P 9,0	P 16,6	6,8	6,8	12,85	6,4	3,14E-06	3,14E-08	20	0,999	3,14E-06	3,14E-08
17/1/24 12.51	R 1,1	R 23,9			14,33	6,5			20	0,999		
17/1/24 14.06	P 14,9	P 9,4	13,8	14,5	11,56	6,6	3,01E-06	3,01E-08	20	0,999	3,00E-06	3,00E-08
18/1/24 8.55	R 1,2	R 24,1			14,34	7,4			20	0,999		
18/1/24 9.56	P 12,1	P 13,1	10,9	11,0	12,20	7,4	2,79E-06	2,79E-08	20	0,999	2,78E-06	2,78E-08
18/1/24 11.02	R 1,5	R 23,8			20,34	7,5			20	0,999		
18/1/24 11.21	P 9,2	P 16,1	7,7	7,7	18,83	7,5	4,26E-06	4,26E-08	20	0,999	4,25E-06	4,25E-08
18/1/24 12.32	R 1,2	R 23,8			20,37	7,5			20	0,999		
18/1/24 13.06	P 12,7	P 12,2	11,5	11,6	18,10	7,5	3,63E-06	3,63E-08	20	0,999	3,63E-06	3,63E-08
18/1/24 13.07	R 0,5	R 23,9			20,44	7,5			20	0,999		
18/1/24 14.18	P 23,7	P 0,8	23,2	23,1	15,91	7,6	3,71E-06	3,71E-08	20	0,999	3,70E-06	3,70E-08

**STD-5** media 2.72E08 m/s

data e ora	lettura E	lettura U	volume E (ml)	volume U (ml)	gradiente idraulico (-)	tempo dalla compattaz.(gg)	k (cm/s)	k (m/s)	Temp (°C)	R <sub>T</sub>	k <sub>20</sub> (cm/s)	k <sub>20</sub> (m/s)
24/1/24 14.57	R 1,4	R 22,7			20,24	1,6			20	0,999		
24/1/24 15.20	P 7,4	P 16,8	6,0	5,9	19,07	1,6	2,71E-06	2,71E-08	20	0,999	2,70E-06	2,70E-08
24/1/24 16.01	P 17,4	P 6,8	10,0	10,0	17,11	1,7	2,77E-06	2,77E-08	20	0,999	2,77E-06	2,77E-08
25/1/24 8.00	R 2,2	R 23,9			20,28	2,3			20	0,999		
25/1/24 8.09	P 4,7	P 21,7	2,5	2,2	19,82	2,3	2,68E-06	2,68E-08	20	0,999	2,68E-06	2,68E-08
25/1/24 9.36	P 24,7	P 2,0	20,0	19,7	15,93	2,4	2,63E-06	2,63E-08	20	0,999	2,63E-06	2,63E-08
25/1/24 12.40	R 1,9	R 23,0			20,22	2,5			20	0,999		
25/1/24 13.49	P 19,3	P 5,9	17,4	17,1	16,84	2,6	2,78E-06	2,78E-08	20	0,999	2,78E-06	2,78E-08
25/1/24 13.49	R 1,5	R 24,1			20,37	2,6			20	0,999		
25/1/24 14.56	P 18,4	P 7,2	16,9	16,9	17,06	2,6	2,78E-06	2,78E-08	20	0,999	2,78E-06	2,78E-08

## 6. Conclusioni

Riassumendo i risultati ottenuti all'interno di questa tesi, svolta all'grazie ai Laboratori del Dipartimento di Scienza e di Ingegneria della Materia dell'Ambiente e dell'Urbanistica, abbiamo determinato che il terreno oggetto di studio è una sabbia limosa, con un contenuto ottimo d'acqua del 13,6%, e una permeabilità dell'ordine di  $10^{-8}$  m/s, in particolare all'ottimo pari a  $3,43 \cdot 10^{-8}$  m/s, e al ramo wet di  $2,72 \cdot 10^{-8}$  m/s. Tali dati verranno poi utilizzati per studi futuri sull'utilizzo di additivi nei terreni al fine di migliorarne le caratteristiche.

# BIBLIOGRAFIA

[1] ASTM D2487 – 17 “Classification of Soil for Engineering Purpose”.

[2] ASTM D4318 – 17e1 “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index”.

[3] ASTM D698 – 12 “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort”.