

# UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE



## FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Edile

### TESI DI LAUREA

*Campo-prova per la costruzione di un argine di  
contenimento in terra-cemento*

*Test field of the construction of a soil-cement embankment*

**Laureanda:**

*Lucia Ponzetto*

**Relatrice:**

*Prof.ssa Evelina Fratolocchi*

**Anno Accademico 2021/2022**



## INDICE

<b>1 OGGETTO E SCOPO DELLA TESI.....</b>	<b>4</b>
<b>2 CAMPO-PROVA .....</b>	<b>6</b>
2.1 FINALITÀ .....	6
2.2 MEZZI MECCANICI .....	6
2.3 MODALITÀ OPERATIVE .....	7
<b>3 SPERIMENTAZIONE .....</b>	<b>9</b>
3.1 PROVE IN LABORATORIO.....	9
3.1.1 Prove di classificazione .....	9
3.1.2 Misure del contenuto d'acqua .....	11
3.1.3 Prova di compattazione Proctor Standard .....	12
3.1.4 Prove di taglio diretto.....	14
3.1.5 Prove di conducibilità idraulica .....	16
3.2 PROVE IN SITO .....	18
3.2.1 Prove di densità in sito mediante metodo del cono di sabbia .....	18
3.2.2 Prove di carico su piastra.....	19
3.2.3 Prove di permeabilità in foro .....	21
<b>4 RISULTATI.....</b>	<b>23</b>
4.1 RISULTATI PROVE DI LABORATORIO .....	23
4.1.1 Prove di classificazione .....	23
4.1.2 Compattazione .....	26
4.1.3 Resistenza al taglio .....	28
4.1.4 Conducibilità idraulica.....	33
4.2 RISULTATI PROVE IN SITU .....	34
4.2.1 Densità.....	34
4.2.2 Prove di carico su piastra.....	35
<b>5 CONCLUSIONI.....</b>	<b>39</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>40</b>
<b>SITOGRAFIA .....</b>	<b>40</b>

# 1 Oggetto e scopo della tesi

In questo elaborato si analizzano le modalità operative di un campo-prova e i risultati relativi alle prove di controllo svolte in laboratorio e in sito. Il campo-prova è servito a mettere a punto le modalità operative da adottare per la costruzione di un rilevato in terra-cemento per la stabilizzazione di un pendio adiacente alla discarica in località Belladanza nel Comune di Città di Castello (PG).

Il campo prova è stato realizzato nelle giornate del 09/02/2022, 10/02/2022, 11/02/2022, 22/02/2022 e 23/02/2022 all'interno del sito dove è ubicata la discarica stessa (Fig. 1.1).



*Figura 1.1: Inquadramento dell'area di intervento*

L'argine in terra-cemento ha ruolo strutturale, dovendo garantire la stabilità del pendio. Inoltre, è stata anche valutata la possibilità che il rilevato potesse costituire parte del rivestimento di sponda dell'ampliamento della discarica, cioè che potesse soddisfare anche requisiti di impermeabilità per il contenimento del percolato (il liquido inquinante che si forma principalmente dal processo di infiltrazione delle acque meteoriche all'interno del corpo dei rifiuti), il quale non deve migrare nel sottosuolo.

Nel dettaglio, durante la tesi sono state seguite sia le attività propedeutiche alla realizzazione del campo-prova (indagini geotecniche di laboratorio), sia la realizzazione del campo-prova e le relative misure di controllo (prove in sito e di laboratorio).

Le indagini di laboratorio sono state eseguite presso il Dipartimento SIMAU (Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente e Urbanistica) dell'Università Politecnica delle Marche.

In particolare, sono state eseguite prove per la classificazione e caratterizzazione fisica della terra da utilizzare, prove di compattazione, prove per la misura diretta della conducibilità idraulica e prove di taglio diretto per la valutazione dei parametri di resistenza al taglio su campioni di terra miscelata con cemento. Le prove in sito eseguite sul campo-prova sono prove di densità con cono di sabbia e prove di carico su piastra.

## 2 Campo-prova

### 2.1 Finalità

La realizzazione del campo-prova è un passaggio necessario, o perlomeno conveniente, quando si realizzano opere geotecniche in terra compattata per essere sicuri che i parametri assunti in fase di progetto possano essere ottenuti sul materiale (nel nostro caso terra additivata con cemento) una volta posto in opera.

In particolar modo l'esecuzione del campo-prova permette di mettere a punto le modalità operative con cui si realizzerà successivamente l'argine di contenimento.

### 2.2 Mezzi meccanici

Per la realizzazione del campo-prova sono stati impiegati i mezzi meccanici (Fig. 2.1) messi a disposizione dall'azienda e precedentemente verificati affinché soddisfino le prestazioni richieste.

I mezzi meccanici utilizzati sono i seguenti:

- Compattatore HAMM 3250 con rullo munito di protrusioni profonde 10 cm, del peso totale di 19.8 tonnellate, e carico statico lineare di 56,3 kg/cm (5.6 t/m); dimensioni del rullo: diametro = 1.6 m; larghezza = 2.2 m;
- Riciclatrice Wirtgen WR 2500 S. Profondità massima di fresatura = 50 cm; larghezza di fresatura = 2.4 m;
- Escavatore con pala liscia ed escavatore con pala dentata;
- Autobotte con barra posteriore spandi-acqua della lunghezza di 2.2 m;
- Spandi-cemento con nastro posteriore di lunghezza pari a 2.6 m.



*Figura 2.1: Mezzi meccanici utilizzati nel campo-prova*

## 2.3 Modalità operative

L'esecuzione del campo-prova ha previsto la suddivisione del sito in tre differenti strisce, ognuna delle quali è stata realizzata per sovrapposizione di tre o più strati, eseguiti operativamente secondo la stessa modalità. La differenza tra le tre strisce è data dal fatto che a ciascuna viene aggiunto, tramite annaffiamento con autobotte, un volume di acqua differente. Questa scelta è stata dettata dall'esigenza di individuare un range di contenuto d'acqua tale da garantire un minimo valore di densità secca della miscela finale terra-cemento.

La procedura del campo-prova ha avuto inizio con il prelievo della terra dalla zona di accumulo, ha seguito quindi la stesura del primo strato che è stato uniformemente distribuito tramite l'escavatore. Una volta conclusa la stesura si è eseguita la fresatura del terreno tramite la riciclatrice Wirtgen WR 2500 S che ha permesso la frantumazione e la miscelazione del materiale in maniera omogenea per



una profondità di 30 cm. Successivamente è stata additivata l'acqua tramite l'autobotte e, ancora una volta, è stata eseguita la fresatura.

In seguito, è stato aggiunto il cemento almeno pari al 5% del peso secco del terreno. Sulla base della percentuale minima di cemento da aggiungere e noto lo spessore dello strato di terreno da additivare, è stata calcolata la quantità di cemento da aggiungere per unità di superficie, mediante la spandimento. Si è provveduto poi ad un doppio passaggio della fresatrice che ha consentito una uniforme distribuzione del cemento sulla terra.

Infine, il materiale è stato compattato con il compattatore HAMM 3250 ad azione statica che sfrutta il peso del rullo.

La quantità di acqua caratterizzante ciascuna striscia è stata determinata dalle passate che l'autobotte ha eseguito su ogni strato. In particolare, nella prima striscia è stato additivato un quantitativo di acqua pari a due passate totali di autobotte: una relativa alla "andata" e una relativa al "ritorno". Con lo stesso ragionamento e la stessa procedura sono state associate alla seconda e terza striscia rispettivamente quattro e sei passate.



## 3 Sperimentazione

### 3.1 Prove in laboratorio

#### 3.1.1 Prove di classificazione

Le prove di classificazione hanno l'obiettivo di collocare i terreni in classi, nell'ambito delle quali si ha un comportamento simile. I parametri di classificazione devono essere indipendenti dalle condizioni di sollecitazione, da quelle ambientali e dal tempo e comprendono la dimensione e distribuzione dei grani, la forma dei grani e la composizione mineralogica.

Per determinare le dimensioni dei grani e la distribuzione percentuale di tali dimensioni, ovvero la granulometria si ricorre all'analisi granulometrica.

L'obiettivo dell'analisi granulometrica è quello di raggruppare, in diverse classi di grandezza, le particelle costituenti il terreno, e di determinare successivamente le percentuali in peso di ciascuna classe, riferendolo al peso secco del campione iniziale.

L'analisi granulometrica si effettua con due metodi, l'uno complementare all'altro: la setacciatura per la frazione grossolana (diametro dei grani maggiore di 0.075 mm) e la sedimentazione per la frazione fine (diametro dei grani minore di 0.075 mm).

La tecnica di setacciatura viene eseguita utilizzando una serie di setacci, con apertura delle maglie decrescente verso il basso, che devono essere sovrapposti e fatti vibrare, in modo da separare i granuli in frazioni di diverse dimensioni, ciascuna trattenuta al corrispondente setaccio. Questo metodo, tuttavia, non permette la separazione dei granuli di dimensioni inferiori a 0,0075 mm, cioè le particelle limose e argillose, che si effettua tramite metodi indiretti che si basano sui tempi di sedimentazione delle particelle in acqua.

L'analisi granulometrica permette di ottenere valutazioni quantitative per quanto riguarda le dimensioni delle particelle componenti un terreno, ma non dà alcuna informazione sulle

caratteristiche dei minerali di argilla che nel caso di materiali coesivi rivestono una importanza prevalente e ne influenzano il comportamento fisico-meccanico.

Per quantificare il grado di interazione solido-acqua, dipendente da granulometria e mineralogia, si procede con l'identificazione di particolari stati fisici di riferimento denominati limiti di Atterberg o di consistenza, che esprimono transizioni di comportamento del terreno al variare del contenuto d'acqua.

Il limite liquido  $w_L$  è il contenuto d'acqua che corrisponde al passaggio dallo stato plastico a quello liquido e si determina in laboratorio con il metodo del cucchiaio di Casagrande (Fig. 3.1). La prova prevede che un prefissato volume di terreno, prelevato dal passante al setaccio n. 40 (0.42 mm), venga mescolato con acqua distillata fino ad ottenere una pastella omogenea. L'impasto viene successivamente disposto nel cucchiaio, spianandone la superficie e praticando poi nella zona centrale un solco. Con un dispositivo a manovella, il cucchiaio viene quindi lasciato cadere ripetutamente, a intervalli di tempo regolari, da un'altezza prefissata su una base di materiale standardizzato e vengono contati i colpi necessari a far richiudere il solco. Viene poi prelevato un po' di materiale dal cucchiaio e determinato su questo il valore del contenuto d'acqua. La procedura viene ripetuta più volte variando la quantità di acqua nell'impasto, in modo da ottenere una serie di coppie di valori numero di colpi-contenuto d'acqua che vengono poi riportati in un diagramma semilogaritmico, e interpolati linearmente: il contenuto d'acqua corrispondente a 25 colpi rappresenta convenzionalmente il limite liquido.

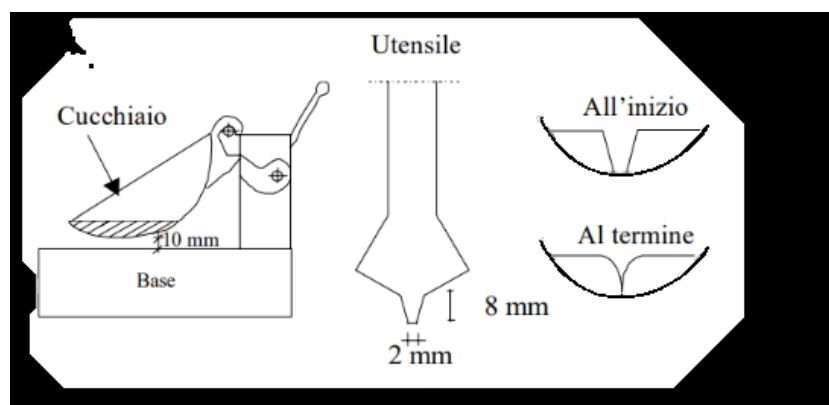


Figura 3.1: Apparecchio di Casagrande per la determinazione del limite di liquidità

Il limite plastico  $w_p$  è il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale il terreno inizia a perdere il proprio comportamento plastico. Si determina in laboratorio impastando una certa quantità di terreno passante al setaccio n. 40 (0.42 mm) con acqua distillata e formando manualmente dei bastoncini di 3.2 mm di diametro. Questi vengono fatti rotolare continuamente su una lastra di materiale poroso in modo da perdere progressivamente acqua, e quando iniziano a fessurarsi si determina il contenuto d'acqua che, quindi, rappresenta il limite plastico. Generalmente si fanno 3 determinazioni e si assume come  $w_p$  il valor medio.

### *3.1.2 Misure del contenuto d'acqua*

Il contenuto d'acqua, indicato con  $w$ , permette di valutare in percentuale qual è il quantitativo di acqua presente nel terreno.

Gli strumenti necessari per la prova sono:

- Forno a 100°C per l'essiccamento del materiale;
- Bilancia di sensibilità di 0,01 g;
- Utensili per l'estrazione del materiale;
- Contenitore per alloggiare il materiale estratto.

In alternativa al forno tradizionale si può utilizzare il forno a microonde per poter ottenere il risultato in un tempo di circa 10-15 minuti anziché le 24 ore (o almeno una notte) indispensabili con forno tradizionale. Il forno a microonde è la soluzione che è stata adottata per le misure da eseguire in sito, mentre per le misure di laboratorio è stato utilizzato il forno tradizionale.

Il calcolo del contenuto d'acqua si esegue su un campione da cui si prelevano alcuni provini. Si seleziona quindi un quantitativo sufficientemente rappresentativo del campione in esame e lo si pesa con il contenitore, precedentemente tarato. Nel caso del forno a microonde si procede con l'essiccamento fino a massa costante e, terminato il periodo di essiccamento, si preleva il contenitore dal forno per farlo raffreddare. Si pesa quindi il tutto a temperatura ambiente.

Le masse secca e umida così determinate consentono il calcolo della percentuale d'acqua contenuta come la differenza tra le due pesate. È importante che la prova venga effettuata immediatamente dopo il prelievo per impedire l'evaporazione dell'acqua dal campione prelevato.

Durante la prova sono determinati:

- $P_t$  = peso del contenitore
- $P_w$  = peso lordo del materiale umido
- $P_s$  = peso lordo del materiale essiccato
- $P_{s,N}$  = peso netto del materiale essiccato.

Il contenuto d'acqua, espresso in percentuale, si calcola con la seguente relazione:

$$w = \frac{P_w - P_s}{P_{s,N}} \times 100 \quad (3.1)$$

### *3.1.3 Prova di compattazione Proctor Standard*

La prova Proctor Standard (ASTM D698-12) è una procedura utilizzata per determinare il costipamento di un terreno, valutando l'influenza del contenuto d'acqua sullo stesso. Interessa in particolare determinare la massima massa volumica ottenibile per costipamento della frazione secca della terra e il corrispondente livello di umidità, detto di "umidità ottima".

Gli elementi principali utilizzati per la prova sono una fustella (Fig. 3.2a), sormontata da un collare mobile, che serve a contenere il terreno, e un pestello (Fig. 3.2b), vincolato a cadere all'interno di una guida, che è lo strumento che svolge la funzione di compattatore.



Figura 3.2a: Fustella di contenimento del provino



Figura 3.2b: Pestello per il costipamento del materiale

La prova consiste nel compattare il terreno in esame per strati, in un recipiente metallico cilindrico utilizzando un pestello di dato peso a caduta libera.

Il processo viene ripetuto sullo stesso campione di terra, umidificato con percentuali d'acqua progressivamente crescenti. A ciascun tasso di umidità corrisponde un valore di densità a secco per il terreno sottoposto alla prova, che viene riportato in un grafico ottenendo una curva a campana dove il punto di massimo costituisce il massimo valore di densità a secco raggiungibile dal campione di terra in fase di compattazione, cui corrisponde un tenore d'acqua preciso che rappresenta la quantità d'acqua ottimale per la miscela di terra testata.

Quando il campione di terreno da compattare è tutto passante al setaccio da 5 mm (n°4 ASTM) viene impiegata la fustella piccola da 943 cm<sup>3</sup>. Altrimenti si usa la fustella grande da 2125 cm<sup>3</sup> purché il materiale trattenuto al setaccio da 25 mm sia inferiore al 35%, condizione necessaria affinché il test risulti effettuabile su quel campione perché l'attrito tra grani e fustella deve essere un effetto trascurabile.

### 3.1.4 Prove di taglio diretto

La prova utilizzata per l'individuazione dei parametri di resistenza al taglio del terreno è stata la prova di Taglio Diretto (ASTM D3080-04) che si pone l'obiettivo di determinare l'involuppo di rottura e quindi i parametri di resistenza al taglio,  $c'$  e  $\phi'$ .

La prova viene eseguita inserendo un provino all'interno di una intelaiatura metallica detta scatola di Casagrande (Fig. 3.3) che è una fustella rigida e impermeabile costituita al fondo da una piastra di base che funziona da piano d'appoggio, al di sopra è posta una pietra porosa e a contatto con questa viene messa una sottile carta filtro che ha la funzione di impedire, durante il drenaggio, il passaggio di piccole particelle solide di terreno che potrebbero occludere i vuoti presenti nella pietra porosa compromettendone il funzionamento.

Sopra la carta filtro infine viene posizionata una piastra nervata, dotata di forellini per il passaggio dei liquidi e la sua funzione è quella di tenere, grazie alle nervature, in posizione il provino durante la fase di taglio e trasferire le sollecitazioni taglienti facendo in modo che le deformazioni si sviluppino tutte nell'intorno della superficie di rottura.

Al di sopra del provino sono disposti in serie gli stessi elementi presenti inferiormente in questo ordine verso l'alto: piastra nervata, carta filtro, pietra porosa ed infine viene posta una piastra di carico verticale con lo scopo di ripartire uniformemente sulla superficie superiore del provino il carico a cui sarà sottoposta.

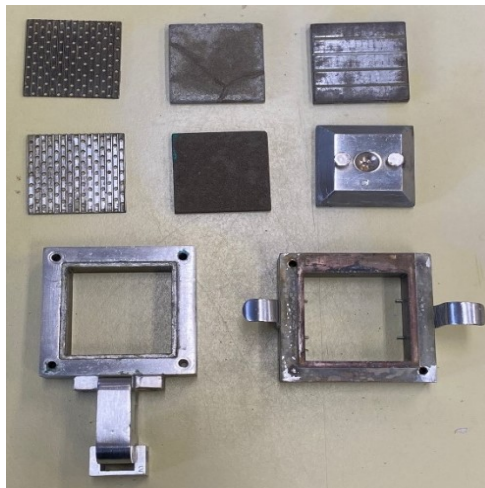


Figura 3.3: Scatola di taglio scomposta nelle parti che la costituiscono

L'intelaiatura è divisa in due semiscatole prismatiche, sovrapposte libere di muoversi l'una rispetto all'altra lungo la loro linea di giunzione, che sarà il piano di rottura del provino. La semiscatola inferiore è vincolata ad un motore che la spinge in avanti, mentre la semiscatola superiore è vincolata ad una cella di carico che misura la resistenza che il terreno offre allo sforzo di taglio.

La prova si esegue su tre provini con geometria parallelepipeda a base quadrata di lato 6 cm e altezza 2 cm. Il provino viene inserito all'interno di un recipiente contenente acqua.

La prova ha inizio con l'applicazione di un carico verticale  $N$ , segue quindi il processo di consolidazione che termina dopo circa 24 ore alla fine del quale la sovrappressione iniziale sarà nulla e la tensione efficace verticale pari alla pressione totale verticale applicata. I tre provini vengono consolidati a differenti pressioni e poi sottoposti alla fase di taglio a pressione verticale costante. La seconda fase si esegue portando a rottura il provino bloccando la parte superiore della scatola mentre la parte inferiore solidale con la base è libera di muoversi.

La prova deve essere sempre condotta con velocità di taglio sufficientemente lenta da garantire il drenaggio, ovvero tale da non fare insorgere sovrappressioni interstiziali. Il parametro che permette di individuare la velocità con cui eseguire la prova è il coefficiente di consolidazione che può essere determinato sperimentalmente durante la prima fase della prova.

Durante la prova vengono misurate la resistenza, lo spostamento orizzontale e il cedimento del provino ovvero la deformazione verticale. In particolare, la resistenza è calcolata valutando la forza  $T$  al contrasto con la parte superiore del provino che quindi rapportata all'area  $A$  di superficie del provino stesso permette di ricavare le tensioni tangenziali  $\tau$ :

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (3.3)$$

In termini di risultati, la prova di taglio fornisce tre punti sul piano di Mohr, corrispondenti alle coppie tensione assiale - tensione tangenziale a rottura di ciascun provino.



La prova permette quindi di misurare la resistenza al taglio del materiale e quindi di ottenere un punto sul piano di Mohr che rappresenta il punto di tangenza fra il cerchio di Mohr a rottura e l'involuppo di rottura; tuttavia, non è possibile costruire il cerchio di Mohr a rottura, né il percorso di carico e quindi non si conosce interamente lo stato tensionale del provino durante la prova.

I risultati della prova vengono quindi interpretati interpolando i punti a rottura ottenuti sul piano di Mohr e determinando l'involuppo di rottura.

### 3.1.5 Prove di conducibilità idraulica

Per la determinazione diretta della conducibilità idraulica su campioni di terra in laboratorio è stato impiegato il permeametro a pareti flessibili a carico variabile (ASTM D5084 – 16a) in cui imponendo un gradiente idraulico e attivando un flusso all'interno del provino, tramite l'applicazione della legge di Darcy è possibile valutare il coefficiente di conducibilità idraulica.

La strumentazione per l'esecuzione della prova si costituisce di tre elementi principali (Fig.3.4): la cella, le burette per la misura dei volumi in ingresso e in uscita durante il flusso e un pannello di controllo delle pressioni.



Figura 3.4: Permeametro a pareti flessibili

Il campione, opportunamente compattato, viene posto all'interno della cella avvolto con una membrana impermeabile e fissato tramite o-ring, in maniera tale da essere isolato dal fluido presente in cella. Il provino è alloggiato tra due pietre porose in un anello d'acciaio inox che consente il passaggio dell'acqua solo verticalmente attraverso il provino stesso.

Il campione è connesso a due burette tramite le quali si applica una pressione all'acqua in ingresso e in uscita dal campione (quindi un gradiente idraulico) e si misura al contempo il volume di acqua in ingresso e in uscita dal campione. Durante la prova si misura la temperatura media del laboratorio per una eventuale correzione connessa alla viscosità cinematica dell'acqua.

La determinazione della conducibilità idraulica si basa sulla legge di Darcy:

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad (3.4)$$

in cui  $Q$  è la portata,  $A$  è l'area della sezione trasversale attraversata dal fluido e  $k$  è il coefficiente di conducibilità idraulica.

## 3.2 Prove in sito

### 3.2.1 Prove di densità in sito mediante metodo del cono di sabbia

La prova ha lo scopo di accertare che il grado di compattazione del terreno raggiunto in cantiere, dopo che il materiale è stato steso e opportunamente rullato, corrisponda al grado di addensamento minimo stabilito in fase di progetto.

Il materiale necessario per l'esecuzione della prova è il seguente:

- Boccioni per la sabbia calibrata di capacità pari a 5 litri;
- Cono standardizzato con rubinetto d'arresto;
- Piastra con foro circolare per alloggiamento del boccione;
- Sabbia calibrata di peso e densità noti;
- Sacchetti per la raccolta e il trasporto del materiale estratto dai fori di prova;
- Utensili per lo scavo del foro ed estrazione del materiale.



*Figura 3.5: Esecuzione della prova di densità con il metodo del cono di sabbia*

La prova viene eseguita secondo la normativa (ASTM D1556/D1556M – 15) in cui una fase preliminare prevede la taratura del cono e del boccione contenente la sabbia; il volume del cono è conosciuto così come la densità volumica della sabbia. In seguito, si procede con il posizionamento della piastra e quindi con lo scavo del terreno; questo verrà sistemato in un contenitore anch'esso tarato e sigillato per evitare la dispersione di umidità. Il boccione contenente la sabbia completo del cono si posiziona con precisione sul foro della piastra, si apre la valvola e, quando il flusso di sabbia si arresta, si chiude la valvola.

Alla fine, si pesa nuovamente il boccione di sabbia e il contenitore con il terreno prelevato.

Con i dati ottenuti si ricava la misura del contenuto d'acqua nel terreno, e poi la densità del secco secondo la seguente formula:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_f} \quad (3.5)$$

$$m_s = \frac{m_{w,N}}{1+w} \quad (3.6)$$

Dove  $\rho_s$  è la densità secca [g/cmc],  $m_s$  è il peso secco del materiale rimosso [g],  $V_f$  è il volume noto del foro [cmc],  $m_{w,N}$  è il peso umido netto del materiale rimosso [g] e  $w$  è il contenuto d'acqua in percentuale.

### *3.2.2 Prove di carico su piastra*

La prova di carico su piastra è una tecnica di indagine che consente di determinare la resistenza al taglio non drenata se viene spinta fino a rottura del terreno e il modulo di deformazione al variare del livello di pressione applicato. Nel caso in esame, la prova è stata utilizzata per determinare la rigidità



a compressione e quindi controllare indirettamente che il quantitativo di cemento additivato fosse quello minimo richiesto.

La prova viene eseguita su una porzione di terreno caricandolo a gradini successivi, così da poter calcolare il modulo di deformazione o di compressibilità del terreno.

Per la realizzazione della prova sono richieste le seguenti attrezzature:

- una piastra circolare in acciaio di diametro  $\varnothing = 300$  mm (“Matest”) e spessore di 25 mm;
- un manometro;
- un comparatore singolo con corsa di 2,5 cm e sensibilità 1/100 mm;
- trave di riferimento in alluminio di lunghezza 2,5 m, telescopica;
- un martinetto idraulico di 200 kN (20 ton.) con pompa e prolunghe costituita da più aste cilindriche per poter raggiungere il contrasto;
- una serie di estensioni e nodi sferici per il centramento del carico da disporre al di sopra della piastra di carico;
- un cronometro;
- un elemento di contrasto come un autocarro.



*Figura 3.6: Attrezzatura necessaria per l'esecuzione della prova di carico su piastra*

La prova viene così eseguita: scelta la zona di terreno dove eseguire il controllo, la superficie viene opportunamente livellata e messa in piano con della sabbia per consentire alla piastra di avere il massimo contatto con il terreno.

Posizionata la piastra di acciaio, va collocato al centro il martinetto idraulico opportunamente contrastato utilizzando un compressore o un autocarro. A 120° dal perimetro della piastra vanno posizionati tre trasduttori di spostamento con risoluzione 0,001mm solidali ad un telaio di riferimento del tutto indipendente dal sistema di carico.

Viene applicato un precarico di 0,20 kg/cm<sup>2</sup> tramite il martinetto idraulico fino a quando i cedimenti iniziali sono esauriti, così si azzerà il comparatore e si inizia la prova. Si procede quindi ad applicare i carichi con un intervallo di tempo pari a due minuti leggendo i corrispondenti cedimenti.

Il grado di compattazione è calcolato tramite la valutazione del Modulo di deformazione, così determinato:

$$M_d = \frac{\Delta p}{\Delta s} \times D \quad (3.7)$$

dove  $\Delta p$  è l'incremento della pressione indotto dalla piastra circolare,  $\Delta s$  è il corrispondente incremento di cedimento della superficie caricata,  $D$  è il diametro della piastra.

### *3.2.3 Prove di permeabilità in foro*

La prova è destinata a misurare la conducibilità idraulica del terreno. A seconda della geometria realizzata in corrispondenza del tratto di foro prescelto e quindi della direzione del flusso che si instaura durante la prova, la permeabilità misurata sarà quella orizzontale, quella verticale o una media tra le due.

L'attrezzatura di prova è costituita da utensili per lo scavo del foro, acqua e un metro a nastro.

Prima di eseguire la prova il terreno deve essere preventivamente saturato mediante immissione d'acqua e si deve stabilire un regime di flusso permanente. Per ottenere questo risultato si immette acqua nello scavo per almeno 24 ore prima dell'inizio dell'esecuzione della prova.

Il pozzetto di prova può essere di forma quadrata o circolare e le dimensioni devono aumentare all'aumentare della grandezza dei granuli del terreno. In particolare, nel caso di pozzetti a base quadrata il lato del quadrato, o per pozzetti circolari il diametro del cerchio, deve essere superiore a 10-15 volte la dimensione della frazione granulometrica significativa.

Operativamente si realizza uno scavo, lo si riempie d'acqua e si valuta la portata necessaria per mantenere il livello costante (prove a carico costante) o si valuta l'abbassamento dell'acqua all'interno dello scavo (prove a carico variabile).

Nel campo prova è stata eseguita la prova a carico variabile facendo filtrare l'acqua attraverso un tratto di foro predeterminato e misurando quindi gli assorbimenti.



*Figura 3.7: Pozzetto circolare di prova*

Tuttavia, l'esecuzione della prova in pozzetto non ha permesso di ricavare misurazioni idonee alla valutazione della permeabilità in sito.



## 4 Risultati

### 4.1 Risultati prove di laboratorio

#### 4.1.1 Prove di classificazione

Prima dell'esecuzione del campo-prova è stata svolta l'analisi granulometrica per setacciatura (ASTM D6913/D6913M-17), eseguita come descritto nel *paragrafo 3.1.1*, i cui risultati vengono riportati sul piano cartesiano con in ascissa, in scala logaritmica, la dimensione dei granuli e in ordinate, in scala lineare, la percentuale di materiale passante.

Il peso del materiale trattenuto da un dato setaccio riferito al peso totale del campione è detto trattenuto e il complemento a cento della somma dei trattenuti di tutti i setacci, con dimensione delle maglie maggiore di quella del setaccio dato, è detto passante al setaccio considerato.

Per la determinazione della curva granulometrica (Fig. 4.1) sono stati riportati in tabella 4.1 il valore del trattenuto cumulativo e del passante cumulativo prima espressi in grammi e poi nella corrispondente percentuale.

Tabella 4.1: Curva granulometrica

Curva granulometrica			
TRATTENUTO CUMULATIVO [g]	TRATTENUTO CUMULATIVO [%]	PASSANTE CUMULATIVO [g]	PASSANTE CUMULATIVO [%]
0.00	0.00	2009.73	100.00
0.00	0.00	2009.73	100.00
278.91	13.88	1730.82	86.12
453.75	22.58	1555.98	77.42
775.21	38.57	1234.52	61.43
1025.27	51.02	984.46	48.98
1167.25	58.08	842.48	41.92
1244.32	61.91	765.41	38.09
1266.46	63.02	743.27	36.98
1497.36	74.51	512.37	25.49
1570.13	78.13	439.60	21.87
1612.59	80.24	397.14	19.76
1671.93	83.19	337.80	16.81
1701.02	84.64	308.71	15.36

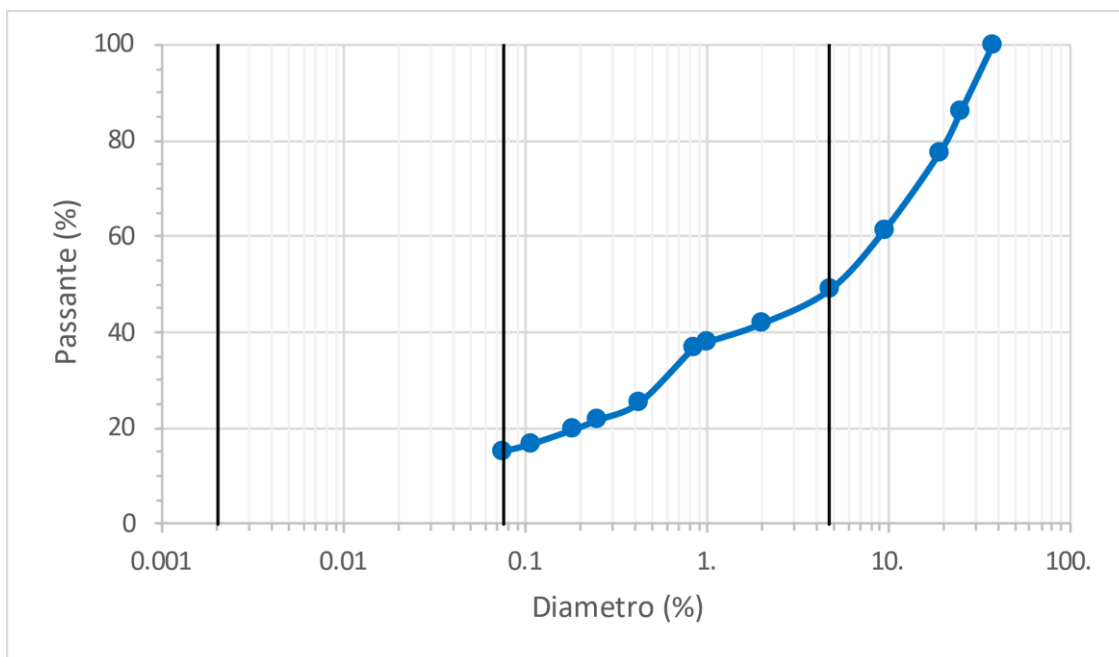


Figura 4.1: Curva granulometrica

Di conseguenza dalla valutazione della curva granulometrica si conclude che il terreno è costituito dal 51.0% di ghiaia, dal 33.6% di sabbia e dal 15.4% di materiale fine.

Per la determinazione dei Limiti di Atterberg vengono riportati in Tabella 4.2 il valore numerico del limite liquido e il valore numerico del limite plastico relativi a diversi campioni esaminati.

Tabella 4.2: Limite liquido e Limite plastico

02/03/2022	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO			
N. colpi	15	27	36	*	*		
Contenitore	n. 72	n. 350	n. 412	n. 123	n. 113	n. 358	n. 308
Tara (g)	28.82	31.18	33.18	29.90	30.38	30.33	31.26
PLU (g)	65.03	67.37	76.00	33.66	34.03	37.38	36.80
PLS (g)	57.34	59.89	67.65	32.85	33.30	36.10	35.88
P <sub>w</sub> (g)	7.69	7.48	8.35	0.81	0.73	1.28	0.92
P <sub>s</sub> (g)	28.52	28.71	34.47	2.95	2.92	5.77	4.62
W (%)	27.0	26.1	24.2	27.5	25.0	22.2	19.9

Successivamente è stato ricavato l'indice di plasticità ottenuto come differenza fra limite liquido e limite plastico, poi espresso in percentuale (Tabella 4.3).

Tabella 4.3: indice di plasticità

LL (%)	PL (%)	PI (%)
25.7	21.0	4.6

In Figura 4.2 sono riportati su un grafico i risultati relativi alla prova eseguita tramite il Cucchiaino di Casagrande espressi come contenuto d'acqua del campione in funzione dei numeri di colpi necessari a fare chiudere il solco. Devono essere effettuate almeno tre prove su campioni che presentino un contenuto d'acqua differente, al fine di poter interpolare i punti ottenuti e tracciarne una retta. Il contenuto d'acqua del limite liquido si legge in corrispondenza del numero di colpi pari a 25 che corrisponde a circa  $w_L=26\%$ .

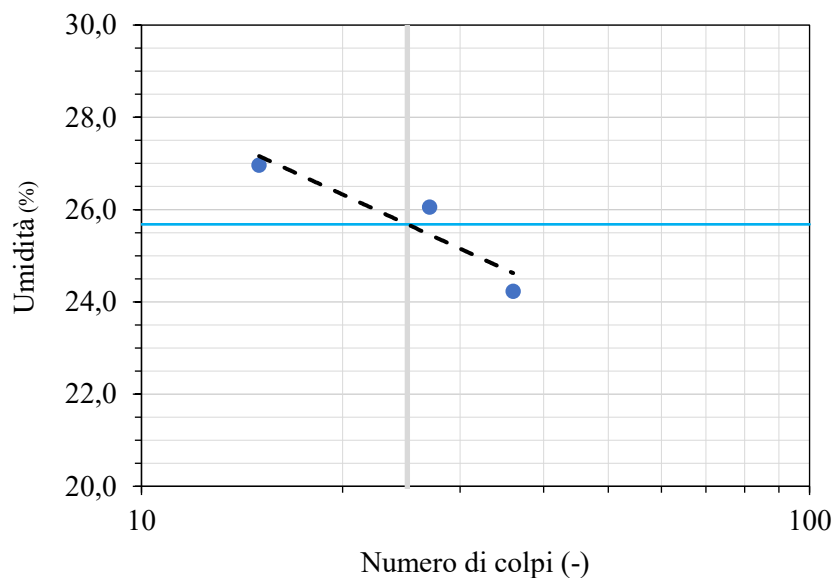


Figura 4.2: Determinazione del limite liquido mediante il metodo del Cucchiaino di Casagrande

### 4.1.2 Compattazione

Prima di eseguire il campo-prova, il terreno è stato additivato con il 5% di cemento mediante miscelazione e compattazione Proctor standard in laboratorio. Il risultato delle prove ha portato all'individuazione del contenuto di acqua di ottimo del 13% corrispondente a una densità secca di 1,9 g/cm<sup>3</sup> (Fig. 4.3).

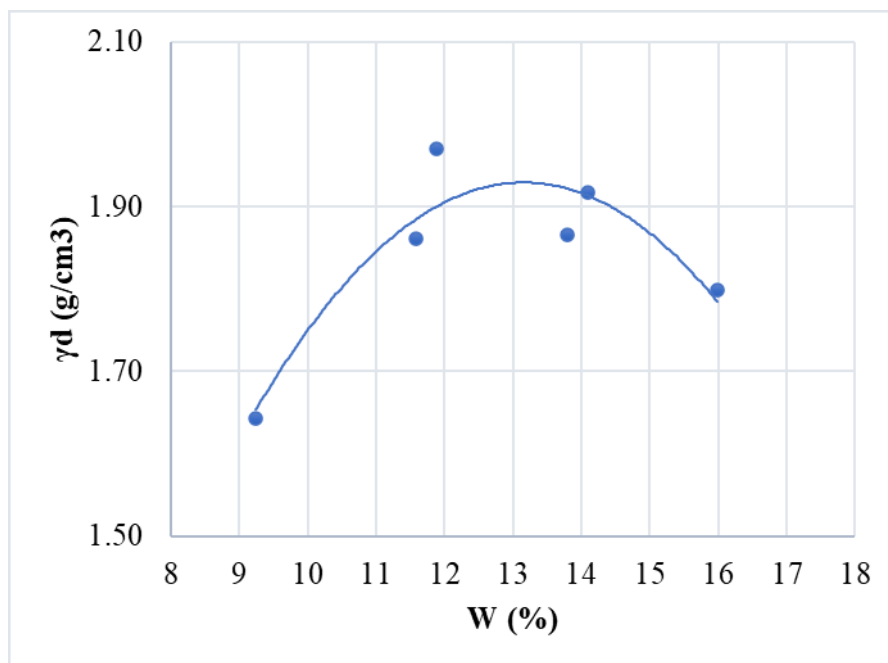


Figura 4.3: Risultati della Prova Proctor eseguita sul terreno TDS\*+5%

Come mostra la figura 4.3 la variazione di contenuto d'acqua nel terreno rispetto al punto di ottimo provoca una diminuzione della densità secca del materiale. In particolare, nel ramo wet of optimum (le coppie di valori nel ramo decrescente della curva), si ottiene un buon grado di compattazione e al contempo una permeabilità bassa del terreno.

Le prove di compattazione sono state eseguite anche durante la realizzazione del campo-prova prelevando campioni di terreno miscelato in sito, prima della sua compattazione. Non è stato infatti possibile il prelievo di campioni indisturbati a causa della notevole consistenza del materiale al termine della sua compattazione.

In tabella 4.4 sono riportati i campioni, le modalità di miscelazione e i relativi risultati.

Tabella 4.4: Prove di Compattazione Proctor

provenienza	miscela	W (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	note
CAMPO PROVA	TSD+5%CEM, conf. in sito, in lab rimossi grani di dimensioni >1cm	11.1	1.85	-
CAMPO PROVA	TSD+5%CEM, conf. in sito, in lab setacciatura al #4 ASTM	11.1	1.67	TD-0
CAMPO PROVA	TSD+5%CEM, confezionamento in sito	9.9	1.73*	k1
CAMPO PROVA	TSD+5%CEM, confezionamento in lab	12.0	1.96	k2
CAMPO PROVA	TSD+5%CEM, conf. e comp. non std in lab (1/3; 2/3)	10.6	1.77	k3
CAMPO PROVA	TSD+5%CEM, conf. e comp. non std in lab (1/3; 2/3)	14.4	1.77	k4

Come riportato in tabella n 4.4 sotto la voce *note* alcuni provini sono stati poi utilizzati per condurre prove di permeabilità in laboratorio tramite il permeametro a pareti flessibili.

Dalle prove Proctor si è ricavata la densità secca dei diversi campioni il cui valore varia tra un minimo di 1.67 g/cm<sup>3</sup> e un massimo di 1.96 g/cm<sup>3</sup>.

Le prove precedentemente condotte in laboratorio forniscono un valore minimo accettabile di densità secca pari a 1.7 g/cm<sup>3</sup>, di conseguenza si può concludere che i risultati ottenuti nel campo-prova sono soddisfacenti vale a dire che la miscelazione in sito è avvenuta correttamente.

### 4.1.3 Resistenza al taglio

In laboratorio sono state realizzate due prove di taglio diretto su campioni di terra additivata a cemento prelevati in campo-prova e poi ricostruiti in laboratorio alla stessa densità misurata in sito.

La prima prova è stata eseguita su un campione prelevato in sito in data 11/02/2022 e ricostruito lo stesso giorno poi sottoposto alla fase di taglio il 23/02/2022 ad una stagionatura di 11 giorni.

Per ricavare l'involuppo di rottura a taglio, e quindi l'angolo di resistenza al taglio e la coesione che rappresentano i parametri oggetto di interesse, si è proceduto ripetendo la prova su ogni provino applicando tre differenti carichi assiali che producono pressioni verticali pari rispettivamente a 50, 100 e 200 kPa.

La fase di consolidazione si è conclusa dopo 24 ore il cui andamento è riportato in Figura 4.4.

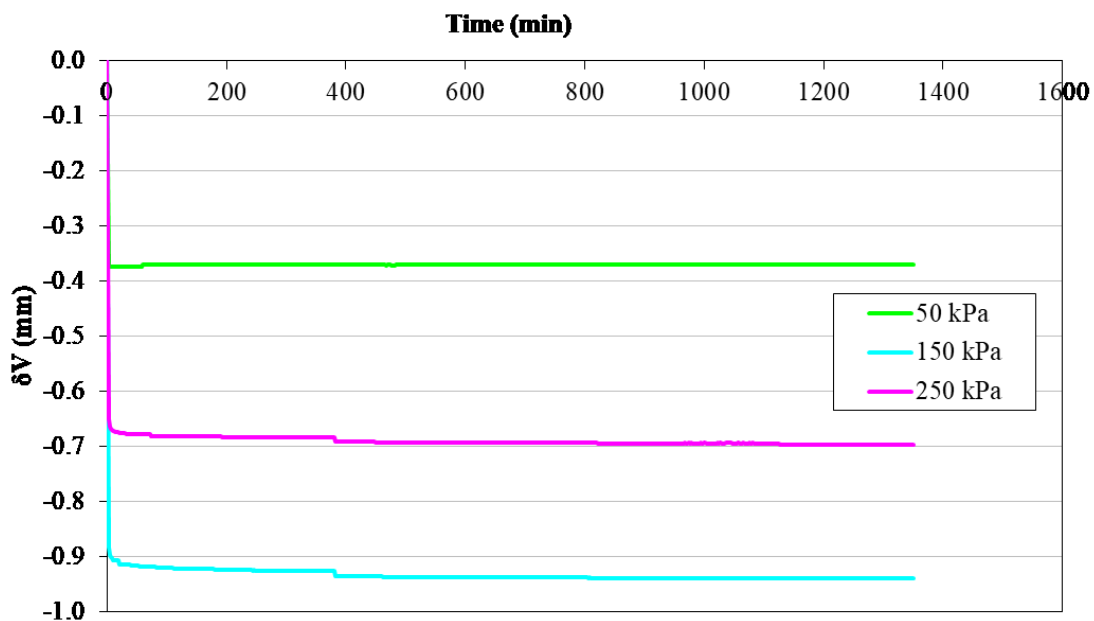


Figura 4.4: TD-1 \_Fase di Consolidazione

In seguito alla fase di consolidazione ha inizio la fase di taglio che termina con la rottura dei provini (Fig. 4.5). Questa seconda fase è stata condotta a una velocità di 0.0024384 mm/min.

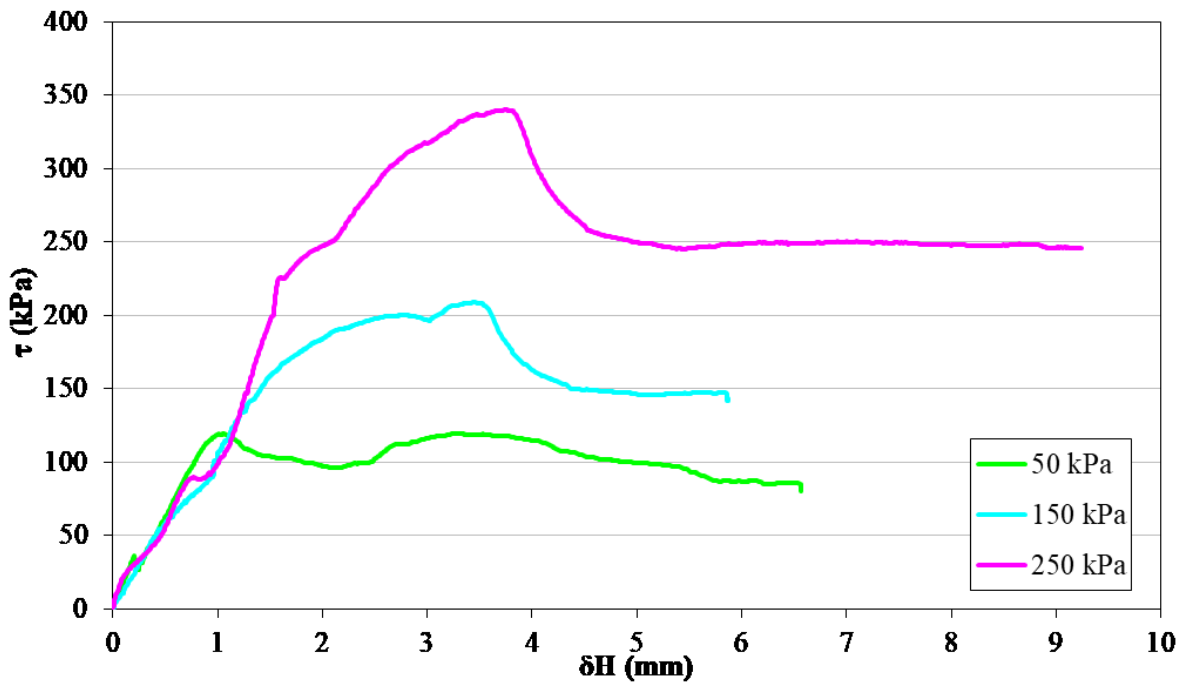


Figura 4.5: TD-1\_Fase di Taglio

Durante la fase di consolidazione viene valutato il cedimento verticale dei singoli provini. Di seguito è riportato l'andamento delle variazioni di spessore dei provini in funzione dello scorrimento orizzontale (Fig. 4.6).

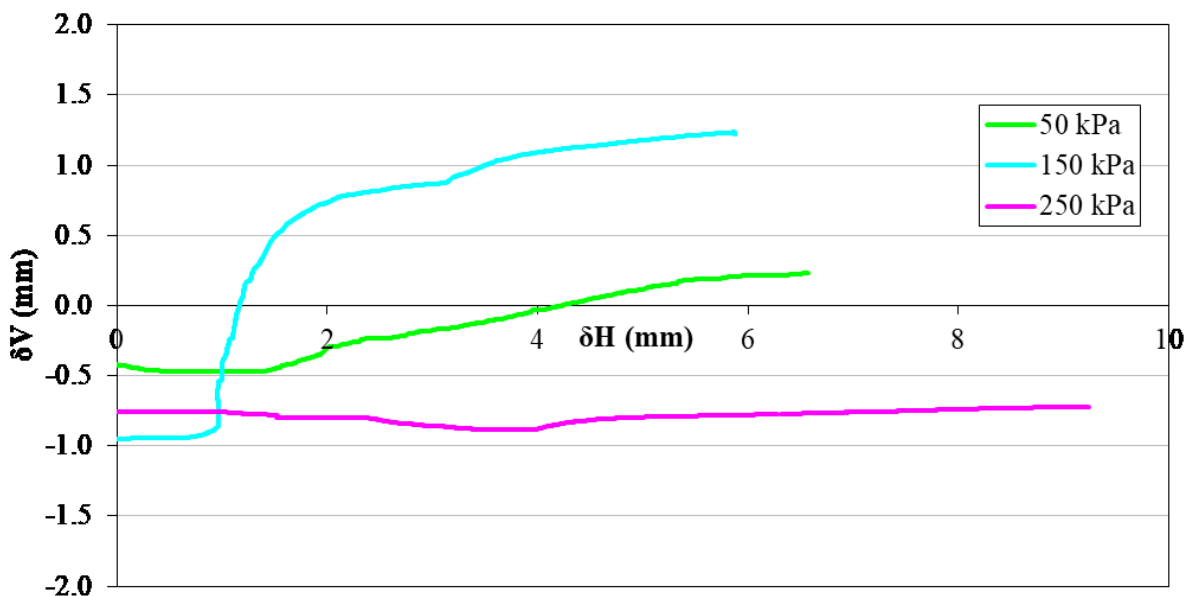


Figura 4.6: TD-1\_Cedimento-Scorrimento



Infine, i risultati della prova di taglio come coppia di tensioni verticali applicate e corrispondenti tensioni tangenziali di rottura vengono riportate sul Piano di Mohr.

Interpolando i punti di rottura relativi a ciascun provino si costruisce l'involuppo di rottura (Fig. 4.7) dal quale si ricava l'angolo di resistenza al taglio e la coesione  $c'$  dall'intersezione della retta con l'asse delle ordinate.

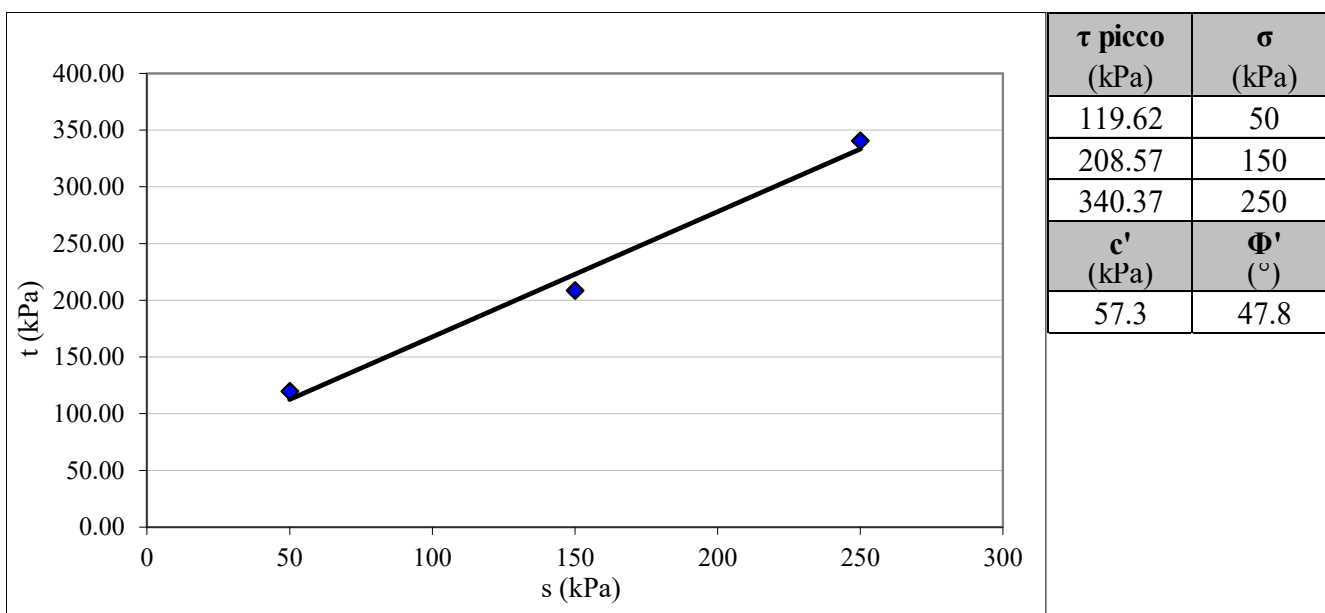


Figura 4.7: TD-1\_Inviluppo di Rottura

Dall'involuppo di rottura in Figura 4.7 si ricava il valore dell'angolo di resistenza al taglio pari a  $47.8^\circ$  e il valore della coesione che risulta essere pari a 57.3 kPa. I risultati ottenuti appaiono quindi soddisfacenti in quanto i parametri di progetto erano rispettivamente  $35^\circ$  e 15 kPa.

La seconda prova di Taglio Diretto è stata eseguita su un provino di miscela prelevato in sito il 22/02/2022 e poi ricostruito in laboratorio il 23/02/2022. La fase di taglio è stata eseguita a 15 giorni di stagionatura.

La procedura seguita per la prova è uguale a quella già descritta e in Figura 4.8 è riportato l'andamento della fase di consolidazione dei tre provini a 24 ore dall'avvio del processo.

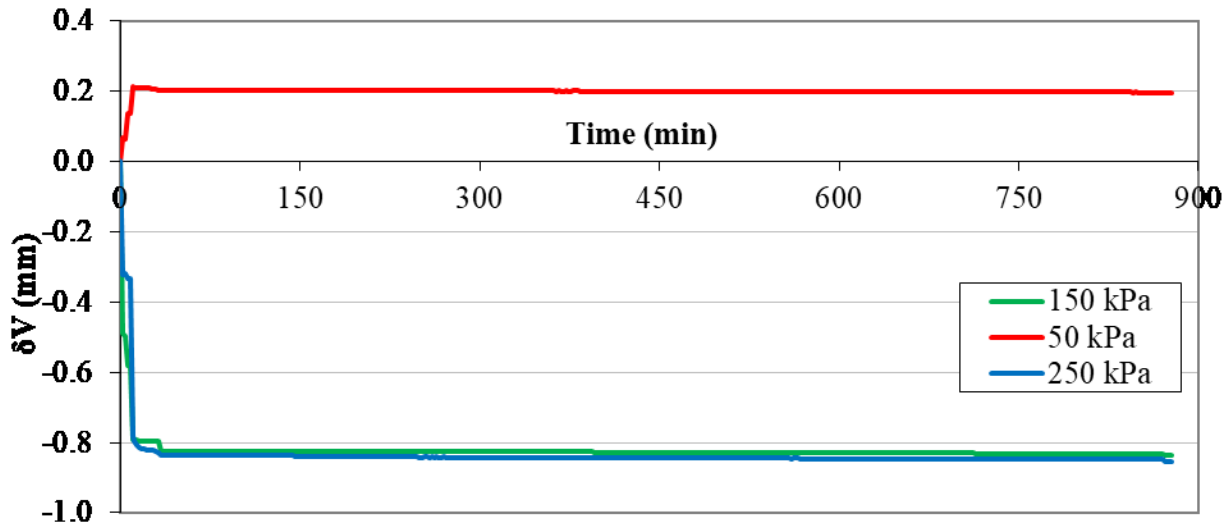


Figura 4.8: TD-2 Fase di Consolidazione

Alla fase di consolidazione segue quella di taglio in cui i provini vengono portati a rottura con una velocità di 0.0024384 mm/min, e il cui andamento è riportato in Fig. 4.9 come tensione in funzione dello spostamento orizzontale.

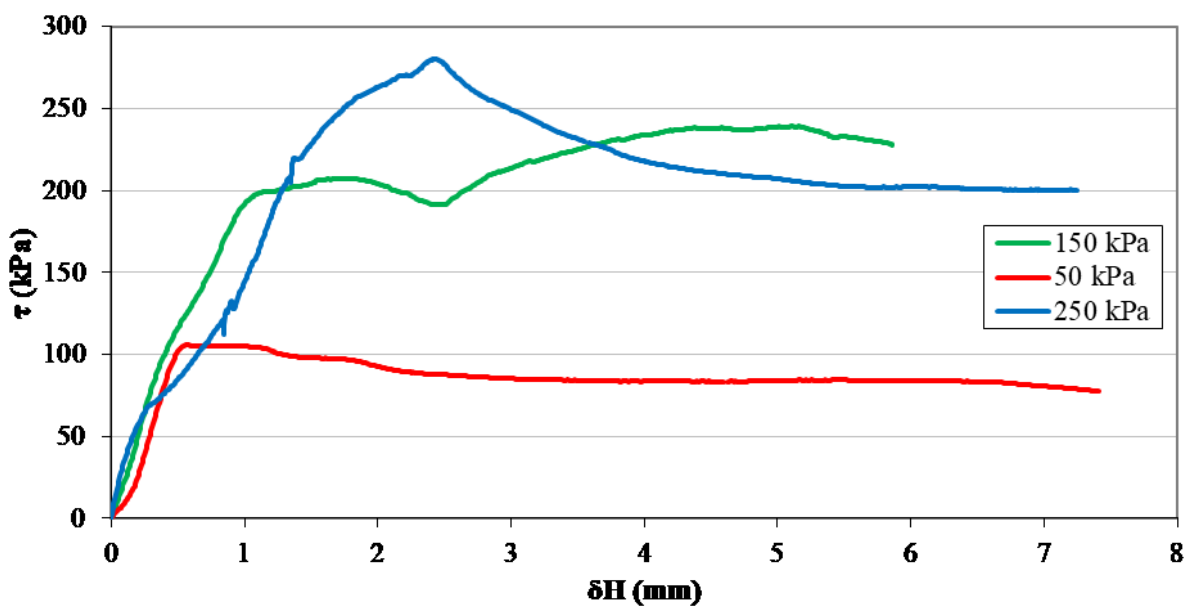


Figura 4.9: TD-2 Fase di Taglio

Durante la fase di consolidazione viene valutato il cedimento verticale dei singoli provini. In figura 4.10 è riportato l'andamento dei cedimenti in funzione dello scorrimento orizzontale.

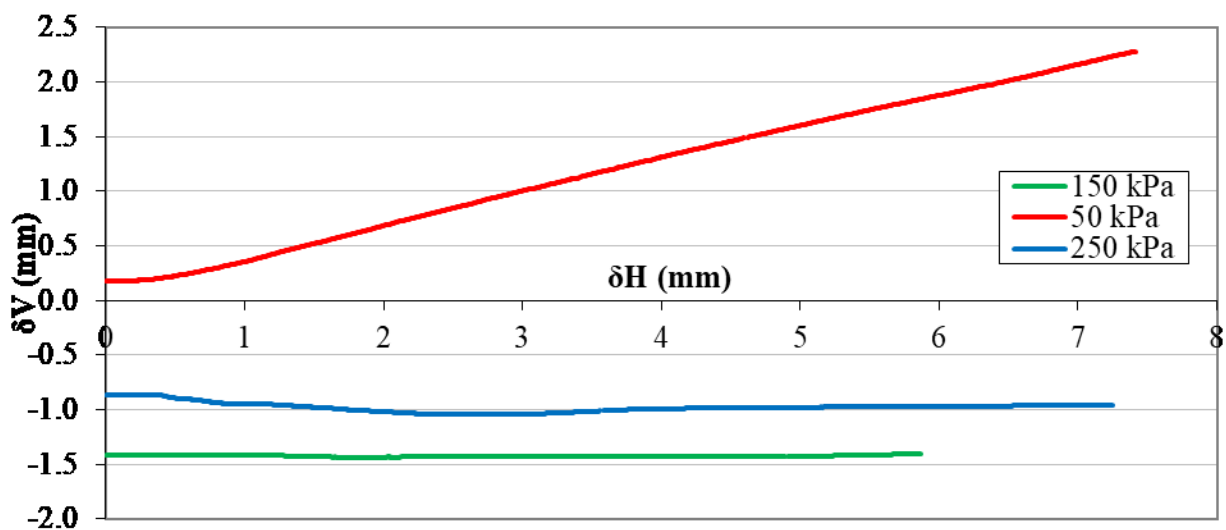


Figura 4.10: TD-2\_Cedimento-Scorrimento

Infine, i risultati vengono riportati sul Piano di Mohr identificando la tensione tangenziale di rottura per ciascun provino sottoposto a prova in funzione della corrispondente tensione verticale a cui è soggetto. Interpolando i punti ottenuti si definisce l'involuppo di rottura (Fig. 4.11) acquisendo un angolo di taglio di  $41.1^\circ$  e una coesione di 66.7 kPa, valori ancora una volta positivi poiché i parametri di progetto erano rispettivamente  $35^\circ$  e 15 kPa.

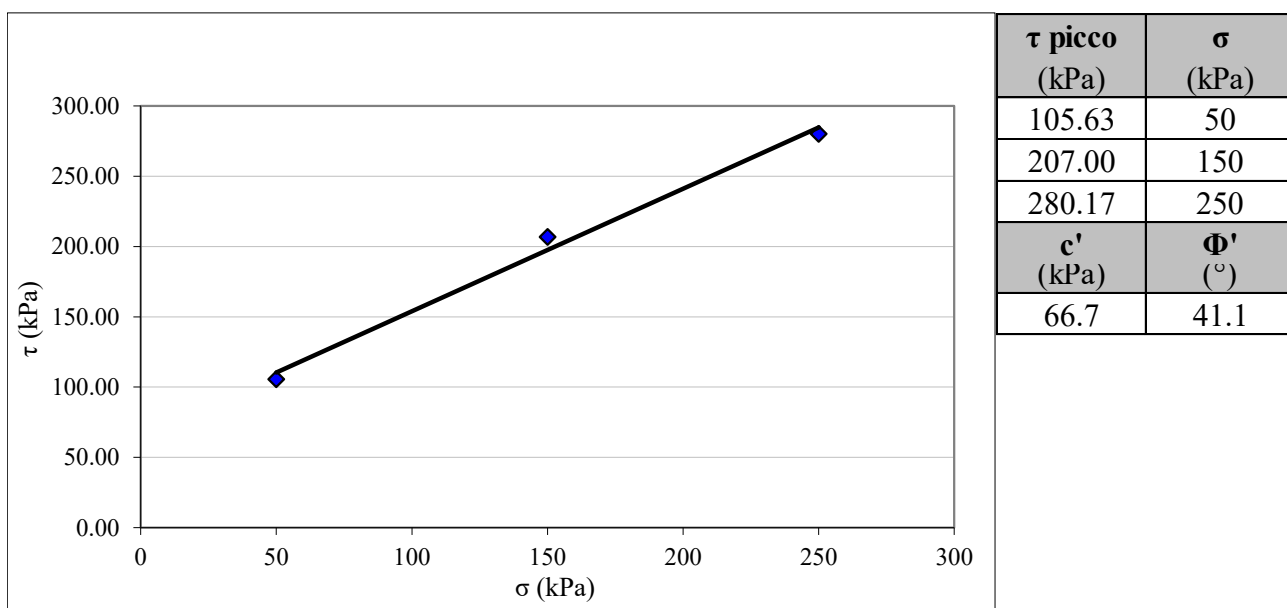


Figura 4.11: TD-2\_Involuppo di rottura

#### 4.1.4 Conducibilità idraulica

Presso il laboratorio di geotecnica dell'Università sono state condotte un totale di quattro prove di conducibilità idraulica eseguite tramite il permeametro a pareti flessibili al fine di valutare il comportamento della miscela terra-cemento in termini di coefficiente di permeabilità  $k$ .

La preparazione dei provini è stata compiuta come descritto nel *paragrafo 3.1.5* e ha portato ai risultati restituiti in Tabella 4.5.

Tabella 4.5: Prove di Permeabilità

provenienza	prova	miscela	campione	$W_0$ (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$S_{r,0}$ (%)	Stagionatura (gg)	$k$ (m/s)
CAMPO PROVA	k1	TSD+5 %CEM	TQ, confezionato in sito, compattato in laboratorio	9.9	1.88*	~64	14	3.3E-6
CAMPO PROVA	k2	TSD+5 %CEM	TQ, confezionato e compattato in laboratorio	12.0	1.96	~90	41	4.0E-10
CAMPO PROVA	k3	TSD+5 %CEM	1/3 trattenuto al #4 2/3 passante al #4	10.6	1.78	~58	34	2.1E-6
CAMPO PROVA	k4	TSD+5 %CEM	1/3 trattenuto al #4	14.4	1.72	~75	34	1.2E-6

L'asterisco vuole indicare una inesattezza nella compattazione del campione.

I risultati dell'analisi restituiscono un valore di coefficiente di permeabilità per cui il terreno risulta essere non idoneo per poter costituire il rivestimento di sponda, per il quale la normativa vigente richiede un valore di  $k$  non superiore a  $1 \times 10^{-9}$  m/s.

## 4.2 Risultati prove in situ

### 4.2.1 Densità

Operando nei modi descritti nel *paragrafo 3.2.1* sono state eseguite 22 prove di densità in situ i cui risultati sono riportati in Tabella 4.6

*Tabella 4.6: Densità in situ mediante metodo del cono di sabbia*

N° PROVA	W (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
1° Striscia 2° Strato	10.6	1.51
1° Striscia 3° Strato	13.2	1.78
1° Striscia 3° Strato	9.4	1.65
2° Striscia 1° Strato	13.5	1.89
2° Striscia 1° Strato	11.1	1.89
2° Striscia 2° Strato	10.4	1.71
2° Striscia 2° Strato	13.1	1.65
2° Striscia 3° Strato	11.8	1.88
2° Striscia 3° Strato	11.8	1.98
3° Striscia 1° Strato	13.7	1.71
3° Striscia 1° Strato	15.5	1.65
3° Striscia 2° Strato	11.0	1.75
3° Striscia 2° Strato	13.3	1.75
3° Striscia 3° Strato	9.8	1.80
3° Striscia 3° Strato	8.9	1.92
2° Striscia 3° Strato	15.6	1.83
2° Striscia 3° Strato	9.6	1.93
2° Striscia 3° Strato	12.1	1.88
3° Striscia 3° Strato	11.8	1.70
3° Striscia 3° Strato	8.7	1.84
3° Striscia 3° Strato	9.6	ANNULATO
1° Striscia 3° Strato	12.8	1.91

È possibile osservare che l'analisi ha permesso di ottenere valori di densità secca pressoché costanti e positivi, a eccezione di alcune prove in cui la densità assume valori leggermente più bassi di 1.7 g/cm<sup>3</sup>.

## 4.2.2 Prove di carico su piastra

In sito sono state svolte sette prove di carico su piastra che hanno permesso di valutare il modulo di compressibilità della miscela terra-cemento.

Di seguito sono riportati gli andamenti dei cedimenti in funzione delle tensioni applicate (Fig. 4.12, Fig. 4.13, Fig. 4.14, Fig. 4.15, Fig. 4.16, Fig. 4.17, Fig. 4.18).

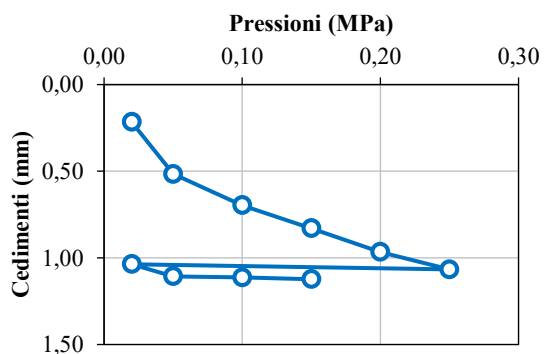


Figura 4.12: Prova PLT 1

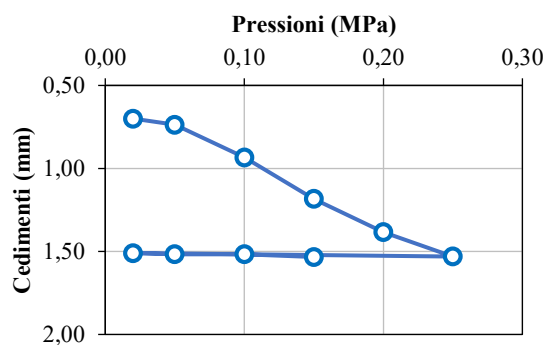


Figura 4.13: Prova PLT 24

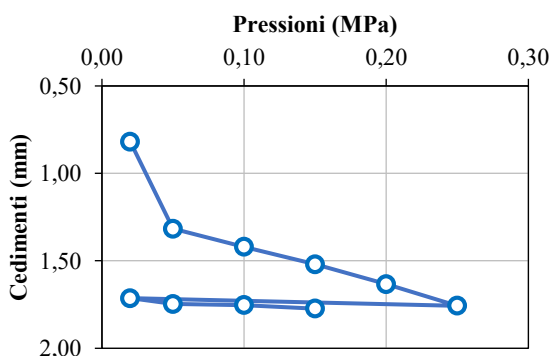


Figura 4.14: Prova PLT 3

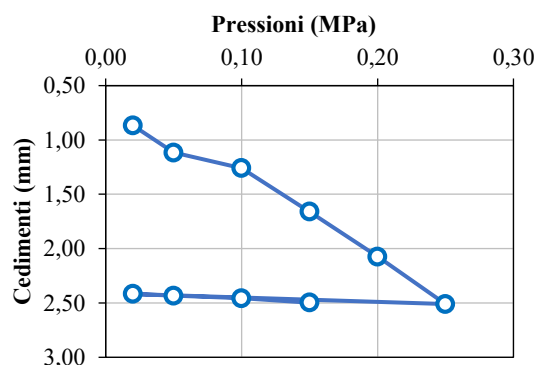


Figura 4.15: Prova PLT 4

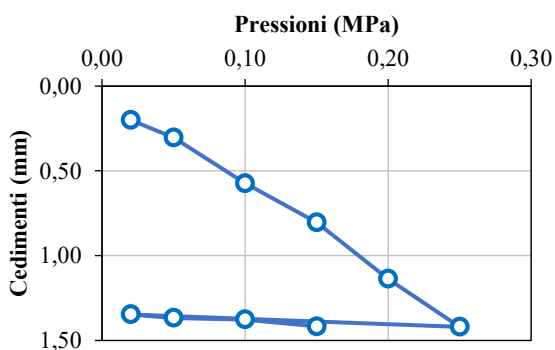


Figura 4.16: Prova PLT 5

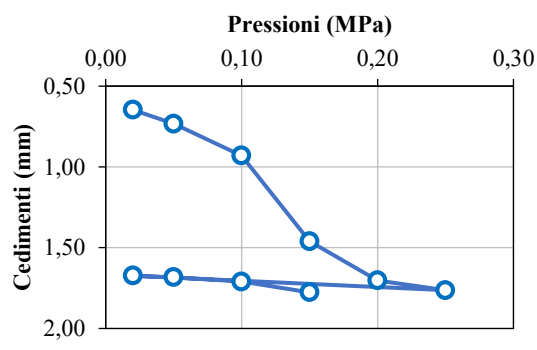


Figura 4.17: Prova PLT 6

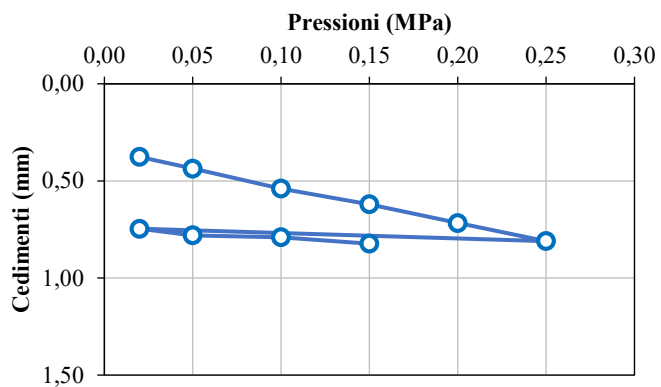


Figura 4.18: Prova PLT 7

I valori ottenuti dall'analisi sono poi stati inseriti nella Tabella 4.7.

Tabella 4.7: Prove di carico su piastra

stagionatura (gg)	1	11	12
	striscia 3	striscia 2	striscia 1
	<b>PLT 6</b>	<b>PLT 1</b>	
$M_d$ (MPa)	41.3	95.7	
$M_d'$ (MPa)	321	1800	
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	-	1.83	
W (%)	9.6	15.6	
	<b>PLT 5</b>	<b>PLT 2</b>	<b>PLT 7</b>
$M_d$ (MPa)	60.0	67.2	163.6
$M_d'$ (MPa)	600	1800	692
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.84	1.93	1.91
W (%)	8.7	9.6	12.8
	<b>PLT 4</b>	<b>PLT 3</b>	
$M_d$ (MPa)	55.2	147.5	
$M_d'$ (MPa)	474	1125	
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.70	1.88	
W (%)	11.8	12.1	



Dove:

- $M_d$  è relativo al 1° ciclo di carico ed è calcolato considerando l'intervallo di carico  $D_p=50\div 150$  kPa e il corrispondente cedimento  $D_s$ ;
- $M_d'$  è relativo al 2° ciclo di carico ed è calcolato considerando l'intervallo di carico  $D_p'=50\div 150$  kPa e il corrispondente cedimento  $D_s'$ .

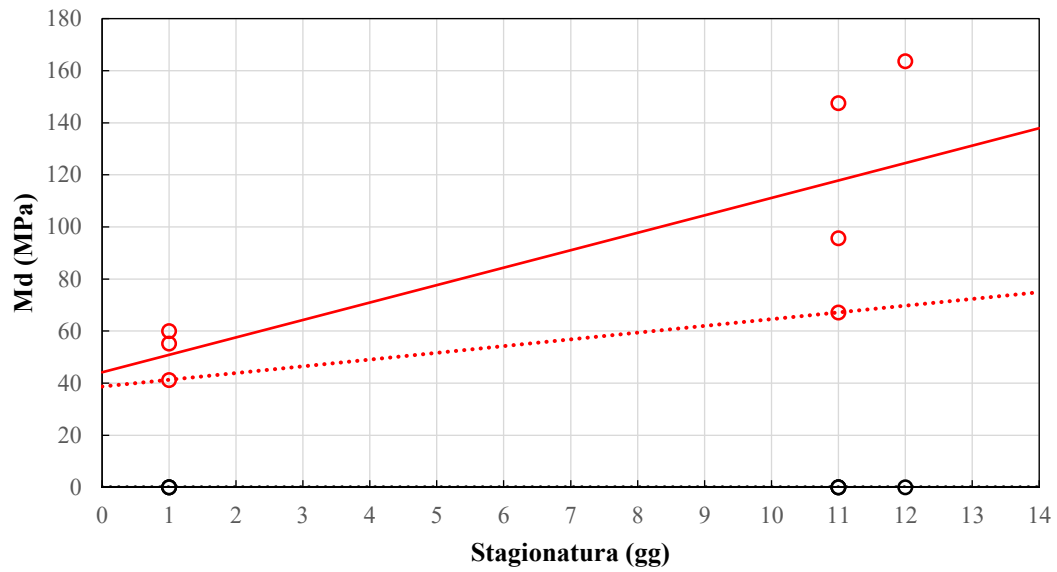
L'intervallo di carico considerato durante la prova è quello relativo a 50-150 kPa.

Poiché il modulo di compressibilità determinato dal primo ciclo di carico doveva avere i seguenti valori:

- $M_d \geq 50$  MPa alla stagionatura di 0-1 gg
- $M_d \geq 55$  MPa alla stagionatura di 2-6gg
- $M_d \geq 60$  MPa alla stagionatura oltre i 6 gg

Si evince dai risultati che le misure ottenute sono positive a eccezione della prova di carico su piastra 6 in quanto si ottiene  $M_d = 41.3$  MPa.

Di seguito in Figura 4.19 è riportato il diagramma rappresentativo dell'andamento del modulo di compressibilità in funzione della stagionatura.



*Figura 4.19: Modulo di compressibilità in funzione della stagionatura*

Il modulo di compressibilità cresce all'aumentare della stagionatura giustificato dal fatto che nel corso dei giorni il cemento additivato al terreno matura e di conseguenza il terreno additivato diventa sempre più rigido.

## 5 Conclusioni

In questo caso studio si sono valutati i risultati di indagini di laboratorio e in sito per una miscela terra-cemento da impiegare per la costruzione di un argine di contenimento di un pendio con instabilità superficiali adiacente ad una discarica per rifiuti non pericolosi in fase di ampliamento.

L'obiettivo è stato sia di comprendere se i risultati ottenuti dalle prove condotte in laboratorio in fase di progetto fossero ottenibili mediante la lavorazione in sito, sia quali fossero le procedure idonee allo scopo. Per questo è stato realizzato un campo-prova, grazie al quale, variando le modalità di lavorazione della miscela terra-cemento (soprattutto energia specifica di compattazione e contenuto d'acqua) è stato possibile verificare l'effettivo raggiungimento dei parametri minimi richiesti dal progetto e definire le relative modalità operative, che sono poi state utilizzate per la costruzione del rilevato di contenimento.

I risultati hanno evidenziato che la miscela terra-5%cemento, compattata in un range di contenuto d'acqua fra il 10 e il 15% in strati di 20-25 cm di spessore finale, consente di ottenere i parametri di progetto, ad eccezione della conducibilità idraulica che è risultata troppo alta affinché il rilevato possa costituire parte del rivestimento di sponda della discarica in ampliamento. Pertanto, è stata comunque prevista la realizzazione di un tradizionale rivestimento in argilla compattata nella porzione di discarica adiacente al rilevato di contenimento.

## Bibliografia

- REGOLIOSI P., STORONI RIDOLFI S. (2005) – *Introduzione alla geotecnica*. Dario Flaccovio Editore.
- Raviolo P.L. (1993) – *Il laboratorio geotecnico*. Editrice Controls.
- CIANCI S., GARBIN F., ORI F., PARENTE M., SCARAPAZZI M. (2016) – *La caratterizzazione geotecnica mediante prove di laboratorio*. Professione Geologo. Periodico dell'Ordine dei Geologi del Lazio.
- CIANCI S., PARENTE S. (2013) – *Il certificato di laboratorio: il taglio diretto*. Professione Geologo. Periodico dell'Ordine dei Geologi del Lazio n.37/2013.

## Sitografia

- Lucio Garofalo, *Wirtgen WR 2400 in azione. La stabilizzatrice Wirtgen WR 2400 coniuga un'eccezionale potenza con un'ottima manovrabilità e trasportabilità*, pubblicato il 15/02/2010 [https://www.stradeautostrade.it/macchine-stradali/wirtgen-wr-2400-in-azione/(ultima consultazione 07/09/2022)]
- Antonio Nirta, *Che cos'è un'analisi granulometrica*, pubblicato l'11/02/2019 [https://www.intrageo.it/geotecnica/analisi-granulometrica/#:~:text=L'obiettivo%20dell'analisi%20granulometrica,peso%20secco%20del%20campione%20iniziale. (ultima consultazione 07/10/2022)]
- Diego Barbero, *Prove di densità in situ: che cosa sono e quando richiederle*, pubblicato il 13/08/2019 [https://geologobarbero.it/prove-di-densita-in-situ-che-cosa-sono-e-quando-richiederle/ (ultima consultazione 07/10/2022)]
- Provincia Autonoma di Trento, *Misura del contenuto in acqua, della massa volumica e del peso dell'unità di volume*, pubblicazione n.d. [http://www.protezionecivile.tn.it/territorio/geotecnica/-Proveterre/pagina4.html#:~:text=Il%20contenuto%20d'acqua%20naturale,e%20ripesato%20a%20temperatura%20ambiente. (ultima consultazione 07/10/2022)]
- GeoProve Srl, *Prova di Taglio Diretto*, pubblicazione n.d. [https://www.geoprove.eu/divisioni-ed-attivita/laboratorio-terre-e-roccie/laboratorio-art/prova-di-taglio-diretto.html (ultima consultazione 07/10/2022)]
- RGM Prove di Ing. Rosa Marcello & C. Srl, *Prove di carico su piastra: metodologia di indagine*, pubblicazione n.d. [https://www.provedicarico.it/servizi/prove-di-carico-su-piastra/prove-di-carico-su-piastra/#:~:text=La%20prova%20di%20carico%20su,massa%20di%20terreno%20in%20sito. (ultima consultazione 07/10/2022)]
- Omega Soluzioni, *Prove di carico su piastra*, pubblicazione n.d. [https://omegasoluzioni.it/diagnosi-strutturale/prove-di-carico-su-piastra/ (ultima consultazione 07/10/2022)]
- GeoApp, *Prove in pozzetto*, pubblicazione n.d. [https://geoapp.geostru.eu/app/prove-in-pozzetto/ (ultima consultazione 07/10/2022)]
- EnciclopediaAmbiente, *Prova Proctor*, pubblicazione n.d. [https://www.enciclopediambiente.com/definizioni/prova-proctor/ (ultima consultazione 07/10/2022)]
- Wikipedia, *Prova Proctor*, ultima modifica il 06/10/2017 [https://it.wikipedia.org/wiki/Prova\_Proctor (ultima consultazione 07/10/2022)]