



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Edile

**ASPETTI GEOTECNICI DELLA COSTRUZIONE DI UN RILEVATO IN TERRA
CEMENTO**

**GEOTECHNICAL ASPECTS OF THE CONSTRUCTION OF A SOIL-CEMENT
EMBANKMENT**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof.ssa **Evelina Fratolocchi**

Tesi di Laurea di:

Michael Belardinelli

A.A. 2021/2022

Sommario

1.INTRODUZIONE.....	4
2.COSTRUZIONE DEL RILEVATO	6
2.1 Terreno utilizzato.....	6
2.2 Lavorazione della terra	6
2.3 Fasi di lavorazione.....	8
2.4 Realizzazione del rilevato	10
2.5 Barriera di fondo scarica.....	11
3.DESCRIZIONE DELLE PROVE	12
3.1 Prove eseguite in sito.....	12
3.1.1 Misura del contenuto d'acqua w.....	12
3.1.2 Controllo della quantità di cemento rilasciato dal mezzo.....	13
3.1.3 Prove di densità in sito mediante cono di sabbia	14
3.1.4 Prove di carico su piastra.....	16
3.1.4.1 Prova su piastra dinamica	16
3.1.4.2 Prova di carico su piastra statica	17
4. RISULTATI.....	20
4.1 Densità secca	20
4.2 Compressibilità	22
4.2.1 Risultati prove su piastra statica.....	22
4.2.2 Risultati prove su piastra dinamica	26
5. CONCLUSIONI.....	30
6. BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA	31

1.INTRODUZIONE

La presente tesi espone l'attività di tirocinio svolta nella discarica in località Belladanza nel comune di Città di Castello (PG), come previsto nel curriculum del corso di Laurea triennale di ingegneria edile. Il tirocinio riguarda la costruzione di un rilevato costituito da terreno compattato stabilizzato con cemento, facendo principale riferimento agli aspetti geotecnici. La realizzazione è stata progettata dalla società direttrice del polo impiantistico di Belladanza, in seguito alla instabilità superficiale manifestatasi in una porzione di pendio adiacente alla discarica per la quale è stato previsto un ampliamento. La costruzione dell'opera, oltre a soddisfare la necessità di stabilizzazione del pendio, consente l'incremento della volumetria della discarica.

L'attività di tirocinio svolta si suddivide in due parti: la prima si è incentrata sul campo-prova, dove sono state condotte diverse operazioni per riprodurre in sito la miscela terra-cemento con le stesse caratteristiche definite in fase progettuale, utilizzando i mezzi e macchinari di cui disponeva l'impresa appaltatrice. Questa fase è stata necessaria per mettere a punto le modalità operative da adottare per la costruzione dell'opera, mediante diversi tentativi e l'esecuzione di prove di controllo, con lo scopo di determinare l'intervallo di variabilità di alcune caratteristiche del rilevato. La seconda parte si è focalizzata sulla reale costruzione dell'argine di contenimento, fase in cui le mansioni principali che sono state svolte in sito, durante la fase di cantiere, si concentravano su attività di controllo, per assicurare la correttezza esecutiva della costruzione, e in prove per verificare che i parametri necessari al collaudo del rilevato soddisfacessero le prescrizioni definite a seguito del campo prova. Durante l'attività di tirocinio sono state eseguite prove in sito, determinando direttamente sul terreno trattato e compattato in sito i parametri fisici e meccanici necessari al completamento delle verifiche, e prove in laboratorio, utilizzando campioni di materiale prelevati in cantiere e analizzati nel laboratorio di geotecnica del Dipartimento SIMAU dell'Università Politecnica delle Marche.

Le prove di verifica che sono state eseguite durante il campo-prova e in corso d'opera, anche in relazione alle direttive del corpo normativo, sono state:

1. Misura del contenuto d' acqua della terra fresata (con almeno due determinazioni ogni 100 m²), verificando che la terra abbia un contenuto d'acqua, W , compreso nel seguente intervallo:

$$W = 10\% - 18\%$$

2. Controllo della quantità di cemento rilasciata dal mezzo per unità di superficie, in cui il risultato atteso è di 24 kg di cemento per m², su uno spessore di circa 20-25 cm, per ottenere

una percentuale di cemento pari ad almeno il 5% rispetto al peso secco della terra.

3. Prove di densità in sito mediante il metodo del cono di sabbia, verificando che la densità secca del terreno sia:

$$\gamma_d \geq 1.70 \text{ g/cm}^3$$

4. Misure del contenuto d'acqua in corso d'opera

$$w \sim 8-16\%$$

5. Prove di carico su piastra per la determinazione del modulo di compressibilità, M_d :

$$M_d \geq 50 \text{ MPa alla stagionatura di 0-1 gg}$$

$$M_d \geq 55 \text{ MPa alla stagionatura di 2-6 gg}$$

$$M_d \geq 60 \text{ MPa per stagionature oltre i 6 gg}$$

6. Prove di laboratorio per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio o della resistenza non drenata, per verificare i seguenti parametri di progetto:

$$a) c' = 15 \text{ kPa}$$

$$b) \varphi' = 35^\circ$$

$$c) c_u = 150 \text{ kPa}$$

7. Prove di laboratorio per la determinazione del coefficiente di conducibilità idraulica

8. Analisi granulometriche

La tesi è stata sviluppata relativamente alla seconda parte del tirocinio, in particolare nella esecuzione delle prove di controllo in corso d'opera, definendo le modalità di esecuzione delle verifiche e i risultati ottenuti da ciascuna di esse in relazione alle prescrizioni e le direttive definite durante la fase di progetto e del campo prova. Le prove effettuate durante la costruzione del rilevato sono state svolte in sito e sono identificate nei punti 1, 2, 3, 4 e 5 sopra riportati.

2.COSTRUZIONE DEL RILEVATO

2.1 Terreno utilizzato

Per la costruzione del rilevato è stato scelto di utilizzare del terreno di risulta, proveniente dagli scavi di parte della discarica stessa, che si trovava accantonato nella zona ad est della discarica (Fig.1), avendo cura di non utilizzare terreno visibilmente diverso rispetto a quello utilizzato durante il campo prova, nel caso in cui si dovesse rinvenire delle porzioni di materiale differente durante le lavorazioni.



Figura 1-2: Luogo di deposito del terreno

2.2 Lavorazione della terra

La lavorazione della terra con cemento, per ottenere il misto cementato utilizzato per la costruzione, ha richiesto: la preparazione dello strato sciolto di terra tal quale, la sua fresatura, eventuale aggiustamento del contenuto d'acqua ed ulteriore fresatura, l'aggiunta di cemento, l'ulteriore fresatura e la compattazione. La terra dopo essere stata additivata e fresata è stata immediatamente trasportata presso l'area di costruzione del rilevato, per poi stenderla e compattarla in strati secondo le modalità verificate nel campo-prova; nel paragrafo successivo verranno analizzate nello specifico le varie lavorazioni. Durante la lavorazione della terra e la realizzazione del rilevato è stato necessario impiegare gli stessi mezzi meccanici utilizzati nel campo-prova, per garantire gli stessi risultati precedentemente ottenuti; in particolare, i mezzi adoperati dall'impresa appaltatrice sono stati:

1. Compattatore HAMM 3250 con rullo munito di protrusioni (Fig. 5)
2. Riciclatrice Wirtgen WR 2500 S (Fig.4)
3. Escavatore con pala liscia ed escavatore con pala dentata (Fig. 6)
4. Autobotte con barra posteriore spandi-acqua della lunghezza di 2.2 m (Fig.3)

5. Spandi-cemento con nastro posteriore di lunghezza pari a 2.6 m (Fig.2)

6. Camion ribaltabile per lo scarico del materiale (Fig.7)



Figura 2: Spandi-cemento



Figura 3: Autobotte



Figura 5: Compattatore



Figura 4: Riciclatrice Wirtgen



Figura 6: Escavatore



Figura7: Camion ribaltabile

2.3 Fasi di lavorazione

A seguito del campo prova sono state definite le fasi di lavorazione del terreno per la costruzione del rilevato e le verifiche annesse al processo. In generale la procedura si articola nei seguenti passaggi:

1. Stesa di uno strato di terra, mediante escavatore, di spessore non superiore a 30 cm, provvedendo ad ottenere una superficie pianeggiante
2. Fresatura dello strato con fresatrice regolata per 30 cm di profondità eseguendo almeno tre passaggi in tutta la superficie
3. Misura del contenuto d'acqua della terra fresata, eseguendo almeno 2 determinazioni ogni 100 m² circa e prelevando almeno 200 g di terra per ciascuna determinazione. Il controllo è stato effettuato utilizzando un forno a microonde, ottenendo i risultati in 10-15 minuti, per verificare che la terra abbia un contenuto d'acqua, w , compreso nel seguente intervallo:

$$w = 10\% \div 18\%$$

In relazione ai risultati ottenuti dalla determinazione del contenuto d'acqua le lavorazioni sono state condotte diversamente:

- (a) Se il w è nel range suddetto si può procedere con l'aggiunta di cemento (punto 4).
- (b) Nel caso di $w < 10\%$ si deve aggiungere acqua mediante autobotte con velocità minima, sapendo che, in base a quanto ottenuto dal campo-prova:
 - con 2 passaggi (1A+1R) per superficie si ottiene un incremento del contenuto d'acqua di circa 1-2%
 - con 4 passaggi (2A+2R) per superficie si ottiene un incremento del contenuto d'acqua di circa 2-3%.

Dopo l'aggiunta di acqua la terra va nuovamente fresata con le modalità descritte al punto 2 e va misurato il w con la procedura descritta al punto 3.

4. Passaggio del mezzo spandi-cemento in modo da coprire tutta la superficie dello strato, secondo le direttive definite durante il campo prova
5. Ulteriore fresatura dello strato di terreno
6. Immediato carico della terra lavorata su automezzo, trasporto nell'area di costruzione del rilevato

7. Scarico graduale della terra lavorata presso l'area del rilevato in modo tale da evitarne la segregazione.
8. Immediata stesa della terra lavorata mediante escavatore, provvedendo al suo rimescolamento e formando uno strato di circa 20 cm di spessore, dopodiché si deve eseguire un doppio passaggio dell'escavatore cingolato per superficie, con sovrapposizione di almeno 0.5 m.
9. Compattazione con rullo munito di protrusioni statico (cioè senza vibrazione) mediante 4 passaggi per superficie e sovrapposizione dei passaggi di almeno 0.5 m.
10. Lo strato successivo di terra lavorata deve essere steso direttamente sulla superficie scabra risultante dalla compattazione dello strato inferiore eseguita con rullo con protrusioni. Ciò garantisce la compenetrazione degli strati via via compattati (come dimostrato dal campo-prova).



Figura 8: Fresatura del terreno



Figura 9: Aggiunta dell'acqua mediante autobotte



Figura 10: Trasporto del materiale



Figura 11: Compattazione dello strato

2.4 Realizzazione del rilevato

Le varie lavorazioni per ricreare la miscela terra-cemento sono state eseguite in un'area di lavoro esterna a quella della costruzione del rilevato (Fig.9), all' interno del sito della discarica, così da garantire la sicurezza durante l'esecuzione dei lavori, vista la mancanza di spazio nell'area di realizzazione del rilevato. Prima di poter avviare la costruzione dell'opera è stato necessario preparare il piano di posa del rilevato tramite l'asportazione di materiale vegetale, l'eliminazione del terreno risultante dai distacchi del pendio, la preparazione della superficie con una contropendenza verso monte di almeno il 2% e la compattazione con rullo statico munito di protrusioni eseguendo due passaggi su tutta la superficie. La realizzazione dell'opera è stata eseguita tramite la sovrapposizione di vari strati della miscela terra-cemento compattata, per un'altezza massima di circa 20 cm l'uno e una lunghezza e larghezza variabile, secondo le modalità già definite nel capitolo 2.3, mantenendo sempre una contropendenza verso monte. Inoltre, la larghezza complessiva del rilevato è stata incrementata di almeno 1.5 m rispetto alla larghezza di progetto per ottenere un rilevato finale che fosse sufficientemente compattato, poiché la porzione esterna non può risultare adeguatamente costipato sia per assenza di contrasto, sia perché il compattatore non può operare in adiacenza alla scarpata. Terminata la realizzazione del rilevato, l'opera è stata completata eseguendo la sua riprofilatura per ottenere le dimensioni e le pendenze delle scarpate di progetto.



Figura 12: Luogo di lavorazione del terreno



Figura 13: Luogo di costruzione del rilevato

2.5 Barriera di fondo discarica

Raggiunta l'altezza progettuale, la parte del rilevato che si troverà in adiacenza al rivestimento di scarpata della porzione di discarica in ampliamento è stata completata realizzando una barriera di fondo, come previsto dalle normative vigenti, per l'impermeabilizzazione del suolo e la tutela ambientale del sito; infatti, la barriera geologica è stata determinata in modo tale da assicurare una capacità di attenuazione sufficiente per evitare rischi per il suolo e le acque superficiali e sotterranee. Nel caso di impianti di discarica per rifiuti non pericolosi, come quello in esame, il substrato di base della discarica deve essere costituito da una barriera geologica naturale, caratterizzata da conducibilità idraulica k non superiore a 1×10^{-9} m/s e da uno spessore pari ad almeno 1 m. Nel caso della discarica di Belladanza è stato realizzato uno strato di argilla compattata dello spessore di 1 metro. Al di sopra della barriera è stato posto in opera uno strato di impermeabilizzazione artificiale costituito da una membrana in HDPE protetta da un geotessile. Il rivestimento di sponda è stato completato con la disposizione di uno strato drenante di 0.5 m di spessore realizzato con materiale granulare (ghiaia). La geomembrana e il geotessile sono stati ancorati in una trincea appositamente realizzata (Fig.13): la membrana è stata inserita all'interno della trincea, che successivamente è stata riempita con terreno.



Figura 12: Trincea per fissaggio membrana



Figura 13: Barriera di fondo discarica

3. DESCRIZIONE DELLE PROVE

3.1 Prove eseguite in sito

3.1.1 Misura del contenuto d'acqua w

SCOPO DELLA PROVA

La prova permette di determinare il contenuto d'acqua w, definito come la quantità, solitamente espressa in percentuale, di acqua presente nel terreno rispetto alla fase solida:

$$w = \frac{P_w}{P_s} \quad (1)$$

Dove:

P_w = peso dell'acqua

P_s = peso del solido

ESECUZIONE DELLA PROVA

Sperimentalmente la misura del contenuto d'acqua viene fatta confrontando il peso del terreno appena prelevato e il peso del medesimo campione essiccato, la differenza tra le due misurazioni corrisponde al peso dell'acqua. In laboratorio per determinare il peso secco del terreno prelevato, il campione viene collocato in un apposito forno con una temperatura costante di 110° per 24 ore; tuttavia, durante i controlli in corso d'opera, per poter velocizzare la verifica, è stato utilizzato un forno a microonde, così da determinare il peso secco dei campioni e successivamente ricavare il peso dell'acqua, in un tempo di circa 10-15 minuti.



Figura 14: Attrezzatura utilizzata per la pesa e l'essiccamento del terreno

3.1.2 Controllo della quantità di cemento rilasciato dal mezzo

SCOPO DELLA PROVA

L'esecuzione del controllo permette di verificare che la quantità di cemento rilasciata dal mezzo, durante le fasi di lavorazione, sia quella stabilita in fase progettuale e durante il campo prova.

ATTREZZATURA

- Mezzo spandi-cemento
- Piastra quadrata di raccolta del cemento
- Bilancia

ESECUZIONE DELLA PROVA

A seguito dei risultati ottenuti dal campo prova si è visto che per poter ottenere una quantità minima del 5% del peso secco del terreno, di cemento nella miscela, il mezzo stendi-cemento deve procedere in 2° ridotta a 450 giri/min, in questo modo si riesce ad ottenere una quantità di 24 kg di cemento per metro quadrato di superficie, su uno strato di 30 cm. La verifica è stata eseguita almeno una volta nell'arco di una giornata di lavoro nell'area destinata alla lavorazione del terreno, prima di avviare le lavorazioni giornaliere. L'esecuzione del controllo prevede il posizionamento di una piastra quadrata di dimensione 25x25cm al di sotto della macchina spandi-cemento e successivamente azionare il mezzo. La verifica ha risultato positivo se dopo aver pesato l'elemento con all'interno il cemento rilasciato dal mezzo, vengono raggiunti i valori minimi stabiliti durante il campo prova. A prova terminata l'elemento di raccolta avrebbe dovuto contenere 6 kg netti di cemento per poter considerare la verifica soddisfatta.



Figura 15: Passaggio della macchina spandi-cemento

3.1.3 Prove di densità in sito mediante cono di sabbia

SCOPO DELLA PROVA

La prova viene utilizzata per poter determinare in sito la densità secca e il peso di volume del secco di un terreno tramite l'utilizzo di un cono di sabbia considerando che il metodo non è applicabile a terreni che presentano grandi quantità di rocce o materiale grossolano, né tanto meno per suoli organici. I controlli sono stati fatti su ogni strato del rilevato, con una frequenza di una misura ogni 300 m² circa, effettuando almeno un controllo quando la superficie totale dello strato era minore.

ATTREZZATURA

Per poter eseguire la prova è necessario essere in possesso di:

- Contenitore di sabbia: un barattolo avente capacità di volume superiore a quella richiesta per riempire il foro di prova e il cono durante il test
- Cono standardizzato: un apparecchio staccabile costituito da una valvola cilindrica con un orifizio di circa 13 mm
- Una piastra di base: piastra in acciaio con un foro centrale
- Sabbia: la sabbia deve essere pulita, asciutta, uniforme per densità e granulometria con peso e densità noti a priori
- Sacchetti per la raccolta del materiale estratto dal foro
- Attrezzi per eseguire lo scavo

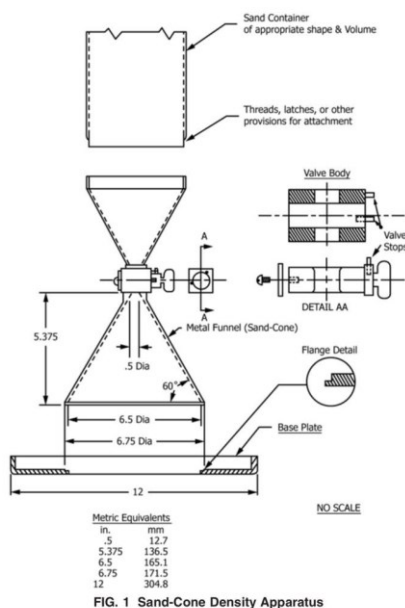


Figura 17: Apparato del cono di sabbia



Figura 18: Esecuzione della prova

ESECUZIONE

Dopo aver preparato la superficie rasando il terreno, si fa aderire perfettamente la piastra di base e la si fissa tramite chiodatura al suolo. Si procede quindi allo scavo del pozzetto di prova in modo da realizzare una forma grossomodo cilindrica, avendo cura di regolarizzare le pareti dello scavo. Il materiale scavato viene raccolto in un sacchetto di tara nota. Si avvita il cono al contenitore con la sabbia calibrata e si posiziona il sistema sulla piastra di base; si apre la valvola e si lascia defluire la sabbia fino al completo riempimento del foro realizzato, infine si chiude la valvola e si rimuove il boccione che dovrà essere richiuso e pesato. Dalla prova è possibile determinare il volume del foro che è stato scavato e conoscendo la massa del terreno conseguente allo scavo, riusciamo a individuare la densità del terreno.

Si riportano in seguito le operazioni necessarie al calcolo della densità secca di un terreno:

- 1) Calcolo del volume del foro:

$$V = (M_1 - M_2) / \rho \quad (2)$$

In cui:

V = volume del foro

M_1 = Massa della sabbia utilizzata per riempire il pozzetto e il cono

M_2 = Massa del cono

ρ = Densità della sabbia

- 2) Calcolo della massa secca del terreno prelevato dal foro:

$$M_3 = M_4(100 + W) \quad (3)$$

M_3 = Massa secca del campione

M_4 = Massa del campione

W = Contenuto d'acqua

- 3) Calcolo della densità secca del terreno:

$$\rho = M_3 / V \quad (4)$$

ρ = Densità secca del terreno

3.1.4 Prove di carico su piastra

SCOPO DELLA PROVA

La prova di carico su piastra è una tecnica di indagine che consente di misurare il cedimento verticale di un terreno in sito sottoposti ad incrementi di pressione. Se si riesce a raggiungere la rottura, si può determinare la resistenza non drenata del terreno.

Durante l'attività svolta nella discarica sono state eseguite due tipi di prove di carico:

- Prova di carico su piastra statica
- Prova di carico su piastra dinamica

La differenza tra le due, oltre alla procedura d'esecuzione, è che la prova su piastra statica è regolata da normativa italiana (CNR BUN.146 del 14 dicembre 1992) al contrario della prova su piastra dinamica che non è ancora riconosciuta sul territorio nazionale italiano, ma la sua validità è garantita da paesi esteri come la Germania (normative di riferimento tedesche ZTV E - ZTV A); un vantaggio della prova di carico dinamica è che risulta essere una prova di rapido svolgimento, garantendo l'affidabilità dei risultati; infatti, può essere effettuata in modo veloce e preciso da una singola persona e senza dover impiegare un contrasto come invece richiede la prova di carico statica, che necessita di almeno 30 minuti per l'esecuzione. Le prove sono state eseguite con una frequenza di una ogni circa 300 m², alternando tra prove di piastra statica e dinamica, eseguendone almeno una nel caso di superfici di estensione minore.

3.1.4.1 Prova su piastra dinamica

La prova di carico dinamica permette di identificare in modo rapido il modulo di deformazione e la compattazione di un terreno tramite l'ausilio di un dispositivo apposito.

ATTREZZATURA

La piastra è composta da tre parti:

- Il dispositivo di carico con un peso di 10 kg
- La piastra di carico con diametro di 30 cm
- Un sensore di accelerazione collegato alla centralina che traduce il segnale del sensore.

ESECUZIONE DELLA PROVA

La prova viene eseguita lasciando cadere il peso di 10 kg per tre volte sulla piastra, da un'altezza di circa 70 cm. Gli urti generati dal peso generano un cedimento al suolo che viene misurato e tradotto dal sensore in modulo di deformazione che viene restituito in MN/m². Grazie alla stampante integrata, è inoltre possibile stampare direttamente sul posto il risultato della prova. Il dispositivo calcola il modulo di deformazione dinamico “Evd” quale parametro indicativo della deformabilità del terreno sotto l'impulso di un carico verticale, definito dalla seguente formula:

$$Evd = 1,5 \cdot r \cdot \sigma_{max} / s_{max} \quad (5)$$

dove:

Evd = Modulo di deformazione dinamico

σ_{max} = Tensione massima

s_{max} = Cedimento massimo



Figura 16: Prova di carico dinamica in sito

3.1.4.2 Prova di carico su piastra statica

ATTREZZATURA

I materiali necessari per l'esecuzione della prova sono:

- Piastra circolare in acciaio di spessore non minore di 20 mm e diametro di 300 mm (Fig.20)
- Cerniera sferica per il centramento del carico, da disporre al di sopra della piastra di carico

- Martinetto idraulico o meccanico della portata di circa 50 KN (Fig. 21)
- Prolunghe costituite da più aste cilindriche avvitate tra loro
- Comparatori centesimali
- Bracci metallici su cui posizionare i comparatori (Fig. 23)
- Cronometro



Figura 17:Apparato prova



Figura 18: Martinetto idraulico



Figura 19:Strato di sabbia



Figura 20:Bracci comparatori

ESECUZIONE DELLA PROVA

Per l'esecuzione della prova è necessario disporre di un contrasto fisso, che può essere costituito dalla parte posteriore del telaio di un autocarro e si dispone la piastra sulla superficie dello strato su cui si vuol determinare il modulo di deformazione. È necessario eliminare eventuali irregolarità superficiali per mezzo di un sottile strato di sabbia, curando che il contatto tra la piastra e il terreno sia il più completo possibile. La prova inizia posizionando la scatola cilindrica al di sopra della piastra e continua disponendo il martinetto e le prolunghie necessarie per bloccare il sistema al contrappeso. Successivamente vengono posizionati 3 comparatori, facendoli appoggiare con cura su 3 bracci comparatori posti sul perimetro della piastra con un'angolazione di 120°. La prova inizia applicando un carico di assetto, tramite il martinetto, di 0,02 N/mm², si attende che i cedimenti siano esauriti e si azzerano i comparatori. In seguito, si porta il carico al valore di 0,05 N/mm² e si effettua una prima lettura dei 3 comparatori determinando la media tra i 3 cedimenti. Vengono quindi applicati incrementi di carico effettuando ogni 2 minuti le corrispondenti letture, fino alla stabilizzazione dei cedimenti e ad arrivare ad un carico di 0,15 N/mm². La prova prevede anche un ciclo di scarico in cui vengono gradualmente abbassate le pressioni fino a ritornare a 0,05 N/mm²; tuttavia, nelle nostre prove abbiamo fatto riferimento unicamente al primo ciclo di carico. Eseguita la prova, si rimuove l'apparecchiatura e si effettua un prelievo di materiale in prossimità del punto di misura per misurare l'umidità. I risultati vengono poi riportati in grafici con ascisse la pressione e ordinata il cedimento. Per il calcolo del modulo di deformazione si è fatto riferimento al primo ciclo di carico, considerando l'intervallo 50-150 KPa e il corrispondente cedimento, ed è stato ottenuto a mezzo della relazione:

$$M_d = \frac{\Delta P}{\Delta S} d \quad (6)$$

Dove:

M_d = Modulo di deformazione

ΔP = Incremento di pressione trasmesso dalla piastra

ΔS = Cedimento della superficie caricata

d = Diametro della piastra

4. RISULTATI

4.1 Densità secca

Attraverso l'esecuzione dei conici di sabbia è stato possibile determinare la densità secca della miscela terra-cemento compattata. In seguito, si riportano per esteso i valori e i risultati delle prove effettuate fino al giorno 14/03/2022 e successivamente si riportano in un grafico i risultati di tutte le prove eseguite, definendo un andamento medio dei valori ottenuti. Per identificare la posizione in cui le prove sono state effettuate si è fatto riferimento a delle sezioni, identificate in sito tramite l'infissione di paletti e, rispettivamente, al lato monte e lato valle della discarica. Nella tabella successiva vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove di densità in sito, evidenziando in rosso i valori delle grandezze che non hanno soddisfatto i limiti.

Tabella 1: Risultati delle prove di densità in sito

Numero prova	Descrizione Campione	Vol Scavo	Massa Terreno	Y in sito	w sito	Yd	Yd
		<i>dm³</i>	<i>kg</i>	<i>kN/m³</i>	<i>%</i>	<i>g/cm³</i>	<i>kN/m³</i>
1	Misto cementato	1.789	3.428	19.160	11.07	1.73	17.25
2	Misto cementato	1.708	3.332	19.506	12.53	1.73	17.33
3	Misto cementato	1.757	3.479	19.799	13.31	1.75	17.47
4	Misto cementato	1.610	3.206	19.919	11.73	1.78	17.83
5	Misto cementato	2.331	4.540	19.480	7.38	1.81	18.14
6	Misto cementato	2.992	5.158	17.240	11.10	1.58	15.77
7	Misto cementato	2.369	3.765	15.890	9.97	1.45	14.45
8	Misto cementato	1.852	3.679	19.870	10.23	1.80	18.02
9	Misto cementato	1.463	3.287	22.460	7.92	2.08	20.81
10	Misto cementato	1.582	3.288	20.780	11.67	1.86	18.61
11	Misto cementato	2.267	3.671	16.200	12.08	1.45	14.45
12	Misto cementato	2.127	2.140	10.060	9.03	0.92	9.23
13	Misto cementato	1.486	3.273	22.020	9.07	2.02	20.19
14	Misto cementato	1.307	2.710	20.740	12.03	1.85	18.51
15	Misto cementato	1.876	3.041	16.210	10.29	1.47	14.70
16	Misto cementato	1.312	3.045	23.200	11.10	2.13	21.33

Tabella 2: Posizione delle prove in sito

N° PROVA	POSIZIONE
1	3° strato +28m da inizio stesa lato pista 1 (lato valle)
2	3° strato +28m da inizio stesa lato pista 1 (lato valle)
3	4° strato +55m da inizio stesa lato pista 1 (lato valle)
4	4° strato +55m da inizio stesa lato pista 1 (lato monte)
5	6° strato -11m da sezione N°6 lato pista 1 (lato monte)
6	6° strato +25m da sezione N°6 lato pista 1 (lato valle)
7	-25m da sez N°6 (centrale)
8	+26m da sez N°6 (lato valle)
9	-15m da sez N°6 (lato monte)
10	+20m da sez N°6 (centrale)
11	-22m da sez N°6 (lato monte)
12	+28m da sez N°6 (lato valle)
13	-18m da sez N°6 (centrale)
14	+23m da sez N°6 (lato monte)
15	-18m da sez N°6 (lato valle)
16	+12m da sez N°6 (lato valle)

In generale le prove hanno avuto esiti positivi ad eccezione di alcune: i valori di densità secca delle prove N° 6,7,11,12 e 15 hanno evidenziato dei valori di poco minori di $1,7 \text{ g/cm}^3$, tranne una, pertanto durante le lavorazioni, come definito durante la fase di campo prova, si è reso necessario effettuare un ulteriore passaggio con il rullo compattatore per tutta l'estensione dello strato realizzato. Nel grafico seguente si esamina l'andamento dei risultati ottenuti da tutte le prove di densità secca effettuate, si evidenzia che la maggior parte delle prove ha ampiamente soddisfatto le aspettative; tuttavia, si riscontra la presenza di alcuni valori al di sotto della media.

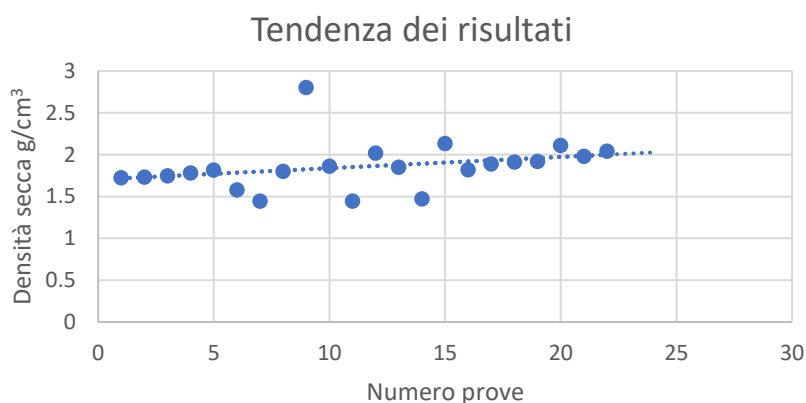


Grafico 1: Andamento dei risultati dei coni di sabbia

4.2 Compressibilità

4.2.1 Risultati prove su piastra statica

L'esecuzione delle prove su piastra ha permesso di determinare il modulo di deformazione dello strato realizzato, i risultati delle prove sono stati elaborati e riportati sotto forma di tabelle e grafici. Di seguito si riportano i risultati delle 7 prove effettuate nei giorni compresi tra l'11/03/2022 e il 29/03/2022. Per l'esecuzione della prova sono stati utilizzati gli stessi strumenti, garantendo l'omogeneità dell'acquisizione e dell'elaborazione dei dati.

Dimensioni piastra:

$\varnothing_{\text{piastra}}$	A_{piastra}
mm	mm ²
300	70686

Tabella 3: Prova su piastra statica n°1

PLT n° 1 - 11/03/2022		Letture a t=2min			Cedimento medio
Pressioni	Forza	1	2	3	
N/mm ²	kN	mm/100	mm/100	mm/100	mm
0.00	0.00				0.00
0.02	1.41	27	55	36	0.39
0.05	3.53	48	75	44	0.56
0.10	7.07	68	101	69	0.79
0.15	10.60	77	119	88	0.95

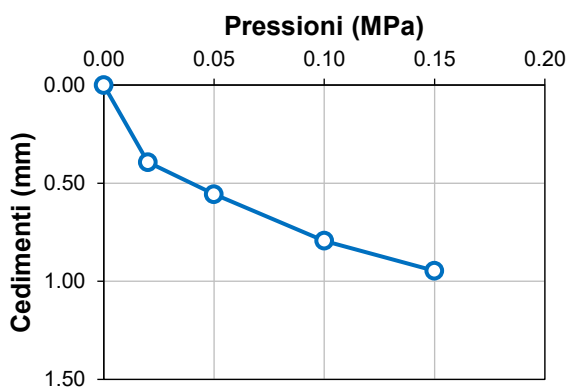


Grafico 2: Prova n°1

Tabella 4: Risultati prova n°1

Primo ciclo di carico		
Δp	Δs	M_d
N/mm ²	mm	N/mm ²
0.10	0.39	76.9

Tabella 5: Prova su piastra statica n° 2

PLT n° 2 - 11/03/2022		Letture a t=2min			
Pressioni	Forza	1	2	3	Cedimento medio
N/mm^2	kN	$mm/100$	$mm/100$	$mm/100$	mm
0.00	0.00				0.00
0.02	1.41	67	105	12	0.61
0.05	3.53	91	116	63	0.90
0.10	7.07	102	123	77	1.01
0.15	10.60	131	142	97	1.23

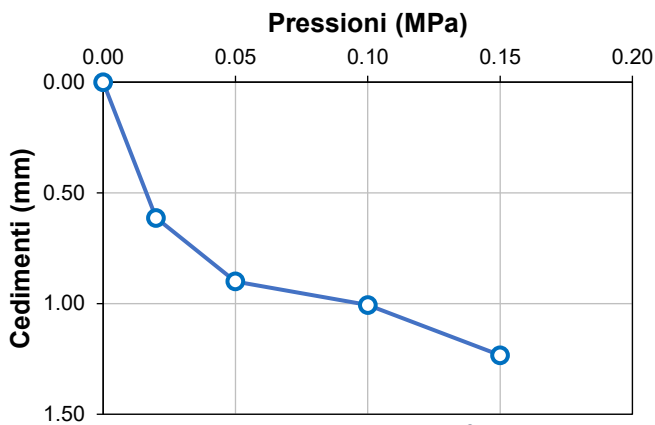


Grafico 3: Prova n°2

Tabella 6: Risultati prova n°2

Primo ciclo di carico		
Δp	Δs	M_d
N/mm^2	mm	N/mm^2
0.10	0.33	90.0

Tabella 7: Prova su piastra statica n°3

PLT n° 3 - 14/03/2022		Letture a t=2min			
Pressioni	Forza	1	2	3	Cedimento medio
N/mm^2	kN	$mm/100$	$mm/100$	$mm/100$	mm
0.00	0.00				0.00
0.02	1.41	100	305	115	1.73
0.05	3.53	155	381	161	2.32
0.10	7.07	185	406	192	2.61
0.15	10.60	220	429	22	2.90

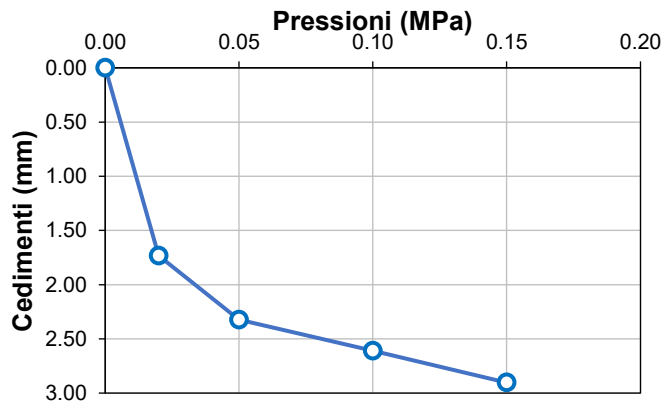


Grafico 3: Prova n°3

Tabella 8: Risultati prova n°3

Primo ciclo di carico		
Δp	Δs	M_d
N/mm^2	Mm	N/mm^2
0.10	0.58	51.7

Tabella 9: Prova su piastra statica n°4

PLT n° 4 - 14/03/2022		Letture a t=2min			
Pressioni	Forza	1	2	3	Cedimento medio
<i>N/mm²</i>	<i>kN</i>	<i>mm/100</i>	<i>mm/100</i>	<i>mm/100</i>	<i>mm</i>
0.00	0.00				0.00
0.02	1.41	50	150	250	1.50
0.05	3.53	100	200	300	2.00
0.10	7.07	113	220	378	2.37
0.15	10.60	117	225	378	2.40

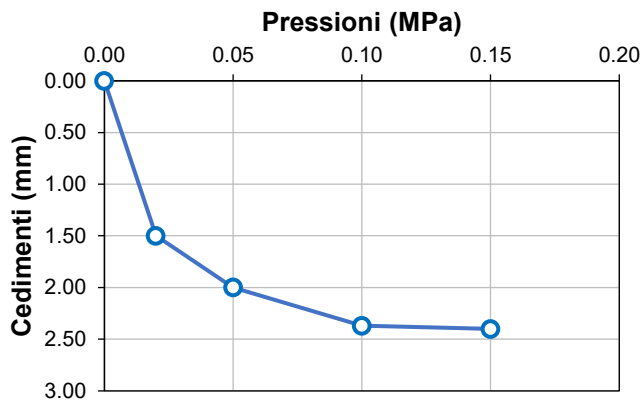


Grafico 4: Prova n°4

Tabella 10: Risultati prova n° 4

Primo ciclo di carico		
Δp	Δs	M_d
<i>N/mm²</i>	<i>mm</i>	<i>N/mm²</i>
0.10	0.40	75.0

Tabella 11: Prova su piastra statica n°5

PLT n° 5 - 15/03/2022		Letture a t=2min			
Pressioni	Forza	1	2	3	Cedimento medio
<i>N/mm²</i>	<i>kN</i>	<i>mm/100</i>	<i>mm/100</i>	<i>mm/100</i>	<i>mm</i>
0.00	0.00				0.00
0.02	1.41	118	221	207	1.82
0.05	3.53	172	325	311	2.69
0.10	7.07	198	371	335	3.01
0.15	10.60	228	406	348	3.27

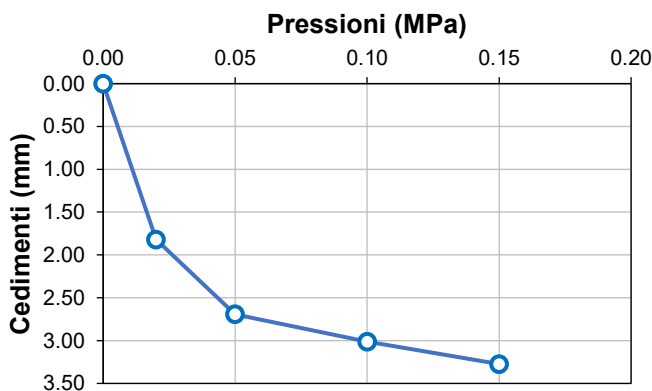


Grafico 5: Prova n° 5

Tabella 12: Risultati prova n°5

Primo ciclo di carico		
Δp	Δs	M_d
<i>N/mm²</i>	<i>mm</i>	<i>N/mm²</i>
0.10	0.58	51.7

Tabella 13: Prova su piastra statica n°6

PLT n° 6 - 24/03/2022		Letture a t=2min			
Pressioni	Forza	1	2	3	Cedimento medio
N/mm^2	kN	$mm/100$	$mm/100$	$mm/100$	mm
0.00	0.00				0.00
0.02	1.41	24	185	310	1.73
0.05	3.53	58	224	372	2.18
0.10	7.07	129	230	399	2.53
0.15	10.60	161	238	410	2.70

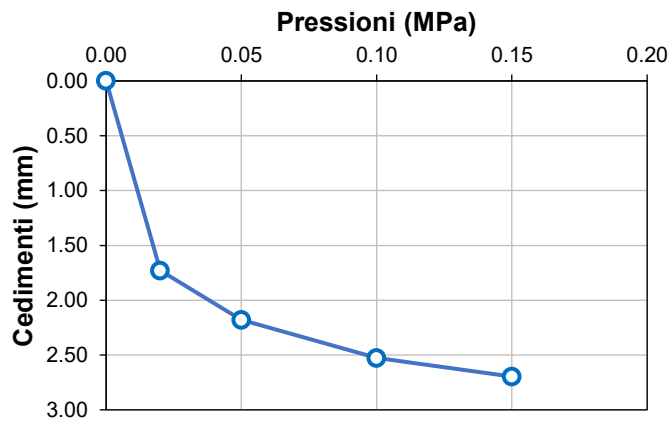


Grafico 6: Prova n°6

Tabella 14: Risultati prova n°6

Primo ciclo di carico		
Δp	Δs	M_d
N/mm^2	mm	N/mm^2
0.10	0.52	58.1

Tabella 15: Prova su piastra statica n°7

PLT n° 7 - 29/03/2022		Letture a t=2min			
Pressioni	Forza	1	2	3	Cedimento medio
N/mm^2	kN	$mm/100$	$mm/100$	$mm/100$	mm
0.00	0.00				0.00
0.02	1.41	50	235	333	2.06
0.05	3.53	70	331	335	2.45
0.10	7.07	71	362	336	2.56
0.15	10.60	78	391	340	2.70

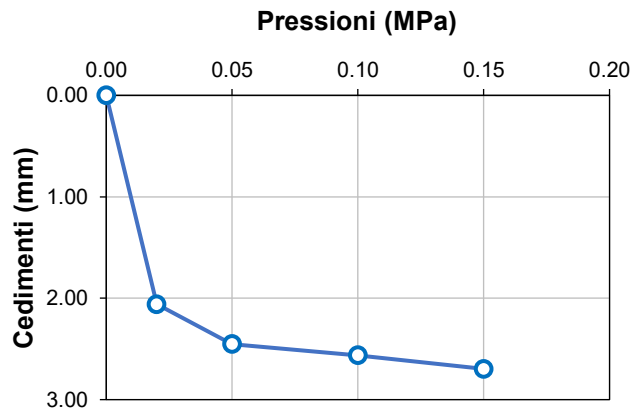


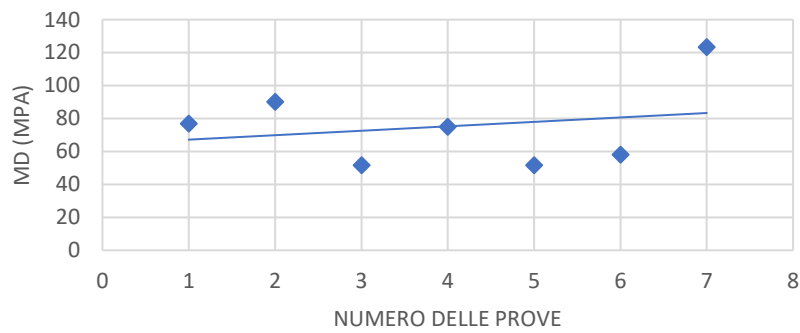
Grafico 7: Prova n°7

Tabella 16: Risultati della prova n°7

Primo ciclo di carico		
Δp	Δs	M_d
N/mm^2	mm	N/mm^2
0.10	0.24	123.3

Tutte le prove si riferiscono ad un tempo di stagionatura massimo di un giorno, avendo condotte le prove immediatamente dopo la compattazione degli strati o la mattina seguente, pertanto, l'esito previsto avrebbe dovuto essere di un modulo di deformazione maggiore di 50,00 MPa, sulla base delle verifiche condotte durante il campo prova. Le prove hanno soddisfatto i risultati attesi ottenendo valori ampiamente oltre i limiti nella maggior parte delle verifiche, ad eccezione delle prove N° 3 e N° 5, ma ad ogni modo hanno comunque superato il valore minimo imposto. Come per le prove di densità si riporta l'andamento dei risultati ottenuti da tutte le prove su piastra statica effettuando sottolineando una certa omogeneità nei risultati.

TENDENZA DEI RISULTATI



4.2.2 Risultati prove su piastra dinamica

Infine, si riportano i risultati ottenuti dalle prove su piastra dinamica. Dalle verifiche è stato valutato il modulo di deformazione dinamica, che per tutte le prove ha avuto un risultato maggiore di 50 Mpa, in relazione ad una stagionatura di massimo un giorno; è stato inoltre valutato il rapporto s/v tra il cedimento massimo e la velocità massima del cedimento sapendo che un rapporto maggiore o uguale a 3,5 individua la presenza di un terreno cedevole. Il valore si misura in millisecondi e riporta il grado di compattazione del terreno. Durante una prova è necessario verificare che il valore s/v sia sempre inferiore a 3,5 ms, se così non fosse ciò potrebbe dipendere da diverse cause, come ad esempio la consistenza del terreno, il contenuto d'acqua o il grado di compattazione. Dalle prove effettuate il rapporto ha sempre soddisfatto il limite imposto individuando un terreno compatto. In totale sono state eseguite 15 prove effettuate tra il giorno 14/03/2022 e il giorno 28/03/2022:

Tabella 17: Risultati prove su piastra dinamica

N°prova	Data	Ora	Nr. colpi	Velocità max del cedimento v (mm/s)	Cedimento max s (mm)	Rapporto s/v (ms)	Modulo elastico E_{vd} (Mpa)
1	14/03/2022	14:59:02	1	93.5	0.154	1.561	221.8
			2	8.0	0.042		
			3	95.8	0.112		
			media	65.8	0.103		
2	14/03/2022	14:57:44	1	123.4	0.198	1.558	116.8
			2	117.3	0.205		
			3	134.7	0.182		
			media	125.1	0.195		
3	17/03/2022	08:52:08	1	190.7	0.390	2.066	143.5
			2	28.8	0.053		
			3	10.9	0.033		
			media	76.8	0.159		
4	17/03/2022	09:01:56	1	180.8	0.411	2.025	72.1
			2	143.0	0.268		
			3	143.9	0.268		
			media	155.9	0.316		
5	18/03/2022	09:44:18	1	123.9	0.232	1.830	99.5
			2	125.6	0.230		
			3	126.0	0.225		
			media	125.2	0.229		

Tabella 18: Risultati prove su piastra dinamica

N°prova	Data	Ora	Nr. colpi	Velocità max del cedimento v (mm/s)	Cedimento max s (mm)	Rapporto s/v (ms)	Modulo elastico E_{vd} (Mpa)
6	18/03/2022	09:17:18	1	126.2	0.227	1.795	100.2
			2	127.2	0.223		
			3	126.6	0.232		
			media	126.7	0.227		
7	21/03/2022	09:30:04	1	155.1	0.273	1.713	82.8
			2	162.6	0.276		
			3	163.9	0.276		
			media	160.5	0.275		
8	22/03/2022	09:50:38	1	192.1	0.467	2.034	58.1
			2	189.6	0.372		
			3	196.4	0.337		
			media	192.7	0.392		
9	22/03/2022	09:31:02	1	174.1	0.310	1.869	72.1
			2	171.2	0.333		
			3	161.8	0.305		
			media	169.0	0.316		
10	23/03/2022	09:32:32	1	124.0	0.247	1.751	101.2
			2	135.1	0.224		
			3	126.5	0.204		
			media	128.5	0.225		

Tabella 19: Risultati prove su piastra dinamica

N°prova	Data	Ora	Nr.colpi	Velocità max del cedimento v (mm/s)	Cedimento max s (mm)	Rapporto s/v (ms)	Modulo elastico E_{vd} (Mpa)
11	23/03/2022	09:11:24	1	122.6	0.180		119.0
			2	142.6	0.234		
			3	125.4	0.160		
			media	130.2	0.191	1.470	
12	24/03/2022	10:43:18	1	143.9	0.262		78.4
			2	161.6	0.287		
			3	181.7	0.323		
			media	162.4	0.291	1.790	
13	24/03/2022	10:20:10	1	127.1	0.225		102.0
			2	106.0	0.222		
			3	108.0	0.223		
			media	113.7	0.223	1.964	
14	25/03/2022	08:58:38	1	141.9	0.265		83.6
			2	148.0	0.271		
			3	152.6	0.281		
			media	147.5	0.272	1.846	
15	28/03/2022	08:09:56	1	121.7	0.144		191.4
			2	112.0	0.124		
			3	87.9	0.089		
			media	107.2	0.119	1.110	

5. CONCLUSIONI

Nella tesi sono stati riportati ed analizzati i risultati ottenuti durante l'attività di tirocinio, nella quale sono state svolte verifiche in corso d'opera delle procedure esecutive di un rilevato in terra-cemento e di alcuni dei parametri del materiale necessari ad assicurare le prestazioni definite in fase di progetto.

In particolare, sono state seguite ed analizzate le modalità con le quali è stata realizzata l'opera, definendo le lavorazioni necessarie a ricavare la miscela terra-cemento e quelle relative alla reale costruzione del rilevato. I controlli condotti durante la fase operativa sono stati attuati in sito e hanno permesso di determinare: la densità secca del terreno, attraverso l'esecuzione dei coni di sabbia, la percentuale di cemento nel terreno, verificando il corretto rilascio della giusta quantità del mezzo, il modulo di deformazione, svolgendo prove su piastra statica e dinamica e il contenuto d'acqua del terreno. Dalla conoscenza dei suddetti parametri è stato possibile analizzare il grado di compattazione del rilevato, le caratteristiche di deformabilità facendo riferimento ai valori definiti durante il campo prova e prima ancora in fase di progetto. Per la maggior parte delle verifiche i risultati delle prove sono rientrati negli intervalli stabiliti garantendo la corretta esecuzione dell'opera e la continuità delle lavorazioni; in generale quindi possiamo affermare di avere ottenuto valori omogenei e attendibili, ma soprattutto in accordo con le direttive definite durante le fasi preliminari alla costruzione del rilevato. Sulla base dei risultati ottenuti e dalla loro interpretazione siamo stati in grado di affermare che le caratteristiche geotecniche del rilevato possano garantire la stabilità dell'opera e il perfetto svolgimento della sua funzione.

6. BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

- Conoscenze e dati raccolti sul campo
- D1556/D1556M–15 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by \Sand-Cone Method
- COLOMBO P., COLLESELLI F., Elementi di geotecnica; Editore: Zanichelli
- ANCELLOTTA R., COSTANZO D., CIANCIMINO A. (2020); Progettazione geotecnica: Secondo l'Eurocodice 7 e le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018. Editore: Hoepli
- Azimut sistemi, studio di geologia applicata,
(https://irpcdn.multiscreensite.com/a2d0bdb8/files/uploaded/Presentazione_ProveCaricoPiastraDinamica.pdf)
- Terratest, scheda tecnica
(<http://light-weight-deflectometer.com/wp-content/uploads/2016/02/Terratest-pdf-flyer-IT.pdf>)