

COMMITTENTE:



DIREZIONE INVESTIMENTI PROGETTI PALERMO

SOGGETTO TECNICO:



DIREZIONE TERRITORIALE PRODUZIONE DI PALERMO
S. O. INGEGNERIA DI PALERMO

PROGETTAZIONE:

SINTAGMA S.r.l. - ITALIANA SISTEMI S.r.l.

TIMBRO E FIRMA DEL PROGETTISTA



PROGETTO DEFINITIVO

CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016

**Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento
per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo**

GEOLOGIA, GEOTECNICA E IDROGEOLOGIA
GEOTECNICA
Relazione geotecnica

SCALA -
Foglio - di -

PROGETTO/ANNO	SOTTOPR.	LIVELLO	NOME DOC.	PROGR.OP.	FASE FUNZ.	NUMERAZ.
3 0 4 8 1 7	S 0 1	P D	T G - -	0 2	0 0 0	E 0 0 1 7

Rev.	Descrizione	Progettista			RFI			
		Redatto	Verificato	Approvato	Verificato Team Ver.	Verificato C.P.	Approvato	Autorizzato
A	Emissione	OTT. 18	OTT. 18	OTT. 18				
		F. Novelli	Ing. Sellari	Ing. Granieri	D.T.	D.T.	Ing. Martinelli	Ing. Palazzo
B	Recepimento OdI	LUG. 19	LUG. 19	LUG. 19				
		F. Novelli	Ing. Sellari	Ing. Granieri	D.T.	D.T.	Ing. Martinelli	Ing. Palazzo

LINEA	SEDE TECN.	NOME DOC.	NUMERAZ.
Verificato e trasmesso	Data	Convalidato	Data

Sommario

1	INTRODUZIONE	3
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
2.1	NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO	5
3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	6
4	CAMPAGNE DI INDAGINI	8
5	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	12
5.1.1	UG1	12
5.1.2	UG2	28
5.1.3	UG3	46
5.1.4	UG4	46
5.1.5	RILEVATO FERROVIARIO ESISTENTE.....	46
6	REGIME DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI.....	51
7	SCELTA DEL VALORE CARATTERISTICO UTILIZZANDO METODI STATISTICI	52

1 INTRODUZIONE

La presente **Relazione Geotecnica** viene redatta a supporto della Progettazione Definitiva relativa agli interventi di potenziamento della tratta ferroviaria Alcamo Diramazione – Trapani via Milo, finalizzati al ripristino della funzionalità della linea attraverso la risoluzione dei numerosi dissesti di carattere geologico – geotecnico presenti.

L'attività di rilevamento e censimento dei dissesti e delle criticità presenti lungo la linea, effettuata in sede di progettazione preliminare, ha trovato conferma nei nuovi sopralluoghi effettuati in fase di redazione del presente progetto definitivo. I risultati di tale estesa attività propedeutica hanno condotto alla formulazione di una ipotesi sulle cause dei dissesti sulla quale impostare le soluzioni progettuali; in particolare, l'attuale stato di degrado della linea è dovuto, principalmente, alle scadenti caratteristiche meccaniche con cui sono stati realizzati in origine i rilevati e all'insufficiente sistema di raccolta e smaltimento delle acque meteoriche. Per una descrizione più dettagliata delle criticità rilevate e per una loro documentazione fotografica si rimanda alla "Relazione descrittiva delle criticità lungo linea" (304817_S01_PD_TG--_05_000_E0001).

Nel seguito si sintetizzano le tipologie di dissesto più frequenti, in relazione alla tipologia di sezione (in rilevato o in trincea). Per maggiori dettagli si rimanda alla relazione già citata.

La linea ferroviaria è costituita da tratti in rilevato per circa il 30% dello sviluppo totale; i rilevati hanno un'altezza variabile da 1 m fino a 9 ÷ 10 m. I tratti in rilevato sono quelli che presentano maggiori ed evidenti stati di dissesto, tali da portare alla sospensione dell'esercizio ferroviario. I principali dissesti osservati sono:

- il cedimento del Piano del Ferro;
- la presenza di franamenti del materiale sulle scarpate laterali.

Lungo il tracciato sono presenti svariati punti dove il rilevato ha subito cedimenti sub verticali, molto visibili, evidenziati da variazioni altimetriche repentine dei binari. Spesso si notano vuoti o svuotamenti del ballast al di sotto dei binari e delle traversine, attribuibili ai cedimenti, al fatto di avere una ridotta larghezza utile della fondazione del ballast e a scarpate laterali spesso molto pendenti, che non sono in grado di sostenere il piano ferroviario.

I fenomeni di franamento ed instabilità delle scarpate laterali sono evidenti in corrispondenza dei rilevati di elevata altezza i quali presentano, generalmente, scarpate laterali con pendenze molto elevate e senza banche intermedie. La natura limoso – argillosa del terreno che costituisce i rilevati, insieme alle scarpate di elevata pendenza, provocano fenomeni di instabilità generalizzata. Si rilevano, infatti, numerosi franamenti del materiale superficiale, con fenomeni gravitativi assimilabili al creep. Si osservano, inoltre, numerosi casi di franamento più importante, in cui è possibile notare una nicchia di distacco e una zona di accumulo del materiale alla base. Questi franamenti interessano tipicamente volumi dell'ordine dei 5 – 10 m³.

La linea ferroviaria è costituita da tratti in trincea per il 24% circa dello sviluppo totale. Anche in questi tratti sono stati rilevati numerosi fenomeni di dissesto., causati, principalmente, dal franamento di materiale dalle scarpate laterali. Il fenomeno più comune è rappresentato dall'instabilità generale del materiale superficiale delle scarpate. Si riscontrano, infatti, numerosi episodi di colata e creep del materiale argilloso, che spesso arriva ad invadere la sede ferroviaria. su questo materiale spesso riesce ad attecchire la vegetazione, che in certi casi nasconde e sommerge completamente il binario. Due episodi, in particolare, alla pk 92+850 e alla pk 104+300, hanno prodotto una notevole quantità di materiale causando la completa occupazione della sede ferroviaria. Una ulteriore causa indiretta dei franamenti delle scarpate nei tratti in trincea, è quasi sempre la presenza a ridosso delle scarpate di terreno agricolo coltivato. Quest'ultimo, soprattutto nel periodo corrispondente e successivo all'aratura, trattiene significativamente le

 RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo	CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016 Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo
304817_S01_PD_TG- - _02_000_E0017	Relazione geotecnica

precipitazioni causando l'imbibizione degli strati superficiali con conseguente rammollimento degli stessi e, quindi, franamento. I coltivi giungono fino al ciglio della scarpata, compromettendo i fossi di guardia e intaccando la stabilità della scarpata stessa, a causa della mancanza di misure di delimitazione e separazione tali da tali da garantire le distanze di rispetto previste dalla regolamentazione RFI.

Dopo un breve richiamo al contesto geologico (Capitolo 3), si descrivono le campagne di indagini geognostiche a disposizione (Capitolo 4), per poi giungere alla caratterizzazione geotecnica di riferimento impiegata nelle analisi di progetto (Capitolo 5).

 <p>RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG- - _02_000_E0017</p>	<p>Relazione geotecnica</p>

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

1. Decreto Ministeriale del 14 Gennaio 2008: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n. 29 del 04.2.2008, Supplemento Ordinario n. 30.
2. Circolare 2 Febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al D.M. 14 Gennaio 2008.
3. Decreto Ministeriale del 17 Gennaio 2018: “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n. 42 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n. 8.
4. UNI EN 1997-1 : Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
5. UNI EN 1998-5 : Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici
6. R. Lancellotta, *Geotecnica*, Zanichelli
7. R. Frank, C. Bauduin, R. Driscoll, M. Kavvas, N. Krebs Ovesen, T. Orr, B. Schuppener, traduzione italiana a cura di J. Facciorusso , *Guida all’Eurocodice 7: Progettazione Geotecnica EN 1997-1*, EPC Editore

 <p>RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG- - _02_000_E0017</p>	<p>Relazione geotecnica</p>

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area interessata dalla rete ferroviaria si inquadra nel contesto geologico dei Monti di Trapani. Come si evince dalla Carta Geologica e dal profilo geologico (vedi elaborati di progetto), la linea ferroviaria si sviluppa principalmente attraverso i terreni argillosi e limoso – argillosi della formazione del Flysh Numidico e le litologie sabbiose, sabbioso – limose e ghiaiose delle alluvioni recenti. Nell'area che va all'incirca dalla stazione di Segesta a Bruca, si rinvengono anche i conglomerati della Formazione di Terravecchia, le marne e argille marnose di San Cripello e le calcilutiti scagliose cretache. In ordine stratigrafico dall'alto verso il basso, la successione litostratigrafica, che caratterizza il tracciato è la seguente:

– **Detrito di versante (dt)**

Si tratta di accumuli detritici eterometrici, a volte cementati, presenti alla base dei rilievi carbonatici, principalmente alle falde dei rilievi; sono costituiti di frammenti e blocchi lapidei a spigoli vivi di natura prevalentemente carbonatica misti a terre rosse, sabbie e sabbie limose.

– **Alluvioni recenti ed attuali (a)**

Le alluvioni sono costituite da litologie prevalentemente ghiaiose, sabbiose e limose, e si riconducono a depositi di terrazzo fluviale su più ordini che interessano le aree di fondovalle e le aree prefocali dei fiumi.

– **Terrazzi marini (Tm)**

Tutta la fascia costiera del bacino e dell'area territoriale è caratterizzata dalla presenza di depositi di natura prevalentemente calcarenitica e sabbioso – conglomeratica, riferibili ai terrazzi di abrasione marina di epoca tirreniana. Si tratta di calcareniti detritico – organogene con grado di cementazione variabile, di colore giallo chiaro o biancastro, fossilifere, terrazzate in vari ordini a partire dalle quote prossime al livello del mare fino a quote di circa 100 m s.l.m. La stratificazione è in grossi banchi, talora incrociata e la giacitura è suborizzontale, con leggera pendenza verso la linea di costa. Le calcareniti, dal punto di vista litologico, sono costituite in prevalenza da frammenti organogeni di natura calcarea e da una matrice anch'essa carbonatica. Presentano un grado di compattezza e cementazione alquanto variabile sia lateralmente che in senso verticale, e si riscontrano rare intercalazioni sabbiose ed argillose. Alla base è presente, quasi sempre, un livello conglomeratico.

– **Formazione di Terravecchia (TRV1)**

La formazione è caratterizzata, in generale da due litofacies con caratteri litologici differenti: una litofacies pelitica ed una sabbioso – arenaceo – conglomeratica. Nell'area in esame affiorano in prevalenza i termini riferibili alla litofacies pelitica. Tale litofacies è costituita di argille grigio – verdastre e grigie, argille sabbiose bruno – azzurrastre, spesso con cristalli di gesso e con sottili livelli sabbiosi che ne marcano la stratificazione, argille verdi, dure e a frattura concoide, argille marnose e marne, talora biancastre. Le argille si presentano giuntate e tettonizzate e i giunti di stratificazione sono talora marcati da sottili livelli sabbiosi. (TRV2)

La litofacies sabbioso – arenaceo – conglomeratica della Formazione di Terravecchia è invece costituita, in tutta la sua sequenza, da un intervallo conglomeratico passante verso l'alto ad arenarie, sabbie, molasse

 <p>RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG- - _02_000_E0017</p>	<p>Relazione geotecnica</p>

calcareae, molasse dolomitiche, quindi ad argille marnose e siltose, ricche di livelli sabbiosi di potenza variabile.(TRV1)

In base ai dati disponibili non è stato possibile distinguere le due litofacies della formazione, che pertanto è stata denominata in carta geologica e nel profilo geologico come TRV1 (litologie prevalentemente conglomeratiche con livelli di sabbie e peliti).

– **Formazione di San Cripello (Mc)**

Si tratta di depositi marnosi e argilloso marnosi di colore grigio-verdastro, presentano granuli di glauconite ed una microfauna a Globigerinidi e Orbuline.

– **Flysch Numidico (FLY1)**

Tali depositi sono costituiti in prevalenza da argille ed argilliti siltose di colore bruno con frequenti intercalazioni di banchi e livelli quarzarenitici e quarzosiltitici, e con inglobati livelli e lenti di breccie calcarenitiche gradate

– **Calclutiti Marnose tipo “Scaglia” (Sc)**

Si tratta di calclutiti marnose in facies di “Scaglia” di colore biancastro e rosaceo, stratificate in strati di spessore centimetrico e decimetrico, con noduli e liste di selce nera e con intercalazioni di livelli addizionati di breccie calcareae o calcarenitiche. Verso l’alto sono presenti livelli di calcari marnosi e marne grigiastre.

4 CAMPAGNE DI INDAGINI

Ai fini della caratterizzazione e modellazione geotecnica, oggetto della presente relazione, si è fatto riferimento ai risultati di due campagne di indagini geognostiche. La prima, eseguita nella fase di progettazione preliminare, è stata portata a termine nei primi mesi del 2016 ed è consistita nella realizzazione di sondaggi a carotaggio continuo, con prelievo di campioni indisturbati, esecuzione di prove SPT ed installazione di strumentazione piezometrica. I sondaggi sono stati realizzati a partire dalla sede ferroviaria. La Tabella 1 riporta in elenco il dettaglio dei sondaggi.

Sondaggio	Profondità (m)	Campioni	SPT	Pz A	Pz C
S1	15	1	2	1	
S2	16.5	2	2	1	
S3	30	4	2	1	
S4	20	3	2	1	
S5	25	3	3		2
S6	30	4	2		2
S7	35	4	2		2
S8	30	4	2		1
S9	30	4	2	1	
S10	20	3	2	1	
S11	25	3	1		2
S12	20	3	3		2
S13	20	3	2		2
S19	30	3	2	1	
S20	30	3	3	1	
S21	30	3	2		1
S22	30	3	2		1
S23	30	3	2		1
S24	30	3	2	1	
S25	30	3	2	1	
S26	20	3	3	1	
S27	30	3	2	1	
S28	20	3	2	1	
S29	25	3	2	1	
S30	20	3	2	1	
S31	25	3	2	1	
S32	30	3	2	1	
S33	30	3	2	1	

Tabella 1 – Sondaggi a carotaggio continuo – campagna geognostica Progetto Preliminare.

La seconda campagna di indagini, eseguita nella fase di progettazione definitiva, è stata eseguita tra i mesi di Ottobre e Dicembre 2017, ed è consistita, come la precedente, nell'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo, con prelievo di campioni indisturbati, esecuzione di prove SPT ed installazione di strumentazione piezometrica. La Tabella 2 riporta in elenco il dettaglio dei sondaggi.

Sondaggio	Profondità (m)	Campioni	SPT	Pz C
S1i	15	1	2	
S2i	20	2	1	
S6i	16	2		
S7i	15	2		
S8i	15	2		
S9i	15	2		
S10i	15	2	1	1
S11i	15	2		1
S12i	15	2		1
S13i	20	2	1	1
S14i	10		1	
S15i	7			
S16i	16	1	3	1
S17i	15	2		1
S18i	16	2		1
S19i	15	3		
S20i	15	2		
S21i	12	2		1
S22i	15	2		1
S23i	15	1		
S24i	15	2		1
S25i	15	1		
S26i	15	1		
S27i	16	1		
S28i	15	1		
S29i	15	2		
S30i	16	2		
S31i	20	2		
S32i	16	2		
S33i	15	2		
S34i	16	2		
S35i	15	1		
S36i	15	2		
S37i	15	2		

S38i	15	2		
S39i	16	2		
S40i	15	2		
S41i	15	2		
S42i	15	2		
S43i	20	2		
S44i	20	2		
S45i	16	2		1
S46i	15	2		
S47i	20	2		
S48i	20	2		
S49i	15	2		
S50i	20	2		
S51i	15	1		
S52i	15	3		
S53i	15	1		
S54i	15	2		
S55i	15	3		
S56i	16	3		
S57i	15	2		
S58i	20	3	1	
S59i	15	2		1
S60i	15	2		
S61i	22	3	1	1
S62i	16	2	1	1
S63i	15	2	1	
S64i	15	2		
S65i	15	2		1
S66i	15	2		1
S67i	15	2	2	1
S68i	15	2	2	
S69i	15	2	2	1
S70i	15	2		1
S71i	15	2		
S72i	15	2		
S73i	15	2		
S74i	15	1		
S75i	15	2	1	1
S76i	15	2		1

S77i	17	2		1
S78i	16	2		
S79i	15	2		
S80i	15	2		
S81i	15	2		
S82i	15	2		
S83i	15	2		
S84i	15	2		
S85i	15	2		
S86i	15	1		
S87i	15	2		
S88i	15	2		
S89i	15	2	1	1
S90i	15	2		
S91i	15	2		
S92i	15	2		
S93i	15	2		
S94i	16	2		
S95i	12		1	
S96i	20	3		1
S97i	16	2		1
S98i	15	3	2	1

Tabella 2 – Sondaggi a carotaggio continuo – campagna geognostica Progetto Definitivo.

Nelle Tabelle precedenti, le sigle Pz A e Pz C stanno ad indicare, rispettivamente, l'installazione, all'interno del foro, di un strumentazione piezometrica a tubo aperto o del tipo Casagrande.

Per ulteriori dettagli inerenti le campagne geognostiche, ed in particolare l'elenco delle prove di classificazione ed identificazione e delle prove meccaniche eseguite sui campioni prelevati dai sondaggi, si rimanda al "Report tecnico sulle indagini" (304817_S01_PD_TG--_02_000_E0003).

 <p>RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG- - _02_000_E0017</p>	<p>Relazione geotecnica</p>

5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nella ricerca di una rappresentazione sintetica, ma sufficientemente approssimata, della natura e delle caratteristiche del sottosuolo, si sono definite 2 unità geotecniche distinte, denominate UG1 e UG2. La loro descrizione litologica si è ottenuta semplificando e sintetizzando quella molto dettagliata dei rapporti di perforazione e di laboratorio, sulla base delle osservazioni dirette delle carote e dei campioni, ponendo in evidenza i caratteri essenziali e più facilmente individuabili. Le superfici di separazione dei diversi terreni sono state individuate utilizzando le descrizioni litologiche riportate nei log stratigrafici e la documentazione fotografica delle carote estratte. Le prove in sito del tipo SPT (Standard Penetration Test) non sono state utilizzate ai fini della caratterizzazione geotecnica perché ritenute non rappresentative; esse, infatti, sono state eseguite in terreni a grana fine, come desumibile da un confronto con l'analisi granulometrica di campioni prelevati nella stessa unità litologica, prossimi alla profondità di esecuzione della prova. In tali terreni, come noto, la prova SPT perde di significatività.

Si sottolinea che, dall'esame dei log stratigrafici lungo tutto il tracciato, si rileva, apparentemente, la mancanza di una correlazione tra la geologia di superficie e i log stessi, con riferimento alle unità geologiche Mc, Sc, TRV1 e Tm. Tale incongruenza non risulta comunque rilevante in relazione alle finalità del progetto; si ritiene, pertanto, che i dati a disposizione costituiscano una base consistente sulla quale impostare la caratterizzazione geotecnica.

L'Unità Geotecnica 2 rappresenta la porzione più consistente, e profonda, dell'unità geologica del Flysh Numidico (FLY), mentre l'Unità Geotecnica 1 ne rappresenta la parte meno consistente, più superficiale, alla quale sono stati accorpati, da un punto di vista geotecnico, sulla base dei risultati delle prove di identificazione e classificazione e meccaniche, i depositi alluvionali (a). Inoltre, una suddivisione preliminare dei dati sperimentali a disposizione per tratte lungo il tracciato, non ha evidenziato una sostanziale variabilità e, pertanto, la caratterizzazione è stata impostata sulla base della totalità dei dati.

Le unità geologiche per le quali si è rilevata un'incongruenza con i dati provenienti dai sondaggi sono state raggruppate in due ulteriori unità geotecniche, denominate UG3 e UG4, alle quali sono stati assegnati parametri geotecnici variabili entro un intervallo che è stato definito sulla base di dati reperiti in letteratura. In particolare, l'Unità Geotecnica 4 raggruppa le calcilutiti marnose tipo "Scaglia" (Sc) e i depositi marnosi e argilloso – marnosi della Formazione di San Cripello (Mc), mentre all'unità Geotecnica 3 sono stati associati i depositi di natura calcarenitica e sabbioso – conglomeratica ascrivibili ai terrazzi marini (Tm) e la litofacies sabbioso – arenaceo – conglomeratica della Formazione di Terravecchia (TRV1).

Si sono definite 1 paragrafi seguenti illustrano, dapprima, le caratteristiche fisiche e di stato e le proprietà indice, e poi, le proprietà meccaniche delle 2 unità geotecniche sopra definite.

5.1.1 UG1

5.1.1.1 CARATTERISTICHE GENERALI

La Tabella 3 riporta le caratteristiche fisiche, le proprietà indice e le caratteristiche granulometriche relative ai campioni prelevati nell'Unità Geotecnica 1. La sono relative, rispettivamente, agli andamenti con la profondità dei limiti liquido e plastico e del contenuto d'acqua, dei pesi dell'unità di volume totale e secco e delle frazioni granulometriche. La Figura 4 e la Figura 5 riportano, rispettivamente, i risultati dei limiti di Atterberg nella Carta di plasticità di Casagrande (1948) e i punti sperimentali IP – CF (< 0.002 mm).

La carta, come noto, è divisa in sei regioni dalla retta A di equazione $IP = 0.73 \cdot (w_L - 20)$ e dalle due rette verticali $w_L = 30$ e $w_L = 50$. Com'è possibile osservare i terreni della UG1 ricadono al di sopra della retta A e presentano, ad eccezione di un numero esiguo di campioni, un limite liquido w_L maggiore di 50 e, pertanto,

 Direzione Territoriale Produzione Palermo	CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016 Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo
304817_S01_PD_TG- - _02_000_E0017	Relazione geotecnica

possono essere classificati come argille inorganiche di elevata plasticità. Il contenuto d'acqua naturale w è prossimo al limite plastico w_p , come si può notare dalla Figura 1, e l'indice di consistenza I_c è inferiore all'unità, o di poco superiore, denotando una consistenza solido – plastica. L'indice di attività I_A , dato dal rapporto tra l'indice di plasticità IP e la frazione argillosa CF , non è mai superiore a 1.25, ossia i terreni sono inattivi o normalmente attivi, come si può notare dalla Figura 5.

I risultati dell'analisi granulometrica consentono di identificare la natura limoso – argillosa dei terreni: si tratta di limi con argilla o argille con limi sabbiosi o debolmente sabbiosi.

Il peso dell'unità di volume totale γ non mostra un trend significativo con la profondità (si veda la Figura 2) e il valore caratteristico γ_k assunto in sede di analisi, determinato secondo la procedura statistica descritta in Appendice alla presente relazione, è pari a 18.5 kN/m^3 .

Sondaggio	Campione	Prof. da	Prof. a	Prof.	w	w _L	w _p	IP	I _c	γ	γ _d	γ _s	G	S	L	A
		(m)	(m)	(m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)
S23	C2	13.0	13.3	13.2	28.2	56.0	20.2	35.8	0.8	19.2	15.0	25.8	18.0	30.0	20.0	32.0
S25	C1	5.0	5.3	5.2	21.1	44.9	24.2	20.7	1.2	19.6	16.2	26.5	0.0	18.0	48.0	34.0
S26	C1	5.0	5.3	5.2	27.8	53.2	23.2	29.9	0.8	18.4	14.4	25.5	4.0	14.0	46.0	36.0
S27	C1	5.0	5.3	5.2	24.4	54.9	22.7	32.2	0.9	20.0	16.1	26.5	0.0	28.0	28.0	44.0
S29	C1	4.0	4.3	4.2	28.7	64.3	27.8	36.5	1.0	18.9	14.7	26.4	2.0	16.0	28.0	54.0
S29	C2	9.5	9.8	9.7	27.1	56.1	26.0	30.1	1.0	19.1	15.1	25.9	0.0	14.0	44.0	42.0
S30	C1	5.0	5.5	5.2	30.3	66.5	26.4	40.2	0.9	18.7	14.4	25.8	2.0	18.0	28.0	52.0
S31	C1	7.0	7.3	7.2	24.1	65.4	23.2	42.2	1.0	19.8	15.9	26.0	0.0	10.0	32.0	58.0
S31	C2	13.7	14.0	13.9	25.4	60.1	20.3	39.8	0.9	19.3	15.4	26.3	0.0	16.0	40.0	44.0
S32	C2	12.5	12.8	12.7	23.5	58.0	29.5	28.5	1.2	19.1	15.5	25.6	0.0	12.0	36.0	52.0
S33	C2	12.5	12.8	12.7	28.1	69.0	28.8	40.1	1.0	19.1	15.0	25.6	2.0	6.0	40.0	52.0
S45i	C1	3.0	3.4	3.2	19.7	56.3	18.4	37.9	1.0	17.5	14.6	26.0	0.0	30.0	26.0	44.0
S46i	C1	3.3	3.7	3.5	24.1	62.2	23.3	38.8	1.0	17.4	14.0	25.9	0.0	28.0	26.0	46.0
S47i	C1	3.0	3.5	3.3	23.3	53.1	22.0	31.1	1.0	18.9	15.4	26.0	0.0	22.0	32.0	46.0
S49i	C1	1.7	2.0	1.9	25.8	58.0	25.1	32.9	1.0	13.2	10.5	26.0	0.0	18.0	46.0	36.0
S50i	C1	3.0	3.5	3.3	19.1	57.4	23.5	33.9	1.1	18.4	15.4	26.0	0.0	24.0	42.0	34.0
S52i	C1	2.5	4.0	3.3	19.0	62.9	22.3	40.6	1.1	18.2	15.3	26.0	0.0	18.0	34.0	48.0
S52i	C2	4.5	4.9	4.7	22.9	57.7	25.1	32.5	1.1	17.8	14.5	26.0	0.0	18.0	48.0	34.0
S54i	C1	4.5	5.0	4.8	22.5	57.3	26.1	31.2	1.1	19.3	15.8	25.8	0.0	20.0	28.0	52.0
S57i	C1	3.0	3.5	3.3	30.4	65.1	25.5	39.6	0.9	18.8	14.4	25.8	0.0	18.0	26.0	56.0
S58i	C1	3.0	3.4	3.2	20.3	57.1	20.5	36.6	1.0	18.9	15.7	26.1	2.0	22.0	28.0	48.0
S58i	C2	8.5	9.0	8.8	23.5	57.0	22.7	34.3	1.0	18.7	15.2	25.8	0.0	28.0	28.0	44.0
S59i	C1	2.5	3.0	2.8	31.4	59.2	19.4	39.8	0.7	17.6	13.4	25.7	10.0	14.0	30.0	46.0
S65i	C1	3.5	4.0	3.8	26.4	50.4	26.4	24.0	1.0	17.6	13.9	25.8	0.0	16.0	40.0	44.0
S66i	C1	4.5	5.0	4.8	29.6	56.4	21.0	35.5	0.8	19.1	14.7	25.9	0.0	12.0	44.0	44.0
S67i	C1	3.0	3.5	3.3	22.3	63.5	20.3	43.2	1.0	19.4	15.8	25.9	2.0	22.0	36.0	40.0
S69i	C1	3.0	3.5	3.3	22.0					19.3	15.8	25.8	0.0	14.0	44.0	42.0
S70i	C1	3.0	3.5	3.3	28.0	63.2	24.7	38.5	0.9	19.1	14.9	25.9	0.0	18.0	36.0	46.0
S71i	C1	1.0	1.5	1.3	19.6	57.3	27.4	29.8	1.3	20.6	17.2	26.0	0.0	22.0	34.0	44.0
S72i	C1	4.0	4.5	4.3	26.1	56.5	25.6	30.8	1.0	17.4	13.8	25.8	0.0	16.0	38.0	46.0
S74i	C1	1.3	1.7	1.5	25.4	59.5	29.2	30.3	1.1	18.4	14.7	26.0	0.0	12.0	44.0	44.0
S75i	C1	2.7	3.2	3.0	31.2	67.6	25.3	42.4	0.9	18.7	14.3	26.0	0.0	14.0	36.0	50.0
S79i	C1	1.2	1.7	1.5	25.5	61.1	27.3	33.8	1.1			25.8	0.0	16.0	40.0	44.0
S80i	C1	3.0	3.5	3.3	22.0	59.6	28.9	30.7	1.2	18.7	15.3	25.9	0.0	16.0	42.0	42.0
S81i	C1	4.0	4.5	4.3	34.5	73.8	26.0	47.8	0.8	18.4	13.7	26.0	0.0	22.0	28.0	50.0
S88i	C1	4.0	4.5	4.3	21.4	52.7	19.5	33.2	0.9	19.6	16.1	25.9	6.0	26.0	26.0	42.0
S89i	C1	4.0	4.5	4.3	20.5	54.3	21.7	32.5	1.0	19.7	16.3	25.8	2.0	24.0	24.0	50.0

S90i	C1	4.5	5.0	4.8	23.3	53.4	20.6	32.8	0.9	18.5	15.0	25.8	4.0	30.0	24.0	42.0
S91i	C1	6.5	7.0	6.8	19.2	62.3	20.3	42.0	1.0	19.8	16.6	25.9	2.0	24.0	38.0	40.0
S92i	C1	5.5	6.0	5.8	18.3					20.2	17.1	25.6	6.0	22.0	34.0	38.0
S93i	C1	5.5	6.0	5.8	19.2	57.0	20.8	36.2	1.0	19.5	16.4	25.7	0.0	16.0	36.0	48.0
S93i	C2	11.5	12.0	11.8	14.4	52.7	24.1	28.6	1.3	19.2	16.8	25.9	0.0	10.0	58.0	32.0
S21	C2	7.0	7.3	7.2	28.0	55.9	29.8	26.1	1.1	19.1	14.9	25.5	4.0	26.0	20.0	50.0
S22	C2	9.0	9.3	9.2	23.3	48.4	28.8	19.6	1.3	18.8	15.2	25.9	0.0	12.0	58.0	30.0
S31i	C1	4.0	4.5	4.3	23.5	50.9	26.1	24.8	1.1	19.2	15.5	25.7	2.0	26.0	32.0	40.0
S32i	C1	3.7	4.2	4.0	25.7	58.3	20.9	37.4	0.9	19.1	15.2	25.8	0.0	28.0	30.0	42.0
S38i	C1	2.6	3.0	2.8	18.8	50.1	23.8	26.3	1.2	19.5	16.5	25.6	2.0	12.0	48.0	38.0
S39i	C1	2.0	2.5	2.3	19.0	48.4	24.6	23.8	1.2	17.7	14.8	25.6	4.0	24.0	40.0	32.0
S41i	C1	4.0	4.5	4.3	22.7	66.4	25.7	40.7	1.1	19.5	15.9	25.7	0.0	32.0	24.0	44.0
S42i	C1	3.0	3.5	3.3	23.1	63.9	27.1	36.8	1.1	17.1	13.9	25.9	0.0	16.0	30.0	54.0
S4	C1	4.0	4.3	4.1	19.6	40.6	22.6	18.0	1.2	18.5	15.4	26.1	0.0	64.0	28.0	8.0
S5	C1	8.0	8.3	8.2	11.5	34.7	19.3	15.4	1.5	17.3	15.5	26.4	0.0	48.0	34.0	18.0
S6	C2	8.0	8.3	8.2	22.1	59.2	23.3	35.9	1.0	19.2	15.7	25.8	0.0	32.0	34.0	34.0
S7	C2	12.0	12.3	12.2	25.9	68.9	29.0	39.9	1.1	19.3	15.3	26.1	0.0	14.0	40.0	46.0
S8	C2	11.5	11.8	11.7	31.8	69.1	29.4	39.7	0.9	19.0	14.4	26.2	0.0	26.0	28.0	46.0
S11	C1	4.0	4.3	4.2	24.1	61.2	25.1	36.1	1.0	19.0	15.3	25.9	0.0	16.0	32.0	52.0
S12	C1	3.0	3.3	3.2	19.0	41.9	23.3	18.5	1.2	20.0	16.8	25.8	30.0	30.0	24.0	16.0
S13	C1	4.0	4.3	4.2	18.5	51.7	22.6	29.0	1.1	20.7	17.5	25.8	2.0	8.0	46.0	44.0
S29i	C1	2.5	3.0	2.8	25.5	53.3	25.7	27.6	1.0	18.6	14.8	25.8	0.0	16.0	32.0	52.0
S30i	C1	3.2	3.7	3.5	28.0	66.4	26.2	40.2	1.0	18.4	14.4	25.9	2.0	18.0	28.0	52.0
S1i	C1	3.2	3.7	3.5	12.8	34.5	16.8	17.6	1.2	19.3	17.1	25.8	0.0	20.0	58.0	22.0
S7i	C1	5.0	5.5	5.3	22.9	58.2	24.0	34.3	1.0	17.4	14.2	26.1	0.0	14.0	44.0	42.0
S12i	C1	3.3	3.8	3.6	13.9	45.3	17.1	28.3	1.1	19.9	17.4	25.7	6.0	40.0	22.0	32.0
S3	C2	5.0	5.5	5.2	28.9	41.7	19.2	22.5	0.6	19.1	14.9	26.2	2.0	24.0	26.0	48.0
S16i	C1	3.0	3.4	3.2	14.5	48.9	18.4	30.5	1.1	19.3	16.8	25.8	14.0	36.0	22.0	28.0
S17i	C1	2.8	3.3	3.1	24.0	52.3	22.6	29.6	1.0	17.5	14.1	25.9	0.0	10.0	38.0	52.0
S18i	C1	2.7	3.2	3.0	22.8	51.2	26.1	25.1	1.1	18.6	15.1	26.0	0.0	10.0	38.0	52.0
S96i	C2	11.5	12.0	11.8	24.3	64.1	20.4	43.7	0.9	19.5	15.7	25.9	0.0	24.0	36.0	40.0

Tabella 3 – Caratteristiche fisiche, proprietà indice e caratteristiche granulometriche dell'Unità Geotecnica 1.

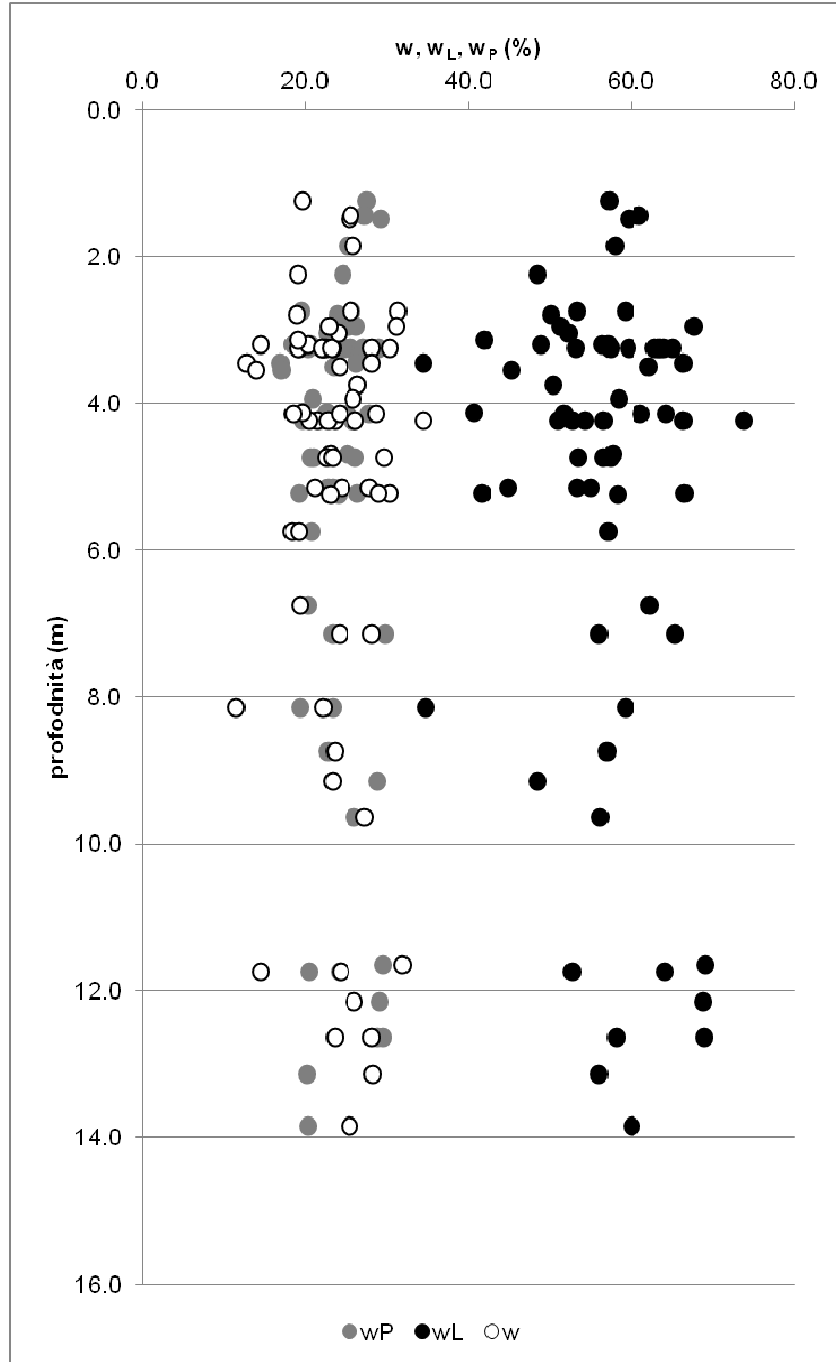


Figura 1 – Limiti di Atterberg e contenuto d'acqua naturale con la profondità.

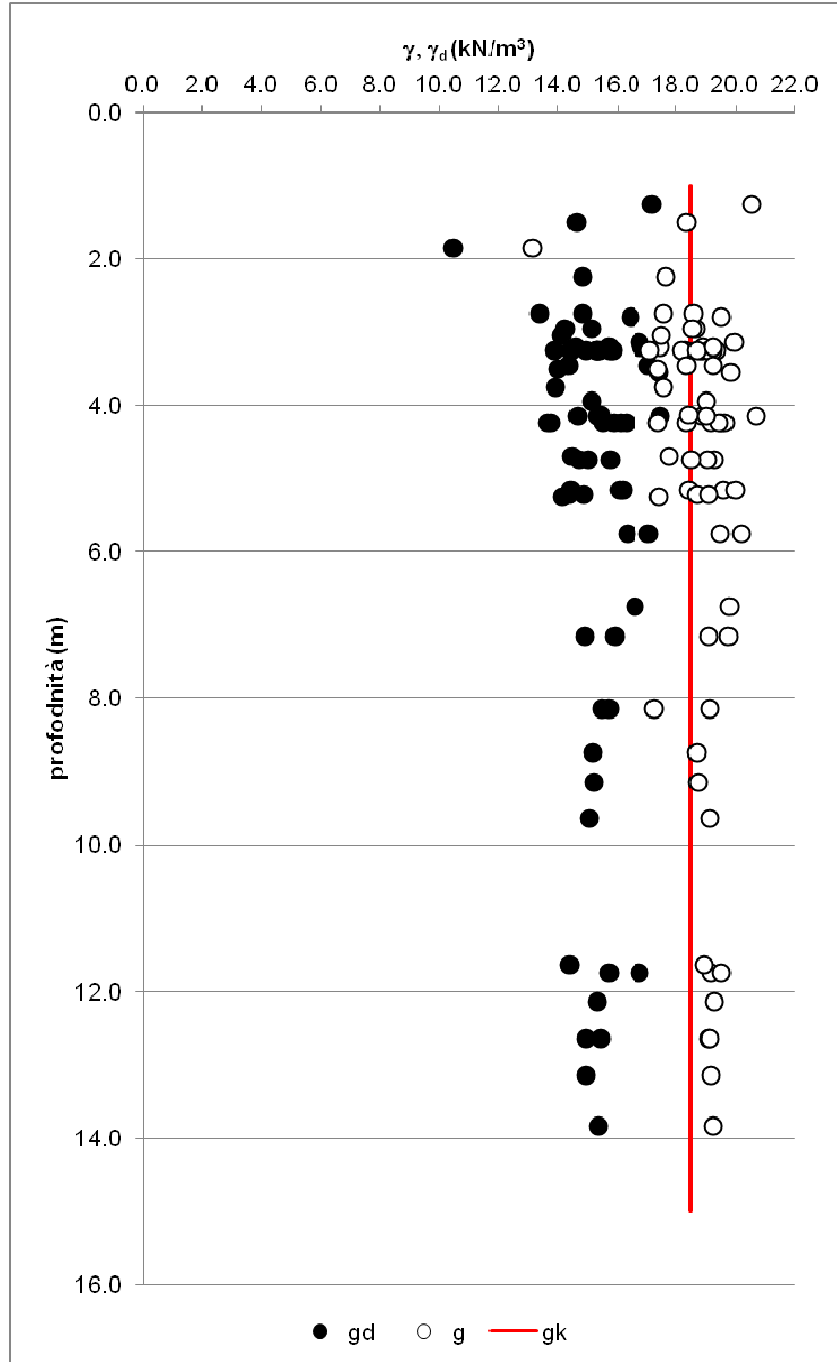


Figura 2 – Pesì dell'unità di volume totale e secco con la profondità.

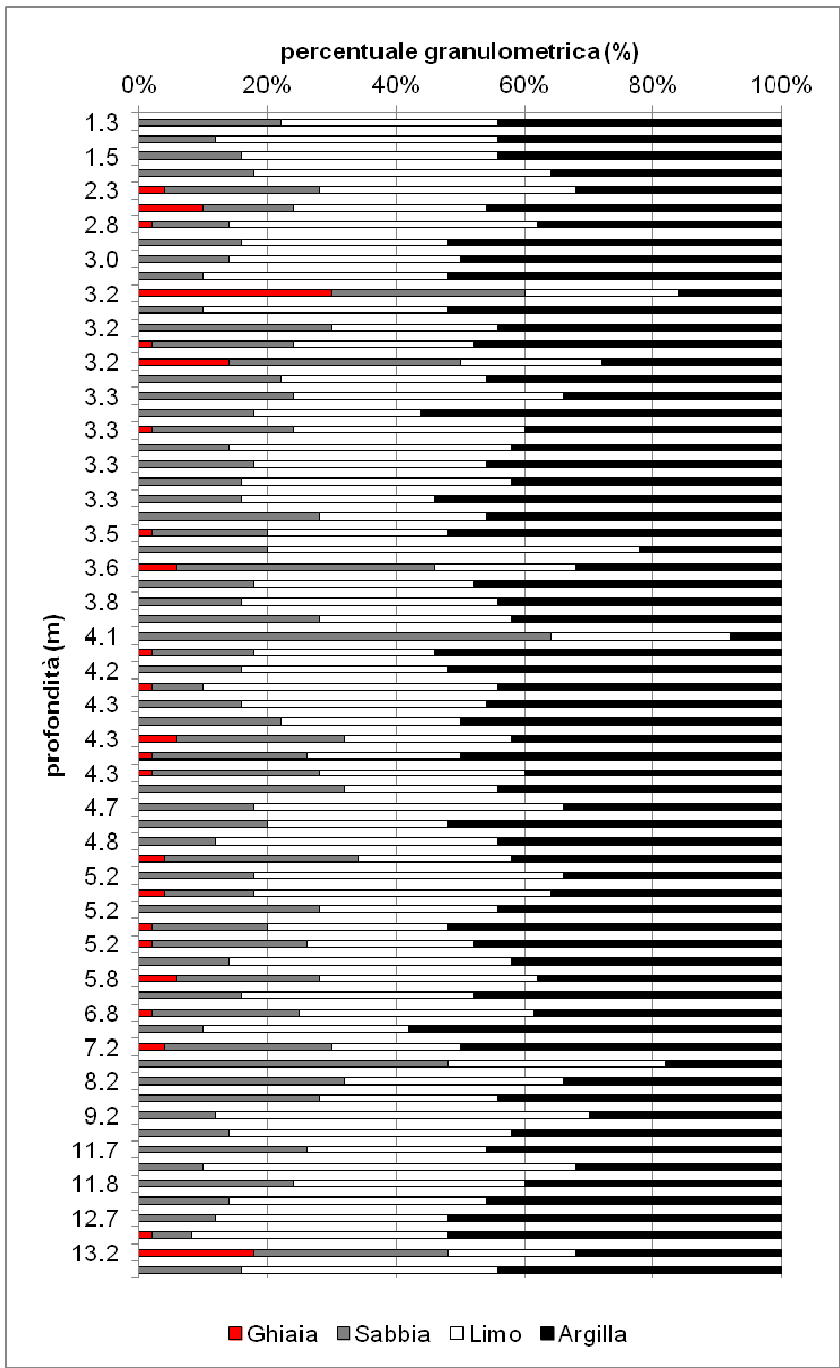


Figura 3 – Frazioni granulometriche con la profondità.

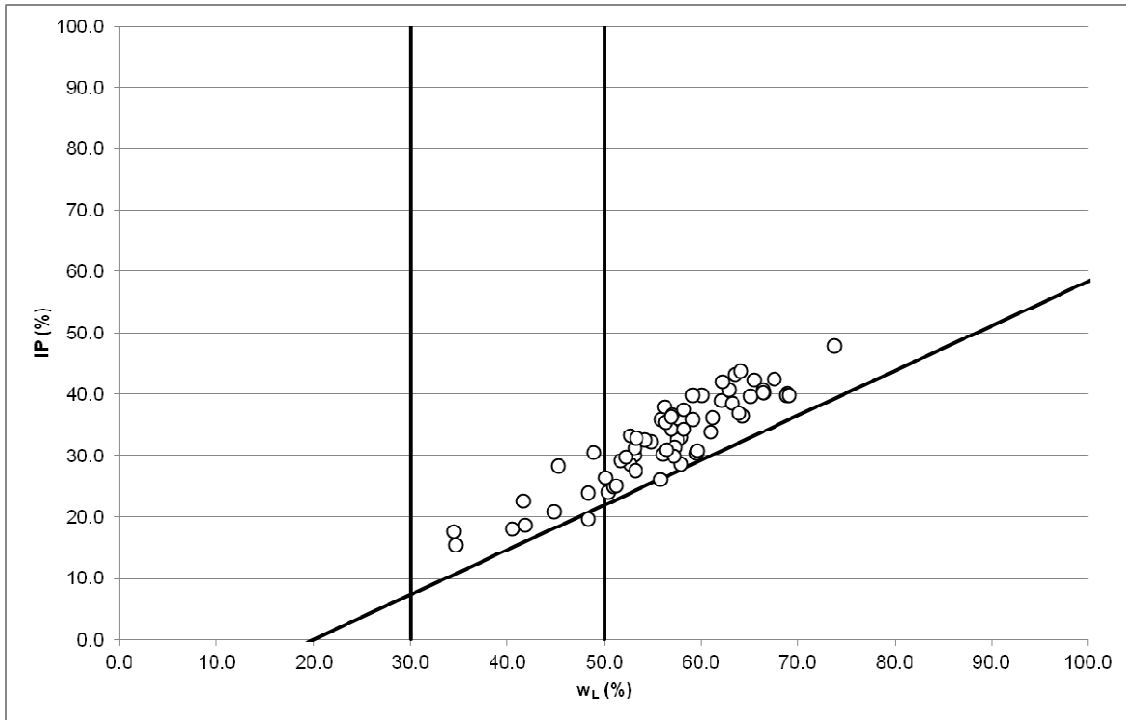


Figura 4 – Carta di plasticità di Casagrande.

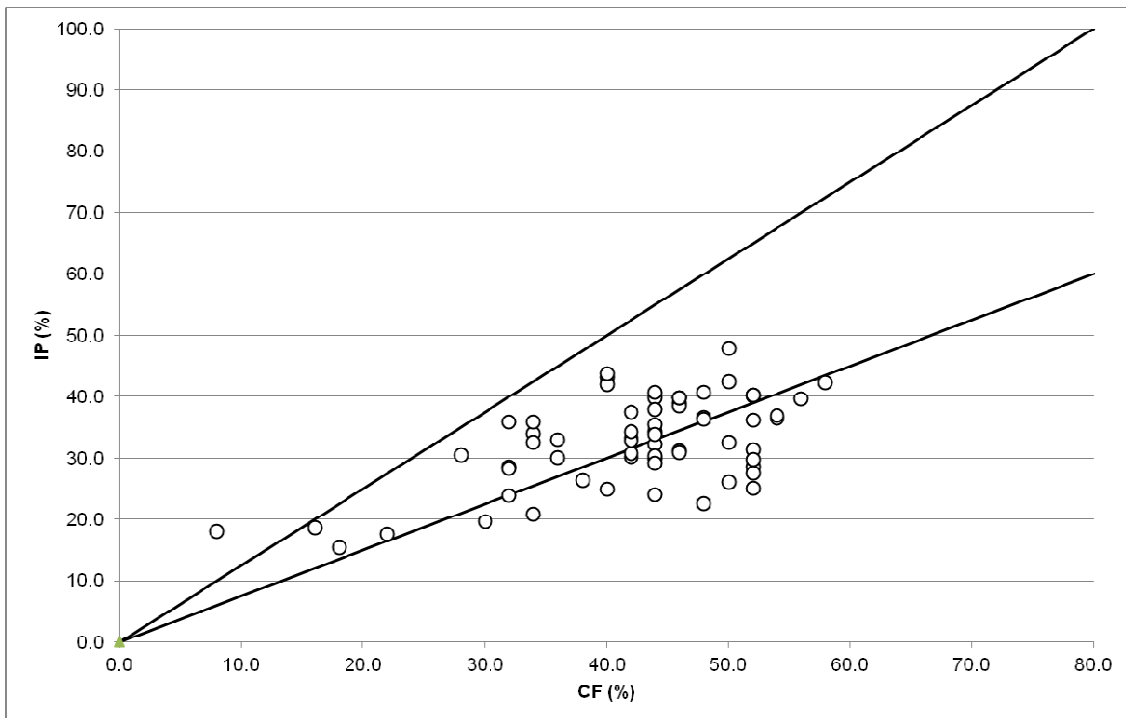


Figura 5 – Andamento IP – CF.

5.1.1.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE

Nel seguito sono analizzate le caratteristiche meccaniche dell'Unità Geotecnica 1, come risultano dalle prove di laboratorio, rese disponibili per le analisi. In particolare, si sono esaminate le caratteristiche di resistenza e deformabilità che hanno maggiore influenza sulla impostazione generale del progetto in esame.

La compressibilità è stata caratterizzata attraverso l'analisi delle prove edometriche, dalle quali sono stati ricavati gli indici di compressione e rigonfiamento C_c e C_s , il modulo edometrico M e il coefficiente di consolidazione c_v in corrispondenza della tensione verticale efficace σ'_{v0} , stimata alla profondità di prelievo del campione indisturbato.

Da un'analisi attenta delle curve edometriche, non è stato possibile determinare con affidabilità la tensione di preconsolidazione σ'_{vc} e, conseguentemente, il grado di sovraconsolidazione OCR, poiché le curve mancano dei primi gradini di carico (alle tensioni verticali efficaci di 25 e/o 50 kN/m²), rendendo impossibile la ricostruzione del ramo di ricomprensione, necessario per l'applicazione dell'usuale metodo di Casagrande. La Tabella 4 sintetizza le caratteristiche di cui sopra.

Sondaggio	Campione	Prof. da	Prof. a	Prof.	C_c	C_s	C_v	M
		(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(m ² /s)	(N/mm ²)
S59i	C1	2.5	3.0	2.8	0.262	0.102		5.2
S66i	C1	4.5	5.0	4.8	0.289	0.105		8.1
S69i	C1	3.0	3.5	3.3	0.204	0.096		8.2
S70i	C1	3.0	3.5	3.3	0.219	0.101		10.5
S72i	C1	4.0	4.5	4.3	0.252	0.089		22.4
S80i	C1	3.0	3.5	3.3	0.219	0.093		19.7
S81i	C1	4.0	4.5	4.3	0.296	0.095		2.9
S88i	C1	4.0	4.5	4.3	0.219	0.075		4.9
S89i	C1	4.0	4.5	4.3	0.196	0.082		26.5
S90i	C1	4.5	5.0	4.8	0.224	0.080		8.6
S7i	C1	5.0	5.5	5.3	0.208	0.084		5.5
S96i	C2	11.5	12.0	11.8	0.197	0.064		6.0

Tabella 4 - Caratteristiche di compressibilità.

L'indice di compressione C_c varia tra 0.2 e 0.3, mentre l'indice di rigonfiamento C_s varia tra 0.08 e 0.10 con un unico campione che presenta un valore inferiore (0.06 – campione C1 sondaggio S96i). il coefficiente di consolidazione C_v varia nell'intervallo

Le caratteristiche di resistenza al taglio espresse in termini di tensioni efficaci (c' e ϕ') sono state ricavate dall'analisi delle prove triassiali consolidate drenate TxCID e non drenate TxCIU e delle prove di taglio diretto DS, eseguite in laboratorio su campioni indisturbati (si veda la Tabella 5). Si precisa che i parametri di resistenza al taglio riportati sono rilevativi alle condizioni di picco (c'_p e ϕ'_p) essendo stati determinati in corrispondenza del massimo valore di τ nelle curve $\tau - \delta_h$ delle prove di taglio diretto e di q ($= \sigma'_1 - \sigma'_3$) nelle curve $q - \epsilon_a$ delle prove triassiali.

Sondaggio	Campione	Prof. da	Prof. a	Prof.	φ'	c'
		(m)	(m)	(m)	(°)	(kN/m ²)
S23	C2	13.0	13.3	13.2	20.5	24.4
S25	C1	5.0	5.3	5.2	28.3	21.6
S26	C1	5.0	5.3	5.2	25.2	13.6
S27	C1	5.0	5.3	5.2	23.8	17.0
S29	C1	4.0	4.3	4.2	21.8	30.8
S29	C2	9.5	9.8	9.7	25.4	30.3
S31	C1	7.0	7.3	7.2	19.3	25.8
S33	C2	12.5	12.8	12.7	21.1	26.6
S45i	C1	3.0	3.4	3.2	17.3	24.5
S46i	C1	3.3	3.7	3.5	26.7	23.5
S47i	C1	3.0	3.5	3.3	20.0	19.3
S49i	C1	1.7	2.0	1.9	21.9	17.7
S50i	C1	3.0	3.5	3.3	16.1	27.6
S52i	C1	2.5	4.0	3.3	23.5	30.1
S52i	C2	4.5	4.9	4.7	19.1	22.5
S54i	C1	4.5	5.0	4.8	22.2	23.4
S58i	C1	3.0	3.4	3.2	26.4	25.8
S58i	C2	8.5	9.0	8.8	16.1	24.0
S59i	C1	2.5	3.0	2.8	18.2	31.1
S65i	C1	3.5	4.0	3.8	20.9	26.9
S66i	C1	4.5	5.0	4.8	21.2	27.8
S67i	C1	3.0	3.5	3.3	14.6	44.8
S69i	C1	3.0	3.5	3.3	15.1	26.3
S70i	C1	3.0	3.5	3.3	24.4	18.8
S71i	C1	1.0	1.5	1.3	20.3	27.1
S72i	C1	4.0	4.5	4.3	25.4	16.1
S74i	C1	1.3	1.7	1.5	22.9	22.0
S80i	C1	3.0	3.5	3.3	19.3	25.5
S90i	C1	4.5	5.0	4.8	13.8	45.0
S91i	C1	6.5	7.0	6.8	17.1	16.4
S92i	C1	5.5	6.0	5.8	21.5	23.9
S93i	C1	5.5	6.0	5.8	14.7	22.0
S93i	C2	11.5	12.0	11.8	11.1	33.9
S21	C2	7.0	7.3	7.2	20.9	30.7
S22	C2	9.0	9.3	9.2	19.1	18.9
S31i	C1	4.0	4.5	4.3	18.7	31.1
S32i	C1	3.7	4.2	4.0	16.6	24.2

S38i	C1	2.6	3.0	2.8	16.4	13.9
S39i	C1	2.0	2.5	2.3	23.2	7.3
S41i	C1	4.0	4.5	4.3	22.5	17.6
S42i	C1	3.0	3.5	3.3	20.5	24.5
S4	C1	4.0	4.3	4.1	19.2	15.8
S5	C1	8.0	8.3	8.2	22.9	55.1
S29i	C1	2.5	3.0	2.8	13.3	16.7
S30i	C1	3.2	3.7	3.5	18.8	16.5
S1i	C1	3.2	3.7	3.5	28.1	12.2
S7i	C1	5.0	5.5	5.3	20.0	14.9
S12i	C1	3.3	3.8	3.6	18.8	40.7
S3	C2	5.0	5.5	5.2	16.1	10.0
S16i	C1	3.0	3.4	3.2	21.5	23.0
S17i	C1	2.8	3.3	3.1	24.0	9.9
S18i	C1	2.7	3.2	3.0	16.8	30.0
S96i	C2	11.5	12.0	11.8	23.2	9.9

Tabella 5 – Caratteristiche di resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci.

I parametri di resistenza al taglio c'_p e φ'_p mostrano una marcata variabilità e la mancanza di un trend significativo con la profondità. L'applicazione della procedura statistica descritta in Appendice ha consentito di determinare valori caratteristici di coesione efficace $c'_k = 21.6 \text{ kN/m}^2$ e angolo di resistenza al taglio $\varphi'_k = 19.4^\circ$ (Tabella 6). Nelle analisi si assume per l'Unità Geotecnica 1, $c'_k = 22 \text{ kN/m}^2$ e $\varphi'_k = 19^\circ$.

$(\tan\varphi')_{\text{mean}}$	0.369	c'_{mean}	23.725
σ_φ	0.079	σ_c	9.126
V_φ	0.213	V_c	0.385
$t_{n-1}^{0.95}$	1.674	$t_{n-1}^{0.95}$	1.674
$k_{n,\text{mean}}$	0.228	$k_{n,\text{mean}}$	0.228
$(\tan\varphi')_k$	0.351	$c'_k (\text{kN/m}^2)$	21.6
$\varphi'_k (^\circ)$	19.4		

Tabella 6 – Parametri di resistenza al taglio caratteristici.

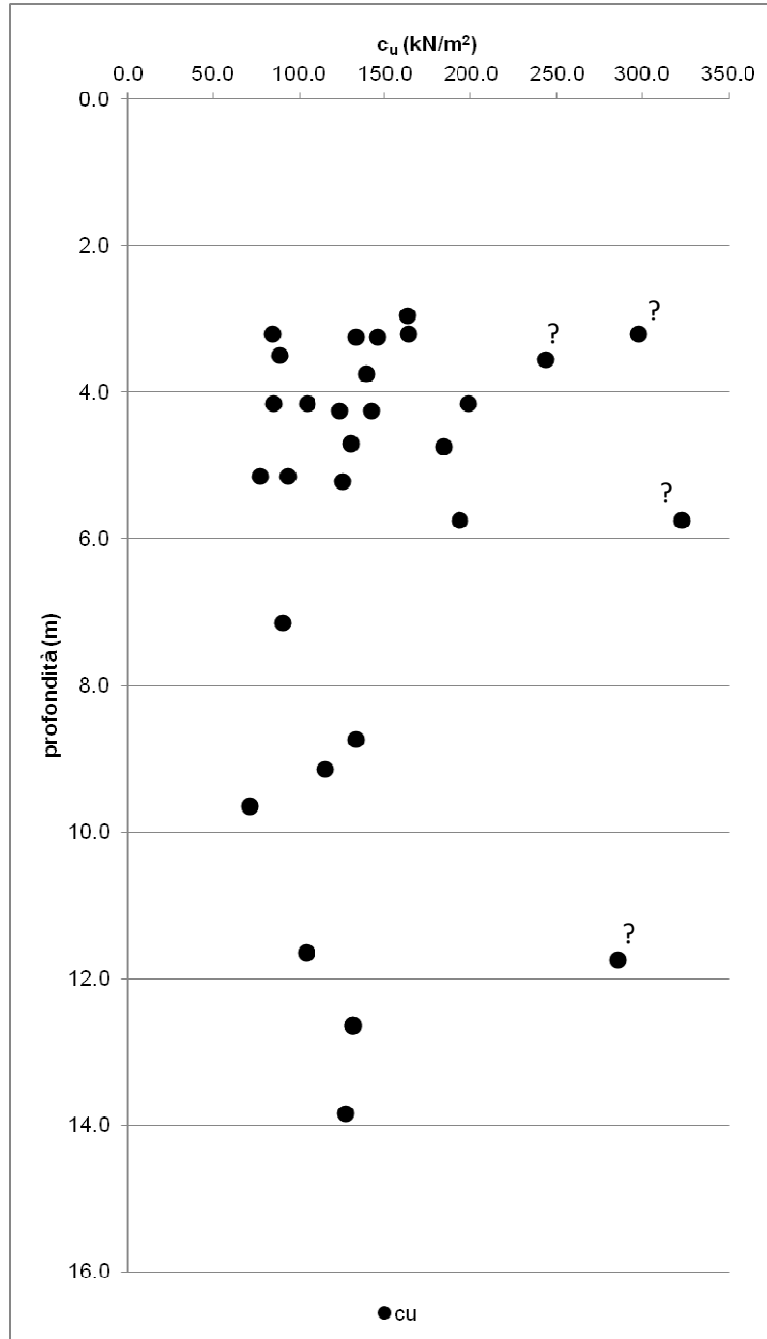
La resistenza al taglio in condizioni non drenate c_u è stata valutata utilizzando i risultati delle prove di espansione laterale libera ELL.

Sondaggio	Campione	Prof. da	Prof. a	Prof.	c_u
		(m)	(m)	(m)	(kN/m^2)
S25	C1	5.0	5.3	5.2	77.0

S27	C1	5.0	5.3	5.2	93.0
S29	C1	4.0	4.3	4.2	85.0
S29	C2	9.5	9.8	9.7	71.0
S30	C1	5.0	5.5	5.2	125.5
S31	C1	7.0	7.3	7.2	90.5
S31	C2	13.7	14.0	13.9	127.5
S32	C2	12.5	12.8	12.7	131.5
S33	C2	12.5	12.8	12.7	131.5
S45i	C1	3.0	3.4	3.2	84.5
S46i	C1	3.3	3.7	3.5	88.5
S52i	C2	4.5	4.9	4.7	130.5
S58i	C1	3.0	3.4	3.2	298.0
S58i	C2	8.5	9.0	8.8	133.5
S65i	C1	3.5	4.0	3.8	139.0
S69i	C1	3.0	3.5	3.3	146.0
S80i	C1	3.0	3.5	3.3	133.0
S89i	C1	4.0	4.5	4.3	142.0
S90i	C1	4.5	5.0	4.8	184.0
S92i	C1	5.5	6.0	5.8	193.5
S93i	C1	5.5	6.0	5.8	323.0
S93i	C2	11.5	12.0	11.8	286.0
S22	C2	9.0	9.3	9.2	115.5
S31i	C1	4.0	4.5	4.3	123.5
S8	C2	11.5	11.8	11.7	104.0
S11	C1	4.0	4.3	4.2	104.5
S13	C1	4.0	4.3	4.2	199.0
S12i	C1	3.3	3.8	3.6	244.0
S16i	C1	3.0	3.4	3.2	163.5
S18i	C1	2.7	3.2	3.0	163.0

Tabella 7 – Resistenza al taglio non drenata.

Anch'essa presenta una notevole variabilità con valori compresi nel range piuttosto ampio $80 \div 200 \text{ kN/m}^2$; un certo numero, comunque esiguo ($n = 4$), di campioni mostra valori maggiori (fino a 300 kN/m^2): questi sono stati scartati perché ritenuti poco affidabili (si vedano la Tabella 7 e la Figura 6). L'applicazione della procedura statistica descritta in Appendice conduce ad una stima di $c_{uk} = 114 \text{ kN/m}^2$. Nelle analisi si assume un valore caratteristico $c_{uk} = 110 \text{ kN/m}^2$.



Le caratteristiche di deformabilità sono state valutate nell'ipotesi che il comportamento meccanico dei terreni in condizioni distanti dalla rottura sia elastico lineare. A tale scopo sono stati selezionati valori del modulo di Young E' e del coefficiente di Poisson ν' rappresentativi del campo di deformazioni che generalmente si producono, in condizioni di esercizio, nei problemi di interazione terreno – struttura. In particolare si è assunto un valore del rapporto $E_u/c_u = 600$. Dalle relazioni $G = E_u/3$ ed $E' = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu')$, con $\nu' = 0.3$, si è quindi ricavata una stima del modulo di Young E' . L'applicazione della procedura statistica descritta in Appendice conduce ad una stima di $E'_k = 59.5 \text{ kN/m}^2$. Nelle analisi si è assunto un valore caratteristico $E'_k = 60 \text{ N/mm}^2$.

Sondaggio	Campione	Prof. da (m)	Prof. a (m)	Prof. (m)	E_u (kN/m^2)	E' (kN/m^2)
S25	C1	5.0	5.3	5.2	46.2	40.0
S27	C1	5.0	5.3	5.2	55.8	48.4
S29	C1	4.0	4.3	4.2	51.0	44.2
S29	C2	9.5	9.8	9.7	42.6	36.9
S30	C1	5.0	5.5	5.2	75.3	65.3
S31	C1	7.0	7.3	7.2	54.3	47.1
S31	C2	13.7	14.0	13.9	76.5	66.3
S32	C2	12.5	12.8	12.7	78.9	68.4
S33	C2	12.5	12.8	12.7	78.9	68.4
S45i	C1	3.0	3.4	3.2	50.7	43.9
S46i	C1	3.3	3.7	3.5	53.1	46.0
S52i	C2	4.5	4.9	4.7	78.3	67.9
S58i	C2	8.5	9.0	8.8	80.1	69.4
S65i	C1	3.5	4.0	3.8	83.4	72.3
S69i	C1	3.0	3.5	3.3	87.6	75.9
S80i	C1	3.0	3.5	3.3	79.8	69.2
S89i	C1	4.0	4.5	4.3	85.2	73.8
S90i	C1	4.5	5.0	4.8	110.4	95.7
S92i	C1	5.5	6.0	5.8	116.1	100.6
S22	C2	9.0	9.3	9.2	69.3	60.1
S31i	C1	4.0	4.5	4.3	74.1	64.2
S8	C2	11.5	11.8	11.7	62.4	54.1
S11	C1	4.0	4.3	4.2	62.7	54.3
S13	C1	4.0	4.3	4.2	119.4	103.5
S16i	C1	3.0	3.4	3.2	98.1	85.0
S18i	C1	2.7	3.2	3.0	97.8	84.8

Tabella 8 – Caratteristiche di deformabilità.

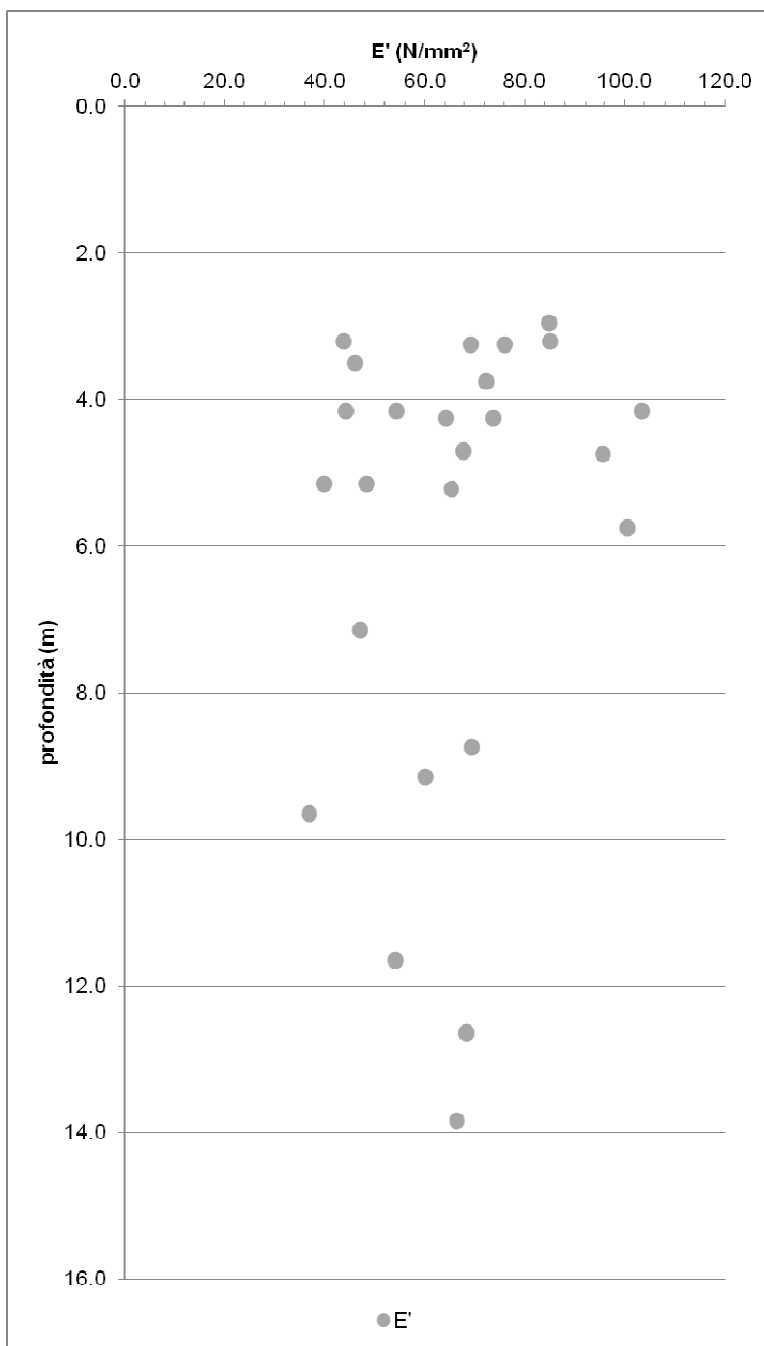


Figura 7 – Modulo di Young E' con la profondità.

5.1.1.3 PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI E DI PROGETTO

In definitiva per l'Unità Geotecnica 1 di definiscono i parametri geotecnici caratteristici e di progetto di Tabella 9. Questi ultimi sono stati determinati a partire da quelli caratteristici attraverso l'applicazione dei coefficienti di sicurezza parziali γ_M dei gruppi M1 e M2 contenuti nella Tabella 6.2.II delle NTC2018.

parametro	valore caratteristico	valore di progetto (M1)	valore di progetto (M2)
Peso dell'unità di volume, γ (kN/m ³)	18.5	18.5	18.5
Angolo di resistenza al taglio, ϕ' (°)	19.0	19.0	15.4
Coesione efficace, c' (kN/m ²)	22.0	22.0	17.6
Resistenza al taglio non drenata, c_u (kN/m ²)	110	110	78.6
Modulo di Young, E' (N/mm ²)	60	60	60

Tabella 9 – Parametri geotecnici caratteristici e di progetto.

 RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo	CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016 Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo
304817_S01_PD_TG- - _02_000_E0017	Relazione geotecnica

5.1.2 UG2

5.1.2.1 CARATTERISTICHE GENERALI

La Tabella 10 riporta le caratteristiche fisiche, le proprietà indice e le caratteristiche granulometriche relative ai campioni prelevati nell'Unità Geotecnica 2. La Figura 8, la Figura 9 e la Figura 10 sono relative, rispettivamente, agli andamenti con la profondità dei limiti liquido e plastico e del contenuto d'acqua, dei pesi dell'unità di volume totale e secco e delle frazioni granulometriche. La Figura 11 e la Figura 12 riportano, rispettivamente, i risultati dei limiti di Atterberg nella Carta di plasticità di Casagrande (1948) e i punti sperimentali IP – CF (< 0.002 mm).

La carta, come noto, è divisa in sei regioni dalla retta A di equazione $IP = 0.73 \cdot (w_L - 20)$ e dalle due rette verticali $w_L = 30$ e $w_L = 50$. Com'è possibile osservare i terreni della UG2 ricadono al di sopra della retta A e presentano un limite liquido w_L compreso tra 30 e 50 e, pertanto, possono essere classificati come argille inorganiche di media ed elevata plasticità. Il contenuto d'acqua naturale w è inferiore al limite plastico w_p , come si può notare dalla Figura 8, e l'indice di consistenza I_c è superiore all'unità, denotando una consistenza semisolida – solida. L'indice di attività I_A , dato dal rapporto tra l'indice di plasticità IP e la frazione argillosa CF, non è mai inferiore a 0.75 (tranne che per un numero esiguo di campioni), ossia i terreni sono normalmente attivi o attivi, come si può notare dalla Figura 12.

I risultati dell'analisi granulometrica consentono di identificare la natura limoso – argillosa dei terreni: si tratta di limi con argilla o argille con limi sabbiosi o debolmente sabbiosi; rispetto all'Unità Geotecnica 1 i campioni presentano più frequentemente una maggiore frazione limosa rispetto a quella argillosa.

Il peso dell'unità di volume totale γ non mostra un trend significativo con la profondità (si veda la Figura 9) e il valore caratteristico γ_k assunto in sede di analisi, determinato secondo la procedura statistica descritta in Appendice alla presente relazione, è pari a 18.0 kN/m³.

Sondaggio	Campione	Prof. da	Prof. a	Prof.	w	w _L	w _p	IP	I _c	γ	γ _d	γ _s	G	S	L	A
		(m)	(m)	(m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)
S87i	C1	3.0	3.5	3.3	16.3	43.5	23.6	19.9	1.4	19.6	16.8	25.8	0.0	14.0	52.0	34.0
S51i	C1	4.0	4.5	4.3	15.8	54.2	18.4	35.8	1.1	19.3	16.6	25.9	0.0	22.0	48.0	30.0
S73i	C1	4.0	4.5	4.3	20.5	58.6	23.6	35.0	1.1	19.0	15.8	25.8	0.0	12.0	46.0	42.0
S82i	C1	4.0	4.5	4.3	26.1	55.1	27.4	27.7	1.0	18.0	14.3	25.8	0.0	12.0	48.0	40.0
S53i	C1	4.5	5.0	4.8	14.7	64.2	17.8	46.3	1.1	16.0	14.0	26.2	0.0	14.0	50.0	36.0
S59i	C2	6.0	6.4	6.2	24.2	50.3	26.5	23.7	1.1	18.6	15.0	25.9	0.0	22.0	40.0	38.0
S71i	C2	6.0	6.4	6.2	18.4	52.2	18.5	33.6	1.0	18.6	15.7	25.9	0.0	24.0	48.0	28.0
S72i	C2	6.0	6.4	6.2	18.9	45.6	24.7	20.9	1.3	20.1	16.9	25.8	0.0	16.0	46.0	38.0
S86i	C1	6.0	6.5	6.3	22.6	56.0	22.3	33.7	1.0	19.8	16.2	26.1	0.0	18.0	42.0	40.0
S57i	C2	6.5	7.0	6.8	17.4	41.1	25.1	16.0	1.5	15.0	12.8	26.3	0.0	38.0	46.0	16.0
S84i	C2	6.5	7.0	6.8	12.9	54.7	23.3	31.4	1.3	18.4	16.3	26.0	0.0	20.0	44.0	36.0
S76i	C1	7.0	7.5	7.3	28.3	64.5	23.6	40.9	0.9	18.5	14.5	25.8	0.0	12.0	36.0	52.0
S85i	C2	7.0	7.5	7.3	20.2	61.6	22.8	38.8	1.1	18.0	14.9	26.2	0.0	14.0	46.0	40.0
S87i	C2	7.5	8.0	7.8	16.1	38.3	22.6	15.6	1.4	19.6	16.9	25.8	0.0	26.0	42.0	32.0
S60i	C2	8.0	8.4	8.2	16.6	49.2	23.2	26.0	1.3	15.8	13.6	26.3	0.0	26.0	40.0	34.0
S65i	C2	8.0	8.5	8.3	14.6	52.1	22.0	30.2	1.2	18.4	16.0	26.3	0.0	14.0	50.0	36.0
S67i	C2	13.0	3.5	8.3	20.4	57.6	26.8	30.9	1.2	19.1	15.9	26.1	0.0	14.0	42.0	44.0
S45i	C2	8.5	8.8	8.7	11.1	35.6	19.6	16.0	1.5	16.4	14.7	25.7	10.0	18.0	50.0	22.0
S50i	C2	8.5	9.0	8.8	20.1	40.7	25.2	15.5	1.3	18.4	15.3	26.1	0.0	20.0	40.0	40.0
S54i	C2	9.0	9.3	9.2	15.6	56.6	17.8	38.8	1.1	18.9	16.4	26.1	12.0	18.0	40.0	30.0
S47i	C2	9.0	9.5	9.3	24.0	52.8	24.4	28.4	1.0	19.9	16.1	26.1	0.0	18.0	48.0	34.0
S63i	C2	9.0	9.5	9.3	21.9	57.9	17.9	39.9	0.9	20.1	16.5	25.8	0.0	18.0	42.0	40.0
S82i	C2	9.0	9.5	9.3	20.2	60.3	22.3	38.0	1.1	19.3	16.1	25.7	0.0	16.0	44.0	40.0
S66i	C2	9.3	9.7	9.5	14.0	57.3	18.1	39.2	1.1	17.1	15.0	25.8	0.0	12.0	44.0	44.0
S78i	C2	9.5	10.0	9.8	22.9	55.4	27.6	27.8	1.2	17.8	14.5	25.8	0.0	16.0	26.0	58.0
S89i	C2	9.5	10.0	9.8	17.7	53.2	24.4	28.9	1.2	20.6	17.5	25.8	0.0	20.0	42.0	38.0
S25	C2	10.0	10.2	10.1	23.9	43.9	26.8	17.2	1.2	18.3	14.8	25.7	0.0	48.0	40.0	12.0
S27	C2	10.7	11.0	10.9	19.8	43.0	21.4	21.5	1.1	19.2	16.0	26.5	2.0	52.0	28.0	18.0
S90i	C2	11.0	11.5	11.3	16.4	66.4	22.0	44.3	1.1	17.3	14.8	25.8	0.0	10.0	38.0	52.0
S76i	C2	11.5	12.0	11.8	19.2	59.5	18.9	40.7	1.0	20.6	17.3	25.7	0.0	20.0	40.0	40.0
S93i	C2	11.5	12.0	11.8	14.4	52.7	24.1	44.3	0.9	19.2	16.8	25.9	0.0	10.0	58.0	32.0
S52i	C3	12.0	12.5	12.3	17.8	53.6	18.3	35.2	1.0	19.7	16.7	25.8	0.0	14.0	46.0	40.0
S68i	C2	12.0	12.5	12.3	23.0	54.9	28.6	26.3	1.2	18.8	15.3	26.2	0.0	22.0	28.0	50.0
S69i	C2	12.0	12.5	12.3	19.4	56.4	25.5	30.9	1.2	19.8	16.6	26.2	0.0	14.0	36.0	50.0
S91i	C2	12.0	12.5	12.3	21.4	44.6	19.5	44.3	0.5	20.2	16.7	25.7	0.0	14.0	34.0	52.0
S70i	C2	12.5	13.0	12.8	18.4	56.5	26.5	30.0	1.3	18.1	15.3	26.1	0.0	14.0	40.0	46.0
S24	C2	13.0	13.3	13.2	17.3	46.3	26.3	20.0	1.5	19.3	16.5	25.6	0.0	22.0	52.0	26.0

S26	C2	13.7	14.0	13.9	17.7	42.1	25.8	16.3	1.5	18.8	16.0	25.5	4.0	16.0	50.0	30.0
S58i	C3	15.0	15.4	15.2	17.9	51.4	22.2	29.2	1.1	18.7	15.9	25.9	0.0	30.0	48.0	22.0
S92i	C2	15.0	15.5	15.3	17.4	53.0	24.6	44.3	0.8	17.9	15.3	26.2	0.0	14.0	40.0	46.0
S26	C3	17.5	18.0	17.8	15.8	42.3	26.9	15.4	1.7	17.5	15.1	25.7	0.0	28.0	40.0	32.0
S28	C3	19.0	19.3	19.2	14.8	46.8	25.0	21.8	1.5	16.5	14.4	26.5	4.0	32.0	36.0	28.0
S31	C3	19.0	19.3	19.2	19.4	58.2	18.1	40.0	1.0	17.2	14.4	25.7	0.0	14.0	42.0	44.0
S24	C3	20.0	20.3	20.2	14.8	48.4	24.9	23.6	1.4	16.2	14.1	26.5	4.0	26.0	42.0	28.0
S23	C3	20.0	20.4	20.2	10.3	39.0	20.4	18.6	1.5	17.9	16.2	25.5	0.0	26.0	58.0	16.0
S29	C3	21.0	21.3	21.2	18.7	45.7	22.7	23.0	1.2	17.1	14.4	26.2	0.0	24.0	48.0	28.0
S32	C3	24.0	24.3	24.2	12.8	59.7	26.7	33.0	1.4			26.0	0.0	14.0	36.0	50.0
S25	C3	25.0	25.3	25.2	14.5	46.7	23.7	23.0	1.4	15.9	13.9	25.6	16.0	38.0	22.0	24.0
S27	C3	25.0	25.3	25.2	12.7	34.7	19.9	14.8	1.5	18.3	16.3	27.0	16.0	30.0	34.0	20.0
S33	C3	25.0	25.3	25.2	10.6	49.7	21.2	28.5	1.4	18.5	16.7	26.3	0.0	34.0	38.0	28.0
S43i	C1	4.5	5.0	4.8	25.9	55.2	24.2	31.0	0.9	18.0	14.3	25.9	0.0	24.0	38.0	38.0
S34i	C2	6.0	6.5	6.3	19.7	40.3	21.7	18.7	1.1	18.0	15.1	25.9	0.0	26.0	34.0	40.0
S38i	C2	6.5	7.0	6.8	16.2	54.3	21.7	32.6	1.2	19.0	16.3	26.1	0.0	16.0	38.0	46.0
S31i	C2	8.0	8.4	8.2	16.9	40.7	25.3	15.4	1.6	17.8	15.2	25.9	0.0	28.0	42.0	30.0
S36i	C2	9.0	9.5	9.3	13.7	54.4	23.0	31.4	1.3	18.8	16.5	26.0	0.0	18.0	38.0	44.0
S41i	C2	10.3	10.7	10.5	17.7	55.0	20.6	34.4	1.1	17.5	14.9	25.8	0.0	12.0	58.0	30.0
S19	C3	15.0	15.3	15.2	20.5	31.5	24.3	7.2	1.5	17.8	14.8	25.9	0.0	68.0	26.0	6.0
S20	C2	16.4	16.7	16.6	17.7	32.9	23.7	9.2	1.7	19.2	16.3	25.9	0.0	16.0	46.0	38.0
S22	C3	20.0	20.3	20.2	21.0	46.2	23.8	22.4	1.1	18.2	15.1	26.1	0.0	20.0	48.0	32.0
S21	C3	20.5	20.8	20.7	17.2	51.8	21.1	30.7	1.1	16.0	13.6	25.9	0.0	10.0	48.0	42.0
S20	C3	26.3	26.6	26.5	14.0	51.1	24.1	27.0	1.4	18.3	16.0	25.9	4.0	42.0	20.0	34.0
S28i	C1	4.0	4.4	4.2	22.4	53.9	27.5	26.4	1.2	19.4	15.9	25.8	0.0	20.0	38.0	42.0
S29i	C2	7.5	8.0	7.8	19.7	44.5	22.2	22.3	1.1	18.2	15.2	25.7	0.0	18.0	50.0	32.0
S13	C2	9.0	9.3	9.2	18.5	49.7	26.0	23.7	1.3	19.9	16.8	26.0	0.0	12.0	46.0	42.0
S30i	C2	9.3	9.7	9.5	14.4	54.1	27.4	26.7	1.5	19.8	17.4	25.7	0.0	18.0	46.0	36.0
S10	C3	10.0	10.3	10.2	15.5	37.0	22.6	14.3	1.5	18.4	15.9	26.0	0.0	56.0	32.0	12.0
S11	C2	10.0	10.3	10.2	17.2	47.2	26.9	20.3	1.5	16.8	14.3	25.9	0.0	18.0	32.0	50.0
S12	C2	10.0	10.3	10.2	10.9	64.9	21.8	43.1	1.3	19.7	17.8	26.0	0.0	50.0	20.0	30.0
S5	C2	10.0	10.3	10.2	11.1	34.2	22.9	11.3	2.0	18.2	16.4	26.0	2.0	42.0	40.0	16.0
S6	C3	11.0	11.3	11.2	16.8	38.4	23.4	15.0	1.4	16.7	14.3	25.8	0.0	40.0	44.0	16.0
S4	C2	11.2	11.5	11.4	11.7	29.9	18.3	11.6	1.6	18.3	16.4	26.0	2.0	40.0	44.0	14.0
S9	C3	12.5	12.8	12.7	10.7	51.2	24.3	26.9	1.5	18.3	16.5	26.1	4.0	46.0	32.0	18.0
S13	C3	15.0	15.3	15.2	18.8	59.0	30.0	29.0	1.4	19.2	16.3	25.9	0.0	12.0	34.0	54.0
S12	C3	16.0	16.3	16.2	10.2	27.3	17.0	10.3	1.7	17.1	15.6	26.1	0.0	50.0	20.0	30.0
S7	C3	17.0	17.2	17.1	16.3	75.2	25.7	49.5	1.2	20.3	17.4	26.5	0.0	12.0	54.0	34.0
S5	C3	18.0	18.3	18.2	13.7	40.3	24.2	16.1	1.7	17.7	15.6	25.9	2.0	34.0	42.0	22.0

S4	C3	18.8	19.0	18.9	7.7	38.9	23.2	15.7	2.0			26.1	0.0	44.0	42.0	14.0
S11	C3	20.0	20.3	20.2	15.0	63.3	28.1	35.3	1.4	18.7	16.3	26.1	0.0	22.0	26.0	52.0
S6	C4	20.0	20.3	20.2	14.7	38.0	25.5	12.4	1.9	17.8	15.5	26.1	0.0	46.0	36.0	18.0
S8	C3	20.0	20.3	20.2	16.9	56.1	20.8	35.4	1.1	19.8	17.0	26.1	0.0	16.0	34.0	50.0
S9	C4	21.0	21.3	21.2	11.9	24.2	16.0	8.2	1.5	17.7	15.8	26.0	28.0	38.0	20.0	14.0
S7	C4	22.0	22.3	22.2	14.8	76.1	27.4	48.7	1.3	19.8	17.3	26.2	0.0	10.0	46.0	44.0
S8	C4	25.0	25.3	25.2	16.4	55.2	20.2	35.0	1.1	17.7	15.2	26.2	0.0	14.0	46.0	40.0
S6i	C1	7.0	7.5	7.3	19.5	40.1	20.8	19.3	1.1	16.2	13.5	25.8	0.0	16.0	40.0	44.0
S6i	C2	12.5	13.0	12.8	24.7	58.4	26.0	32.5	1.0	18.6	14.9	25.6	2.0	12.0	50.0	36.0
S7i	C2	10.5	11.0	10.8	28.5	61.0	25.6	35.4	0.9	17.4	13.6	26.1	0.0	16.0	36.0	48.0
S12i	C2	10.0	10.5	10.3	17.5	60.4	22.7	37.7	1.1	18.2	15.5	25.7	0.0	16.0	42.0	42.0
S3	C3	12.0	12.3	12.2	14.0	38.3	23.1	15.2	1.6	18.3	16.1	25.9	0.0	36.0	40.0	24.0
S3	C4	20.0	20.3	20.2	20.4	39.0	21.3	17.7	1.1	20.2	16.8	26.1	0.0	34.0	44.0	22.0
S17i	C2	8.0	8.4	8.2	12.2	61.3	23.0	38.3	1.3	16.8	15.0	25.9	0.0	16.0	44.0	40.0
S18i	C2	9.0	9.5	9.3	13.4	53.8	25.4	28.4	1.4	18.9	16.6	25.7	0.0	18.0	38.0	44.0
S97i	C2	12.5	13.0	12.8	18.5	63.1	25.2	37.9	1.0	21.3	18.0	25.7	0.0	10.0	38.0	52.0
S98i	C3	12.5	13.0	12.8	21.3	63.2	24.9	38.3	1.0	17.4	14.4	25.8	0.0	12.0	46.0	42.0

Tabella 10 – Caratteristiche fisiche, proprietà indice e caratteristiche granulometriche dell'Unità Geotecnica 2.

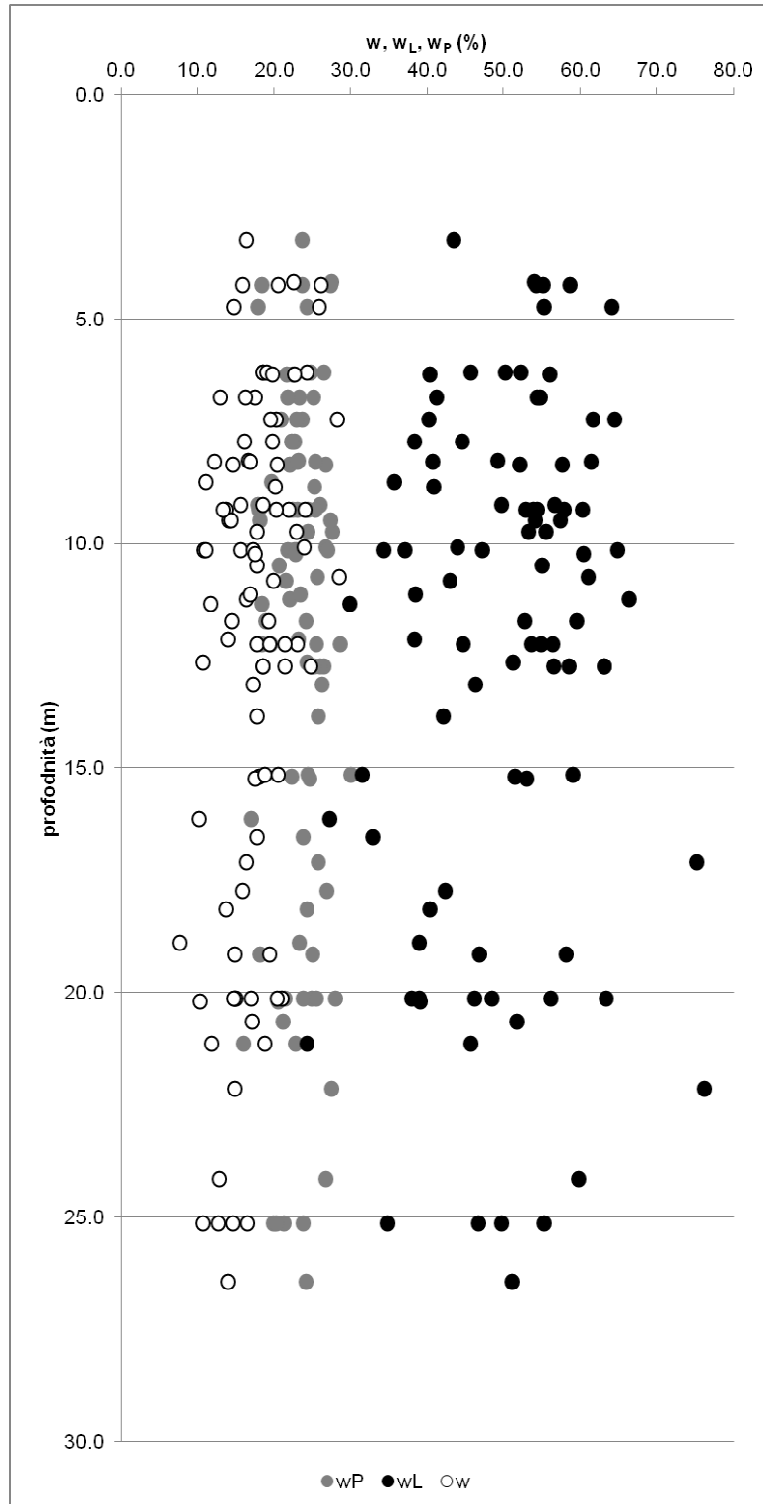


Figura 8 – Limiti di Atterberg e contenuto d'acqua naturale con la profondità.

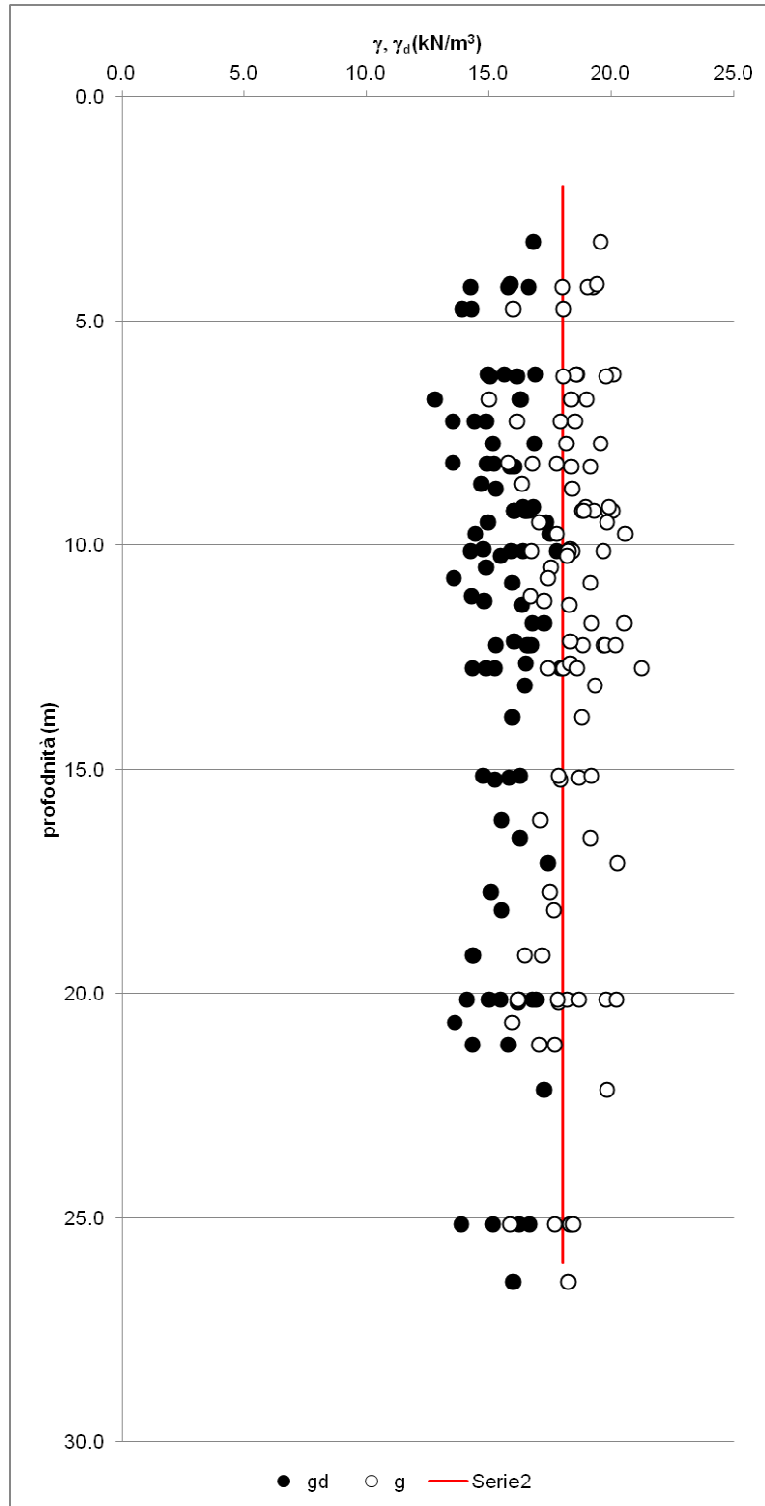


Figura 9 – Pesì dell'unità di volume totale e secco con la profondità.

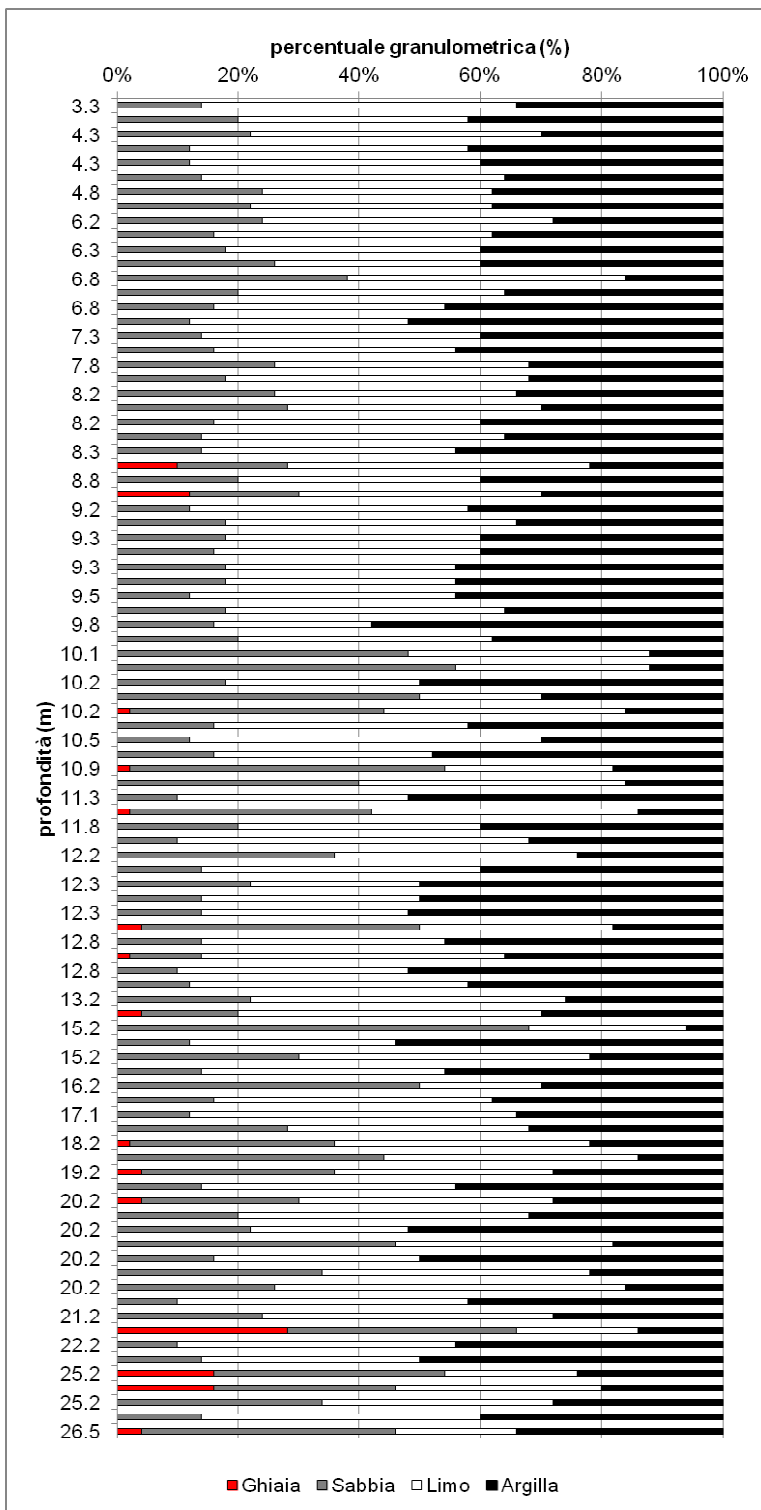


Figura 10 – Frazioni granulometriche con la profondità.

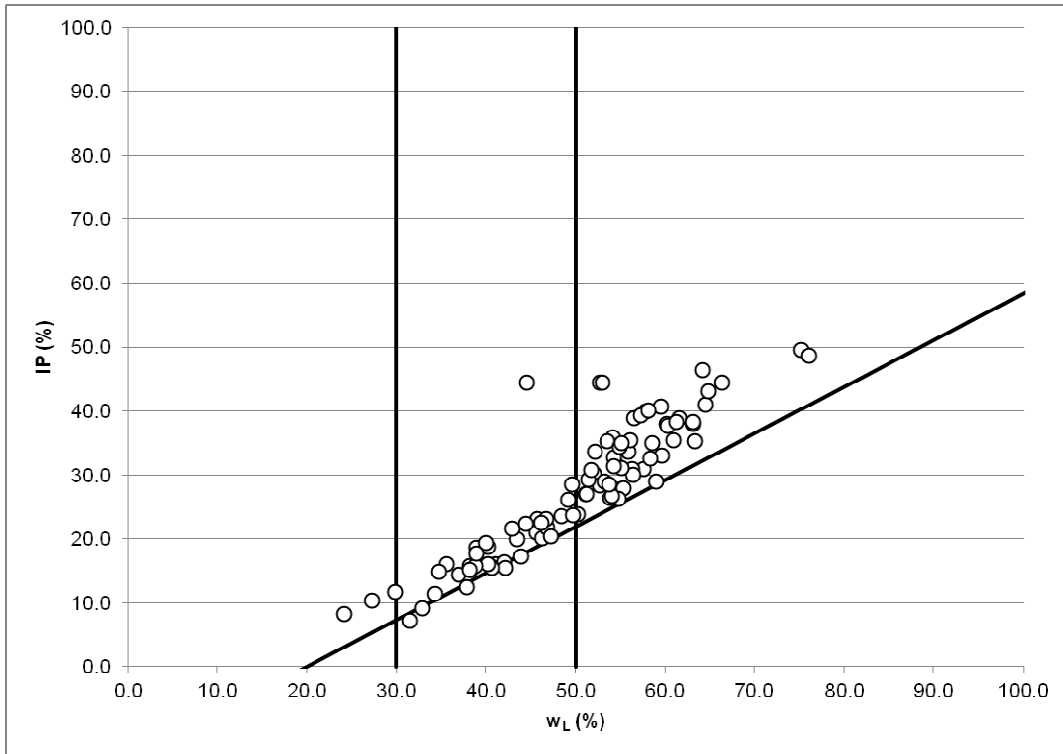


Figura 11 – Carta di plasticità di Casagrande.

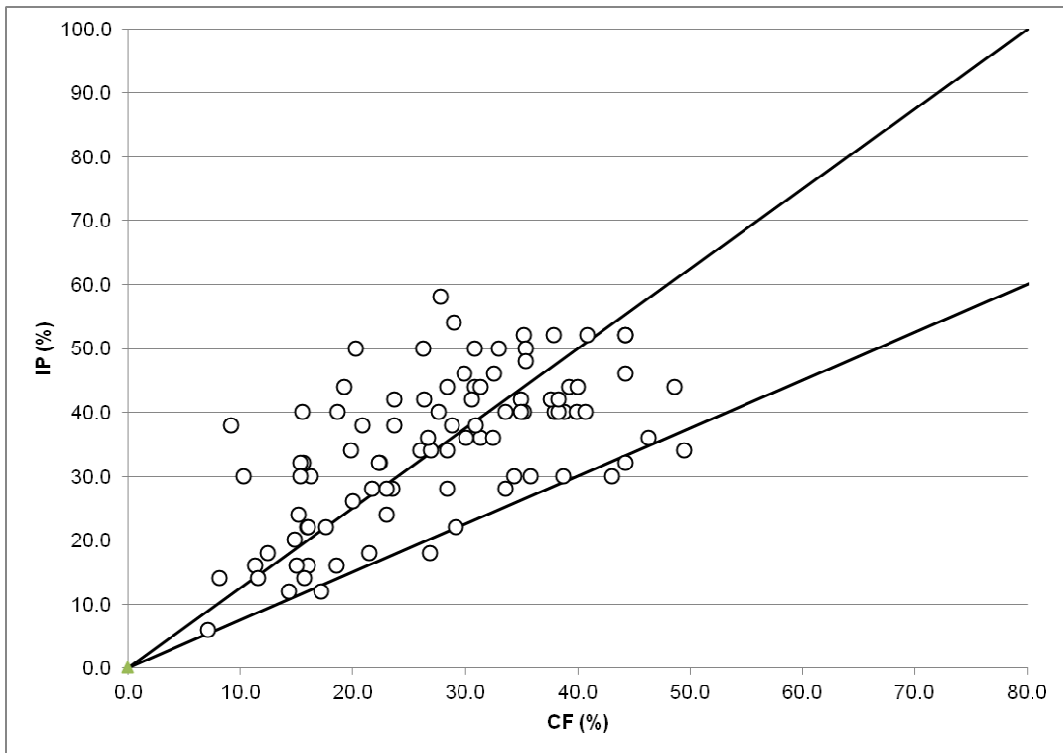


Figura 12 – Andamento IP – CF.

5.1.2.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE

Nel seguito sono analizzate le caratteristiche meccaniche dell'Unità Geotecnica 2, come risultano dalle prove di laboratorio, rese disponibili per le analisi. In particolare, si sono esaminate le caratteristiche di resistenza e deformabilità che hanno maggiore influenza sulla impostazione generale del progetto in esame.

La compressibilità è stata caratterizzata attraverso l'analisi delle prove edometriche, dalle quali sono stati ricavati gli indici di compressione e rigonfiamento C_c e C_s , il modulo edometrico M e il coefficiente di consolidazione c_v in corrispondenza della tensione verticale efficace σ'_{v0} , stimata alla profondità di prelievo del campione indisturbato.

Da un'analisi attenta delle curve edometriche, non è stato possibile determinare con affidabilità la tensione di preconsolidazione σ'_{vc} e, conseguentemente, il grado di sovraconsolidazione OCR, poiché le curve mancano dei primi gradini di carico (alle tensioni verticali efficaci di 25 e/o 50 kN/m²), rendendo impossibile la ricostruzione del ramo di ricomprensione, necessario per l'applicazione dell'usuale metodo di Casagrande. La Tabella 4 sintetizza le caratteristiche di cui sopra.

Sondaggio	Campione	Prof. da	Prof. a	Prof.	C_c	C_s	C_v	M
		(m)	(m)	(m)	(-)	(-)	(m ² /s)	(N/mm ²)
S73i	C1	4.0	4.5	4.3	0.199	0.076		10.5
S84i	C2	6.5	7.0	6.8	0.250	0.069		2.4
S85i	C2	7.0	7.5	7.3	0.254	0.091		2.5
S45i	C2	8.5	8.8	8.7	0.174	0.024		5.6
S50i	C2	8.5	9.0	8.8	0.173	0.044		10.2
S66i	C2	9.3	9.7	9.5	0.204	0.081		4.7
S78i	C2	9.5	10.0	9.8	0.228	0.079		3.0
S58i	C3	15.0	15.4	15.2	0.186	0.059		8.0
S6i	C2	12.5	13.0	12.8	0.189	0.069		6.3
S7i	C2	10.5	11.0	10.8	0.235	0.091		3.9
S12i	C2	10.0	10.5	10.3	0.189	0.083		7.5
S17i	C2	8.0	8.4	8.2	0.209	0.081		4.3
S18i	C2	9.0	9.5	9.3	0.262	0.106		3.0
S97i	C2	12.5	13.0	12.8	0.140	0.081		17.2

Tabella 11 – Caratteristiche di compressibilità.

L'indice di compressione C_c varia tra 0.14 e 0.26, mentre l'indice di rigonfiamento C_s varia tra 0.04 e 0.11 con un unico campione che presenta un valore inferiore (0.02 – campione C2 sondaggio S45i). il coefficiente di consolidazione C_v varia nell'intervallo.

Le caratteristiche di resistenza al taglio espresse in termini di tensioni efficaci (c' e ϕ') sono state ricavate dall'analisi delle prove triassiali consolidate drenate TxCID e non drenate TxCIU e delle prove di taglio diretto DS, eseguite in laboratorio su campioni indisturbati (si veda la Tabella 12). Si precisa che i parametri di resistenza al taglio riportati sono rilevativi alle condizioni di picco (c'_p e ϕ'_p) essendo stati determinati in

corrispondenza del massimo valore di τ nelle curve $\tau - \delta_h$ delle prove di taglio diretto e di $q (= \sigma'_1 - \sigma'_3)$ nelle curve $q - \varepsilon_a$ delle prove triassiali.

Sondaggio	Campione	Prof. da (m)	Prof. a (m)	Prof. (m)	φ' (°)	c' (kN/m ²)
S87i	C1	3.0	3.5	3.3	23.2	22.1
S51i	C1	4.0	4.5	4.3	22.1	17.7
S82i	C1	4.0	4.5	4.3	19.4	19.7
S53i	C1	4.5	5.0	4.8	22.2	13.4
S71i	C2	6.0	6.4	6.2	21.7	20.4
S72i	C2	6.0	6.4	6.2	19.7	24.2
S57i	C2	6.5	7.0	6.8	30.0	11.9
S76i	C1	7.0	7.5	7.3	21.8	18.5
S87i	C2	7.5	8.0	7.8	19.4	24.9
S65i	C2	8.0	8.5	8.3	19.7	47.1
S67i	C2	13.0	3.5	8.3	18.2	43.6
S45i	C2	8.5	8.8	8.7	29.5	43.5
S50i	C2	8.5	9.0	8.8	25.4	33.7
S54i	C2	9.0	9.3	9.2	17.9	13.0
S47i	C2	9.0	9.5	9.3	18.8	19.8
S63i	C2	9.0	9.5	9.3	20.8	27.9
S66i	C2	9.3	9.7	9.5	15.4	26.1
S25	C2	10.0	10.2	10.1	19.4	15.2
S27	C2	10.7	11.0	10.9	26.6	18.1
S90i	C2	11.0	11.5	11.3	19.5	30.4
S76i	C2	11.5	12.0	11.8	25.2	14.6
S93i	C2	11.5	12.0	11.8	11.1	33.9
S52i	C3	12.0	12.5	12.3	17.9	18.1
S68i	C2	12.0	12.5	12.3	23.9	14.7
S24	C2	13.0	13.3	13.2	25.0	27.6
S26	C2	13.7	14.0	13.9	22.5	22.2
S92i	C2	15.0	15.5	15.3	17.6	11.1
S26	C3	17.5	18.0	17.8	26.6	19.2
S28	C3	19.0	19.3	19.2	32.3	4.3
S31	C3	19.0	19.3	19.2	17.8	16.7
S29	C3	21.0	21.3	21.2	25.7	30.6
S25	C3	25.0	25.3	25.2	29.1	9.6
S27	C3	25.0	25.3	25.2	22.6	20.2
S33	C3	25.0	25.3	25.2	23.6	58.6

S43i	C1	4.5	5.0	4.8	32.3	10.1
S34i	C2	6.0	6.5	6.3	25.5	27.1
S31i	C2	8.0	8.4	8.2	16.2	26.7
S41i	C2	10.3	10.7	10.5	25.4	26.0
S19	C3	15.0	15.3	15.2	22.9	3.5
S22	C3	20.0	20.3	20.2	25.0	25.3
S20	C3	26.3	26.6	26.5	18.1	40.4
S28i	C1	4.0	4.4	4.2	17.9	19.3
S29i	C2	7.5	8.0	7.8	18.2	31.9
S30i	C2	9.3	9.7	9.5	19.9	7.5
S10	C3	10.0	10.3	10.2	22.6	26.2
S5	C2	10.0	10.3	10.2	27.2	24.7
S6	C3	11.0	11.3	11.2	17.7	32.6
S4	C2	11.2	11.5	11.4	28.3	6.1
S13	C3	15.0	15.3	15.2	22.5	10.0
S7	C3	17.0	17.2	17.1	18.6	17.0
S11	C3	20.0	20.3	20.2	26.1	4.0
S6	C4	20.0	20.3	20.2	21.4	29.8
S8	C3	20.0	20.3	20.2	16.7	29.2
S9	C4	21.0	21.3	21.2	34.6	26.0
S7	C4	22.0	22.3	22.2	14.7	31.0
S8	C4	25.0	25.3	25.2	21.4	12.9
S6i	C1	7.0	7.5	7.3	19.1	14.3
S7i	C2	10.5	11.0	10.8	21.7	21.9
S12i	C2	10.0	10.5	10.3	15.0	22.2
S17i	C2	8.0	8.4	8.2	19.2	9.8
S18i	C2	9.0	9.5	9.3	13.4	17.2
S98i	C3	12.5	13.0	12.8	34.5	40.7

Tabella 12 – Caratteristiche di resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci.

I parametri di resistenza al taglio c'_p e ϕ'_p mostrano una marcata variabilità e la mancanza di un trend significativo con la profondità. L'applicazione della procedura statistica descritta in Appendice ha consentito di determinare valori caratteristici di coesione efficace $c'_k = 20.2 \text{ kN/m}^2$ e angolo di resistenza al taglio $\phi'_k = 21.0^\circ$ (Tabella 13). Nelle analisi si assume per l'Unità Geotecnica 1, $c'_k = 20 \text{ kN/m}^2$ e $\phi'_k = 21^\circ$.

$(\tan\phi')_{\text{mean}}$	0.406
σ_ϕ	0.103
V_ϕ	0.254
$t_{n-1}^{0.95}$	1.671

c'_{mean}	22.565
σ_c	10.988
V_c	0.487
$t_{n-1}^{0.95}$	1.671

$k_{n,mean}$	0.216
$(\tan\varphi')_k$	0.384
φ'_k (°)	21.0

$k_{n,mean}$	0.216
c'_k (kN/m ²)	20.2

Tabella 13 – Parametri di resistenza al taglio caratteristici.

La resistenza al taglio in condizioni non drenate c_u è stata valutata utilizzando i risultati delle prove di espansione laterale libera ELL.

Sondaggio	Campione	Prof. da	Prof. a	Prof.	c_u
		(m)	(m)	(m)	(kN/m ²)
S82i	C1	4.0	4.5	4.3	79.0
S53i	C1	4.5	5.0	4.8	116.5
S57i	C2	6.5	7.0	6.8	210.5
S85i	C2	7.0	7.5	7.3	197.5
S45i	C2	8.5	8.8	8.7	61.5
S54i	C2	9.0	9.3	9.2	81.0
S82i	C2	9.0	9.5	9.3	244.5
S89i	C2	9.5	10.0	9.8	87.0
S27	C2	10.7	11.0	10.9	275.5
S90i	C2	11.0	11.5	11.3	95.0
S76i	C2	11.5	12.0	11.8	229.5
S93i	C2	11.5	12.0	11.8	225.5
S52i	C3	12.0	12.5	12.3	554.0
S68i	C2	12.0	12.5	12.3	148.5
S91i	C2	12.0	12.5	12.3	158.5
S70i	C2	12.5	13.0	12.8	253.0
S24	C2	13.0	13.3	13.2	67.0
S26	C2	13.7	14.0	13.9	118.0
S58i	C3	15.0	15.4	15.2	109.0
S92i	C2	15.0	15.5	15.3	74.0
S26	C3	17.5	18.0	17.8	277.0
S28	C3	19.0	19.3	19.2	104.0
S31	C3	19.0	19.3	19.2	165.0
S24	C3	20.0	20.3	20.2	247.0
S23	C3	20.0	20.4	20.2	226.5
S29	C3	21.0	21.3	21.2	225.5
S32	C3	24.0	24.3	24.2	173.0
S25	C3	25.0	25.3	25.2	193.5

S33	C3	25.0	25.3	25.2	286.0
S34i	C2	6.0	6.5	6.3	151.5
S41i	C2	10.3	10.7	10.5	370.0
S20	C2	16.4	16.7	16.6	245.5
S22	C3	20.0	20.3	20.2	172.0
S21	C3	20.5	20.8	20.7	168.0
S30i	C2	9.3	9.7	9.5	123.0
S6	C3	11.0	11.3	11.2	181.0
S4	C2	11.2	11.5	11.4	313.0
S12	C3	16.0	16.3	16.2	81.5
S11	C3	20.0	20.3	20.2	89.5
S6	C4	20.0	20.3	20.2	222.5
S8	C3	20.0	20.3	20.2	429.0
S8	C4	25.0	25.3	25.2	120.0
S12i	C2	10.0	10.5	10.3	254.0
S97i	C2	12.5	13.0	12.8	124.5
S98i	C3	12.5	13.0	12.8	281.5

Tabella 14 – Resistenza al taglio non drenata.

Anch'essa presenta una notevole variabilità con valori compresi nel range piuttosto ampio $90 \div 300 \text{ kN/m}^2$; un certo numero, comunque esiguo ($n = 3$), di campioni mostra valori maggiori (fino a 550 kN/m^2): questi sono stati scartati perché ritenuti poco affidabili (si vedano la Tabella 14 e la Figura 13). L'applicazione della procedura statistica descritta in Appendice conduce ad una stima di $c_{uk} = 154.0 \text{ kN/m}^2$. Nelle analisi si assume un valore caratteristico $c_{uk} = 150 \text{ kN/m}^2$.

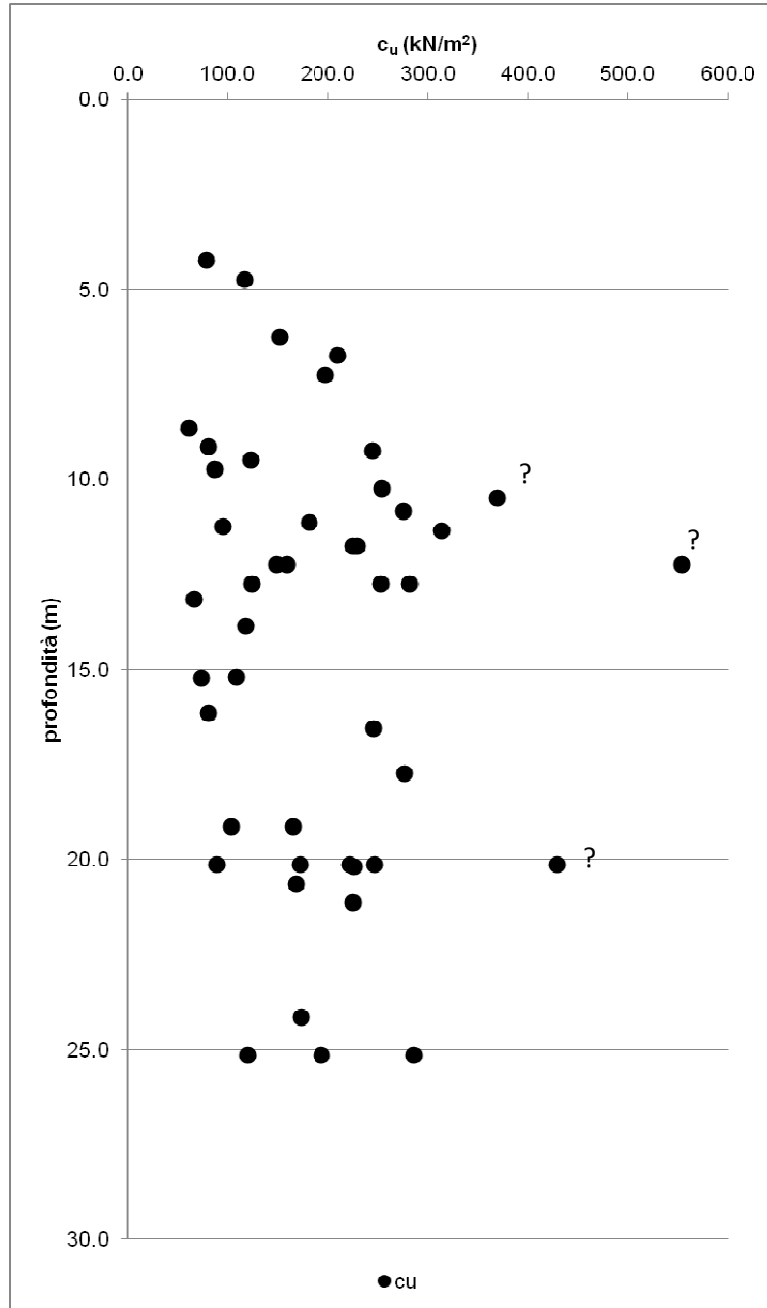


Figura 13 – Resistenza al taglio non drenata con la profondità.

Le caratteristiche di deformabilità sono state valutate nell'ipotesi che il comportamento meccanico dei terreni in condizioni distanti dalla rottura sia elastico lineare. A tale scopo sono stati selezionati valori del modulo di Young E' e del coefficiente di Poisson ν' rappresentativi del campo di deformazioni che generalmente si producono, in condizioni di esercizio, nei problemi di interazione terreno – struttura. In particolare si è assunto un valore del rapporto $E_u/c_u = 600$. Dalle relazioni $G = E_u/3$ ed $E' = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu')$, con $\nu' = 0.3$, si è quindi ricavata una stima del modulo di Young E' . L'applicazione della procedura statistica descritta in Appendice conduce ad una stima di $E'_k = 80.1 \text{ kN/m}^2$. Nelle analisi si è assunto un valore caratteristico $E'_k = 75 \text{ N/mm}^2$.

Sondaggio	Campione	Prof. da (m)	Prof. a (m)	Prof. (m)	E_u (N/mm^2)	E' (N/mm^2)
S82i	C1	4.0	4.5	4.3	47.4	41.1
S53i	C1	4.5	5.0	4.8	69.9	60.6
S57i	C2	6.5	7.0	6.8	126.3	109.5
S85i	C2	7.0	7.5	7.3	118.5	102.7
S45i	C2	8.5	8.8	8.7	36.9	32.0
S54i	C2	9.0	9.3	9.2	48.6	42.1
S82i	C2	9.0	9.5	9.3	146.7	127.1
S89i	C2	9.5	10.0	9.8	52.2	45.2
S27	C2	10.7	11.0	10.9	165.3	143.3
S90i	C2	11.0	11.5	11.3	57	49.4
S76i	C2	11.5	12.0	11.8	137.7	119.3
S93i	C2	11.5	12.0	11.8	135.3	117.3
S68i	C2	12.0	12.5	12.3	89.1	77.2
S91i	C2	12.0	12.5	12.3	95.1	82.4
S70i	C2	12.5	13.0	12.8	151.8	131.6
S24	C2	13.0	13.3	13.2	40.2	34.8
S26	C2	13.7	14.0	13.9	70.8	61.4
S58i	C3	15.0	15.4	15.2	65.4	56.7
S92i	C2	15.0	15.5	15.3	44.4	38.5
S26	C3	17.5	18.0	17.8	166.2	144.0
S28	C3	19.0	19.3	19.2	62.4	54.1
S31	C3	19.0	19.3	19.2	99	85.8
S24	C3	20.0	20.3	20.2	148.2	128.4
S23	C3	20.0	20.4	20.2	135.9	117.8
S29	C3	21.0	21.3	21.2	135.3	117.3
S32	C3	24.0	24.3	24.2	103.8	90.0
S25	C3	25.0	25.3	25.2	116.1	100.6
S33	C3	25.0	25.3	25.2	171.6	148.7
S34i	C2	6.0	6.5	6.3	90.9	78.8

S20	C2	16.4	16.7	16.6	147.3	127.7
S22	C3	20.0	20.3	20.2	103.2	89.4
S21	C3	20.5	20.8	20.7	100.8	87.4
S30i	C2	9.3	9.7	9.5	73.8	64.0
S6	C3	11.0	11.3	11.2	108.6	94.1
S4	C2	11.2	11.5	11.4	187.8	162.8
S12	C3	16.0	16.3	16.2	48.9	42.4
S11	C3	20.0	20.3	20.2	53.7	46.5
S6	C4	20.0	20.3	20.2	133.5	115.7
S8	C4	25.0	25.3	25.2	72	62.4
S12i	C2	10.0	10.5	10.3	152.4	132.1
S97i	C2	12.5	13.0	12.8	74.7	64.7
S98i	C3	12.5	13.0	12.8	168.9	146.4

Tabella 15 – Caratteristica di deformabilità.

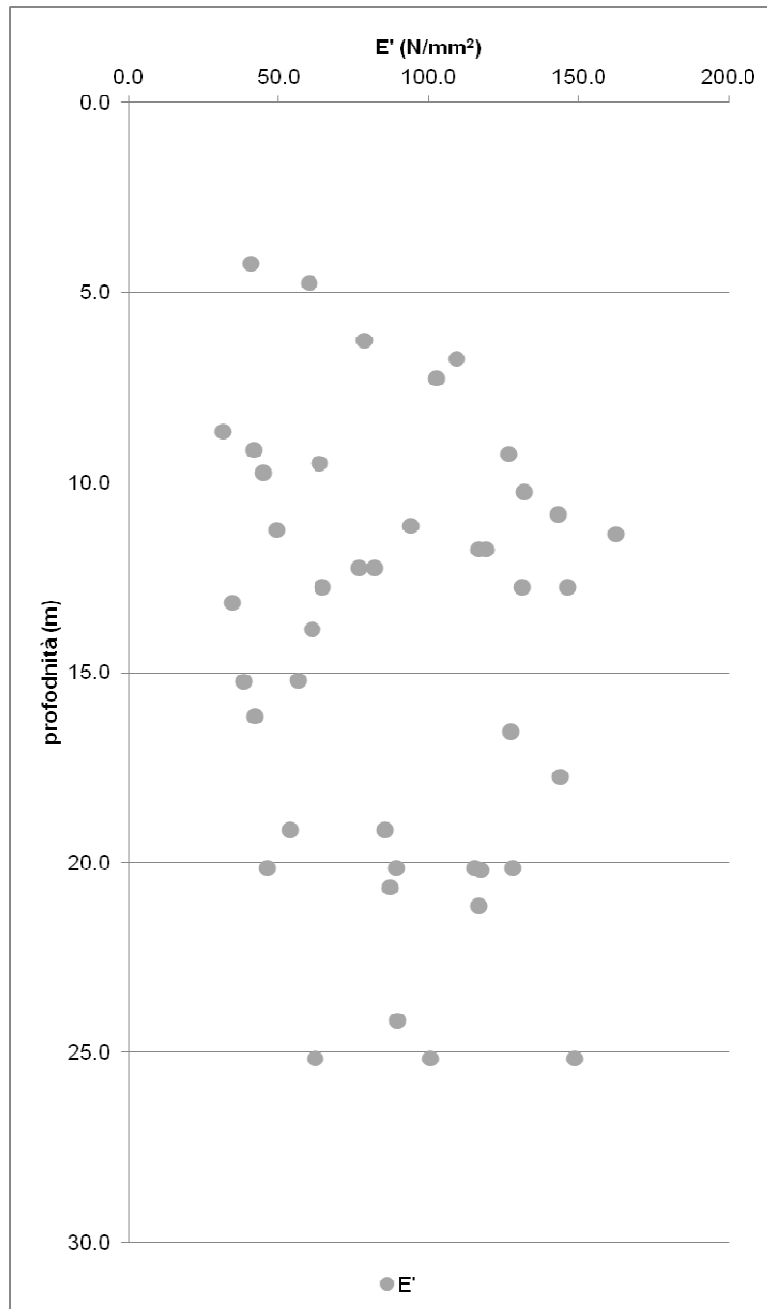


Figura 14 – Modulo di Young E' con la profondità.

5.1.2.3 PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI E DI PROGETTO

In definitiva per l'Unità Geotecnica 2 di definiscono i parametri geotecnici caratteristici e di progetto di Tabella 16. Questi ultimi sono stati determinati a partire da quelli caratteristici attraverso l'applicazione dei coefficienti di sicurezza parziali γ_M dei gruppi M1 e M2 contenuti nella Tabella 6.2.II delle NTC2018.

parametro	valore caratteristico	valore di progetto (M1)	valore di progetto (M2)
Peso dell'unità di volume, γ (kN/m ³)	18.0	18.0	18.5
Angolo di resistenza al taglio, ϕ' (°)	21.0	21.0	17.1
Coesione efficace, c' (kN/m ²)	20.0	20.0	16.0
Resistenza al taglio non drenata, c_u (kN/m ²)	150	150	107.1
Modulo di Young, E' (N/mm ²)	75	75	75

Tabella 16 – Parametri geotecnici caratteristici e di progetto.

5.1.3 UG3

Per l'Unità Geotecnica 3, come descritto al paragrafo 5, sono stati assegnati degli intervalli di variabilità dei parametri geotecnici definiti da dati di letteratura. La Tabella 17 riassume tali parametri.

parametro	valore caratteristico	valore di progetto (M1)	valore di progetto (M2)
Peso dell'unità di volume, γ (kN/m ³)	19.0 ÷ 20.0	19.0 ÷ 20.0	19.0 ÷ 20.0
Angolo di resistenza al taglio, ϕ' (°)	30.0 ÷ 34.0	30.0 ÷ 34.0	24.8 ÷ 28.4
Coesione efficace, c' (kN/m ²)	0.0	0.0	0.0
Modulo di Young, E' (N/mm ²)	20 ÷ 30	20 ÷ 30	20 ÷ 30

Tabella 17 – Parametri geotecnici caratteristici e di progetto

5.1.4 UG4

Anche per l'Unità Geotecnica 4, come descritto al paragrafo 5, sono stati assegnati degli intervalli di variabilità dei parametri geotecnici definiti da dati di letteratura. La Tabella 18 riassume tali parametri.

parametro	valore caratteristico	valore di progetto (M1)	valore di progetto (M2)
Peso dell'unità di volume, γ (kN/m ³)	21.0 ÷ 23.0	21.0 ÷ 23.0	21.0 ÷ 23.0
Angolo di resistenza al taglio, ϕ' (°)	30.0 ÷ 35.0	30.0 ÷ 35.0	24.8 ÷ 29.3
Coesione efficace, c' (kN/m ²)	60.0 ÷ 150.0	60.0 ÷ 150.0	48 ÷ 120
Modulo di Young, E' (N/mm ²)	100 ÷ 150	100 ÷ 150	100 ÷ 150

Tabella 18 – Parametri geotecnici caratteristici e di progetto.

5.1.5 RILEVATO FERROVIARIO ESISTENTE

5.1.5.1 CARATTERISTICHE GENERALI

La Tabella 19 riporta le caratteristiche fisiche, le proprietà indice e le caratteristiche granulometriche relative ai campioni prelevati nel corpo del rilevato ferroviario. La Figura 15, la è relativa all'andamento con la profondità delle frazioni granulometriche. La Figura 16 e la Figura 17 riportano, rispettivamente, i risultati dei limiti di Atterberg nella Carta di plasticità di Casagrande (1948) e i punti sperimentali IP – CF (< 0.002 mm).

Com'è possibile osservare i terreni che costituiscono il rilevato esistente ricadono al di sopra della retta A e presentano un limite liquido w_L , con maggiore frequenza superiore al 50% e, pertanto, possono essere classificati come argille inorganiche di elevata plasticità. Il contenuto d'acqua naturale w è prossimo al limite plastico w_p e l'indice di consistenza I_c è inferiore o di poco superiore all'unità, denotando una consistenza solido - plastica. L'indice di attività I_a , dato dal rapporto tra l'indice di plasticità IP e la frazione argillosa CF, non è mai superiore a 1.25, ossia i terreni sono inattivi o normalmente attivi come si può notare dalla Figura 12.

I risultati dell'analisi granulometrica consentono di identificare la natura limoso – argillosa dei terreni che costituiscono il rilevato: si tratta di limi con argilla o argille con limi sabbiosi o debolmente sabbiosi.

Dall'esame delle caratteristiche generali sopra esposte si evince che i materiali con cui sono stati realizzati i rilevati esistenti sono del tutto simili a quelli afferenti all'unità denominata UG1, più superficiale, da cui sono stati prelevati. Il valore caratteristico del peso dell'unità di volume γ_k assunto in sede di analisi, determinato secondo la procedura statistica descritta in Appendice alla presente relazione, è pari a 18.5 kN/m³.

Sondaggio	Campione	Prof. da	Prof. A	Prof.	w	w _L	w _P	IP	γ	γ _d	γ _s	G	S	L	A
		(m)	(m)	(m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)
S1	C1	2.5	2.8	2.7	22.0	46.5	25.8	20.7	20.2	16.6	26.4	2.0	28.0	32.0	38.0
S2	C1	1.6	1.8	1.7	25.0	45.6	21.9	23.7	18.3	14.6	26.2	8.0	34.0	18.0	40.0
S2	C2	6.5	6.8	6.7	19.7	51.7	28.3	23.4	17.6	14.7	25.7	12.0	22.0	28.0	38.0
S3	C1	2.5	2.8	2.6	17.7	42.0	22.6	19.4	17.5	14.9	26.7	0.0	50.0	28.0	22.0
S6	C1	5.0	5.5	5.2	25.0	59.4	23.3	36.2	18.9	15.1	25.8	16.0	14.0	28.0	42.0
S7	C1	6.0	6.3	6.2	17.4	42.2	20.0	22.2	18.4	15.6	25.8	2.0	32.0	26.0	40.0
S8	C1	3.5	3.8	3.7	24.8	55.3	22.2	33.1	18.8	15.0	25.8	2.0	22.0	42.0	34.0
S9	C1	3.0	3.3	3.2	29.5	50.5	22.2	28.3			26.3	2.0	14.0	34.0	50.0
S9	C2	6.5	6.8	6.7	25.9	50.0	22.8	27.2	18.7	14.9	25.9	2.0	20.0	38.0	40.0
S10	C1	2.5	2.8	2.7	29.6	65.8	28.4	37.4	18.5	14.2	26.2	4.0	24.0	24.0	48.0
S10	C2	6.0	6.3	6.2	30.3	64.6	23.4	41.2	18.7	14.4	25.8	0.0	12.0	28.0	60.0
S19	C1	5.3	5.6	5.5	33.0	66.7	28.1	38.6	18.1	13.6	25.8	6.0	14.0	28.0	52.0
S19	C2	8.0	8.3	8.2	24.4	60.9	24.5	36.4	19.3	15.5	25.8	4.0	22.0	28.0	46.0
S20	C1	8.5	8.8	8.7	25.8	57.3	26.1	31.2	19.3	15.3	25.7	0.0	22.0	32.0	46.0
S21	C1	4.0	4.3	4.2	35.0	54.5	30.3	24.3	17.9	13.3	25.8	36.0	10.0	22.0	32.0
S22	C1	3.3	3.6	3.5	28.8	56.2	26.9	29.3	18.3	14.2	25.8	0.0	18.0	32.0	50.0
S23	C1	5.0	5.3	5.2	18.9	52.3	23.8	28.6	19.5	16.4	26.2	2.0	32.0	28.0	38.0
S24	C1	7.0	7.3	7.2	26.6	64.3	24.8	39.5	18.7	14.8	25.6	0.0	14.0	32.0	54.0
S32	C1	5.0	5.3	5.2	24.0	58.2	26.8	31.4	18.9	15.3	25.7	4.0	20.0	28.0	48.0
S33	C1	7.5	7.8	7.7	26.3	58.6	25.8	32.8	18.7	14.8	25.5	2.0	18.0	50.0	30.0

Tabella 19 – Caratteristiche fisiche, proprietà indice e caratteristiche granulometriche dei materiali costituenti il rilevato ferroviario esistente.

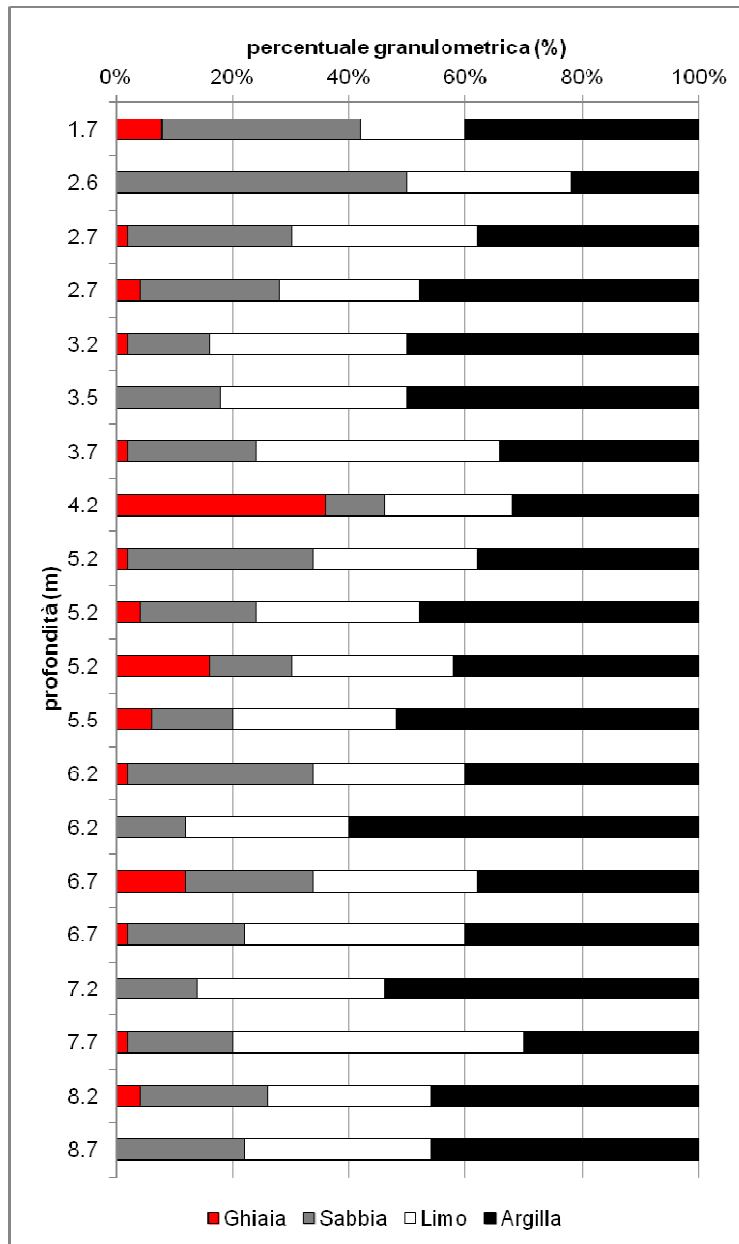


Figura 15 – Frazioni granulometriche con la profondità.

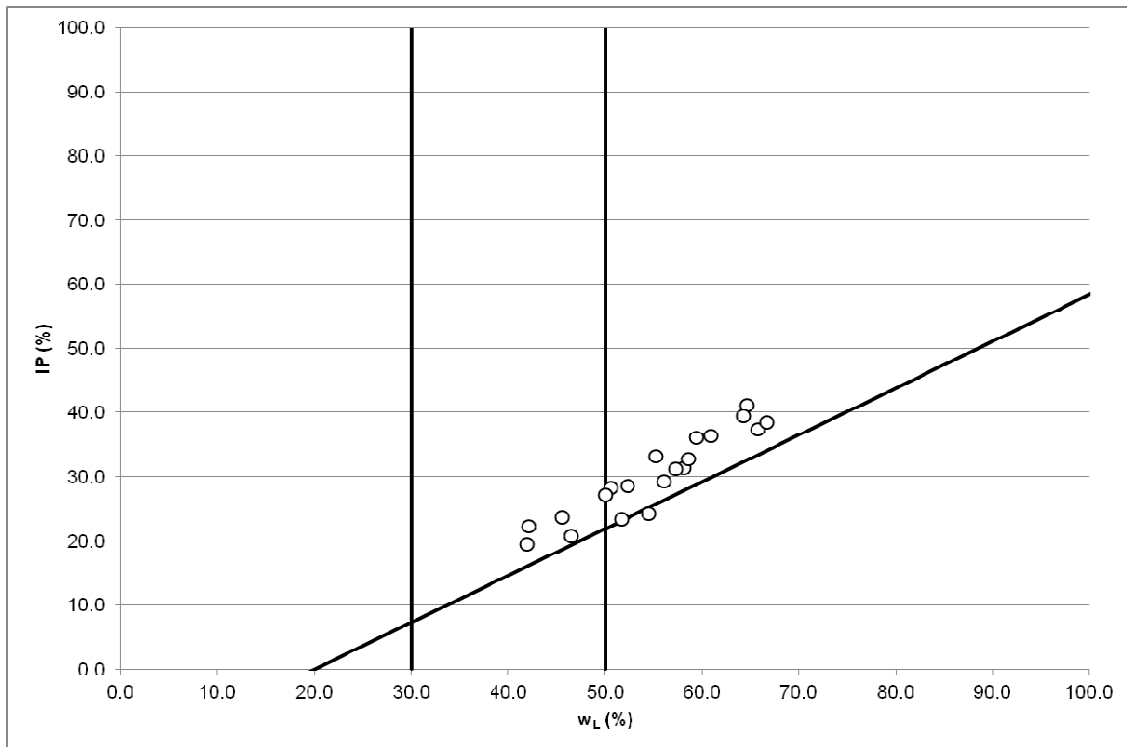


Figura 16 – Carta di plasticità di Casagrande per i materiali costituenti il rilevato ferroviario esistente..

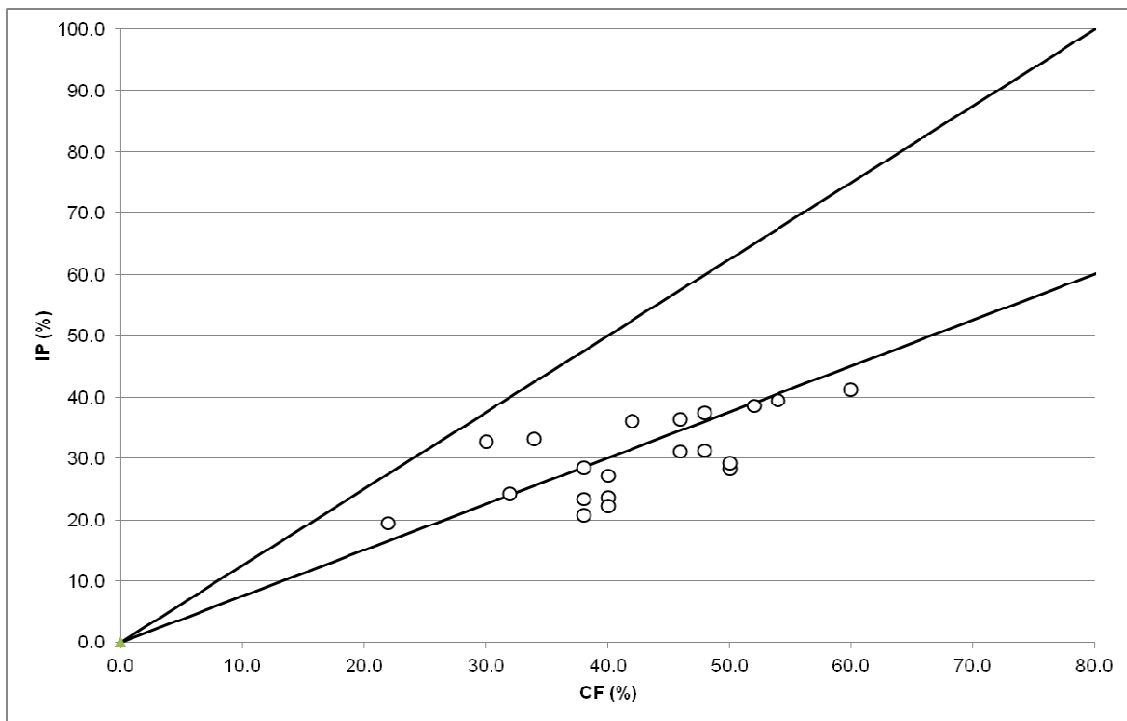


Figura 17 – Andamento IP – CF per i materiali costituenti il rilevato ferroviario esistente.

5.1.5.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE

Le caratteristiche di resistenza al taglio espresse in termini di tensioni efficaci (c' e φ') sono state ricavate dall'analisi delle prove di taglio diretto DS, eseguite in laboratorio su campioni indisturbati (si veda la. Si precisa che i parametri di resistenza al taglio riportati sono rilevativi alle condizioni di picco (c'_p e φ'_p) essendo stati determinati in corrispondenza del massimo valore di τ nelle curve $\tau - \delta_h$.

Sondaggio	Campione	Prof. da (m)	Prof. a (m)	Prof. (m)	φ' (°)	c' (kN/m ²)
S1	C1	2.5	2.8	2.7	12.3	52.5
S2	C1	1.6	1.8	1.7	11.1	18.9
S2	C2	6.5	6.8	6.7	21.5	24.8
S3	C1	2.5	2.8	2.6	25.5	18.8
S6	C1	5.0	5.5	5.2	19.5	22.0
S7	C1	6.0	6.3	6.2	18.8	24.5
S8	C1	3.5	3.8	3.7	17.7	22.2
S9	C2	6.5	6.8	6.7	26.8	9.9
S10	C2	6.0	6.3	6.2	14.9	13.9
S19	C1	5.3	5.6	5.5	22.0	10.9
S19	C2	8.0	8.3	8.2	18.9	13.2
S20	C1	8.5	8.8	8.7	24.9	17.7
S21	C1	4.0	4.3	4.2	21.6	7.1
S22	C1	3.3	3.6	3.5	25.0	23.0
S23	C1	5.0	5.3	5.2	21.8	22.7
S24	C1	7.0	7.3	7.2	20.2	13.5
S32	C1	5.0	5.3	5.2	22.3	29.2
S33	C1	7.5	7.8	7.7	23.6	28.5

Tabella 20 – Parametri di resistenza al taglio per i materiali costituenti il rilevato ferroviario esistente.

L'applicazione della procedura statistica descritta in Appendice ha consentito di determinare valori caratteristici di coesione efficace $c'_k = 16.6$ kN/m² e angolo di resistenza al taglio $\varphi'_k = 18.8^\circ$. Nelle analisi si assume per i materiali costituenti il rilevato ferroviario esistente, $c'_k = 15$ kN/m² e $\varphi'_k = 19^\circ$. In particolare, tali parametri sono stati presi a confronto nella verifica di stabilità globale del rilevato nello stato di fatto. Per il dettaglio di tale verifica si rimanda all'elaborato progettuale relativo (304817_S01_PD_TG--_05_000_E0003).

6 REGIME DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI

Per quanto riguarda le condizioni idrauliche del sottosuolo, si dispone di una sola lettura piezometrica effettuata sulla sola strumentazione installata nella campagna geognostica del Progetto Definitivo (si veda la Tabella 21). I dati a disposizione non sono sufficienti ad una definizione completa del regime delle acque sotterranee, mancando una serie estesa per un intervallo temporale sufficientemente rappresentativo. I dati sembrano comunque mostrare, anche in accordo all'assetto litostratigrafico del sottosuolo, che il livello piezometrico si attesta grossomodo all'interno dell'Unità Geotecnica 1 o al contatto di questa con l'Unità Geotecnica 2.

Piezometro	data lettura	Livello ⁽¹⁾ (m)	note
S10i	28/09/2018	6.3	
S11i	01/10/2018	6.5	
S12i	01/10/2018	6.0	
S13i	28/09/2018	5.6	
S16i	28/09/2018	10.5	
S17i	28/09/2018	6.0	
S18i	01/10/2018	distrutto	
S21i	28/09/2018	3.6	
S22i	28/09/2018	4.4	
S24i	28/09/2018	1.3	
S39i	28/09/2018	1.9	protezione rotta
S45i	28/09/2018	1.2	
S59i	28/09/2018	1.5	
S61i	28/09/2018	5.4	
S62i	28/09/2018	6.9	
S65i	28/09/2018	2.3	
S66i	28/09/2018	1.9	protezione rotta
S67i	28/09/2018	7.7	
S69i	01/10/2018	distrutto	
S70i	28/09/2018	10.2	
S75i	01/10/2018	3.5	
S76i	01/10/2018	-	
S77i	01/10/2018	distrutto	
S89i	01/10/2018	4.3	tappo rotto
S96i	28/09/2018	distrutto	
S97i	28/09/2018	2.2	
S98i	28/09/2018	1.8	tappo rotto

Tabella 21 – Letture piezometriche.

(1) Il livello piezometrico riportato è riferito alla quota di testa del piezometro.

 <p>RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE Direzione Territoriale Produzione Palermo</p>	<p>CONTRATTO APPLICATIVO n.9/2017 - A.Q. n.341/2016 del 29/11/2016</p> <p>Progettazione definitiva delle opere civili ed armamento per il ripristino della linea Palermo - Trapani via Milo</p>
<p>304817_S01_PD_TG- - _02_000_E0017</p>	<p>Relazione geotecnica</p>

7 SCELTA DEL VALORE CARATTERISTICO UTILIZZANDO METODI STATISTICI

Ai fini della determinazione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici si è deciso di impiegare metodi statistici, data la mole di dati sperimentali a disposizione, così come esposti nella Guida all'Eurocodice 7: EN 1997-1 (Documento di Riferimento 7). Nel seguito si descrive in breve la procedura adottata.

La principale differenza tra il valore caratteristico di una proprietà di un materiale strutturale e il valore caratteristico di una proprietà del terreno è che per il primo il valore caratteristico viene spesso definito come un frattile (il 5 %) mentre per il secondo il valore caratteristico è di solito una stima del valore medio con una probabilità del 95 % che il valore medio che controlla il verificarsi dello stato limite nel terreno sia più favorevole del valore caratteristico selezionato. In generale, i metodi statistici per il calcolo dei valori caratteristici dei parametri del terreno, dovrebbe tener conto di:

- Tipo (locale o regionale) ed estensione (numero dei risultati) della popolazione campione e relativa incertezza statistica;
- Variabilità dei risultati sperimentali che costituiscono il campione, rapporto di fluttuazione dei loro valori in relazione al volume di terreno campionato e capacità della struttura di ridistribuire i carichi;
- Presenza di trend significativi nei risultati sperimentali del campione;
- Conoscenza, a priori, di parametri quantificati statisticamente, se disponibili;
- Livello richiesto di confidenza per il valore caratteristico.

Il diagramma di flusso di riporta tutti i maggiori elementi che influiscono sulla scelta del valore caratteristico di un parametro del terreno, a partire da un programma di campionamento locale (cioè i risultati sperimentali sono ottenuti da prove condotte in corrispondenza del sito considerato) in terreno omogeneo, integrato da informazioni complementari, se disponibili. Il percorso conduce a formulazioni statistiche appropriate per il calcolo dei valori caratteristici rilevanti nella pratica corrente quotidiana.

Per strati di terreno in cui il parametro geotecnico non mostra un trend sistematico significativo, o in direzione orizzontale o con la profondità, il valore caratteristico X_k del parametro può essere valutato da un campione di valori individuali del parametro secondo la seguente equazione:

$$X_k = X_{\text{mean}} \cdot (1 - k_n \cdot V_x) \quad (1)$$

dove:

X_{mean} è la media aritmetica dei singoli valori del parametro contenuti nel campione;

V_x è il coefficiente di variazione del parametro X ;

k_n è un coefficiente statistico che tiene conto di:

- Numero dei risultati sperimentali (n) che costituiscono il campione;
- Volume di terreno coinvolto nello stato limite in questione, correlato alla distanza di fluttuazione (spesso definita come distanza di auto – correlazione) della proprietà del materiale;
- Tipo di popolazione da cui il campione è estratto: solo campionamento locale o campionamento locale insieme a risultati sperimentali significativi ottenuti nello strato di terreno considerato;
- Livello statistico di confidenza richiesto per il valore caratteristico calcolato.

Per il coefficiente di variazione si possono considerare due situazioni estreme:

- 1) V_x non è noto a priori ma può essere stimato sulla base degli n risultati sperimentali del solo campione locale. Questo caso è denominato “ V_x incognito”. Il valore di V_x da introdurre nell’equazione (1) è stimato come:

$$V_x = s_x / X_{\text{mean}}$$

Dove s_x è la deviazione standard calcolata sulle n misure sperimentali del campione:

$$s_x^2 = 1/(n - 1) \cdot \sum (X_i - X_{\text{mean}})^2$$

- 2) V_x è noto a priori. Questo caso è denominato V_x noto. Una conoscenza a priori può essere ottenuta dai risultati di precedenti prove, banche dati o da tabelle pubblicate dei coefficienti di variazione delle proprietà del terreno in situazioni confrontabili; una situazione confrontabile viene definita sulla base di un giudizio ingegneristico. In questo caso il valore di V_x nell’equazione (1) è noto a priori e non è correlato al campione. X_{mean} è il valore medio del campione.

Quando il volume di terreno interessato dallo stato limite considerato è molto grande rispetto alla distanza di fluttuazione della proprietà del terreno, e si può perciò assumere che il comportamento sia governato dal valore medio del parametro del terreno, il valore caratteristico dovrebbe essere una stima cautelativa del valore medio. In questo caso il valore caratteristico X_k rappresenta un valore stimato corrispondente ad un livello di confidenza del 95 % che il valore medio (incognito) della popolazione che controlla il verificarsi dello stato limite nel terreno sia più favorevole del valore caratteristico calcolato X_k ottenuto dal campione e dalle informazioni a priori disponibili.

Nel presente documento si è fatto riferimento al caso V_x incognito per il quale $k_{n, \text{mean}} = t_{n-1}^{0.95} \cdot \sqrt{1/n}$ dove $t_{n-1}^{0.95}$ è il fattore t della distribuzione di Student con $n - 1$ gradi di libertà e un livello di confidenza del 95 %.

n	V_x incognito
3	1.69
4	1.18
5	0.95
6	0.82
8	0.67
10	0.58
20	0.39
30	0.31
∞	0
k_n	$k_{n, \text{mean}} = t_{n-1}^{0.95} \cdot \sqrt{1/n}$