

Lavori di allargamento in tratti saltuari della S.S. n°38
dal Km 18+200 al Km 68+300

PROGETTO DEFINITIVO

COD.SIL NOMSMI01070

PROGETTISTA



I PROGETTISTI:

Dott. Ing. Andrea Polli
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma n.19540

IL RESPONSABILE DEL S.I.A.:

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giampiero Carrieri
Ordine dei Geologi del Piemonte n.274

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Dott. Geol. Giampiero Carrieri
Ordine dei Geologi del Piemonte n.274

VISTO:

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO : *Ing. Pietro Gualandi*
IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO: *Ing. Emanuele Fiorenza*

PROTOCOLLO

—

DATA

GEOLOGIA E GEOTECNICA
Generale
Relazione Geotecnica

CODICE PROGETTO

PROGETTO LIV. PROG. N. PROG.

- - MSMI09 **D** **2101**

NOME FILE

TOOGE00GETRE01_A

REVISIONE

SCALA:

CODICE ELAB. **T O O G E O O G E T R E O 1**

A

—

A

Emissione Progetto Definitivo

Dicembre 2022

L. Verzani

L. Landolfi

A. Polli

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	4
2.1	Riferimenti Normativi, Capitolati	4
2.2	Documenti di Progetto Definitivo	4
3	INDAGINI GEOGNOSTICHE	6
3.1	Sondaggi e prove in foro	6
3.2	Pozzetti esplorativi e prove di carico su piastra.....	7
3.3	Prove di laboratorio	8
3.4	Indagini geofisiche.....	11
4	CRITERI DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	12
4.1	Standard Penetration Test (SPT) in foro di sondaggio.....	12
4.2	Prove di carico su piastra in pozzetto esplorativo.....	14
4.3	Prove pressiometriche.....	15
4.4	Prove e analisi di laboratorio	16
4.5	Indagini sismiche MASW e classificazione sismica del suolo di fondazione	18
5	LIVELLO DI FALDA E PERMEABILITA'	20
6	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	22
6.1	Analisi generali	22
6.2	Tratta d'intervento 1.....	22
6.2.1	<i>Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione</i>	22
6.2.2	<i>Analisi e prove di laboratorio</i>	24
6.2.2.1	Curve granulometriche e classificazione dei terreni	24
6.2.2.2	Carta di Plasticità.....	25
6.2.2.3	Prove geotecniche	25
6.2.3	<i>Standard penetration test (SPT)</i>	26
6.2.4	<i>Prove pressiometriche</i>	30
6.2.5	<i>Prove di carico su piastra</i>	30
6.2.6	<i>Caratterizzazione delle Unità Geotecniche</i>	31
6.3	Tratta d'intervento 2.....	31
6.3.1	<i>Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione</i>	31
6.3.2	<i>Analisi e prove di laboratorio</i>	34
6.3.2.1	Curve granulometriche e classificazione dei terreni	34
6.3.2.2	Carta di Plasticità	35
6.3.2.3	Prove geotecniche	35
6.3.3	<i>Standard penetration test (SPT)</i>	36
6.3.4	<i>Prove pressiometriche</i>	40

6.3.5	Prove di carico su piastra	40
6.3.6	Caratterizzazione delle Unità Geotecniche.....	40
6.4	Tratta d'intervento 3.....	41
6.4.1	Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione	41
6.4.2	Analisi e prove di laboratorio	44
6.4.2.1	Curve granulometriche e classificazione dei terreni	44
6.4.2.2	Prove geotecniche	45
6.4.3	Standard penetration test (SPT).....	45
6.4.4	Prove pressiometriche.....	49
6.4.5	Prove di carico su piastra	49
6.4.6	Caratterizzazione delle Unità Geotecniche.....	49
6.5	Tratta d'intervento 4.....	50
6.5.1	Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione	50
6.5.2	Analisi e prove di laboratorio	52
6.5.2.1	Curve granulometriche e classificazione dei terreni	52
6.5.2.2	Prove geotecniche	52
6.5.3	Standard penetration test (SPT).....	53
6.5.4	Prove pressiometriche.....	56
6.5.5	Prove di carico su piastra	56
6.5.6	Caratterizzazione delle Unità Geotecniche.....	57

1 INTRODUZIONE

La presente Relazione Geotecnica è parte del Progetto Definitivo (PD) della Strada Statale SS38 per l'adeguamento della sezione stradale esistente alla sezione C1 che include l'installazione di nuove barriere guardrail.

La SS38 è affiancata dalla linea ferroviaria Milano-Sondrio-Tirano lungo la corsia destra in direzione est (progressive crescenti), con conseguente possibilità di effettuare l'allargamento prevalentemente lungo il lato sinistro (in direzione ovest), dove sono presenti accessi privati, intersezioni con strade locali e il fosso di raccolta delle acque meteoriche.

Il progetto riguarda quattro tratte non contigue della SS38:

- Tratta T1 - km 20+590 – 23+220 L=2630m
- Tratta T2 - km 25+040 – 27+280 L=2240m
- Tratta T3 - km 55+224 – 56+447 L=1223m
- Tratta T4 - km 57+984 – 58+515 L= 531m.

Per uno sviluppo totale di 6624m dei quattro interventi.

La Figura 1-1 mostra le due tipologie di adeguamento, con allargamento dell'attuale sede stradale per ottenere la nuova banchina (Tipo A) e la corsia di viabilità secondaria (Tipo B); gli allargamenti sono rispettivamente di circa 2.3m e 7,6m.

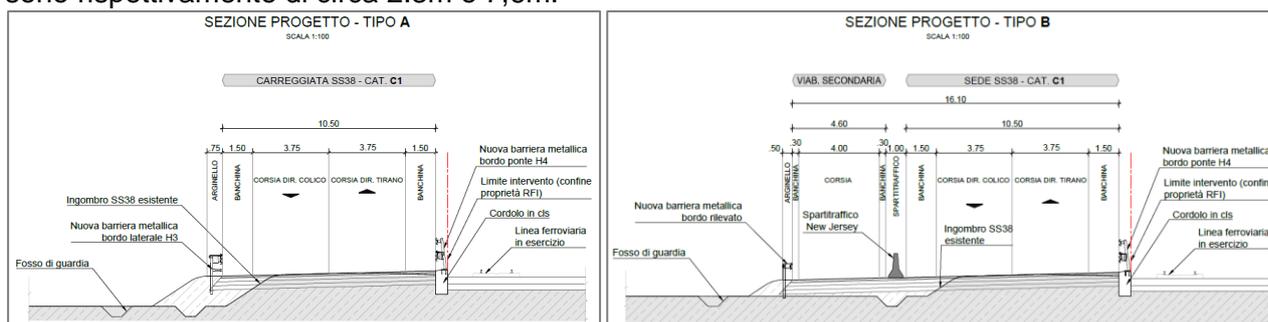


Figura 1-1: Tipologia di adeguamento.

Nella tratta di intervento 4 è inoltre previsto l'adeguamento di un ponte per lo scavalco di un torrente. In Figura 1-2 sono indicati i settori dei quattro interventi.



Figura 1-2: Posizione delle 4 tratte di SS38 interessate dagli interventi in progetto (immagine da Google Maps).

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Riferimenti Normativi, Capitolati

- [1]. ANAS: Capitolato Speciale d'Appalto Norme Tecniche per l'Esecuzione del Contratto Servizi per Ingegneria e Architettura. Revisione settembre 2017 Capitolo 2 "Capitolato d'oneri per la redazione del Progetto Definitivo" (sezioni per Geologia, Geotecnica, Sismica).
- [2]. D.M. 17 gennaio 2018 "Nuove Norme tecniche per costruzioni" in sostituzione di quelle approvate con il D.M. 14 gennaio 2008.
- [3]. Circolare n.7 del 21 gennaio 2019 – Istruzioni per l'applicazione dell' "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 – Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.
- [4]. O.P.C.M. n. 3274 del 20.03.2000 e s.m.i. "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica".
- [5]. Consiglio Nazionale delle Ricerche – Bollettino Ufficiale – Parte IV Norme Tecniche – Determinazione del modulo di deformazione Md e M'd mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare – N. 146 (1992).
- [6]. ISO 22476-3, Geotechnical investigation, and testing - Field testing - Part 3: Standard penetration test. 2015.
- [7]. ISO 22476-4:2021(en)
- [8]. Geotechnical investigation and testing — Field testing — Part 4: Prebored pressuremeter test by Ménard procedure.

2.2 Documenti di Progetto Definitivo

- [9]. Geodata Engineering – SS38 dello Stelvio – Progetto Definitivo – Piano delle indagini geognostiche previste per i siti oggetto di intervento
- [10]. Tecno Piemonte S.p.A. – Esecuzione di pozzetti esplorativi con determinazione del modulo di deformazione mediante prova di carico su piastra (19/11/2021)
- [11]. Tecno Piemonte S.p.A. – Prove di laboratorio su campioni da pozzetti esplorativi (22/11/2021)
- [12]. Tecno Piemonte S.p.A. – Esecuzione di sondaggi geognostici con prove in foro pressiometriche e di permeabilità
- [13]. deformazione mediante prova di carico su piastra (19/11/2021)
- [14]. Tecno Piemonte S.p.A. – Prove di laboratorio su campioni da sondaggi geognostici (22/11/2021 - 01/12/2021)
- [15]. Tecno Piemonte S.p.A. – Indagine geofisica con tecnica MASW per la determinazione del profilo di velocità Vs30 (22/10/2021)
- [16]. Relazione Geologica

- [17]. Carta geologica
- [18]. Carta geomorfologica
- [19]. Carta idrogeologica
- [20]. Relazione Geotecnica
- [21]. Profili geotecnici
- [22]. Relazione Sismica
- [23]. Carta sismica

3 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Nell'ambito dell'attuale fase progettuale, tra i mesi di ottobre e novembre 2021 è stata eseguita una campagna di indagine geognostica, che ha previsto:

- sondaggi a carotaggio continuo con prove in foro e installazione di piezometro per il monitoraggio della falda
- pozzetti esplorativi con esecuzione di prove di carico su piastra
- prelievo di campioni e prove di laboratorio
- indagini MASW per la caratterizzazione sismica dei suoli di fondazione.

3.1 Sondaggi e prove in foro

I certificati di sondaggio e prove in foro sono riportati nei documenti di PD [9].

In Tabella 3-1 sono elencati i sondaggi eseguiti. Per ogni sondaggio sono stati successivamente installati un piezometro a tubo aperto in pvc diametro 2" fino a 20,0m di profondità (0-3,0m cieco; 3,0-20,0m fessurato) ed un pozzetto fuori terra in pvc diametro 140mm a protezione del terminale piezometrico.

ID	Profondità [m]	Intervento [n.]
S1	20,0	1
S2	20,0	1
S3	20,0	2
S4	20,0	2
S5	20,0	3
S6	20,0	4

Tabella 3-1: Sintesi dei sondaggi a carotaggio continuo

Nei sondaggi sono state eseguite le seguenti prove in foro (Tabella 3-2):

- prove SPT a interasse 1,5m fino a fondo foro
- prove di permeabilità tipo Lefranc (LF), realizzate sottofalda
- prove pressiometriche di tipo Menard (PRX).

ID sondaggio	Prove SPT [n.]	Prove di permeabilità LF [n.]	Prove pressiometriche PRX [n.]
S1	12	2	1
S2	12	2	1
S3	12	2	1
S4	12	2	1
S5	13	2	1
S6	12	2	1

Tabella 3-2: Sintesi delle prove in foro di sondaggio

Durante la realizzazione dei sondaggi geognostici, per le prove di laboratorio previste in questa fase progettuale, sono stati prelevati campioni rimaneggiati (CR) e indisturbati (SH), compatibilmente con le caratteristiche geotecniche dei terreni. In Tabella 3-3 vengono riportate le quantità dei

campioni raccolti.

ID sondaggio	CR [n.]	SH [n.]
S1	4	4
S2	6	-
S3	4	-
S4	6	2
S5	5	1
S6	4	1

Tabella 3-3: Sintesi dei campioni prelevati dai sondaggi geognostici

3.2 Pozzetti esplorativi e prove di carico su piastra

In Tabella 3-4 sono indicati i pozzetti esplorativi previsti ed effettivamente eseguiti. Sono stati realizzati 17 pozzetti (Ref. [9]), 15 dei quali hanno fornito campioni geotecnici.

Intervento [n.]	Sigla pozzetto	Scavo		Campione geotecnico	
		Eseguito	profondità [m]	Eseguito	profondità [m]
1	P1-1	-	-	-	-
	P1-2	X	2,0	X	1,8
	P1-3	-	-	-	-
	P1-4	X	2,0	X	1,8
	P1-5	X	2,0	X	1,8
	P1-6	X	2,0	X	1,8
	P1-7	X	2,0	X	1,8
	P1-8	X	2,0	X	1,8
2	P2-1	X	1,5	X	0,9
	P2-2	-	-	-	-
	P2-3	-	-	-	-
	P2-4	X	2,0	X	1,1
	P2-5	X	2,0	X	1,5
	P2-6	X	2,0	X	1,7
3	P3-1	X	1,0	-	-
	P3-2	X	2,0	X	1,8
	P3-3	X	1,0	-	-
	P3-4	-	-	-	-
4	P4-1	X	2,0	X	1,8
	P4-2	X	2,0	X	1,8
	P4-3	X	2,0	X	1,8
	P4-4	X	2,0	X	1,8

Tabella 3-4: Sintesi dei pozzetti esplorativi e relativi campioni geotecnici

Nei pozzetti esplorativi sopraelencati, sono state effettuate 19 prove di carico su piastra, al fine di determinare il modulo di deformazione, nonché il grado di compattazione dei terreni di sottofondo, base delle pavimentazioni stradali. In Tabella 3-5 sono elencate le quantità delle prove di carico effettuate per ogni sito d'intervento (Ref. [9]).

Intervento [n.]	Sigla pozzetto	Prova di carico su piastra	
		n. prove eseguite	profondità [m]
1	P1-2	1	1,0
	P1-4	2	0,6
			1,2
	P1-5	2	0,6
			1,2
	P1-6	1	1,2
P1-7	1	1,0	
P1-8	1	1,0	
2	P2-1	1	1,0
	P2-4	1	0,6
	P2-5	2	0,6
			1,2
	P2-6	2	0,6
1,2			
3	P3-2	1	1,0
4	P4-1	1	1,0
	P4-2	1	1,0
	P4-3	1	1,0
	P4-4	1	1,0

Tabella 3-5: Sintesi delle prove di carico su piastra eseguite nei pozzetti esplorativi

3.3 Prove di laboratorio

I campioni geotecnici prelevati sia dai pozzetti esplorativi che dai sondaggi a carotaggio continuo sono stati testati in laboratorio per la definizione delle proprietà indice e delle caratteristiche di resistenza (Ref. [11][14]).

In Tabella 3-6 si riportano le prove di laboratorio realizzate sui campioni (CR) di terreno prelevati dai pozzetti esplorativi.

Campione	Profondità	Analisi granulometrica	Limiti di Atterberg	Contenuto naturale d'acqua
P1-2	1,80	X	X	X
P1-4	1,80	X	X	X
P1-5	1,80	X	X	X
P1-6	1,80	X	X	X
P1-7	1,80	X	X	X
P1-8	1,80	X	X	X
P2-1	0,90	X	X	X
P2-4	1,10	X	X	X
P2-5	1,50	X	X	X
P2-6	1,70	X	X	X
P3-2	1,80	X	X	X
P4-1	1,80	X	X	X
P4-2	1,80	X	X	X
P4-3	1,80	X	X	X
P4-4	1,80	X	X	X

Tabella 3-6: Sintesi delle prove di laboratorio su terre, eseguite nei campioni prelevati dai pozzetti esplorativi

In Tabella 3-7 si riportano le prove di laboratorio realizzate sui campioni (CR, SH) di terreno prelevati dai sondaggi geognostici (in rosso sono indicati i campioni prelevati ma non testati).

Sondaggio	Profondità		Campione	Analisi granulometrica	Limiti di Atterberg	Determinazione della massa volumica naturale	Contenuto naturale d'acqua	Prove di taglio diretto
	da [m]	a [m]						
S1	2,00	2,50	SH1) She	X	X	X	X	X
	4,50	5,00	CR1) Rim	X	X	-	-	-
	6,50	7,00	SH2) She	X	X	X	X	X
	8,50	9,00	CR2) Rim	X	X	-	-	-
	11,50	12,00	CR3) Rim	-	-	-	-	-
	14,00	14,50	SH3) She	X	X	X	X	X
	16,50	17,00	CR4) Rim	-	-	-	-	-
S2	1,00	1,50	CR1) Rim	X	X	-	-	-
	3,50	4,00	CR2) Rim	X	X	-	-	-
	5,00	5,50	CR3) Rim	X	X	-	-	-
	8,50	9,00	CR4) Rim	X	X	-	-	-
	12,50	13,00	CR5) Rim	-	-	-	-	-
	18,50	19,00	CR6) Rim	-	-	-	-	-
S3	2,00	2,50	CR1) Rim	X	X	-	-	-
	8,00	8,50	CR2) Rim	X	X	-	-	-
	11,50	12,00	CR3) Rim	-	-	-	-	-
	17,50	18,00	CR4) Rim	-	-	-	-	-
S4	1,00	1,50	CR1) Rim	X	X	-	-	-
	3,50	4,00	SH1) She	X	X	X	X	X
	5,00	5,50	CR2) Rim	X	X	-	-	-
	8,50	9,00	CR3) Rim	X	X	-	-	-
	11,50	12,00	CR4) Rim	-	-	-	-	-
	15,50	16,00	CR5) Rim	-	-	-	-	-
	18,00	18,50	CR6) Rim	-	-	-	-	-
S5	1,50	2,00	SH2) She	X	X	X	X	X
	1,50	2,00	CR1) Rim	X	X	-	-	-
	3,50	4,00	SH1) She	X	X	X	X	X
	6,50	7,00	CR2) Rim	X	X	-	-	-
	8,70	9,00	CR3) Rim	X	X	-	-	-
	11,50	12,00	CR4) Rim	-	-	-	-	-
S6	16,00	16,50	CR5) Rim	-	-	-	-	-
	1,50	2,00	CR1) Rim	X	X	-	-	-
	2,00	2,50	SH1) She	X	X	X	X	X
	5,50	6,00	CR2) Rim	X	X	-	-	-
	12,50	13,00	CR4) Rim	-	-	-	-	-
	16,50	17,00	CR3) Rim	-	-	-	-	-

Tabella 3-7: Sintesi delle prove di laboratorio su terre, eseguite nei provini provenienti dai sondaggi geognostici

3.4 Indagini geofisiche

In Tabella 4-4 vengono elencate le indagini geofisiche MASW (Ref. [15]) eseguite nei quattro settori in studio per la caratterizzazione sismica dei terreni.

Intervento	ID
1	M1
	M2
	M3
2	M1
	M2
3	M1
	M2
4	M1
	M2

Tabella 3-8: Sintesi delle indagini geofisiche

4 CRITERI DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel presente Capitolo si presentano i criteri di analisi dei dati di indagine utilizzati per la definizione dei parametri geotecnici di progetto.

I dati di indagine sono stati analizzati statisticamente, definendo i seguenti valori:

- Medio
- Minimo
- Massimo
- Deviazione Standard
- Mediano
- 5° e 95° percentile
- *Cautelativo (caratteristico).

Nota *: il valore cautelativo (k) è definito secondo la seguente equazione (Schneider, 1999 from Designers' Guide to EN 1997-1):

$$\text{Valore}_{(k)} = \text{Valore}_{(\text{med})} - 0.5 \cdot \text{DS}$$

dove,

- $\text{Valore}_{(k)}$ Valore cautelativo (caratteristico)
- $\text{Valore}_{(\text{med})}$ Valore Medio
- DS Deviazione Standard.

La caratterizzazione dei terreni si basa sia sui risultati delle analisi statistiche dei valori dei vari parametri sia sul confronto tra i valori dei parametri ottenuti tramite differenti tipologie di prove (SPT, prove pressiometriche in foro, prove di taglio diretto in laboratorio).

Si premette che sulla base delle informazioni stratigrafiche e dei dati di prova da sondaggi geognostici sono state individuate le seguenti Unità Geotecniche (UG):

- **UG1** terreni fini con granulometrie costituite in modo variabile e prevalente da sabbie limose, limi, argille, torba
- **UG2** terreni grossolani con granulometrie costituite in modo variabile e prevalente da ciottoli, ghiaie, sabbie.

In generale UG2 è nettamente prevalente in tutti i sondaggi, ad eccezione del sondaggio S1 dove sono presenti terreni prevalentemente fini (UG1).

4.1 Standard Penetration Test (SPT) in foro di sondaggio

I risultati delle analisi delle prove SPT, suddivisi per le diverse Unità Geotecniche nei quattro settori in studio, sono riportati nel Capitolo 6.

Attraverso i dati SPT si valutano i seguenti parametri geotecnici:

- densità relativa D_r
- angolo di attrito φ
- Modulo di Young E .

I dati penetrometrici sono stati interpretati secondo correlazioni di letteratura di seguito descritte, scelte sulla base delle caratteristiche granulometriche.

Le correlazioni empiriche tra N_{SPT} , densità relativa e angolo di resistenza al taglio dei terreni granulari sono impostate con i valori di $N_{1,60}$ (Skempton, 1986; as listed by Robertson and Wride, 1998).

$$N_{1,60} = N_{SPT} * [1 / (\sigma'_{v0} / 98.6)]^{0.56}$$

Per la valutazione della densità relativa si ritiene valida la correlazione Bazaara et al. (1967), rappresentativa di un database che include anche valori di resistenza penetrometrica da prove in situ, oltre che in camera di calibrazione, portando in conto così gli effetti di cementazione ed aging delle formazioni naturali. La formulazione è indicata di seguito:

$$D_r = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{20 \cdot (1 + 4.1 \cdot \sigma'_{v0})}} \quad \text{per } \sigma'_{v0} \leq 72 \text{ kPa}$$
$$D_r = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{20 \cdot (3.24 + 1.024 \cdot \sigma'_{v0})}} \quad \text{per } \sigma'_{v0} > 72 \text{ kPa}$$

in cui:

- σ'_{v0} = pressione verticale efficace in sito alla quota della prova SPT;
- N_{SPT} = numero di colpi misurato, non corretto.

Per la valutazione dell'**angolo di attrito (φ)** sono state adottate le seguenti correlazioni:

- Japanese National Railway, 1982 (UG1), di carattere generale:
$$\varphi (^{\circ}) = 27 + 0.3 \cdot N_{SPT}$$
- Schmertmann, 1977 (UG2), da correlazioni indirette basate su D_r (%):
$$\varphi (^{\circ}) = a + b \cdot D_r$$

dove, per i terreni di fondazione nelle aree in studio la correlazione applicata è quella riferita a "sabbia grossa uniforme e ghiaia-sabbia ben gradata con limo" (Figura 4-1):

➤
$$\varphi (^{\circ}) = 34.5 + 0.10 \cdot D_r$$

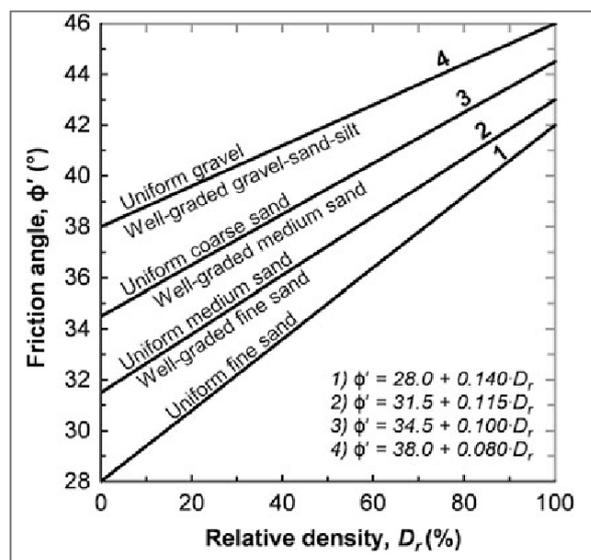


Figura 4-1: Grafico che correla la densità relativa e l'angolo di resistenza al taglio (Schmertmann, 1977)

Per la valutazione del **modulo di Young (E)** sono state utilizzate le seguenti tre correlazioni:

- D'Apollonia et al. 1970 (in Denver, 1984), per sabbia e ghiaia normalconsolidata (UG2)

$$E = 18.75 + 0.756 \cdot N_{SPT} \quad [\text{MPa}]$$
- D'Apollonia et al. 1970 (in Denver, 1984), per sabbia e ghiaia sovraconsolidata (UG2)

$$E = 36.79 + 1.043 \cdot N_{SPT} \quad [\text{MPa}]$$
- Schultze e Menzenbach 1961 (in Bowels, 1995), per sabbie e sabbie limose (UG1):

$$E = 7.46 + 0.517 \cdot N_{SPT} \quad [\text{MPa}]$$

I risultati ottenuti tramite SPT sono stati comparati con i valori di modulo ottenuti attraverso le prove pressiometriche in foro di sondaggio.

4.2 Prove di carico su piastra in pozzetto esplorativo

I risultati delle analisi delle prove di carico su piastra, suddivisi per le diverse Unità Geotecniche nei quattro settori in studio, sono riportati nel Capitolo 6.

Mediante la prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare ($\varnothing=300\text{mm}$) vengono determinati i moduli di deformazione (M_d e M'_d). In accordo alla Norma di riferimento (CNR-BU-146) il Modulo di Deformazione M_d è una misura convenzionale della capacità portante dei terreni di sottofondo, degli strati di rilevato nonché degli strati non legati di fondazione e di base delle pavimentazioni stradali.

$$M_d = (\Delta p / \Delta s) \cdot D \quad [\text{N/mm}^2]$$

Ove,

- Δp incremento della pressione trasmessa da una piastra circolare rigida di diametro $\varnothing=300\text{mm}$ $[\text{N/mm}^2]$
- Δs incremento di cedimento della superficie caricata $[\text{mm}]$

La prova va eseguita con doppio ciclo di carico al fine di determinare con il primo ciclo il modulo M_d convenzionalmente indicativo della portanza, con il secondo ciclo il modulo M'_d che consente di

valutare mediante il rapporto M_d / M'_d il grado di costipamento dello strato in esame.

I moduli di deformazione M_d e M'_d corrispondenti al primo e al secondo ciclo rispettivamente vengono determinati applicando la relazione sopra indicata nella quale gli incrementi di carico (Δp e $\Delta p'$) si fissano pari a $0.1N/mm^2$ per terreni di sottofondo e per strati di rilevato:

- $\Delta p = \Delta p'$ compreso tra 0.05 e $0.15 N/mm^2$

La valutazione della qualità del costipamento si effettua in base al rapporto M_d / M'_d (≤ 1) che risulta tanto più prossimo all'unità quanto migliore è la qualità del costipamento.

4.3 Prove pressiometriche

In ciascuno dei sei sondaggi geognostici è stata eseguita una prova pressiometrica; nei sondaggi S3, S6 le prove sono state posizionate in terreni prevalentemente ghiaiosi e non hanno raggiunto la pressione limite. Si osserva che l'unica prova eseguita in terreni prevalentemente limosi (\rightarrow UG1, sondaggio S1) ha il valore di Modulo di Young nettamente inferiore rispetto ai valori ottenuti nei terreni prevalentemente sabbiosi (\rightarrow UG2, sondaggi S-2,4,5).

I valori di Modulo di Young derivati da prova pressiometrica risultano generalmente superiori a quelli derivati tramite prove SPT (cfr. Capitolo 6).

Sondaggio	Prof. (m)	Terreno (UG attribuibile)	Modulo pressiometrico E_M (MPa)	Modulo di taglio G (MPa)	Pressione limite P_{lim} (MPa)	Modulo di Young E (MPa)
S1	5.7	limo sabbioso loc. argilloso (UG1)	14.9	5.7	0.736	22.4
S2	4.2	sabbia loc. deb.limosa (UG2)	26.3	10.1	2.25	78.9
S3	5.7	ghiaia in matrice sabbiosa (UG2)	23.5	9.1	-	-
S4	7.2	sabbia con ghiaia (UG2)	32.1	12.3	2.85	96.3
S5	2.7	sabbia loc. deb.limosa (UG2)	19.3	7.4	1.75	57.9
S6	7.2	ghiaia e ciottoli in matr. sabbiosa (UG2)	41.5	15.9	-	-

Tabella 4-1: Sintesi dei risultati delle prove pressiometriche.

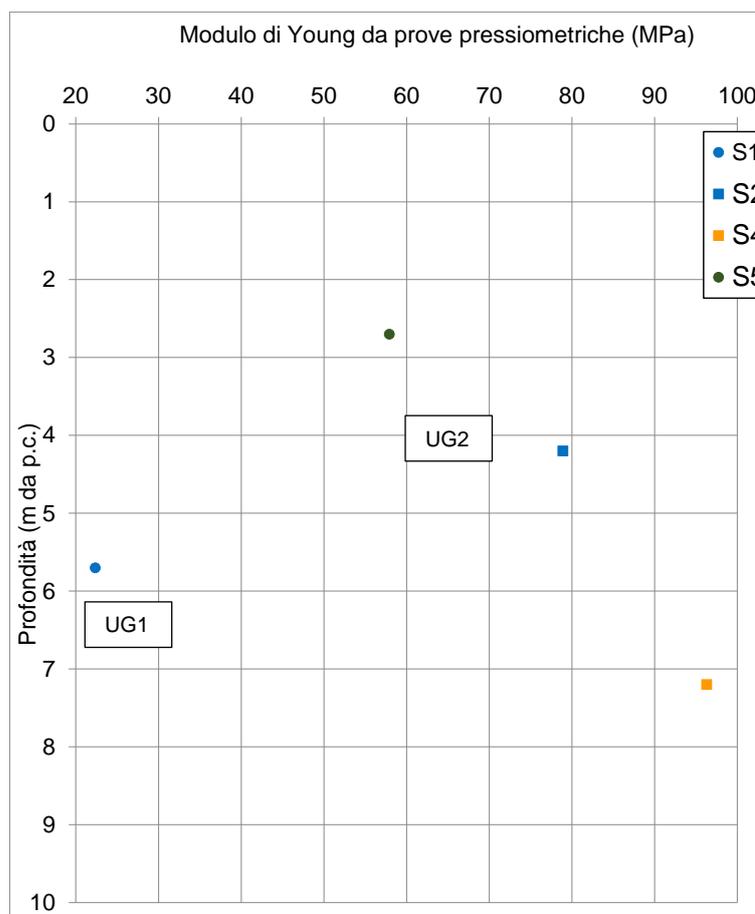


Figura 4-2: Valori di Modulo di Young da prove pressiometriche con la profondità.

4.4 Prove e analisi di laboratorio

I campioni indisturbati e rimaneggiati prelevati dai sondaggi geognostici sono stati testati in laboratorio tramite prove di taglio diretto e sono stati misurati gli indici fisici.

Prova di taglio diretto

Sono state eseguite otto prove di taglio diretto per definire i parametri di resistenza (coesione "c", angolo di attrito " φ "); sette prove su campioni indisturbati di granulometria più fine e una su campione rimaneggiato più grossolano.

Si osserva l'aumento dei valori di angolo di attrito e la diminuzione della coesione all'aumentare della granulometria dei campioni. Si evidenzia che per i limiti di campionamento e di esecuzione della prova di taglio diretto, per i terreni con granulometria grossolana (\rightarrow UG2), il campione può risultare parzialmente rappresentativo del terreno di fondazione in quanto le frazioni di materiale di pezzatura maggiore non vengono testate. Pertanto, come peraltro osservabile dalle prove SPT, i valori di angolo di attrito ottenuti in laboratorio risulterebbero inferiori rispetto a quelli prevedibili per terreni a maggiore granulometria. Tenendo conto di questo limite nell'esecuzione delle prove di taglio diretto di laboratorio, i valori di angolo di attrito possono essere considerati cautelativi per l'Unità UG2, mentre per l'Unità UG1 i valori dei parametri (c, φ) si ritengono rappresentativi.

In Tabella 4-2 sono riassunti i valori di coesione e di angolo di attrito; in Figura 4-3 si osserva la

variazione dei valori dei parametri per i campioni prevalentemente limosi → UG1 ($c \geq 9 \text{ kPa}$; $\varphi \leq 30^\circ$) e quelli prevalentemente sabbiosi e ghiaiosi → UG2 ($c \leq 7 \text{ kPa}$; $\varphi \geq 35^\circ$).

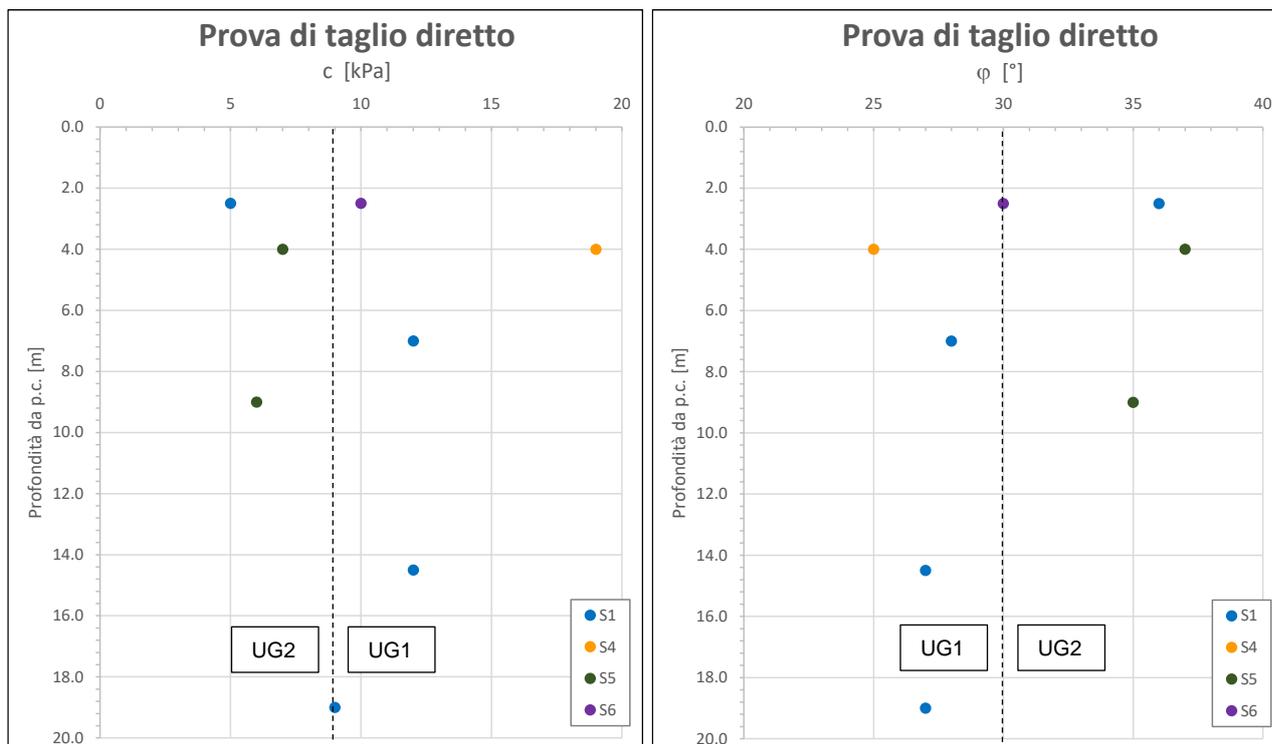


Figura 4-3: Valori di coesione (c) e angolo di attrito (φ) con la profondità (la linea tratteggiata verticale distingue indicativamente i valori limite tra le due Unità Geotecniche).

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	Classificazione granulometrica (AGI)	unità geotecnica attribuibile	valori di picco	
				UG	c' [kPa]	φ' [°]
S1	SH1-She	2.0 – 2.5	sabbia limosa	UG2	5	36
	SH2-She	6.5 – 7.0	limo sabbioso, debolmente argilloso	UG1	12	28
	SH3-She	14.0 – 14.5	limo debolmente argilloso	UG1	12	27
	SH4-She	18.5 – 19.0	limo sabbioso, debolmente argilloso	UG1	9	27
S4	SH1-She	3.5 – 4.0	Limo debolmente argilloso	UG1	19	25
S5	SH1-She	3.5 - 4.0	sabbia debolmente limosa	UG2	7	37
	CR3-Rim	8.7 – 9.0	Ghiaia sabbiosa debolmente limosa	UG2	6	35
S6	SH1-She	2.0 - 2.5	Limo con sabbia, debolmente argilloso	UG1	10	30

Tabella 4-2: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto

Analisi degli indici fisici

Sono state effettuate analisi di laboratorio sui campioni di terreno finalizzate alla definizione di:

- Granulometria
- Limiti di Atterberg
- Peso / Volume naturale (massa volumica umida γ)
- Determinazione dell'umidità (contenuto d'acqua w).

Di seguito si riporta l'analisi dei dati di Peso / Volume (γ) e del contenuto d'acqua (w) misurata sugli otto campioni indisturbati prelevati dai sondaggi geognostici; tali dati sono riferibili ai terreni più fini ascrivibili all'Unità Geotecnica UG1. Per l'analisi degli altri indici fisici si rimanda al Capitolo 6.

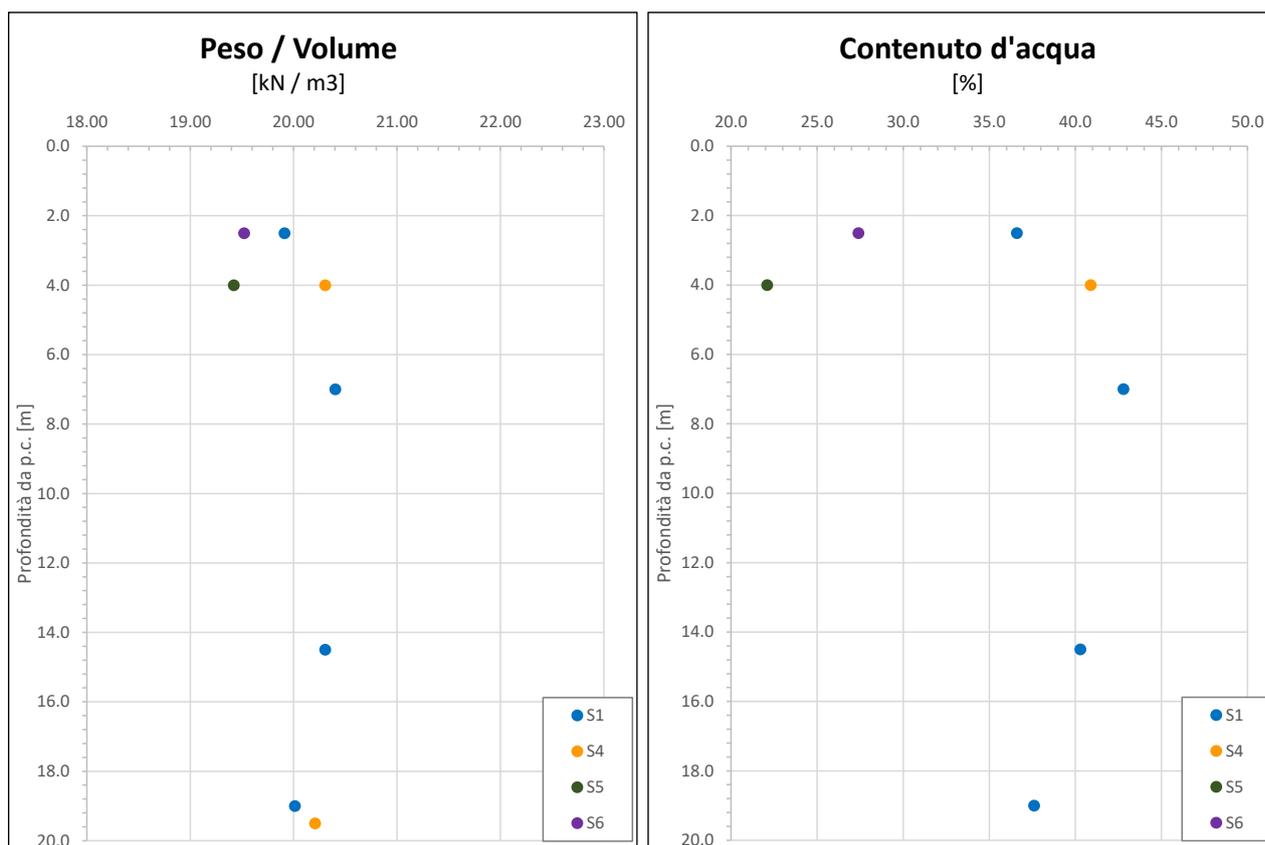


Figura 4-4: Valori di Peso / Volume e contenuto d'acqua con la profondità.

Unità Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Dev.St.	caratteristico
UG1 γ (kN/m³)	S1,4,5,6	8	19.4	20.4	20.0	0.4	19.8
UG1 w (%)		8	22.1	42.8	36.0	12.4	-

Tabella 4-3: Analisi statistica dei dati.

Per i livelli di terreno più grossolani (UG2, prevalenti ghiaie), si assume il valore di peso volume $\gamma=20.5\text{kN/m}^3$.

4.5 Indagini sismiche MASW e classificazione sismica del suolo di fondazione

Per la misura delle velocità delle onde di taglio (V_s), sono state effettuate prospezioni sismiche

MASW.

Il metodo MASW "Multichannel Analysis of Surface Waves" è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare un possibile profilo di velocità delle onde di taglio (V_s), dall'analisi di registrazioni di onde di superficie generate da una sorgente artificiale impulsiva o a frequenza ed ampiezza di sollecitazione controllate. Le onde sono acquisite da stendimenti in linea di geofoni posti sulla superficie del sottosuolo d'indagine.

In Tabella 4-4 vengono elencate le indagini geofisiche e i relativi risultati, quali la velocità media equivalente delle onde di taglio ($V_{s,eq}$); $V_{s,eq}$ con substrato sismico (800 m/s) oltre 30m di profondità corrisponde a V_{s30} . La categoria di sottosuolo rispetta i sensi della NTC/2018 (Figura 4-5), tuttavia si rimanda alla relazione sismica per l'approfondimento di secondo livello sismico (Normativa di Regione Lombardia) e la Risposta Sismica Locale RSL.

Intervento	ID	$V_{s,eq}$ [m/s]	Categoria di sottosuolo (NTC/2018)
1	M1	345	C
	M2	200	C
	M3	255	C
2	M1	305	C
	M2	355	C
3	M1	315	C
	M2	370	B
4	M1	360	C
	M2	410	B

Tabella 4-4: Sintesi delle indagini geofisiche e relativi risultati

Categoria	Profilo stratigrafico
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fine mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C D, con la profondità del substrato non superiore a 30m.</i>

Figura 4-5: Categorie di sottosuolo (NTC-2018).

5 LIVELLO DI FALDA E PERMEABILITA'

La soggiacenza della falda misurata nei piezometri installati nei sei sondaggi è di pochi metri (cfr. Tabella 5-1).

Settore di intervento	Sondaggio	Soggiacenza (m da p.c.)
Tratta 1	S1	2.5
	S2	2.5
Tratta 2	S3	2.7
	S4	2.7
Tratta 3	S5	2.9
Tratta 4	S6	1.9

Tabella 5-1: Valori di soggiacenza della falda nei sondaggi geognostici.

In ciascuno dei sei sondaggi sono state eseguite due prove di permeabilità (k) Lefranc (Tabella 5-2, Figura 5-1).

Quattro prove hanno permeabilità $k < 10^{-6}$ (m/s), di queste tre sono in terreni prevalentemente limosi (\rightarrow UG1), mentre una è in terreni prevalentemente sabbiosi (\rightarrow UG2). Le altre otto prove hanno permeabilità $k > 10^{-6}$ (m/s), di queste una sola prova è in terreni prevalentemente limosi (\rightarrow UG1), le altre cinque prove sono in terreni prevalentemente sabbiosi e ghiaiosi (\rightarrow UG2). Si conferma pertanto un generale aumento della permeabilità con l'aumentare della granulometria dei terreni di fondazione.

Sondaggio	Profondità prova (m)	Permeabilità k (m/s)	Terreno
S1	3.5	8.61E-07	limo sabbioso
	8.5	5.35E-07	limo argilloso
S2	2.0	4.78E-06	limo sabbioso
	7.0	1.19E-05	ghiaia in matrice sabbiosa
S3	4.0	3.59E-06	ghiaia in matrice sabbiosa
	8.5	2.15E-06	sabbia medio e rara ghiaia
S4	4.5	8.40E-07	sabbia medio e più ghiaia
	8.0	3.48E-06	sabbia e rara ghiaia
S5	4.5	1.37E-06	sabbia/ghiaia
	7.5	4.73E-06	ghiaia e ciottoli in matrice sabbiosa
S6	3.0	8.22E-07	limo argilloso
	6.0	8.29E-06	ghiaia e ciottoli in matrice sabbiosa

Tabella 5-2: Valori di permeabilità da prove Lefranc in foro di sondaggio.

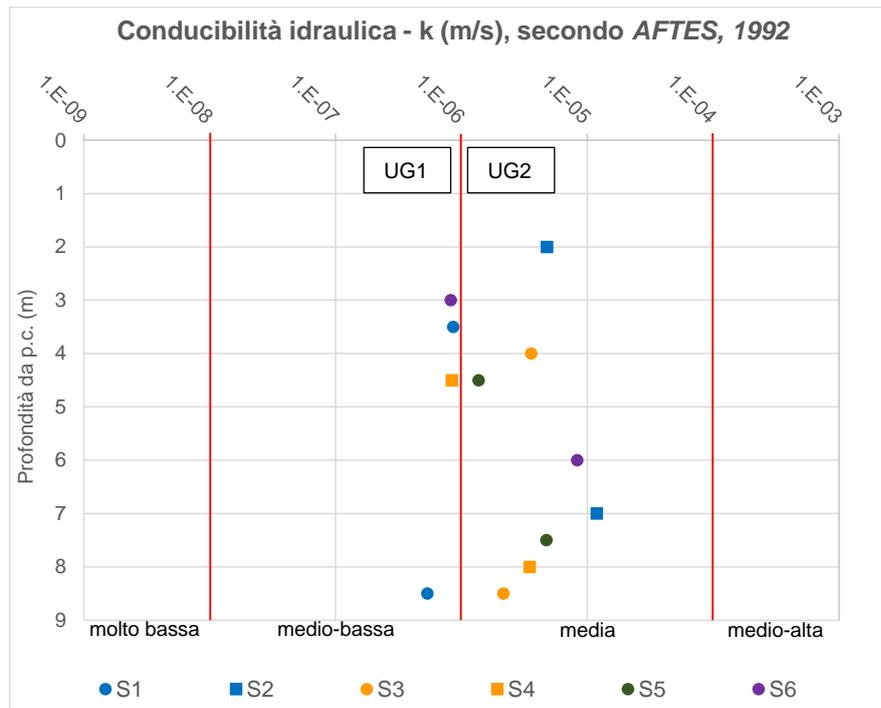


Figura 5-1: Valori di permeabilità con la profondità; $k=1 \cdot 10^{-6}$ m/s viene assunto come limite indicativo tra terreni fini (UG1) e relativamente più grossolani (UG2).

6 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Nel presente Capitolo vengono analizzate le informazioni ottenute dalle indagini geognostiche e i dati ottenuti dalle prove in sito e in laboratorio, al fine di definire le Unità Geotecniche di fondazione dell'opera.

Come descritto nella Relazione Geologica [16], il substrato roccioso di trova a profondità generalmente elevate e quindi non è di interesse per la progettazione geotecnica.

6.1 Analisi generali

6.2 Tratta d'intervento 1

6.2.1 Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione

La Figura 6-1 mostra il contesto territoriale della tratta di intervento 1; lungo il lato sud (carreggiata direzione Tirano) la SS38 è adiacente alla Linea Ferroviaria. Lungo il lato nord (carreggiata direzione Colico) la strada confina prevalentemente con campi agricoli e in misura minore con proprietà private.

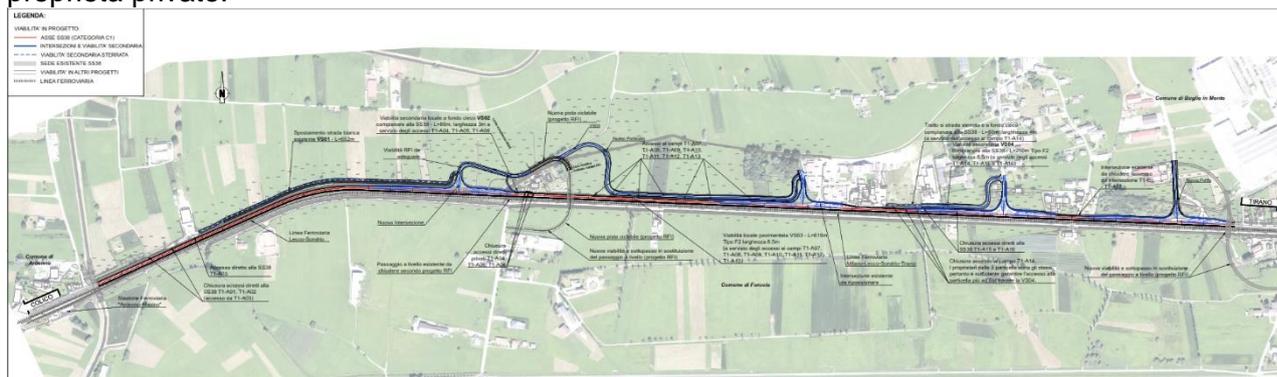


Figura 6-1: Localizzazione della tratta 1-SS38.

La Figura 6-2 mostra le informazioni geologiche dell'area prossima all'intervento 1.

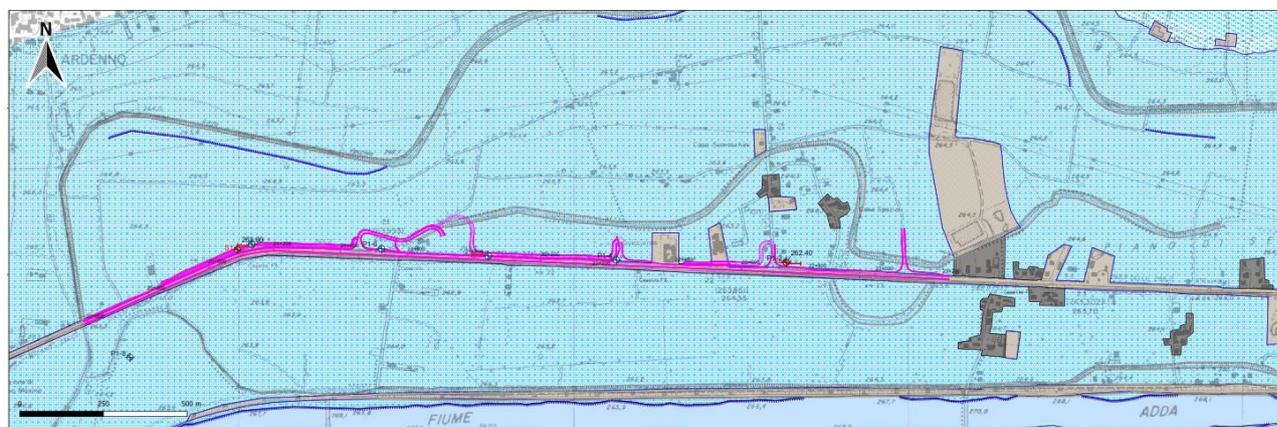


Figura 6-2: Stralcio dalla Carta Geologica di PD della tratta 1-SS38.

Di seguito si descrivono caratteri geolitologici dei terreni di fondazione dell'opera, con riferimento sia alle informazioni della Cartografia Geologica Regionale (Progetto CARG) sia ai dati ottenuti tramite le indagini dirette.

La tratta di intervento 1 lungo il suo intero sviluppo è fondata su depositi quaternari di origine alluvionale.

DEPOSITI QUATERNARI (CARG, Foglio 56)

Depositi alluvionali (POI-alg):

- Ghiaie massive o stratificate da fini a grossolane, a supporto clastico, matrice sabbiosa da assente ad abbondante, clasti arrotondati, sabbie ben lavate, in corpi lenticolari clinostratificati; lenti e corpi stratoidi di sedimenti limoso argillosi, talvolta laminati. Si osservano strutture sedimentarie dovute all'azione di correnti trattive come ciottoli embricati, laminazioni oblique a basso angolo, laminazioni incrociate. Nella tratta in esame la simbologia utilizzata per la cartografia si riferisce a "ghiaie prevalenti".

DEPOSITI QUATERNARI (Indagini geognostiche; PD):

- Le indagini dirette, quali pozzetti esplorativi e sondaggi geognostici, hanno permesso di definire con migliore precisione le caratteristiche litologiche dei terreni di fondazione. I sondaggi S1 e S2 evidenziano, dall'alto al basso stratigrafico, una prima copertura spessa circa 30cm di limo sabbioso con resti organici (terreno coltivo) e una successione di depositi quaternari alluvionali. Questi ultimi sono costituiti, per il sondaggio S1 (profondità 20m), da limo sabbioso e sabbia limoso-argillosa, ai quali si sostituisce nel sondaggio S2 (profondità 20m) un'alternanza di sabbia debolmente limosa e ghiaia eterometrica poligenica a clasti subarrotondati immersi in una matrice sabbiosa.

Le risultanze derivate dai pozzetti esplorativi (profondità 2m) sono coerenti con quanto sopra indicato: il primo paio di metri in profondità è costituito da sabbia poco addensata e molto umida, con limo e rara ghiaia (pozzetto P1-4). Pertanto, diversamente da quanto indicato dalla cartografia ufficiale, i terreni di fondazione della prima tratta d'intervento, entro i primi 20m da p.c., sono corpi stratoidi lateralmente discontinui a sabbia e limo prevalenti.

6.2.2 Analisi e prove di laboratorio

6.2.2.1 Curve granulometriche e classificazione dei terreni

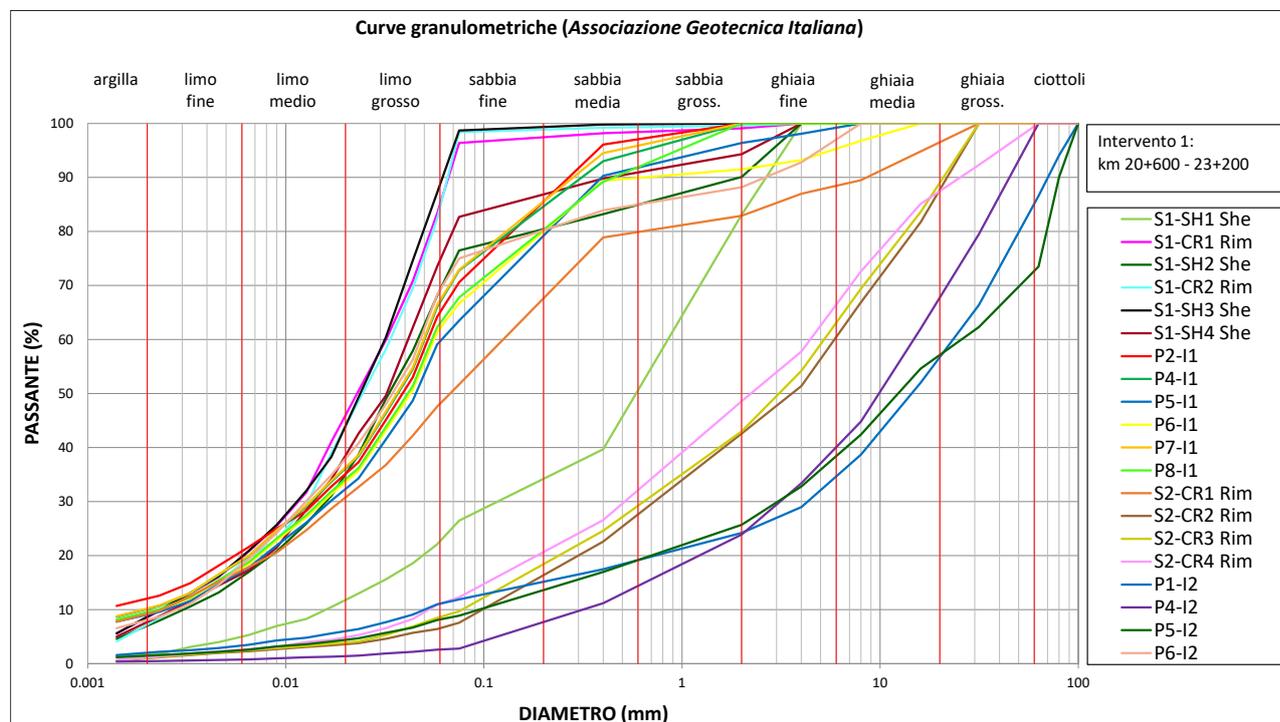


Figura 6-3: Curve granulometriche

Indagine-Campione	Profondità (m)	Classificazione AGI	Classificazione AASHTO M145-91
S1-SH1 She	2.5	sabbia limosa	A2-4
S1-CR1 Rim	5.0	limo debolmente argilloso	A4
S1-SH2 She	7.0	limo sabbioso, debolmente argilloso	A4
S1-CR2 Rim	9.0	limo debolmente argilloso	A4
S1-SH3 She	14.5	limo debolmente argilloso	A4
S1-SH4 She	19.0	limo sabbioso, debolmente argilloso	A4
P2-I1	1.8	limo sabbioso-argilloso	A4
P4-I1	1.8	limo con sabbia, debolmente argilloso	A4
P5-I1	1.8	limo con sabbia, debolmente argilloso	A4
P6-I1	1.8	limo sabbioso, debolmente argilloso-ghiaioso	A4
P7-I1	1.8	limo con sabbia, debolmente argilloso	A4
P8-I1	1.8	limo con sabbia, debolmente argilloso	A4
S2-CR1 Rim	1.5	limo con sabbia, ghiaioso, debolmente argilloso	A4
S2-CR2 Rim	4.0	ghiaia con sabbia, debolmente limosa	A1-a
S2-CR3 Rim	5.5	ghiaia con sabbia, debolmente limosa	A1-a
S2-CR4 Rim	9.0	sabbia con ghiaia, limosa	A1-a
P1-I2	0.9	ghiaia sabbiosa, debolmente limosa	A1-a
P4-I2	1.1	ghiaia con sabbia	A1-a
P5-I2	1.5	ghiaia con sabbia, debolmente limoso	A1-a
P6-I2	1.7	limo con sabbia, debolmente argilloso-ghiaioso	A4

Tabella 6-1: Classificazione granulometrica dei terreni.

6.2.2.2 Carta di Plasticità

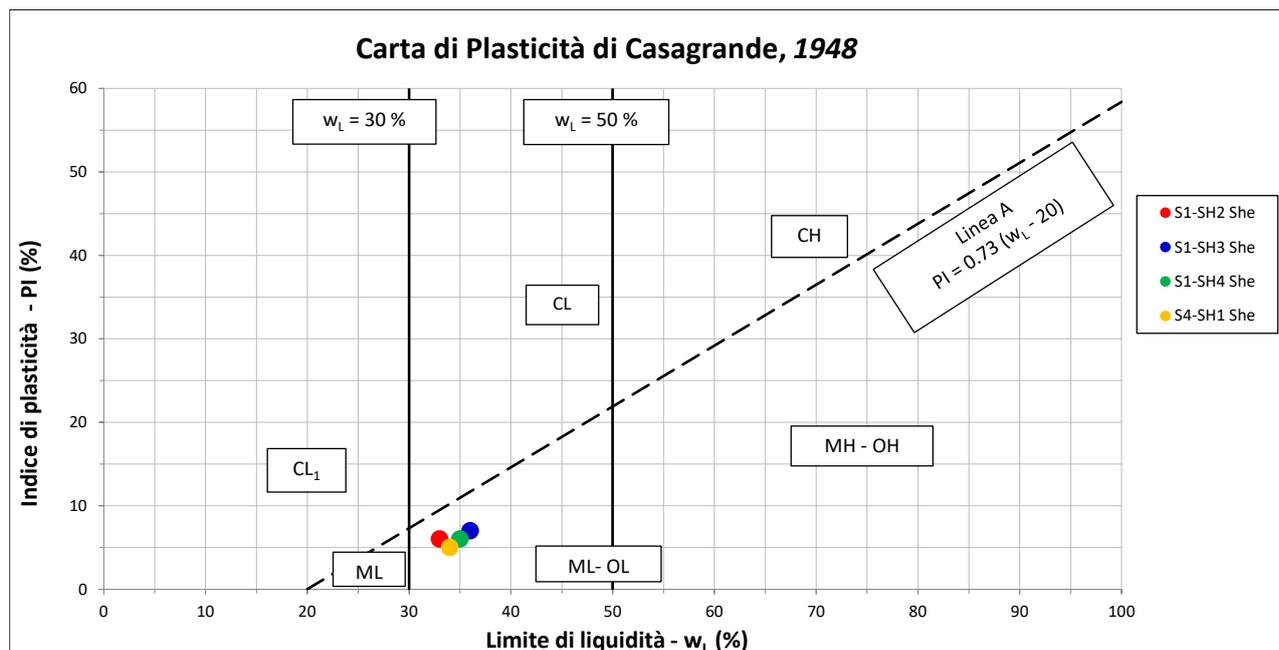


Figura 6-4: Carta di plasticità di Casagrande

NOTA: il campione S4-SH1She è riferito alla tratta d'intervento 2; per confronto i tre campioni della tratta 1 si osserva l'omogeneità dei terreni

6.2.2.3 Prove geotecniche

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	Classificazione granulometrica (AGI)	unità geotecnica attribuibile	valori di picco	
				UG	c' [kPa]	φ' [°]
S1	SH1-She	2.0 – 2.5	sabbia limosa	UG2	5	36
	SH2-She	6.5 – 7.0	limo sabbioso, debolmente argilloso	UG1	12	28
	SH3-She	14.0 – 14.5	limo debolmente argilloso	UG1	12	27
	SH4-She	18.5 – 19.0	limo sabbioso, debolmente argilloso	UG1	9	27

Tabella 6-2: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto.

6.2.3 Standard penetration test (SPT)

Resistenza normalizzata ($N_{1,60}$)

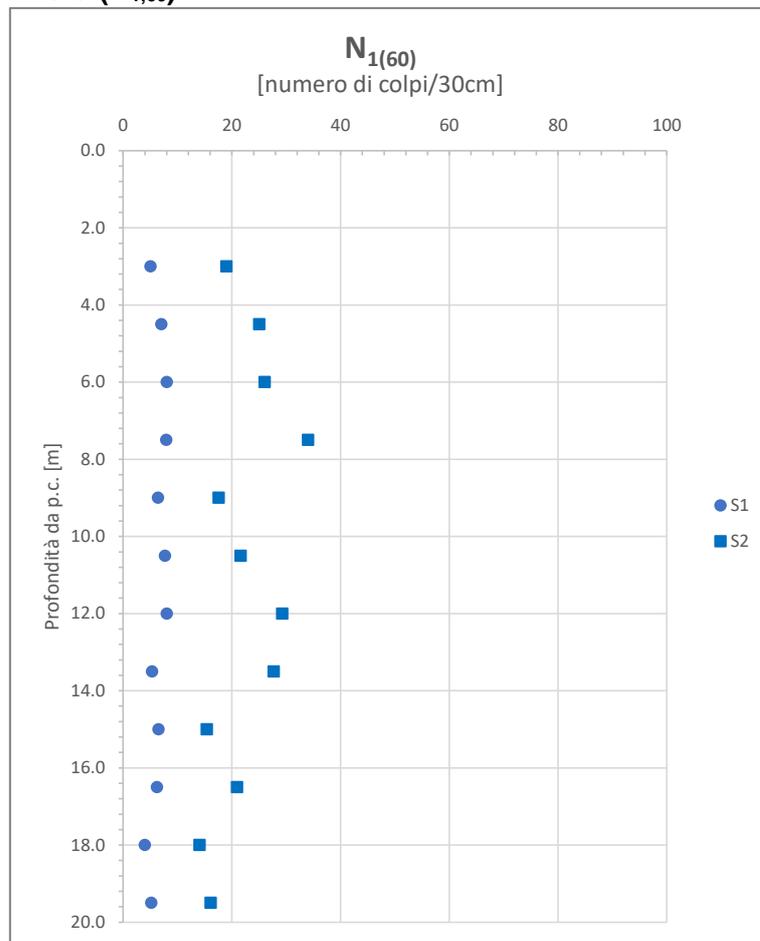


Figura 6-5: Distribuzione dei valori $N_{1,60}$ con la profondità

Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
$N_{1,60}$	S1	12	4	8	6	6	1	6	49	8
	S2	12	14	34	22	21	6	15	31	19

Tabella 6-3: Analisi statistica dei dati.

Densità relativa (Dr)

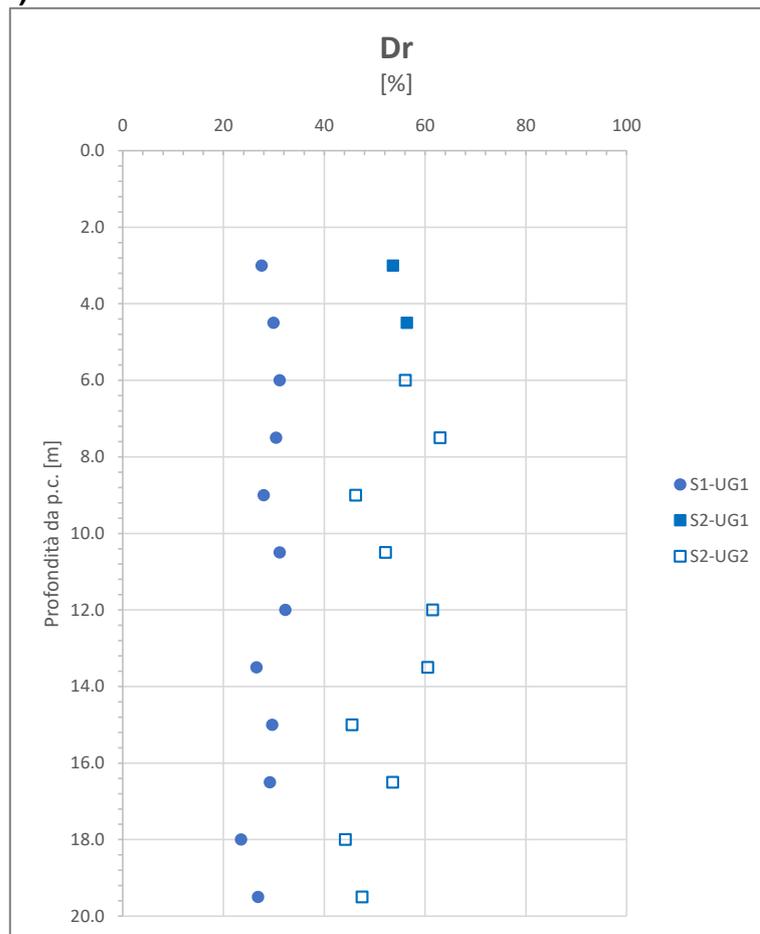


Figura 6-6: Distribuzione dei valori di Densità Relativa (%) con la profondità (Bazaara)

Unità - Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG1 Dr (%)	S1	12	23	32	29	29	2	25	32	28
UG1 Dr (%)	S2	2	54	56	55	-	-	-	-	-
UG2 Dr (%)		10	44	63	53	53	7	45	62	50

Tabella 6-4: Analisi statistica dei dati.

Angolo di attrito (φ)

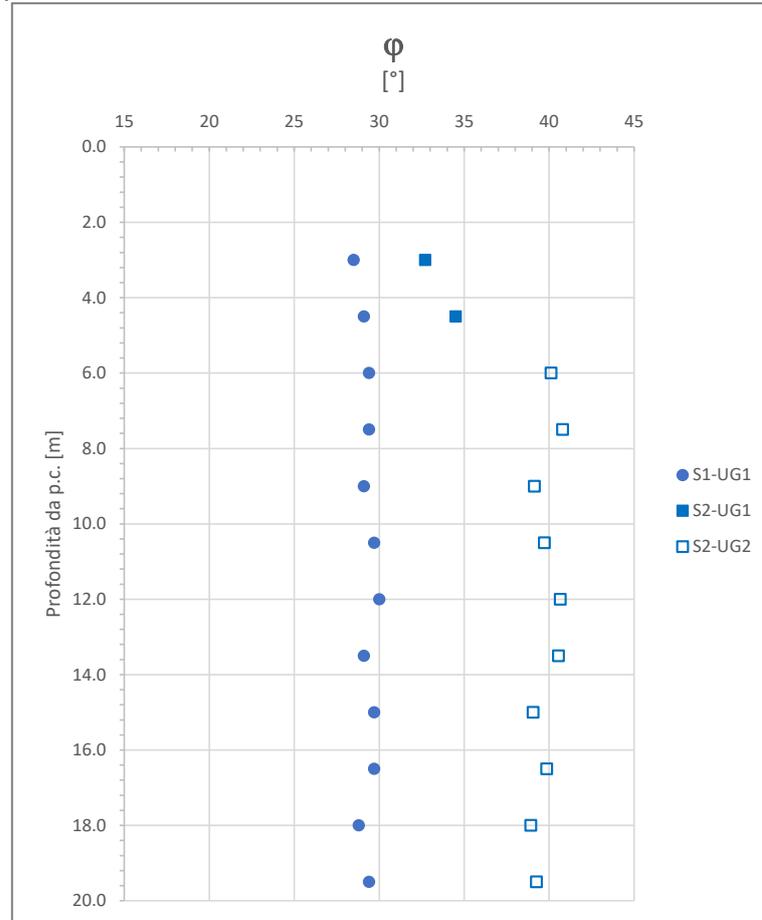


Figura 6-7: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) con la profondità (UG1 Japanese National Railway; UG2 Schmertmann)

Unità Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG1 φ (°)	S1	12	29	30	29	29	0	29	30	29
UG1 φ (°)	S2	2	33	35	34	-	-	-	-	33
UG2 φ (°)		10	39	41	40	40	1	39	41	39

Tabella 6-5: Analisi statistica dei dati.

Modulo Elastico (E)

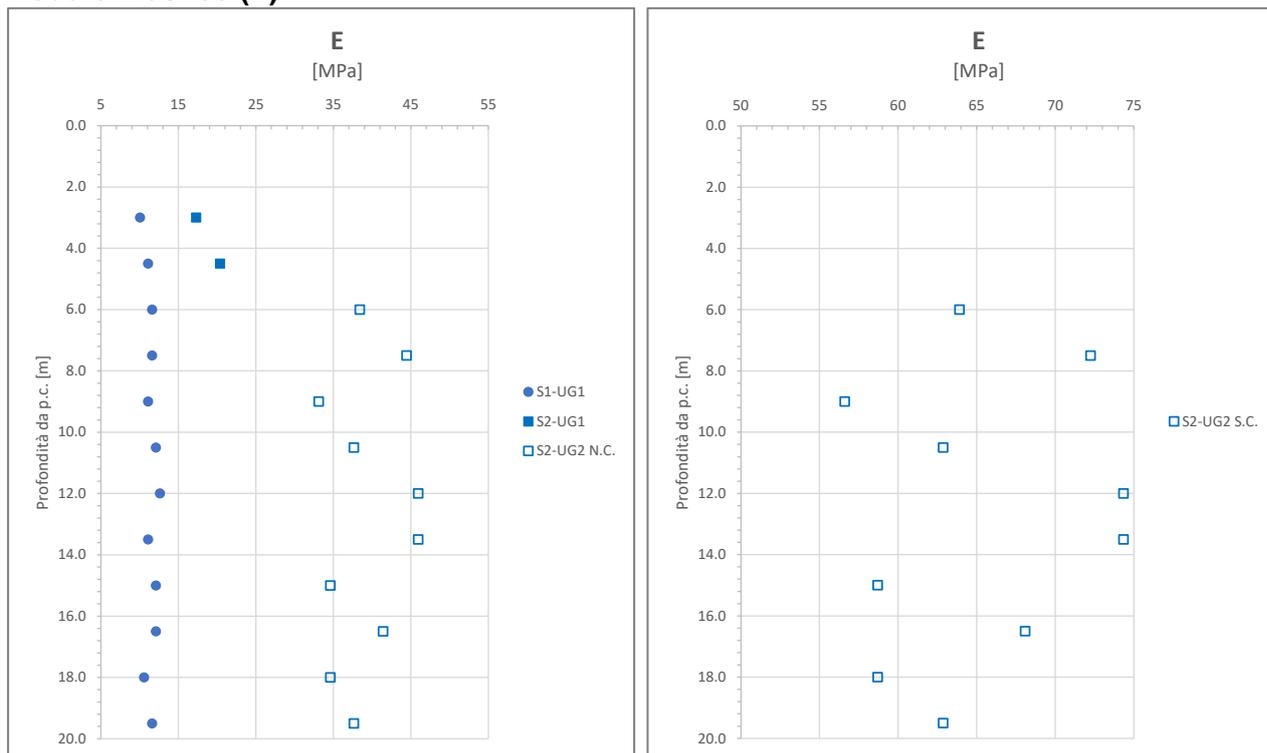


Figura 6-8: Distribuzione del Modulo Elastico in funzione della profondità (UG1 Schultze-Menzenbach; UG2 D'Apollonia-Denver per sabbia e ghiaia N.C. ed S.C.).

Unità Parametro	Sondag	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG1 E (MPa)	S1	12	10	13	11	12	1	10	12	11
UG1 E (MPa)	S2	2	17	20	19	-	-	-	-	-
UG2 N.C. E (MPa)		10	33	46	39	38	5	34	46	37
UG2 S.C. E (MPa)		10	57	74	65	63	7	58	74	62

Tabella 6-6: Analisi statistica dei dati.

Si osserva che il valore di Modulo Elastico ottenuto tramite correlazione per sabbia e ghiaia S.C (sovracconsolidata), sebbene inferiore, risulta più prossimo a quello ottenuto tramite prova pressiométrica in foro (cfr. Tabella 6-7).

6.2.4 Prove pressiometriche

Sondaggio	Prof. (m)	Terreno (UG attribuibile)	Modulo pressiometrico E_M (MPa)	Modulo di taglio G (MPa)	Pressione limite P_{lim} (MPa)	Modulo di Young E (MPa)
S1	5.7	limo sabbioso loc. argilloso (UG1)	14.9	5.7	0.74	22.4
S2	4.2	sabbia loc. deb.limosa (UG2)	26.3	10.1	2.25	78.9

Tabella 6-7: Sintesi dei risultati delle prove pressiometriche.

6.2.5 Prove di carico su piastra

Intervento [n.]	Sigla pozzetto	Prova di carico su piastra				
		Profondità [m]	Ciclo	Moduli di deformazione [MPa]		Grado di costipamento
				M_d	M'_d	
1	P1-2	1.0	1	3.8	-	0.51
			2	-	7.5	
	P1-4	0.6	1	16.3	-	0.55
			2	-	29.7	
		1.2	1	9.3	-	0.45
			2	-	20.5	
	P1-5	0.6	1	6.8	-	0.58
			2	-	11.7	
		1.2	1	6.3	-	0.59
			2	-	10.6	
	P1-6	1.2	1	4.3	-	0.44
			2	-	9.7	
	P1-7	1.0	1	9.7	-	0.82
			2	-	11.8	
	P1-8	1.0	1	5.6	-	0.25
			2	-	22.6	

Tabella 6-8: Sintesi dei risultati delle prove di carico su piastra.

6.2.6 Caratterizzazione delle Unità Geotecniche

Unità geotecnica	Peso / volume	Densità relativa	Modulo di Young	Resistenza al taglio	
	γ_{nat} [kN/m ³]	Dr [%]	E [MPa]	ϕ [°]	c [kPa]
UG1	19.8	(7) 28 (25 - 32)	(1) 16 (11 - 22)	(3) 28 (27 - 29)	(4) (11) 9 - 12
UG2	20.5	(7) 50 (45 - 62)	(2) 62 (58 - 74)	(6) 37 (36 - 39)	(5) 5 (4 - 6)

Tabella 6-9: Caratterizzazione geotecnica

- NOTE (1): valore medio tra valore caratteristico da SPT (11MPa) e valore da prova pressiométrica (22MPa)
- (2) valore caratteristico da SPT per sabbia e ghiaia sovraconsolidata; range riferito a 5° e 95° percentile
- (3): valore medio tra valore caratteristico da SPT (29°) e valore minimo da prove di taglio dir. (27°)
- (4): valore compreso tra valori min. (9kPa) e max. (12kPa) da prove di taglio diretto
- (5): valore da unica prova di taglio diretto (stima indicativa del range 4-6kPa)
- (6): valore compreso nel range definito da prova di taglio dir. (36°) e da valore caratteristico da SPT (39°)
- (7) valore caratteristico da prova SPT; range riferito a 5° e 95° percentile

6.3 Tratta d'intervento 2

6.3.1 Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione

La Figura 6-9 mostra il contesto territoriale della tratta di intervento 2; lungo il lato sud (carreggiata direzione Tirano) la SS38 è adiacente alla Linea Ferroviaria. Lungo il lato nord (carreggiata direzione Colico) la strada confina con campi agricoli e con proprietà private.

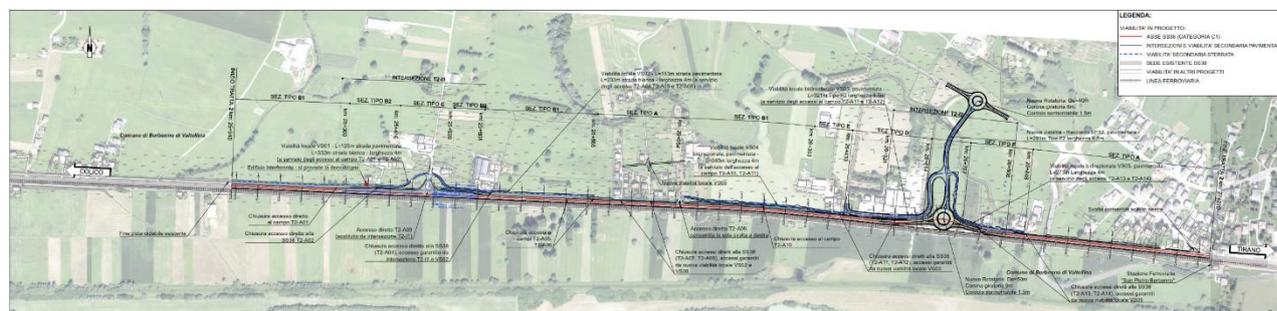


Figura 6-9: Localizzazione della tratta 2-SS38.

La Figura 6-10 mostra le informazioni geologiche dell'area prossima all'intervento 2.



Figura 6-10: Stralcio dalla Carta Geologica di PD della tratta 2-SS38.

Di seguito si descrivono caratteri geolitologici dei terreni di fondazione dell'opera, con riferimento sia alle informazioni della Cartografia Geologica Regionale (Progetto CARG) sia ai dati ottenuti tramite le indagini dirette.

La tratta di intervento 2 lungo è prevalentemente fondata su depositi quaternari di origine alluvionale, lungo la parte terminale in avvicinamento al centro abitato di San Pietro (Berbenno di Valtellina) vengono intercettati depositi di conoide.

DEPOSITI QUATERNARI (CARG, Foglio 56)

Depositi alluvionali (POI-alg):

- ghiaie massive o stratificate da fini a grossolane, a supporto clastico, matrice sabbiosa da assente ad abbondante, clasti arrotondati, sabbie ben lavate, in corpi lenticolari clinostratificati; lenti e corpi stratoidi di sedimenti limoso argillosi, talvolta laminati. Si osservano strutture sedimentarie dovute all'azione di correnti trattive come ciottoli embricati, laminazioni oblique a basso angolo, laminazioni incrociate. Nella tratta in esame la simbologia utilizzata per la cartografia si riferisce a "ghiaie prevalenti".

Depositi di conoide (POI-ms):

- ghiaie massive o grossolanamente stratificate da fini a grossolane, talvolta ben selezionate, a supporto clastico, matrice sabbiosa da assente ad abbondante, clasti arrotondati; sabbie ben lavate, in corpi lenticolari clinostratificati, lenti e corpi stratoidi di sedimenti limoso argillosi, talvolta laminati. Diamicton massivi, a supporto di matrice limoso sabbiosa o limoso argillosa, clasti da spigolosi ad arrotondati. Spesso le componenti gravitative dei conoidi, quali i diamicton, costituiscono la parte basale dei conoidi stessi, mentre le componenti alluvionali costituiscono le parti più superficiali.

DEPOSITI QUATERNARI (Indagini geognostiche; PD):

- Nella tratta T2 la stratigrafia risultante dai sondaggi geognostici si compone di una successione di depositi eterogenei con variazioni laterali. Al di sotto di un primo strato di terreno coltivo, composto essenzialmente da limo sabbioso, il sondaggio S3 (profondità

20m) evidenzia un'alternanza di ghiaia prevalente e sabbia. I depositi ghiaiosi hanno granulometrica eterometrica da media a fine, con clasti subarrotondati e poligenici immersi in una matrice sabbiosa grossolana, con contenuto limoso crescente in superficie. Gli strati di sabbia sono a granulometria medio/fine e in quantità minore grossolana, in alcuni orizzonti il contenuto limoso aumenta. Al di sotto di 19,7m di profondità si riscontra uno strato di limo sabbioso grigio.

Una diversa ricostruzione stratigrafica appare dal sondaggio S4 (profondità 20m): la sabbia diventa il litotipo prevalente e la coltre di terreno superficiale a limo sabbioso si riduce di spessore. Le sabbie sono a granulometria variabile da finissima a medio/fine, con una frazione ghiaiosa medio/fine che diminuisce all'aumento della profondità, creando una gradazione inversa. A circa 17m la sabbia è debolmente limosa con livelli di torba bruno-nerastra. I pozzetti esplorativi (profondità 2m) realizzati in prossimità dell'opera di progetto sottolineano una variabilità areale litologica dei terreni di fondazione. Infatti, nei primi due metri di scavo si incontrano corpi stratoidi a granulometria e addensamento diverso. Generalmente sabbia limosa poco addensata e molto umida, è seguita in profondità da ghiaia sabbiosa con ciottoli in matrice localmente limosa. Nel pozzetto P1-2 la granulometria dei sedimenti è più grossolana, risultando ghiaia a ciottoli e trovanti pluridecimentrici in matrice limoso-sabbiosa. Nello scavo P2-6, un primo strato di sabbia poco umida e addensata copre un orizzonte di limo debolmente sabbioso, poco consistente, molto umido, e materiale da riporto.

6.3.2 Analisi e prove di laboratorio

6.3.2.1 Curve granulometriche e classificazione dei terreni

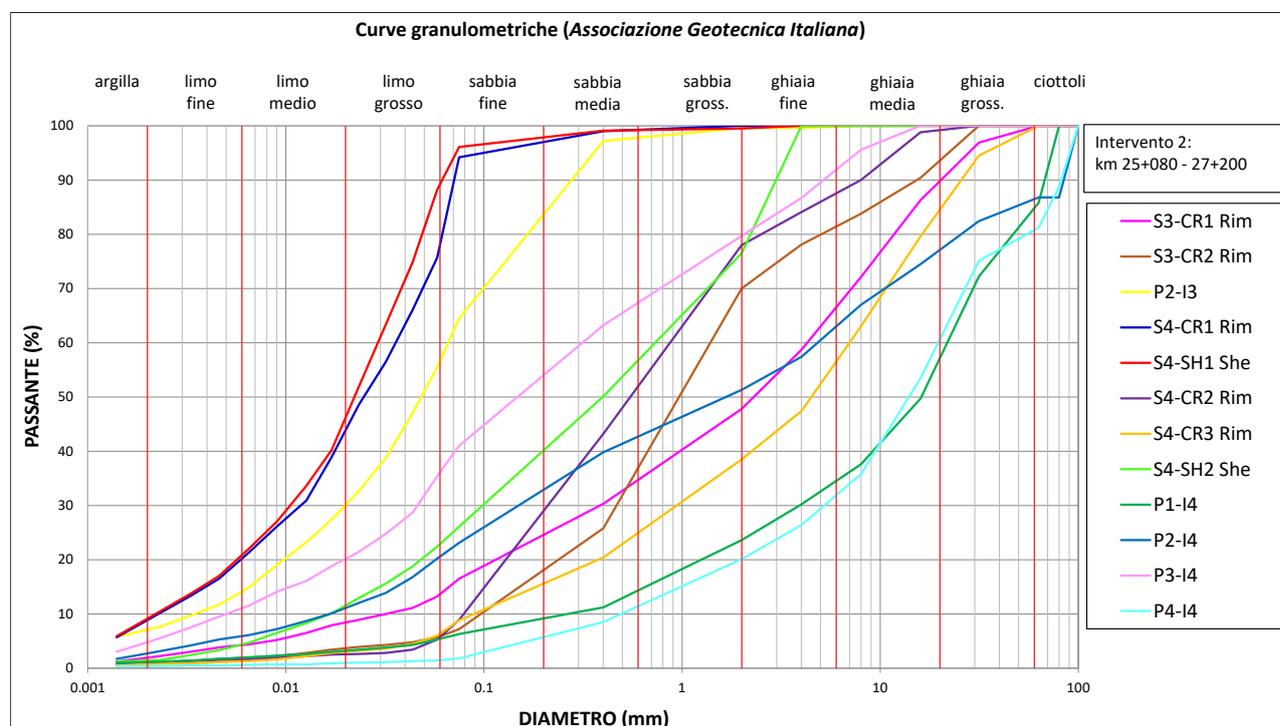


Figura 6-11: Curve granulometriche

Indagine-Campione	Profondità (m)	Classificazione AGI	Classificazione AASHTO M145-91
S3-CR1 Rim	2.5	sabbia limosa con ghiaia	A1-b
S3-CR2 Rim	8.5	sabbia ghiaiosa	A1-b
P2-I3	1.8	limo con sabbia, debolmente argilloso	A4
S4-CR1 Rim	1.5	limo debolmente argilloso	A4
S4-SH1 She	4.0	limo debolmente argilloso	A4
S4-CR2 Rim	5.5	sabbia ghiaiosa, debolmente limosa	A-1b
S4-CR3 Rim	9.0	ghiaia con sabbia, debolmente limosa	A1-a
S4-SH2 She	19.5	sabbia limosa	A2-4
P1-I4	1.8	ghiaia sabbiosa, debolmente limosa	A1-a
P2-I4	1.8	ghiaia sabbioso-limosa	A2-4
P3-I4	1.8	sabbia limosa, debolmente ghiaiosa e argillosa	A4
P4-I4	1.8	ghiaia sabbiosa	A1-a

Tabella 6-10: Classificazione granulometrica dei terreni.

6.3.2.2 Carta di Plasticità

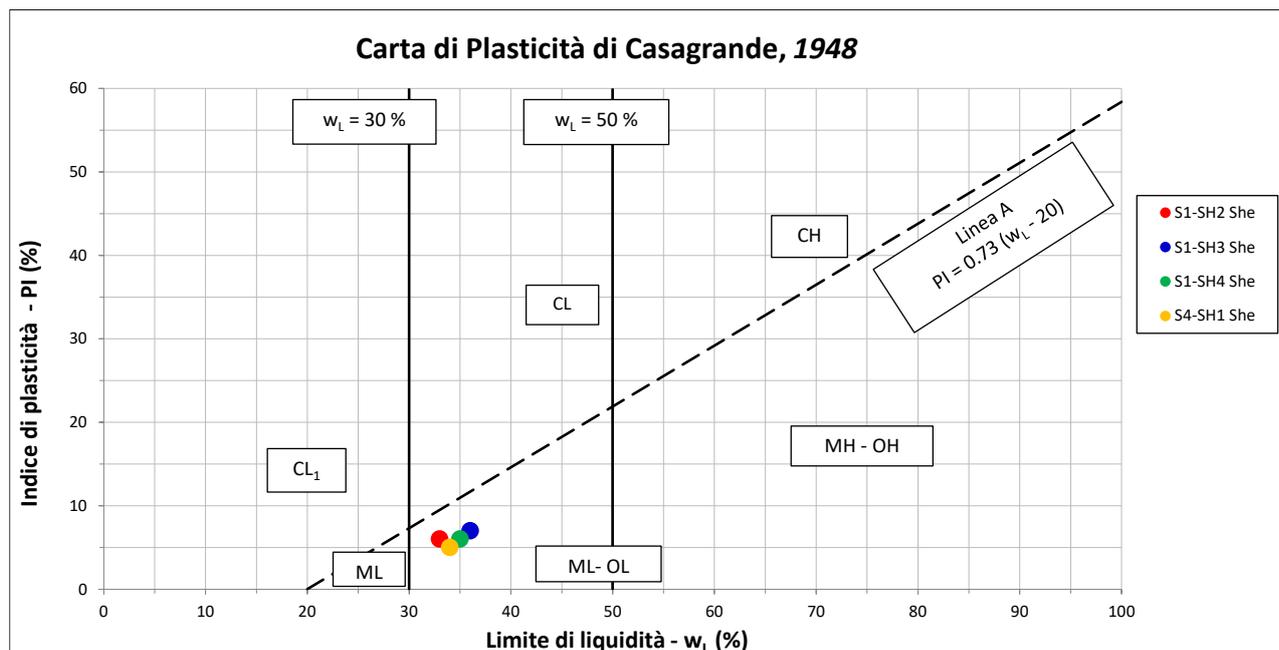


Figura 6-12: Carta di plasticità di Casagrande

NOTA: il solo campione S4-SH1She è riferito alla tratta d'intervento 2; dal confronto con gli altri campioni, riferiti alla tratta 1, si osserva l'omogeneità delle caratteristiche dei terreni

6.3.2.3 Prove geotecniche

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	Classificazione granulometrica (AGI)	unità geotecnica attribuibile	valori di picco	
				UG	c' [kPa]	ϕ' [°]
S4	SH1-She	3.5 – 4.0	Limo debolmente argilloso	UG1	19	25

Tabella 6-11: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto.

6.3.3 Standard penetration test (SPT)

Resistenza normalizzata ($N_{1,60}$)

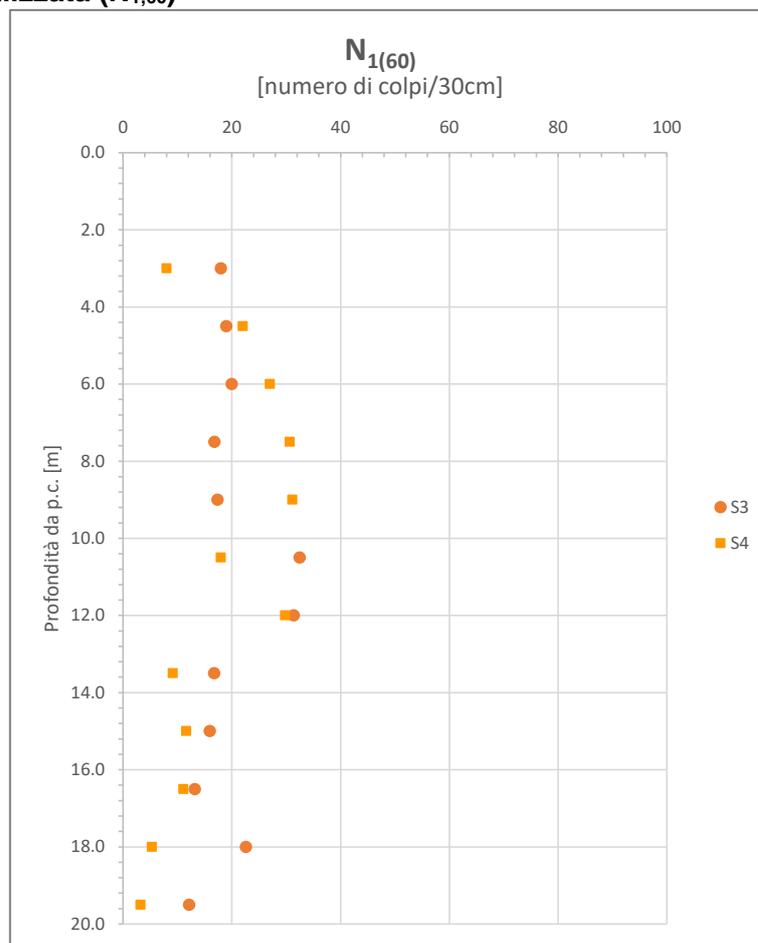


Figura 6-13: Distribuzione dei valori $N_{1,60}$ con la profondità

Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
$N_{1,60}$	S3	12	12	32	20	18	6	13	32	16
	S4	12	3	31	17	15	10	4	31	12

Tabella 6-12: Analisi statistica dei dati.

Densità relativa (Dr)

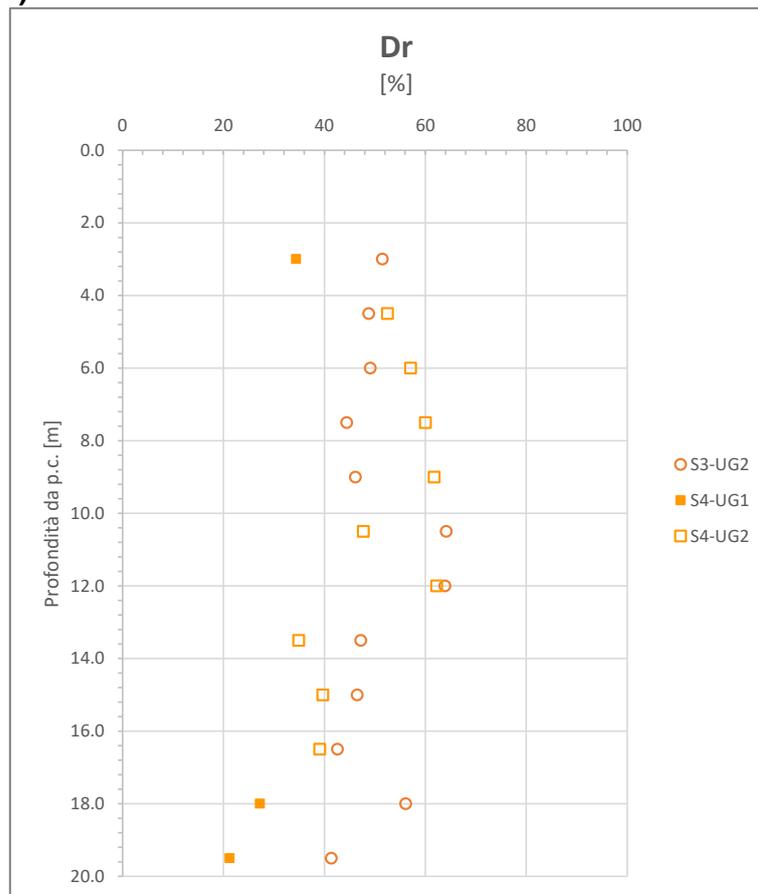


Figura 6-14: Distribuzione dei valori di Densità Relativa (%) con la profondità (Bazaara)

Unità - Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG2 Dr (%)	S3	12	41	64	50	48	8	42	64	46
UG1 Dr (%)	S4	3	21	34	28	27	7	-	-	24
UG2 Dr (%)		9	35	62	51	52	11	37	62	45
UG2 Dr (%)	S3+S4	21	35	64	50	49	9	-	-	46

Tabella 6-13: Analisi statistica dei dati.

Angolo di attrito (φ)

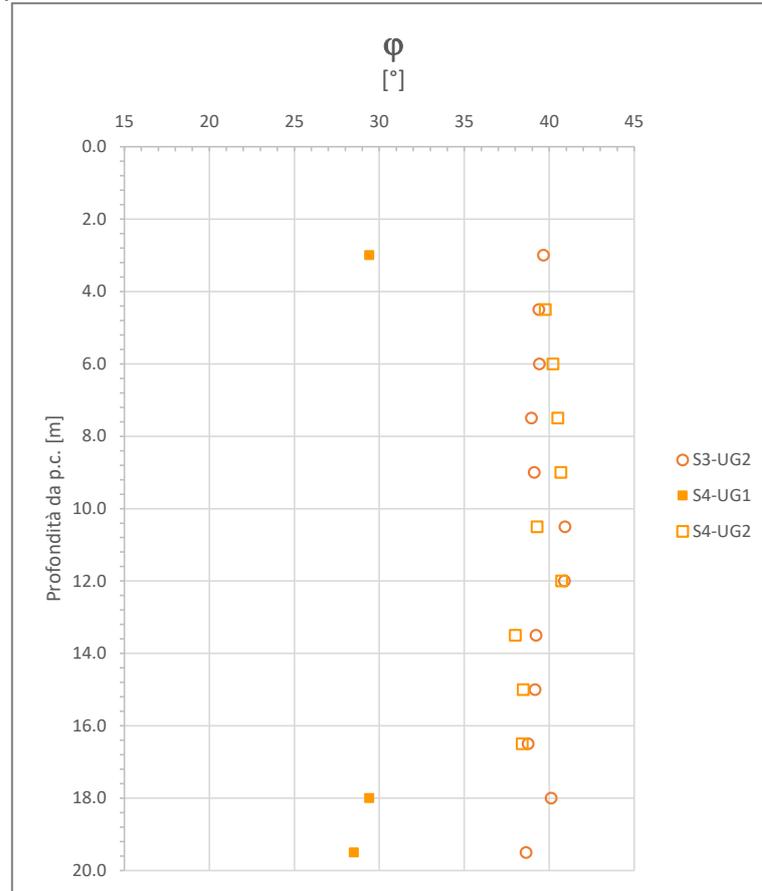


Figura 6-15: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) con la profondità (UG1 Japanese National Railway; UG2 Schmertmann)

Unità Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG2 φ (°)	S3	12	39	41	40	39	1	39	41	39
UG1 φ (°)	S4	3	29	29	29	-	1	-	-	29
UG2 φ (°)		9	38	41	40	40	1	38	41	39

Tabella 6-14: Analisi statistica dei dati.

Modulo Elastico (E)

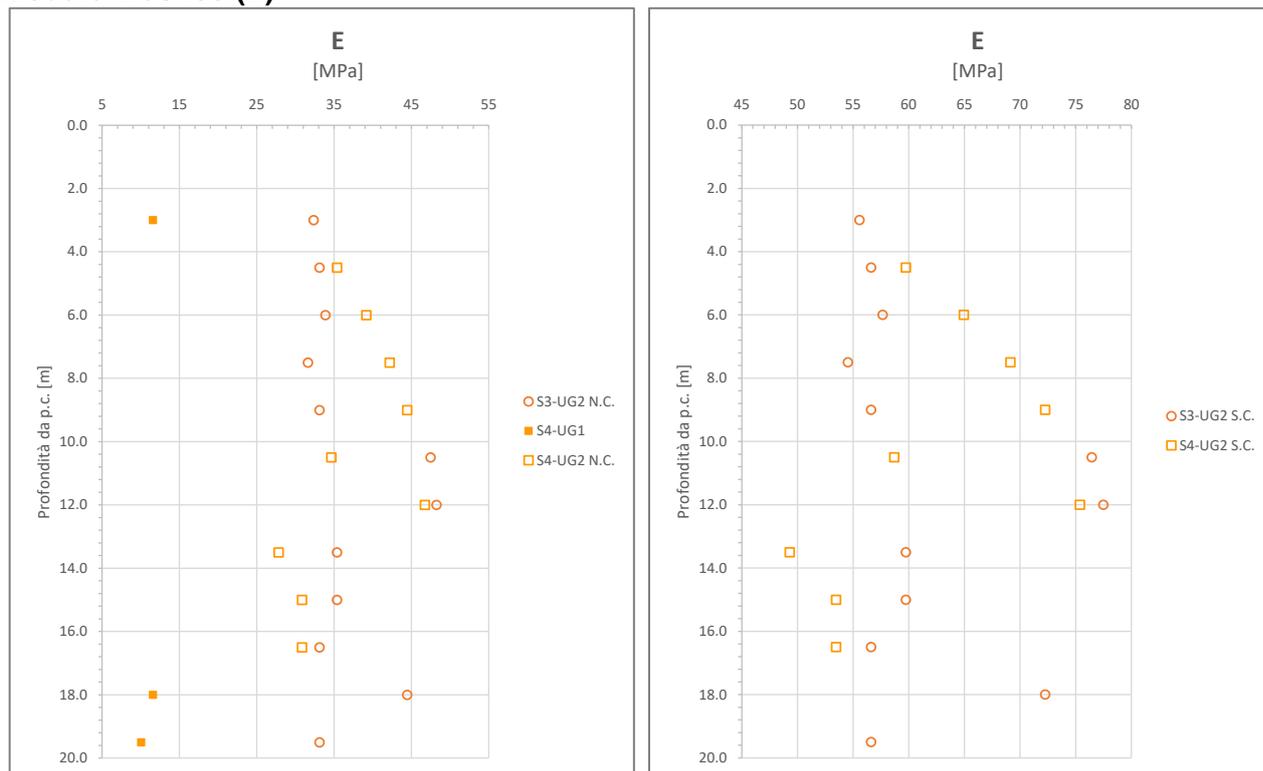


Figura 6-16: Distribuzione del Modulo Elastico in funzione della profondità (UG1 Schultze-Menzenbach; UG2 D'Apollonia-Denver per sabbia e ghiaia N.C. ed S.C.).

Unità Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG2 N.C. E (MPa)	S3	12	32	48	37	33	6	32	48	34
UG1 E (MPa)	S4	3	10	12	11	12	1	-	-	11
UG2 N.C. E (MPa)		9	28	47	37	35	7	29	46	34
UG2 N.C. E (MPa)	S3+S4	21	28	48	37	35	6	-	-	34
UG2 S.C. E (MPa)		21	49	77	62	59	9	-	-	57

Tabella 6-15: Analisi statistica dei dati.

Si osserva che il valore di Modulo Elastico ottenuto tramite correlazione per sabbia e ghiaia S.C (sovracconsolidata), sebbene inferiore, risulta più simile a quello ottenuto tramite prova pressiométrica in foro (cfr. Tabella 6-7).

6.3.4 Prove pressiometriche

Sondaggio	Prof. (m)	Terreno (UG attribuibile)	Modulo pressiometrico E_M (MPa)	Modulo di taglio G (MPa)	Pressione limite P_{lim} (MPa)	Modulo di Young E (MPa)
S3	5.7	ghiaia in matrice sabbiosa (UG2)	23.5	9.1	-	-
S4	7.2	sabbia con ghiaia (UG2)	32.1	12.3	2.85	96.3

Tabella 6-16: Sintesi dei risultati delle prove pressiometriche.

6.3.5 Prove di carico su piastra

Intervento [n.]	Sigla pozzetto	Prova di carico su piastra				Grado di costipamento
		Profondità [m]	Ciclo	Moduli di deformazione [MPa]		
				M_d	M'_d	
2	P2-1	1.0	1	14.0	-	0.22
			2	-	62.5	
	P2-4	0.6	1	5.2	-	0.68
			2	-	7.7	
	P2-5	0.6	1	6.3	-	0.53
			2	-	11.8	
		1.2	1	7.4	-	0.46
			2	-	16.2	
	P2-6	0.6	1	4.2	-	0.58
			2	-	7.2	
		1.2	1	4.5	-	0.63
			2	-	7.2	

Tabella 6-17: Sintesi dei risultati delle prove di carico su piastra.

6.3.6 Caratterizzazione delle Unità Geotecniche

Unità geotecnica	Peso / volume	Densità relativa	Modulo di Young	Resistenza al taglio	
	γ_{nat} [kN/m ³]	D_r [%]	E [MPa]	ϕ [°]	c [kPa]
UG1	19.8	⁽⁷⁾ 24 (21 - 34)	⁽¹⁾ 11 (10 - 12)	⁽³⁾ 27 (25 - 29)	⁽⁴⁾ 19 (17 - 21)
UG2	20.5	⁽⁷⁾ 46 (37 - 64)	⁽²⁾ 57 (49 - 77)	⁽⁶⁾ 39 (49 - 77)	⁽⁵⁾ 5 (4 - 6)

Tabella 6-18: Caratterizzazione geotecnica

NOTA ⁽¹⁾: valore caratteristico da SPT; range riferito a valori min. e max.

- (2): valore caratteristico da SPT per sabbia e ghiaia sovraconsolidata; range riferito a valori min. e max.
- (3): valore compreso tra valore caratteristico da SPT (29°) e valore da prove di taglio dir. (25°)
- (4): valore da unica prova di taglio diretto (stima indicativa del range 17-21kPa)
- (5): valore derivato dalla tratta di intervento 1 (in assenza di dati per la tratta 1)
- (6): valore caratteristico da SPT; range riferito a 5° e 95° percentile.
- (7): valore caratteristico da prova SPT; range riferito a 5° e 95° percentile per UG2 e a valori min. e max. per UG1

6.4 Tratta d'intervento 3

6.4.1 Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione

La Figura 6-17 mostra il contesto territoriale della tratta di intervento 3; lungo la carreggiata direzione Tirano la SS38 è prevalentemente adiacente alla Linea Ferroviaria, a partire dal km 56+400 circa la strada e la linea ferroviaria si distanziano. Lungo la carreggiata direzione Colico la strada confina prevalentemente con campi agricoli, proprietà private e aree boschive.

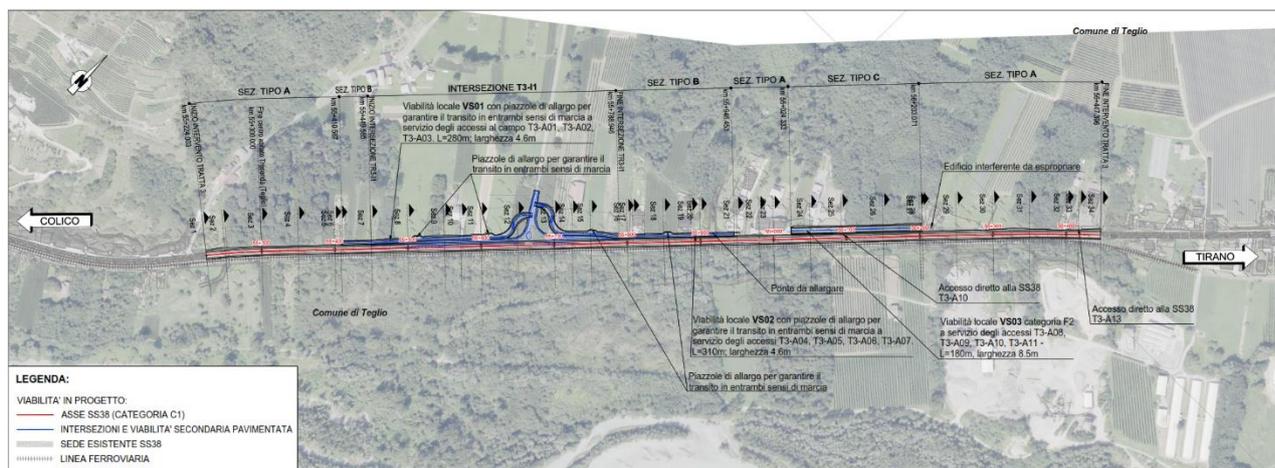


Figura 6-17: Localizzazione della tratta 3-SS38.

La Figura 6-18 mostra le informazioni geologiche dell'area prossima all'intervento 3.

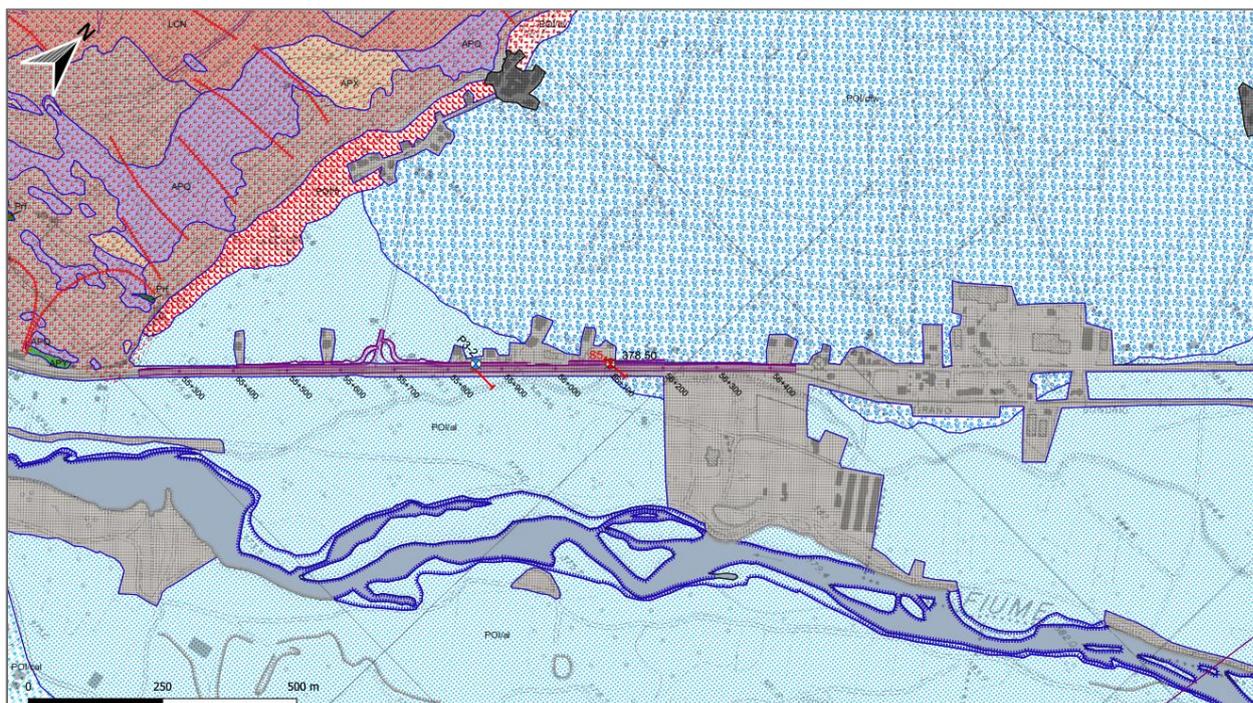


Figura 6-18: Stralcio dalla Carta Geologica di PD della tratta 3-SS38.

Di seguito si descrivono caratteri geolitologici dei terreni di fondazione dell'opera, con riferimento sia alle informazioni della Cartografia Geologica Regionale (Progetto CARG) sia ai dati ottenuti tramite le indagini dirette.

La tratta di intervento 3 è fondata su depositi quaternari di origine alluvionale e di conoide, lungo la tratta iniziale costeggia proprietà private in vicinanza al basamento roccioso affiorante. Lungo la parete rocciosa a nord della tratta iniziale sono presenti in modo diffuso depositi di frana.

DEPOSITI QUATERNARI (CARG, Foglio 57)

Depositi alluvionali (POI-al):

- ghiaie massive o stratificate da fini a grossolane, a supporto clastico, matrice sabbiosa da assente ad abbondante, clasti arrotondati, sabbie ben lavate, in corpi lenticolari clinostratificati; lenti e corpi stratoidi di sedimenti limoso argillosi, talvolta laminati. Si osservano strutture sedimentarie dovute all'azione di correnti trattive come ciottoli embricati, laminazioni oblique a basso angolo, laminazioni incrociate. Nella tratta in esame la simbologia utilizzata per la cartografia si riferisce a "sabbie prevalenti".

Depositi di conoide (POI-dwf):

- ghiaie massive o grossolanamente stratificate da fini a grossolane, talvolta ben selezionate, a supporto clastico, matrice sabbiosa da assente ad abbondante, clasti arrotondati; sabbie ben lavate, in corpi lenticolari clinostratificati, lenti e corpi stratoidi di sedimenti limoso argillosi, talvolta laminati. Diamicton massivi, a supporto di matrice limoso sabbiosa o limoso argillosa, clasti da spigolosi ad arrotondati. Spesso le componenti gravitative dei conoidi, quali i diamicton, costituiscono la parte basale dei conoidi stessi, mentre le componenti alluvionali costituiscono le parti più superficiali. Nella tratta in esame la simbologia utilizzata

per la cartografia si riferisce a "depositi di debris flow".

BASAMENTO ROCCIOSO: UNITA' TETTONOMETAMORFICA DELL'APRICA (CARG, Foglio 57)

Rocce filoniane (fn):

- Filoni andesitici, andesiti porfiriche (Cretacico ? – Paleogene ?).

Micascisti a granato, biotite, clorite (APX):

- Scisti a grana fine (pre-varisico).

Quarziti (APQ):

- Quarziti intercalate nei micascisti (pre-varisico).

Metabasiti (APY):

- Scisti cloritici e prasiniti (pre-varisico).

DEPOSITI QUATERNARI (Indagini geognostiche; PD):

- Durante l'esecuzione delle indagini dirette non è stato incontrato il substrato roccioso; perciò, per i primi 20m di profondità si ipotizza la presenza di sola copertura sedimentaria per l'intera tratta d'intervento. Il sondaggio S5 (profondità 20m) evidenzia un'alternanza di ghiaia e sabbia con strati di spessore variabile ad un massimo di 4m. Le sabbie nei primi metri superficiali sono localmente limoso-micacee con rara ghiaia fine, mentre a maggiore profondità aumentano di granulometria e di frazione ghiaiosa. Gli strati di ghiaia sono eterometrici con ciottoli poligenici subarrotondati immersi in una matrice sabbiosa e localmente limosa (8,7m-9,0m).

Le risultanze dei pozzetti esplorativi (profondità 2m) relativi all'opera confermano una prevalenza di sabbia nel primo paio di metri di scavo. I terreni di fondazione sono quindi poco addensati e poco umidi a granulometria medio/fine.

6.4.2 Analisi e prove di laboratorio

6.4.2.1 Curve granulometriche e classificazione dei terreni

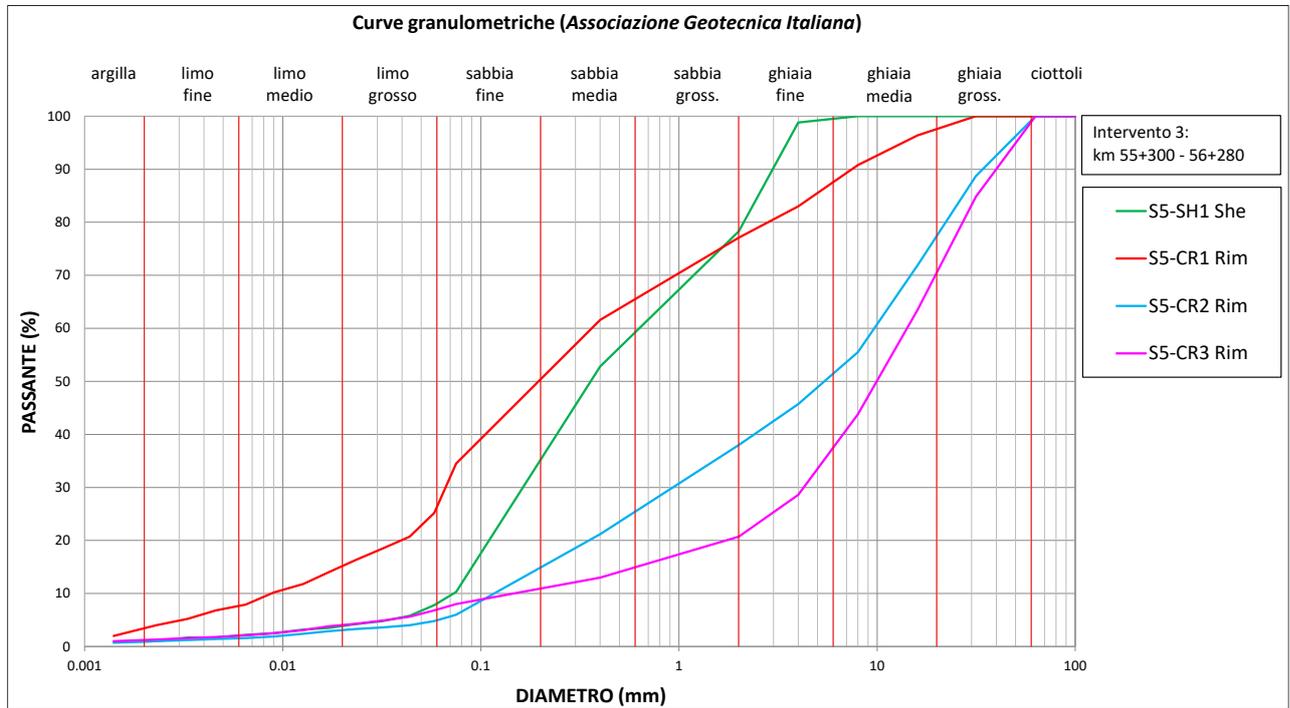


Figura 6-19: Curve granulometriche

Indagine-Campione	Profondità (m)	Classificazione AGI	Classificazione AASHTO M145-91
S5-CR1 Rim	2.0	sabbia con limo, ghiaiosa	A2-4
S5-SH1 She	4.0	sabbia debolmente limosa	A2-4
S5-CR2 Rim	7.0	ghiaia con sabbia, debolmente limosa	A1-a
S5-CR3 Rim	9.0	ghiaia sabbiosa, debolmente limosa	A1-a

Tabella 6-19: Classificazione granulometrica dei terreni.

6.4.2.2 Prove geotecniche

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	Classificazione granulometrica (AGI)	unità geotecnica attribuibile	valori di picco	
				UG	c' [kPa]	φ' [°]
S5	SH1-She	3.5 - 4.0	sabbia debolmente limosa	UG2	7	37
	CR3-Rim	8.7 - 9.0	Ghiaia sabbiosa debolmente limosa	UG2	6	35

Tabella 6-20: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto.

6.4.3 Standard penetration test (SPT)

Resistenza normalizzata ($N_{1,60}$)

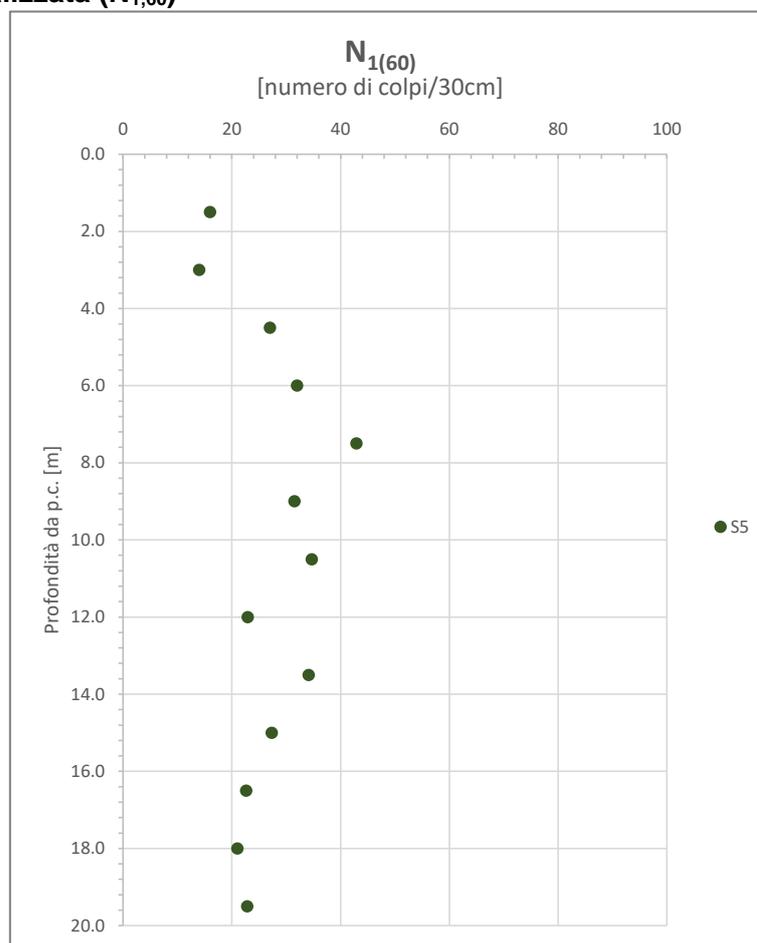


Figura 6-20: Distribuzione dei valori $N_{1,60}$ con la profondità

Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
$N_{1,60}$	S5	13	14	43	27	27	8	15	38	23

Tabella 6-21: Analisi statistica dei dati.

Densità relativa (D_r)

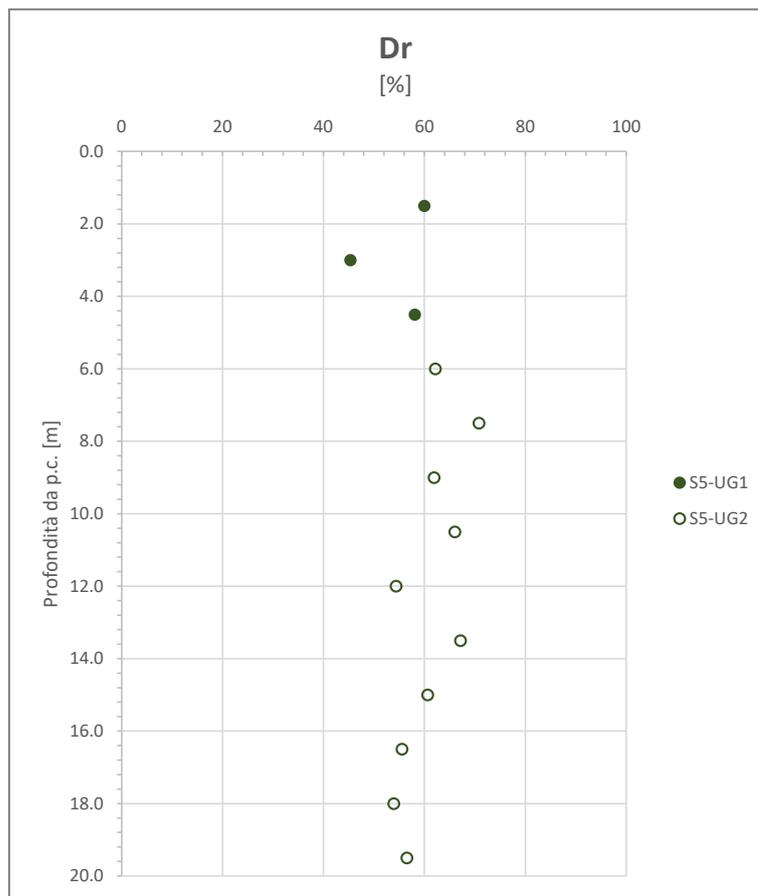


Figura 6-21: Distribuzione dei valori di Densità Relativa (%) con la profondità (Bazaara)

Unità - Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG1 Dr (%)	S5	3	45	60	54	58	8	47	60	51
UG2 Dr (%)		10	54	71	61	61	6	54	69	58

Tabella 6-22: Analisi statistica dei dati.

Angolo di attrito (φ)

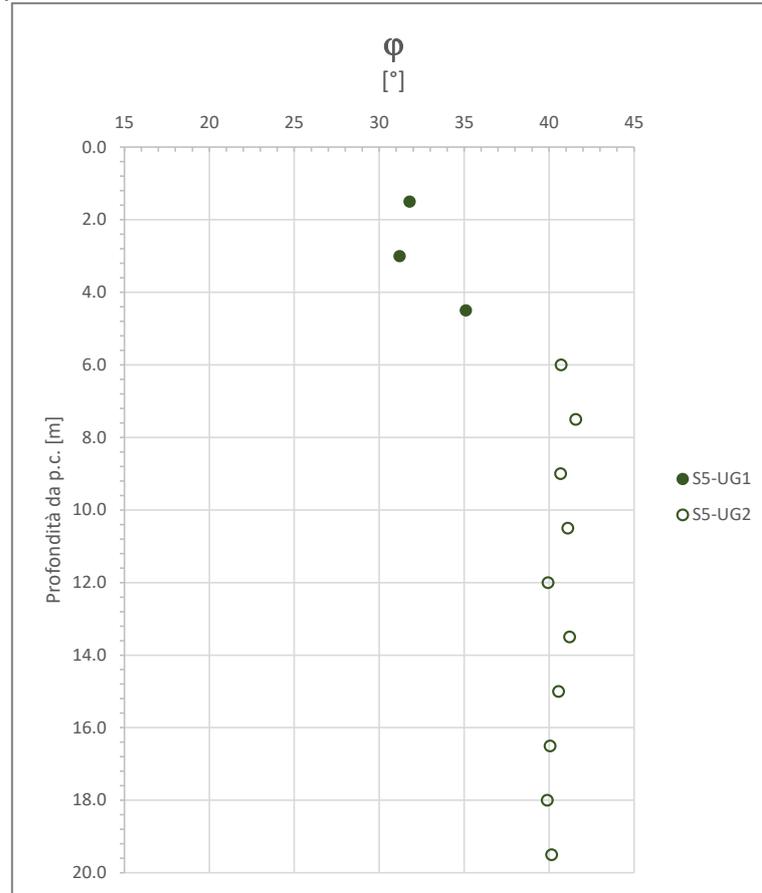


Figura 6-22: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) con la profondità (UG1 Japanese National Railway; UG2 Schmertmann)

Unità Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG1 φ (°)	S5	3	31	35	33	32	2	-	-	32
UG2 φ (°)		10	40	42	41	41	1	40	41	40

Tabella 6-23: Analisi statistica dei dati.

Modulo Elastico (E)

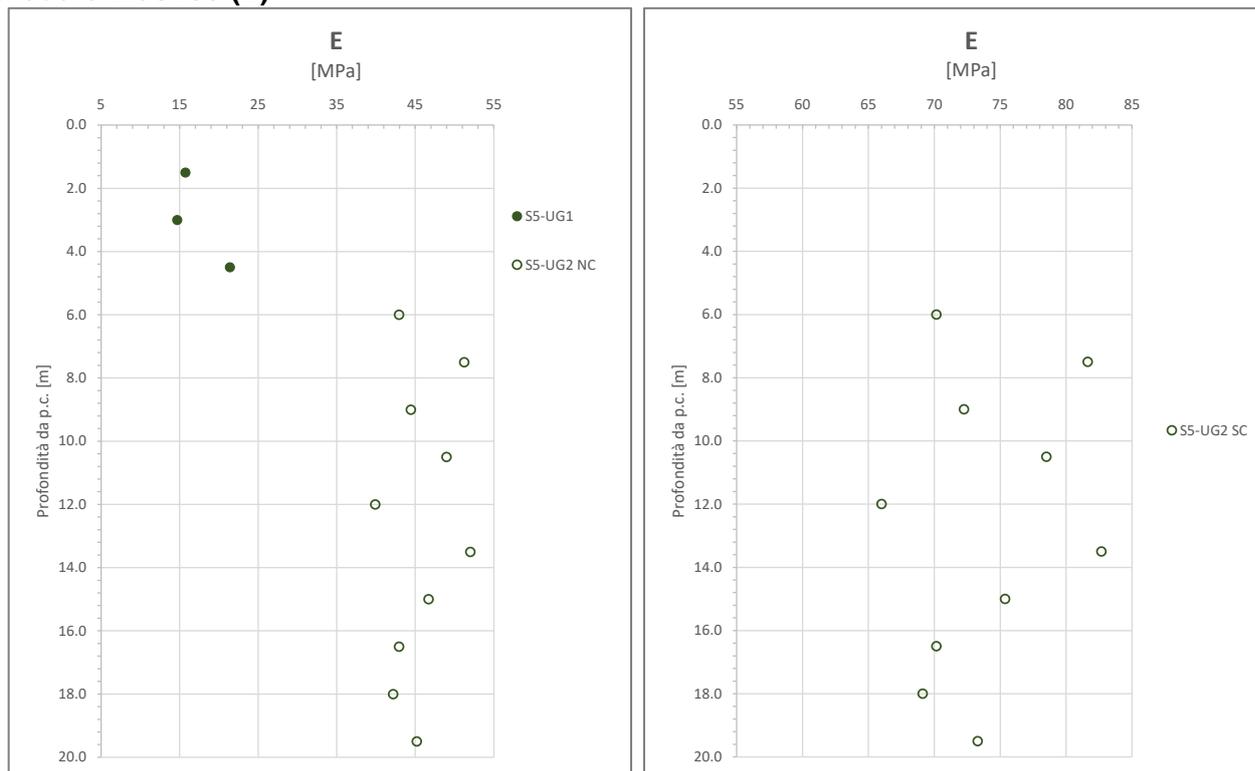


Figura 6-23: Distribuzione del Modulo Elastico in funzione della profondità (UG1 Schultze-Menzenbach; UG2 D'Apollonia-Denver per sabbia e ghiaia N.C. ed S.C.).

Unità Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG1 E (MPa)	S5	3	15	21	17	16	4	-	-	15
UG2 N.C. E (MPa)	S5	10	40	52	46	45	4	41	52	44
UG2 S.C. E (MPa)		10	66	83	74	73	6	67	82	71

Tabella 6-24: Analisi statistica dei dati.

Si osserva che il valore di Modulo Elastico ottenuto tramite prova pressiométrica in foro (cfr. Tabella 6-25) è intermedio rispetto ai valori ottenuti da prova SPT con correlazioni per sabbia e ghiaia N.C. (normalconsolidata) e S.C. (sovracconsolidata).

6.4.4 Prove pressiometriche

Sondaggio	Prof. (m)	Terreno (UG attribuibile)	Modulo pressiometrico E_M (MPa)	Modulo di taglio G (MPa)	Pressione limite P_{lim} (MPa)	Modulo di Young E (MPa)
S5	2.7	sabbia loc. deb.limosa (UG2)	19.3	7.4	1.75	57.9

Tabella 6-25: Sintesi dei risultati delle prove pressiometriche.

6.4.5 Prove di carico su piastra

Intervento [n.]	Sigla pozzetto	Prova di carico su piastra				Grado di costipamento
		Profondità [m]	Ciclo	Moduli di deformazione [MPa]		
				M_d	M'_d	
3	P3-2	1.0	1	7.7	-	0.69
			2	-	11.1	

Tabella 6-26: Sintesi dei risultati delle prove di carico su piastra.

6.4.6 Caratterizzazione delle Unità Geotecniche

Unità geotecnica	Peso / volume	Densità relativa	Modulo di Young	Resistenza al taglio	
	γ_{nat} [kN/m ³]	D_r [%]	E [MPa]	φ [°]	c [kPa]
UG1	19.8	⁽⁷⁾ 51 (47 - 60)	⁽¹⁾ 15 (15 - 21)	⁽³⁾ 32 (31 - 35)	⁽⁴⁾ 10 (8-12)
UG2	20.5	⁽⁷⁾ 58 (54 - 69)	⁽²⁾ 44 (41 - 52)	⁽⁶⁾ 37 (35 - 40)	⁽⁵⁾ 6 (6-7)

Tabella 6-27: Caratterizzazione geotecnica

- NOTA ⁽¹⁾: valore caratteristico da SPT (15MPa); range riferito a valori min. e max.
- ⁽²⁾: valore caratteristico da SPT per sabbia e ghiaia normalconsolidata; range riferito a 5° e 95° percentile
- ⁽³⁾: valore caratteristico da SPT; range riferito a valori min. e max.
- ⁽⁴⁾: valore stimato indicativo (assenza di prove di taglio diretto)
- ⁽⁵⁾: valore minimo da prove di taglio diretto; range riferito a valori min. e max.
- ⁽⁶⁾: valore max. da prova di taglio diretto (37°), intermedio tra il valore min. da prova di taglio diretto (35°) e valore caratteristico da SPT (40°)
- ⁽⁷⁾: valore caratteristico da prova SPT; range riferito a 5° e 95° percentile

6.5 Tratta d'intervento 4

6.5.1 Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione

La Figura 6-24 mostra il contesto territoriale della tratta di intervento 4; lungo la carreggiata direzione Tirano la Linea Ferroviaria corre circa parallela alla strada ma ad alcune decine di metri di distanza. Entrambe le carreggiate confinano con campi agricoli, proprietà private e aree boschive.

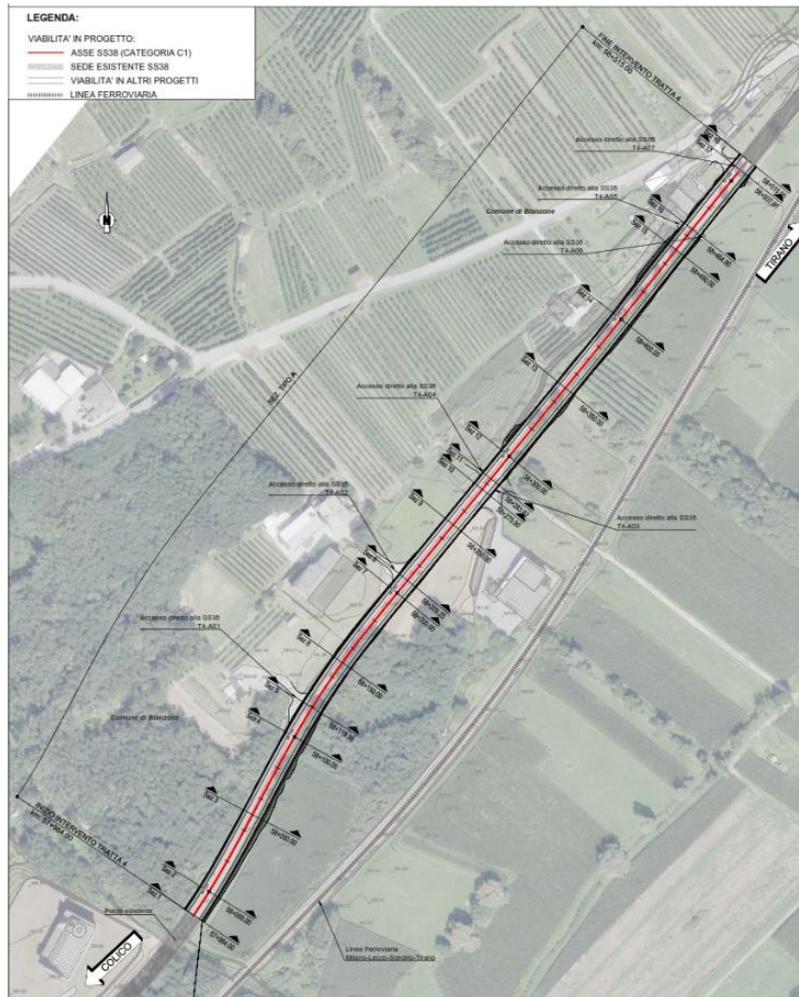


Figura 6-24: Localizzazione della tratta 4-SS38.

La Figura 6-25 mostra le informazioni geologiche dell'area prossima all'intervento 4.

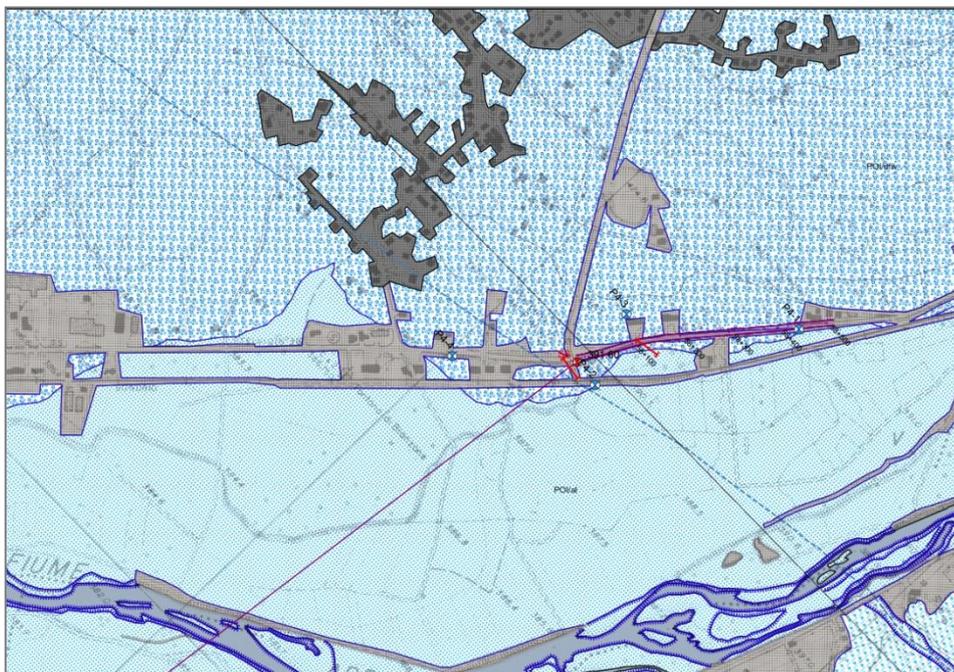


Figura 6-25: Stralcio dalla Carta Geologica di PD della tratta 4-SS38.

Di seguito si descrivono caratteri geolitologici dei terreni di fondazione dell'opera, con riferimento sia alle informazioni della Cartografia Geologica Regionale (Progetto CARG) sia ai dati ottenuti tramite le indagini dirette.

La tratta di intervento 4 è fondata su depositi quaternari di conoide al limite con i sovrastanti depositi alluvionali del Fiume Adda, lungo entrambi i lati della tratta ci sono proprietà private.

DEPOSITI QUATERNARI (CARG, Foglio 57)

Depositi alluvionali (POI-al):

- ghiaie massive o stratificate da fini a grossolane, a supporto clastico, matrice sabbiosa da assente ad abbondante, clasti arrotondati, sabbie ben lavate, in corpi lenticolari clinostratificati; lenti e corpi stratoidi di sedimenti limoso argillosi, talvolta laminati. Si osservano strutture sedimentarie dovute all'azione di correnti trattive come ciottoli embricati, laminazioni oblique a basso angolo, laminazioni incrociate. Nella tratta in esame la simbologia utilizzata per la cartografia si riferisce a "sabbie prevalenti".

Depositi di conoide (POI-dwf):

- ghiaie massive o grossolanamente stratificate da fini a grossolane, talvolta ben selezionate, a supporto clastico, matrice sabbiosa da assente ad abbondante, clasti arrotondati; sabbie ben lavate, in corpi lenticolari clinostratificati, lenti e corpi stratoidi di sedimenti limoso argillosi, talvolta laminati. Diamicton massivi, a supporto di matrice limoso sabbiosa o limoso argillosa, clasti da spigolosi ad arrotondati. Spesso le componenti gravitative dei conoidi, quali i diamicton, costituiscono la parte basale dei conoidi stessi, mentre le componenti alluvionali costituiscono le parti più superficiali. Nella tratta in esame la simbologia utilizzata per la cartografia si riferisce a "depositi di debris flow".

DEPOSITI QUATERNARI (Indagini geognostiche; PD):

- I risultati delle indagini dirette confermano i dati di letteratura per i terreni di fondazione della tratta T4. Infatti, fino a 20m di profondità la ricostruzione stratigrafica prevede unicamente depositi quaternari, senza l'incontro del substrato roccioso. Dall'alto al basso stratigrafico, il sondaggio S6 evidenzia uno strato di circa 3m di spessore di limo sabbioso, susseguito da sola ghiaia a ciottoli in matrice sabbiosa e locali trovanti.

I terreni di fondazione per la tratta in esame sono pertanto rappresentati da sabbia con limo, poco addensata e umida. Ciò è confermato anche dalle stratigrafie di scavo dei pozzetti, in cui si indicano sabbie prevalenti per i primi 2m di profondità, e solo localmente vengono incontrate ghiaie sabbiose (P4-2).

6.5.2 Analisi e prove di laboratorio

6.5.2.1 Curve granulometriche e classificazione dei terreni

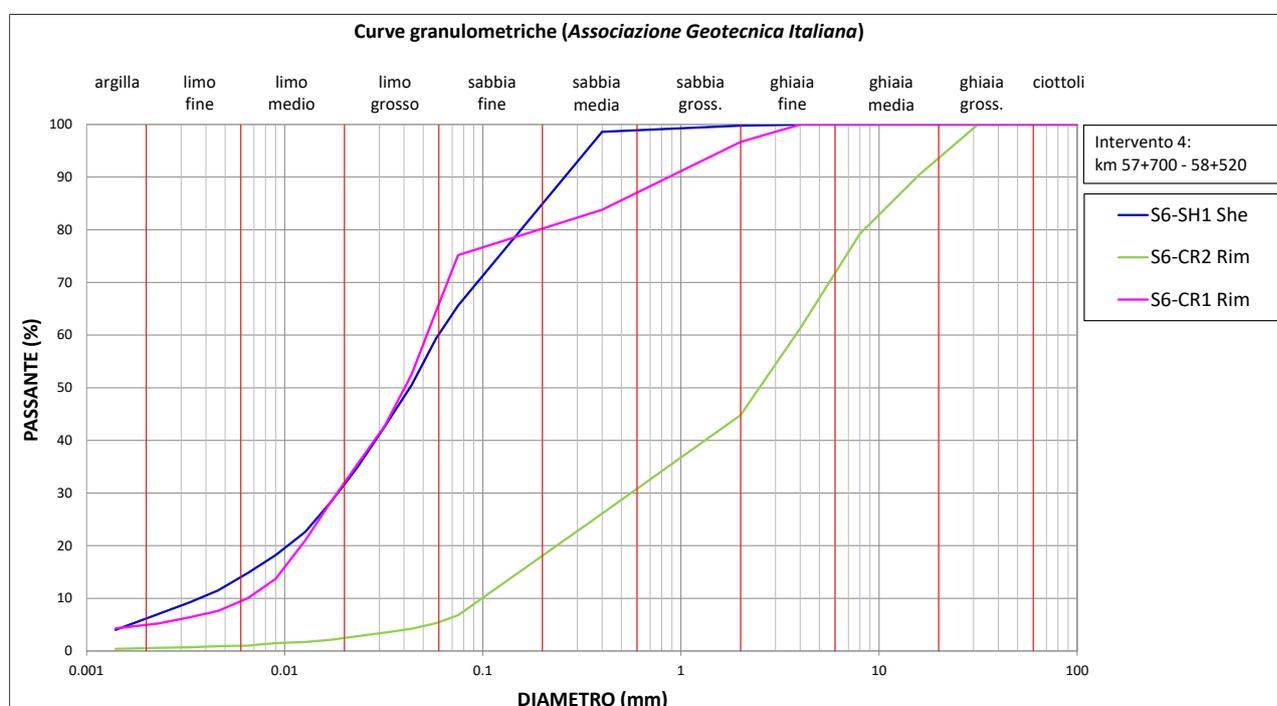


Figura 6-26: Curve granulometriche

Indagine-Campione	Profondità (m)	Classificazione AGI	Classificazione AASHTO M145-91
S6-CR1 Rim	2.0	limo sabbioso, debolmente argilloso	A4
S6-SH1 She	2.5	limo con sabbia, debolmente argilloso	A4
S6-CR2 Rim	6.0	sabbia con ghiaia, debolmente limosa	A1-a

Tabella 6-28: Classificazione granulometrica dei terreni.

6.5.2.2 Prove geotecniche

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	Classificazione granulometrica (AGI)	unità geotecnica attribuibile	valori di picco
-----------	-----------------------	----------------	--------------------------------------	-------------------------------	-----------------

				UG	c' [kPa]	ϕ' [°]
S6	SH1-She	2.0 - 2.5	Limo con sabbia, debolmente argilloso	UG1	10	30

Tabella 6-29: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto.

6.5.3 Standard penetration test (SPT)

Resistenza normalizzata ($N_{1,60}$)

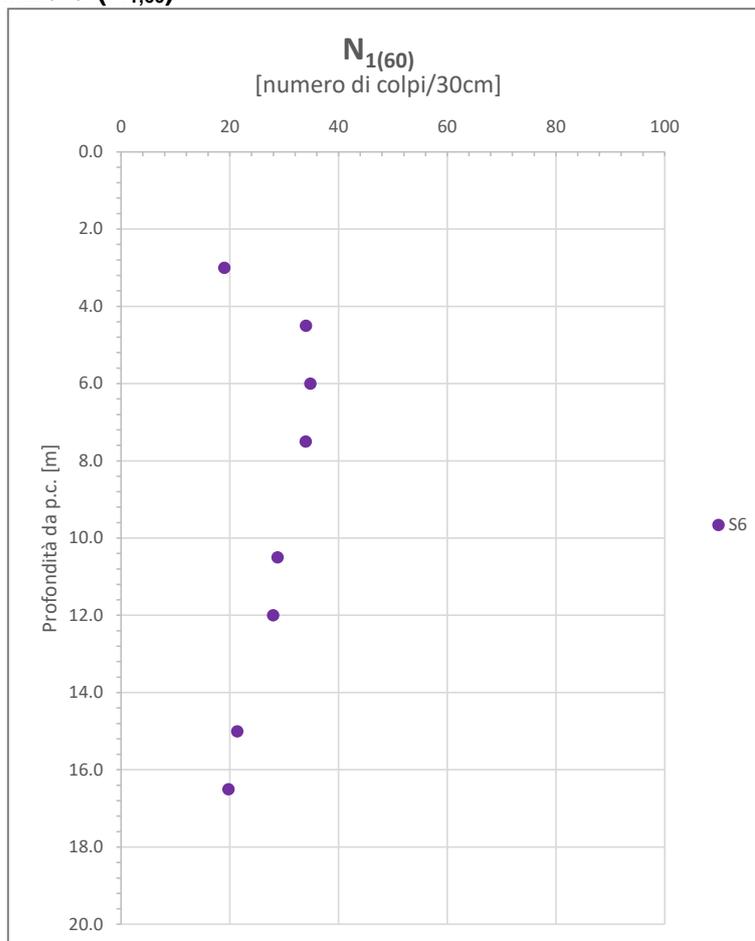


Figura 6-27: Distribuzione dei valori $N_{1,60}$ con la profondità

Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
$N_{1,60}$	S6	8	19	35	27	28	7	19	35	24

Tabella 6-30: Analisi statistica dei dati.

Densità relativa (D_r)

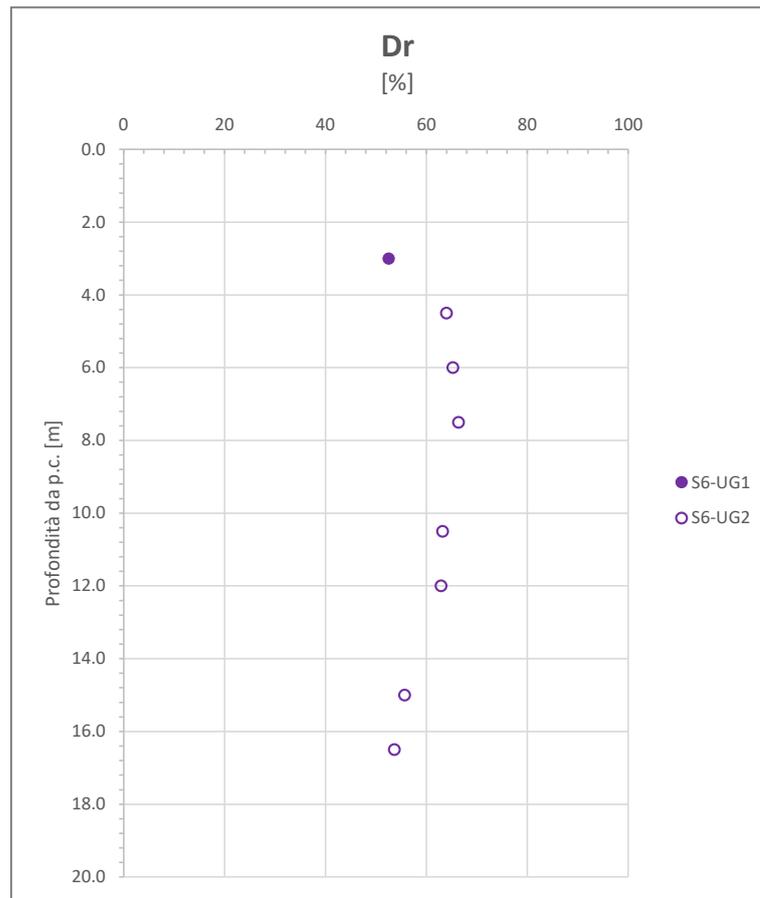


Figura 6-28: Distribuzione dei valori di Densità Relativa (%) con la profondità (Bazaara)

Unità - Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG1 Dr (%)	S6	1	-	-	53	-	-	-	-	-
UG2 Dr (%)		7	54	66	63	63	5	54	66	59

Tabella 6-31: Analisi statistica dei dati.

Angolo di attrito (φ)

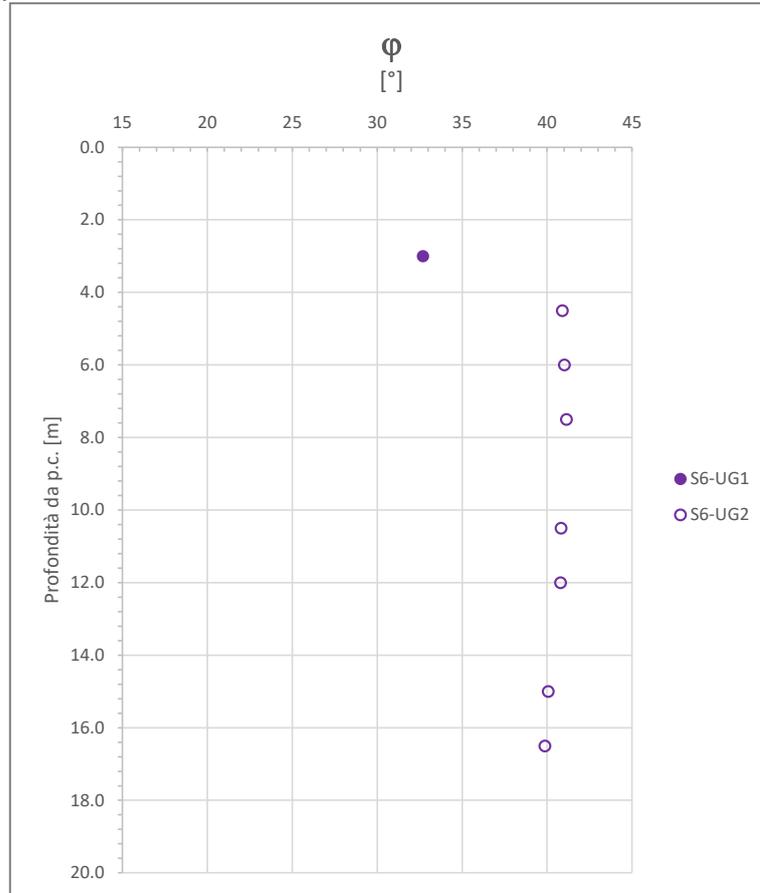


Figura 6-29: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) con la profondità (UG1 Japanese National Railway; UG2 Schmertmann)

Unità Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG1 φ (°)	S6	1	-	-	33	-	-	-	-	-
UG2 φ (°)		7	40	41	41	41	0	40	41	40

Tabella 6-32: Analisi statistica dei dati.

Modulo Elastico (E)

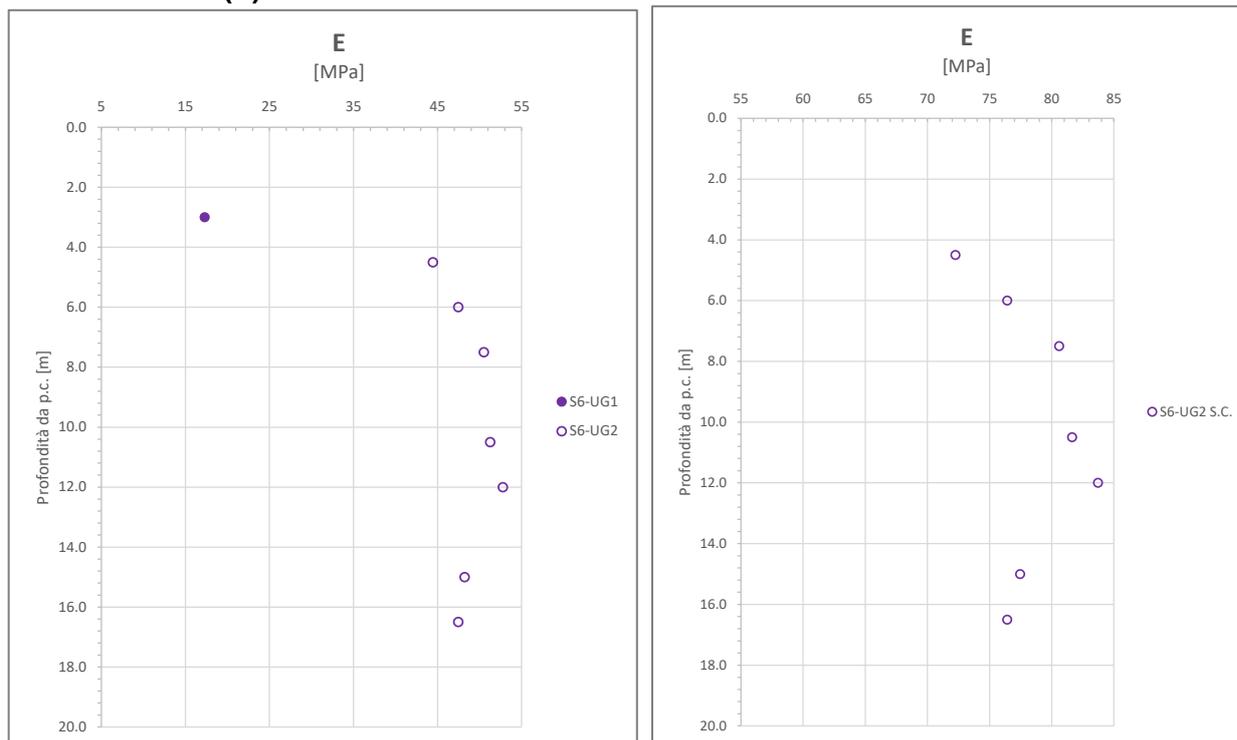


Figura 6-30: Distribuzione del Modulo Elastico in funzione della profondità (UG1 Schultze-Menzenbach; UG2 D'Apollonia-Denver per sabbia e ghiaia N.C. ed S.C.).

Unità Parametro	Sondag.	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
UG1 E (MPa)	S6	1	-	-	17	-	-	-	-	-
UG2 N.C. E (MPa)		7	44	53	49	48	3	45	52	47
UG2 S.C. E (MPa)		7	72	84	78	77	4	74	83	76

Tabella 6-33: Analisi statistica dei dati.

6.5.4 Prove pressiometriche

Sondaggio	Prof. (m)	Terreno (UG attribuibile)	Modulo pressiometrico E_M (MPa)	Modulo di taglio G (MPa)	Pressione limite P_{lim} (MPa)	Modulo di Young E (MPa)
S6	7.2	ghiaia e ciottoli in matr. sabbiosa (UG2)	41.5	15.9	-	-

Tabella 6-34: Sintesi dei risultati delle prove pressiometriche.

6.5.5 Prove di carico su piastra

Intervento	Sigla	Prova di carico su piastra
------------	-------	----------------------------

[n.]	pozzetto	Profondità [m]	Ciclo	Moduli di deformazione [MPa]		Grado di costipamento
				M _d	M' _d	
4	P4-1	1	1	9.2	-	0.61
			2	-	15.2	
	P4-2	1	1	10.1	-	0.48
			2	-	21.1	
	P4-3	1	1	16.0	-	0.37
			2	-	43.5	
	P4-4	1	1	18.9	-	0.65
			2	-	29.1	

Tabella 6-35: Sintesi dei risultati delle prove di carico su piastra.

6.5.6 Caratterizzazione delle Unità Geotecniche

Unità geotecnica	Peso / volume	Densità relativa	Modulo di Young	Resistenza al taglio	
	γ_{nat} [kN/m ³]	Dr [%]	E [MPa]	ϕ [°]	c [kPa]
UG1	19.8	⁽⁷⁾ 53	⁽²⁾ 17 (15 - 20)	⁽³⁾ 30 (30 - 33)	⁽⁴⁾ 10 (8 - 12)
UG2	20.5	⁽⁷⁾ 59 (54 - 66)	⁽¹⁾ 47 (45 - 52)	⁽⁵⁾ 40 (40 - 41)	⁽⁶⁾ 5 (4 - 6)

Tabella 6-36: Caratterizzazione geotecnica

- NOTA ⁽¹⁾: valore caratteristico da SPT; range riferito a 5° e 95° percentile; in mancanza di riferimenti da prove pressiometriche si mantiene come per la tratta di intervento 3 il valore di modulo derivato dalla correlazione per sabbie e ghiaie normalconsolidate
- ⁽²⁾: valore da prova SPT (un solo dato disponibile; range stimato indicativamente)
- ⁽³⁾: valore da prova di taglio diretto (range max con unico valore disponibile da SPT)
- ⁽⁴⁾: valore da prova di taglio diretto; range stimato indicativamente
- ⁽⁵⁾: valore caratteristico da SPT; range riferito a 5° e 95° percentile
- ⁽⁶⁾: valori indicativi stimati in assenza di prove.
- ⁽⁷⁾: valore caratteristico da prova SPT; range riferito a 5° e 95° percentile per UG2; unico valore disponibile per UG1