

Lavori per il miglioramento delle condizioni di sicurezza della S.S. n° 36 dal Km 27+800 al Km 44+300, tratta Giussano-Civate lungo la Strada Statale n° 36 "del Lago di Como e dello Spluga"

PROGETTO DEFINITIVO

COD. SIL. NOMSMI00668

PROGETTISTA



I PROGETTISTI:

Ing. Andrea Polli
Ordine degli Ingegneri Roma N°A19540

IL RESPONSABILE DEL S.I.A.:

Ing. Andrea Polli
Ordine degli Ingegneri Roma N°A19540

IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Lorenzo Verzani
Ordine dei Geologi della Lombardia N°1234

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Ing. Marco Meneguzzer
Ordine degli Ingegneri della provincia di Trento N°1483

VISTO:

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

PROTOCOLLO

—

DATA

Aprile 2023

GEOLOGIA E GEOTECNICA

Geotecnica

Relazione geotecnica

CODICE PROGETTO

PROGETTO LIV. PROG. N. PROG.

- - MSM I 06 D 2 1 0 1

NOME FILE

T00GE00GETRE04_B

CODICE
ELAB.

T 0 0 G E 0 0 G E T R E 0 4

REVISIONE

B

SCALA:

B

Revisione per istruttorie ANAS

Aprile 2023

D. Stein

M. Del Fedele

L. Verzani

A

Emissione Progetto Definitivo

08/04/2022

D. Stein

E. Trussoni

F. Bontempi

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
2.1	Riferimenti Normativi, Capitolati, studi pregressi	5
2.2	Bibliografia	6
2.3	Documenti di Progetto Definitivo	7
3	INDAGINI GEOGNOSTICHE	8
3.1	Sondaggi e prove in foro	8
3.2	Pozzetti e prove di carico su piastra.....	10
3.3	Prove di laboratorio.....	12
3.4	Indagini geofisiche	16
4	CRITERI DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	17
4.1	Standard Penetration Test (SPT) in foro di sondaggio	18
4.2	Prove di carico su piastra in pozzetto esplorativo.....	20
4.3	Prove di laboratorio.....	20
4.4	Indagini geofisiche e classificazione sismica del suolo di fondazione.....	23
4.4.1	MASW.....	23
4.4.2	Down hole.....	24
5	LIVELLO DI FALDA E PERMEABILITA'	25
5.1	Condizioni di falda.....	25
5.2	Permeabilità.....	25
6	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	29
6.1	Settore Briosco: ampliamento in curva e viadotto per corsia decelerazione	29
6.1.1	<i>Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione</i>	29
6.1.2	<i>Unità Geotecnica UG1</i>	30
6.1.2.1	Indici fisici da analisi di laboratorio.....	30
6.1.2.2	Curve granulometriche da analisi di laboratorio	30
6.1.2.3	Carta di Plasticità da analisi di laboratorio	31
6.1.2.4	Prove geotecniche di laboratorio	32
6.1.2.5	Standard Penetration Test (SPT).....	34
6.1.2.6	Caratterizzazione UG1	39
6.1.3	<i>Unità Geotecnica UG2</i>	39
6.1.3.1	Indici fisici da analisi di laboratorio.....	39
6.1.3.2	Curve granulometriche da analisi di laboratorio	40
6.1.3.3	Prove geotecniche di laboratorio	41
6.1.3.4	Standard Penetration Test (SPT).....	41
6.1.3.5	Caratterizzazione UG2	46
6.1.4	<i>Unità Geotecnica UG3</i>	47

6.1.4.1	Indici fisici da analisi di laboratorio.....	47
6.1.4.2	Curve granulometriche da analisi di laboratorio	47
6.1.4.3	Carta di Plasticità da analisi di laboratorio	48
6.1.4.4	Standard Penetration Test (SPT).....	49
6.1.4.5	Caratterizzazione UG3	54
6.2	Settore Ponte Veduggio	55
6.2.1	<i>Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione</i>	<i>55</i>
6.2.2	<i>Unità Geotecnica UG4</i>	<i>56</i>
6.2.2.1	Indici fisici da analisi di laboratorio.....	56
6.2.2.2	Curve granulometriche da analisi di laboratorio	56
6.2.2.3	Carta di Plasticità da analisi di laboratorio	56
6.2.2.4	Prove geotecniche di laboratorio	57
6.2.2.5	Standard Penetration Test (SPT).....	59
6.2.2.6	Prove di carico su piastra	63
6.2.2.7	Caratterizzazione UG4	63
6.3	Settore del Lago di Annone.....	64
6.3.1	<i>Unità Geotecnica UG5</i>	<i>65</i>
	• Prove di carico su piastra	67
6.4	Allargamento banchina laterale: analisi prove di carico su piastra.....	68
6.4.1	<i>Inquadramento dell'area e caratteri geolitologici dei terreni di fondazione</i>	<i>68</i>
6.4.2	<i>Sintesi dei dati d'indagine.....</i>	<i>68</i>
7	INDICAZIONI PER LA SUCCESSIVA FASE DI PROGETTO ESECUTIVO	73
8	APPENDICE: UBICAZIONE POZZETTI ESPLORATIVI.....	74

1 INTRODUZIONE

La presente Relazione Geotecnica è parte del Progetto Definitivo (PD) dei Lavori di manutenzione straordinaria per il miglioramento delle condizioni di sicurezza della S.S. n. 36 “del Lago di Como e dello Spluga”, dal Km 27+800 al Km 44+300, tratta Giussano Civate.

Lo studio geotecnico si basa sul rilevamento geologico dei siti di intervento e sui dati ottenuti attraverso la campagna d’indagine geognostica svolta nell’ambito dell’attuale fase di PD.

Il progetto in esame prevede il miglioramento della sicurezza stradale della “SS36 del Lago di Como e dello Spluga” dalla PK 25+500 alla PK 44+300 (Figura 1-1). Secondo indicazioni fornite da ANAS, in tale tratto sono state individuate alcune tipologie di interventi finalizzati ad avvicinare la sezione tipo esistente alla sezione di tipo B (DM 05.11.2001), rimanendo, per quanto possibile, nei limiti attualmente occupati dalla sede stradale, oltre ad altre tipologie legate alla sicurezza e alla manutenzione stradale.

In particolare, gli interventi si possono distinguere in opere puntuali e in opere estese su tutta la tratta. Per quanto riguarda le opere puntuali si prevede:

- rifacimento dell’impalcato di tre ponti (sottovia), rispettivamente in località Giussano, Capriano e Veduggio;
- miglioramento della curva planimetrica dello Svincolo di Briosco, aumentando il raggio di curvatura di entrambe le carreggiate, con conseguente adeguamento piano-altimetrico delle rampe di uscita e di immissione dello svincolo stesso, e allungamento del sottovia sulla SP102;
- costruzione di un nuovo manufatto in allargamento del viadotto esistente all’uscita di Briosco, in direzione sud, al fine di inserire la corsia di decelerazione attualmente non presente;
- allargamento del sottovia esistente in corrispondenza dell’uscita sud di Veduggio con Colzano per permettere di adeguare l’attuale corsia di decelerazione. Spostamento delle rampe di svincolo della carreggiata nord da via Tremolada a via Giuseppe Verdi;
- miglioramento delle larghezze delle rampe degli svincoli presenti;
- individuazione di quattro aree in cui inserire una piazzola di sosta in entrambe le carreggiate.

Per quanto riguarda gli interventi su tutta la tratta è prevista la realizzazione della banchina laterale da 1.75m, dove non esistente, e la pavimentazione nel caso risulti esserci già la larghezza necessaria. Per quanto riguarda le carreggiate si prevede di portare la larghezza delle corsie a 3.75 dove attualmente risulta inferiore.

Il progetto prevede inoltre la sostituzione delle barriere spartitraffico con New Jersey di ultima generazione e la protezione delle pile centrali dei cavalcavia che sovrappassano la SS36. Anche per le barriere laterali è prevista la sostituzione sia in caso di bordo rilevato, sia su opera d’arte.

Tra le opere di manutenzione e miglioramento è previsto infine il rifacimento del tappeto di usura nonché il rifacimento della segnaletica orizzontale e verticale.

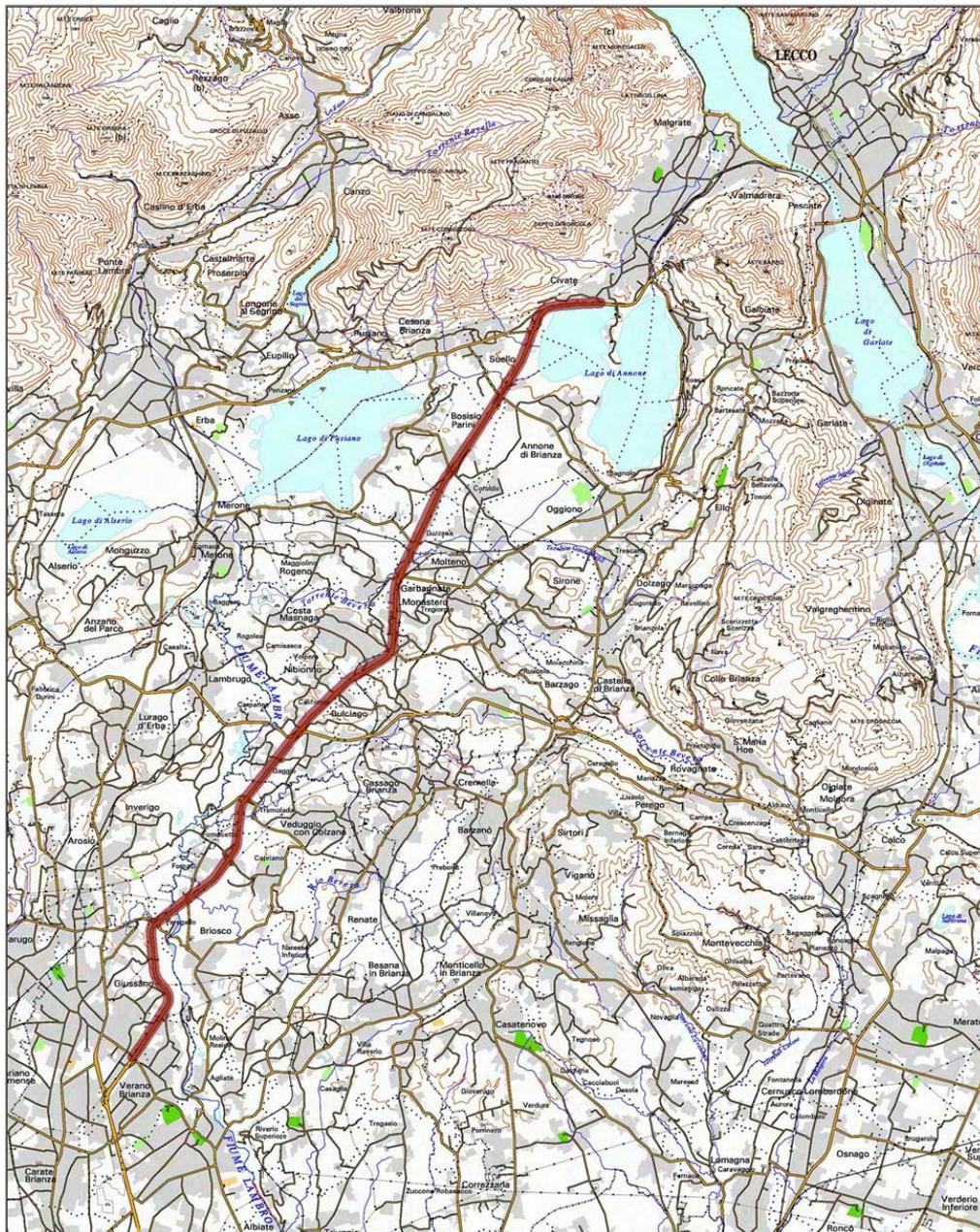


Figura 1-1: Corografia tracciato in esame (Stralcio CT50 Regione Lombardia)

Si evidenzia che le indagini geognostiche per i ponti Giussano e Capriano e per lo svincolo di Costa Masnaga sono attualmente in corso e dovranno essere integrate nella successiva fase progettuale.

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Riferimenti Normativi, Capitolati, studi pregressi

- [1]. D.M. 17 gennaio 2018 “Nuove Norme tecniche per costruzioni” in sostituzione di quelle approvate con il D.M. 14 gennaio 2008.
- [2]. Circolare 21.01.2019: “Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle Norme tecniche per costruzioni”.
- [3]. 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”.
- [4]. D.G.R. n. 2129 del 11 luglio 2014 “Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia”.
- [5]. L.R. 33/2015 “Aggiornamento della normativa sulle costruzioni in zona sismica”.
- [6]. D.G.R. n. 5001/2016 “linee di indirizzo e coordinamento per l’esercizio delle funzioni trasferite ai comuni in materia sismica”.
- [7]. D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011 (“Aggiornamento dei Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio”) in attuazione dell’art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n. 12, approvati con d.g.r. 22 dicembre 2005, n. 8/1566 e successivamente modificati con d.g.r. 28 maggio 2008, n. 8/7374.
- [8]. D. Lgs 30 aprile 1992, n. 285 (Nuovo codice della strada)
- [9]. D. M. n. 6792 del 05/11/2001 (Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade)
- [10]. 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).
- [11]. Geom. Elio Vismara – Relazione Tecnica – Rilievo plano-altimetrico delle sponde a lago dell’intero bacino del Lago di Annone.
- [12]. Geoplanet – Indagine Geologico Tecnica ai sensi del D.M. 17.1.2018, della D.G.R. IX/2616 del 30.11.2011 e della D.G.R. 30.3.2016 N.X/5001 per verifica caratteristiche litostratigrafiche terreni esistenti lungo pista ciclopedonale dall’innesto dello svincolo da Como-Erba-Fino all’uscita verso Civate-Valmadrera nel Comune di Civate (LC) – Maggio 2020.

2.2 Bibliografia

- [13]. A.G.I., 1977. Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche – AGI - Roma.
- [14]. Bowles, J.E., 1982. Foundation Analysis and Design. 3rd Ed., McGrawHill, Inc., New York.
- [15]. Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 2 - Ground investigation and testing
- [16]. Gibbs H.J. and Holtz W.G., 1957. Research on determining the density of sands by spoon penetration testing. Proc. Of the 4th Internal Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.35-39.
- [17]. Iwasaki T., Tatsuoka F., Saheki M., 1977. An example of correlation between SPT N-value and strain dependent S wave velocity. In: Proceedings of the 12th Japan national conference on geotechnical engineering, JGS, Tokyo, pp 477-780 (in Japanese).
- [18]. Meyerhof, G. G., 1956. "Penetration Tests and Bearing Capacity Of Cohesionless Soils." Journal of the Soil Mechanics Division, ASCE, Vol. 82, SM1, pp. 1-12.
- [19]. Robertson P.K. and Campanella R.G., 1983. "Interpretation of Cone Penetration Tests-Part I (Sand)." Canadian Geotechnical Journal, Vol. [16].20, No.4, pp. 734-745.
- [20]. Schmertmann, J.H. (1975) "In-Situ Measurement of Shear Strength," State-of-the-Art Paper, Session III, Proceedings of the Conf. on InSitu measurement of Soil Properties, Specialty Conf. of the Geotechnical Div., ASCE, North Carolina State University, Raleigh, Vol. I, pp. 57-138.
- [21]. Schultze, E. and Menzenbach, E., 1961. "Standard Penetration Test and Compressibility of Soils." Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 527-531.
- [22]. Shioi Y. And Fukuy J., 1982. Application of N-Value to Design of Foundations in Japan. In: Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam.
- [23]. Skempton, A.W., 1986. "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation." Geotechnique, Vol. 36, No.3, pp. 425-447.

2.3 Documenti di Progetto Definitivo

- [24]. ANAS - Geodata Engineering - SS36 “del Lago di Como e dello Spluga” - Progetto Definitivo - Piano delle indagini geognostiche previste per i siti oggetto d'intervento (Revisione 1 – giugno 2021).
- [25]. ANAS – Sidercem - Relazione sulle Indagini Geognostiche (sondaggi, pozzetti e prove in sito; indagini geofisiche; prove di laboratorio) – (Revisione 0, 23/12/2021).
- [26]. Relazione Geologica (T00GE00GEORE01).
- [27]. Carta Geologica (T00GE01GEOCG01 foglio 1 di 5; T00GE01GEOCG02 foglio 2 di 5; T00GE01GEOCG03 foglio 3 di 5; T00GE01GEOCG04 foglio 4 di 5; T00GE01GEOCG05 foglio 5 di 5).
- [28]. Carta Geomorfologica (T00GE02GEOCG01 foglio 1 di 5; T00GE02GEOCG02 foglio 2 di 5; T00GE02GEOCG03 foglio 3 di 5; T00GE02GEOCG04 foglio 4 di 5; T00GE02GEOCG05 foglio 5 di 5).
- [29]. Carta Idrogeologica (T00GE00GEOCI01 foglio 1 di 5; T00GE00GEOCI02 foglio 2 di 5; T00GE00GEOCI03 foglio 3 di 5; T00GE00GEOCI04 foglio 4 di 5; T00GE00GEOCI05 foglio 5 di 5).
- [30]. Profilo Geologico (T00GE00GEOFG01).
- [31]. Relazione Geotecnica (T00GE00GETRE04).
- [32]. Profilo Geotecnico (T00GE00GETFG01).
- [33]. Relazione Sismica (T00GE00GEORE01).
- [34]. Carta Sismica (T00GE00GEOCS01 foglio 1 di 2; T00GE00GEOCS02 foglio 2 di 2).

3 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Nell'ambito dell'attuale fase progettuale (PD) 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, in parte 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
- prove down-hole in foro di sondaggio.

In Tabella 3-1 si indicano le quantità delle indagini svolte.

Indagine	Quantità	Tratta SS36 (PK)
Pozzetti esplorativi	78	29.290 - 44.300
Prova di carico su piastra	42	29.290 - 44.300
Sondaggi	14	28.200 - 31.983
Prove di permeabilità	22	28.200 - 31.983
Down-hole	2	28.200 - 31.983
MASW	8	28.200 - 29.290
Prove di laboratorio	56	28.200 - 31.983

Tabella 3-1: Sintesi delle indagini geognostiche

Si evidenzia che attualmente non sono disponibili le indagini geognostiche previste per i ponti Capriano e Giussano.

3.1 Sondaggi e prove in foro

In Tabella 3-2 sono elencati i sondaggi eseguiti. Per ogni sondaggio sono stati installati tubi piezometrici aperti o tubi per down-hole. I sondaggi sono protetti da pozzetti carrabili o pozzetti a fungo in metallo a protezione dei fori.

ID	Profondità [m]	Progressiva [km]	Allestimento foro
S1	30,0	29.298	Piezometro
S2	30,0	29.330	Piezometro
S3	30,0	29.363	Piezometro
S4	30,0	29.398	Piezometro
S5	30,0	29.412	Piezometro
S6	30,0	29.435	Piezometro
S7	20,0	31.640	Piezometro
S8	38,0	31.655	Down-hole
S9	30,0	28.237	Piezometro
S10	35,0	28.311	Down-hole
S11	30,0	28.282	Piezometro
S12	25,0	28.383	Piezometro
S13	30,0	28.494	Piezometro

ID	Profondità [m]	Progressiva [km]	Allestimento foro
S14	30,0	28.510	Piezometro

Tabella 3-2: Sintesi dei sondaggi a carotaggio continuo

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

- prove SPT a interasse di 1,5 m e talvolta di 3,0 m fino a fondo foro
- prove di permeabilità tipo Lefranc (LF)
- misura del livello piezometrico
- prove down hole.

ID sondaggio	Quota altimetrica [m slm]	SPT [n.]	Permeabilità LF [n.]	Down-hole [m]	Quota piezometrica [m slm]	Soggiacenza [m]
S1	248.00	17	2	-	226.50	21.5
S2	242.20	18	2	-	226.40	15.8
S3	235.00	17	2	-	227.50	7.5
S4	237.83	18	2	-	232.58	5.25
S5	237.83	19	2	-	230.53	7.3
S6	237.83	17	2	-	231.63	6.2
S7	244.00	10	2	-	non indicata	non indicata
S8	246.70	21	2	30	243.70	3.0
S9	270.00	18	-	-	non trovata	non trovata
S10	265.00	21	2	30	non trovata	non trovata
S11	263.00	17	-	-	246.30	16.7
S12	248.44	14	2	-	234.74	13.7
S13	258.38	15	2	-	232.38	26.0
S14	259.63	18	-	-	241.63	18

Tabella 3-3: 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 3-4 vengono riportate le quantità dei campioni raccolti.

ID sondaggio	CR [n.]	SH [n.]
S1	4	-
S2	3	1
S3	3	1
S4	4	-
S5	3	1
S6	4	-
S7	4	-
S8	3	1
S9	3	1

ID sondaggio	CR [n.]	SH [n.]
S10	3	1
S11	4	-
S12	4	-
S13	3	1
S14	4	-

Tabella 3-4: Sintesi dei campioni prelevati dai sondaggi geognostici

3.2 Pozzetti e prove di carico su piastra

Sono stati realizzati 70 pozzetti esplorativi (profondità max. 2 m); in 42 pozzetti sono state eseguite altrettante prove di carico su piastra (profondità 1 m o 2 m) (Tabella 3-5).

In APPENDICE: UBICAZIONE POZZETTI ESPLORATIVI (Figura 8-1, Figura 8-2, Figura 8-3, Figura 8-4) si riporta la distribuzione dei pozzetti esplorativi, lungo la SS36.

Tratta (km)	Sigla pozzetto	Scavo		Prova di carico	
		Eseguito	profondità [m]	Eseguito	profondità [m]
28+500	77	X	2	X	1
-	1	-	-	-	-
-	2	-	-	-	-
30+230	3	X	2	X	1
30+350	4	X	2	X	1
30+600	5	X	2	X	1
30+900	6	X	2	X	1
31+100	7	X	2	-	-
31+550	8	X	2	X	1
-	9	-	-	-	-
31+800	10	X	2	-	-
32+000	11	X	2	X	1
32+000	12	X	2	X	1
32+150	13	X	2	X	1
32+300	14	X	2	-	-
32+500	15	X	2	-	-
32+600	16	X	2	X	2
32+800	17	X	2	X	1
32+900	18	X	2	-	-
33+000	19	X	2	-	-
33+300	20	X	2	X	1
33+650	21	X	0.8	X	1
33+700	22	X	2	X	1
33+900	23	X	2	X	2
33+900	24	X	2	X	1
34+100	25	X	2	-	-
34+200	26	X	2	-	-
34+550	27	X	2	-	-

Tratta (km)	Sigla pozzetto	Scavo		Prova di carico	
		Eseguito	profondità [m]	Eseguito	profondità [m]
34+600	28	X	2	-	-
35+100	29	X	0.8	-	-
35+100	29bis	X	0.8	-	-
35+290	30	X	0.7	-	-
35+400	31	X	2	X	2
35+550	32	X	2	X	2
35+920	33	X	2	X	2
36+000	34	X	2	-	-
36+100	35	X	2	X	2
36+100	36	X	2	X	2
36+300	37	X	2	X	2
36+300	38	X	2	-	-
36+800	39	X	2	-	-
36+900	40	X	2	-	-
37+200	41	X	1.6	X	1
37+200	42	X	1.6	X	2
37+300	43	X	1.6	X	2
37+600	44	X	2	-	-
37+600	45	X	2	X	2
37+900	46	X	2	X	2
38+370	47	X	2	X	2
38+700	48	X	2	X	2
38+900	49	X	2	X	2
39+000	50	X	2	-	-
39+384	51	X	2	X	2
39+656	52	X	2	-	-
39+950	53	X	2	X	2
40+290	54	X	2	-	-
40+350	55	X	2	X	2
40+500	56	X	2	X	2
40+700	57	X	2	X	2
40+750	58	X	2	X	2
41+200	59	X	2	-	-
41+800	60	X	2	X	2
41+900	61	X	2	-	-
42+150	62	X	2	-	-
42+200	63	X	2	X	2
42+450	64	X	2	X	2
42+605	65	X	0.5	-	-
42+800	66	X	2	-	-
43+017	67	X	1.5	X	2
43+200	68	X	2	X	1
-	69	-	-	-	-
43+650	70	X	2	-	-
-	71	-	-	-	-
44+100	72	X	1.2	X	1
-	73	-	-	-	-
44+300	74	X	2	-	-

Tratta (km)	Sigla pozzetto	Scavo		Prova di carico	
		Eseguito	profondità [m]	Eseguito	profondità [m]
-	75	-	-	-	-
-	76	-	-	-	-

Tabella 3-5: Sintesi dei pozzetti esplorativi e prove di carico su piastra

3.3 Prove di laboratorio

I campioni geotecnici prelevati dai sondaggi a carotaggio continuo sono stati testati in laboratorio per la definizione delle proprietà indice e delle caratteristiche di resistenza.

In Tabella 3-6 si riportano le prove di laboratorio realizzate sui campioni di terreno (rimaneggiati-CR, indisturbati-SH) prelevati dai sondaggi geognostici.

Sondaggio	Profondità		Campione	Analisi granulometrica	Limiti di Atterberg	Determinazione della massa volumica naturale	Prove di taglio diretto	Prove Edometriche
	da [m]	a [m]						
S1	8,50	8,70	CR1) Rim	X	X	X	-	-
	12,50	12,70	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	16,30	16,50	CR3) Rim	X	X	X	-	-
	22,50	22,70	CR4) Rim	X	X	X	-	-
S2	6,50	7,50	SH1) She	X	-	X	X	X
	8,50	8,70	CR1) Rim	X	X	X	-	-
	12,00	12,40	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	19,80	20,00	CR3) Rim	X	X	X	-	-
S3	8,00	8,40	SH1) She	X	X	X	X	-
	10,20	10,40	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	13,00	13,20	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	20,00	20,20	CR3) Rim	X	-	X	-	-
S4	3,50	3,70	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	7,00	7,20	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	8,20	8,40	CR3) Rim	X	-	X	-	-
	21,50	21,70	CR4) Rim	X	-	X	-	-
S5	5,30	5,50	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	7,10	7,30	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	10,00	10,20	CR3) Rim	X	-	X	-	-
	23,60	24,00	SH1) She	X	X	X	X	X
S6	3,50	3,70	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	7,20	7,50	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	9,60	9,80	CR3) Rim	X	-	X	-	-
	20,20	20,40	CR4) Rim	X	-	X	-	-
S7	3,50	3,70	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	6,40	6,60	CR2) Rim	X	X	X	-	-

Sondaggio	Profondità		Campione	Analisi granulometrica	Limiti di Atterberg	Determinazione della massa volumica naturale	Prove di taglio diretto	Prove Edometriche
	da [m]	a [m]						
	13,30	13,50	CR3) Rim	X	X	X	-	-
	19,50	19,70	CR4) Rim	X	X	X	-	-
S8	10,30	10,50	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	14,50	14,70	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	22,30	22,50	CR3) Rim	X	X	X	-	-
	23,50	24,00	SH1) She	X	X	X	X	X
S9	4,00	4,20	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	7,00	7,50	SH1) She	X	-	X	X	X
	12,50	12,70	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	21,40	21,60	CR3) Rim	X	-	X	-	-
S10	4,30	4,50	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	8,50	9,00	SH1) She	X	-	X	X	-
	11,60	11,80	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	21,50	21,70	CR3) Rim	X	-	X	-	-
S11	4,20	4,40	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	6,60	6,80	CR2) Rim	X	X	X	-	-
	13,30	13,50	CR3) Rim	X	-	X	-	-
	20,20	20,40	CR4) Rim	X	-	X	-	-
S12	7,00	7,20	CR1) Rim	X	-	X	-	-
	13,00	13,20	CR2) Rim	X	-	X	-	-
	19,00	19,20	CR3) Rim	X	-	X	-	-
	21,00	21,20	CR4) Rim	X	-	X	-	-
S13	4,00	4,20	CR1) Rim	X	X	X	-	-
	7,00	7,50	SH1) She	X	X	X	X	X
	12,00	12,20	CR2) Rim	X	X	X	-	-
	21,30	21,50	CR3) Rim	X	-	X	-	-

Sondaggio	Profondità		Campione	Analisi granulometrica	Limiti di Atterberg	Determinazione della massa volumica naturale	Prove di taglio diretto	Prove Edometriche
	da [m]	a [m]						
S14	4,00	4,20	CR1) Rim	X	X	X	-	-
	7,30	7,50	CR2) Rim	X	X	X	-	-
	12,50	12,70	CR3) Rim	X	X	X	-	-
	21,00	21,20	CR4) Rim	X	-	X	-	-

Tabella 3-6: Sintesi delle prove di laboratorio su terre, eseguite nei provini provenienti dai sondaggi geognostici

3.4 Indagini geofisiche

In Tabella 3-7 vengono elencate le indagini geofisiche MASW e Down-hole eseguite nei diversi settori.

Settore	ID	Prospezione	Profondità d'indagine (m)	Progressiva (km)
Briosco Arosio	L1	MASW	30	28.398
	L2		30	28.383
	L3		30	28.267
	L4		30	28.341
	L5		30	28.510
	S10	Down-hole	30	28.311
Briosco- Fornaci	L6	MASW	30	29.330
	L7		30	29.412
	L8		30	29.398
Veduggio	S8	Down-hole	30	31.655

Tabella 3-7: 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-I):

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

dove,

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

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

Settore Briosco - Fornaci

- **UG1** Prevalenti limi e argille con matrici variabili da argillose, limose a sabbiose
- **UG2** Prevalenti sabbie debolmente limose e debolmente ghiaiose
- **UG3** Prevalenti ghiaie sabbiose con ciottoli.

Settore Veduggio

- **UG4** Prevalenti limi con argilla sabbiosa.

4.1 Standard Penetration Test (SPT) in foro di sondaggio

I risultati delle analisi delle prove SPT, suddivisi per le diverse Unità Geotecniche, 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 elasticità E (modulo di Young equivalente).

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).

Per la valutazione della **densità relativa (D_r)** sono state utilizzate le seguenti correlazioni:

- Gibbs & Holtz, 1957 (UG1, UG2, UG3). Correlazione valida per qualunque pressione efficace (per ghiaie D_r viene sovrastimato, per limi sottostimato).
- Skempton, 1986 (UG4). Elaborazione valida per limi e sabbie e sabbie da fini a grossolane NC a qualunque pressione efficace (per ghiaie il valore di D_r % viene sovrastimato, per limi sottostimato).

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

- Japanese National Railway, 1982 (UG1 e UG2). Valido per sabbie medie e grossolane-ghiaiose:

$$\varphi (^{\circ}) = 27 + 0.3 \cdot N_{SPT}$$

- Shioi and Fukuni, 1982 (UG1, UG3 e UG4). Valido per sabbie - sabbie fini o limose a profondità minime di 2 m dal p.c. (Road Bridge Specification).
- Schmertmann, 1977 (UG2 e UG3). Angolo di attrito per varie tipologie di terreno (valori massimi), da correlazioni indirette basate su D_r (%):

$$\varphi (^{\circ}) = a + b \cdot D_r$$

dove,

- $\varphi (^{\circ}) = 38 + 0.08 \cdot D_r$ (ghiaietto uniforme o sabbie e ghiaie poco limose)
- $\varphi (^{\circ}) = 34.5 + 0.10 \cdot D_r$ (sabbia grossa uniforme o media ben gradata)
- $\varphi (^{\circ}) = 31.5 + 0.115 \cdot D_r$ (sabbia media uniforme o fine ben gradata)
- $\varphi (^{\circ}) = 28 + 0.14 \cdot D_r$ (sabbia fine uniforme).

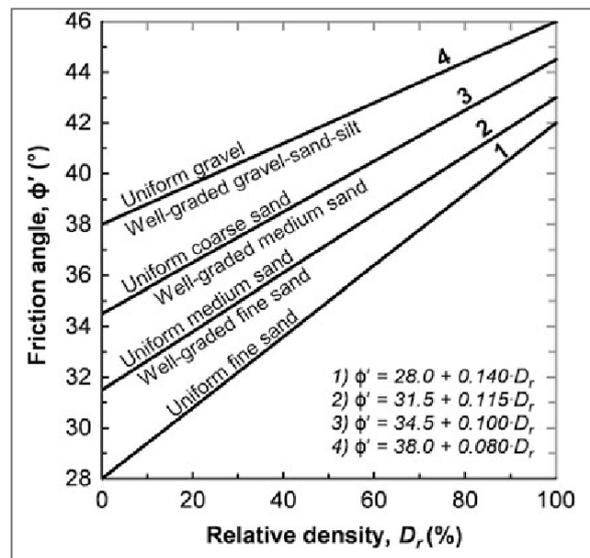


Figura 4-1: Grafico che correla la densità relativa e l'angolo di resistenza al taglio (Schmertmann, 1977)

- Meyerhof, 1956 (UG4). Correlazione valida per terreni argillosi ed argillosi-marnosi fessurati e terreni di riporto sciolti da modifica sperimentale di dati:

$$\varphi (^{\circ}) = a + b \cdot NSPT - c \cdot NSPT^2$$

dove,

- Sabbie e limo $\leq 5\%$: $a=29.47$; $b=0.46$; $c= 0.004$
- Sabbie e limo $> 5\%$: $a=23.70$; $b=0.57$; $c= 0.006$.

Il **modulo di Young (E)** può essere ottenuto attraverso i dati di resistenza penetrometrica in prova dinamica non continua, tipo SPT, attraverso:

- correlazione diretta con il numero di colpi corretto, N_{SPT}
- correlazione indiretta, utilizzando le relazioni sperimentali tra velocità delle onde di taglio V_s e N_{SPT} , e successivamente calcolando E_0 come indicato per le prove sismiche.

Le correlazioni utilizzate sono:

- Schultze e Menzenbach, 1995 (UG1-UG3). Applicabile normalmente in litologie sabbiose sotto falda:

$$E \text{ (MPa)} = 0.517 \cdot N_{SPT} + 7.46 \quad (\text{Schultze e Menzenbach, 1961})$$

- Bowles (UG1-UG2)
- Schultze (UG4).

4.2 Prove di carico su piastra in pozzetto esplorativo

I valori dei parametri ottenuti tramite le prove di carico su piastra sono riportati nel Paragrafo 0. La prova di carico su piastra è una tecnica di indagine non distruttiva che consente di determinare le proprietà di resistenza e il cedimento verticale di una determinata massa di terreno in sito. La resistenza viene valutata caricando il terreno con una piastra rigida circolare (diametro 600mm), registrando, in un solo ciclo, sia il carico indotto che il corrispondente cedimento. Dal rapporto fra il carico e il cedimento viene ottenuto il modulo di reazione del terreno o costante elastica K.

4.3 Prove di laboratorio

I campioni indisturbati prelevati dai sondaggi geognostici sono stati testati in laboratorio tramite prove di taglio diretto e prove edometriche.

Prova di taglio diretto

Sono state eseguite sette prove di taglio diretto; si osserva una certa variabilità dei valori dei parametri di resistenza (coesione c ; angolo di resistenza al taglio ϕ) che solo parzialmente risultano rappresentativi delle caratteristiche prevalentemente fini dei campioni prelevati in settori attribuibili all'Unità Geotecnica UG1 sulla base delle stratigrafie di sondaggio. Come di seguito descritto, i campioni che mostrano valori dei parametri più coerenti con un terreno a maggiore granulometria (es. più elevato ϕ , minore c) si considerano rappresentativi delle Unità Geotecniche UG2-UG3 (Tabella 4-1), anche in relazione ai valori di angolo di resistenza al taglio derivati da SPT.

- Il campione C2SH1 del sondaggio S9 ha un elevato valore di angolo di attrito tipico di un terreno a granulometria prevalentemente ghiaiosa. Tale prova non viene pertanto considerata rappresentativa per la caratterizzazione geotecnica.
- I campioni S2-C1SH1 e S10-C2SH1 mostrano valori dei parametri coerenti con un terreno a granulometria più grossolana. Tali prove vengono considerate per la caratterizzazione rispettivamente di **UG2** e **UG3**.
- I campioni S3-C1SH1, S5-C4SH1 e S13-C2SH1 mostrano valori dei parametri coerenti con la granulometria prevalentemente fine del campione stesso. Tali prove vengono considerate per la caratterizzazione di **UG1**.
- Il campione S8-C4SH1 prelevato nel settore del ponte Veduggio mostra valori di angolo di resistenza al taglio inferiori agli altri campioni, in analogia ai risultati delle prove SPT. Tale prova è considerata rappresentativa di **UG4**.

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	descrizione	unità geotecnica		valori di picco	
				da stratigrafia sondaggio	UG attribuita	c' [kPa]	ϕ' [°]
S2	C1SH1	6.5 - 7.0	Limo argilloso sabbioso, con sostanza organica	UG1	UG2	5.6	33.6
S3	C1SH1	8.0 - 8.4	Limo argilloso	UG1	UG1	23.2	29.5
S5	C4SH1	23.6 - 24.0	Limo sabbioso argilloso, debolmente ghiaioso	UG1	UG1	28.6	29.6
S8	C4SH1	23.5 - 24.0	Argilla con limo	UG4	UG4	16.2	13.2
S9	C2SH1	7.0 - 7.5	Limo con argilla debolmente ghiaioso e debolmente sabbioso	UG1	-	14.7	41.3
S10	C2SH1	8.5 - 9.0	Limo con sabbia ghiaioso argilloso	UG3	UG3	4.3	38.0
S13	C2SH1	7.0 - 7.5	Limo argilloso debolmente sabbioso	UG1	UG1	22.5	23.9

Tabella 4-1: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto su campioni indisturbati

Prova edometrica

I risultati delle prove edometriche, suddivisi per le unità UG1 e UG4, sono riportati nel Capitolo 6.

Le prove di compressione edometrica consentono di:

- determinare la relazione tensione-deformazione che caratterizza le proprietà di compressibilità e di rigonfiamento per effetto di variazioni di stato tensionale effettivo in condizioni di deformazione trasversale impedita;
- determinare le caratteristiche che governano la variabilità di tali deformazioni nel tempo, per effetto dei fenomeni di consolidazione primaria e secondaria;
- ricostruire la storia tensionale del deposito naturale da cui è stato prelevato il campione.

Dalle prove edometriche si ottengono le curve di compressione sulle quali si individuano tre parametri che rappresentano la pendenza, nel piano semilogaritmico ($\log \sigma'_v$; e), delle rette in cui le curve vengono linearizzate distinguendo i tratti rappresentativi delle tre fasi di ricarico-carico-scarico simulate in prova:

- indice di ricompressione CR lungo il ramo di ricarico iniziale
- indice di compressibilità CC lungo la retta di normal-consolidazione
- indice di rigonfiamento CS lungo i rami di scarico ed eventuale nuovo ricarico.

Analisi in laboratorio

Sono state inoltre effettuate analisi di laboratorio sui campioni di terreno finalizzate alla definizione di (cfr. Capitolo 6):

- Granulometria
- Limiti di Atterberg
- Peso specifico dei grani .

Il peso specifico dei grani (Gs) costituenti un terreno può essere definito come il valore medio del peso unitario delle particelle granulari che lo compongono. La determinazione di Gs abbinata alla stima del contenuto d'acqua naturale (w) permette di ottenere i parametri rappresentativi dello stato naturale di un terreno, utili per la classificazione e la caratterizzazione geotecnica, quali: porosità (n), indice dei vuoti (e) e grado di saturazione (S). La prova consiste nel determinare il rapporto tra il volume delle particelle solide di un campione e il medesimo volume di acqua distillata alla temperatura di 4°C.

4.4 Indagini geofisiche e classificazione sismica del suolo di fondazione

Per la misura delle velocità delle onde di taglio (V_s), sono state effettuate due tipologie di prospezione sismica.

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.

Il metodo consente di ottenere informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30m - 50m.

La prova Down-Hole, invece, consiste nella misurazione dei tempi di arrivo di impulsi sismici generati in superficie e registrati da un ricevitore posto all’interno di un foro di sondaggio verticale, adeguatamente predisposto con apposita tubazione.

La prova consente la misura diretta delle velocità di propagazione delle onde di compressione (V_p) e delle onde di taglio (V_s).

La procedura di indagine prevede di calare in foro e bloccare il geofono in corrispondenza del primo punto di misura, solitamente alla massima profondità. Si procede all’energizzazione e registrazione degli impulsi sismici per le onde P (colpo verticale su piastra appoggiata al suolo), poi per le onde SH (colpi orizzontali al lato di una trave vincolata al suolo).

In Tabella 4-2 e Tabella 4-3 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, tuttavia si rimanda alla relazione sismica per l’approfondimento di secondo livello sismico (Normativa di Regione Lombardia) e la Risposta Sismica Locale RSL.

4.4.1 MASW

Per la caratterizzazione sismica dei terreni interessati dalle opere in progetto, sono state realizzate 8 indagini MASW; 5 nella zona Briosco-Arosio, 3 nella zona Briosco-Fornaci.

Settore	ID	$V_{s,eq} - V_{s30}$ [m/s]	Categoria di sottosuolo di base (NTC/2018)
Briosco Arosio	L1	569.70	B
	L2	538.24	B
	L3	539.24	B
	L4	530.67	B
	L5	521.36	B
Briosco Fornaci	L6	399.13	B
	L7	446.70	B
	L8	433.99	B

Tabella 4-2: Sintesi delle indagini geofisiche MASW e relativi risultati

4.4.2 Down hole

Nel sondaggio S10 (Zona Briosco-Arosio) e nel sondaggio S8 (Zona Veduggio), è stata realizzata l'indagine down-hole.

Settore	ID	Vs,eq – Vs30 [m/s]	Categoria di sottosuolo di base (NTC/2018)
Veduggio	S8	227.42	C
Briosco-Arosio	S10	567.17	B

Tabella 4-3: Sintesi delle indagini geofisiche Down-hole e relativi risultati

5 LIVELLO DI FALDA E PERMEABILITA'

5.1 Condizioni di falda

La ricostruzione della superficie piezometrica è stata realizzata sulla base dei valori rilevati durante i sondaggi, come mostrato in Tabella 3-3. Per la progettazione esecutiva sarà da effettuare una campagna piezometrica.

In sintesi, si possono trarre le seguenti indicazioni:

- nella zona di Briosco Arosio, la falda freatica presenta una soggiacenza variabile tra 13.7m e 26.0m dal piano campagna.
- nella zona di Briosco Fornaci, la falda freatica presenta una soggiacenza variabile tra 6.2m e 21.5m dal piano campagna.
- nella zona di Veduggio, abbiamo un'unica misura della falda freatica con soggiacenza di 3.0m dal piano campagna.

5.2 Permeabilità

La permeabilità delle UG è stata ottenuta attraverso l'analisi delle prove di permeabilità eseguite nei fori di sondaggio, come mostrato in Tabella 5-1 e Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3, Figura 5-4. Sono state realizzate ventidue prove di permeabilità di tipo Lefranc a carico variabile, per determinare la permeabilità dei terreni.

Unità Geotecniche		Range indicativo da dati bibliografici k (m/s)	Valori statistici da prove in situ k (m/s)			
			Medio	Min.	Max.	Dev. St.
UG1	Limi e argille con matrici variabili da argillose, limose a sabbiose	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁶	3,23E-06	5,76E-07	9,54E-06	3,57E-06
UG2	Sabbie debolmente limose e debolmente ghiaiose	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁴	3,61E-06	6,58E-07	6,56E-06	4,17E-06
UG3	Ghiaie sabbiose con ciottoli	10 ⁻⁶ - 10 ⁻³	1,81E-06	4,66E-07	5,11E-06	1,40E-06
UG4	Limi con argilla sabbiosa	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁶	1,77E-06	5,88E-07	2,93E-06	1,34E-06

Tabella 5-1: Tabella riassuntiva dei valori di permeabilità, ottenuti dalle diverse prove in foro, al fine di caratterizzare dal punto di vista idrogeologico le UG

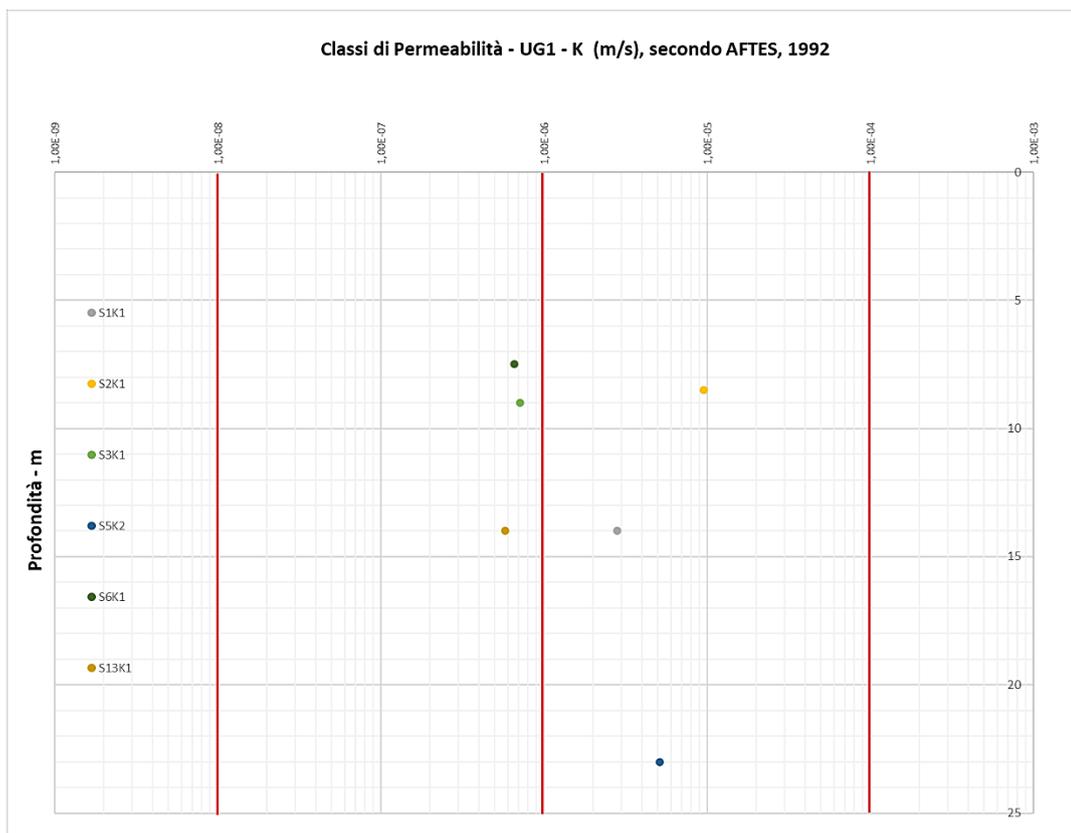


Figura 5-1. Grafico delle risultanze dei coefficienti di permeabilità per unità geotecnica UG1, in funzione della profondità di esecuzione prova (secondo AFTES, 1992)

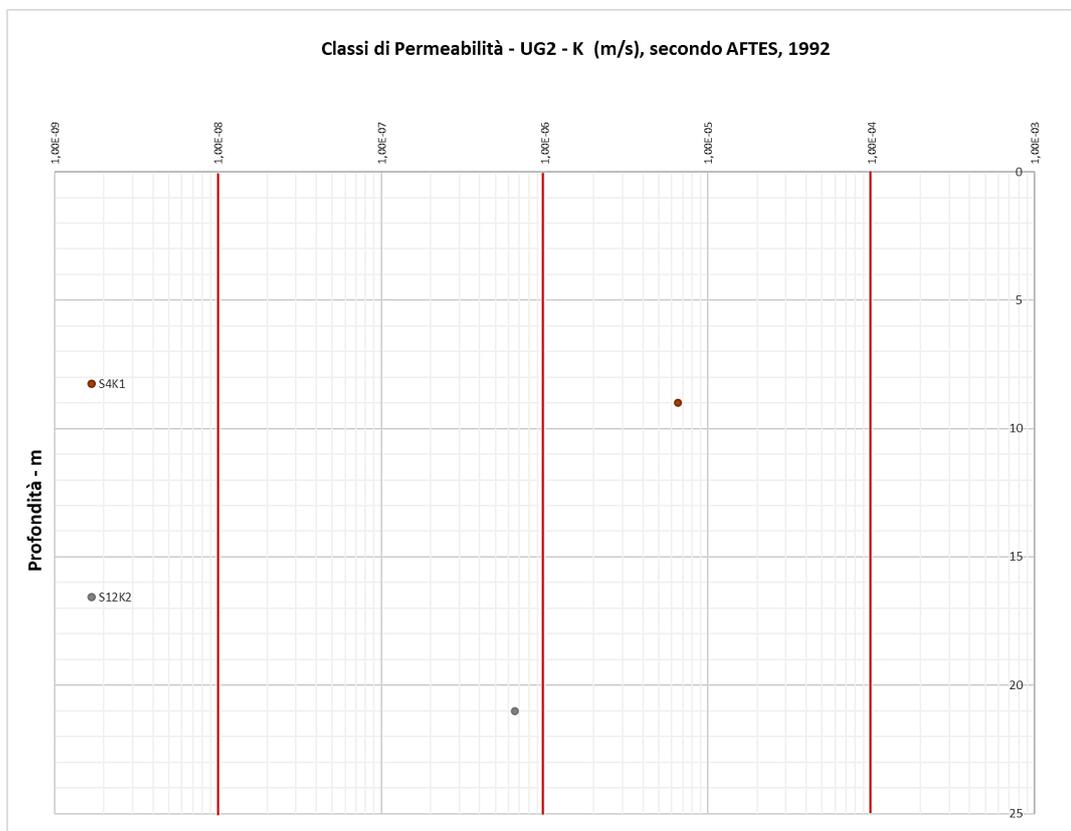


Figura 5-2. Grafico delle risultanze dei coefficienti di permeabilità per unità geotecnica UG2, in funzione della profondità di esecuzione prova (secondo AFTES, 1992)

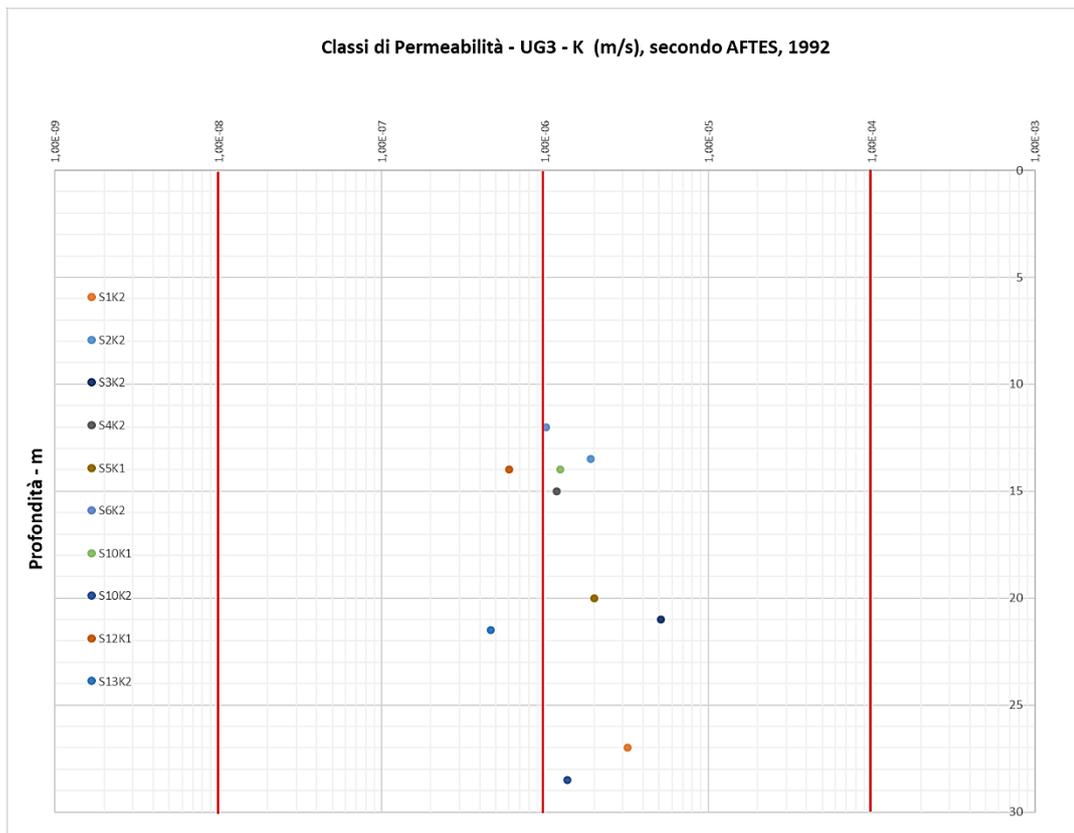


Figura 5-3. Grafico delle risultanze dei coefficienti di permeabilità per unità geotecnica UG3, in funzione della profondità di esecuzione prova (secondo AFTES, 1992)

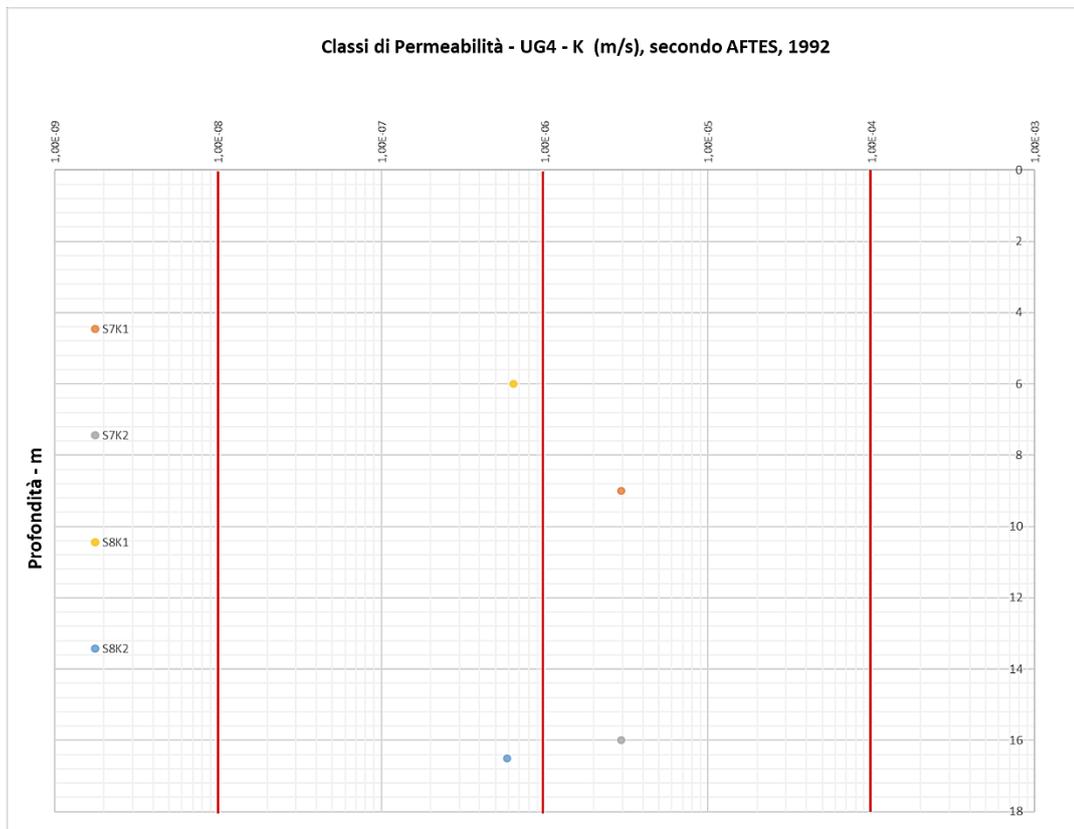


Figura 5-4. Grafico delle risultanze dei coefficienti di permeabilità per unità geotecnica UG4, in funzione della profondità di esecuzione prova (secondo AFTES, 1992)

L'analisi dei dati evidenzia che **UG1** presenta una permeabilità media di $3.23E-06$ (secondo classificazione AFTES, 1992), con k variabili tra $5.76E-07$ e $9.54E-06$, **UG2** presenta una permeabilità media di $3.61E-06$ (secondo classificazione AFTES, 1992), con k variabili tra $6.58E-07$ e $6.56E-06$, **UG3** presenta una permeabilità media di $1.81E-06$ (secondo classificazione AFTES, 1992), con k variabili tra $4.66E-07$ e $5.11E-06$ e **UG4** presenta una permeabilità media di $1.77E-06$ (secondo classificazione AFTES, 1992), con k variabili tra $5.88E-07$ e $2.93E-06$.

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 (UG) di fondazione dell'opera.

I dati vengono analizzati tenendo conto dell'omogeneità delle caratteristiche dei terreni per i differenti settori. In particolare, sulla base dei dati e delle informazioni derivate dai sondaggi e dalle prove si distinguono i settori Briosco e Veduggio dove sono previste opere d'arte maggiori (la corsia di decelerazione in viadotto e il ponte, rispettivamente); per il resto del tracciato, ove è previsto l'allargamento della banchina laterale, si analizzano i risultati delle prove di carico su piastra realizzate nei pozzetti esplorativi. Si evidenzia che attualmente sono le indagini geognostiche previste per i ponti Capriano e Giussano e per lo svincolo di Costa Masnaga.

6.1 Settore Briosco: ampliamento in curva e viadotto per corsia decelerazione

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

La morfologia del settore è interessata da forme di origine morenica, modificate dall'azione fluviale del Fiume Lambro e del Rio Bevera. Le formazioni individuate sono tutte di origine fluvio-glaciale.

La zona di Briosco Arosio dal progetto C.A.R.G., presenta le seguenti formazioni:

- unità di Cadorago (BEE), composta da depositi fluvioglaciali: ghiaie massive o debolmente stratificate e depositi glacio-lacustri: limi argillosi. Till di ablazione e di alloggiamento: diamicton massivi. Till di colata: limi massivi. Depositati glaciolacustri: limi argillosi laminati; sabbie fini limose e limi sabbiosi, laminati.

La zona di Briosco Fornaci dal progetto C.A.R.G., presenta le seguenti formazioni:

- Sintema di Cantù (LCN): depositi fluvioglaciali, glaciali e di contatto glaciali, deltizi e lacustri. Morfologie in genere ben conservate con morene a fianchi ripidi e ben rilevate rispetto alle zone circostanti. I depositi fluvioglaciali costituiscono spesso i terrazzi e le piane morfologicamente più depresse all'interno delle principali valli.
- Unità di Minoprio (BMI): depositi gluvio-glaciali, ghiaie e ghiaie sabbiose massive, diamicton massivi a supporto clastico. Till di ablazione: ghiaie massive. Till di alloggiamento: diamicton massivi. Till di Colata: limi massivi. Depositati glaciolacustri: limi argillosi laminati, sabbie fini limose e limi sabbiosi, laminati.

La Figura 6 1 mostra la carta geologica del PD, con ubicazione indagini ed interventi in progetto.

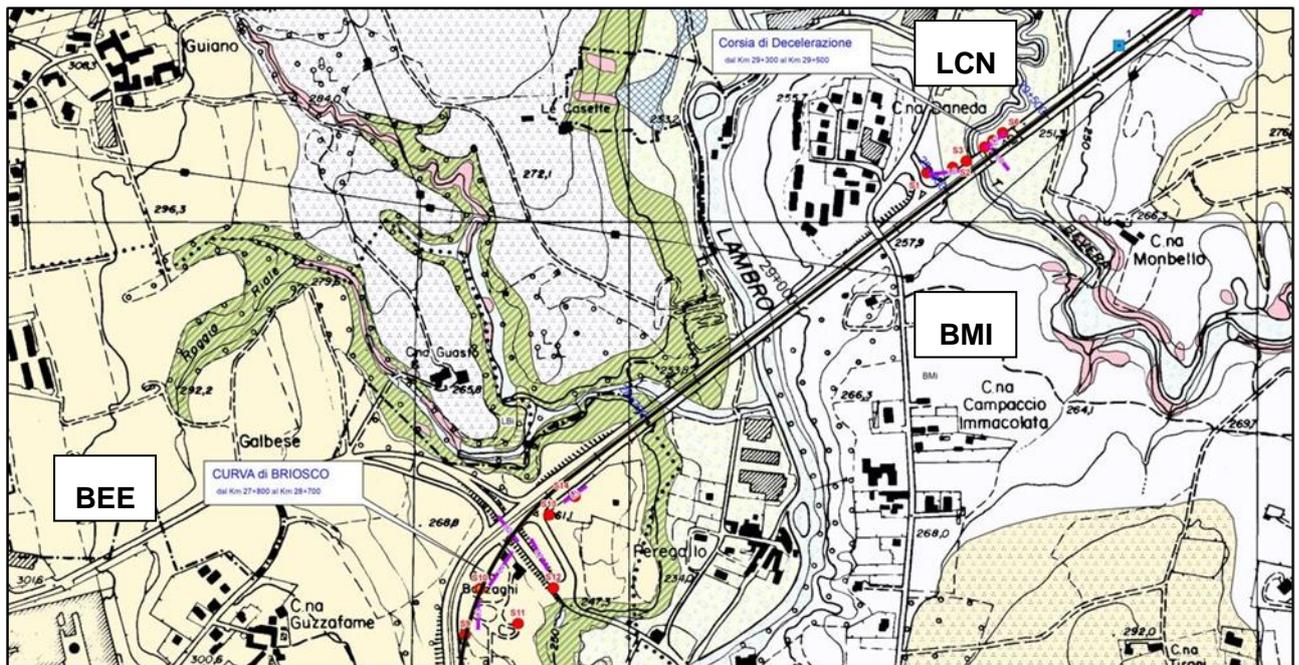


Figura 6-1: Localizzazione della tratta con indagini e stralcio dalla Carta geologica di PD.

6.1.2 Unità Geotecnica UG1

6.1.2.1 Indici fisici da analisi di laboratorio

I campioni prelevati dai sondaggi, sono stati sottoposti alla determinazione della massa volumica reale (Tabella 6-1).

Campione	Massa volumica reale media dei granuli (Kg/m ³)	Campione	Massa volumica reale media dei granuli (Kg/m ³)
S1CR1	2698	S9SH1	2709
S1CR2	2662	S11CR1	2684
S2SH1	2698	S11CR2	2711
S2CR1	2692	S13CR1	2711
S5SH1	2697	S13CR2	2705
S6CR1	2673	S13SH1	2709
S6CR2	2664	S14CR1	2710
S9CR1	2708	S11CR3	2708

Tabella 6-1: Valori di massa volumica reale media dei granuli per UG1

6.1.2.2 Curve granulometriche da analisi di laboratorio

Dal grafico delle curve granulometriche dei campioni rappresentativi di UG1 (Figura 6-2) si osserva la presenza di materiali abbastanza omogenei, quali limi e argille.

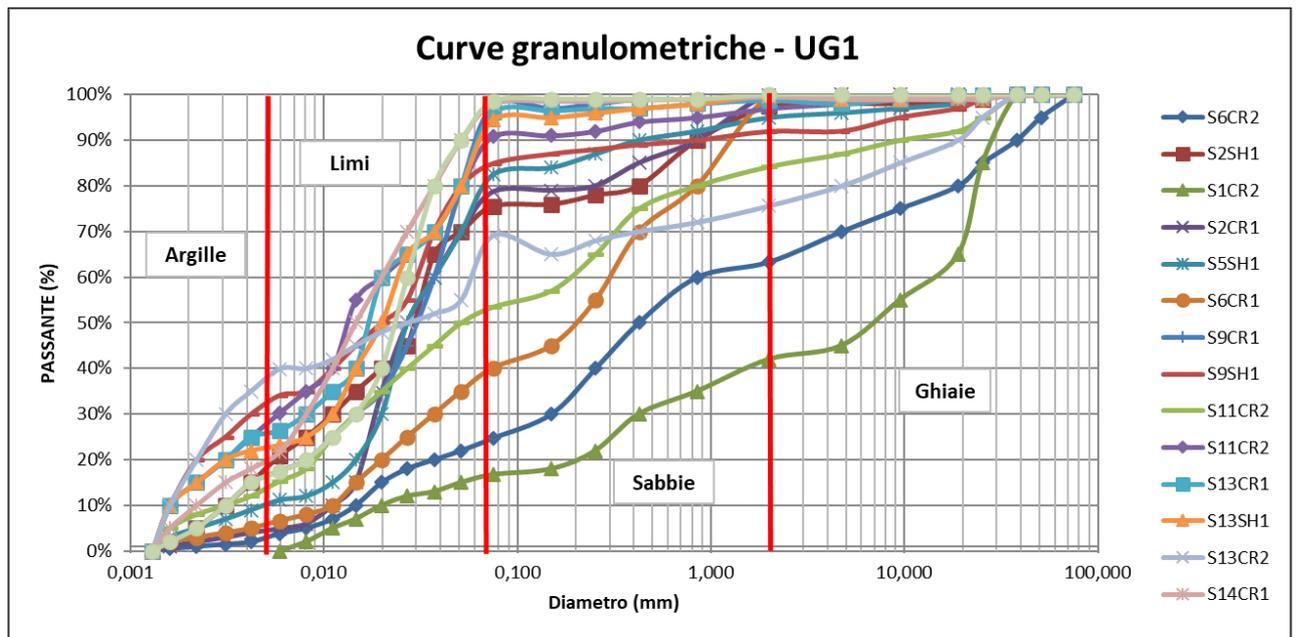
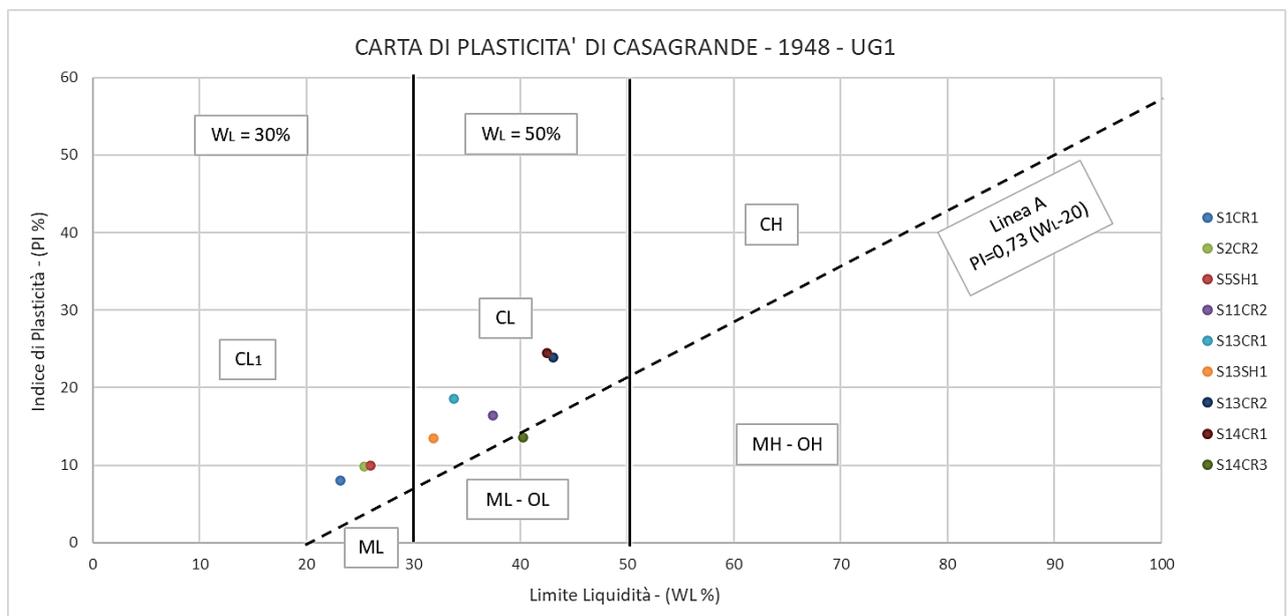


Figura 6-2: Curve granulometriche dei campioni di terreno UG1

6.1.2.3 Carta di Plasticità da analisi di laboratorio

Dalla Carta di Plasticità di Casagrande (Figura 6-3) si osserva che i campioni rappresentativi di UG1 ricadono nei campi delle argille inorganiche di bassa e media plasticità.



DESCRIZIONE	ABBREVIAZIONE
Argille inorganiche di alta plasticità	CH
Limi inorganici di alta compressibilità e argille organiche	MH - OH
Argille inorganiche di media plasticità	CL
Limi inorganici di bassa compressibilità	ML
Limi inorganici di media compressibilità e limi organici	ML - OL
Argille inorganiche di bassa plasticità	CL₁

Figura 6-3: Carta di plasticità di Casagrande (1948) - campioni di terreno UG1

6.1.2.4 Prove geotecniche di laboratorio

Di seguito si analizzano i risultati delle prove di laboratorio (resistenza al taglio diretto ed edometriche) su campioni indisturbati costituiti da terreni con prevalente granulometria fine (limoso argilloso) e subordinata granulometria grossolana (sabbioso ghiaioso).

Prova di taglio diretto

- I campioni S3-C1SH1, S5-C4SH1 e S13-C2SH1 mostrano valori dei parametri coerenti con la granulometria prevalentemente fine del campione stesso. Tali prove vengono considerate per la caratterizzazione di **UG1**.

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	descrizione	unità geotecnica		valori di picco	
				da stratigrafia sondaggio	UG attribuita	c' [kPa]	φ' [°]
S3	C1SH1	8.0 - 8.4	Limo argilloso	UG1	UG1	23.2	29.5
S5	C4SH1	23.6 - 24.0	Limo sabbioso argilloso, debolmente ghiaioso	UG1	UG1	28.6	29.6
S13	C2SH1	7.0 - 7.5	Limo argilloso debolmente sabbioso	UG1	UG1	22.5	23.9

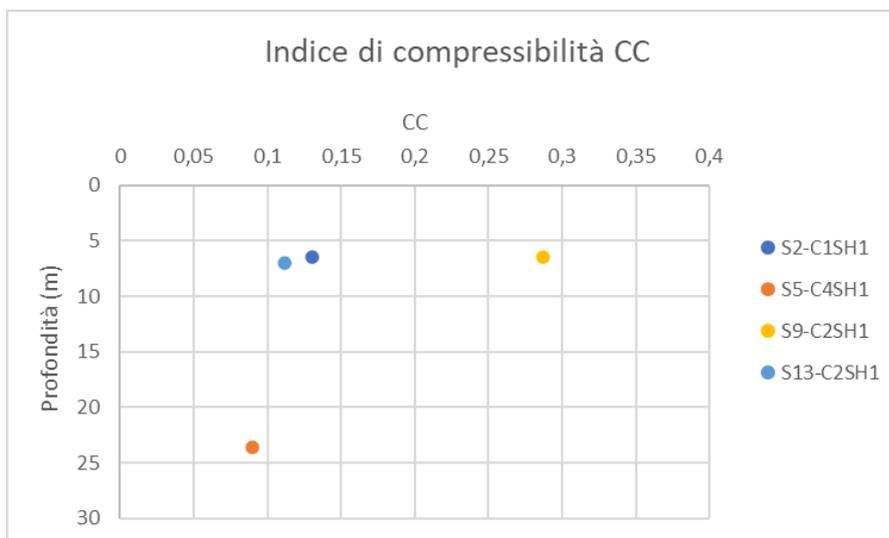
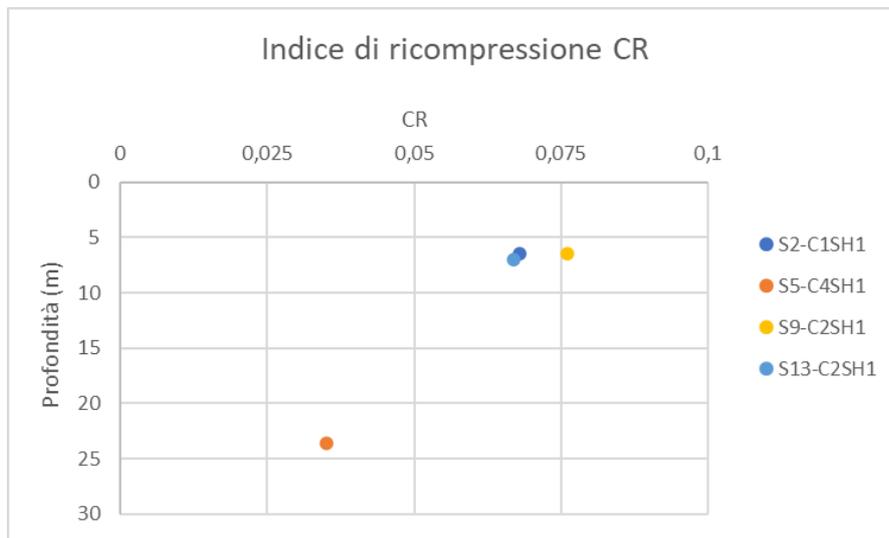
Tabella 6-2: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto su campioni indisturbati

Prova edometrica

Sono state effettuate 5 prove edometriche su campioni indisturbati rappresentativi dei UG1 (Tabella 6-3, Figura 6-4).

Campione	Profondità (m)	Unità geotecnica	Indice di ricomprensione CR	Indice di compressibilità CC	indice di rigonfiamento CS
S2-C1SH1	6.50-7.50	UG1	0.068	0.130	0.013
S5-C4SH1	23.60-24.00	UG1	0.035	0.090	0.020
S8-C4SH1	23.50-24.00	UG4	0.133	0.376	0.116
S9-C2SH1	6.50-7.50	UG1	0.076	0.287	0.096
S13-C2SH1	7.00-7.50	UG1	0.067	0.112	0.033

Tabella 6-3: Sintesi dei risultati delle prove edometriche su campioni indisturbati



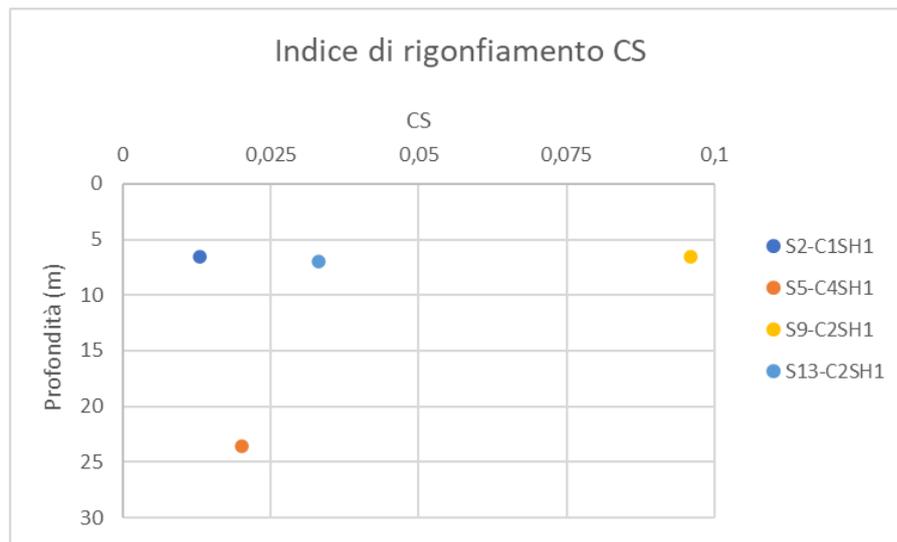


Figura 6-4: Indici di comprimibilità, ottenuti dalle prove edometriche

6.1.2.5 Standard Penetration Test (SPT)

N_{SPT} (valori totali misurati)

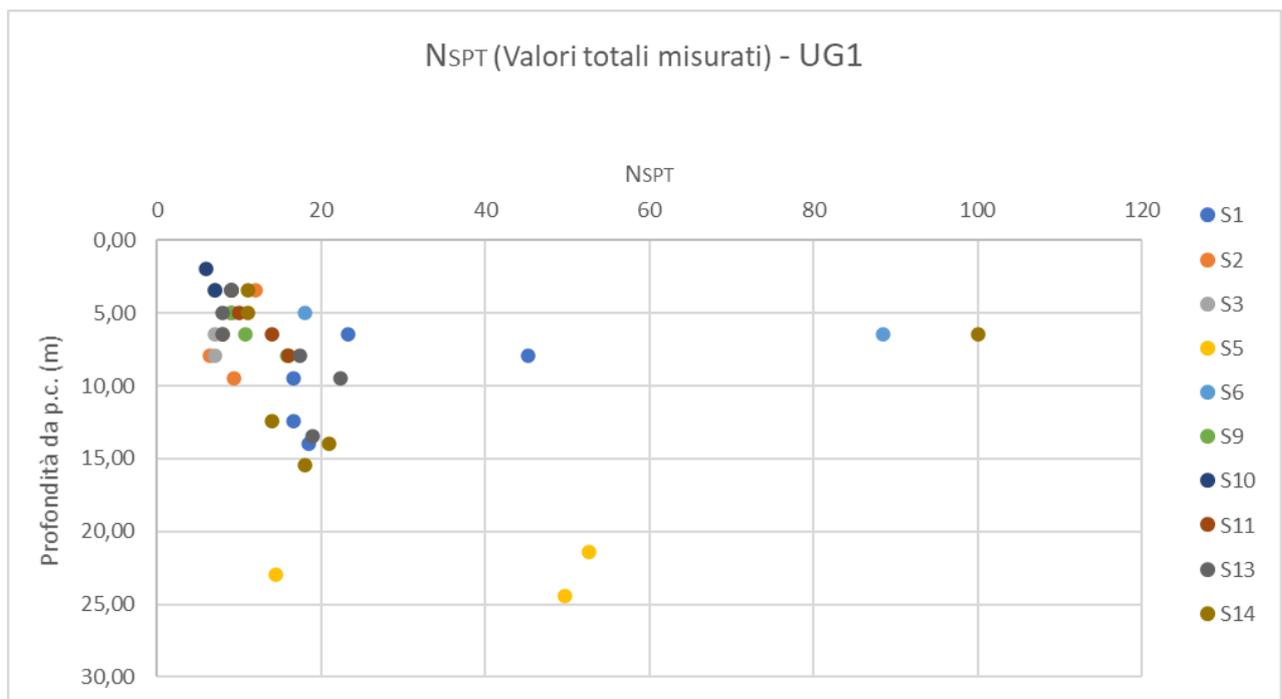


Figura 6-5: Distribuzione dei valori UG1 di N_{SPT} con la profondità

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
N _{SPT}	1	43	6	100	24	13	26,9	7	100	11

Tabella 6-4: Valori statistici

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

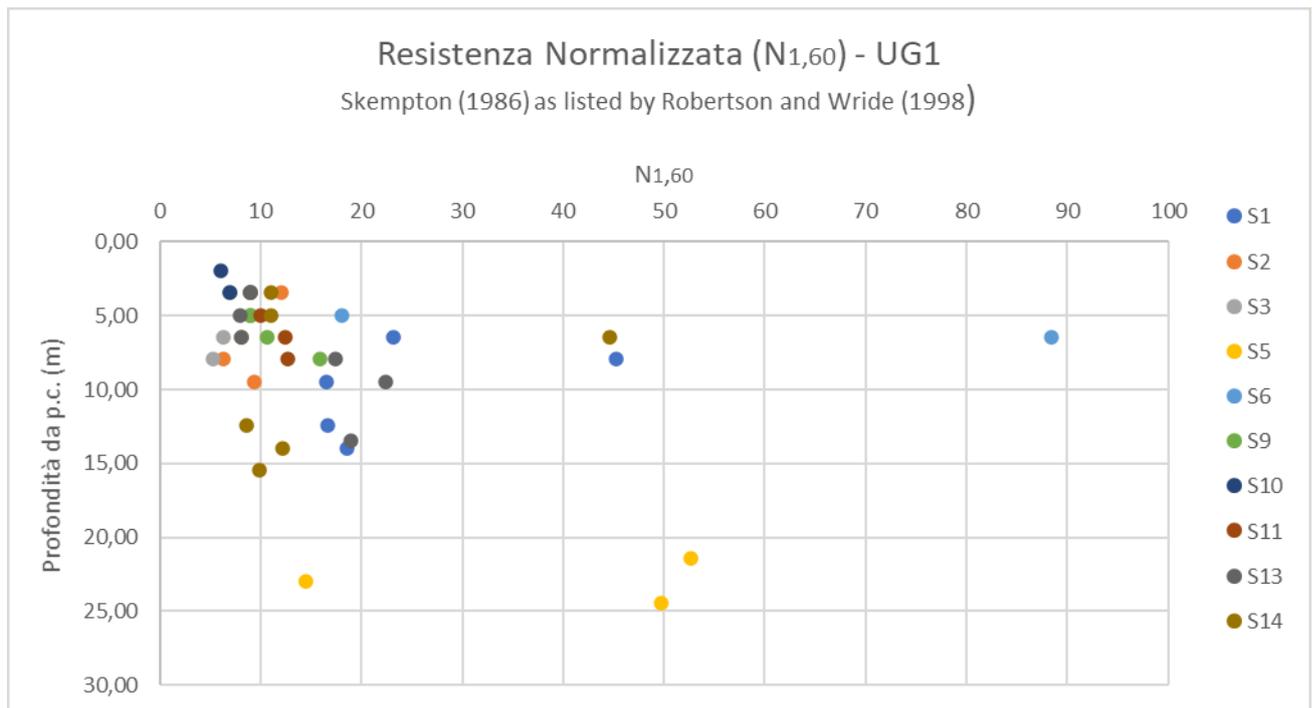


Figura 6-6: Distribuzione dei valori UG1 di $N_{1,60}$ con la profondità

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
$N_{1,60}$ [n.colpi/30cm]	1	43	5	88	16	10	16,1	6	49	8

Tabella 6-5: Valori statistici

Densità relativa (Dr)

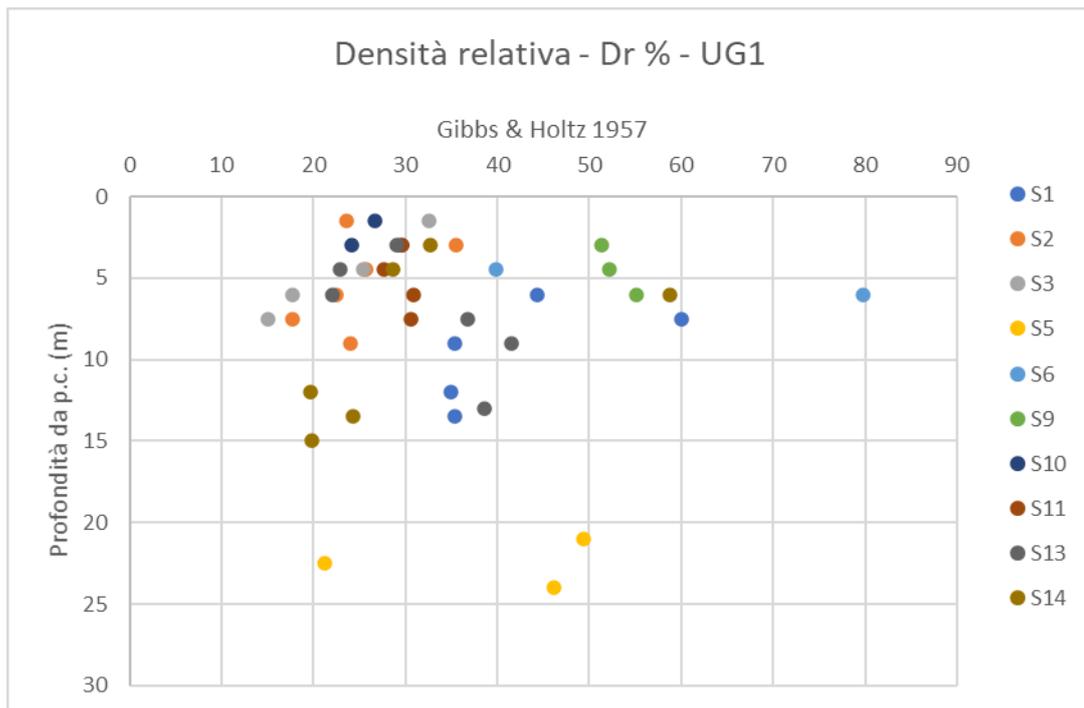


Figura 6-7: Distribuzione dei valori di Densità Relativa (%) – UG1 in funzione della profondità, secondo Gibbs & Holtz, 1957

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
Dr [%]	1	42	15.1	79.7	32.6	60.1	11.5	20.3	51.4	26.9

Tabella 6-6: Valori statistici

Angolo di attrito (φ)

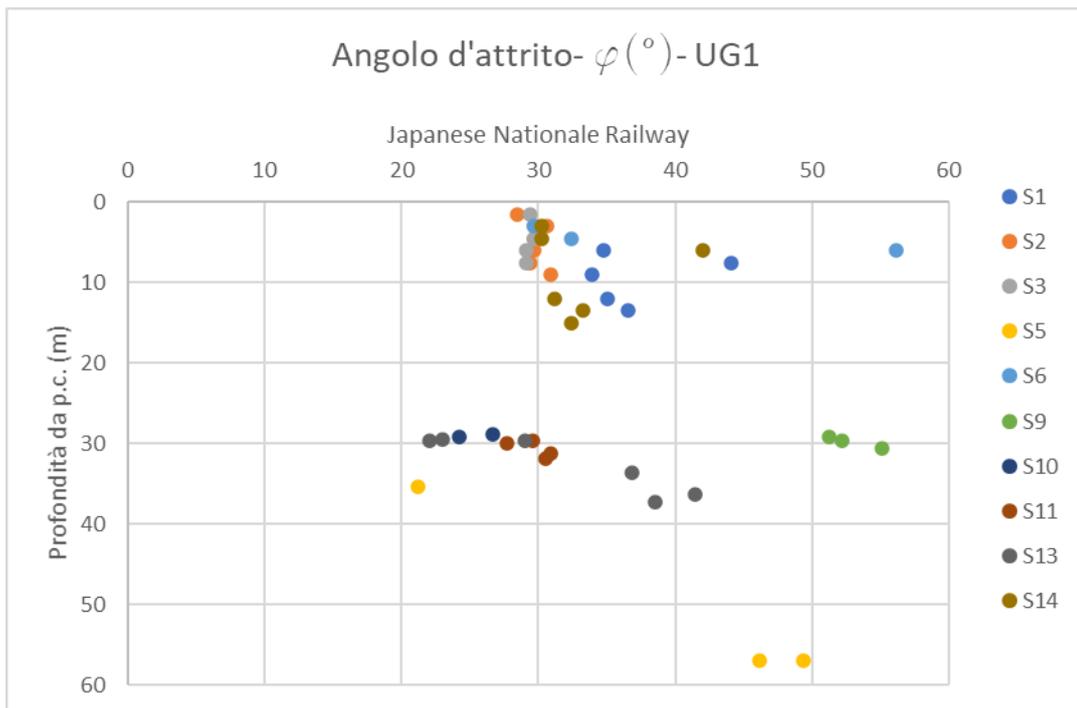


Figura 6-8: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) UG1 in funzione della profondità, secondo Japanese National Railway, 1982

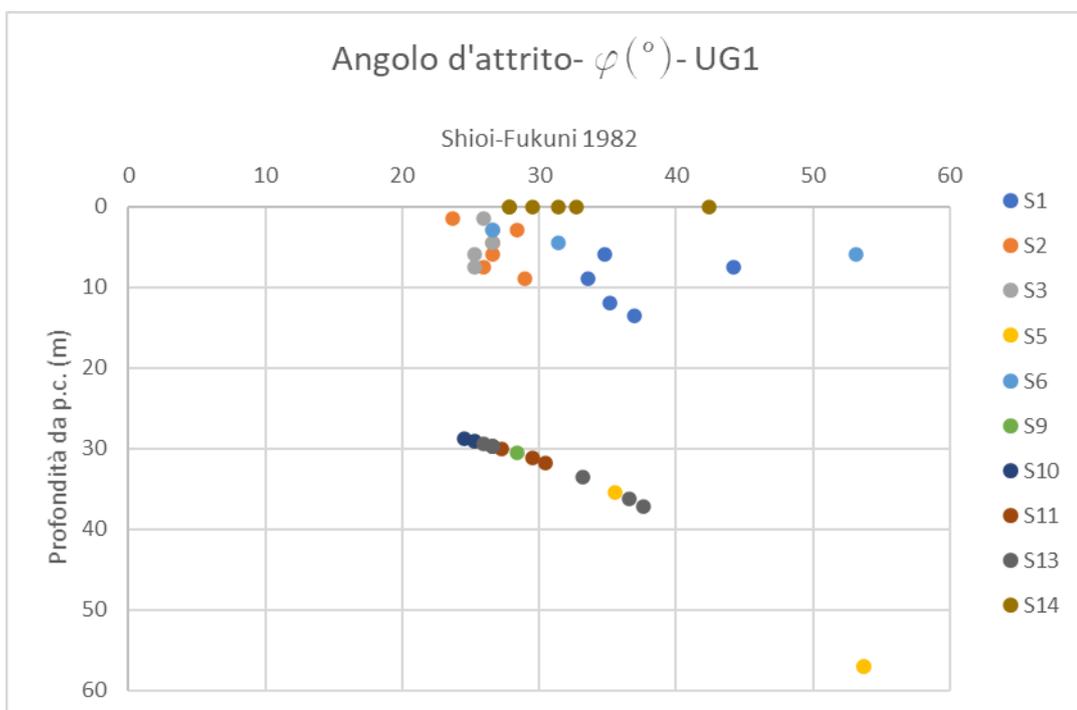


Figura 6-9: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) UG1 in funzione della profondità, secondo Shioi-Fukuni 1982

Per la definizione dei valori statistici del parametro φ si fa riferimento alla correlazione di Shioi-Fukuni 1982 (Road Bridge Specification).

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev. St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
φ' [°]	1	42	24	55	31	28	7.8	25	52	28

Tabella 6-7: Valori statistici angolo di attrito φ -UG1

Modulo di Young (E)

Per l'analisi del parametro E in funzione di N_{SPT} sono state usate le formulazioni empiriche di Bowles (1982) correlazione valida per sabbia, sabbia SC, sabbia NC e ghiaia, e di Schultze-Menzenbach (Sabbia ghiaiosa).

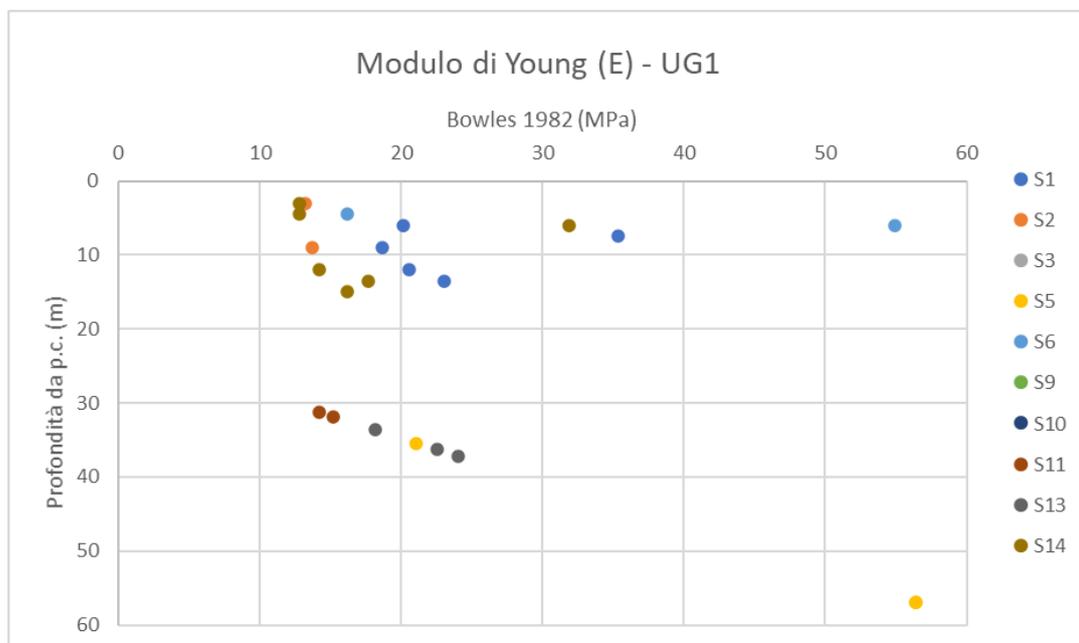


Figura 6-10: Grafico che correla il Modulo di Young in funzione della profondità, secondo Bowles 1982.

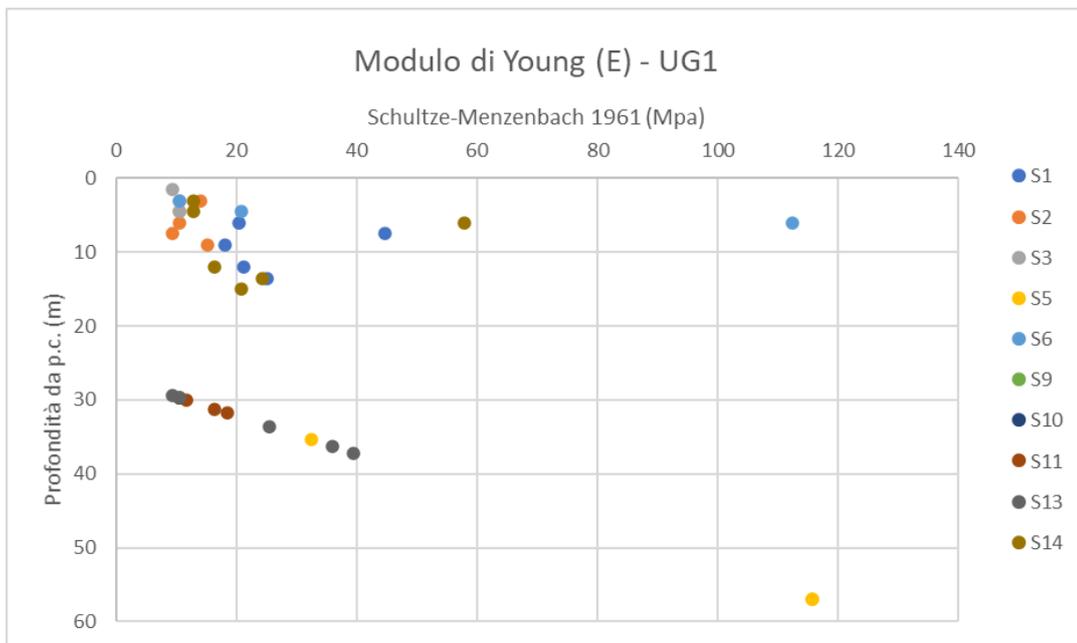


Figura 6-11: Grafico che correla il Modulo di Young in funzione della profondità, secondo Schultze e Menzenbach, 1961

Per la definizione dei valori statistici del parametro E si fa riferimento alla correlazione di Bowles 1982.

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
E [MPa]	1	42	12.7	56.4	23.4	18.3	13.8	12.8	56.2	17.5

Tabella 6-8: Valori statistici Modulo di Young

6.1.2.6 Caratterizzazione UG1

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	26.9	17.5	28	23.1

Tabella 6-9: Caratterizzazione UG1

NOTE *: valore stimato da bibliografia

** : valore caratteristico da prove di taglio diretto.

6.1.3 Unità Geotecnica UG2

6.1.3.1 Indici fisici da analisi di laboratorio

I campioni prelevati dai sondaggi, sono stati sottoposti alla determinazione della massa volumica

reale (Tabella 6-10).

Campione	Massa volumica reale media dei granuli (Kg/m ³)
S4CR1	2677
S4CR2	2670
S4CR3	2654
S5CR1	2674
S12CR4	2665

Tabella 6-10: Valori di massa volumica reale media dei granuli per UG2

6.1.3.2 Curve granulometriche da analisi di laboratorio

Dal grafico delle curve granulometriche dei campioni rappresentativi di UG2 (Figura 6-12) si osserva la presenza di materiali abbastanza omogenei, quali sabbie debolmente limose e debolmente ghiaiose.

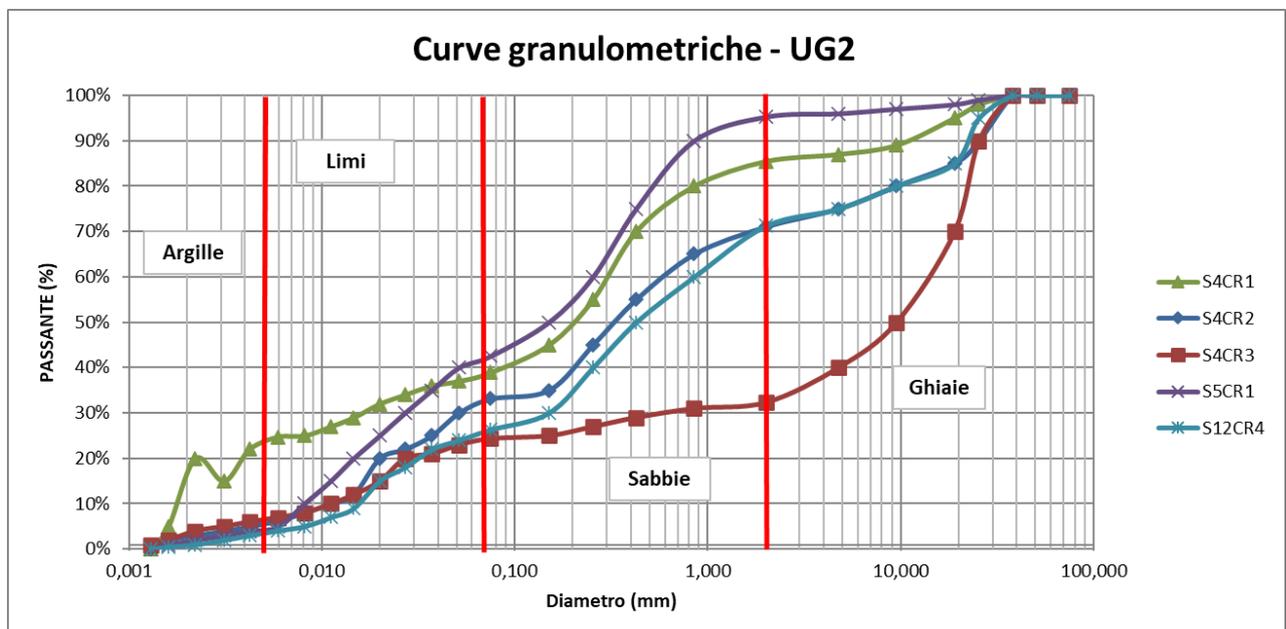


Figura 6-12: Curve granulometriche dei campioni di terreno UG2

6.1.3.3 Prove geotecniche di laboratorio

Di seguito si analizzano i risultati delle prove di laboratorio (resistenza al taglio diretto) su campioni indisturbati costituiti da terreni con prevalente granulometria fine (limoso argillosa) e subordinata granulometria grossolana (sabbioso ghiaiosa).

Prova di taglio diretto

Il campione S2-C1SH1 mostra valori dei parametri coerenti con un terreno a granulometria più grossolana. Tale prova viene considerata per la caratterizzazione di **UG2**.

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	descrizione	unità geotecnica		valori di picco	
				da stratigrafia sondaggio	UG attribuita	c' [kPa]	ϕ' [°]
S2	C1SH1	6.5 - 7.0	Limo argilloso sabbioso, con sostanza organica	UG1	UG2	5.6	33.6

Tabella 6-11: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto su campioni indisturbati

6.1.3.4 Standard Penetration Test (SPT)

N_{SPT} (valori totali misurati)

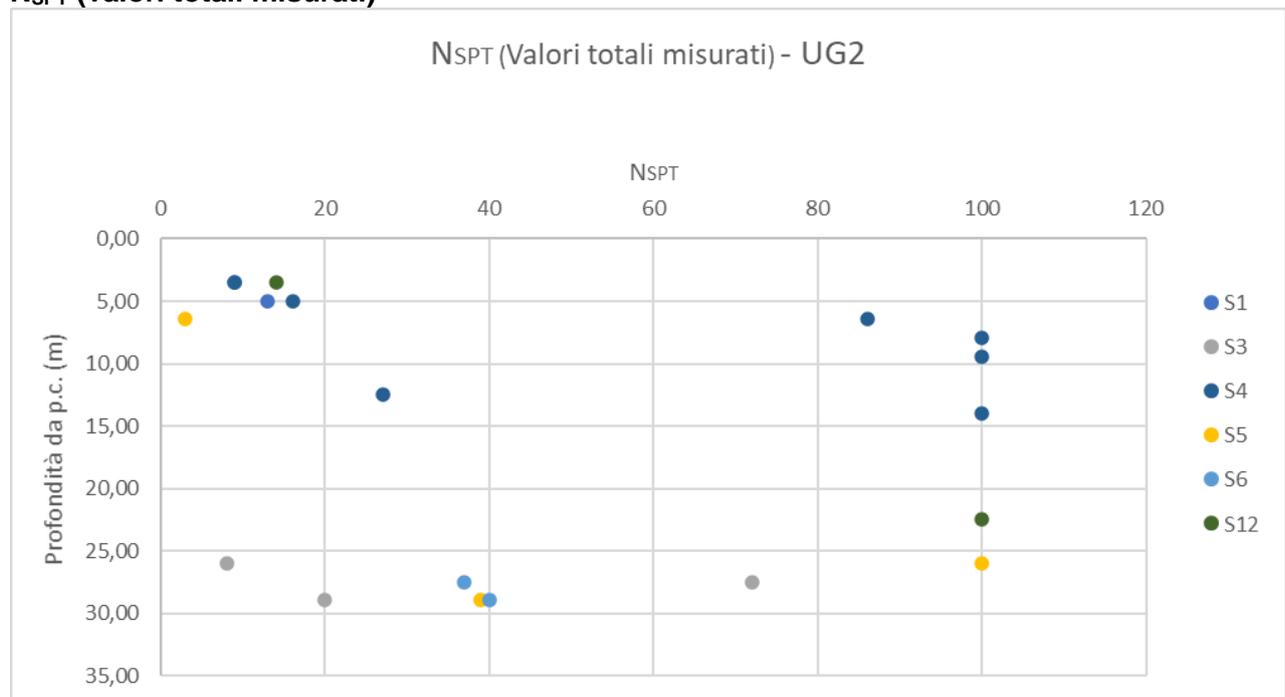


Figura 6-13: Distribuzione dei valori UG2 di N_{SPT} con la profondità

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
NSPT	2	18	3	100	45	32	38.5	8	100	26

Tabella 6-12: Valori statistici

Resistenza normalizzata (N_{1,60})

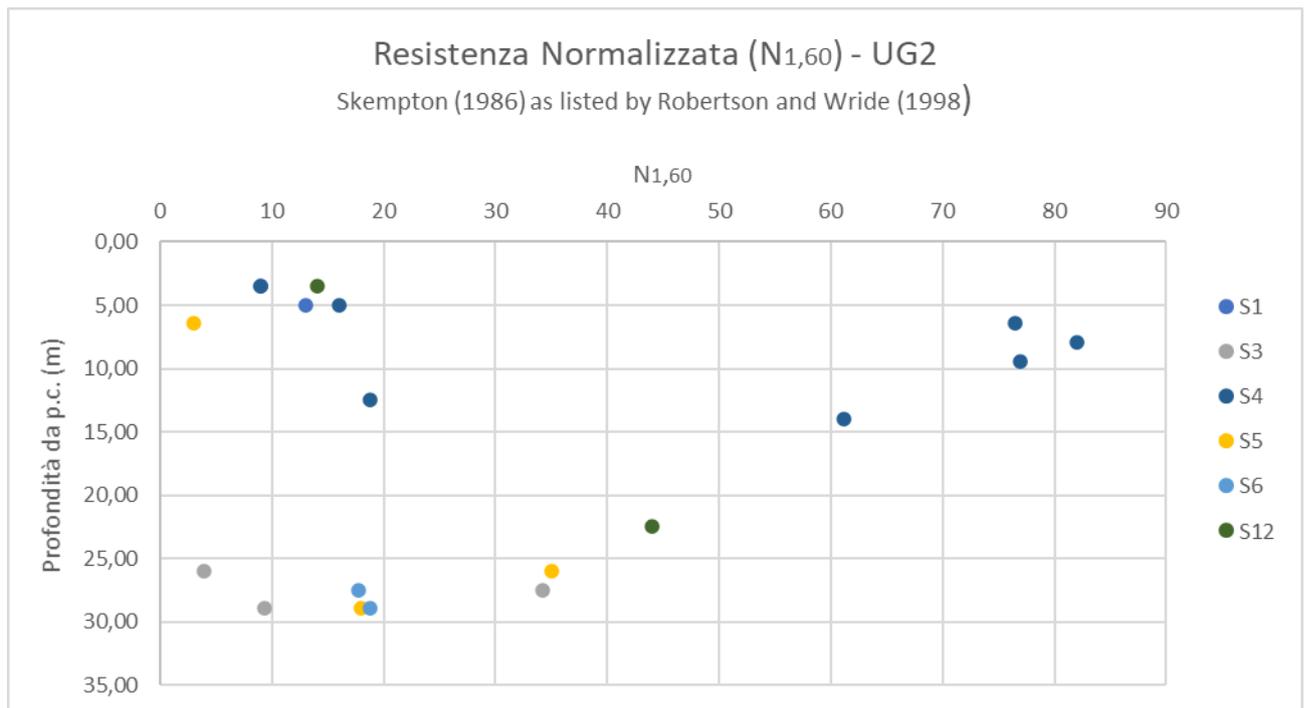


Figura 6-14: Distribuzione dei valori UG2 di N_{1,60} con la profondità

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
N _{1,60} [n.colpi/30cm]	2	18	3	82	29	18	26,1	4	77	16

Tabella 6-13: Valori statistici

Densità relativa (Dr)

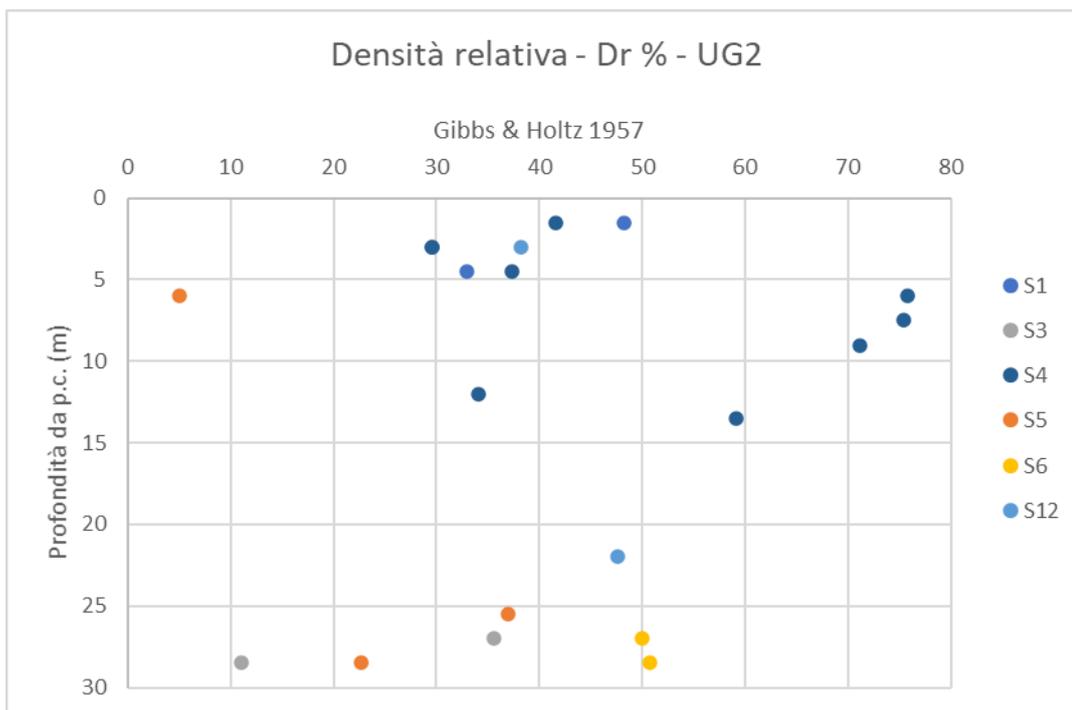
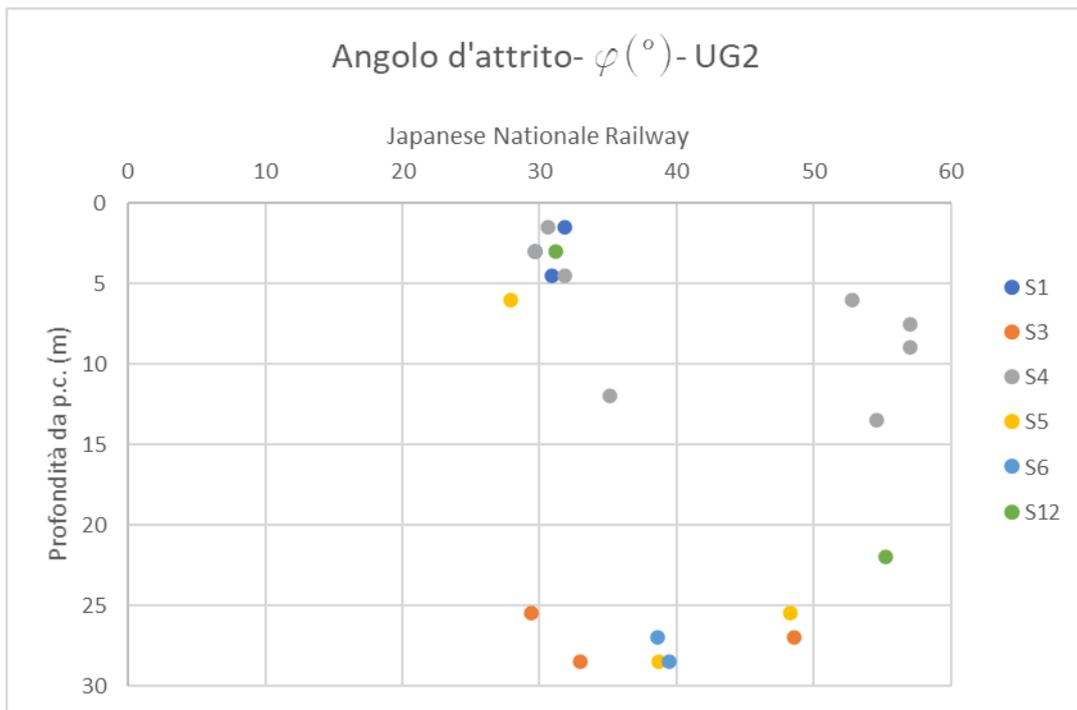


Figura 6-15: Distribuzione dei valori di Densità Relativa (%) – UG2 in funzione della profondità, secondo Gibbs & Holtz 1957

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
Dr [%]	2	20	5.1	75.8	41.6	37.8	19.0	10.7	75.4	32.1

Tabella 6-14: Valori statistici

Angolo di attrito (φ)



Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev. St.	5° percentil e	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
φ' [°]	2	20	28	57	40	35	10.6	29	57	30

Tabella 6-15: Valori statistici angolo di attrito φ -UG2

Modulo di Young (E)

Per l'analisi del parametro E in funzione di N_{SPT} sono state usate le formulazioni empiriche di Bowles (1982) correlazione valida per sabbia, sabbia SC, sabbia NC e ghiaia, e di Schultze-Menzenbach (Sabbia ghiaiosa).

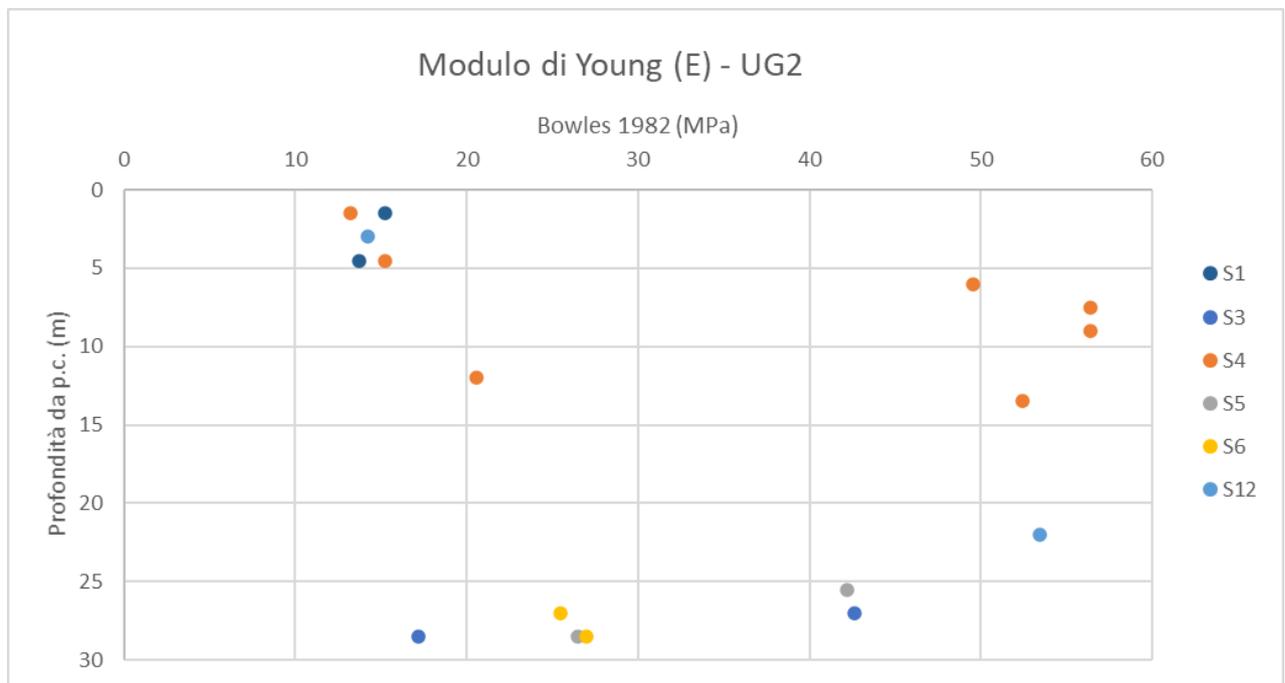


Figura 6-18: Grafico che correla il Modulo di Young in funzione della profondità, secondo Bowles 1982.

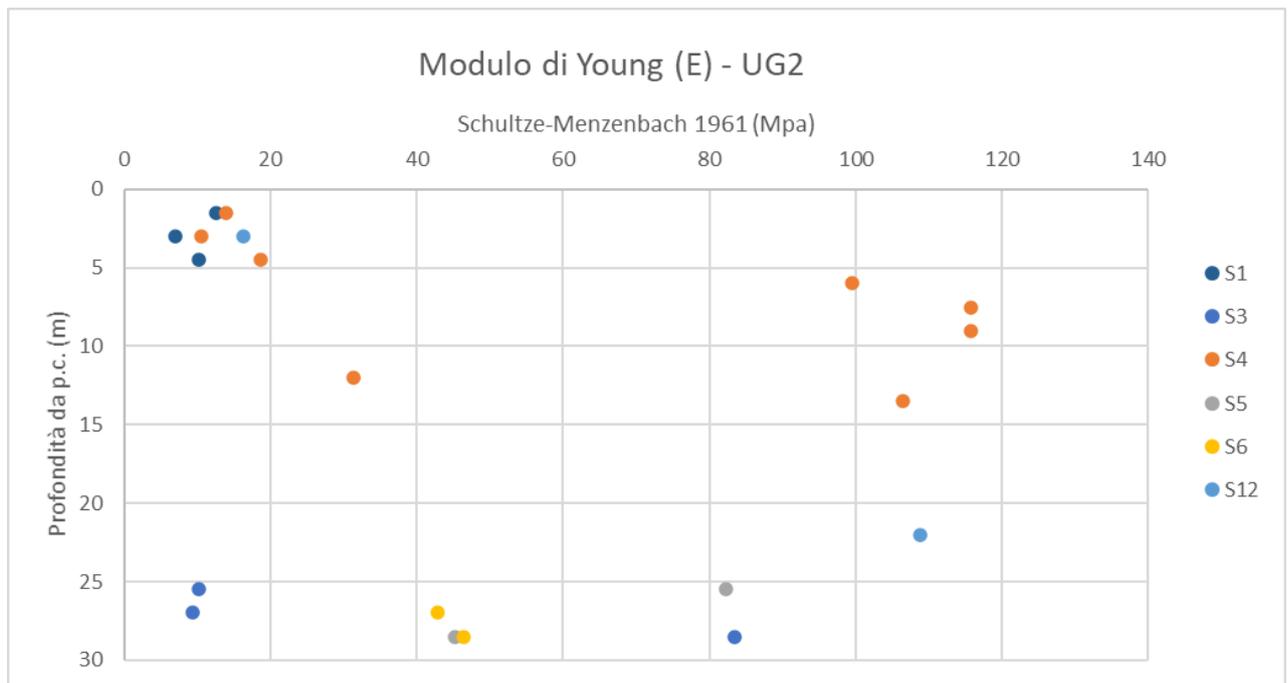


Figura 6-19: Grafico che correla il Modulo di Young in funzione della profondità, secondo Schultze e Menzenbach, 1961

Per la definizione dei valori statistici del parametro E si fa riferimento alla correlazione di Bowles 1982.

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
E [MPa]	2	20	13.2	56.4	31.8	26.5	17.0	13.6	56.3	23.4

Tabella 6-16: Valori statistici Modulo di Young

6.1.3.5 Caratterizzazione UG2

Unità geotecnica	*Peso / volume	Densità relativa	Modulo di Young	Resistenza al taglio	
	γ_{nat} [kN/m ³]	Dr [%]	E [MPa]	ϕ [°]	**c [kPa]
UG2	19	32.14	23.36	30	5.6

Tabella 6-17: Caratterizzazione UG2

NOTE *: valore stimato da bibliografia

** : valore caratteristico da prove di taglio diretto

6.1.4 Unità Geotecnica UG3

6.1.4.1 Indici fisici da analisi di laboratorio

I campioni prelevati dai sondaggi, sono stati sottoposti alla determinazione della massa volumica reale (Tabella 6-18).

Campione	Massa volumica reale media dei granuli (Kg/m ³)	Campione	Massa volumica reale media dei granuli (Kg/m ³)
S1CR3	2676	-	-
S1CR4	2705	S9CR4	2660
S2CR3	2667	S10CR1	2702
S2CR4	2665	S10CR2	2685
S3CR1	2708	S10CR3	2664
S3CR2	2672	S10CR4	2660
S3CR3	2664	S11CR3	2661
S3CR4	2692	S11CR4	2654
S4CR4	2665	S12CR1	2656
S5CR2	2684	S12CR2	2669
S5CR3	2659	S12CR3	2666
S6CR3	2662	S13CR4	2662
S6CR4	2654	S14CR2	2690
S9CR3	2662	S14CR4	2663

Tabella 6-18: Valori di massa volumica reale media dei granuli per UG3

6.1.4.2 Curve granulometriche da analisi di laboratorio

Dal grafico delle curve granulometriche dei campioni rappresentativi di UG3 (Figura 6-20) si osserva la presenza di materiali abbastanza omogenei, quali ghiaie sabbiose con ciottoli.

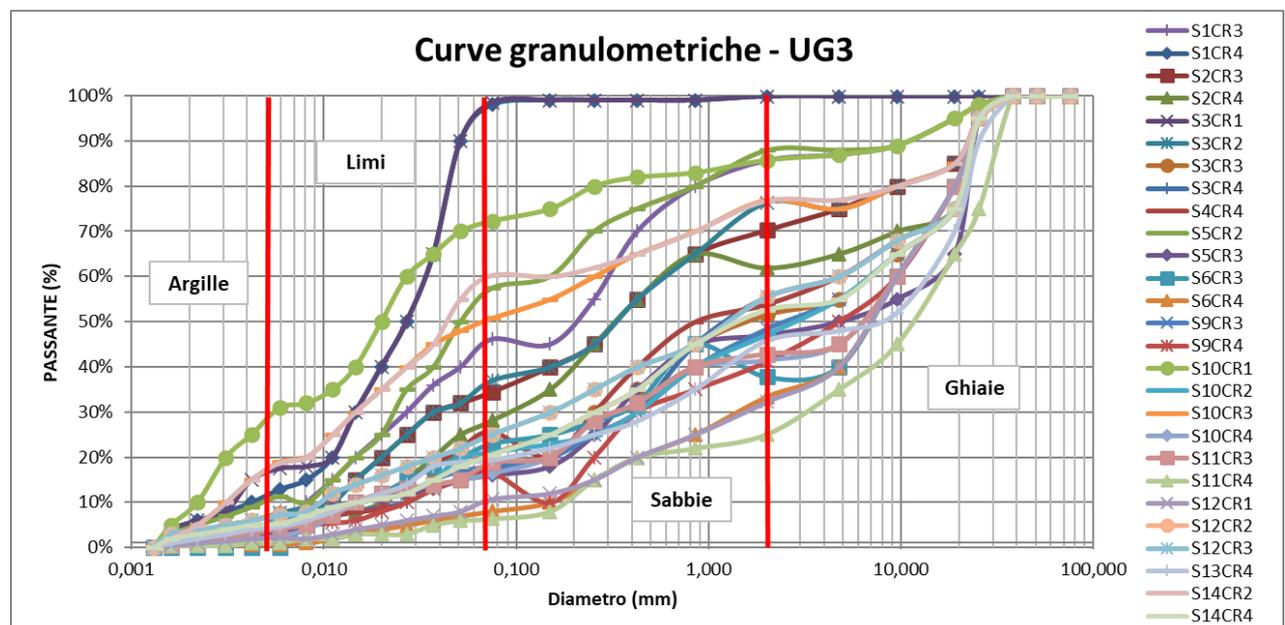
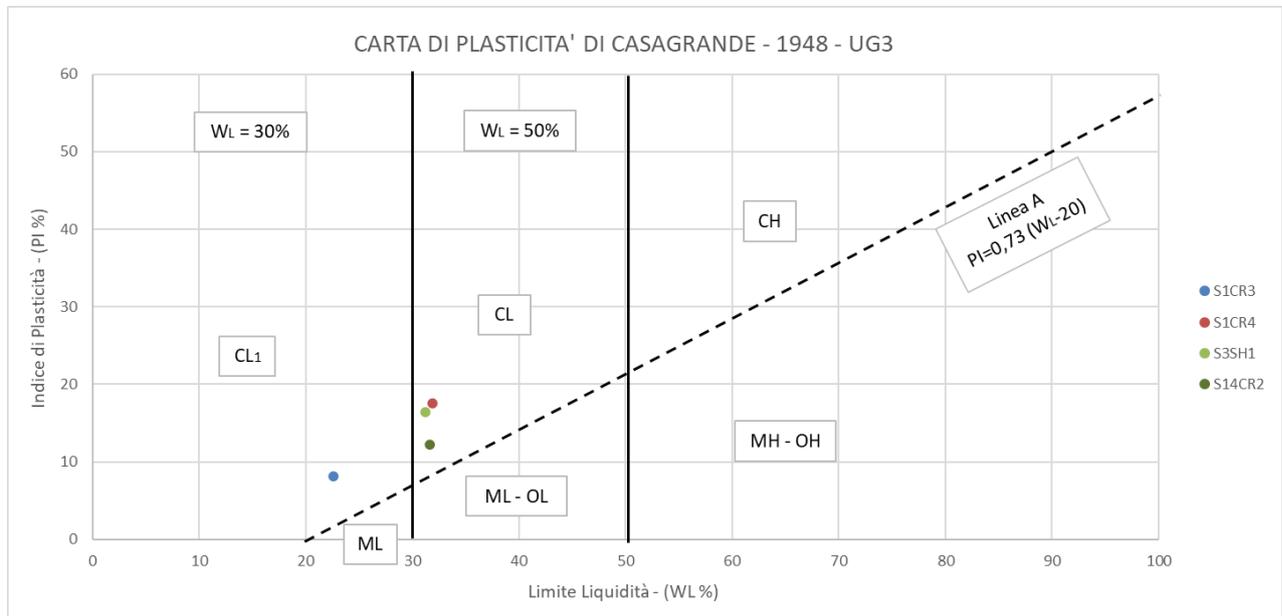


Figura 6-20: Curve granulometriche dei campioni di terreno UG3

6.1.4.3 Carta di Plasticità da analisi di laboratorio

Quattro campioni, su un totale di 27, mostrano comportamento plastico che può essere considerato rappresentativo della componente più fine (matrice) dell'unità UG3.

Dalla Carta di Plasticità di Casagrande (Figura 6-21) si osserva che i campioni ricadono nei campi delle argille inorganiche di bassa e media plasticità.



DESCRIZIONE	ABBREVIAZIONE
Argille inorganiche di alta plasticità	CH
Limi inorganici di alta compressibilità e argille organiche	MH - OH
Argille inorganiche di media plasticità	CL
Limi inorganici di bassa compressibilità	ML
Limi inorganici di media compressibilità e limi organici	ML - OL
Argille inorganiche di bassa plasticità	CL₁

Figura 6-21: Carta di plasticità di Casagrande (1948) - campioni di terreno UG3

Prova di taglio diretto

Il campione S10-C2SH1 mostra valori dei parametri coerenti con un terreno a granulometria più grossolana. Tale prova viene considerata per la caratterizzazione di **UG3**.

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	descrizione	unità geotecnica		valori di picco	
				da stratigrafia sondaggio	UG attribuita	c' [kPa]	ϕ' [°]
S10	C2SH1	8.5 - 9.0	Limo con sabbia ghiaioso argilloso	UG3	UG3	4.3	38.0

Tabella 6-19: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto su campioni indisturbati

6.1.4.4 Standard Penetration Test (SPT)

N_{SPT} (valori totali misurati)

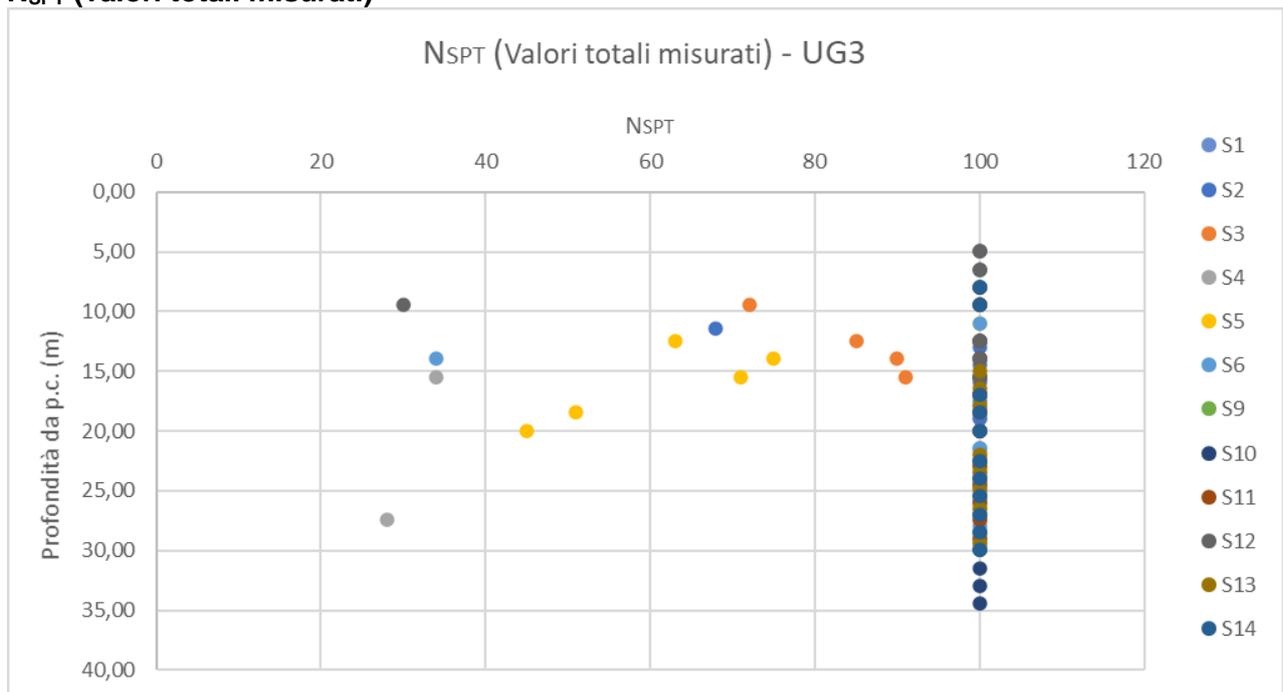


Figura 6-22: Distribuzione dei valori UG3 di N_{SPT} con la profondità

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
NSPT	3	134	28	100	96	100	14,3	67	100	89

Tabella 6-20: Valori statistici

Per UG3 si osserva un elevato numero di prove a rifiuto (N_{SPT}=100).

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

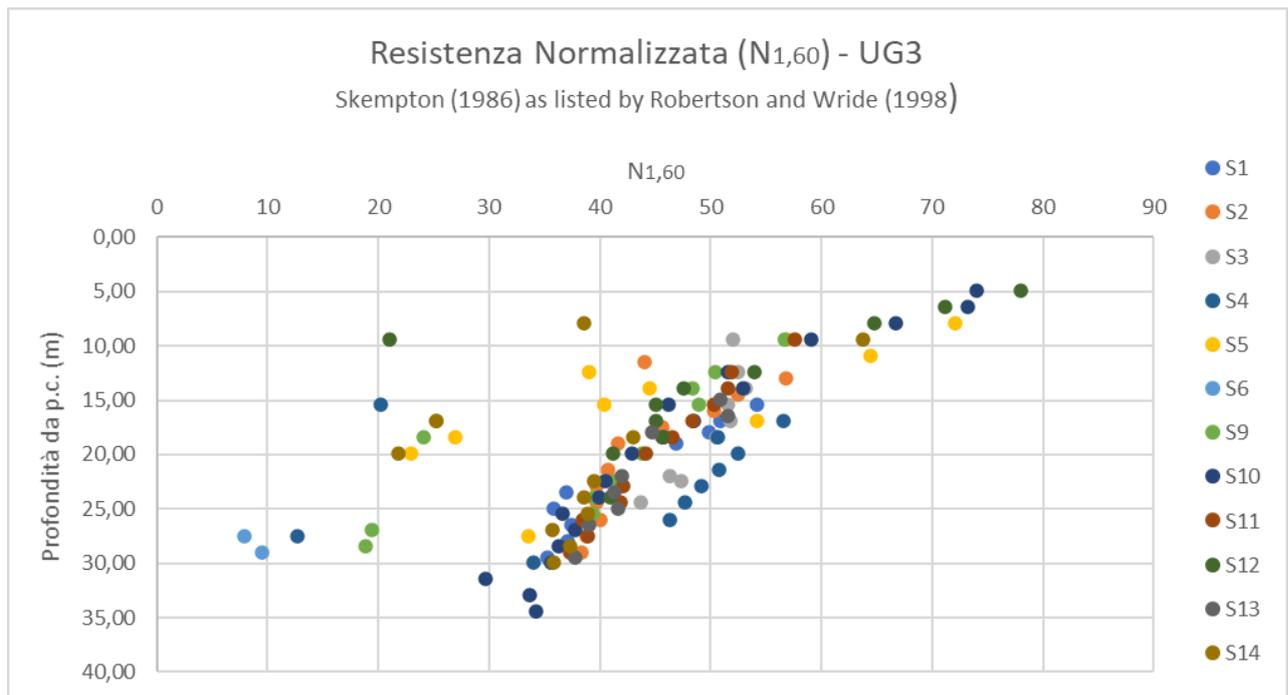


Figura 6-23: Distribuzione dei valori UG3 di $N_{1,60}$ con la profondità

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
$N_{1,60}$ [n.colpi/30cm]	3	134	13	78	45	45	12,0	23	68	39

Tabella 6-21: Valori statistici

Densità relativa (Dr)

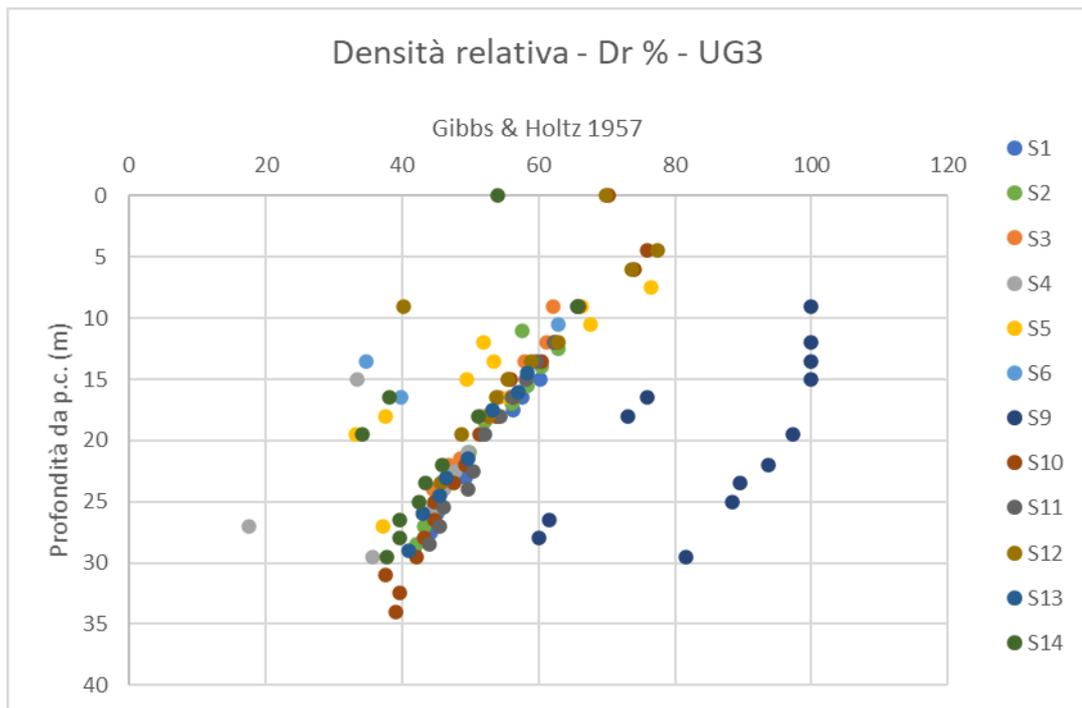


Figura 6-24: Distribuzione dei valori di Densità Relativa (%) – UG3 in funzione della profondità, secondo Gibbs & Holtz 1957

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
Dr [%]	3	134	17.6	100	54.8	52.2	15.2	37.3	89.2	47.2

Tabella 6-22: Valori statistici

Angolo di attrito (φ)

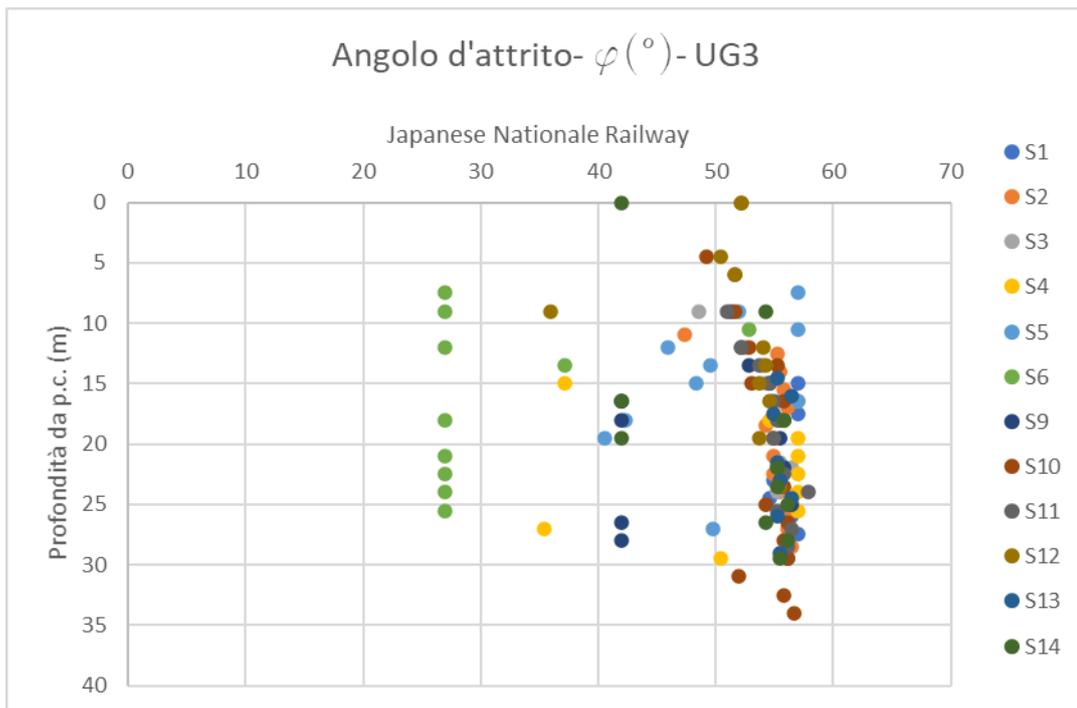


Figura 6-25: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) UG3 in funzione della profondità, secondo Japanese National Railway, 1982

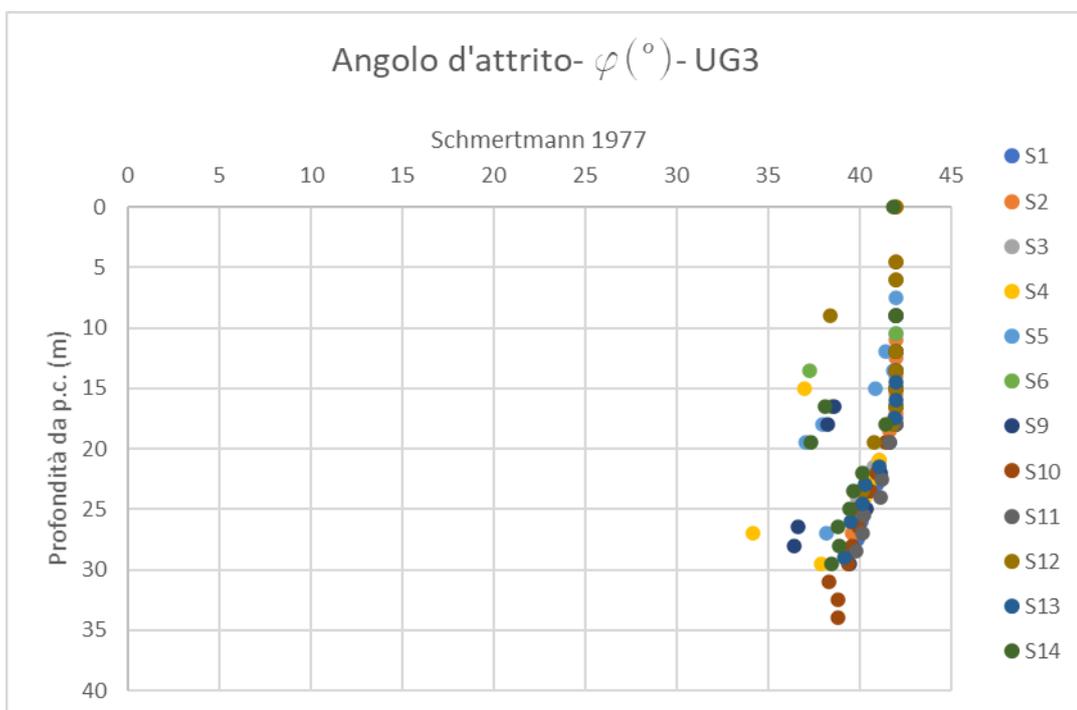


Figura 6-26: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) UG3 in funzione della profondità, secondo Schmertmann 1977

Per la definizione dei valori statistici del parametro φ si fa riferimento alla correlazione di Schmertmann 1977.

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev. St.	5° percentil e	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
φ' [°]	3	134	34	42	41	41	1.6	38	42	40

Tabella 6-23: Valori statistici angolo di attrito φ -UG3

Modulo di Young (E)

Per l'analisi del parametro E in funzione di N_{SPT} sono state usate le formulazioni empiriche di Bowles (1982) correlazione valida per sabbia, sabbia SC, sabbia NC e ghiaia, e di Schultze-Menzenbach (Sabbia ghiaiosa).

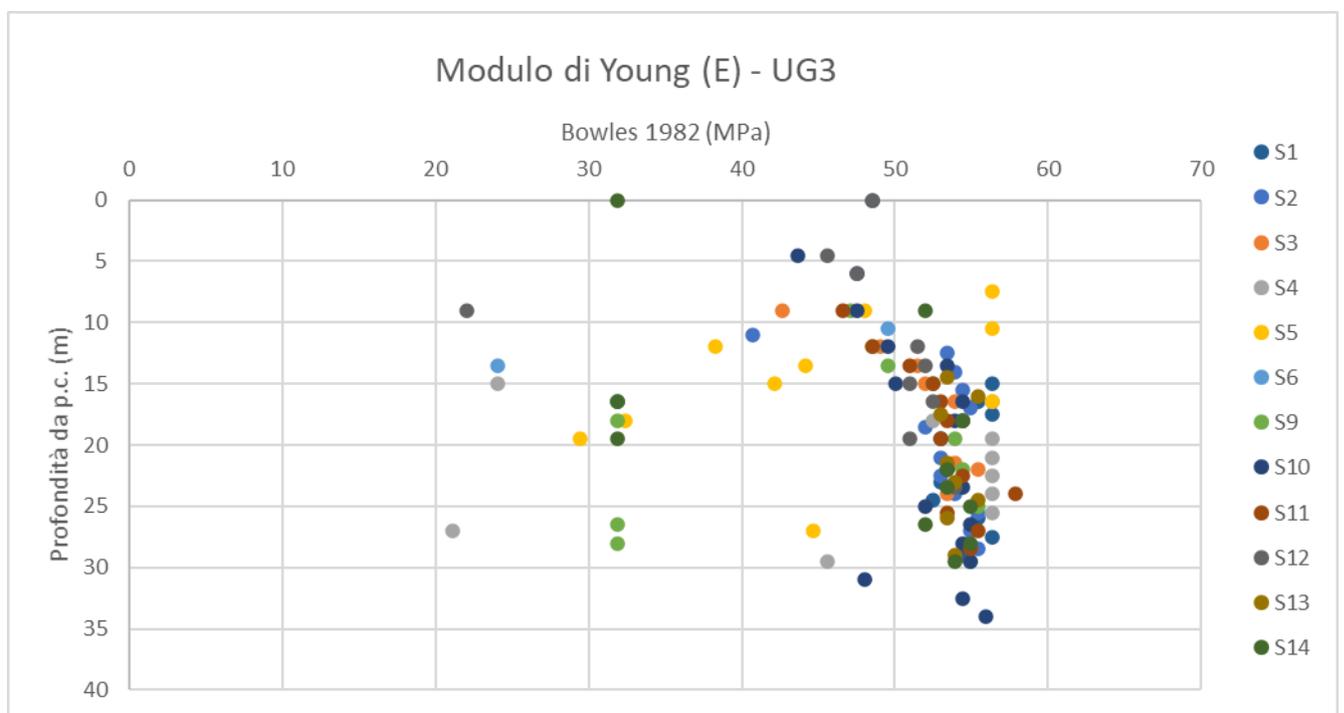


Figura 6-27: Grafico che correla il Modulo di Young in funzione della profondità, secondo Bowles 1982.

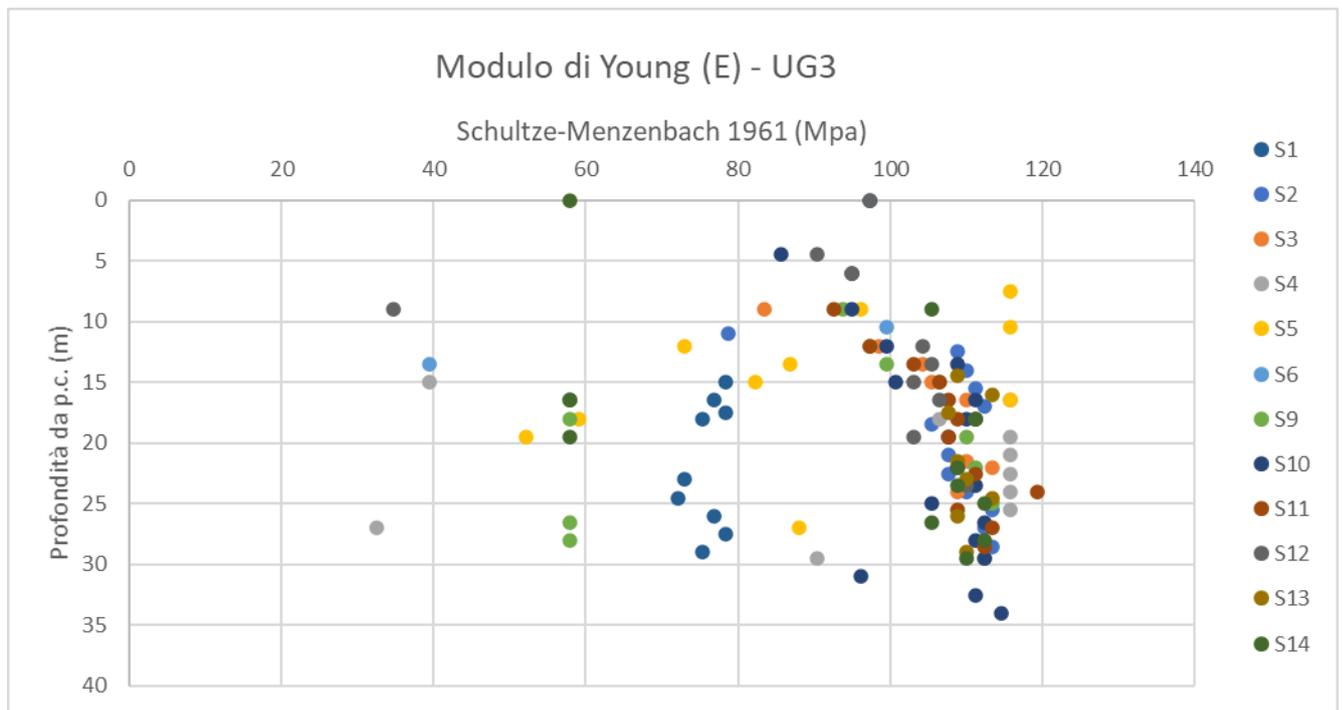


Figura 6-28: Grafico che correla il Modulo di Young in funzione della profondità, secondo Schultze e Menzenbach, 1961

Per la definizione dei valori statistici del parametro E si fa riferimento alla correlazione di Bowles 1982.

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
E [MPa]	3	134	21	57,8	49,9	53,4	8,24	31,8	56,3	45,7

Tabella 6-24: Valori statistici Modulo di Young

6.1.4.5 Caratterizzazione UG3

Unità geotecnica	*Peso / volume	Densità relativa	Modulo di Young	Resistenza al taglio	
	γ_{nat} [kN/m ³]	Dr [%]	E [MPa]	ϕ [°]	**c [kPa]
UG3	20	47,2	45,7	40	0-5

Tabella 6-25: Caratterizzazione UG3

NOTE *: valore stimato da bibliografia

** : range stimato, considerando il risultato della prova di taglio diretto

6.2 Settore Ponte Veduggio

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

La morfologia del settore è interessata da forme di origine morenica.

La zona di Veduggio dai sondaggi S7-S8 effettuati è caratterizzata dalla presenza di limi con argilla sabbiosa.

Dal progetto C.A.R.G., si individuano le seguenti formazioni:

- Sintema del PO (POI): depositi sabbioso-ghiaiosi fluviali e di conoide dominati da debris flow; argille e torbe di deposizione lacustre. Alterazione assente. Morfologia ben espressa nelle piane fluviali dei principali corsi d'acqua.
- Sintema di Cantù (LCN): depositi fluvioglaciali, glaciali e di contatto glaciali, deltizi e lacustri. Morfologie in genere ben conservate con morene a fianchi ripidi e ben rilevate rispetto alle zone circostanti. I depositi fluvioglaciali costituiscono spesso i terrazzi e le piane morfologicamente più depresse all'interno delle principali valli.

La mostra la carta geologica del PD, con ubicazione indagini ed interventi in progetto

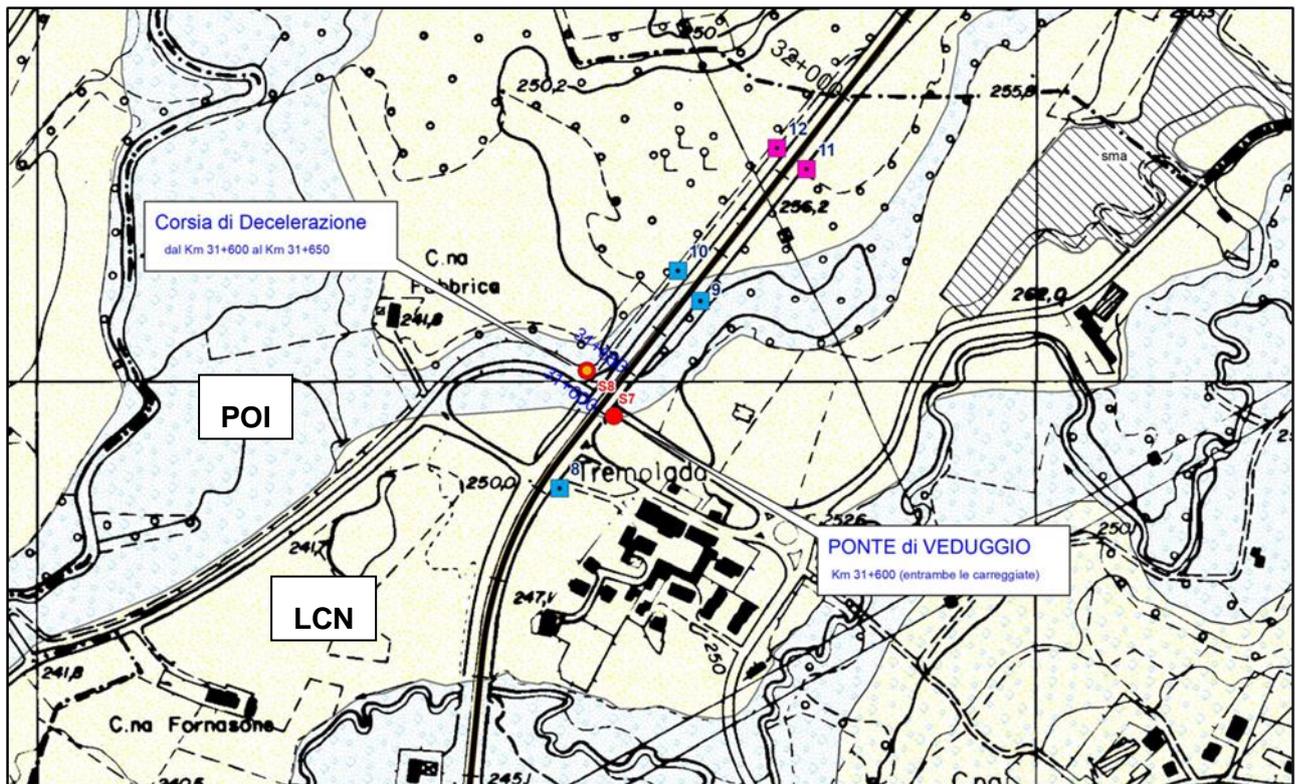


Figura 6-29. Localizzazione della tratta con indagini e stralcio dalla Carta geologica di PD.

6.2.2 Unità Geotecnica UG4

6.2.2.1 Indici fisici da analisi di laboratorio

I campioni prelevati dai sondaggi, sono stati sottoposti alla determinazione della massa volumica reale (Tabella 6-26).

Campione	Massa volumica reale media dei granuli (Kg/m ³)
S7CR1	2686
S7CR2	2723
S7CR3	2719
S7CR4	2697
S8CR1	2709
S8CR2	2681
S8CR3	2699
S8CR4	2727

Tabella 6-26: Valori di massa volumica reale media dei granuli per UG4

6.2.2.2 Curve granulometriche da analisi di laboratorio

Dal grafico delle curve granulometriche dei campioni rappresentativi di UG4 (Figura 6-30) si osserva la presenza di materiali abbastanza omogenei, quali limi con argilla sabbiosa.

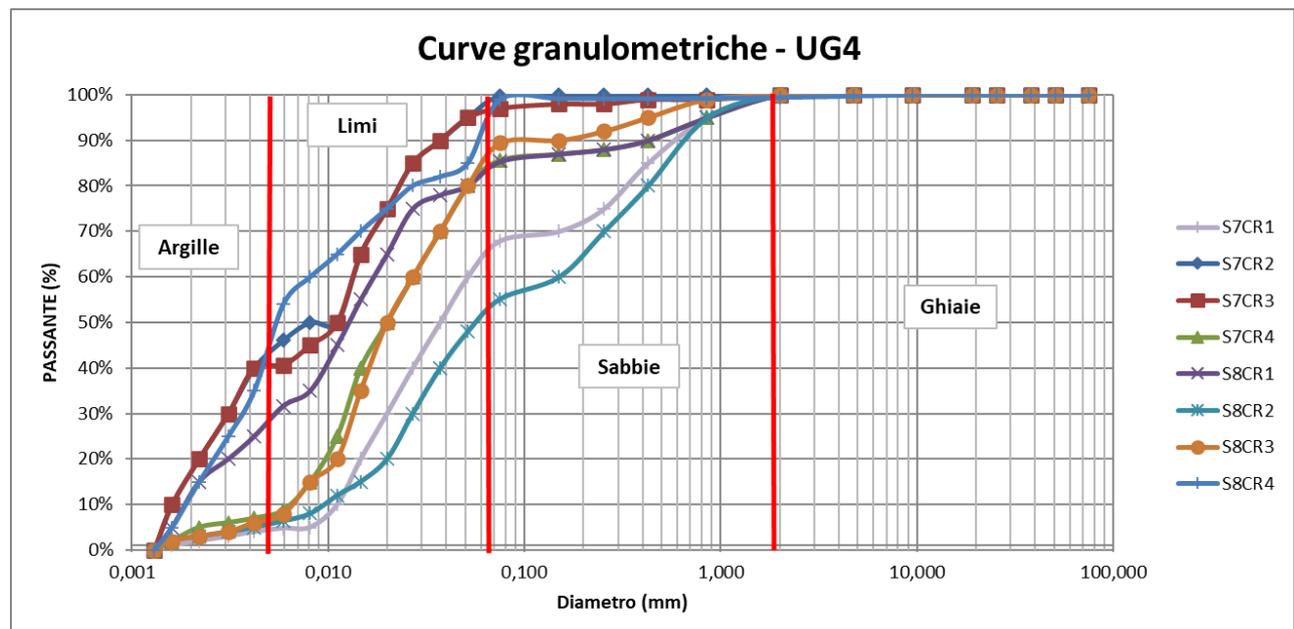
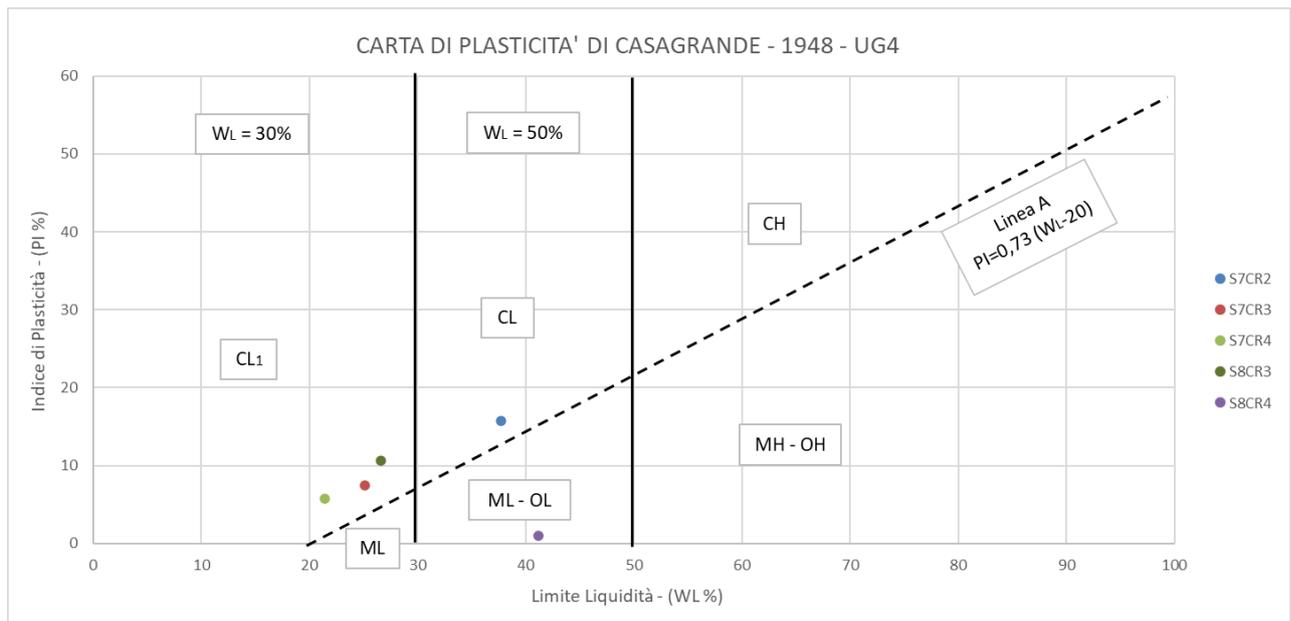


Figura 6-30: Curve granulometriche dei campioni di terreno UG4

6.2.2.3 Carta di Plasticità da analisi di laboratorio

Dalla Carta di Plasticità di Casagrande (Figura 6-31) si osserva che i campioni ricadono principalmente nel campo delle argille inorganiche di bassa plasticità.



DESCRIZIONE	ABBREVIAZIONE
Argille inorganiche di alta plasticità	CH
Limi inorganici di alta compressibilità e argille organiche	MH - OH
Argille inorganiche di media plasticità	CL
Limi inorganici di bassa compressibilità	ML
Limi inorganici di media compressibilità e limi organici	ML - OL
Argille inorganiche di bassa plasticità	CL₁

Figura 6-31: Carta di plasticità di Casagrande (1948) - campioni di terreno UG4

6.2.2.4 Prove geotecniche di laboratorio

Di seguito si analizzano i risultati delle prove di laboratorio (resistenza al taglio diretto ed edometriche) su campioni indisturbati a granulometria fine limoso-argillosa.

Prova di taglio diretto

Dalla prova di taglio diretto si osservano valori molto bassi dei parametri di resistenza (Tabella 6-27).

sondaggio	campione indisturbato	profondità [m]	descrizione	unità geotecnica		valori di picco	
				da stratigrafia sondaggio	UG attribuita	c' [kPa]	φ' [°]
S8	C4SH1	23.5 - 24.0	Argilla con limo	UG4	UG4	16.2	13.2

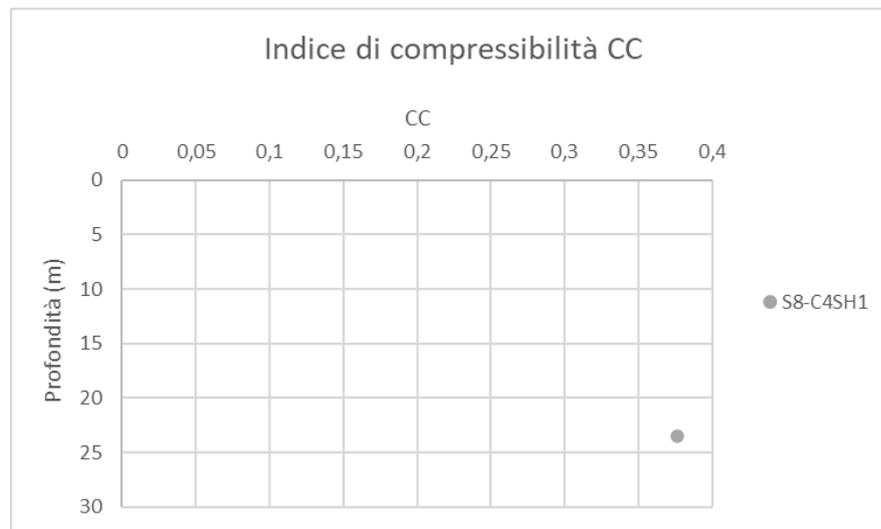
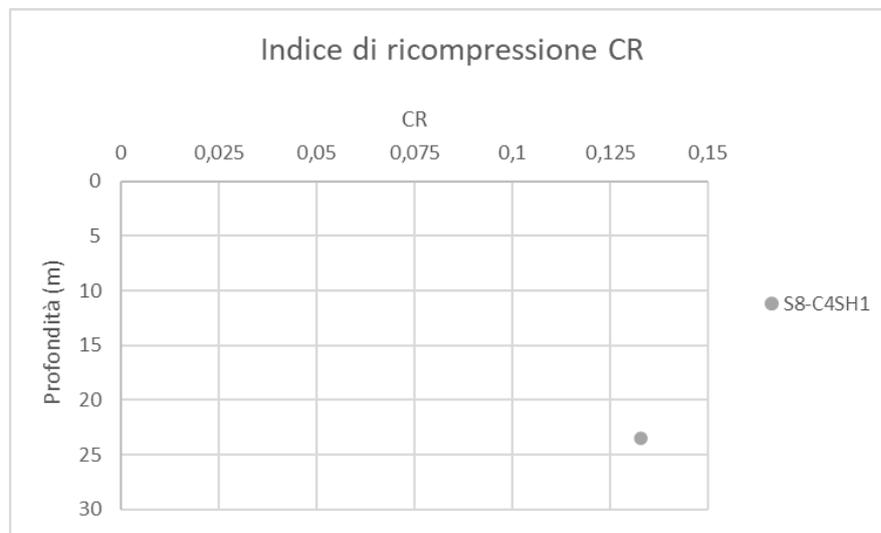
Tabella 6-27: Sintesi dei risultati delle prove di taglio diretto su campioni indisturbati

Prova edometrica

In Tabella 6-28 e Figura 6-32 si riportano i risultati della prova edometrica.

Campione	Profondità (m)	Unità geotecnica	Indice di ricomprensione CR	Indice di compressibilità CC	indice di rigonfiamento CS
S8-C4SH1	23.50-24.00	UG4	0.133	0.376	0.116

Tabella 6-28: Sintesi dei risultati delle prove edometriche su campioni indisturbati



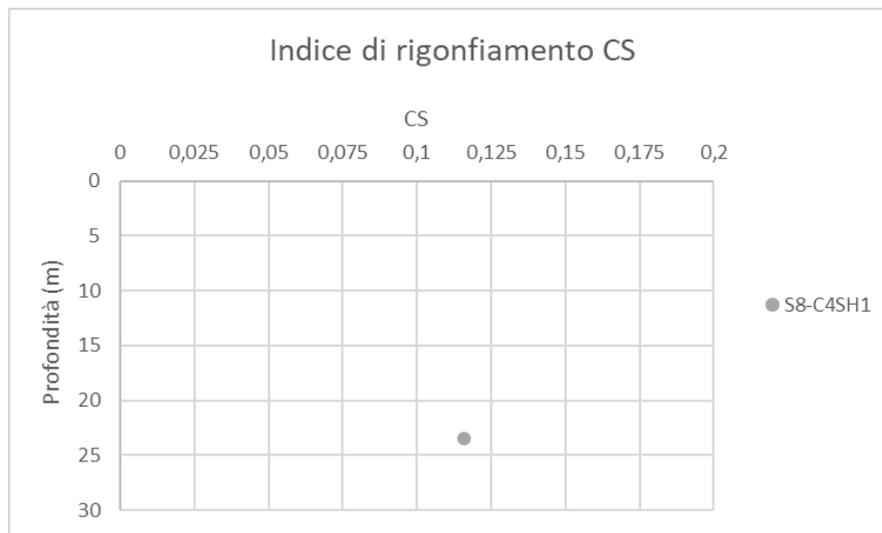


Figura 6-32: Indici di comprimibilità, ottenuti dalle prove edometriche

6.2.2.5 Standard Penetration Test (SPT)

NSPT (valori totali misurati)

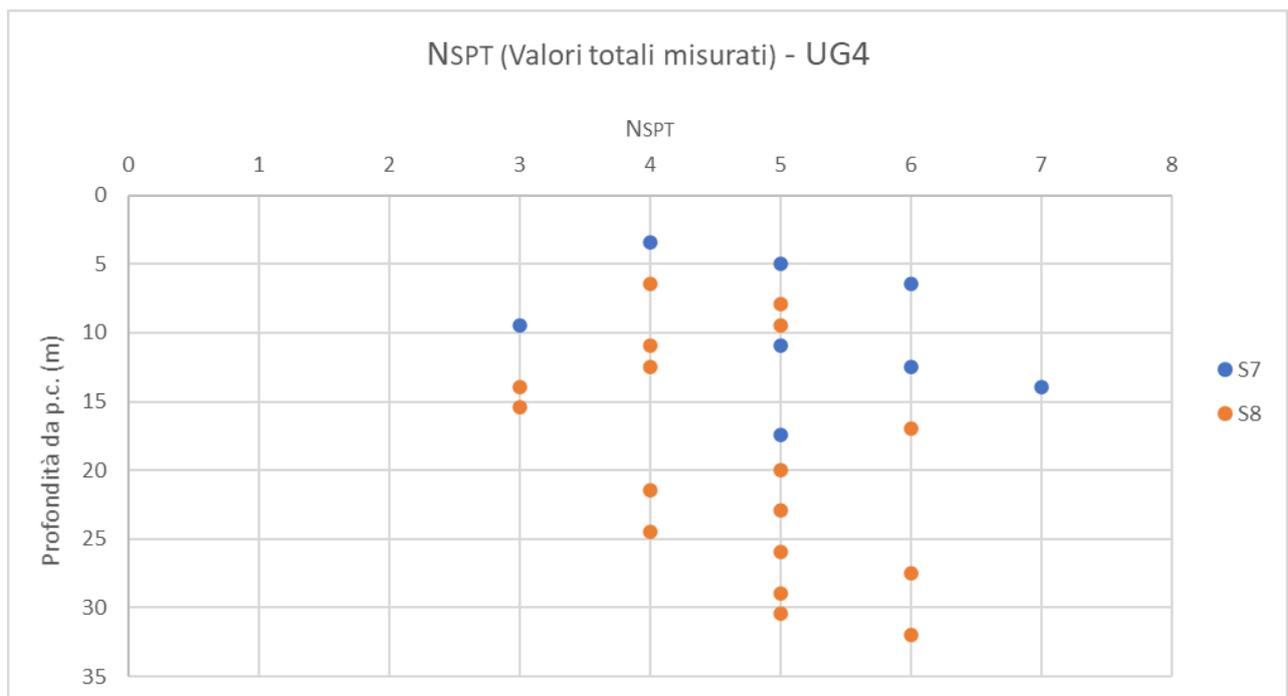


Figura 6-33: Distribuzione dei valori UG4 di NSPT con la profondità

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
NSPT	4	18	3	7	5	5	1.0	3	6	4.5

Tabella 6-29: Valori statistici

Resistenza normalizzata (N_{1,60})

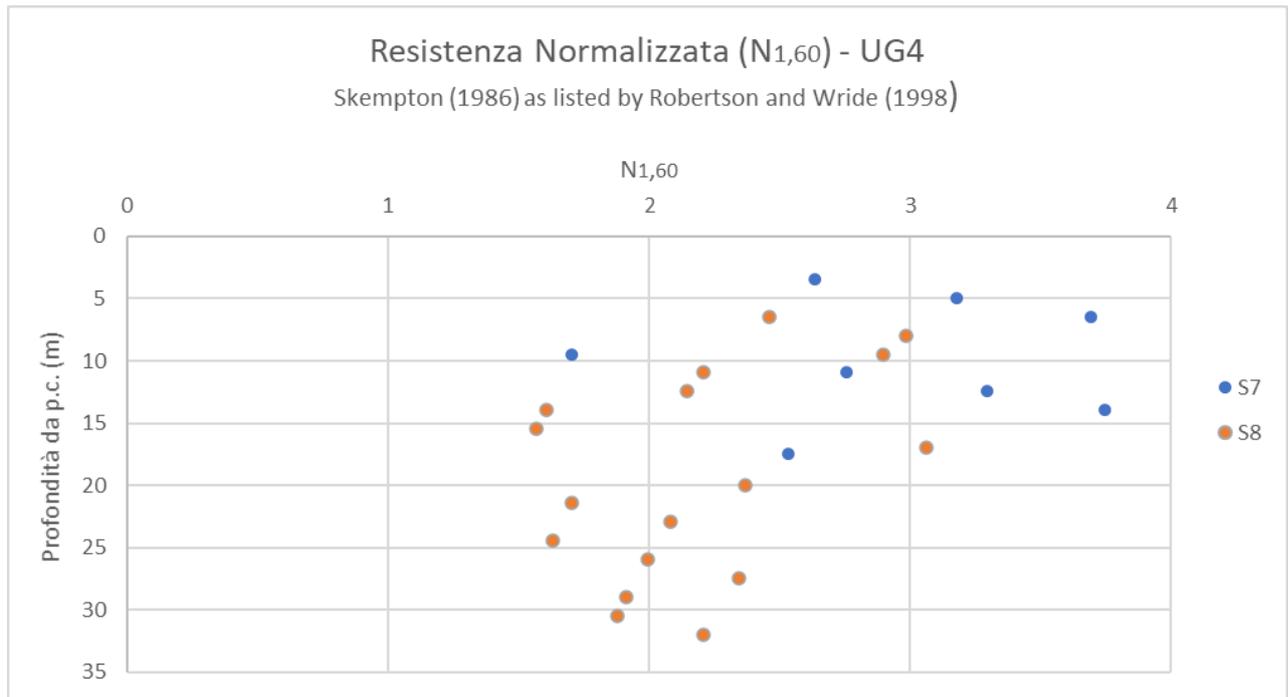


Figura 6-34: Distribuzione dei valori UG4 di N_{1,60} con la profondità

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev.St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
N _{1,60} [n.colpi/30cm]	4	18	2	4	2	2	0.6	2	4	2

Tabella 6-30: Valori statistici

Angolo di attrito (φ)

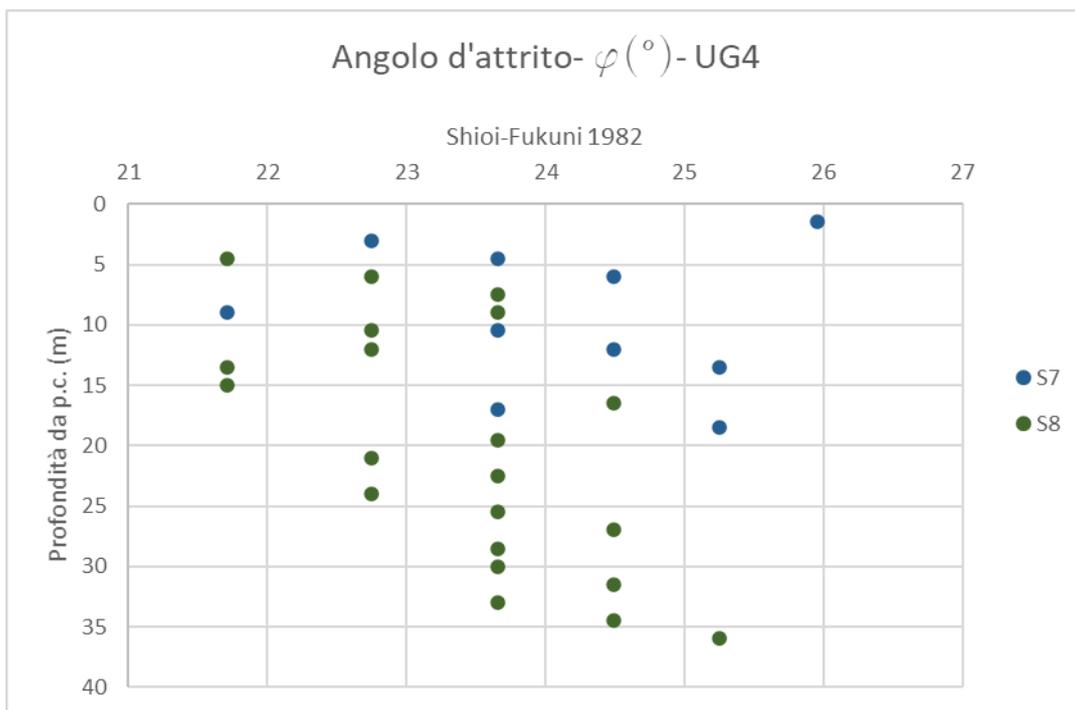


Figura 6-35: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) UG4 in funzione della profondità, secondo Shioi-Fukuni 1982

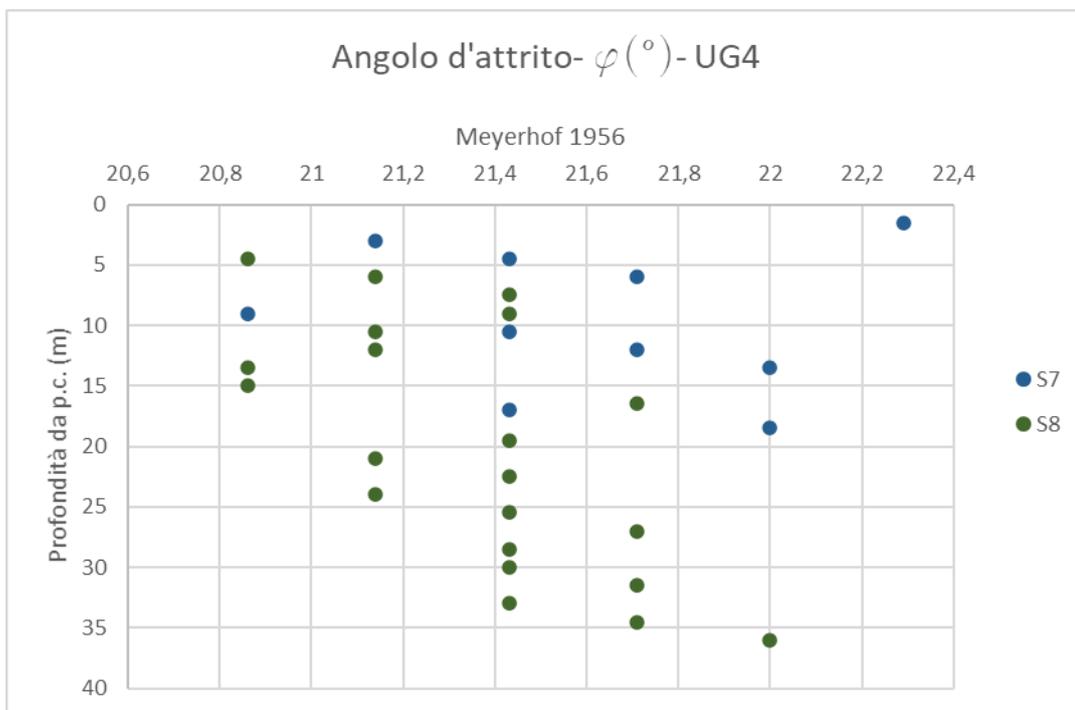


Figura 6-36: Distribuzione dell'angolo d'attrito (φ) UG4 in funzione della profondità, secondo Meyerhof 1956

Per la definizione dei valori statistici del parametro φ si fa riferimento alla correlazione di Meyerhof 1956.

Parametro	UG	Dati (n.)	Min	Max	Media	Mediana	Dev. St.	5° percentile	95° percentile	cautelativo (caratteristico)
φ' [°]	4	30	21	22	21	21	0.4	21	22	21

Tabella 6-31: Valori statistici angolo di attrito φ -UG4

Modulo di Young (E)

Considerata la bassa attendibilità delle correlazioni tra N_{SPT} e modulo di Young equivalente (E) per terreni a granulometria argilloso limosa, si preferisce stimare la rigidezza dell'unità UG4 tramite correlazione analitica con le velocità delle onde di taglio definite dalle prove sismiche (superficie e/o in foro).

Il calcolo del modulo E dalla velocità di propagazione delle onde di taglio (V_S) si basa sulla correlazione:

$$V_S = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}}$$

In cui:

- G_0 è il modulo di rigidezza a taglio a piccolissime deformazioni;
- ρ , è la densità del terreno, correlata al peso dell'unità di volume (γ), $\rho = \gamma / 9.81$.

Ricavando il modulo di rigidezza a taglio dalla relazione inversa:

$$G_0 = (V_S)^2 \cdot \rho$$

Il corrispondente modulo E_0 è dato da:

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu)$$

in cui:

- ν è il coefficiente di *Poisson*;

Nell'utilizzo dei risultati di prove sismiche è necessario tener presente che esse (indipendentemente dalla tipologia) forniscono valori di rigidezza nel campo delle piccolissime deformazioni (deformazione percentuale, $\epsilon \leq 10^{-4}$ %), indicativi di una risposta meccanica elastica lineare.

Nella realtà, i terreni, sottoposti ai carichi delle opere civili ordinarie, tendono a rispondere soprattutto nel campo delle piccole e medie deformazioni ($\epsilon \leq 10^{-2}$ % - 1 %), con valori di rigidezza minori di quelli a piccolissime deformazioni.

Pertanto, è necessario modificare il valore del modulo E calcolato dalle prove sismiche adottando un coefficiente di riduzione secondo la formulazione seguente:

$$E_{oper} = E_0 / \alpha_{oper}$$

Il coefficiente α_{oper} è fissato in base al confronto con tipologie di prove in situ o di laboratorio in grado

di misurare la risposta elastica nel campo deformativo di interesse applicativo (pressiometriche, dilatometriche, triassiali).

In prima approssimazione si può assumere:

- $\alpha_{oper} = 5$, per moduli operativi usati nelle analisi di tipo strutturale;
- $\alpha_{oper} = 10$, per moduli operativi usati nelle analisi geotecniche di cedimento;

Nel settore di ponte di Veduggio si dispone di una singola prova sismica down-hole eseguita in corrispondenza del sondaggio S7 (DH-S7).

Il profilo di V_S e le osservazioni sulla coerenza con la stratigrafia locale sono riportate nella Relazione Sismica [33].

La prova DH-S7 individua due sismostrati caratterizzati dai seguenti valori di V_S :

- da 0 a 4m di profondità dal piano campagna, $V_S = 160$ m/s
- da 4 a 30m, $V_S = 239$ m/s

Assumendo valida, in via cautelativa, la riduzione del modulo attraverso il coefficiente $\alpha_{oper} = 10$, si calcolano i seguenti moduli operativi:

z [m dal pc]	V_S [m/s]	γ [m/s]	G_0 [MPa]	ν [-]	E_0 [MPa]	$E_{op} = E_0/10$ [MPa]
0 - 4	160	19	50	0,25	124	12
4 - 30	239	20	116	0,25	291	29

6.2.2.6 Prove di carico su piastra

Nei pressi dell'area di Veduggio, sono state realizzate le seguenti prove di carico su piastra.

Prova (n°)	Profondità (m)	Cedimento (0,10 cm)	Cedimento (0,80 cm)	Mod reazione K (da N/cm ³)
5	1	0,245	0,455	3,33
6	1	0,291	0,629	2,07
8	1	0,377	0,622	2,86
11	1	0,254	0,466	3,3
12	1	0,174	0,555	1,84
13	1	0,41	0,798	1,8
16	2	0,025	0,096	9,86

6.2.2.7 Caratterizzazione UG4

Unità geotecnica	*Peso / volume	Densità relativa	Modulo di Young	Resistenza al taglio	
	γ_{nat} [kN/m ³]	D_r [%]	E [MPa]	φ [°]	**c [kPa]

UG4	19	19.2	3.0	21	16.2
-----	----	------	-----	----	------

NOTE *: valore stimato da bibliografia

**.: valore caratteristico da prove di taglio diretto

6.3 Settore del Lago di Annone

Lungo la tratta finale dell'intervento, indicativamente tra le progressive km43+000 e km44+300, la SS36 corre parallela alla pista ciclopedonale del Lago di Annone che si trova ubicata tra la sponda nord del lago e la carreggiata nord della SS36.

In questa tratta è stato richiesto da ANAS l'innalzamento della quota della pista, per evitare inondazioni in caso di innalzamento del livello del lago.

Si premette che attualmente è nota la quota del livello idrometrico zero, pari a **224.25m slm** [11], ma non è noto il livello di massima piena. Per l'attuale fase di PD, si assume come quota di salvaguardia della pista ciclabile dal rischio inondazione **225.75m slm**, maggiore di 1.5m rispetto al livello di zero idrometrico. In fase di Progetto Esecutivo, andrà verificata l'idoneità di questa assunzione ed eventualmente adeguata la soluzione progettuale di PD.

In più settori l'attuale quota della pista ciclabile risulta inferiore al livello di zero idrometrico; in Figura 6-39 si osserva la vicinanza del lago alla pista ciclopedonale. Visto il prolungato periodo di siccità dei primi mesi del 2022, il livello del lago è verosimilmente inferiore allo zero idrometrico.



Figura 6-37: Vicinanza del lago alla pista ciclopedonale, nel settore NE (20 aprile 2022).

In alcuni settori la pista ha ceduto, tale condizione è maggiormente visibile lungo le tratte in cui la pista si trova parzialmente in appoggio al rilevato stradale (lato di monte) e parzialmente su terreno naturale (lato di valle).



Figura 6-38: Cedimento della pista ciclopedonale in vicinanza al rilevato della SS36.

Nel settore è stata eseguita un'indagine geologica [12], comprensiva dell'esecuzione di n.17 prove penetrometriche dinamiche continue con penetrometro dinamico superpesante (DPSH).

Gli studi pregressi forniscono solo una descrizione di massima dei terreni del sottosuolo indagati dalle DPSH identificando una formazione limoso sabbiosa (prevalentemente limosa).

6.3.1 Unità Geotecnica UG5

Le prove tipo DPSH indicano l'andamento della resistenza penetrometrica rappresentato nella seguente Figura 6-39, caratterizzato da una maggiore dispersione del dato in prossimità del piano campagna e fino a circa 4m di profondità. Per profondità maggiori, la prova evidenzia una maggiore omogeneità dei materiali attraversati con una resistenza media variabile tra 2 e 6 Ncolpi (DPSH).

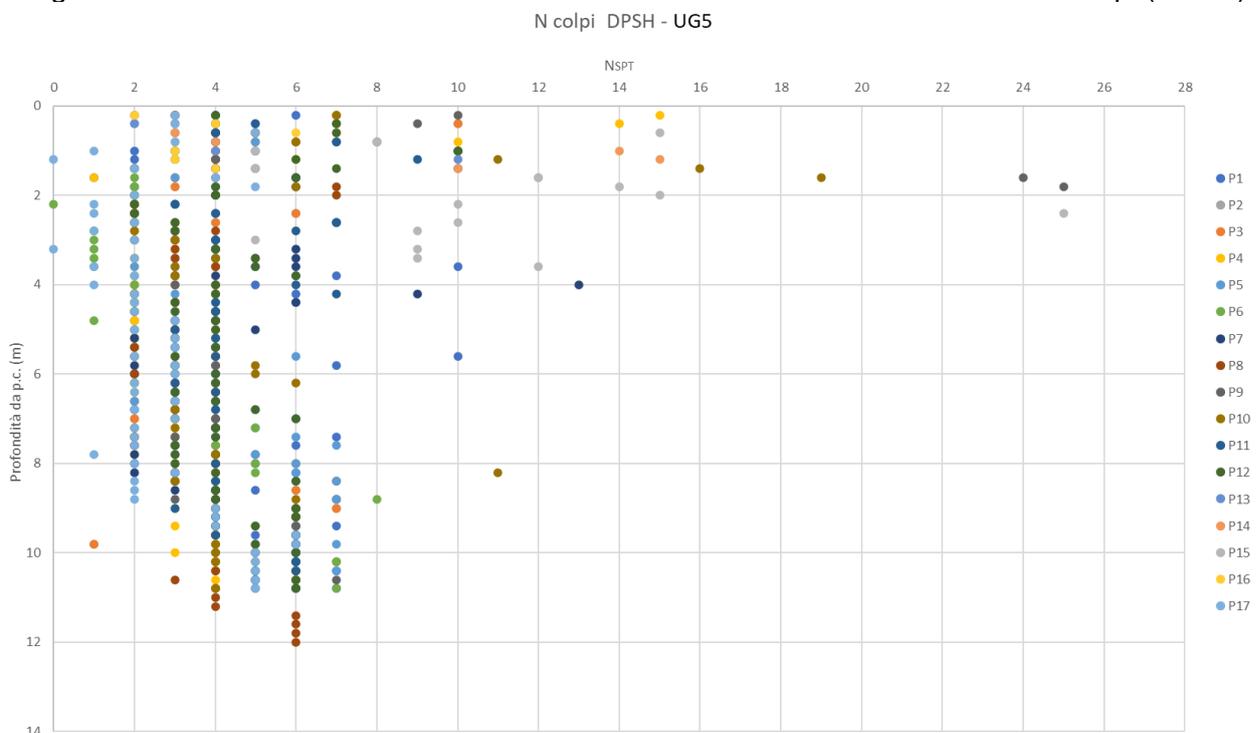


Figura 6-39: UG5: distribuzione dei valori N_{COLPI} con la profondità da prova tipo DPSH

Al fine di utilizzare correlazioni di letteratura ritenute affidabili, la resistenza penetrometrica in prova DPSH è stata tradotta in termini di N_{SPT} equivalenti attraverso la correlazione empirica:

$$N_{SPT} = 1.2 \cdot N_{DPSH}$$

definita dall'esperienza pregressa in sottosuoli ricadenti nell'ambito in esame.

Applicando la correlazione di Shioi-Fukuni (1982) ai valori di N_{SPT} equivalenti si ottiene l'andamento dell'angolo di attrito mostrato nella seguente Figura 6-40:

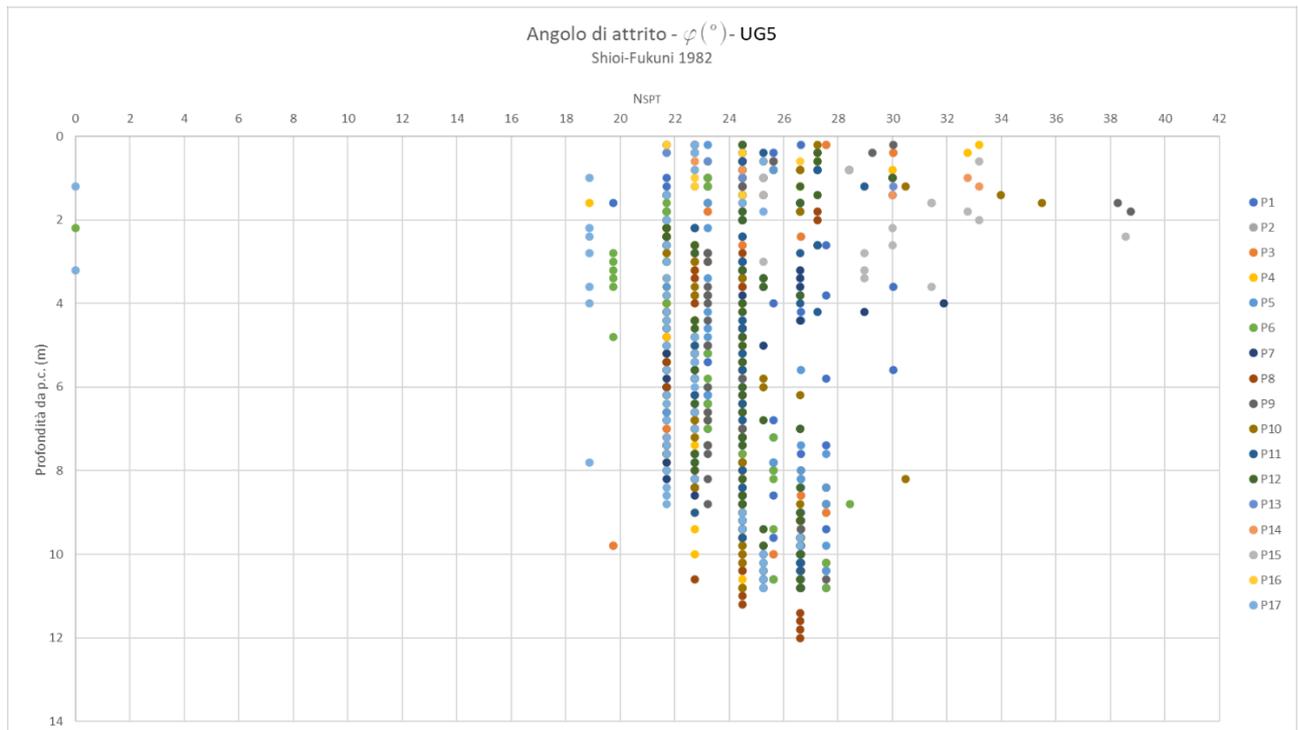


Figura 6-40: UG5: andamento dell'angolo d'attrito da prova DPSH

In tabella si riportano le valutazioni statistiche eseguite sulla messe di dati disponibile e la stima del valore caratteristico di riferimento:

Parametro	Numeri di dati	Min	Max	Media	Mediana	Dev. St.	5° percentile	95° percentile	Valore caratteristico
ϕ' [°]	750	18.9	38.8	24.4	24.5	2.6	21.7	29.0	23.1

Tabella 6-32: Valori statistici angolo di attrito ϕ -UG5

Per sottosuoli a prevalenza limosa la resistenza efficace è caratterizzata anche da una coesione non nulla. In assenza di prove specifiche si considera un intervallo:

$$c' = 10 - 20\text{kPa}$$

raccomandando per la successiva fase progettuale l'esecuzione di prove di taglio diretto su campioni indisturbati al fine di verificare le assunzioni fatte.

Non sono disponibili risultati di prove di deformabilità, né prove sismiche, per cui il valore del modulo di rigidezza (E_{op}) è definito sulla scorta dei valori stimati in contesti geologici simili. Le prove integrative raccomandate per la successiva fase progettuale permetteranno di definire un valore caratteristico adeguato allo specifico sottosuolo in esame.

In via preliminare si assume:

$$E_{op} = 10 - 20 \text{ MPa}$$

Nell'area si dispone anche delle seguenti prove di carico su piastra finalizzate alla stima della costante di sottofondo o modulo di reazione K:

- Prove di carico su piastra

Prova (n°)	Profondità (m)	Cedimento (0,10 cm)	Cedimento (0,80 cm)	Mod reazione K (da N/cm ³)
60	2	0,179	0,672	1,42
63	2	0,434	0,717	2,47
64	2	0,205	0,586	1,84
67	2	0,169	0,511	2,05
68	1	0,257	0,571	2,33
72	1	0,264	0,608	2,03

La sintesi della caratterizzazione geotecnica per il settore del lago di Annone è riportata di seguito:

Unità geotecnica	Peso / volume	Modulo di Young	Resistenza al taglio	
	* γ_{nat} [kN/m ³]	*E [MPa]	ϕ [°]	*c [kPa]
UG5	19	10-20	23	10-20

NOTE *: valore stimato da verificare in successiva fase di progetto

6.4 Allargamento banchina laterale: analisi prove di carico su piastra

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

La morfologia del settore è interessata da forme di origine morenica, per l'ubicazione dei pozzetti all'interno della carta geologica, vista l'estensione dell'area di rimanda alla Carta Geologica (T00GE01GEOCG02 foglio 2 di 5; T00GE01GEOCG03 foglio 3 di 5; T00GE01GEOCG04 foglio 4 di 5; T00GE01GEOCG05 foglio 5 di 5).

In questo settore dal progetto C.A.R.G., si individuano le seguenti formazioni:

- Unità di Minoprio (BMI): depositi gluvio-glaciali, ghiaie e ghiaie sabbiose massive, diamicton massivi a supporto clastico. Till di ablazione: ghiaie massive. Till di alloggiamento: diamicton massivi. Till di Colata: limi massivi. Depositi glaciolacustri: limi argillosi laminati, sabbie fini limose e limi sabbiosi, laminati.
- Sintema di Cantù (LCN): depositi fluvio-glaciali, glaciali e di contatto glaciali, deltizi e lacustri. Morfologie in genere ben conservate con morene a fianchi ripidi e ben rilevate rispetto alle zone circostanti. I depositi fluvio-glaciali costituiscono spesso i terrazzi e le piane morfologicamente più depresse all'interno delle principali valli.
- Sintema del PO (POI): depositi sabbioso-ghiaiosi fluviali e di conoide dominati da debris flow; argille e torbe di deposizione lacustre. Alterazione assente. Morfologia ben espressa nelle piane fluviali dei principali corsi d'acqua.

6.4.2 Sintesi dei dati d'indagine

In Tabella 6-33 si riassumono le informazioni stratigrafiche derivate dai pozzetti esplorativi.

P	Str.1	Prof. (m)	Str.2	Prof. (m)	Str.3	Prof. (m)	Str.4	Prof. (m)	Str.5	Prof. (m)
1	NON ESEGUITO									
2	NON ESEGUITO									
3	Terreno vegetale	0,1	Ghiaia sabbiosa	0,4	Sabbia limosa con ciottoli	2				
4	Terreno vegetale	0,3	Sabbia limosa	1,6	Argilla limosa	2				
5	Terreno vegetale	0,1	Argilla limosa	1	Sabbia limosa	2				
6	Terreno vegetale	0,3	Argilla limosa	2						
7	Terreno vegetale	0,6	Sabbia limosa	2						
8	Terreno vegetale	0,4	Sabbia con limo	1	Argilla limosa	2				
9	NON ESEGUITO									
10	Terreno vegetale	0,5	Sabbia limosa	2						
11	Terreno vegetale	0,1	Argilla limosa	0,7	Sabbia limosa	2				
12	Terreno vegetale	0,4	Sabbia limosa	0,8	Argilla sabbiosa	2				
13	Terreno	0,5	Sabbia	2						

	vegetale		limosa							
14	Sabbia	1,8	Argilla sabbiosa	2						
15	Terreno vegetale	0,4	Sabbia limosa	2						
16	Terreno vegetale	0,1	Argilla sabbiosa	2						
17	Terreno vegetale	0,3	Sabbia limosa	0,9	Sabbia argillosa	2				
18	Terreno vegetale	0,1	Sabbia	0,4	Limo	0,7	Argilla con limo	2		
19	Terreno vegetale	0,5	Sabbia limosa	0,8	Sabbia con limo	2				
20	Terreno vegetale	0,2	Sabbia limosa	0,6	Argilla con sabbia e limo	2				
21	Terreno vegetale	0,8								
22	Terreno vegetale	0,4	Sabbia con limo	0,6	Argilla con limo	2				
23	Terreno vegetale	0,5	Ghiaia sabbiosa	0,9	Sabbia con riporto	1,2	Limo con riporto	1,7	Argilla con sabbia	2
24	Terreno vegetale	0,5	Sabbia con limo	1,3	Argilla con limo	2				
25	Terreno vegetale	0,5	Sabbia con riporto	0,8	Argilla limosa	2				
26	Terreno vegetale	0,3	Sabbia limosa	1,2	Argilla limosa	2				
27	Terreno vegetale	0,1	Sabbia con limo	0,6	Sabbia con limo debolmente argillosa	2				
28	Terreno vegetale	0,1	Argilla con sabbia	0,5	Argilla	2				
29	Terreno vegetale	0,1	Sabbia	0,5	Blocchi natura arenitica	0,8				
29 bis	Terreno vegetale	0,1	Sabbia	0,5	Blocchi natura arenitica	0,8				
30	Terreno vegetale	0,4	Sabbia limosa	0,7						
31	Terreno vegetale	0,8	Argilla con sabbia	0,5	Argilla	2				
32	Terreno vegetale	0,1	Argilla limosa	0,6	Sabbia argillosa	2				
33	Terreno vegetale	0,2	Sabbia con argilla	2						
34	Terreno vegetale	0,3	Sabbia limosa	0,6	Argilla limosa	2				
35	Terreno vegetale	0,1	Sabbia con limo	0,3	Argilla con sabbia e limo	2				
36	Terreno vegetale	0,2	Sabbia limosa	2						
37	Terreno	0,1	Argillosa	0,2	Sabbia	2				

	vegetale		limosa		limosa deb argillosa					
38	Terreno vegetale	0,2	Sabbia con detriti	2						
39	Terreno vegetale	0,1	Sabbia	1	Argilla sabbiosa	2				
40	Terreno vegetale	0,3	Ghiaia sabbiosa	0,4	Sabbia limosa	2				
41	Terreno vegetale	0,4	Sabbia limosa	1,6						
42	Terreno vegetale	0,6	Sabbia con limo	1,6			Presenza acqua			
43	Terreno vegetale	0,1	Sabbia con limo	1,6						
44	Terreno vegetale	0,2	Sabbia	1,4	Blocchi natura arenitica	2				
45	Terreno vegetale	0,4	Sabbia limosa	1,4	Argilla con sabbia	2				
46	Terreno vegetale	0,2	Argilla	0,4	Sabbia con riporto	1	Blocchi natura arenitica	2		
47	Terreno vegetale	1	Sabbia	2						
48	Terreno vegetale	0,6	Sabbia limosa argillosa	2						
49	Terreno vegetale	0,2	Argilla sabbiosa con limo	2						
50	Terreno vegetale	0,3	Sabbia limosa	0,6	Argilla sabbiosa	2				
51	Terreno vegetale	0,6	Argilla limosa	2						
52	Terreno vegetale	0,8	Sabbia con limo	1,4	Argilla con sabbia	2				
53	Terreno vegetale	0,1	Sabbia con limo	0,3	Argilla limosa	2				
54	Terreno vegetale	0,5	Argilla limosa	2						
55	Terreno vegetale	0,1	Ghiaia sabbiosa	0,6	Argilla con sabbia	2				
56	Terreno vegetale	0,4	Argilla limosa	1	Argilla con sabbia	2				
57	Terreno vegetale	0,4	Sabbia limosa	1	Argilla limosa	2				
58	Terreno vegetale	0,2	Sabbia con limo	1,2	Argilla	1,7	Argilla limosa	2		
59	Terreno vegetale	0,5	Argilla limosa	0,9	Sabbia argillosa	2				
60	Terreno vegetale	0,8	Sabbia con limo	2						
61	Terreno vegetale	0,4	Argilla limosa	2						
62	Terreno vegetale	0,1	Ghiaia sabbiosa	0,4	Argilla con limo e sabbia	2				
63	Terreno vegetale	0,4	Limo sabbioso	2						
64	Terreno vegetale	0,1	Argilla con sabbia e limo	2						
65	Terreno vegetale	0,5								

66	Terreno vegetale	0,5	Sabbia con argilla	2						
67	Terreno vegetale	1	Argilla limosa sabbiosa	1,5						
68	Terreno vegetale	0,1	Argilla limosa sabbiosa	2						
69	NON ESEGUITO									
70	Terreno vegetale	0,1	Argilla limosa ghiaiosa	2						
71	NON ESEGUITO									
72	Conglomerato bituminoso	0,1	Sabbia argillosa	1,2						
73	NON ESEGUITO									
74	Terreno vegetale	0,5	Argilla limosa sabbiosa	2						
75	NON ESEGUITO									
76	NON ESEGUITO									
77	Terreno vegetale	0,4	Sabbia argillosa limosa	2						

Tabella 6-33: Sintesi delle stratigrafie (str.) pozzetti esplorativi "P"

In Tabella 6-34 si riassumono i dati di prove di carico su piastra eseguite nei pozzetti esplorativi.

Prova (n°)	Profondità (m)	Cedimento (0,10 cm)	Cedimento (0,80 cm)	Mod reazione K (da N/cm ³)
3	1	0,171	0,38	3,35
4	1	0,204	0,533	2,13
5	1	0,245	0,455	3,33
6	1	0,291	0,629	2,07
8	1	0,377	0,622	2,86
11	1	0,254	0,466	3,3
12	1	0,174	0,555	1,84
13	1	0,41	0,798	1,8
16	2	0,025	0,096	9,86
17	1	0,277	0,578	2,33
20	1	0,309	0,648	2,06
21	1	0,085	0,2	6,09
22	1	0,213	0,497	2,46
23	2	0,129	0,243	6,14
24	1	0,189	0,54	1,99
31	2	0,111	0,376	2,64
32	2	0,097	0,312	3,26
33	2	0,113	0,281	4,17
35	2	0,224	0,735	1,37
36	2	0,313	0,754	1,59
37	2	0,426	0,907	1,46
41	1	0,185	0,5	2,22
42	2	0,167	0,514	2,02
43	2	0,28	0,482	3,47
45	2	0,1	0,682	1,2
46	2	0,159	0,381	3,15
47	2	0,172	0,302	5,38

48	2	0,05	0,548	1,36
49	2	0,073	0,176	6,8
51	2	0,025	0,537	1,37
53	2	0,188	0,392	3,43
55	2	0,29	0,794	1,39
56	2	0,411	0,6	3,7
57	2	0,257	0,526	2,6
58	2	0,306	0,709	1,74
60	2	0,179	0,672	1,42
63	2	0,434	0,717	2,47
64	2	0,205	0,586	1,84
67	2	0,169	0,511	2,05
68	1	0,257	0,571	2,33
72	1	0,264	0,608	2,03
77	1	0,28	0,737	1,53

Tabella 6-34: Sintesi dei risultati delle prove di carico su piastra

7 INDICAZIONI PER LA SUCCESSIVA FASE DI PROGETTO ESECUTIVO

Si premette che ad oggi la campagna d'indagine geognostica è in corso nei settori del Ponte Giussano, del Ponte Capriano e dello Svincolo Costa Masnaga; questi dati di indagine dovranno essere utilizzati nella successiva fase di progetto, per la quale si evidenzia la necessità delle seguenti attività:

- vista la carenza di dati piezometrici e pozzi nell'area di progetto, a parte per il Comune di Giussano, si raccomanda il monitoraggio dei piezometri installati in fase di PD, unitamente al monitoraggio dei pozzi idrici, per aumentare il numero di informazioni di carattere idrogeologico
- nella zona di Veduggio è stata definita l'Unità Geotecnica 4 (UG4), costituita prevalentemente da limi con argilla sabbiosa. I dati di prova forniscono valori molto bassi dei parametri geotecnici. Si raccomanda l'esecuzione di prove penetrometriche statiche (CPTU), per affinare la caratterizzazione dei terreni di fondazione
- nei settori attualmente non indagati dal punto di vista sismico dal Km 31.650 al Km 44.300, dove nella Carta Sismica (T00GE00GEOCS01 foglio 1 di 2; T00GE00GEOCS02 foglio 2 di 2) sono presenti terreni potenzialmente liquefacibili indicati con la sigla Z2, si dovranno eseguire indagini sismiche (MASW e HVSR) finalizzate ad analisi di risposta sismica locale e sondaggi a carotaggio continuo con installazione di piezometro con prelievo di campioni indisturbati per analisi di laboratorio, per valutare la pericolosità da liquefazione.
- nel settore della pista ciclopedonale del Lago di Annone si raccomanda l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo con esecuzione di indagine down-hole, prove SPT (ogni 1.5m di approfondimento), prelievo di campioni per prove di laboratorio (rimaneggiati ed indisturbati) e l'esecuzione di prove CPTU; le prove SPT permetteranno di verificare anche la correlazione attualmente adottata per l'interpretazione delle prove penetrometriche dinamiche Scpt con penetrometro superpesante (DPSH) [12].

8 APPENDICE: UBICAZIONE POZZETTI ESPLORATIVI

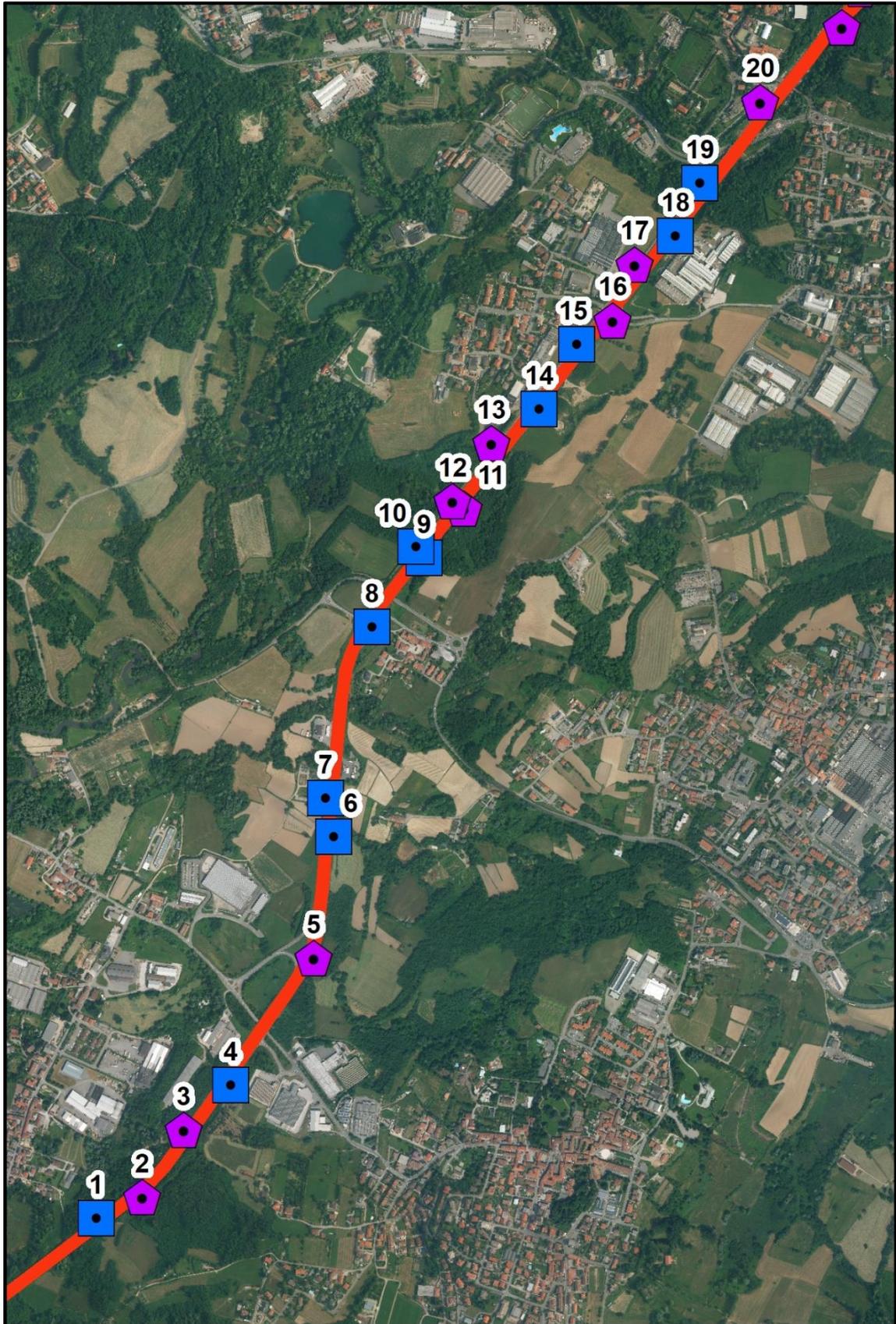


Figura 8-1: Ubicazione pozzetti esplorativi (da 1 a 20); in viola con prova di carico su piastra.

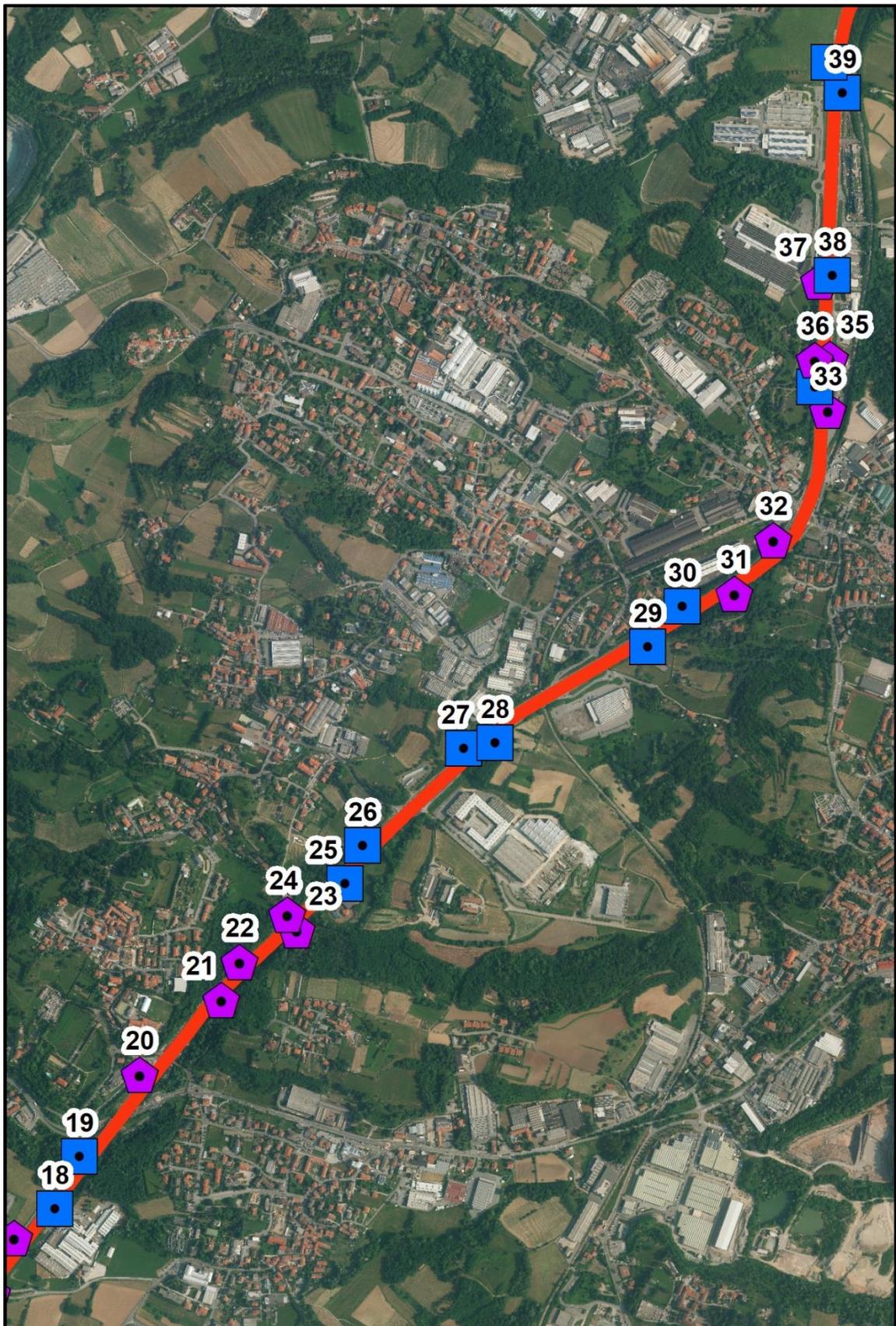


Figura 8-2: Ubicazione pozzetti esplorativi (da 18 a 39); in viola con prova di carico su piastra.

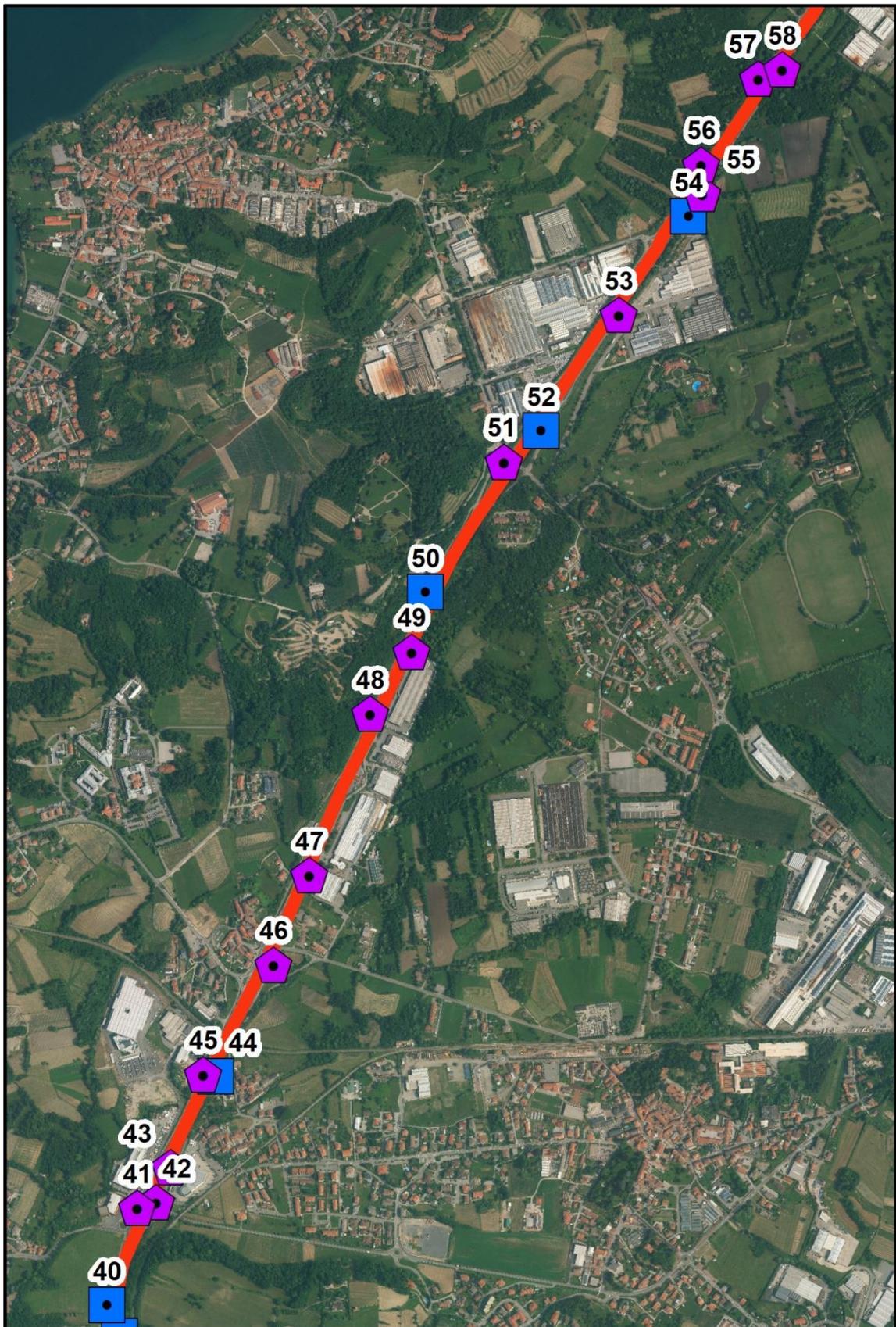


Figura 8-3: Ubicazione pozzetti esplorativi (da 40 a 58); in viola con prova di carico su piastra.

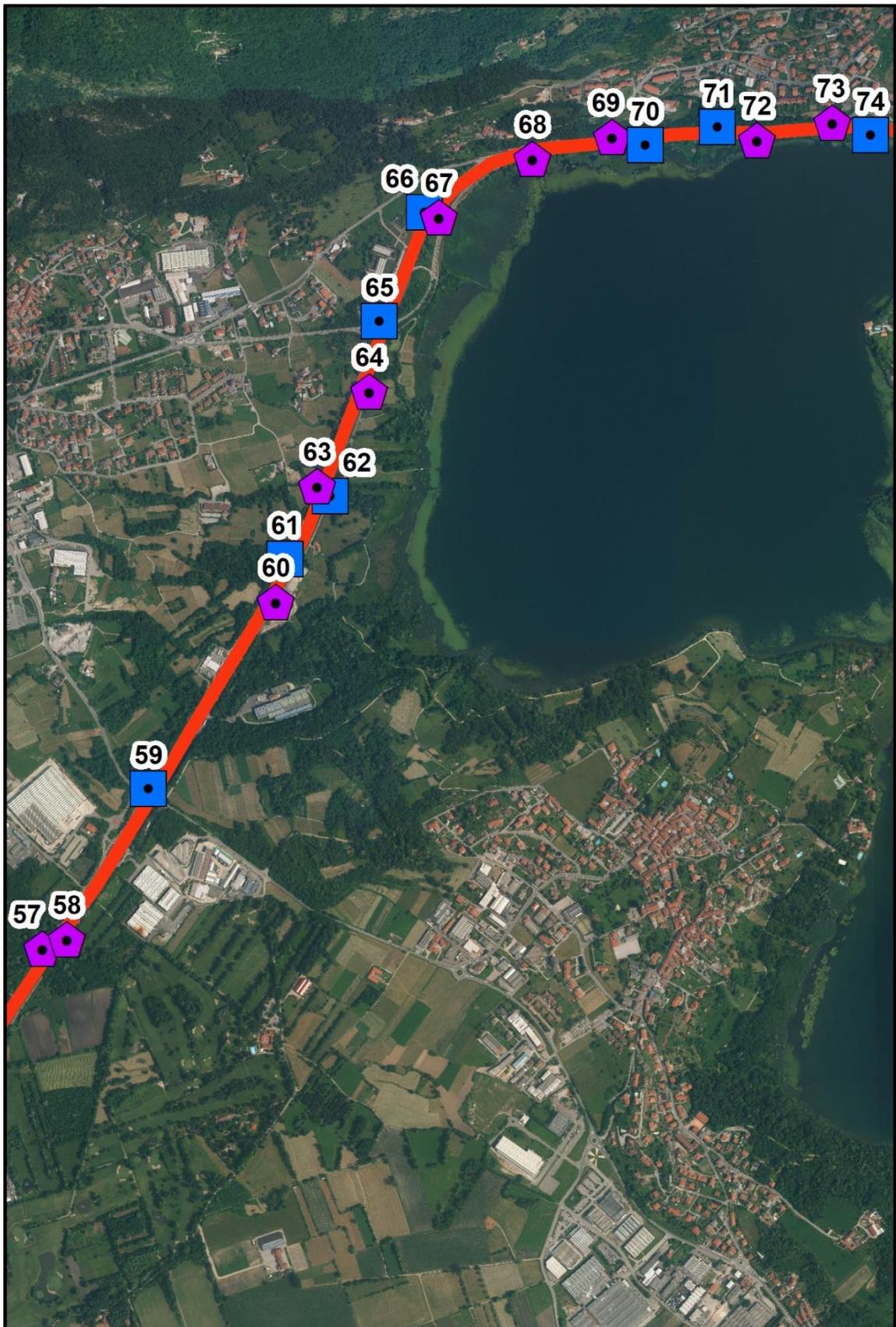


Figura 8-4: Ubicazione pozzetti esplorativi (da 57 a 74); in viola con prova di carico su piastra.