

**PNC - PNRR: Piano Nazionale Complementare al Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza nei territori colpiti dal sisma 2009-2016, Sub-misura A4, "Investimenti sulla rete stradale statale"**

**S.S. 502 - S.S. 78 - Belforte del Chienti - Sarnano - Lavori di adeguamento e/o miglioramento tecnico funzionale della sezione stradale in t.s. e potenziamento delle intersezioni. 2° Stralcio. Cod. SIL ACNOAN00114 - Codice CUP F71B22001170001**

PROGETTAZIONE DEFINITIVA, ESECUTIVA ED ESECUZIONE LAVORI

cod. **PSL10/22**

**PROGETTO DEFINITIVO**

RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Prof. Ing. Franco BRAGA  
Ordine Ingegneri di Roma n. 7072/A

GEOLOGO:

Dott. Geol. Andrea RONDINARA  
Albo regionale del Lazio n. 921

COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Davide TALIA  
Ordine Ingegneri di Roma n. 29001/B

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

Dott. Ing. Marco MANCINA

PROTOCOLLO

DATA

RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI IMPRESE:

Mandataria



Mandanti



RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO PROGETTISTI:

Mandataria



Mandanti



Dott. Geol. Andrea Rondinara

Prestatore del servizio di PMA



**STUDI E INDAGINI**  
**Geotecnica**  
Relazione geotecnica generale

CODICE PROGETTO

NOME FILE

T01SG00SISRE01A.dwg

REVISIONE

SCALA:

PROGETTO LIV. PROG. N. PROG.  

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

CODICE ELAB. **T01SG00SISRE01**

**A**

-

**A**

EMISSIONE

Agosto 2023

Rosa

Orsini

Braga

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

S.S. 502 – S.S. 78 Belforte del Chienti – Sarnano – Lavori di adeguamento e/o miglioramento tecnico funzionale della sezione stradale in t.s. e potenziamento intersezioni – 2° stralcio. Cod. SIL ACNOAN00114 - Codice CUP F71B22001170001 CIG 95039446B1

**PROGETTO DEFINITIVO**

**Relazione geotecnica generale**

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE ESEGUITE.....</b>	<b>7</b>
	4.1 SONDAGGI A CARTOTAGGIO CONTINUO .....	9
	4.2 PROVE GEOTECNICHE IN FORO.....	10
	4.2.1 CRITERI DI INTERPRETAZIONE.....	10
	4.2.2 RILIEVI DEI LIVELLI DI FALDA .....	12
	4.3 INDAGINI GEOFISICHE .....	14
	4.3.1 PROVE SISMICHE IN FORO (DOWN-HOLE) .....	14
	4.3.2 MISURE DI RUMORE SISMICO AMBIENTALE (METODO HVSR) .....	15
	4.3.3 INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE IN ONDA P E IN ONDA S .....	15
	4.3.4 CRITERI DI INTERPRETAZIONE DELLE PROVE GEOFISICHE .....	15
	4.4 PROVE DI LABORATORIO .....	17
<b>5</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOTECNICO .....</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>DETERMINAZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEI PARAMETRI GEOTECNICI .....</b>	<b>20</b>
	6.1 UG2 - UNITÀ GEOTECNICA 2 .....	20
	6.1.1 Peso dell'unità di volume.....	20
	6.1.2 Angolo di resistenza al taglio.....	21
	6.1.3 Coesione efficace .....	22
	6.1.4 Caratteristiche di deformabilità .....	23
	6.2 UG4 – UNITÀ GEOTECNICA 4.....	24
	6.2.1 Peso dell'unità di volume.....	24
	6.2.2 Angolo di resistenza al taglio.....	25
	6.2.3 Coesione efficace .....	26
	6.2.4 Caratteristiche di deformabilità .....	27
<b>7</b>	<b>SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI.....</b>	<b>28</b>

## 1 PREMESSA

Il presente documento costituisce la relazione geotecnica generale nell'ambito dei lavori di adeguamento e/o miglioramento tecnico funzionale della sezione stradale in T.S. e potenziamento intersezioni lungo la S.S. n. 502 "Cingoli" – S.S.n. 78 "Picena" – Belforte del Chienti – Sarnano (Lotto 1) – 2° stralcio.

I lavori ricompresi nel 2° stralcio fanno parte del quadro delle iniziative inquadrate nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR).

Per tutti i dettagli sull'opera si rimanda alla visione degli elaborati grafici e della "Relazione descrittiva" Doc. T01VI01STRRE01.

Il presente documento è focalizzato all'individuazione e alla caratterizzazione delle unità geotecniche presenti lungo lo sviluppo del tratto oggetto dell'adeguamento e/o miglioramento tecnico funzionale della sezione stradale in T.S. e potenziamento intersezioni lungo la S.S. n. 502 "Cingoli" – S.S.n. 78 "Picena" – Belforte del Chienti – Sarnano (Lotto 1) – 2° stralcio. In particolare, nel seguito verranno sviluppati ed esaminati i seguenti aspetti:

- Descrizione delle campagne di indagini eseguite;
- Caratterizzazione geotecnica delle unità geotecniche individuate lungo il tracciato in esame;

## 2 **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

- D.M. 17/01/2018 Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”;
- Circolare 21/01/2019 “Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17/01/2018;
- UNI EN 1997-1:2005 Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali. Versione in lingua italiana della norma europea EN1997-1;
- UNI EN 1997-1:2005 Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo. Versione in lingua italiana della norma europea EN1997-2;
- AGI – Associazione Geotecnica Italiana (2005) “Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica”.

### 3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

L'area oggetto della presente indagine, secondo un'analisi omogenea dal punto di vista del rilievo, dell'assetto morfologico complessivo e della posizione geografica precedentemente presa in considerazione, effettuata a partire dalla Carta Geologica delle Marche (1: 250.000) e dalla Carta Geologica d'Italia (1:100.000), appartiene alla regione fisiografica "B - Fasce di rilievi collinari comprese tra catene montuose o adiacenti ad esse" [Sistema Ba], caratterizzata dalla presenza in substrato di alternanze di termini arenacei, arenaceo-pelitici e pelitico, depositi nel Miocene fittamente stratificati e con possibili strutture sinclinaliche.

I depositi superficiali sono in genere argilloso-limoso-sabbiosi di spessore cospicuo (da qualche metro fino a 10 m) e, lungo le valli fluviali, sono presenti depositi alluvionali terrazzati, prevalentemente ghiaiosi, di discreta estensione e potenza.

Da un'analisi della Carta Geologica d'Italia, Foglio 124 "Macerata" (Figura 1), è possibile notare che l'area in cui ricade il territorio comunale di Caldarola, rappresentato in rosso, presenta due face di terreni differenti la prima relativa alla zona montuosa od alto collinare e la regione fisiografica denominata "Massicci e dorsali montuose – Regione A" mentre la porzione orientale, rappresentata nella carta da tonalità marroni, presenta per lo più caratteristiche tipiche di "Fasce di rilievi collinari comprese tra catene montuose o adiacenti ad esse – Regione B".

In particolare, l'area montuoso -altocollinare occidentale è costituita per lo più da alternanza di calcari, calcari marnosi, marne e calcari selciferi depositi nell'intervallo Giurassico superiore - Eocene medio e rappresentati maggiormente dalle unità della Maiolica, Scaglia rossa e Scaglia Cinerea.

Il settore orientale, dove è ubicato il capoluogo, strutturalmente rappresenta una zona di raccordo tra i rilievi montuosi calcarei e/o calcareo-marnosi del settore occidentale e parte della depressione miocenica, il cui nucleo è presente ancora più ad est del territorio comunale di Caldarola. In questo settore sono presenti alternanze di marne calcaree, marne argillose, calcari e calcari marnosi depositi nell'intervallo Eocene medio (41,2 Ma) - Tortoniano (11,63 Ma) e da alternanze di termini arenacei, arenaceo pelitici e pelitico-arenacei, rappresentate nella Carta Geologica d'Italia dalle unità litologiche del Bisciario, dallo Schlier, dalle Molasse inferiori e dalla Formazione gessoso-solfifera.

Entrambi i settori possono presentare una copertura continentale costituita da depositi superficiali argilloso-limoso-sabbiosi di spessore cospicuo in corrispondenza di scarpate o vallecicole concave, e depositi alluvionali terrazzati prevalentemente ghiaiosi, di discreta estensione e potenza, lungo le valli fluviali.

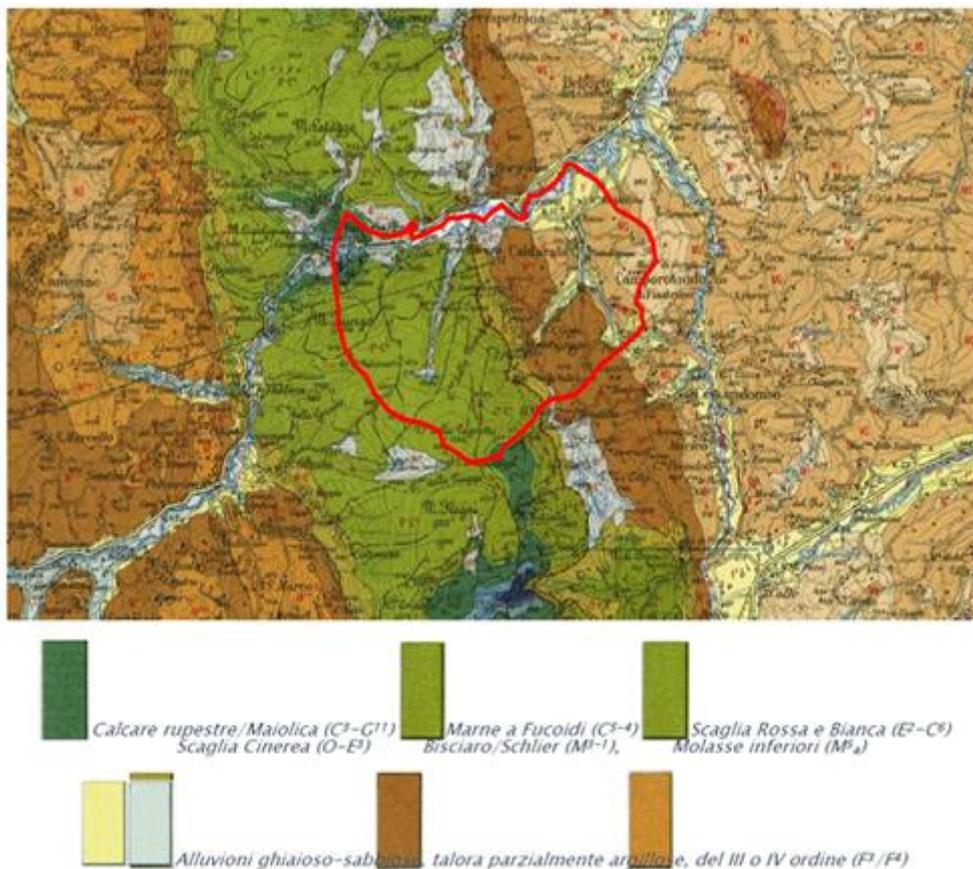


Figura 1: Carta Geologica d'Italia – Foglio 124 "Macerata". In rosso, delimitazione del territorio comunale di Caldarola

## 4 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE ESEGUITE

Nel corso dell'iter progettuale e approvativo del progetto è stata eseguita un'unica campagna d'indagini (2022) commissionata da ANAS S.p.A. Struttura territoriale Marche – Via Isonzo, 15 – 60124 Ancona. È in corso una campagna di indagini integrativa i cui risultati al momento non sono noti.

Durante la campagna di indagini eseguita dalla Albanese Perforazioni, Ripalimosani (CB), sono state effettuate le seguenti lavorazioni:

- n.7 sondaggi geognostici a carotaggio continuo;
- n. 32 cassette di catalogazione di carote di terreni estratte nel corso dei sondaggi;
- n. 29 SPT a fondo foro;
- n. 5 piezometri installati;
- n. 2 indagine sismica in foro "Down Hole";
- n. 2 stendimento sismico a rifrazione;
- n. 3 misurazioni microtremori tecnica HVSR;
- n. 10 campioni di terreno indisturbati prelevati;
- n. 17 campioni di terreni rimaneggiati prelevati;
- n. 28 campioni di terreno analizzati per dati geomeccanici;
- n. 5 campioni di terreno analizzati per analisi ambientali;
- n. 5 pozzetti esplorativi per campioni ambientali;

Il posizionamento delle prove geognostiche e geofisiche sopra indicate lungo lo sviluppo del tratto del tracciato oggetto dell'adeguamento è riportato nelle seguenti Figura 2, Figura 3 e Figura 4.

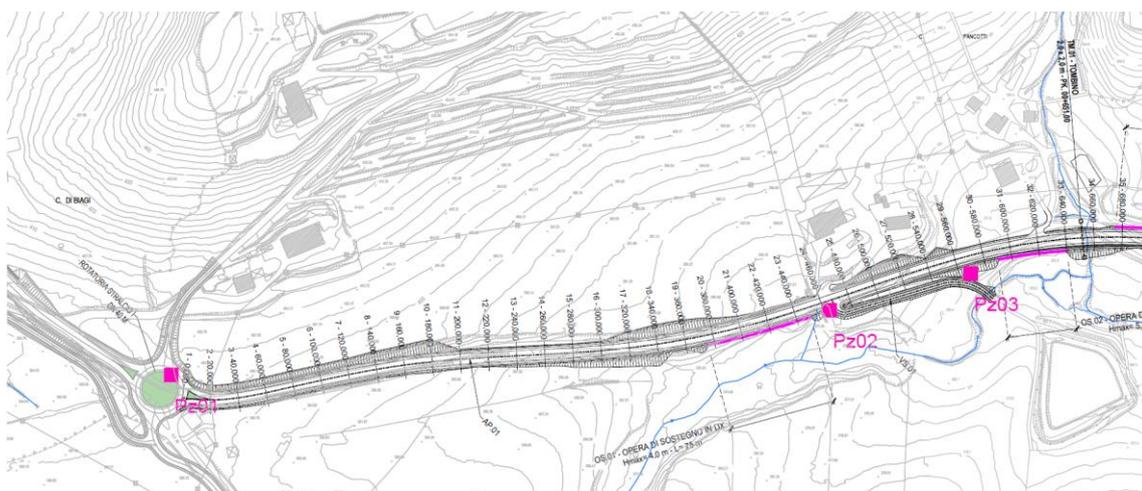


Figura 2: Planimetria di progetto con ubicazione indagini geognostiche – 1 di 3

**PROGETTO DEFINITIVO**

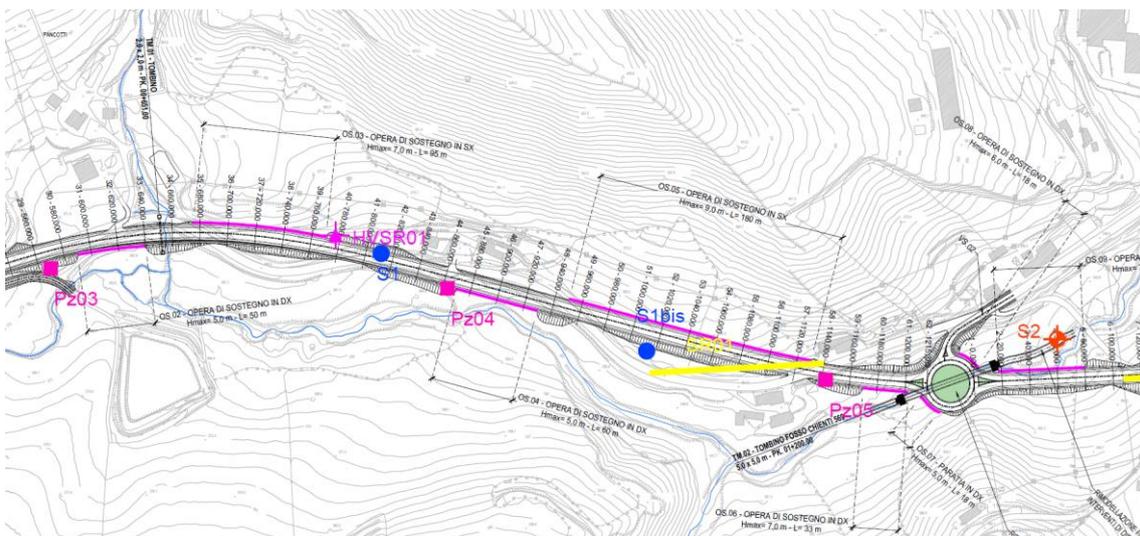


Figura 3: Planimetria di progetto con ubicazione indagini geognostiche – 2 di 3

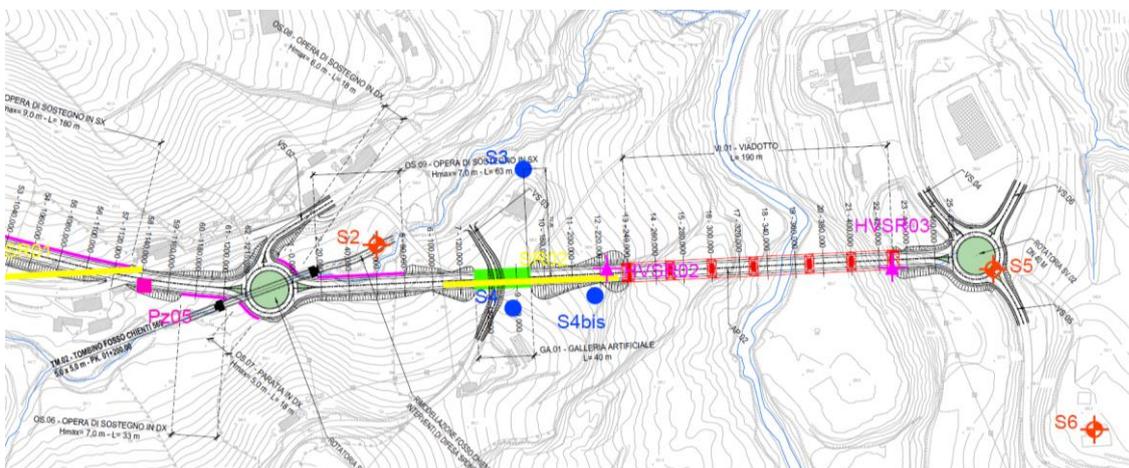


Figura 4: Planimetria di progetto con ubicazione indagini geognostiche – 3 di 3

#### 4.1 SONDAGGI A CARTOTAGGIO CONTINUO

La campagna geognostica effettuata ha previsto l'esecuzione di n°7 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, ciascuno in corrispondenza dell'area di interesse di opera d'arte maggiore (viadotto, sottovia o ponte, galleria, etc.) o cadenzate lungo il tracciato di linea. Il quadro riassuntivo dei sondaggi effettuati sono riportati nella Tabella 1.

Si è definita la profondità delle perforazioni sulla base del tipo di opere previste, garantendo un'indagine del sottosuolo almeno pari alla profondità di rilevanza progettuale; essa è risultata variabile tra 15-40 m.

La realizzazione delle perforazioni di sondaggio ha permesso di: ricostruire il profilo stratigrafico, eseguire le prove geotecniche in foro (Standard Penetration Test), eseguire il rilevamento idrogeologico (installazione di piezometri). Inoltre, si sono prelevati campioni per il riconoscimento dei terreni e, ove possibile, campioni indisturbati per l'esecuzione di prove di laboratorio.

SONDAGGIO	STRUM.	PERFORAZIONE	PROF (ml)	LAT/LONG	ALT (m s.l.m.)
S1	P	CC	20	43° 7'13.86"N 13°14'58.94"E	367
S1bis	P	CC	15	43° 7'11.70"N 13°15'7.45"E	363
S2	DH	CC	40	43° 7'12.18"N 13°15'20.50"E	343
S3	P	CC	25	43° 7'14.01"N 13°15'25.09"E	343
S4	P	CC	20	43° 7'10.77"N 13°15'24.86"E	353
S4bis	P	CC	20	43° 7'11.10"N 13°15'27.45"E	340
S5	DH	CC	40	43° 7'11.91"N 13°15'40.05"E	333

Tabella 1: Sondaggi a carotaggio continuo

## 4.2 PROVE GEOTECNICHE IN FORO

Durante l'avanzamento delle perforazioni di sondaggio sono state condotte numerose prove geotecniche in foro (prove penetrometriche dinamiche SPT) e sono stati prelevati campioni sia indisturbati che rimaneggiati.

Sui sondaggi S02 e S05 sono state effettuate misure sismiche in foro tipo down-hole.

Inoltre, si sono installati piezometri a tubo aperto, per il rilievo del livello piezometrico delle acque sotterranee.

Si fornisce il prospetto riepilogativo in Tabella 2.

SONDAGGIO	STRUM.	PERFORAZIONE	PROFONDITÀ	LAT/LONG	ALT (m s.l.m.)	SPT
S1	P	CC	20	43° 7'13.86"N 13°14'58.94"E	367	1 PC - 3,50m (5-8-10) 2 PC - 6,00m (5-9-10) 3 PC - 11,80m (17-35-R4cm)
S1bis	P	CC	15	43° 7'11.70"N 13°15'7.45"E	363	1 PC - 6,00m (R4cm) 2 PC - 9,30m (19-41-R3cm) 3 PC - 13,50m (R4cm)
S2	DH	CC	40	43° 7'12.18"N 13°15'20.50"E	343	1 PC - 4,50m (7-4-4) 2 PC - 11,00m (R7cm) 3 PC - 16,50m (R11cm) 4 PC - 18,90m (30-R7cm) 5 PC - 22,00m (R10cm) 6 PC - 26,00m (39-R5cm)
S3	P	CC	25	43° 7'14.01"N 13°15'25.09"E	34β	1 PC - 2,50m (3-4-4) 2 PC - 8,50m (5-7-7) 3 PC - 14,50m (5-6-7) 4 PC - 18,40m (15-22-30)
S4	P	CC	20	43° 7'10.77"N 13°15'24.86"E	353	1 PC - 2,20m (R4cm) 2 PC - 6,00m (13-23-R5cm) 3 PC - 13,00m (R4cm) 4 PC - 15,80m (39-R6cm)
S4bis	P	CC	20	43° 7'11.10"N 13°15'27.45"E	340	1 PC - 2,00m (20-27-34) 2 PC - 5m (R4cm) 3 PC - 8,00m (R4cm) 4 PC - 13,00m (R3cm)
S5	DH	CC	40	43° 7'11.91"N 13°15'40.05"E	333	1 PC - 1,80m (10-32-41) 2 PC - 4,60m (12-37-R7cm) 3 PC - 7,00m (22-R5cm) 4 PC - 11,10m (R3cm) 5 PC - 15,40m (48-R5cm)

Tabella 2: Sondaggi a carotaggio continuo

### 4.2.1 CRITERI DI INTERPRETAZIONE

#### Densità Relativa

Per la valutazione della densità relativa si è utilizzata la correlazione proposta da Skempton (1986):

$$D_r = \left( \frac{N_1}{60} \right)^{0,5}$$

dove:

$$N_1 = \left( \frac{98}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,5} N_{SPT}$$

Angolo di resistenza al taglio

Per la valutazione dell'angolo di resistenza al taglio si sono impiegati i diagrammi proposti da:

- Correlazione proposta nel Road Bridge Specification

$$\phi = \sqrt{15 \cdot N_{SPT} + 15}$$

- Correlazione di De Mello tra il valore di  $N_{SPT}$ , la tensione verticale efficace e l'angolo di resistenza al taglio di picco. Detta correlazione, in linea generale, sovrastima il valore dell'angolo di resistenza al taglio, soprattutto per bassi valori della tensione efficace verticale

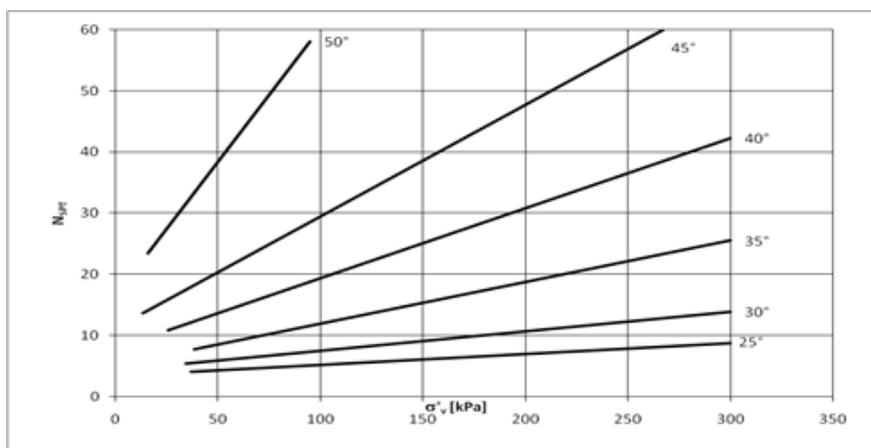


Figura 5: Correlazione di De Mello, fra il valore  $N_{SPT}$ , la tensione verticale efficace e l'angolo di resistenza al taglio di picco.

- Correlazione di Schmertmann (1977) in funzione della granulometria e della densità relativa, valutata in accordo con Skempton:

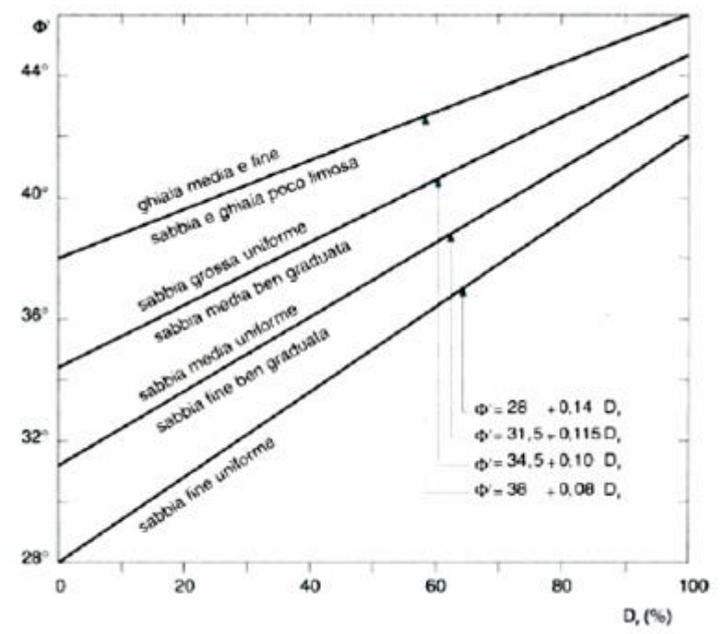


Figura 6: Correlazione di Schmertmann (1977) – Stima di  $\phi'$  da  $D_r$  per differenti granulometrie

Modulo di Young

I risultati delle prove SPT sono stati interpretati adottando la correlazione di Denver, per la stima di un valore operativo del modulo di Young:

$$E = s_1 \cdot N_{SPT} + s_2 \quad (\text{in MPa})$$

nella quale i parametri  $s_1$  e  $s_2$  sono scelti in funzione del litotipo.

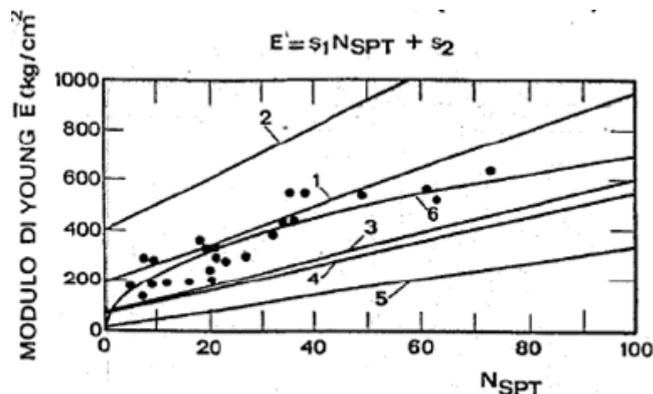


Figura 7: Correlazione di Denver (1982) – Stima del modulo elastico operativo da risultati prova SPT

Curva	Note	Riferimento	s <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>
1	Sabbia e ghiaia NC	D'Apollonia et al, 1970	0,756	8,75
2	Sabbia OC	D'Apollonia et al, 1970	1,043	36,79
3	Sabbia	Schulze e Menzenbach, 1961	0,517	7,46
4	Sabbia satura	Webb, 1970	0,478	7,17
5	Sabbia argillosa	Webb, 1970	0,316	1,58
6	Terreno coesivo	D'Apollonia et al.	1,160	0,029

Tabella 3: Correlazione di Denver (1982) - Parametri  $s_1$  e  $s_2$  in funzione della litologia

Oltre alle correlazioni appena citate, nel caso di limi, sabbie limose e miscele leggermente coesive è stata adottata anche la correlazione suggerita dall'AASHTO (1966):

$$E = 0.4N_{1(60)}$$

Dove:

- E modulo di Young operativo (MPa);
- $N_{1(60)}$  numero di colpi normalizzati a una tensione verticale efficace di 100 kPa e corretta al 60% del rapporto di energia delle aste.

**4.2.2 RILIEVI DEI LIVELLI DI FALDA**

Il rilevamento del livello di falda è stato effettuato grazie ai piezometri installati nei fori indagine. Le letture piezometriche sono state eseguite al 26/11/2022 e al 29/07/2023, i cui risultati sono riportati rispettivamente nelle seguenti Tabella 4 e Tabella 5:

**PROGETTO DEFINITIVO**

SONDAGGIO	STRUM.	PROF (ml)	LAT/LONG	ALT (m s.l.m.)	DATA MISURA	QUOTA FALDA (m da P.C.)
S1	P	20	43° 7'13.86"N 13°14'58.94"E	367	26/11/2022	9.03
S1bis	P	15	43° 7'11.70"N 13°15'7.45"E	363	26/11/2022	11.11
S3	P	25	43° 7'14.01"N 13°15'25.09"E	343	26/11/2022	12.29
S4	P	20	43° 7'10.77"N 13°15'24.86"E	353	26/11/2022	9.61
S4bis	P	20	43° 7'11.10"N 13°15'27.45"E	340	26/11/2022	3.08
S7	P	20	43° 7'6.92"N 13°15'46.13"E	352	26/11/2022	15.56
S9	P	25	43° 6'59.46"N 13°16'0.32"E	360	26/11/2022	11.57
S10	P	15	43° 6'53.81"N 13°16'1.40"E	379	26/11/2022	4.13
S12	P	25	43° 6'48.34"N 13°16'0.47"E	387	26/11/2022	18.14

Tabella 4: Letture piezometriche 2022

SONDAGGIO	STRUM.	PROF (ml)	LAT/LONG	ALT (m s.l.m.)	DATA MISURA	QUOTA FALDA (m da P.C.)
S1	P	20	43° 7'13.86"N 13°14'58.94"E	367	29/07/2023	9.22
S1bis	P	15	43° 7'11.70"N 13°15'7.45"E	363	29/07/2023	11.34
S3	P	25	43° 7'14.01"N 13°15'25.09"E	343	29/07/2023	12.53
S4	P	20	43° 7'10.77"N 13°15'24.86"E	353	29/07/2023	9.91
S4bis	P	20	43° 7'11.10"N 13°15'27.45"E	340	29/07/2023	3.29
S7	P	20	43° 7'6.92"N 13°15'46.13"E	352	29/07/2023	15.78
S9	P	25	43° 6'59.46"N 13°16'0.32"E	360	29/07/2023	11.74
S10	P	15	43° 6'53.81"N 13°16'1.40"E	379	29/07/2023	4.42
S12	P	25	43° 6'48.34"N 13°16'0.47"E	387	29/07/2023	18.32

Tabella 5: Letture piezometriche 2023

### 4.3 INDAGINI GEOFISICHE

#### 4.3.1 PROVE SISMICHE IN FORO (DOWN-HOLE)

Per la ricostruzione dei profili di velocità in onde  $V_p$  e  $V_s$ , la determinazione dei moduli dinamici dei materiali carotati, la determinazione del parametro  $V_{seq}$  o  $V_{s30}$  ai sensi delle NTC 2018 e la definizione categoria sismica del suolo di fondazione, in corrispondenza dei sondaggi S02 ed S05 opportunamente attrezzati, sono state effettuate n. 2 specifiche prove sismiche in foro di tipo Down-Hole.

Sondaggio	Profondità	Esecuzione down hole	Impresa esecutrice	Anno
(codice)	(m)	(m)	(-)	(-)
S02	40	41	Albanese Perforazioni srl	Novembre 2022
S05	40	41	Albanese Perforazioni srl	Novembre 2022

Tabella 6: Dettaglio delle misure sismiche in foro tipo down-hole

Per i risultati e conclusioni derivanti dalla interpretazione delle prove Down-Hole eseguite in accordo con la Tabella 6 si rimanda a quanto contenuto nel §6 "Relazione sismica" Doc.T01SG00SISRE01.

#### 4.3.2 MISURE DI RUMORE SISMICO AMBIENTALE (METODO HVSR)

Sono state eseguite n.3 indagini di misurazione del rumore sismico ambientale (metodo HVSR):

- HVSR01 in prossimità del sondaggio S1
- HVSR02 in prossimità del sondaggio S4bis
- HVSR03 in prossimità del sondaggio S5.

Per i risultati e conclusioni derivanti dalle prove HVSR si rimanda a quanto contenuto nel §6 della “Relazione sismica” Doc.T01SG00SISRE01.

#### 4.3.3 INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE IN ONDA P E IN ONDA S

Nella totalità sono stati realizzati n.2 profili sismici a rifrazione. La seguente tabella sintetizza, per ogni stesa, le principali informazioni:

Tipologia di indagine	Coordinate		Condizioni meteo	Data acquisizione	Operatore
Tomografia sismica SR01	43.119771° 13.252102°	43.119856° 13.253631°	Poco nuvoloso	26.11.2022	Pasquale Alessandro
Tomografia sismica SR02	43.119578° 13.256707°	43.120064° 13.258100°	Poco nuvoloso	26.11.2022	Pasquale Alessandro

Tabella 7: Riepilogo indagini sismiche a rifrazione

Per i risultati e conclusioni derivanti dalle indagini sismiche a rifrazione si rimanda a quanto contenuto nel §6 della “Relazione sismica” Doc.T01SG00SISRE01.

#### 4.3.4 CRITERI DI INTERPRETAZIONE DELLE PROVE GEOFISICHE

Ai fini della caratterizzazione geotecnica, i valori di  $V_s$  sono utilizzati per la valutazione del modulo di rigidezza a taglio a piccole deformazioni,  $G_0$ , tramite la seguente formula:

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

dove  $\rho$  è la densità di massa del terreno.

Il modulo elastico a piccole deformazioni è ottenuto utilizzando la relazione:

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

dove  $\nu$  è il coefficiente di Poisson.

Per la determinazione dei moduli elastici operativi, si utilizzano le curve di decadimento proposte da Vucetic & Dobri (1991), riportate nella seguente Figura 8:

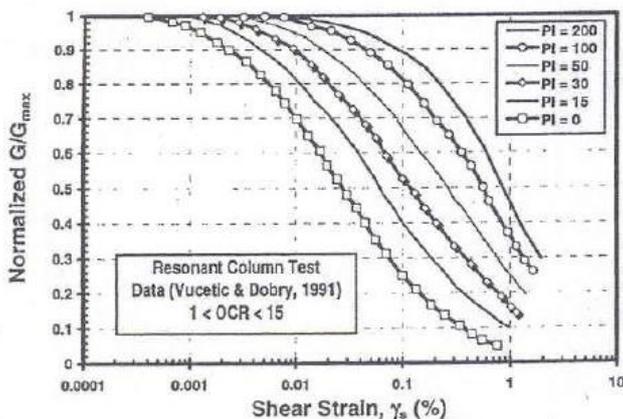


Figura 8: Curva di decadimento  $G/G_0$

La letteratura tecnica mostra che è possibile stimare un modulo di rigidezza a taglio operativo a partire da valori di deformazioni a taglio convenzionali associati al tipo di opera (Figura 9)

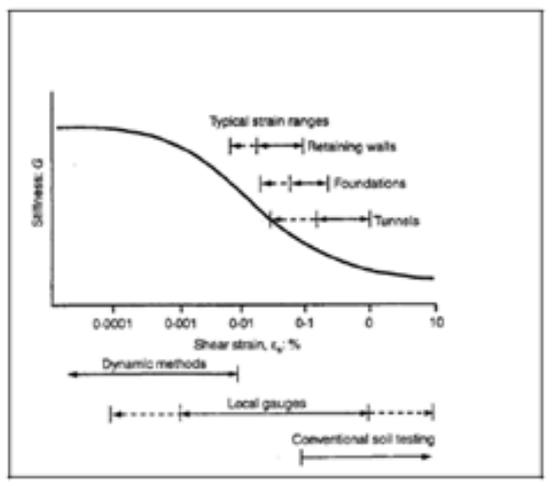


Figura 9: Valori di deformazioni a taglio convenzionali per diverse opere.

Per la tipologia di opere previste in questo progetto e per la natura dei terreni interagenti, si adotta un valore del modulo elastico operativo di circa 1/10 di quello ottenuto a piccole deformazioni.

#### 4.4 PROVE DI LABORATORIO

Per ogni verticale di indagine sono stati prelevati numerosi campioni, perlopiù indisturbati e litoidi poi avviati al laboratorio.

Il riepilogo delle tipologie e quantità di prove eseguite per la determinazione delle proprietà indice (apertura campione, misura del contenuto d'acqua, misura del peso dell'unità di volume, misura del peso specifico dei grani, granulometrie, limiti di Atterberg) e dei parametri di resistenza e deformabilità sono riportati rispettivamente nella Tabella 8 e nella Tabella 9.

Sondaggio	Prelievo Campioni						Apertura Campione	Umidità Naturale (W <sub>n</sub> )	Peso di Volume Naturale	Peso Specifico dei Grani	Granulometria		Limiti di Atterberg	Massa volumetrica reale e apparente e della porosità
	Indisturbati		Rimaneggiati		Litoide						Vagliatura	Areometrie		
	(codice)	(profondità)	(codice)	(profondità)	(codice)	(profondità)								
S01	-	-	C.R.1	h 2,00÷2,50	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-
	C.I.1	h 4,50÷5,00	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
	C.I.2	h 8,00÷8,50	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
S01bis	-	-	C.R.2	h 12,50÷13,00	-	-	1	-	-	1	1	1	1	-
	C.I.1	h 3,00÷3,50	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
S02	-	-	C.R.1	h 8,00÷8,50	-	-	1	1	-	1	1	1	1	-
	-	-	C.R.1	h 4,00÷4,50	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
	C.I.1	h 5,50÷6,00	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
	C.I.2	h 12,00÷12,50	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
S03	-	-	C.R.2	h 16,00÷16,50	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-
	-	-	C.L.1	h 23,20÷23,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	C.R.1	h 3,00÷3,50	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-
S03	C.I.1	h 6,00÷6,50	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
	C.I.2	h 10,50÷11,00	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
	-	-	C.R.2	h 12,50÷12,90	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-
S04	C.I.3	h 19,50÷20,00	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
	-	-	C.R.1	h 3,50÷4,00	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-
	-	-	C.R.2	h 5,50÷6,00	-	-	1	1	-	1	1	1	-	-
	-	-	C.R.3	h 14,30÷14,80	-	-	1	1	-	1	1	1	-	-
S04bis	-	-	C.R.4	h 18,00÷18,50	-	-	1	1	-	1	1	1	-	-
	C.I.1	h 2,50÷3,00	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
S05	-	-	C.R.1	h 5,04÷5,54	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-
	-	-	C.R.2	h 13,00÷13,50	-	-	1	1	-	1	1	1	-	-
	C.I.1	h 2,50÷3,00	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	-
	-	-	C.R.1	h 6,00÷6,50	-	-	1	1	-	1	1	1	-	-
S05	-	-	C.L.1	h 7,50÷8,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	C.R.2	h 18,00÷18,50	-	-	1	1	-	1	1	1	-	-
	-	-	C.L.2	h 19,50÷20,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	C.R.3	h 23,50÷24,00	-	-	1	-	-	1	1	1	-	-
							1	-	-	1	1	1	-	-
							27	17	10	20	26	26	12	0

Tabella 8: Prove di laboratorio per determinazione proprietà indice su campioni prelevati da carotaggi

**PROGETTO DEFINITIVO**

Sondaggio	Prelievo Campioni						Prova edometrica	Prova di Taglio Diretto			Prove Triassiali			Prove di compressione ad E.L.L. su campioni di terra	Prova di colonna risonante
	Indisturbati		Rimaneggiati		Litoide			PE	TD	Taglio Residuo	CU	UU	CD		
(codice)	(codice)	(profondità)	(codice)	(profondità)	(codice)	(profondità)	(quantità)	(quantità)	(quantità)	(quantità)	(quantità)	(quantità)	(quantità)	(quantità)	
S01	-	-	C.R.1	h 2,00÷2,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	C.I.1	h 4,50÷5,00	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	
	C.I.2	h 8,00÷8,50	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	
S01bis	-	-	C.R.2	h 12,50÷13,00	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	
	C.I.1	h 3,00÷3,50	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	
S02	-	-	C.R.1	h 8,00÷8,50	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	
	-	-	C.R.1	h 4,00÷4,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	C.I.1	h 5,50÷6,00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	
	C.I.2	h 12,00÷12,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	
S03	-	-	C.R.2	h 16,00÷16,50	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	C.L.1	h 23,20÷23,60	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	C.R.1	h 3,00÷3,50	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	
	C.I.1	h 6,00÷6,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
	C.I.2	h 10,50÷11,00	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	
S04	-	-	C.R.2	h 12,50÷12,90	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	
	-	-	C.R.2	h 19,50÷20,00	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	
	-	-	C.R.1	h 3,50÷4,00	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	
	-	-	C.R.2	h 5,50÷6,00	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	
S04bis	-	-	C.R.3	h 14,30÷14,80	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	
	-	-	C.R.4	h 18,00÷18,50	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	
	C.I.1	h 2,50÷3,00	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	
	-	-	C.R.1	h 5,04÷5,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
S05	-	-	C.R.2	h 13,50÷14,00	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	
	-	-	C.R.1	h 6,00÷6,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
	-	-	-	-	C.L.1	h 7,50÷8,00	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	C.R.2	h 18,00÷18,50	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	C.L.2	h 19,50÷20,00	-	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	C.R.3	h 23,50÷24,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	C.R.4	h 29,50÷30,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
							2	8	1	3	3	1	2	1	

Tabella 9: Prove di laboratorio per determinazione dei parametri di resistenza a taglio e deformabilità su campioni prelevati da carotaggi

Il quantitativo e la tipologia di prove prescritte in sede di piano di indagini non sono stati completati.

Al momento della redazione di questa relazione geotecnica generale, le prove di laboratorio eseguite e i relativi risultati inerenti ai parametri geotecnici sono riassunti nella seguente Tabella 10:

		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) laboratorio	c'(kPa) laboratorio	$\phi'$ (°) laboratorio
<b>S1</b>	CI 1 (z = 4.5 m)	18.9	7.24	21.51
<b>S1</b>	CI 2 (z = 8 m)	20.9	25.42	35.72
<b>S2</b>	CI 1 (z = 5.5 m)	19.7	10.20	28.60
<b>S2</b>	CI 2 (z = 8 m)	20.1	0.20	31.50
<b>S3</b>	CI 1 (z = 6.0 m)	18.0	-	-
<b>S3</b>	CI 2 (z = 10.5 m)	19.9	7.34	29.14
<b>S5</b>	CI 1 (z = 2.5 m)	20.0	5.2	21.3
<b>S5</b>	CR 2 (z = 18 m)	-	0	29.7

Tabella 10: Parametri geotecnici ottenuti con le prove di laboratorio

## 5 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

Nel seguito si riporta la definizione del modello geotecnico di sottosuolo.

Tale modello è stato definito con riferimento al modello geologico illustrato negli elaborati specifici, considerando gli aspetti stratigrafici, strutturali, idrogeologici e geomorfologici individuati. Sono stati, inoltre, analizzati tutti i dati disponibili (rilievo geologico, risultati delle indagini in sito, rilievo della falda) per la definizione delle unità omogenee sotto il profilo fisico-meccanico, del regime delle pressioni interstiziali e dei valori caratteristici dei parametri geotecnici.

Nell'attesa delle risultanze della campagna geotecnica in corso, si ritiene opportuno evidenziare che nelle successive fasi della progettazione dovranno essere approfonditi sia l'assetto geologico strutturale e stratigrafico nelle aree di intervento, sia il comportamento meccanico delle unità geotecniche individuate.

Al fine del dimensionamento delle opere si possono individuare due unità geotecniche principali:

### ● UG2 – ARGILLA CON LIMO SABBIOSA

L'UG 2 è costituita da depositi eluvio-colluviali e depositi alluvionali attuali e terrazzati ed è caratterizzata da una granulometria che presenta una forte percentuale di componente limosa e argillosa in matrice sabbiosa. Questa unità geotecnica presenta uno spessore variabile compreso tra 5 e 15 metri, raggiungendo localmente profondità dell'ordine dei 30 m.

### ● UG4 – FORMAZIONE ARENACEO-MARNOSA

L'UG 4 è costituita dalla litofacies pelitico-arenacea ed è caratterizzata da una granulometria che presenta una significativa percentuale di componente limosa e argillosa in matrice sabbiosa. Dalle indagini in sito effettuate in corrispondenza di questa unità è possibile caratterizzare tale unità geotecnica come terreno.

## 6 DETERMINAZIONE DEI VALORI CARATTERISTICI DEI PARAMETRI GEOTECNICI

Come riportato al §4, al momento della redazione della presente relazione geotecnica, non si dispone di tutte le indagini di laboratorio richieste nella precedente campagna di indagine.

Si rimanda alla successiva fase di progettazione lo studio dei risultati di laboratorio completi (in accordo con le Tabella 8 e Tabella 9) e la successiva caratterizzazione geotecnica delle unità geotecniche.

Inoltre, si sottolinea che la determinazione dei parametri geotecnici delle unità litologiche definite al §5 è stata eseguita in accordo con i risultati delle sole prove di laboratorio, in quanto le prove dinamiche eseguite nei fori di sondaggio sono risultate spesso a rifiuto.

Nei paragrafi seguenti si riportano i grafici delle principali caratteristiche meccaniche dei terreni.

### 6.1 UG2 - UNITÀ GEOTECNICA 2

#### 6.1.1 Peso dell'unità di volume

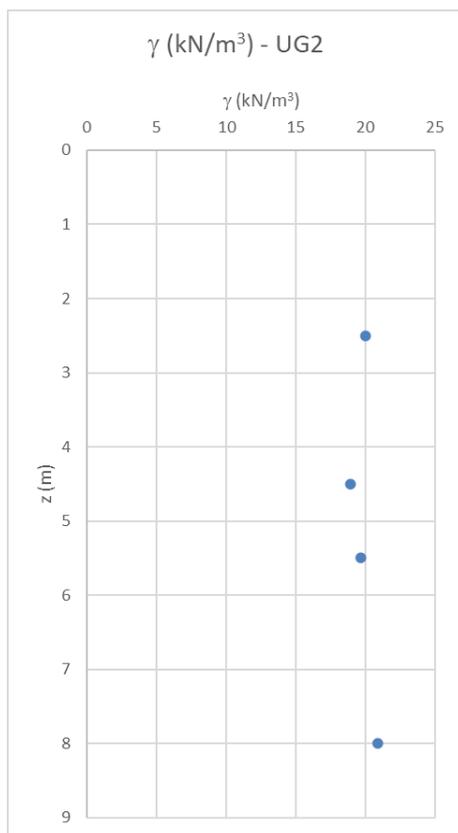


Figura 10: Peso di volume allo stato naturale in funzione della profondità (UG2)

In accordo con i risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni relativi alla unità geotecnica UG2 (C11-S1, C12-S1, C11-S2, C11-S5) si suggerisce per il peso di unità di volume un range di variabilità pari a  $\gamma = 18 - 20$  kN/m<sup>3</sup>.

6.1.2 Angolo di resistenza al taglio

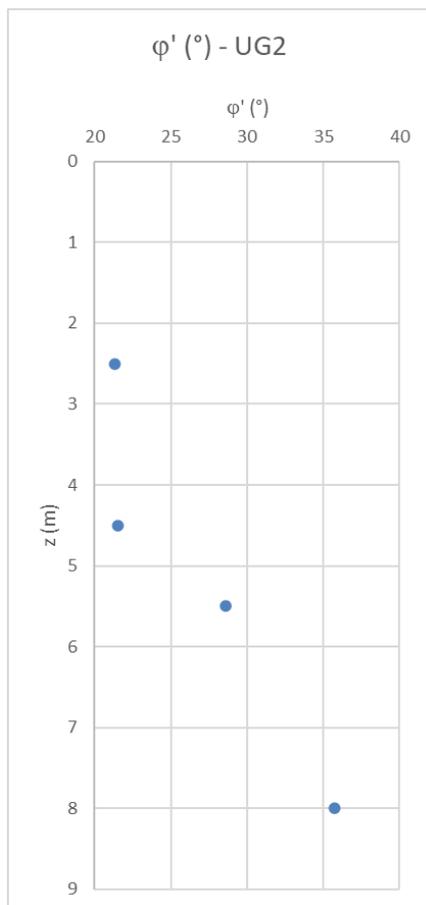


Figura 11: Angolo di resistenza al taglio in funzione della profondità (UG2)

In accordo con i risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni relativi alla unità geotecnica UG2 (CI1-S1, CI2-S1, CI1-S2, CI1-S5) si suggerisce per l'angolo di resistenza al taglio un range di variabilità pari a  $\phi' = 22^\circ - 30^\circ$ .

6.1.3 Coesione efficace

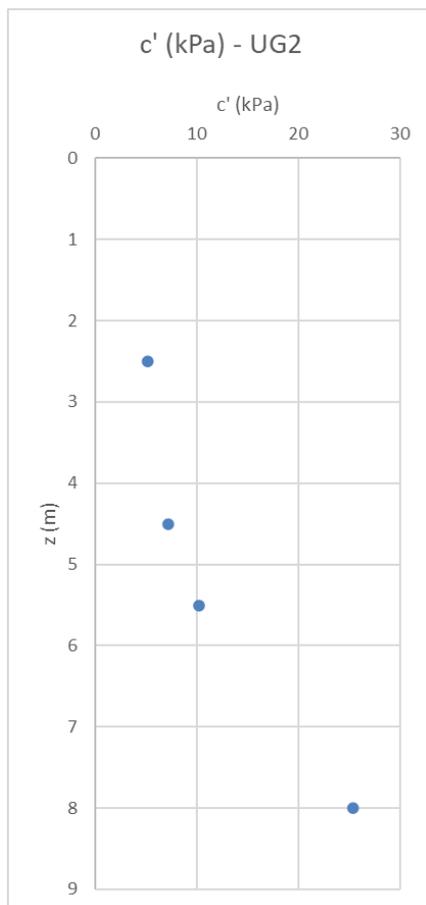


Figura 12: Coesione efficace in funzione della profondità (UG2)

In accordo con i risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni relativi alla unità geotecnica UG2 (CI1-S1, CI2-S1, CI1-S2, CI1-S5) si suggerisce per l'angolo di resistenza al taglio un range di variabilità pari a  $c' = 10 - 20$  kPa.

### 6.1.4 Caratteristiche di deformabilità

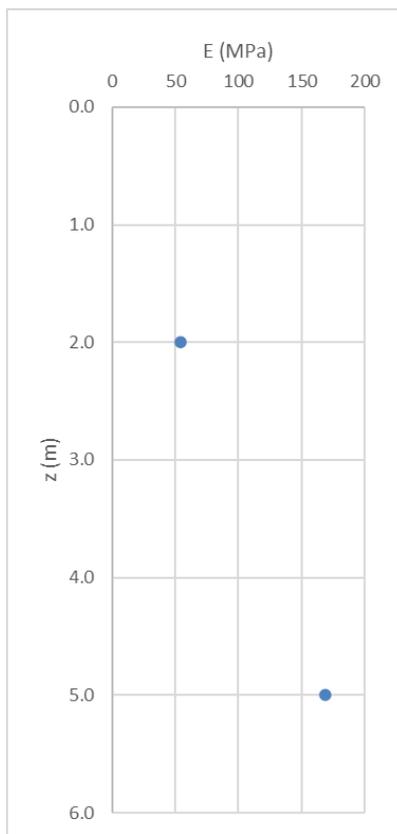


Figura 13: Modulo elastico di Young in funzione della profondità (UG2)

In accordo con i risultati delle prove Down-Hole eseguite nei fori di sondaggio S2 e S5 è possibile determinare per il modulo elastico di Young per l'unità geotecnica UG2 un valore di circa 170 MPa.

In accordo con quanto descritto al §4.3.4, si definisce per l'unità geotecnica considerata un valore minimo di modulo elastico operativo pari a 1/10 del valore di modulo elastico ottenuto alle piccole deformazioni.

Pertanto, per l'unità geotecnica UG2 si suggerisce per il modulo elastico operativo un range di variabilità pari a  $E_{op} = 15 - 30$  MPa.

## 6.2 UG4 – UNITÀ GEOTECNICA 4

### 6.2.1 Peso dell'unità di volume

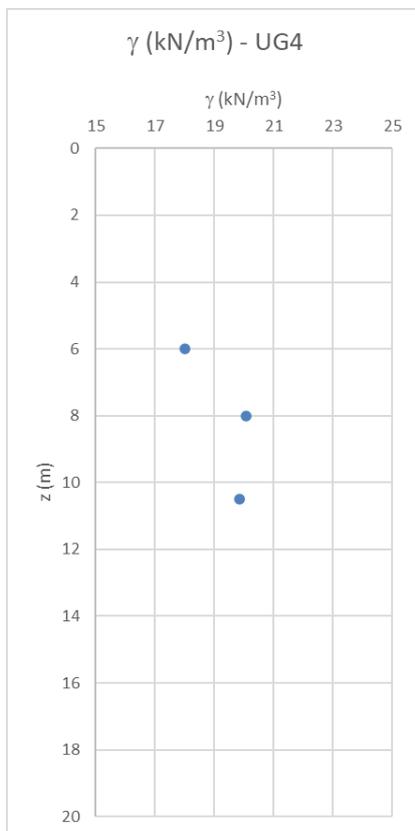


Figura 14: Peso di volume allo stato naturale in funzione della profondità (UG4)

In accordo con i risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni relativi alla unità geotecnica UG4 (CI2-S2, CI1-S3, CI2-S3, CR2-S5) si suggerisce per il peso di unità di volume un range di variabilità pari a  $\gamma = 18 - 20$  kN/m³.

6.2.2 Angolo di resistenza al taglio

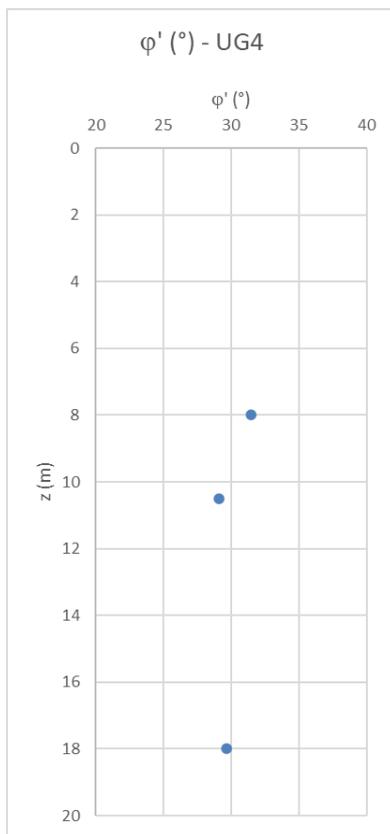


Figura 15: Angolo di resistenza al taglio in funzione della profondità (UG4)

In accordo con i risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni relativi alla unità UG4 (CI2-S2, C11-S3, CI2-S3, CR2-S5) si suggerisce per l'angolo di resistenza al taglio un range di variabilità pari a  $\phi' = 29^\circ - 31^\circ$ .

6.2.3 Coesione efficace

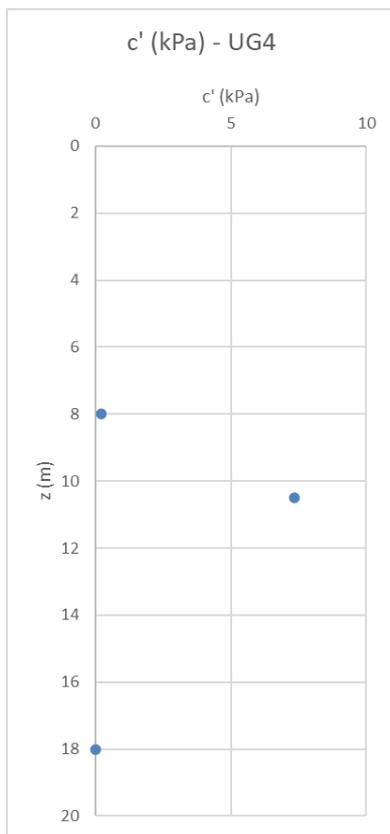


Figura 16: Coesione efficace in funzione della profondità (UG4)

In accordo con i risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni relativi alla unità geotecnica UG4 (CI2-S2, CI1-S3, CI2-S3, CR2-S5) si suggerisce per l'angolo di resistenza al taglio un range di variabilità pari a  $c' = 5 - 10$  kPa.

6.2.4 Caratteristiche di deformabilità

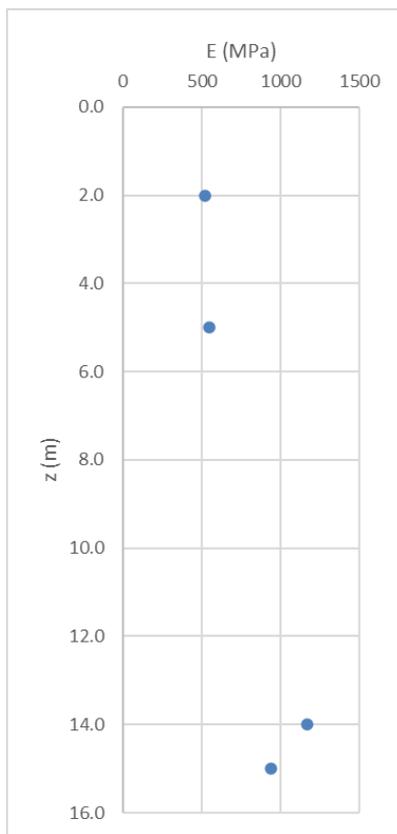


Figura 17: Modulo elastico di Young in funzione della profondità (UG4)

In accordo con i risultati delle prove Down-Hole eseguite nei fori di sondaggio S2 e S5 è possibile determinare per il modulo elastico di Young per l'unità geotecnica UG4 un valore di circa 500 MPa nei primi 10 m di profondità da p.c. e un valore di circa 1100 MPa per profondità maggiori di 10 m dal p.c..

In accordo con quanto descritto al §4.3.4, si definisce per l'unità geotecnica considerata un valore minimo di modulo elastico operativo pari a 1/10 del valore di modulo elastico ottenuto alle piccole deformazioni.

Pertanto, per l'unità geotecnica UG4 si suggerisce per il modulo elastico operativo un range di variabilità pari a  $E_{op} = 10 - 50$  MPa per i primi 10 m di profondità, mentre per le profondità maggiori di 10 m si suggerisce un range di variabilità pari a  $E_{op} = 50 - 80$  MPa.

## 7 SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI

Nel seguito si riporta una sintesi dei valori caratteristici dei principali parametri geotecnici assunti per la progettazione.

Nell'attesa delle risultanze della campagna geotecnica in corso, si ritiene opportuno evidenziare che nelle successive fasi della progettazione dovranno essere approfonditi sia l'assetto geologico strutturale e stratigrafico nelle aree di intervento, sia il comportamento meccanico delle unità geotecniche individuate.

Nella seguente tabella si riportano i valori caratteristici dei parametri geotecnici.

Unità	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	c'		$\phi'$ °		E' <sub>op</sub> MPa			C <sub>u</sub> kPa	
		min	max	min	max	min	max	z (m)	min	max
-	-									
<b>UG2</b>	18 ÷ 20	10	20	22	30	15	60	-	-	-
<b>UG4</b>	18 ÷ 20	0	5	29	31	10	50	0 ÷ 10	-	-
						50	80	>10		

Tabella 11: Tabella di sintesi dei parametri geotecnici individuati