

**SGC Grosseto Fano (E78).
Tratto Nodo di Arezzo (S. Zeno) - Selci Lama (E45).
Adeguamento a 4 corsie del tratto Le Ville - Selci Lama (E45).
Lotto 7.**

PROGETTO DEFINITIVO

PG 364

ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

<p>IL GEOLOGO <i>Dott. Geol. Salvatore Marino</i> Ordine dei geologi della Regione Lazio n. 1069</p>	<p>PROGETTISTI SPECIALISTICI <i>Ing. Ambrogio Signorelli</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. A35111</p>	<p>PROGETTAZIONE ATI: (Mandataria) GP INGENGERIA <i>GESTIONE PROGETTI INGENGERIA srl</i> (Mandante)  (Mandante) engeko (Mandante)  <i>Studio di Architettura e Ingegneria Moderna</i></p>
<p>COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE <i>Arch. Santo Salvatore Vermiglio</i> Ordine Architetti Provincia di Reggio Calabria n. 1270</p>	<p><i>Ing. Moreno Panfili</i> Ordine Ingegneri Provincia di Perugia n. A2657</p>	<p>IL PROGETTISTA RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE. (DPR207/10 ART 15 COMMA 12): <i>Dott. Ing. GIORGIO GUIDUCCI</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 14035</p>
<p>L'ARCHEOLOGO <i>Dott.ssa Maria Grazia Liseno</i> Elenco MIBACT n. 1646</p>	<p><i>Ing. Claudio Muller</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 15754</p>	
<p>VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO <i>Ing. Michele Consumini</i></p>	<p><i>Ing. Giovanni Suraci</i> Ordine Ingegneri Provincia di RC n. A2895</p>	
<p>VISTO: IL RESP. DEL PROGETTO <i>Arch. Pianif. Marco Colazza</i></p>	<p><i>Ing. Giuseppe Resta</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 20629</p>	

**Studi e Indagini
Geotecnica
Relazione geotecnica**

CODICE PROGETTO		NOME FILE		REVISIONE	SCALA
COMP.	PROGETTO	LIV.	ANNO	N.PROG.	
DP	LO702G	D2110			
CODICE ELAB.		T O O G E O 8 G E T R E O 1		B	-
D					
C					
B	Revisione per Istr. ANAS Prot. CDG.U.0439522 23-05-2024	Giugno '24	L. Censori	A. Signorelli	Guiducci
A	Emissione	Marzo '24	L. Censori	A. Signorelli	G. Guiducci
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

INDICE

1	<u>PREMESSA.....</u>	1
2	<u>NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO.....</u>	3
2.1	NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO.....	3
3	<u>INDAGINI GEOGNOSTICHE.....</u>	4
3.1	CAMPAGNE DI INDAGINI.....	4
3.1.1	Campagna indagini Progetto Definitivo (2022-24).....	4
3.1.2	Campagna indagini Progetto Preliminare (2010-11).....	9
3.2	PROVE IN SITO.....	11
3.2.1	Prova penetrometrica dinamica (SPT, <i>Standard Penetration Test</i>).....	11
3.2.2	Prova scissometrica (FVT, <i>Field Vane Test</i>).....	15
3.2.3	Prove geofisiche.....	17
3.3	PROVE DI LABORATORIO.....	22
3.3.1	Prova edometrica.....	22
4	<u>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELLE PRINCIPALI FORMAZIONI.....</u>	25
4.1	CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI.....	25
4.1.1	UG1a - Sabbia limosa.....	25
4.1.2	UG1b - Limo argilloso.....	32
4.1.3	UG2 - Sabbia con elementi lapidei.....	45
4.1.4	UG3 - Sabbia con limo.....	51
4.1.5	UG5 - Argilla marnosa.....	57
4.1.6	UG6 - Deposito di frana.....	66
4.1.7	UG7a - Ghiaia.....	74
4.1.8	UG7b - Limo sabbioso.....	81
4.1.9	UG8 - Conglomerati.....	91
4.1.10	UG9 - Argilla limosa.....	97
4.1.11	UG10 - Ghiaia sabbiosa.....	108
4.2	CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI.....	115
4.2.1	UG4 - Arenaria.....	115
4.3	PARAMETRI CARATTERISTICI.....	120
5	<u>STABILITÀ DEI VERSANTI.....</u>	121
5.1	DISSESTO TRA LE PROGRESSIVE 2+200 KM E 2+370 KM.....	121
5.2	DISSESTO TRA LE PROGRESSIVE 4+720 KM E 4+775 KM.....	122

PROGETTAZIONE ATI:

5.3	DISSESTO TRA LE PROGRESSIVE 7+130 KM E 7+380 KM.....	123
5.4	DISSESTI TRA LE PROGRESSIVE 7+775 KM E 7+875 KM E LE PROGRESSIVE 8+025 KM E 8+075	124
6	<u>CORPO STRADALE</u>	126
6.1	RILEVATI STRADALI.....	126
6.1.1	Piano di posa dei rilevati	126
6.1.2	Verifiche di stabilità.....	131
6.1.3	Cedimenti	140
7	<u>SCAVI PROVVISORIALI</u>	150
7.1.1	Verifiche di stabilità.....	150
8	<u>STABILITÀ NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....</u>	153
8.1	MOTIVI DI ESCLUSIONE DALLA VERIFICA A LIQUEFAZIONE.....	153
8.2	METODI DI ANALISI PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE.....	154
8.2.1	Metodi di analisi semi-empirica	155
8.2.2	Metodi di analisi semplificata.....	156
8.2.3	Metodi di analisi dinamica semplificata	159
8.3	VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	160
8.3.1	Metodo di analisi semi-empirica	160
8.3.2	Metodo di analisi semplificata	162
8.3.3	Metodo di analisi dinamica semplificata	165
9	<u>PROBLEMATICHE GEOTECNICHE E SOLUZIONI TECNICHE ADOTTATE</u>	166
9.1	SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	166
9.1.1	Intervento di mitigazione del rischio di liquefazione mediante vibro sostituzione con formazione di colonne di materiale inerte (da progr. 2+350 km a prog. 3+100)	166
9.1.2	Intervento di mitigazione del rischio di liquefazione mediante pali plastici....	174
10	<u>ALLEGATI</u>	175
A.	RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO.....	175
B.	RISULTATI INDAGINI GEOFISICHE.....	175
C.	VERIFICA DELLA SUSCETTIBILITÀ A LIQUEFAZIONE	175
D.	VERIFICHE DI STABILITÀ DEI RILEVATI STRADALI.....	175
E.	VERIFICA DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI STRADALI.....	175
F.	VERIFICA DI STABILITÀ DEGLI SCAVI PROVVISORIALI.....	175

PROGETTAZIONE ATI:

PROGETTAZIONE ATI:

1 PREMESSA

La presente relazione geotecnica illustra gli aspetti geotecnici relativi al Progetto Definitivo per la realizzazione dell'adeguamento a 4 corsie del tratto Le Ville – Selci Lama, tratto Nodo di Arezzo – Selci Lama (E45), Itinerario Internazionale E78 S.G.C. Grosseto – Fano.

L'intervento in progetto si inserisce nella rete della mobilità nazionale come parte integrante dell'Itinerario Trasversale E78 Grosseto – Fano, che svolge la funzione strategica di colmare la carenza infrastrutturale nei collegamenti trasversali trans-appenninici della penisola, nel settore centro-settentrionale. La sua importanza in tal senso è sancita dal Piano Generale dei Trasporti e della Logistica e dalla Legge Obiettivo ed è confermata dagli strumenti di pianificazione settoriale (ANAS) e regionali. L'itinerario E78 costituisce uno dei più importanti collegamenti trasversali tra i corridoi longitudinali tirrenico ed adriatico (nota anche come "Autostrada dei due Mari").

In particolare, l'intervento prevede la realizzazione di una strada di categoria B (D.M. 05 novembre 2001) di sviluppo pari a circa 12,5 km nel tratto compreso tra Le Ville di Monterchi e Selci – Lama. Il tratto in esame ricade in maggior parte nella Regione Toscana, specificamente nella Provincia e nel Comune di Arezzo mentre nel tratto finale ricade nella Regione Umbria, nello specifico nella provincia di Perugia.

Il progetto si inserisce nel quadro di interventi di completamento e adeguamento a quattro corsie della "S.G.C. Grosseto – Fano", infrastruttura di collegamento trasversale tra le aree del versante tirrenico dell'Appennino e quelle del versante adriatico.

In tale quadro il progetto può essere considerato come parte funzionale di completamento dell'adeguamento della "Due Mari" nell'intero tratto Le Fabbriche – Selci Lama realizzando quindi un importante collegamento trasversale con la E45 mediante una strada a carreggiate separate in luogo della S.S.73 esistente, la quale presenta in ampi tratti caratteristiche proprie di una strada urbana piuttosto che di un'infrastruttura di collegamento interregionale.

L'itinerario E78 precedentemente descritto fa parte della rete TEN-T.

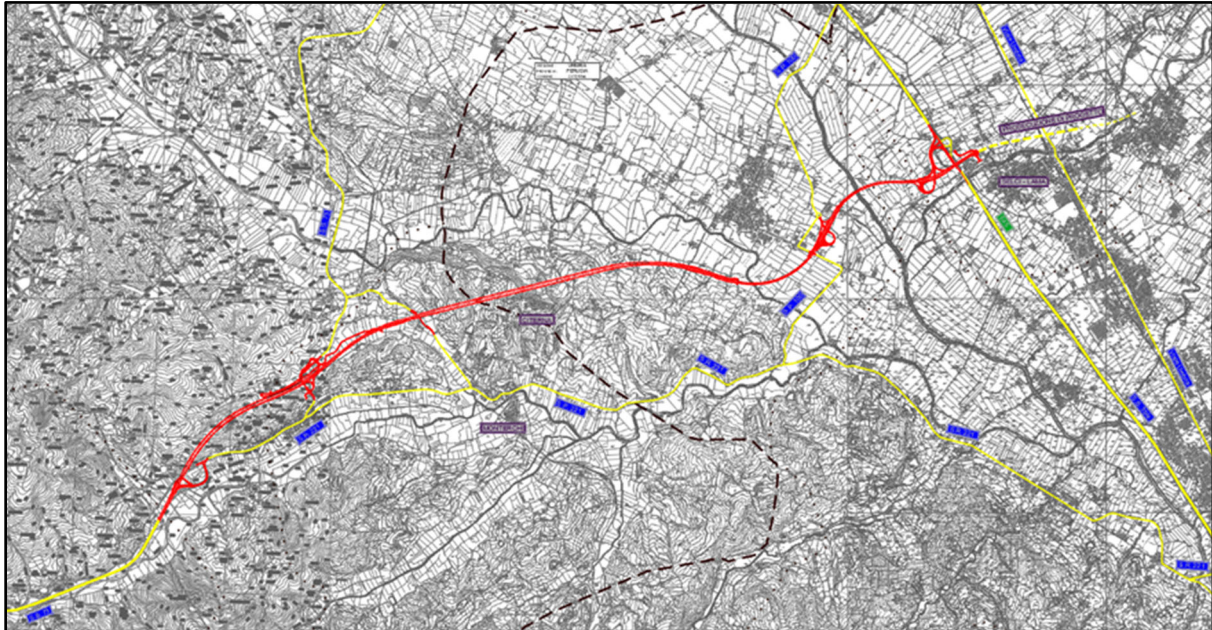


Figura 1.1 Individuazione intervento di progetto

Nella presente relazione vengono esaminati e sviluppati i seguenti aspetti:

- descrizione delle campagne di indagini eseguite e delle analisi di laboratorio;
- caratterizzazione geotecnica delle formazioni individuate lungo il tracciato in esame;
- schematizzazione stratigrafica e geotecnica del progetto;
- descrizione delle problematiche geotecniche e delle soluzioni tecniche adottate;
- definizione delle metodologie per il dimensionamento delle opere geotecniche.

PROGETTAZIONE ATI:

2 NORMATIVA E DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

Si elenca di seguito la principale normativa e documentazione presa come riferimento per la stesura della presente relazione.

2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

Si riporta di seguito l'elenco delle normative a cui si è fatto riferimento per la stesura della presente relazione:

- [1] Decreto 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni»
- [2] Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018
- [3] UNI EN 1997-1:2013. Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali
- [4] UNI EN 1997-2:2007. Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo
- [5] UNI EN 1998-5:2005. Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici
- [6] “Raccomandazioni sulla Programmazione ed Esecuzione delle Indagini Geotecniche” pubblicate a cura della Associazione Geotecnica Italiana (A.G.I. 1977)
- [7] “Aspetti Geotecnici della Progettazione in Zona Sismica. Linee Guida” pubblicate a cura della Associazione Geotecnica Italiana (A.G.I. 2005)

3 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Per lo sviluppo della progettazione delle opere civili relative al lotto in esame sono state eseguite indagini di carattere geologico e geotecnico finalizzate:

- al riconoscimento geologico e geotecnico dei terreni di fondazione;
- alla caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione, finalizzata alla definizione dei parametri per l'esecuzione dei calcoli geotecnici e strutturali;
- alla ricostruzione dei rapporti opere-terreni.

3.1 CAMPAGNE DI INDAGINI

3.1.1 Campagna indagini Progetto Definitivo (2022-24)

Nel periodo tra gennaio e maggio 2022 sono stati eseguiti a cura della *CAM PERFORAZIONI S.r.l.u.* di Pesaro, n. 26 sondaggi a rotazione, di cui n. 22 a carotaggio continuo integrale, n. 2 a carotaggio continuo parziale e n. 2 a distruzione di nucleo. Le profondità investigate variano da 15 m a 120 m. All'interno dei fori sono state effettuate n. 104 prove SPT (*Standard Penetration Test*) che hanno interessato profondità massime fino a 45 m. Al fine di rilevare la profondità della superficie piezometrica, n. 15 sondaggi sono stati strumentati con piezometri, di cui n. 12 piezometri a tubo aperto ($\varnothing 2''$) e n. 3 piezometri Casagrande. Per il monitoraggio degli spostamenti a componente orizzontale del terreno, n. 1 sondaggio è stato strumentato con inclinometro. Per la determinazione del comportamento dinamico dei terreni, n. 10 sondaggi sono stati strumentati con tubo in PVC ($\varnothing 3''$) per l'esecuzione di prove sismiche di tipo DH (*Down-hole*).

Nel corso delle perforazioni di sondaggio sono stati prelevati n. 65 campioni indisturbati e n. 38 campioni rimaneggiati successivamente sottoposti a prove geotecniche di laboratorio per la classificazione dei terreni e per la determinazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche.

A seguito dei sondaggi geognostici, al fine di definire il modello sismo-stratigrafico dell'area mediante l'individuazione della profondità del *bedrock* sismico e la discretizzazione della velocità delle onde di taglio per la definizione del parametro $V_{s,eq}$ (NTC2018), sono state eseguite a cura della ditta *GEOFISICA MISURE S.n.c* di Cosenza, n. 10 prove sismiche di tipo DH (*Down-hole*), n. 1 indagine sismica di tipo MASW (*Multi-Channel Analysis of Surface Waves*), n. 3 indagini sismiche di tipo HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) e n. 9 indagini sismiche a rifrazione SRT (*Sismic Refraction Tomography*).

A integrazione delle precedenti indagini e per ovviare all'impossibilità di eseguire alcune indagini dirette, durante il 2023 è stata eseguita una consistente campagna di indagini geofisiche e geoelettriche a cura della *GEOSERVING S.r.l.* di Frosinone. La finalità di questa campagna è stata quella di raccogliere informazioni in aree, al momento non accessibili da macchine perforatrici (imbocco Ovest della galleria "Citerna"), nei tratti dei corpi galleria e in corrispondenza di lineamenti tettonici censiti nel catalogo ITHACA. In particolare sono state eseguite n. 4 indagini sismiche a rifrazione in onde P e SH, n. 4 indagini sismiche geoelettriche in modalità ERT e n. 4 indagini sismiche "ibride" a riflessione e rifrazione in onde P.

Le indagini geognostiche per l'attuale fase progettuale si sono concluse nel gennaio 2024, con l'esecuzione di n. 1 sondaggi a rotazione (BH12) con profondità pari a 35 m. All'interno del foro sono state effettuate n. 5 prove SPT (*Standard Penetration Test*) che hanno interessato profondità

PROGETTAZIONE ATI:

massime fino a 30 m. Il sondaggio è stato successivamente strumentato con tubo in PVC (Ø3”) per l’esecuzione di una prove sismica di tipo DH (*Down-hole*).

Nella Tabella 3-1 si riporta una sintesi dei sondaggi eseguiti e presi in considerazione per la caratterizzazione geotecnica. La posizione dei sondaggi è indicata nella Planimetria ubicazione indagini in sito (*T00GE01GEOPU01-07*).

Tabella 3-1 Quadro di riferimento delle indagini eseguite (sondaggi geognostici)

Sondaggio	Tipologia	Quota (m s.l.m.)	Lunghezza (m)	Prove in foro	Campioni
BH01	cc	308,80	45,0	6 SPT 1 Dh	5 Sh, 1 Cr
BH02	cc	315,34	35,0	4 SPT 1 Pz	2 Sh, 4 Cl
BH03	cc	315,60	35,0	5 SPT 1 Dh	1 Sh, 1 Cr, 3 Cl
BH07	cc	318,46	35,0	5 SPT 1 Dh	2 Sh, 1 Cl
BH08	cc	320,23	25,0	4 SPT 1 Pz	3 Sh, 1 Cr
BH09	cc	312,72	35,0	5 SPT 1 Dh	2 Sh, 2 Cr, 1 Cl
BH10	cc	311,20	25,0	3 SPT 1 Pz	2 Sh, 2 Cr
BH11	cc	339,73	35,0	7 SPT 1 Dh	2 Sh, 3 Cr
BH12	cc	312,00	35,0	5 SPT 1 Dh	3 Sh
BH13	cc	323,29	35,0	3 SPT 1 Pz	1 Sh, 1 Cr
BH15	dn / cc	339,73	120,0	1 Pz	3 Cr
BH16	dn / cc	394,12	80,0	1 Pz	3 Cr
BH17	cc	337,53	25,0	4 SPT 1 In	3 Sh, 1 Cr
BH17bis	dn	338,59	30,0	1 Pz	-
BH20	cc	294,34	35,0	3 SPT 1 Pz	2 Sh
BH21	cc	325,17	30,0	3 SPT 1 Pz	3 Sh, 1 Cr
BH22	cc	284,89	35,0	5 SPT 1 Dh	3 Sh, 2 Cr
BH23	cc	287,71	20,0	3 SPT 1 Pz	3 Sh, 1 Cr
BH24	cc	282,21	20,0	3 SPT 1 Pz	3 Sh
BH25	cc	282,47	40,0	6 SPT 1 Dh	3 Sh, 3 Cr
BH26	cc	285,91	40,0	6 SPT 1 Pz	2 Sh, 2 Cr

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio	Tipologia	Quota (m s.l.m.)	Lunghezza (m)	Prove in foro	Campioni
BH27	dn	283,05	47,0	6 SPT 1 Dh	-
BH28	cc	284,50	40,0	5 SPT 1 Pz	4 Sh, 4 Cr
BH29	cc	283,67	45,0	6 SPT 1 Pz	4 Sh, 1 Cr
BH30	cc	283,91	40,0	6 SPT 1 Dh	5 Sh, 5 Cr
BH31	cc	285,25	40,0	6 SPT 1 Pz	5 Sh
BH32	cc	285,25	40,0	6 SPT 1 Dh	5 Sh, 1 Cr

LEGENDA

Tipologia: cc = carotaggio continuo; dn = distruzione di nucleo;

Prove in foro: SPT = prova penetrometrica standard; PMT = prove pressiometriche; DMT = prove dilatometriche; DH = down-hole; CH = cross-hole; Pz = piezometro; Lf = Lefranc; Lg = Lugeon

Campioni: Sh = campione indisturbato; Cr = campione rimaneggiato; Cl = campione litoide

Sono stati eseguiti anche n. 16 pozzetti esplorativi spinti a profondità massime pari a 3 m dal p.c. e il prelievo di n. 20 campioni rimaneggiati. Al fine di determinare le caratteristiche di portanza dei terreni del piano di posa, sono state eseguite n. 18 prove di carico su piastra, rispettivamente a 0,5 m e 1 m dal p.c.

Nella Tabella 3-2 si riporta una sintesi dei pozzetti eseguiti e presi in considerazione per la determinazione degli spessori di bonifica. La posizione dei pozzetti è indicata nella Planimetria ubicazione indagini in sito (T00GE01GEOPU01-07).

Tabella 3-2 Quadro di riferimento delle indagini eseguite (pozzetti esplorativi)

Pozzetto	Profondità (m)	Prova PLT	Profondità (m)	Campioni
PZ01	2,0	1	0,50	1 Cr
PZ02	2,0	2	0,50 ÷ 1,00	2 Cr
PZ03	2,0	2	0,50 ÷ 1,00	2 Cr
PZ04	2,0	2	0,50 ÷ 1,00	3 Cr
PZ07	3,0	1	0,50	1 Cr
PZ08	2,0	1	0,50	1 Cr
PZ09	2,0	1	0,50	1 Cr

Pozzetto	Profondità (m)	Prova PLT	Profondità (m)	Campioni
PZ10	2,0	1	0,50	1 Cr
PZ11	2,0	1	0,50	1 Cr
PZ12	2,0	1	0,50	1 Cr
PZ14	3,0	2	0,50 ÷ 1,00	2 Cr
PZ16	2,0	1	0,50	1 Cr
PZ17	2,0	1	0,50	2 Cr
PZ18	2,0	1	0,50	1 Cr

LEGENDA

Prove PLT = prova di carico su piastra

Campioni: Cr = campione rimaneggiato

Per maggiori dettagli sulle modalità esecutive delle indagini geognostiche, si rimanda agli specifici rapporti emessi dalla ditta esecutrice.

3.1.1.1 Misure piezometriche

Durante la campagna di indagini 2022-24 sono stati installati n. 12 piezometri a tubo aperto e n. 3 piezometro di Casagrande.

Nella Tabella 3-3 si riportano i livelli di falda rilevati durante le diverse misurazioni.

Tabella 3-3 Esito delle misure piezometriche

Sondaggio	Tipologia piezometro	gen-22	feb-22	mar-22	apr-22	mag-22	giu-22
		Livelli di falda rilevati (m da p.c.)					
BH02	Tubo aperto			18,20		17,90	
BH08	Tubo aperto			1,35		1,50	
BH10	Tubo aperto			2,50		3,00	
BH13	Tubo aperto		6,80			7,10	
BH15	Casagrande (cella1)					a	a
	Casagrande (cella2)					a	a
BH16	Casagrande (cella1)					9,75	10,12

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio	Tipologia piezometro	gen-22	feb-22	mar-22	apr-22	mag-22	giu-22
		Livelli di falda rilevati (m da p.c.)					
	Casagrande (cella2)					10,15	10,80
BH17bis	Casagrande (cella1)						
	Casagrande (cella2)		10,40				
BH20	Tubo aperto		6,30			6,50	
BH21	Tubo aperto		6,60			6,90	
BH23	Tubo aperto		3,00			3,20	
BH24	Tubo aperto		3,20			3,30	
BH26	Tubo aperto		3,50			3,75	
BH28	Tubo aperto	3,80				4,20	
BH29	Tubo aperto		3,50			3,80	
BH31	Tubo aperto		4,80			5,20	

LEGENDA

a = falda assente

3.1.2 Campagna indagini Progetto Preliminare (2010-11)

Tra dicembre 2010 ed aprile 2011, nell'ambito del progetto preliminare "E78 S.G.C. Grosseto-Fano – Tratto Tosco-Umbro, Le Ville di Monterchi – Parnacciano", è stata realizzata una campagna di indagini così articolata:

- Sondaggi geognostici a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo con prelievo di campioni ed esecuzione di prove in sito, attrezzati con piezometri o con tubi per la realizzazione di prove sismiche in foro;
- Prove penetrometriche dinamiche SPT e statiche CPTU;
- Pozzetti geognostici con prelievi di campioni di terreno;
- Indagini geofisiche inclusive sia di stendimenti sismici di superficie, sia di prove in foro tipo DH (*Down-hole*);
- Monitoraggio dei livelli piezometrici.

L'intera campagna in questione si estende su più lotti limitrofi, di conseguenza, per lo studio del progetto in esame sono stati utilizzati solamente i sondaggi presenti nel corridoio in oggetto.

Nella Tabella 3-4 si riporta una sintesi dei sondaggi eseguiti e presi in considerazione per la caratterizzazione geotecnica. La posizione dei sondaggi è indicata nella Planimetria ubicazione indagini in sito (*T00GE01GEOPU01-07*).

Tabella 3-4 Quadro di riferimento delle indagini eseguite (sondaggi geognostici)

Sondaggio	Tipologia	Quota (m s.l.m.)	Lunghezza (m)	Prove in foro	Campioni
S01	cc	314,17	22,5	3 SPT 1 Pz	1 Sh
S03	cc	373,15	40,0	1 DMT 1 Dh	-
S04	cc	319,01	30,0	2 SPT, 1 PMT 1 Pz	-
S05	cc	333,81	40,0	3 SPT 1 Lf, 1 Pz	2 Sh
S05bis	dn	333,81	40,0	1 Dh	-
S06	dn / cc	389,57	75,0	1 SPT, 2 PMT 1 Lf, 1 Pz	1 Sh

LEGENDA

Tipologia: cc = carotaggio continuo; dn = distruzione di nucleo;

Prove in foro: SPT = prova penetrometrica standard; PMT = prove pressiometriche; DMT = prove dilatometriche; DH = down-hole; CH = cross-hole; Pz = piezometro; Lf = Lefranc; Lg = Lugeon

Campioni: Sh = campione indisturbato; Cr = campione rimaneggiato; Cl = campione litoide

Nella Tabella 3-5 si riporta una sintesi dei pozzetti eseguiti e presi in considerazione per la determinazione degli spessori di bonifica. La posizione dei pozzetti è indicata nella Planimetria ubicazione indagini in sito (T00GE01GEOPU01-07).

Tabella 3-5 Quadro di riferimento delle indagini eseguite (pozzetti esplorativi)

Pozzetto	Profondità (m)	Prova PLT	Profondità (m)	Campioni
PG01	1,7	1	0,6	1 Cr

Per maggiori dettagli sulle modalità esecutive delle indagini geognostiche, si rimanda agli specifici rapporti emessi dalla ditta esecutrice.

3.1.2.1 Misure piezometriche

Durante la campagna di indagini 2010-11 sono stati installati n. 3 piezometri a tubo aperto e n. 1 piezometro di Casagrande.

Nella Tabella 3-6 si riportano i livelli di falda rilevati durante le diverse misurazioni.

Tabella 3-6 Esito delle misure piezometriche

Sondaggio	Tipologia piezometro	gen-11	feb-11	mar-11	apr-11	mag-11	giu-11	lug-11
		Livelli di falda rilevati (m da p.c.)						
S01	Tubo aperto		3.89					3.62
S04	Tubo aperto		2.28					1.98
S05	Tubo aperto		13.64					13.18
S06	Casagrande (cella1)							49.96

3.2 PROVE IN SITO

3.2.1 Prova penetrometrica dinamica (SPT, *Standard Penetration Test*)

Nel corso delle perforazioni di sondaggio sono state eseguite prove di resistenza dinamica SPT a profondità variabile.

I valori di N_{SPT} sono stati normalizzati per tener conto del rendimento medio misurato pari a $ER_{iM} = 60\%$ (Skempton, 1986) e dell'influenza del valore della tensione litostatica efficace attraverso il fattore di correzione C_N , calcolato secondo la formula di Peck, Hanson e Thorburn (1974):

$$C_N = 0,77 \log\left(\frac{20}{\sigma'_{v0}}\right)$$

dove σ'_{v0} è la tensione litostatica efficace alla quota di esecuzione della prova espressa in kg/cm^2 .

I valori di N_{SPT} normalizzati sono stati quindi ottenuti mediante la seguente espressione:

$$N_{1(60)} = C_N \cdot \left(\frac{ER_{iM}}{60}\right) \cdot N_{SPT}$$

Nelle figure successive sono riportati i risultati di tali prove, in termini di numero di colpi N_{SPT} . In particolare, per ciascuna prova sono indicati la profondità, i valori dei numeri di colpi N_1 , N_2 , N_3 e $N_{SPT} = N_2 + N_3$, nonché i valori della tensione litostatica efficace σ'_{v0} , del coefficiente di correzione C_N e del numero di colpi normalizzato $N_{1(60)}$. È stata anche riportata la profondità della falda, laddove risulta minore della profondità di prova. Il rifiuto strumentale è indicato con un numero di colpi pari a 100.

I dati desunti dalle prove SPT sono stati elaborati tramite opportune correlazioni empiriche in funzione del tipo di terreno rinvenuto nei sondaggi per la stima dei parametri geotecnici.

3.2.1.1 Criteri di interpretazione

La valutazione dei parametri geotecnici del terreno in seguito all'esecuzione di una prova penetrometrica dinamica avviene attraverso correlazioni affidabili ricavate da letteratura tecnica la cui validità è confermata a livello internazionale.

Di seguito si riportano le correlazioni utilizzate nell'ambito di questo progetto.

Densità relativa

Di seguito sono riportate le correlazioni fra il valore di N_{SPT} e la densità relativa per i terreni a grana grossa (sabbie e ghiaie).

La densità relativa è valutata attraverso correlazioni applicabili solo nel caso di terreni prevalentemente sabbiosi. In presenza di depositi ghiaiosi si ottengono valori eccessivamente elevati e quindi a sfavore di sicurezza: in questo caso si adotta il valore più basso fra quelli calcolati con metodi differenti.

Skempton (1986). Questa correlazione è valida solo per le sabbie. La densità relativa può essere correlata al valore di N_{SPT} con la seguente relazione per i terreni normalconsolidati:

$$D_r = \left(\frac{N_{SPT}}{a + b \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{100}} \right)^{0,5}$$

mentre per i terreni sovraconsolidati si ha:

$$D_r = \left(\frac{N_{SPT}}{a + b \cdot C_{OC} \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{100}} \right)^{0,5}$$

dove a e b sono costanti empiriche indicate nella Tabella 3-7, σ'_{v0} è la tensione litostatica efficace alla quota della prova SPT espressa in kPa, N_{SPT} è il numero di colpi misurato

$$C_{OC} = \frac{1 + 2K_{OOC}}{1 + K_{ONC}}$$

essendo $K_{ONC} = 1 - \sin \varphi'$ il coefficiente di spinta a riposo per terreni normalmente consolidati, $K_{OOC} = K_{ONC}(OCR)^{\sin \varphi'}$ il coefficiente di spinta a riposo per terreni sovraconsolidati, OCR il grado di sovraconsolidazione.

Tabella 3-7 Costanti empiriche a e b (Skempton, 1986)

Tipo di materiale	a	b
Sabbie fini NC	27,5	27,5
Sabbie grosse NC	43,3	21,7
Sabbie OC	27,5 ÷ 43,3	21,7 ÷ 27,5

Gibbs e Holtz (1957). Questa correlazione è valida per le sabbie da fini a grossolane pulite. Per $D_r < 70\%$ così come per $\sigma'_{v0} < 5$ kPa i valori della densità relativa sono tendenzialmente più elevati di quelli reali.

$$D_r = \left\{ \left[1,5 \cdot \left(\frac{N_{SPT}}{F} \right)^{0,222} \right] - 0,6 \right\}$$

dove $F = 0,0065 \cdot \sigma_{v0}^2 + 1,68 \cdot \sigma_{v0} + 14$, σ_{v0} è la tensione litostatica totale espressa in t/m².

Meyerhof (1957). Questa correlazione è valida per le sabbie da fini a grossolane pulite, per qualunque valore di tensione efficace, in depositi normalmente consolidati. Nel caso di depositi ghiaiosi il valore che si ottiene è sovrastimato, contrariamente in quelli limosi è sottostimato.

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N_{SPT}}{\sigma'_{v0} + 0,7}}$$

dove σ'_{v0} è la tensione litostatica efficace espressa in kg/cm² e N_{SPT} è il numero di colpi misurato. Il metodo fornisce generalmente valori in eccesso rispetto ad altri metodi nei primi metri di approfondimento della prova.

Bazaraa (1967). Questa correlazione è valida per le sabbie in generale, per qualunque valore di tensione efficace.

PROGETTAZIONE ATI:

$$D_r = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{20 \cdot (1 + 4,1 \cdot \sigma'_{v0})}} \quad \text{per } \sigma'_{v0} \leq 0,732 \text{ kg/cm}^2$$

$$D_r = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{20 \cdot (3,24 + 1,024 \cdot \sigma'_{v0})}} \quad \text{per } \sigma'_{v0} > 0,732 \text{ kg/cm}^2$$

dove σ'_{v0} è la tensione litostatica efficace espressa in kg/cm² e N_{SPT} è il numero di colpi misurato.

Schultze e Menzanbach (1961). Questa correlazione è valida per le sabbie da fini a ghiaiose, per qualunque valore di tensione efficace, in depositi normalmente consolidati. Nel caso di depositi ghiaiosi il valore che si ottiene è sovrastimato, contrariamente in quelli limosi è sottostimato.

$$\ln(D_r) = 0,478 \cdot \ln(N_{SPT}) - 0,262 \cdot \ln(\sigma'_{v0}) + 2,84$$

dove σ'_{v0} è la tensione litostatica efficace espressa in kg/cm² e N_{SPT} è il numero di colpi misurato.

Angolo di resistenza al taglio

Per stimare l'angolo di resistenza a taglio dal valore delle prove penetrometriche dinamiche possono essere adottate le seguenti correlazioni.

L'angolo di resistenza al taglio del materiale indagato può essere valutato attraverso due categorie di metodi: i metodi di correlazione diretta e i metodi di correlazione indiretta. Tra i metodi di correlazione diretta vanno considerati, in generale, più attendibili quelli che esprimono l'angolo di resistenza al taglio anche in funzione della tensione efficace agente sullo strato.

Shioi e Fukuni (Road Bridge Specification, 1982). Questa correlazione è valida per sabbie fini o limose e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova superiori a 8÷10 m nel caso di terreni sopra falda e superiori a 15 m per terreni immersi in falda ($\sigma'_{v0} > 150 \div 200$ kPa).

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

dove N_{SPT} è il numero di colpi misurato.

Shioi e Fukuni (Japanese National Railway, 1982). Questa correlazione è valida per sabbie medio grosse fino a sabbie ghiaiose e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità di prova superiori a 8÷10 m nel caso di terreni sopra falda e superiori a 15 m per terreni immersi in falda ($\sigma'_{v0} > 150 \div 200$ kPa).

$$\varphi = 0,3 \cdot N_{SPT} + 27$$

dove N_{SPT} è il numero di colpi misurato.

Hatanaka e Uchida (1996). A differenza delle formule precedenti questo metodo propone una correlazione tra φ il parametro N_1 (resistenza penetrometrica normalizzata rispetto alla pressione efficace di 1 kg/cm²). N_1 viene valutato con la relazione di Liao e Whitman (1986):

$$N_1 = \frac{N_{SPT}}{\left(\frac{\sigma'_{v0}}{98,1}\right)^{0,5}}$$

dove σ'_{v0} è la tensione litostatica efficace espressa in kPa.

L'angolo di resistenza al taglio viene fornito quindi dalla relazione:

$$\varphi = (\alpha \cdot N_1)^{0,5} + \beta$$

con $\alpha = 20$ e $\beta = 20^\circ \pm 3^\circ$.

Schmertmann (1975). Questa correlazione è valida per sabbie e ghiaie in genere.

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{N_{SPT}}{\left(12,2 + 20,3 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{p_a}\right)} \right]^{0,34}$$

dove σ'_{v0} è la tensione litostatica efficace espressa in kPa e p_a è la pressione atmosferica pari a 98,1 kPa.

Schmertmann (1978). Questa correlazione è valida per sabbie e ghiaie in genere. Facendo riferimento ad un altro parametro, affetto generalmente da errore non trascurabile, i valori di φ vengono ad essere quasi sempre sovrastimati.

$\varphi = 28,0 + 0,140Dr$	Sabbia fina uniforme
$\varphi = 31,5 + 0,115Dr$	Sabbia media uniforme o fina ben gradata
$\varphi = 34,5 + 0,100Dr$	Sabbia grossa uniforme o media ben gradata
$\varphi = 38,0 + 0,080Dr$	Ghiaiuto uniforme o sabbie e ghiaie poco limose

Modulo di deformazione a taglio

Per la determinazione del modulo di taglio iniziale G_0 possono essere utilizzate le seguenti correlazioni.

Ohsaki e Iwasaki (1973). Il metodo è valido per le sabbie pulite o con fine plastico (limo o argilla) e si basa sulla seguente relazione:

$$G_0(t/m^2) = aN_{SPT}^b$$

dove N_{SPT} è il numero di colpi misurato, mentre a e b sono costanti dipendenti dalla granulometria del deposito secondo il seguente schema:

a	b	Granulometria
650	0.94	Sabbie pulite
1182	0.76	Sabbie con fine plastico

PROGETTAZIONE ATI:

Velocità delle onde S

Ohta e Goto (1978). Secondo gli autori la velocità delle onde S è stimabile mediante la relazione:

$$V_S = C \cdot N_{SPT}^{0,171} \cdot z^{0,199} \cdot f_A \cdot f_G \text{ [m/s]}$$

dove C è una costante empirica pari a 67,3, z è la profondità dal p.c. in m, f_A è un coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (Tabella 3-8), f_G è un coefficiente funzione della composizione granulometrica (Tabella 3-9).

Tabella 3-8 Relazione di Ohta e Goto, 1978 – Coefficiente f_A (funzione dell'epoca geologica del deposito)

f_A	Olocene	Pleistocene
	1,0	1,3

Tabella 3-9 Relazione di Ohta e Goto, 1978 – Coefficiente f_G (funzione della granulometria del deposito)

f_G	Ghiaie	Sabbie ghiaiose	Sabbie grosse	Sabbie medie	Sabbie fini
	1,45	1,15	1,14	1,09	1,07

Coesione non drenata

La prova penetrometrica non fornisce, in generale, valori attendibili per i terreni coesivi. Ci si può orientare nella scelta dei valori di C_u proposti di seguito considerando che:

- nessuna correlazione tiene conto delle pressioni efficaci e del grado di sovraconsolidazione;
- i metodi si applicano ad argille non sensitive e portano ad una sotto stima di C_u nel caso di materiali con elevato indice di sensibilità;
- vista la non trascurabile dispersione dei dati, i metodi vanno applicati con prudenza e solo per stime di primo riferimento.

Stroud (1974). La resistenza al taglio non drenata di un'argilla non sensitiva può essere approssimativamente stimata mediante la seguente correlazione:

$$c_u = f_1 \cdot N_{SPT}$$

in cui f_1 è un coefficiente funzione dell'indice di plasticità con valori compresi tra 3,5 e 6,5 kPa e mediamente vale 4,4 kPa.

3.2.2 Prova scissometrica (FVT, *Field Vane Test*)

Nel corso delle perforazioni di sondaggio sono state eseguite prove scissometriche a profondità variabile.

La prova scissometrica costituisce un metodo di misura diretta e accurata della resistenza a taglio in condizioni non drenate dei terreni coesivi saturi.

PROGETTAZIONE ATI:

Dal valore della torsione misurata in sito è possibile ricavare il valore c_{uFV} della resistenza a taglio non drenata, mobilitata nel terreno. In accordo alle indicazioni di letteratura (Bjerrum, 1973; Azzouz *et al.*, 1983), la resistenza a taglio non drenata c_u è data dalla seguente espressione:

$$c_u = \mu \cdot c_{uFV}$$

dove μ è un coefficiente di correzione (principalmente dovuto all'infissione della paletta e all'influenza della sosta tra infissione ed esecuzione della prova) funzione dell'indice di plasticità.

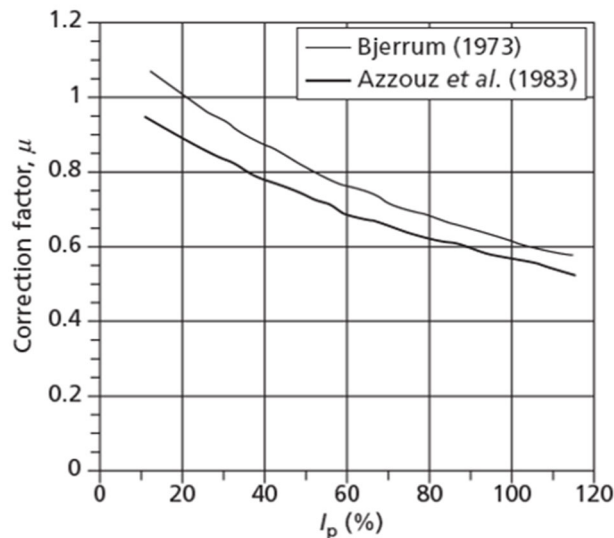


Figura 3.1 Fattore di correzione μ per la coesione non drenata c_u misurata mediante prova FVT (Fonte: Knappett e Craig, 2012)

Le prove scissometriche possono inoltre consentire di stimare il grado di sovraconsolidazione (OCR) come dimostrato da Mayne e Mitchell (1988). Questo è possibile, adottando un secondo coefficiente empirico, α_{FV} , avendosi:

$$OCR = \alpha_{FV} \cdot \left(\frac{c_{uFV}}{\sigma'_{v0}} \right)$$

Sulla base di un esteso *database* di risultati da prove provenienti da 96 differenti siti, è stata trovata la seguente correlazione (Knappett e Craig, 2012):

$$\alpha_{FV} \approx 22(IP)^{-0,48}$$

dove l'indice di plasticità, IP , è espresso in percentuale. La relazione sopra riportata fra α_{FV} e IP è del tutto simile a quella relativa fra μ e IP , avendosi $\alpha_{FV} \approx 4\mu$.

Mayne e Mitchell (1988) hanno inoltre dimostrato un buon accordo fra questo metodo e i risultati di prove edometriche convenzionali per determinare il grado di sovraconsolidazione nel campo di variazione dell'indice di plasticità IP fra l'8 e il 100%.

Noto il valore della coesione non drenata c_u e il grado di sovraconsolidazione OCR è possibile stimare il modulo di elasticità non drenato $E_{u,50}$ mediante la correlazione di Duncan e Buchignani (1987), secondo la quale il rapporto $E_{u,50}/c_u$ diminuisce all'aumentare del grado di sovraconsolidazione (Figura 3.2):

$$E_{u,50} = k \cdot c_u$$

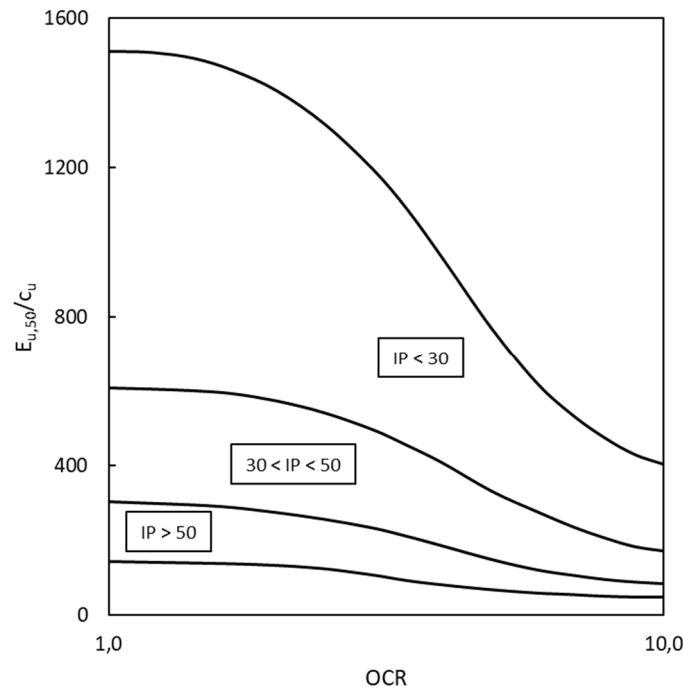


Figura 3.2 Correlazione di Duncan e Buchignani (1987)

3.2.3 Prove geofisiche

Durante la campagna d'indagini 2022 sono state eseguite prove in foro di tipo Down-hole e stendimenti sismici MASW.

Nella Tabella 3-10 sono riportati i valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{S,eq}$ ottenuta dai risultati delle prove in sito e secondo le prescrizioni normative contenute al §3.2.2 [1].

Tabella 3-10 Velocità delle onde di taglio $V_{S,eq}$ e categorie di sottosuolo secondo NTC2018

Prova	Ubicazione (km)	Opere d'arte	Tratto di prova (m)	$V_{S,eq}$ (m/s)	Profondità bedrock (m da p.c.)	Categoria di sottosuolo
BH01 Dh	0+450	Rilevato	45	230	31,0	C
BH03 Dh	0+700	VI01-02	35	248	12,0	E

PROGETTAZIONE ATI:

Prova	Ubicazione (km)	Opere d'arte	Tratto di prova (m)	V _{S,eq} (m/s)	Profondità bedrock (m da p.c.)	Categoria di sottosuolo
MASW01	0+775	GA01-02	50	446	23,5	B
S03 Dh	1+900	GN01-02	40	198	> 30	C
BH07 Dh	2+625	Rilevato	35	200	15,0	E
BH09 Dh	3+750	Rilevato	35	288	> 30	C
BH11 Dh	4+350	Rilevato	35	363	> 30	B
S05bis Dh	4+675	Rilevato	40	206	> 30	C
BH22 Dh	9+025	VI03-04	35	243	> 30	C
BH25 Dh	10+800	VI05-06	40	277	> 30	C
BH27 Dh	11+225	VI05-06	45	281	> 30	C
BH30 Dh	11+575	VI05-06	40	227	> 30	C
BH32 Dh	11+950	Rilevato	40	225	> 30	C

3.2.3.1 Criteri di interpretazione

Moduli elastici iniziali

Nel caso di problemi di dinamica dei terreni, come ad esempio lo studio del comportamento dei terreni in caso di un sisma, è necessario valutare il modulo di elasticità tangenziale G_0 e il modulo di elasticità longitudinale E_0 iniziali, associabili a piccole deformazioni. A tale scopo, è possibile fare riferimento alle formule di seguito riportate:

- modulo di Poisson dinamico

$$v_{dyn} = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left[\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1\right]}$$

- modulo dinamico di rigidezza

$$G_d = \rho \cdot V_S^2 = \frac{E_d}{(2 + 2 \cdot v_d)}$$

- modulo di deformabilità volumetrica

$$K_d = \rho \cdot \left(V_P^2 - 4 \cdot \frac{V_S^2}{3} \right) = \frac{E_d}{(3 - 6 \cdot v_d)}$$

- modulo di Young dinamico

$$E_d = \rho \cdot V_S^2 \cdot \frac{3 \cdot (V_P/V_S)^2 - 4}{(V_P/V_S)^2 - 1} = \rho \cdot V_P^2 \cdot (1 + v_d)(1 - 2 \cdot v_d)/(1 - v_d)$$

dove

V_P = velocità delle onde di compressione

PROGETTAZIONE ATI:

V_s = velocità delle onde di taglio

ρ = densità = γ/g

γ = peso di volume totale

g = accelerazione di gravità

G_d = modulo di taglio dinamico

E_d = modulo di Young dinamico

ν_d = modulo di Poisson dinamico

Moduli elastici “operativi”

Il comportamento dei terreni a grandi deformazioni risulta fortemente non lineare. I moduli di deformazione risultano funzione sia delle pressioni efficaci medie correnti sia del livello di deformazione indotto o del grado di mobilitazione della resistenza al taglio.

In relazione a quanto sopra la scelta dei moduli di deformazione per le analisi ingegneristiche viene a dipendere anche dal metodo di analisi adottato. Una volta ottenuti i valori iniziali, ovvero i moduli di taglio e di Young a piccolissime deformazioni, si possono stimare i moduli operativi adottando i seguenti criteri.

Nel caso di ricorso a metodi di calcolo elastico-lineari o elastico-lineari-plastici, per la stima dei moduli “operativi” da associare allo specifico problema al contorno possono essere fatte le seguenti assunzioni “convenzionali”:

- nell’analisi di fronti di scavo sostenuti con opere di sostegno tipo paratie (tirantate e non) i moduli di Young “operativi” E_{op} sono pari a circa $(1/3 \div 1/5) \times E_0$; il problema è infatti complessivamente di scarico. Inoltre i coefficienti di sicurezza nei confronti della stabilità imposti dalla normativa vigente sono tali per cui normalmente le deformazioni indotte risultano relativamente contenute, dell’ordine di $1 \times 10^{-3} \div 5 \times 10^{-3}$.
- nell’analisi di fondazioni profonde e dirette i moduli di Young “operativi” E_{op} sono pari a circa $1/5 \times E_0$, ciò in considerazione del fatto che:
 - gli spostamenti totali e differenziali ammissibili per l’opera sono molto contenuti (i cedimenti ammissibili sono infatti generalmente inferiori a $0,01 \times B$, essendo B la dimensione minore della fondazione);
 - da ciò deriva che, in base alla normativa vigente e alla pratica corrente, tale tipo di opere è caratterizzato da coefficienti di sicurezza nei confronti della rottura per capacità portante generalmente superiori a $2.5 \div 3$;
- nel calcolo dei cedimenti dei rilevati i moduli di Young “operativi” E_{op} sono pari a circa $(1/5 \div 1/10) \times E_0$ o, in alternativa, pari a quelli desumibili dalle correlazioni empiriche; per tali strutture in terra possono essere ammessi cedimenti totali e differenziali maggiori di quelli delle fondazioni profonde e dirette.

- infine, nel calcolo di opere in sotterraneo e gallerie, a causa delle elevate deformazioni indotte dallo scavo dell'opera geotecnica, i moduli di Young "operativi" E_{op} sono pari a circa $1/10 \times E_0$.

Tali considerazioni sui valori operativi dei moduli possono essere meglio valutate osservando la Figura 3.3 che mostra il tipico decadimento del modulo in funzione della deformazione di taglio a partire dai moduli dinamici, a piccolissime deformazioni.

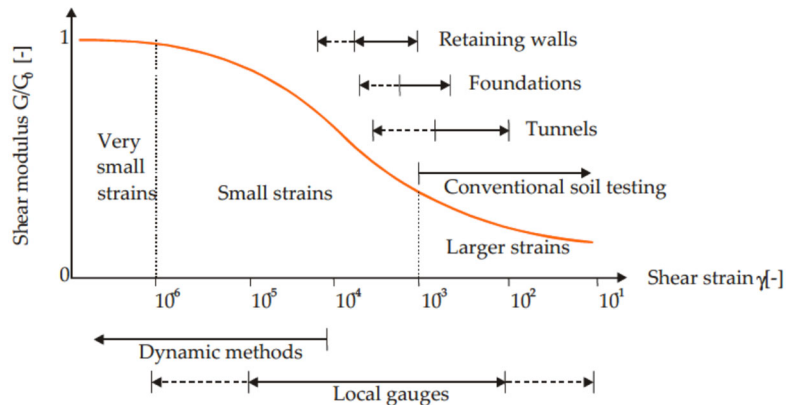


Figura 3.3 Andamento del modulo di deformabilità in funzione del livello di deformazione

Nel caso di ricorso a metodi di calcolo elastico-non lineari, i dati di ingresso per le analisi sono:

- moduli elastici iniziali
- curve di decadimento del modulo in funzione del livello di deformazione indotto.

Nei casi in cui non è possibile eseguire la caratterizzazione degli strati litologici con prove dirette per definire la curva iniziale di riferimento e da utilizzare nei codici di calcolo, ci si può riferire ai valori teorici presenti in letteratura scientifica.

I modelli di comportamento dei materiali sono stati ricavati empiricamente da vari autori, studiando un set di dati abbastanza ampio. Tipiche curve di decadimento ricavate con riferimento alla tipologia di materiale considerato sono state messe a confronto nel lavoro di Guerreiro *et al.* (2012). Nella normale pratica ingegneristica si preferisce utilizzare le curve di Vucetic e Dobry (1991) per i terreni a elevata plasticità ($30\% < PI < 60\%$), poiché la pressione di confinamento ha un impatto ridotto a valori di PI maggiori, e quelle di Darendeli (2001) per i terreni non plastici e/o di media plasticità.

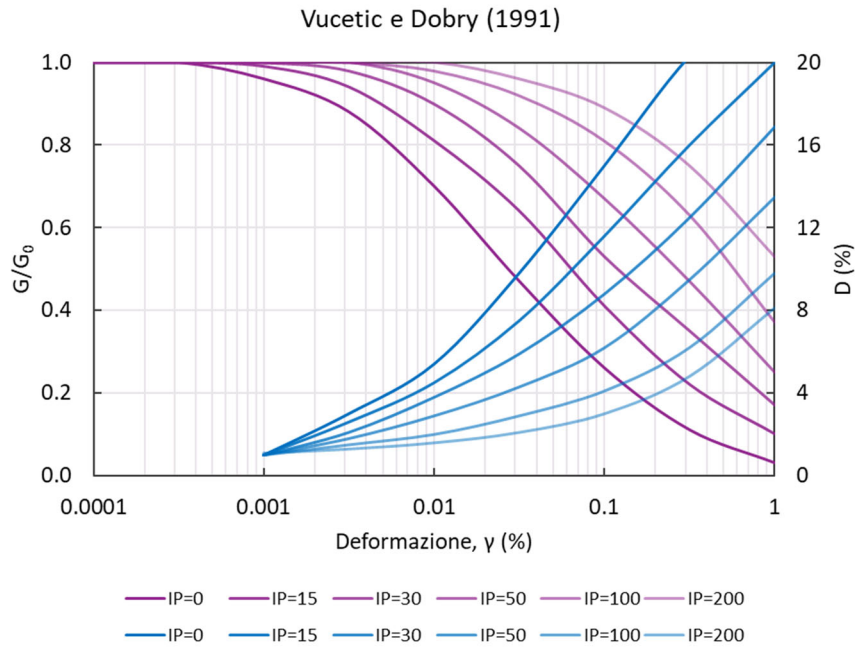


Figura 3.4 Modello empirico dei moduli di riduzione normalizzati per litologie sabbiose e argillose (Vucetic & Dobry, 1991). Le curve si riferiscono ai diversi stati di plasticità dei terreni

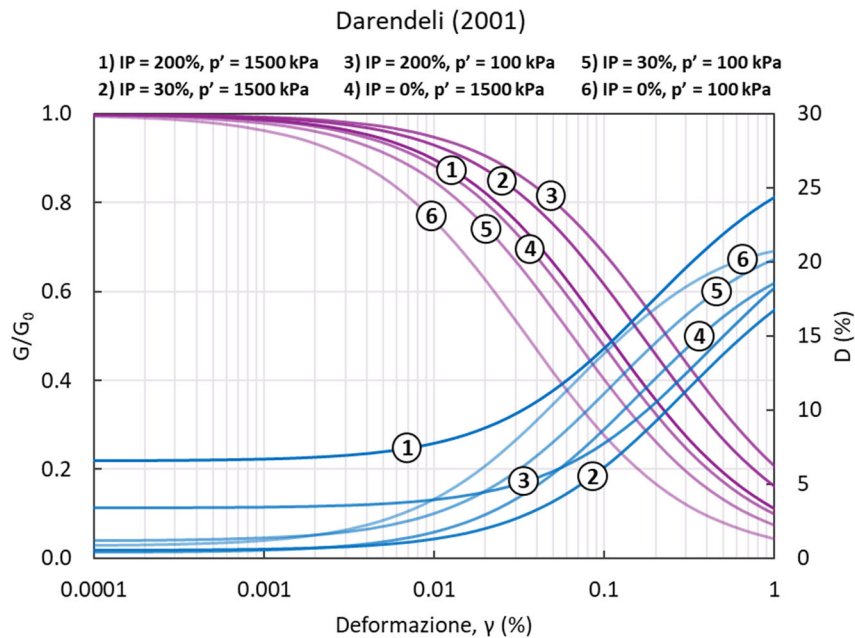


Figura 3.5 Modello empirico dei moduli di riduzione normalizzati per limiti di plasticità (0%, 30% e 200%) e per pressione di confinamento pari a 100 kPa e 1500 kPa (Darendeli, 2001)

3.3 PROVE DI LABORATORIO

Sui campioni indisturbati e rimaneggiati prelevati con i sondaggi, sono state eseguite prove di laboratorio di identificazione e meccaniche. In particolare, sono state effettuate determinazioni del peso dell'unità di volume γ , del peso specifico dei grani γ_s , della massa volumica γ_g (per i campioni litoidi), del contenuto naturale d'acqua w_n , dei limiti di consistenza w_L e w_P e della composizione granulometrica.

Sui campioni di terreno sono state eseguite n. 39 prove di taglio diretto (TD), n. 1 prova di taglio diretto e residuo (DR), n. 19 prove di compressione triassiale consolidata non drenata (TCU), n. 12 prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (TUU) e n. 19 prove di compressibilità edometrica (ED).

Sui campioni di roccia, invece, sono state eseguite n. 6 prove di compressione uniassiale (DC) e n. 4 prove di punzonamento (PLT).

3.3.1 Prova edometrica

La prova edometrica riproduce in laboratorio le condizioni di consolidazione monodimensionale. I dati di una prova edometrica sono interpretati con riferimento alle seguenti variabili:

- ε_v, σ'_v
- e, σ'_v

essendo ε_v la deformazione verticale ($= \Delta H/H_0$, dove H_0 è l'altezza iniziale del provino), e l'indice dei vuoti, σ'_{v0} la tensione litostatica efficace.

Facendo riferimento alle curve semilogaritmiche ($e, \log \sigma'_v$ oppure $\varepsilon_v, \log \sigma'_v$), la compressibilità nei vari tratti della curva di compressione è individuata dai seguenti parametri:

- a) la pendenza della curva nel ramo di ricompressione è definita rapporto di ricompressione RR nel piano $\varepsilon_v, \log \sigma'_v$:

$$RR = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \log \sigma'_v}$$

e indice di ricompressione c_r nel piano $e, \log \sigma'_v$:

$$c_r = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}$$

- b) la pendenza della curva nel ramo di compressione è definita rapporto di ricompressione CR nel piano $\varepsilon_v, \log \sigma'_v$:

$$CR = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \log \sigma'_v}$$

e indice di compressione c_c nel piano $e, \log \sigma'_v$:

$$c_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}$$

- c) la pendenza della curva nel ramo di scarico è definita rapporto di rigonfiamento SR nel piano $\varepsilon_v, \log \sigma'_v$:

PROGETTAZIONE ATI:

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

$$SR = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \log \sigma'_v}$$

e indice di rigonfiamento c_s nel piano $e, \log \sigma'_v$:

$$c_s = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}$$

In assenza di prove di laboratorio valide una stima sufficientemente corretta del modulo edometrico può essere fatta, in analogia con quanto già previsto per il modulo in condizioni non drenate $E_{u,50}$ utilizzando la medesima espressione (Duncan e Buchignani, 1976) con $k = 80$:

$$E_{ed} = 80 \cdot c_u$$

PROGETTAZIONE ATI:

Di seguito si riportano i risultati dell'interpretazione delle prove edometriche per ciascun litotipo individuato.

Tabella 3-11 Elaborazione prove edometriche

Litotipo	Quota falda (m)	Campione (-)	Profondità media (m)	σ'_{v0}	$\sigma'_{c,min}$	$\sigma'_{c,max}$	OCR_{min}	OCR_{max}	C_c	M	c_v	k_v
				(kPa)	(kPa)	(kPa)	(-)	(-)				
UG1b	18,20	BH01-Sh2	7,25	141	174	400	1,23	1,77	0,177	7,30	6,05E-08	8,13E-11
UG1a	2,50	BH07-Sh1	3,25	56	207	400	3,70	5,13	0,173	4,08	-	-
UG1a	1,35	BH08-Sh1	3,25	45	68	400	1,51	2,18	0,190	2,13	-	-
UG1a	2,50	BH09-Sh2	14,75	168	114	400	0,68	1,02	0,106	8,51	1,48E-07	1,71E-10
UG1b	2,50	BH10-Sh2	7,25	95	246	800	2,59	4,05	0,227	4,48	-	-
UG1b	6,30	BH20-Sh1	5,75	112	130	400	1,16	1,67	0,244	4,13	2,86E-08	6,79E-11
UG9	6,30	BH20-Sh2	12,75	185	81	200	0,44	0,59	0,164	4,22	1,13E-08	2,63E-11
UG9	6,60	BH21-Sh2	11,25	174	103	200	0,59	0,84	0,146	5,59	3,66E-08	6,42E-11
UG9	6,60	BH21-Sh3	21,25	271	94	200	0,35	0,46	0,171	6,79	9,17E-09	1,32E-11
UG1b	6,20	BH22-Sh2	12,75	184	243	800	1,32	1,96	0,171	6,01	-	-
UG10	3,00	BH23-Sh2	12,25	148	637	1600	4,30	6,08	0,272	9,90	-	-
UG1b	3,20	BH24-Sh1	3,25	63	205	400	3,25	4,71	0,192	4,27	-	-
UG1b	3,80	BH28-Sh1	3,45	67	142	400	2,12	2,94	0,189	2,99	1,03E-07	3,38E-10
UG9	3,80	BH28-Sh2	18,25	214	334	1600	1,56	2,25	0,184	9,32	9,69E-08	1,02E-10
UG1b	2,30	BH30-Sh1	3,25	54	221	800	4,09	6,11	0,213	3,02	2,49E-07	8,08E-10
UG9	2,30	BH30-Sh2	12,75	146	313	1600	2,14	3,82	0,453	3,17	2,04E-08	6,31E-11
UG1b	4,80	BH31-Sh1	3,25	63	237	800	3,76	5,81	0,216	3,89	-	-
UG9	4,80	BH31-Sh2	7,25	117	135	400	1,15	1,53	0,134	5,18	1,21E-07	2,29E-10
UG9	3,50	BH32-Sh3	13,25	163	131	400	0,80	1,14	0,236	5,01	2,14E-08	4,19E-11

PROGETTAZIONE ATI:

4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELLE PRINCIPALI FORMAZIONI

Le osservazioni sperimentali ottenute dalle prove in sito e in laboratorio sono esaminate nel seguito per ciascuna unità geotecnica individuata. L'elaborazione e l'interpretazione delle prove geotecniche in sito e in laboratorio è finalizzata alla definizione dei valori caratteristici dei parametri geotecnici.

Di seguito si riporta la caratterizzazione delle principali formazioni interagenti con le sole opere a cielo aperto. Per la caratterizzazione dei litotipi interagenti con le opere in sottterraneo si rimanda alla Relazione geotecnica delle opere in sottterraneo (*T00GN00OSTRE03/04*).

4.1 CARATTERIZZAZIONE DEI TERRENI

4.1.1 UG1a - Sabbia limosa

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto Ovest, dalla progressiva 0+000 km alla progressiva 0+750 km e sul tratto intermedio del tracciato, dalla progressiva 2+300 km alla progressiva 4+300 km.

L'unità UG1a rappresenta la coltre superficiale dell'unità geotecnica UG1, la quale comprende i depositi alluvionali recenti e attuali che colmano la Valle Tiberina e le valli dei principali affluenti del Tevere. Si tratta prevalentemente di sabbia limosa, a volte debolmente argillosa, mediamente densa.

All'interno dell'unità geotecnica UG1a sono stati prelevati n. 7 campioni indisturbati e sono state eseguite n. 6 prove SPT.

Tabella 4-1 Risultati prove SPT (UG1a)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
BH01	SPT1	10,00	18,20	3	5	6	11	60	0,77	8
BH02	SPT1	8,00	17,90	5	6	8	14	60	0,84	12
BH07	SPT1	5,55	2,50	1	2	2	4	60	1,10	4
	SPT2	12,00	2,50	2	4	8	12	60	0,91	11
BH09	SPT1	5,50	2,50	1	2	2	4	60	1,08	4
	SPT2	11,00		4	7	7	14	60	0,90	13

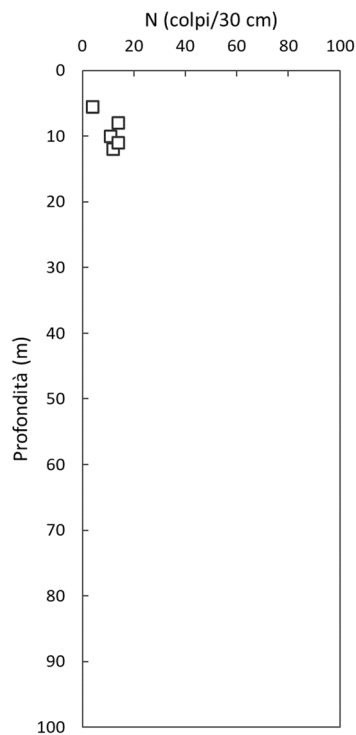


Figura 4.1 Risultati prove SPT (UG1a)

4.1.1.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 0 ÷ 10 % Sabbia = 43 ÷ 83 % Limo = 14 ÷ 39 % Argilla = 3 ÷ 17 %

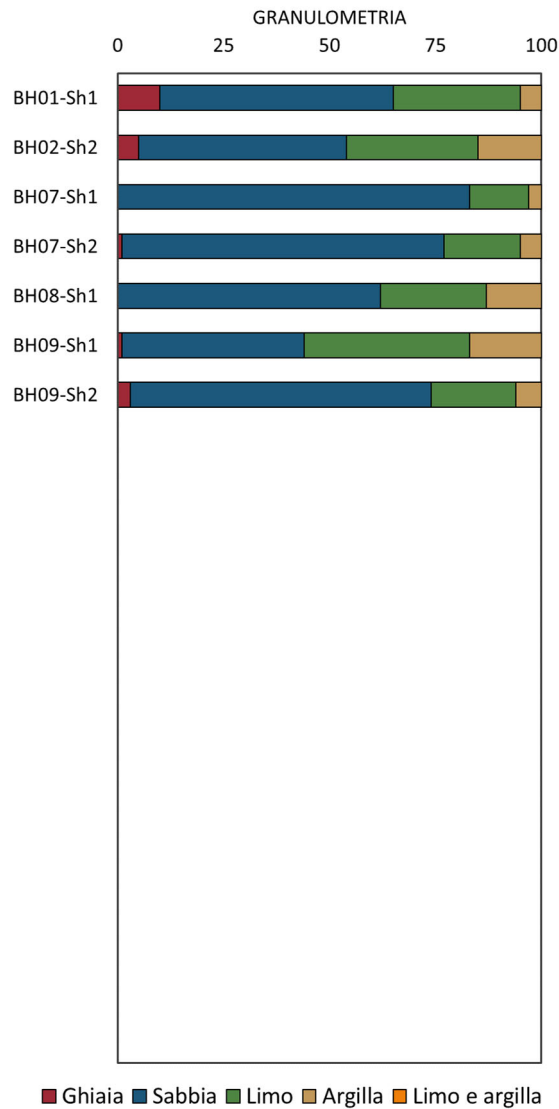


Figura 4.2 Analisi granulometrica (UG1a)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume naturale

$$\gamma = 19.1 \div 20.7 \text{ kN/m}^3$$

Peso di volume della parte solida

$$\gamma_s = 25.7 \div 27.0 \text{ kN/m}^3$$

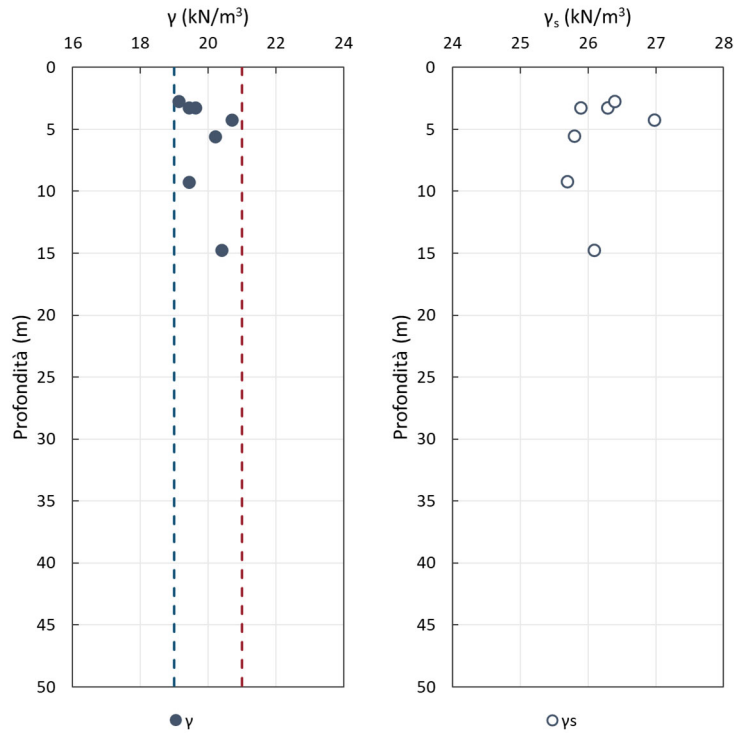


Figura 4.3 Peso dell'unità di volume naturale e della parte solida (UG1a)

Densità relativa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Densità relativa

$D_r = 22.2 \div 55.9 \%$

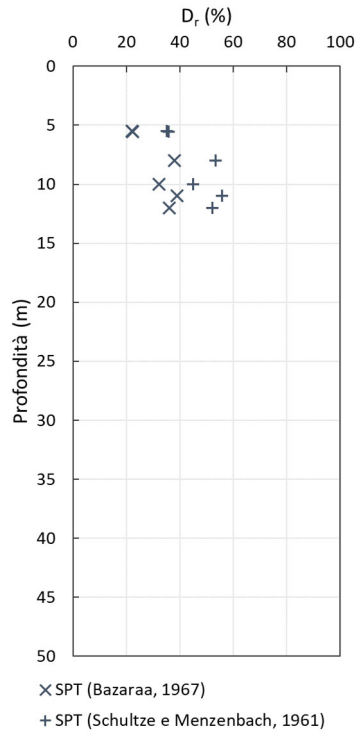


Figura 4.4 Densità relativa (UG1a)

4.1.1.2 Parametri di resistenza al taglio

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di coesione efficace c' e angolo di attrito efficace φ' .

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (CD)

Coesione efficace

$c' = 0$ kPa

Angolo di attrito efficace

$\varphi' = 36^\circ \div 39^\circ$

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Angolo di attrito efficace

$\varphi' = 29^\circ \div 38^\circ$

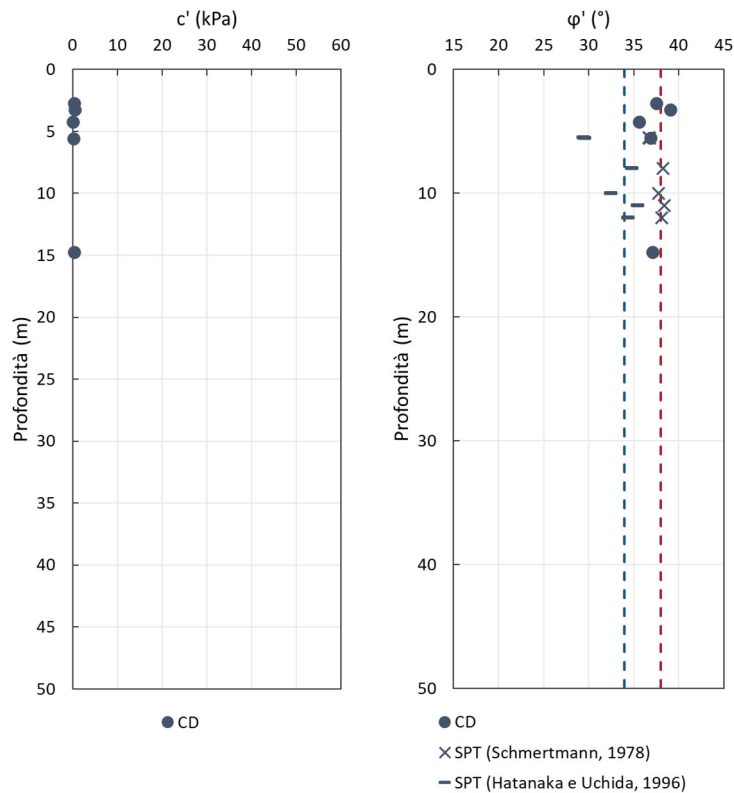


Figura 4.5 Parametri di resistenza al taglio (UG1a)

4.1.1.3 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale

$$G_0 = 47 \div 72 \text{ MPa}$$

Modulo di elasticità longitudinale

$$E_0 = 129 \div 200 \text{ MPa}$$

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Modulo di elasticità tangenziale

$$G_0 = 35 \div 70 \text{ MPa}$$

Modulo di elasticità longitudinale

$$E_0 = 83 \div 169 \text{ MPa}$$

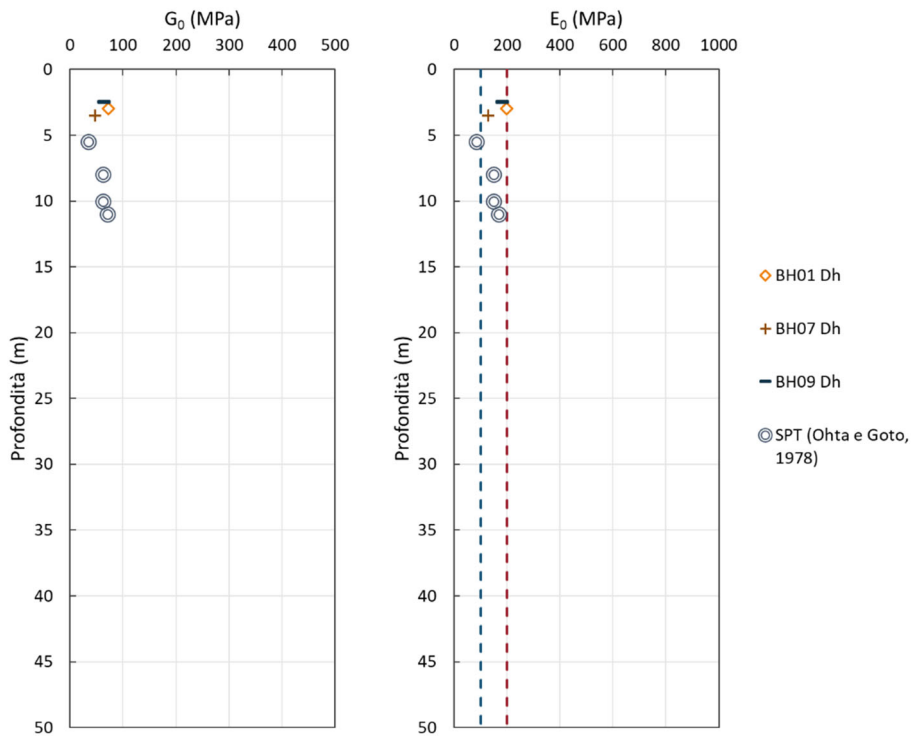


Figura 4.6 Parametri di deformabilità (UG1a)

4.1.2 UG1b - Limo argilloso

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto Ovest, dalla progressiva 0+000 km alla progressiva 0+750 km, sul tratto intermedio, dalla progressiva 2+300 km alla progressiva 4+300 km e sul tratto Est del tracciato, dalla progressiva 8+100 km fino a fine intervento.

L'unità UG1b rappresenta la porzione basale dell'unità geotecnica UG1, la quale comprende i depositi alluvionali recenti e attuali che colmano la Valle Tiberina e le valli dei principali affluenti del Tevere. Nella parte terminale del tracciato, invece, tale unità, oltre a rappresentare la coltre superficiale si rinviene a profondità variabili sottoforma di lenti caratterizzate da spessori modesti. Si tratta prevalentemente di limo argilloso e argilla limosa, spesso con sabbia, da poco plastico a plastico, da consistente a moderatamente consistente.

All'interno dell'unità geotecnica UG1b sono stati prelevati n. 21 campioni indisturbati e n. 6 campioni rimaneggiati, inoltre sono state eseguite n. 17 prove SPT di cui 1 ha raggiunto il rifiuto strumentale nel tratto successivo a quello di avviamento, n. 1 prova CPTU e sono state prese in considerazione 13 prove VT.

Tabella 4-2 Risultati prove SPT (UG1b)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
S01	SPT3	14,20	3,60	8	9	14	23	60	0,84	19
BH01	SPT2	19,00	18,20	7	13	16	29	60	0,58	17
BH08	SPT1	9,00	1,35	1	3	6	9	60	1,02	9
	SPT2	11,55		2	4	4	8	60	0,95	8
	SPT3	17,55		5	9	13	22	60	0,82	18
BH10	SPT1	5,00	2,50	7	12	14	26	60	1,12	29
	SPT2	10,80		12	19	22	41	60	0,93	38
	SPT3	15,00		32	r	-	100	60	0,84	-
BH20	SPT1	2,55	6,30	3	6	7	13	60	1,24	16
	SPT2	8,55		5	11	13	24	60	0,89	21
BH21	SPT1	5,55	6,60	11	15	13	28	60	0,98	28
BH23	SPT1	5,00	3,00	5	5	8	13	60	1,10	14
	SPT3	19,00		7	7	9	16	60	0,77	12
BH25	SPT1	5,55	3,20	5	10	12	22	60	1,07	24
BH28	SPT1	3,70	3,80	2	2	2	4	60	1,12	4
BH30	SPT3	18,70	2,30	3	7	7	14	60	0,78	11
	SPT4	22,00		7	5	5	10	60	0,74	7

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

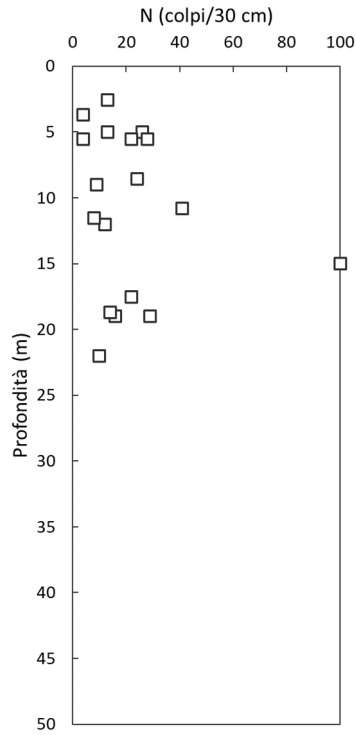


Figura 4.7 Risultati prove SPT (UG1b)

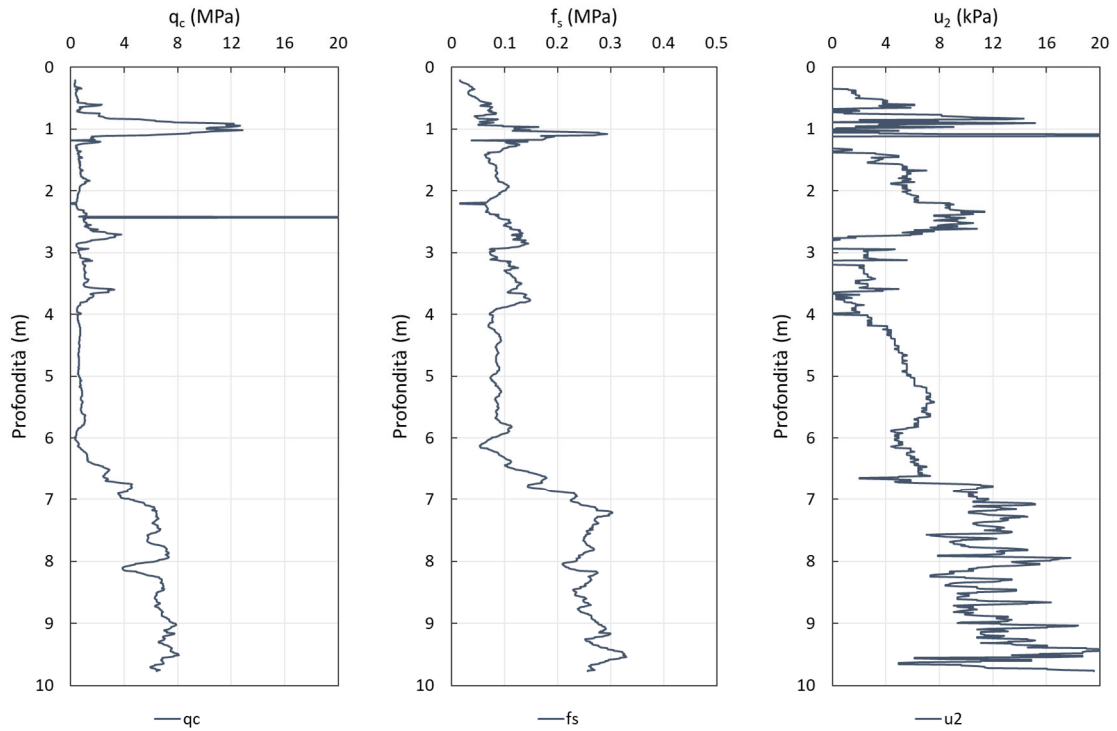


Figura 4.8 Risultati prove CPTU (UG1b)

PROGETTAZIONE ATI:

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

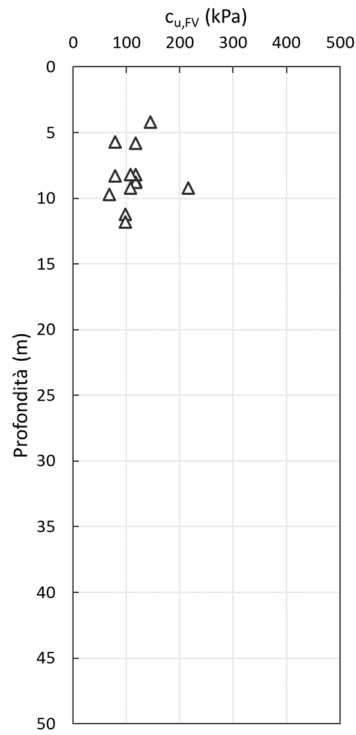


Figura 4.9 Risultati prove VT (UG1b)

PROGETTAZIONE ATI:

4.1.2.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 0 ÷ 38 % Sabbia = 5 ÷ 54 % Limo = 35 ÷ 71 % Argilla = 9 ÷ 49 %

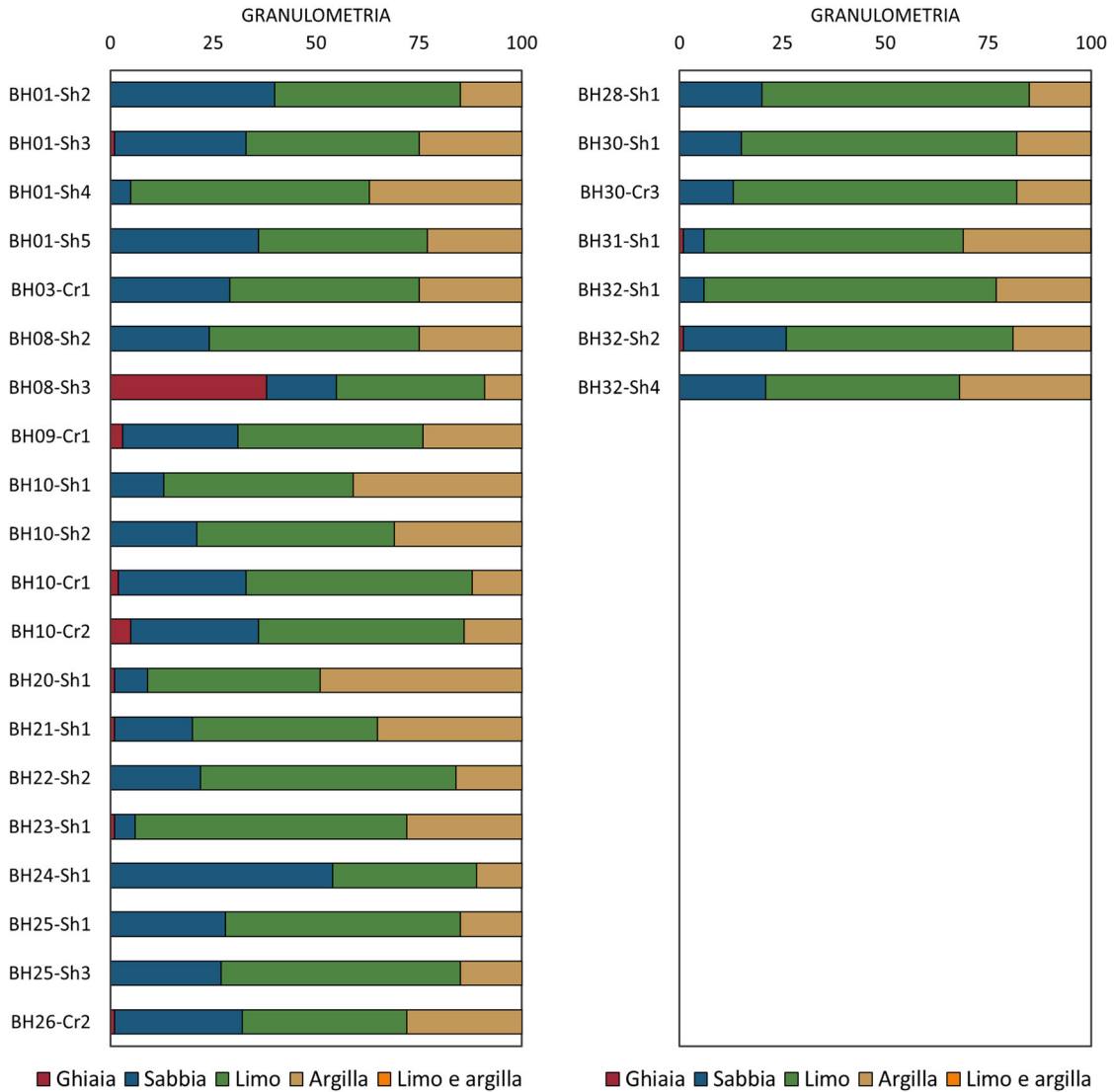


Figura 4.10 Analisi granulometrica (UG1b)

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

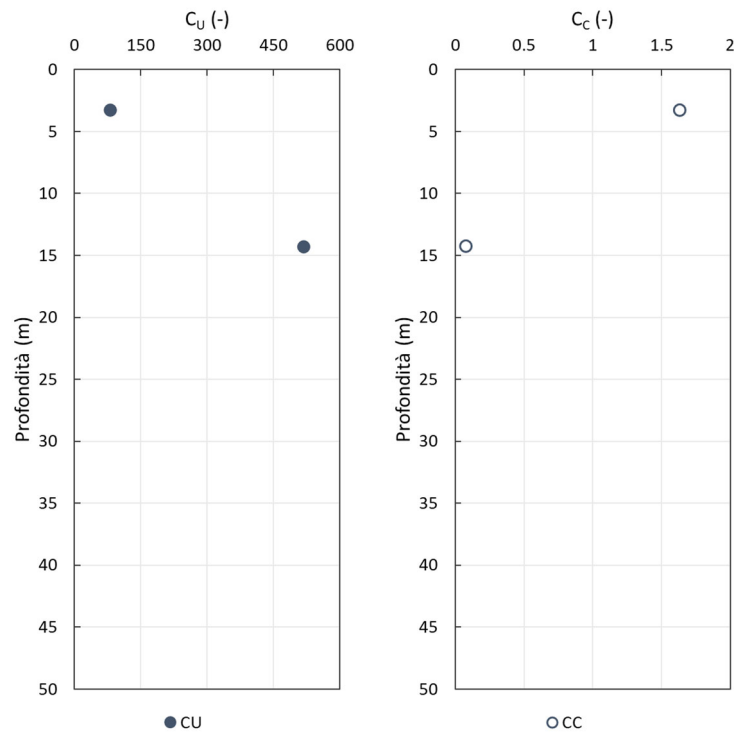


Figura 4.11 Coefficiente di uniformità e di curvatura (UG1b)

PROGETTAZIONE ATI:

Peso dell'unità di volume

Peso di volume naturale

$$\gamma = 18.1 \div 20.5 \text{ kN/m}^3$$

Peso di volume saturo

$$\gamma_{\text{sat}} = 18.1 \div 20.5 \text{ kN/m}^3$$

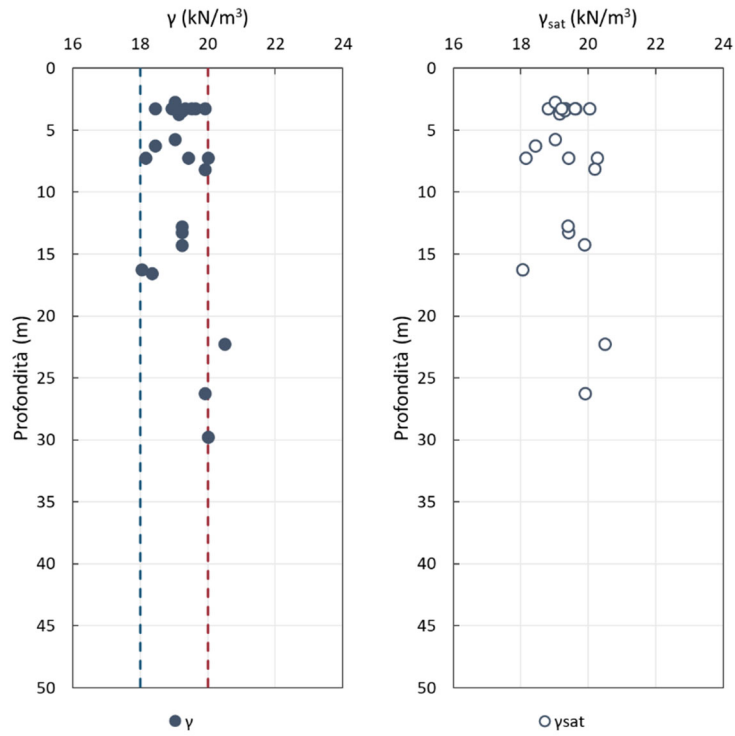


Figura 4.12 Peso dell'unità di volume naturale e saturo (UG1b)

Peso specifico dei grani

$$G_s = 2.55 \div 2.71$$

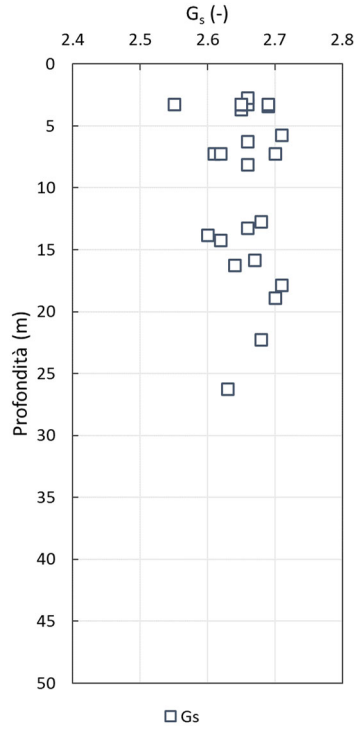


Figura 4.13 Peso specifico dei grani (UG1b)

Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione

Indice dei vuoti	$e = 0.47 \div 0.97$
Porosità	$n = 32 \div 49 \%$
Grado di saturazione	$S_r = 82 \div 100 \%$

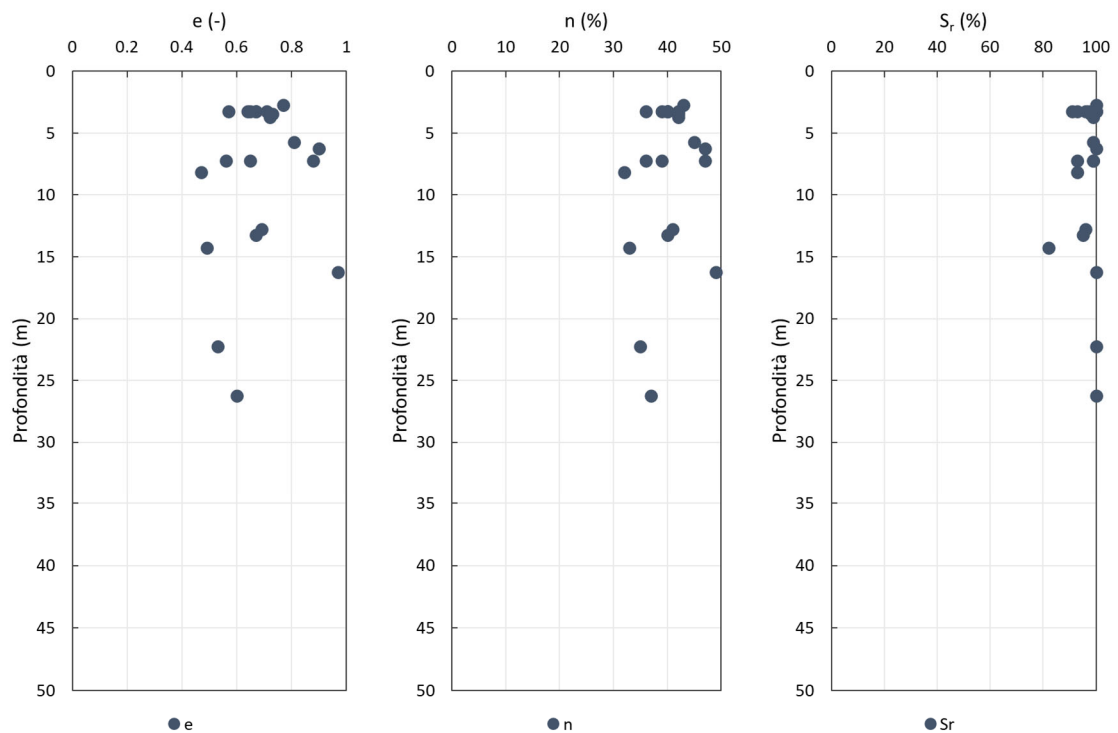


Figura 4.14 Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione (UG1b)

Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità

Contenuto naturale d'acqua	$w_n = 18.10 \div 36.90 \%$
Limite liquido	$w_L = 25 \div 60 \%$
Limite plastico	$w_P = 17 \div 27 \%$
Indice di plasticità	$IP = 8 \div 36 \%$

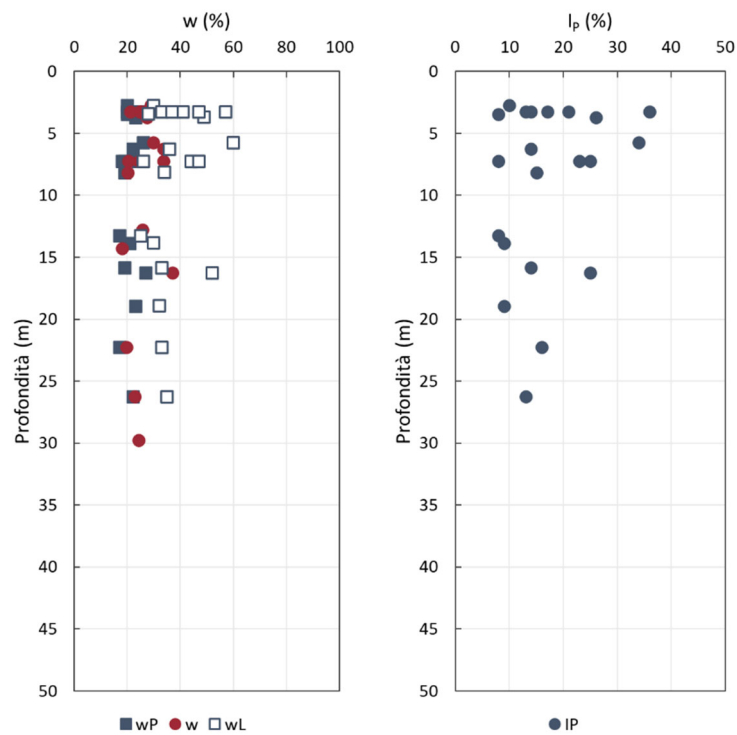


Figura 4.15 Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità (UG1b)

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

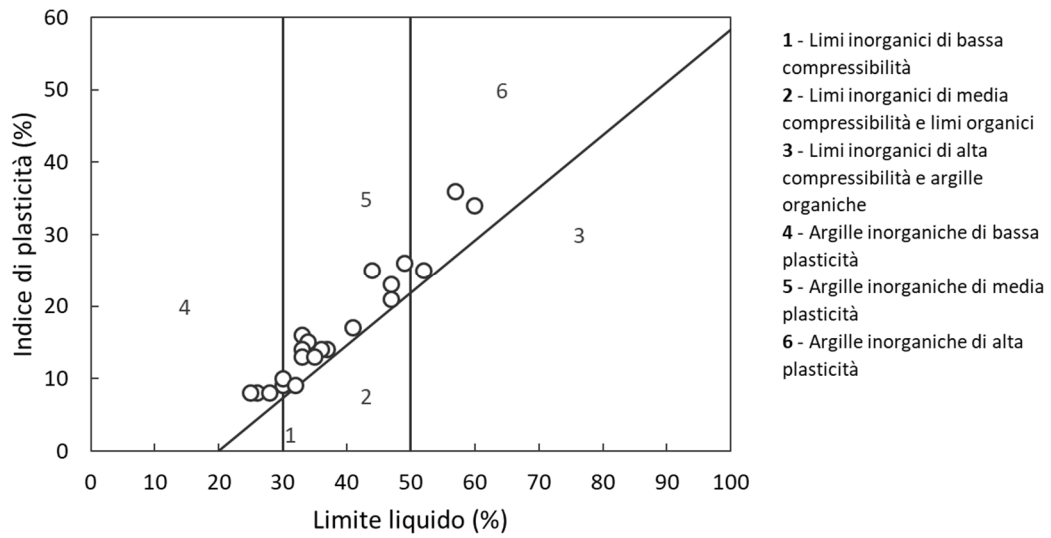


Figura 4.16 Carta di plasticità di Casagrande (UG1b)

PROGETTAZIONE ATI:

4.1.2.2 Parametri di resistenza a taglio drenati

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di coesione efficace c' e angolo di attrito efficace φ' .

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (CD)

Coesione efficace $c' = 0 \div 21$ kPa

Angolo di attrito efficace $\varphi' = 19^\circ \div 31^\circ$

PROVA TRIASSIALE CONSOLIDATA NON DRENATA (TCU)

Coesione efficace $c' = 0 \div 4$ kPa

Angolo di attrito efficace $\varphi' = 23^\circ \div 29^\circ$

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Angolo di attrito efficace $\varphi' = 29^\circ \div 38^\circ$

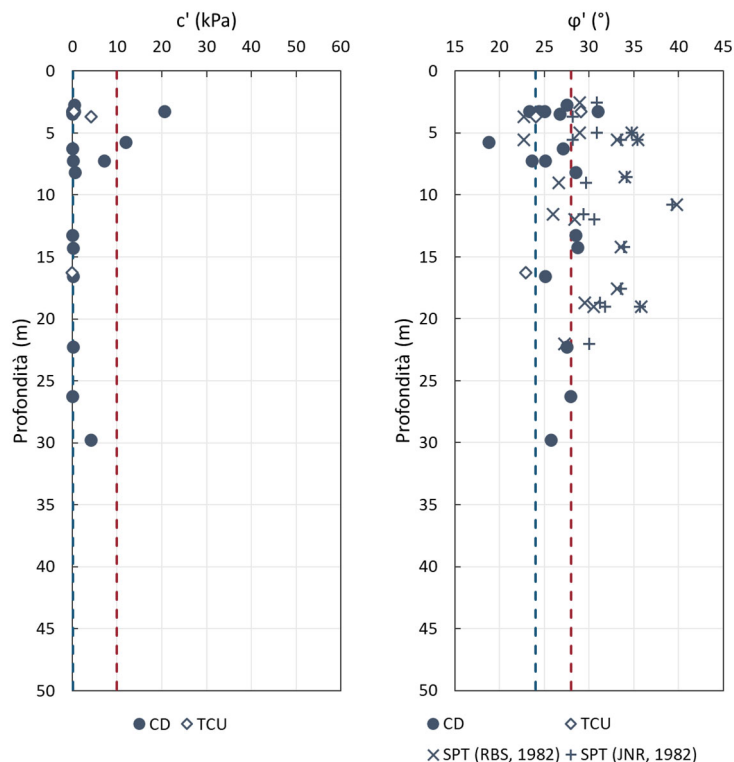


Figura 4.17 Parametri di resistenza al taglio drenati (UG1b)

4.1.2.3 Parametri di resistenza a taglio non drenati

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di resistenza al taglio non drenata c_u .

PROVA TRIASSIALE NON CONSOLIDATA NON DRENATA (TUU)

Coesione non drenata $c_u = 53 \div 104$ kPa

PROVA SCISSOMETRICA (VT)

Coesione non drenata $c_u = 69 \div 216$ kPa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Coesione non drenata $c_u = 18 \div 180$ kPa

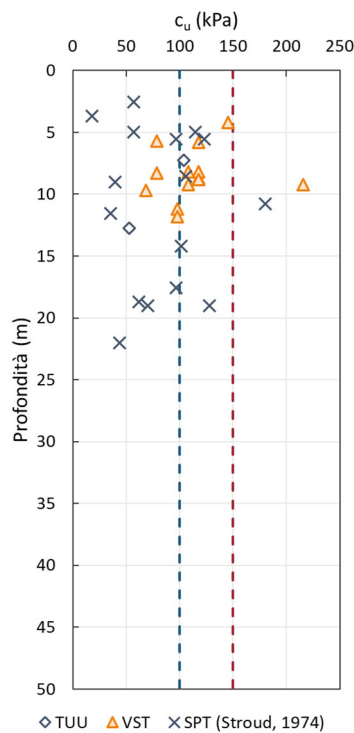


Figura 4.18 Parametri di resistenza al taglio non drenati (UG1b)

4.1.2.4 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 59 \div 223$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 160 \div 631$ MPa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 27 \div 103$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 65 \div 246$ MPa

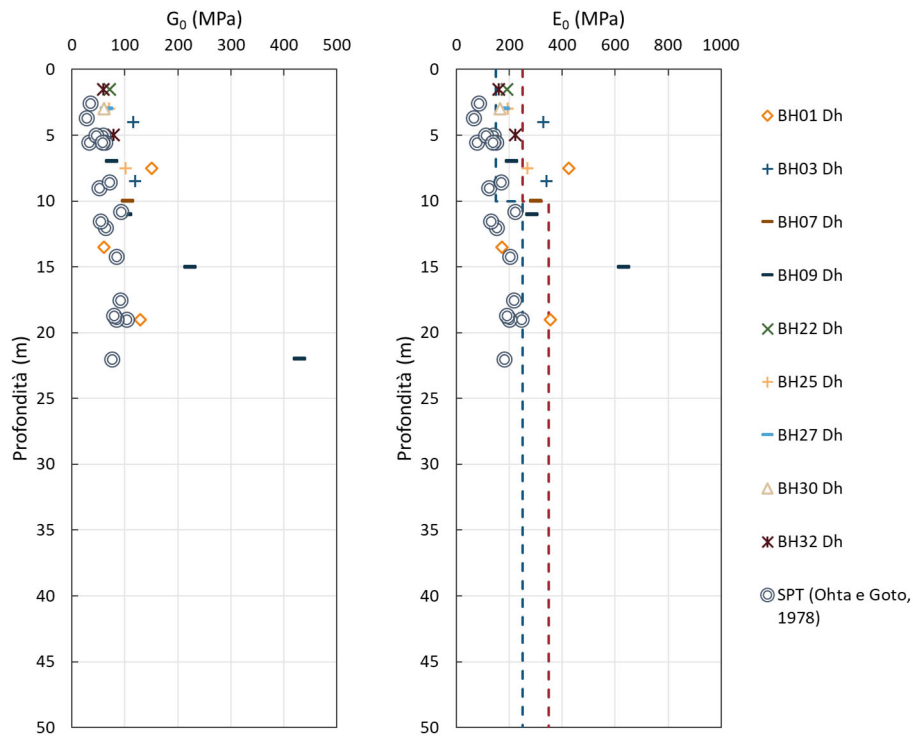


Figura 4.19 Parametri di deformabilità (UG1b)

4.1.3 UG2 - Sabbia con elementi lapidei

L'unità geotecnica in esame è presente solamente nel tratto iniziale del tracciato, dalla progressiva 0+000 km alla progressiva 0+750 km.

L'unità UG2 comprende la porzione di base dei depositi alluvionali recenti e attuali rintracciati a inizio lotto. Si tratta principalmente di sabbia fine limosa con clasti arenacei, spigolosi ed eterometrici, da densa a molto densa.

All'interno dell'unità geotecnica UG2 è stato prelevato n. 1 campione rimaneggiato e sono state eseguite n. 2 prove SPT di cui 1 ha raggiunto il rifiuto strumentale nel tratto di avviamento.

Tabella 4-3 Risultati prove SPT (UG2)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
BH01	SPT3	28,55	18,20	27	33	38	71	60	0,50	35
	SPT4	32,00		r	-	-	100	60	0,44	-

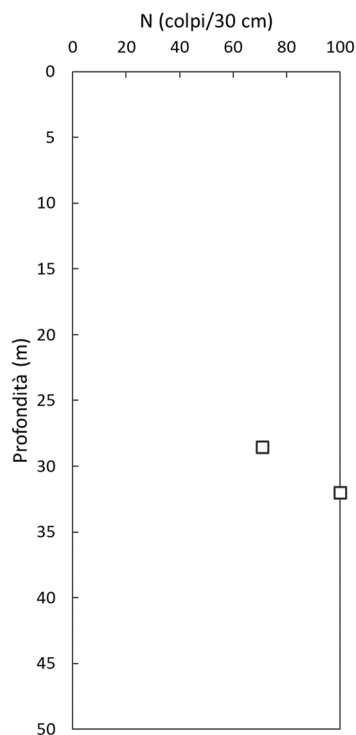


Figura 4.20 Risultati prove SPT (UG2)

4.1.3.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 9 %

Sabbia = 40 %

Limo = 36 %

Argilla = 15 %

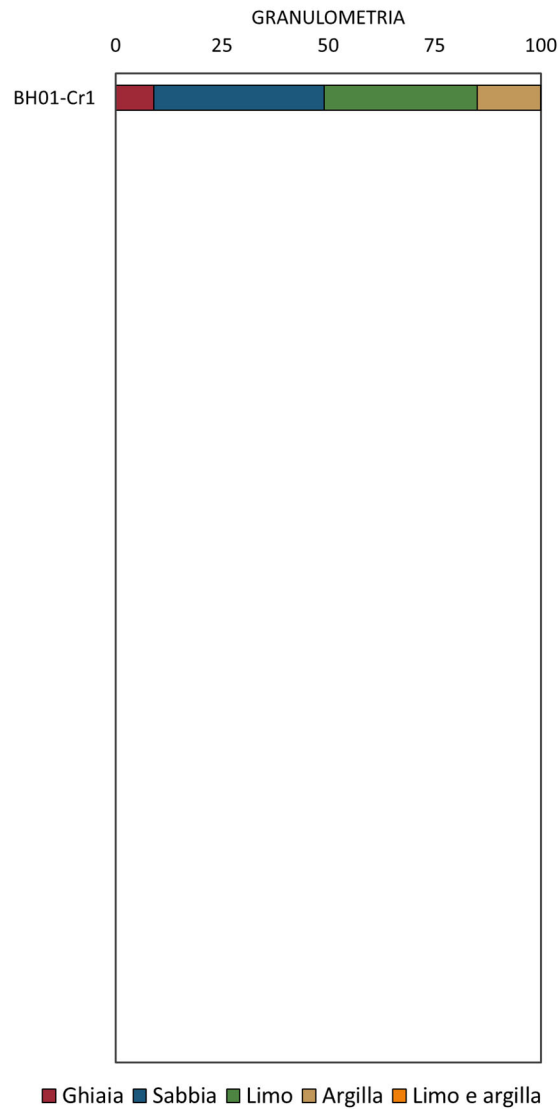


Figura 4.21 Analisi granulometrica (UG2)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume della parte solida $\gamma_s = 25.5 \text{ kN/m}^3$

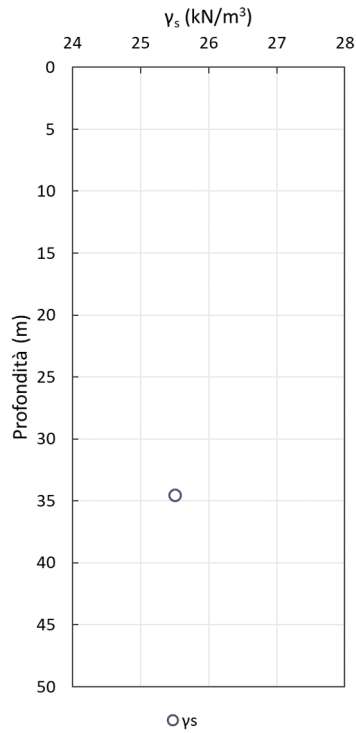


Figura 4.22 Peso dell'unità di volume della parte solida (UG2)

PROGETTAZIONE ATI:

Densità relativa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Densità relativa

$$D_r = 67.1 \div 88.4 \%$$

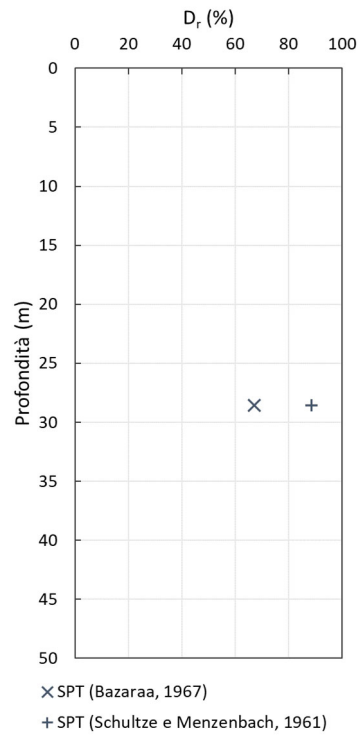


Figura 4.23 Densità relativa (UG2)

4.1.3.2 Parametri di resistenza al taglio

Di seguito si riportano i risultati dell'interpretazione di prove in sito in termini di angolo di attrito efficace φ' .

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Angolo di attrito efficace

$$\varphi' = 37^\circ \div 41^\circ$$

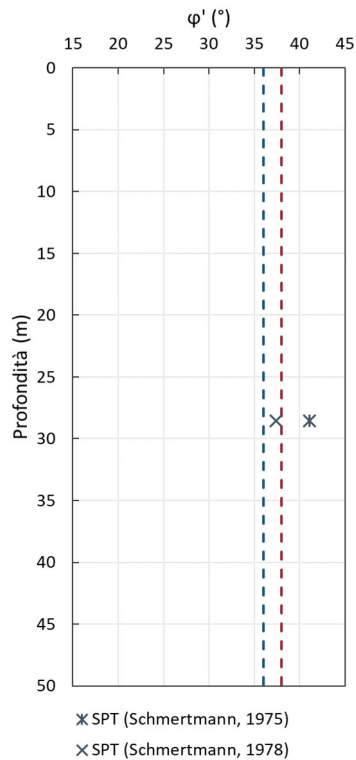


Figura 4.24 Parametri di resistenza al taglio (UG2)

4.1.3.3 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 480$ MPa
Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 172$ MPa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 466$ MPa
Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 194$ MPa

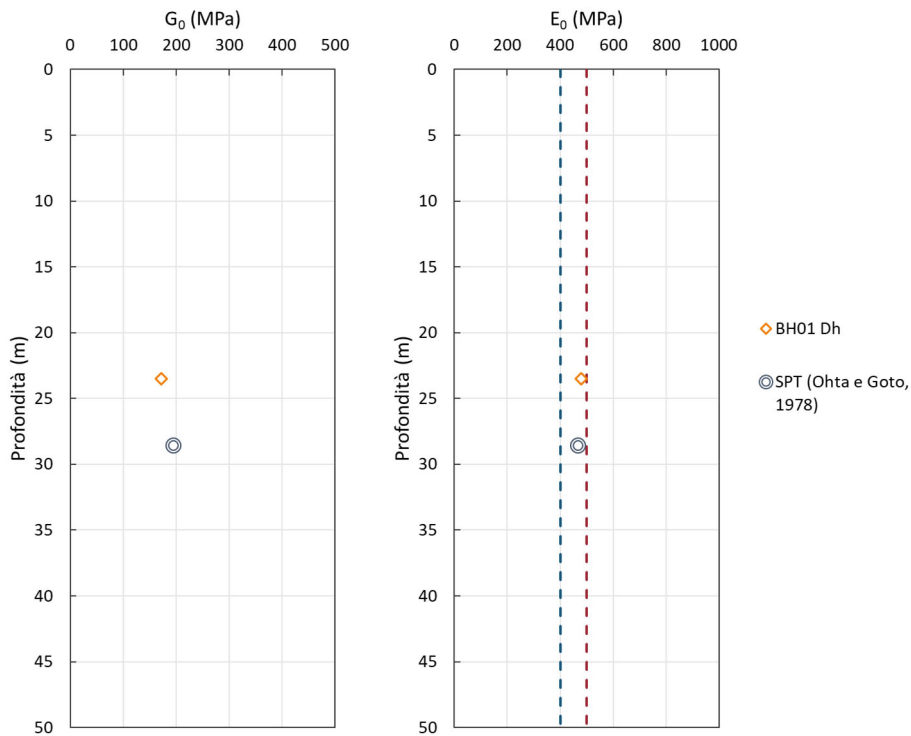


Figura 4.25 Parametri di deformabilità (UG2)

4.1.4 UG3 - Sabbia con limo

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto Ovest del tracciato, dalla progressiva 0+750 km alla progressiva 2+300 km.

L'unità UG3 rappresenta la coltre superficiale dell'unità UG4, e comprende i depositi eluviali e colluviali di natura detritica, caratterizzati da una matrice limosa argillosa con immersi clasti centimetrici e decimetrici di natura calcareo-arenitica. Si tratta prevalentemente di sabbia con limo, a volte argillosa, mediamente densa.

All'interno dell'unità geotecnica UG3 sono stati prelevati n. 3 campioni indisturbati e sono state eseguite n. 3 prove SPT.

Tabella 4-4 Risultati prove SPT (UG3)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
S01	SPT1	3,00	3,60	2	2	5	7	60	1,18	8
	SPT2	9,50		5	7	9	16	60	0,92	15
BH03	SPT1	8,55	12,00	2	4	6	10	60	0,83	8

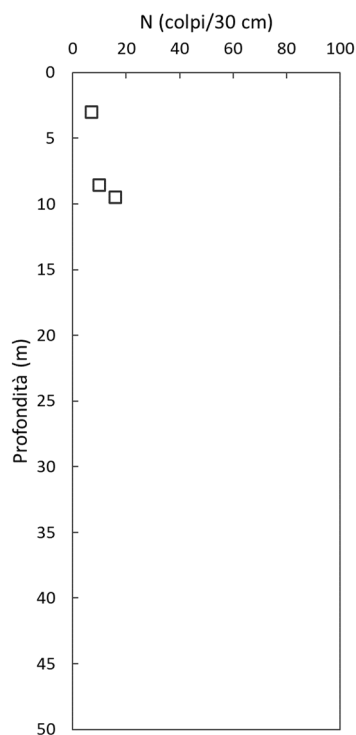


Figura 4.26 Risultati prove SPT (UG3)

PROGETTAZIONE ATI:

4.1.4.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 3 ÷ 46 % Sabbia = 36 ÷ 46 % Limo = 16 ÷ 40 % Argilla = 2 ÷ 14 %

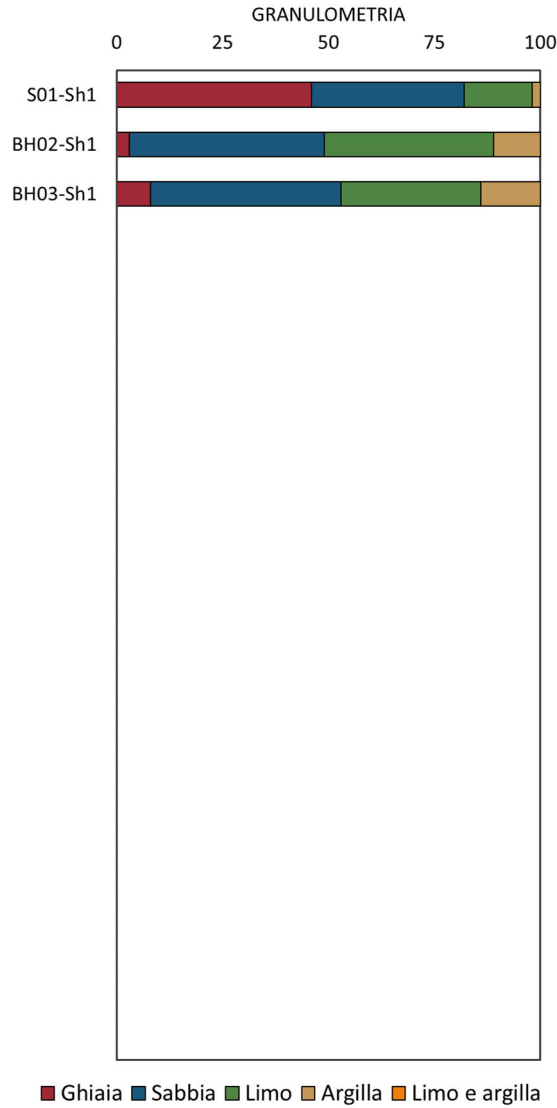


Figura 4.27 Analisi granulometrica (UG3)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume naturale

$$\gamma = 19.6 \div 20.4 \text{ kN/m}^3$$

Peso di volume della parte solida

$$\gamma_s = 25.5 \div 26.4 \text{ kN/m}^3$$

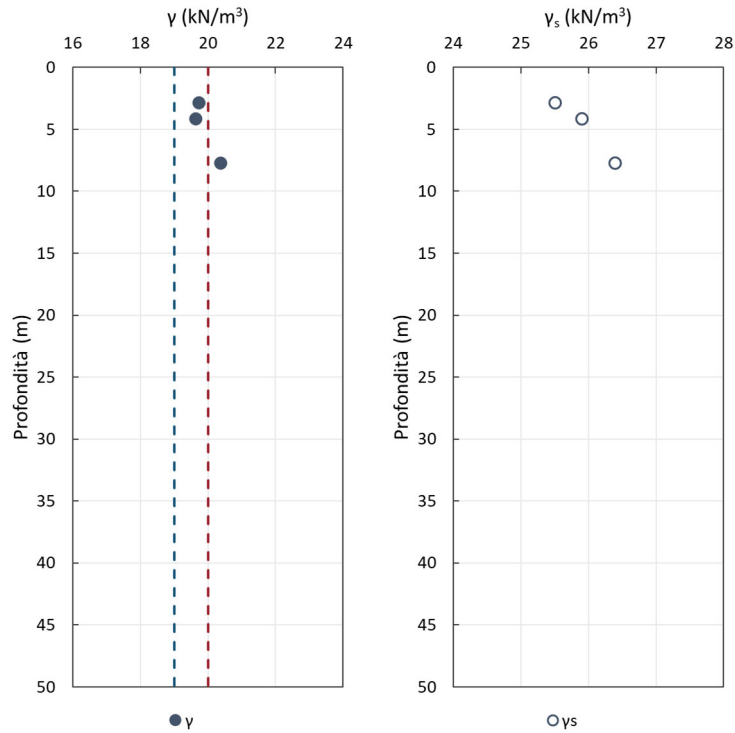


Figura 4.28 Peso dell'unità di volume naturale e della parte solida (UG3)

PROGETTAZIONE ATI:

Densità relativa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Densità relativa

$$D_r = 31.8 \div 60.6 \%$$

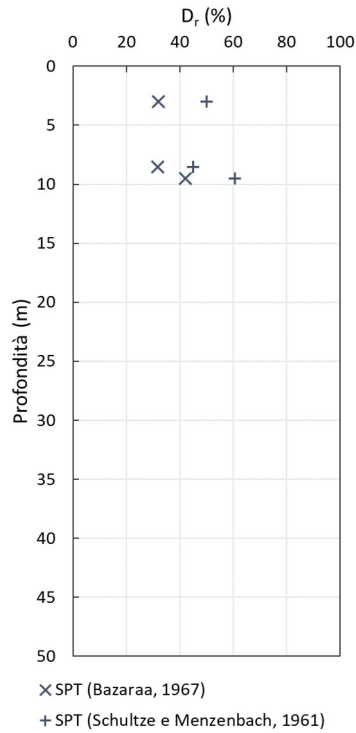


Figura 4.29 Densità relativa (UG3)

4.1.4.2 Parametri di resistenza al taglio

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di coesione efficace c' e angolo di attrito efficace φ' .

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (CD)

Coesione efficace $c' = 0$ kPa
Angolo di attrito efficace $\varphi' = 30^\circ \div 32^\circ$

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Angolo di attrito efficace $\varphi' = 31^\circ \div 37^\circ$

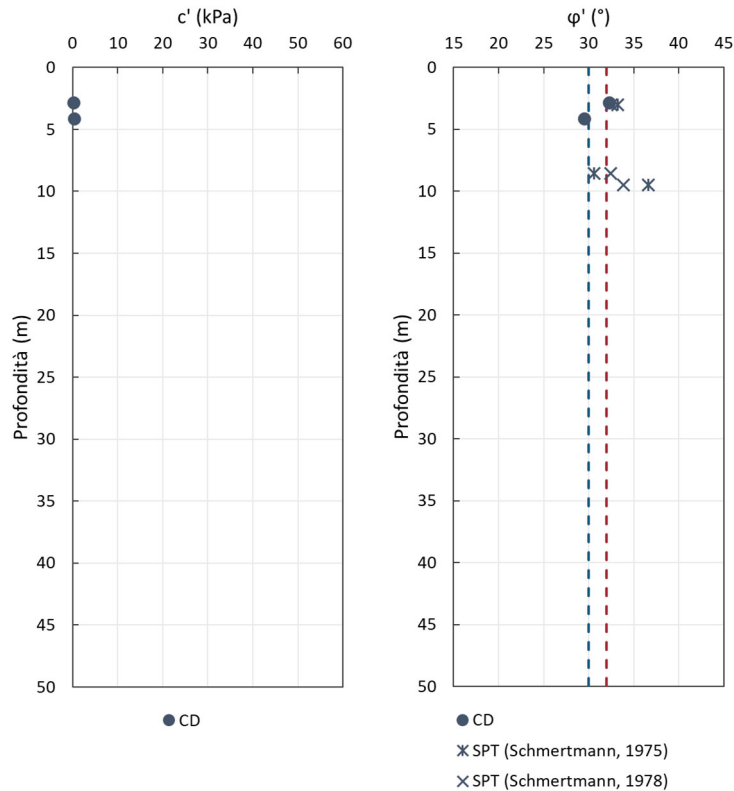


Figura 4.30 Parametri di resistenza al taglio (UG3)

4.1.4.3 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 75 \div 93$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 206 \div 250$ MPa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 32 \div 68$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 77 \div 162$ MPa

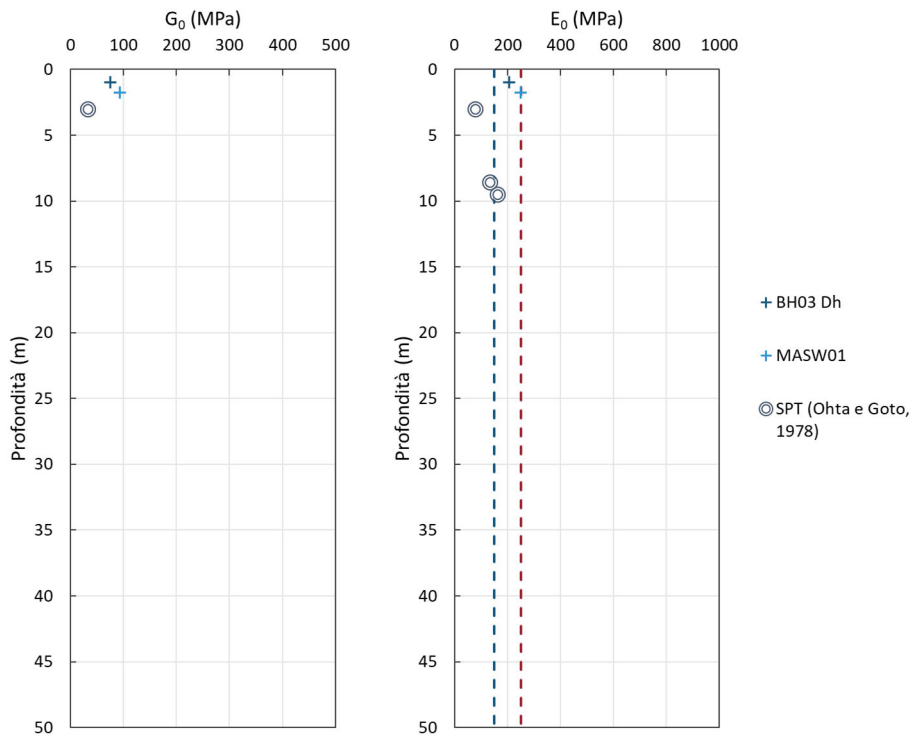


Figura 4.31 Parametri di deformabilità (UG3)

4.1.5 UG5 - Argilla marnosa

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto intermedio del tracciato, dalla progressiva 2+850 km alla progressiva 4+325 km.

L'unità UG5 è costituita dal Macigno, Membro di Lippiano (MAC₃). Si tratta di torbiditi silicoclastiche in strati sottili e medi in prevalenza pelitico arenacei. Gli strati arenacei spessi sono rari, mentre sono presenti argilliti nerastre e torbiditi calcarenitico marnose con spessori da pochi centimetri a molti metri. Nel complesso è caratterizzato da grana fine anche negli intervalli basali.

All'interno dell'unità geotecnica UG5 sono stati prelevati n. 2 campioni rimaneggiati e sono state eseguite n. 5 prove SPT di cui 3 hanno raggiunto il rifiuto strumentale nel tratto di avviamento e le restanti 2 nel tratto successivo.

PROGETTAZIONE ATI:

Tabella 4-5 Risultati prove SPT (UG5)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
BH01	SPT6	42,50	18,20	r	-	-	100	60	0,38	-
BH08	SPT4	22,50	1,35	r	-	-	100	60	0,68	-
BH09	SPT3	19,00	2,50	31	r	-	100	60	0,76	-
	SPT4	24,70		38	r	-	100	60	0,68	-
	SPT5	32,40		r	-	-	100	60	0,55	-

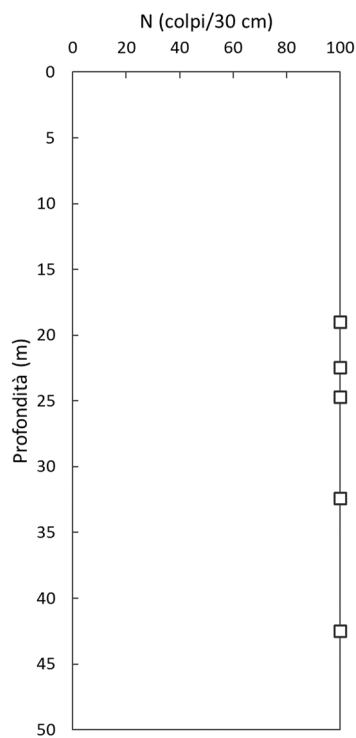


Figura 4.32 Risultati prove SPT (UG5)

4.1.5.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 0 ÷ 20 % Sabbia = 9 ÷ 30 % Limo = 37 ÷ 46 % Argilla = 13 ÷ 45 %

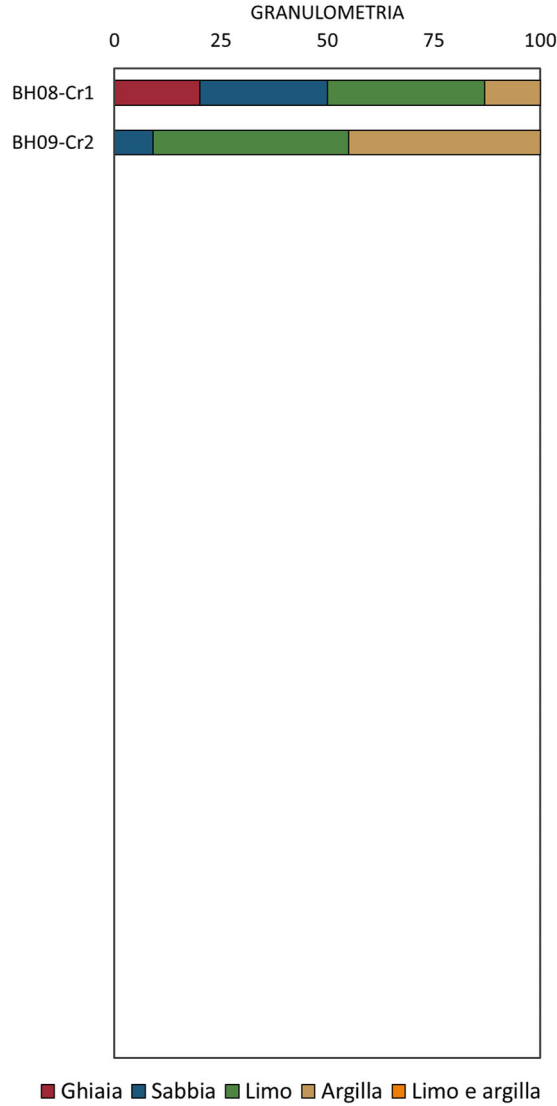


Figura 4.33 Analisi granulometrica (UG5)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume naturale

$$\gamma = 21.4 \text{ kN/m}^3$$

Peso di volume saturo

$$\gamma_{\text{sat}} = 21.4 \text{ kN/m}^3$$

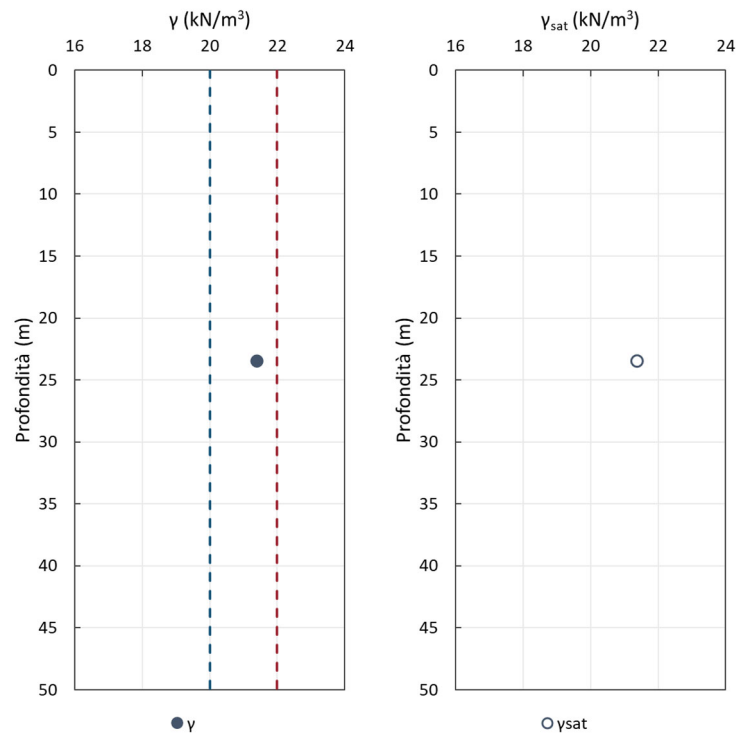


Figura 4.34 Peso dell'unità di volume naturale e saturo (UG5)

PROGETTAZIONE ATI:

Peso specifico dei grani

$$G_s = 2.67 \div 2.71$$

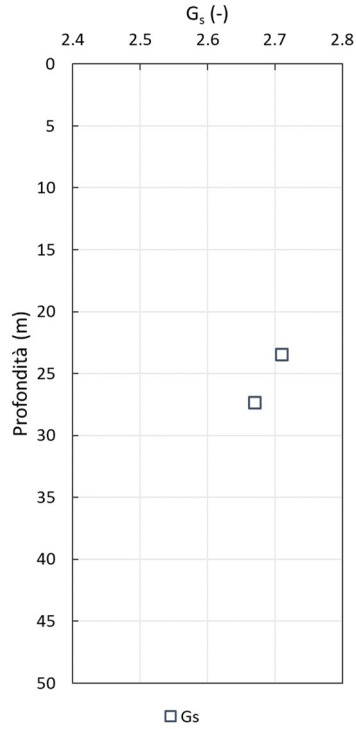


Figura 4.35 Peso specifico dei grani (UG5)

Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione

Indice dei vuoti	$e = 0.45$
Porosità	$n = 31 \%$
Grado di saturazione	$S_r = 100 \%$

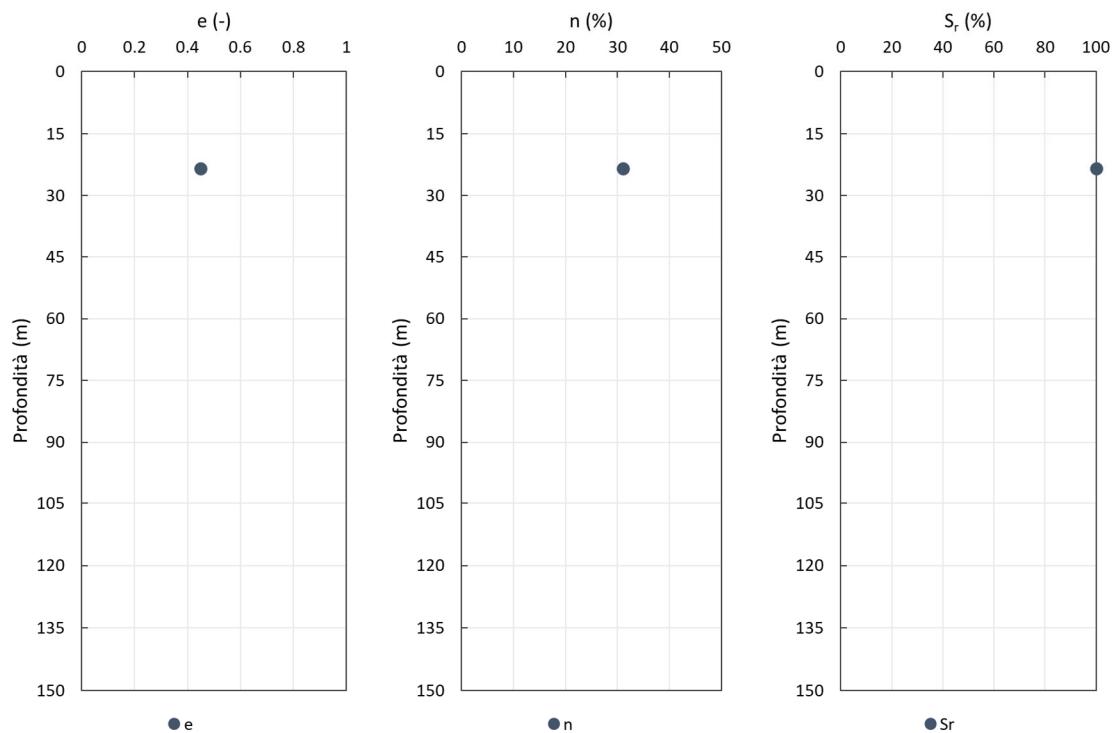


Figura 4.36 Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione (UG5)

Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità

Contenuto naturale d'acqua	$w_n = 16.80 \%$
Limite liquido	$w_L = 27 \div 49 \%$
Limite plastico	$w_P = 14 \div 23 \%$
Indice di plasticità	$IP = 13 \div 26 \%$

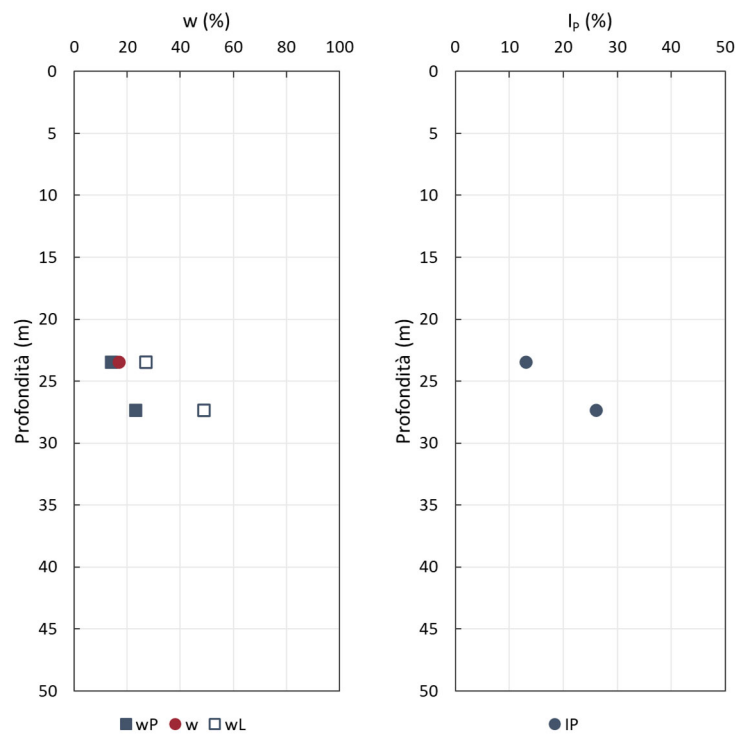


Figura 4.37 Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità (UG5)

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

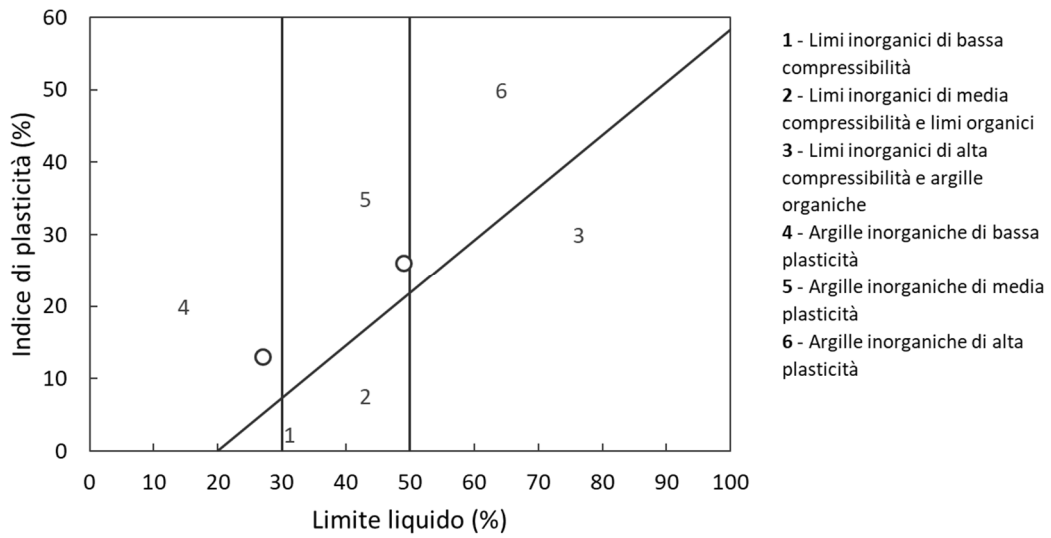


Figura 4.38 Carta di plasticità di Casagrande (UG5)

PROGETTAZIONE ATI:

4.1.5.2 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale

$$G_0 = 893 \div 1867 \text{ MPa}$$

Modulo di elasticità longitudinale

$$E_0 = 2488 \div 5178 \text{ MPa}$$

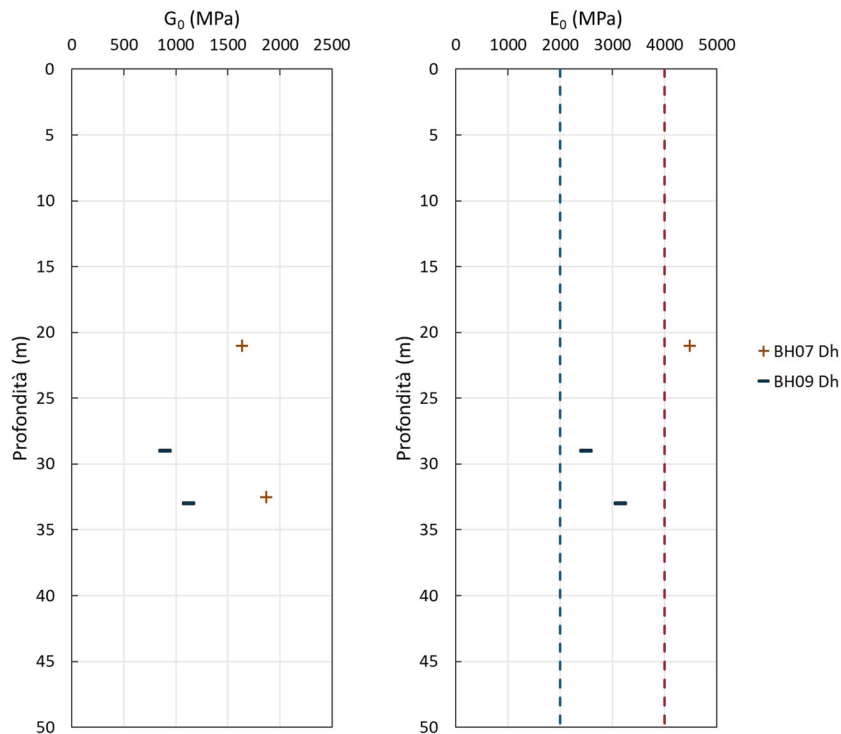


Figura 4.39 Parametri di deformabilità (UG5)

4.1.6 UG6 - Deposito di frana

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto intermedio del tracciato, dalla progressiva 4+650 km alla progressiva 8+100 km.

Si tratta di ammassi caotici per lo più costituiti da limi argillosi spesso inglobanti clasti eterometrici di natura calcarea e arenitica. Coinvolgono la coltre eluviale e colluviale e di alterazione del substrato per spessori variabili.

All'interno dell'unità geotecnica UG6 è stato prelevato n. 1 campione indisturbato (BH17 In - Sh1) ed è stata eseguita n. 1 prova SPT (BH17 In - SPT1).

Tabella 4-6 Risultati prove SPT (UG6)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
BH17	SPT1	6,00	10,40	4	6	9	15	60	0,95	14

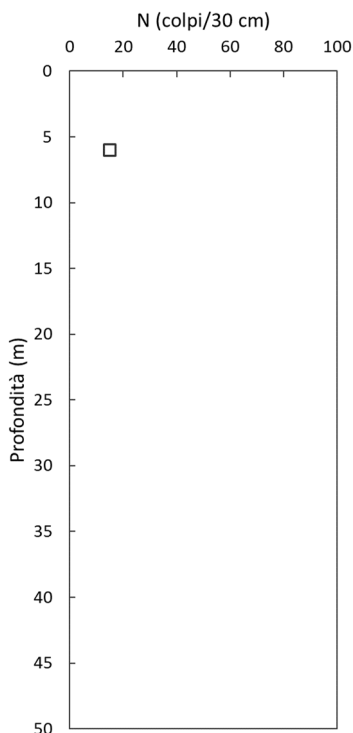


Figura 4.40 Risultati prove SPT (UG6)

4.1.6.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 1 %

Sabbia = 4 %

Limo = 59 %

Argilla = 36 %

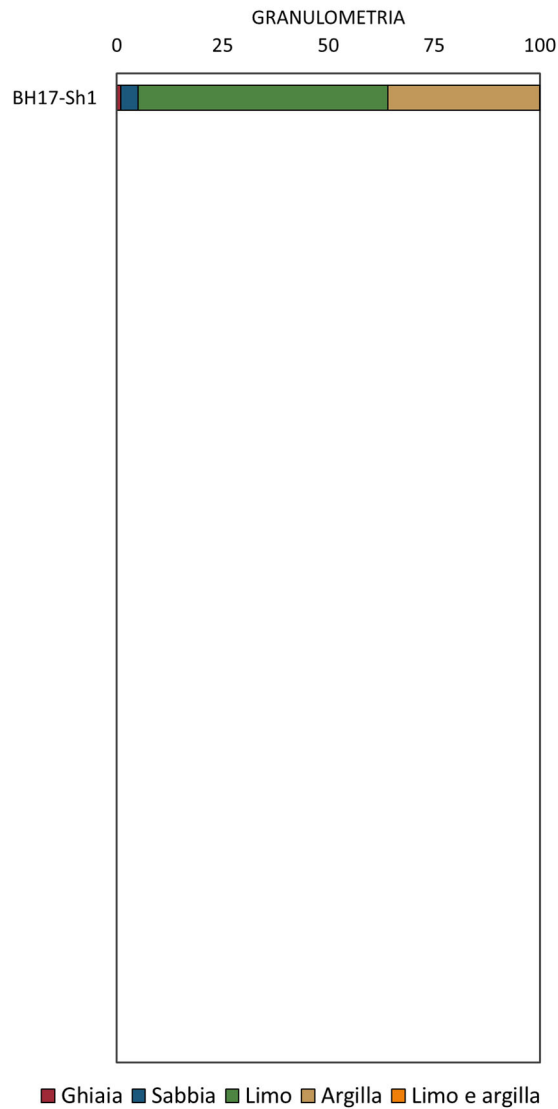


Figura 4.41 Analisi granulometrica (UG6)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume naturale

$$\gamma = 19.5 \text{ kN/m}^3$$

Peso di volume saturo

$$\gamma_{\text{sat}} = 19.5 \text{ kN/m}^3$$

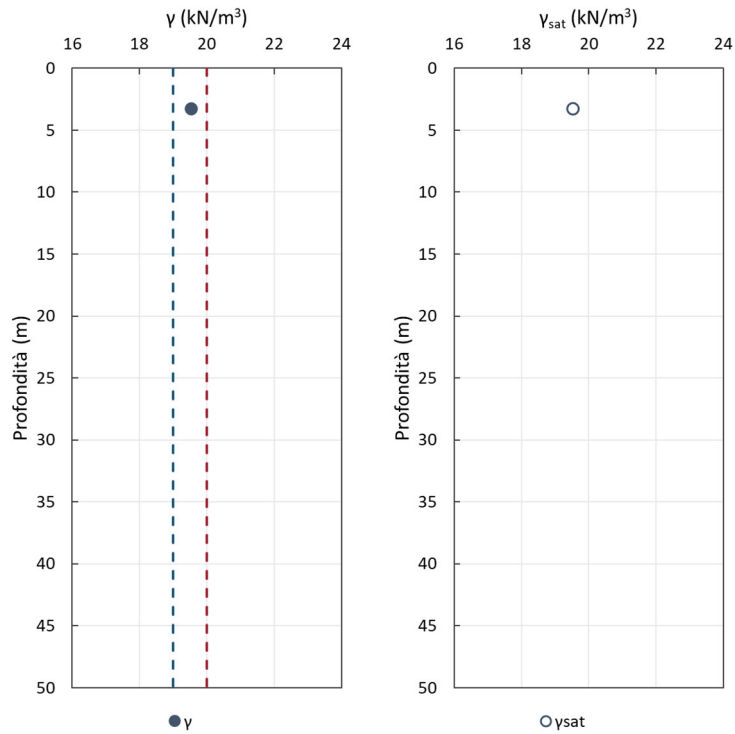


Figura 4.42 Peso dell'unità di volume naturale e saturo (UG6)

PROGETTAZIONE ATI:

Peso specifico dei grani

$$G_s = 2.62$$

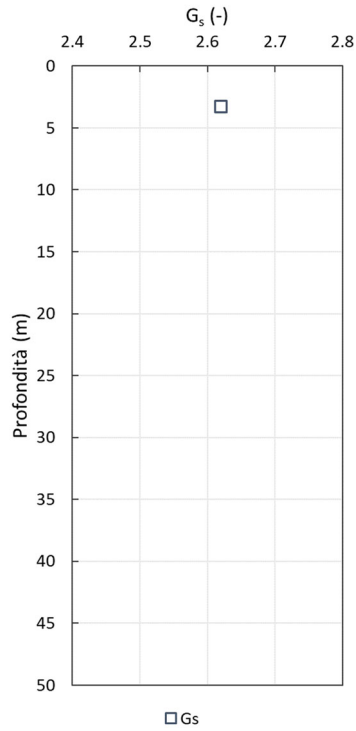


Figura 4.43 Peso specifico dei grani (UG6)

Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione

Indice dei vuoti	$e = 0.66$
Porosità	$n = 40 \%$
Grado di saturazione	$S_r = 100 \%$

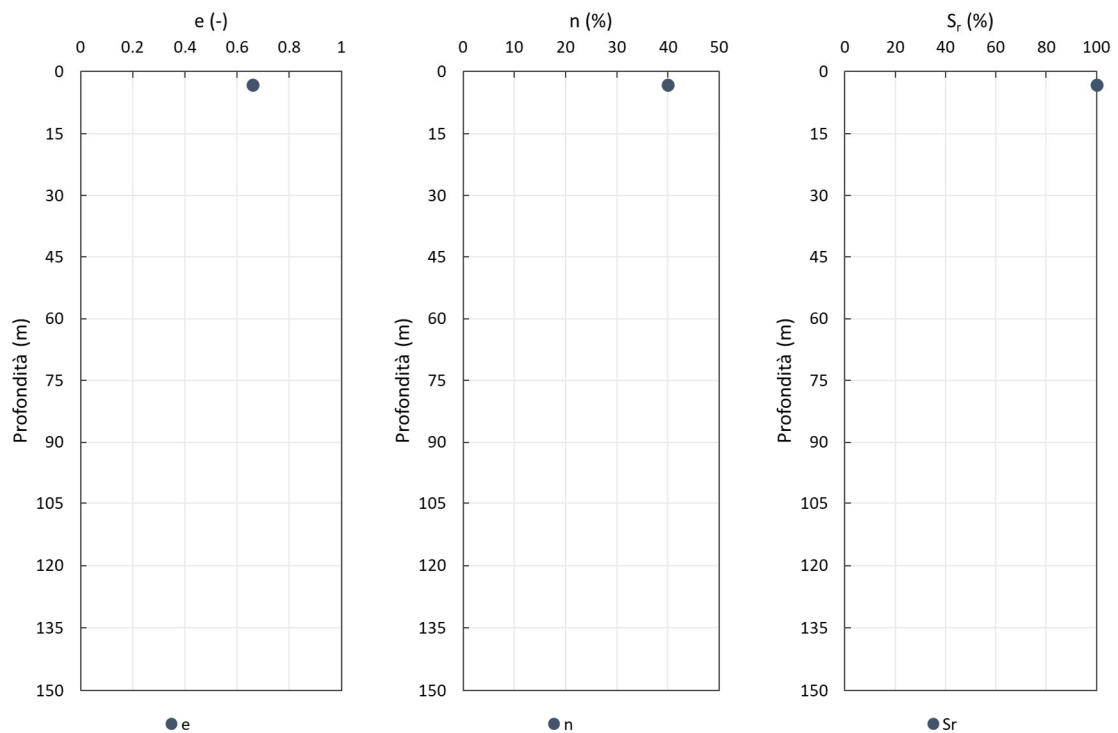


Figura 4.44 Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione (UG6)

Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità

Contenuto naturale d'acqua	$w_n = 24.70 \%$
Limite liquido	$w_L = 54 \%$
Limite plastico	$w_P = 22 \%$
Indice di plasticità	$IP = 32 \%$

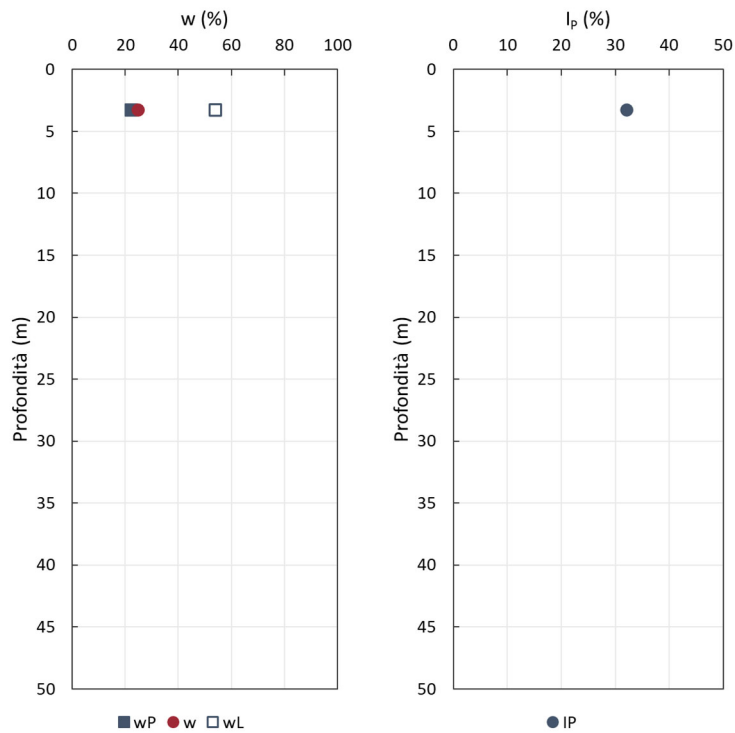


Figura 4.45 Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità (UG6)

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

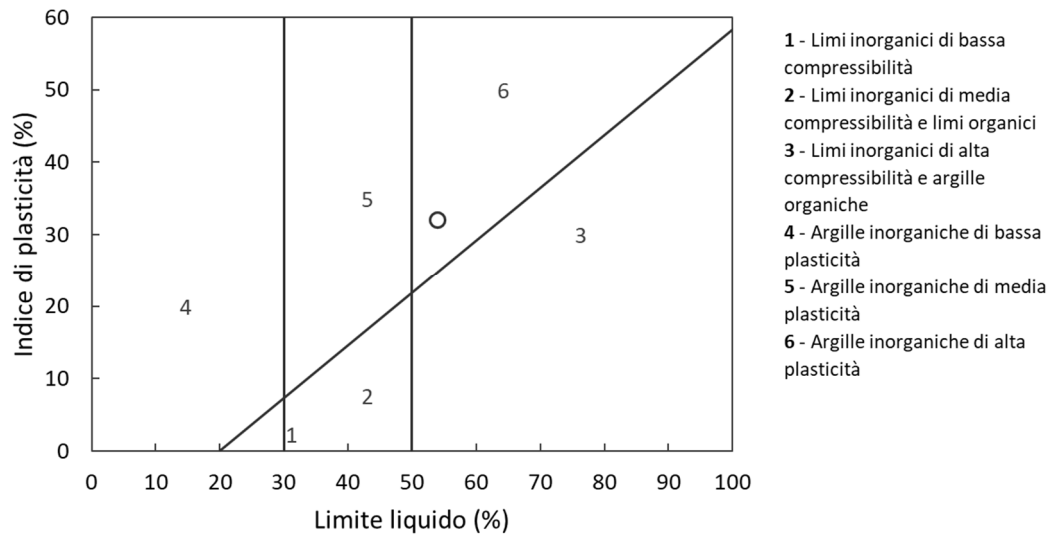


Figura 4.46 Carta di plasticità di Casagrande (UG6)

PROGETTAZIONE ATI:

4.1.6.2 Parametri di resistenza al taglio

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di coesione efficace c' e angolo di attrito efficace φ' .

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (CD)

Coesione efficace $c' = 0$ kPa

Angolo di attrito efficace $\varphi' = 18^\circ$

PROVA DI TAGLIO RESIDUO (RS)

Coesione efficace residua $c'_{res} = 0$ kPa

Angolo di attrito efficace residuo $\varphi'_{res} = 9^\circ$

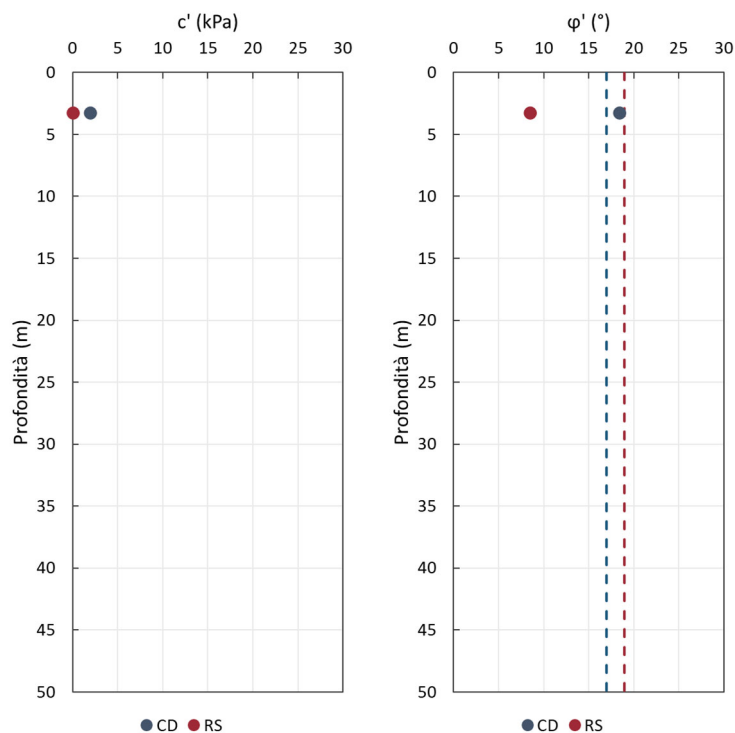


Figura 4.47 Parametri di resistenza al taglio (UG6)

4.1.7 UG7a - Ghiaia

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto intermedio del tracciato, dalla progressiva 3+900 km alla progressiva 6+900.

L'unità UG7a è costituita dal Sintema di Citerna, a sua volta suddiviso nei due subsintemi di Molin dell'Olio (CTA₁) prevalentemente di natura sabbiosa e di Monte Rotondo (CTA₂) di natura clastica e sabbiosa grossolana. Si sovrappone al Sintema di Fighille (FHL). Si tratta complessivamente di ciottoli poligenici di dimensioni anche decimetriche, cementati, immersi in una matrice sabbiosa.

All'interno dell'unità geotecnica UG7a sono stati prelevati n. 3 campioni rimaneggiati e sono state eseguite n. 9 prove SPT di cui 2 hanno raggiunto il rifiuto strumentale nel tratto di avviamento e 4 nei tratti successivi.

PROGETTAZIONE ATI:

Tabella 4-7 Risultati prove SPT (UG7a)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
S2	SPT1	21,00	10,00	r	-	-	100	60	0,62	-
	SPT2	26,00		39	r	-	100	60	0,57	-
BH11	SPT1	3,00	8,40	27	32	41	73	60	1,17	86
	SPT2	7,00		31	39	42	81	60	0,89	72
	SPT4	17,50		32	r	-	100	60	0,68	-
	SPT6	28,50		28	30	43	73	60	0,57	41
	SPT7	32,00		r	-	-	100	60	0,53	-
BH12	SPT2	12,00	6,00	19	32	r	100	60	0,81	-
BH13	SPT3	15,50	6,80	39	r	-	100	60	0,73	-

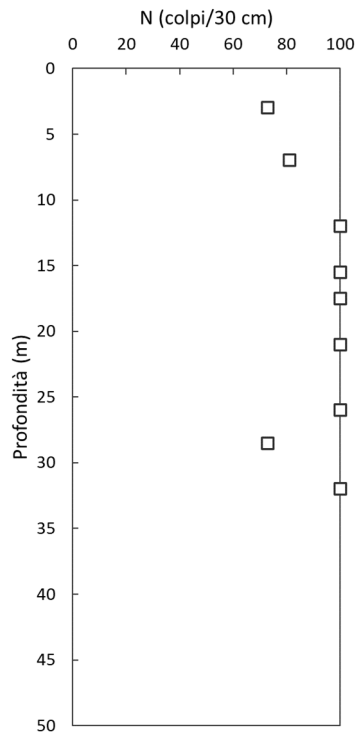


Figura 4.48 Risultati prove SPT (U7a)

4.1.7.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 12 ÷ 70 % Sabbia = 14 ÷ 44 % Limo = 11 ÷ 35 % Argilla = 5 ÷ 18 %

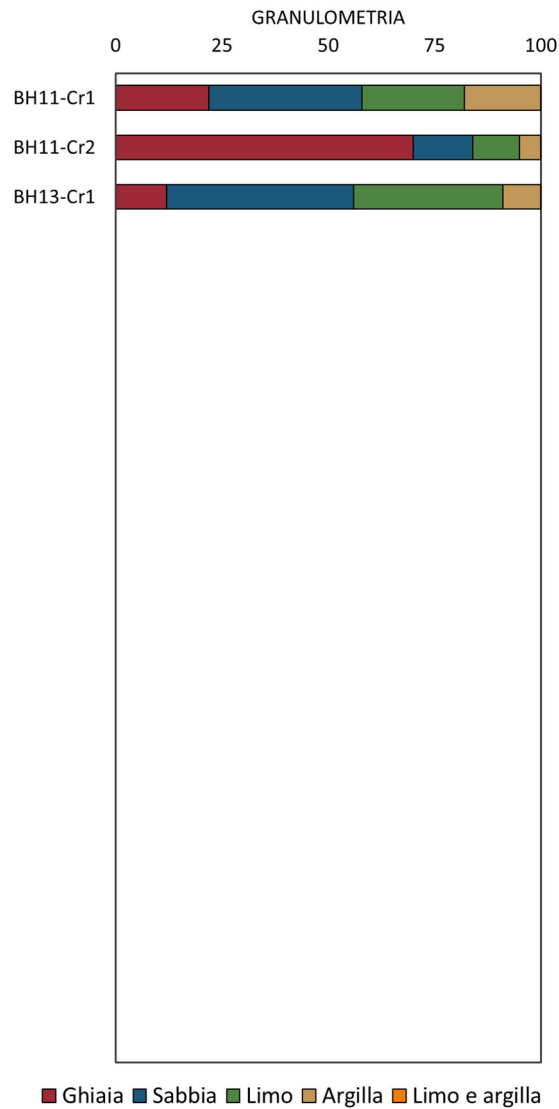


Figura 4.49 Analisi granulometrica (UG7a)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume della parte solida $\gamma_s = 25.9 \div 26.6 \text{ kN/m}^3$

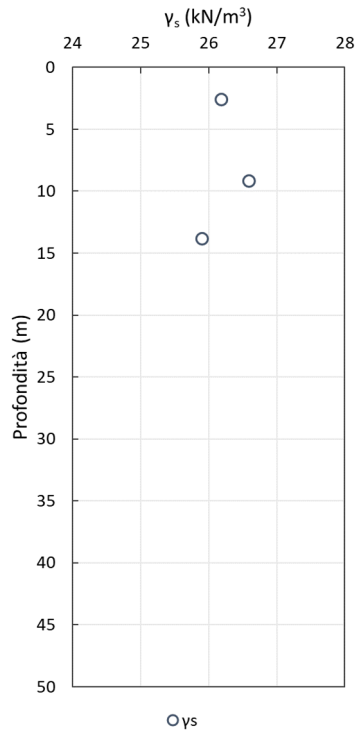


Figura 4.50 Peso dell'unità di volume della parte solida (UG7a)

Densità relativa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Densità relativa

$$D_r = 72.1 \div 100 \%$$

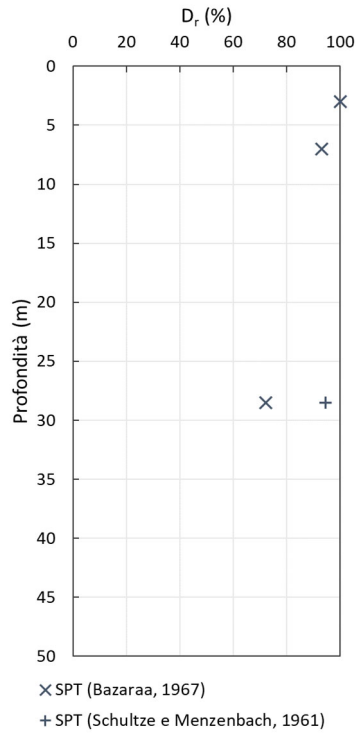


Figura 4.51 Densità relativa (UG7a)

4.1.7.2 Parametri di resistenza al taglio

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di coesione efficace c' e angolo di attrito efficace φ' .

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (CD)

Coesione efficace $c' = 0$ kPa

Angolo di attrito efficace $\varphi' = 34^\circ$

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Angolo di attrito efficace $\varphi' = 43^\circ \div 46^\circ$

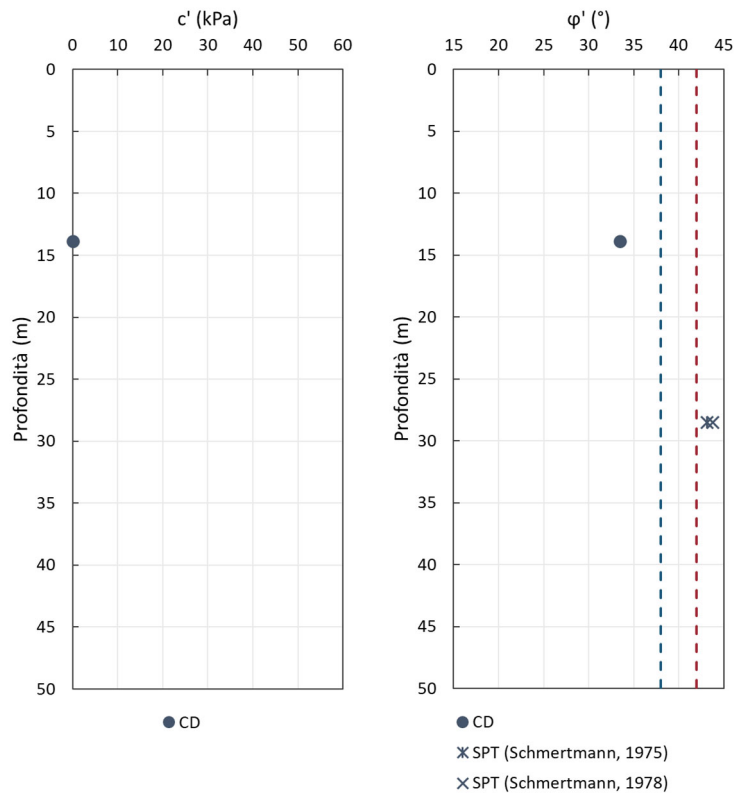


Figura 4.52 Parametri di resistenza al taglio (UG7a)

4.1.7.3 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 86 \div 502$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 238 \div 1309$ MPa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 221 \div 542$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 531 \div 1302$ MPa

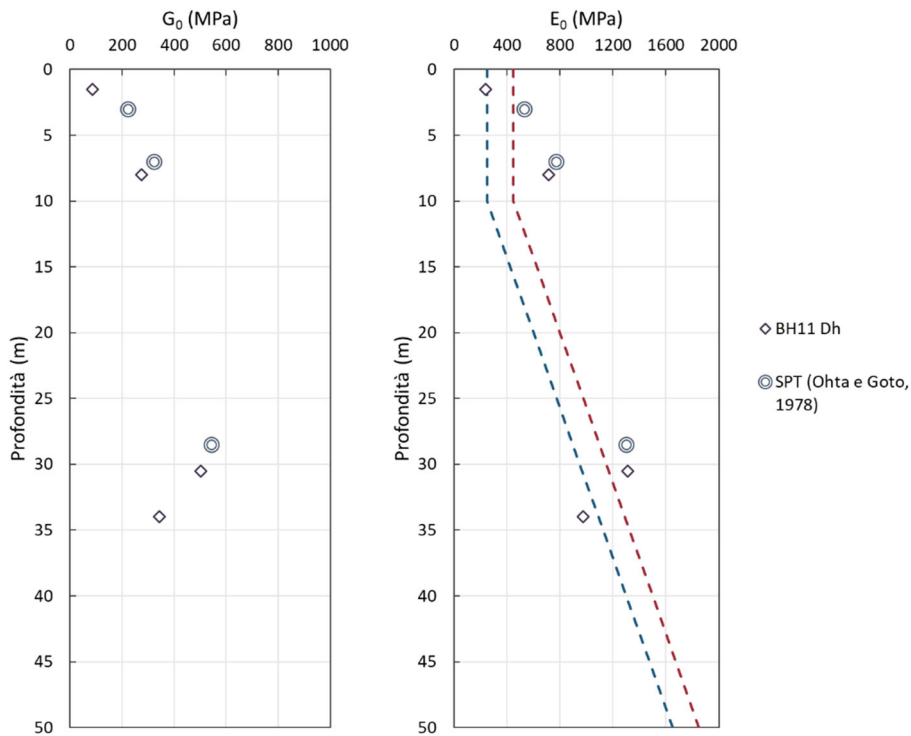


Figura 4.53 Parametri di deformabilità (UG7a)

4.1.8 UG7b - Limo sabbioso

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente nel tratto intermedio del tracciato, dalla progressiva 4+200 km alla progressiva 4+500 km.

L'unità UG7b viene rintracciata a profondità variabili all'interno dell'unità geotecnica UG7 sottoforma di orizzontamenti caratterizzati da spessori non trascurabili. Si tratta prevalentemente di limo con sabbia, a volte argilloso, da poco plastico a plastico, da consistente a molto consistente.

All'interno dell'unità geotecnica UG7b sono stati prelevati n. 3 campioni indisturbati e n. 1 campione rimaneggiato, inoltre sono state eseguite n. 8 prove SPT di cui 1 ha raggiunto il rifiuto strumentale nel tratto di avviamento e 2 nei tratti successivi.

PROGETTAZIONE ATI:

Tabella 4-8 Risultati prove SPT (UG7b)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
BH11	SPT3	13,00	8,40	5	7	9	16	60	0,77	12
	SPT5	24,00		21	39	r	100	60	0,63	-
BH12	SPT1	5,00	6,00	10	17	23	40	60	1,02	41
	SPT3	18,00		13	20	31	51	60	0,74	37
	SPT4	25,60		12	15	27	42	60	0,65	27
	SPT5	29,60		18	25	33	58	60	0,61	35
BH13	SPT1	3,00	6,80	35	47	r	100	60	1,19	-
	SPT2	8,50		r	-	-	100	60	0,88	-

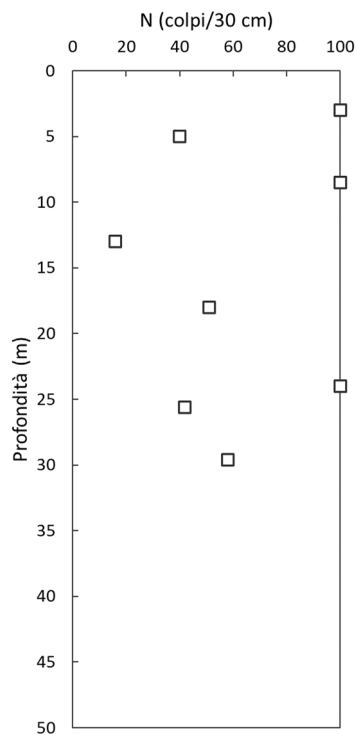


Figura 4.54 Risultati prove SPT (U7b)

4.1.8.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 0 ÷ 7 %

Sabbia = 6 ÷ 37 %

Limo = 46 ÷ 64 %

Argilla = 6 ÷ 32 %

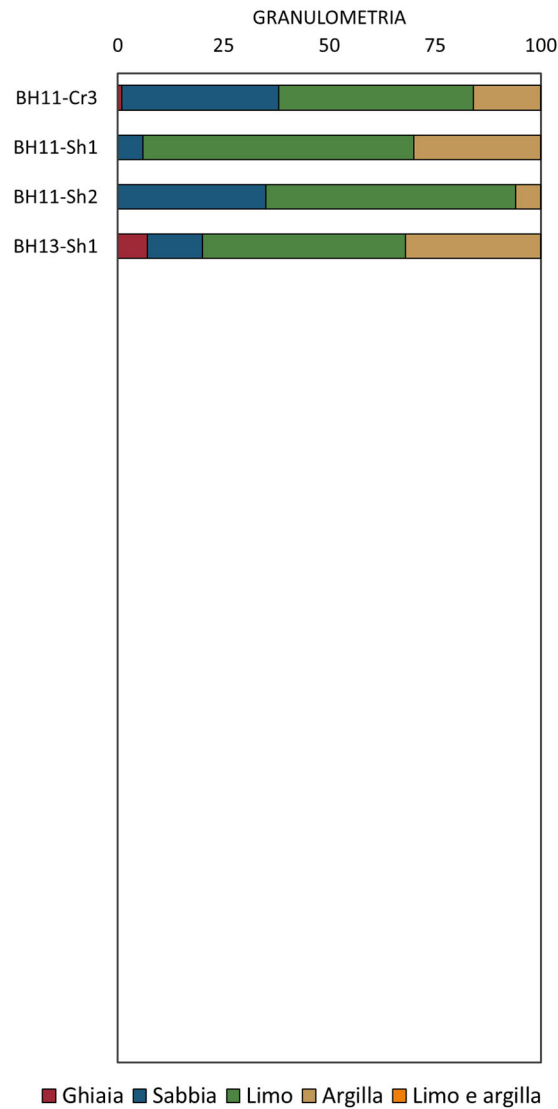


Figura 4.55 Analisi granulometrica (UG7b)

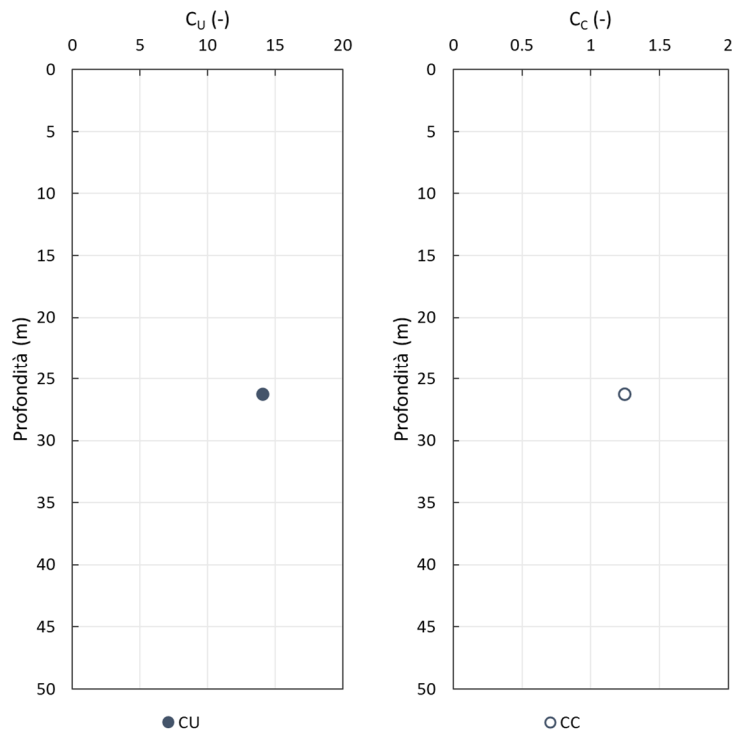


Figura 4.56 Coefficiente di uniformità e di curvatura (UG7b)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume naturale

$$\gamma = 19.7 \div 20.1 \text{ kN/m}^3$$

Peso di volume saturo

$$\gamma_{\text{sat}} = 19.8 \div 20.6 \text{ kN/m}^3$$

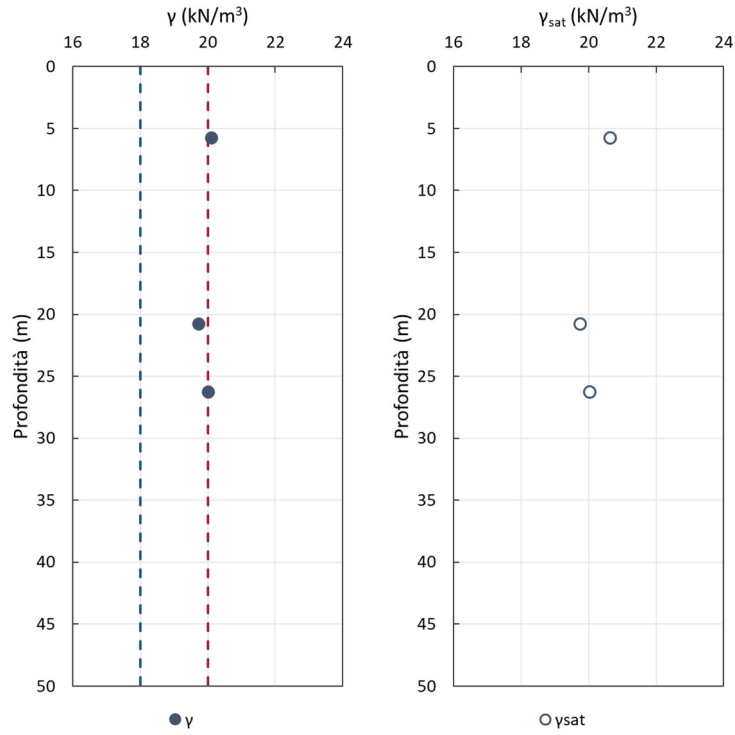


Figura 4.57 Peso dell'unità di volume naturale e saturo (UG7b)

Peso specifico dei grani

$$G_s = 2.59 \div 2.65$$

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

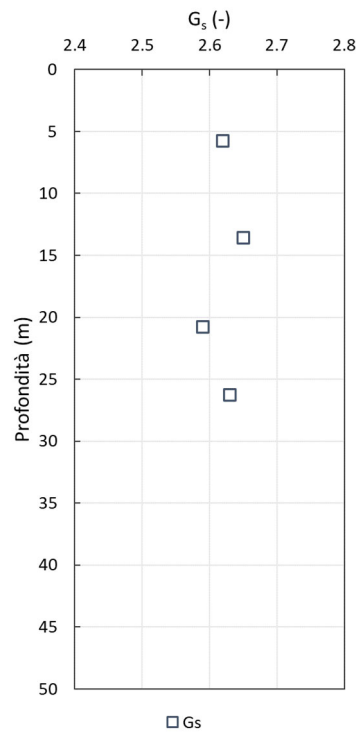


Figura 4.58 Peso specifico dei grani (UG7b)

Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione

Indice dei vuoti	$e = 0.41 \div 0.57$
Porosità	$n = 29 \div 36 \%$
Grado di saturazione	$S_r = 84 \div 99 \%$

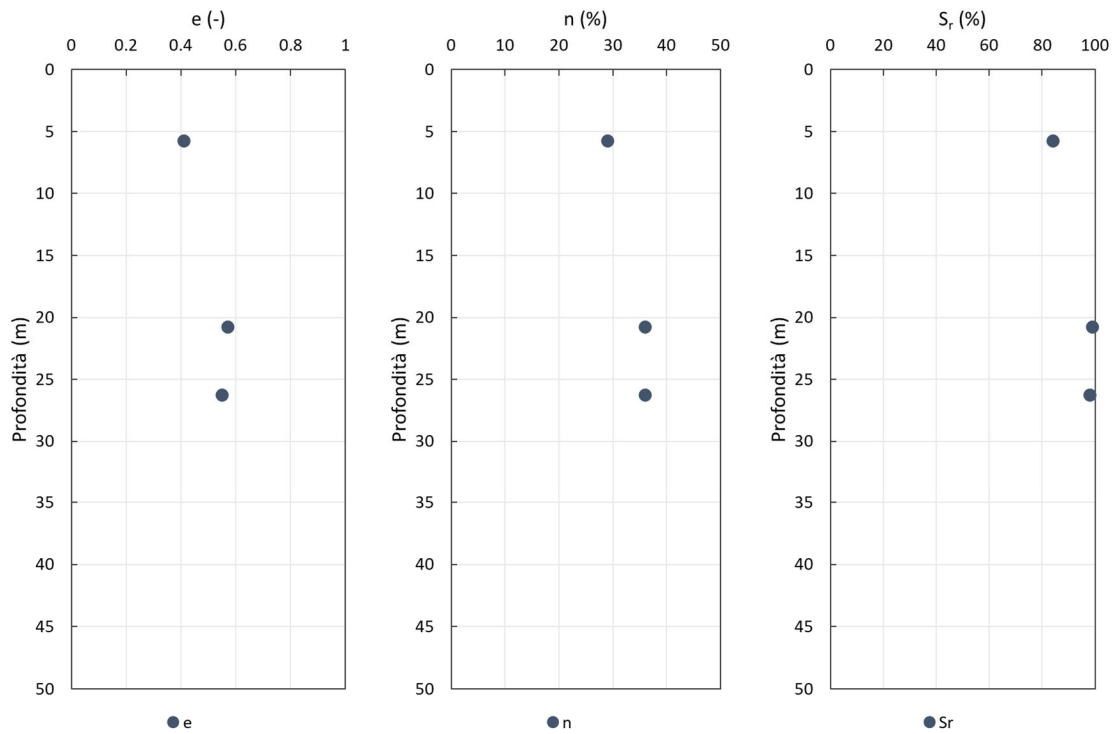


Figura 4.59 Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione (UG7b)

Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità

Contenuto naturale d'acqua	$w_n = 15.20 \div 21.90 \%$
Limite liquido	$w_L = 35 \div 49 \%$
Limite plastico	$w_P = 21 \div 25 \%$
Indice di plasticità	$IP = 13 \div 25 \%$

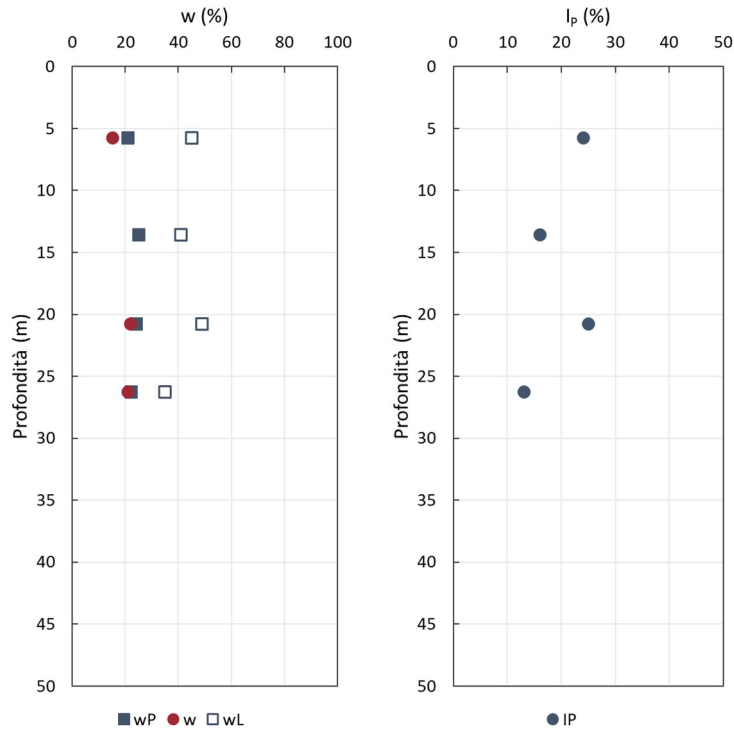


Figura 4.60 Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità (UG7b)

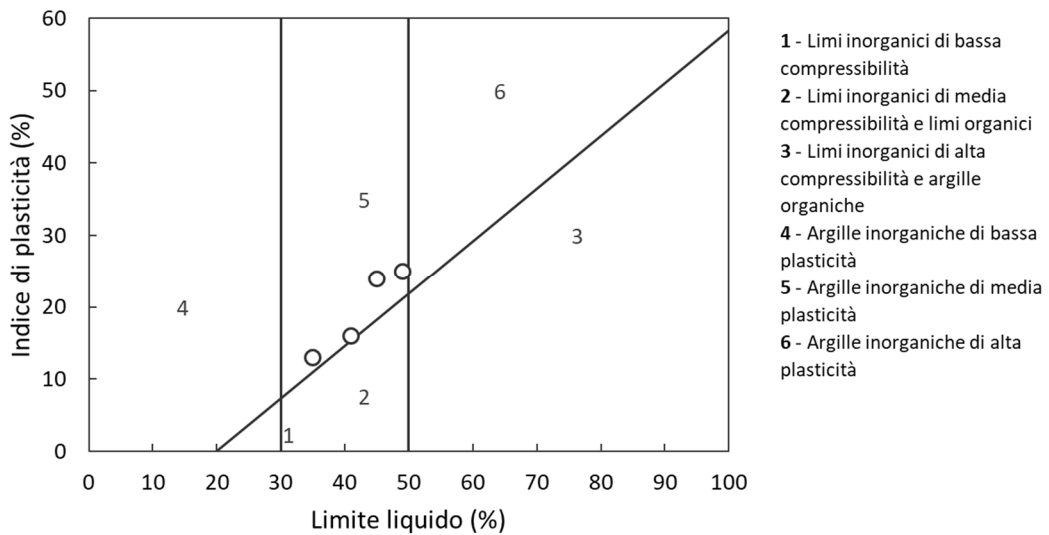


Figura 4.61 Carta di plasticità di Casagrande (UG7b)

4.1.8.2 Parametri di resistenza a taglio drenati

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di coesione efficace c' e angolo di attrito efficace ϕ' .

PROGETTAZIONE ATI:

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (CD)

Coesione efficace

$$c' = 2 \div 14 \text{ kPa}$$

Angolo di attrito efficace

$$\varphi' = 24^\circ \div 27^\circ$$

PROVA TRIASSIALE CONSOLIDATA NON DRENATA (TCU)

Coesione efficace

$$c' = 0 \div 6 \text{ kPa}$$

Angolo di attrito efficace

$$\varphi' = 29^\circ$$

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Angolo di attrito efficace

$$\varphi' = 31^\circ \div 45^\circ$$

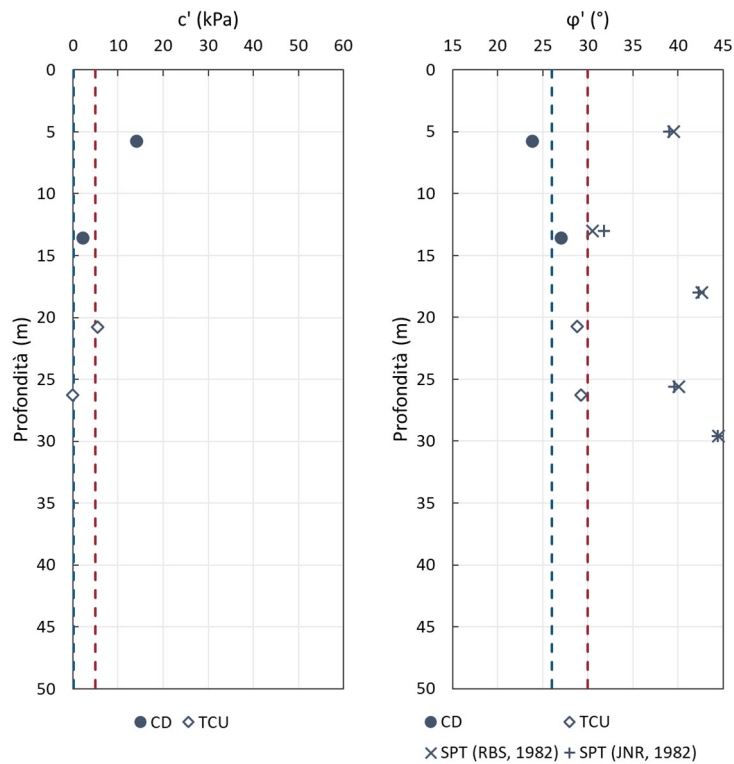


Figura 4.62 Parametri di resistenza al taglio drenati (UG7b)

4.1.8.3 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 184 \div 351$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 506 \div 992$ MPa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Modulo di elasticità tangenziale	$G_0 = 119 \div 273$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale	$E_0 = 285 \div 656$ MPa

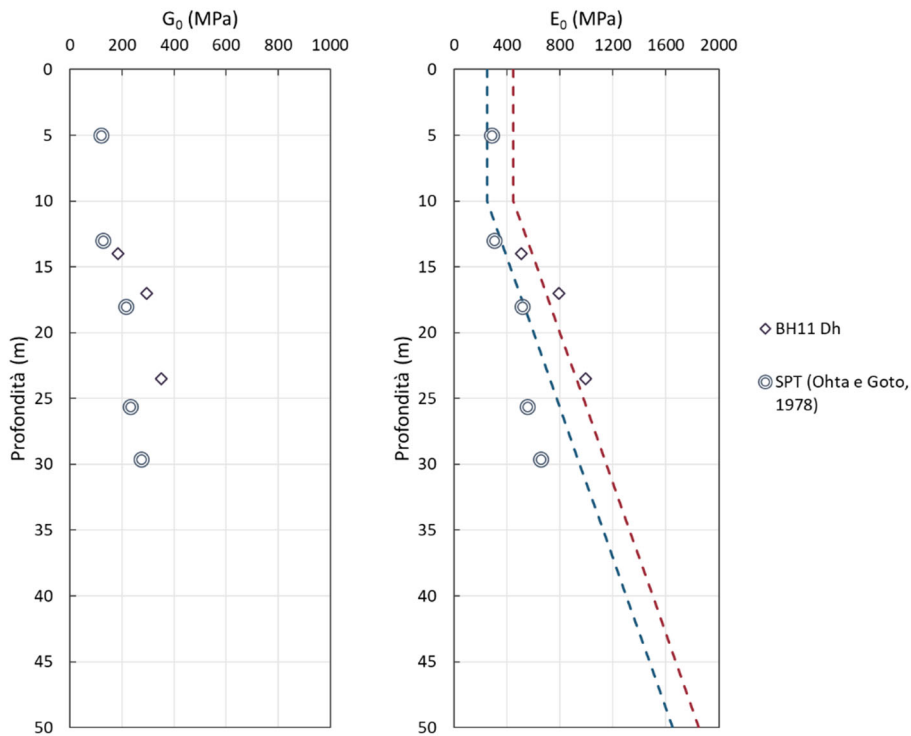


Figura 4.63 Parametri di deformabilità (UG7b)

4.1.9 UG8 - Conglomerati

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto intermedio del tracciato, dalla progressiva 4+7500 km alla progressiva 5+600 km.

L'unità UG8 è costituita dal Sintema di Monterchi (MTC₁), subsintema di Mercatale. Si tratta complessivamente di conglomerati con ciottoli e blocchi di natura arenacea, in matrice sabbiosa, alternati a lenti e livelli sabbiosi, a tratti cementati.

All'interno dell'unità geotecnica UG8 sono stati prelevati n. 3 campioni indisturbati e sono state eseguite n. 4 prove SPT.

Tabella 4-9 Risultati prove SPT (UG8)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
S05	SPT1	5,30	13,20	14	21	27	48	60	0,98	47
	SPT2	14,00		11	15	21	36	60	0,67	24
	SPT3	16,50		4	9	16	25	60	0,64	16
S06	SPT1	73,70	49,96	8	10	15	25	60	0,16	4

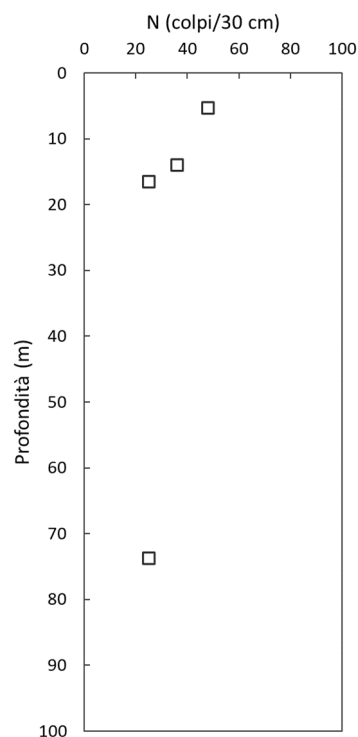


Figura 4.64 Risultati prove SPT (UG8)

PROGETTAZIONE ATI:

4.1.9.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 0 % Sabbia = 16 ÷ 44 % Limo = 38 ÷ 66 % Argilla = 18 ÷ 22 %

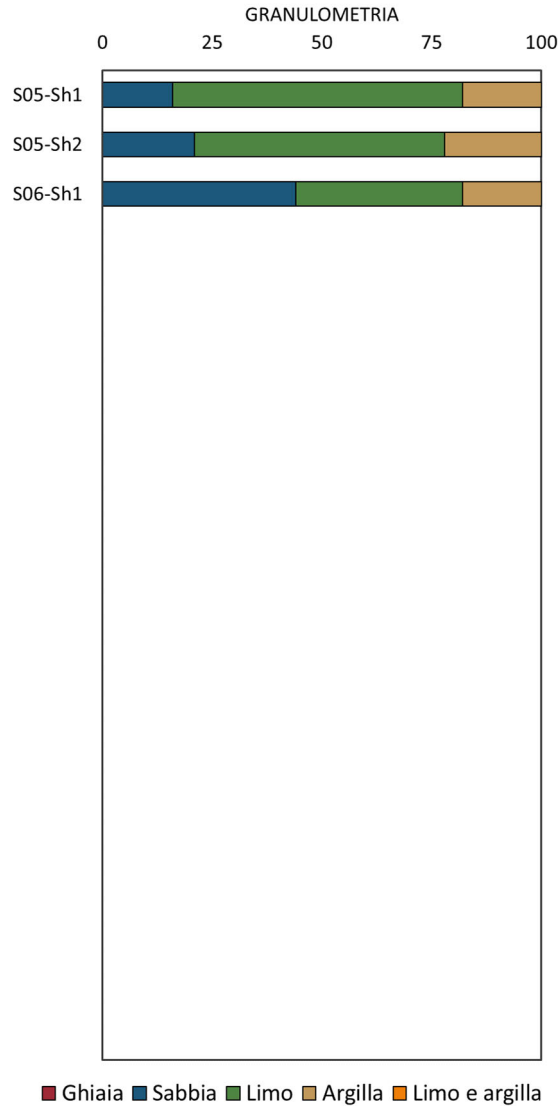


Figura 4.65 Analisi granulometrica (UG8)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume della parte solida

$$\gamma_s = 26.3 \div 26.5 \text{ kN/m}^3$$

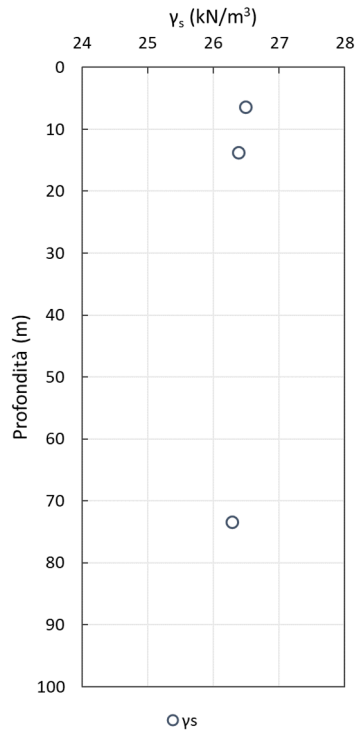


Figura 4.66 Peso dell'unità di volume della parte solida (UG8)

Densità relativa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Densità relativa

$$D_r = 28.0 \div 74.5 \%$$

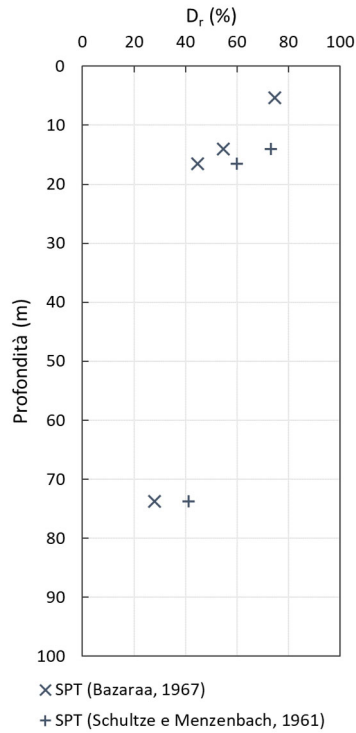


Figura 4.67 Densità relativa (UG8)

PROGETTAZIONE ATI:

4.1.9.2 Parametri di resistenza al taglio

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di coesione efficace c' e angolo di attrito efficace φ' .

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Angolo di attrito efficace

$$\varphi' = 37^\circ \div 42^\circ$$

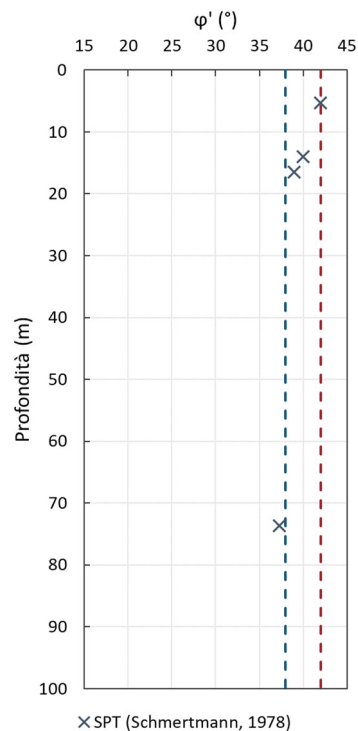


Figura 4.68 Parametri di resistenza al taglio (UG8)

4.1.9.3 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale

$$G_0 = 12 \div 610 \text{ MPa}$$

Modulo di elasticità longitudinale

$$E_0 = 36 \div 1735 \text{ MPa}$$

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Modulo di elasticità tangenziale

$$G_0 = 241 \div 549 \text{ MPa}$$

Modulo di elasticità longitudinale

$$E_0 = 577 \div 1317 \text{ MPa}$$

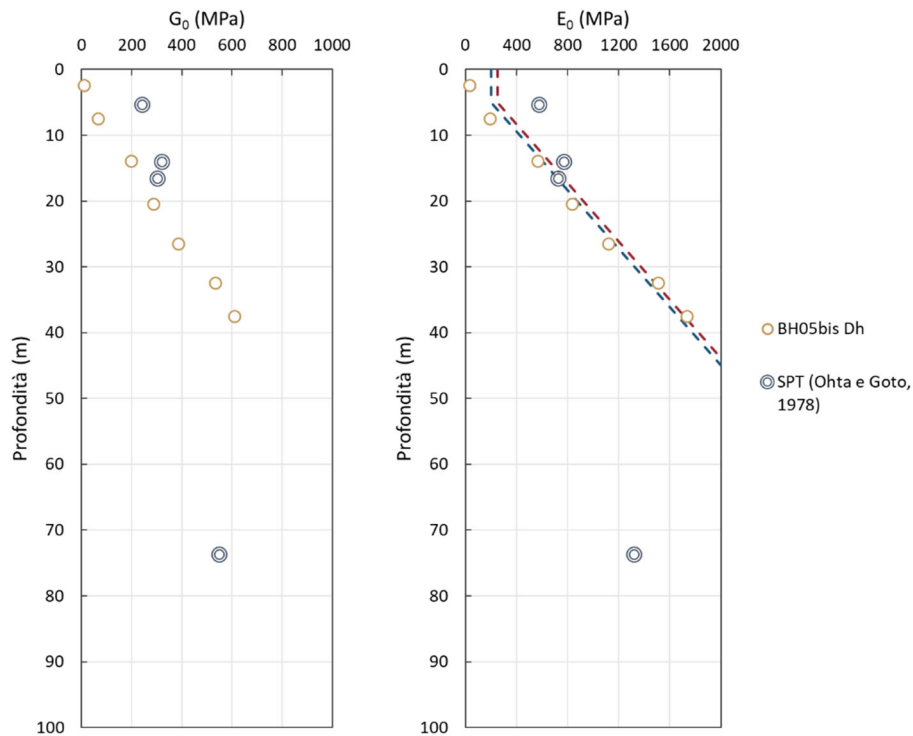


Figura 4.69 Parametri di deformabilità (UG8)

4.1.10 UG9 - Argilla limosa

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto intermedio, dalla progressiva 5+400 km alla progressiva 8+900 km e sul tratto Est del tracciato, dalla progressiva 10+850 km fino a fine intervento.

L'unità UG9 è costituita dal Sintema di Fighille (FHL). Si tratta di argille limose con intercalati livelli e strati sabbiosi o sabbioso-limosi. Verso l'alto sono frequenti livelli e/o lenti di ghiaie e di conglomerati poligenici, con prevalenza di ciottoli arenacei centimetrici ed appiattiti. L'unità risulta da poco plastica a plastica, da consistente a molto consistente.

All'interno dell'unità geotecnica UG9 sono stati prelevati n. 22 campioni indisturbati e n. 9 campioni rimaneggiati, inoltre sono state eseguite n. 24 prove SPT di cui 1 ha raggiunto il rifiuto strumentale nel tratto di avviamento e 2 nel tratto successivo e sono state prese in considerazione 26 prove VT.

Tabella 4-10 Risultati prove SPT (UG9)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
S2	SPT3	41,00	10,00	25	36	42	78	60	0,46	36
S3	SPT2	9,55	10,00	7	12	18	30	60	0,79	24
S3	SPT3	15,00	10,00	19	30	42	72	60	0,70	50
S3	SPT4	20,00	10,00	17	31	45	76	60	0,63	48
BH17	SPT3	18,00	10,40	10	20	44	64	60	0,65	42
BH17	SPT4	23,00	10,40	17	28	44	72	60	0,60	43
BH20	SPT3	10,55	6,30	16	26	30	56	60	0,83	46
BH21	SPT2	16,55	6,60	28	35	43	78	60	0,72	56
BH21	SPT3	26,00	6,60	42	r	-	100	60	0,61	-
BH26	SPT5	28,00	3,50	9	10	10	20	60	0,62	12
BH28	SPT6	37,00	3,80	7	10	10	20	60	0,53	11
BH29	SPT4	33,60	3,50	6	7	7	14	60	0,56	8
BH29	SPT5	38,70	3,50	7	9	11	20	60	0,52	10
BH30	SPT5	31,60	2,30	8	13	15	28	60	0,59	17
BH30	SPT6	38,00	2,30	7	8	8	16	60	0,54	9
BH31	SPT1	8,00	4,80	8	8	9	17	60	0,92	16
BH31	SPT2	10,80	4,80	36	48	r	100	60	0,85	-
BH31	SPT3	18,80	4,80	27	39	r	100	60	0,71	-
BH31	SPT4	21,60	4,80	19	28	37	65	60	0,68	44
BH31	SPT5	29,10	4,80	15	22	29	51	60	0,59	30
BH31	SPT6	35,00	4,80	10	12	12	24	60	0,54	13
BH32	SPT2	13,50	3,50	3	3	3	6	60	0,82	5
BH32	SPT3	17,30	3,50	3	4	4	8	60	0,76	6
BH32	SPT6	36,00	3,50	8	10	10	20	60	0,54	11

PROGETTAZIONE ATI:

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

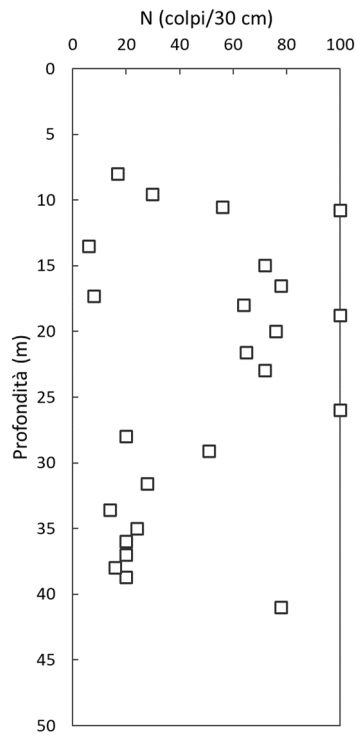


Figura 4.70 Risultati prove SPT (UG9)

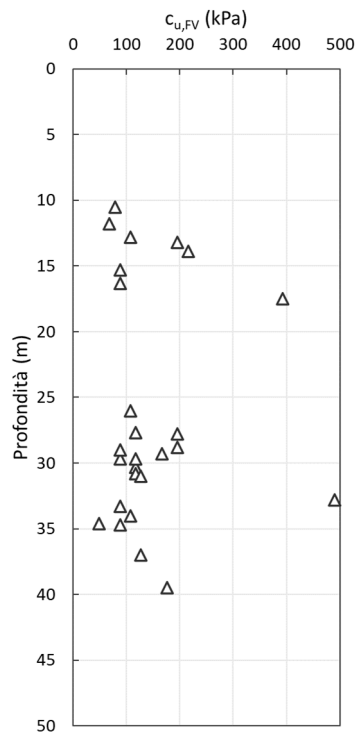


Figura 4.71 Risultati prove VT (UG9)

PROGETTAZIONE ATI:

4.1.10.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 0 ÷ 19 % Sabbia = 1 ÷ 29 % Limo = 35 ÷ 82 % Argilla = 9 ÷ 52 %

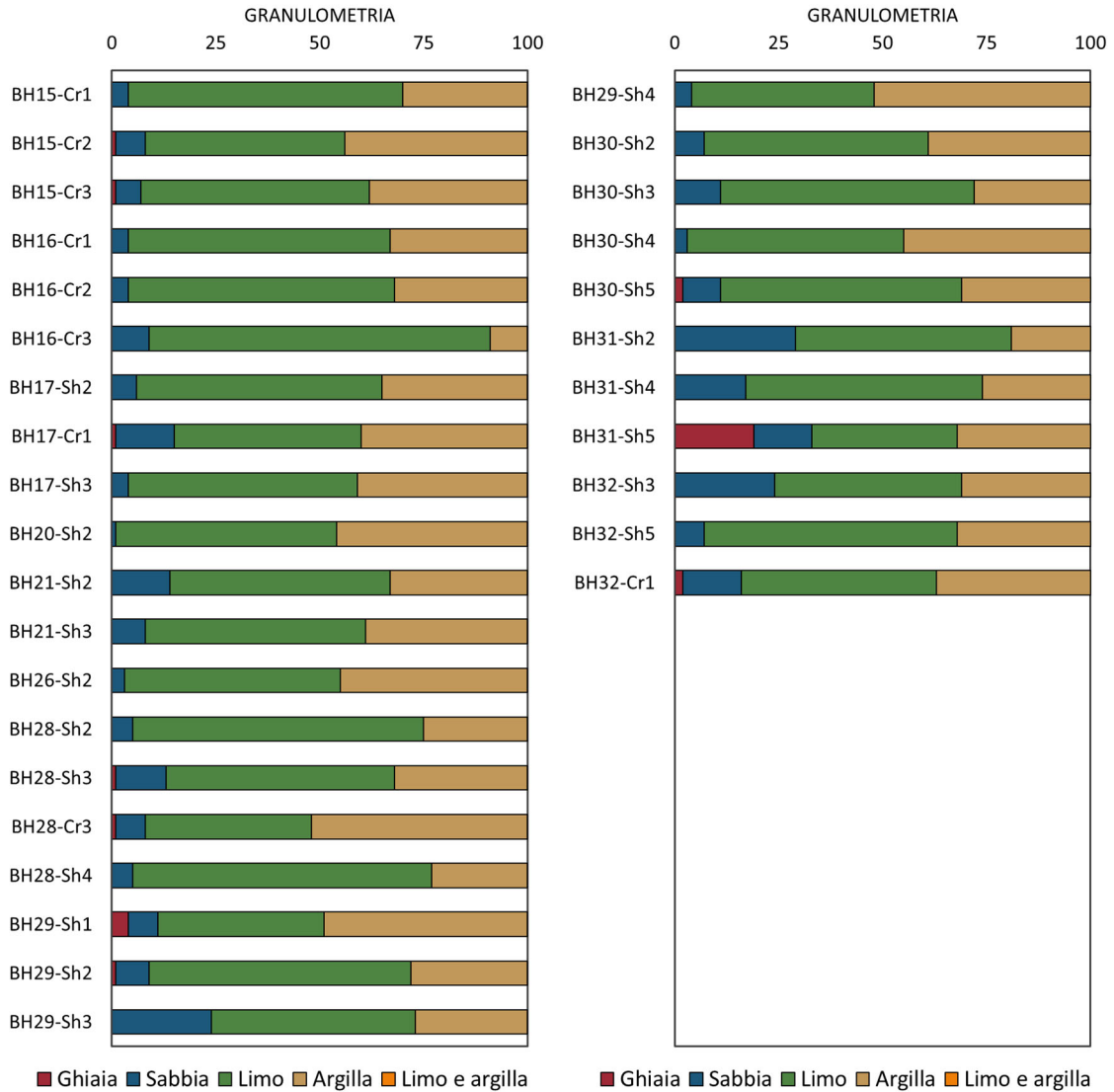


Figura 4.72 Analisi granulometrica (UG9)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume naturale

$$\gamma = 17.7 \div 21.2 \text{ kN/m}^3$$

Peso di volume saturo

$$\gamma_{\text{sat}} = 17.9 \div 21.2 \text{ kN/m}^3$$

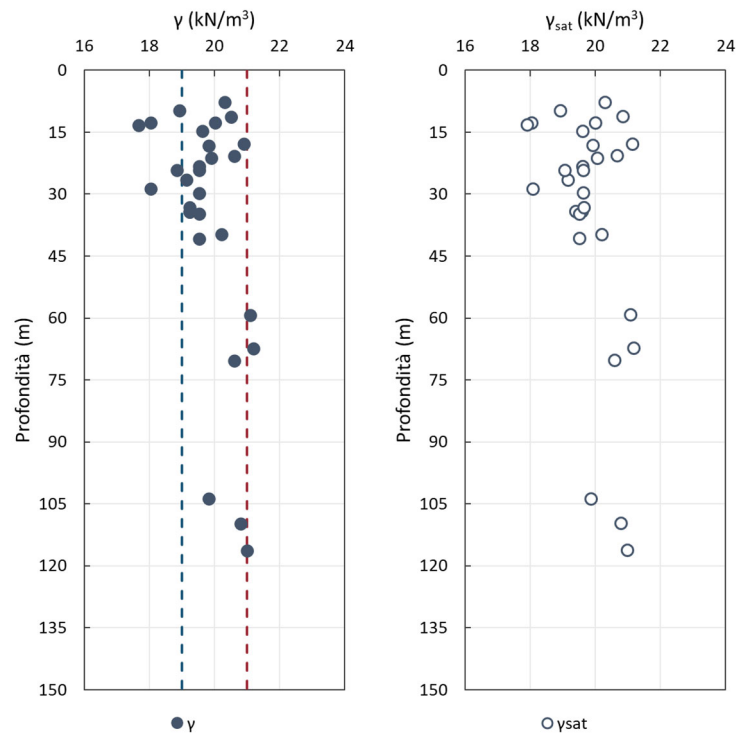


Figura 4.73 Peso dell'unità di volume naturale e saturo (UG9)

Peso specifico dei grani

$$G_s = 2.59 \div 2.72$$

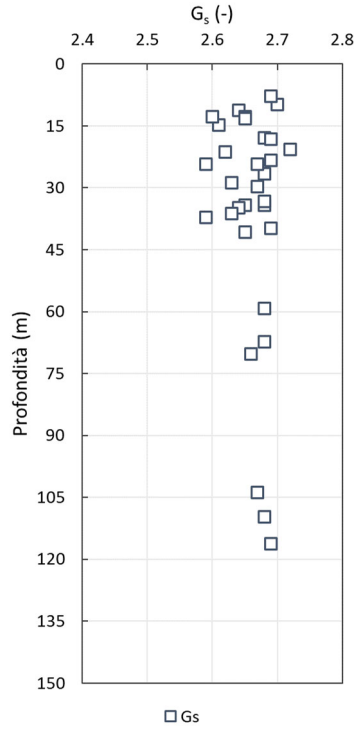


Figura 4.74 Peso specifico dei grani (UG9)

Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione

Indice dei vuoti	$e = 0.41 \div 0.96$
Porosità	$n = 29 \div 49 \%$
Grado di saturazione	$S_r = 88 \div 100 \%$

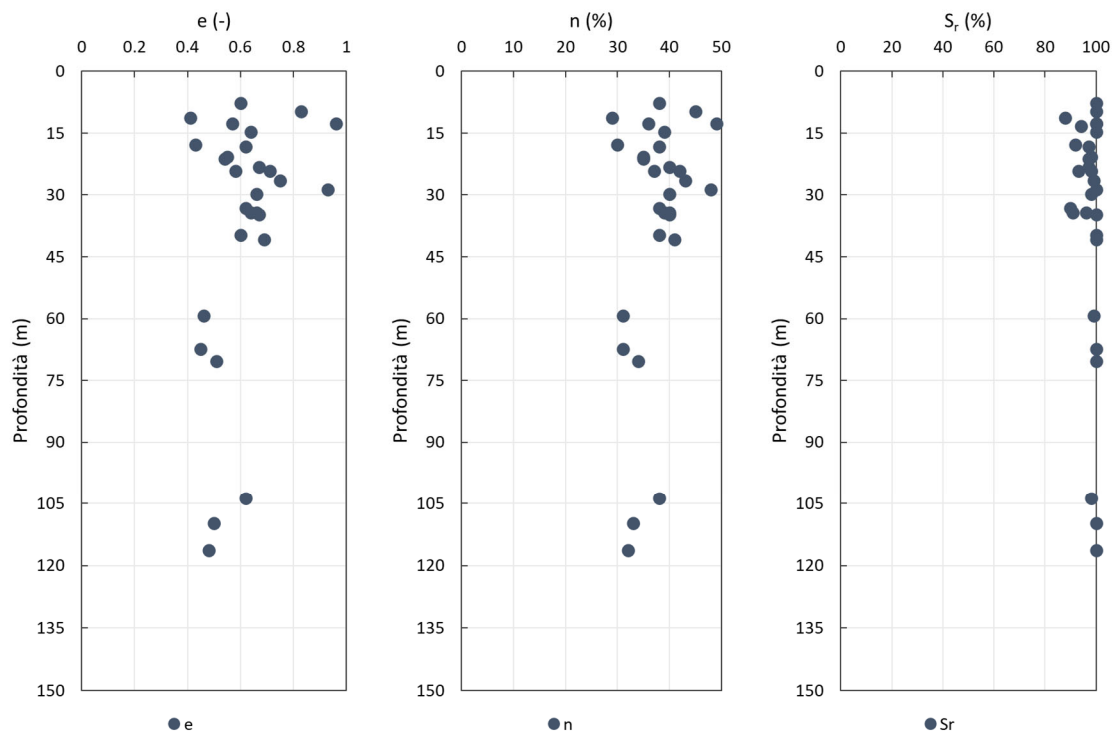


Figura 4.75 Indice dei vuoti, porosità e grado di saturazione (UG9)

Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità

Contenuto naturale d'acqua	$w_n = 15.2 \div 36.10 \%$
Limite liquido	$w_L = 30 \div 67 \%$
Limite plastico	$w_P = 17 \div 31 \%$
Indice di plasticità	$IP = 9 \div 36 \%$

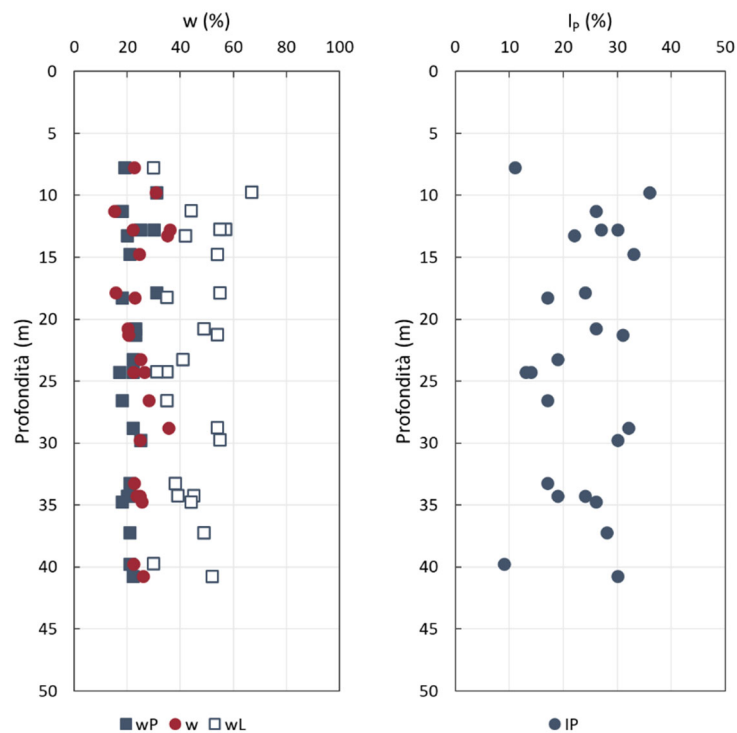


Figura 4.76 Contenuto naturale d'acqua, limiti di Atterberg e indice di plasticità (UG9)

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

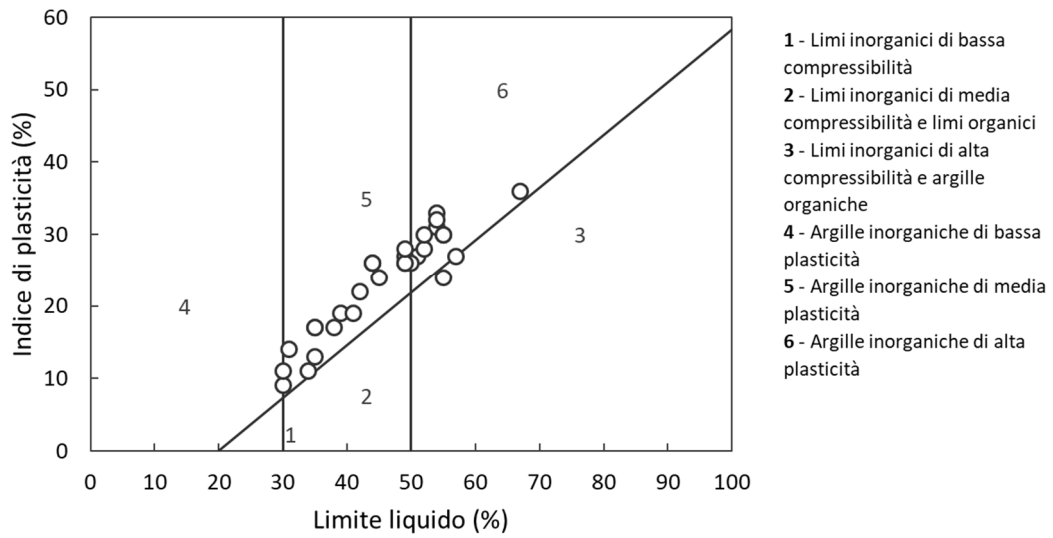


Figura 4.77 Carta di plasticità di Casagrande (UG9)

PROGETTAZIONE ATI:

4.1.10.2 Parametri di resistenza a taglio drenati

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di coesione efficace c' e angolo di attrito efficace φ' .

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (CD)

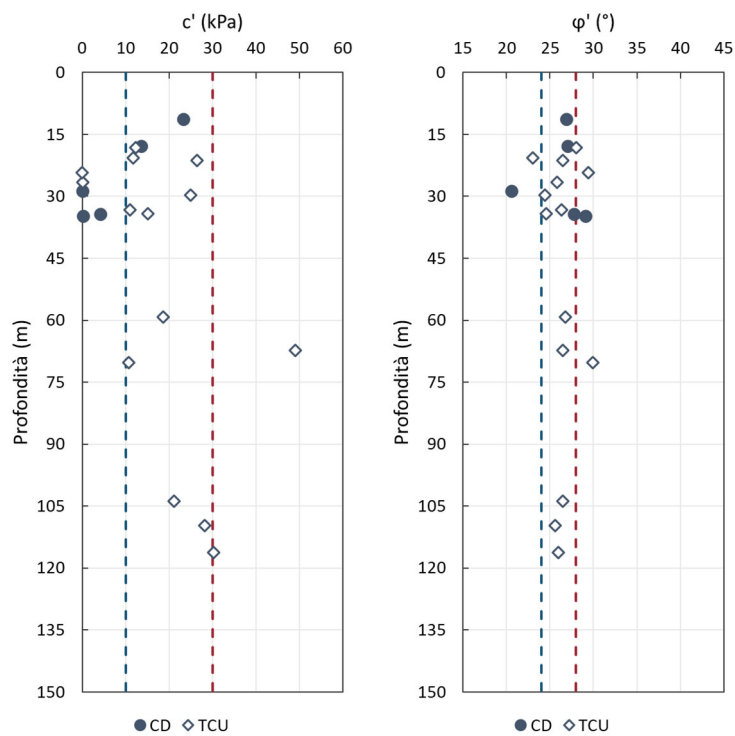
Coesione efficace $c' = 0 \div 23 \text{ kPa}$

Angolo di attrito efficace $\varphi' = 21^\circ \div 29^\circ$

PROVA TRIASSIALE CONSOLIDATA NON DRENATA (TCU)

Coesione efficace $c' = 0 \div 49 \text{ kPa}$

Angolo di attrito efficace $\varphi' = 23^\circ \div 30^\circ$



4.1.10.3 Parametri di resistenza a taglio non drenati

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di resistenza al taglio non drenata c_u .

PROVA TRIASSIALE NON CONSOLIDATA NON DRENATA (TUU)

Coesione non drenata

$$c_u = 49 \div 450 \text{ kPa}$$

PROVA SCISSOMETRICA (VT)

Coesione non drenata

$$c_u = 49 \div 490 \text{ kPa}$$

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Coesione non drenata

$$c_u = 26 \div 343 \text{ kPa}$$

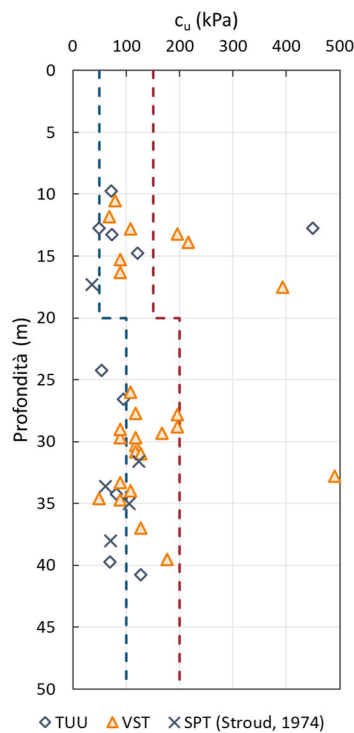


Figura 4.79 Parametri di resistenza al taglio non drenati (UG9)

4.1.10.4 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale

$$G_0 = 83 \div 190 \text{ MPa}$$

Modulo di elasticità longitudinale

$$E_0 = 236 \div 504 \text{ MPa}$$

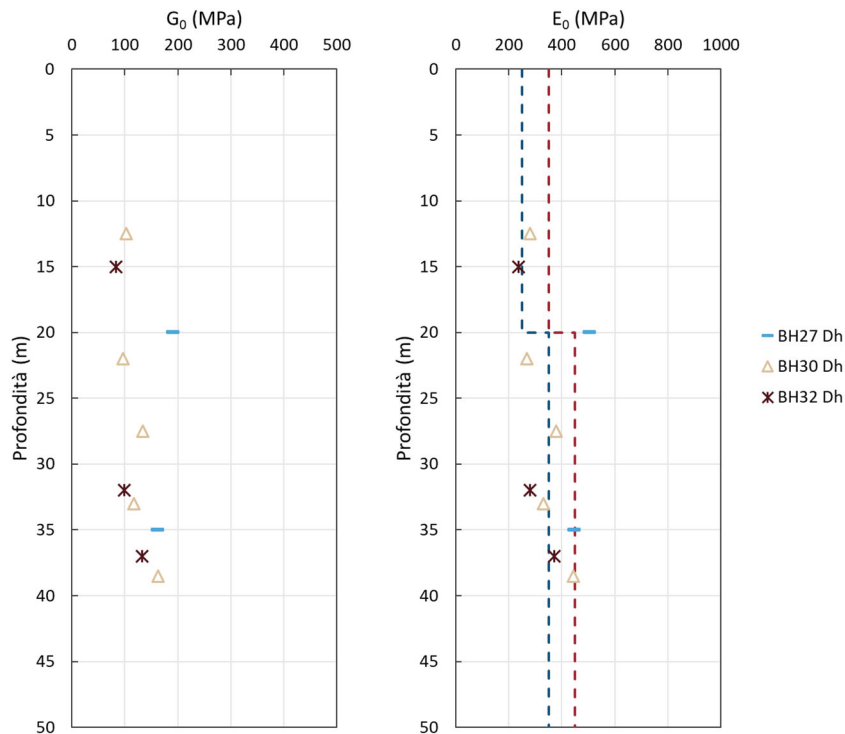


Figura 4.80 Parametri di deformabilità (UG9)

4.1.11 UG10 - Ghiaia sabbiosa

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto Est del tracciato, dalla progressiva 8+800 km fino a fine intervento.

L'unità UG10 comprende le ghiaie di natura poligenica in matrice sabbiosa (Ag) dei depositi alluvionali recenti e attuali che colmano la Valle Tiberina e le valli dei principali affluenti del Tevere. Si tratta prevalentemente di ghiaia con sabbia, sabbie ghiaiose, a volte limose, raramente debolmente argillose, da dense a molto dense.

All'interno dell'unità geotecnica UG10 sono stati prelevati n. 9 campioni indisturbati e n. 16 campioni rimaneggiati, inoltre sono state eseguite n. 31 prove SPT di cui 3 hanno raggiunto il rifiuto strumentale nel tratto successivo a quello di avviamento.

Tabella 4-11 Risultati prove SPT (UG10)

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
BH22	SPT1	5,55	6,20	25	38	24	62	60	0,98	61
	SPT2	16,00		7	8	12	20	60	0,76	15
	SPT3	22,55		21	27	38	65	60	0,68	44
	SPT4	28,00		18	22	24	46	60	0,62	28
	SPT5	32,55		22	31	39	70	60	0,58	40
BH23	SPT2	13,55	3,00	19	12	3	15	60	0,86	13
BH24	SPT1	5,00	3,20	7	17	23	40	60	1,09	44
	SPT2	9,00		4	21	25	46	60	0,96	44
	SPT3	13,00		4	10	17	27	60	0,87	23
BH25	SPT2	13,00	3,20	29	22	23	45	60	0,87	39
	SPT3	20,55		25	19	18	37	60	0,74	27
	SPT4	26,55		15	17	19	36	60	0,67	24
	SPT5	32,00		30	45	r	100	60	0,61	-
	SPT6	37,55		24	32	38	70	60	0,56	40
BH26	SPT1	7,00	3,50	12	18	22	40	60	1,01	40
	SPT2	12,00		18	21	26	47	60	0,88	41
	SPT3	16,00		15	18	12	30	60	0,81	24
	SPT4	20,50		27	35	43	78	60	0,74	58
	SPT6	34,60		19	22	37	59	60	0,59	35
BH28	SPT2	9,00	3,80	15	18	21	39	60	0,94	37
	SPT3	13,00		27	40	r	100	60	0,86	-
	SPT4	20,00		15	19	31	50	60	0,74	37
	SPT5	25,00		29	42	r	100	60	0,68	-
BH29	SPT1	5,00	3,50	7	9	12	21	60	1,08	23
	SPT2	13,70		8	10	10	20	60	0,85	17

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio	Prova	Profondità prova (m)	Profondità falda (m)	Numero colpi				ER _{i,m} (%)	C _N (-)	(N ₁) ₆₀
				N ₁	N ₂	N ₃	N			
	SPT3	17,00		9	12	12	24	60	0,79	19
BH30	SPT1	7,00	2,30	15	21	30	51	60	1,05	54
	SPT2	14,70		13	19	27	46	60	0,85	39
BH32	SPT1	7,00	3,50	10	13	18	31	60	1,01	31
	SPT4	20,00		18	26	35	61	60	0,75	45
	SPT5	28,50		30	39	50	89	60	0,64	57

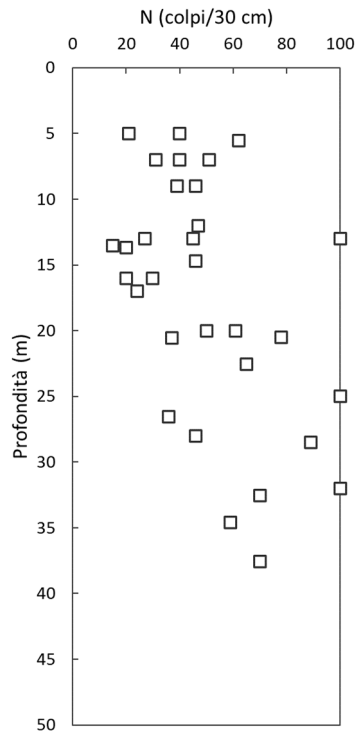


Figura 4.81 Risultati prove SPT (UG10)

4.1.11.1 Caratteristiche fisiche

Granulometria

Ghiaia = 2 ÷ 63 % Sabbia = 24 ÷ 74 % Limo = 8 ÷ 24 % Argilla = 2 ÷ 10 %

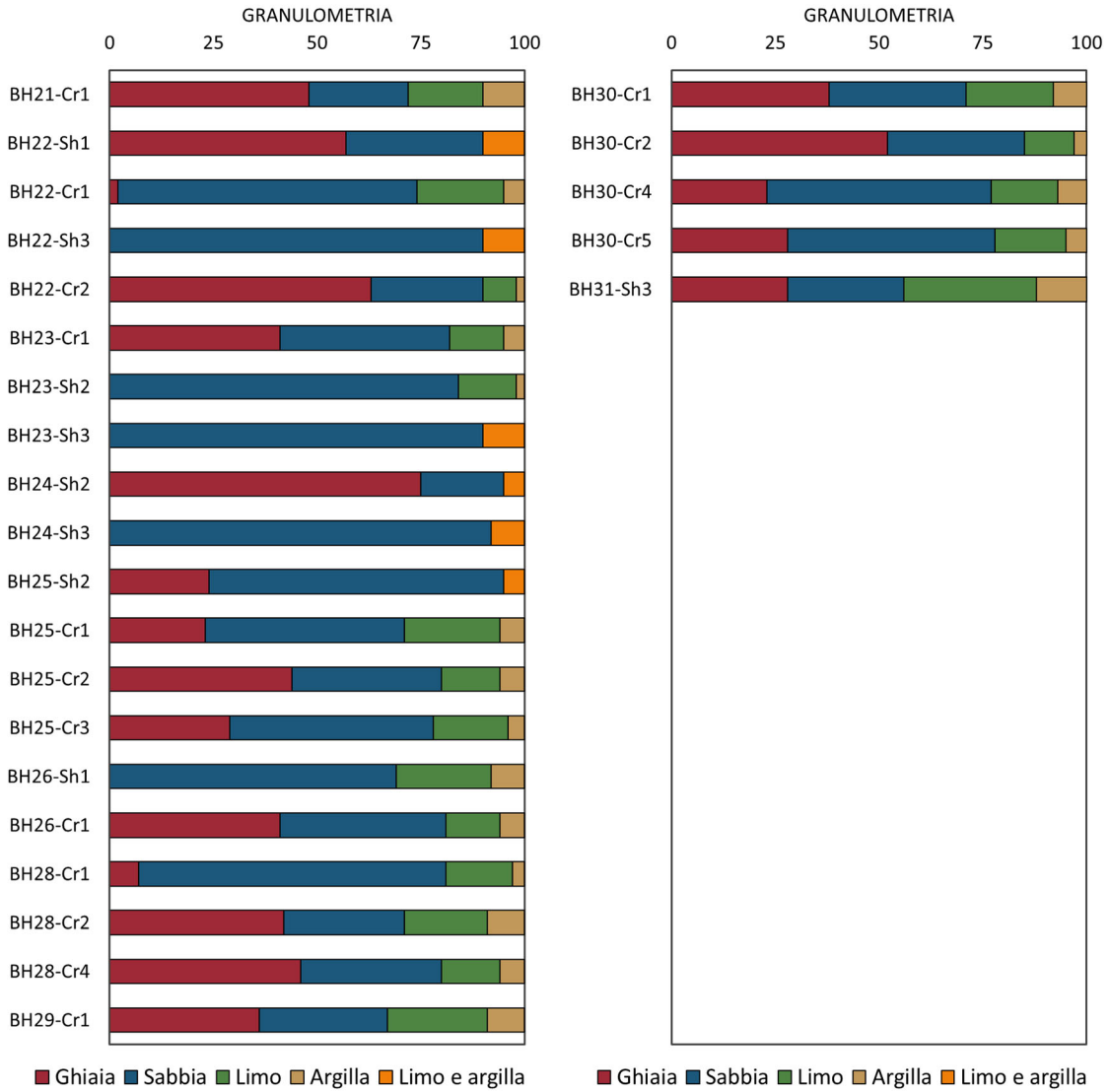


Figura 4.82 Analisi granulometrica (UG10)

Peso dell'unità di volume

Peso di volume naturale

$$\gamma = 16.9 \div 19.3 \text{ kN/m}^3$$

Peso di volume della parte solida

$$\gamma_s = 24.6 \div 27.3 \text{ kN/m}^3$$

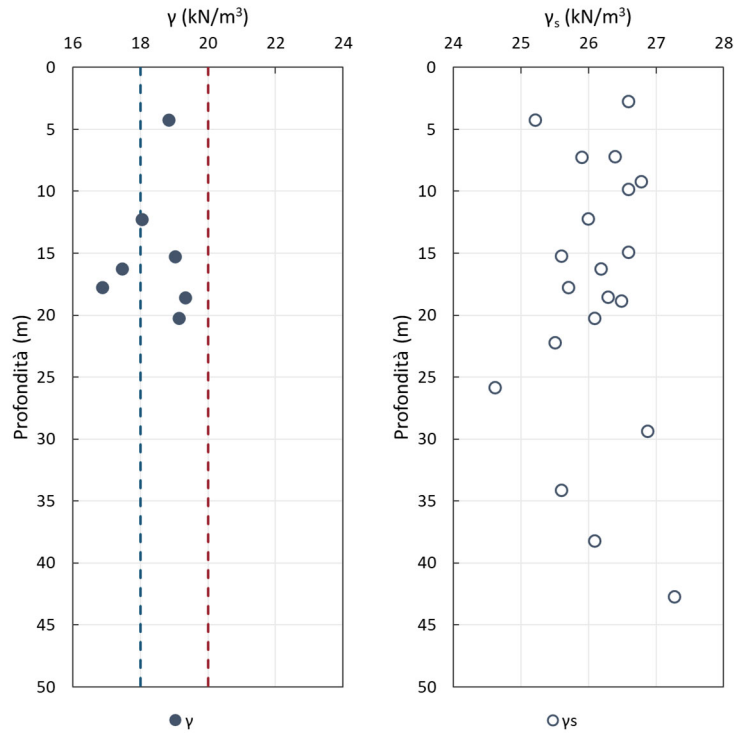


Figura 4.83 Peso dell'unità di volume naturale e della parte solida (UG10)

Densità relativa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Densità relativa

$D_r = 39.5 \div 100 \%$

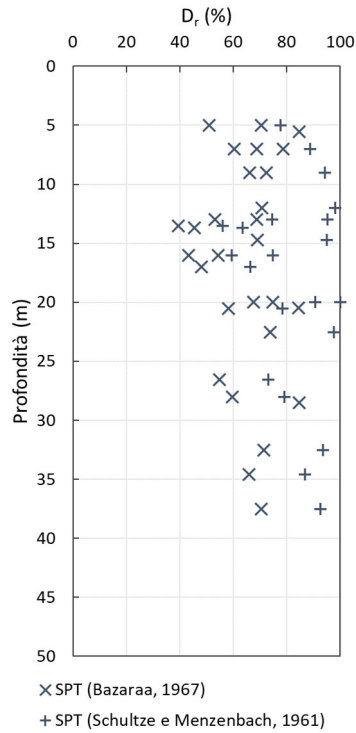


Figura 4.84 Densità relativa (UG10)

4.1.11.2 Parametri di resistenza al taglio

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio e l'interpretazione di prove in sito in termini di coesione efficace c' e angolo di attrito efficace φ' .

PROVA DI TAGLIO DIRETTO (CD)

Coesione efficace

$c' = 0$ kPa

Angolo di attrito efficace

$\varphi' = 29^\circ \div 37^\circ$

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Angolo di attrito efficace

$\varphi' = 29^\circ \div 38^\circ$

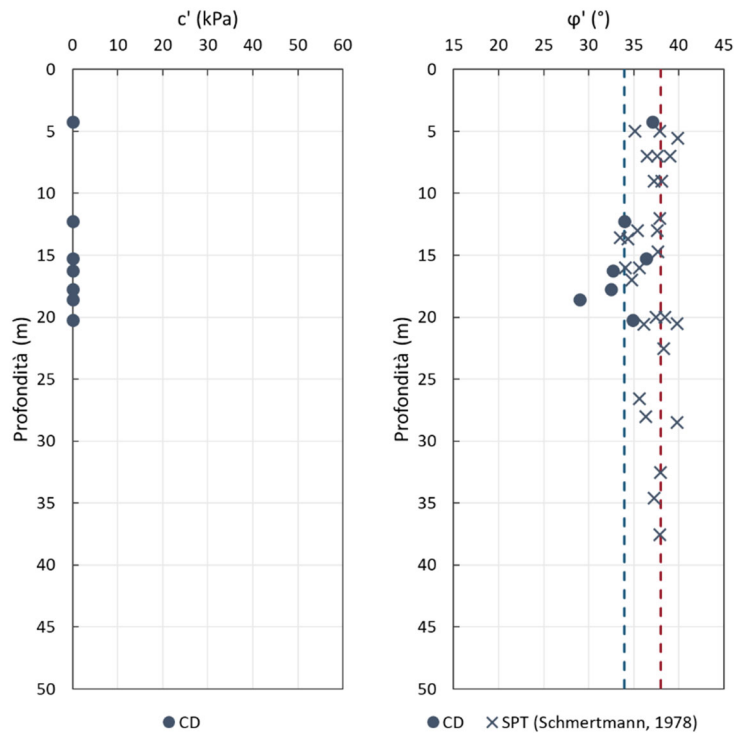


Figura 4.85 Parametri di resistenza al taglio (UG10)

4.1.11.3 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale $G_0 = 97 \div 330$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale $E_0 = 261 \div 857$ MPa

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA (SPT)

Modulo di elasticità tangenziale $G_0 = 99 \div 334$ MPa
Modulo di elasticità longitudinale $E_0 = 238 \div 801$ MPa

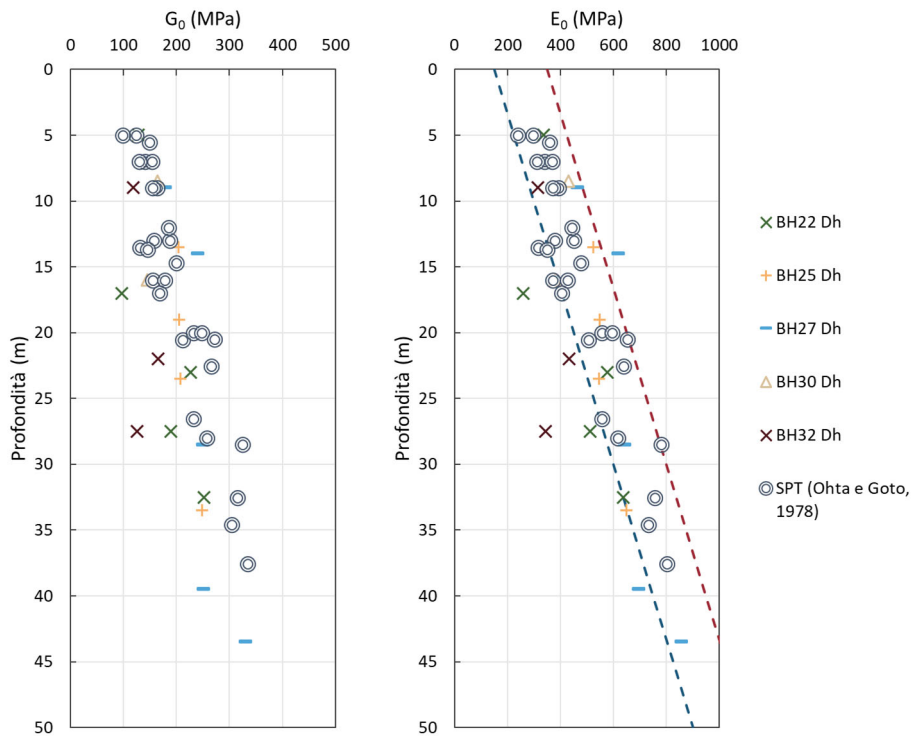


Figura 4.86 Parametri di deformabilità (UG10)

4.2 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

La caratterizzazione geomeccanica dei litotipi interessati dal progetto in esame si basa principalmente su rilievi di superficie, integrati con informazioni bibliografiche e localmente con prove di laboratorio e sondaggi. In particolare, le stazioni geomeccaniche hanno permesso una stima del GSI (Hoek & Marinos, 2001) per le porzioni superficiali.

4.2.1 UG4 - Arenaria

L'unità geotecnica in esame è distribuita principalmente sul tratto Ovest del tracciato, dalla progressiva 0+750 km alla progressiva 2+300 km.

L'unità UG4 è costituita dal Macigno, Membro di Molin Nuovo (MAC₁). Si tratta di arenarie caratterizzate da potenti bancate di aspetto massimo e grana mediamente grossolana. Sono inoltre presenti, ma da subordinate ad assenti, intercalazioni argillitico marnose e calcarenitico marnose. Lo strato più superficiale, caratterizzato da spessori variabili tra i 10 e 15 m, risulta intensamente alterato (UG4a).

All'interno dell'unità geotecnica UG4 sono stati prelevati n. 13 campioni litoidi.

4.2.1.1 Proprietà indice

Massa volumica

Massa volumica

$$\gamma_g = 24.6 \div 27.3 \text{ kN/m}^3$$

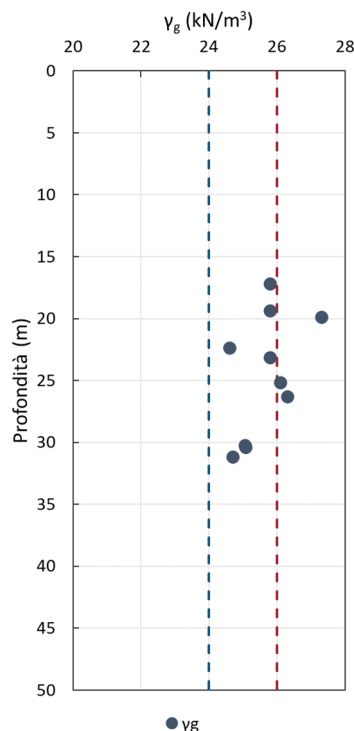


Figura 4.87 Massa volumica (UG4)

PROGETTAZIONE ATI:

Tensione normale a rottura

Di seguito si riportano i risultati delle prove di laboratorio in termini di resistenza a compressione uniassiale σ_c . Per la valutazione di tale parametro si è fatto riferimento alle prove di compressione uniassiale su roccia e alle prove di resistenza a carico puntuale, i cui risultati sono riportati nel grafico di Figura 4.88. Per le prove di resistenza a carico puntuale, ricerche bibliografiche ed esperienze dirette (Bruschi, 1998) inducono a ritenere che il valore del coefficiente di proporzionalità K tra l'indice di resistenza al punzonamento $I_{S(50)}$ e la resistenza a compressione uniassiale σ_c sia funzione principale della litologia. Per il litotipo in esame si è scelto un valori di K pari a 19.

In Figura 4.88, inoltre, si riportano i valori di σ_c ottenuti durante i rilievi geomeccanici mediante misurazioni indirette (prove sclerometriche).

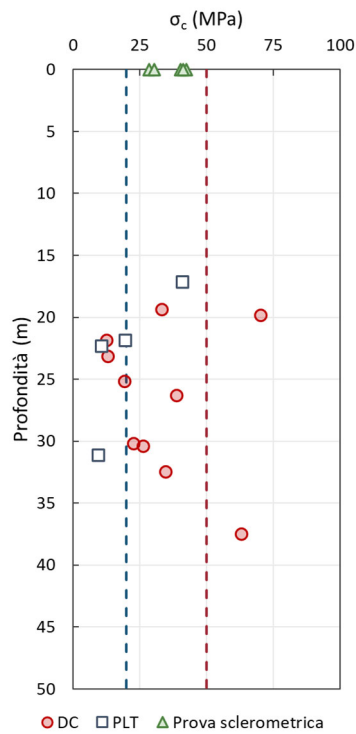


Figura 4.88 Tensione normale a rottura (UG4)

4.2.1.2 Parametri di deformabilità

Di seguito si riportano i risultati delle interpretazioni di prove in sito in termini modulo di elasticità longitudinale alle piccole deformazioni E_0 e modulo di elasticità tangenziale alle piccole deformazioni G_0 .

PROVA DOWN-HOLE (DH)

Modulo di elasticità tangenziale

$$G_0 = 415 \div 4046 \text{ MPa}$$

Modulo di elasticità longitudinale

$$E_0 = 1078 \div 10115 \text{ MPa}$$

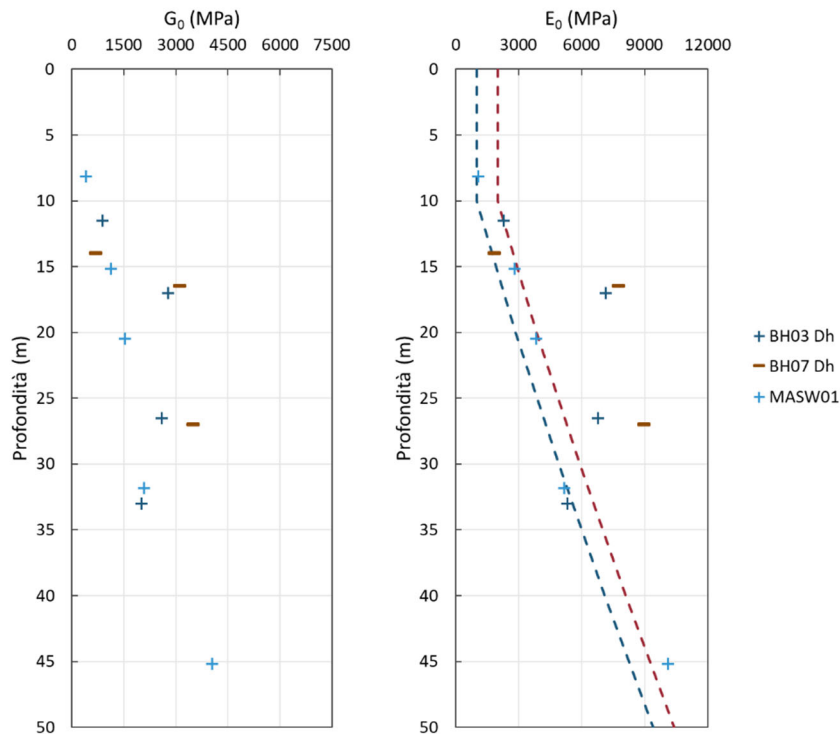


Figura 4.89 Parametri di deformabilità (UG4)

4.2.1.3 Classificazione

La classificazione dell'ammasso roccioso è stata eseguita mediante il *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1989) e il *Geological Strength Index* per rocce fratturate (Hoek e Marinos, 2000).

Di seguito si riporta una sintesi dei risultati ottenuti dai singoli rilievi geologico strutturali validi per l'unità UG4b. Per maggiori dettagli si rimanda alla Relazione sulle indagini strutturali (T00GE01GEORE02).

Tabella 4-12 Sintesi dei risultati ottenuti dai rilievi geologico strutturali (UG4b)

Stazione geomeccanica	R1	R2	R3	R4	R5	R6	RMR	GSI
SG01 (2023)	5	12	10	19	15	0	61	56
SG02 (2023)	5	18	12	8	15	0	58	53
SG04 (2023)	5	16	12	18	15	0	66	61

Per la classificazione della porzione più superficiale e alterata dell'ammasso roccioso (UG4a) si considerano anche i risultati del carotaggio in corrispondenza del sondaggio BH02 Pz in termini di recupero percentuale modificato (RQD), riportati in Figura 4.90.

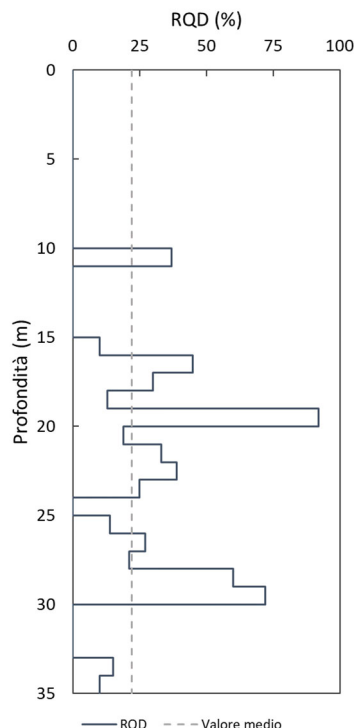


Figura 4.90 Recupero percentuale modificato (RQD), sondaggio BH02 Pz

Con riferimento alle due stazioni geomeccaniche SG01 (2023) e SG02 (2023), considerando un recupero percentuale modificato medio pari a $RQD_m = 22\%$, per l'unità UG4b si ottiene un valore di $GSI = 36 \div 43$ (Tabella 4-13).

Tabella 4-13 Sintesi dei risultati ottenuti dai rilievi geologico strutturali (UG4a)

Stazione geomeccanica	R1	R2	R3	R4	R5	R6	RMR	GSI
SG01 (2023)	3	5	10	15	15	0	48	43
SG02 (2023)	3	5	12	6	15	0	41	36

4.2.1.4 Caratterizzazione

I parametri di resistenza a taglio e deformabilità caratteristici dell'ammasso roccioso sono stati valutati secondo i criteri riportati al §. Di seguito si riporta una sintesi dei risultati ottenuti.

Tabella 4-14 Caratteristiche di resistenza e deformabilità (UG4)

		Arenaria alterata (UG4a)	Arenaria (UG4b)
Massa volumica γ		24 ÷ 26 kN/m ³	24 ÷ 26 kN/m ³
Classificazione	σ_c	20 ÷ 35 MPa	20 ÷ 35 MPa
	GSI	35 ÷ 45	50 ÷ 55
	m_i	17	17
	D	0,2	0,2
Criterio di rottura Hoek-Brown	m	1,289 ÷ 1,572	2,338 ÷ 2,851
	s	4,00e-04 ÷ 8,00e-04	2,60e-03 ÷ 4,700e-03
	a	0,516 ÷ 0,511	0,506 ÷ 0,504
	$\sigma_{3,max}$	0,200 MPa	0,200 MPa
Criterio di rottura Mohr-Coulomb	c'	98 ÷ 146 kPa	153 ÷ 272 kPa
	φ'	54° ÷ 59°	58° ÷ 63°
Modulo elastico E_m		1,7 ÷ 3,0 GPa	4,1 ÷ 7,1 GPa
Coeff, di Poisson ν		0,25	0,25

4.3 PARAMETRI CARATTERISTICI

Con riferimento ai litotipi precedentemente individuati si è proceduto a definire le caratteristiche fisico-meccaniche combinando i risultati delle prove di laboratorio e delle indagini in sito svolte nel corso delle diverse campagne d'indagini, mediante correlazioni proposte in letteratura e ampiamente verificate sul piano sperimentale.

Sono stati quindi definiti per ciascuna unità geotecnica i valori caratteristici dei parametri di resistenza e deformabilità. I valori caratteristici sono riassunti nella Tabella 4-15 e nei Profili geotecnici (T00GE09GETFG01-17).

Tabella 4-15 Sintesi dei parametri fisico-meccanici caratteristici dei terreni

Unità geotecnica	Descrizione	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)	c_u (kPa)	E_0 (MPa)	E (MPa)	
UG1a	Sabbia limosa	19 ÷ 21	0	34 ÷ 38	-	100 ÷ 200	10 ÷ 40	
UG1b	Limo argilloso	18 ÷ 20	0 ÷ 10	24 ÷ 28	100 ÷ 150	150 ÷ 250	15 ÷ 50	$z \leq 10$ m
						250 ÷ 350	25 ÷ 70	$z > 10$ m
UG2	Sabbia con elementi lapidei	19 ÷ 21	0	36 ÷ 38	-	400 ÷ 500	40 ÷ 100	
UG3	Sabbia con limo	19 ÷ 20	0 ÷ 5	30 ÷ 32	-	150 ÷ 250	15 ÷ 50	
UG5	Argilla marnosa	20 ÷ 22	30 ÷ 35	25 ÷ 30	-	2000÷4000	200 ÷ 800	
UG6	Depositi di frana	19 ÷ 20	0 [0]	17 ÷ 19 [9]	-	150 ÷ 250	15 ÷ 50	
UG7a	Ghiaia	19 ÷ 21	0	38 ÷ 42	-	250 ÷ 450	25 ÷ 90	$z \leq 10$ m
						35·z	3.5·z ÷ 7·z	$z > 10$ m
UG7b	Limo sabbioso	18 ÷ 20	0 ÷ 5	28 ÷ 30	-	250 ÷ 450	25 ÷ 90	$z \leq 10$ m
						35·z	3.5·z ÷ 18·z	$z > 10$ m
UG8	Conglomerati	19 ÷ 21	0	38 ÷ 42	-	200 ÷ 250	20 ÷ 50	$z \leq 5$ m
						45·z	4.5·z ÷ 9·z	$z > 5$ m
UG9	Argille limose	19 ÷ 21	10 ÷ 30	24 ÷ 28	50 ÷ 150	250 ÷ 350	25 ÷ 70	$z \leq 20$ m
					100 ÷ 200	350 ÷ 450	35 ÷ 90	$z \leq 20$ m
UG10	Ghiaia sabbiosa	18 ÷ 20	0	34 ÷ 38	-	15·z+250	1.5·z+25 ÷ 3·z+50	

[*] = parametro in condizioni residue

Tabella 4-16 Sintesi dei parametri fisico-meccanici caratteristici delle unità litoidi

Unità geotecnica	Descrizione	γ (kN/m ³)	σ_c (MPa)	GSI (-)	E_0 (MPa)
UG4a	Arenaria alterata	24 ÷ 26	20 ÷ 50	35 ÷ 45	1000 ÷ 2000
UG4b	Arenaria	24 ÷ 26	20 ÷ 50	50 ÷ 60	90·z ^{1.20}

5 STABILITÀ DEI VERSANTI

Nel presente capitolo sono analizzati e descritti i fenomeni franosi interferenti con il tracciato stradale in esame. Per ciascuno fenomeno si riporta quanto descritto nella cartografia ufficiale, *nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia* (IFFI) e nel *Piano di Assetto Idrogeologico* (PAI). Per maggiori dettagli su quanto riscontrato in fase di rilievo e indagine si rimanda alla Relazione geologica (T00GE02GEORE01).

5.1 DISSESTO TRA LE PROGRESSIVE 2+200 KM E 2+370 KM

Tra le progressive 2+200 km e 2+370 km, in corrispondenza dell'imbocco lato Fano della galleria "Le Ville", l'inventario IFFI individua la presenza di quattro aree di dissesto (ID: 0515247100, 0515241500, 0515244100 e 0515244000) con cinematica indeterminata classificate come quiescenti.

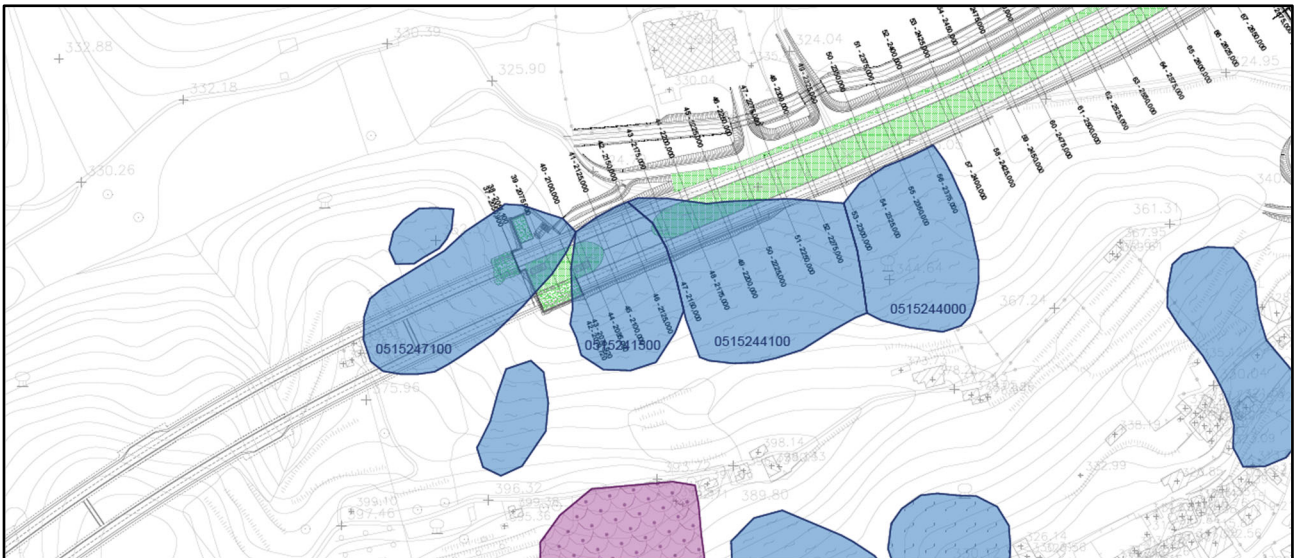


Figura 5.1 Fenomeni franosi (IFFI) tra le progressive 2+200 km e 2+370 km

Il PAI, invece, non segnala alcun fenomeno nel medesimo settore.

Dalle osservazioni condotte in sito, è stata verificata la presenza di materiale corticale di natura sabbioso limosa in stato di addensamento per lo più sciolto a copertura del substrato arenaceo. Questo risulta soggetto a fenomeni di dilavamento e/o di accumulo in settori morfologicamente favorevoli. La natura del terreno e gli spessori degli strati colluviali comporta che il versante sia localmente caratterizzato da fenomeni di soliflusso che interessano la coltre di alterazione.

Al fine di controllo dello stato di attività dei presenti dissesti, in fase di monitoraggio, si prevede l'installazione di un tubo inclinometrico, in corrispondenza del dissesto 0515244100.

5.2 DISSESTO TRA LE PROGRESSIVE 4+720 KM E 4+775 KM

Tra le progressive 4+720 km e 4+775 km, in corrispondenza dell'imbocco lato Grosseto della galleria "Citerna", l'inventario IFFI individua la presenza di una frana (ID: 0540645700) per scivolamento rotazionale/traslato classificata come quiescente.

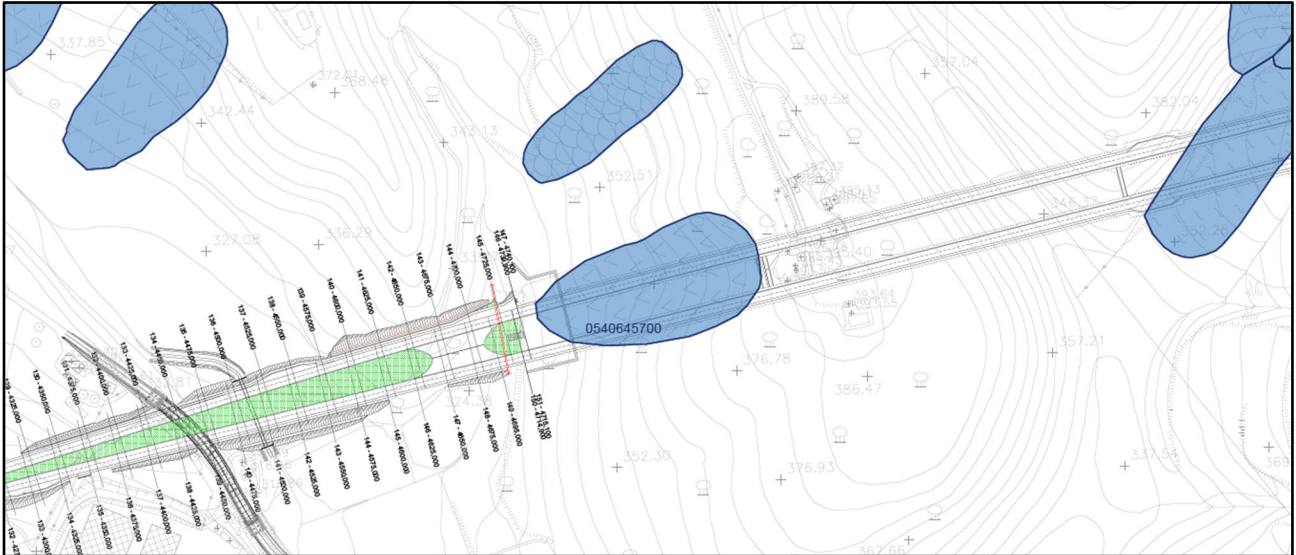


Figura 5.2 Frana per scivolamento rotazionale/traslato quiescente (IFFI) tra le progressive 4+720 km e 4+775 km

Il PAI registra il medesimo dissesto (ID: 2890924) come frana per scivolamento in condizioni di quiescenza.

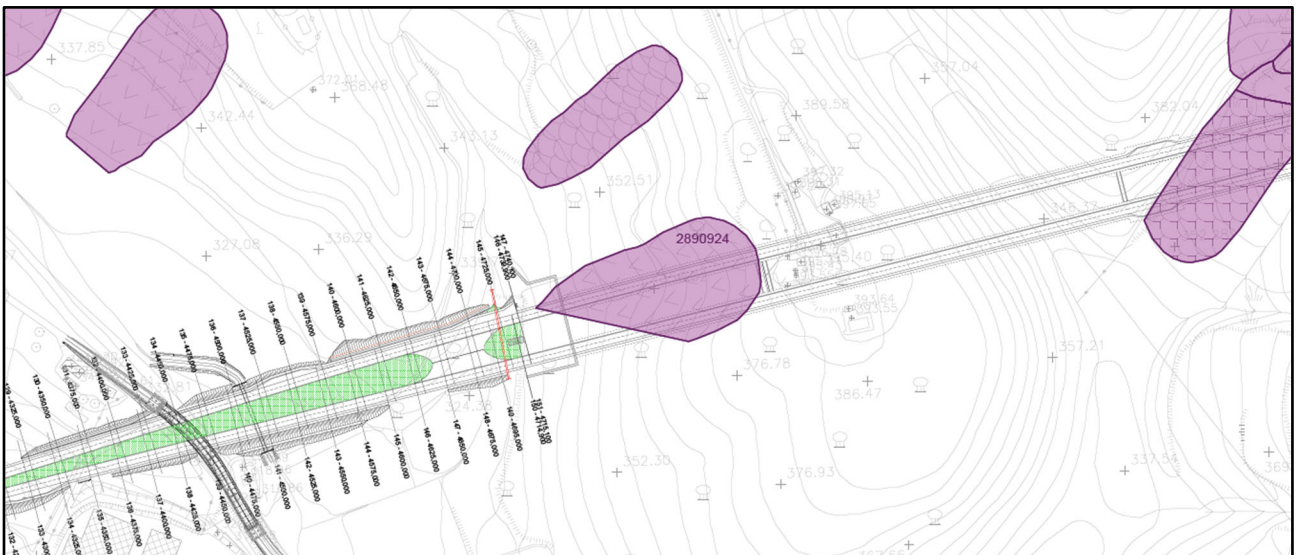


Figura 5.3 Frana per scivolamento quiescente (PAI) tra le progressive 4+720 km e 4+775 km

PROGETTAZIONE ATI:

5.3 DISSESTO TRA LE PROGRESSIVE 7+130 KM E 7+380 KM

Tra le progressive 7+130 km e 7+380 km, in corrispondenza della galleria artificiale “Citerna”, l’inventario IFFI individua la presenza di una frana (ID: 0540641000) complessa classificata come quiescente.

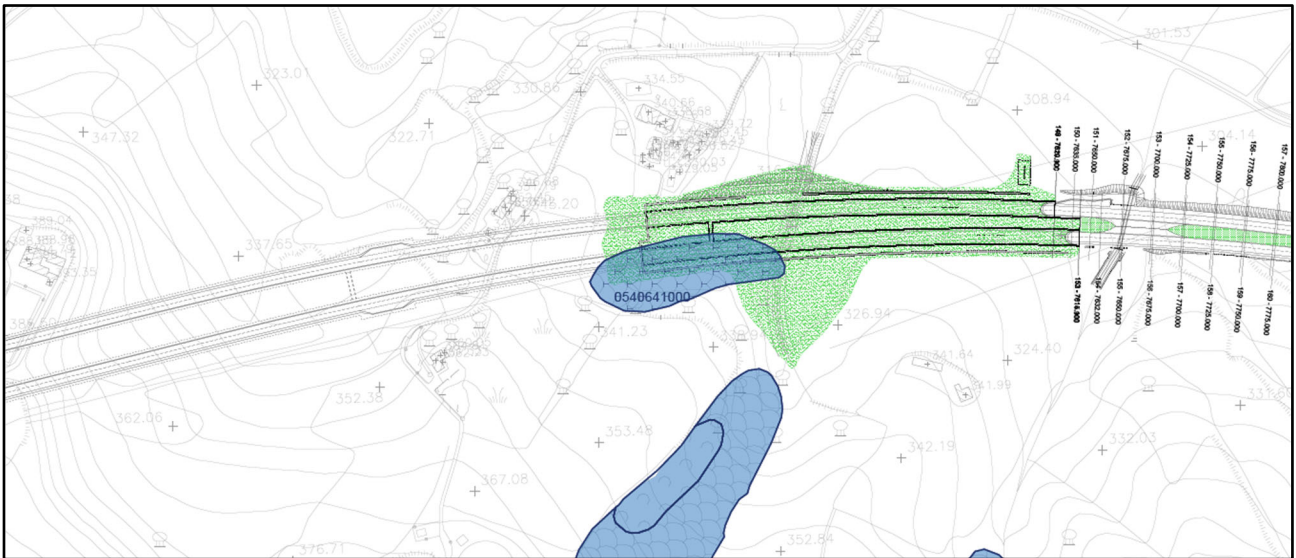


Figura 5.4 Frana complesse quiescente (IFFI) tra le progressive 7+130 km e 7+380 km

Il PAI registra il medesimo dissesto (ID: 2890885) come frana per scivolamento in condizioni di quiescenza.

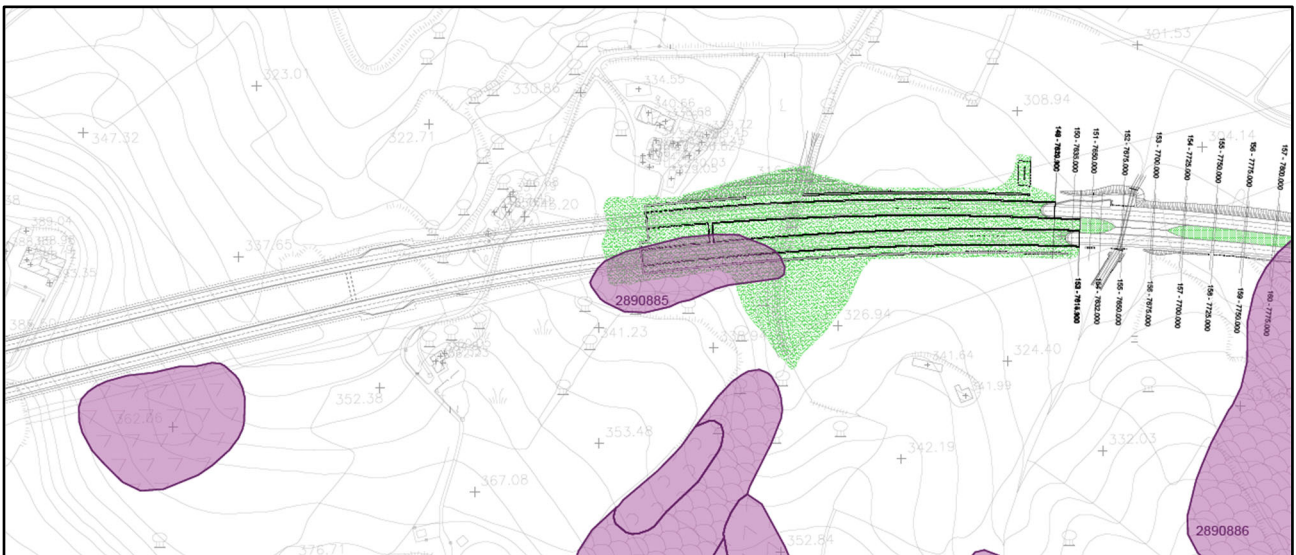


Figura 5.5 Frana per scivolamento quiescente (PAI) tra le progressive 7+130 km e 7+380 km

In corrispondenza del presente dissesto è possibile individuare due sondaggi (BH17 In e BH17bis Pz) attrezzati rispettivamente con tubo inclinometrico e tubo piezometrico.

Il sondaggio BH17 In, eseguito a carotaggio continuo, ha riscontrato nei primi 12 m dal p.c. argille limose destrutturate, con alla base una fascia alterata interpretabile come possibile e/o potenziale superficie di distacco. Dai 12 ai 25 m dal p.c. il sondaggio intercetta le argille grigie del Sintema di Fighille (UG9). Al momento della stesura del presente documento non si hanno a disposizione letture inclinometriche, necessarie per l'individuazione di una potenziale superficie di scorrimento.

5.4 DISSESTI TRA LE PROGRESSIVE 7+775 KM E 7+875 KM E LE PROGRESSIVE 8+025 KM E 8+075

Tra le progressive 7+775 km e 7+875 km e tra le progressive 8+025 km e 8+075 km, in corrispondenza del corpo stradale, il PAI individua rispettivamente la presenza di una frana (ID: 2890886) presunta e complessa e di una frana (ID: 2890892) complessa classificata come quiescente.

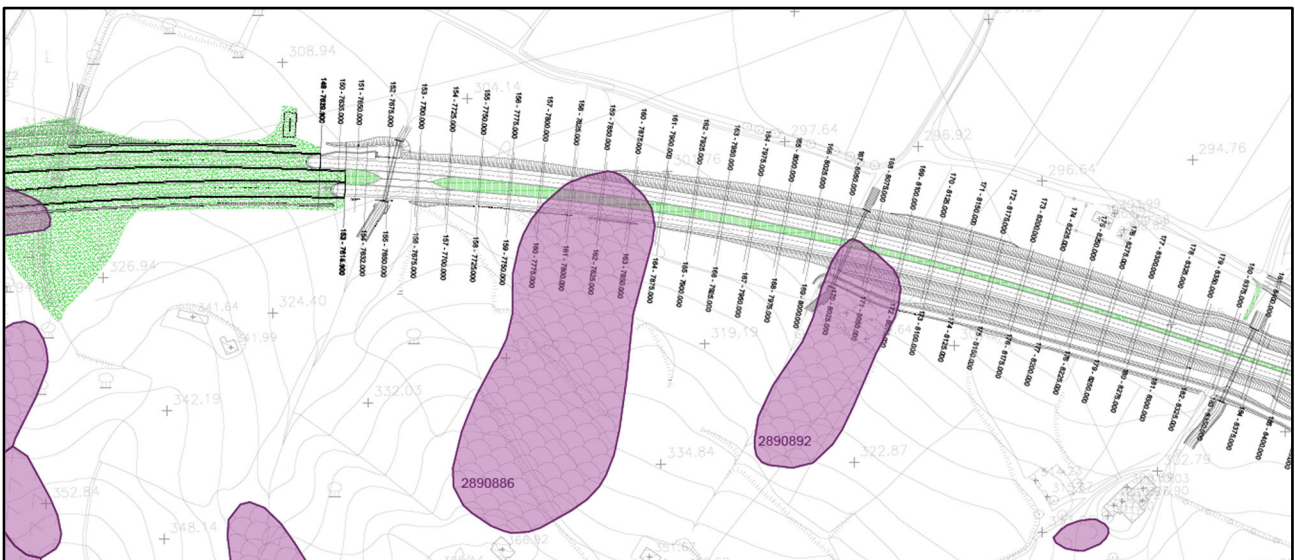


Figura 5.6 Frane complesse quiescenti (PAI) tra le progressive 7+775 km e 7+875 km e tra le progressive 8+025 km e 8+075 km

Nel medesimo settore (tra le progressive 8+025 km e 8+075 km) l'inventario IFFI segnala invece, la presenza di una sola frana (ID: 0540641400) complessa classificata come quiescente.

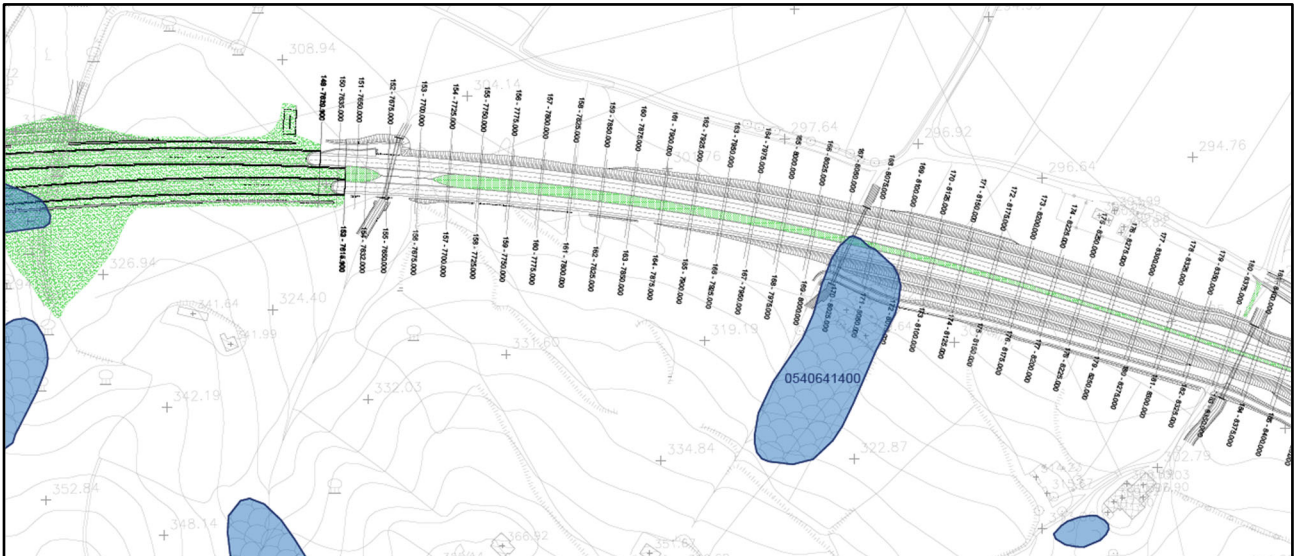


Figura 5.7 Frana complessa quiescente (IFFI) tra le progressive 8+025 km e 8+075 km

Al momento della stesura del presente documento non si hanno a disposizione indagini geognostiche, necessarie per la caratterizzazione fisica e meccanica del materiale che costituisce i due fenomeni franosi e per l'individuazione di una potenziale superficie di scorrimento.

Al fine di controllo dello stato di attività dei presenti dissesti, in fase di monitoraggio, si prevede l'installazione di due coppie di strumenti costituite da un tubo piezometrico e un tubo inclinometrico.

PROGETTAZIONE ATI:

6 CORPO STRADALE

6.1 RILEVATI STRADALI

Nei successivi paragrafi sono riportate le analisi effettuate per la valutazione dei cedimenti e della stabilità dei rilevati stradali presenti lungo il tracciato. Le sezioni analizzate nelle verifiche risultano essere le più rappresentative, considerando le condizioni più gravose e penalizzanti per l'opera, sia da un punto di vista geometrico sia da un punto di vista geotecnico.

I rilevati stradali devono essere realizzati con i materiali prescritti dal “CAPITOLATO SPECIALE DI APPALTO - Norme Tecniche per l'esecuzione del contratto - Parte 2 - IT.PRL.05.13 - Rev.2.0 Movimenti di terra e Demolizioni”. La pendenza delle scarpate è pari a 2/3 (verticale/orizzontale) con banche di larghezza pari a 2 m ogni 5 m di altezza di rilevato.

6.1.1 Piano di posa dei rilevati

6.1.1.1 Verifica preliminare dell'idoneità del piano di posa

Nel corso delle indagini eseguite nell'attuale fase di progettazione sono stati eseguiti n. 15 pozzetti stratigrafici e n.18 prove di carico su piastra, rispettivamente a 0,5 m e 1 m di profondità (Figura 6.1).

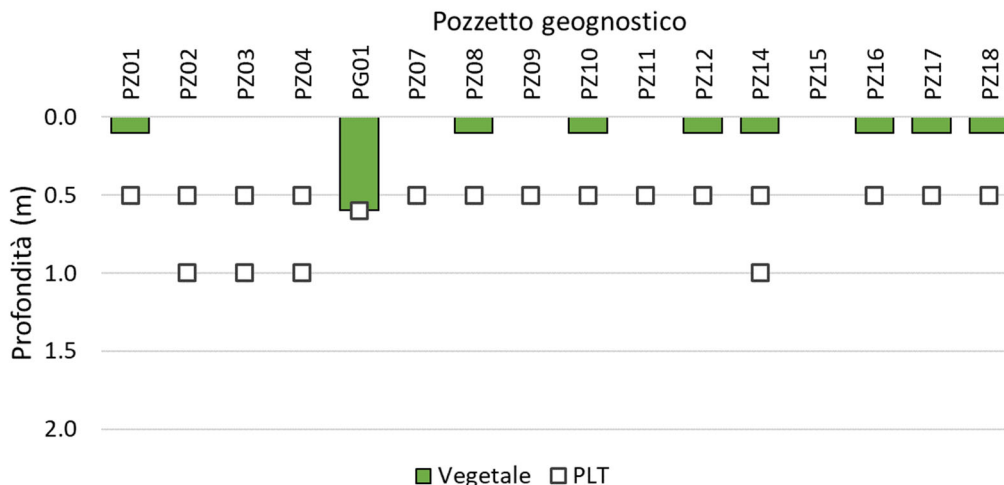


Figura 6.1 Spessore coltre vegetale e prove di carico su piastra (PLT)

Dall'analisi granulometrica dei campioni prelevati nei pozzetti si osserva che eccetto per i pozzetti PG01 (2011) e PZ04 (2022), nessun campione risulta appartenente ai gruppi A1, A2, A3 (UNI 13242 - UNI 14688 - UNI 13285). Inoltre, dai risultati delle prove di carico su piastra si osserva che per n. 14 prove su n. 18 prove eseguite, il valore del modulo di deformazione M_d , al primo ciclo, determinato con prova di carico su piastra (diametro 30 cm) (CNR 146/92) è inferiore al valore prescritto dal “CAPITOLATO SPECIALE DI APPALTO - Norme Tecniche per l'esecuzione del contratto - Parte 2 - IT.PRL.05.13 - Rev.2.0 Movimenti di terra e Demolizioni”, funzione dell'altezza del rilevato.

Prova di carico	Profondità prova	Classificazione UNI 11531	Esito classificazione	Altezza rilevato	M_d [MPa] 1° ciclo di carico (50 ÷ 150 kPa)	Esito prova di carico
PZ01-1	0,50	A5	×	$h \geq 2$ m	10	×

PROGETTAZIONE ATI:

Prova di carico	Profondità prova	Classificazione UNI 11531	Esito classificazione	Altezza rilevato	M_d [MPa] 1° ciclo di carico (50 ÷ 150 kPa)	Esito prova di carico
PZ02-1	0,50	A5	×	$h \geq 2$ m	24	✓
PZ02-2	1,00	A5	×	$h \geq 2$ m	20	✓
PZ03-1	0,50	A5	×	$h \geq 2$ m	19	✓
PZ03-2	1,00	A5	×	$h \geq 2$ m	15	✓
PZ04-1	0,50	A1-b	✓	$1 \leq h < 2$ m	13	×
PZ04-2	1,00	A1-b	✓	$1 \leq h < 2$ m	4	×
PG01	0,60	A2-4	✓	$h \geq 2$ m	10	×
PZ07-1	0,50	A7-6	×	$h \geq 2$ m	7	×
PZ08-1	0,50	A6	×	-	13	-
PZ09-1	0,50	A7-6	×	-	5	-
PZ10-1	0,50	A7-6	×	$h \geq 2$ m	11	×
PZ11-1	0,50	A7-6	×	$h \geq 2$ m	6	×
PZ12-1	0,50	A7-6	×	$h \geq 2$ m	16	✓
PZ14-1	0,50	A4	×	$h \geq 2$ m	11	×
PZ14-2	1,00	A4	×	$h \geq 2$ m	13	×
PZ16-1	0,50	A6	×	$h \geq 2$ m	12	×
PZ17-1	0,50	A4	×	$h \geq 2$ m	10	×
PZ18-1	0,50	A5	×	$h \leq 1$ m	16	×

6.1.1.2 Stima spessore dello strato di bonifica

In base ai risultati ottenuti dalle prove in sito e in laboratorio sui terreni e campioni eseguite in corrispondenza dei punti di interesse del tracciato stradale si prevede la bonifica del piano di posa dei rilevati con materiale arido granulare. Tali interventi assicurano la presenza di materiale le cui caratteristiche risultano essere idonee per le opere in questione.

Per quanto concerne i rilevati, laddove non siano presenti sondaggi che forniscono informazioni sui valori di portanza e qualità del terreno esistente si procede ad una valutazione della posizione del piano di posa del rilevato. Nel caso di tratti in trincea, quando non sono presenti sondaggi che forniscono informazioni sui valori di portanza e qualità del terreno esistente, si procede ad una valutazione in funzione della profondità dello scavo rispetto al piano campagna.

La stima dello spessore di bonifica è stata eseguita con riferimento al criterio dei due strati di Burmister (1943), basato sull'equilibrio di due solidi elastici di diversa natura sovrapposti:

- Strato 1: spessore finito s , modulo di elasticità E_1 (strato superficiale)
- Strato 2: semi-infinito con modulo elastico E_0 (terreno di sottofondo)

Il metodo correla i risultati in termini di modulo di deformazione di una prova di carico su piastra con le caratteristiche di deformazione dello strato di bonifica e del sottofondo.

Il carico uniforme p esercitato dalla piastra si considera superficiale e distribuito su un'area circolare di raggio a , il cedimento w_0 al centro della piastra considerata rigida da utilizzarsi per la definizione del modulo di deformazione teorica, risulta:

$$w_0 = 1,18 \cdot \frac{p \cdot a}{E_0} \cdot F_2$$

dove F_2 è un coefficiente funzione dei rapporti s/a e E_1/E_0 , calcolato mediante la seguente formula:

$$F_2 = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(0,9 \cdot \frac{s}{a}\right)^2}} \right] \cdot \frac{E_0}{E_1} + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(0,9 \cdot \frac{s}{a} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_0}}\right)^2}}$$

Fissati s , E_1 e E_0 si può stimare il cedimento per un dato carico e quindi si può mettere in relazione il modulo di deformazione M_d con lo spessore e le caratteristiche dello strato di bonifica e del sottofondo, passando attraverso il calcolo del cedimento per un carico pari a $p = 100$ kPa agente su una piastra di raggio $a = 15$ cm.

Per quanto riguarda le caratteristiche del materiale usato per lo strato di bonifica viene ipotizzati valori del modulo elastico pari a $E_1 = 30$ MPa. Per la determinazione del modulo elastico E_0 attribuito al terreno di sottofondo si è fatto riferimento ai risultati delle prove di carico su piastra utilizzando la seguente relazione:

$$E_{PLT} = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot \frac{\pi \cdot b}{4} \cdot (1 - \nu^2) = M_d \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1 - \nu^2)$$

dove si è assunto $\nu = 0.5$.

Tabella 6-1 Verifica spessore strato di bonifica

Pozzetto	Progr. (km)	Vegetale (cm)	Scotico (cm)	Bonifica (cm)	s (cm)	a (cm)	p (kPa)	M _{d,s} (MPa)	E ₀ (MPa)	E ₁ (MPa)	F ₂ (-)	w ₀ (cm)	M _{d,b} (MPa)	M _{d,min} (MPa)	Verifica
PZ01	0+275	10	20	30	50	15	100	10	6	30	0,321	0,10	31	20	1.50
PZ02	2+350	0	20	30	50	15	100	20	12	30	0,503	0,08	39	20	2.00
PZ03	2+675	0	20	30	50	15	100	15	9	30	0,419	0,08	36	20	1.80
PZ04	2+750	0	20	40	60	15	100	4	2	30	0,174	0,13	23	20	1.10
PG01	4+200	60	20	40	60	15	100	10	6	30	0,296	0,09	32	20	1.50
PZ07	8+050	0	20	30	50	15	100	7	4	30	0,267	0,11	27	20	1.30
PZ08	9+225	10	20	30	50	15	100	13	8	30	0,379	0,09	34	20	1.70
PZ09	9+375	0	20	30	50	15	100	5	3	30	0,225	0,13	23	20	1.20
PZ10	9+925	10	20	30	50	15	100	11	6	30	0,341	0,09	32	20	1.60
PZ11	10+150	0	20	30	50	15	100	6	4	30	0,244	0,12	25	20	1.20
PZ12	10+250	10	20	30	50	15	100	16	10	30	0,438	0,08	37	20	1.80
PZ14	11+750	10	20	30	50	15	100	11	7	30	0,345	0,09	32	20	1.60
PZ16	11+850	10	20	30	50	15	100	12	7	30	0,365	0,09	33	20	1.70
PZ17	12+000	10	20	30	50	15	100	10	6	30	0,329	0,10	31	20	1.60
PZ18	12+300	10	20	30	50	15	100	16	9	30	0,434	0,08	37	20	1.80

PROGETTAZIONE ATI:

6.1.1.3 Bonifica del piano di posa viabilità principale

Sulla base dei risultati della verifica sono definiti gli spessori di bonifica per i tratti in rilevato, suddividendo il tracciato in zone. Ogni zona è caratterizzata da uno o più pozzetti, in funzione della densità di prove, maggiormente distribuiti nelle aree in rilevato.

Tabella 6-2 Spessore bonifica viabilità principale (direzione Fano)

Zona	Progressiva iniziale (km)	Progressiva finale (km)	Spessore bonifica (cm)
AP.01	Inizio intervento	0+522	30
AP.03	0+782	0+859	30
AP.05	2+071	2+675	30
AP.05	2+675	4+715	40
AP.07	7+615	8+680	30
AP.09	9+914	10+490	30
AP.11	11+660	Fine intervento	30

Tabella 6-3 Spessore bonifica viabilità principale (direzione Grosseto)

Zona	Progressiva iniziale (km)	Progressiva finale (km)	Spessore bonifica (cm)
AP.02	Inizio intervento	0+505	30
AP.06	2+051	2+675	30
AP.06	2+675	4+740	40
AP.08	7+720	8+708	30
AP.10	9+933	10+510	30
AP.12	11+685	Fine intervento	30

6.1.1.4 Bonifica del piano di posa viabilità secondarie

Le viabilità secondarie sono tutte prossime all'asse principale, tuttavia tenuto conto delle ridotte dimensioni delle strade e delle caratteristiche del traffico che le percorrerà (assenza di veicoli pesanti) si considera uno spessore di bonifica pari a 30 cm oltre allo spessore di scotico pari a 20 cm. Per gli svincoli, invece, si mantengono i valori definiti per la viabilità principale (Tabella 6-2 e Tabella 6-3).

6.1.1.5 Strato anticapillare

Nei casi in cui la falda risulta prossima al piano campagna e nel caso di terreno di natura coesiva fino a 2 m dal p.c., occorre prevedere uno strato anticapillare di spessore compreso tra 30 e 50 cm costituito da materiali granulari aventi funzione di filtro, eventualmente protetto da geotessili con funzione anticontaminante.

Con riferimento ai terreni presenti in sito (argille limose e limi argillosi) e tenuto conto del livello di falda di progetto che caratterizzano il tratto terminale dell'asse stradale si prevede uno strato anticapillare con spessore pari a 30 cm, sia per la viabilità principale che per la viabilità secondaria.

Tabella 6-4 Spessore strato anticapillare viabilità principale (direzione Fano)

Zona	Progressiva iniziale (km)	Progressiva finale (km)	Spessore anticapillare (cm)
AP.07	7+615	8+680	30
AP.09	9+914	10+490	30
AP.11	11+660	Fine intervento	30

Tabella 6-5 Spessore strato anticapillare viabilità principale (direzione Grosseto)

Zona	Progressiva iniziale (km)	Progressiva finale (km)	Spessore anticapillare (cm)
AP.08	7+720	8+708	30
AP.10	9+933	10+510	30
AP12	11+685	Fine intervento	30

6.1.2 Verifiche di stabilità

Ai sensi delle NTC 2018 §6.8.2 e §7.11.4, per i rilevati stradali, si eseguono le verifiche di stabilità dell'insieme manufatto-terreno di fondazione. Le verifiche sono svolte in fase di esercizio sia in condizioni statiche che in condizioni sismiche.

Le sezioni analizzate nelle verifiche risultano essere le più rappresentative, considerando le condizioni più gravose e penalizzanti per l'opera, sia dal punto di vista geometrico sia dal punto di vista geotecnico.

Si precisa che l'oggetto delle verifiche progettuali è il solo sistema geotecnico manufatto-terreno di fondazione, in quanto il corpo del rilevato si assume di per sé stabile se realizzato a regola d'arte, con le pendenze previste, impiegando materiali e metodi di posa in opera prescritti dal "CAPITOLATO SPECIALE DI APPALTO - Norme Tecniche per l'esecuzione del contratto - Parte 2 - IT.PRL.05.13 - Rev.2.0 Movimenti di terra e Demolizioni".

Le verifiche sono state eseguite con il software *Slide2 Modeler* (v. 9.031) della *Rocscience Inc.*

6.1.2.1 Metodi di calcolo

L'esame delle condizioni di stabilità dei rilevati stradali viene condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite.

Nelle analisi sono trascurate le superfici più corticali in quanto poco significative e per le quali non risulta idonea un'analisi convenzionale all'equilibrio limite. In particolare sono stati ricercati i fattori

di sicurezza relativi ai cinematismi che coinvolgono lo strato superficiale di sottofondo, imponendo il passaggio di tali superfici partendo da piano campagna.

Il coefficiente di sicurezza FS a rottura lungo la superficie di scorrimento è definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie e quella effettivamente mobilitata lungo la stessa:

$$FS = \frac{\int_S \tau_{res}}{\int_S \tau_{mob}}$$

In accordo alla normativa vigente per rilevati in materiali sciolti e fronti di scavo, le verifiche di sicurezza SLU sono effettuate secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I [1]. Le verifiche di sicurezza SLV sono condotte ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1,2$.

6.1.2.2 Verifiche di stabilità in aree a rischio esondazione

Quando tratte del tracciato stradale ricadono in aree a rischio esondazione con piena avente periodo di ritorno pari a 200 anni, evidenziate dalle planimetrie idrauliche, è necessario che siano sottoposte a verifiche di stabilità con falda a piano campagna (la quota di falda da esondazione superiore al piano campagna stabilizzerebbe il rilevato).

6.1.2.3 Caratteristiche meccaniche

Premesso che per il terreno di fondazione del rilevato si fa riferimento al modello geotecnico di sottosuolo di progetto, per le caratteristiche meccaniche dei materiali che costituiscono il rilevato stesso sono adottati i seguenti parametri:

Peso di volume	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
Angolo di resistenza al taglio	$\varphi' = 35^\circ$
Coesione efficace	$c' = 0 \text{ kPa}$

6.1.2.4 Azioni

Il sovraccarico stradale in condizioni statiche è assunto come un carico uniformemente distribuito di intensità pari a 20 kPa applicato a tutta la piattaforma stradale. In condizioni sismiche, per il sovraccarico, in via cautelativa si assume un coefficiente $\psi_{2j} = 0,2$. In particolare, risulta:

Condizioni statiche	$q_d = \gamma_{Qi} \times q_k = 1,3 \times 20 = 26 \text{ kPa}$
Condizioni sismiche	$q_d = \Psi_{21} \times q_k = 0,2 \times 20 = 4 \text{ kPa}$

Il comportamento in condizioni sismiche dei fronti di scavo e dei rilevati è analizzato mediante metodi pseudostatici (§7.11.4 [1]). L'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W del volume di terreno potenzialmente instabile. Le componenti orizzontale e verticale della forza statica equivalente possono esprimersi come $F_h = k_h \cdot W$ e $F_v = k_v \cdot W$, con k_h e k_v rispettivamente pari a:

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$$

dove k_h e k_v sono i coefficienti sismici in direzione orizzontale e verticale, β_s coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

In assenza di analisi specifiche della risposta sismica locale, l'accelerazione massima attesa al sito può essere valutata con la relazione

$$a_{max} = S \cdot a_g = (S_S \cdot S_T) \cdot a_g$$

dove S è un coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica S_S e dell'amplificazione topografica S_T , a_g è l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

In accordo con la normativa, si adotta la combinazione fondamentale, in cui il peso del rilevato viene moltiplicato per 1,0 e i carichi variabili per 1,3.

6.1.2.5 Analisi di stabilità del manufatto-terreno di fondazione

Di seguito si riportano le verifiche di stabilità del rilevato stradale considerando le superfici di rottura che interessano il corpo del rilevato e il terreno di fondazione.

Il modello di calcolo utilizzato tiene conto dei coefficienti parziali sulle azioni γ_E , sui parametri geotecnici γ_M e sulle resistenze di progetto γ_R (cfr. §6.1.2.1), di conseguenza la verifica di sicurezza si può ritenere soddisfatta per ogni valore del fattore di sicurezza maggiore dell'unità. Per maggiori dettagli sui coefficienti parziali di sicurezza utilizzati si rimanda ai rapporti di calcolo allegati al presente documento.

Sezione trasversale di calcolo R1 (progressiva km 4+125)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

Strato	Terreno	Spessore (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	Sabbia limosa	10,0	20,0	0	36
2	Limo argilloso	10,0	19,0	5	26
3	Ghiaia	10,0	20,0	0	40

Nel modello di calcolo l'altezza del rilevato è pari a 8 m e la falda è posta a 2,5 m dal piano di posa del rilevato.

Per la valutazione dei coefficienti k_h e k_v si sono considerati i seguenti parametri.

PARAMETRI SISMICI

Latitudine: 43.4948° (N) Longitudine: 12.0953° (E)

Vita nominale $V_N = 50$ anni

Classe d'uso II ($C_U = 2$)

Periodo di riferimento $V_R = 100$ anni

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

	Probabilità di superamento (%)	T_R (anni)	a_g (g)	F_0 (-)	T_C^* (s)
SLV	10	949	0,264	2,414	0,307

COEFFICIENTI SISMICI - FRONTI DI SCAVO E RILEVATI

	S_s (-)	C_c (-)	S_T (-)	a_{max} (m/s ²)	β_s (s)	k_h (-)	k_v (-)
SLV	1,320	1,550	1,000	3,422	0,380	0,133	0,066

PROGETTAZIONE ATI:

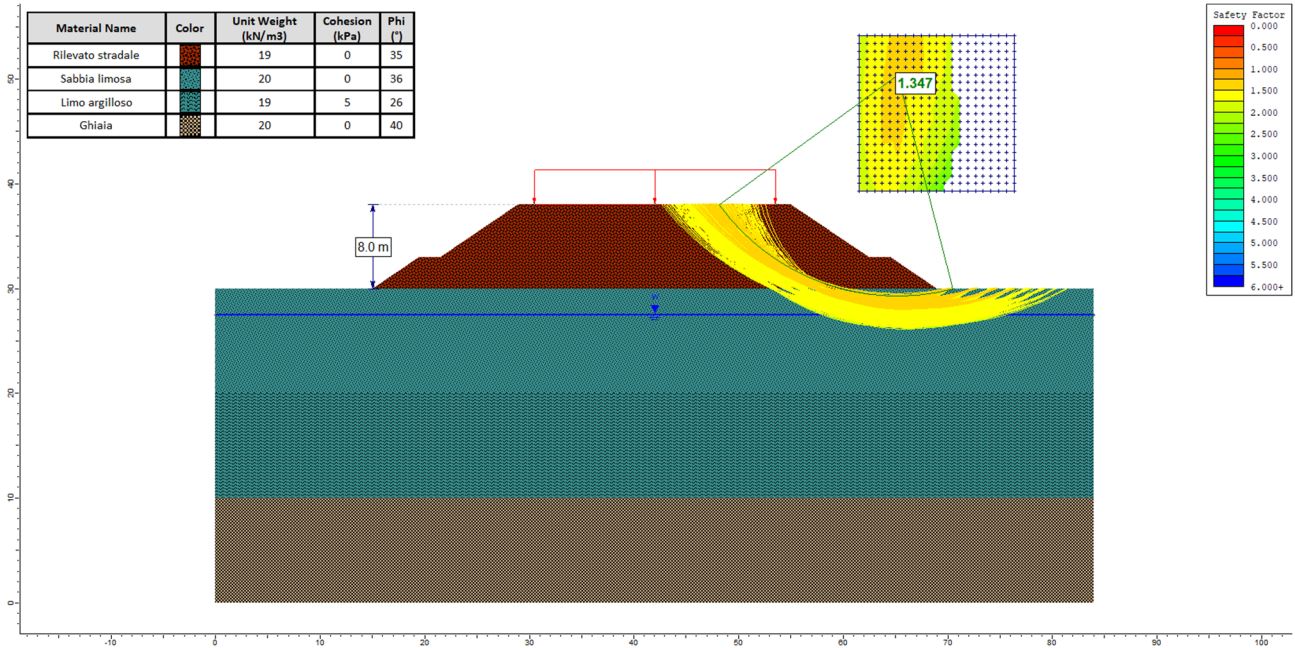


Figura 6.2 Sezione trasversale R1. Verifica di stabilità in condizioni statiche (FS = 1,347)

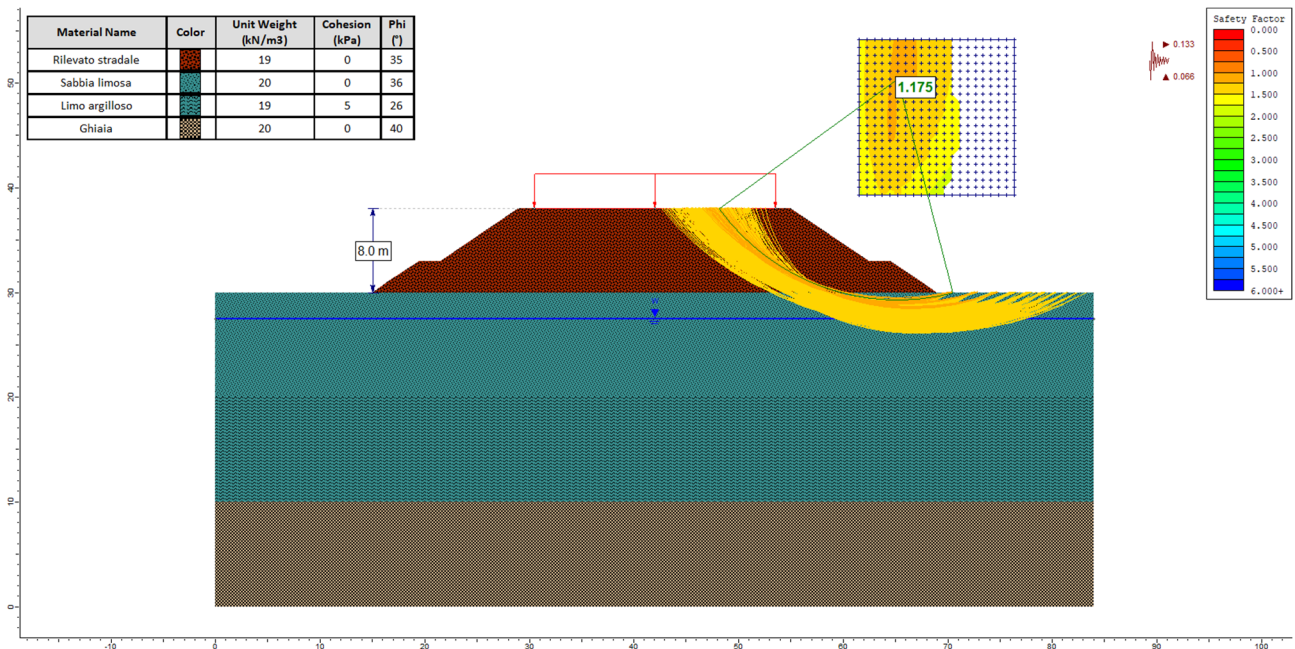


Figura 6.3 Sezione trasversale R1. Verifica di stabilità in condizioni sismiche (FS = 1,175)

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione trasversale di calcolo R2 (progressiva km 8+100)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

Strato	Terreno	Spessore (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
1	Limo argilloso	5,00	19,0	5	26
2	Argilla limosa	25,0	20,0	20	26

Nel modello di calcolo l'altezza del rilevato è pari a 10 m e la falda è posta a 2 m dal piano di posa del rilevato.

Per la valutazione dei coefficienti k_h e k_v si sono considerati i seguenti parametri.

PARAMETRI SISMICI

Latitudine: 43.5021° (N) Longitudine: 12.1439° (E)

Vita nominale $V_N = 50$ anni

Classe d'uso II ($C_U = 2$)

Periodo di riferimento $V_R = 100$ anni

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

	Probabilità di superamento (%)	T_R (anni)	a_g (g)	F_o (-)	T_c^* (s)
SLV	10	949	0,279	2,411	0,309

COEFFICIENTI SISMICI - FRONTI DI SCAVO E RILEVATI

	S_s (-)	C_c (-)	S_T (-)	a_{max} (m/s ²)	β_s (s)	k_h (-)	k_v (-)
SLV	1,300	1,550	1,000	3,558	0,380	0,138	0,069

PROGETTAZIONE ATI:

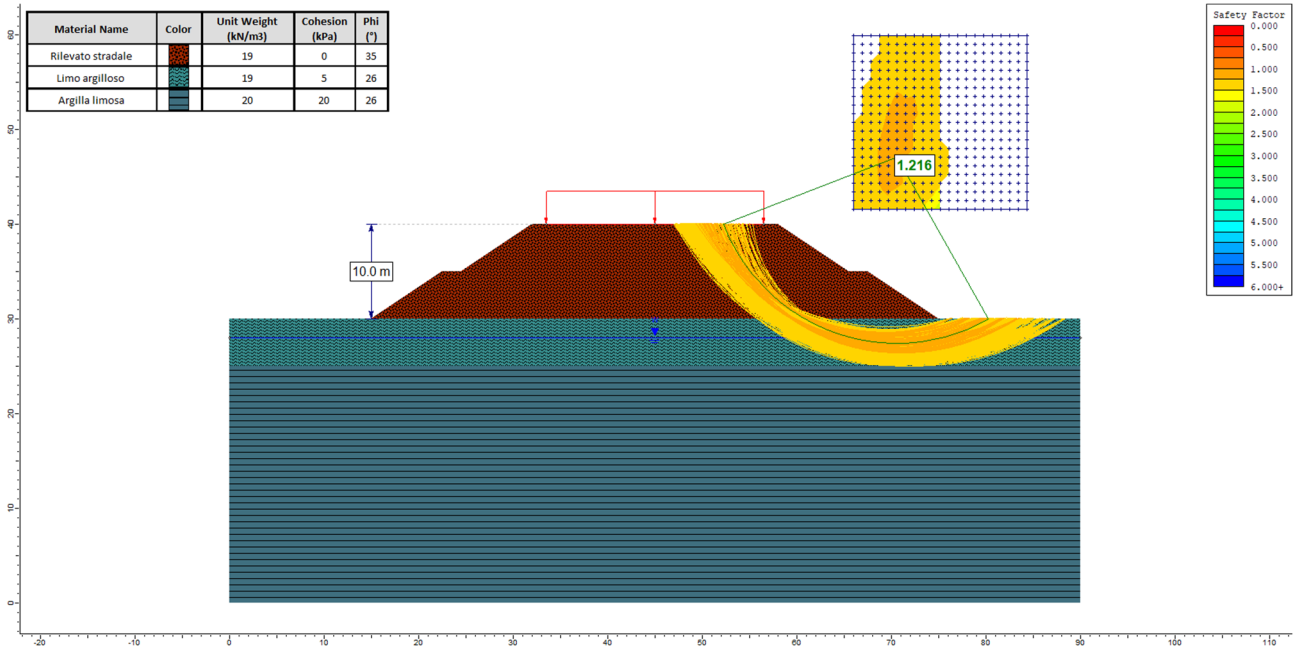


Figura 6.4 Sezione trasversale R2. Verifica di stabilità in condizioni statiche (FS = 1,216)

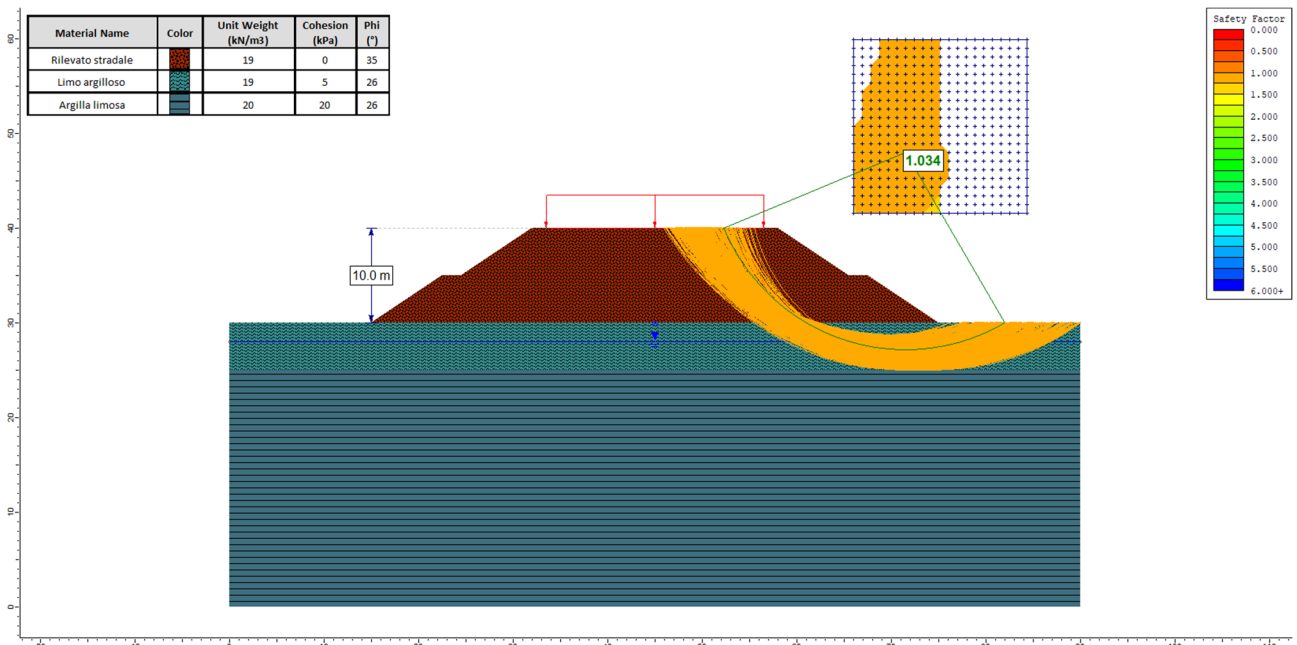


Figura 6.5 Sezione trasversale R2. Verifica di stabilità in condizioni sismiche (FS = 1,034)

PROGETTAZIONE ATI:

Sezione trasversale di calcolo R3 (progressiva km 10+150)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

Strato	Terreno	Spessore (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	Limo argilloso	5,00	19,0	5	26
2	Ghiaia sabbiosa	25,0	19,0	0	36

Nel modello di calcolo l'altezza del rilevato è pari a 9 m. La sezione trasversale in esame ricade all'interno di un'area a rischio esondazione (con piena avente periodo di ritorno pari a 200 anni). Con riferimento al §6.1.2.2, l'analisi di stabilità in condizioni statiche si esegue con falda posta in corrispondenza del piano campagna.

Per la valutazione dei coefficienti k_h e k_v si sono considerati i seguenti parametri.

PARAMETRI SISMICI

Latitudine: 43.5072° (N) Longitudine: 12.1605° (E)

Vita nominale $V_N = 50$ anni

Classe d'uso II ($C_U = 2$)

Periodo di riferimento $V_R = 100$ anni

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

	Probabilità di superamento (%)	T_R (anni)	a_g (g)	F_o (-)	T_c^* (s)
SLV	10	949	0,281	2,410	0,309

COEFFICIENTI SISMICI - FRONTI DI SCAVO E RILEVATI

	S_s (-)	C_c (-)	S_T (-)	a_{max} (m/s ²)	β_s (s)	k_h (-)	k_v (-)
SLV	1,290	1,550	1,000	3,555	0,380	0,138	0,069

PROGETTAZIONE ATI:

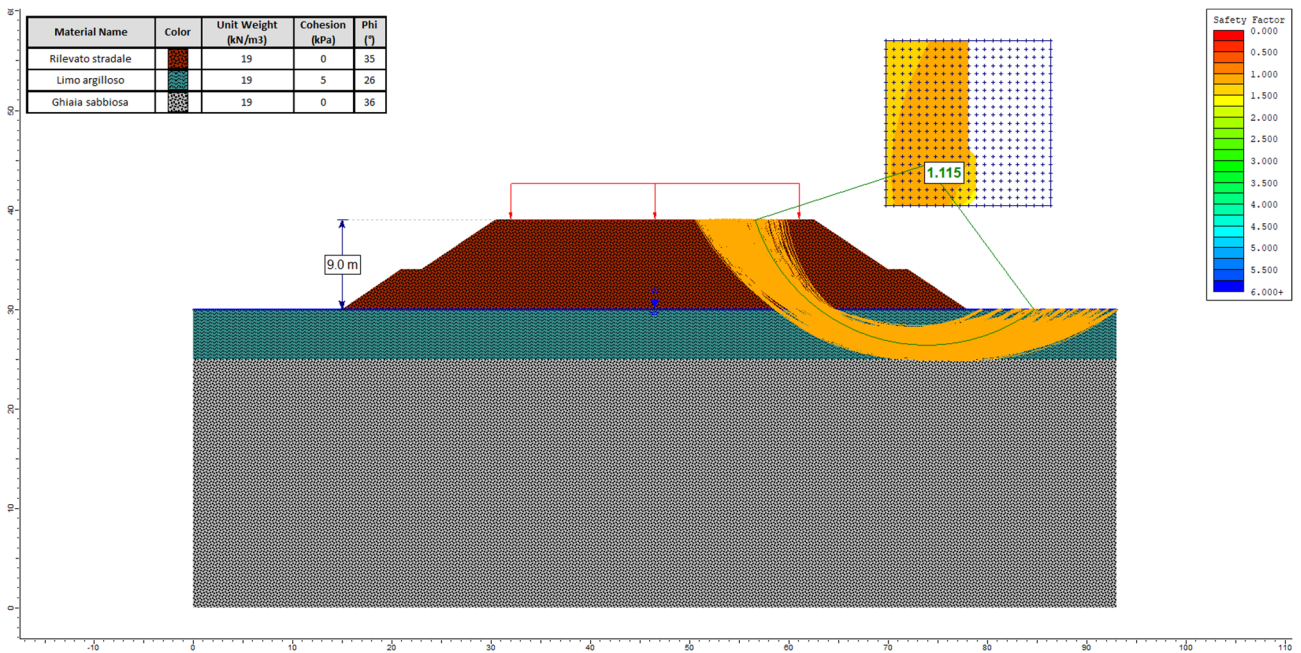


Figura 6.6 Sezione trasversale R3. Verifica di stabilità in condizioni statiche (FS = 1,115)

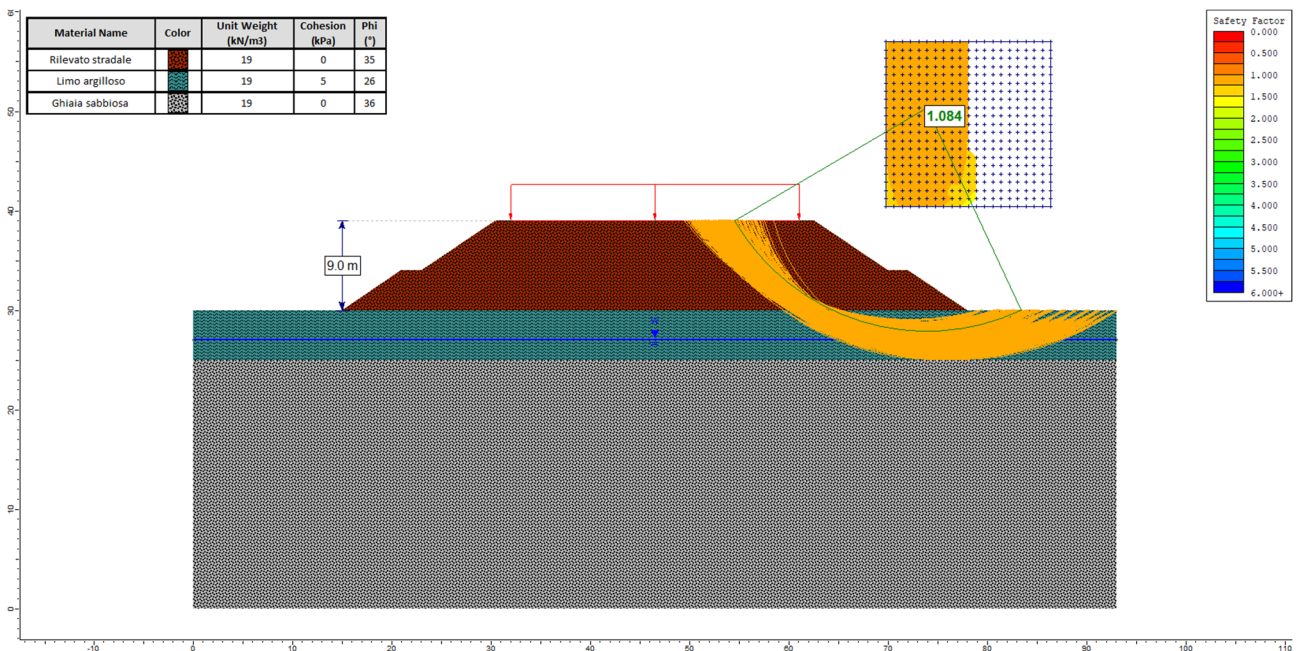


Figura 6.7 Sezione trasversale R3. Verifica di stabilità in condizioni sismiche (FS = 1,084)

PROGETTAZIONE ATI:

6.1.3 Cedimenti

Ai sensi delle NTC 2018 §6.8.3, per i rilevati stradali, si eseguono le verifiche degli spostamenti dell'insieme manufatto-terreno di fondazione.

Le sezioni analizzate nelle verifiche risultano essere le più rappresentative, considerando le condizioni più gravose e penalizzanti per l'opera, sia da un punto di vista geometrico sia da un punto di vista geotecnico.

6.1.3.1 Metodi di calcolo

Di seguito sono esposti i metodi di calcolo adottati per la valutazione dei cedimenti totali, immediati e di consolidazione primaria. Sia per i terreni coesivi che per i terreni incoerenti, la stima dei cedimenti è stata eseguita attraverso l'utilizzo della teoria dell'elasticità.

Cedimento con metodo elastico (terreni incoerenti)

Il cedimento che sviluppa all'interno di terreni incoerenti è stato determinato ricorrendo alla teoria dell'elasticità ed alla seguente espressione:

$$\delta_{tot} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_{zi} - \nu(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})}{E'_i} \Delta z_i$$

dove

- δ_{tot} cedimento totale [L];
- n numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile;
- $\Delta\sigma_{zi}, \Delta\sigma_{xi}, \Delta\sigma_{yi}$ tensioni indotte dal carico [F/L];
- Δz_i altezza dello strato i-esimo [L];
- E'_i modulo di deformazione elastico drenato dello strato i-esimo [F/L];
- ν modulo di Poisson.

Il comportamento dei terreni a grana grossa (sabbie e ghiaie) risulta macroscopicamente diverso da quello dei terreni a grana fine (limi e argille), in virtù della marcata differenza esistente tra i valori del coefficiente di permeabilità. Avendo infatti elevata permeabilità essi si comportano come un sistema aperto con libero flusso dell'acqua e l'eventuale sovrappressione dell'acqua interstiziale, generata da una qualunque causa che ne disturbi l'equilibrio originario, si dissipa in tempi estremamente brevi. Ne consegue che, ai fini pratici, si può trascurare il moto di filtrazione transitorio e fare riferimento direttamente alle condizioni di equilibrio finale. Il decorso del cedimento nel tempo può essere pertanto considerato rapido, praticamente contemporaneo alla costruzione dell'opera.

Cedimento con metodo elastico (terreni coesivi)

L'analisi relativa ai cedimenti viene sviluppata con riferimento alla determinazione dei cedimenti totali, immediati e di consolidazione primaria.

Cedimento immediato

Con riferimento alla teoria dell'elasticità il cedimento immediato in argille viene stimato con la seguente espressione:

$$\delta_0 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_{zi} - \nu(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})}{E'_{ui}} \Delta z_i$$

dove

- δ_0 cedimento totale [L];
- n numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile;
- $\Delta\sigma_{zi}, \Delta\sigma_{xi}, \Delta\sigma_{yi}$ tensioni indotte dal carico [F/L];
- Δz_i altezza dello strato i-esimo [L];
- E'_{ui} modulo di deformazione elastico non drenato dello strato i-esimo [F/L];
- ν modulo di Poisson assunto pari a 0,5.

Cedimento totale (immediato e di consolidazione primaria)

Il cedimento immediato e di consolidazione primaria nei terreni coesivi viene stimato con la seguente espressione (in analogia a quanto già indicato per i depositi incoerenti):

$$\delta_{tot} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_{zi} - \nu(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})}{E'_i} \Delta z_i$$

dove

- δ_{tot} cedimento totale [L];
- n numero di strati in cui è suddivisa la zona compressibile;
- $\Delta\sigma_{zi}, \Delta\sigma_{xi}, \Delta\sigma_{yi}$ tensioni indotte dal carico [F/L];
- Δz_i altezza dello strato i-esimo [L];
- E'_i modulo di deformazione elastico drenato dello strato i-esimo [F/L];
- ν modulo di Poisson.

Per definizione il cedimento di consolidazione primaria δ_c è dato dalla differenza tra δ_{tot} e δ_0 .

Determinazione teorica dell'andamento nel tempo dei cedimenti

Cedimento di consolidazione primaria

L'analisi del processo di consolidazione consiste nella previsione del decorso nel tempo della dissipazione della sovrappressione interstiziale e quindi del cedimento.

Si tratta di un problema molto complesso del quale esistono in letteratura delle soluzioni relative a schemi semplificati che possono comunque fornire indicazioni per i problemi pratici.

La prima soluzione al problema monodimensionale è stata ottenuta da Terzaghi (1923) tenendo conto delle seguenti ipotesi:

- terreno omogeneo e completamente saturo, con legge sforzi-deformazione di tipo lineare;
- parametri di compressibilità e di permeabilità costanti durante il processo di consolidazione;
- incompressibilità dell'acqua e dello scheletro solido del terreno;
- deformazioni piccole e comportamento del terreno non viscoso;
- carico supposto applicato istantaneamente;
- validità della legge di Darcy.

L'equazione differenziale che regola il fenomeno in regime transitorio risulta:

$$c_v \cdot \frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{du}{dt}$$

dove

- c_v coefficiente di consolidazione verticale [L^2/T];
- $u(z,t)$ sovrappressione interstiziale [F/L];
- z dimensione verticale [L];
- t tempo [T].

La soluzione dell'equazione dipende dalle condizioni iniziali:

- distribuzione delle sovrappressioni interstiziali all'atto dell'applicazione del carico;
- condizioni di drenaggio al contorno.

La soluzione è generalmente espressa in termini del parametro adimensionale "grado di consolidazione" U_v definito dal rapporto fra la sovrappressione dissipata e quella iniziale:

$$U_v(z, t) = \frac{u_0 - u(z, t)}{u_0} = 1 - \frac{u(z, t)}{u_0} = \frac{\delta_c(t)}{\delta_c}$$

dove

- u_0 sovrappressione iniziale [F/L];

PROGETTAZIONE ATI:

- $u(z,t)$ sovrappressione interstiziale [F/L];
- $\delta_c(t)$ cedimento (per consolidazione) nel generico istante t [L];
- $\bar{\delta}_c$ cedimento al termine del processo [L].

Una funzione che approssima la soluzione dell'equazione differenziale è stata proposta da Sivaram e Swamee (1977):

$$U_m = \frac{\left(4 \cdot \frac{T_V}{\pi}\right)^{0,5}}{\left[1 + \left(\frac{4 \cdot T_V}{\pi}\right)^{2,8}\right]^{0,179}}, T_V = \frac{c_v \cdot t}{H^2}$$

dove

- U_m grado di consolidazione medio;
- T_V fattore tempo;
- c_v coefficiente di consolidazione verticale [L^2/T];
- t istante di tempo generico [T];
- H massimo percorso di drenaggio [L].

Determinazione delle pressioni nel sottosuolo

Facendo ricorso alla teoria del semispazio elastico omogeneo ed isotropo, è possibile definire in ogni punto del sottosuolo e per il previsto schema di carico e con valore costante sull'impronta della fondazione, i valori delle corrispondenti tensioni indotte.

Il corpo di carico del rilevato viene ad essere suddiviso in corpi di carico riconducibili a quelli di Figura 6.8, che consentono di determinare le tensioni indotte in forma analitica chiusa.

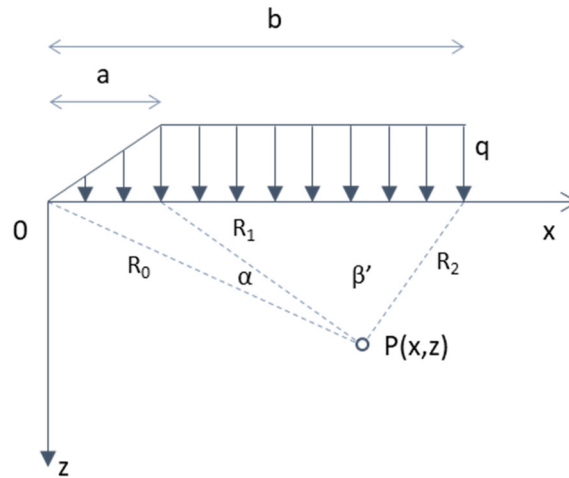


Figura 6.8 Schema di carico trapezoidale

Con tale schema di carico le espressioni delle tensioni indotte, dal singolo corpo di carico, sono:

$$\Delta\sigma_z = \frac{p}{\pi} \left[\beta + \frac{x\alpha}{a} - \frac{z}{R_2^2} (x - b) \right]$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{p}{\pi} \left[\beta + \frac{x\alpha}{a} + \frac{z}{R_2^2} (x - b) + \frac{2z}{a} \log \frac{R_1}{R_0} \right]$$

$$\Delta\sigma_y = \nu(\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_z)$$

6.1.3.2 Analisi dei cedimenti del manufatto-terreno di fondazione

Per completare lo studio dei rilevati, dopo aver analizzato la stabilità globale del complesso manufatto-terreno, attraverso i metodi dell'equilibrio limite, si procederà ad analizzarne il comportamento sotto i carichi di esercizio e quindi verificare la sua funzionalità attraverso l'analisi dei cedimenti.

Di seguito si riportano le verifiche dei cedimenti del rilevato stradale considerando il corpo di carico di forma trapezoidale.

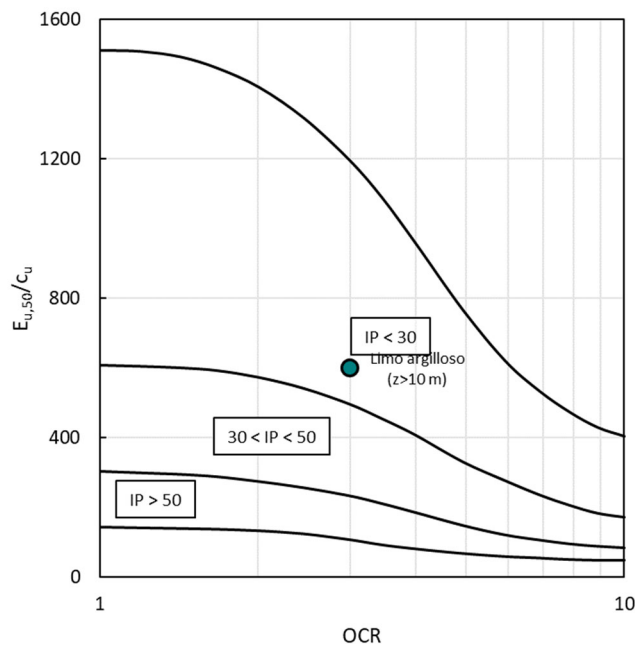
Sezione trasversale di calcolo R1 (progressiva km 4+125)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

Strato	Terreno	Spessore (m)	γ (kN/m ³)	φ' (°)	E (MPa)	E_u (MPa)	ν (-)
1	Sabbia limosa	10,0	20,0	36	20	-	0,30
2	Limo argilloso	10,0	19,0	26	40	60	0,30
3	Ghiaia	10,0	20,0	40	90	-	0,25

Nel modello di calcolo l'altezza del rilevato è pari a 8 m e la falda è posta a 2,5 m dal piano di posa del rilevato.

Per la valutazione del modulo elastico non drenato E_u è stata utilizzata la relazione proposta da Duncan e Buchignani (1987). Per lo strato di limo argilloso a profondità maggiori di 10 m dal piano campagna è stato considerato un indice di plasticità $IP = 25$, un grado di sovraconsolidazione $OCR = 3$ e una coesione non drenata $c_u = 100$ kPa., da cui $E_u = 60$ MPa.



PROGETTAZIONE ATI:

Nella Tabella 6-6 sono riportati i risultati delle analisi in termini di cedimenti totali, immediati, di consolidazione e il cedimento residuo dopo un anno, in corrispondenza della mezzeria del corpo di carico.

Tabella 6-6 Risultati delle analisi dei cedimenti

Strato	Spessore (m)	H (m)	δ_{tot} (cm)	δ_0 (cm)	δ_c (cm)	U_m (1 anno - %)	δ_r (cm)
1	10,0	-	4,82	4,82	-	-	-
2	10,0	5,0	2,61	1,12	1,49	22,5	1,16
3	10,0	-	1,07	1,07	-	-	-
TOTALE	30,0		8,50	7,01	1,49		1,16

Il coefficiente di consolidazione c_v per lo strati di limo argilloso è stato posto pari a $3,19 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, valore ottenuto dalla prova edometrica eseguita sul campione BH10-Sh2 corrispondente a un intervallo tensionale compreso tra 200 e 400 kPa.

Nella Figura 6.9 è riportato l'andamento del cedimento di consolidazione nel tempo all'interno dello strato limoso argilloso in corrispondenza della mezzeria del corpo di carico.

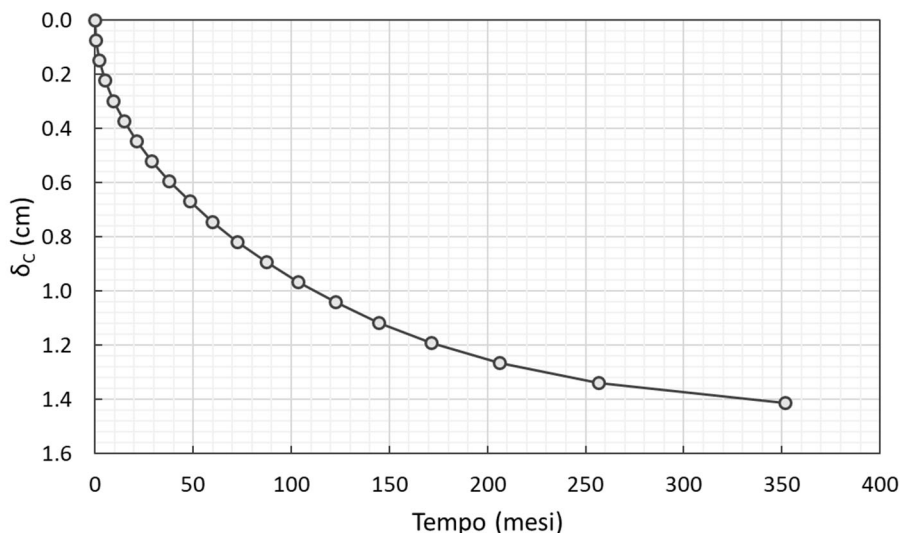


Figura 6.9 Andamento nel tempo del cedimento di consolidazione (UG1b)

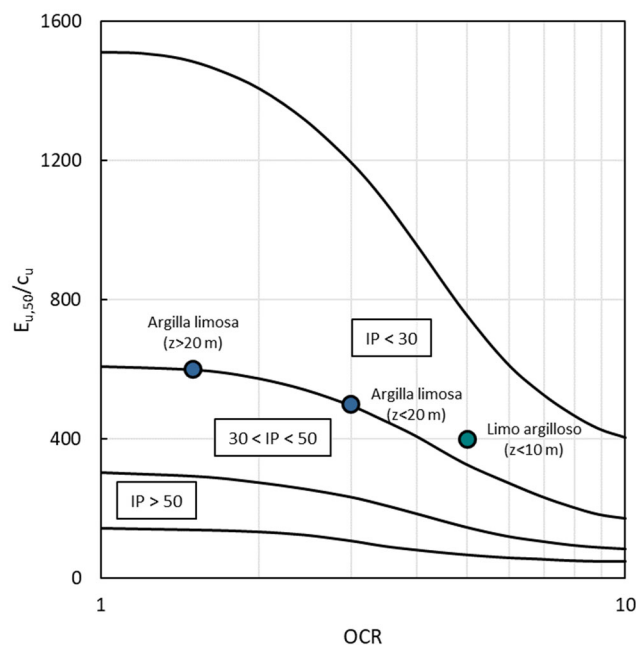
Sezione trasversale di calcolo R2 (progressiva km 8+100)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

Strato	Terreno	Spessore (m)	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	E (MPa)	E_u (MPa)	ν (-)
1	Limo argilloso	5,00	19,0	26	25	40	0,30
2	Argilla limosa	15,0	20,0	26	40	50	0,30
3	Argilla limosa	10,0	20,0	26	50	90	0,30

Nel modello di calcolo l'altezza del rilevato è pari a 10 m e la falda è posta a 2,5 m dal piano di posa del rilevato.

Per la valutazione del modulo elastico non drenato E_u è stata utilizzata la relazione proposta da Duncan e Buchignani (1987). Per lo strato di limo argilloso a profondità minori di 10 m dal piano campagna è stato considerato un indice di plasticità $IP = 25$, un grado di sovraconsolidazione $OCR = 5$ e una coesione non drenata $c_u = 100$ kPa, da cui $E_u = 40$ MPa. Per lo strato di argilla limosa a profondità minori di 20 m dal piano campagna è stato considerato un indice di plasticità $IP = 30$, un grado di sovraconsolidazione $OCR = 3$ e una coesione non drenata $c_u = 100$ kPa, da cui $E_u = 50$ MPa. Per lo strato di argilla limosa a profondità maggiori di 20 m dal piano campagna è stato considerato un indice di plasticità $IP = 30$, un grado di sovraconsolidazione $OCR = 1,5$ e una coesione non drenata $c_u = 150$ kPa, da cui $E_u = 90$ MPa.



PROGETTAZIONE ATI:

Nella Tabella 6-7 sono riportati i risultati delle analisi in termini di cedimenti totali, immediati, di consolidazione e il cedimento residuo dopo un anno, in corrispondenza della mezzeria del corpo di carico.

Tabella 6-7 Risultati delle analisi dei cedimenti

Strato	Spessore (m)	H (m)	δ_{tot} (cm)	δ_0 (cm)	δ_c (cm)	U_m (1 anno - %)	δ_r (cm)
1	5,00	5,00	2,22	0,31	1,91	17,8	1,57
2	25,0	25,0	7,23	3,26	3,97	2,80	3,86
TOTALE	30,0		9,45	3,57	5,88		5,43

Il coefficiente di consolidazione c_v per lo strato di limo argilloso è stato posto pari a $2,00 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, valore ottenuto dalla prova edometrica eseguita sul campione BH20-Sh1 corrispondente a un intervallo tensionale compreso tra 200 e 400 kPa.

Nella Figura 6.10 è riportato l'andamento del cedimento di consolidazione nel tempo all'interno dello strato di limo argilloso in corrispondenza della mezzeria del corpo di carico.

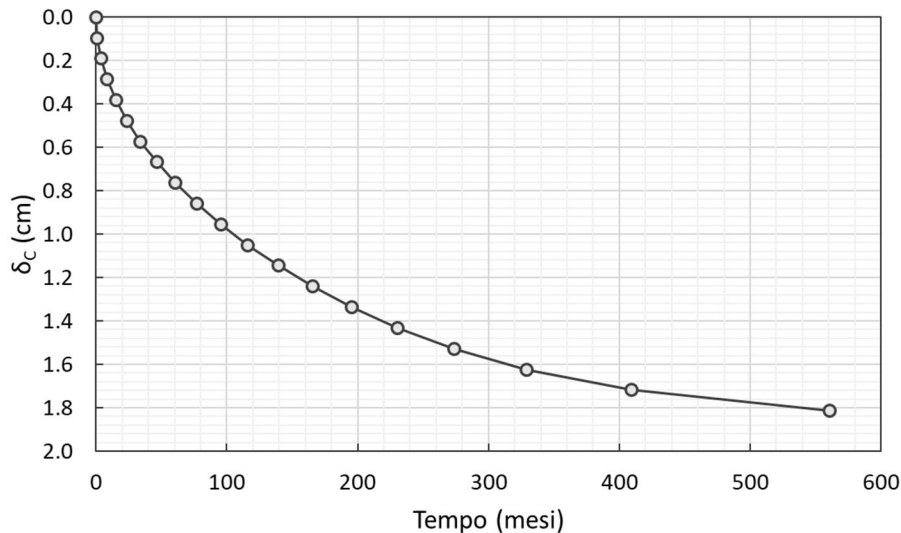


Figura 6.10 Andamento nel tempo del cedimento di consolidazione (UG1b)

Il coefficiente di consolidazione c_v per lo strato di argilla limosa è stato posto pari a $2,00 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, pari alla media dei valori ottenuti dalle prove edometriche eseguita sui campione BH20-Sh2, BH21-Sh2 e BH21-Sh3 corrispondente a un intervallo tensionale compreso tra 200 e 400 kPa.

Nella Figura 6.11 è riportato l'andamento del cedimento di consolidazione nel tempo all'interno dello strato di argilla limosa in corrispondenza della mezzeria del corpo di carico.

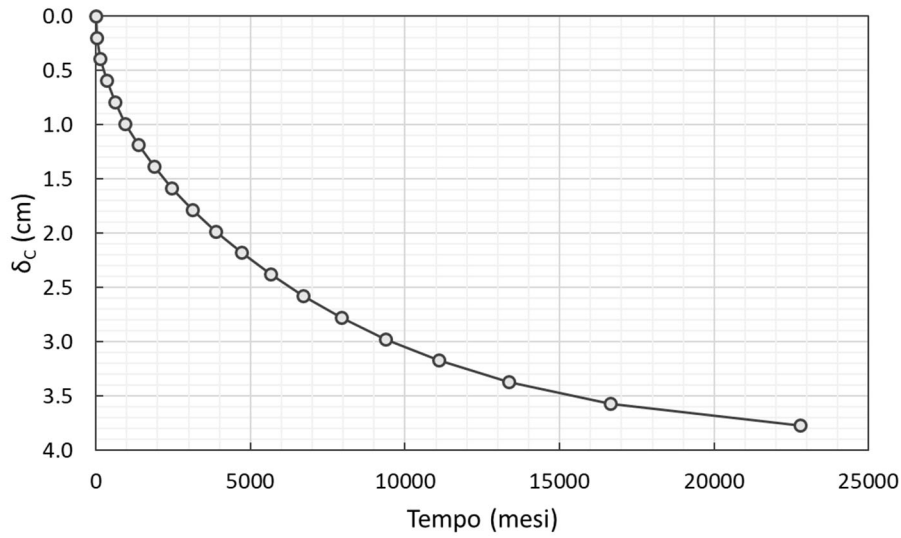


Figura 6.11 Andamento nel tempo del cedimento di consolidazione (UG9)

7 SCAVI PROVVISORIALI

Nei successivi paragrafi sono riportate le analisi effettuate per la valutazione della stabilità degli scavi provvisoriali per la realizzazione delle singole opere.

Gli scavi provvisoriali possono essere realizzati con scarpate di pendenza 1/1 (verticale/orizzontale).

Le verifiche sono eseguite con riferimento ad un'altezza massima 5 m per le unità geotecniche UG1a e UG1b principalmente interessate dagli scavi.

7.1.1 Verifiche di stabilità

Ai sensi delle NTC 2018 §6.8.2, per i fronti di scavo, si eseguono le verifiche di stabilità dell'insieme manufatto-terreno di fondazione e per il quale si omettono le verifiche in condizioni sismiche, in considerazione della permanenza dello scavo inferiore a 2 anni (§ 2.4.1 [1]).

Le verifiche sono state eseguite con il software *Slide2 Modeler* (v. 9.031) della *Rocscience Inc.*

7.1.1.1 Metodi di calcolo

L'esame delle condizioni di stabilità dei fronti di scavo viene condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite.

Nelle analisi sono trascurate le superfici più corticali in quanto poco significative e per le quali non risulta idonea un'analisi convenzionale all'equilibrio limite. In particolare sono stati ricercati i fattori di sicurezza relativi ai cinematismi che coinvolgono lo strato superficiale di sottofondo, imponendo il passaggio di tali superfici partendo da piano campagna.

Il coefficiente di sicurezza *FS* a rottura lungo la superficie di scorrimento è definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie e quella effettivamente mobilitata lungo la stessa:

$$FS = \frac{\int_S \tau_{res}}{\int_S \tau_{mob}}$$

In accordo alla normativa vigente per i fronti di scavo, le verifiche di sicurezza SLU sono effettuate secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I [1].

7.1.1.2 Analisi di stabilità del manufatto-terreno di fondazione

Di seguito si riportano le verifiche di stabilità dei fronti di scavo considerando le superfici di rottura che interessano l'intero fronte di scavo.

Il modello di calcolo utilizzato tiene conto dei coefficienti parziali sulle azioni γ_E , sui parametri geotecnici γ_M e sulle resistenze di progetto γ_R (cfr. §6.1.2.1), di conseguenza la verifica di sicurezza si può ritenere soddisfatta per ogni valore del fattore di sicurezza maggiore dell'unità. Per maggiori dettagli sui coefficienti parziali di sicurezza utilizzati si rimanda ai rapporti di calcolo allegati al presente documento.

Scavo provvisorio in sabbia limosa (UG1a)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL TERRENO

Strato	Terreno	Altezza (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	Sabbia limosa	5,00	20,0	0	36

Nel modello di calcolo l'altezza del fronte di scavo è pari a 5 m e la falda è posta a 3 m dal piano campagna.

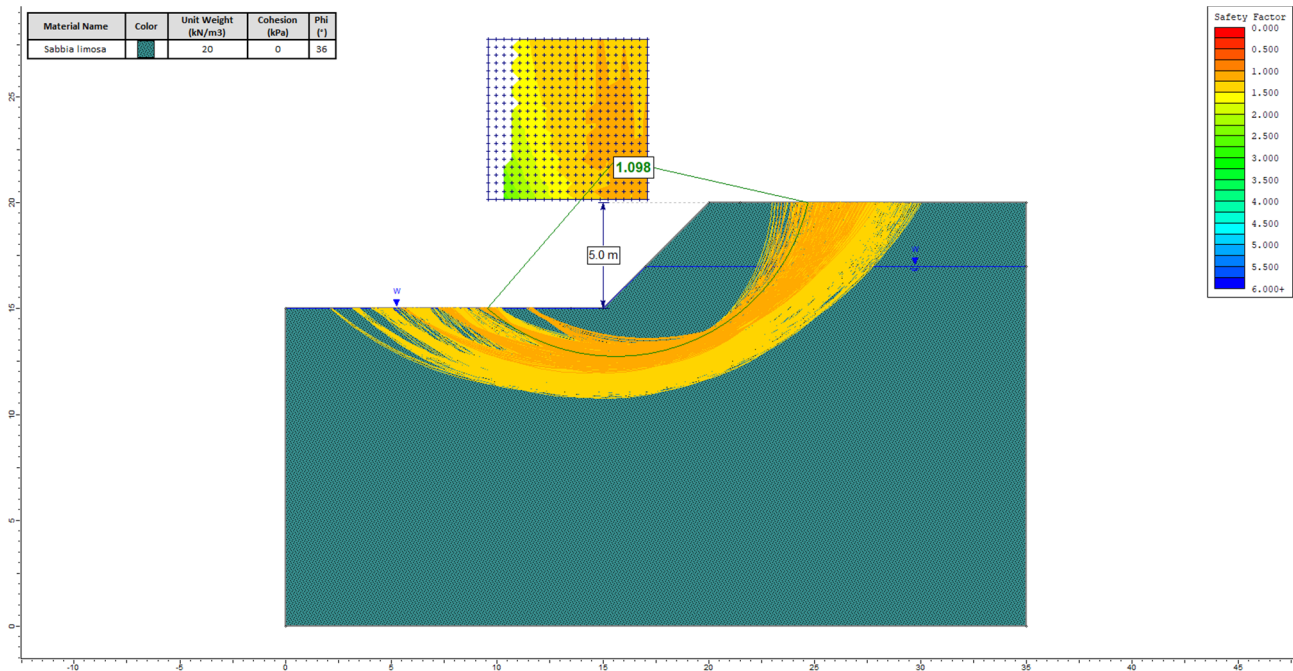


Figura 7.1 Scavo provvisorio in sabbia limosa (FS = 1,098)

Scavo provvisorio in limo argilloso (UG1b)

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEL TERRENO

Strato	Terreno	Altezza (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	Sabbia limosa	5,00	20,0	5	26

Nel modello di calcolo l'altezza del fronte di scavo è pari a 5 m e la falda è posta a 4 m dal piano campagna.

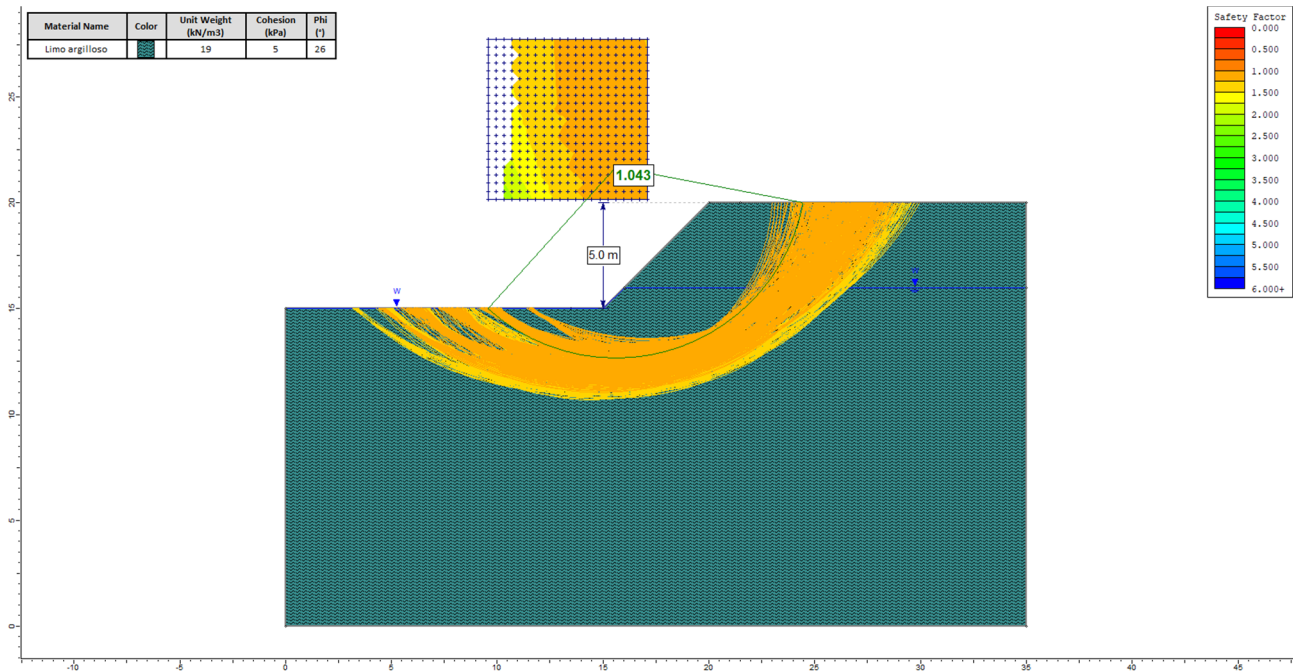


Figura 7.2 Scavo provvisorio in limo argilloso (FS = 1,043)

PROGETTAZIONE ATI:

8 STABILITÀ NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

In condizioni sismiche, il termine “liquefazione” comprende una serie di fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate. Tali fenomeni sono legati allo sviluppo di sovrappressioni interstiziali che, se positive, causano una riduzione della tensione media efficace presente nel terreno e, quindi, una riduzione della resistenza a taglio. La riduzione della resistenza può rappresentare solo una condizione temporanea, seguita da un successivo recupero, o può indurre nel terreno una condizione di collasso generalizzata e definitiva.

L'avvenuta liquefazione si manifesta, in condizioni di *free-field* (cioè di assenza di manufatti sulla superficie del deposito), attraverso la formazione di vulcanelli di sabbia, rotture o spostamenti laterali del terreno, ovvero in presenza di manufatti, attraverso la perdita di capacità portante e/o lo sviluppo di elevati cedimenti e rotazioni.

Durante l'evento sismico, se la superficie del piano campagna è orizzontale questo può subire oscillazioni di grande ampiezza. Al termine della sollecitazione, la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali e il conseguente riassetto dei grani possono dar luogo a fenomeni di subsidenza. Nei pendii, per la presenza di strati liquefacibili, può manifestarsi durante il sisma uno spostamento permanente cumulato o un flusso di terreno che può proseguire anche dopo il terremoto fino al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio.

8.1 MOTIVI DI ESCLUSIONE DALLA VERIFICA A LIQUEFAZIONE

Sulla base di un'analisi preliminare della sismicità del sito e delle caratteristiche geotecniche del deposito, si può ritenere che la probabilità che si verifichi la liquefazione sia estremamente bassa o nulla nel caso in cui si manifesti almeno una delle seguenti circostanze (§7.11.3.4.2 [1]):

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di $0,1g$;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (*Standard Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (*Cone Penetration Test*) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 8.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_C < 3,5$ e in Figura 8.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_C > 3,5$.

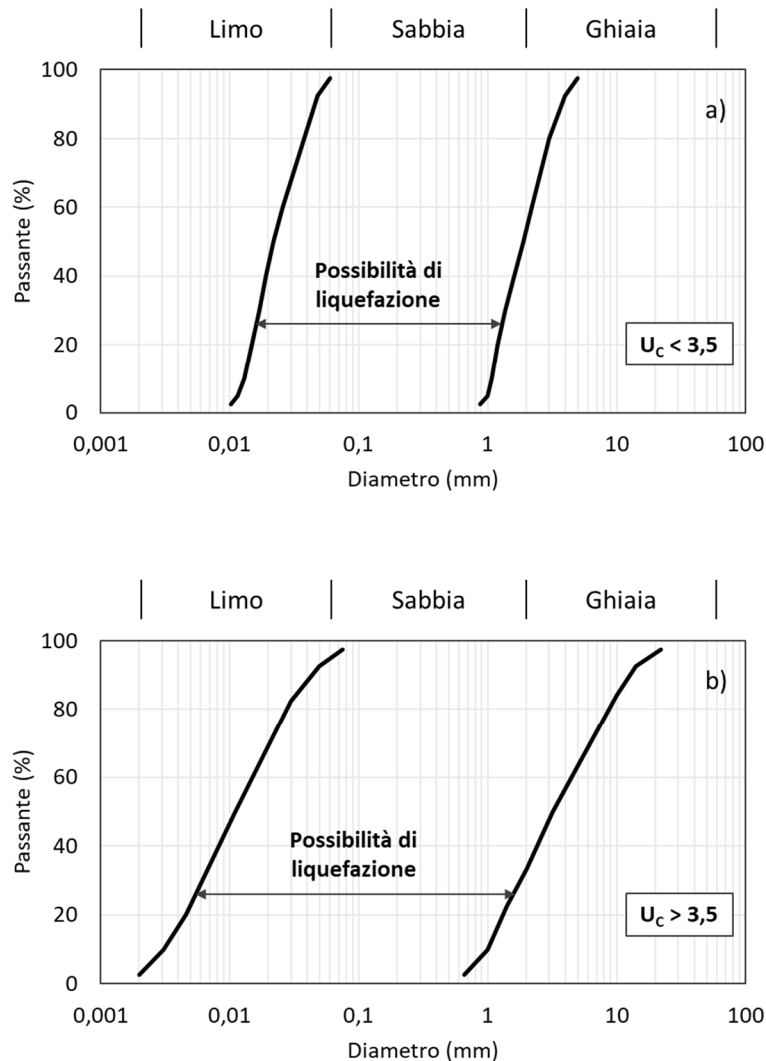


Figura 8.1 Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione (§7.11.3.4.2 [1])

8.2 METODI DI ANALISI PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE

Per valutare la possibilità di occorrenza della liquefazione in un sito sono state proposte diverse metodologie che vanno da semplici metodi qualitativi e semi-empirici, metodi di analisi semplificata, metodi di analisi dinamica, fino alla modellistica fisica.

Nei paragrafi seguenti saranno trattati i metodi adottati in questo lavoro e che possono essere classificati come appartenenti alle seguenti tre categorie, in ordine di complessità crescente:

- metodi di analisi semi-empirici;
- metodi di analisi semplificata;
- metodi di analisi dinamica semplificata.

8.2.1 Metodi di analisi semi-empirica

I metodi semi-empirici vengono utilizzati generalmente per fornire una valutazione di massima della vulnerabilità di un deposito sabbioso saturo alla liquefazione, prendendo in considerazione solo i parametri geologici e geotecnici del sito. Si tratta di metodi estremamente semplificati, di rapido e semplice impiego.

8.2.1.1 Procedura di Sherif e Ishibashi (1978)

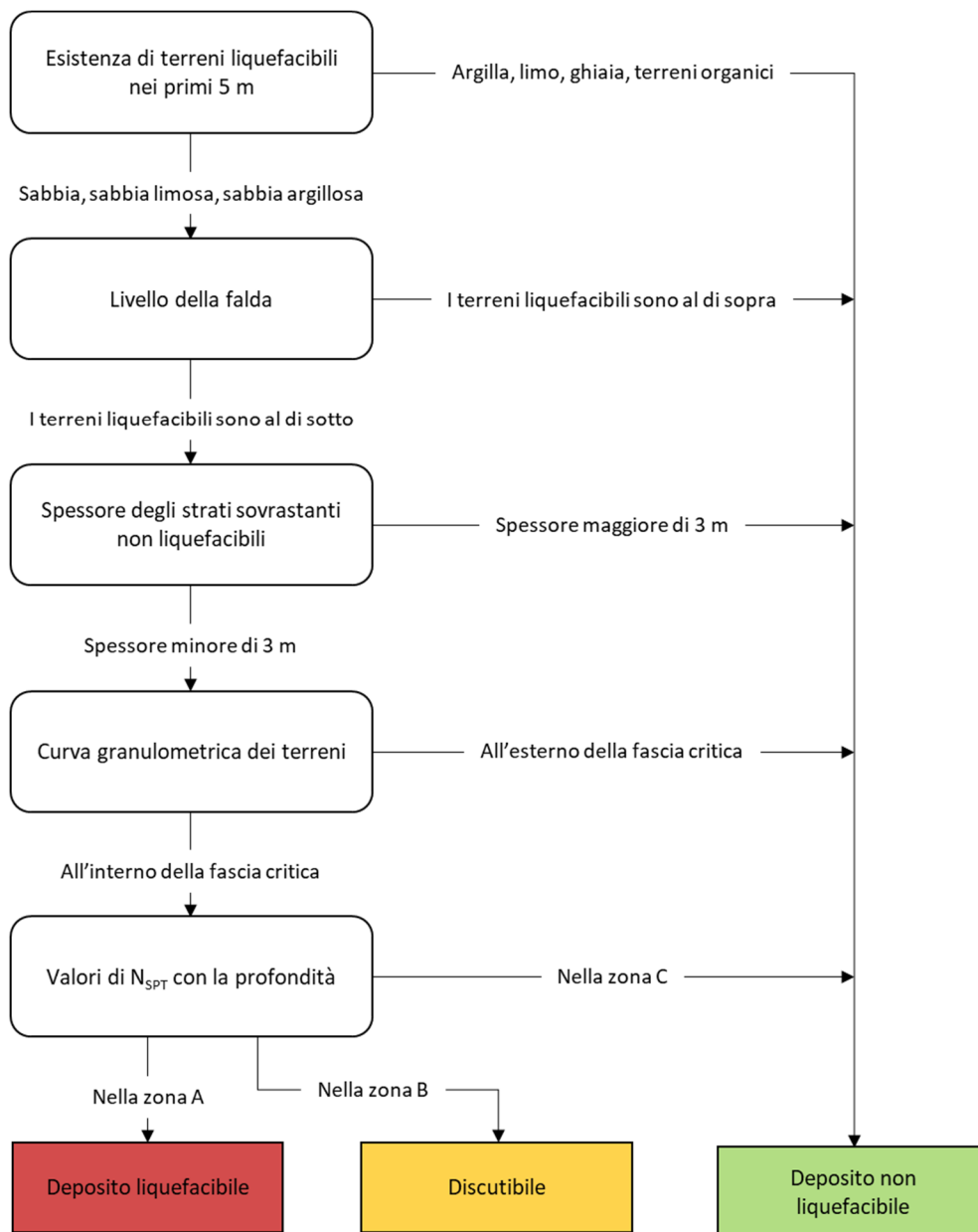


Figura 8.2 Diagramma di flusso per la valutazione della vulnerabilità di un deposito alla liquefazione (Sherif e Ishibashi, 1978)

Il metodo di Sherif & Ishibashi (1978) ammette che si possano verificare fenomeni di liquefazione solo nei livelli che presentino le seguenti caratteristiche:

- siano costituiti da sabbie o sabbie limose;
- si trovino sotto il livello statico della falda;
- gli strati di copertura non abbiano spessore maggiore di 3 metri.

secondo il diagramma di flusso rappresentato in Figura 8.2.

Se questi requisiti non sono verificati si prosegue nell'elaborazione prendendo in considerazione la granulometria e l'addensamento del deposito. Il metodo richiede che siano condotte su campioni dello strato potenzialmente liquefacibile analisi granulometriche. Le curve ricavate vanno confrontate con due profili granulometrici di riferimento (Tsuchida, 1970), uno per granulometrie uniformi, l'altro per granulometrie estese (presenza di frazioni argillose o ghiaiose) (Figura 8.1).

Verificato che la granulometria dello strato sia predisponente al manifestarsi di fenomeni di liquefazione, per poter emettere un giudizio definitivo sulla vulnerabilità del deposito occorre prendere in considerazione il suo grado di addensamento, valutato attraverso prove SPT (Nishiyama *et al.*, 1977). Se il numero di colpi ricade, anche parzialmente, nella fascia A, il deposito è liquefacibile, se ricade nella fascia C non è liquefacibile. La fascia B infine riguarda strati in cui la liquefazione è possibile, ma non probabile.

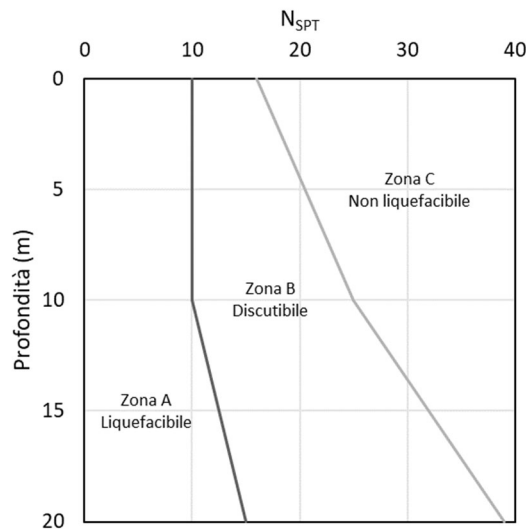


Figura 8.3 Grafico per la valutazione della vulnerabilità di un deposito alla liquefazione basato su prove SPT (Nishiyama *et al.*, 1977)

8.2.2 Metodi di analisi semplificata

Nei metodi di analisi semplificata la verifica a liquefazione del deposito è effettuata in condizioni di *free-field*. L'analisi della pericolosità di liquefazione per l'area in esame viene eseguita in corrispondenza di un numero adeguato di verticali significative, alle profondità in cui sono presenti materiali potenzialmente liquefacibili.

La sicurezza nei confronti della liquefazione, ad una generica profondità, è valutata in termini di coefficiente di sicurezza, F_L , definito come rapporto fra resistenza disponibile alla liquefazione (stato di sforzo critico associato alla condizione di liquefazione o al manifestarsi di grandi deformazioni plastiche) e sollecitazione indotta dall'azione sismica. Entrambi i parametri tensionali sono correntemente normalizzati rispetto alla tensione verticale efficace agente alla profondità esaminata, in modo da definire un rapporto di resistenza ciclica, CRR , e un rapporto di tensione ciclica, CSR .

Il termine CSR è stimato a partire dal valore dell'accelerazione massima attesa in superficie, $a_{max,s}$, per eventi sismici di assegnata "probabilità di eccedenza" in un arco temporale di riferimento.

Il termine CRR è generalmente stimato mediante abachi, a partire dai risultati di prove in sito di tipo SPT, CPT o da misure di velocità di propagazione delle onde di taglio. Negli abachi, tipicamente, è riportato in ordinata il carico sismico ed in ascissa la resistenza del terreno normalizzata, stimata attraverso una delle prove in sito richiamate in precedenza. Una curva separa i punti rappresentativi di *case-histories* per le quali si è osservato il fenomeno della liquefazione (giacenti sopra la curva limite) da quelli per i quali la liquefazione non è avvenuta (giacenti sotto la curva limite). Tale curva limite rappresenta il luogo dei minimi rapporti tensionali ciclici, CSR , necessari affinché sia raggiunta la condizione di liquefazione, e quindi rappresenta il luogo dei valori corrispondenti alla resistenza ciclica, CRR .

I metodi, applicabili solo nelle condizioni di piano di campagna orizzontale o con deboli pendenze e depositi olocenici, richiedono la valutazione, fino alla profondità critica da p.c., del coefficiente di sicurezza:

$$F_L(z) = \frac{CRR_{M=7.5; \sigma'_v=1 \text{ atm}}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

dove:

$CRR_{M=7.5; \sigma'_v=1 \text{ atm}} = \frac{\tau_{ult}}{\sigma'_{v0}}$ è il rapporto di resistenza ciclica, ovvero la resistenza normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace iniziale σ'_{v0} , per terremoto di magnitudo $M = 7.5$ e pressione efficace di riferimento $\sigma'_v = 1 \text{ atm}$;

MSF è il fattore di scala della magnitudo che è funzione, oltre che del valore della magnitudo dell'azione sismica di riferimento, anche del metodo di stima di CRR ;

K_σ è il fattore di correzione che tiene conto della pressione efficace alla profondità a cui la resistenza viene valutata;

$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$ è il rapporto di tensione ciclica, ovvero la tensione di taglio ciclica media indotta dall'azione sismica di riferimento, normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace iniziale σ'_{v0} , ove a_{max} è il picco di accelerazione al piano campagna, g è l'accelerazione di gravità, σ_{v0} e σ'_{v0} sono le tensioni verticali rispettivamente totale e efficace alla profondità considerata e r_d è un coefficiente riduttivo dell'azione sismica per effetto della deformabilità del terreno che può essere stimato con relazioni empiriche associate ai diversi metodi di stima di CRR (e di MSF). Il valore della tensione tangenziale media $\tau_{media} = 0,65 \tau_{max}$ al variare della profondità può essere più precisamente determinato con analisi di risposta sismica locale.

I risultati dell'analisi devono essere presentati riportando l'andamento del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione $F_L(z)$ per ciascuna delle verticali esplorate fino alla profondità critica z_{crit} da piano campagna o fino alla profondità oltre la quale si esclude l'occorrenza di liquefazione.

Per ogni verticale deve anche essere valutato l'indice del potenziale di liquefazione I_L di seguito definito.

$$I_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz \quad \text{in cui} \quad w(z) = \frac{200}{z_{crit}} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_{crit}}\right)$$

dove z_{crit} è la profondità critica, ovvero la profondità massima entro la quale può verificarsi la liquefazione, che di norma si assume pari a 20 m. La variabile $F(z)$ vale (Sonmez, 2003):

$$\begin{aligned} F(z) &= 0 && \text{per } F_L \geq 1,2 \\ F(z) &= 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18,427 \cdot F_L) && \text{per } 1,2 > F_L \geq 0,95 \\ F(z) &= 1 - F_L && \text{per } F_L \leq 0,95 \end{aligned}$$

In base al valore stimato dell'indice del potenziale di liquefazione si definiscono le seguenti classi di pericolosità (Sonmez, 2003):

$I_L = 0$	Non liquefacibile ($F_L \geq 1,2$)
$0 < I_L \leq 2$	Potenziale basso
$2 < I_L \leq 5$	Potenziale moderato
$5 < I_L \leq 15$	Potenziale alto
$I_L > 15$	Potenziale molto alto

Nel paragrafo successivo viene descritto uno dei metodi di analisi semplificata basato sui risultati delle prove in sito SPT. Il contenuto di fine FC , richiesto per l'applicazione dei vari metodi, può essere determinato con misure dirette in laboratorio e/o mediante relazioni empiriche.

8.2.2.1 Metodo basato sui risultati di prove SPT (Boulanger e Idriss, 2014)

La procedura in esame, scelta tra quelle più recenti e ritenute affidabili, deve essere applicata seguendo i passi nell'ordine indicato.

$$1. (N_1)_{60} = C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \cdot N_{SPT} \leq 46$$

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}}\right)^m \leq 1,7$$

$$m = 0,784 - 0,0768 \cdot \sqrt{(N_1)_{60}} \leq 46$$

[m è determinato per via iterativa; per prove eseguite secondo le raccomandazioni AGI (1977): $C_E = C_B = C_R = C_S \approx 1$; p_a è la pressione atmosferica]

$$2. (N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left[1,63 + \frac{9,7}{FC} - \left(\frac{15,7}{FC}\right)^2\right]$$

[FC è il contenuto di fine espresso in %, determinato con analisi granulometrica sul materiale prelevato durante l'esecuzione della prova medesima e/o mediante stima indiretta da prove CPTe/CPTu limitrofe]

$$3. \quad CRR_{M=7.5; \sigma'_{v0}=1 \text{ atm}} = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60cs}}{14,1} + \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right]^2 - \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{23,6} \right]^3 + \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{25,4} \right]^4 - 2,8 \right\}$$

$$4. \quad MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \cdot \left[8,64 \cdot \exp \left(\frac{-M}{4} \right) - 1,325 \right]$$

$$MSF_{max} = 1,09 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{31,5} \right)^2 \leq 2,2$$

$$5. \quad K_\sigma = 1 - C_\sigma \cdot \ln \left(\frac{\sigma'_v}{p_a} \right) \leq 1,1$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18,9 - 2,55 \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0,3$$

$$6. \quad CSR_{M; \sigma'_v} = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

$$\alpha(z) = -1,012 - 1,126 \cdot \sin \left(\frac{z}{11,73} + 5,133 \right)$$

$$\beta(z) = 0,106 + 0,118 \cdot \sin \left(\frac{z}{11,28} + 5,142 \right)$$

$$7. \quad F_L = \frac{CRR_{M=7.5; \sigma'_{v0}=1 \text{ atm}}}{CSR_{M; \sigma'_v}} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

8.2.3 Metodi di analisi dinamica semplificata

Nei metodi di analisi dinamica semplificata, la verifica a liquefazione del deposito è condotta in condizioni di *free-field*, in corrispondenza di un numero adeguato di verticali significative. La verifica si esegue tipicamente valutando il carico sismico attraverso un'analisi di risposta locale del sito; l'azione sismica pertanto deve essere definita attraverso un accelerogramma al *bedrock*.

In linea di principio, tra i metodi dinamici semplificati per l'analisi della pericolosità di liquefazione si possono distinguere due categorie principali: a) metodi che eseguono l'analisi in termini di tensioni totali e b) metodi che eseguono l'analisi in termini di tensioni efficaci.

Nei metodi in termini di tensioni totali, il carico sismico, ovvero il termine *CSR*, è determinato mediante un'analisi 1-D della risposta sismica locale del sito condotta in termini di tensioni totali, prescindendo quindi dallo sviluppo delle sovrappressioni neutre tipiche del processo di liquefazione. Alle diverse profondità in cui sono presenti materiali potenzialmente liquefacibili e in corrispondenza delle quali devono essere eseguite le verifiche, l'azione sismica che innesca il fenomeno può essere ricavata in termini di storia temporale delle tensioni tangenziali $\tau(t)$. Il rapporto di tensione ciclica, *CSR*, può essere calcolato mediante la relazione:

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \cdot \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{v0}}$$

essendo τ_{max} il valore della tensione tangenziale massima e σ'_{v0} la tensione verticale efficace alla profondità esaminata prima dell'evento sismico (non tenendo conto delle sovrappressioni interstiziali indotte).

Il rapporto di tensione ciclica, così calcolato, è confrontato con la resistenza a liquefazione, espressa attraverso il rapporto di resistenza ciclica, CRR , che può essere stimato utilizzando i risultati di prove in sito o a partire dai risultati di prove di laboratorio.

La sicurezza nei confronti della liquefazione, alla profondità considerata, è valutata in termini di coefficiente di sicurezza, $F_L = CRR/CSR$.

I metodi in termini di tensioni efficaci si basano sull'applicazione di codici di calcolo 1-D che eseguono l'analisi della risposta sismica locale in termini di tensioni efficaci, utilizzando modelli non lineari del terreno, con integrazione delle equazioni del moto nel dominio del tempo.

Con l'applicazione di questi metodi è possibile determinare lungo la verticale esaminata, al variare della profondità e istante per istante durante l'evento sismico, il rapporto di sovrappressione interstiziale $r_u = \Delta u / \sigma'_{v0}$, essendo r_u l'eccesso di pressione interstiziale indotto dal sisma. La verifica della sicurezza nei confronti della liquefazione, può essere effettuata determinando il valore di r_u che corrisponde ad un prefissato valore del fattore di sicurezza, F_L .

8.3 VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

8.3.1 Metodo di analisi semi-empirica

In via preliminare, per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione, è stata considerata la natura litologica dei terreni presenti nell'area inerente al progetto. A tale scopo, sono state utilizzate le stratigrafie dei sondaggi eseguiti. A ciascuna verticale di indagine è stato applicato il metodo proposto da Scherif e Ishibashi (1978), messo a punto in modo tale da identificare le verticali potenzialmente liquefacibili, sfruttando le informazioni disponibili sulla litologia degli strati attraversati, sulla posizione della falda e sulla granulometria e plasticità dei terreni ivi presenti. In particolare, sono state selezionate come liquefacibili solo le verticali contenenti entro i primi 15 m almeno uno strato giudicato suscettibile alla liquefazione (ovvero rientrante nelle litologie suggerite dal metodo: sabbia, sabbia limosa, sabbia argillosa) e posizionato al di sotto del livello di falda, purché non sia presente uno strato superficiale di terreno non liquefacibile (argilla, limo, ghiaia e terreni organici) di spessore pari ad almeno 3 m (che produce un cosiddetto "effetto tappo" sulle manifestazioni e le conseguenze, in superficie, della liquefazione sismica).

Di seguito si riporta un riepilogo della verifica della suscettibilità alla liquefazione (Tabella 8-1), basata sul metodo empirico proposto da Sherif e Ishibashi (cfr. §8.2.1.1).

Tabella 8-1 Verifica della suscettibilità alla liquefazione basata sul metodo di Sherif e Ishibashi (1978)

Sondaggio	Esito 1° verifica	Esito 2° verifica	Esito 3° verifica	Esito 4° verifica	Esito 5° verifica	Verifica
BH01	×	✓	-	-	-	Non liquefacibile
S01	×	✓	-	-	-	Non liquefacibile
BH02	×	✓	-	-	-	Non liquefacibile
BH03	×	✓	-	-	-	Non liquefacibile
S03	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio	Esito 1° verifica	Esito 2° verifica	Esito 3° verifica	Esito 4° verifica	Esito 5° verifica	Verifica
BH07	X	X	X	X	X	Liquefacibile
BH08	X	X	X	✓	-	Non liquefacibile
S04	X	X	X	X	✓	Non liquefacibile
BH09	X	X	X	✓	-	Non liquefacibile
BH10	X	X	X	✓	-	Non liquefacibile
BH11	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH12	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH13	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
S05	X	✓	-	-	-	Non liquefacibile
S4	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
S2	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
S3	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH17	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH20	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH21	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH22	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH23	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH24	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH25	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH26	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH28	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH29	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH30	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH31	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile
BH32	✓	-	-	-	-	Non liquefacibile

Adottando il metodo di Sherif e Ishibashi (1977), il terreno in corrispondenza della verticale di indagine BH07 risulta potenzialmente liquefacibile. Tale risultato è confermato anche dalle curve granulometriche dei campioni BH07-Sh1 (quota di prelievo $z = 3,00 \div 3,50$ m da p.c.) e BH07-Sh2 (quota di prelievo $z = 9,00 \div 9,50$ m da p.c.) (Figura 8.4) e dai risultati delle prove SPT (eseguite rispettivamente a 5,55 m e a 12,00 m da p.c.) (Figura 8.5).

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

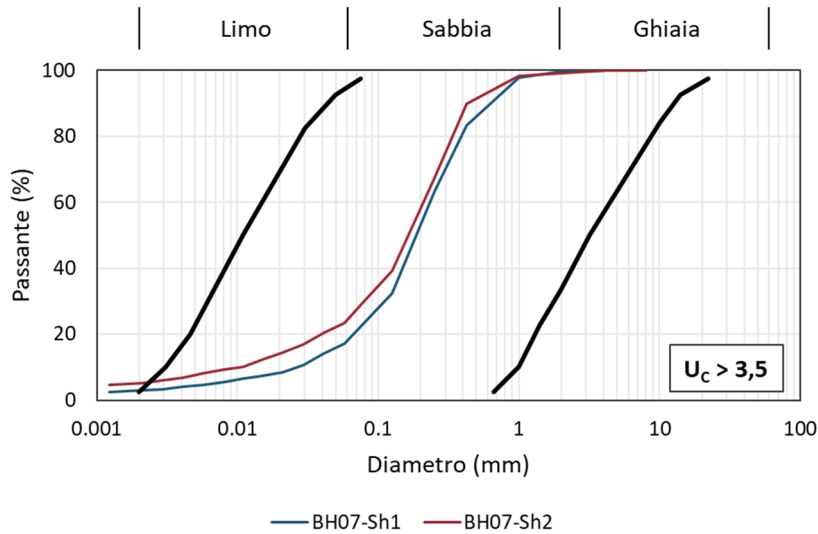


Figura 8.4 Curve granulometriche relative ai campioni BH07-Sh1 e BH07-Sh2

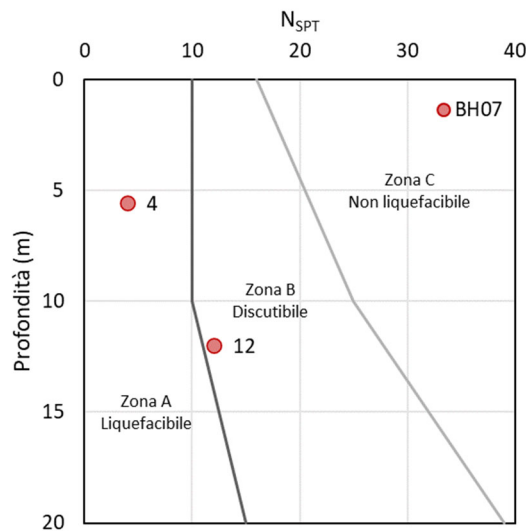


Figura 8.5 Risultati prove SPT in corrispondenza del sondaggio BH07

8.3.2 Metodo di analisi semplificata

A valle dei risultati ottenuti con un'analisi basata su metodi di analisi semi-empirica, per la verticale di indagine BH07 si procede alla verifica della suscettibilità alla liquefazione con metodi di analisi semplificata basati su un approccio deterministico, quale quello proposto da Boulanger e Idriss (2014) (cfr. §8.2.2.1).

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

Per il calcolo della domanda sismica, occorre prima definire l'evento sismico atteso, con un assegnato periodo di ritorno, T_R , attraverso l'accelerazione massima orizzontale al suolo, a_{max} , e la magnitudo momento, M_w .

L'accelerazione a_{max} può essere calcolata come $a_{max} = a_g \cdot S_S \cdot S_T$ dove a_g è l'accelerazione orizzontale massima attesa in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, S_S il fattore di amplificazione stratigrafica del deposito e S_T il fattore di amplificazione topografica. Per il sito in esame, risulta:

PARAMETRI SISMICI

Latitudine: 43.4904° (N) Longitudine: 12.0780° (E)

Vita nominale $V_N = 50$ anni

Classe d'uso II ($C_U = 2$)

Periodo di riferimento $V_R = 100$ anni

Categoria sottosuolo: E

Categoria topografica: T1

	Probabilità di superamento (%)	T_R (anni)	a_g (g)	F_o (-)	T_c^* (s)
SLV	10	949	0,261	2,414	0,307

COEFFICIENTI SISMICI

	S_s (-)	C_c (-)	S_T (-)	a_{max} (g)
SLV	1,310	1,840	1,000	0,342

Per quanto riguarda la stima della magnitudo momento attesa, M_w , essa è stata definita come la massima magnitudo, $M_{w_{max}}$, associata alla zona sismogenetica nella quale ricade il sito in esame. In particolare, considerata la zonazione sismogenetica ZS9 (INGV, 2009) il sito di studio ricade all'interno della zona Appenino Umbro (ZS 919) a cui corrisponde una magnitudo massima pari a $M_{w_{max}} = 6,37$.

PROGETTAZIONE ATI:

Di seguito si riportano i risultati della verifica della suscettibilità alla liquefazione basata sul metodo proposta da Idriss e Boulanger (2014).

Profondità falda	$z_w = 1,00$ m da p.c.
Peso dell'unità di volume naturale	$\gamma_n = 19,44$ kN/m ³ (da campioni BH07-Sh1 e BH07-Sh2)
Peso dell'unità di volume saturo	$\gamma_n = 19,54$ kN/m ³ (da campioni BH07-Sh1 e BH07-Sh2)
Accelerazione orizzontale di picco	$a_{max} = 0,342$ g
Magnitudo per il terremoto atteso nel sito del progetto	$M_w = 6,37$
Profondità critica	$z_{crit} = 15,0$ m

Tabella 8-2 Calcolo del fattore di sicurezza F_L nei confronti della liquefazione (Boulanger e Idriss, 2014)

z_{med} (m)	N_m (-)	σ'_{v0} (kPa)	m (-)	C_N (-)	$(N_1)_{60}$ (-)	FC (%)	$\Delta(N_1)_{60}$ (-)	$(N_1)_{60cs}$ (-)	$CRR_{M;\sigma'v}$ (-)	MSF_{max} (-)	MSF (-)	C_σ (-)	K_σ (-)	σ_{v0} (kPa)	r_d (-)	$CSR_{M;\sigma'v}$ (-)	F_L (-)
4.00	4	48.6	0.594	1.53	6	22.4	5	11	0.12	1.21	1.09	0.08	1.06	78.1	0.947	0.34	0.43
10.0	12	107.0	0.523	0.97	12	29.0	5	17	0.17	1.21	1.09	0.10	0.99	195.3	0.822	0.33	0.56

Tabella 8-3 Calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione I_L (Sonmez, 2003)

Δz (m)	$F(z)$ (-)	$w(z)$ (-)	$I_{L,i}$ (-)
6.00	0.57	9.78	34
6.00	0.44	4.44	12

I_L **46**

PROGETTAZIONE ATI:

Adottando il metodo di Boulanger e Idriss (2014), in corrispondenza della verticale di indagine BH07, il potenziale di liquefazione risulta *molto alto* ($I_L > 15$).

8.3.3 Metodo di analisi dinamica semplificata

A valle dei risultati ottenuti con un'analisi basata su metodi di analisi semplificata, per la verticale di indagine BH07 si procede alla verifica della suscettibilità alla liquefazione con metodi di analisi dinamica semplificata (cfr. §8.2.3).

La verifica è stata eseguita con il software *Liquefazione* (v. 2023.9.4) della *Statec s.r.l.*

Di seguito si mostrano i risultati dell'analisi riportando l'andamento del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione $F_L(z)$. Per maggiori dettagli sull'intera procedura di calcolo adottata si rimanda ai rapporti di calcolo allegati al presente documento.

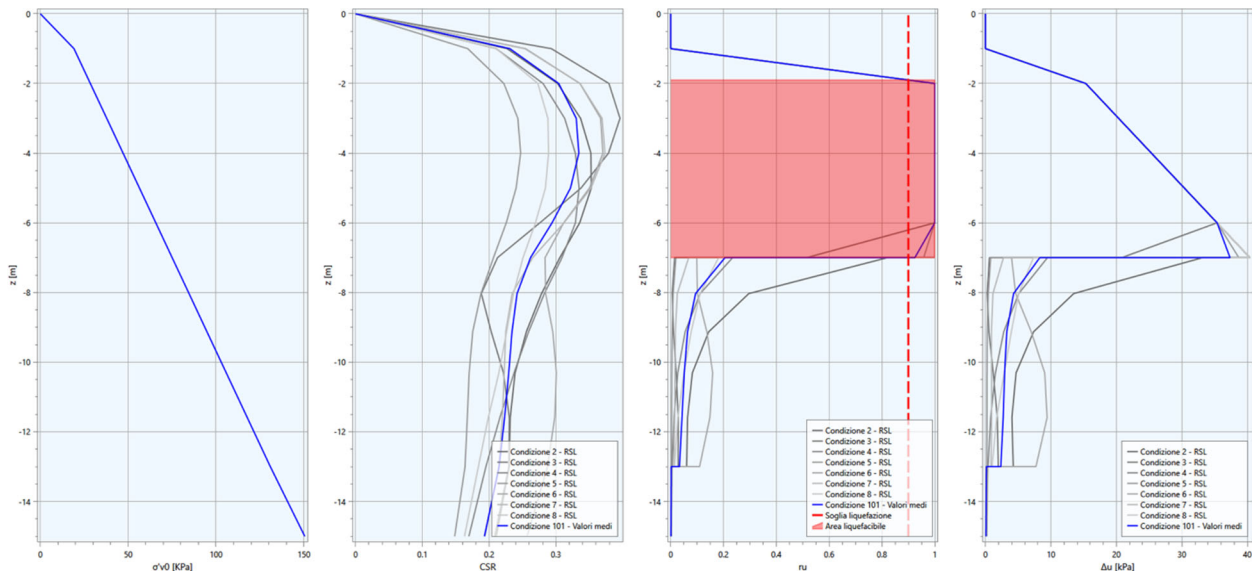


Figura 8.6 Risultati della verifica alla liquefazione mediante metodi di analisi dinamica semplificata

Adottando metodi di analisi dinamica semplificata, in corrispondenza della verticale di indagine BH07, il terreno risulta suscettibile alla liquefazione per profondità comprese tra 2 e 7 m dal piano campagna.

9 PROBLEMATICHE GEOTECNICHE E SOLUZIONI TECNICHE ADOTTATE

9.1 SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

A seguito delle verifiche per la suscettibilità alla liquefazione, eseguite con diversi metodi di analisi (cfr. §8.2), in corrispondenza della verticale di indagine BH07 il terreno è risultato liquefacibile (cfr. §8.3).

Al fine di ridurre il rischio di fenomeni di liquefazione, nelle aree limitrofe al sondaggio BH07, si predispongono due tipologie di intervento: (1) vibro sostituzione con formazione di colonne di materiale inerte e (2) pali plastici.

La prima tipologia di intervento consiste in colonne verticali in ghiaia realizzate all'interno dello strato liquefacibile. Sono generalmente realizzate mediante una sonda vibrante che penetra nel sottosuolo addensando il terreno circostante. Il foro è successivamente riempito di ghiaia che viene a sua volta addensata dalla medesima sonda vibrante. Se il foro prodotto dalla sonda rimane stabile per un tempo sufficiente, è possibile immettere il materiale granulare dall'alto (*top feed*); in caso contrario, è necessario immettere il materiale drenante dalla punta della sonda, prima di estrarla dal terreno (*bottom feed*). Applicando le sonde vibranti in terreni poco consistenti è possibile raggiungere diametri dell'ordine di 0,75 ÷ 1,10 m e profondità dell'ordine di 25 m (Moseley e Priebe, 1993). Questa tipologia di intervento è ampiamente impiegata per problematiche di mitigazione del rischio di liquefazione grazie ai seguenti effetti: aumento della densità del terreno intercluso tra le colonne in ghiaia e aumento della permeabilità del terreno garantendo la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali.

La seconda tipologia di intervento consiste invece nella realizzazione di elementi strutturali (pali realizzati con una miscela di acqua, cemento e bentonite). La miscela di sostegno è lasciata indurire nello scavo per effetto della idratazione del cemento a formare una massa di bassa permeabilità. Questa tipologia di intervento è impiegata per problematiche di mitigazione del rischio di liquefazione grazie ai seguenti effetti: aumento della rigidità del terreno in sito con funzione di assorbire gran parte delle deformazioni di taglio indotti dal sisma e conseguente riduzione delle sovrappressioni interstiziali.

9.1.1 Intervento di mitigazione del rischio di liquefazione mediante vibro sostituzione con formazione di colonne di materiale inerte (da progr. 2+350 km a prog. 3+100)

Allo scopo di diminuire il rischio di liquefazione, in corrispondenza dell'asse principale, tra le progressive 2+350 km e 3+100 km, si prevede la realizzazione di colonne verticali in ghiaia vibro compattate con diametro pari a 80 cm e altezza pari a 10 m, nel terreno sottostante al piano di posa del corpo stradale in corrispondenza dell'asse principale, intestate nello strato non liquefacibile.

9.1.1.1 Criteri di dimensionamento

Il dimensionamento del presente intervento è stato eseguito con riferimento al sondaggio BH07, secondo l'approccio proposto da Priebe (1995). Secondo Priebe (1995) il diametro della singola colonna in ghiaia d_c , l'interasse tra due colonne adiacenti s , la lunghezza della singola colonna in ghiaia e il nuovo fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione F_L' , possono essere determinati conoscendo il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione iniziale F_L mediante un'analisi a ritroso.

PROGETTAZIONE ATI:

La soluzione suggerita da Priebe (1995) si basa sulle seguenti ipotesi:

- il comportamento delle colonne è assunto rigido;
- il materiale che compone le colonne è considerato incompressibile;
- il peso specifico delle colonne e del terreno circostante è trascurato.

Concetto di cella unitaria

Alla base della teoria esposta da Priebe (1995) si trova il concetto di “cella unitaria”. In particolare, ipotizzando che ciascuna colonna presenta il medesimo comportamento, il calcolo può essere ridotto a una sola unità (o cella unitaria). Tipicamente le disposizioni più comuni delle colonne sono triangolare equilatera o quadrata. Nel primo caso l’area di influenza associata a ciascun elemento risulta essere di forma esagonale, mentre nel secondo caso risulta essere quadrata. Al fine di soddisfare la condizione di assiale simmetria, l’area di influenza è trasformata in un cerchio con medesima area. La Figura 9.1 mostra il modello di cella unitaria (Castro, 2017).

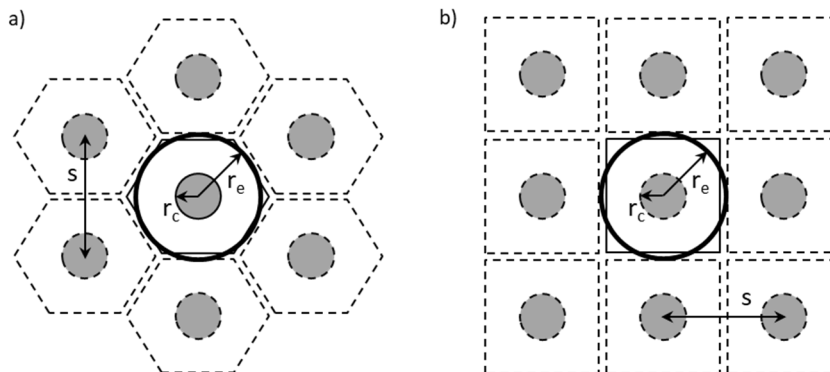


Figura 9.1 Rappresentazione schematica della cella unitaria in condizione di assiale simmetria per una disposizione (a) triangolare equilatera e (b) quadrata (modificato da Castro, 2017)

Al fine di massimizzare la disposizione delle colonne di ghiaia, per l’intervento in esame si sceglie di adottare la disposizione triangolare equilatera. In questo caso il diametro della cella unitaria d_e , risulta:

$$d_e = 1,05 \cdot s$$

dove s è l’interasse tra le colonne.

Fattore di miglioramento n_0

Il miglioramento delle caratteristiche del sottosuolo, conseguente alla realizzazione di una colonna in ghiaia, viene valutata (oltre alle ipotesi precedentemente esposte) sulla assunzione che, durante un input sismico, il materiale ghiaioso è soggetto a rottura per taglio mentre il suolo al contorno

PROGETTAZIONE ATI:

reagisce elasticamente. Sotto tali ipotesi è possibile valutare il miglioramento apportato dall'installazione delle colonne in ghiaia attraverso il coefficiente n_0 :

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \cdot \left[\frac{0,5 + f(\mu_s, A_c/A)}{K_{ac} \cdot f(\mu_s, A_c/A)} - 1 \right] \quad (8.1)$$

dove μ_s è il rapporto di Poisson del terreno in sito, A_c è l'area della sezione trasversale della colonna, A è l'area della cella unitaria, K_{ac} è il coefficiente di spinta attiva. Il valore della funzione $f(\mu_s, A_c/A)$ è ottenuta dalla seguente equazione:

$$f(\mu_s, A_c/A) = \frac{1 - \mu_s^2}{1 - \mu_s - 2\mu_s^2} \cdot \frac{(1 - 2\mu_s) \cdot (1 - A_c/A)}{1 - 2\mu_s + A_c/A} \quad (8.2)$$

Il valore di K_{ac} risulta:

$$K_{ac} = \tan^2(45^\circ - \varphi_c/2)$$

dove φ_c è l'angolo di attrito interno del materiale che costituisce le colonne. Il valore di A_c è ottenuto dalla seguente equazione:

$$A_c = 1/4 \cdot \pi \cdot d_c^2$$

dove d_c è il diametro delle colonne in ghiaia. Il valore di A è ottenuto dalla seguente equazione:

$$A = 1/4 \cdot \pi \cdot d_e^2$$

dove d_e è il diametro della cella unitaria.

In generale, assumendo un valore del rapporto di Poisson pari a $\mu_s = 1/3$, l'equazione (8.1), risulta:

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \cdot \left[\frac{5 - A_c/A}{4 \cdot K_{ac} \cdot (1 - A_c/A)} - 1 \right] \quad (8.3)$$

La relazione tra il fattore di miglioramento n_0 , il rapporto A_c/A e l'angolo di attrito φ_c per $\mu_s = 1/3$ è mostrata in Figura 9.2.

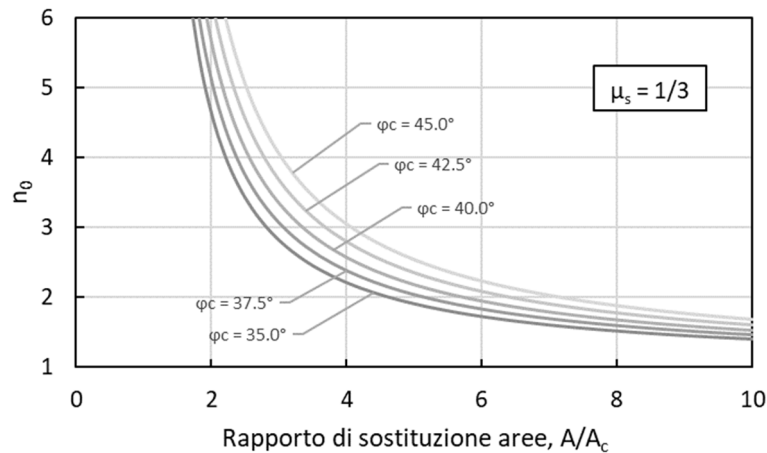


Figura 9.2 Fattore di miglioramento n_0 (modificato da Priebe, 1995)

Fattore di miglioramento ridotto n_1

Il materiale che compone la singola colonna è in realtà compressibile. Questo comporta quindi un aumento della sezione trasversale A_c della colonna soggetta a compressione. Di conseguenza è necessario determinare il valore di $\Delta(A/A_c)$ come aliquota aggiuntiva del rapporto A_c/A . Definendo l'angolo di attrito interno del materiale costituente le colonne φ_c e il rapporto dei moduli edometrici M_c/M_s delle colonne e del terreno circostante, Priebe (1995) suggerisce di valutare $\Delta(A/A_c)$ mediante la seguente equazione:

$$\Delta\left(\frac{A}{A_c}\right) = \frac{1}{\left(\frac{A}{A_c}\right)_1} - 1 \quad (8.4)$$

dove $(A/A_c)_1$ è il valore del rapporto di sostituzione pari al valore minore positivo dato dalla seguente equazione:

$$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1 = -\frac{4 \cdot K_{ac} \cdot (M_c/M_s - 2) + 5}{2 \cdot (4 \cdot K_{ac} - 1)} \pm \frac{1}{2} \cdot \left(\left[\frac{4 \cdot K_{ac} \cdot (M_c/M_s - 2) + 5}{4 \cdot K_{ac} - 1} \right]^2 + \frac{16 \cdot K_{ac} \cdot (M_c/M_s - 1)}{4 \cdot K_{ac} - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8.5)$$

Allora, la compressibilità delle colonne può essere portata in conto utilizzando un fattore di miglioramento ridotto n_1 determinabile mediante l'equazione (8.1) considerando un rapporto di sostituzione aree modificato $\overline{A_c/A}$ pari al rapporto di sostituzione aree A/A_c incrementato di una quantità uguale a $\Delta(A/A_c)$.

$$n_1 = 1 + \frac{\overline{A_c}}{A} \cdot \left[\frac{5 - \overline{A_c/A}}{4 \cdot K_{ac} \cdot (1 - \overline{A_c/A})} - 1 \right] \quad (8.5)$$

Il valore del rapporto di sostituzione aree modificato $\overline{A_c/A}$ è ottenuto mediante la seguente equazione:

$$\frac{\bar{A}_c}{A} = \frac{1}{\left(\frac{A}{A_c}\right) + \Delta\left(\frac{A}{A_c}\right)} \quad (8.6)$$

La relazione tra $\Delta(A/A_c)$, il rapporto dei moduli edometrici M_c/M_s e l'angolo di attrito φ_c per $\mu_s = 1/3$ è mostrata in Figura 9.3.

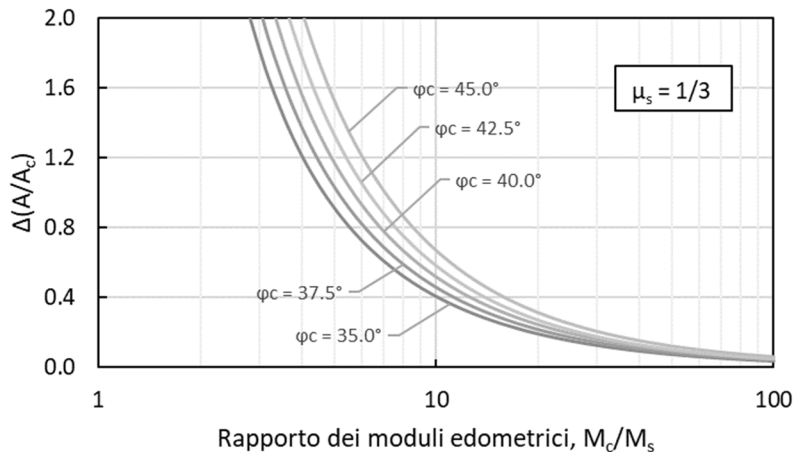


Figura 9.3 Aliquota aggiuntiva $\Delta(A/A_c)$ (modificato da Priebe, 1995)

Stima del fattore di sicurezza post-intervento

Priebe (1995) suggerisce che l'azione agente durante un sisma CSR può essere ridotta mediante l'utilizzo di tecniche di vibro sostituzione, applicando un coefficiente riduttivo α pari a:

$$\alpha = \frac{1}{n_1} \quad (8.7)$$

dove n_1 è il fattore di miglioramento ridotto calcolata secondo l'equazione (8.5). Allora, il valore del fattore di sicurezza post-intervento F'_L può essere calcolato come:

$$F'_L = \frac{CRR}{CSR \cdot \alpha}, \quad \text{con } \alpha < 1$$

dove α è il coefficiente riduttivo dell'azione sismica, CRR è il rapporto di resistenza ciclica e CSR è il rapporto di tensione ciclica.

9.1.1.2 Dimensionamento intervento

Di seguito si riportano i dati di ingresso per il dimensionamento dell'intervento in esame e i risultati dei calcoli, secondo quanto esposto nel §9.1.1.1.

Geometria intervento

PROGETTAZIONE ATI:

STUDI E INDAGINI – GEOTECNICA – RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE

Distanza colonne	1.60 m
Distanza file	1.39 m
Area griglia	2.22 m ²
Altezza colonne	10.0 m

Caratteristiche materiale delle colonne

Peso specifico	19.00 kN/m ³
Modulo edometrico	100.0 MPa
Angolo di attrito	42.50 gradi

Caratteristiche sottosuolo

No.	H [m]	d _c [m]	A/A _c [-]	M _s [MPa]	M _c /M _s [MPa]	μ _s [-]
1	6	0.80	4.41	5	20	0.33
2	6	0.80	4.41	10	10	0.33

Profondità falda 1.00 m

H = spessore strato i-esimo

d_c = diametro colonna

A_c = area colonna

A = area cella unitaria

M_c = modulo edometrico colonna

M_s = modulo edometrico terreno

μ_s = rapporto di Poisson terreno

PROGETTAZIONE ATI:

Risultati

No.	n_0 [-]	$\Delta (A/A_c)$ [-]	n_1 [-]	α [-]
1	2.58	0.28	2.46	0.41
2	2.58	0.59	2.35	0.43

n_0 = fattore di miglioramento

$\Delta(A/A_c)$ = aliquota additiva

n_1 = fattore di miglioramento ridotto

α = coefficiente riduttivo azione sismica

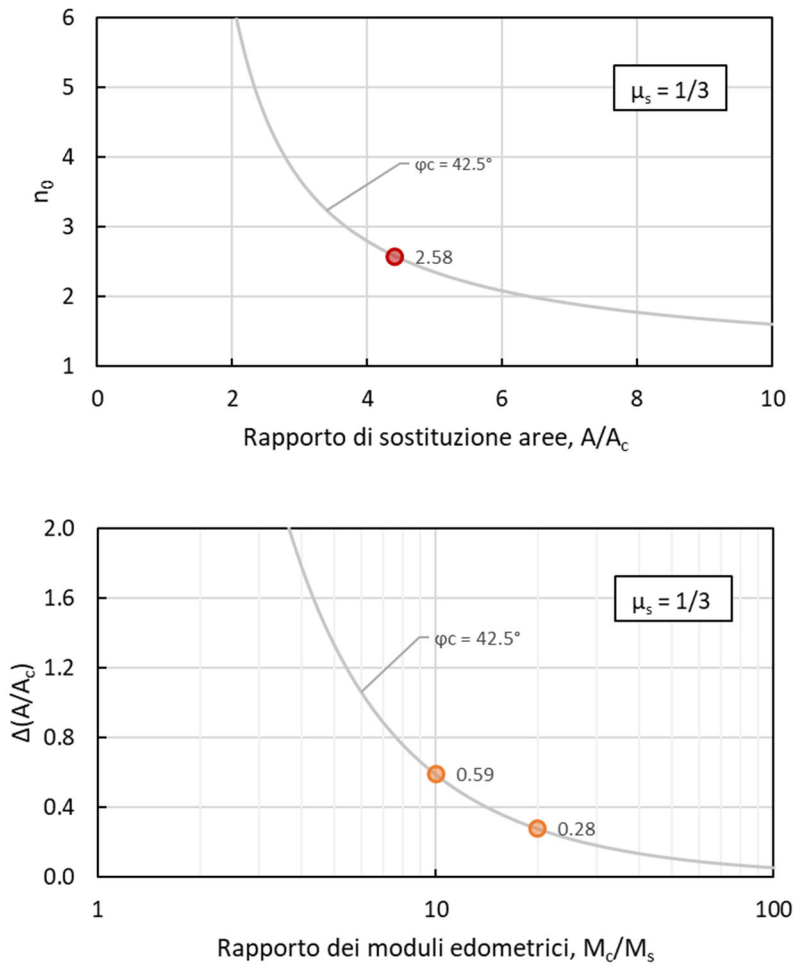


Figura 9.4 Fattore di miglioramento n_0 (sopra) e rapporto $\Delta(A/A_c)$ (sotto) per l'intervento in esame

PROGETTAZIONE ATI:

9.1.1.3 Verifica della suscettibilità alla liquefazione post-intervento

Il calcolo delle caratteristiche geometriche della maglia e delle colonne è stato svolto al fine di raggiungere la condizione di $I_L < 2$, per la quale è possibile garantire la riduzione dei fenomeni di liquefazione osservati e ricondurre la classe di rischio a *basso* (Sonmez, 2003). Le verifiche alla liquefazione post-intervento secondo le formulazioni precedentemente illustrate sono state svolte considerando l'analoga parametrizzazione eseguita per le verifiche della liquefazione in condizioni *free-field*.

Di seguito si riportano i risultati della verifica della suscettibilità alla liquefazione post-intervento, basata sul metodo proposta da Idriss e Boulanger (2014). In particolare, si è tenuto conto del coefficiente riduttivo α (Priebe, 1995), applicandolo direttamente al rapporto di tensione ciclica (CSR), come descritto al §9.1.1.1.

Tabella 9-1 Calcolo del fattore di sicurezza F_L nei confronti della liquefazione post-intervento (Boulanger e Idriss, 2014)

z_{med} (m)	N_m (-)	σ'_{v0} (kPa)	m (-)	C_N (-)	$(N_1)_{60}$ (-)	FC (%)	$\Delta(N_1)_{60}$ (-)	$(N_1)_{60cs}$ (-)	$CRR_{M;\sigma'v}$ (-)	MSF_{max} (-)	MSF (-)	C_σ (-)	K_σ (-)	σ_{v0} (kPa)	r_d (-)	$CSR_{M;\sigma'v}$ (-)	F_L (-)
4.00	4	48.6	0.594	1.53	6	22.4	5	11	0.12	1.21	1.09	0.08	1.06	78.1	0.947	0.14	1.04
10.0	12	107.0	0.523	0.97	12	29.0	5	17	0.17	1.21	1.09	0.10	0.99	195.3	0.822	0.14	1.31

Tabella 9-2 Calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione I_L post-intervento (Sonmez, 2003)

Δz (m)	$F(z)$ (-)	$w(z)$ (-)	$I_{L,i}$ (-)
6.00	0.01	9.78	1
6.00	0.00	4.44	0

I_L	1
-------	---

9.1.2 Intervento di mitigazione del rischio di liquefazione mediante pali plastici

Allo scopo di diminuire il rischio di liquefazione, in corrispondenza del cavalcavia CV01, si prevede la realizzazione di pali plastici con diametro pari a 120 cm e altezza pari a 8 m, nel terreno sottostante il piano di posa delle fondazioni del cavalcavia CV01 e intestati nello strato non liquefacibile. In particolare, si prevede la realizzazione di pali plastici in corrispondenza della spalla SPA e delle pile P1, P2, P3 e P4, ovvero laddove lo spessore dello strato liquefacibile non risulta trascurabile.

Tale intervento ha il solo scopo di rendere impermeabile il terreno di fondazione del cavalcavia, impedendo la nascita di sovrappressioni interstiziali che, durante l'evento sismico, potrebbero causare la perdita di resistenza a taglio del terreno stesso.

PROGETTAZIONE ATI:

10 ALLEGATI

- A. RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO
- B. RISULTATI INDAGINI GEOFISICHE
- C. VERIFICA DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE
- D. VERIFICHE DI STABILITÀ DEI RILEVATI STRADALI
- E. VERIFICA DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI STRADALI
- F. VERIFICA DI STABILITÀ DEGLI SCAVI PROVVISORIALI

PROGETTAZIONE ATI:

ALLEGATO A

RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO SU CAMPIONI DI TERRA

Tabella 1 Sintesi dei risultati delle prove di laboratorio eseguite

Indagini geognostiche e unità geotecniche				Proprietà indici								Composizione granulometrica e classificazione					Limiti di Atterberg					Prova CD e RS				Prova TxCU		Prova TxUU			
Sondaggio	Campione	Prof. media del campione (m)	Unità geotecnica	Peso dell' unità di volume parte solida (kN/m³)	Peso dell' unità di volume secco (kN/m³)	Peso dell' unità di volume naturale (kN/m³)	Peso dell' unità di volume saturo (kN/m³)	Indice dei vuoti (-)	Porosità (%)	Grado di saturazione (%)	Contenuto d'acqua (%)	Frazione ghiaiosa (%)	Frazione sabbiosa (%)	Frazione limosa (%)	Frazione argillosa (%)	Classificazione A.G.I.	LL (%)	LP (%)	IP (-)	Indice di consistenza (-)	Attività (-)	Modulo edometrico (MPa)	c' (°)	φ' (kPa)	c' _{res} (°)	φ' _{res} (kPa)	c' (°)	φ' (kPa)	c _u (kPa)		
																														CAMPAGNA INDAGINI 2022-24	
BH01	Sh1	4.25	UG1a	26.98	17.17	20.70	20.70	0.57	36	100	20.80	10	55	30	5	Sabbia con limo ghiaiosa	nd	np	0				0	36							
	Sh2	7.25	UG1b	26.49	16.58	20.01	20.26	0.56	36	93	20.40	0	40	45	15	Limo con sabbia argilloso	26	18	8										104		
	Sh3	13.25	UG1b	26.09	15.40	19.23	19.42	0.67	40	95	24.90	1	32	42	25	Limo con sabbia argilloso	25	17	8				0	29							
	Sh4	16.25	UG1b	25.90	13.15	18.05	18.05	0.97	49	100	36.90	0	5	58	37	Limo con argilla debolm. sabbioso	52	27	25								0	23			
	Sh5	22.25	UG1b	26.29	17.07	20.50	20.50	0.53	35	100	19.70	0	36	41	23	Limo con sabbia argilloso	33	17	16				0	28							
	Cr1	34.55	UG2	25.51									9	40	36	15	Sabbia con limo argillosa debolm. ghiaiosa	35	20	15											
BH02	Sh1	2.85	UG3	25.51	16.87	19.72	20.21	0.45	31	86	16.80	3	46	40	11	Sabbia con limo argillosa	nd	np	0				0	32							
	Sh2	5.55	UG1a	25.80	16.78	20.21	20.21	0.53	35	99	20.00	5	49	31	15	Sabbia con limo argillosa	23	16	7				0	37							
BH03	Sh1	4.15	UG3	25.90	15.89	19.62	19.68	0.63	39	99	23.90	8	45	33	14	Sabbia con limo argillosa debolm. ghiaiosa	24	14	10				0	30							
	Cr1	8.15	UG1b	26.09	16.58	19.91	20.20	0.47	32	93	20.10	0	29	46	25	Limo con sabbia con argilla	34	19	15				1	29							
BH07	Sh1	3.25	UG1a	25.89	15.69	19.44	19.56	0.63	39	97	23.80	0	83	14	3	Sabbia limosa	nd	np	0				0	39							
	Sh2	9.25	UG1a	25.69	15.78	19.44	19.51	0.61	38	96	23.10	1	76	18	5	Sabbia limosa	nd	np	0												
BH08	Sh1	3.25	UG1a	26.29	15.79	19.62	19.71	0.66	40	98	24.50	0	62	25	13	Sabbia con limo argillosa	nd	np	0												
	Sh2	7.25	UG1b	25.60	13.54	18.15	18.16	0.88	47	99	33.70	0	24	51	25	Limo argilloso sabbioso	nd	np	0				0	24							
	Sh3	14.25	UG1b	25.70	16.28	19.23	19.90	0.49	33	82	18.10	38	17	36	9	Ghiaia con limo sabbiosa debolm. argillosa	nd	np	0	0.70			0	29							
	Cr1	23.45	UG5	26.59	18.34	21.38	21.38	0.45	31	100	16.80	20	30	37	13	Limo con sabbia ghiaioso argilloso	nd	np	0	0.01											
BH09	Sh1	2.75	UG1a	26.39	14.91	19.13	19.13	0.78	44	100	28.90	1	43	39	17	Sabbia con limo argillosa	30	22	8	0.60			0	38							
	Sh2	14.75	UG1a	26.09	16.87	20.40	20.40	0.55	35	100	20.70	3	71	20	6	Sabbia limosa debolm. argillosa	nd	np	0	0.83			0	37							

PROGETTAZIONE ATI:

Indagini geognostiche e unità geotecniche				Proprietà indici								Composizione granulometrica e classificazione					Limiti di Atterberg					Prova CD e RS				Prova TxCU		Prova TxUU				
Sondaggio	Campione	Prof. media del campione (m)	Unità geotecnica	Peso dell' unità di volume parte solida	Peso dell' unità di volume secco	Peso dell' unità di volume naturale	Peso dell' unità di volume saturo	Indice dei vuoti	Porosità	Grado di saturazione	Contenuto d'acqua	Frazione ghiaiosa	Frazione sabbiosa	Frazione limosa	Frazione argillosa	Classificazione A.G.I.	LL	LP	IP	Indice di consistenza	Attività	Modulo edometrico (MPa)	c'	φ'	c' res	φ' res	c'	φ'	c _u			
				(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(-)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(-)	(-)		(-)	(-)	(-)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(kPa)
	Cr1	17.85	UG1b	26.59								3	28	45	24	Limo con sabbia argillosa																
	Cr2	27.35	UG5	26.19								0	9	46	45	Limo con argilla debolm. sabbioso	49	23	26													
BH10	Sh1	3.70	UG1b	26.00	15.01	19.13	19.16	0.72	42	99	27.30	0	13	46	41	Limo con argilla sabbioso	49	23	26	0.43							4	24				
	Sh2	7.25	UG1b	25.70	15.50	19.42	19.42	0.65	39	99	24.60	0	21	48	31	Limo con argilla sabbioso	47	24	23	0.01			7	25								
	Cr1	13.85	UG1b	25.51								2	31	55	12	Limo con sabbia argillosa	30	21	9	0.93												
	Cr2	15.85	UG1b	26.19								5	31	50	14	Limo con sabbia argillosa	33	19	14													
BH11	Cr1	2.60	UG7a	26.19								22	36	24	18	Sabbia limosa ghiaiosa argillosa	58	22	36													
	Cr2	9.15	UG7a	26.59								70	14	11	5	Ghiaia sabbiosa limosa debolm. argillosa	30	16	14													
	Cr3	13.55	UG7b	26.00								1	37	46	16	Limo con sabbia argilloso	41	25	16	0.41			2	27								
	Sh1	20.75	UG7b	25.41	16.19	19.72	19.75	0.57	36	99	21.90	0	6	64	30	Limo con argilla debolm. sabbioso	49	24	25								6	29				
	Sh2	26.25	UG7b	25.80	16.48	20.01	20.03	0.55	36	98	20.90	0	35	59	6	Limo con sabbia debol. argilloso	35	22	13	0.78							0	29				
BH12	Sh1	2,25	UG3	27,47	15,79	19,52		0,74	43	90	23,80	0	29	48	23	Limo con sabbia argilloso	56	26	30	1,07												
	SPT1	5,23	UG7b	27,27								3	27	48	22	Limo sabbioso argilloso	35	17	18													
	SPT2	12,16	UG7a	26,98								35	39	15	11	Sabbia con ghiaia limosa argillosa	27	14	13													
	Sh2	14,55	UG7b	26,19	19,91	22,66						41	36	18	5	Ghiaia con sabbia limosa debolm. argillosa	31	25	6	2,87			6	33								
	SPT3	18,23	UG7b	27,27								0	33	53	14	Limo con sabbia argilloso	31	17	14													
	SPT4	25,75	UG7b	26,68								35	39	19	7	Sabbia con ghiaia limosa debolm. argillosa	31															
	SPT5	29,78	UG7b	27,06								0	39	47	14	Limo con sabbia argilloso	36	18	18													
BH13	Sh1	5.75	UG7b	25.70	17.46	20.11	20.63	0.41	29	84	15.20	7	13	48	32	Limo con argilla sabbioso debolm. ghiaioso	45	21	24	0.14			14	24								
	Cr1	13.85	UG7a	25.90								12	44	35	9	Sabbia con limo ghiaiosa debolm. argillosa	nd	np	0				0	34								
BH15	Cr1	103.7 5	UG9	26.19	16.09	19.82	19.87	0.62	38	98	23.10	0	4	66	30	Limo con argilla	51	24	27								21	27				
	Cr2	109.7 5	UG9	26.29	17.56	20.80	20.80	0.50	33	100	18.50	1	7	48	44	Limo con argilla debolm. sabbioso	49	23	26								28	26				
	Cr3	116.2 5	UG9	26.39	17.85	20.99	20.99	0.48	32	100	17.80	1	6	55	38	Limo con argilla debolm. sabbioso	52	24	28	0.83							30	26				
BH16	Cr1	59.25	UG9	26.29	17.95	21.09	21.09	0.46	31	99	17.00	0	4	63	33	Limo con argilla	49	22	27	0.97							19	27				

PROGETTAZIONE ATI:

Indagini geognostiche e unità geotecniche				Proprietà indici								Composizione granulometrica e classificazione					Limiti di Atterberg					Prova CD e RS				Prova TxCU		Prova TxUU	
Sondaggio	Campione	Prof. media del campione	Unità geotecnica	Peso dell' unità di volume parte solida	Peso dell' unità di volume secco	Peso dell' unità di volume naturale	Peso dell' unità di volume saturo	Indice dei vuoti	Porosità	Grado di saturazione	Contenuto d'acqua	Frazione ghiaiosa	Frazione sabbiosa	Frazione limosa	Frazione argillosa	Classificazione A.G.I.	LL	LP	IP	Indice di consistenza	Attività	Modulo edometrico	c'	φ'	c' _{res}	φ' _{res}	c'	φ'	c _u
		(m)		(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(-)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(-)	(-)		(-)	(-)	(MPa)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)
	Cr2	67.35	UG9	26.29	18.15	21.19	21.19	0.45	31	100	16.70	0	4	64	32	Limo con argilla	50	24	26								49	27	
	Cr3	70.25	UG9	26.09	17.27	20.60	20.60	0.51	34	100	19.00	0	9	82	9	Limo debol. argilloso debolm. sabbioso	34	23	11								11	30	
BH17	Sh1	3.25	UG6	25.70	15.70	19.52	19.52	0.66	40	100	24.70	1	4	59	36	Limo con argilla	54	22	32				2	18	0	9			
	Sh2	14.75	UG9	25.60	15.79	19.62	19.62	0.64	39	100	24.60	0	6	59	35	Limo con argilla debolm. sabbioso	54	21	33										121
BH17	Cr1	17.85	UG9	26.29	18.05	20.90	21.14	0.43	30	92	15.60	1	14	45	40	Limo con argilla sabbioso	55	31	24				14	27					
	Sh3	20.75	UG9	26.68	17.17	20.60	20.67	0.55	35	98	20.10	0	4	55	41	Limo con argilla	49	23	26	1.08						12	23		
BH20	Sh1	5.75	UG1b	26.59	14.62	19.03	19.03	0.81	45	99	29.90	1	8	42	49	Argilla con limo debolm. sabbiosa	60	26	34	1.08			12	19					
	Sh2	12.75	UG9	25.51	16.38	20.01	20.01	0.57	36	100	22.10	0	1	53	46	Limo con argilla	57	30	27	1.24									450
BH21	Sh1	3.25	UG1b	25.02	14.81	18.44	18.81	0.64	39	91	24.70	1	19	45	35	Limo con argilla sabbioso	57	21	36				21	24					
	Sh2	11.25	UG9	25.90	17.76	20.50	20.86	0.41	29	88	15.20	0	14	53	33	Limo con argilla sabbioso	44	18	26	1.03			23	27					
	Sh3	21.25	UG9	25.70	16.58	19.91	20.06	0.54	35	97	20.50	0	8	53	39	Limo con argilla debolm. sabbioso	54	23	31	1.17						26	27		
	Cr1	25.85	UG10	24.62								48	24	18	10	Ghiaia sabbiosa limosa argillosa	nd	np	0	1.22									
BH22	Sh1	2.75	UG10	26.59							23.50	57	33	0	0	Ghiaia con sabbia limosa	nd	np	0	1.19									
	Sh2	12.75	UG1b	26.29	15.30	19.23	19.40	0.69	41	96	25.60	0	22	62	16	Limo sabbioso argilloso	nd	np	0	1.28									53
	Cr1	18.85	UG10	26.49								2	72	21	5	Sabbia limosa debolm. argillosa	nd	np	0	1.36									
	Sh3	20.25	UG10	26.09	15.01	19.13	19.18	0.73	42	99	27.30	0	90	0	0	Sabbia limosa	nd	np	0	0.92			0	35					
	Cr2	34.15	UG10	25.60								63	27	8	2	Ghiaia con sabbia debolm. limosa	nd	np	0	0.89									
BH23	Sh1	3.25	UG1b	26.00	15.21	19.33	19.33	0.71	42	100	26.90	1	5	66	28	Limo con argilla debolm. sabbioso	41	24	17	1.64			0	23					
	Cr1	9.85	UG10	26.59								41	41	13	5	Ghiaia con sabbia limosa	nd	np	0	1.11									
	Sh2	12.25	UG10	26.00	15.01	18.05	19.18	0.57	36	73	20.20	0	84	14	2	Sabbia limosa	nd	np	0	0.89			0	34					
	Sh3	17.75	UG10	25.70	13.73	16.87	18.30	0.65	39	69	23.00	0	90	0	0	Sabbia debolm. limosa	nd	np	0	1.29			0	33					
BH24	Sh1	3.25	UG1b	26.09	16.38	19.91	20.04	0.57	36	96	21.20	0	54	35	11	Sabbia con limo argillosa	nd	np	0	0.90						0	29		
	Sh2	7.25	UG10	25.90							10.20	75	20	0	0	Ghiaia sabbiosa limosa	nd	np	0	1.11									
	Sh3	16.25	UG10	26.19	14.42	17.46	18.86	0.61	37	69	21.20	0	92	0	0	Sabbia debolm. limosa	nd	np	0	1.08			0	33					

PROGETTAZIONE ATI:

Indagini geognostiche e unità geotecniche				Proprietà indici								Composizione granulometrica e classificazione					Limiti di Atterberg					Prova CD e RS				Prova TxCU		Prova TxUU	
Sondaggio	Campione	Prof. media del campione (m)	Unità geotecnica	Peso dell'unità di volume parte solida (kN/m³)	Peso dell'unità di volume secco (kN/m³)	Peso dell'unità di volume naturale (kN/m³)	Peso dell'unità di volume saturo (kN/m³)	Indice dei vuoti (-)	Porosità (%)	Grado di saturazione (%)	Contenuto d'acqua (%)	Frazione ghiaiosa (%)	Frazione sabbiosa (%)	Frazione limosa (%)	Frazione argillosa (%)	Classificazione A.G.I.	LL (%)	LP (%)	IP (-)	Indice di consistenza (-)	Attività (-)	Modulo edometrico (MPa)	c' (°)	φ' (kPa)	c' res (°)	φ' res (kPa)	c' (°)	φ' (kPa)	c _u (kPa)
BH25	Sh1	2.75	UG1b	26.09	14.72	19.03	19.03	0.77	43	100	28.90	0	28	57	15	Limo con sabbia argilloso	30	20	10				0	28					
	Sh2	15.25	UG10	25.60	16.38	19.03	19.95	0.46	31	76	16.50	24	71	0	0	Sabbia ghiaiosa debolm. limosa	nd	np	0				0	36					
BH25	Cr1	23.85	UG10									23	48	23	6	Sabbia limosa ghiaiosa debolm. argillosa													
	Sh3	29.75	UG1b		16.09	20.01					24.20	0	27	58	15	Limo con sabbia argilloso	nd	np	0				4	26					
	Cr2	30.85	UG10									44	36	14	6	Ghiaia con sabbia limosa debolm. argillosa	nd	np	0										
	Cr3	38.85	UG10									29	49	18	4	Sabbia con ghiaia limosa													
BH26	Sh1	4.25	UG10	25.21	15.40	18.84	19.22	0.58	37	89	22.00	0	69	23	8	Sabbia limosa debolm. argillosa				0.83			0	37					
	Cr1	12.73	UG10									41	40	13	6	Ghiaia con sabbia limosa debolm. argillosa													
	Cr2	16.55	UG1b			18.34						1	31	40	28	Limo con sabbia con argilla							0	25					
	Sh2	29.75	UG9	26.19	15.70	19.52	19.63	0.66	40	98	24.80	0	3	52	45	Limo con argilla	55	25	30							25	24		
BH28	Sh1	3.45	UG1b	26.39	15.11	19.23	19.30	0.73	42	98	27.20	0	20	65	15	Limo sabbioso argilloso	28	20	8				0	27					
	Cr1	9.23	UG10	26.78								7	74	16	3	Sabbia limosa debolm. ghiaiosa													
	Sh2	18.25	UG9	26.39	16.09	19.82	19.92	0.62	38	97	22.90	0	5	70	25	Limo argilloso	35	18	17							12	28		
	Cr2	29.35	UG10	26.88								42	29	20	9	Ghiaia con sabbia limosa debolm. argillosa				0.11									
	Sh3	34.25	UG9	26.29	15.60	19.23	19.59	0.64	39	91	23.50	1	12	55	32	Limo con argilla sabbioso	39	20	19				4	28				82	
	Cr3	37.23	UG9	25.41								1	7	40	52	Argilla con limo debolm. sabbiosa	49	21	28										
	Sh4	39.75	UG9	26.39	16.48	20.21	20.21	0.60	38	100	22.30	0	5	72	23	Limo argilloso debolm. sabbioso	30	21	9									70	
	Cr4	42.75	UG10	27.27								46	34	14	6	Ghiaia con sabbia limosa debolm. argillosa													
BH29	Sh1	9.75	UG9	26.49	14.42	18.93	18.93	0.83	45	100	30.80	4	7	40	49	Argilla con limo debolm. sabbiosa	67	31	36									72	
	Cr1	18.75	UG10									36	31	24	9	Ghiaia con sabbia limosa debolm. argillosa													
	Sh2	23.25	UG9	26.39	15.60	19.52	19.61	0.67	40	97	25.00	1	8	63	28	Limo con argilla debolm. sabbioso	41	22	19										
	Sh3	26.55	UG9	26.29	14.91	19.13	19.16	0.75	43	99	28.10	0	24	49	27	Limo con argilla sabbioso	35	18	17							0	26	94	
	Sh4	40.75	UG9	26.00	15.50	19.52	19.52	0.69	41	100	26.00	0	4	44	52	Argilla con limo	52	22	30	1.01								127	
BH30	Sh1	3.25	UG1b	26.00	15.70	19.62	19.62	0.65	40	100	24.70	0	15	67	18	Limo argilloso sabbioso	33	20	13	0.10			0	31					

PROGETTAZIONE ATI:

Indagini geognostiche e unità geotecniche				Proprietà indici								Composizione granulometrica e classificazione					Limiti di Atterberg					Prova CD e RS				Prova TxCU		Prova TxUU			
Sondaggio	Campione	Prof. media del campione (m)	Unità geotecnica	Peso dell' unità di volume parte solida	Peso dell' unità di volume secco	Peso dell' unità di volume naturale	Peso dell' unità di volume saturo	Indice dei vuoti	Porosità	Grado di saturazione	Contenuto d'acqua	Frazione ghiaiosa	Frazione sabbiosa	Frazione limosa	Frazione argillosa	Classificazione A.G.I.	LL	LP	IP	Indice di consistenza	Attività	Modulo edometrico (MPa)	c'	φ'	c' res	φ' res	c'	φ'	c _u		
				(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(-)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)	(%)	(-)		(-)	(-)	(-)	(-)	(°)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
BH30	Cr1	7.23	UG10	26.39								38	33	21	8	Ghiaia con sabbia limosa debolm. argillosa															
	Sh2	12.75	UG9	26.00	13.24	18.05	18.05	0.96	49	100	36.10	0	7	54	39	Limo con argilla debolm. sabbioso	55	25	30	0.71										49	
	Cr2	14.93	UG10	26.59									52	33	12	3	Ghiaia con sabbia limosa														
	Cr3	18.93	UG1b	26.49									0	13	69	18	Limo argilloso sabbioso	32	23	9	0.82										
	Cr4	22.23	UG10	25.51									23	54	16	7	Sabbia ghiaiosa limosa debolm. argillosa														
	Sh3	24.25	UG9	26.19	14.81	18.84	19.07	0.71	42	93	26.50	0	11	61	28	Limo con argilla sabbioso	35	22	13	0.86							0	29			
	Sh4	28.75	UG9	25.80	13.34	18.05	18.08	0.93	48	100	35.50	0	3	52	45	Limo con argilla	54	22	32				0	21							
	Sh5	34.25	UG9	26.00	15.40	19.23	19.40	0.66	40	96	24.80	2	9	58	31	Limo con argilla debolm. sabbioso	45	21	24	1.01							15	25			
	Cr5	38.23	UG10	26.09									28	50	17	5	Sabbia con ghiaia limosa	nd	np	0											
BH31	Sh1	3.25	UG1b	26.00	15.11	18.93	19.22	0.67	40	93	25.20	1	5	63	31	Limo con argilla debolm. sabbioso	47	26	21	0.84											
	Sh2	7.75	UG9	26.39	16.58	20.31	20.31	0.60	38	100	22.50	0	29	52	19	Limo con sabbia argilloso	30	19	11	0.41											
	Sh3	18.55	UG10	26.29	15.60	19.33	19.59	0.66	40	95	24.50	28	28	32	12	Limo con ghiaia con sabbia argilloso	25	17	8	0.87			0	29							
	Sh4	24.25	UG9	25.41	15.99	19.52	19.63	0.58	37	98	22.30	0	17	57	26	Limo con argilla sabbioso	31	17	14	0.64									54		
	Sh5	34.75	UG9	25.90	15.50	19.52	19.52	0.67	40	100	25.40	19	14	35	32	Limo con argilla ghiaioso sabbioso	44	18	26				0	29							
BH32	Sh1	3.25	UG1b	26.39	15.60	19.52	19.61	0.67	40	97	24.70	0	6	71	23	Limo argilloso debolm. sabbioso	37	23	14	0.63			0	25							
	Sh2	6.25	UG1b	26.09	13.83	18.44	18.44	0.90	47	100	33.70	1	25	55	19	Limo con sabbia argilloso	36	22	14				0	27							
	Sh3	13.25	UG9	26.00	13.05	17.66	17.92			94	35.00	0	24	45	31	Limo con argilla sabbioso	42	20	22										73		
	Sh4	26.25	UG1b	25.80	16.19	19.91	19.91	0.60	37	100	22.70	0	21	47	32	Limo con argilla sabbioso	35	22	13				0	28							
	Sh5	33.25	UG9	26.29	15.70	19.23	19.66	0.62	38	90	22.60	0	7	61	32	Limo con argilla debolm. sabbioso	38	21	17	0.65							11	26			
	Cr1	36.23	UG9	25.80									2	14	47	37	Limo con argilla sabbioso				0.58										
CAMPAGNA INDAGINI 2011																															
S01	Sh1	7.70	UG3	26.39	17.82	20.36	22.23	0.51	33.77	75	14.26	46	36	16	2	Ghiaia con sabbia limosa															
S05	Sh1	6.43	UG8	26.49	14.49	18.04	19.85	0.86	46.24	77	24.43	0	16	66	18	Limo argilloso sabbioso	46	27	19	1.14											
S05	Sh2	13.75	UG8	26.39	15.90	19.25	20.50	0.69	40.92	82	21.10	0	21	57	22	Limo argilloso sabbioso	48	26	22	1.22											

PROGETTAZIONE ATI:

Indagini geognostiche e unità geotecniche				Proprietà indici								Composizione granulometrica e classificazione					Limiti di Atterberg					Prova CD e RS				Prova TxCU		Prova TxUU			
Sondaggio	Campione	Prof. media del campione (m)	Unità geotecnica	Peso dell' unità di volume parte solida (kN/m ³)	Peso dell' unità di volume secco (kN/m ³)	Peso dell' unità di volume naturale (kN/m ³)	Peso dell' unità di volume saturo (kN/m ³)	Indice dei vuoti (-)	Porosità (%)	Grado di saturazione (%)	Contenuto d'acqua (%)	Frazione ghiaiosa (%)	Frazione sabbiosa (%)	Frazione limosa (%)	Frazione argillosa (%)	Classificazione A.G.I.	LL (%)	LP (%)	IP (-)	Indice di consistenza (-)	Attività (-)	Modulo edometrico (MPa)	c' (°)	φ' (kPa)	c' _{res} (°)	φ' _{res} (kPa)	c' (°)	φ' (kPa)	c _u (kPa)		
S06	Sh1	73.45	UG8	26.29	17.58	20.60	21.28	0.52	34.30	88	17.18	0	44	38	18	Sabbia con limo argillosa	34	20	14	1.20											

PROGETTAZIONE ATI:

RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO SU CAMPIONI LITOIDI

Tabella 2 Sintesi dei risultati delle prove di laboratorio eseguite

Indagini geognostiche e unità geotecniche				Prova DC		Prova PLT					
Sondaggio	Campione	Prof. media del campione (m)	Unità geotecnica	Massa volumica (kN/m ³)	Resistenza a compressione uniassile (MPa)	Modulo di Young tangente (GPa)	Modulo di Young secante (GPa)	Rapporto di Poisson tangente (-)	Rapporto di Poisson tangente (-)	Indice di resistenza al punzonamento (MPa)	Resistenza a compressione uniassile (MPa)
CAMPAGNA INDAGINI 2022-24											
BH02	CI1	19.85	UG4	27.30	70.21						
	CI2	23.15	UG4	25.80	13.03						
	CI3	26.30	UG4	26.30	38.90	9.892		0.48			
	CI4	31.15	UG4	24.70						0.50	9.50
BH03	CI1	19.35	UG4	25.80	33.24						
	CI2	22.35	UG4	24.60						0.56	10.64
	CI3	25.15	UG4	26.10	19.30						
BH07	CI1	17.15	UG4	25.80						2.16	41.04
BH09	CI1	21.85	UG4		12.65					1.03	19.57
CAMPAGNA INDAGINI 2011											
S03	CI1a	30.20	UG4	25.06	22.81						
	CI1b	30.40	UG4	25.07	26.29						
	CI2	32.50	UG4								
	CI3	37.50	UG4								

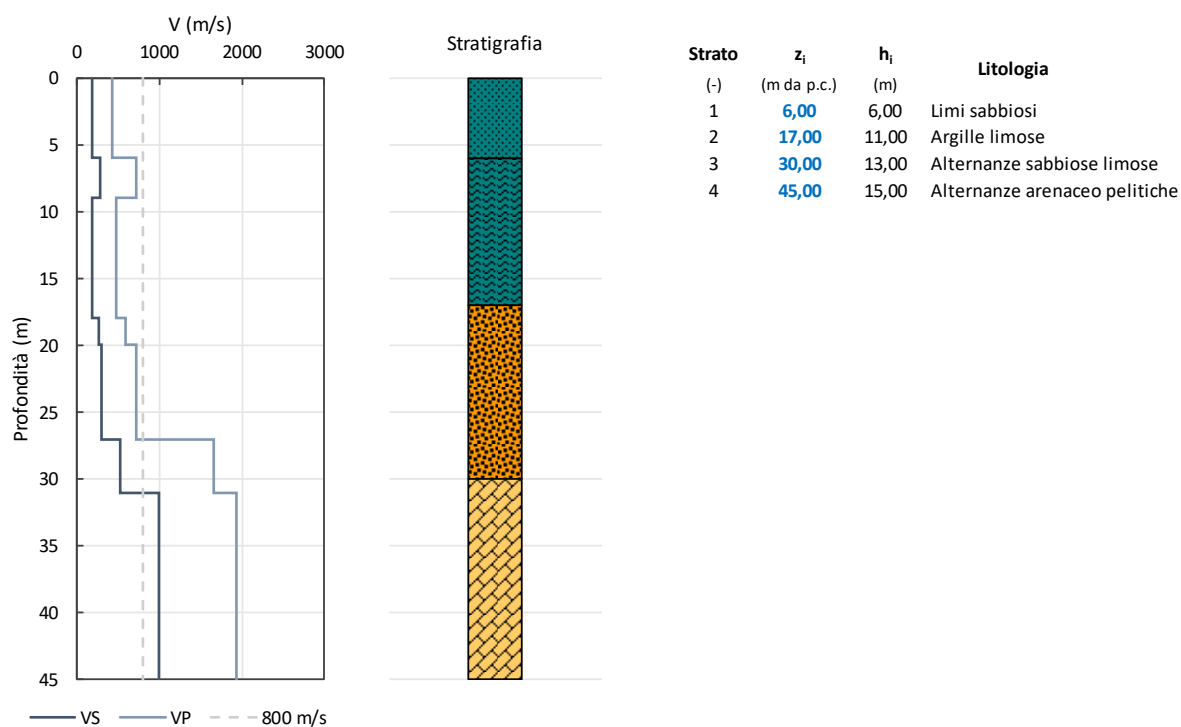
PROGETTAZIONE ATI:

ALLEGATO B

RISULTATI INDAGINI GEOFISICHE

Sondaggio BH01 Dh

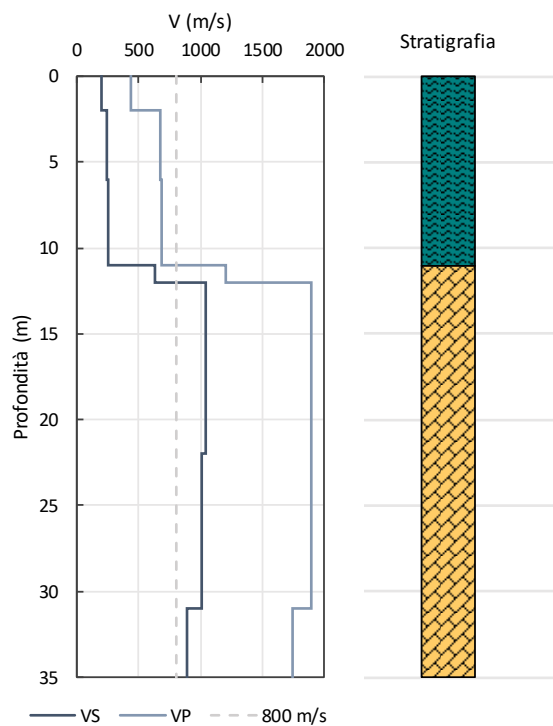
Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	V _{s,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	6,00	6,00	188	434	230	31,0	C
2	9,00	3,00	279	714			
3	18,00	9,00	177	476			
4	20,00	2,00	258	586			
5	27,00	7,00	298	713			
6	31,00	4,00	522	1661			
7	45,00	14,00	993	1931			



PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio BH03 Dh

Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	V _{S,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	2,00	2,00	194	438	248	12,0	E
2	6,00	4,00	244	673			
3	11,00	5,00	248	684			
4	12,00	1,00	625	1198			
5	22,00	10,00	1045	1895			
6	31,00	9,00	1010	1898			
7	35,00	4,00	887	1743			

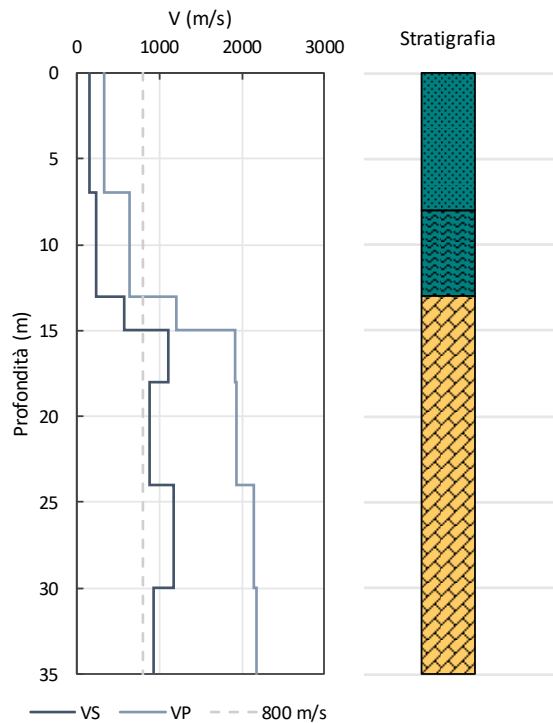


Strato (-)	z _i (m da p.c.)	h _i (m)	Litologia
1	11,00	11,00	Limi sabbiosi e argillosi
2	35,00	24,00	Alternanze arenaceo pelitiche

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio BH07 Dh

Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	V _{S,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	7.00	7.00	154	336	200	15,0	E
2	13.00	6.00	230	634			
3	15.00	2.00	579	1199			
4	18.00	3.00	1103	1915			
5	24.00	6.00	874	1928			
6	30.00	6.00	1170	2136			
7	35.00	5.00	934	2170			

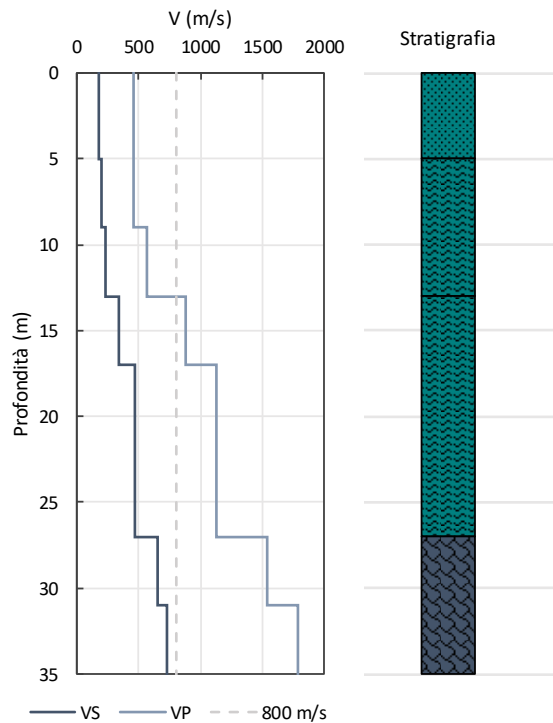


Strato (-)	z _i (m da p.c.)	h _i (m)	Litologia
1	8.00	8.00	Limi sabbiosi e argillosi
2	13.00	5.00	Argille limose
3	35.00	22.00	Alternanze arenaceo pelitiche

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio BH09 Dh

Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	V _{s,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	5.00	5.00	180	457	288	> 30 m	C
2	9.00	4.00	194	452			
3	13.00	4.00	226	565			
4	17.00	4.00	335	874			
5	27.00	10.00	465	1126			
6	31.00	4.00	646	1535			
7	35.00	4.00	724	1781			

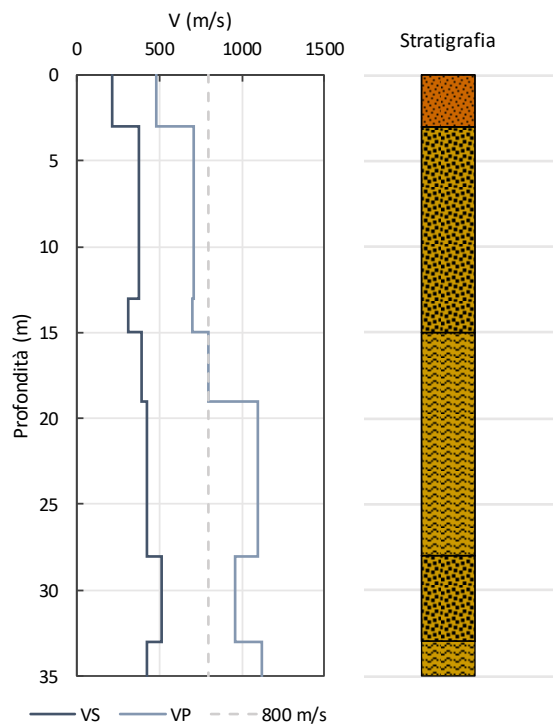


Strato (-)	z _i (m da p.c.)	h _i (m)	Litologia
1	5.00	5.00	Limi sabbiosi e argillosi
2	13.00	8.00	Alternanze argilloso sabbiose
3	27.00	14.00	Argille limose sabbiose consistenti
4	35.00	8.00	Argille marnose

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio BH11 Dh

Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	V _{S,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	3.00	3.00	211	479	363	> 30 m	B
2	13.00	10.00	376	706			
3	15.00	2.00	308	695			
4	19.00	4.00	390	798			
5	28.00	9.00	426	1099			
6	33.00	5.00	509	960			
7	35.00	2.00	421	1121			

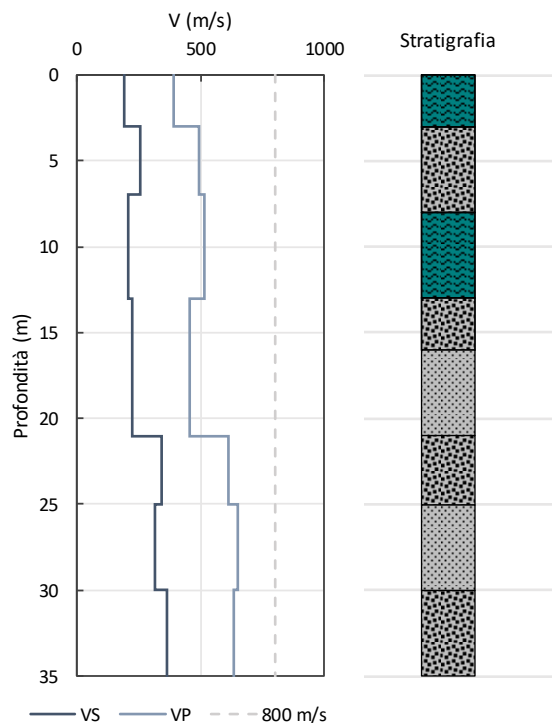


Strato (-)	z _i (m da p.c.)	h _i (m)	Litologia
1	3.00	3.00	Limi sabbiosi e argillosi
2	15.00	12.00	Ghiaie in matrice sabbiosa
3	28.00	13.00	Alternanze argillose sabbiose limose
4	33.00	5.00	Ghiaie in matrice sabbiosa
5	35.00	2.00	Argille sabbiose

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio BH22 Dh

Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	V _{s,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	3.00	3.00	192	388	243	> 30 m	C
2	7.00	4.00	257	495			
3	13.00	6.00	206	515			
4	21.00	8.00	224	456			
5	25.00	4.00	342	614			
6	30.00	5.00	313	652			
7	35.00	5.00	361	636			

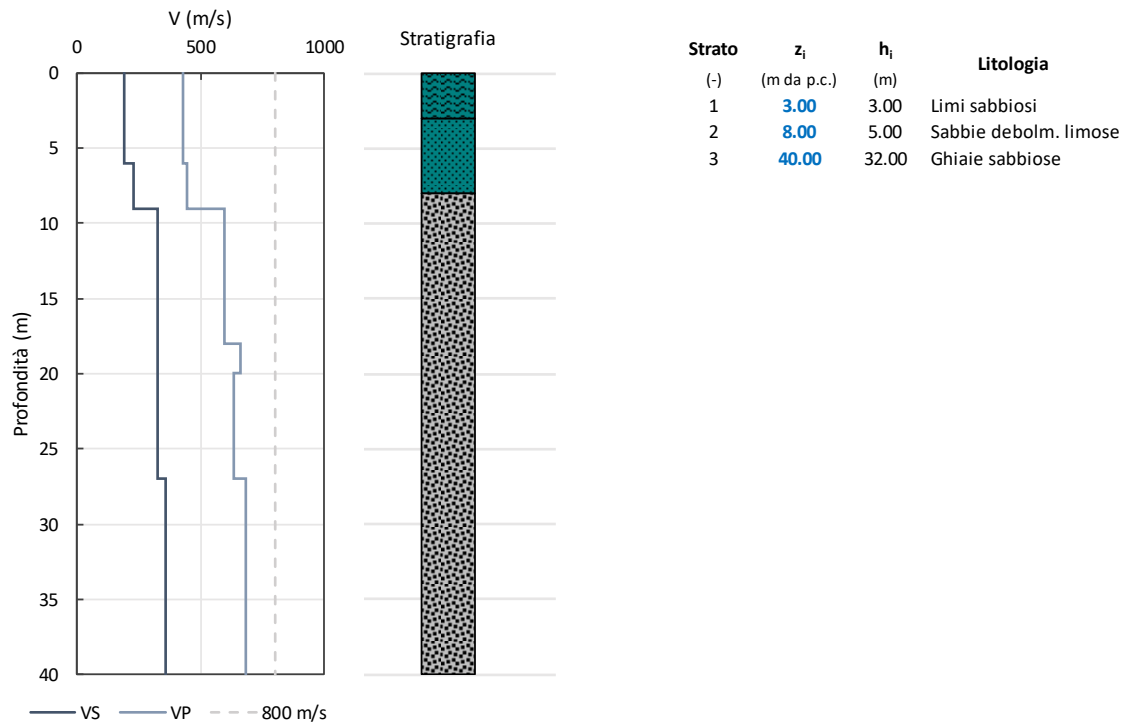


Strato (-)	z _i (m da p.c.)	h _i (m)	Litologia
1	3.00	3.00	Sabbie e sabbie limose
2	8.00	5.00	Ghiaie im matrice sabbiosa
3	13.00	5.00	Argille limose
4	16.00	3.00	Ghiaie im matrice sabbiosa
5	21.00	5.00	Sabbie e sabbie limose
6	25.00	4.00	Ghiaie im matrice sabbiosa
7	30.00	5.00	Sabbie e sabbie limose
8	35.00	5.00	Ghiaie im matrice sabbiosa

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio BH25 Dh

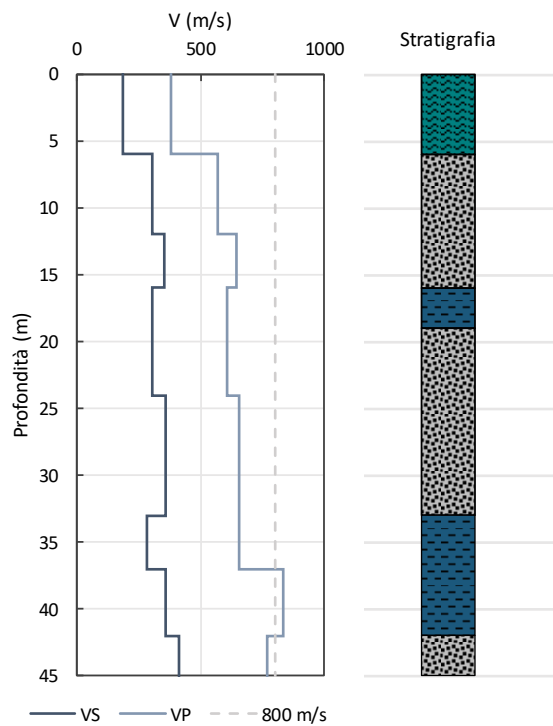
Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	V _{s,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	6.00	6.00	190	428	277	> 30 m	C
2	9.00	3.00	229	444			
3	18.00	9.00	324	594			
4	20.00	2.00	325	659			
5	27.00	7.00	327	636			
6	40.00	13.00	358	682			



PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio BH27 Dh

Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	V _{S,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	6.00	6.00	184	379	281	> 30 m	C
2	12.00	6.00	304	567			
3	16.00	4.00	352	645			
4	24.00	8.00	305	605			
5	33.00	9.00	359	655			
6	37.00	4.00	281	653			
7	42.00	5.00	360	834			
8	45.00	3.00	413	768			

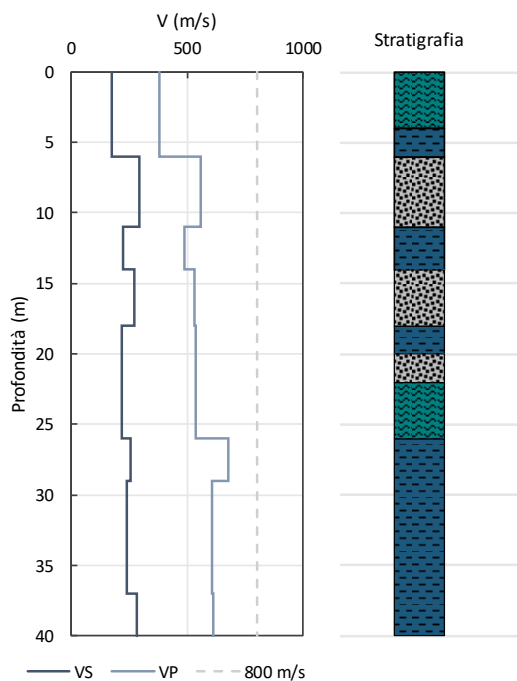


Strato (-)	z _i (m da p.c.)	h _i (m)	Litologia
1	6.00	6.00	Limi sabbiosi e argillosi
2	16.00	10.00	Ghiaie sabbiose
3	19.00	3.00	Argille limose con intercalazioni sabbiose
4	33.00	14.00	Ghiaie sabbiose
5	42.00	9.00	Argille limose con intercalazioni sabbiose
6	45.00	3.00	Ghiaie sabbiose

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio BH30 Dh

Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	V _{s,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	6.00	6.00	177	382	227	> 30 m	C
2	11.00	5.00	291	557			
3	14.00	3.00	224	489			
4	18.00	4.00	273	530			
5	26.00	8.00	217	535			
6	29.00	3.00	256	679			
7	37.00	8.00	240	607			
8	40.00	3.00	282	612			

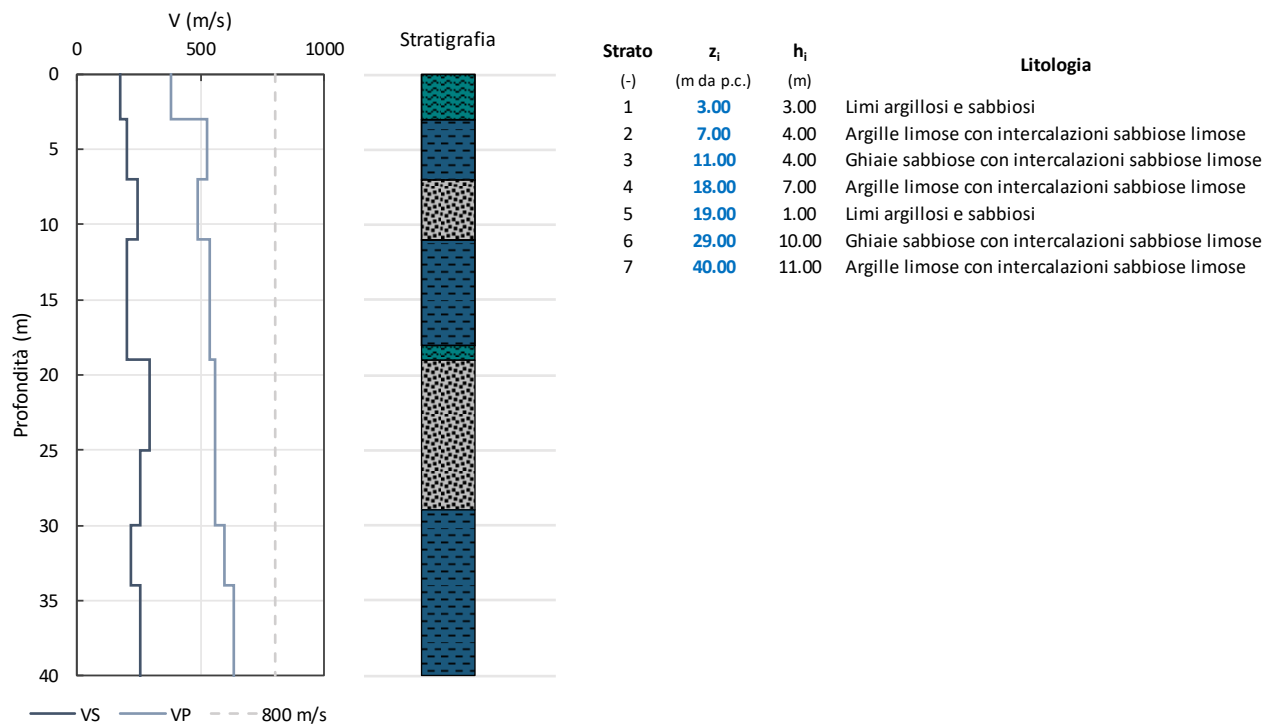


Strato (-)	z _i (m da p.c.)	h _i (m)	Litologia
1	4.00	4.00	Limi argillosi e sabbiosi
2	6.00	2.00	Argille limose con intercalazioni sabbiose
3	11.00	5.00	Ghiaie sabbiose
4	14.00	3.00	Argille limose con intercalazioni sabbiose
5	18.00	4.00	Ghiaie sabbiose
6	20.00	2.00	Argille limose con intercalazioni sabbiose
7	22.00	2.00	Ghiaie sabbiose
8	26.00	4.00	Limi argillosi e sabbiosi
9	40.00	14.00	Argille limose con intercalazioni sabbiose

PROGETTAZIONE ATI:

Sondaggio BH32 Dh

Strato (-)	z (m da p.c.)	h (m)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	V _{S,eq} (m/s)	Z _{bedrock} (m)	Cat. sottosuolo
1	3.00	3.00	174	380	225	> 30 m	C
2	7.00	4.00	201	527			
3	11.00	4.00	247	490			
4	19.00	8.00	202	536			
5	25.00	6.00	292	556			
6	30.00	5.00	255	558			
7	34.00	4.00	220	596			
8	40.00	6.00	255	633			

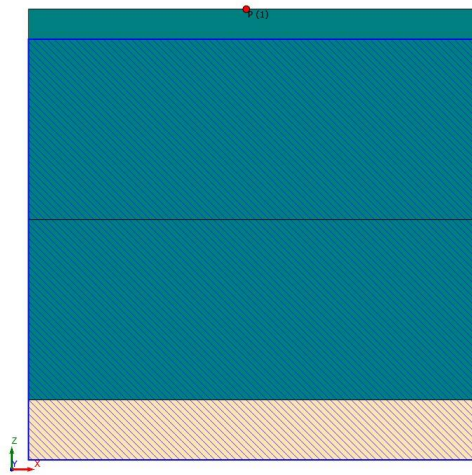


PROGETTAZIONE ATI:

ALLEGATO C

RELAZIONE DI CALCOLO

VERIFICA DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE



Oggetto: Verticale di indagine sondaggio BH07 Dh

Sommario

1 - Metodo di calcolo adottato e descrizione del codice di calcolo LSR 2D	3
1.1 - Metodo lineare equivalente.....	3
1.2 - Soluzione alla singola iterazione mediante FEM.....	5
1.2.1 - Smorzamento	6
1.2.2 - Free-field boundaries	6
1.3 - Procedimento iterativo	7
1.4 - Interpretazione dei risultati	8
1.5 - Valutazione dell'incremento delle pressioni interstiziali	8
1.5.1 - Premessa	8
1.5.2 - Approccio numerico	8
2 - Input	11
2.1 - Curve di Decadimento dei Materiali	11
2.2 - Curve di Resistenza al Taglio e Rapporto di sovrappressione interstiziale	12
2.3 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati.....	15
2.4 - Accelerogrammi e Spettri di Input	16
2.5 - Modello di Calcolo FEM.....	24
3 - Output	28
3.1 - Accelerogrammi Output.....	28
3.2 - Spettri Output	31
3.3 - Interpretazione dei risultati	34
3.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL	35
3.5 - Incremento sovrappressioni interstiziali	37

1 - Metodo di calcolo adottato e descrizione del codice di calcolo LSR 2D

Il codice di calcolo LSR 2d, alla stregua di software ben noti dalla comunità scientifica (es. QUAD4 e QUAD4M), consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Qualora la stratigrafia in esame non presenti problematiche di carattere bidimensionale è comunque possibile studiare il problema monodimensionale grazie ad una discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

1.1 - Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Figura 5. La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata $\dot{\gamma}$, secondo la relazione:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$

dove:

- G = Modulo di taglio;
- η = viscosità del mezzo;

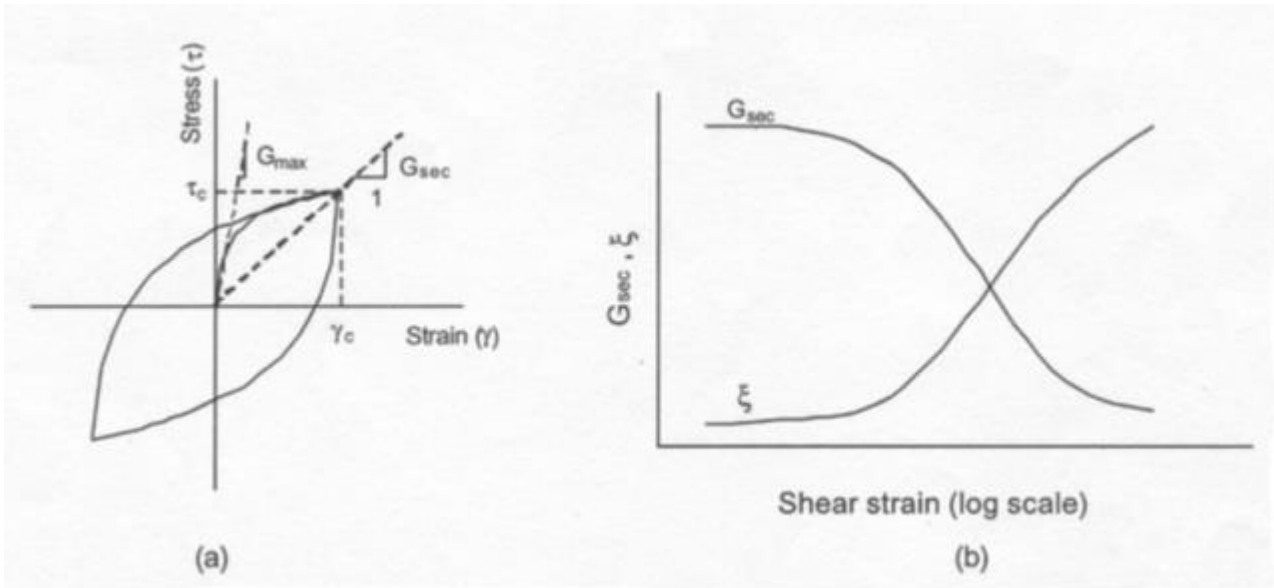


Figura 5. Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Figura 5. Il modulo di taglio equivalente, G , è preso considerando il modulo di taglio secante G_s .

È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

La curva $G_s - \gamma$ non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva $\tau - \gamma$ e sussiste la seguente relazione:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma} \gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento D , definito come:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$

dove:

- ΔW^{dissp} = quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- W^{max} = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico;

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento (Figura 5b).

1.2 - Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell' i-esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (Figura 6) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

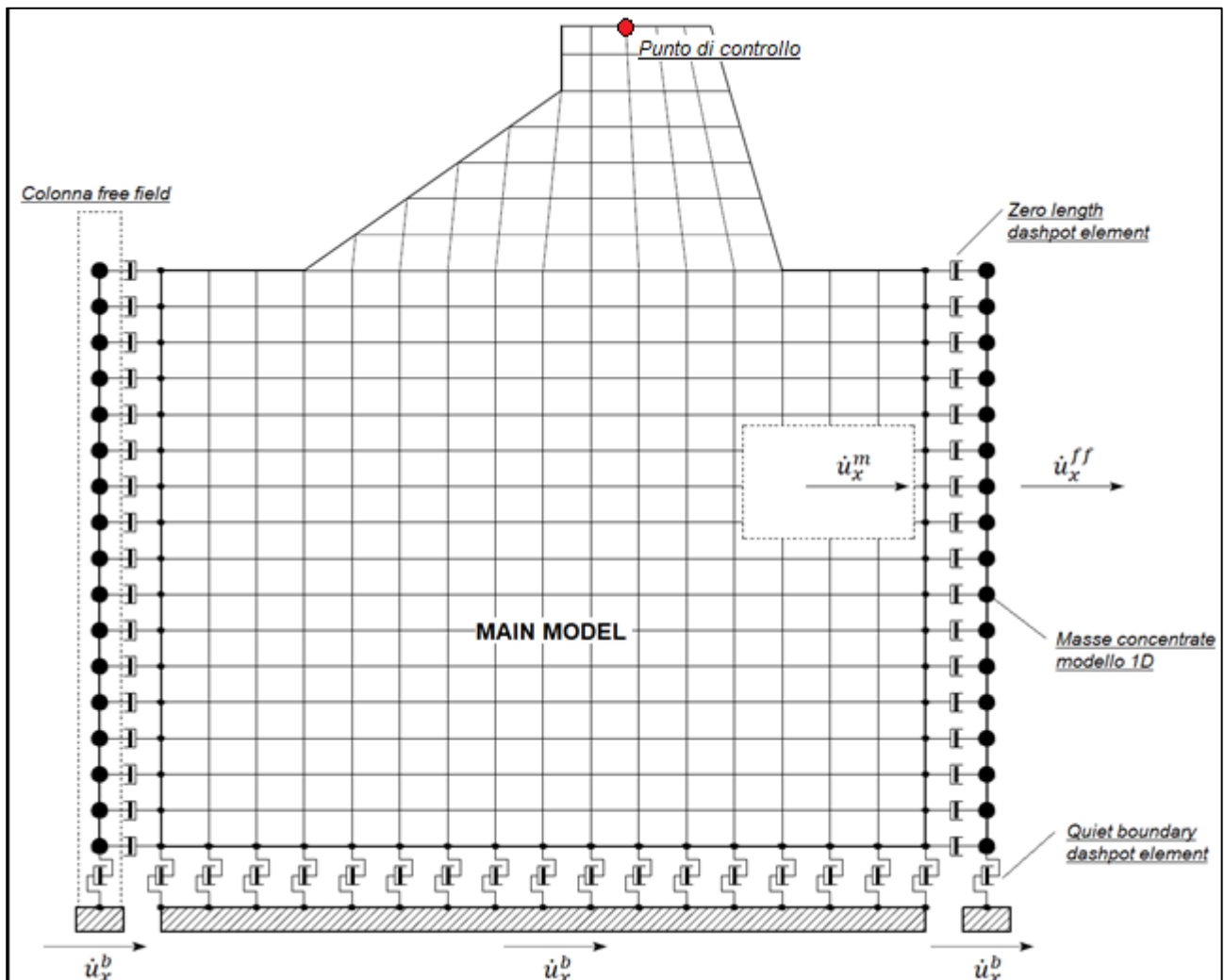


Figura 6. Discretizzazione FEM del deposito di terreno.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g$$

dove:

- M = matrice di massa del sistema;
- C = matrice di smorzamento del sistema;
- K = matrice di rigidità del sistema;
- \ddot{u}, \dot{u}, u = rispettivamente vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;
- a_g = vettore di accelerazione alla base;

Tale equazione vale per ogni istante di tempo tn e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni tn viene ottenuta a partire dalle seguenti relazioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

dove:

- Δt = incremento temporale tra l'istante di tempo tn e $tn - 1$;
- β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25;
- γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50;

1.2.1 - Smorzamento

La matrice di smorzamento del sistema viene ottenuta mediante l'assemblaggio delle matrici di smorzamento dei singoli elementi, queste ultime ottenute a loro volta come:

$$C_q = \alpha_q M_q + \beta_q K_q$$

dove:

- α_q e β_q = coefficienti di smorzamento alla Reyleigh;

Tali coefficienti vengono ottenuti a partire dal rapporto di smorzamento viscoso del singolo elemento e dalla relazione seguente:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t [(1 - \gamma) \ddot{u}_{n-1} + \gamma \ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t \dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - \beta) \ddot{u}_{n-1} + 2\beta \ddot{u}_n]$$

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

$$D_q = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_q}{\omega} + \beta_q \omega \right)$$

dove:

- ω_1 = frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega_2 = n * \omega_1$ con $n = \omega_i / \omega_1$ (approssimato all'intero pari più grande) e ω_i frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

1.2.2 - Free-field boundaries

Le condizioni di free-field sulle frontiere laterali vengono implementate mediante l'accoppiamento di smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne free-field) in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero. Le coordinate dei nodi delle frontiere laterali del modello e delle colonne free-field possono essere uguali. È necessario, affinché tali condizioni al contorno siano applicabili, che le frontiere

lateralmente del modello siano perfettamente verticali. Le forze interne agli smorzatori possono essere ottenute mediante le seguenti equazioni:

$$F_x = -\rho V_p (\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff}) A \quad (1)$$

$$F_y = -\rho V_s (\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff}) A \quad (2)$$

dove:

- ρ : densità di massa del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- V_p : velocità delle onde P del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- V_s : velocità delle onde S del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- A : area di influenza relativa al nodo su cui agisce lo smorzatore;
- \dot{u}_x^m : velocità del nodo del modello in direzione x;
- \dot{u}_y^m : velocità del nodo del modello in direzione y;
- \dot{u}_x^{ff} : velocità del nodo della colonna free-field in direzione x;
- \dot{u}_y^{ff} : velocità del nodo della colonna free-field in direzione y.

Le componenti della velocità dei nodi delle colonne laterali ad ogni istante di tempo vengono ottenute mediante una soluzione numerica monodimensionale a masse concentrate dell'equazione di propagazione delle onde. Tale soluzione è affidata ad un processo di calcolo che opera in parallelo rispetto a quello impiegato per la soluzione del modello principale. In altre parole, per il generico passo di integrazione temporale, vengono dapprima ottenute le componenti delle velocità delle colonne di campo libero attraverso la soluzione 1D, per poi essere convertite in carichi applicati al modello principale mediante le equazioni (1) e (2).

1.3 - Procedimento iterativo

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidità e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Facendo riferimento alla Figura 5, lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico:

- definizione di curve $G = G(\gamma)$ e $D = D(\gamma)$ per i diversi strati;
- inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni (G_0 e D_0);
- calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato (γ_1 , Figura 5);
- aggiornamento dei valori $G_1 = G(\gamma_1)$ e $D_1 = D(\gamma_1)$;
- iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$).

1.4 - Interpretazione dei risultati

Il risultato della procedura iterativa sopradescritta non è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM. Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione in superficie in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica.

1.5 - Valutazione dell'incremento delle pressioni interstiziali

1.5.1 - Premessa

L'accumulo delle pressioni interstiziali in terreni sabbiosi e limosi sollecitati da carichi sismici di media e alta intensità, in terreni sotto falda, può generare l'abbattimento della rigidità e della resistenza del materiale, portandolo ad un cambiamento di stato, da solido a liquido: questo fenomeno prende il nome di **liquefazione**.

Il ruolo dell'accumulo delle pressioni interstiziali nell'innescare del suddetto fenomeno è stato intensamente studiato in letteratura con centinaia di articoli, sin dagli anni settanta. Vari metodi empirici, dunque, sono stati messi a punto per riprodurre la generazione delle sovrappressioni interstiziali sotto carichi ciclici. I primi modelli proposti (Seed and Lee 1966, Seed et al. 1975) si basavano sul concetto di sollecitazione di taglio CSR (cyclic shear ratio), in cui il carico sismico si presentava come una **sollecitazione di taglio ciclica uniforme** ed il potenziale di liquefazione era caratterizzato dall'ampiezza della sollecitazione di taglio ciclica e dal numero di cicli.

I test di laboratorio che meglio simulano l'approccio CSR sono la prova triassiale ciclica, la prova di taglio ciclico a tensioni controllate e la prova di taglio semplice ciclico. I risultati di queste prove sono spesso presentati sotto forma di curve CSR- N_{LIQ} che rappresentano l'andamento della sollecitazione che induce liquefazione in corrispondenza di un certo numero di cicli, dove CSR rappresenta il rapporto tra la tensione di taglio e la pressione efficace di confinamento nelle prove triassiali cicliche, e la pressione verticale efficace nelle prove di taglio semplice ciclico (τ/σ'_{v0}). Inoltre, le indagini di laboratorio hanno dimostrato che lo sviluppo delle sovrappressioni interstiziali non è generato dalle tensioni di taglio ciclico ma dalle corrispondenti deformazioni. Vi sono ricercatori che hanno sviluppato modelli numerici di sovrappressioni interstiziali in funzione dell'accumulo di deformazioni di taglio (Dobry et al. 1985a, Dobry et al. 1985b, Finn and Bhatia 1982, Ivšić 2006) nei quali si usano le curve CSR- N_{LIQ} misurate in laboratorio. La procedura numerica utilizzata e di seguito descritta sfrutta tale approccio.

1.5.2 - Approccio numerico

Nell'approccio alle tensioni totali, le storie temporali irregolari delle tensioni di taglio, sono l'output della RSL, e devono essere convertite in una serie equivalente di cicli a tensione uniforme. Questa procedura consente di confrontare la domanda sismica con la resistenza del terreno ottenuta da prove di laboratorio in cui si usano carichi armonici. Secondo gli studi presentati da Seed et al. (1975), la storia irregolare delle tensioni di taglio indotte da un accelerogramma, può essere trasformata in una storia regolare di cicli equivalenti, N_{eq} , aventi un'ampiezza pari al 65% della

tensione di taglio max: $\tau_{eq} = 0.65 \tau_{max}$. Quindi, per il calcolo del rapporto delle pressioni interstiziali, Seed et al. (1975) propongono la seguente relazione:

$$r_u = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[2 \left(\frac{N}{N_L} \right)^{1/\beta} - 1 \right]$$

dove:

- r_u : pressioni interstiziali residue normalizzate rispetto alla tensione iniziale efficace di confinamento;
- N : numero di cicli equivalenti;
- N_L : numero di cicli necessari per generare liquefazione;
- β : parametro empirico.

Quest'ultimo può essere calcolato mediante la seguente equazione proposta da Polito et al. (2008):

$$\beta = c_1 FC + c_2 D_r + c_3 CSR + c_4$$

dove per frazione di fine $FC < 35\%$ i coefficienti della regressione assumono i seguenti valori:

$$c_1 = 0.01166; c_2 = 0.007397; c_3 = 0.01034; c_4 = 0.5058$$

mentre per frazione di fine $FC \geq 35\%$ i coefficienti della regressione assumono questi altri valori:

$$c_1 = 0.002149; c_2 = -0.0009398; c_3 = 1.667; c_4 = 0.4285$$

La densità relativa D_r è espressa in percentuale, mentre il rapporto di tensione di taglio CSR è quello imposto nella prova al triassiale Ciclico (o il valore calcolato con una risposta sismica locale).

La procedura di calcolo automatico prevede l'uso dell'equazione appena illustrata per il calcolo del rapporto di sovrappressione interstiziale r_u ottenendo il valore di N_L da opportune curve di resistenza al taglio ciclico $CSR - N_L$ date da prove di laboratorio ed il valore di N in funzione della storia temporale delle accelerazioni dell'evento sismico che si è analizzato nella risposta sismica locale.

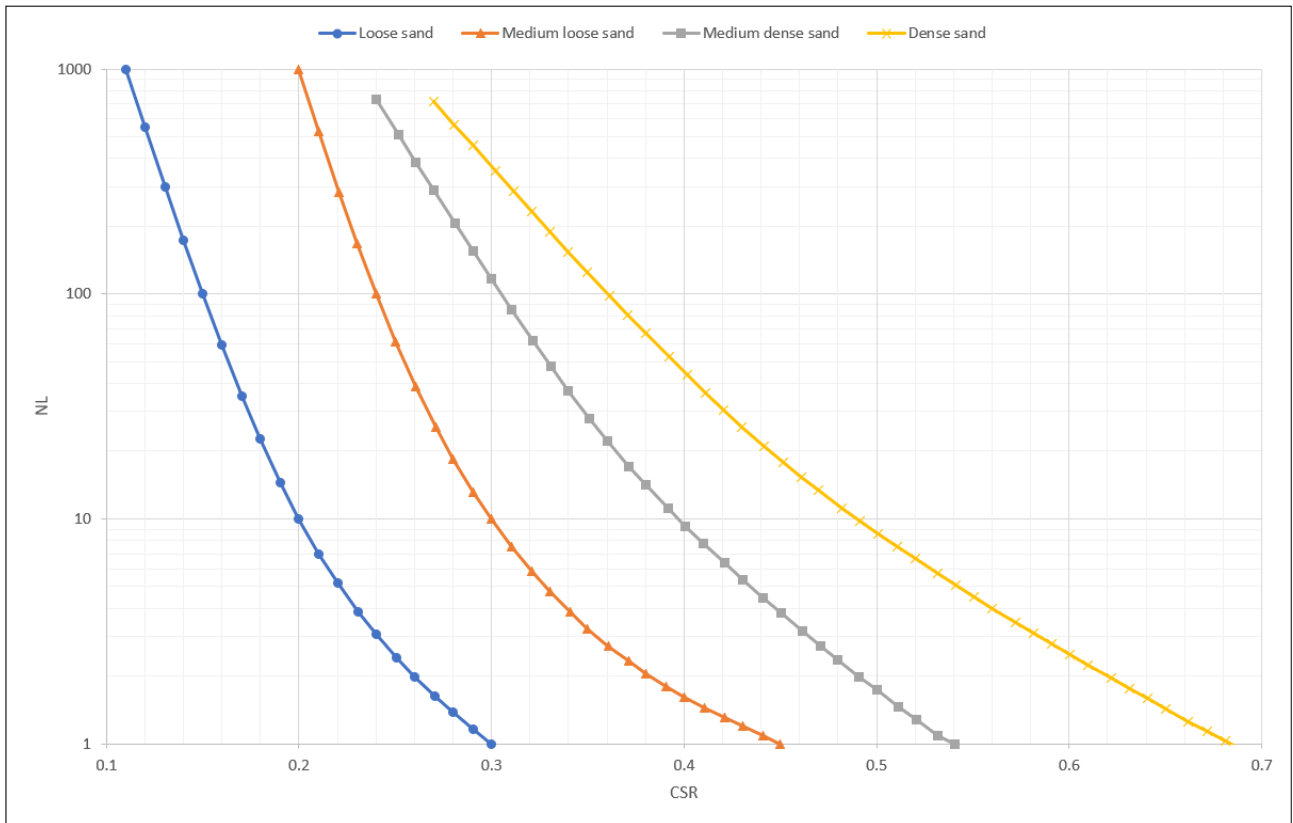


Figura 7. Curve di resistenza al taglio ciclico ottenute da prove di laboratorio.

La determinazione del valore di N viene condotta sfruttando la metodologia proposta in letteratura da Biondi et al. (2012) la quale consente di convertire la storia temporale dell'evento sismico analizzato in un certo numero di cicli equivalenti.

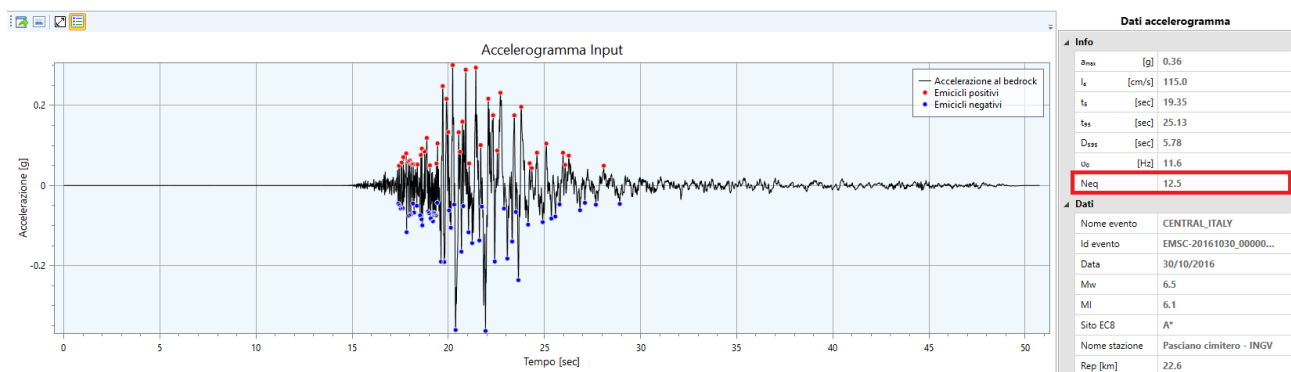


Figura 8. Procedura per la determinazione del numero di cicli equivalenti.

Noti N ed N_L si procede a calcolare il rapporto di sovrappressione interstiziale da cui è possibile ottenere la sovrappressione interstiziale dalla seguente equazione:

$$\Delta u = r_u \sigma_{z,statico}$$

Quando $r_u = 1$, la tensione effettiva di confinamento è pari a 0, condizione per la quale si ha la liquefazione.

2 - Input

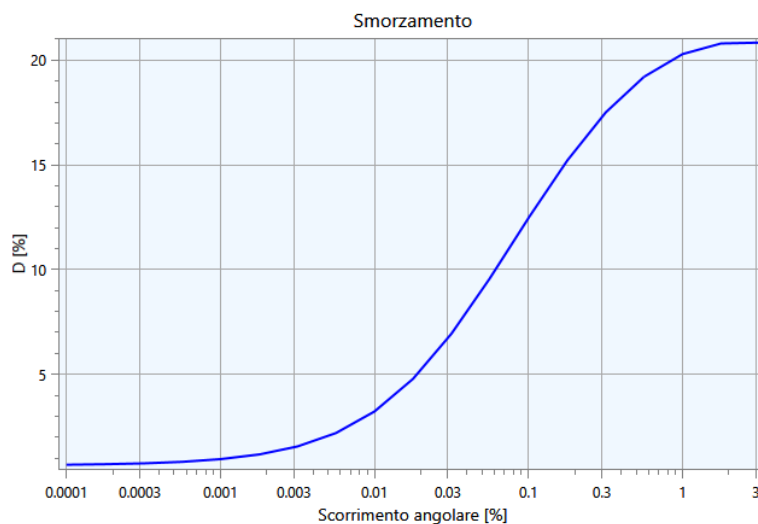
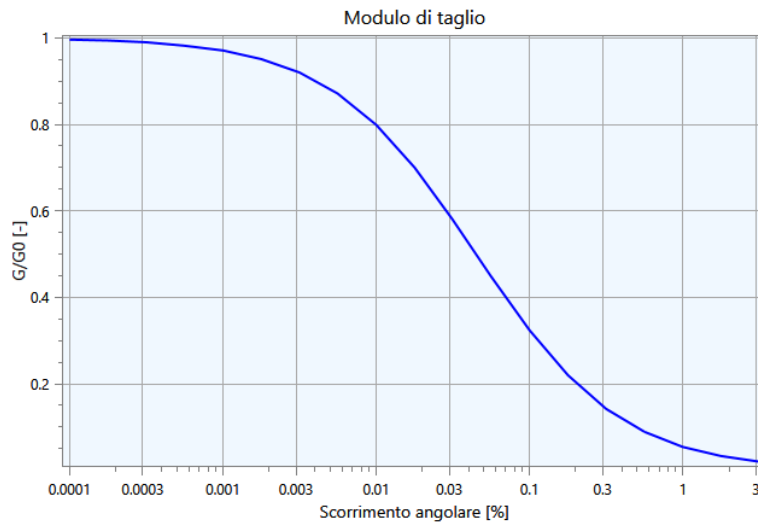
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai dati di input utilizzati per lo studio della risposta sismica locale del deposito.

2.1 - Curve di Decadimento dei Materiali

All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio G ed un aumento del rapporto di smorzamento D . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento una relativa a G ed una D .

Di seguito si riportano le curve di riferimento utilizzate nell'analisi:

Curva n. 1: Darendeli & Stokoe (2001)

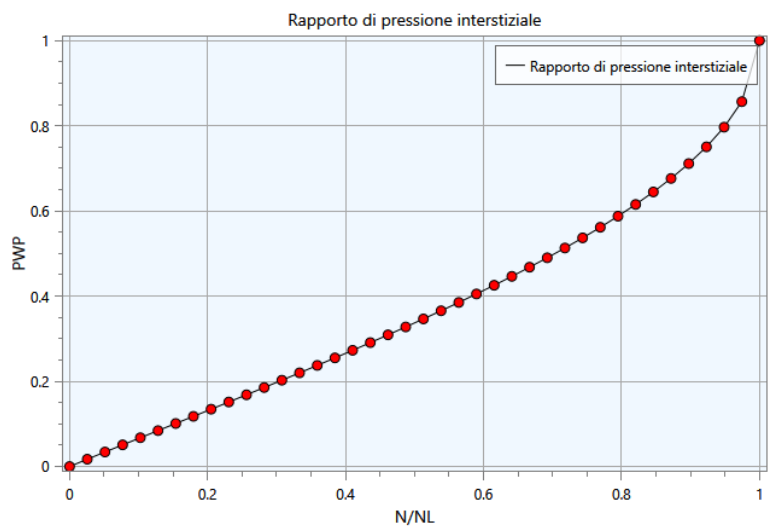
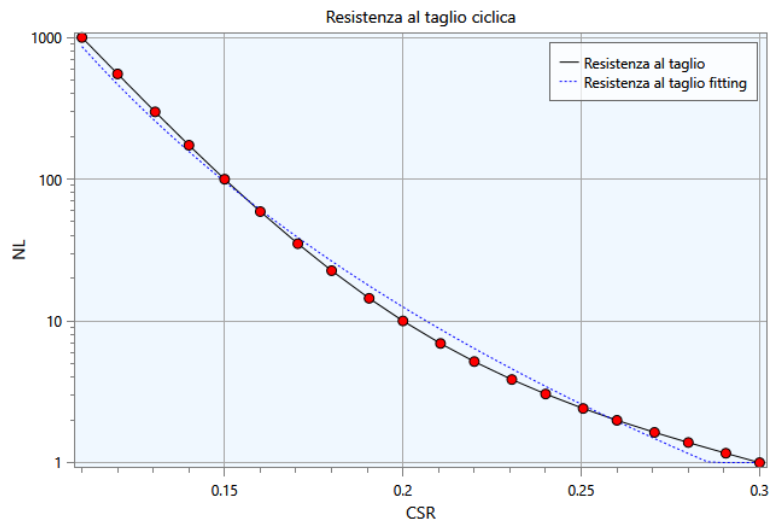


2.2 - Curve di Resistenza al Taglio e Rapporto di sovrappressione interstiziale

Di seguito si riportano le curve di resistenza al taglio utilizzate per modellare la risposta dei singoli litotipi. Queste descrivono il numero di cicli limite N_L in funzione del rapporto di tensione di taglio CSR ed il rapporto di sovrappressione interstiziale r_u in funzione del rapporto $\frac{N}{N_L}$:

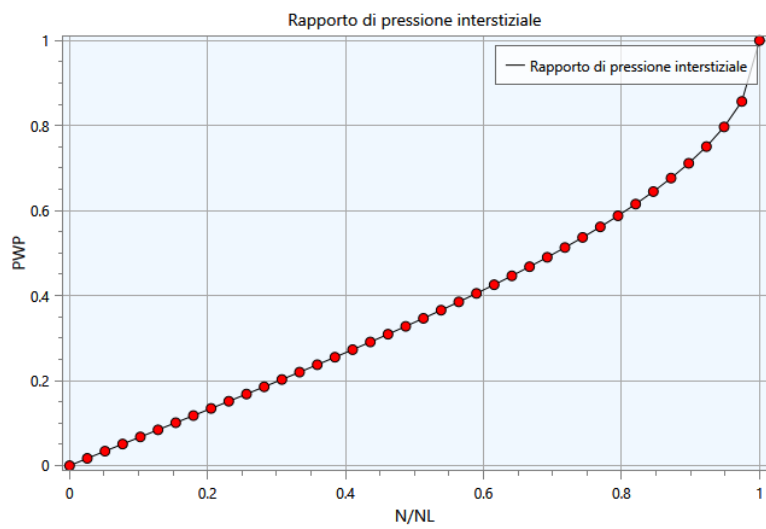
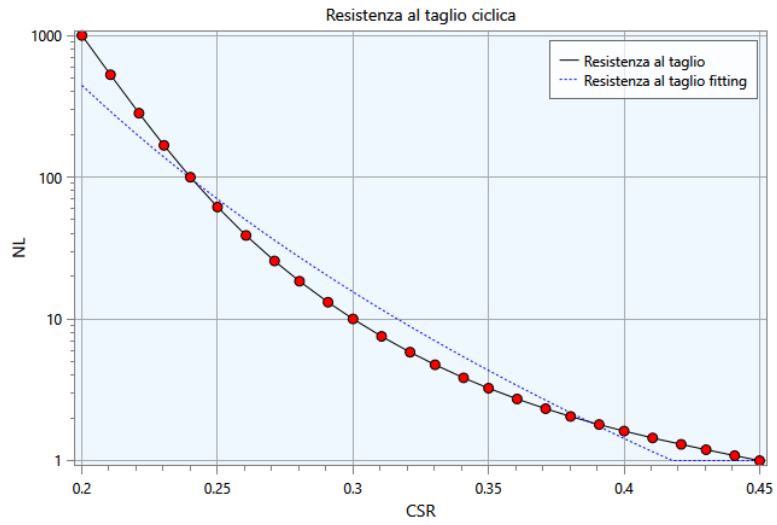
Curva n. 1: Loose sand

Descrizione: Loose sand



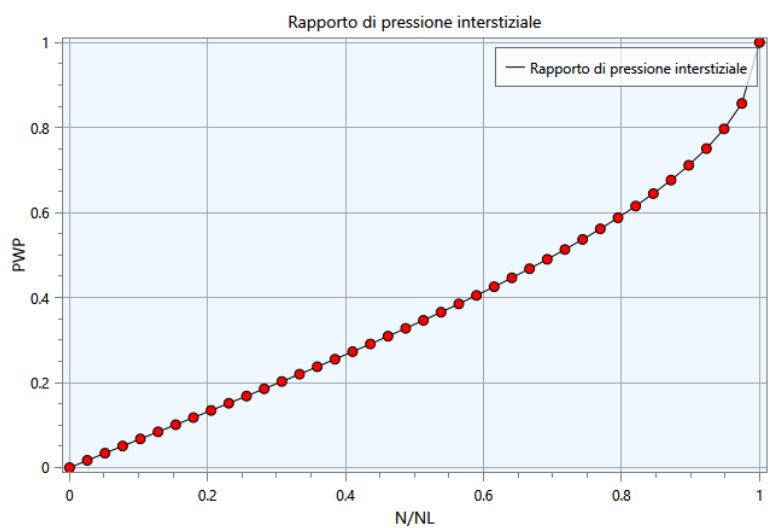
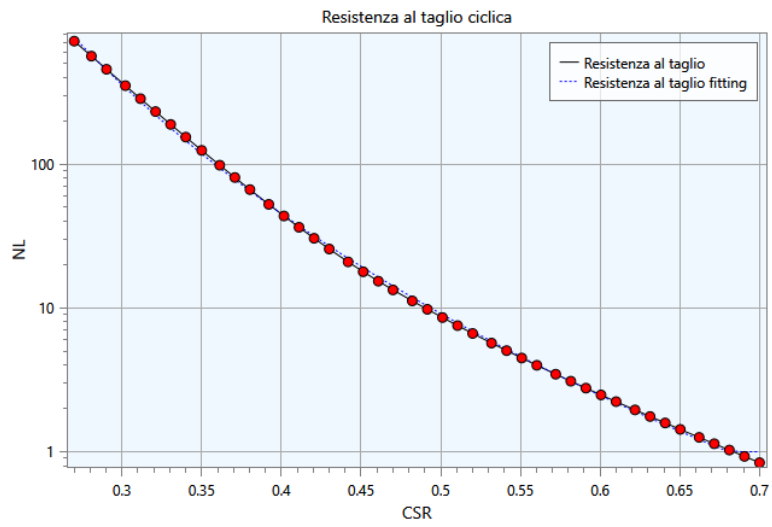
Curva n. 2: Medium loose sand

Descrizione: Medium loose sand



Curva n. 3: Dense sand

Descrizione: Dense sand



2.3 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati

Sulla base del cosiddetto volume significativo di terreno interessato dal problema in esame, viene definita una stratigrafia di progetto che rappresenta l'andamento delle singole lenti di terreno in una sezione verticale.

Tale stratigrafia viene rappresentata nel piano verticale X-Z mediante una serie di spezzate ognuna delle quali identifica l'andamento del singolo strato. La prima di tali spezzate serve ad identificare l'orografia della porzione di sito oggetto di studio. Di seguito si riporta una rappresentazione grafica della stratigrafia di progetto:

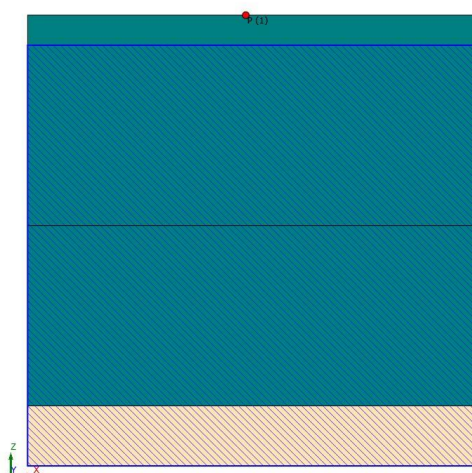


Figura 9. Stratigrafia di progetto.

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

Strato	S [m]	ρ [Kg/m ³]	Vs [m/s]	Curva decadimento
Sabbia limosa	7.00	1950.00	154.00	Darendeli & Stokoe (2001)
Sabbia limosa	6.00	1950.00	230.00	Darendeli & Stokoe (2001)
Alternanze arenaceo-pelitiche	2.00	2000.00	579.00	Darendeli & Stokoe (2001)

Tabella 1. Caratteristiche meccaniche strati.

dove:

- S = spessore del singolo strato;
- ρ = densità di massa del singolo strato;
- Vs = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;

Caratteristiche del bedrock:

- ρ [Kg/m³] : 2200.00
- Vs [m/s] : 1000.00

Caratteristiche della falda:

- Presente : SI
- Profondità [m] : 1.00

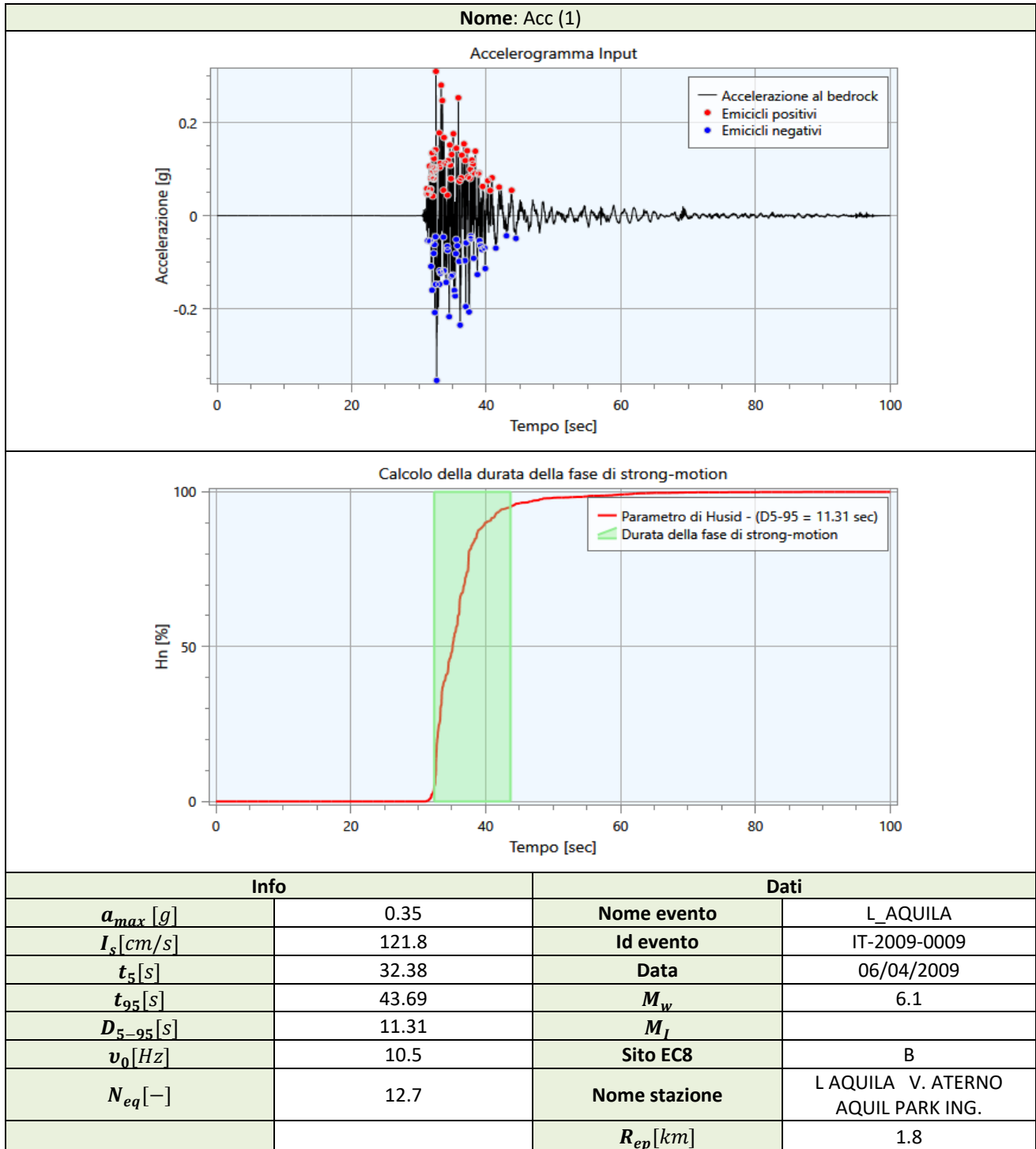
2.4 - Accelerogrammi e Spettri di Input

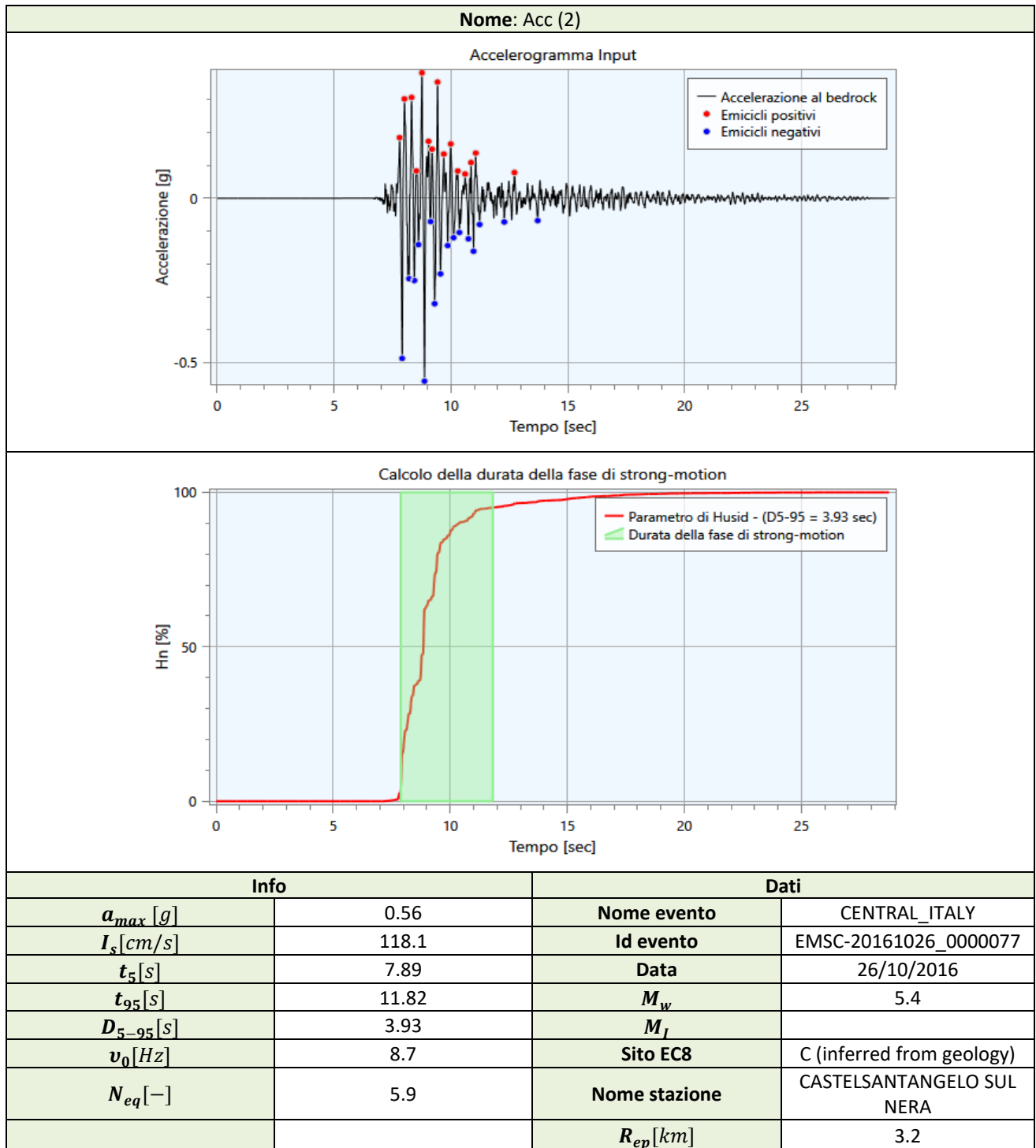
Gli accelerogrammi di input relativi allo stato limite in esame (ad esempio SLV) possono essere ottenuti tramite un'analisi con l'utilizzo dell'applicativo software REXEL v. 3.4 beta, che permette la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018), dell'Eurocodice 8 (EC – CEN 2003), dell'ASCE/SEI 7-10 (ASCE, 2010). Il database utilizzato è l'Italian Accelerometric Archive (ITACA) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), scaricabile dal sito <http://itaca.mi.ingv.it>.

Per ogni accelerogramma viene ottenuto il numero di cicli equivalenti N_{eq} secondo la procedura proposta da Biondi et al. (2012) oltre ad una serie di informazioni di seguito descritte:

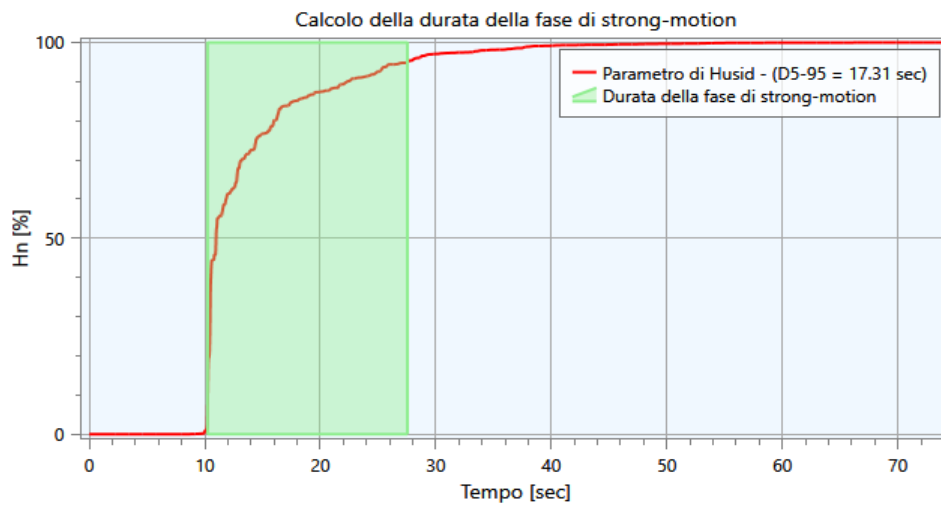
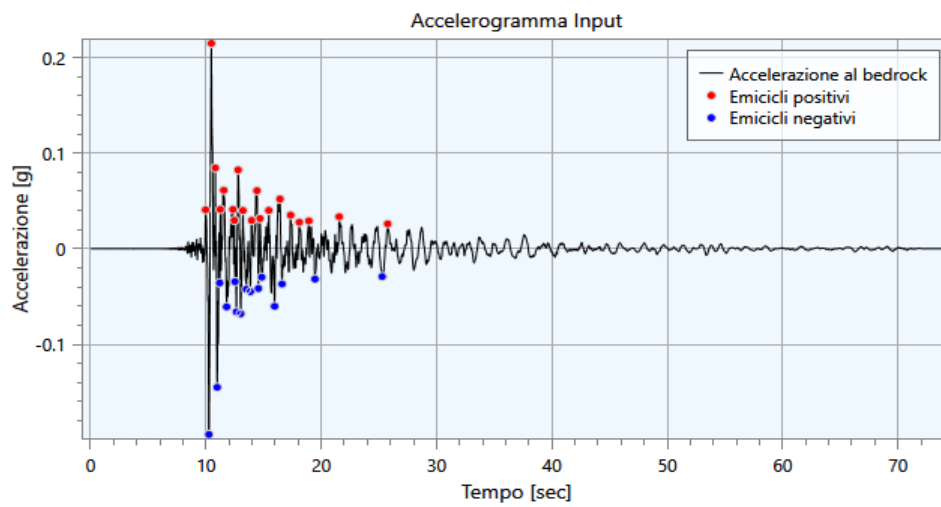
- a_{max} : accelerazione massima;
- I_S : intensità di Arias;
- t_5 : istante iniziale della fase di strong motion;
- t_{95} : istante finale della fase di strong motion;
- D_{5-95} : durata della fase di strong motion;
- v_0 : frequenza di passaggi per lo zero nella fase di strong motion;
- N_{eq} : numero di cicli equivalenti;

Di seguito si riportano gli accelerogrammi di progetto riferiti ad una condizione detta di 'outcrop':

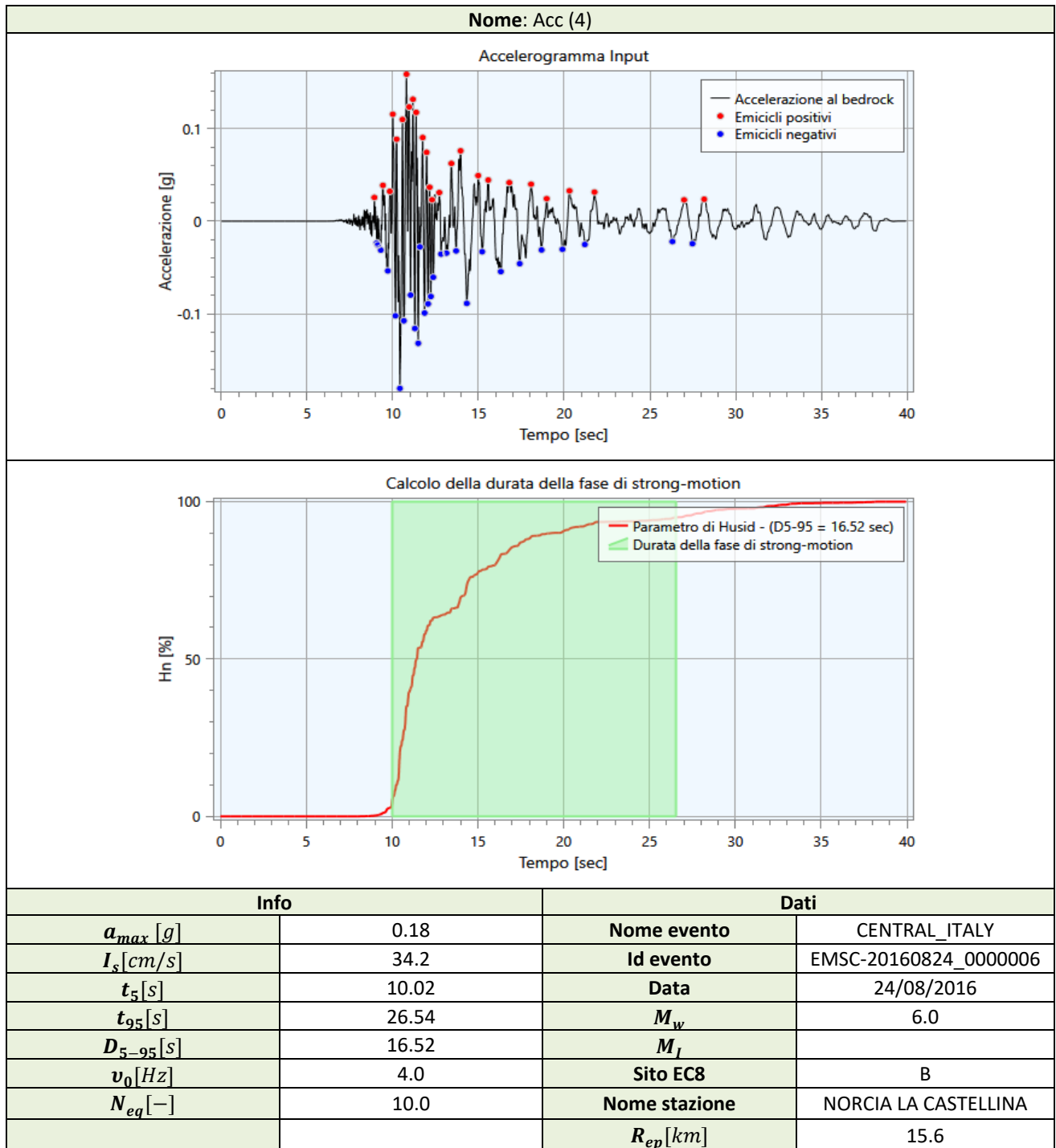




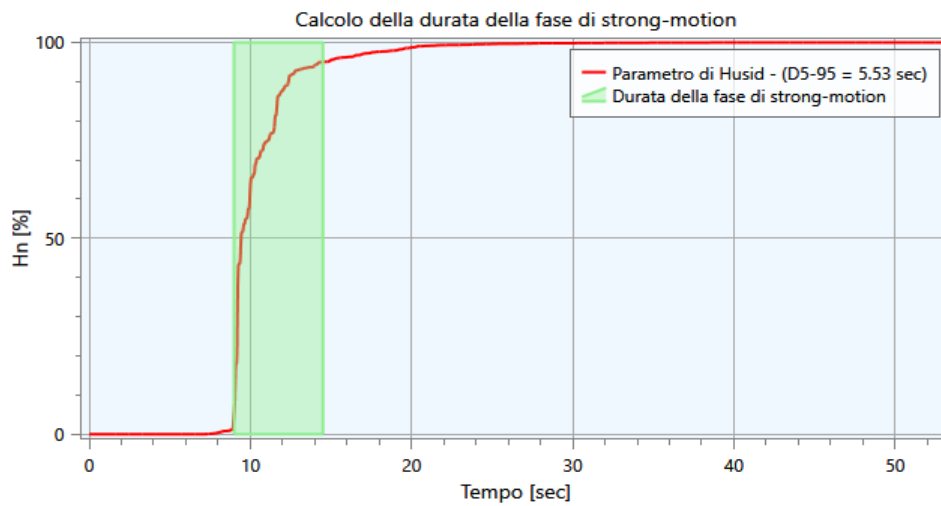
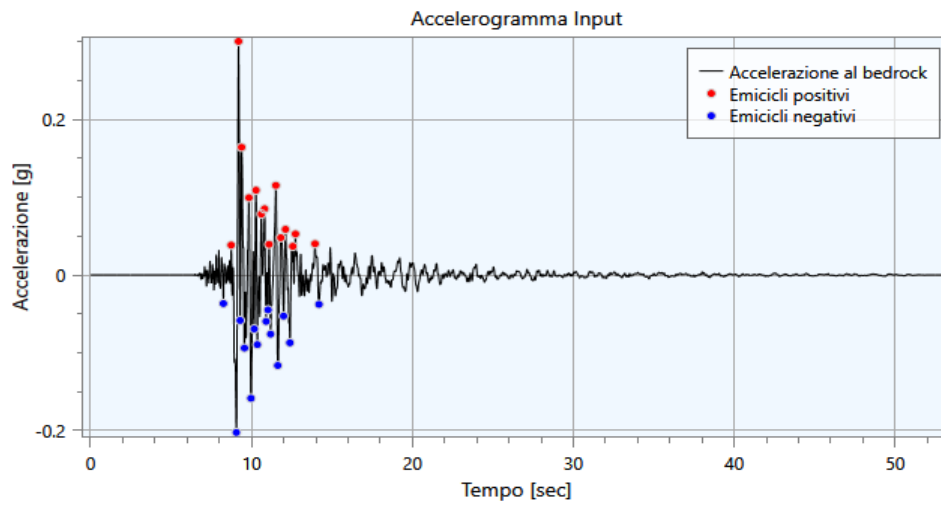
Nome: Acc (3)



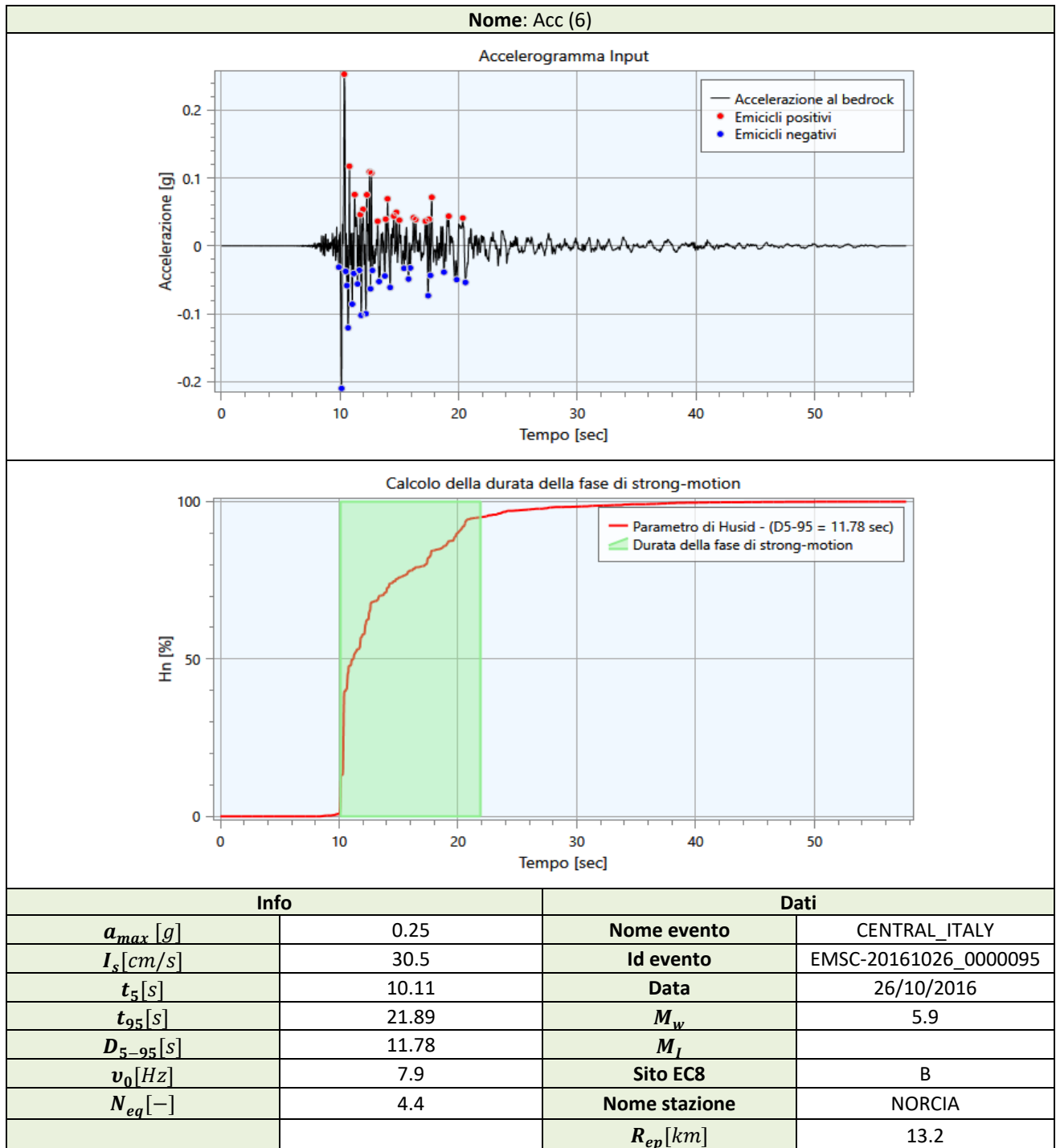
Info		Dati	
a_{max} [g]	0.21	Nome evento	CENTRAL_ITALY
I_s [cm/s]	27.7	Id evento	EMSC-20161026_0000095
t_5 [s]	10.24	Data	26/10/2016
t_{95} [s]	27.55	M_w	5.9
D_{5-95} [s]	17.31	M_I	
v_0 [Hz]	5.7	Sito EC8	B
N_{eq} [-]	4.3	Nome stazione	NORCIA LA CASTELLINA
		R_{ep} [km]	13.3

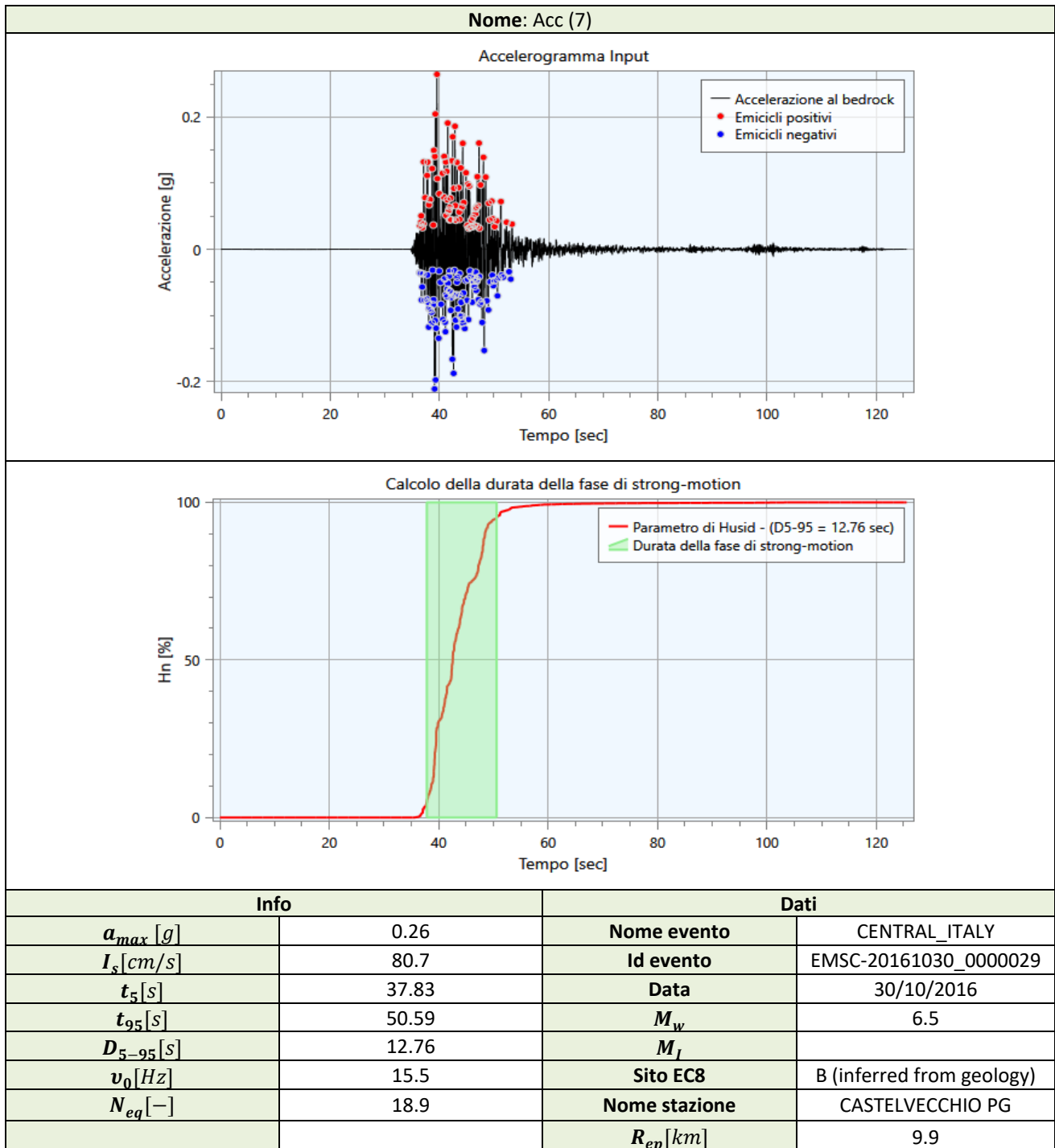


Nome: Acc (5)



Info		Dati	
a_{max} [g]	0.30	Nome evento	CENTRAL_ITALY
I_s [cm/s]	36.6	Id evento	EMSC-20161026_0000077
t_5 [s]	8.98	Data	26/10/2016
t_{95} [s]	14.51	M_w	5.4
D_{5-95} [s]	5.53	M_I	
ν_0 [Hz]	7.1	Sito EC8	B
N_{eq} [-]	3.7	Nome stazione	NORCIA
		R_{ep} [km]	9.4





2.5 - Modello di Calcolo FEM

Il modello di calcolo agli elementi finiti da utilizzare per lo studio della problematica in esame viene di seguito descritto.

Per ogni analisi, nel caso più generale, è necessario specificare due componenti di sollecitazione. In particolare vi sono, per ogni condizione, un accelerogramma di in direzione X (Orizzontale), ed uno in direzione Z (Verticale).

Ad ogni analisi corrispondono una serie di condizioni di carico. Per ognuna di esse vengono specificate due componenti di accelerazione di input in outcrop. In tabella vengono riportate le condizioni di carico relative al caso in esame:

SLV

Condizione	Accelerogramma X
CDC (1)	Acc (1)
CDC (2)	Acc (2)
CDC (3)	Acc (3)
CDC (4)	Acc (4)
CDC (5)	Acc (5)
CDC (6)	Acc (6)
CDC (7)	Acc (7)

Tabella 2. Condizioni di carico.

Il modello FEM viene ottenuto mediante una discretizzazione con elementi finiti piani a tre o a quattro nodi del dominio. Il passo ed i rapporti di infittimento della mesh in corrispondenza dei punti di controllo sono dati di input e possono variare a seconda del caso. Il passo della mesh deve soddisfare la seguente relazione:

$$p \leq \frac{V_{s,min}}{8 f_{max}}$$

dove:

- p = passo della mesh;
- $V_{s,min}$ = velocità delle onde di taglio minima presente nel modello;
- f_{max} = frequenza massima che si vuole analizzare;

Di seguito si riportano i nodi del modello con le rispettive coordinate nel riferimento X-Z:

Nodo	X [m]	Z [m]
1	-0.25	0.00
2	0.25	0.00
3	-0.25	-7.00
4	0.25	-7.00
5	-0.25	-13.00
6	0.25	-13.00
7	-0.25	-15.00
8	0.25	-15.00
9	-0.25	-1.00
10	-0.25	-2.00
11	-0.25	-3.00
12	-0.25	-4.00
13	-0.25	-5.00

14	-0.25	-6.00
15	0.25	-6.00
16	0.25	-5.00
17	0.25	-4.00
18	0.25	-3.00
19	0.25	-2.00
20	0.25	-1.00
21	-0.25	-8.03
22	-0.25	-9.13
23	-0.25	-10.31
24	-0.25	-11.59
25	0.25	-11.59
26	0.25	-10.31
27	0.25	-9.13
28	0.25	-8.03

Tabella 3. Nodi del modello FEM.

Di seguito gli elementi:

Elemento	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
1	1	9	20	2
2	9	10	19	20
3	10	11	18	19
4	11	12	17	18
5	12	13	16	17
6	13	14	15	16
7	14	3	4	15
8	3	21	28	4
9	21	22	27	28
10	22	23	26	27
11	23	24	25	26
12	24	5	6	25
13	5	7	8	6

Tabella 3bis. Elementi del modello FEM.

Le condizioni al contorno del problema in esame (posizione del bedrock) vengono prese in considerazione sul modello FEM mediante l'applicazione di smorzatori viscosi sui nodi facenti parte della porzione di terreno a contatto con il bedrock. Tali smorzatori esprimono due componenti (una orizzontale ed una verticale) di forza proporzionali alla velocità.

Le costanti di smorzamento C_x e C_z sono rispettivamente:

$$C_x = \rho_b * V_{sb} * V_{sb} \text{ e } C_z = \rho_b * V_{pb} * V_{pb}$$

dove:

- ρ_b = densità di massa del substrato;
- V_{sb} = velocità delle onde di taglio del substrato;
- V_{pb} = velocità delle onde p del substrato;

Sul modello possono essere applicati dei vincoli fissi nel caso in cui il substrato lo si volesse modellare come infinitamente rigido o per simulare un comportamento monodimensionale. In tal caso vengono applicati su tutti i nodi del modello dei vincoli in direzione verticale, in modo da consentire solo deformazioni di taglio.

Di seguito vengono indicati i vincoli applicati al modello (B: “bloccato”; L : “libero”) :

Nodo	Direzione X	Direzione Z
1	L	B
2	L	B
3	L	B
4	L	B
5	L	B
6	L	B
7	L	B
8	L	B
9	L	B
10	L	B
11	L	B
12	L	B
13	L	B
14	L	B
15	L	B
16	L	B
17	L	B
18	L	B
19	L	B
20	L	B
21	L	B
22	L	B
23	L	B
24	L	B
25	L	B
26	L	B
27	L	B
28	L	B

Tabella 4. Vincoli esterni del Modello FEM.

I cinematici di controllo, in corrispondenza dei quali vengono monitorate le storie temporali, sono di seguito riportati:

ID Nodo	Target in X	Target in Z
1	SI	NO
2	NO	NO
3	NO	NO
4	NO	NO
5	NO	NO
6	NO	NO
7	NO	NO
8	NO	NO
9	NO	NO
10	NO	NO
11	NO	NO
12	NO	NO
13	NO	NO
14	NO	NO
15	NO	NO
16	NO	NO
17	NO	NO

18	NO	NO
19	NO	NO
20	NO	NO
21	NO	NO
22	NO	NO
23	NO	NO
24	NO	NO
25	NO	NO
26	NO	NO
27	NO	NO
28	NO	NO

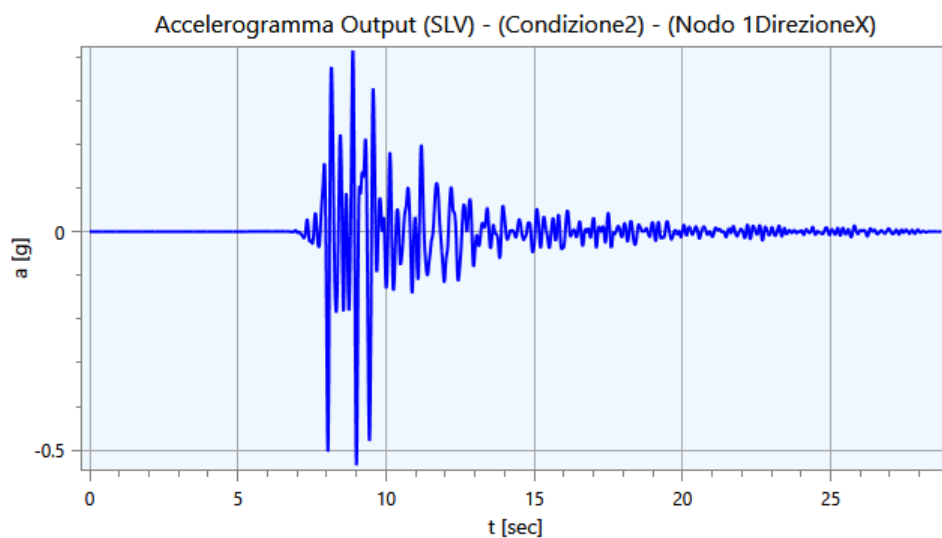
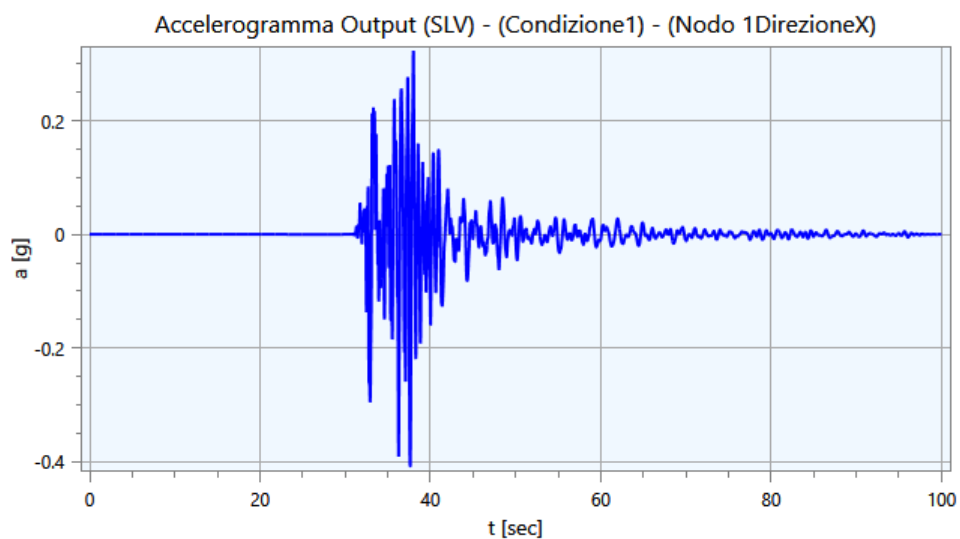
Tabella 5. Cinematismi di controllo.

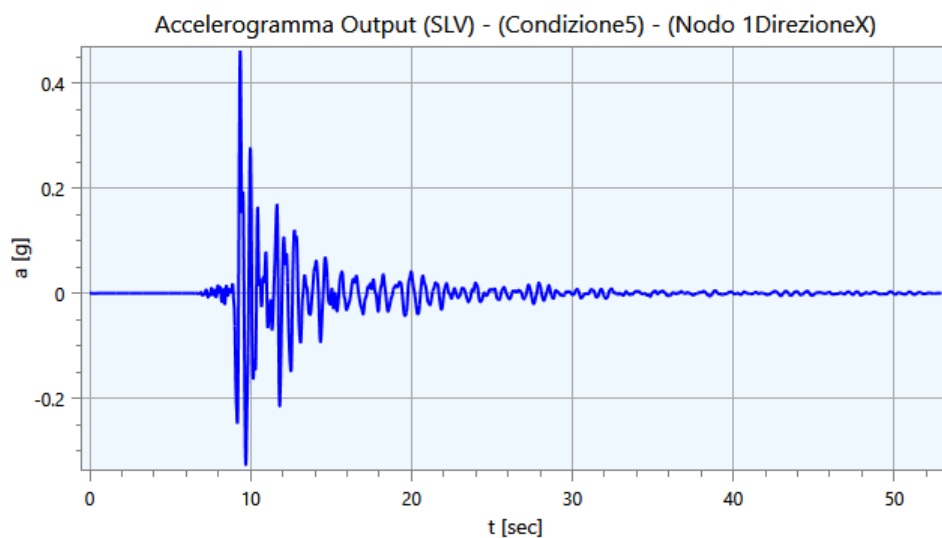
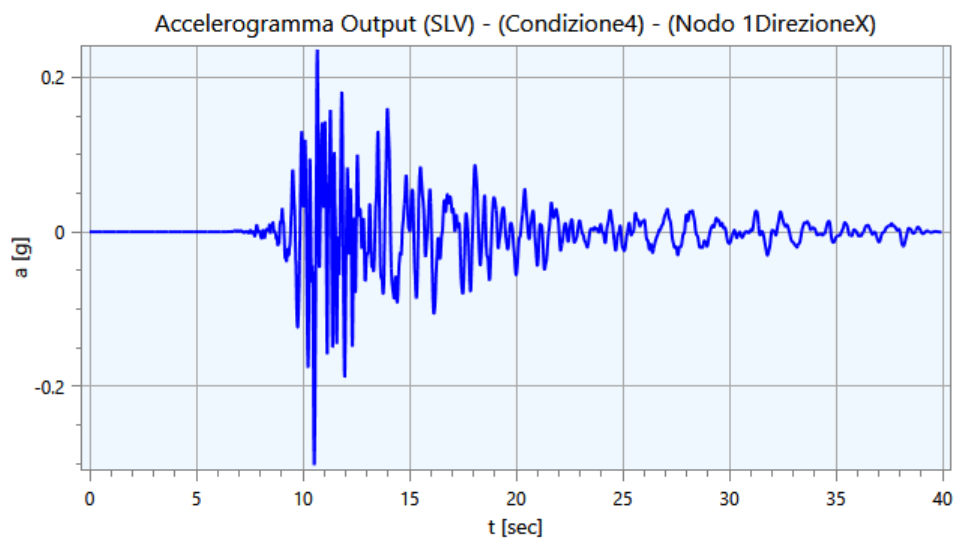
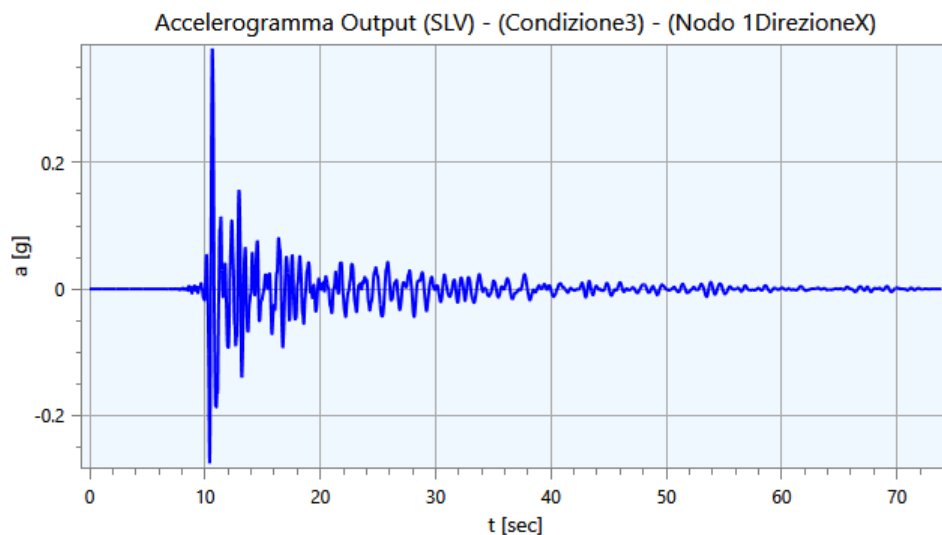
3 - Output

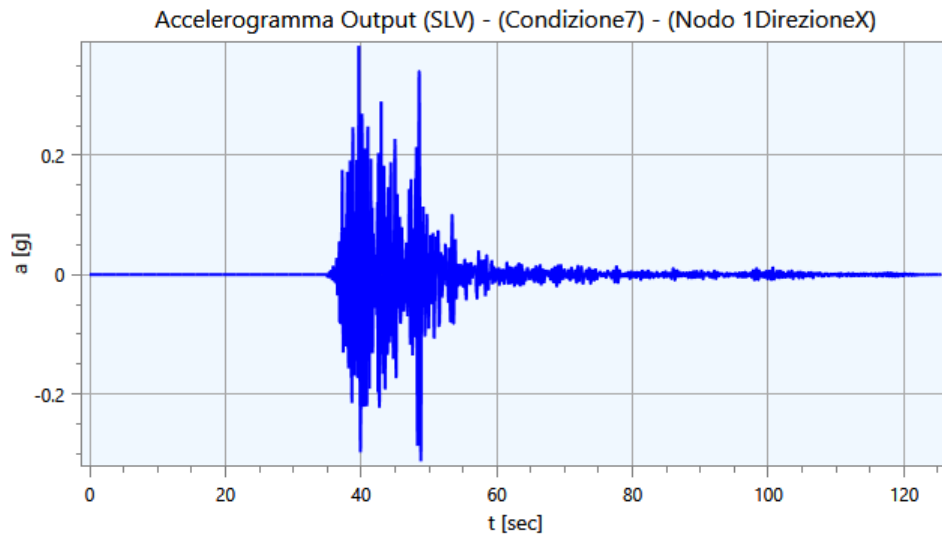
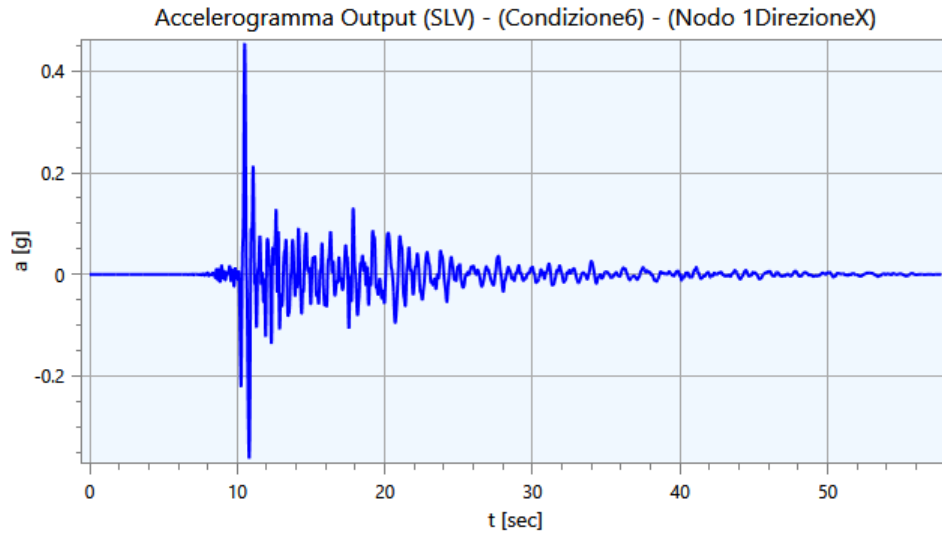
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai risultati del calcolo.

3.1 - Accelerogrammi Output

Di seguito vengono riportati gli accelerogrammi relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

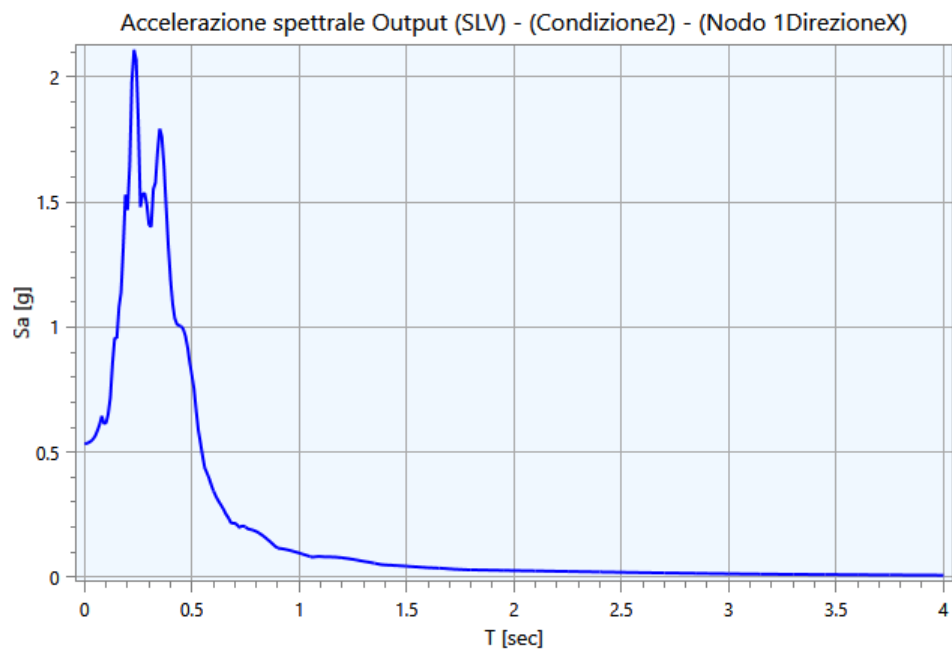
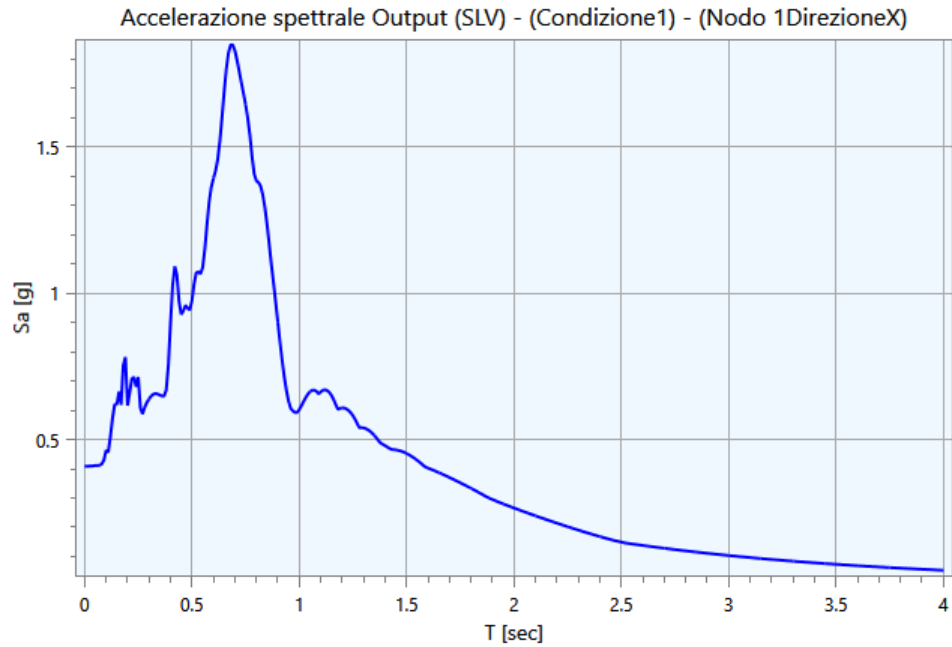


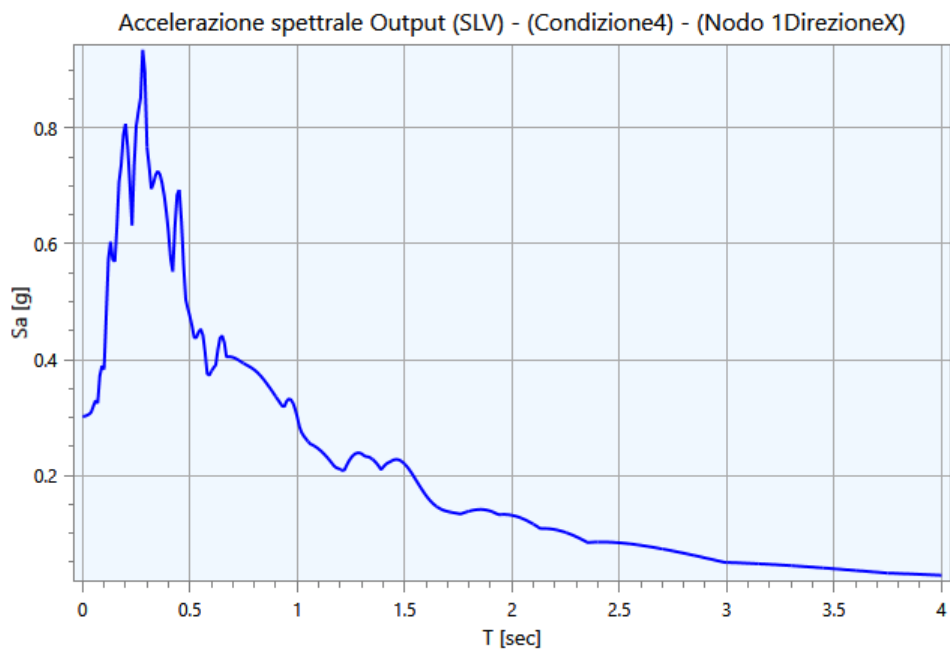
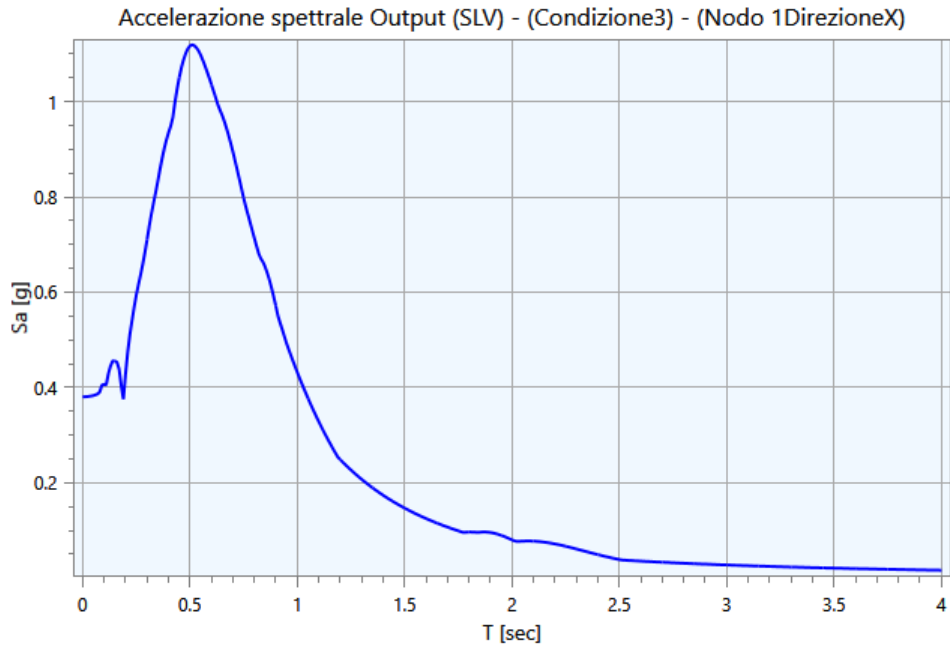


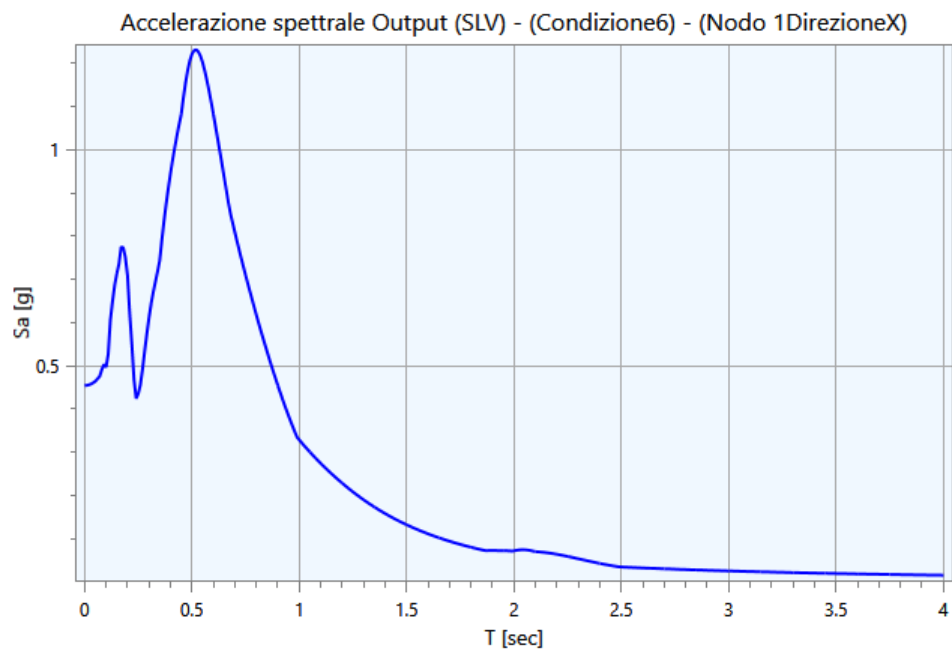
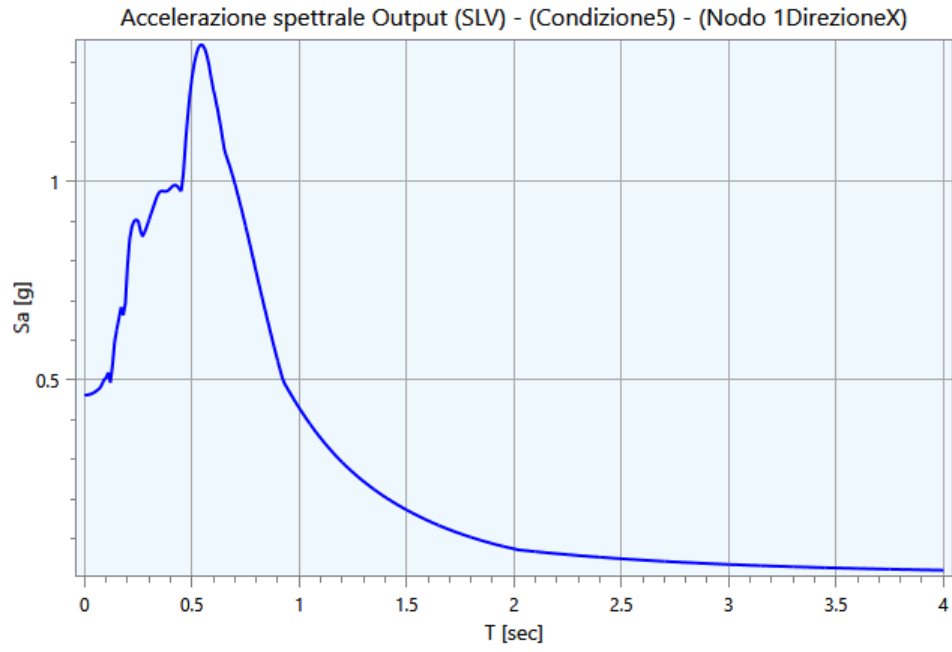


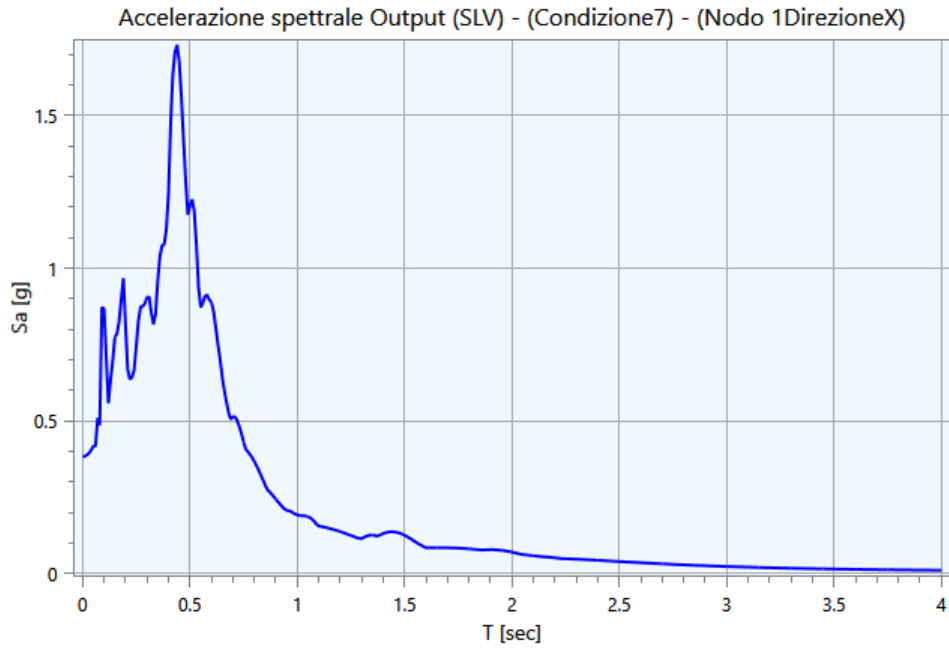
3.2 - Spettri Output

Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:



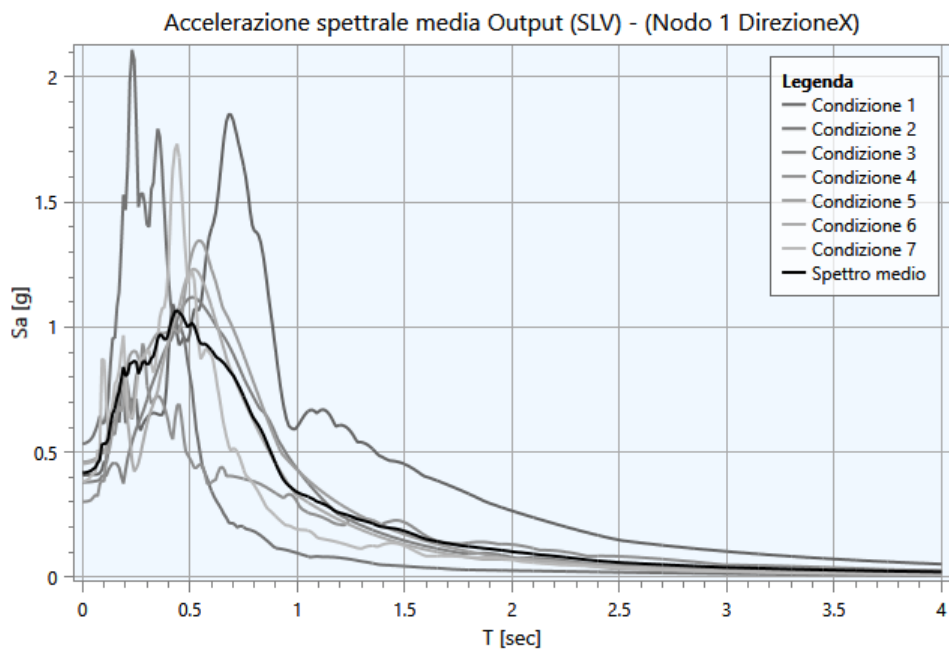






3.3 - Interpretazione dei risultati

Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:



3.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL

La parametrizzazione degli spettri di risposta ottenuti nei vari punti di controllo viene condotta mediante la procedura suggerita dagli "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica" (GdL MS, 2008 – parti I e II – punto 2.5.4.3.1 pag 92). Partendo dallo spettro di risposta medio in accelerazione rappresentativo dei 7 accelerogrammi, tale procedura prevede:

- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in accelerazione (TA);
- il calcolo del valor medio dello spettro in accelerazione (SA) nell'intorno tra $0.5 TA - 1.5 TA$;
- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in pseudovelocità (TV);
- il calcolo del valor medio dello spettro in pseudovelocità (SV) nell'intorno tra $0.8 TV - 1.2 TV$;
- il calcolo del valore di $T_c = 2\pi \frac{SV}{SA}$;
- il calcolo del valore di $T_b = 1/3 T_c$;
- il calcolo del valore $T_d = 4 a_g + 1.6$ con a_g uguale al valore di accelerazione a T uguale a zero;
- l'applicazione delle equazioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) per la determinazione dei tratti dello spettro tra T_0, T_b, T_c, T_d, T_4 .

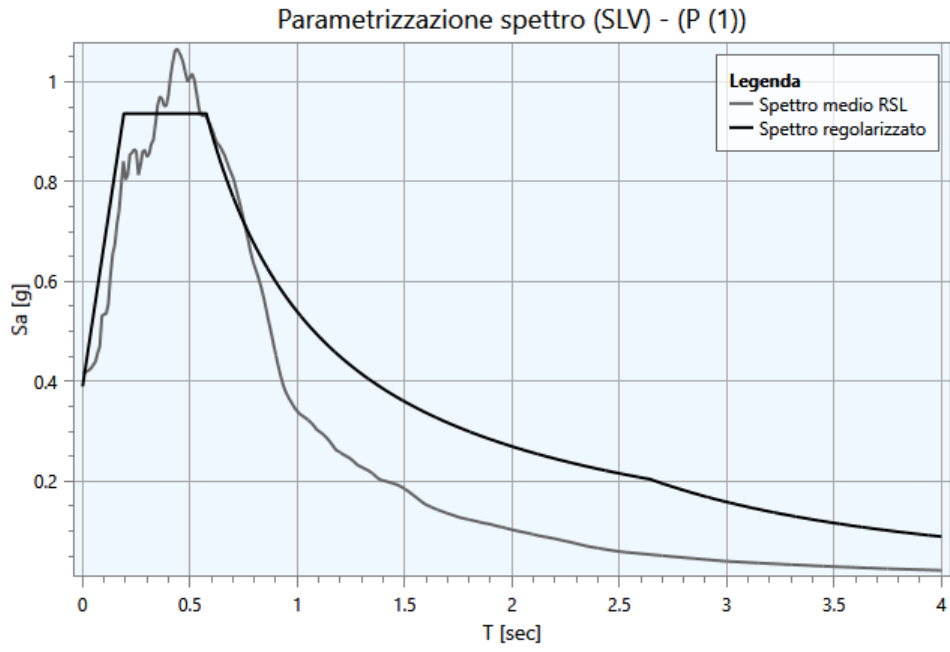
Di seguito vengono riportati, per ogni analisi, i parametri degli spettri parametrizzati per i vari punti di controllo presenti nella sezione oggetto di studio.

SLV

Punto di controllo	A_g [g]	F0	S	A_{max} [g]	T_b [sec]	T_c [sec]	T_d [sec]
P (1)	0.261	2.401	1.494	0.390	0.192	0.576	2.644

dove:

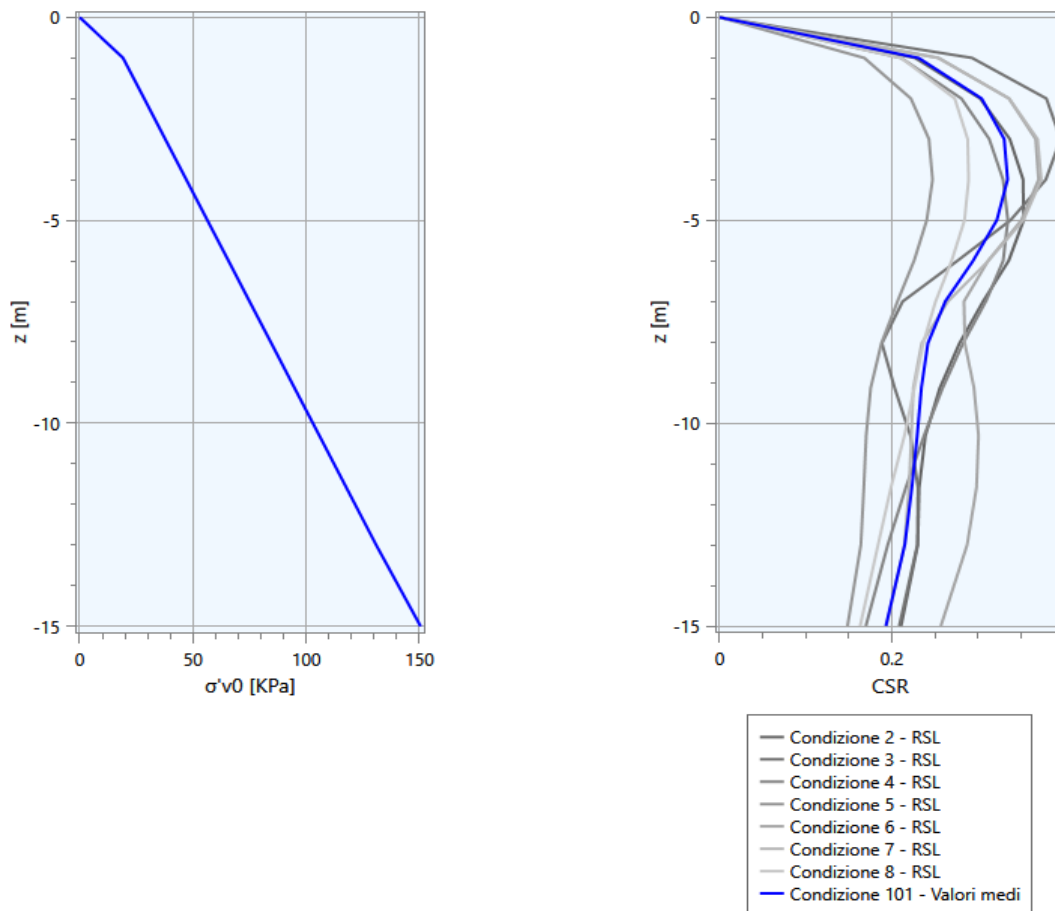
- A_g : accelerazione orizzontale massima al sito;
- F0 : valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- S : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- A_{max} : punto di ancoraggio a T=0 dello spettro di output;
- T_b : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- T_c : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- T_d : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

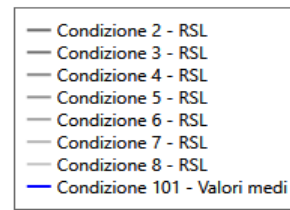
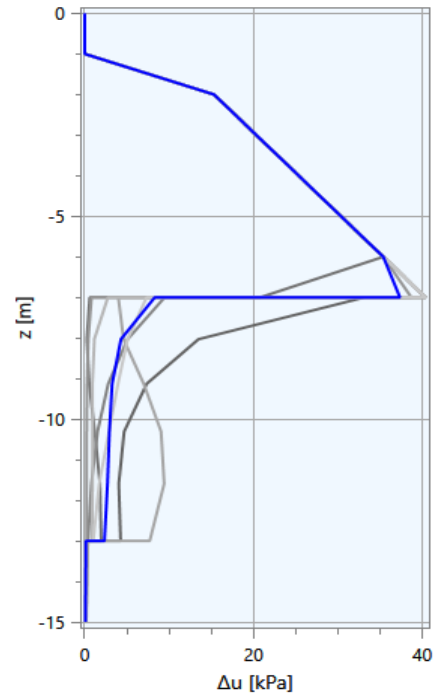
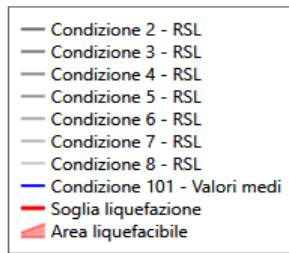
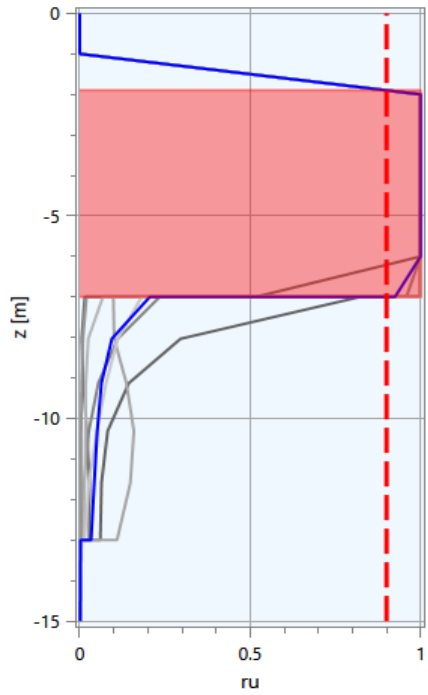


3.5 - Incremento sovrappressioni interstiziali

Di seguito vengono riportate, per le varie analisi numeriche, i risultati relativi alla valutazione delle sovrappressioni interstiziali generate dalle forzanti sismiche. Valori del rapporto di sovrappressione interstiziali al di sopra della soglia 0.90 indicano che il mezzo interessato risulta potenzialmente liquefacibile per l'evento che si è simulato mediante l'analisi RSL.

SLV

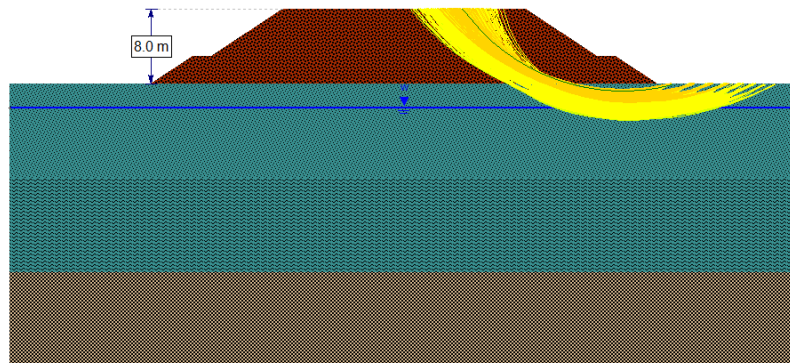




ALLEGATO D

RAPPORTO DI CALCOLO

VERIFICA DI STABILITÀ



Oggetto: Rilevato stradale alla progressiva 4+125 (sezione trasversale di calcolo R1)

Table of Contents

Project Summary	2
Currently Open Scenarios	2
Design Standard	3
Analisi statica	3
Analisi sismica	3
Analysis Options	4
All Open Scenarios	4
Seismic Loading	5
Analisi statica	5
Analisi sismica	5
Loading	6
Analisi statica	6
Analisi sismica	6
Materials	7
Materials In Use	7
Global Minimums	9
Analisi statica	9
Method: bishop simplified	9
Analisi sismica	9
Method: bishop simplified	9
Slice Data	10
Analisi statica	10
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.34696	10
Analisi sismica	13
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.17501	13



Slide2 Analysis Information

Slide1

Project Summary

File Name: Slide1.slmd
Slide2 Modeler Version: 9.031
Project Title: Slide2 - An Interactive Slope Stability Program

Currently Open Scenarios

Group Name	Scenario Name	Global Minimum	Compute Time
Analisi statica 	Master Scenario	Bishop Simplified: 1.346960	00h:00m:00.224s
Analisi sismica 	Master Scenario	Bishop Simplified: 1.175010	00h:00m:00.223s

Design Standard

◆ Analisi statica

Selected Type: Eurocode 7 (User Defined)
Name: NTC2018 - Approccio 1 , Combinazione 2 (A2+M2+R2) - SLU

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Undrained strength	1.4
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1.1
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

◆ Analisi sismica

Selected Type: Eurocode 7 (User Defined)
Name: NTC2018 - Approccio 1, Combinazione 2 (A2+M2+R2) - SLV

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1
Coefficient of shearing resistance	1
Undrained strength	1
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1.2
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

Analysis Options

All Open Scenarios

Slices Type:	Vertical
Analysis Methods Used	
	Bishop simplified
Number of slices:	100
Tolerance:	0.001
Maximum number of iterations:	150
Check malpha < 0.2:	Yes
Create Interslice boundaries at intersections with water tables and piezos:	Yes
Initial trial value of FS:	1
Steffensen Iteration:	Yes

Seismic Loading

◆ Analisi statica

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No

◆ Analisi sismica

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No
Seismic Load Coefficient (Horizontal):	0.133
Seismic Load Coefficient (Vertical):	-0.066

Loading

◆ Analisi statica


Distribution:	Constant
Magnitude [kPa]:	20
Orientation:	Normal to boundary
Load Action:	Live

◆ Analisi sismica


Distribution:	Constant
Magnitude [kPa]:	4
Orientation:	Normal to boundary
Load Action:	Live

Materials


Rilevato stradale

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	19 kN/m ³
Cohesion	0 kPa
Phi	35 °
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No


Sabbia limosa

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	20 kN/m ³
Cohesion	0 kPa
Phi	36 °
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No





Limo argilloso

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	19 kN/m ³
Cohesion	5 kPa
Phi	26 °
Tensile Strength	0 kPa
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No

Ghiaia

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	20 kN/m ³
Cohesion	0 kPa
Phi	40 °
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No

Materials In Use

	Material		Analisi statica		Analisi sismica
Rilevato stradale		✓		✓	
Sabbia limosa		✓		✓	
Limo argilloso		✓		✓	
Ghiaia		✓		✓	

Global Minimums

◆ Analisi statica

Method: bishop simplified

	FS	1.346960
Center:	65.221, 50.424	
Radius:	21.095	
Left Slip Surface Endpoint:	48.172, 38.000	
Right Slip Surface Endpoint:	70.500, 30.000	
Resisting Moment:	16944 kN-m	
Driving Moment:	12579.4 kN-m	
Total Slice Area:	78.075 m ²	
Surface Horizontal Width:	22.3275 m	
Surface Average Height:	3.49681 m	

◆ Analisi sismica

Method: bishop simplified

	FS	1.175010
Center:	65.221, 50.424	
Radius:	21.095	
Left Slip Surface Endpoint:	48.172, 38.000	
Right Slip Surface Endpoint:	70.500, 30.000	
Resisting Moment:	15924.3 kN-m	
Driving Moment:	13552.4 kN-m	
Total Slice Area:	78.075 m ²	
Surface Horizontal Width:	22.3275 m	
Surface Average Height:	3.49681 m	

Slice Data

◆ Analisi statica

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.34696

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Angle of Slice Base [deg]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [deg]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]	Base Vertical Stress [kPa]	Effective Vertical Stress [kPa]
1	0.222063	0.631064	-53.4119	Rilevato stradale	0	29.2561	6.98954	9.41463	18.4875	0	18.4875	27.9031	27.9031
2	0.222063	1.8707	-52.4116	Rilevato stradale	0	29.2561	8.45051	11.3825	22.3518	0	22.3518	33.3296	33.3296
3	0.222063	3.06681	-51.4335	Rilevato stradale	0	29.2561	9.89265	13.325	26.1663	0	26.1663	38.5735	38.5735
4	0.222063	4.22215	-50.4758	Rilevato stradale	0	29.2561	11.3158	15.2419	29.9305	0	29.9305	43.6459	43.6459
5	0.222063	5.33918	-49.5373	Rilevato stradale	0	29.2561	12.7198	17.133	33.6442	0	33.6442	48.5567	48.5567
6	0.222063	6.42008	-48.6164	Rilevato stradale	0	29.2561	14.1047	18.9984	37.3071	0	37.3071	53.3149	53.3149
7	0.222063	7.46681	-47.712	Rilevato stradale	0	29.2561	15.4705	20.8381	40.9199	0	40.9199	57.9289	57.9289
8	0.222063	8.48113	-46.8231	Rilevato stradale	0	29.2561	16.8174	22.6523	44.4823	0	44.4823	62.4054	62.4054
9	0.222063	9.46464	-45.9486	Rilevato stradale	0	29.2561	18.1453	24.441	47.9948	0	47.9948	66.7511	66.7511
10	0.222063	10.4188	-45.0877	Rilevato stradale	0	29.2561	19.4546	26.2046	51.4582	0	51.4582	70.9725	70.9725
11	0.222063	11.3449	-44.2396	Rilevato stradale	0	29.2561	20.7455	27.9433	54.8724	0	54.8724	75.0744	75.0744
12	0.222063	12.2441	-43.4036	Rilevato stradale	0	29.2561	22.0179	29.6572	58.2378	0	58.2378	79.0617	79.0617
13	0.222063	13.1177	-42.579	Rilevato stradale	0	29.2561	23.2722	31.3467	61.5555	0	61.5555	82.9396	82.9396
14	0.222063	13.9665	-41.7651	Rilevato stradale	0	29.2561	24.5084	33.0119	64.8255	0	64.8255	86.7117	86.7117
15	0.222063	14.7915	-40.9614	Rilevato stradale	0	29.2561	25.727	34.6533	68.0486	0	68.0486	90.3824	90.3824
16	0.222063	15.5936	-40.1674	Rilevato stradale	0	29.2561	26.928	36.2709	71.2255	0	71.2255	93.9551	93.9551
17	0.222063	16.3736	-39.3826	Rilevato stradale	0	29.2561	28.1116	37.8652	74.3562	0	74.3562	97.433	97.433
18	0.222063	17.1322	-38.6065	Rilevato stradale	0	29.2561	29.2781	39.4364	77.4414	0	77.4414	100.819	100.819
19	0.222063	17.8701	-37.8387	Rilevato stradale	0	29.2561	30.4275	40.9846	80.4818	0	80.4818	104.117	104.117
20	0.222063	18.5881	-37.0789	Rilevato stradale	0	29.2561	31.5602	42.5103	83.4777	0	83.4777	107.328	107.328
21	0.222063	19.2865	-36.3266	Rilevato stradale	0	29.2561	32.6762	44.0136	86.4296	0	86.4296	110.456	110.456
22	0.222063	19.9662	-35.5814	Rilevato stradale	0	29.2561	33.7758	45.4947	89.3381	0	89.3381	113.503	113.503
23	0.222063	20.6274	-34.8432	Rilevato stradale	0	29.2561	34.8592	46.9539	92.2036	0	92.2036	116.47	116.47
24	0.222063	21.2709	-34.1115	Rilevato stradale	0	29.2561	35.8571	48.2981	94.8431	0	94.8431	119.131	119.131
25	0.222063	21.8969	-33.3861	Rilevato stradale	0	29.2561	29.2621	39.4149	77.3991	0	77.3991	96.6837	96.6837
26	0.222063	22.506	-32.6667	Rilevato stradale	0	29.2561	30.2524	40.7488	80.0188	0	80.0188	99.4156	99.4156
27	0.222063	23.0986	-31.953	Rilevato stradale	0	29.2561	31.2277	42.0625	82.5984	0	82.5984	102.076	102.076
28	0.222063	23.675	-31.2448	Rilevato stradale	0	29.2561	32.188	43.356	85.1384	0	85.1384	104.667	104.667
29	0.222063	24.2356	-30.5419	Rilevato stradale	0	29.2561	33.1335	44.6295	87.6393	0	87.6393	107.189	107.189

30	0.222063	24.7808	-29.8441	Rilevato stradale	0	29.2561	34.0643	45.8832	90.1012	0	90.1012	109.645	109.645
31	0.222063	25.2907	-29.1511	Rilevato stradale	0	29.2561	34.9525	47.0796	92.4503	0	92.4503	111.945	111.945
32	0.222063	25.355	-28.4628	Rilevato stradale	0	29.2561	35.2275	47.45	93.1775	0	93.1775	112.275	112.275
33	0.222063	25.2311	-27.7789	Rilevato stradale	0	29.2561	35.2388	47.4653	93.2076	0	93.2076	111.77	111.77
34	0.222063	25.093	-27.0993	Rilevato stradale	0	29.2561	35.2268	47.4491	93.1761	0	93.1761	111.202	111.202
35	0.222063	24.9409	-26.4237	Rilevato stradale	0	29.2561	35.1917	47.4018	93.0833	0	93.0833	110.571	110.571
36	0.222063	24.775	-25.7522	Rilevato stradale	0	29.2561	35.1336	47.3236	92.9295	0	92.9295	109.878	109.878
37	0.222063	24.5957	-25.0843	Rilevato stradale	0	29.2561	35.0527	47.2146	92.7156	0	92.7156	109.124	109.124
38	0.222063	24.403	-24.4202	Rilevato stradale	0	29.2561	34.9491	47.0751	92.4416	0	92.4416	108.31	108.31
39	0.222063	24.1973	-23.7595	Rilevato stradale	0	29.2561	34.8231	46.9053	92.1079	0	92.1079	107.437	107.437
40	0.222063	23.9788	-23.1021	Rilevato stradale	0	29.2561	34.6746	46.7053	91.7155	0	91.7155	106.507	106.507
41	0.222063	23.7475	-22.4479	Rilevato stradale	0	29.2561	34.5039	46.4754	91.2638	0	91.2638	105.519	105.519
42	0.222063	23.5038	-21.7968	Rilevato stradale	0	29.2561	34.311	46.2155	90.7536	0	90.7536	104.475	104.475
43	0.222063	23.2478	-21.1487	Rilevato stradale	0	29.2561	34.096	45.9259	90.1848	0	90.1848	103.375	103.375
44	0.222063	22.9795	-20.5034	Rilevato stradale	0	29.2561	33.8589	45.6066	89.558	0	89.558	102.22	102.22
45	0.222063	22.6993	-19.8608	Rilevato stradale	0	29.2561	33.6	45.2578	88.8729	0	88.8729	101.01	101.01
46	0.222063	22.4073	-19.2207	Rilevato stradale	0	29.2561	33.3191	44.8795	88.1302	0	88.1302	99.7467	99.7467
47	0.222063	22.1035	-18.5832	Rilevato stradale	0	29.2561	33.0164	44.4718	87.3295	0	87.3295	98.43	98.43
48	0.222063	21.7881	-17.9481	Rilevato stradale	0	29.2561	32.692	44.0348	86.4711	0	86.4711	97.0606	97.0606
49	0.222063	21.4613	-17.3152	Rilevato stradale	0	29.2561	32.3457	43.5684	85.5555	0	85.5555	95.6395	95.6395
50	0.222063	21.1231	-16.6845	Rilevato stradale	0	29.2561	31.9777	43.0727	84.5822	0	84.5822	94.1665	94.1665
51	0.222063	20.7737	-16.0558	Rilevato stradale	0	29.2561	31.5879	42.5477	83.5513	0	83.5513	92.6424	92.6424
52	0.222063	20.4132	-15.4291	Rilevato stradale	0	29.2561	31.1765	41.9935	82.4628	0	82.4628	91.0673	91.0673
53	0.222063	20.0417	-14.8044	Rilevato stradale	0	29.2561	30.7432	41.4099	81.3168	0	81.3168	89.442	89.442
54	0.224642	19.8916	-14.1778	Sabbia limosa	0	30.1666	31.3226	42.1903	79.8463	0	79.8463	87.7592	87.7592
55	0.224642	19.5015	-13.5493	Sabbia limosa	0	30.1666	30.848	41.551	78.6363	0	78.6363	86.0703	86.0703
56	0.224642	19.0997	-12.9225	Sabbia limosa	0	30.1666	30.3493	40.8793	77.365	0	77.365	84.3285	84.3285
57	0.224642	18.6862	-12.2973	Sabbia limosa	0	30.1666	29.8265	40.1751	76.0323	0	76.0323	82.534	82.534
58	0.224642	18.2613	-11.6735	Sabbia limosa	0	30.1666	29.2796	39.4384	74.6384	0	74.6384	80.6877	80.6877
59	0.224642	17.8249	-11.0512	Sabbia limosa	0	30.1666	28.7084	38.6691	73.1823	0	73.1823	78.7893	78.7893
60	0.224642	17.3771	-10.4301	Sabbia limosa	0	30.1666	28.1129	37.8669	71.664	0	71.664	76.839	76.839
61	0.224642	16.9181	-9.81033	Sabbia limosa	0	30.1666	27.4929	37.0318	70.0835	0	70.0835	74.8374	74.8374
62	0.224642	16.4478	-9.19168	Sabbia limosa	0	30.1666	26.8482	36.1635	68.4402	0	68.4402	72.7847	72.7847
63	0.224642	15.9663	-8.57412	Sabbia limosa	0	30.1666	26.1789	35.2619	66.7341	0	66.7341	70.6812	70.6812
64	0.224642	15.4738	-7.95756	Sabbia limosa	0	30.1666	25.4846	34.3268	64.9644	0	64.9644	68.5268	68.5268
65	0.224642	15.0899	-7.34192	Sabbia limosa	0	30.1666	24.9636	33.625	63.6362	0	63.6362	66.8526	66.8526
66	0.224642	15.1664	-6.72714	Sabbia limosa	0	30.1666	25.2024	33.9466	64.2448	0	64.2448	67.2175	67.2175

67	0.224642	15.28	-6.11313	Sabbia limosa	0	30.1666	25.5048	34.3539	65.0155	0	65.0155	67.747	67.747
68	0.224642	15.3826	-5.49982	Sabbia limosa	0	30.1666	25.791	34.7395	65.7456	0	65.7456	68.2289	68.2289
69	0.224642	15.4744	-4.88715	Sabbia limosa	0	30.1666	26.0613	35.1035	66.434	0	66.434	68.6624	68.6624
70	0.224642	15.5552	-4.27504	Sabbia limosa	0	30.1666	26.3152	35.4455	67.0813	0	67.0813	69.0485	69.0485
71	0.224642	15.6253	-3.66342	Sabbia limosa	0	30.1666	26.5527	35.7654	67.6868	0	67.6868	69.3869	69.3869
72	0.224642	15.6845	-3.05221	Sabbia limosa	0	30.1666	26.7736	36.063	68.2501	0	68.2501	69.6778	69.6778
73	0.224642	15.7329	-2.44135	Sabbia limosa	0	30.1666	26.9779	36.3381	68.7707	0	68.7707	69.9209	69.9209
74	0.224642	15.6098	-1.83077	Sabbia limosa	0	30.1666	26.8883	36.2175	68.5427	0	68.5427	69.4021	69.4021
75	0.224642	15.0245	-1.2204	Sabbia limosa	0	30.1666	25.998	35.0183	66.2732	0	66.2732	66.8271	66.8271
76	0.224642	14.4014	-0.610165	Sabbia limosa	0	30.1666	25.0339	33.7196	63.8154	0	63.8154	64.082	64.082
77	0.224642	13.7676	0	Sabbia limosa	0	30.1666	24.0421	32.3837	61.287	0	61.287	61.287	61.287
78	0.224642	13.123	0.610165	Sabbia limosa	0	30.1666	23.0222	31.01	58.6871	0	58.6871	58.4419	58.4419
79	0.224642	12.4677	1.2204	Sabbia limosa	0	30.1666	21.974	29.5981	56.0152	0	56.0152	55.5471	55.5471
80	0.224642	11.8016	1.83077	Sabbia limosa	0	30.1666	20.897	28.1474	53.2697	0	53.2697	52.6018	52.6018
81	0.224642	11.1247	2.44135	Sabbia limosa	0	30.1666	19.7909	26.6575	50.4502	0	50.4502	49.6064	49.6064
82	0.224642	10.4371	3.05221	Sabbia limosa	0	30.1666	18.6552	25.1278	47.555	0	47.555	46.5603	46.5603
83	0.224642	9.73867	3.66342	Sabbia limosa	0	30.1666	17.4895	23.5577	44.5834	0	44.5834	43.4637	43.4637
84	0.224642	9.02943	4.27504	Sabbia limosa	0	30.1666	16.2934	21.9465	41.5342	0	41.5342	40.3163	40.3163
85	0.224642	8.30935	4.88715	Sabbia limosa	0	30.1666	15.0661	20.2935	38.406	0	38.406	37.1178	37.1178
86	0.224642	7.5784	5.49982	Sabbia limosa	0	30.1666	13.8075	18.5982	35.1975	0	35.1975	33.8681	33.8681
87	0.224642	6.83656	6.11313	Sabbia limosa	0	30.1666	12.5169	16.8597	31.9074	0	31.9074	30.5668	30.5668
88	0.224642	6.08378	6.72714	Sabbia limosa	0	30.1666	11.1936	15.0773	28.5341	0	28.5341	27.2138	27.2138
89	0.224642	5.32003	7.34192	Sabbia limosa	0	30.1666	9.83704	13.2501	25.0761	0	25.0761	23.8087	23.8087
90	0.224642	4.54525	7.95756	Sabbia limosa	0	30.1666	8.44665	11.3773	21.5318	0	21.5318	20.3511	20.3511
91	0.224642	3.75942	8.57412	Sabbia limosa	0	30.1666	7.02171	9.45796	17.8994	0	17.8994	16.8407	16.8407
92	0.224642	2.96247	9.19168	Sabbia limosa	0	30.1666	5.56152	7.49115	14.1772	0	14.1772	13.2772	13.2772
93	0.224642	2.15434	9.81033	Sabbia limosa	0	30.1666	4.06533	5.47584	10.3631	0	10.3631	9.66019	9.66019
94	0.224642	1.48159	10.4301	Sabbia limosa	0	30.1666	2.81045	3.78557	7.1643	0	7.1643	6.64696	6.64696
95	0.224642	1.25686	11.0512	Sabbia limosa	0	30.1666	2.39677	3.22835	6.10972	0	6.10972	5.64162	5.64162
96	0.224642	1.05404	11.6735	Sabbia limosa	0	30.1666	2.02076	2.72188	5.15123	0	5.15123	4.73372	4.73372
97	0.224642	0.839771	12.2973	Sabbia limosa	0	30.1666	1.6187	2.18032	4.1263	0	4.1263	3.77345	3.77345
98	0.224642	0.613981	12.9225	Sabbia limosa	0	30.1666	1.18997	1.60284	3.03341	0	3.03341	2.76038	2.76038
99	0.224642	0.376582	13.5493	Sabbia limosa	0	30.1666	0.733918	0.988558	1.87087	0	1.87087	1.694	1.694
100	0.224642	0.127485	14.1778	Sabbia limosa	0	30.1666	0.249854	0.336544	0.636917	0	0.636917	0.573797	0.573797

Analisi sismica

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.17501

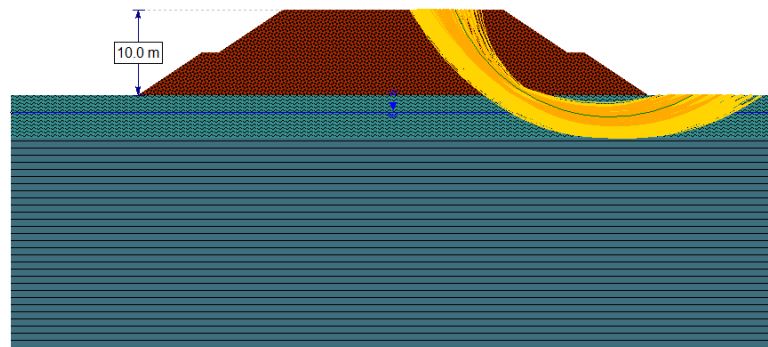
Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Angle of Slice Base [deg]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [deg]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]	Base Vertical Stress [kPa]	Effective Vertical Stress [kPa]
1	0.222063	0.631064	-53.4119	Rilevato stradale	0	35	1.83353	2.15442	3.69219	0	3.69219	6.16212	6.16212
2	0.222063	1.8707	-52.4116	Rilevato stradale	0	35	3.32292	3.90446	6.69138	0	6.69138	11.0081	11.0081
3	0.222063	3.06681	-51.4335	Rilevato stradale	0	35	4.80389	5.64462	9.67364	0	9.67364	15.6986	15.6986
4	0.222063	4.22215	-50.4758	Rilevato stradale	0	35	6.27539	7.37365	12.6368	0	12.6368	20.2429	20.2429
5	0.222063	5.33918	-49.5373	Rilevato stradale	0	35	7.73656	9.09053	15.5791	0	15.5791	24.6494	24.6494
6	0.222063	6.42008	-48.6164	Rilevato stradale	0	35	9.18673	10.7945	18.4993	0	18.4993	28.9256	28.9256
7	0.222063	7.46681	-47.712	Rilevato stradale	0	35	10.6252	12.4847	21.3961	0	21.3961	33.0779	33.0779
8	0.222063	8.48113	-46.8231	Rilevato stradale	0	35	12.0516	14.1608	24.2685	0	24.2685	37.1126	37.1126
9	0.222063	9.46464	-45.9486	Rilevato stradale	0	35	13.4657	15.8223	27.1159	0	27.1159	41.035	41.035
10	0.222063	10.4188	-45.0877	Rilevato stradale	0	35	14.8669	17.4688	29.9377	0	29.9377	44.8502	44.8502
11	0.222063	11.3449	-44.2396	Rilevato stradale	0	35	16.2553	19.1001	32.7334	0	32.7334	48.5628	48.5628
12	0.222063	12.2441	-43.4036	Rilevato stradale	0	35	17.6303	20.7158	35.5025	0	35.5025	52.1768	52.1768
13	0.222063	13.1177	-42.579	Rilevato stradale	0	35	18.9922	22.316	38.2445	0	38.2445	55.6959	55.6959
14	0.222063	13.9665	-41.7651	Rilevato stradale	0	35	20.3405	23.9003	40.9597	0	40.9597	59.124	59.124
15	0.222063	14.7915	-40.9614	Rilevato stradale	0	35	21.6752	25.4686	43.6475	0	43.6475	62.4639	62.4639
16	0.222063	15.5936	-40.1674	Rilevato stradale	0	35	22.9965	27.0211	46.3081	0	46.3081	65.7193	65.7193
17	0.222063	16.3736	-39.3826	Rilevato stradale	0	35	24.304	28.5574	48.9412	0	48.9412	68.8923	68.8923
18	0.222063	17.1322	-38.6065	Rilevato stradale	0	35	25.5978	30.0777	51.5465	0	51.5465	71.9858	71.9858
19	0.222063	17.8701	-37.8387	Rilevato stradale	0	35	26.878	31.5819	54.1245	0	54.1245	75.0023	75.0023
20	0.222063	18.5881	-37.0789	Rilevato stradale	0	35	28.1444	33.07	56.6744	0	56.6744	77.9436	77.9436
21	0.222063	19.2865	-36.3266	Rilevato stradale	0	35	29.3972	34.542	59.1972	0	59.1972	80.8126	80.8126
22	0.222063	19.9662	-35.5814	Rilevato stradale	0	35	30.6362	35.9979	61.6924	0	61.6924	83.6108	83.6108
23	0.222063	20.6274	-34.8432	Rilevato stradale	0	35	31.8616	37.4377	64.1597	0	64.1597	86.3397	86.3397
24	0.222063	21.2709	-34.1115	Rilevato stradale	0	35	33.0605	38.8464	66.5741	0	66.5741	88.9674	88.9674
25	0.222063	21.8969	-33.3861	Rilevato stradale	0	35	32.8449	38.5931	66.1399	0	66.1399	87.7856	87.7856
26	0.222063	22.506	-32.6667	Rilevato stradale	0	35	34.0184	39.972	68.5031	0	68.5031	90.3146	90.3146
27	0.222063	23.0986	-31.953	Rilevato stradale	0	35	35.1784	41.335	70.8392	0	70.8392	92.781	92.781
28	0.222063	23.675	-31.2448	Rilevato stradale	0	35	36.3251	42.6823	73.1482	0	73.1482	95.1863	95.1863
29	0.222063	24.2356	-30.5419	Rilevato stradale	0	35	37.4582	44.0138	75.43	0	75.43	97.5316	97.5316
30	0.222063	24.7808	-29.8441	Rilevato stradale	0	35	38.5781	45.3296	77.6848	0	77.6848	99.8181	99.8181
31	0.222063	25.2907	-29.1511	Rilevato stradale	0	35	39.6529	46.5925	79.8491	0	79.8491	101.966	101.966
32	0.222063	25.355	-28.4628	Rilevato stradale	0	35	40.0338	47.0401	80.6163	0	80.6163	102.319	102.319

33	0.222063	25.2311	-27.7789	Rilevato stradale	0	35	40.1153	47.1359	80.7804	0	80.7804	101.912	101.912
34	0.222063	25.093	-27.0993	Rilevato stradale	0	35	40.1699	47.2	80.8906	0	80.8906	101.446	101.446
35	0.222063	24.9409	-26.4237	Rilevato stradale	0	35	40.1977	47.2327	80.9463	0	80.9463	100.921	100.921
36	0.222063	24.775	-25.7522	Rilevato stradale	0	35	40.1989	47.2341	80.9486	0	80.9486	100.34	100.34
37	0.222063	24.5957	-25.0843	Rilevato stradale	0	35	40.1734	47.2042	80.8974	0	80.8974	99.7026	99.7026
38	0.222063	24.403	-24.4202	Rilevato stradale	0	35	40.1214	47.1431	80.7929	0	80.7929	99.0099	99.0099
39	0.222063	24.1973	-23.7595	Rilevato stradale	0	35	40.043	47.0509	80.6348	0	80.6348	98.262	98.262
40	0.222063	23.9788	-23.1021	Rilevato stradale	0	35	39.9381	46.9277	80.4237	0	80.4237	97.4605	97.4605
41	0.222063	23.7475	-22.4479	Rilevato stradale	0	35	39.8069	46.7735	80.1592	0	80.1592	96.6054	96.6054
42	0.222063	23.5038	-21.7968	Rilevato stradale	0	35	39.6493	46.5883	79.8421	0	79.8421	95.6982	95.6982
43	0.222063	23.2478	-21.1487	Rilevato stradale	0	35	39.4653	46.3721	79.4716	0	79.4716	94.7386	94.7386
44	0.222063	22.9795	-20.5034	Rilevato stradale	0	35	39.2549	46.1249	79.0477	0	79.0477	93.7271	93.7271
45	0.222063	22.6993	-19.8608	Rilevato stradale	0	35	39.0182	45.8468	78.5712	0	78.5712	92.6654	92.6654
46	0.222063	22.4073	-19.2207	Rilevato stradale	0	35	38.7551	45.5376	78.0414	0	78.0414	91.5531	91.5531
47	0.222063	22.1035	-18.5832	Rilevato stradale	0	35	38.4655	45.1973	77.4579	0	77.4579	90.3904	90.3904
48	0.222063	21.7881	-17.9481	Rilevato stradale	0	35	38.1493	44.8258	76.8216	0	76.8216	89.1788	89.1788
49	0.222063	21.4613	-17.3152	Rilevato stradale	0	35	37.8067	44.4232	76.1314	0	76.1314	87.9178	87.9178
50	0.222063	21.1231	-16.6845	Rilevato stradale	0	35	37.4372	43.9891	75.3877	0	75.3877	86.6083	86.6083
51	0.222063	20.7737	-16.0558	Rilevato stradale	0	35	37.0411	43.5237	74.5898	0	74.5898	85.2503	85.2503
52	0.222063	20.4132	-15.4291	Rilevato stradale	0	35	36.6181	43.0266	73.738	0	73.738	83.8443	83.8443
53	0.222063	20.0417	-14.8044	Rilevato stradale	0	35	36.1681	42.4979	72.8318	0	72.8318	82.3908	82.3908
54	0.224642	19.8916	-14.1778	Sabbia limosa	0	36	36.8609	43.3119	71.5363	0	71.5363	80.8484	80.8484
55	0.224642	19.5015	-13.5493	Sabbia limosa	0	36	36.3642	42.7283	70.5726	0	70.5726	79.336	79.336
56	0.224642	19.0997	-12.9225	Sabbia limosa	0	36	35.8375	42.1094	69.5504	0	69.5504	77.7731	77.7731
57	0.224642	18.6862	-12.2973	Sabbia limosa	0	36	35.2806	41.455	68.4695	0	68.4695	76.1602	76.1602
58	0.224642	18.2613	-11.6735	Sabbia limosa	0	36	34.6932	40.7648	67.3297	0	67.3297	74.4976	74.4976
59	0.224642	17.8249	-11.0512	Sabbia limosa	0	36	34.0751	40.0386	66.1303	0	66.1303	72.7854	72.7854
60	0.224642	17.3771	-10.4301	Sabbia limosa	0	36	33.4261	39.276	64.8707	0	64.8707	71.0237	71.0237
61	0.224642	16.9181	-9.81033	Sabbia limosa	0	36	32.7459	38.4768	63.5503	0	63.5503	69.2126	69.2126
62	0.224642	16.4478	-9.19168	Sabbia limosa	0	36	32.0341	37.6404	62.169	0	62.169	67.3526	67.3526
63	0.224642	15.9663	-8.57412	Sabbia limosa	0	36	31.2905	36.7667	60.7261	0	60.7261	65.4439	65.4439
64	0.224642	15.4738	-7.95756	Sabbia limosa	0	36	30.5147	35.8551	59.2204	0	59.2204	63.4859	63.4859
65	0.224642	15.0899	-7.34192	Sabbia limosa	0	36	29.9441	35.1846	58.1129	0	58.1129	61.9711	61.9711
66	0.224642	15.1664	-6.72714	Sabbia limosa	0	36	30.2848	35.5849	58.7739	0	58.7739	62.3461	62.3461
67	0.224642	15.28	-6.11313	Sabbia limosa	0	36	30.7035	36.0769	59.5867	0	59.5867	62.8751	62.8751
68	0.224642	15.3826	-5.49982	Sabbia limosa	0	36	31.1047	36.5483	60.3654	0	60.3654	63.3604	63.3604
69	0.224642	15.4744	-4.88715	Sabbia limosa	0	36	31.4882	36.9989	61.1094	0	61.1094	63.8018	63.8018

70	0.224642	15.5552	-4.27504	Sabbia limosa	0	36	31.8538	37.4285	61.8192	0	61.8192	64.2003	64.2003
71	0.224642	15.6253	-3.66342	Sabbia limosa	0	36	32.2012	37.8367	62.4931	0	62.4931	64.5548	64.5548
72	0.224642	15.6845	-3.05221	Sabbia limosa	0	36	32.5302	38.2233	63.1319	0	63.1319	64.8665	64.8665
73	0.224642	15.7329	-2.44135	Sabbia limosa	0	36	32.8406	38.588	63.7344	0	63.7344	65.1346	65.1346
74	0.224642	15.6098	-1.83077	Sabbia limosa	0	36	32.7943	38.5336	63.6445	0	63.6445	64.6927	64.6927
75	0.224642	15.0245	-1.2204	Sabbia limosa	0	36	31.7699	37.3299	61.6563	0	61.6563	62.3331	62.3331
76	0.224642	14.4014	-0.610165	Sabbia limosa	0	36	30.6515	36.0158	59.4856	0	59.4856	59.812	59.812
77	0.224642	13.7676	0	Sabbia limosa	0	36	29.4953	34.6573	57.2419	0	57.2419	57.2419	57.2419
78	0.224642	13.123	0.610165	Sabbia limosa	0	36	28.3006	33.2535	54.9235	0	54.9235	54.6221	54.6221
79	0.224642	12.4677	1.2204	Sabbia limosa	0	36	27.0667	31.8037	52.5287	0	52.5287	51.9521	51.9521
80	0.224642	11.8016	1.83077	Sabbia limosa	0	36	25.7928	30.3068	50.0564	0	50.0564	49.232	49.232
81	0.224642	11.1247	2.44135	Sabbia limosa	0	36	24.4783	28.7622	47.505	0	47.505	46.4614	46.4614
82	0.224642	10.4371	3.05221	Sabbia limosa	0	36	23.122	27.1686	44.8732	0	44.8732	43.6403	43.6403
83	0.224642	9.73867	3.66342	Sabbia limosa	0	36	21.7233	25.5251	42.1588	0	42.1588	40.7679	40.7679
84	0.224642	9.02943	4.27504	Sabbia limosa	0	36	20.2813	23.8307	39.3601	0	39.3601	37.8441	37.8441
85	0.224642	8.30935	4.88715	Sabbia limosa	0	36	18.7947	22.084	36.4753	0	36.4753	34.8683	34.8683
86	0.224642	7.5784	5.49982	Sabbia limosa	0	36	17.2629	20.2841	33.5023	0	33.5023	31.8401	31.8401
87	0.224642	6.83656	6.11313	Sabbia limosa	0	36	15.6845	18.4294	30.4391	0	30.4391	28.7593	28.7593
88	0.224642	6.08378	6.72714	Sabbia limosa	0	36	14.0584	16.5188	27.2834	0	27.2834	25.6251	25.6251
89	0.224642	5.32003	7.34192	Sabbia limosa	0	36	12.3835	14.5507	24.0327	0	24.0327	22.4372	22.4372
90	0.224642	4.54525	7.95756	Sabbia limosa	0	36	10.6583	12.5236	20.6847	0	20.6847	19.1948	19.1948
91	0.224642	3.75942	8.57412	Sabbia limosa	0	36	8.88154	10.4359	17.2366	0	17.2366	15.8975	15.8975
92	0.224642	2.96247	9.19168	Sabbia limosa	0	36	7.05183	8.28597	13.6856	0	13.6856	12.5445	12.5445
93	0.224642	2.15434	9.81033	Sabbia limosa	0	36	5.16756	6.07193	10.0288	0	10.0288	9.13522	9.13522
94	0.224642	1.48159	10.4301	Sabbia limosa	0	36	3.58152	4.20832	6.9507	0	6.9507	6.29142	6.29142
95	0.224642	1.25686	11.0512	Sabbia limosa	0	36	3.06224	3.59816	5.94292	0	5.94292	5.34484	5.34484
96	0.224642	1.05404	11.6735	Sabbia limosa	0	36	2.58863	3.04167	5.0238	0	5.0238	4.48897	4.48897
97	0.224642	0.839771	12.2973	Sabbia limosa	0	36	2.07917	2.44305	4.03508	0	4.03508	3.58185	3.58185
98	0.224642	0.613981	12.9225	Sabbia limosa	0	36	1.53268	1.80092	2.9745	0	2.9745	2.62284	2.62284
99	0.224642	0.376582	13.5493	Sabbia limosa	0	36	0.947941	1.11384	1.83969	0	1.83969	1.61125	1.61125
100	0.224642	0.127485	14.1778	Sabbia limosa	0	36	0.323644	0.380285	0.628099	0	0.628099	0.546338	0.546338

RAPPORTO DI CALCOLO

VERIFICA DI STABILITÀ



Oggetto: Rilevato stradale alla progressiva 8+100 (sezione trasversale di calcolo R2)

Table of Contents

Project Summary	2
Currently Open Scenarios	2
Design Standard	3
Analisi statica	3
Analisi sismica	3
Analysis Options	4
All Open Scenarios	4
Seismic Loading	5
Analisi statica	5
Analisi sismica	5
Loading	6
Analisi statica	6
Analisi sismica	6
Materials	7
Materials In Use	7
Global Minimums	8
Analisi statica	8
Method: bishop simplified	8
Analisi sismica	8
Method: bishop simplified	8
Slice Data	9
Analisi statica	9
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.2162	9
Analisi sismica	12
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.03419	12



Slide2 Analysis Information

Slide1

Project Summary

File Name: Slide1.slmd
Slide2 Modeler Version: 9.031
Project Title: Slide2 - An Interactive Slope Stability Program

Currently Open Scenarios

Group Name	Scenario Name	Global Minimum	Compute Time
Analisi statica 	Master Scenario	Bishop Simplified: 1.216200	00h:00m:00.228s
Analisi sismica 	Master Scenario	Bishop Simplified: 1.034190	00h:00m:00.211s

Design Standard

◆ Analisi statica

Selected Type: Eurocode 7 (User Defined)
Name: NTC2018 - Approccio 1 , Combinazione 2 (A2+M2+R2) - SLU

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Undrained strength	1.4
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1.1
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

◆ Analisi sismica

Selected Type: Eurocode 7 (User Defined)
Name: NTC2018 - Approccio 1, Combinazione 2 (A2+M2+R2) - SLV

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1
Coefficient of shearing resistance	1
Undrained strength	1
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1.2
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

Analysis Options

All Open Scenarios

Slices Type:	Vertical
Analysis Methods Used	
	Bishop simplified
Number of slices:	100
Tolerance:	0.001
Maximum number of iterations:	150
Check malpha < 0.2:	Yes
Create Interslice boundaries at intersections with water tables and piezos:	Yes
Initial trial value of FS:	1
Steffensen Iteration:	Yes

Seismic Loading

◆ Analisi statica

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No

◆ Analisi sismica

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No
Seismic Load Coefficient (Horizontal):	0.138
Seismic Load Coefficient (Vertical):	-0.069

Loading

◆ Analisi statica


Distribution:	Constant
Magnitude [kPa]:	20
Orientation:	Normal to boundary
Load Action:	Live

◆ Analisi sismica


Distribution:	Constant
Magnitude [kPa]:	4
Orientation:	Normal to boundary
Load Action:	Live

Materials


Rilevato stradale

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	19 kN/m3
Cohesion	0 kPa
Phi	35 °
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No


Limo argilloso

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	19 kN/m3
Cohesion	5 kPa
Phi	26 °
Tensile Strength	0 kPa
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No

Argilla limosa

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	20 kN/m3
Cohesion	20 kPa
Phi	26 °
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No

Materials In Use

Material	Analisi statica	Analisi sismica
Rilevato stradale 	✓	✓
Limo argilloso 	✓	✓
Argilla limosa 	✓	✓

Global Minimums

◆ Analisi statica

Method: bishop simplified

	FS	1.216200
Center:	70.569, 47.027	
Radius:	19.592	
Left Slip Surface Endpoint:	52.280, 40.000	
Right Slip Surface Endpoint:	80.259, 30.000	
Resisting Moment:	23765.3 kN-m	
Driving Moment:	19540.7 kN-m	
Total Slice Area:	142.896 m ²	
Surface Horizontal Width:	27.9791 m	
Surface Average Height:	5.10724 m	

◆ Analisi sismica

Method: bishop simplified

	FS	1.034190
Center:	71.485, 47.944	
Radius:	20.777	
Left Slip Surface Endpoint:	52.287, 40.000	
Right Slip Surface Endpoint:	81.959, 30.000	
Resisting Moment:	25016.6 kN-m	
Driving Moment:	24189.5 kN-m	
Total Slice Area:	148.299 m ²	
Surface Horizontal Width:	29.6721 m	
Surface Average Height:	4.99792 m	

Slice Data

◆ Analisi statica

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.2162

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Angle of Slice Base [deg]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [deg]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]	Base Vertical Stress [kPa]	Effective Vertical Stress [kPa]
1	0.27733	1.79967	-67.9029	Rilevato stradale	0	29.2561	6.37588	7.75434	15.2272	0	15.2272	30.9314	30.9314
2	0.27733	5.22774	-65.8342	Rilevato stradale	0	29.2561	9.27043	11.2747	22.1401	0	22.1401	42.8007	42.8007
3	0.27733	8.349	-63.921	Rilevato stradale	0	29.2561	12.107	14.7245	28.9145	0	28.9145	53.6509	53.6509
4	0.27733	11.2236	-62.131	Rilevato stradale	0	29.2561	14.8803	18.0974	35.538	0	35.538	63.6787	63.6787
5	0.27733	13.8938	-60.4414	Rilevato stradale	0	29.2561	17.589	21.3918	42.0072	0	42.0072	73.0216	73.0216
6	0.27733	16.3903	-58.8356	Rilevato stradale	0	29.2561	20.234	24.6086	48.324	0	48.324	81.7813	81.7813
7	0.27733	18.7367	-57.3013	Rilevato stradale	0	29.2561	22.8168	27.7498	54.4923	0	54.4923	90.0349	90.0349
8	0.27733	20.9512	-55.8286	Rilevato stradale	0	29.2561	25.3394	30.8178	60.5171	0	60.5171	97.843	97.843
9	0.27733	23.0484	-54.4098	Rilevato stradale	0	29.2561	27.8042	33.8155	66.4036	0	66.4036	105.254	105.254
10	0.27733	25.0404	-53.0385	Rilevato stradale	0	29.2561	30.2133	36.7454	72.1572	0	72.1572	112.308	112.308
11	0.27733	26.9368	-51.7096	Rilevato stradale	0	29.2561	32.5689	39.6103	77.7828	0	77.7828	119.036	119.036
12	0.27733	28.7461	-50.4187	Rilevato stradale	0	29.2561	34.8731	42.4127	83.2861	0	83.2861	125.468	125.468
13	0.27733	30.4753	-49.1621	Rilevato stradale	0	29.2561	37.1279	45.155	88.6711	0	88.6711	131.627	131.627
14	0.27733	32.1303	-47.9366	Rilevato stradale	0	29.2561	39.3352	47.8395	93.9425	0	93.9425	137.532	137.532
15	0.27733	33.7165	-46.7396	Rilevato stradale	0	29.2561	41.4966	50.4682	99.1046	0	99.1046	143.201	143.201
16	0.27733	35.2382	-45.5685	Rilevato stradale	0	29.2561	37.7995	45.9717	90.2748	0	90.2748	128.832	128.832
17	0.27733	36.6996	-44.4214	Rilevato stradale	0	29.2561	38.1857	46.4414	91.197	0	91.197	128.619	128.619
18	0.27733	38.1041	-43.2965	Rilevato stradale	0	29.2561	40.1278	48.8034	95.8354	0	95.8354	133.645	133.645
19	0.27733	39.4549	-42.1919	Rilevato stradale	0	29.2561	42.0326	51.1201	100.385	0	100.385	138.487	138.487
20	0.27733	40.7548	-41.1064	Rilevato stradale	0	29.2561	43.9013	53.3928	104.848	0	104.848	143.154	143.154
21	0.27733	41.9373	-40.0385	Rilevato stradale	0	29.2561	45.6596	55.5312	109.047	0	109.047	147.412	147.412
22	0.27733	42.3581	-38.9871	Rilevato stradale	0	29.2561	46.5945	56.6682	111.28	0	111.28	148.994	148.994
23	0.27733	42.5451	-37.9511	Rilevato stradale	0	29.2561	47.2678	57.4871	112.888	0	112.888	149.752	149.752
24	0.27733	42.6899	-36.9295	Rilevato stradale	0	29.2561	47.8874	58.2407	114.368	0	114.368	150.361	150.361
25	0.27733	42.7942	-35.9214	Rilevato stradale	0	29.2561	48.4548	58.9307	115.722	0	115.722	150.825	150.825
26	0.27733	42.8596	-34.9261	Rilevato stradale	0	29.2561	48.971	59.5585	116.955	0	116.955	151.151	151.151
27	0.27733	42.8873	-33.9426	Rilevato stradale	0	29.2561	49.4373	60.1256	118.069	0	118.069	151.343	151.343
28	0.27733	42.8789	-32.9704	Rilevato stradale	0	29.2561	49.8545	60.6331	119.065	0	119.065	151.405	151.405
29	0.27733	42.8353	-32.0088	Rilevato stradale	0	29.2561	50.2239	61.0823	119.947	0	119.947	151.342	151.342

30	0.27733	42.7578	-31.0572	Rilevato stradale	0	29.2561	50.546	61.4741	120.717	0	120.717	151.157	151.157
31	0.27733	42.6475	-30.115	Rilevato stradale	0	29.2561	50.822	61.8097	121.376	0	121.376	150.854	150.854
32	0.278961	42.7544	-29.179	Limo argilloso	4	21.3151	40.4493	49.1945	128.436	0	128.436	151.023	151.023
33	0.278961	42.5788	-28.2487	Limo argilloso	4	21.3151	40.5261	49.2879	128.699	0	128.699	150.473	150.473
34	0.278961	42.3723	-27.3265	Limo argilloso	4	21.3151	40.5701	49.3414	128.85	0	128.85	149.814	149.814
35	0.278961	42.1357	-26.4119	Limo argilloso	4	21.3151	40.5819	49.3557	128.89	0	128.89	149.046	149.046
36	0.278961	41.8699	-25.5045	Limo argilloso	4	21.3151	40.5619	49.3314	128.822	0	128.822	148.173	148.173
37	0.278961	41.5754	-24.6039	Limo argilloso	4	21.3151	40.5106	49.269	128.646	0	128.646	147.196	147.196
38	0.278961	41.2529	-23.7097	Limo argilloso	4	21.3151	40.4284	49.1691	128.364	0	128.364	146.119	146.119
39	0.278961	40.903	-22.8217	Limo argilloso	4	21.3151	40.3158	49.0321	127.978	0	127.978	144.943	144.943
40	0.278961	40.5261	-21.9394	Limo argilloso	4	21.3151	40.173	48.8585	127.489	0	127.489	143.67	143.67
41	0.278961	40.1229	-21.0625	Limo argilloso	4	21.3151	40.0005	48.6486	126.897	0	126.897	142.302	142.302
42	0.278961	39.6938	-20.1907	Limo argilloso	4	21.3151	39.7984	48.4028	126.204	0	126.204	140.84	140.84
43	0.278961	39.2392	-19.3239	Limo argilloso	4	21.3151	39.5671	48.1215	125.411	0	125.411	139.286	139.286
44	0.278961	38.7595	-18.4616	Limo argilloso	4	21.3151	39.3067	47.8048	124.518	0	124.518	137.641	137.641
45	0.278961	38.2552	-17.6036	Limo argilloso	4	21.3151	39.0176	47.4532	123.527	0	123.527	135.906	135.906
46	0.278961	37.7265	-16.7496	Limo argilloso	4	21.3151	38.6997	47.0666	122.437	0	122.437	134.084	134.084
47	0.278961	37.1739	-15.8995	Limo argilloso	4	21.3151	38.3534	46.6455	121.25	0	121.25	132.175	132.175
48	0.278961	36.6887	-15.053	Limo argilloso	4	21.3151	38.0665	46.2965	120.266	0	120.266	130.504	130.504
49	0.278961	36.9146	-14.2098	Limo argilloso	4	21.3151	38.4624	46.778	121.623	0	121.623	131.363	131.363
50	0.283008	37.8209	-13.3636	Limo argilloso	4	21.3151	38.9074	47.3192	123.479	0.329642	123.149	132.722	132.392
51	0.283008	38.1705	-12.5144	Limo argilloso	4	21.3151	39.2518	47.7381	125.298	0.96753	124.33	134.01	133.042
52	0.283008	38.4965	-11.6679	Limo argilloso	4	21.3151	39.5866	48.1453	127.04	1.56231	125.478	135.215	133.653
53	0.283008	38.7991	-10.824	Limo argilloso	4	21.3151	39.9118	48.5408	128.707	2.11438	126.593	136.338	134.224
54	0.283008	39.0786	-9.98252	Limo argilloso	4	21.3151	40.2276	48.9248	130.3	2.62412	127.676	137.38	134.756
55	0.283008	39.2754	-9.14318	Limo argilloso	4	21.3151	40.4755	49.2263	131.617	3.09187	128.526	138.132	135.04
56	0.283008	38.7137	-8.3058	Limo argilloso	4	21.3151	39.9892	48.6349	130.376	3.51794	126.858	136.214	132.696
57	0.283008	37.91	-7.47022	Limo argilloso	4	21.3151	39.2696	47.7597	128.294	3.90262	124.391	133.443	129.54
58	0.283008	37.0838	-6.63622	Limo argilloso	4	21.3151	38.5315	46.8621	126.106	4.24614	121.86	130.589	126.343
59	0.283008	36.2351	-5.80364	Limo argilloso	4	21.3151	37.7749	45.9419	123.815	4.54874	119.267	127.655	123.106
60	0.283008	35.3641	-4.97228	Limo argilloso	4	21.3151	36.9999	44.9993	121.42	4.8106	116.609	124.639	119.828
61	0.283008	34.4709	-4.14198	Limo argilloso	4	21.3151	36.2063	44.0341	118.92	5.0319	113.888	121.542	116.51
62	0.283008	33.5555	-3.31254	Limo argilloso	4	21.3151	35.3939	43.0461	116.316	5.21277	111.103	118.364	113.151
63	0.283008	32.6181	-2.4838	Limo argilloso	4	21.3151	34.563	42.0355	113.607	5.35333	108.253	115.106	109.753
64	0.283008	31.6585	-1.65558	Limo argilloso	4	21.3151	33.7131	41.0019	110.793	5.45367	105.34	111.768	106.314
65	0.283008	30.677	-0.827703	Limo argilloso	4	21.3151	32.8442	39.9452	107.875	5.51385	102.361	108.349	102.835
66	0.283008	29.6735	0	Limo argilloso	4	21.3151	31.9563	38.8653	104.85	5.5339	99.3163	104.85	99.3163

67	0.283008	28.648	0.827703	Limo argilloso	4	21.3151	31.0491	37.762	101.72	5.51385	96.2057	101.271	95.7571
68	0.283008	27.6005	1.65558	Limo argilloso	4	21.3151	30.1225	36.635	98.4821	5.45367	93.0284	97.6114	92.1578
69	0.283008	26.5309	2.4838	Limo argilloso	4	21.3151	29.1762	35.4841	95.1374	5.35333	89.7841	93.8718	88.5185
70	0.283008	25.4394	3.31254	Limo argilloso	4	21.3151	28.2099	34.3089	91.6838	5.21277	86.471	90.051	84.8382
71	0.283008	24.3257	4.14198	Limo argilloso	4	21.3151	27.2235	33.1093	88.121	5.0319	83.0891	86.1496	81.1177
72	0.283008	23.1899	4.97228	Limo argilloso	4	21.3151	26.2168	31.8849	84.4477	4.8106	79.6371	82.1668	77.3562
73	0.283008	22.0318	5.80364	Limo argilloso	4	21.3151	25.1892	30.6352	80.6629	4.54874	76.1142	78.1027	73.5539
74	0.283008	20.8514	6.63622	Limo argilloso	4	21.3151	24.1407	29.3599	76.7651	4.24614	72.5189	73.9564	69.7103
75	0.283008	19.6486	7.47022	Limo argilloso	4	21.3151	23.0707	28.0586	72.7528	3.90262	68.8502	69.7277	65.8251
76	0.283008	18.4233	8.3058	Limo argilloso	4	21.3151	21.9789	26.7308	68.6249	3.51794	65.107	65.4163	61.8983
77	0.283008	17.1752	9.14318	Limo argilloso	4	21.3151	20.8649	25.3759	64.3791	3.09187	61.2872	61.021	57.9291
78	0.283008	15.9043	9.98252	Limo argilloso	4	21.3151	19.7282	23.9935	60.0142	2.62412	57.39	56.5417	53.9176
79	0.283008	14.6104	10.824	Limo argilloso	4	21.3151	18.5683	22.5828	55.5275	2.11438	53.4131	51.9773	49.8629
80	0.283008	13.2932	11.6679	Limo argilloso	4	21.3151	17.3847	21.1433	50.9174	1.56231	49.3551	47.3273	45.765
81	0.283008	11.9527	12.5144	Limo argilloso	4	21.3151	16.1768	19.6743	46.1811	0.96753	45.2135	42.5905	41.623
82	0.283008	10.9478	13.3636	Limo argilloso	4	21.3151	15.3449	18.6625	42.6908	0.329642	42.3611	39.0454	38.7158
83	0.278961	10.4133	14.2098	Limo argilloso	4	21.3151	15.1033	18.3687	41.5328	0	41.5328	37.7083	37.7083
84	0.278961	10.0273	15.053	Limo argilloso	4	21.3151	14.7449	17.9328	40.3039	0	40.3039	36.3384	36.3384
85	0.278961	9.61788	15.8995	Limo argilloso	4	21.3151	14.3567	17.4606	38.9727	0	38.9727	34.8832	34.8832
86	0.278961	9.1848	16.7496	Limo argilloso	4	21.3151	13.9376	16.9509	37.536	0	37.536	33.3414	33.3414
87	0.278961	8.72774	17.6036	Limo argilloso	4	21.3151	13.4868	16.4027	35.9902	0	35.9902	31.711	31.711
88	0.278961	8.24637	18.4616	Limo argilloso	4	21.3151	13.0034	15.8148	34.333	0	34.333	29.9918	29.9918
89	0.278961	7.74032	19.3239	Limo argilloso	4	21.3151	12.4862	15.1858	32.5598	0	32.5598	28.1814	28.1814
90	0.278961	7.20922	20.1907	Limo argilloso	4	21.3151	11.9343	14.5145	30.6673	0	30.6673	26.2785	26.2785
91	0.278961	6.65264	21.0625	Limo argilloso	4	21.3151	11.3462	13.7993	28.6511	0	28.6511	24.2815	24.2815
92	0.278961	6.07015	21.9394	Limo argilloso	4	21.3151	10.7208	13.0386	26.5066	0	26.5066	22.1883	22.1883
93	0.278961	5.46128	22.8217	Limo argilloso	4	21.3151	10.0565	12.2307	24.2289	0	24.2289	19.9971	19.9971
94	0.278961	4.82552	23.7097	Limo argilloso	4	21.3151	9.35178	11.3736	21.8127	0	21.8127	17.7056	17.7056
95	0.278961	4.16231	24.6039	Limo argilloso	4	21.3151	8.60495	10.4653	19.252	0	19.252	15.3117	15.3117
96	0.278961	3.47109	25.5045	Limo argilloso	4	21.3151	7.81416	9.50358	16.5407	0	16.5407	12.8128	12.8128
97	0.278961	2.75123	26.4119	Limo argilloso	4	21.3151	6.97737	8.48588	13.6716	0	13.6716	10.2062	10.2062
98	0.278961	2.00205	27.3265	Limo argilloso	4	21.3151	6.09236	7.40953	10.6372	0	10.6372	7.48913	7.48913
99	0.278961	1.22284	28.2487	Limo argilloso	4	21.3151	5.15668	6.27155	7.42903	0	7.42903	4.6584	4.6584
100	0.278961	0.412814	29.179	Limo argilloso	4	21.3151	4.16762	5.06866	4.03789	0	4.03789	1.7107	1.7107

Analisi sismica

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.03419

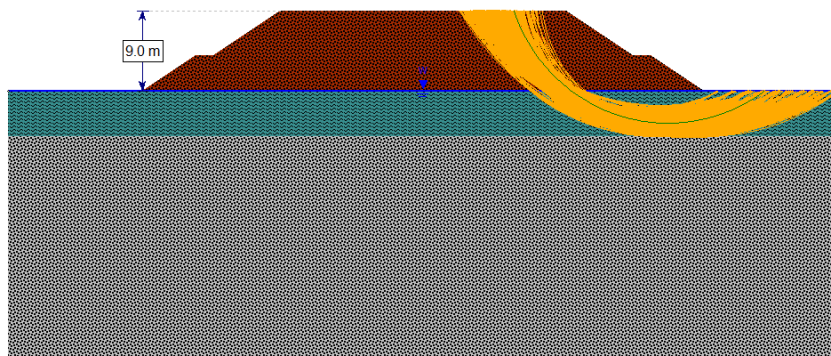
Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Angle of Slice Base [deg]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [deg]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]	Base Vertical Stress [kPa]	Effective Vertical Stress [kPa]
1	0.300852	1.97579	-66.4814	Rilevato stradale	0	35	2.23287	2.30921	3.95747	0	3.95747	9.08816	9.08816
2	0.300852	5.75261	-64.4789	Rilevato stradale	0	35	5.08698	5.2609	9.01602	0	9.01602	19.671	19.671
3	0.300852	9.21349	-62.6142	Rilevato stradale	0	35	7.95144	8.2233	14.0929	0	14.0929	29.4421	29.4421
4	0.300852	12.4157	-60.8604	Rilevato stradale	0	35	10.8085	11.178	19.1565	0	19.1565	38.5439	38.5439
5	0.300852	15.4004	-59.1984	Rilevato stradale	0	35	13.6471	14.1137	24.1878	0	24.1878	47.0796	47.0796
6	0.300852	18.1984	-57.6138	Rilevato stradale	0	35	16.4607	17.0235	29.1744	0	29.1744	55.1261	55.1261
7	0.300852	20.8334	-56.0956	Rilevato stradale	0	35	19.2449	19.9029	34.1091	0	34.1091	62.7438	62.7438
8	0.300852	23.3243	-54.6352	Rilevato stradale	0	35	21.9971	22.7492	38.9871	0	38.9871	69.9804	69.9804
9	0.300852	25.6863	-53.2255	Rilevato stradale	0	35	24.7158	25.5608	43.8056	0	43.8056	76.8746	76.8746
10	0.300852	27.9319	-51.8609	Rilevato stradale	0	35	27.4	28.3368	48.5629	0	48.5629	83.4583	83.4583
11	0.300852	30.0714	-50.5365	Rilevato stradale	0	35	30.0492	31.0766	53.2584	0	53.2584	89.7584	89.7584
12	0.300852	32.1137	-49.2484	Rilevato stradale	0	35	32.6634	33.7802	57.8917	0	57.8917	95.7972	95.7972
13	0.300852	34.0663	-47.993	Rilevato stradale	0	35	35.2427	36.4476	62.4631	0	62.4631	101.594	101.594
14	0.300852	35.9357	-46.7675	Rilevato stradale	0	35	37.7874	39.0793	66.9732	0	66.9732	107.167	107.167
15	0.300852	37.7274	-45.5693	Rilevato stradale	0	35	38.9676	40.2999	69.0651	0	69.0651	108.815	108.815
16	0.300852	39.4464	-44.3962	Rilevato stradale	0	35	41.417	42.833	73.4062	0	73.4062	113.959	113.959
17	0.300852	41.0971	-43.2461	Rilevato stradale	0	35	43.8384	45.3372	77.698	0	77.698	118.931	118.931
18	0.300852	42.6833	-42.1174	Rilevato stradale	0	35	46.2275	47.808	81.9323	0	81.9323	123.728	123.728
19	0.300852	44.2084	-41.0084	Rilevato stradale	0	35	48.5847	50.2458	86.11	0	86.11	128.357	128.357
20	0.300852	45.0902	-39.9178	Rilevato stradale	0	35	50.2582	51.9765	89.0761	0	89.0761	131.125	131.125
21	0.300852	45.3556	-38.8443	Rilevato stradale	0	35	51.2486	53.0008	90.8316	0	90.8316	132.102	132.102
22	0.300852	45.5682	-37.7868	Rilevato stradale	0	35	52.1744	53.9582	92.4724	0	92.4724	132.924	132.924
23	0.300852	45.7303	-36.7442	Rilevato stradale	0	35	53.0366	54.8499	94.0005	0	94.0005	133.597	133.597
24	0.300852	45.844	-35.7156	Rilevato stradale	0	35	53.8364	55.6771	95.4182	0	95.4182	134.126	134.126
25	0.300852	45.9112	-34.7002	Rilevato stradale	0	35	54.5752	56.4411	96.7275	0	96.7275	134.517	134.517
26	0.300852	45.9335	-33.697	Rilevato stradale	0	35	55.2536	57.1427	97.9299	0	97.9299	134.775	134.775
27	0.300852	45.9125	-32.7054	Rilevato stradale	0	35	55.8726	57.7829	99.0271	0	99.0271	134.904	134.904
28	0.300852	45.8498	-31.7247	Rilevato stradale	0	35	56.4331	58.3625	100.02	0	100.02	134.908	134.908
29	0.300852	45.7465	-30.7543	Rilevato stradale	0	35	56.9356	58.8822	100.911	0	100.911	134.79	134.79
30	0.290588	44.0511	-29.8098	Limo argilloso	5	26	46.8395	48.441	108.931	0	108.931	135.767	135.767
31	0.290588	43.8838	-28.8904	Limo argilloso	5	26	47.0425	48.6509	109.447	0	109.447	135.406	135.406
32	0.290588	43.683	-27.9791	Limo argilloso	5	26	47.2053	48.8193	109.862	0	109.862	134.939	134.939

33	0.290588	43.4497	-27.0754	Limo argilloso	5	26	47.3283	48.9465	110.175	0	110.175	134.368	134.368
34	0.290588	43.1845	-26.1789	Limo argilloso	5	26	47.4121	49.0331	110.388	0	110.388	133.696	133.696
35	0.290588	42.8883	-25.2893	Limo argilloso	5	26	47.4569	49.0795	110.502	0	110.502	132.924	132.924
36	0.290588	42.5617	-24.4062	Limo argilloso	5	26	47.4633	49.0861	110.518	0	110.518	132.055	132.055
37	0.290588	42.2054	-23.5292	Limo argilloso	5	26	47.4315	49.0532	110.437	0	110.437	131.09	131.09
38	0.290588	41.82	-22.658	Limo argilloso	5	26	47.3619	48.9812	110.26	0	110.26	130.031	130.031
39	0.290588	41.406	-21.7923	Limo argilloso	5	26	47.2547	48.8704	109.987	0	109.987	128.88	128.88
40	0.290588	40.964	-20.9318	Limo argilloso	5	26	47.1101	48.7208	109.62	0	109.62	127.639	127.639
41	0.290588	40.4944	-20.0762	Limo argilloso	5	26	46.9284	48.5329	109.157	0	109.157	126.308	126.308
42	0.290588	39.9977	-19.2253	Limo argilloso	5	26	46.7096	48.3066	108.6	0	108.6	124.889	124.889
43	0.290588	39.4744	-18.3788	Limo argilloso	5	26	46.4539	48.0422	107.95	0	107.95	123.384	123.384
44	0.290588	38.9248	-17.5364	Limo argilloso	5	26	46.1614	47.7397	107.206	0	107.206	121.793	121.793
45	0.290588	38.5137	-16.6978	Limo argilloso	5	26	46.0136	47.5868	106.829	0	106.829	120.632	120.632
46	0.298682	39.9654	-15.8514	Limo argilloso	5	26	46.5855	48.1783	108.7	0.415852	108.285	121.928	121.512
47	0.298682	40.4331	-14.997	Limo argilloso	5	26	47.1251	48.7363	110.882	1.22431	109.657	123.506	122.282
48	0.298682	40.8737	-14.1459	Limo argilloso	5	26	47.6549	49.2843	112.992	1.98602	111.006	125.002	123.016
49	0.298682	41.2876	-13.298	Limo argilloso	5	26	48.1753	49.8224	115.031	2.70152	112.33	126.418	123.716
50	0.298682	41.6751	-12.4531	Limo argilloso	5	26	48.686	50.3506	117.001	3.37132	113.629	127.752	124.381
51	0.298682	42.0364	-11.6109	Limo argilloso	5	26	49.1875	50.8692	118.901	3.99587	114.905	129.007	125.012
52	0.298682	41.97	-10.7712	Limo argilloso	5	26	49.2279	50.911	119.584	4.5756	115.008	128.949	124.373
53	0.298682	41.1635	-9.93388	Limo argilloso	5	26	48.4448	50.1012	118.126	5.11089	113.016	126.611	121.5
54	0.298682	40.3177	-9.0987	Limo argilloso	5	26	47.6202	49.2484	116.52	5.6021	110.917	124.146	118.544
55	0.298682	39.4465	-8.26546	Limo argilloso	5	26	46.7697	48.3688	114.803	6.04955	108.753	121.597	115.547
56	0.298682	38.5502	-7.43398	Limo argilloso	5	26	45.8931	47.4622	112.976	6.45353	106.523	118.964	112.511
57	0.298682	37.6289	-6.60407	Limo argilloso	5	26	44.9903	46.5285	111.04	6.8143	104.225	116.248	109.434
58	0.298682	36.6827	-5.77555	Limo argilloso	5	26	44.061	45.5675	108.993	7.1321	101.861	113.45	106.318
59	0.298682	35.7118	-4.94824	Limo argilloso	5	26	43.1053	44.5791	106.836	7.40712	99.4292	110.568	103.161
60	0.298682	34.7163	-4.12196	Limo argilloso	5	26	42.1228	43.563	104.569	7.63954	96.9291	107.604	99.9647
61	0.298682	33.6961	-3.29654	Limo argilloso	5	26	41.1133	42.519	102.19	7.82951	94.3604	104.558	96.7285
62	0.298682	32.6515	-2.47181	Limo argilloso	5	26	40.0766	41.4468	99.6998	7.97713	91.7227	101.43	93.4527
63	0.298682	31.5825	-1.64759	Limo argilloso	5	26	39.0121	40.346	97.0968	8.08252	89.0143	98.219	90.1365
64	0.298682	30.489	-0.82371	Limo argilloso	5	26	37.92	39.2165	94.3809	8.14572	86.2351	94.926	86.7803
65	0.298682	29.3712	0	Limo argilloso	5	26	36.7994	38.0576	91.5508	8.16678	83.384	91.5508	83.384
66	0.298682	28.229	0.82371	Limo argilloso	5	26	35.6502	36.8691	88.6057	8.14572	80.46	88.0932	79.9475
67	0.298682	27.0625	1.64759	Limo argilloso	5	26	34.4719	35.6505	85.5442	8.08252	77.4617	84.5526	76.4701
68	0.298682	25.8715	2.47181	Limo argilloso	5	26	33.264	34.4013	82.3651	7.97713	74.388	80.9291	72.952
69	0.298682	24.6561	3.29654	Limo argilloso	5	26	32.0258	33.1208	79.0672	7.82951	71.2376	77.2225	69.393

70	0.298682	23.4162	4.12196	Limo argilloso	5	26	30.757	31.8086	75.6486	7.63954	68.0091	73.4321	65.7925
71	0.298682	22.1517	4.94824	Limo argilloso	5	26	29.4567	30.4639	72.1078	7.40712	64.7007	69.5575	62.1504
72	0.298682	20.8626	5.77555	Limo argilloso	5	26	28.1245	29.0861	68.443	7.1321	61.3109	65.5983	58.4662
73	0.298682	19.5488	6.60407	Limo argilloso	5	26	26.7594	27.6743	64.6517	6.8143	57.8374	61.5536	54.7393
74	0.298682	18.2101	7.43398	Limo argilloso	5	26	25.3608	26.2279	60.7319	6.45353	54.2784	57.4228	50.9693
75	0.298682	16.8464	8.26546	Limo argilloso	5	26	23.9277	24.7458	56.6816	6.04955	50.6321	53.2057	47.1561
76	0.298682	15.4575	9.0987	Limo argilloso	5	26	22.4592	23.2271	52.4976	5.6021	46.8955	48.9007	43.2986
77	0.298682	14.3469	9.93388	Limo argilloso	5	26	21.3596	22.0899	49.2084	5.11089	44.0976	45.4676	40.3567
78	0.298682	13.9969	10.7712	Limo argilloso	5	26	21.2869	22.0147	48.4882	4.5756	43.9126	44.4386	39.863
79	0.298682	13.6616	11.6109	Limo argilloso	5	26	21.2535	21.9802	47.8237	3.99587	43.8279	43.4568	39.4609
80	0.298682	13.3003	12.4531	Limo argilloso	5	26	21.2055	21.9305	47.0765	3.37132	43.7052	42.3936	39.0223
81	0.298682	12.9128	13.298	Limo argilloso	5	26	21.1421	21.865	46.2459	2.70152	43.5444	41.2489	38.5474
82	0.298682	12.4989	14.1459	Limo argilloso	5	26	21.0632	21.7834	45.3295	1.98602	43.3435	40.0208	38.0348
83	0.298682	12.0582	14.997	Limo argilloso	5	26	20.9684	21.6853	44.3266	1.22431	43.1022	38.7093	37.485
84	0.298682	11.5906	15.8514	Limo argilloso	5	26	20.857	21.5701	43.2344	0.415852	42.8185	37.3122	36.8964
85	0.290588	10.8017	16.6978	Limo argilloso	5	26	20.5347	21.2368	41.9988	0	41.9988	35.8389	35.8389
86	0.290588	10.3076	17.5364	Limo argilloso	5	26	19.986	20.6693	40.6024	0	40.6024	34.2869	34.2869
87	0.290588	9.78756	18.3788	Limo argilloso	5	26	19.3911	20.0541	39.0887	0	39.0887	32.6461	32.6461
88	0.290588	9.24128	19.2253	Limo argilloso	5	26	18.7484	19.3894	37.4534	0	37.4534	30.9152	30.9152
89	0.290588	8.66835	20.0762	Limo argilloso	5	26	18.0556	18.6729	35.6906	0	35.6906	29.0917	29.0917
90	0.290588	8.06833	20.9318	Limo argilloso	5	26	17.3106	17.9025	33.795	0	33.795	27.1737	27.1737
91	0.290588	7.44076	21.7923	Limo argilloso	5	26	16.5111	17.0756	31.7606	0	31.7606	25.1592	25.1592
92	0.290588	6.78516	22.658	Limo argilloso	5	26	15.6542	16.1894	29.5803	0	29.5803	23.0455	23.0455
93	0.290588	6.101	23.5292	Limo argilloso	5	26	14.737	15.2409	27.2467	0	27.2467	20.8299	20.8299
94	0.290588	5.38771	24.4062	Limo argilloso	5	26	13.7565	14.2269	24.7517	0	24.7517	18.5097	18.5097
95	0.290588	4.64471	25.2893	Limo argilloso	5	26	12.709	13.1435	22.0864	0	22.0864	16.0817	16.0817
96	0.290588	3.87133	26.1789	Limo argilloso	5	26	11.5906	11.9869	19.2407	0	19.2407	13.5427	13.5427
97	0.290588	3.06691	27.0754	Limo argilloso	5	26	10.397	10.7525	16.2035	0	16.2035	10.8887	10.8887
98	0.290588	2.23068	27.9791	Limo argilloso	5	26	9.12335	9.43528	12.9627	0	12.9627	8.116	8.116
99	0.290588	1.36186	28.8904	Limo argilloso	5	26	7.7642	8.02966	9.50435	0	9.50435	5.21997	5.21997
100	0.290588	0.459602	29.8098	Limo argilloso	5	26	6.31349	6.52935	5.81308	0	5.81308	2.19587	2.19587

RAPPORTO DI CALCOLO

VERIFICA DI STABILITÀ



Oggetto: Rilevato stradale alla progressiva 10+150 (sezione trasversale di calcolo R3)



Table of Contents

Project Summary	2
Currently Open Scenarios	2
Design Standard	3
Analisi statica	3
Analisi sismica	3
Analysis Options	4
All Open Scenarios	4
Seismic Loading	5
Analisi statica	5
Analisi sismica	5
Loading	6
Analisi statica	6
Analisi sismica	6
Materials	7
Materials In Use	7
Global Minimums	8
Analisi statica	8
Method: bishop simplified	8
Analisi sismica	8
Method: bishop simplified	8
Slice Data	9
Analisi statica	9
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.11543	9
Analisi sismica	12
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.08382	12

Project Summary

File Name: Slide1.slmd
Slide2 Modeler Version: 9.031
Project Title: Slide2 - An Interactive Slope Stability Program

Currently Open Scenarios

Group Name	Scenario Name	Global Minimum	Compute Time
Analisi statica 	Master Scenario	Bishop Simplified: 1.115430	00h:00m:00.227s
Analisi sismica 	Master Scenario	Bishop Simplified: 1.083820	00h:00m:00.207s

Design Standard

◆ Analisi statica

Selected Type: Eurocode 7 (User Defined)
Name: NTC2018 - Approccio 1 , Combinazione 2 (A2+M2+R2) - SLU

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Undrained strength	1.4
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1.1
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

◆ Analisi sismica

Selected Type: Eurocode 7 (User Defined)
Name: NTC2018 - Approccio 1, Combinazione 2 (A2+M2+R2) - SLV

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1
Coefficient of shearing resistance	1
Undrained strength	1
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1.2
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

Analysis Options

All Open Scenarios

Slices Type:	Vertical
Analysis Methods Used	
	Bishop simplified
Number of slices:	100
Tolerance:	0.001
Maximum number of iterations:	150
Check malpha < 0.2:	Yes
Create Interslice boundaries at intersections with water tables and piezos:	Yes
Initial trial value of FS:	1
Steffensen Iteration:	Yes

Seismic Loading

◆ Analisi statica

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No

◆ Analisi sismica

Advanced seismic analysis:	No
Staged pseudostatic analysis:	No
Seismic Load Coefficient (Horizontal):	0.138
Seismic Load Coefficient (Vertical):	-0.069

Loading

◆ **Analisi statica**


Distribution:	Constant
Magnitude [kPa]:	20
Orientation:	Normal to boundary
Load Action:	Live

◆ **Analisi sismica**


Distribution:	Constant
Magnitude [kPa]:	4
Orientation:	Normal to boundary
Load Action:	Live

Materials


Rilevato stradale

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	19 kN/m3
Cohesion	0 kPa
Phi	35 °
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No

Limo argilloso

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	19 kN/m3
Cohesion	5 kPa
Phi	26 °
Tensile Strength	0 kPa
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No

Ghiaia sabbiosa

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	19 kN/m3
Cohesion	0 kPa
Phi	36 °
Water Surface	Assigned per scenario
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No

Materials In Use

Material		Analisi statica	Analisi sismica
Rilevato stradale		✓	✓
Limo argilloso		✓	✓
Ghiaia sabbiosa		✓	✓

Global Minimums

◆ Analisi statica

Method: bishop simplified

	FS	1.115430
Center:	73.895, 44.557	
Radius:	18.125	
Left Slip Surface Endpoint:	56.643, 39.000	
Right Slip Surface Endpoint:	84.693, 30.000	
Resisting Moment:	19415.6 kN-m	
Driving Moment:	17406.4 kN-m	
Total Slice Area:	151.303 m ²	
Surface Horizontal Width:	28.0502 m	
Surface Average Height:	5.394 m	

◆ Analisi sismica

Method: bishop simplified

	FS	1.083820
Center:	73.895, 50.363	
Radius:	22.481	
Left Slip Surface Endpoint:	54.497, 39.000	
Right Slip Surface Endpoint:	83.420, 30.000	
Resisting Moment:	25097.8 kN-m	
Driving Moment:	23156.8 kN-m	
Total Slice Area:	132.579 m ²	
Surface Horizontal Width:	28.923 m	
Surface Average Height:	4.58386 m	

Slice Data

◆ Analisi statica

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.11543

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Angle of Slice Base [deg]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [deg]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]	Base Vertical Stress [kPa]	Effective Vertical Stress [kPa]
1	0.280581	2.14747	-70.7984	Rilevato stradale	0	29.2561	6.29258	7.01893	13.7831	0	13.7831	31.8513	31.8513
2	0.280581	6.16982	-68.2528	Rilevato stradale	0	29.2561	9.70012	10.8198	21.2469	0	21.2469	45.5638	45.5638
3	0.280581	9.72187	-65.9667	Rilevato stradale	0	29.2561	13.0243	14.5277	28.528	0	28.528	57.7354	57.7354
4	0.280581	12.9237	-63.8706	Rilevato stradale	0	29.2561	16.2579	18.1345	35.6108	0	35.6108	68.7542	68.7542
5	0.280581	15.8503	-61.9213	Rilevato stradale	0	29.2561	19.4011	21.6406	42.4956	0	42.4956	78.8632	78.8632
6	0.280581	18.5523	-60.0896	Rilevato stradale	0	29.2561	22.4571	25.0493	49.1893	0	49.1893	88.227	88.227
7	0.280581	21.066	-58.3549	Rilevato stradale	0	29.2561	25.4298	28.3652	55.7009	0	55.7009	96.9636	96.9636
8	0.280581	23.4182	-56.7017	Rilevato stradale	0	29.2561	28.3238	31.5932	62.0398	0	62.0398	105.161	105.161
9	0.280581	25.6296	-55.1183	Rilevato stradale	0	29.2561	31.1431	34.738	68.2152	0	68.2152	112.888	112.888
10	0.280581	27.7167	-53.5955	Rilevato stradale	0	29.2561	33.8919	37.804	74.2359	0	74.2359	120.198	120.198
11	0.280581	29.6925	-52.1258	Rilevato stradale	0	29.2561	36.5735	40.7952	80.1098	0	80.1098	127.134	127.134
12	0.280581	31.568	-50.7032	Rilevato stradale	0	29.2561	39.1915	43.7154	85.844	0	85.844	133.732	133.732
13	0.280581	33.3521	-49.3225	Rilevato stradale	0	29.2561	41.7489	46.568	91.4459	0	91.4459	140.022	140.022
14	0.280581	35.0523	-47.9795	Rilevato stradale	0	29.2561	44.2486	49.3562	96.921	0	96.921	146.029	146.029
15	0.280581	36.6751	-46.6707	Rilevato stradale	0	29.2561	46.6929	52.0827	102.275	0	102.275	151.773	151.773
16	0.280581	38.2262	-45.3928	Rilevato stradale	0	29.2561	45.3746	50.6122	99.3874	0	99.3874	145.389	145.389
17	0.280581	39.7103	-44.1432	Rilevato stradale	0	29.2561	43.4441	48.4588	95.1588	0	95.1588	137.323	137.323
18	0.280581	41.1316	-42.9196	Rilevato stradale	0	29.2561	45.6249	50.8914	99.9357	0	99.9357	142.362	142.362
19	0.280581	42.4939	-41.7198	Rilevato stradale	0	29.2561	47.7623	53.2755	104.617	0	104.617	147.201	147.201
20	0.280581	43.8004	-40.542	Rilevato stradale	0	29.2561	49.8574	55.6124	109.206	0	109.206	151.852	151.852
21	0.280581	45.0462	-39.3846	Rilevato stradale	0	29.2561	51.9025	57.8936	113.686	0	113.686	156.296	156.296
22	0.280581	45.6338	-38.2461	Rilevato stradale	0	29.2561	53.1986	59.3393	116.525	0	116.525	158.457	158.457
23	0.280581	45.7922	-37.1251	Rilevato stradale	0	29.2561	53.99	60.2221	118.258	0	118.258	159.128	159.128
24	0.280478	45.8881	-36.0208	Limo argilloso	4	21.3151	43.8258	48.8846	128.562	1.00016	127.562	160.428	159.428
25	0.280478	45.957	-34.9319	Limo argilloso	4	21.3151	43.7403	48.7893	130.255	2.96134	127.294	160.805	157.843
26	0.280478	45.9839	-33.8573	Limo argilloso	4	21.3151	43.6211	48.6563	131.764	4.84518	126.919	161.029	156.184
27	0.280478	45.9704	-32.796	Limo argilloso	4	21.3151	43.4694	48.4871	133.096	6.65463	126.441	161.106	154.451
28	0.280478	45.9179	-31.7473	Limo argilloso	4	21.3151	43.2861	48.2827	134.258	8.39235	125.865	161.041	152.649
29	0.280478	45.8278	-30.7103	Limo argilloso	4	21.3151	43.0725	48.0444	135.254	10.0608	125.194	160.839	150.779

30	0.280478	45.7013	-29.6843	Limo argiloso	4	21.3151	42.8294	47.7732	136.091	11.6622	124.429	160.505	148.843
31	0.280478	45.5395	-28.6687	Limo argiloso	4	21.3151	42.5575	47.47	136.773	13.1986	123.574	160.042	146.844
32	0.280478	45.3434	-27.6629	Limo argiloso	4	21.3151	42.2578	47.1357	137.304	14.672	122.632	159.455	144.783
33	0.280478	45.114	-26.6663	Limo argiloso	4	21.3151	41.9309	46.771	137.688	16.0841	121.604	158.746	142.662
34	0.280478	44.8522	-25.6783	Limo argiloso	4	21.3151	41.5774	46.3767	137.929	17.4364	120.492	157.919	140.483
35	0.280478	44.5588	-24.6984	Limo argiloso	4	21.3151	41.1979	45.9534	138.029	18.7306	119.299	156.977	138.246
36	0.280478	44.2345	-23.7261	Limo argiloso	4	21.3151	40.7929	45.5017	137.993	19.968	118.025	155.922	135.954
37	0.280478	43.88	-22.7611	Limo argiloso	4	21.3151	40.363	45.0221	137.823	21.1499	116.673	154.758	133.608
38	0.280478	43.4961	-21.8028	Limo argiloso	4	21.3151	39.9084	44.5151	137.521	22.2774	115.244	153.486	131.208
39	0.280478	43.0833	-20.851	Limo argiloso	4	21.3151	39.4297	43.9811	137.09	23.3518	113.739	152.108	128.757
40	0.280478	42.642	-19.9051	Limo argiloso	4	21.3151	38.9271	43.4205	136.532	24.3739	112.158	150.627	126.253
41	0.280478	42.173	-18.9648	Limo argiloso	4	21.3151	38.401	42.8337	135.848	25.3448	110.504	149.045	123.7
42	0.280478	41.6766	-18.0298	Limo argiloso	4	21.3151	37.8517	42.221	135.042	26.2654	108.776	147.362	121.097
43	0.280478	41.1533	-17.0997	Limo argiloso	4	21.3151	37.2794	41.5826	134.113	27.1364	106.977	145.581	118.445
44	0.280478	40.6035	-16.1743	Limo argiloso	4	21.3151	36.6843	40.9188	133.064	27.9587	105.105	143.704	115.745
45	0.280478	40.0276	-15.2531	Limo argiloso	4	21.3151	36.0667	40.2299	131.896	28.7328	103.163	141.731	112.998
46	0.280478	39.426	-14.336	Limo argiloso	4	21.3151	35.4266	39.5159	130.61	29.4596	101.15	139.664	110.204
47	0.280478	38.7989	-13.4227	Limo argiloso	4	21.3151	34.7641	38.777	129.207	30.1395	99.0672	137.503	107.364
48	0.280478	38.221	-12.5128	Limo argiloso	4	21.3151	34.1578	38.1007	127.934	30.7731	97.1607	135.514	104.741
49	0.280478	38.3527	-11.6061	Limo argiloso	4	21.3151	34.3072	38.2673	128.991	31.361	97.6302	136.037	104.676
50	0.280478	38.6474	-10.7023	Limo argiloso	4	21.3151	34.6432	38.6421	130.59	31.9036	98.6869	137.138	105.234
51	0.280478	38.9178	-9.80123	Limo argiloso	4	21.3151	34.9686	39.0051	132.111	32.4012	99.7101	138.152	105.751
52	0.280478	39.1639	-8.9026	Limo argiloso	4	21.3151	35.2834	39.3562	133.554	32.8544	100.7	139.081	106.227
53	0.280478	39.3861	-8.00616	Limo argiloso	4	21.3151	35.5876	39.6955	134.92	33.2634	101.657	139.925	106.662
54	0.280478	39.5845	-7.1117	Limo argiloso	4	21.3151	35.8813	40.0231	136.209	33.6285	102.58	140.685	107.057
55	0.280478	39.7266	-6.21897	Limo argiloso	4	21.3151	36.1289	40.2993	137.309	33.9501	103.359	141.246	107.296
56	0.280478	39.1573	-5.32776	Limo argiloso	4	21.3151	35.6104	39.721	135.957	34.2283	101.729	139.278	105.049
57	0.280478	38.2885	-4.43784	Limo argiloso	4	21.3151	34.7684	38.7818	133.544	34.4634	99.0805	136.242	101.779
58	0.280478	37.3964	-3.54899	Limo argiloso	4	21.3151	33.9041	37.8177	131.018	34.6555	96.3628	133.121	98.4656
59	0.280478	36.4811	-2.661	Limo argiloso	4	21.3151	33.0175	36.8288	128.38	34.8047	93.575	129.914	95.1096
60	0.280478	35.5425	-1.77365	Limo argiloso	4	21.3151	32.1085	35.8148	125.628	34.9113	90.7163	126.622	91.7105
61	0.280478	34.5807	-0.886717	Limo argiloso	4	21.3151	31.1766	34.7754	122.761	34.9752	87.7861	123.244	88.2686
62	0.280478	33.5958	0	Limo argiloso	4	21.3151	30.2219	33.7105	119.78	34.9965	84.7839	119.78	84.7839
63	0.280478	32.5878	0.886717	Limo argiloso	4	21.3151	29.2441	32.6198	116.684	34.9752	81.709	116.232	81.2563
64	0.280478	31.5566	1.77365	Limo argiloso	4	21.3151	28.2429	31.503	113.472	34.9113	78.5604	112.597	77.6858
65	0.280478	30.5023	2.661	Limo argiloso	4	21.3151	27.2179	30.3597	110.142	34.8047	75.3373	108.877	74.0723
66	0.280478	29.4247	3.54899	Limo argiloso	4	21.3151	26.1688	29.1895	106.694	34.6555	72.0387	105.071	70.4156

67	0.280478	28.3239	4.43784	Limo argiloso	4	21.3151	25.0953	27.9921	103.126	34.4634	68.663	101.179	66.7153
68	0.280478	27.1998	5.32776	Limo argiloso	4	21.3151	23.997	26.767	99.4376	34.2283	65.2093	97.1997	62.9714
69	0.280478	26.0522	6.21897	Limo argiloso	4	21.3151	22.8734	25.5137	95.626	33.9501	61.6759	93.1335	59.1834
70	0.280478	24.881	7.1117	Limo argiloso	4	21.3151	21.724	24.2316	91.6899	33.6285	58.0614	88.9795	55.351
71	0.280478	23.6862	8.00616	Limo argiloso	4	21.3151	20.5483	22.9202	87.6278	33.2634	54.3644	84.7376	51.4742
72	0.280478	22.4676	8.9026	Limo argiloso	4	21.3151	19.3457	21.5788	83.4372	32.8544	50.5828	80.4069	47.5525
73	0.280478	21.2249	9.80123	Limo argiloso	4	21.3151	18.1156	20.2067	79.1156	32.4012	46.7144	75.9861	43.5849
74	0.280478	19.9581	10.7023	Limo argiloso	4	21.3151	16.8572	18.8031	74.661	31.9036	42.7574	71.4751	39.5715
75	0.280478	18.6669	11.6061	Limo argiloso	4	21.3151	15.57	17.3673	70.0706	31.361	38.7096	66.8728	35.5118
76	0.280478	17.3511	12.5128	Limo argiloso	4	21.3151	14.2529	15.8982	65.3413	30.7731	34.5682	62.1781	31.405
77	0.280478	16.382	13.4227	Limo argiloso	4	21.3151	13.3649	14.9077	61.9153	30.1395	31.7758	58.7258	28.5863
78	0.280478	16.0034	14.336	Limo argiloso	4	21.3151	13.2178	14.7436	60.7724	29.4596	31.3128	57.3944	27.9348
79	0.280478	15.6086	15.2531	Limo argiloso	4	21.3151	13.066	14.5742	59.5684	28.7328	30.8356	56.0054	27.2726
80	0.280478	15.1881	16.1743	Limo argiloso	4	21.3151	12.8975	14.3863	58.2644	27.9587	30.3057	54.5236	26.5649
81	0.280478	14.7414	17.0997	Limo argiloso	4	21.3151	12.712	14.1794	56.8587	27.1364	29.7223	52.948	25.8116
82	0.280478	14.2682	18.0298	Limo argiloso	4	21.3151	12.5088	13.9527	55.3488	26.2654	29.0834	51.2773	25.0119
83	0.280478	13.7681	18.9648	Limo argiloso	4	21.3151	12.2872	13.7056	53.7318	25.3448	28.387	49.5094	24.1646
84	0.280478	13.2407	19.9051	Limo argiloso	4	21.3151	12.0469	13.4375	52.0048	24.3739	27.6309	47.6427	23.2688
85	0.280478	12.6855	20.851	Limo argiloso	4	21.3151	11.7869	13.1475	50.1652	23.3518	26.8134	45.6758	22.324
86	0.280478	12.1018	21.8028	Limo argiloso	4	21.3151	11.5066	12.8348	48.2092	22.2774	25.9318	43.6063	21.3289
87	0.280478	11.4893	22.7611	Limo argiloso	4	21.3151	11.205	12.4984	46.1335	21.1499	24.9836	41.4323	20.2824
88	0.280478	10.8473	23.7261	Limo argiloso	4	21.3151	10.8814	12.1374	43.934	19.968	23.966	39.1515	19.1835
89	0.280478	10.1751	24.6984	Limo argiloso	4	21.3151	10.5346	11.7506	41.606	18.7306	22.8754	36.761	18.0304
90	0.280478	9.47207	25.6783	Limo argiloso	4	21.3151	10.1636	11.3368	39.1452	17.4364	21.7088	34.2585	16.8221
91	0.280478	8.73742	26.6663	Limo argiloso	4	21.3151	9.76721	10.8946	36.5463	16.0841	20.4622	31.6411	15.557
92	0.280478	7.97035	27.6629	Limo argiloso	4	21.3151	9.34404	10.4226	33.8036	14.672	19.1316	28.9056	14.2336
93	0.280478	7.16997	28.6687	Limo argiloso	4	21.3151	8.8926	9.91907	30.9106	13.1986	17.712	26.0484	12.8498
94	0.280478	6.33533	29.6843	Limo argiloso	4	21.3151	8.41123	9.38214	27.8605	11.6622	16.1983	23.0659	11.4037
95	0.280478	5.4654	30.7103	Limo argiloso	4	21.3151	7.89808	8.80975	24.6454	10.0608	14.5846	19.954	9.89319
96	0.280478	4.55905	31.7473	Limo argiloso	4	21.3151	7.35102	8.19955	21.2567	8.39235	12.8644	16.7083	8.31593
97	0.280478	3.61507	32.796	Limo argiloso	4	21.3151	6.76772	7.54892	17.6848	6.65463	11.0301	13.3239	6.66932
98	0.280478	2.63212	33.8573	Limo argiloso	4	21.3151	6.14547	6.85484	13.9186	4.84518	9.07346	9.79571	4.95053
99	0.280478	1.60876	34.9319	Limo argiloso	4	21.3151	5.4812	6.1139	9.94595	2.96134	6.98461	6.11767	3.15633
100	0.280478	0.543393	36.0208	Limo argiloso	4	21.3151	4.7714	5.32216	5.75273	1.00016	4.75257	2.28346	1.2833

Analisi sismica

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.08382

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Angle of Slice Base [deg]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [deg]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]	Base Vertical Stress [kPa]	Effective Vertical Stress [kPa]
1	0.290358	1.32885	-58.9218	Rilevato stradale	0	35	2.14668	2.32662	3.98732	0	3.98732	7.54898	7.54898
2	0.290358	3.91568	-57.516	Rilevato stradale	0	35	4.42416	4.79499	8.21756	0	8.21756	15.1664	15.1664
3	0.290358	6.36837	-56.1625	Rilevato stradale	0	35	6.69536	7.25656	12.4361	0	12.4361	22.4234	22.4234
4	0.290358	8.7008	-54.8552	Rilevato stradale	0	35	8.95556	9.70621	16.6343	0	16.6343	29.3556	29.3556
5	0.290358	10.9244	-53.5891	Rilevato stradale	0	35	11.2013	12.1402	20.8056	0	20.8056	35.9926	35.9926
6	0.290358	13.0488	-52.3598	Rilevato stradale	0	35	13.43	14.5557	24.9454	0	24.9454	42.3593	42.3593
7	0.290358	15.0822	-51.1638	Rilevato stradale	0	35	15.6399	16.9508	29.0499	0	29.0499	48.4768	48.4768
8	0.290358	17.0315	-49.9982	Rilevato stradale	0	35	17.8293	19.3237	33.1165	0	33.1165	54.3631	54.3631
9	0.290358	18.9028	-48.8601	Rilevato stradale	0	35	19.9973	21.6735	37.1436	0	37.1436	60.0348	60.0348
10	0.290358	20.7013	-47.7474	Rilevato stradale	0	35	22.1432	23.9992	41.1293	0	41.1293	65.5048	65.5048
11	0.290358	22.4316	-46.658	Rilevato stradale	0	35	24.2662	26.3002	45.0727	0	45.0727	70.7855	70.7855
12	0.290358	24.0979	-45.5901	Rilevato stradale	0	35	26.3661	28.5761	48.9731	0	48.9731	75.8879	75.8879
13	0.290358	25.7037	-44.5422	Rilevato stradale	0	35	28.4425	30.8266	52.8299	0	52.8299	80.8215	80.8215
14	0.290358	27.2524	-43.5128	Rilevato stradale	0	35	30.4955	33.0516	56.643	0	56.643	85.5951	85.5951
15	0.290358	28.7467	-42.5008	Rilevato stradale	0	35	32.5247	35.2509	60.4121	0	60.4121	90.2163	90.2163
16	0.290358	30.1893	-41.5048	Rilevato stradale	0	35	34.5301	37.4244	64.1372	0	64.1372	94.692	94.692
17	0.290358	31.5827	-40.5239	Rilevato stradale	0	35	36.5119	39.5723	67.818	0	67.818	99.0285	99.0285
18	0.290358	32.9289	-39.5572	Rilevato stradale	0	35	38.4699	41.6945	71.455	0	71.455	103.232	103.232
19	0.290358	34.2299	-38.6038	Rilevato stradale	0	35	40.4044	43.7911	75.0481	0	75.0481	107.307	107.307
20	0.290358	35.4876	-37.6629	Rilevato stradale	0	35	42.3154	45.8623	78.5978	0	78.5978	111.259	111.259
21	0.290358	36.7035	-36.7338	Rilevato stradale	0	35	44.2031	47.9082	82.1038	0	82.1038	115.092	115.092
22	0.290358	37.8792	-35.8158	Rilevato stradale	0	35	46.0674	49.9288	85.567	0	85.567	118.811	118.811
23	0.290358	39.0161	-34.9083	Rilevato stradale	0	35	47.0117	50.9522	87.3208	0	87.3208	120.127	120.127
24	0.290358	40.1155	-34.0107	Rilevato stradale	0	35	48.2273	52.2697	89.5787	0	89.5787	122.122	122.122
25	0.290358	41.1785	-33.1225	Rilevato stradale	0	35	50.0076	54.1992	92.8854	0	92.8854	125.513	125.513
26	0.290358	42.2063	-32.2433	Rilevato stradale	0	35	51.7654	56.1044	96.1503	0	96.1503	128.803	128.803
27	0.290358	43.1998	-31.3724	Rilevato stradale	0	35	53.5008	57.9852	99.3737	0	99.3737	131.995	131.995
28	0.290358	44.0576	-30.5095	Rilevato stradale	0	35	55.0857	59.703	102.318	0	102.318	134.778	134.778
29	0.290358	44.0861	-29.6543	Rilevato stradale	0	35	55.6404	60.3042	103.348	0	103.348	135.026	135.026
30	0.290358	43.9146	-28.8062	Rilevato stradale	0	35	55.9374	60.6261	103.9	0	103.9	134.659	134.659
31	0.290358	43.7124	-27.965	Rilevato stradale	0	35	56.1879	60.8976	104.365	0	104.365	134.197	134.197
32	0.290358	43.4801	-27.1303	Rilevato stradale	0	35	56.392	61.1188	104.744	0	104.744	133.639	133.639

33	0.290358	43.2185	-26.3018	Rilevato stradale	0	35	56.5501	61.2901	105.038	0	105.038	132.989	132.989
34	0.290358	42.9281	-25.4792	Rilevato stradale	0	35	56.6624	61.4118	105.246	0	105.246	132.247	132.247
35	0.288649	42.3597	-24.6646	Limo argilloso	5	26	45.6486	49.4749	111.475	0	111.475	132.437	132.437
36	0.288649	42.0179	-23.8576	Limo argilloso	5	26	45.5941	49.4158	111.329	0	111.329	131.493	131.493
37	0.288649	41.6495	-23.0556	Limo argilloso	5	26	45.5065	49.3209	111.096	0	111.096	130.464	130.464
38	0.288649	41.255	-22.2584	Limo argilloso	5	26	45.386	49.1903	110.775	0	110.775	129.35	129.35
39	0.288649	40.8348	-21.4657	Limo argilloso	5	26	45.2329	49.0244	110.366	0	110.366	128.153	128.153
40	0.288649	40.3894	-20.6773	Limo argilloso	5	26	45.0474	48.8233	109.871	0	109.871	126.873	126.873
41	0.288649	39.9192	-19.8929	Limo argilloso	5	26	44.8295	48.5871	109.291	0	109.291	125.512	125.512
42	0.288649	39.4245	-19.1124	Limo argilloso	5	26	44.5794	48.3161	108.624	0	108.624	124.072	124.072
43	0.288649	38.9058	-18.3356	Limo argilloso	5	26	44.2973	48.0103	107.871	0	107.871	122.552	122.552
44	0.288649	38.3632	-17.5623	Limo argilloso	5	26	43.983	47.6697	107.033	0	107.033	120.954	120.954
45	0.288649	37.7972	-16.7923	Limo argilloso	5	26	43.6368	47.2945	106.11	0	106.11	119.279	119.279
46	0.288649	37.2081	-16.0253	Limo argilloso	5	26	43.2587	46.8847	105.102	0	105.102	117.527	117.527
47	0.288649	36.596	-15.2614	Limo argilloso	5	26	42.8487	46.4403	104.008	0	104.008	115.699	115.699
48	0.288649	35.9613	-14.5001	Limo argilloso	5	26	42.4066	45.9612	102.83	0	102.83	113.797	113.797
49	0.288649	35.3042	-13.7415	Limo argilloso	5	26	41.9327	45.4475	101.566	0	101.566	111.82	111.82
50	0.288649	34.625	-12.9853	Limo argilloso	5	26	41.4266	44.899	100.216	0	100.216	109.769	109.769
51	0.288649	33.9237	-12.2315	Limo argilloso	5	26	40.8884	44.3157	98.7814	0	98.7814	107.645	107.645
52	0.288649	33.2007	-11.4798	Limo argilloso	5	26	40.318	43.6975	97.2602	0	97.2602	105.448	105.448
53	0.288649	32.456	-10.73	Limo argilloso	5	26	39.7153	43.0443	95.6528	0	95.6528	103.179	103.179
54	0.288649	31.8184	-9.98215	Limo argilloso	5	26	39.2239	42.5117	94.3428	0	94.3428	101.246	101.246
55	0.288649	31.9509	-9.23599	Limo argilloso	5	26	39.5936	42.9124	95.3286	0	95.3286	101.767	101.767
56	0.288649	32.1978	-8.49141	Limo argilloso	5	26	40.0957	43.4565	96.6672	0	96.6672	102.653	102.653
57	0.288649	32.4236	-7.74827	Limo argilloso	5	26	40.5781	43.9794	97.9536	0	97.9536	103.475	103.475
58	0.288649	32.6286	-7.00644	Limo argilloso	5	26	41.0408	44.4809	99.1877	0	99.1877	104.232	104.232
59	0.288649	32.8128	-6.26579	Limo argilloso	5	26	41.4837	44.9609	100.368	0	100.368	104.923	104.923
60	0.288649	32.9763	-5.52619	Limo argilloso	5	26	41.9066	45.4192	101.496	0	101.496	105.551	105.551
61	0.288649	32.9511	-4.78751	Limo argilloso	5	26	42.1133	45.6433	102.048	0	102.048	105.575	105.575
62	0.288649	32.1181	-4.04963	Limo argilloso	5	26	41.3748	44.8429	100.078	0	100.078	103.008	103.008
63	0.288649	31.1646	-3.31242	Limo argilloso	5	26	40.4853	43.8788	97.706	0	97.706	100.049	100.049
64	0.288649	30.1907	-2.57576	Limo argilloso	5	26	39.5608	42.8768	95.2411	0	95.2411	97.0207	97.0207
65	0.288649	29.1964	-1.83952	Limo argilloso	5	26	38.601	41.8366	92.6816	0	92.6816	93.9213	93.9213
66	0.288649	28.1817	-1.10359	Limo argilloso	5	26	37.6056	40.7577	90.0274	0	90.0274	90.7518	90.7518
67	0.288649	27.1466	-0.367844	Limo argilloso	5	26	36.5739	39.6396	87.2763	0	87.2763	87.5111	87.5111
68	0.288649	26.0913	0.367844	Limo argilloso	5	26	35.5057	38.4818	84.4276	0	84.4276	84.1996	84.1996
69	0.288649	25.0156	1.10359	Limo argilloso	5	26	34.4001	37.2836	81.4798	0	81.4798	80.8171	80.8171

70	0.288649	23.9195	1.83952	Limo argiloso	5	26	33.2569	36.0445	78.4311	0	78.4311	77.363	77.363
71	0.288649	22.8032	2.57576	Limo argiloso	5	26	32.0752	34.7638	75.2802	0	75.2802	73.8373	73.8373
72	0.288649	21.6664	3.31242	Limo argiloso	5	26	30.8545	33.4408	72.025	0	72.025	70.2392	70.2392
73	0.288649	20.5092	4.04963	Limo argiloso	5	26	29.594	32.0746	68.6637	0	68.6637	66.5686	66.5686
74	0.288649	19.3315	4.78751	Limo argiloso	5	26	28.293	30.6646	65.1945	0	65.1945	62.8249	62.8249
75	0.288649	18.1332	5.52619	Limo argiloso	5	26	26.9508	29.2098	61.6152	0	61.6152	59.0077	59.0077
76	0.288649	16.9144	6.26579	Limo argiloso	5	26	25.5663	27.7093	57.9234	0	57.9234	55.1164	55.1164
77	0.288649	15.6748	7.00644	Limo argiloso	5	26	24.1388	26.1621	54.1169	0	54.1169	51.1503	51.1503
78	0.288649	14.4145	7.74827	Limo argiloso	5	26	22.6673	24.5673	50.1929	0	50.1929	47.1087	47.1087
79	0.288649	13.1333	8.49141	Limo argiloso	5	26	21.1506	22.9235	46.1487	0	46.1487	42.991	42.991
80	0.288649	11.831	9.23599	Limo argiloso	5	26	19.5878	21.2297	41.9813	0	41.9813	38.7961	38.7961
81	0.288649	10.5077	9.98215	Limo argiloso	5	26	17.9777	19.4846	37.6877	0	37.6877	34.5235	34.5235
82	0.288649	9.48231	10.73	Limo argiloso	5	26	16.7412	18.1445	34.3904	0	34.3904	31.218	31.218
83	0.288649	9.14555	11.4798	Limo argiloso	5	26	16.4056	17.7807	33.4954	0	33.4954	30.1637	30.1637
84	0.288649	8.81321	12.2315	Limo argiloso	5	26	16.0722	17.4194	32.6064	0	32.6064	29.1223	29.1223
85	0.288649	8.4591	12.9853	Limo argiloso	5	26	15.7058	17.0223	31.6293	0	31.6293	28.0076	28.0076
86	0.288649	8.08302	13.7415	Limo argiloso	5	26	15.3054	16.5883	30.5616	0	30.5616	26.8188	26.8188
87	0.288649	7.68475	14.5001	Limo argiloso	5	26	14.8699	16.1163	29.4005	0	29.4005	25.5548	25.5548
88	0.288649	7.26409	15.2614	Limo argiloso	5	26	14.3984	15.6053	28.1431	0	28.1431	24.2145	24.2145
89	0.288649	6.82078	16.0253	Limo argiloso	5	26	13.8895	15.0538	26.7863	0	26.7863	22.7969	22.7969
90	0.288649	6.35458	16.7923	Limo argiloso	5	26	13.3423	14.4607	25.3269	0	25.3269	21.3006	21.3006
91	0.288649	5.86521	17.5623	Limo argiloso	5	26	12.7552	13.8243	23.7613	0	23.7613	19.7243	19.7243
92	0.288649	5.35238	18.3356	Limo argiloso	5	26	12.1267	13.1432	22.0856	0	22.0856	18.0667	18.0667
93	0.288649	4.81578	19.1124	Limo argiloso	5	26	11.4555	12.4157	20.2957	0	20.2957	16.3261	16.3261
94	0.288649	4.25509	19.8929	Limo argiloso	5	26	10.7398	11.64	18.3872	0	18.3872	14.501	14.501
95	0.288649	3.66994	20.6773	Limo argiloso	5	26	9.97786	10.8142	16.3553	0	16.3553	12.5896	12.5896
96	0.288649	3.05996	21.4657	Limo argiloso	5	26	9.16767	9.9361	14.1949	0	14.1949	10.59	10.59
97	0.288649	2.42477	22.2584	Limo argiloso	5	26	8.30715	9.00346	11.9003	0	11.9003	8.50029	8.50029
98	0.288649	1.76393	23.0556	Limo argiloso	5	26	7.39403	8.0138	9.46533	0	9.46533	6.31828	6.31828
99	0.288649	1.07698	23.8576	Limo argiloso	5	26	6.42581	6.96442	6.88347	0	6.88347	4.04163	4.04163
100	0.288649	0.363466	24.6646	Limo argiloso	5	26	5.39976	5.85237	4.14745	0	4.14745	1.66788	1.66788

ALLEGATO E

RAPPORTO DI CALCOLO

VERIFICA DEI CEDIMENTI

Oggetto: Rilevato stradale alla progressiva 4+125 (sezione trasversale di calcolo R1)

Sezione trasversale di calcolo R1 (progressiva km 4+125)

Calcolo del cedimento totale

CEDIMENTI INDOTTI DA UN RILEVATO

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

Altezza del rilevato	h =	8,00	(m)
Larghezza scarpata sinistra	a =	12,00	(m)
Larghezza scarpata destra	a' =	12,00	(m)
Larghezza coronamento	b =	26,00	(m)
Peso dell'unità di volume del rilevato	$\gamma_r =$	19,00	(kN/m ³)

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

Numero di strati	n =	<input type="text" value="3"/>	
Rapporto tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media	$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$	10	(%)
Quota falda da p.c.	$z_w =$	2,50	(m)

n_i (-)	Tipo di terreno	z_i (m)	z_f (m)	s (m)	Δz_i (m)	γ (kN/m ³)	φ' (°)	E (MPa)	v (-)
1	Sabbia limosa	0,0	10,0	10,0	0,50	20,00	36,0	20	0,30
2	Limo argilloso	10,0	20,0	10,0	0,50	19,00	26,0	40	0,30
3	Ghiaia	20,0	30,0	10,0	0,50	20,00	40,0	90	0,25

Massima profondità alla quale viene estesa l'analisi	H =	30,00	(m)
--	-----	-------	-----

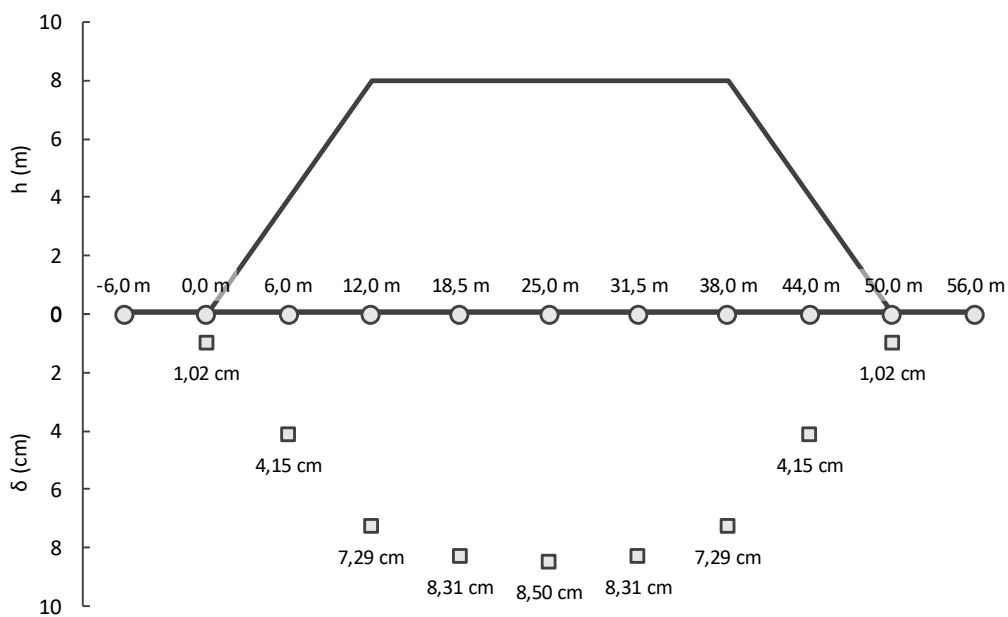
PROGETTAZIONE ATI:

ASCISSE DI CALCOLO

x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (m)	x_5 (m)	x_6 (m)	x_7 (m)	x_8 (m)	x_9 (m)	x_{10} (m)	x_{11} (m)
-6,00	0,00	6,00	12,00	18,50	25,00	31,50	38,00	44,00	50,00	56,00

CEDIMENTI

δ_1 (cm)	δ_2 (cm)	δ_3 (cm)	δ_4 (cm)	δ_5 (cm)	δ_6 (cm)	δ_7 (cm)	δ_8 (cm)	δ_9 (cm)	δ_{10} (cm)	δ_{11} (cm)
0,02	1,02	4,15	7,29	8,31	8,50	8,31	7,29	4,15	1,02	0,02



PROGETTAZIONE ATI:

Calcolo del cedimento immediato

CEDIMENTI INDOTTI DA UN RILEVATO

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

Altezza del rilevato	h =	8,00	(m)
Larghezza scarpata sinistra	a =	12,00	(m)
Larghezza scarpata destra	a' =	12,00	(m)
Larghezza coronamento	b =	26,00	(m)
Peso dell'unità di volume del rilevato	$\gamma_r =$	19,00	(kN/m ³)

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

Numero di strati	n =	<input type="text" value="3"/>	3
Rapporto tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media	$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$	10	(%)
Quota falda da p.c.	$z_w =$	2,50	(m)

n_i (-)	Tipo di terreno	z_i (m)	z_f (m)	s (m)	Δz_i (m)	γ (kN/m ³)	φ' (°)	E (MPa)	ν (-)
1	Sabbia limosa	0,0	10,0	10,0	0,50	20,00	36,0	20	0,30
2	Limo argilloso	10,0	20,0	10,0	0,50	19,00	26,0	60	0,50
3	Ghiaia	20,0	30,0	10,0	0,50	20,00	40,0	90	0,25

Massima profondità alla quale viene estesa l'analisi	H =	30,00	(m)
--	-----	--------------	-----

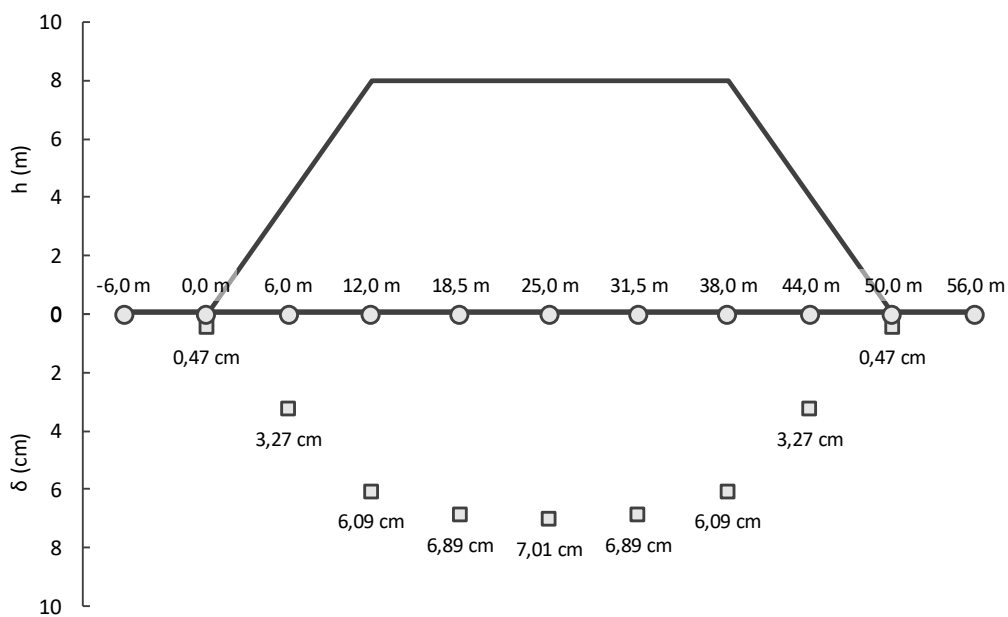
PROGETTAZIONE ATI:

ASCISSE DI CALCOLO

x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (m)	x_5 (m)	x_6 (m)	x_7 (m)	x_8 (m)	x_9 (m)	x_{10} (m)	x_{11} (m)
-6,00	0,00	6,00	12,00	18,50	25,00	31,50	38,00	44,00	50,00	56,00

CEDIMENTI

δ_1 (cm)	δ_2 (cm)	δ_3 (cm)	δ_4 (cm)	δ_5 (cm)	δ_6 (cm)	δ_7 (cm)	δ_8 (cm)	δ_9 (cm)	δ_{10} (cm)	δ_{11} (cm)
-0,30	0,47	3,27	6,09	6,89	7,01	6,89	6,09	3,27	0,47	-0,30



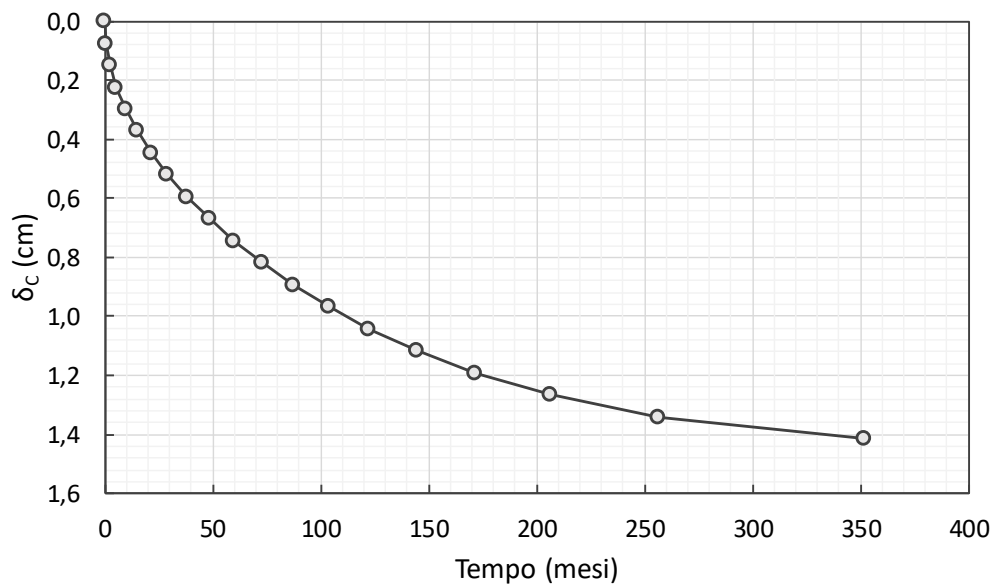
PROGETTAZIONE ATI:

Decorso dei cedimenti

DECORSO DEI CEDIMENTI DI CONSOLIDAZIONE

DATI DI INPUT

Cedimento di consolidazione	$\delta_c =$	1,49	(cm)
Massimo percorso di drenaggio	$H =$	5,00	(m)
Coefficiente di consolidazione	$c_v =$	3,19E-08	(m ² /s)



$t =$ 12 mesi

$T_v =$ 0,040

$U_m =$ 22,5%

$\delta_t =$ 0,33 cm

PROGETTAZIONE ATI:

RAPPORTO DI CALCOLO

VERIFICA DEI CEDIMENTI

Oggetto: Rilevato stradale alla progressiva 8+100 (sezione trasversale di calcolo R2)

Sezione trasversale di calcolo R2 (progressiva km 8+100)

Calcolo del cedimento totale

CEDIMENTI INDOTTI DA UN RILEVATO

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

Altezza del rilevato	h =	10,00	(m)
Larghezza scarpata sinistra	a =	15,00	(m)
Larghezza scarpata destra	a' =	15,00	(m)
Larghezza coronamento	b =	26,00	(m)
Peso dell'unità di volume del rilevato	$\gamma_r =$	19,00	(kN/m ³)

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

Numero di strati	n =	<input type="text" value="3"/>	
Rapporto tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media	$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$	10	(%)
Quota falda da p.c.	$z_w =$	2,50	(m)

n_i (-)	Tipo di terreno	z_i (m)	z_f (m)	s (m)	Δz_i (m)	γ (kN/m ³)	φ' (°)	E (MPa)	v (-)
1	Limo argilloso	0,0	5,0	5,0	0,50	19,00	26,0	25	0,30
2	Argilla limosa	5,0	20,0	15,0	0,50	20,00	26,0	40	0,30
3	Argilla limosa	20,0	30,0	10,0	0,50	20,00	26,0	50	0,30

Massima profondità alla quale viene estesa l'analisi	H =	30,00	(m)
--	-----	-------	-----

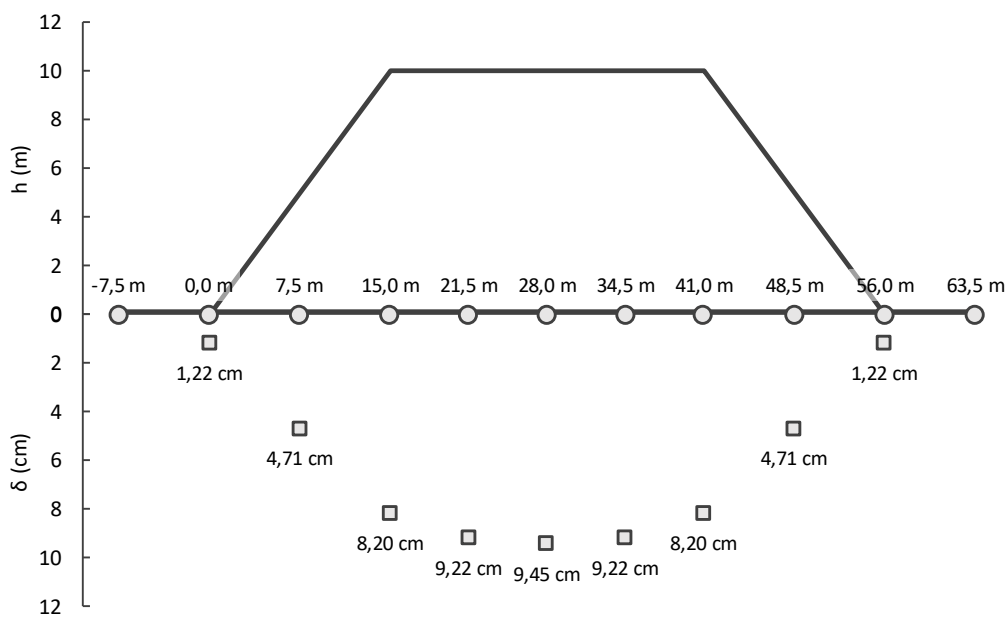
PROGETTAZIONE ATI:

ASCISSE DI CALCOLO

x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (m)	x_5 (m)	x_6 (m)	x_7 (m)	x_8 (m)	x_9 (m)	x_{10} (m)	x_{11} (m)
-7,50	0,00	7,50	15,00	21,50	28,00	34,50	41,00	48,50	56,00	63,50

CEDIMENTI

δ_1 (cm)	δ_2 (cm)	δ_3 (cm)	δ_4 (cm)	δ_5 (cm)	δ_6 (cm)	δ_7 (cm)	δ_8 (cm)	δ_9 (cm)	δ_{10} (cm)	δ_{11} (cm)
0,08	1,22	4,71	8,20	9,22	9,45	9,22	8,20	4,71	1,22	0,08



PROGETTAZIONE ATI:

Calcolo del cedimento immediato

CEDIMENTI INDOTTI DA UN RILEVATO

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL RILEVATO

Altezza del rilevato	h =	10,00	(m)
Larghezza scarpata sinistra	a =	15,00	(m)
Larghezza scarpata destra	a' =	15,00	(m)
Larghezza coronamento	b =	26,00	(m)
Peso dell'unità di volume del rilevato	$\gamma_r =$	19,00	(kN/m ³)

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E GEOTECNICHE DEL SOTTOSUOLO

Numero di strati	n =	<input type="text" value="3"/>	
Rapporto tensione media indotta nel sottosuolo e tensione efficace media	$\Delta\sigma_m/\sigma_{m0}$	10	(%)
Quota falda da p.c.	$z_w =$	2,50	(m)

n_i (-)	Tipo di terreno	z_i (m)	z_f (m)	s (m)	Δz_i (m)	γ (kN/m ³)	φ' (°)	E (MPa)	ν (-)
1	Limo argilloso	0,0	5,0	5,0	0,50	19,00	26,0	40	0,50
2	Argilla limosa	5,0	20,0	15,0	0,50	20,00	26,0	50	0,50
3	Argilla limosa	20,0	30,0	10,0	0,50	20,00	26,0	90	0,50

Massima profondità alla quale viene estesa l'analisi	H =	30,00	(m)
--	-----	--------------	-----

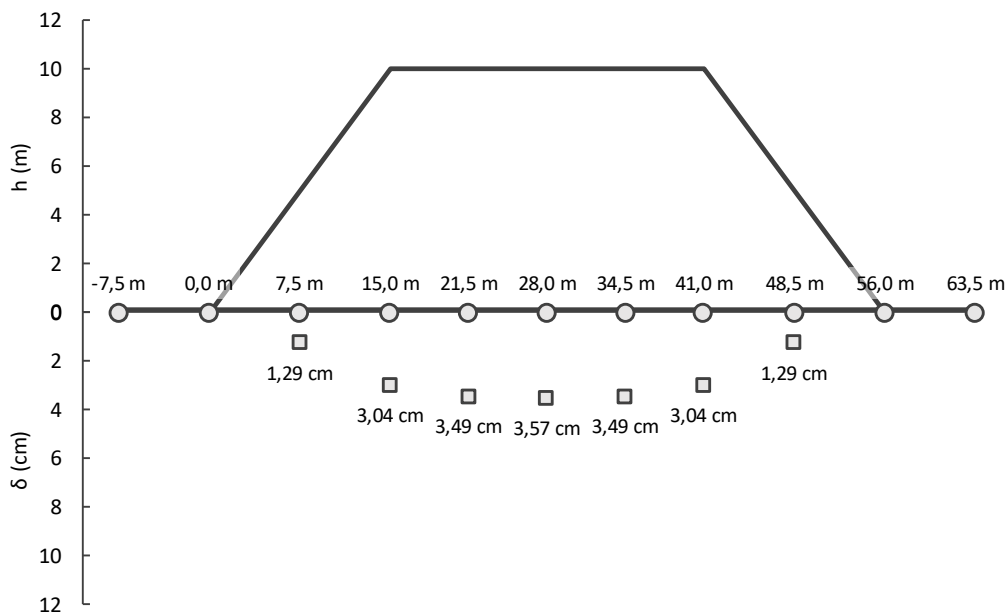
PROGETTAZIONE ATI:

ASCISSE DI CALCOLO

x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (m)	x_5 (m)	x_6 (m)	x_7 (m)	x_8 (m)	x_9 (m)	x_{10} (m)	x_{11} (m)
-7,50	0,00	7,50	15,00	21,50	28,00	34,50	41,00	48,50	56,00	63,50

CEDIMENTI

δ_1 (cm)	δ_2 (cm)	δ_3 (cm)	δ_4 (cm)	δ_5 (cm)	δ_6 (cm)	δ_7 (cm)	δ_8 (cm)	δ_9 (cm)	δ_{10} (cm)	δ_{11} (cm)
-0,83	-0,42	1,29	3,04	3,49	3,57	3,49	3,04	1,29	-0,42	-0,83



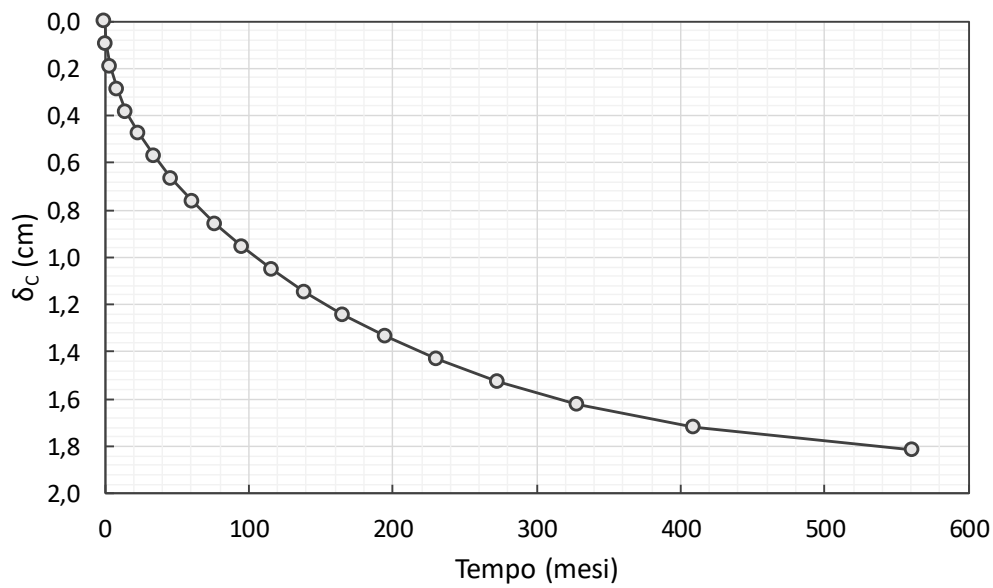
PROGETTAZIONE ATI:

Decorso dei cedimenti

DECORSO DEI CEDIMENTI DI CONSOLIDAZIONE

DATI DI INPUT

Cedimento di consolidazione	$\delta_c =$	1,91	(cm)
Massimo percorso di drenaggio	$H =$	5,00	(m)
Coefficiente di consolidazione	$c_v =$	2,00E-08	(m ² /s)



$t =$ **12 mesi**

$T_v =$ 0,025

$U_m =$ 17,8%

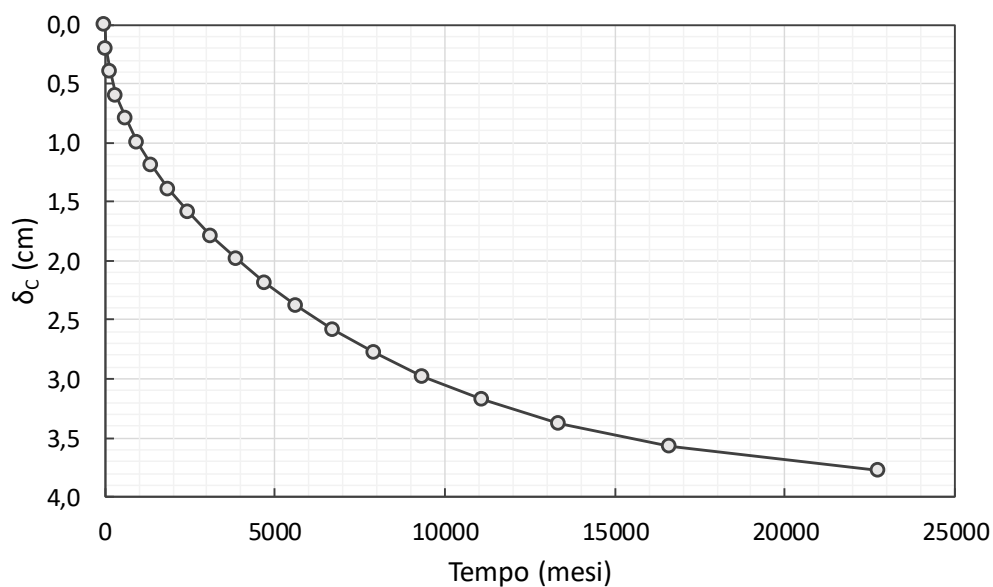
$\delta_t =$ 0,34 cm

PROGETTAZIONE ATI:

DECORSO DEI CEDIMENTI DI CONSOLIDAZIONE

DATI DI INPUT

Cedimento di consolidazione	$\delta_c =$	3,97	(cm)
Massimo percorso di drenaggio	$H =$	25,00	(m)
Coefficiente di consolidazione	$c_v =$	1,23E-08	(m ² /s)



t = **12 mesi**

$T_v =$ 0,001

$U_m =$ 2,8%

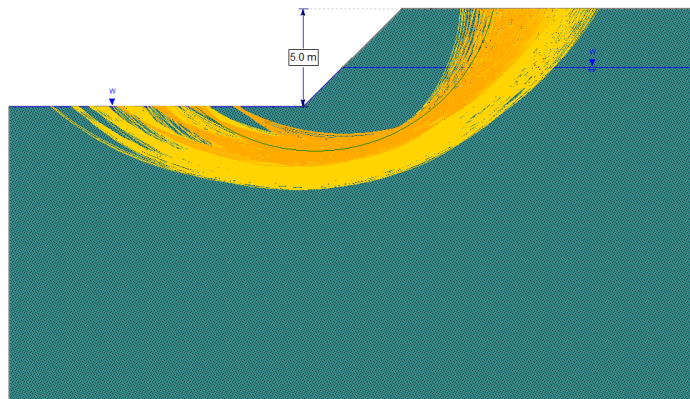
$\delta_t =$ 0,11 cm

PROGETTAZIONE ATI:

ALLEGATO F

RAPPORTO DI CALCOLO

VERIFICA DI STABILITÀ



Oggetto: Scavo provvisorio in sabbia limosa (UG1a)

Table of Contents

- Project Summary 2
- Design Standard 3
- Analysis Options 4
- Materials 5
- Global Minimums 6
 - Method: bishop simplified 6
- Slice Data 7
 - Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.0981 7

Slide2 Analysis Information

Slide1

Project Summary

File Name:	Slide1.slmd
Slide2 Modeler Version:	9.031
Compute Time:	00h:00m:00.178s
Project Title:	Slide2 - An Interactive Slope Stability Program
Date Created:	29/05/2024, 15:14:51

Design Standard


Selected Type:	Eurocode 7 (User Defined)
Name:	NTC2018 - Approccio 1 , Combinazione 2 (A2+M2+R2) - SLU
Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Undrained strength	1.4
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1.1
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

Analysis Options

Slices Type:	Vertical
Analysis Methods Used	
	Bishop simplified
Number of slices:	100
Tolerance:	0.001
Maximum number of iterations:	150
Check malpha < 0.2:	Yes
Create Interslice boundaries at intersections with water tables and piezos:	Yes
Initial trial value of FS:	1
Steffensen Iteration:	Yes

Materials

Sabbia limosa

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	20 kN/m ³
Cohesion	0 kPa
Phi	36 °
Water Surface	Water Table
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No

Global Minimums

Method: bishop simplified

	FS	1.098100
Center:		15.600, 22.056
Radius:		9.313
Left Slip Surface Endpoint:		9.521, 15.000
Right Slip Surface Endpoint:		24.684, 20.000
Resisting Moment:		3194.71 kN-m
Driving Moment:		2909.3 kN-m
Total Slice Area:		49.0259 m ²
Surface Horizontal Width:		15.1632 m
Surface Average Height:		3.23323 m

Slice Data

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.0981

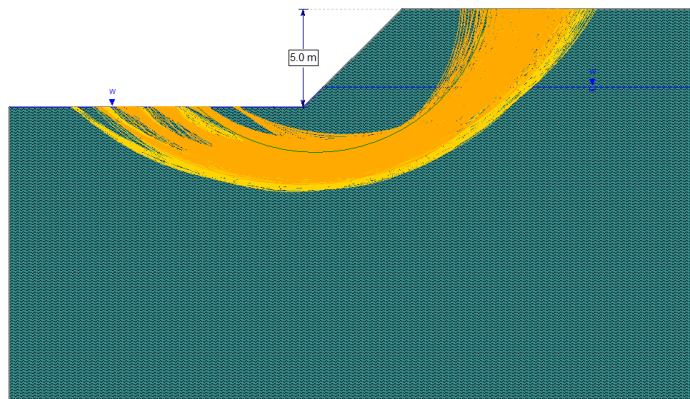
Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Angle of Slice Base [deg]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [deg]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]	Base Vertical Stress [kPa]	Effective Vertical Stress [kPa]
1	0.1511	0.192542	-40.1417	Sabbia limosa	0	30.1666	0.564286	0.619643	1.79767	0.624976	1.17269	1.32179	0.696814
2	0.1511	0.569548	-38.9362	Sabbia limosa	0	30.1666	1.61449	1.77287	5.20404	1.84881	3.35523	3.89963	2.05082
3	0.1511	0.930796	-37.7508	Sabbia limosa	0	30.1666	2.55891	2.80994	8.33938	3.02149	5.31789	6.358	3.33651
4	0.1511	1.27704	-36.5841	Sabbia limosa	0	30.1666	3.41265	3.74743	11.2376	4.14547	7.0921	8.70458	4.55911
5	0.1511	1.60897	-35.4349	Sabbia limosa	0	30.1666	4.18773	4.59855	13.9258	5.22296	8.70286	10.9459	5.72295
6	0.1511	1.92719	-34.3018	Sabbia limosa	0	30.1666	4.89391	5.374	16.4264	6.25595	10.1704	13.0878	6.83182
7	0.1511	2.23225	-33.1838	Sabbia limosa	0	30.1666	5.5391	6.08249	18.7575	7.24626	11.5113	15.1351	7.88881
8	0.1511	2.52468	-32.0799	Sabbia limosa	0	30.1666	6.12992	6.73126	20.9346	8.19551	12.7391	17.0923	8.89677
9	0.1511	2.80491	-30.9891	Sabbia limosa	0	30.1666	6.67185	7.32636	22.9705	9.1052	13.8653	18.9634	9.85821
10	0.1511	3.07338	-29.9108	Sabbia limosa	0	30.1666	7.16955	7.87288	24.8763	9.9767	14.8996	20.7518	10.7751
11	0.1511	3.33047	-28.8439	Sabbia limosa	0	30.1666	7.62696	8.37517	26.6615	10.8113	15.8502	22.4609	11.6496
12	0.1511	3.57653	-27.7879	Sabbia limosa	0	30.1666	8.04749	8.83695	28.3342	11.61	16.7242	24.0934	12.4834
13	0.1511	3.81188	-26.7421	Sabbia limosa	0	30.1666	8.43405	9.26143	29.9015	12.374	17.5275	25.6519	13.2779
14	0.1511	4.03683	-25.7058	Sabbia limosa	0	30.1666	8.78919	9.65141	31.3698	13.1042	18.2656	27.1388	14.0346
15	0.1511	4.25165	-24.6785	Sabbia limosa	0	30.1666	9.11511	10.0093	32.7445	13.8016	18.9429	28.5562	14.7546
16	0.1511	4.45658	-23.6595	Sabbia limosa	0	30.1666	9.41381	10.3373	34.0305	14.4668	19.5637	29.9061	15.4393
17	0.1511	4.65188	-22.6485	Sabbia limosa	0	30.1666	9.6871	10.6374	35.2323	15.1008	20.1315	31.1903	16.0895
18	0.1511	4.83775	-21.6448	Sabbia limosa	0	30.1666	9.93625	10.911	36.3536	15.7042	20.6494	32.4106	16.7064
19	0.1511	5.01438	-20.648	Sabbia limosa	0	30.1666	10.1629	11.1599	37.3979	16.2776	21.1203	33.5682	17.2906
20	0.1511	5.18198	-19.6578	Sabbia limosa	0	30.1666	10.3682	11.3853	38.3685	16.8216	21.5469	34.6648	17.8432
21	0.1511	5.3407	-18.6736	Sabbia limosa	0	30.1666	10.5531	11.5884	39.2681	17.3368	21.9313	35.7015	18.3647
22	0.1511	5.49071	-17.6952	Sabbia limosa	0	30.1666	10.7188	11.7703	40.0994	17.8238	22.2756	36.6796	18.8558
23	0.1511	5.63214	-16.722	Sabbia limosa	0	30.1666	10.8661	11.9321	40.8647	18.2829	22.5818	37.6002	19.3173
24	0.1511	5.76514	-15.7537	Sabbia limosa	0	30.1666	10.9959	12.0746	41.5661	18.7147	22.8514	38.4642	19.7495
25	0.1511	5.88983	-14.7901	Sabbia limosa	0	30.1666	11.1087	12.1985	42.2055	19.1194	23.0861	39.2725	20.1531
26	0.1511	6.00632	-13.8307	Sabbia limosa	0	30.1666	11.2055	12.3048	42.7847	19.4976	23.2871	40.026	20.5284
27	0.1511	6.11471	-12.8753	Sabbia limosa	0	30.1666	11.2868	12.394	43.3054	19.8494	23.456	40.7255	20.8761
28	0.1511	6.21511	-11.9235	Sabbia limosa	0	30.1666	11.3531	12.4668	43.769	20.1754	23.5936	41.3717	21.1963
29	0.1511	6.3076	-10.975	Sabbia limosa	0	30.1666	11.4049	12.5237	44.177	20.4756	23.7014	41.9653	21.4897
30	0.1511	6.39225	-10.0295	Sabbia limosa	0	30.1666	11.4428	12.5653	44.5305	20.7504	23.7801	42.5067	21.7563

31	0.1511	6.46915	-9.08684	Sabbia limosa	0	30.1666	11.4671	12.592	44.8308	21	23.8308	42.9967	21.9967
32	0.1511	6.53835	-8.14662	Sabbia limosa	0	30.1666	11.4784	12.6044	45.0788	21.2246	23.8542	43.4356	22.211
33	0.1511	6.59991	-7.20861	Sabbia limosa	0	30.1666	11.4769	12.6028	45.2755	21.4245	23.851	43.8239	22.3994
34	0.1511	6.65388	-6.27253	Sabbia limosa	0	30.1666	11.4631	12.5876	45.4219	21.5997	23.8222	44.162	22.5623
35	0.1511	6.70031	-5.33814	Sabbia limosa	0	30.1666	11.4371	12.5591	45.5188	21.7504	23.7684	44.4501	22.6997
36	0.1511	6.73923	-4.40516	Sabbia limosa	0	30.1666	11.3994	12.5177	45.5669	21.8767	23.6902	44.6887	22.812
37	0.1511	6.8946	-3.47335	Sabbia limosa	0	30.1666	11.5836	12.7199	46.4026	22.3297	24.0729	45.6995	23.3698
38	0.1511	7.3594	-2.54247	Sabbia limosa	0	30.1666	12.2283	13.4279	49.3026	23.8899	25.4127	48.7596	24.8697
39	0.1511	7.83259	-1.61225	Sabbia limosa	0	30.1666	12.9009	14.1665	52.2364	25.426	26.8104	51.8733	26.4473
40	0.1511	8.29837	-0.682462	Sabbia limosa	0	30.1666	13.5499	14.8791	55.097	26.938	28.159	54.9356	27.9976
41	0.1511	8.75673	0.247149	Sabbia limosa	0	30.1666	14.1758	15.5664	57.8858	28.4259	29.4599	57.9469	29.521
42	0.1511	9.20768	1.17682	Sabbia limosa	0	30.1666	14.7792	16.229	60.6036	29.8898	30.7138	60.9072	31.0174
43	0.1511	9.65122	2.10681	Sabbia limosa	0	30.1666	15.3604	16.8673	63.2513	31.3296	31.9217	63.8164	32.4868
44	0.1511	10.0873	3.03735	Sabbia limosa	0	30.1666	15.92	17.4818	65.83	32.7453	33.0847	66.6748	33.9295
45	0.1511	10.516	3.9687	Sabbia limosa	0	30.1666	16.4583	18.0729	68.3405	34.1368	34.2037	69.4823	35.3455
46	0.1511	10.9372	4.90109	Sabbia limosa	0	30.1666	16.9757	18.641	70.7824	35.5042	35.2782	72.238	36.7338
47	0.1511	11.3509	5.83479	Sabbia limosa	0	30.1666	17.4724	19.1864	73.1582	36.8472	36.311	74.9437	38.0965
48	0.1511	11.7571	6.77005	Sabbia limosa	0	30.1666	17.9487	19.7095	75.4666	38.1657	37.3009	77.5973	39.4316
49	0.1511	12.1557	7.70712	Sabbia limosa	0	30.1666	18.405	20.2105	77.7083	39.4597	38.2486	80.1991	40.7394
50	0.1511	12.5468	8.64628	Sabbia limosa	0	30.1666	18.8416	20.69	79.8849	40.7283	39.1566	82.75	42.0217
51	0.1511	12.9301	9.58778	Sabbia limosa	0	30.1666	19.913	21.8665	81.873	40.4904	41.3826	85.2367	44.7463
52	0.1511	13.3057	10.5319	Sabbia limosa	0	30.1666	20.9542	23.0098	83.774	40.2274	43.5466	87.6697	47.4423
53	0.1511	13.6735	11.4789	Sabbia limosa	0	30.1666	21.9653	24.1201	85.5871	39.9391	45.648	90.0476	50.1085
54	0.1511	14.0335	12.4291	Sabbia limosa	0	30.1666	22.9467	25.1978	87.3126	39.6253	47.6873	92.37	52.7447
55	0.1511	14.3855	13.3828	Sabbia limosa	0	30.1666	23.8985	26.2429	88.951	39.2856	49.6654	94.6369	55.3513
56	0.1511	14.7294	14.3403	Sabbia limosa	0	30.1666	24.8208	27.2557	90.5021	38.9198	51.5823	96.8474	57.9276
57	0.1511	15.0652	15.3019	Sabbia limosa	0	30.1666	25.7137	28.2362	91.965	38.5275	53.4375	99.0004	60.4729
58	0.1511	15.3927	16.268	Sabbia limosa	0	30.1666	26.5772	29.1844	93.3409	38.1085	55.2324	101.097	62.988
59	0.1511	15.7119	17.2388	Sabbia limosa	0	30.1666	27.4113	30.1004	94.6283	37.6622	56.9661	103.134	65.4716
60	0.1511	16.0225	18.2148	Sabbia limosa	0	30.1666	28.2162	30.9842	95.8269	37.1884	58.6385	105.112	67.9235
61	0.1511	16.3245	19.1962	Sabbia limosa	0	30.1666	28.9914	31.8355	96.9358	36.6864	60.2494	107.03	70.3432
62	0.1511	16.6178	20.1836	Sabbia limosa	0	30.1666	29.7371	32.6543	97.9549	36.1559	61.799	108.886	72.7305
63	0.1511	16.902	21.1772	Sabbia limosa	0	30.1666	30.453	33.4404	98.8832	35.5964	63.2868	110.681	75.0848
64	0.1511	17.1771	22.1776	Sabbia limosa	0	30.1666	31.1388	34.1935	99.7192	35.0071	64.7121	112.412	77.4054
65	0.1511	17.4429	23.1851	Sabbia limosa	0	30.1666	31.7943	34.9133	100.462	34.3876	66.0742	114.079	79.6915
66	0.1511	17.6991	24.2003	Sabbia limosa	0	30.1666	32.4191	35.5994	101.11	33.737	67.3726	115.679	81.9425
67	0.1511	17.9456	25.2237	Sabbia limosa	0	30.1666	33.0128	36.2514	101.661	33.0548	68.6065	117.213	84.1578

68	0.1511	18.182	26.2557	Sabbia limosa	0	30.1666	33.5751	36.8688	102.115	32.3401	69.7752	118.677	86.3368
69	0.1511	18.4082	27.297	Sabbia limosa	0	30.1666	34.1054	37.4511	102.469	31.592	70.8773	120.07	88.4781
70	0.1511	18.5285	28.3481	Sabbia limosa	0	30.1666	34.3668	37.7382	102.23	30.8097	71.4207	120.772	89.9625
71	0.1511	18.3052	29.4098	Sabbia limosa	0	30.1666	33.7835	37.0977	100.2	29.992	70.2084	119.244	89.252
72	0.1511	18.0421	30.4827	Sabbia limosa	0	30.1666	33.1181	36.367	97.9634	29.138	68.8254	117.458	88.32
73	0.1511	17.7674	31.5675	Sabbia limosa	0	30.1666	32.4407	35.6231	95.6638	28.2463	67.4175	115.596	87.3498
74	0.1511	17.4808	32.6652	Sabbia limosa	0	30.1666	31.751	34.8658	93.3001	27.3158	65.9843	113.657	86.3409
75	0.1511	17.1817	33.7764	Sabbia limosa	0	30.1666	31.0487	34.0946	90.8699	26.3449	64.525	111.637	85.2918
76	0.1511	16.8697	34.9023	Sabbia limosa	0	30.1666	30.333	33.3087	88.3695	25.3321	63.0374	109.532	84.1999
77	0.1511	16.5443	36.0439	Sabbia limosa	0	30.1666	29.6037	32.5078	85.7977	24.2757	61.522	107.341	83.065
78	0.1511	16.2048	37.2023	Sabbia limosa	0	30.1666	28.8598	31.691	83.15	23.1737	59.9763	105.058	81.8839
79	0.1511	15.8507	38.3787	Sabbia limosa	0	30.1666	28.1011	30.8578	80.4233	22.0241	58.3992	102.679	80.6549
80	0.1511	15.4811	39.5746	Sabbia limosa	0	30.1666	27.3266	30.0073	77.6145	20.8246	56.7899	100.201	79.376
81	0.1511	15.0954	40.7915	Sabbia limosa	0	30.1666	26.5357	29.1388	74.7184	19.5725	55.1459	97.6165	78.044
82	0.1511	14.6926	42.0312	Sabbia limosa	0	30.1666	25.7273	28.2512	71.731	18.2649	53.4661	94.9213	76.6564
83	0.1511	14.2717	43.2955	Sabbia limosa	0	30.1666	24.9008	27.3436	68.6472	16.8985	51.7487	92.1088	75.2103
84	0.1511	13.8315	44.5867	Sabbia limosa	0	30.1666	24.055	26.4148	65.4603	15.4696	49.9907	89.1708	73.7012
85	0.1511	13.3708	45.9073	Sabbia limosa	0	30.1666	23.1887	25.4635	62.1646	13.9741	48.1905	86.0996	72.1255
86	0.1511	12.8881	47.2602	Sabbia limosa	0	30.1666	22.3005	24.4882	58.7517	12.407	46.3447	82.8849	70.4779
87	0.1511	12.3816	48.6485	Sabbia limosa	0	30.1666	21.389	23.4873	55.2133	10.7629	44.4504	79.5159	68.753
88	0.1511	11.8493	50.0763	Sabbia limosa	0	30.1666	20.4525	22.4589	51.5391	9.03512	42.504	75.9795	66.9444
89	0.1511	11.289	51.548	Sabbia limosa	0	30.1666	19.4889	21.4008	47.7176	7.21611	40.5015	72.2607	65.0446
90	0.1511	10.6977	53.069	Sabbia limosa	0	30.1666	18.496	20.3105	43.7349	5.29675	38.4382	68.3415	63.0448
91	0.1511	10.0722	54.6458	Sabbia limosa	0	30.1666	17.4709	19.1848	39.5738	3.26608	36.3077	64.1994	60.9333
92	0.1511	9.40819	56.2865	Sabbia limosa	0	30.1666	16.4104	18.0203	35.2146	1.11068	34.1039	59.8084	58.6977
93	0.157739	9.0655	58.0406	Sabbia limosa	0	30.1666	14.9622	16.43	31.0943	0	31.0943	55.0766	55.0766
94	0.157739	8.23702	59.9255	Sabbia limosa	0	30.1666	13.1287	14.4166	27.2838	0	27.2838	49.9553	49.9553
95	0.157739	7.34088	61.9248	Sabbia limosa	0	30.1666	11.2406	12.3433	23.36	0	23.36	44.4337	44.4337
96	0.157739	6.36277	64.0653	Sabbia limosa	0	30.1666	9.29478	10.2066	19.3163	0	19.3163	38.4287	38.4287
97	0.157739	5.28201	66.3862	Sabbia limosa	0	30.1666	7.289	8.00405	15.1479	0	15.1479	31.8208	31.8208
98	0.157739	4.06642	68.9484	Sabbia limosa	0	30.1666	5.22303	5.73541	10.8544	0	10.8544	24.4243	24.4243
99	0.157739	2.66063	71.8577	Sabbia limosa	0	30.1666	3.10356	3.40802	6.44976	0	6.44976	15.9214	15.9214
100	0.157739	0.950638	75.3327	Sabbia limosa	0	30.1666	0.959603	1.05374	1.99421	0	1.99421	5.66054	5.66054

RAPPORTO DI CALCOLO

VERIFICA DI STABILITÀ



Oggetto: Scavo provvisorio in limo argilloso (UG1b)

Table of Contents

- Project Summary 2
- Design Standard 3
- Analysis Options 4
- Materials 5
- Global Minimums 6
 - Method: bishop simplified 6
- Slice Data 7
 - Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.04311 7

Slide2 Analysis Information

Slide1

Project Summary

File Name:	Slide1.slmd
Slide2 Modeler Version:	9.031
Compute Time:	00h:00m:00.180s
Project Title:	Slide2 - An Interactive Slope Stability Program
Date Created:	29/05/2024, 15:14:51

Design Standard


Selected Type:	Eurocode 7 (User Defined)
Name:	NTC2018 - Approccio 1 , Combinazione 2 (A2+M2+R2) - SLU
Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Undrained strength	1.4
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1.1
Tensile and plate strength	1.1
Shear strength	1.1
Compressive strength	1.1
Bond strength	1.1
Seismic Coefficient	1

Analysis Options

Slices Type:	Vertical
Analysis Methods Used	
	Bishop simplified
Number of slices:	100
Tolerance:	0.001
Maximum number of iterations:	150
Check malpha < 0.2:	Yes
Create Interslice boundaries at intersections with water tables and piezos:	Yes
Initial trial value of FS:	1
Steffensen Iteration:	Yes

Materials

Limo argilloso

Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight	19 kN/m ³
Cohesion	5 kPa
Phi	26 °
Tensile Strength	0 kPa
Water Surface	Water Table
Hu Type	Custom
Hu	1
Specify alternate strength type above water surface	No

Global Minimums

Method: bishop simplified

	FS	1.043110
Center:		15.600, 21.678
Radius:		8.994
Left Slip Surface Endpoint:		9.575, 15.000
Right Slip Surface Endpoint:		24.436, 20.000
Resisting Moment:		2756.68 kN-m
Driving Moment:		2642.74 kN-m
Total Slice Area:		48.5923 m ²
Surface Horizontal Width:		14.861 m
Surface Average Height:		3.26979 m

Slice Data

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.04311

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Angle of Slice Base [deg]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [deg]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]	Base Vertical Stress [kPa]	Effective Vertical Stress [kPa]
1	0.149427	0.18716	-41.4229	Limo argilloso	4	21.3151	5.51091	5.74849	6.60111	0.646643	5.95447	1.73867	1.09203
2	0.149427	0.553356	-40.1653	Limo argilloso	4	21.3151	5.98459	6.24259	9.25935	1.91196	7.34739	4.20818	2.29622
3	0.149427	0.903739	-38.9306	Limo argilloso	4	21.3151	6.42098	6.69779	11.7533	3.12264	8.63069	6.56658	3.44394
4	0.149427	1.23913	-37.717	Limo argilloso	4	21.3151	6.82411	7.1183	14.0977	4.28152	9.8162	8.82021	4.53869
5	0.149427	1.56027	-36.5231	Limo argilloso	4	21.3151	7.19731	7.50759	16.3048	5.39115	10.9137	10.9746	5.58345
6	0.149427	1.86782	-35.3472	Limo argilloso	4	21.3151	7.54337	7.86856	18.3851	6.45382	11.9313	13.0348	6.58095
7	0.149427	2.16236	-34.1883	Limo argilloso	4	21.3151	7.86464	8.20368	20.3476	7.47156	12.8761	15.0052	7.53361
8	0.149427	2.44445	-33.0451	Limo argilloso	4	21.3151	8.16312	8.51503	22.2	8.44625	13.7538	16.8897	8.44347
9	0.149427	2.71456	-31.9165	Limo argilloso	4	21.3151	8.44055	8.80442	23.9492	9.37955	14.5696	18.692	9.31245
10	0.149427	2.97313	-30.8017	Limo argilloso	4	21.3151	8.69841	9.0734	25.6009	10.273	15.3279	20.4153	10.1423
11	0.149427	3.22058	-29.6996	Limo argilloso	4	21.3151	8.93803	9.32335	27.1606	11.128	16.0326	22.0625	10.9345
12	0.149427	3.45727	-28.6095	Limo argilloso	4	21.3151	9.16056	9.55547	28.6328	11.9458	16.687	23.6363	11.6905
13	0.149427	3.68353	-27.5306	Limo argilloso	4	21.3151	9.36698	9.77079	30.0217	12.7276	17.2941	25.1392	12.4116
14	0.149427	3.89968	-26.4622	Limo argilloso	4	21.3151	9.55822	9.97027	31.3308	13.4745	17.8563	26.5732	13.0987
15	0.149427	4.106	-25.4036	Limo argilloso	4	21.3151	9.73505	10.1547	32.5638	14.1874	18.3764	27.9405	13.7531
16	0.149427	4.30276	-24.3542	Limo argilloso	4	21.3151	9.89822	10.3249	33.7235	14.8673	18.8562	29.243	14.3757
17	0.149427	4.49019	-23.3135	Limo argilloso	4	21.3151	10.0483	10.4815	34.8126	15.5149	19.2977	30.4823	14.9674
18	0.149427	4.66852	-22.2808	Limo argilloso	4	21.3151	10.186	10.6251	35.8336	16.1311	19.7025	31.66	15.5289
19	0.149427	4.83795	-21.2557	Limo argilloso	4	21.3151	10.3118	10.7563	36.7888	16.7165	20.0723	32.7776	16.0611
20	0.149427	4.99866	-20.2377	Limo argilloso	4	21.3151	10.4261	10.8756	37.6803	17.2718	20.4085	33.8365	16.5647
21	0.149427	5.15084	-19.2264	Limo argilloso	4	21.3151	10.5294	10.9833	38.5099	17.7977	20.7122	34.8378	17.0401
22	0.149427	5.29465	-18.2212	Limo argilloso	4	21.3151	10.622	11.08	39.2793	18.2946	20.9847	35.7826	17.488
23	0.149427	5.43023	-17.2218	Limo argilloso	4	21.3151	10.7044	11.1659	39.9901	18.763	21.2271	36.672	17.909
24	0.149427	5.55772	-16.2278	Limo argilloso	4	21.3151	10.7769	11.2415	40.6437	19.2035	21.4402	37.5071	18.3036
25	0.149427	5.67724	-15.2388	Limo argilloso	4	21.3151	10.8398	11.3071	41.2416	19.6165	21.6251	38.2886	18.6721
26	0.149427	5.78892	-14.2544	Limo argilloso	4	21.3151	10.8933	11.3629	41.7848	20.0024	21.7824	39.0174	19.015
27	0.149427	5.89285	-13.2742	Limo argilloso	4	21.3151	10.9377	11.4093	42.2746	20.3615	21.9131	39.6943	19.3328
28	0.149427	5.98914	-12.2981	Limo argilloso	4	21.3151	10.9733	11.4464	42.712	20.6942	22.0178	40.3198	19.6256
29	0.149427	6.07786	-11.3255	Limo argilloso	4	21.3151	11.0003	11.4745	43.0978	21.0008	22.097	40.8946	19.8938
30	0.149427	6.15911	-10.3562	Limo argilloso	4	21.3151	11.0188	11.4938	43.4331	21.2815	22.1516	41.4194	20.1379

31	0.149427	6.23295	-9.38997	Limo argilloso	4	21.3151	11.0291	11.5046	43.7185	21.5367	22.1818	41.8947	20.358
32	0.149427	6.29945	-8.42638	Limo argilloso	4	21.3151	11.0314	11.5069	43.9549	21.7664	22.1885	42.3207	20.5543
33	0.149427	6.35867	-7.46518	Limo argilloso	4	21.3151	11.0257	11.501	44.1429	21.9711	22.1718	42.6981	20.727
34	0.149427	6.41066	-6.5061	Limo argilloso	4	21.3151	11.0123	11.487	44.283	22.1507	22.1323	43.0271	20.8764
35	0.149427	6.45546	-5.54884	Limo argilloso	4	21.3151	10.9912	11.4651	44.3759	22.3055	22.0704	43.3081	21.0026
36	0.149427	6.4931	-4.59314	Limo argilloso	4	21.3151	10.9627	11.4353	44.4221	22.4356	21.9865	43.5413	21.1057
37	0.149427	6.62625	-3.63872	Limo argilloso	4	21.3151	11.0661	11.5432	45.1184	22.8277	22.2907	44.4147	21.587
38	0.149427	7.05427	-2.6853	Limo argilloso	4	21.3151	11.4519	11.9455	47.7995	24.3746	23.4249	47.2624	22.8878
39	0.149427	7.49487	-1.73263	Limo argilloso	4	21.3151	11.8702	12.382	50.5523	25.897	24.6553	50.1933	24.2963
40	0.149427	7.92842	-0.780439	Limo argilloso	4	21.3151	12.2757	12.8049	53.2427	27.395	25.8477	53.0754	25.6804
41	0.149427	8.35492	0.171537	Limo argilloso	4	21.3151	12.6684	13.2146	55.8712	28.8687	27.0025	55.9092	27.0405
42	0.149427	8.77436	1.12356	Limo argilloso	4	21.3151	13.0486	13.6111	58.4385	30.318	28.1205	58.6944	28.3764
43	0.149427	9.18675	2.07589	Limo argilloso	4	21.3151	13.4164	13.9948	60.9449	31.7429	29.202	61.4312	29.6883
44	0.149427	9.59208	3.0288	Limo argilloso	4	21.3151	14.0179	14.6222	63.3765	32.4057	30.9708	64.1182	31.7125
45	0.149427	9.99033	3.98255	Limo argilloso	4	21.3151	14.8456	15.4856	65.7206	32.3159	33.4047	66.7542	34.4383
46	0.149427	10.3815	4.93741	Limo argilloso	4	21.3151	15.6553	16.3302	67.9874	32.2015	35.7859	69.3398	37.1383
47	0.149427	10.7655	5.89364	Limo argilloso	4	21.3151	16.4473	17.1564	70.1778	32.0626	38.1152	71.8756	39.813
48	0.149427	11.1424	6.85152	Limo argilloso	4	21.3151	17.2216	17.9641	72.2907	31.8988	40.3919	74.36	42.4612
49	0.149427	11.512	7.81133	Limo argilloso	4	21.3151	17.9784	18.7535	74.3277	31.7102	42.6175	76.794	45.0838
50	0.149427	11.8744	8.77335	Limo argilloso	4	21.3151	18.7178	19.5248	76.2889	31.4965	44.7924	79.1777	47.6812
51	0.149427	12.2295	9.73788	Limo argilloso	4	21.3151	19.4398	20.2779	78.1728	31.2576	46.9152	81.5089	50.2513
52	0.149427	12.5773	10.7052	Limo argilloso	4	21.3151	20.1445	21.013	79.9809	30.9933	48.9876	83.7891	52.7958
53	0.149427	12.9176	11.6756	Limo argilloso	4	21.3151	20.8318	21.7299	81.7122	30.7033	51.0089	86.017	55.3137
54	0.149427	13.2504	12.6494	Limo argilloso	4	21.3151	21.5018	22.4288	83.3665	30.3873	52.9792	88.1922	57.8049
55	0.149427	13.5756	13.627	Limo argilloso	4	21.3151	22.1544	23.1095	84.9434	30.0452	54.8982	90.3141	60.2689
56	0.149427	13.8931	14.6086	Limo argilloso	4	21.3151	22.7895	23.772	86.4419	29.6764	56.7655	92.3818	62.7054
57	0.149427	14.2029	15.5946	Limo argilloso	4	21.3151	23.4071	24.4162	87.8623	29.2808	58.5815	94.3953	65.1145
58	0.149427	14.5047	16.5854	Limo argilloso	4	21.3151	24.0069	25.0419	89.2037	28.858	60.3457	96.3538	67.4958
59	0.149427	14.7986	17.5813	Limo argilloso	4	21.3151	24.589	25.6491	90.465	28.4074	62.0576	98.2562	69.8488
60	0.149427	15.0843	18.5828	Limo argilloso	4	21.3151	25.1532	26.2376	91.6451	27.9288	63.7163	100.102	72.1729
61	0.149427	15.3617	19.5901	Limo argilloso	4	21.3151	25.6992	26.8071	92.7436	27.4215	65.3221	101.89	74.4682
62	0.149427	15.6307	20.6038	Limo argilloso	4	21.3151	26.2267	27.3574	93.7582	26.8851	66.8731	103.618	76.7331
63	0.149427	15.8911	21.6243	Limo argilloso	4	21.3151	26.7356	27.8882	94.6889	26.319	68.3699	105.287	78.9684
64	0.149427	16.1428	22.6521	Limo argilloso	4	21.3151	27.2255	28.3992	95.5333	25.7226	69.8107	106.895	81.1726
65	0.149427	16.3854	23.6876	Limo argilloso	4	21.3151	27.6961	28.8901	96.2894	25.0952	71.1942	108.44	83.3448
66	0.149427	16.6189	24.7314	Limo argilloso	4	21.3151	28.1469	29.3604	96.9561	24.436	72.5201	109.921	85.4849
67	0.149427	16.843	25.784	Limo argilloso	4	21.3151	28.5777	29.8097	97.5312	23.7444	73.7868	111.336	87.5919

68	0.149427	17.0574	26.846	Limo argilloso	4	21.3151	28.9879	30.2376	98.0127	23.0193	74.9934	112.685	89.6654
69	0.149427	17.2618	27.9182	Limo argilloso	4	21.3151	29.377	30.6435	98.3978	22.26	76.1378	113.964	91.704
70	0.149427	17.4444	29.001	Limo argilloso	4	21.3151	29.7224	31.0038	98.6187	21.4653	77.1534	115.095	93.6295
71	0.149427	17.3282	30.0953	Limo argilloso	4	21.3151	29.5068	30.7789	97.1537	20.6342	76.5195	114.255	93.6208
72	0.149427	17.0768	31.2019	Limo argilloso	4	21.3151	29.0464	30.2986	94.9308	19.7655	75.1653	112.523	92.7577
73	0.149427	16.8141	32.3216	Limo argilloso	4	21.3151	28.575	29.8069	92.6371	18.8579	73.7792	110.717	91.8587
74	0.149427	16.5398	33.4554	Limo argilloso	4	21.3151	28.0924	29.3035	90.2695	17.9098	72.3597	108.832	90.9222
75	0.149427	16.2533	34.6041	Limo argilloso	4	21.3151	27.5978	28.7876	87.8255	16.9198	70.9057	106.867	89.9471
76	0.149427	15.9541	35.769	Limo argilloso	4	21.3151	27.0909	28.2588	85.3011	15.8861	69.415	104.817	88.9312
77	0.149427	15.6417	36.9512	Limo argilloso	4	21.3151	26.5709	27.7164	82.6925	14.8068	67.8857	102.68	87.8728
78	0.149427	15.3155	38.1521	Limo argilloso	4	21.3151	26.0372	27.1597	79.9961	13.6797	66.3164	100.45	86.7704
79	0.149427	14.9748	39.373	Limo argilloso	4	21.3151	25.489	26.5879	77.2069	12.5024	64.7045	98.1237	85.6213
80	0.149427	14.6188	40.6158	Limo argilloso	4	21.3151	24.9256	26.0002	74.3196	11.2724	63.0472	95.6953	84.4229
81	0.149427	14.2467	41.8821	Limo argilloso	4	21.3151	24.3459	25.3955	71.3289	9.98664	61.3422	93.1595	83.1729
82	0.149427	13.8575	43.1741	Limo argilloso	4	21.3151	23.7488	24.7727	68.2283	8.64177	59.5866	90.5098	81.868
83	0.149427	13.4501	44.494	Limo argilloso	4	21.3151	23.1332	24.1305	65.0105	7.23401	57.7765	87.7386	80.5046
84	0.149427	13.0232	45.8445	Limo argilloso	4	21.3151	22.4978	23.4677	61.6666	5.75903	55.9075	84.8375	79.0785
85	0.149427	12.5754	47.2287	Limo argilloso	4	21.3151	21.8408	22.7824	58.1875	4.21186	53.9756	81.7971	77.5853
86	0.149427	12.1051	48.65	Limo argilloso	4	21.3151	21.1605	22.0728	54.5619	2.58674	51.9751	78.6061	76.0194
87	0.149427	11.6103	50.1127	Limo argilloso	4	21.3151	20.4548	21.3366	50.7767	0.876931	49.8998	75.2514	74.3744
88	0.14314	10.6332	51.5888	Limo argilloso	4	21.3151	19.5326	20.3747	47.1882	0	47.1882	71.8224	71.8224
89	0.14314	10.1286	53.0817	Limo argilloso	4	21.3151	18.3918	19.1847	43.8332	0	43.8332	68.3125	68.3125
90	0.14314	9.59536	54.6284	Limo argilloso	4	21.3151	17.2124	17.9545	40.365	0	40.365	64.6107	64.6107
91	0.14314	9.03002	56.2365	Limo argilloso	4	21.3151	15.9911	16.6805	36.7735	0	36.7735	60.6936	60.6936
92	0.14314	8.42838	57.9152	Limo argilloso	4	21.3151	14.7241	15.3589	33.0478	0	33.0478	56.5339	56.5339
93	0.14314	7.78512	59.6767	Limo argilloso	4	21.3151	13.407	13.985	29.1744	0	29.1744	52.0964	52.0964
94	0.14314	7.09329	61.5365	Limo argilloso	4	21.3151	12.0342	12.553	25.1375	0	25.1375	47.3355	47.3355
95	0.14314	6.34358	63.5156	Limo argilloso	4	21.3151	10.5991	11.056	20.9173	0	20.9173	42.1904	42.1904
96	0.14314	5.52295	65.6437	Limo argilloso	4	21.3151	9.0933	9.48531	16.4892	0	16.4892	36.5759	36.5759
97	0.14314	4.61207	67.9646	Limo argilloso	4	21.3151	7.50603	7.82961	11.8215	0	11.8215	30.3665	30.3665
98	0.14314	3.57999	70.5492	Limo argilloso	4	21.3151	5.82315	6.07419	6.87267	0	6.87267	23.3618	23.3618
99	0.14314	2.37058	73.5266	Limo argilloso	4	21.3151	4.02563	4.19917	1.58666	0	1.58666	15.2002	15.2002
100	0.14314	0.856169	77.1917	Limo argilloso	4	21.3151	1.23624	1.28953	0	0	0	5.43768	5.43768