

# S.G.C. E78 GROSSETO – FANO

Tratto Siena Bettolle (A1)

Adeguamento a 4 corsie del tratto Siena–Ruffolo (Lotto 0)

## PROGETTO DEFINITIVO

COD. FI-81

R.T.I. di PROGETTAZIONE: Mandataria Mandante



**PROGETTISTI:**

Ing. Riccardo Formichi – Pro Iter srl (Integratore prestazioni specialistiche)  
Ordine Ing. di Milano n. 18045

Ing. Riccardo Formichi – Pro Iter srl  
Ordine Ing. di Milano n. 18045

**IL GEOLOGO**

Dott. Geol. Massimo Mezzanica – Pro Iter srl  
Albo Geol. Lombardia n. A762

**COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE**

Ing. Enrico Moretti – Erre.vi.a. srl  
Ordine Ing. di Milano n. 16237

**VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO**

Ing. Raffaele Franco Carso



PROTOCOLLO

DATA

## 02 - Geologia e geotecnica

### 02.03 - Geotecnica

Relazione geotecnica generale

CODICE PROGETTO			NOME FILE	REVISIONE	SCALA
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.	T00GE03GETRE01B .pdf		
DPFI0081	D	20	CODICE ELAB. T00GE03GETRE01	B	-
D					
C					
B	Revisione per istruttoria ANAS		Maggio 2021	Vitiello	Mezzanica Formichi
A	Emissione		Ottobre 2020	Vitiello	Mezzanica Formichi
REV.	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO APPROVATO



# INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVE ED ELABORATI DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>3</b>
2.1	Normative e raccomandazioni tecniche .....	3
2.2	Elaborati di progetto definitivo .....	3
2.3	Documenti bibliografici .....	5
<b>3</b>	<b>INDAGINI GEOGNOSTICHE .....</b>	<b>6</b>
3.1	Indagini geognostiche fornite dal Comune di Siena .....	6
3.2	Campagna di indagine di progetto preliminare (2009) .....	6
3.3	Campagna di indagini integrativa (2019) .....	7
3.3.1	Sondaggi geognostici a carotaggio continuo .....	8
3.3.2	Prove di resistenza dinamica in foro: Standard Penetration Test (SPT) .....	9
3.3.3	Prove pressiometriche .....	10
3.3.4	Prove di permeabilità tipo Lefranc .....	11
3.3.5	Indagini geofisiche .....	13
3.3.6	Pozzetti esplorativi e prove di carico su piastra .....	13
3.3.7	Indagini ambientali .....	14
<b>4</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE .....</b>	<b>18</b>
4.1	Stati limite nei confronti delle azioni sismiche .....	18
4.2	Periodo di riferimento per l'azione sismica .....	19
4.3	Parametri sismici .....	19
4.4	Categoria sismica dei suoli di fondazione .....	22
4.4.1	Prospezioni sismiche down-hole .....	23
4.4.2	Definizione delle categorie di sottosuolo per la progettazione .....	23
4.5	Coefficiente di amplificazione topografica per $h > 30$ m .....	24
4.6	Caratterizzazione sismica da spalla 1 del Viadotto Casone a spalla 2 del Viadotto Ribucciano .....	24
4.7	Caratterizzazione sismica inizio tracciato alla spalla 1 del Viadotto Casone (esclusa) e dalla spalla 2 del Viadotto Ribucciano (esclusa) a fine tracciato .....	24
4.8	Analisi pseudostatiche .....	24
4.8.1	Stabilità dei fronti di scavo e rilevati .....	25
4.8.2	Opere di sostegno .....	25
4.8.3	Manufatti scatolari .....	25
4.8.4	Paratie .....	26
<b>5</b>	<b>QUADRO GEOLOGICO-STRATIGRAFICO DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>27</b>
5.1	Unità stratigrafiche di riferimento .....	28
5.1.1	Depositi neogenici del versante tirrenico .....	28
5.1.2	Depositi olocenici .....	29
<b>6</b>	<b>PERMEABILITÀ DEI TERRENI E PIEZOMETRIA DELLA FALDA .....</b>	<b>31</b>
6.1	Permeabilità dei terreni .....	31
6.2	Pozzi, piezometri e livello piezometrico della falda .....	33
6.3	Modello idrogeologico di riferimento per le opere .....	36
<b>7</b>	<b>CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....</b>	<b>38</b>
7.1	Terreni prevalentemente granulari .....	38
7.1.1	Premessa .....	38
7.1.2	Normalizzazione del valore di $N_{SPT}$ .....	38
7.1.3	Densità relativa .....	39
7.1.4	Angolo di resistenza a taglio .....	39
7.1.5	Parametri di deformabilità .....	40
7.2	Terreni prevalentemente coesivi .....	40
7.2.1	Premessa .....	40
7.2.2	Proprietà indice dei terreni coesivi .....	41
7.2.3	Resistenza al taglio non drenata .....	41
7.2.4	Parametri di resistenza al taglio in termini di sforzi efficaci .....	42
7.2.5	Caratteristiche di deformabilità .....	42
7.3	Classificazione geotecnica dei terreni .....	42
<b>8</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI .....</b>	<b>43</b>
8.1	Unità stratigrafiche: caratteristiche geotecniche generali .....	43

8.2	Proprietà fisiche delle unità geotecniche: risultati delle prove di identificazione .....	46
8.3	Proprietà meccaniche delle unità geotecniche dai risultati di prove penetrometriche standard SPT e di prove CPT-DPSH .....	50
8.4	Permeabilità delle unità geotecniche.....	52
8.5	Proprietà meccaniche delle unità geotecniche dalla prove pressiometriche.....	54
8.6	Parametri di resistenza meccanica delle unità geotecniche dalle prove di taglio diretto e dalle prove triassiali.....	55
8.7	Proprietà geotecniche dei depositi eluvio-colluviali "b <sub>2</sub> ".....	56
8.8	Proprietà geotecniche dei depositi antropici (riporti stradali e ferroviari) .....	56
8.9	Proprietà geotecniche dei materiali dei rilevati di nuova realizzazione .....	56
8.10	Proprietà geotecniche delle Sabbie di San Vivaldo .....	57
8.11	Sintesi dei parametri geotecnici principali delle unità .....	57
<b>9</b>	<b>RILEVATI E TRINCEE .....</b>	<b>58</b>
9.1	Formazione dei rilevati .....	58
9.2	Pavimentazione stradale dei tratti in trincea.....	60
<b>10</b>	<b>DETERMINAZIONE DEGLI SPESSORI DI SCOTICO E BONIFICA .....</b>	<b>61</b>
<b>11</b>	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ DEI FRONTI DI SCAVO PROVVISORIALI.....</b>	<b>62</b>
11.1	Premessa.....	62
11.2	Generalità sulle verifiche di stabilità globale .....	62
11.3	Risultati .....	63
11.3.1	Sezione G-45 – Viadotto Tressa – Pila 1 .....	64
11.3.2	Sezione G-92 – Viadotto Luglie – Pila 1 .....	65
11.3.3	Sezione G-123 – Viadotto Valli – Pila 1 .....	66
11.3.4	Sezione G-153 – Viadotto Casone – Pila 1 .....	67
11.3.5	Sezione G-173 – Viadotto Ribucciano – Pila 4 .....	68
11.3.6	Sezione G-222 – Viadotto Rilugo – Pila 6.....	69
<b>12</b>	<b>VERIFICHE DI STABILITÀ DELLE SEZIONI IN RILEVATO .....</b>	<b>70</b>
12.1	Premessa.....	70
12.2	Generalità sulle verifiche di stabilità globale .....	70
12.3	Risultati .....	72
12.3.1	Sezione G-97 – Rilevato alla p.k. 1+900 (h=8,4 m) .....	73
12.3.2	Sezione G-164 – Rilevato alla p.k. 3+200 (h=5,5 m) .....	75
12.3.3	Sezione G-201 – Rilevato alla p.k. 3+964 (h=6,0 m) .....	76
12.3.4	Sezione G-234 – Rilevato alla p.k. 4+655 (h=6,6 m) .....	78
<b>13</b>	<b>VERIFICHE DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI .....</b>	<b>80</b>
13.1	Metodologia di calcolo dei cedimenti.....	80
13.2	Cedimenti: immediati e di consolidazione.....	81
13.2.1	Terreni granulari .....	81
13.2.2	Terreni coesivi sovraconsolidati (OCR>1) .....	82
13.2.3	Terreni coesivi normalconsolidati (OCR≈1) .....	82
13.3	Sintesi dei risultati.....	83
13.3.1	Rilevati in affiancamento.....	83
13.3.2	Rilevati di nuova realizzazione.....	85
<b>14</b>	<b>MURI DI SOSTEGNO .....</b>	<b>86</b>
14.1	Metodologia di calcolo .....	86
14.2	Verifiche agli Stati Limite Ultimi .....	86
14.2.1	Verifica a ribaltamento .....	88
14.2.2	Verifica a scivolamento.....	88
14.2.3	Verifica di capacità portante della fondazione .....	89
14.3	Verifiche agli Stati Limite di Esercizio .....	89
14.3.1	Verifiche di limitazione delle tensioni in esercizio .....	89
14.3.2	Verifiche a fessurazione .....	89
14.4	Azioni sismiche .....	90
14.5	Analisi dei carichi .....	91
14.6	Spinta delle terre in fase statica .....	91
14.6.1	Coefficienti di spinta.....	91
14.6.2	Spinta del terreno .....	93
14.6.3	Spinta dei sovraccarichi permanenti .....	93
14.6.4	Spinta dei sovraccarichi accidentali .....	94
14.7	Spinta delle terre in fase sismica .....	94

14.7.1	Coefficienti di spinta.....	94
14.7.2	Spinta del terreno .....	95
14.7.3	Spinta dei sovraccarichi permanenti.....	96
14.7.4	Spinta dei sovraccarichi accidentali.....	96
<b>15</b>	<b>OPERE DI SOSTEGNO FLESSIBILI .....</b>	<b>97</b>
15.1	Metodologia di calcolo: condizioni statiche .....	97
15.1.1	Stato limite ultimo (SLU).....	97
15.1.2	Stato Limite di Esercizio (SLE) .....	99
15.2	Metodologia di calcolo: condizioni sismiche .....	99
15.3	Spinta delle terre .....	102
15.3.1	Coefficiente di spinta a riposo.....	102
15.3.2	Coefficiente di spinta attiva in fase statica .....	102
15.3.3	Coefficiente di spinta passiva in fase statica .....	104
15.3.4	Coefficiente di spinta attiva in fase sismica .....	104
15.3.5	Coefficiente di spinta passiva in fase sismica.....	106
<b>16</b>	<b>FONDAZIONI SU PALI.....</b>	<b>108</b>
16.1	Metodologia di calcolo delle azioni in testa al palo .....	108
16.2	Verifica agli stati limite ultimi (SLU) .....	109
16.3	Resistenze di pali soggetti a carichi assiali.....	110
16.4	Resistenze di pali soggetti a carichi trasversali .....	111
16.5	Condizioni sismiche .....	111
16.6	Capacità portante dei pali di fondazione .....	111
16.6.1	Capacità portante verticale .....	111
16.6.2	Capacità portante orizzontale .....	116
16.7	Verifiche agli Stati Limite di Esercizio .....	129
<b>17</b>	<b>FONDAZIONI SU MICROPALI .....</b>	<b>130</b>
17.1	Verifiche agli Stati Limite Ultimi .....	130
17.2	Condizioni sismiche .....	131
17.3	Verifica di resistenza nei confronti dei carichi assiali .....	132
17.4	Verifica di resistenza nei confronti di carichi trasversali .....	133
17.5	Verifiche agli Stati Limite di Esercizio .....	133
<b>18</b>	<b>APPENDICE 1 – CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DETERMINATE DALLE PROVE IN SITO E DALLE PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO .....</b>	<b>134</b>
18.1	Unità geotecnica "FAA".....	135
18.2	Unità geotecnica "FAAa" .....	150
18.3	Unità geotecnica "b <sub>s</sub> ".....	163
18.4	Unità geotecnica "b <sub>l</sub> " .....	177
18.5	Unità geotecnica "b <sub>g</sub> " .....	188
<b>19</b>	<b>APPENDICE 2 – TABULATI DI CALCOLO VERIFICHE DI STABILITÀ DEI FRONTI DI SCAVO PROVVISORIALI E DEI RILEVATI .....</b>	<b>200</b>
19.1	Sezione G-45 .....	201
19.2	Sezione G-92 .....	207
19.3	Sezione G-123 .....	213
19.4	Sezione G-153 .....	219
19.5	Sezione G-173 .....	225
19.6	Sezione G-222 .....	231
19.7	Sezione G-97 .....	236
19.8	Sezione G-164 .....	250
19.9	Sezione G-201 .....	284
19.10	Sezione G-234 .....	322

## 1 PREMESSA

La presente relazione ha per oggetto la caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione interessati dalle opere previste nell'ambito dei lavori di realizzazione dell'infrastruttura denominata "S.G.C. E78 Grosseto-Fano – Tratto Siena Bettolle (A1) – Adeguamento a 4 corsie del tratto Siena-Ruffolo (Lotto 0)", ubicata in comune di Siena (SI).

Il tratto di infrastruttura in progetto ha per oggetto l'adeguamento da due a quattro corsie dell'infrastruttura denominata "S.G.C. E78 Grosseto-Fano, per una lunghezza di circa 5.4 km, nel tratto compreso tra la S.S. 223 di Paganico (svincolo di Cerchiaia) e la S.S.73 Senese-Aretina (svincolo di Ruffolo). La realizzazione dell'intervento, assimilabile ad una strada tipo extraurbano principale (tipo B, a carreggiate separate), prevede la realizzazione di due gallerie (Galleria S. Lazzerò, L=144 m e Galleria Bucciano, L=177 m) e di diversi viadotti: viadotto Tressa (L=236 m), viadotto Luglie (L=120 m), viadotto Valli (L=107 m), viadotto Casone (L=250 m), viadotto Ribucciano (L=256 m) e viadotto Rilugo (L=440 m).

La presente relazione geotecnica generale si articola come segue:

- il capitolo **2** elenca la normativa e gli elaborati di riferimento;
- il capitolo **3** riporta il riepilogo e i risultati delle indagini geognostiche eseguite e di riferimento;
- il capitolo **4** riporta la caratterizzazione sismica dei terreni di fondazione delle opere previste in progetto;
- il capitolo **5** esamina il quadro geologico-stratigrafico di riferimento;
- il capitolo **6** esamina il quadro idrogeologico dell'area e il livello piezometrico della falda;
- il capitolo **7** descrive i criteri adottati per la caratterizzazione geotecnica, ovvero per l'interpretazione dei dati delle indagini geotecniche in termini di proprietà fisiche e meccaniche (resistenza al taglio e deformabilità);
- il capitolo **8** descrive la caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione delle opere previste in progetto;
- il capitolo **9** descrive le sezioni tipo in rilevato e in trincea;
- il capitolo **10** individua sinteticamente gli spessori di scotico e bonifica dei piani di posa di rilevati e trincee;
- i capitoli **11** e **12** riportano le verifiche di stabilità dei fronti di scavo provvisori e dei rilevati per le stratigrafie di progetto considerate e per le differenti configurazioni geometriche maggiormente significative;
- il capitolo **13** riporta il calcolo dei cedimenti attesi per le configurazioni geometriche dei rilevati ritenute maggiormente significative;
- i capitoli **14**, **15**, **16** e **17** descrivono la metodologica seguita per il dimensionamento e per le verifiche inerenti alle principali tipologie di opere geotecniche presenti in progetto, ovvero muri di sostegno, opere di sostegno flessibili e fondazioni su pali e micropali.

In **Appendice 1** (Capitolo **18**), sono stati riportati i grafici che descrivono, per le diverse unità geotecniche riconosciute, le caratteristiche fisiche e meccaniche determinate dalle prove in sito eseguite nei fori di sondaggio e dalle prove di laboratorio effettuate sui campioni prelevati durante la realizzazione dei sondaggi geognostici.

Infine, in **Appendice 2** (Capitolo 19) sono stati riportati i tabulati di calcolo delle verifiche di stabilità dei fronti di scavo provvisionali e dei rilevati effettuate sulle sezioni di maggior significatività.

## 2 NORMATIVE ED ELABORATI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Normative e raccomandazioni tecniche

- **D.M. 17.01.2018** "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni" (Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale", n.42 del 20.02.2018).
- **Circ. 21/01/2019, 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;
- **EN 1997 Eurocodice 7** "Geotechnical Design: Part 1: General rule. Part 2: Ground investigation and testing";
- **CNR UNI 10006** "Costruzione e manutenzione delle strade - Tecnica di impiego delle terre".

### 2.2 Elaborati di progetto definitivo

#### Geologia

- **T00\_GE01\_GEO\_RE01\_A** - "Documentazione indagini geognostiche preesistenti - Indagini in sito"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE02\_A** - "Documentazione indagini geognostiche preesistenti - Indagini geofisiche"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE03\_A** - "Documentazione indagini geognostiche preesistenti - Prove geotecniche di laboratorio"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE04\_A** - "Documentazione indagini geognostiche - Indagini in sito"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE05\_A** - "Documentazione indagini geognostiche - Indagini geofisiche"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE06\_A** - "Documentazione indagini geognostiche - Prove geotecniche di laboratorio"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE07\_A** - "Documentazione indagini geognostiche - Analisi chimiche di laboratorio"
- **T00\_GE01\_GEO\_PU01\_B** - "Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche - Tav. 1/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_PU02\_B** - "Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche - Tav. 2/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_PU03\_B** - "Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche - Tav. 3/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** - "Relazione geologica"
- **T00\_GE01\_GEO\_CG01\_B** - "Carta geologica generale"
- **T00\_GE01\_GEO\_CG02\_B** - "Carta geologica di dettaglio - Tav. 1/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_CG03\_B** - "Carta geologica di dettaglio - Tav. 2/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_CG04\_B** - "Carta geologica di dettaglio - Tav. 3/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_CG05\_B** - "Carta geomorfologica - Tav. 1/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_CG06\_B** - "Carta geomorfologica - Tav. 2/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_CG07\_B** - "Carta geomorfologica - Tav. 3/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_CI01\_B** - "Carta idrogeologica - Tav. 1/3"
- **T00\_GE01\_GEO\_CI02\_B** - "Carta idrogeologica - Tav. 2/3"

- T00\_GE01\_GEO\_CI03\_B - "Carta idrogeologica – Tav. 3/3"
- T00\_GE01\_GEO\_FG01\_B - "Profilo geologico Asse Principale – Carreggiata Est"
- T00\_GE01\_GEO\_FG02\_B - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Tressa – Carreggiata Est"
- T00\_GE01\_GEO\_FG03\_B - "Planimetria e profilo geologico Rami Svincolo Cerchiaia – Tav. 1/2"
- T00\_GE01\_GEO\_FG12\_A - "Planimetria e profilo geologico Rami Svincolo Cerchiaia – Tav. 2/2"
- T00\_GE01\_GEO\_FG04\_B - "Planimetria e profilo geologico Galleria San Lazzerò – Carreggiata Est"
- T00\_GE01\_GEO\_FG05\_B - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Luglie – Carreggiata Est"
- T00\_GE01\_GEO\_FG06\_B - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Valli – Carreggiata Est"
- T00\_GE01\_GEO\_FG07\_B - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Casone – Carreggiata Est"
- T00\_GE01\_GEO\_FG08\_B - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Ribucciano – Carreggiata Est"
- T00\_GE01\_GEO\_FG09\_B - "Planimetria e profilo geologico Galleria Bucciano – Carreggiata Est"
- T00\_GE01\_GEO\_FG10\_B - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Riluogo – Carreggiata Est"
- T00\_GE01\_GEO\_FG11\_B - "Planimetria e profilo geologico Rami Svincolo Ruffolo – Tav.1/2"
- T00\_GE01\_GEO\_FG13\_A - "Planimetria e profilo geologico Rami Svincolo Ruffolo Tav.2/2"
- T00\_GE01\_GEO\_SG01\_A - "Sezioni geologiche trasversali – Tav. 1/4"
- T00\_GE01\_GEO\_SG02\_A - "Sezioni geologiche trasversali – Tav. 2/4"
- T00\_GE01\_GEO\_SG03\_A - "Sezioni geologiche trasversali – Tav. 3/4"
- T00\_GE01\_GEO\_SG04\_A - "Sezioni geologiche trasversali – Tav. 4/4"

#### **Gestione materie**

- T00\_GE02\_GEO\_CD01\_A - "Planimetria ubicativa dei siti di cava e deposito"
- T00\_GE02\_GEO\_RE01\_A - "Piano preliminare di utilizzo in sito delle terre e rocce da scavo – Relazione tecnica"

#### **Geotecnica**

- T00\_GE03\_GET\_FG01\_B - "Profilo geotecnico asse principale – Carreggiata Est - Tav. 1/3"
- T00\_GE03\_GET\_FG02\_B - "Profilo geotecnico asse principale – Carreggiata Est - Tav. 2/3"
- T00\_GE03\_GEO\_FG03\_B - "Profilo geotecnico asse principale – Carreggiata Est - Tav. 3/3"

- T00\_GE03\_GEO\_FG04\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Tressa – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG05\_B - "Profilo geotecnico Rami Svincolo Cerchiaia"
- T00\_GE03\_GEO\_FG06\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Luglie – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG07\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Valli – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG08\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Casone – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG09\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Ribucciano – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG10\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Rilugo – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG11\_B - "Profilo geotecnico Rami Svincolo Ruffolo"

#### Sismica

- T00\_GE04\_GET\_RE01\_A - "Relazione sismica"
- T00\_GE04\_GET\_PL01\_B - "Planimetria con classificazione sismica del territorio"

### 2.3 Documenti bibliografici

- [1] H.G. Poulos, E.H. Davis. *Analisi e progettazione di fondazioni su pali*;  
[2] S. Rampello, L. Callisto L. Masini. *Spinta delle terre sulle strutture di sostegno*.

### 3 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Gli elementi necessari per la progettazione definitiva delle opere previste in progetto sono stati ricavati principalmente dall'interpretazione dei dati geognostici disponibili dall'esecuzione di due campagne di indagini, congiuntamente all'esame dei dati bibliografici disponibili presso l'Area Tecnica e Gestione Territorio del Comune di Siena.

Di seguito verranno descritte, nel dettaglio, le campagne di indagine considerate. L'ubicazione di tutte le indagini è riportata negli elaborati di progetto **T00\_GE01\_GEO\_PU01÷03\_B** – "Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche" - Scala 1:2000 - (3 tavv.).

#### 3.1 Indagini geognostiche fornite dal Comune di Siena

Nell'ottica di migliorare la definizione del modello geologico di riferimento e, di conseguenza, quello geotecnico, è stato richiesto alla *Direzione Area Tecnica e Gestione Territorio del Comune di Siena* un dataset bibliografico di un intorno significativo dell'area in esame e in particolare i dati inerenti alle stratigrafie di pozzi per acqua, sondaggi, prove penetrometriche statiche e dinamiche nonché prove sismiche, identificate tra quelle presenti nella *Carta delle Indagini (Tav.4)* dello "Studio di microzonazione sismica" del nuovo *Piano Operativo e Variante di aggiornamento del Piano Strutturale*, adottato con Del. C.C. n.58 del 19/05/2020. Tali dati sono risultati utili per un maggior dettaglio di definizione del modello geologico-tecnico di riferimento e per l'elaborazione delle cartografie geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche e sismiche allegate al progetto.

In sintesi, risultano disponibili i seguenti dati:

- stratigrafie di n° 9 pozzi per acqua;
- n° 11 sondaggi a carotaggio continuo (con relative prove geotecniche di laboratorio);
- n° 7 prove penetrometriche statiche CPT;
- n° 3 prospezioni sismiche in foro (down-hole);
- n° 6 stendimenti sismici a rifrazione ad onde P ed onde S con elaborazione tomografica dei risultati.

I risultati originali di tali campagne di indagini sono riportati nell'*Allegato 1 - Indagini geognostiche fornite dal Comune di Siena* e nell'*Allegato 2 – Stratigrafie di pozzi per acqua fornite dal Comune di Siena* dell'elaborato di progetto **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** - "Relazione geologica".

#### 3.2 Campagna di indagine di progetto preliminare (2009)

In fase di progetto preliminare, l'area coinvolta dal progetto è stata investigata da una campagna di indagine eseguita nel 2009 dalla ditta Geotecnica Lavori S.r.l di Perugia, consistita in:

- n° 18 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, con esecuzione di n° 80 prove penetrometriche dinamiche in foro tipo SPT, n° 12 prove penetrometriche statiche CPT, n° 5 prove penetrometriche dinamiche continue tipo DPSH, di n° 22 prospezioni sismiche a rifrazione e n° 7 prospezioni sismiche in foro tipo down-hole da 30 m; sui n° 66 campioni indisturbati tipo Shelby, prelevati durante l'esecuzione dei sondaggi, sono state eseguite prove geotecniche di laboratorio, costituite da prove di identificazione (analisi granulometriche per setacciatura e sedimentazione, determinazioni dei limiti di consistenza, classificazioni CNR-UNI 10006), prove di compressione edometrica,

prove di rigonfiamento, prove di taglio diretto, prove di compressione ad espansione laterale libera ELL, prove triassiali UU, prove triassiali CID.

I risultati originali di tale campagna di indagine sono riportati nei seguente elaborati di progetto:

- **T00\_GE01\_GEO\_RE01\_A** - "Documentazione indagini geognostiche preesistenti – Indagini in sito"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE02\_A** - "Documentazione indagini geognostiche preesistenti – Indagini geofisiche"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE03\_A** - "Documentazioni indagini geognostiche preesistenti – Prove geotecniche d di laboratorio"

### 3.3 Campagna di indagini integrativa (2019)

Nel 2019, ad integrazione della campagna del 2009 e ai fini della progettazione definitiva dell'infrastruttura, è stata eseguita una campagna di indagine integrativa dalla ditta "Tecno In S.p.A" di Napoli, con lo scopo di integrare la modellazione geologica e geotecnica eseguita in fase di progetto preliminare e, sulla base delle indagini pregresse, di consentire, attraverso ulteriori indagini sismiche, la caratterizzazione sismica dei terreni di fondazione delle opere conformemente alle NTC 2018. Inoltre, attraverso specifiche analisi chimiche su campioni di terreno e di acqua sotterranea, è stata eseguita la caratterizzazione ambientale per la verifica della loro conformità alle CSC ai sensi del D.Lgs. 152/06 e della normativa in materia di riutilizzo delle terre e rocce da scavo (D.P.R. 120/2017).

La campagna di indagine integrativa è consistita in:

- n° 15 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, distribuiti lungo tutto il tracciato con profondità variabile tra 20 e 35 m in funzione delle quote di progetto e delle caratteristiche strutturali delle opere (viadotti, gallerie naturali e artificiali, rilevati, trincee, ecc.), con prelievo di n° 87 campioni complessivi, di cui n° 48 rimaneggiati (CR) e n° 39 campioni indisturbati (CI, in numero di almeno 2 per ciascun sondaggio) per l'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio;
- esecuzione di n° 46 prove penetrometriche dinamiche in foro SPT (Standard Penetration Test), distribuite in modo omogeneo in ogni verticale di sondaggio (in numero variabile da 1 a 4 a seconda della sua lunghezza), per la determinazione indiretta dei parametri di resistenza a taglio drenata e di deformabilità nei terreni sabbiosi e di resistenza al taglio non drenata nei terreni argillosi;
- n° 11 prove pressiometriche, una per ogni sondaggio;
- n° 14 prove di permeabilità tipo Lefranc a carico variabile;
- installazione in n° 6 fori di sondaggio di piezometri a tubo aperto per la misura del livello piezometrico della falda;
- n° 4 prospezioni sismiche in foro tipo down-hole, in modo da consentire il calcolo delle  $V_{s,eq}$  finalizzate a definire la categoria sismica di sottosuolo lungo il tracciato;
- n° 12 pozzetti esplorativi da 2 m, con prelievo di n°1 campione rimaneggiato tra 0,3 e 0,5 m (n° 11 campioni totali) ed esecuzione di prove di carico su piastra (a -0.5 m), ubicati in corrispondenza del tracciato principale o degli svincoli;
- n° 8 pozzetti ambientali da 2 m, con prelievo di campioni di terreno, finalizzati alla determinazione dello stato di qualità dei terreni in corrispondenza del tracciato, ai fini anche del possibile riutilizzo delle terre di scavo.

Si specifica che, nell'ambito di tale campagna integrativa, il prelievo di campioni di terreno finalizzato alla determinazione dello stato di qualità dei terreni è stato eseguito, oltre che nei pozzetti ambientali, anche in corrispondenza di n° 5 verticali d'indagine e di n° 7 pozzetti esplorativi.

Infine, il prelievo di campioni di acqua sotterranea finalizzato alla determinazione dello stato di qualità è stato eseguito in corrispondenza di n° 4 verticali d'indagine provviste di piezometro.

I risultati di tutte le analisi chimiche sono riportati nell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_RE07\_A** - "Documentazione indagini geognostiche – Analisi chimiche di laboratorio" a cui si rimanda per i relativi certificati ufficiali, oltre che per le stratigrafie dei sondaggi e dei pozzetti e l'ubicazione dei campioni analizzati.

I risultati originali della campagna di indagine integrativa del 2019 sono riportati nei seguenti elaborati di progetto:

- **T00\_GE01\_GEO\_RE04\_A** - "Documentazione indagini geognostiche – Indagini in sito"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE05\_A** - "Documentazione indagini geognostiche – Indagini geofisiche"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE06\_A** - "Documentazione indagini geognostiche – Prove geotecniche di laboratorio"
- **T00\_GE01\_GEO\_RE07\_A** - "Documentazione indagini geognostiche – Analisi chimiche di laboratorio"

### 3.3.1 Sondaggi geognostici a carotaggio continuo

Nella tabella sottostante (cfr. **Tabella 1**) sono riepilogate le profondità dei n° 15 sondaggi a carotaggio continuo eseguiti. Al termine dell'esecuzione di n° 4 sondaggi (S02-DH, S05-DH, S11D-DH e S14D-DH), i fori sono stati condizionati con l'installazione di tubazioni cieche in PVC finalizzate all'esecuzione di prospezioni sismiche tipo down-hole, mentre in n° 6 sondaggi (S01D-PZ, S03D-PZ, S04D-PZ, S06D-PZ, S10D-PZ e S12D-PZ) sono stati installati invece piezometri a tubo aperto. Nella tabella sono indicate le profondità dei sondaggi e la relativa strumentazione installata.

Sondaggio	Prof. (m)	Strumentazione
S01D-PZ	25	Piezometro a tubo aperto
S02-DH	35	Tubazione in PVC
S03D-PZ	25	Piezometro a tubo aperto
S04D-PZ	25	Piezometro a tubo aperto
S05D-DH	35	Tubazione in PVC
S06D-PZ	15	Piezometro a tubo aperto
S06D-BIS	25	-
S07D	30	-
S08D	25	-
S09D	30	-
S10D-PZ	25	Piezometro a tubo aperto
S11D-DH	35	Tubazione in PVC
S12D-PZ	25	Piezometro a tubo aperto
S13D	25	-
S14D-DH	35	Tubazione in PVC

**Tabella 1** - Sondaggi geognostici a carotaggio continuo: profondità e strumentazione installata

Le indagini della campagna geognostica integrativa 2019, insieme con le indagini geognostiche pregresse (campagna 2009, dataset bibliografico del Comune di Siena), hanno consentito di verificare la presenza nell'area dell'unità geologica pliocenica delle *argille azzurre*, riconosciuta con discreta continuità lungo tutto lo sviluppo del tracciato dell'infrastruttura e costituita da una litofacies argilloso-limosa e una litofacies limoso-sabbiosa. Tale unità risulta talvolta ricoperta da lembi di *depositi eluvio-colluviali* di alterazione della stessa e da discreti spessori di *depositi alluvionali* superficiali a prevalente granulometria ghiaiosa, sabbiosa o limosa a seconda delle zone di rinvenimento.

### 3.3.2 Prove di resistenza dinamica in foro: Standard Penetration Test (SPT)

All'interno dei fori di sondaggio, durante la loro esecuzione, sono state eseguite delle prove penetrometriche dinamiche SPT, a profondità variabili. In particolare, sono state eseguite n° 46 prove che sono andate ad aggiungersi alle prove della campagna 2009 (n° 80 prove SPT). Nella sottostante **Tabella 2** sono riassunti i risultati delle prove SPT eseguite per la nuova campagna (R = "rifiuto").

Sondaggio	SPT [-]	Profondità da p.c. [m]	N <sub>SPT</sub> [colpi/30cm]
S01D-PZ	SPT1	2.5	25
	SPT2	7.0	62
	SPT3	12.0	58
	SPT4	19.5	46
	SPT5	23	52
S02D-DH	SPT1	3.2	19
	SPT2	9.0	40
	SPT3	13.0	51
	SPT4	28.0	58
S03D-PZ	SPT1	4.0	21
	SPT2	13.5	30
	SPT3	17.0	35
S04D-PZ	SPT1	10.45	41
	SPT2	17.4	48
S05D-DH	SPT1	3.4	22
	SPT2	11.6	46
	SPT3	18.5	46
	SPT4	26.0	31
	SPT5	33.0	40
S06D-PZ	SPT1	3.3	20
	SPT2	9.5	32
S07D	SPT1	5.8	25
	SPT2	18.0	32
S08D	SPT1	4.55	23
	SPT2	14.55	30
S09D	SPT1	10.6	48
	SPT2	19.5	60
S10D	SPT1	7.5	49
	SPT2	19.5	65
S11D-DH	SPT1	4.0	40
	SPT2	7.55	14
	SPT3	12.0	55

	SPT4	19.55	R
S12D-PZ	SPT1	3.0	12
	SPT2	7.3	23
	SPT3	12.55	36
	SPT4	19.0	65
S13D	SPT1	4.55	22
	SPT2	9.0	52
	SPT3	12.0	67
	SPT4	16.0	82
S14D-DH	SPT1	3.0	8
	SPT2	9.5	22
	SPT3	12.0	31
	SPT4	21.0	57
	SPT5	28.0	37

**Tabella 2** - Prove di resistenza dinamica SPT di ciascun sondaggio

In generale i risultati delle prove penetrometriche SPT hanno consentito di verificare, per i terreni di fondazione in esame, uno stato di addensamento medio-basso ( $N_{SPT} < 25$ ) per i terreni a granulometria più grossolana, come per esempio i depositi alluvionali a granulometria ghiaiosa prevalente, uno stato di addensamento circa medio per i terreni a granulometria sabbiosa e sabbioso-limoso ( $25 > N_{SPT} > 50$ ) e uno stato di consistenza da medio ad elevato ( $N_{SPT} > 50$ ) per i terreni più limoso-argillosi, soprattutto con l'incremento di profondità.

### 3.3.3 Prove pressiometriche

Sono state eseguite n°11 prove pressiometriche in foro, al fine di ottenere risultati utili alla progettazione geotecnica delle opere di sostegno e di fondazione. In particolare, per ciascun sondaggio è stata realizzata una tasca di prova in cui è stato possibile, mediante una sonda cilindrica espandibile, costituita da una cella centrale di misurazione e due celle di guardia laterali (sonda tricellulare tipo Ménard), determinare in maniera diretta i parametri di deformabilità e resistenza dei terreni quali *modulo pressiometrico* e *pressione limite*. I risultati di ciascuna prova, effettuate all'interno dell'unità *argille azzurre*, sono riportati nella tabella sottostante (cfr. **Tabella 3**).

I risultati delle prove hanno mostrato una discreta dispersione dei valori di modulo pressiometrico  $E_M$ , comunque mediamente variabile tra 30 e 170 MPa, e valori di pressione limite  $P_{LIM}$  mediamente variabili tra 3 e 8 MPa.

Sondaggio	Prova	Profondità di prova	descrizione litologia	Modulo pressiométrico	Pressione limite P <sub>LIM</sub>
[-]	[-]	[m]	[-]	[MPa]	[MPa]
S01D-PZ	P1	17,50	<i>Pelite da consistente a molto consistente</i>	34,1	4,10
S02-PZ	P1	18,50	<i>Pelite molto consistente</i>	130,3	6,80
S06D-bis	P1	17,50	<i>Limo argilloso debolmente marnoso molto consistente</i>	20,1	3,30
S06D-bis	P2	22,50	<i>Limo argilloso debolmente marnoso molto consistente</i>	629,8*	5,5*
S10D-PZ	P1	8,50	<i>Pelite da consistente a molto consistente</i>	83,0	6,00
S10D-PZ	P2	13,50	<i>Pelite da consistente a molto consistente</i>	61,2	6,90
S11D-DH	P1	17,50	<i>Limo con sabbia argilloso da consistente a molto consistente</i>	22,8	4,60
S11D-DH	P2	25,50	<i>Pelite da consistente a molto consistente</i>	173,6	7,80
S12D-PZ	P1	17,50	<i>Limo con sabbia e argilla da moder. consistente a consistente</i>	16,7	4,00
S13D	P1	17,50	<i>Altern.za sabbia fine deb. argillosa e peliti da cons. a molto cons.</i>	39,1	4,60
S14D-DH	P1	16,50	<i>Pelite molto consistene, dura</i>	153,6	8,10

**Tabella 3 - Risultati prove pressiométriche di ciascun sondaggio**

Tutte le prove sono state eseguite nell'unità delle *argille azzurre* plioceniche, nell'ambito della quale le prove eseguite in corrispondenza della facies *limoso-argillosa* hanno fornito i valori più elevati di modulo pressiométrico E<sub>M</sub>, quasi sempre superiori a 60 MPa e con valori di pressione limite P<sub>LIM</sub> mediamente variabili tra 5 e 8 MPa, mentre in corrispondenza della facies *limoso-sabbiosa* sono stati registrati generalmente valori inferiori (modulo pressiométrico E<sub>M</sub> non superiore a 40 MPa).

Bisogna segnalare inoltre che la prova P2 del sondaggio S06D-bis (profondità di 22,5 m) fornisce valori di modulo pressiométrico e di pressione limite non totalmente affidabili, prodotto, probabilmente, di un errore strumentale in fase di misurazione.

### 3.3.4 Prove di permeabilità tipo Lefranc

In n° 14 verticali di sondaggio sono state eseguite prove di permeabilità tipo Lefranc. Tali prove, che consentono di determinare il valore del *coefficiente di permeabilità K* del terreno, sono state eseguita a carico idraulico variabile. I risultati delle prove eseguite sono mostrati nella sottostante **Tabella 4**.

	Unità	Sondaggio	Litologia	Prof. Prova	K
		[-]	[-]	[m]	[m/s]
Svincolo Cerchiaia e Viadotto Tressa	bs	S01D-PZ	sabbia a grana fine limosa	5,10	7,7E-06
	FAA	S01D-PZ	limo con sabbia e argilla	10,00	1,8E-07
	FAAa	S02D-DH	sabbia a grana fine limosa	5,00	3,0E-05
	FAA	S02D-DH	limo argilloso sabbioso	10,00	5,8E-06
Galleria S. Lazzerò	FAA	S3	argilla limosa	4,70	6,2E-09
	FAA	S4	argilla limosa	6,20	7,3E-09
	FAA	S5	argilla limosa	11,20	5,7E-09
	FAA	S6	limo argilloso	3,70	6,1E-10
Galleria Bucciano	FAAa	S10D-PZ	limo argilloso sabbioso	2,00	5,8E-08
	FAA	S10D-PZ	argilla limosa	17,00	4,0E-08
	FAA	S12	argilla debolmente limosa	5,20	1,2E-09
	FAA	S13	argilla sabbiosa	6,70	9,8E-09
	FAA	S14	argilla sabbiosa	8,20	6,7E-09
Svincolo Ruffolo e Viadotto Riluogo	bg	S11D-DH	ghiaia sabbiosa debolmente argillosa	5,00	1,8E-05
	FAA	S11D-DH	limo sabbioso argilloso	11,00	1,7E-06
	bg	S12D-PZ	ghiaia sabbiosa limosa	5,00	2,3E-05
	FAA	S12D-PZ	limo con sabbia e argilla	11,60	1,3E-06
	bg	S13D	sabbia con ghiaia limosa argillosa	4,50	2,3E-05
	FAA	S13D	limo argilloso sabbioso	11,00	3,4E-08
	FAA	S14D-DH	limo sabbioso argilloso	6,50	2,9E-06
	FAA	S14D-DH	argilla limosa	15,00	7,0E-08

**Tabella 4 - Risultati delle prove Lefranc in termini di coefficiente di permeabilità del terreno**

Per quanto riguarda l'unità della *argille azzurre* plioceniche, i risultati delle prove denotano una permeabilità generalmente variabile nell'ambito di un range piuttosto esteso: da bassa a molto bassa per i campioni in litofacies argilloso-limosa (variabile tra 1E-7 e 1E-9 m/s) e generalmente medio-bassa per la litofacies limoso-sabbiosa (variabile tra 1E-5 e 1E-7 m/s).

In generale, si deve considerare inoltre che la permeabilità dei depositi a componente più sabbiosa nel complesso risulta comunque sempre mediamente bassa, specie per l'elevato contenuto di materiale fine limoso-argilloso evidente dall'osservazione delle carote di sondaggio e dalle analisi granulometriche di laboratorio, con valori minimi stimati del tutto paragonabili a quelli dei terreni argillosi pliocenici, ma la cui componente sabbiosa in ogni caso li rende non del tutto impermeabili.

### 3.3.5 Indagini geofisiche

#### 3.3.5.1 Prospezioni sismiche in foro tipo down-hole

Nel corso della campagna di indagini integrative per la progettazione esecutiva delle opere, per la determinazione diretta delle velocità delle onde di taglio, sono state eseguite n.4 prospezioni sismiche down-hole (2019) ad integrazione delle n.8 prospezioni down-hole della campagna d'indagine 2009.

Le prospezioni sismiche tipo down-hole della campagna integrativa 2019 sono state eseguite in corrispondenza delle seguenti verticali di sondaggio e opere principali:

- S02D-DH, in corrispondenza del Viadotto Tressa (località Cerchiaia);
- S05D-DH, in corrispondenza del Viadotto Casone;
- S11D-DH e S14D-DH, in corrispondenza del Viadotto Riluogo e in prossimità dello svincolo Ruffolo.

Nell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_RE05\_A** - "Documentazioni indagini geognostiche - Indagini geofisiche", allegato al presente progetto, vengono mostrati nel dettaglio i risultati delle indagini sismiche sotto forma di grafici dell'andamento con la profondità delle velocità di intervallo delle onde sismiche di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$ .

I risultati delle prove in sito tipo down-hole in corrispondenza delle verticali di sondaggio indicate hanno fornito i seguenti valori di  $V_{seq}$ :

- S02D-DH:  $V_{S30} = 407$  m/s
- S05D-DH:  $V_{S30} = 455$  m/s
- S11D-DH:  $V_{S30} = 428$  m/s
- S14D-DH:  $V_{S30} = 496$  m/s

### 3.3.6 Pozzetti esplorativi e prove di carico su piastra

Nel corso della campagna integrativa sono stati realizzati n° 12 pozzetti esplorativi. Alcuni pozzetti hanno raggiunto la profondità di 2,0 m dal p.c. (PZ1, PZ2, PZ4, PZ7, PZ8 e PZ10) mentre alcuni pozzetti sono stati scavati fino a una profondità di 0,30 m dal p.c. (PZ3, PZ5, PZ6, PZ9, PZ11 e PZ13). I pozzetti esplorativi sono stati realizzati allo scopo di:

- verificare la stratigrafia degli strati più superficiali;
- prelievo di n° 1 campione rimaneggiato per ciascun pozzetto, tra 0,30 m e 0,50 m di profondità, sui quali eseguire prove di laboratorio (analisi granulometrica e limiti di Atterberg) atte a definire il gruppo di appartenenza dei terreni nell'ambito di classificazione stradale CNR-UNI 10006;
- esecuzione di prove di carico su piastra circolare al di sotto dello spessore di terreno di scotico di 0,30 m.

L'esecuzione dei pozzetti esplorativi ha consentito il riconoscimento, al di sotto di uno spessore di terreno vegetale costituito da limo argilloso-sabbioso di 0,30 m (PZ1, PZ2, PZ4, PZ7, PZ8, PZ11 e PZ13) oppure, al di sotto di uno spessore di terreno di riporto sabbioso-limoso di 0,30 m (PZ3, PZ5, PZ6, PZ9 e PZ10), di terreni costituiti perlopiù da limi con argille, in parte sabbiosi o debolmente ghiaiosi, da poco consistenti a mediamente consistenti.

Come detto, in corrispondenza dei pozzetti sono state eseguite prove di carico a doppio ciclo su piastra circolare, con piano di posa a 0,30 m di profondità dal p.c., al fine di determinare le caratteristiche di deformabilità dei terreni di sottofondo dei rilevati e delle fondazioni stradali.

Le prove di carico su piastra sono state eseguite con piastra da 298,5 mm e doppio ciclo di carico secondo la norma CNR-BU n.146 del 14.12.1992, con determinazione del modulo di deformazione "M<sub>d</sub>", al primo e al secondo ciclo di carico, misurato nell'intervallo 50-150 kPa.

I risultati ottenuti, in termini di *modulo di deformazione* M<sub>d</sub> (rapporto fra l'intervallo di carico predefinito, 150-50=100 KPa, ed il cedimento corrispondente) sono mostrati nella sottostante **Tabella 5** dove è riportato anche il rapporto M<sub>d1</sub> / M<sub>d2</sub>.

Pozzetto [-]	Sigla prova [-]	Md <sub>1</sub> (1° ciclo) [MPa]	Md <sub>2</sub> (2° ciclo) [MPa]	Md <sub>1</sub> / Md <sub>2</sub> [-]
PZ1	PS 144/19	10,03	73,17	0,14
PZ2	PS 143/19	11,52	78,26	0,15
PZ3	PS 142/19	10,34	140,63	0,07
PZ4	PS 141/19	10,90	91,84	0,12
PZ5	PS 140/19	11,70	80,36	0,15
PZ6	PS 139/19	14,71	88,24	0,17
PZ7	PS 138/19	8,43	67,67	0,12
PZ8	PS 137/19	9,20	61,64	0,15
PZ9	PS 136/19	9,11	100,00	0,09
PZ10	PS 145/19	13,45	86,54	0,16
PZ13	PS 146/19	10,50	66,67	0,16

**Tabella 5** - Risultati prove di carico su piastra

Nel caso specifico, i valori del modulo di deformazione del terreno di sottofondo sono risultati variabili tra 8 e 15 MPa al 1° ciclo di carico, mentre i valori al 2° ciclo sono risultati molto più elevati, in un range compreso tra 61 e 141 MPa, indicando un elevato incremento del modulo di deformazione in conseguenza delle operazioni di compattazione.

### 3.3.7 Indagini ambientali

Sono stati realizzati n° 8 pozzetti ambientali da 2,00 m, con prelievo di campioni di terreno finalizzato alla determinazione dello stato di qualità dei terreni in corrispondenza del tracciato, ai fini anche del possibile riutilizzo delle terre di scavo.

Si specifica che, nell'ambito della campagna integrativa, il prelievo di campioni di terreno finalizzato alla determinazione dello stato di qualità dei terreni è stato eseguito, oltre che nei pozzetti ambientali, anche in corrispondenza di n° 5 verticali d'indagine e di n° 7 pozzetti esplorativi (PZ1, PZ2, PZ4, PZ7, PZ8, PZ10 e PZ11).

Infine, è stato eseguito il prelievo di campioni di acqua sotterranea finalizzato alla determinazione dello stato di qualità. Tale prelievo è stato eseguito in corrispondenza di n° 4 verticali d'indagine provviste di piezometro (S01D-PZ, S03D-PZ, S06D-PZ e S12D-PZ).

I risultati di tutte le analisi chimiche sono riportati nell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_RE07\_A** - "Documentazione indagini geognostiche – Analisi chimiche di laboratorio" a cui si rimanda per i relativi certificati ufficiali, oltre che per le stratigrafie dei sondaggi e dei pozzetti e l'ubicazione dei campioni analizzati.

### 3.3.7.1 Analisi chimiche su campioni di terreno ai sensi del D. Lgs. 152/06 e del D.P.R. 120/17

Sono state eseguite le analisi chimiche su campioni ambientali di terreno per la verifica, ai sensi del D.Lgs. 152/06, Tabella 1 Allegato 5 Titolo V Parte IV (colonna A, colonna B) della conformità dei terreni alla destinazione d'uso dei siti di origine e, ai sensi del D.P.R. 120/17 della conformità dei terreni alla possibile destinazione finale, sia ai fini di un possibile *riutilizzo in situ* sia ai fini di utilizzo come *sottoprodotto* all'esterno del cantiere.

In particolare, è stata verificata la conformità alle CSC per il seguente set analitico di sostanze:

- *Arsenico, Cadmio, Cobalto, Cromo totale, Cromo VI, Mercurio, Nichel, Piombo, Rame, Zinco, BTEX e Stirene, IPA, Idrocarburi leggeri (C<12), Idrocarburi pesanti (C>12), Amianto.*

Per le analisi chimiche dei terreni è stato previsto il prelievo di n° 33 campioni (cfr. **Tabella 6**) distribuiti su ciascuna verticale di sondaggio in funzione delle previste profondità di scavo e su ogni pozzetto esplorativo.

campione	Viadotto Tressa		Viadotto Luglie	Viadotto Valli	Viadotto Casone				Viadotto Ribucciano		Galleria Bucciano	Viadotto Rilugio			
	S01D-PZ	S02D-DH	S03D-PZ	S04D-PZ	S05D-DH	S06D-PZ	S06Dbis	S07D	S08D	S09D	S10D-PZ	S11D-DH	S12D-PZ	S13D	S14D-DH
1						0 - 1 m					10-20 m		0 - 1 m		
2						3 - 4 m							3 - 4 m		
3															

campione	PZ1 AMB	PZ2 AMB	PZ1	PZ2	PZ3	PZ4	PZ5	PZ6	PZ7	PZ3 AMB	PZ8	PZ9	PZ4 AMB	PZ10	PZ11
	1	0 - 1 m	0 - 1 m	0 - 1 m	0 - 1 m		0 - 1 m			0 - 1 m	0 - 1 m	0 - 1 m		0 - 1 m	0 - 1 m
2	1 - 2 m	1 - 2 m	1 - 2 m	1 - 2 m		1 - 2 m			1 - 2 m	1 - 2 m	1 - 2 m		1 - 2 m	1 - 2 m	

campione	PZ13	PZ5 AMB	PZ6 AMB	PZ7 AMB	PZ8 AMB
	1		0 - 1 m	0 - 1 m	0 - 1 m
2		1 - 2 m	1 - 2 m	1 - 2 m	

#### TERRENI (D.Lgs. 152/06)

n° 33 **campioni** **Analisi chimiche TERRENI** (verifica conformità **Tabella 1** Allegato 5 Titolo V Parte IV D.Lgs. 152/06)  
 Arsenico, Cadmio, Cobalto, Cromo totale, Cromo VI, Mercurio, Nichel, Piombo, Rame, Zinco, Idrocarburi pesanti (C>12), Amianto

**Tabella 6 – Campioni ambientali di terreno per analisi ai sensi del D. Lgs. 152/06 e del D.P.R. 120/17**

Dai risultati delle analisi eseguite è possibile osservare che sui n°33 campioni di terreno analizzati, per la totalità di essi è stata verificata la conformità alle CSC alla destinazione d'uso dei terreni, assimilabile a *siti ad uso commerciale/industriale (colonna B)*.

Anche per ciò che riguarda le possibilità di riutilizzo all'esterno del cantiere, nessun campione ha mostrato superamenti delle CSC di colonna A, che potranno dunque essere gestiti eventualmente come *sottoprodotti* all'esterno dell'ambito del cantiere come, ad esempio, i ripristini ambientali di impianti di cava.

### 3.3.7.2 Analisi chimiche su campioni di terreno per la classificazione come rifiuti

Per la classificazione delle terre e rocce da scavo come rifiuti (omologa rifiuto), finalizzata al loro eventuale conferimento a impianto di recupero o a discarica, sono stati prelevati n° 8 campioni in

corrispondenza di n° 8 tra pozzetti esplorativi e pozzetti ambientali (PZ1, PZ4, PZ10, PZ11, PZAMB1, PZAMB3, PZAMB6 e PZAMB8, cfr. **Tabella 7**).

campione	Viadotto Tressa		Viadotto Luglie	Viadotto Valli	Viadotto Casone				Viadotto Ribucciano		Galleria Bucciano	Viadotto Riluogo			
	S01D-PZ	S02D-DH	S03D-PZ	S04D-PZ	S05D-DH	S06D-PZ	S06Dbis	S07D	S08D	S09D	S10D-PZ	S11D-DH	S12D-PZ	S13D	S14D-DH
-															
campione	PZ1 AMB	PZ2 AMB	PZ1	PZ2	PZ3	PZ4	PZ5	PZ6	PZ7	PZ3 AMB	PZ8	PZ9	PZ4 AMB	PZ10	PZ11
	0 - 2 m		0 - 2 m			0 - 2 m				0 - 2 m				0 - 2 m	0 - 0,3 m
campione	PZ13	PZ5 AMB	PZ6 AMB	PZ7 AMB	PZ8 AMB										
			0 - 2 m		0 - 0,3 m										

**TERRENI (OMOLOGA RIFIUTO)**

**n° 8 campioni medi composti**

**Analisi chimiche per la classificazione delle terre e rocce da scavo come rifiuto (OMOLOGA RIFIUTO)**

- Analisi sul tal quale ai sensi del D.Lgs. 152/06 e s.m.i., della Decisione 2000/532/CE e della Direttiva 2008/98/CE, per la classificazione del rifiuto ai fini della pericolosità e per l'attribuzione del codice CER;
- Analisi sugli eluati con le metodiche di cui al **D.M. 05.02.1998** e s.m.i. (**test di cessione**) e confronto con i limiti di cui all'**Allegato 3 del D.M. 5/4/2006 n. 186** per la verifica della recuperabilità del materiale;
- Analisi sugli eluati ai sensi del **D.M. 27/09/2010** per la verifica dell'ammissibilità dei rifiuti in discarica

**Tabella 7 – Campioni ambientali di terreno per classificazione come rifiuti**

Su tali campioni sono state eseguite:

- analisi sul tal quale ai sensi del D. Lgs. 152/06 e s.m.i., della Decisione 2000/532/CE e della Direttiva 2008/98/CE, per la classificazione del rifiuto ai fini della pericolosità e per l'attribuzione del codice CER;
- analisi sugli eluati con le metodiche di cui al D.M. 05.02.1998 e s.m.i. (test di cessione) e confronto con i limiti di cui all'Allegato 3 del D.M. 5/4/2006 n. 186 per la verifica della recuperabilità del materiale;
- analisi sugli eluati ai sensi del D.M. 27/09/2010 per la verifica dell'ammissibilità dei rifiuti in discarica.

I risultati mostrano che i materiali di scavo in esame risultano tutti *non pericolosi* e, per quanto riguarda le loro modalità di smaltimento, in funzione dei risultati delle analisi sugli eluati, risulta che:

- in 5 casi su 8 i campioni risultano idonei ad essere smaltiti in *impianti di recupero* e, di questi 5 casi, 2 casi su 8 risultano idonei ad essere smaltiti in *discarica di inerti*;
- tutti i campioni sono risultati idonei ad essere smaltiti in *discarica di rifiuti non pericolosi*.

In caso di smaltimento dei riporti come *rifiuti*, il codice CER con il quale verranno conferiti potrà essere 17 05 04 nel caso prevalga la componente terreno, oppure 17 09 04 nel caso prevalgano materiali di origine antropica (frammenti di laterizi, calcestruzzi, materiali plastici, ecc.).

**3.3.7.3 Analisi su campioni di acque sotterranee ai sensi del D. Lgs. 152/06**

Sono stati prelevati n° 4 campioni di acque sotterranee in piezometro in corrispondenza delle verticali S01D-PZ, S03D-PZ, S06D-PZ e S12D-PZ ai fini dell'esecuzione di analisi chimiche per la verifica alla conformità alle CSC di cui alla Tabella 2 Allegato 5 Titolo V Parte IV del D. Lgs. 152/06. In particolare, tale conformità è stata verificata per il seguente set analitico:

- *Arsenico, Cadmio, Cobalto, Cromo totale, Cromo VI, Mercurio, Nichel, Piombo, Rame, Zinco, Composti organici aromatici, IPA, Idrocarburi totali.*

	Viadotto Tressa		Viadotto Luglie	Viadotto Valli	Viadotto Casone				Viadotto Ribucciano		Galleria Bucciano	Viadotto Riluogo			
campione	S01D-PZ	S02D-DH	S03D-PZ	S04D-PZ	S05D-DH	S06D-PZ	S06Dbis	S07D	S08D	S09D	S10D-PZ	S11D-DH	S12D-PZ	S13D	S14D-DH
campione	PZ1 AMB	PZ2 AMB	PZ1	PZ2	PZ3	PZ4	PZ5	PZ6	PZ7	PZ3 AMB	PZ8	PZ9	PZ4 AMB	PZ10	PZ11
campione	PZ13	PZ5 AMB	PZ6 AMB	PZ7 AMB	PZ8 AMB										

**ACQUE SOTTERRANEE**

n° 4 campioni in piezometro Analisi chimiche ACQUE SOTTERRANEE (verifica conformità Tabella 2 Allegato 5 Titolo V Parte IV D.Lgs. 152/06)  
Arsenico, Cadmio, Cobalto, Cromo totale, Cromo VI, Mercurio, Nichel, Piombo, Rame, Zinco, Composti organici aromatici, IPA, Idrocarburi totali

**Tabella 8 – Campioni di acqua sotterranea per analisi ai sensi del D. Lgs. 152/06**

Dai risultati è possibile verificare che i campioni analizzati sono risultati *non conformi* ai limiti delle CSC della Tabella 2 Allegato 5 Parte IV Titolo V D. Lgs. 152/2006, nei campioni S6D-PZ e S12D-PZ per i parametri *Idrocarburi totali* ed alcuni *IPA* e nei campioni S1D-PZ e S3D-PZ per alcuni *IPA*.

In fase di progetto definitivo è stata consultata, sul sito ARPAT (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana), la **banca dati di monitoraggio ambientale delle acque sotterranee (banca dati “MAT”)**, previsto dal D.Lgs 152/2006 e dal D. Lgs 30/2009 e messo a disposizione dalla Regione Toscana.

La banca dati contiene i dati risultanti dai monitoraggi effettuati da ARPAT sui corpi idrici sotterranei significativi ai fini della verifica degli obiettivi di qualità ambientale. In particolare, è possibile consultare i risultati ottenuti filtrando il comune di interesse o il corpo idrico, l'anno e i parametri analizzati. Per quanto riguarda il territorio in esame, nella *Banca Dati MAT* purtroppo non risultano disponibili dati di monitoraggio delle acque sotterranee.

Anche a tale proposito, e vista la persistenza della contaminazione in tutti i piezometri campionati, al fine di confermare o di escludere tali contaminazioni, si suggerisce, per la fase di progettazione esecutiva, di eseguire una nuova campagna di campionamento e analisi delle acque sotterranee, eventualmente estendendola ad altre verticali strumentate con piezometri, esistenti o di nuova realizzazione.

### 3.3.7.4 Analisi su campioni di terreno per la verifica dell'aggressività al calcestruzzo

Al fine di valutare il grado di aggressività del terreno sulle strutture di calcestruzzo, in corrispondenza delle verticali S01D-PZ, S03D-PZ, S06D-PZ e S12D-PZ è stato previsto il prelievo di n°6 campioni di terreno per la verifica nei confronti del calcestruzzo ai sensi delle norme UNI 11104 e UNI-EN 206-1.

In nessuno dei campioni esaminati sono stati rilevati superamenti dei limiti inferiori della classe XA1 per i parametri previsti dalla normativa (pH, ione solfato SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ione magnesio Mg<sup>2+</sup>, azoto ammoniacale NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, CO<sub>2</sub> aggressiva).

## 4 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEI TERRENI DI FONDAZIONE

Per il quadro sismo-tettonico di riferimento e la sismicità storica dell'area in esame si rimanda all'elaborato **T00\_GE05\_GET\_RE01\_A** - "Relazione Sismica".

### 4.1 Stati limite nei confronti delle azioni sismiche

Al paragrafo 3.2.1 del D.M. 17/01/2018 vengono definiti gli stati limite nei confronti delle azioni sismiche, sia di esercizio che ultimi, riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

Gli stati limite di esercizio (SLE) sono:

- **Stato Limite di Operatività (SLO):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti in relazione alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- **Stato Limite di Danno (SLD):** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali e orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi (SLU) sono:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):** a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC):** a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento **P<sub>VR</sub>**, cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono (Tab. 3.2.I D.M. 17/01/2018):

Stati Limite		<b><i>P<sub>VR</sub>: Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V<sub>R</sub></i></b>
Stati Limite di Esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati Limite Ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

## 4.2 Periodo di riferimento per l'azione sismica

L'accelerazione orizzontale massima attesa al sito dipende dal periodo di riferimento considerato per la definizione dell'azione sismica. Si ritiene di attribuire alla infrastruttura in progetto, ai sensi della tabella 2.4.I del D.M. 17.01.2018, una vita nominale  $V_N \geq 50$  anni nonché una classe d'uso IV. In base alla tabella 2.4.II il coefficiente d'uso vale  $C_U = 2$ .

Pertanto, il periodo di riferimento per l'azione sismica vale:

$$V_R = V_N C_U = 50 \times 2.0 = 100 \text{ anni}$$

## 4.3 Parametri sismici

In base a quanto descritto nel D.M. 17/01/2018 la *pericolosità sismica* in un generico sito deve essere descritta:

- in termini di accelerazione orizzontale massima  $a_g$  e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale;
- in corrispondenza dei punti di un reticolo, denominato reticolo di riferimento, i cui nodi non distano più di 10 km.

Le forme spettrali previste dal D.M. 17/01/2018 sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima del terreno;
- $F^0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Nelle norme tecniche NTC 2018 sono forniti, secondo un reticolo di riferimento e per differenti intervalli di riferimento, i parametri sismici  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  per un sito rigido orizzontale (come definiti al paragrafo 3.2) necessari per la determinazione delle azioni sismiche.

Qualora l'area in esame non ricada in corrispondenza dei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri di interesse possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento, mediante la seguente espressione:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

in cui:

- $p$  è il valore del parametro di interesse nel punto in esame;
- $p_i$  è il valore del parametro di interesse nell' $i$ -esimo punto della maglia elementare contenente il punto in esame;
- $d_i$  è la distanza del punto in esame dall' $i$ -esimo punto della maglia suddetta.

Di seguito si riportano i valori dei parametri sismici  $a_g$ ,  $F_0$ ,  $T_c^*$  ricavati mediante il programma "Spettri NTC ver.1.0.3.xls", disponibile sul sito <http://www.cslp.it/cslp/>, inserendo le coordinate geografiche di inizio tracciato, fine tracciato e delle principali opere d'arte maggiori.

Inizio tracciato (11.332828-43.280481)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,064	2,518	0,258
SLD	101	0,079	2,509	0,264
SLV	949	0,174	2,516	0,283
SLC	1950	0,212	2,556	0,290

Cavalcavia Cerchiaia (11.335792-43.290631)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,064	2,518	0,258
SLD	101	0,079	2,509	0,264
SLV	949	0,174	2,515	0,283
SLC	1950	0,212	2,555	0,290

Svincolo Cerchiaia / Viadotto Tressa (11.336351-43.295248)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,518	0,258
SLD	101	0,079	2,509	0,264
SLV	949	0,174	2,515	0,283
SLC	1950	0,212	2,554	0,290

Galleria S. Lazzero (11.338997-43.297382)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,518	0,259
SLD	101	0,078	2,509	0,264
SLV	949	0,174	2,514	0,283
SLC	1950	0,212	2,554	0,290

Viadotto Luglie (11.345017-43.299095)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,518	0,259
SLD	101	0,078	2,509	0,265
SLV	949	0,174	2,514	0,283
SLC	1950	0,212	2,553	0,290

Viadotto Valli (11.352297-43.300215)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,519	0,259
SLD	101	0,078	2,509	0,265
SLV	949	0,174	2,514	0,283
SLC	1950	0,211	2,553	0,290

Viadotto Casone (11.358308-43.300407)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,519	0,259
SLD	101	0,078	2,509	0,265
SLV	949	0,174	2,514	0,283
SLC	1950	0,211	2,552	0,290

Viadotto Ribucciano (11.363173-43.299019)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,527	0,260
SLD	101	0,077	2,516	0,266
SLV	949	0,172	2,517	0,284
SLC	1950	0,209	2,553	0,291

Galleria Ribucciano (11.363173-43.299019)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,528	0,260
SLD	101	0,077	2,517	0,266
SLV	949	0,172	2,517	0,284
SLC	1950	0,209	2,553	0,291

Viadotto Riluogo (11.374321-43.299427)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,529	0,260
SLD	101	0,077	2,518	0,266
SLV	949	0,172	2,518	0,284
SLC	1950	0,209	2,554	0,291

Svincolo Ruffolo (11.378616-43.301445)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,529	0,260
SLD	101	0,077	2,518	0,267
SLV	949	0,171	2,518	0,284
SLC	1950	0,209	2,554	0,291

Fine tracciato (11.389219-43.297370)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,063	2,531	0,260
SLD	101	0,077	2,521	0,267
SLV	949	0,171	2,520	0,284
SLC	1950	0,209	2,555	0,291

I valori riportati sono stati ottenuti in funzione del periodo di ritorno  $T_R$  e di una vita di riferimento  $V_R=100$  anni.

Nell'ottica di una caratterizzazione sismica adeguata, sulla base della tipologia di rilievo e delle opere attraversate dal tracciato, si è scelto di utilizzare i dati dei parametri sismici relativi ad inizio tracciato, che forniscono, per l'area in esame, i valori di  $a_g$  più elevati:

Inizio tracciato (11.332828-43.280481)

	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$F_0$	$T^*_c$ (s)
SLO	60	0,064	2,518	0,258
SLD	101	0,079	2,509	0,264
SLV	949	0,174	2,516	0,283
SLC	1950	0,212	2,556	0,290

#### 4.4 Categoria sismica dei suoli di fondazione

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel paragrafo 7.11.3 del D.M. del 17/01/2018. In assenza di tali analisi o per una prima stima, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di *categorie di sottosuolo* di riferimento, identificate in funzione dei valori della velocità di propagazione  $V_s$  (velocità sismiche delle onde di taglio).

Con riferimento alla vigente normativa "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni" (D.M. 17/01/2018) la classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche e ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{Seq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

- $h_i$  spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{s,i}$  velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{Seq}$  è definita dal parametro  $V_{S30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite nella Tab.3.2.II del NTC 2018, di seguito riportata.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

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

#### 4.4.1 **Prospezioni sismiche down-hole**

Nel corso della campagna di indagini integrative per la progettazione esecutiva delle opere, per la determinazione diretta delle velocità delle onde di taglio, sono state eseguite n.4 prospezioni sismiche down-hole (2019) ad integrazione delle n.8 prospezioni down-hole della campagna d'indagine 2009, in corrispondenza delle verticali di sondaggio di seguito indicate e che hanno fornito i seguenti valori di  $V_{Seq}$ :

##### Campagna d'indagine integrativa 2019:

- S02D-DH:  $V_{Seq} = 407$  m/s
- S05D-DH:  $V_{Seq} = 455$  m/s
- S11D-DH:  $V_{Seq} = 428$  m/s
- S14D-DH:  $V_{Seq} = 496$  m/s

##### Campagna d'indagine 2009:

- S2-DH1:  $V_{S30} = 317$  m/s
- S5-DH2:  $V_{S30} = 364$  m/s
- S8-DH3:  $V_{S30} = 317$  m/s
- S9-DH4:  $V_{S30} = 224$  m/s
- S10-DH5:  $V_{S30} = 395$  m/s
- S11-DH6:  $V_{S30} = 447$  m/s
- S13-DH7:  $V_{S30} = 337$  m/s
- S16-DH8:  $V_{S30} = 340$  m/s

I risultati delle prove eseguite per le due campagne sono riportati negli elaborati **T00\_GE01\_GEO\_RE02\_A** – "Documentazioni indagini geognostiche preesistenti – Indagini geofisiche" e **T00\_GE01\_GEO\_RE05\_A** – "Documentazioni indagini geognostiche – Indagini geofisiche".

#### 4.4.2 **Definizione delle categorie di sottosuolo per la progettazione**

Dai risultati delle prove eseguite, anche in considerazione della distribuzione delle formazioni geologiche lungo il tracciato e, soprattutto, delle opere da realizzare, è possibile definire, in modo cautelativo, le seguenti categorie di sottosuolo (cfr. anche l'elaborato di progetto **T00\_GE05\_GET\_PL01\_B** - "Planimetria con classificazione simica del territorio"):

- una **categoria di sottosuolo di tipo B**, corrispondente a *rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S,eq}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s*, nei seguenti tratti:

- **dalla spalla 1 (inclusa) del Viadotto Casone  
alla spalla 2 del Viadotto Ribucciano (inclusa);**

- una **categoria di sottosuolo di tipo C**, corrispondente a *depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato*

superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con le profondità e da valori di  $V_{s,eq}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s, nei seguenti tratti:

- da inizio tracciato alla spalla 1 del Viadotto Casone (esclusa);
- dalla spalla 2 del Viadotto Ribucciano (esclusa) a fine tracciato.

#### 4.5 Coefficiente di amplificazione topografica per $h > 30$ m

In base alle condizioni topografiche presenti in sito ( $T_1$  = superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$ ), si possono adottare i seguenti valori del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  (cfr. Tabella 3.2.V del D.M. 17/01/18):

Categoria topografica	$S_T$
T1	1.0

#### 4.6 Caratterizzazione sismica da spalla 1 del Viadotto Casone a spalla 2 del Viadotto Ribucciano

Questi tratti sono caratterizzati dalla categoria di sottosuolo B.

Applicando il coefficiente di categoria topografica T1 ( $S_T=1$ ) il valore di  $a_{max}$  risulta il seguente:

Stato Limite	$T_R$ [anni]	$a_{max}$ [g]
SLO	60	0.076
SLD	101	0.095
SLV	949	0.209
SLC	1950	0.251

#### 4.7 Caratterizzazione sismica inizio tracciato alla spalla 1 del Viadotto Casone (esclusa) e dalla spalla 2 del Viadotto Ribucciano (esclusa) a fine tracciato

Questi tratti sono caratterizzati dalla categoria di sottosuolo C.

Applicando il coefficiente di categoria topografica T1 ( $S_T=1$ ), il valore di  $a_{max}$  risulta il seguente:

Stato Limite	$T_R$ [anni]	$a_{max}$ [g]
SLO	60	0.096
SLD	101	0.118
SLV	949	0.250
SLC	1950	0.291

#### 4.8 Analisi pseudostatiche

Nei metodi pseudo-statici l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso del volume di terreno  $W$  considerato. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza.

Nelle verifiche allo stato limite ultimo, in mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi mediante dei coefficienti di proporzionalità diretta

denominati coefficienti sismici orizzontale e verticale e indicati con  $k_h$  e  $k_v$  rispettivamente. I valori dei coefficienti sismici orizzontale  $k_h$  e verticale  $k_v$  possono essere valutati mediante le espressioni (§ 7.11.6.2.1 del D.M. 17.01.2018):

$$\begin{aligned} F_h &= k_h \cdot W \\ F_v &= k_v \cdot W \end{aligned} \quad \text{con} \quad \begin{aligned} k_h &= \beta \cdot a_{\max} / g \\ k_v &= \pm 0.5 \cdot k_h \end{aligned}$$

dove:

$a_{\max}$	=	accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
$g$	=	accelerazione di gravità;
$\beta$	=	coefficiente di riduzione di $a_{\max}$ .

In assenza di analisi specifiche di risposta sismica locale, l'accelerazione massima può essere valutata mediante la relazione:

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

dove:

$S_S$	=	coefficiente di amplificazione stratigrafica (Tab. 3.2.IV);
$S_T$	=	coefficiente di amplificazione topografica (Tab. 3.2.V);
$a_g$	=	accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

#### 4.8.1 Stabilità dei fronti di scavo e rilevati

Il comportamento in condizioni sismiche dei fronti di scavo e dei rilevati può essere analizzato con gli stessi metodi impiegati per i pendii naturali. Nei metodi pseudostatici i valori dei coefficienti sismici  $k_h$  e  $k_v$  da utilizzare nelle verifiche geotecniche, in mancanza di studi specifici, sono stati ottenuti a partire da una accelerazione orizzontale massima su suolo rigido calcolata in funzione di uno stato limite tipo **SLV – Stato Limite di salvaguardia della Vita** e il valore del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito  $\beta_s$  da utilizzare risulta (cfr. § 7.11.4.):

$$\beta_s = 0.38 \text{ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)}$$

#### 4.8.2 Opere di sostegno

La sicurezza delle opere di sostegno deve essere garantita prima, durante e dopo il terremoto. È ammesso l'uso di metodi pseudo-statici come specificato nel § 7.11.6.2.1.

I valori dei coefficienti sismici  $k_h$  e  $k_v$  da utilizzare nelle verifiche strutturali e geotecniche si ottengono a partire da una accelerazione orizzontale massima su suolo rigido calcolata in funzione di uno stato limite tipo **SLV – Stato Limite di salvaguardia della Vita** come visto nei precedenti paragrafi della relazione e il valore del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito  $\beta_m$  da utilizzare risulta:

$$\beta_m = 0.38 \text{ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)}$$

Per i muri che non siano in grado di subire spostamenti relativi rispetto al terreno, il coefficiente  $\beta_m$  assume valore unitario.

#### 4.8.3 Manufatti scatolari

Il calcolo delle spinte delle terre sui ritzi dei manufatti scatolari verrà stato eseguito assimilando tali opere ad opere di sostegno rigide, che non sono in grado di subire spostamenti relativi rispetto al terreno, il valore del coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito  $\beta_m$  può essere considerato pari a 1.

#### 4.8.4 Paratie

Nel caso delle paratie l'azione sismica, nelle analisi pseudo-statiche, è definita mediante un'accelerazione orizzontale equivalente  $a_h$  pari a:

$$a_h = k_h g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{max}$$

dove:

$g$  = accelerazione di gravità

$k_h$  = coefficiente sismico in direzione orizzontale

$\alpha$  = coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera

$\beta$  = coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza

mentre la componente verticale  $a_v$  dell'accelerazione equivalente può essere posta uguale a 0.

Anche in questo caso l'accelerazione massima può essere valutata mediante un'analisi di risposta sismica locale oppure mediante la relazione:

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

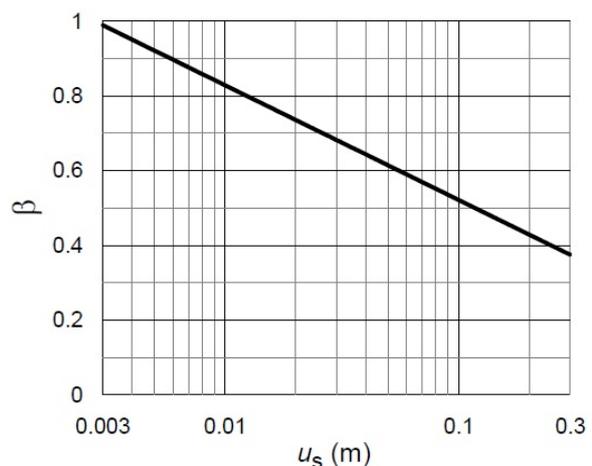
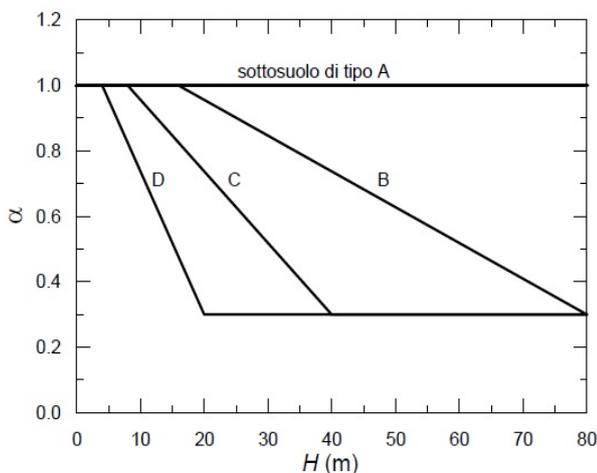
dove:

$S_S$  = coefficiente di amplificazione stratigrafica (Tab. 3.2.IV);

$S_T$  = coefficiente di amplificazione topografica (Tab. 3.2.V);

$a_g$  = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

I valori dei coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  possono essere ricavati dai grafici sottostanti (cfr. *Figura 7.11.2I* e *Figura 7.11.3* delle NTC 2018):



## 5 QUADRO GEOLOGICO-STRATIGRAFICO DI RIFERIMENTO

L'inquadramento geologico, geomorfologico e idrogeologico generale del sito è mostrato nella documentazione geologica di progetto esecutivo e in particolare da:

- **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** - "Relazione geologica"
- **T00\_GE01\_GEO\_CG01\_B** - "Carta geologica generale"
- **T00\_GE01\_GEO\_CG02+04\_B** - "Carta geologica di dettaglio" – 3 tavv.
- **T00\_GE01\_GEO\_CG05+07\_B** - "Carta geomorfologica" – 3 tavv.
- **T00\_GE01\_GEO\_CI01+03\_B** - "Carta idrogeologica" – 3 tavv.

Le condizioni stratigrafiche di riferimento per il sottosuolo in esame, nonché i profili di dettaglio con la ricostruzione stratigrafica delle differenti unità geologico-tecniche sono state rappresentate nei seguenti elaborati di progetto:

- **T00\_GE01\_GEO\_FG01\_B** - "Profilo geologico Asse Principale – Carreggiata Est"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG02\_B** - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Tressa – Carreggiata Est"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG03\_B** - "Planimetria e profilo geologico Rami Svincolo Cerchiaia – Tav. 1/2"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG12\_A** - "Planimetria e profilo geologico Rami Svincolo Cerchiaia – Tav. 2/2"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG04\_B** - "Planimetria e profilo geologico Galleria San Lazzerò – Carreggiata Est"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG05\_B** - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Luglie – Carreggiata Est"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG06\_B** - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Valli – Carreggiata Est"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG07\_B** - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Casone – Carreggiata Est"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG08\_B** - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Ribucciano – Carreggiata Est"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG09\_B** - "Planimetria e profilo geologico Galleria Bucciano – Carreggiata Est"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG10\_B** - "Planimetria e profilo geologico Viadotto Riluogo – Carreggiata Est"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG11\_B** - "Planimetria e profilo geologico Rami Svincolo Ruffolo – Tav.1/2"
- **T00\_GE01\_GEO\_FG13\_A** - "Planimetria e profilo geologico Rami Svincolo Ruffolo Tav.2/2"
- **T00\_GE01\_GEO\_SG01\_A** - "Sezioni geologiche trasversali – Tav. 1/4"
- **T00\_GE01\_GEO\_SG02\_A** - "Sezioni geologiche trasversali – Tav. 2/4"
- **T00\_GE01\_GEO\_SG03\_A** - "Sezioni geologiche trasversali – Tav. 3/4"

– **T00\_GE01\_GEO\_SG04\_A** - "Sezioni geologiche trasversali – Tav. 4/4"

Di seguito si riportano le caratteristiche stratigrafiche delle unità interessate dal progetto in esame, rimandando al **Capitolo 8** per un'analisi dettagliata delle proprietà geotecniche dei terreni.

## 5.1 Unità stratigrafiche di riferimento

Le indagini della campagna geognostica integrativa 2019, insieme con le indagini geognostiche pregresse (campagna di indagine preliminare 2009 e dati bibliografici del Comune di Siena), hanno consentito di verificare la presenza nell'area delle seguenti unità geologiche:

- Unità pliocenica delle *argille azzurre*, riconosciute con continuità lungo tutto lo sviluppo del tracciato dell'infrastruttura, costituita da una litofacies argilloso-limosa e una litofacies limoso-sabbiosa, caratterizzata nel suo complesso da una fascia di alterazione superficiale in argille limose e limi argillosi con spessore di alcuni metri;
- Depositi olocenici di natura *alluvionale* ed *eluvio-colluviale* in corrispondenza delle piane alluvionali e degli impluvi attraversati dell'infrastruttura.

I depositi che caratterizzano il sottosuolo, fino alle massime profondità indagate, sulla base dei dati ottenuti dalle carote di sondaggio (cfr. foto cassette catalogatrici) e dalle analisi granulometriche eseguite in laboratorio e per cui si rimanda ai successivi paragrafi, sono stati suddivisi nelle unità geologico-tecniche descritte di seguito.

### 5.1.1 Depositi neogenici del versante tirrenico

#### 5.1.1.1 Argille azzurre [Pliocene inf.]

Si tratta di peliti marnose massive grigio-azzurre, spesso bioturbate, localmente fossilifere, talvolta intercalate a strati sabbiosi tabulari; all'interno e nella parte alta sono presenti argille sabbiose e limi color nocciola con Lamellibranchi e Gasteropodi.

L'unità è presente lungo tutto il tracciato, ricoperta da depositi olocenici di natura alluvionale ed eluvio-colluviale in corrispondenza delle piane alluvionali e degli impluvi attraversati dell'infrastruttura.

Superficialmente l'unità è caratterizzata da una fascia di alterazione in argille limose e limi argillosi da poco a mediamente consistenti, per uno spessore di alcuni metri.

Da un punto di vista granulometrico l'unità risulta costituita principalmente da una litofacies argilloso-limosa e una litofacies limoso-sabbiosa, gradualmente passanti tra di loro sia in senso verticale che orizzontale. La prima è costituita da argille limose e limi argillosi da poco a mediamente plastici (contenuto di materiale fine < 0.075 mm compreso tra 70 e 90%, Ip compreso tra 10 e 20%), in parte sabbiose, mentre la seconda è costituita da limi sabbioso-argillosi, poco plastici (contenuto di materiale fine < 0.075 mm compreso tra 70 e 80%, componente sabbiosa pari a 20÷30% circa, Ip generalmente inferiore a 10%). Secondo la classificazione USCS dei campioni disponibili, tali terreni sono classificabili perlopiù come CL, ML, CL-ML e subordinatamente come CH; le lenti più sabbiose sono classificabili come SM. Entrambe le litofacies si presentano da molto consistenti a dure, con una elevata resistenza in condizioni non drenate. La permeabilità di tali terreni infatti risulta generalmente da bassa a molto bassa per la litofacies argilloso-limosa (variabile tra 1E-7 e 1E-9 m/s) e generalmente medio-bassa per la litofacies

limoso-sabbiosa (variabile tra 1E-5 e 1E-7 m/s). Il colore della formazione è generalmente grigio, ma nei campioni più sabbiosi e più prossimi alla superficie diventa talvolta oca-grigio scuro.

Le due litofacies risultano gradualmente passanti tra di loro sia verticalmente che orizzontalmente, tanto che non è possibile individuare una netta separazione tra le due lungo il tracciato. Risulta tuttavia possibile osservare la litofacies argilloso-limosa risulta prevalente in corrispondenza di tutto lo sviluppo della Galleria San Lazzerò e in corrispondenza dell'imbocco ovest della Galleria Bucciano, mentre tra l'imbocco est della Galleria Bucciano e la zona dello Svincolo Ruffolo prevale la litofacies limoso-sabbiosa, presumibilmente in ragione della vicinanza del contatto con la soprastante formazione delle *Sabbie di San Vivaldo*.

Localmente sono presenti livelli di sabbie limose e sabbie con limo, addensate e debolmente argillose, di spessore pari ad alcuni metri, che costituiscono i principali livelli permeabili ed acquiferi all'interno della formazione. Tali livelli, distribuiti lungo tutto il tracciato ma generalmente sporadici, risultano particolarmente frequenti in corrispondenza del Viadotto Luglie. È opportuno osservare infine che talvolta i livelli di sabbie o sabbie limose descritti nelle stratigrafie dei sondaggi, in seguito alle analisi di laboratorio hanno mostrato una assoluta prevalenza della componente limosa con una non trascurabile percentuale di componente argillosa, consentendo di classificare tali terreni generalmente come limi sabbioso-argillosi o tutt'al più come limi con sabbia argillosi.

#### 5.1.1.2 Sabbie di San Vivaldo [Pliocene sup.]

Le argille azzurre, nella loro litofacies sabbiosa, passano gradualmente verso l'alto e/o in eteropia ad areniti poco cementate, sabbie a grana da fine a media, molto bioturbate, di colore giallo-oca, localmente con resti di Ostreidi e Pectinidi. Questa formazione affiora esclusivamente e per poche centinaia di metri in prossimità del rilevato a monte della linea ferroviaria Chiusi-Empoli, subito oltre i rilievi della galleria Bucciano, e la sua distribuzione nell'area è stata desunta principalmente dalla cartografia CARG (foglio 297 "Asciano") in quanto non sono disponibili sondaggi geognostici all'interno di tale unità, ma solo la stratigrafia di un pozzo per acqua fornita dal Comune di Siena (codice P247, cfr. *Allegato 2* dell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** – "Relazione geologica"). Tale stratigrafia riporta, da q. 248 m s.l.m. (testa pozzo, sulla sommità della collina di Torre a Bucciano) a q. 205 s.l.m., la presenza di oltre 40 m di sabbie, inizialmente limose di colore giallo oca (porzione superficiale alterata, spessore 10 m), poi di colore grigio con fossili, di granulometria variabile tra le sabbie limose e le sabbie a grana media o con ciottoli, al di sopra di argille grigie riferibili alla formazione delle *argille azzurre* plioceniche.

### **5.1.2 Depositi olocenici**

#### 5.1.2.1 Depositi eluvio-colluviali

Si tratta di terreni che rappresentano il prodotto di alterazione e di trasporto al piede del versante dei materiali appartenenti alle diverse unità affioranti in corrispondenza di tutti i rilievi collinari presenti nell'area del tracciato. Si tratta perlopiù di limi argillosi e limi sabbiosi che coinvolgono in particolare le fondazioni del viadotto Casone, Ribucciano e Riluogo.

#### 5.1.2.2 Depositi alluvionali terrazzati

I *depositi alluvionali terrazzati* sono terreni di natura alluvionali di età quaternaria affioranti lungo le valli dei maggiori corsi d'acqua e dei loro principali affluenti. Si tratta sostanzialmente di ghiaie con

ciottoli, sabbie e peliti massive pedogenizzate che non interferiscono mai con il tracciato, essendo presenti perlopiù ad est dello svincolo Ruffolo.

#### 5.1.2.3 Depositi alluvionali

I *depositi alluvionali* occupano il fondo dei principali impluvi presenti nell'area del tracciato e sono il prodotto del trasporto, da parte delle acque superficiali, di materiali eterogenei a formare dei depositi dello spessore da alcuni metri fino a 8-9 m circa. Si tratta, in particolare, di *sabbie con limo argillose debolmente ghiaiose, limi argillosi sabbiosi e ghiaie con sabbie limose*.

Queste tre tipologie di depositi coinvolgono rispettivamente la piana alluvionale di Cerchiaia, le fondazioni dei principali viadotti centrali al tracciato, la piana alluvionale di Ruffolo in corrispondenza del viadotto Riluogo. Nonostante una granulometria prevalente in ciascuna delle tre tipologie, nei campioni è stata sempre rinvenuta una buona percentuale di materiale fine in matrice limoso-argillosa.

#### 5.1.2.4 Depositi antropici

I *depositi antropici* sono perlopiù costituiti dai materiali che sono stati utilizzati per la realizzazione dei rilevati stradali e/o ferroviari, terrapieni o discariche presenti nell'area del tracciato.

#### 5.1.2.5 Rifiuti aree esterne SI68 e SI68bis

Sulla base di alcuni documenti forniti dal Comune di Siena, nell'area dello Svincolo di Cerchiaia è stata indicata tra i depositi antropici un'area recentemente oggetto di un intervento di bonifica, corrispondente all'area in loc. Cerchiaia-Mattonaia identificata con codice Piano Regionale SI068-068bis, intervento concluso con *certificazione di avvenuta bonifica* della Provincia di Siena datata 25/10/2007.

Tuttavia, da tale documentazione emerge che al contorno di tale area sono ancora presenti rifiuti di varia natura, costituiti da *calcinacci, ceneri, RSU+tufo*. Al momento non risulta disponibile la caratterizzazione ambientale di tali rifiuti, pertanto, nella fase di progettazione esecutiva dell'infrastruttura, dovrà essere previsto un opportuno campionamento di tali materiali e una loro adeguata caratterizzazione ambientale al fine di prevedere un'adeguata bonifica delle aree suddette o comunque, in ogni caso, un adeguato smaltimento di tali rifiuti durante i lavori di scavo delle fondazioni delle opere infrastrutturali previste in quest'area.

## 6 PERMEABILITÀ DEI TERRENI E PIEZOMETRIA DELLA FALDA

Il quadro idrogeologico del tracciato in esame, ubicato in Comune di Siena (SI), è stato desunto dai risultati delle indagini effettuate per la caratterizzazione geologica e idrogeologica del tracciato della "S.G.C. E78 Grosseto-Fano – Tratto Siena Bettolle (A1) – Adeguamento a 4 corsie del tratto Siena-Ruffolo (Lotto 0)" condotte nelle campagne di indagini pregresse (2009) e nella recente campagna integrativa 2019, nonché mediante le informazioni desunte dai dati idrogeologici di pozzi e sondaggi richiesti al Comune di Siena nel corso della presente fase di progettazione definitiva.

### 6.1 Permeabilità dei terreni

L'area oggetto di studio è caratterizzata da tre domini ben distinti dal punto di vista idrogeologico e della permeabilità dei terreni. Si distinguono, infatti, le condizioni presenti nei rilievi collinari argillosi, quelle intermedie nei domini pedecollinari e di raccordo e quelle presenti nei fondovalle alluvionali.

Come rappresentato nell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_CI01+03\_B** - "Carta idrogeologica" – Scala 1.2000 (4 tavv.) il grado di permeabilità dei terreni è strettamente legato alla granulometria delle unità riconosciute. Trattandosi principalmente di depositi superficiali olocenici e di depositi pliocenici non cementati, la permeabilità è una permeabilità primaria per porosità, che risulta generalmente variabile da media a molto bassa a seconda della granulometria prevalente dei depositi.

Di seguito vengono distinte e raggruppate le formazioni affioranti nel bacino in base al tipo e al grado di permeabilità che possiedono:

- Terreni a permeabilità media: sono rappresentati, nell'area in esame, dai *depositi antropici* e dai *depositi alluvionali ghiaiosi*.
- Terreni a permeabilità medio-bassa: sono rappresentati, nell'area in esame, dai *depositi alluvionali sabbioso-limosi*, dai *depositi alluvionali terrazzati* e dai depositi sabbioso-limosi del Pliocene (*Sabbie di San Vivaldo*);
- Terreni a permeabilità bassa o molto bassa: sono rappresentati dalle litologie nelle quali si verifica una circolazione idrica quasi trascurabile e che per tali caratteristiche fungono da substrato alle falde acquifere. In questa categoria si identificano tutte le facies costituite da una frazione argillosa prevalente, mediamente o molto consistente, come le *argille azzurre* dei depositi marini del Pliocene, nella loro struttura non alterata superficialmente, nonché i prodotti della loro alterazione argilloso-limoso costituita dai *depositi eluvio-colluviali*; nel range di terreni a permeabilità bassa si possono collocare, inoltre, i *depositi alluvionali limoso-argillosi*, specie per la loro componente fine prevalente.

Per quanto riguarda in particolare l'unità della *argille azzurre* plioceniche, la bassa permeabilità di tali depositi, misurata attraverso prove di permeabilità Lefranc a carico variabile, è risultata generalmente variabile nell'ambito di un range piuttosto esteso: da bassa a molto bassa per la litofacies argilloso-limoso (variabile tra 1E-7 e 1E-9 m/s) e generalmente medio-bassa per la litofacies limoso-sabbioso (variabile tra 1E-5 e 1E-7 m/s). Inoltre, come è stato possibile osservare nelle stratigrafie dei pozzi per acqua ubicati in ambito collinare (cfr. *Allegato 2* dell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** – "Relazione geologica"), per quanto la loro descrizione non sia del

tutto precisa, nel complesso delle *argille azzurre* plioceniche sono presenti livelli di sabbie acquifere di spessore variabile generalmente tra 2÷3 m e 10 m circa, con una soggiacenza del livello piezometrico variabile tra 20 e 60 m circa (solo in un caso è pari a 3 m, ma in un ambito di transizione tra il piede della collina e la piana alluvionale) e una portata dei pozzi generalmente modesta, variabile tra un minimo di 0.01 l/s e un massimo di 2 l/s.

In generale, si deve considerare che la permeabilità dei depositi a componente più sabbiosa nel complesso risulta comunque sempre mediamente bassa, specie per l'elevato contenuto di materiale fine limoso-argilloso evidente dall'osservazione delle carote di sondaggio e dalle analisi granulometriche di laboratorio, con valori minimi stimati del tutto paragonabili a quelli dei terreni argillosi pliocenici, ma la cui componente sabbiosa in ogni caso li rende non del tutto impermeabili.

Negli elaborati **T00\_GE01\_GEO\_CI01÷03\_B – "Carta idrogeologica"** – Scala 1:2000 (3 tavv.) allegati al progetto, sono stati rappresentati i range di permeabilità delle unità litostratigrafiche riconosciute, riportati anche nella seguente **Figura 1**.

In generale, il sottosuolo del tracciato in esame è caratterizzato nel complesso da terreni a permeabilità **da media a molto bassa**, con valori che variano mediamente tra  $10^{-4}$  m/s e  $10^{-9}$  m/s.

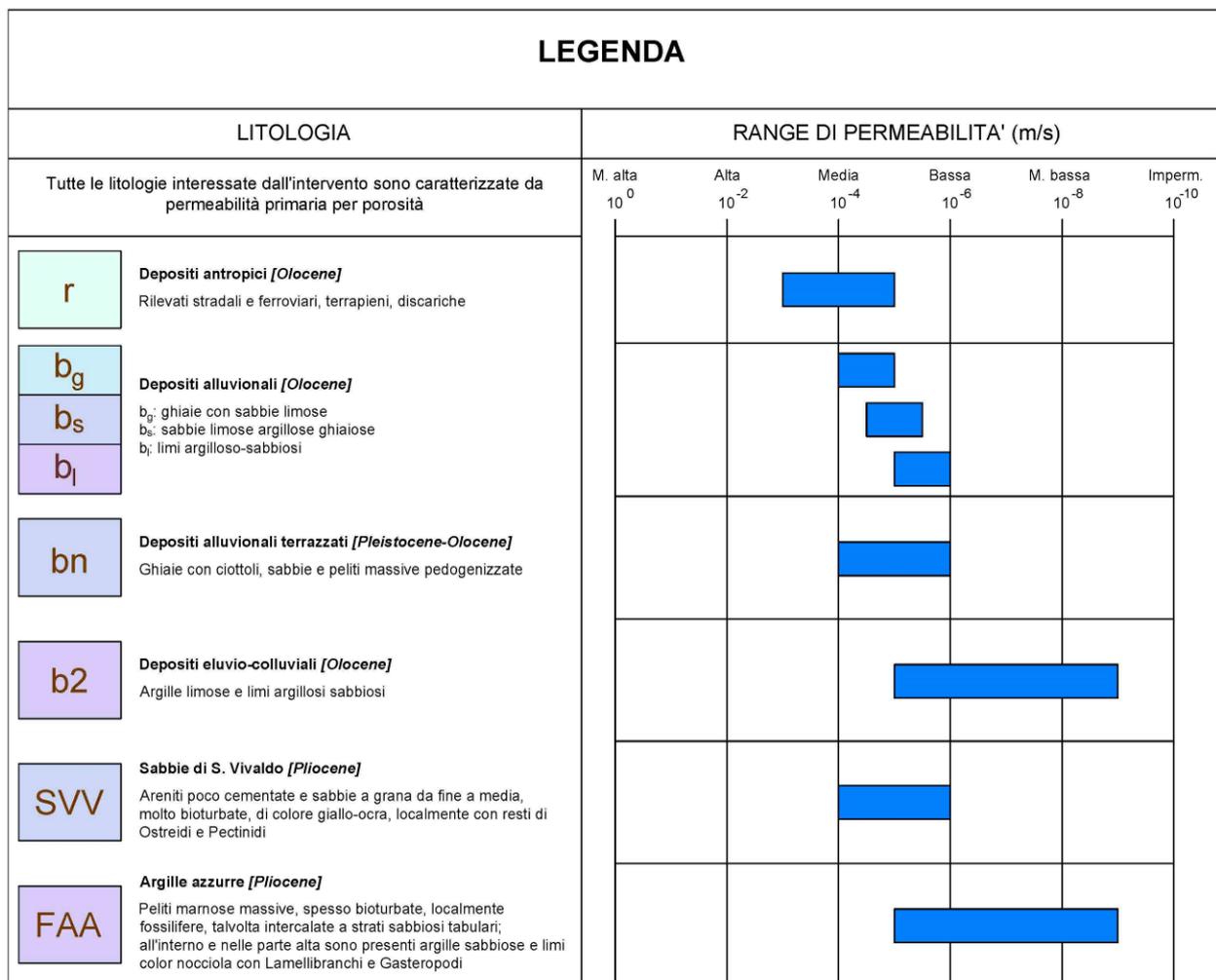


Figura 1 - Range di permeabilità delle unità litostratigrafiche

## 6.2 Pozzi, piezometri e livello piezometrico della falda

Le indagini effettuate nella zona inerente all'infrastruttura in fase di progetto preliminare, unitamente ad una ricognizione dei punti d'acqua esistenti e messi a disposizione dagli enti preposti (Comune di Siena in primis, Provincia e Regione) permettono di delineare una situazione idrogeologica, a livello generale, più completa per il sito in esame e di ricostruire con buona approssimazione il sistema di circolazione idrica sotterranea.

Come accennato in precedenza, in ambito di progettazione è stata fatta richiesta dei dati disponibili in bibliografia per l'area in esame e in particolare (oltre a sondaggi e prove statiche e dinamiche) anche delle stratigrafie dei pozzi per acqua identificati tra quelli presenti nella *Carta delle Indagini (Tav.4)* dello "Studio di microzonazione sismica" del *Piano Operativo e Variante di aggiornamento del Piano Strutturale*, adottato con Del. C.C. n.58 del 19/05/2020.

Tali dati stati consultati per un maggior dettaglio di definizione del modello idrogeologico di riferimento e le stratigrafie richieste sono riportate in *Allegato 2 - Stratigrafie di pozzi fornite dal Comune di Siena* dell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** – "Relazione geologica".

Data l'ubicazione dei pozzi per acqua, che risultano in parte concentrati in corrispondenza delle due valli alluvionali principali nelle zone di svincolo di Cerchiaia e di Ruffolo e in parte distribuiti in tutta la zona collinare compresa tra i due svincoli, è verosimile riferire le due tipologie di pozzi a due diversi complessi idrogeologici, il primo legato ai *depositi alluvionali*, prevalentemente sabbiosi nella zona di Cerchiaia e prevalentemente ghiaiosi nella zona di Ruffolo, dove il livello piezometrico della falda è ad una profondità di pochi metri dal piano campagna, e il secondo legato al complesso delle *argille azzurre* plioceniche. Come è stato possibile osservare nelle stratigrafie dei pozzi per acqua ubicati in ambito collinare, per quanto la loro descrizione non sia del tutto precisa, in tale complesso sono presenti livelli di sabbie acquifere di spessore variabile generalmente tra 2-3 m e 10 m circa, con una soggiacenza del livello piezometrico variabile tra 20 e 60 m circa (solo in un caso è pari a 3 m, ma in un ambito di transizione tra il piede della collina e la piana alluvionale) e una portata dei pozzi generalmente modesta, variabile tra un minimo di 0.01 l/s e un massimo di 2 l/s.

Tutti i pozzi per acqua sono stati riportati nell'elaborato di progetto definitivo **T00\_GE01\_GEO\_CI01+03\_B** – "Carta idrogeologica" – Scala 1:2000 (3 tavv.).

Con il dataset richiesto al Comune di Siena, oltre a un discreto numero di pozzi, è stato fornito anche un discreto numero di sondaggi attrezzati con piezometri, utili per la ricostruzione più dettagliata del livello della falda in corrispondenza del territorio in esame.

In **Tabella 9** sono riportati i dati delle piezometrie ricavate dunque sia dai sondaggi sia dai pozzi messi a disposizione dal Comune di Siena e le cui stratigrafie sono riportate in *Allegato 1 - Indagini geognostiche fornite dal Comune di Siena* e in *Allegato 2 - Stratigrafie di pozzi per acqua* dell'elaborato di progetto definitivo **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** – "Relazione geologica".

<b>Pozzi e stratigrafie comunali</b>			
sondaggio/pozzo [-]	Quota di riferimento [m s.l.m.]	prof. livello piezometrico [m da p.c.]	quota livello piezometrico [m s.l.m.]
P1068	211,5	3,00	208,5
P295	246,0	60,00	186,0
P880	251,4	35,00	216,4
P295	245,0	55,00	190,0
P297	265,0	50,00	215,0
P247	248,0	20,00	228,0
P869	225,0	56,00	169,0
P248	223,0	33,00	190,0
P249	237,0	40,00	197,0
P655	238,0	5,70	232,3
P563	237,7	4,90	232,8
P1267	191,8	3,77	188,0
P1268	191,1	3,68	187,4
P1271	191,4	4,00	187,4
P1269	191,4	3,62	187,8
P1270	190,8	3,90	186,9

**Tabella 9** – Dati piezometrici stratigrafie e pozzi resi disponibili dal Comune di Siena

In **Tabella 10** vengono mostrate anche le misure eseguite per la campagna di indagine pregressa (2009) con l'indicazione delle misure della falda eseguite e della quota del livello piezometrico in relazione alla quota di riferimento da p.c. che, ove non rilevata e/o dichiarata nella documentazione di indagine, è stata desunta dai dati di rilievo disponibili. È stato riportato anche il livello piezometrico della falda rilevato in un sondaggio S2 eseguito nel 2003 per la realizzazione della passerella pedonale a fianco del ponte della linea ferroviaria Siena Buonconvento, a fine tracciato. Inoltre, tali dati sono stati integrati con i pozzi per acqua desunti dalla documentazione disponibile di progetto preliminare, ovvero quanto riportato in elaborato "TAV. GEO 03 - Carta idrogeologica 1:5000" e nelle note sullo stato di progettazione (cfr. Allegato 5 - Nota sulle indagini geologiche).

<b>Campagna di indagini 2009</b>			
sondaggio [-]	Quota di riferimento [m s.l.m.]	prof. livello piezometrico [m da p.c.]	quota livello piezometrico [m s.l.m.]
S1	208,0	3,20	204,8
S3	230,0	0,00	230,0
S4	233,2	14,65	218,6
S6	232,3	3,20	229,1
S7	217,6	4,64	213,0
S12	231,2	1,40	229,8
S14	235,0	16,62	218,4
S15	192,2	4,19	188,0
S17	190,5	2,32	188,2
S18	192,6	2,90	189,7
P1	223,3	1,60	221,7
P6	206,6	asciutto	-
P8	199,2	1,70	197,5
P10	208,2	umido	-
P12	216,4	5,80	210,6
P15	193,1	4,20	188,9
P17	193,3	1,36	191,9

<b>Campagna di indagine 2003</b>			
S2	198,5	2,10	196,4

<b>Pozzi per acqua da documentazione P.P.</b>			
1	207,0	50,00	157,0
3	201,0	7,00	194,0
4	243,0	50,00	193,0
5	248,0	30,00	218,0
6	247,0	50,00	197,0
7	248,0	50,00	198,0
10	204,1	2,00	202,1
15	189,0	15,00	174,0
16	191,0	7,00	184,0
19	200,0	12,00	188,0

**Tabella 10** – Progetto Preliminare: piezometri campagna di indagine 2009, 2003 e pozzi per acqua

Infine, nella campagna di indagine integrativa del 2019, sono stati installati n.6 piezometri a tubo aperto in altrettanti fori di sondaggi a carotaggio continuo. Come per le campagne precedenti, anche in **Tabella 11** si riportano le indicazioni relative alla ricostruzione della quota piezometrica di riferimento per la delineazione di un modello di circolazione idrica sotterranea completo.

Campagna di indagini 2019			
sondaggio [-]	Quota di riferimento [m s.l.m.]	prof. livello piezometrico [m da p.c.]	quota livello piezometrico [m s.l.m.]
S01D-PZ	210,0	6,50	203,5
S03D-PZ	206,0	0,00	206,0
S04D-PZ	198,4	0,00	198,4
S06D-PZ	196,1	2,20	193,9
S10D-PZ	227,1	6,00	221,1
S12D-PZ	192,0	4,30	187,7

**Tabella 11** – Piezometri campagna di indagine 2019

### 6.3 Modello idrogeologico di riferimento per le opere

Il modello idrogeologico di riferimento per il tracciato in esame è stato dunque ottenuto dall'integrazione dei risultati delle indagini effettuate per la caratterizzazione geologica e idrogeologica del tracciato, condotte nelle campagne di indagini pregresse, nella recente campagna integrativa e dalle informazioni desunte dai dati idrogeologici di pozzi e sondaggi richiesti al Comune di Siena nella presente fase di progettazione definitiva.

È stato ricavato un modello idrogeologico di riferimento per la progettazione, basato principalmente sui range di permeabilità dei diversi complessi litostratigrafici presenti nel sottosuolo e arricchito con l'ubicazione delle preferenziali linee di deflusso della falda desunte dall'analisi delle quote piezometriche delle verticali disponibili.

Nonostante l'eterogeneità dei dati a disposizione e i differenti contesti idrogeologici, il livello piezometrico della falda freatica è stato definito considerando i dati di tutte le diverse campagne di indagine eseguite, con la finalità di dare una certa continuità all'informazione, anche al fine di privilegiare delle ipotesi cautelative per la progettazione geotecnica delle opere di fondazione e di sostegno distribuite lungo tutto il tracciato.

Il livello piezometrico di riferimento per la progettazione è stato riportato principalmente negli elaborati **T00\_GE01\_GEO\_FG01** – “Profilo geologico asse principale – Carreggiata Est” e **T00\_GE01\_GET\_FG01** – “Profilo geotecnico asse principale – Carreggiata Est”, oltre che negli elaborati relativi ai profili geologici e geotecnici delle principali opere (viadotti e gallerie).

In sostanza, tale ricostruzione del livello piezometrico di progetto è stata eseguita attraverso l'interpolazione delle misure relative alle diverse campagne di indagini, dando maggiore importanza alle misure eseguite nella recente campagna di indagine (2019) e integrandole, dove necessario e possibile, con le misure eseguite nella campagna precedente e con i dati reperiti dagli elaborati bibliografici comunali (cfr. stratigrafie *Allegato 1* e *Allegato 2* dell'elaborato di progetto **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** – “Relazione geologica”).

Tranne alcuni casi, in cui la perforazione dei sondaggi è in posizione collinare senza contatti con terreni particolarmente filtranti quali riporti o alluvioni, è sempre presente una falda abbastanza superficiale, il cui livello risale fino a pochi metri dal piano campagna.

In particolare, la soggiacenza del livello piezometrico è risultata, con i dati dei piezometri a disposizione, variabile da un minimo di 0 m (in corrispondenza delle vallecole attraversate dai

Viadotti Luglie e Valli, dove la falda risulta a p.c.) fino a non più di 7÷8 m da p.c. nelle zone prossime agli interventi in oggetto, a seconda del contesto idrogeologico. Nelle zone collinari dei principali rilievi non direttamente interferenti con il tracciato, i dati a disposizione mostrano anche soggiacenze anche maggiori.

Lungo il tracciato in progetto è stata identificata l'assoluta predominanza delle litologie di natura limoso-argillosa, a bassa o medio-bassa permeabilità, riferibili alle *argille azzurre* del Pliocene che, insieme ai *depositi eluvio-colluviali* limoso-argillosi e ai depositi alluvionali a componente fine predominante (*depositi alluvionali limosi*) determina una modesta circolazione delle acque sotterranee, perlopiù concentrata nelle stesse coltri eluvio-colluviali e negli orizzonti di alterazione superficiale delle argille, generalmente più permeabili.

Inoltre, come si è visto, le *argille azzurre* plioceniche possono presentare localmente intercalazioni sabbioso-limose sature che, se intercettate dagli scavi (gallerie, trincee, opere di fondazione) possono generare venute d'acqua più o meno cospicue in funzione del valore della permeabilità (mediamente pari a circa  $1E-5$  m/s negli strati dove prevale la componente sabbiosa su quella limosa e circa  $1E-6$  m/s negli strati in cui prevale la componente limosa su quella sabbiosa).

L'andamento della falda superficiale tende in sostanza a seguire l'andamento dei versanti, generalmente a debole pendenza, concentrandosi e diminuendo la soggiacenza in corrispondenza degli impluvi o comunque dei corsi d'acqua, mentre in corrispondenza dei modesti rilievi collinari la soggiacenza tende generalmente ad avere valori più elevati.

## 7 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

I criteri adottati per l'interpretazione dei dati ottenuti dalle indagini in sito e dalle indagini di laboratorio sono illustrati nei paragrafi seguenti, in particolare:

- nel paragrafo 7.1 sono riportati i criteri adottati per l'interpretazione dei dati relativamente ai materiali a comportamento prevalentemente granulare;
- nel paragrafo 7.2 sono indicati i criteri utilizzati per l'interpretazione dei dati relativamente ai materiali con comportamento prevalentemente coesivo.

### 7.1 Terreni prevalentemente granulari

#### 7.1.1 Premessa

Come noto prelevare campioni indisturbati in terreni prevalentemente granulari, risulta molto difficile ed in particolare la caratterizzazione geotecnica di tali terreni è affidata principalmente all'interpretazione dei dati ottenuti dalle prove in sito e dai risultati delle prove di laboratorio effettuate su campioni rimaneggiati (granulometrie, pesi specifici, etc.). L'interpretazione dei dati delle prove in situ in correlazione con le prove di laboratorio è finalizzata a determinare principalmente le seguenti caratteristiche:

- grado di addensamento;
- parametri di resistenza al taglio;
- parametri di deformabilità.

#### 7.1.2 Normalizzazione del valore di $N_{SPT}$

L'interpretazione delle prove SPT è stata eseguita adottando una metodologia che si basa sulla definizione del valore del numero di colpi normalizzato  $(N_1)_{60}$ .

Le prove SPT a fondo foro consistono nel misurare il numero di colpi richiesto per provocare l'avanzamento per battitura di un campionatore standard per tre tratti consecutivi di 15 cm ciascuno. La resistenza dinamica puntuale,  $N_{SPT}$ , si ottiene sommando il numero di colpi necessario per l'avanzamento degli ultimi 30 cm.

Per tenere conto dei fattori di variabilità connessi ai diversi dispositivi di infissione presenti sul mercato e della pressione efficace del terreno alla profondità di esecuzione della prova, viene valutato in funzione della profondità il valore normalizzato di  $N_{SPT}$ , cioè  $(N_1)_{60}$ , ricavato dalla seguente espressione:

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} \times \frac{ER}{60} \times C_N$$

in cui:

$C_N = (98.1/\sigma'_{v0})^{0.5}$  = coefficiente di correzione dipendente dal valore di  $\sigma'_{v0}$ ;

$\sigma'_{v0}$  = pressione verticale efficace alla profondità di prova;

ER = rendimento medio del dispositivo di infissione effettivamente impiegato espresso in percentuale (per il presente caso assunto pari al 65%).

Sulla base della definizione del parametro  $(N_1)_{60}$  sono state applicate delle correlazioni di letteratura per interpretare i dati in termini di parametri di resistenza al taglio e deformabilità.

Di seguito si forniscono le correlazioni adottate per le stime della densità relativa  $D_R$ , dell'angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  e dei moduli di elasticità.

### 7.1.3 Densità relativa

I valori di densità relativa sono stati stimati utilizzando i valori del numero di colpi  $N_{SPT}$  normalizzati mediante il valore  $(N_1)_{60}$ .

La stima dei valori di densità relativa è necessaria per la successiva determinazione dei valori degli angoli di resistenza al taglio (cfr. 7.1.4) e dei moduli di deformabilità per i terreni granulari (cfr. 7.1.5).

In particolare, per la stima del valore di densità relativa è stata adotta la relazione di Skempton:

$$D_R = \left[ \frac{(N_1)_{60}}{60} \right]^{0.5}$$

Nella valutazione dei risultati, è stato tenuto conto dell'effetto della granulometria come segue:

- nelle sabbie, la  $D_R$  è il valore medio "prudenziale" (valore caratteristico);
- nelle ghiaie, di ogni tipo, la  $D_R$  e/o i parametri da essa derivati saranno stabiliti in modo tale da essere prudentemente inferiori al valore minimo assoluto; ciò in ragione del fatto che le prove SPT forniscono valori in proporzione maggiori delle sabbie in ragione della differente granulometria.

### 7.1.4 Angolo di resistenza a taglio

I valori dell'angolo di resistenza al taglio sono calcolati dall'interpretazione di numero di colpi SPT, attraverso la determinazione della densità relativa, mediante la relazione di Schmertmann (cfr. **Figura 2**):

$$\phi'_p = 28 + 0.14 \cdot D_R$$

per sabbie fini uniformi,

$$\phi'_p = 31.5 + 0.115 \cdot D_R$$

per sabbie medie uniformi e sabbie fini ben gradate,

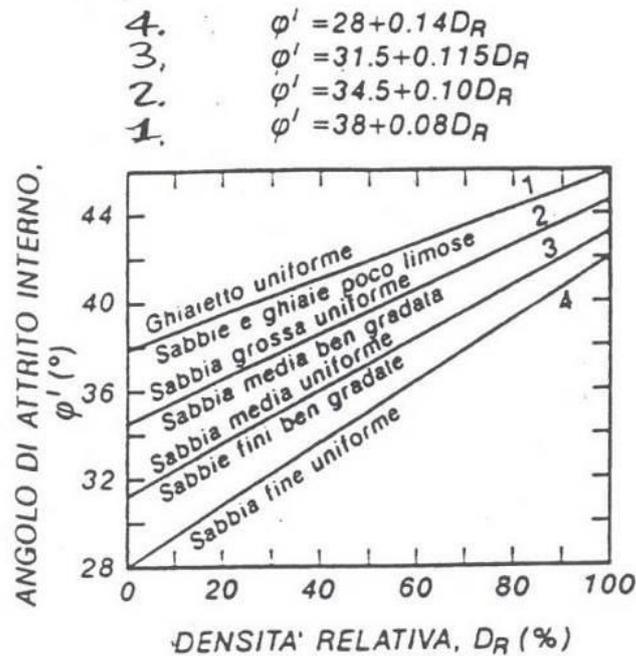
$$\phi'_p = 34.5 + 0.10 \cdot D_R$$

per sabbie grosse uniformi e sabbie medie ben gradate,

$$\phi'_p = 38.0 + 0.08 \cdot D_R$$

per ghiaietti uniformi e sabbie e ghiaie poco limose.

dove  $D_R$  è il corrispondente valore della densità relativa. Si noti come nella relazione sopra riportata, il valore dell'angolo di resistenza al taglio sia quello "di picco".



**Figura 2** - Relazione tra angolo di attrito efficace ( $\varphi'$ ) e densità relativa ( $D_r$ ) per diverse granulometrie (Schmertmann, 1975)

### 7.1.5 Parametri di deformabilità

Per una valutazione generale della rigidità dei materiali (paratie, opere di sostegno, etc.), il modulo elastico operativo  $E'_{25}$  (corrispondente ad un grado di mobilitazione della resistenza ultima pari al 25%) è valutato mediante la correlazione proposta da Jamiolkowski, 1988:

per terreni normalconsolidati:

$$E'_{25} = 0.0981 \times (10.5 - 3.5D_R) \times N_{SPT} \quad (\text{MPa})$$

per terreni sovraconsolidati:

$$E'_{25} = 0.0981 \times (52.5 - 35D_R) \times N_{SPT} \quad (\text{MPa})$$

in cui:

- $E'_{25}$ : modulo di Young secante, cui corrisponde un grado di mobilitazione della resistenza ultima pari al 25%;
- $D_R$ : densità relativa, espressa come frazione dell'unità;
- $N_{SPT}$ : numero di colpi da prova SPT.

## 7.2 Terreni prevalentemente coesivi

### 7.2.1 Premessa

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni a grana fine ci si è affidati sia all'interpretazione delle prove di laboratorio sia all'interpretazione delle prove in sito. Scopo delle indagini è quello di definire in particolar modo le seguenti proprietà:

- OCR – grado di consolidazione;

- parametri di resistenza al taglio;
- parametri di deformabilità;
- coefficienti di permeabilità.

### 7.2.2 Proprietà indice dei terreni coesivi

La classificazione dei terreni a grana fine, e pertanto a prevalente comportamento coesivo, è stata effettuata in primo luogo facendo riferimento ai risultati delle prove di laboratorio in termini di:

- analisi granulometrica;
- limiti di Atterberg (limite liquido e limite plastico);
- pesi di volume naturale e secco;
- umidità naturale;

I primi due fattori consentono la classificazione del materiale secondo i riferimenti bibliografici correnti, come ad esempio la UNI 10006 ed il sistema USCS.

### 7.2.3 Resistenza al taglio non drenata

La resistenza al taglio non drenata  $c_u$  dei terreni limoso-argillosi saturi verrà valutata facendo riferimento:

- ai risultati delle prove di laboratorio triassiali non consolidate non drenate (TX-UU);
- all'interpretazione delle prove dinamiche SPT;
- all'interpretazione delle prove con pocket penetrometer e torvane sulle carote estratte durante la fase di sondaggi;
- all'interpretazione delle prove con pocket penetrometer e Torvane sui campioni di laboratorio.

#### 7.2.3.1 Valutazione di $c_u$ da prove SPT

Nel caso dei terreni limoso-argillosi saturi, la resistenza al taglio non drenata è stata stimata sulla base di correlazioni empiriche.

Nello specifico, è adottata la correlazione di Terzaghi e Peck (coesione non drenata in kPa):

$$c_u = 6 N_{SPT} \quad (\text{kPa})$$

e la relazione di Jamiolkowski (1985), valida per terreni normalconsolidati:

$$c_{u \min} = 0.2 \cdot \sigma'_{vo} (\text{kPa})$$

dove:

$\sigma'_{vo}$  = pressione verticale efficace alla profondità di prova;

$N_{SPT}$  = numero di colpi della prova SPT.

## 7.2.4 Parametri di resistenza al taglio in termini di sforzi efficaci

I parametri di resistenza in termini di sforzi efficaci sono stati determinati sulla base dei risultati delle prove di laboratorio di taglio diretto (TD) e delle prove triassiali consolidate non drenate (TX-CIU).

## 7.2.5 Caratteristiche di deformabilità

### 7.2.5.1 Modulo edometrico da prove edometriche

Il modulo edometrico è stato ricavato direttamente attraverso l'esecuzione di prove di compressibilità edometrica in laboratorio.

### 7.2.5.2 Modulo edometrico da prove SPT

Il valore del modulo edometrico o modulo elastico drenato confinato,  $M_{ds}$  è stato calcolato, sulla base dei risultati delle prove SPT, mediante la relazione di Stroud e Butler (1975):

$$M_{ds} = 0.6 \cdot N_{SPT} \text{ (MPa)}$$

## 7.3 Classificazione geotecnica dei terreni

La classificazione geotecnica dei terreni è stata effettuata facendo riferimento principalmente ai risultati delle seguenti prove di laboratorio:

- analisi granulometriche (setacciatura e sedimentazione);
- limiti di Atterberg.

Le classificazioni utilizzate per la descrizione dei terreni sono le seguenti:

- Classificazione AGI;
- Classificazione CNR-UNI 10006;
- Classificazione USCS.

## 8 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

Il presente capitolo riporta la caratterizzazione geotecnica delle principali unità individuate lungo il tracciato stradale, nonché l'interpretazione dei dati di laboratorio disponibili eseguiti sui campioni dei sondaggi e dei pozzetti esplorativi.

La caratterizzazione geotecnica si è basata principalmente su:

- descrizione stratigrafica dei sondaggi;
- interpretazione dei risultati delle prove penetrometriche statiche e dinamiche;
- prove di laboratorio sui campioni rimaneggiati e indisturbati.

### 8.1 Unità stratigrafiche: caratteristiche geotecniche generali

Le unità litostratigrafiche, così come presentate e descritte nel paragrafo 5.1, sono state distinte nelle seguenti unità geotecniche:

#### Unità "FAA": argille azzurre

Le *Argille azzurre* sono state riconosciute nella quasi totalità del tracciato. Tale unità coinvolge quindi tutte le principali infrastrutture (viadotti e gallerie), ricoperta talvolta da depositi olocenici di natura alluvionale ed eluvio-colluviale in corrispondenza delle piane alluvionali e degli impluvi attraversati dell'infrastruttura. Superficialmente l'unità è caratterizzata da una fascia di alterazione in argille limose e limi argillosi da poco a mediamente consistenti, per uno spessore di alcuni metri.

Da un punto di vista granulometrico l'unità risulta costituita principalmente da una litofacies argilloso-limosa e una litofacies limoso-sabbiosa, gradualmente passanti tra di loro sia in senso verticale che orizzontale. La prima è costituita da argille limose e limi argillosi da poco a mediamente plastici (contenuto di materiale fine < 0.075 mm compreso tra 70 e 90%, Ip compreso tra 10 e 20%), in parte sabbiose, mentre la seconda è costituita da limi sabbioso-argillosi, poco plastici (contenuto di materiale fine < 0.075 mm compreso tra 70 e 80%, componente sabbiosa pari a 20÷30% circa, Ip generalmente inferiore a 10%). Entrambe le litofacies si presentano da molto consistenti a dure, con una elevata resistenza in condizioni non drenate. La permeabilità di tali terreni, infatti, risulta generalmente da bassa a molto bassa per la litofacies argilloso-limosa (variabile tra 1E-7 e 1E-9 m/s) e generalmente medio-bassa per la litofacies limoso-sabbiosa (variabile tra 1E-5 e 1E-7 m/s). Il colore della formazione è generalmente grigio, ma nei campioni più sabbiosi e più prossimi alla superficie diventa talvolta oca-grigio scuro.

Le due litofacies risultano gradualmente passanti tra di loro sia verticalmente che orizzontalmente, tanto che non è possibile individuare una netta separazione tra le due lungo il tracciato. Risulta tuttavia possibile osservare la litofacies argilloso-limosa risulta prevalente in corrispondenza di tutto lo sviluppo della Galleria San Lazzerò e in corrispondenza dell'imbocco ovest della Galleria Bucciano, mentre tra l'imbocco est della Galleria Bucciano e la zona dello Svincolo Ruffolo prevale la litofacies limoso-sabbiosa, presumibilmente in ragione della vicinanza del contatto con la soprastante formazione delle *Sabbie di San Vivaldo*. Localmente sono presenti livelli di sabbie limose e sabbie con limo, addensate e debolmente argillose, di spessore pari ad alcuni metri, che costituiscono i principali livelli permeabili ed acquiferi all'interno della formazione. Tali livelli, distribuiti lungo tutto il tracciato ma generalmente sporadici, risultano particolarmente frequenti in

corrispondenza del Viadotto Luglie. E' opportuno osservare infine che talvolta i livelli di sabbie o sabbie limose descritti nelle stratigrafie dei sondaggi, in seguito alle analisi di laboratorio hanno mostrato una assoluta prevalenza della componente limosa con una non trascurabile percentuale di componente argillosa, consentendo di classificare tali terreni generalmente come limi sabbioso-argillosi o tuttalpiù come limi con sabbia argillosi.

Durante la perforazione dei sondaggi sono stati rinvenuti perlopiù limi argillosi e argille limose, da molto consistenti a duri, da poco plastici a mediamente plastici ( $I_p = 10 \div 20\%$ ), a definire la litofacies limoso-argillosa, mentre in alcuni campioni sono state rinvenute limi sabbioso-argillosi, con componente sabbiosa pari a  $20 \div 30\%$  circa,  $I_p$  generalmente inferiore a  $10\%$ . Secondo la classificazione USCS dei campioni disponibili, tali terreni sono classificabili perlopiù come CL, ML, CL-ML e subordinatamente come CH; le lenti più sabbiose sono classificabili come SM. Il colore è generalmente grigio ma nei campioni più sabbiosi e più prossimi alla superficie diventa talvolta ocra-grigio scuro.

### **Unità "FAA": argille azzurre alterate**

L'unità "FAA, superficialmente, è spesso caratterizzata da una fascia di alterazione in argille limose e limi argillosi da poco a mediamente consistenti, per uno spessore di alcuni metri, talvolta debolmente sabbiose o sabbiose, con una percentuale di sabbia che varia fino a circa il  $30\%$  in alcuni casi ma con un contenuto di fine che non scende mai al di sotto del  $70\%$ . Secondo la classificazione USCS le argille sono classificabili perlopiù come CL e ML.

### **Unità "b2": Depositi eluvio-colluviali**

I *depositi eluvio-colluviali* rappresentano il prodotto di alterazione e di trasporto al piede del versante dei materiali appartenenti alle diverse unità affioranti in corrispondenza di tutti i rilievi collinari presenti nell'area del tracciato. Si tratta perlopiù di limi sabbiosi e sabbie limose che coinvolgono in particolare le fondazioni del viadotto Casone, Ribucciano e Riluogo. Tali terreni affiorano tra la p.k. 1+450 e p.k. 1+550 circa in uscita dalla galleria San Lazzerò, quindi in prossimità della spalla sud del Viadotto Casone con spessori di qualche metro tra la p.k. 2+750 e la p.k. 2+875 circa per poi coinvolgere, successivamente, la pila 2, 3 e 4 del Viadotto Ribucciano tra la p.k. 3+300 e p.k. 3+425 circa e la pila 1 e 2 del Viadotto Riluogo tra la p.k. 4+200 e p.k. 4+300. I depositi eluvio-colluviali vengono infine rinvenuti a fine tracciato, subito dopo lo svincolo di Ruffolo e in corrispondenza della ferrovia Siena-Buonconvento Monte Antico, con spessori di un paio di metri tra la p.k. 4+915 e la p.k. 5+500 circa.

### **Unità "bs": Depositi alluvionali – Sabbie limose argillose**

I *depositi alluvionali – sabbie limose argillose* ("bs") hanno spessore da alcuni metri fino a  $8-9$  m circa. Si tratta, in particolare, di sabbie con limo argillose debolmente ghiaiose che coinvolgono la piana alluvionale di Cerchiaia e le fondazioni profonde della spalla sud (p.k. 0+860) e delle pile 1, 2, 3 e 4. Durante la perforazione dei sondaggi sono stati rinvenuti perlopiù sabbie con limo, talvolta argillosi e ghiaiosi, poco plastici o non plastici ( $I_p = 0 \div 5\%$ ) e con un contenuto di fine variabile tra  $10$  e  $50\%$  circa. Secondo la classificazione USCS dei campioni disponibili tali depositi sono classificabili perlopiù come SM e GW-GC.

### **Unità "bl": Depositi alluvionali – Limi sabbiosi argillosi**

I depositi alluvionali – limi sabbiosi argillosi ("bl") hanno spessori da pochi metri a 5-6 m circa: si tratta, in particolare, di limi sabbiosi argillosi. Tali depositi coinvolgono buona parte delle fondazioni dei principali viadotti centrali al tracciato. Il viadotto Valli, ad esempio, si imposta totalmente, con i suoi plinti di fondazione, nei depositi di questa tipologia, così come le fondazioni di Spalla 1 e Pila 1, 2, 3 e 4 del viadotto Casone nonché, per ciò che concerne le sue due pile, le fondazioni del viadotto Luglie. Durante la perforazione dei sondaggi sono stati rinvenuti limi sabbioso-argillosi, con una percentuale di materiale fine mediamente intorno al 70-80%, da poco a mediamente plastici (Ip circa 15%), classificati come CL secondo la classificazione USCS.

### **Unità "bg": Depositi alluvionali - Ghiaie con sabbie limose**

Si tratta di materiale nel complesso non coesivo, costituito da ghiaie con sabbie limose. Questa tipologia di depositi coinvolge tutta la piana alluvionale di Ruffolo in corrispondenza del viadotto Riluogo, le cui fondazioni ricadono parzialmente in tale unità. Il viadotto Riluogo, infatti, attesterà parte delle sue pile di fondazione nonché la Spalla 2 nei terreni di natura alluvionale a granulometria prevalentemente ghiaiosa presenti in spessori complessivamente variabili tra 2 e 8 m circa a seconda delle zone. Durante la perforazione dei sondaggi sono stati rinvenuti perlopiù ghiaie con sabbie limose, talvolta argillose o debolmente argillose, non plastiche e con un contenuto di fine tendenzialmente inferiore al 20% circa. Secondo la classificazione USCS dei campioni disponibili tali depositi sono classificabili perlopiù come GM, GW-GM e SW-SM.

### **Unità "r": Depositi antropici**

I depositi antropici ("r") sono perlopiù costituiti dai materiali che sono stati utilizzati per la realizzazione dei rilevati stradali e/o ferroviari, terrapieni o discariche presenti nell'area del tracciato. Risultano maggiormente diffusi i rilevati della carreggiata esistente della E78, soprattutto in corrispondenza dei rami di svincolo della zona di Cerchiaia e della zona di Ruffolo, dei tratti di approccio ai viadotti esistenti lungo il tracciato e della zona di ritombamento della Galleria San Lazzerò.

La distribuzione nel sottosuolo, lungo il tracciato dell'infrastruttura, delle unità geotecniche sopra descritte, è mostrata nei seguenti elaborati di progetto:

- T00\_GE03\_GET\_FG01\_B - "Profilo geotecnico asse principale – Carreggiata Est - Tav. 1/3"
- T00\_GE03\_GET\_FG02\_B - "Profilo geotecnico asse principale – Carreggiata Est - Tav. 2/3"
- T00\_GE03\_GEO\_FG03\_B - "Profilo geotecnico asse principale – Carreggiata Est - Tav. 3/3"
- T00\_GE03\_GEO\_FG04\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Tressa – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG05\_B - "Profilo geotecnico Rami Svincolo Cerchiaia"
- T00\_GE03\_GEO\_FG06\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Luglie – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG07\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Valli – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG08\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Casone – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG09\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Ribucciano – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG10\_B - "Profilo geotecnico Viadotto Riluogo – Carreggiata Est"
- T00\_GE03\_GEO\_FG11\_B - "Profilo geotecnico Rami Svincolo Ruffolo"

## 8.2 Proprietà fisiche delle unità geotecniche: risultati delle prove di identificazione

Per la definizione delle proprietà fisiche sono stati considerati i risultati delle prove di identificazione eseguite in laboratorio sui campioni dei sondaggi e dei pozzetti esplorativi, disponibili per le diverse campagne di indagine. Di seguito si riportano, per ogni campione sottoposto a prova, le tabelle riepilogative per ogni unità geotecnica coinvolta nella realizzazione di opere nel tracciato (cfr. **Tabella 12** per le unità "FAA", **Tabella 13** per l'unità "FAAa", **Tabella 14** per le unità "bs", "bl" e "bg"), contenenti i risultati delle seguenti prove di identificazione geotecnica:

- determinazione del peso di volume naturale;
- determinazione del peso specifico dei grani;
- determinazione del contenuto naturale d'acqua;
- determinazione dei limiti di Atterberg (limite liquido, limite plastico, indice di plasticità);
- analisi granulometrica (% AGI delle diverse classi granulometriche);
- contenuto di materiale fine (< 0.075 mm);
- classificazione delle terre CNR-UNI 10006;
- classificazione AGI e classificazione USCS.

Va specificato che, come già anticipato al punto **8.1**, da un punto di vista geologico, l'unità delle *argille azzurre* risulta costituita principalmente da una litofacies argilloso-limosa e una litofacies limoso-sabbiosa; tali litofacies risultano gradualmente passanti tra di loro sia verticalmente che orizzontalmente, tanto che non è possibile individuare una netta separazione tra le due lungo il tracciato, seppur risulta tuttavia possibile osservare che la litofacies argilloso-limosa risulta prevalente in corrispondenza di tutto lo sviluppo della Galleria San Lazzerò e in corrispondenza dell'imbocco ovest della Galleria Bucciano, mentre tra l'imbocco est della Galleria Bucciano e la zona dello Svincolo Ruffolo prevale la litofacies limoso-sabbiosa, presumibilmente in ragione della vicinanza del contatto con la soprastante formazione delle *Sabbie di San Vivaldo*.

Pertanto, da un punto di vista geotecnico, l'unità delle *argille azzurre* è stata considerata in maniera univoca come unità "FAA".

S.G.C. E78 "Grosseto-Fano" - Tratto Siena Bettolle (A1) - Adeguamento a 4 corsie del tratto Siena-Ruffolo - Lotto 0  
Progetto Definitivo

Profondità media campione	Unità geotecnica	Sondaggio	Campione Indisturbato	Profondità	Peso specifico dei grani	Peso di volume naturale	Peso di volume secco	Contenuto naturale d'acqua	Limiti di Atterberg			Composizione granulometrica					Classificazione CNR-UNI	Classificazione AGI	Classificazione USCS	
									W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	W <sub>U</sub>	<0.25	0.25-0.425	0.425-0.75	0.75-2	2-20				>20
10.50	FAA	S1	C2	10.20	10.80		20.52	17.33	18.59	28	24	4						L(S,A)		
16.75	FAA	S1	C3	16.50	17.00		21.77	18.59	17.17	29	25	4						L(S,A)		
12.33	FAA	S1D_PZ	CR03	12.00	12.65					33	22	11	0	25	60	16	78	A 6	L(S,A)	CL
14.75	FAA	S1D_PZ	CI03	14.50	15.00		19.76	16.94	16.65	34	23	10	0	15	56	29	90	A 6	L(A,S)	CL
19.63	FAA	S1D_PZ	CR04	19.30	19.95					34	23	12	0	14	63	23	88	A 6	L(A,S)	CL
23.13	FAA	S1D_PZ	CR05	22.80	23.45					36	23	13	0	28	59	13	75	A 6	L(S,A)	CL
16.25	FAA	S2	C3	16.00	16.50		21.47	18.26	17.59										L(S)	
19.75	FAA	S2	C4	19.50	20.00		20.8	17.73	17.59	28	24	4							L(S)	
9.33	FAA	S2D_DH	CR02	9.00	9.65					37	24	13	1	9	51	39	92	A 6	L(A,S)	CL
11.25	FAA	S2D_DH	CI02	11.00	11.50	25.2	20.37	17.54	16.13	33	19	13	1	23	55	22	77	A 6	L(S,A)	CL
13.33	FAA	S2D_DH	CR03	13.00	13.65					32	23	9	0	13	52	35	90	A 4	L(A,S)	CL
23.25	FAA	S2D_DH	CI03	23.00	23.50		20.15	17.13	17.63	28	19	8	1	24	44	32	79	A 4	L(A,S)	CL
28.33	FAA	S2D_DH	CR04	28.00	28.65					23	19	4	0	43	29	29	61	A 4	S,A,L	ML
2.95	FAA	S3	C1	2.70	3.20		20.38	17.34	17.54	37	26	11						A 6	L(A)	
7.25	FAA	S3	C2	7.00	7.50		20.77	17.97	15.53	34	22	12							L(A)	
12.75	FAA	S3	C3	12.50	13.00		19.96	17.06	16.75										L(A)	
3.25	FAA	S4	C1	3.00	3.50		21.10	17.98	17.34	33	22	10						A 4	L(A)	
9.25	FAA	S4	C2	9.00	9.50		19.70	16.86	16.86	36	24	12						A 6	L(A)	
15.25	FAA	S4	C3	15.00	15.50		20.6	17.34	17.05										L(A)	
16.25	FAA	S5	C3	16.00	16.50		21.12	18.07	16.64										L(A)	
20.75	FAA	S5	C4	20.50	21.00		19.77	16.12	22.61										L(A)	
28.75	FAA	S5	C5	28.50	29.00		21.42	18.64	14.90	38	22	16						A 6	A(L)	
9.75	FAA	S6	C2	9.50	10.00		20.98	17.68	17.78	37	22	15						A 6	A(L)	
17.75	FAA	S6	C3	17.50	18.00		19.74	16.86	17.56										A(L)	
25.75	FAA	S6	C4	25.50	26.00		21.03	18.07	17.21										A(L)	
3.15	FAA	S7	C1	3.00	3.30		21.27	18.25	16.52	42	23	19						A 6	A(L)	
9.75	FAA	S7	C2	9.50	10.00		21.52	18.50	16.27										A(L)	
9.75	FAA	S8	C3	9.50	10.00		20.56	17.52	17.40	23	22	1						A 4	L(A,S)	
9.75	FAA	S3D_PZ	CI01	9.50	10.00	25.80	19.10	16.00	18.81	N.D.	N.D.	N.P.	0	58	33	9	48	A 4	S,L[A]	SM
13.63	FAA	S3D_PZ	CR02	13.30	13.95				15.89	N.D.	N.D.	N.P.	2	59	32	8	43	A 4	S,L[A]	SM
17.13	FAA	S3D_PZ	CR03	16.80	17.45				19.31	N.D.	N.D.	N.P.	1	69	24	8	34	A 2-4	S(L)[A]	SM
23.25	FAA	S3D_PZ	CI02	23.00	23.50	26.30	19.22	15.34	25.28	N.D.	N.D.	N.P.	1	68	21	10	32	A 2-4	S(L)[A]	SM
17.53	FAA	S4D_PZ	CR02	17.20	17.85				26.47	26	19	7	2	34	45	19	68	A 4	L(S,A)	CL-ML
24.75	FAA	S4D_PZ	CI03	24.50	25.00	26.90	19.07	15.19	25.54	35	22	13	0	25	46	29	80	A 6	L(A,S)	CL
11.73	FAA	S5D_DH	CR02	11.40	12.05				14.77	34	26	8	0	17	58	26	86	A 4	L(A,S)	ML
14.75	FAA	S5D_DH	CI02	14.50	15.00	25.60	20.10	16.97	18.48	33	22	11	0	22	60	19	81	A 6	L(S,A)	CL
18.83	FAA	S5D_DH	CR03	18.50	19.15				6.21	29	21	7	0	30	54	16	73	A 4	L(S,A)	CL
22.25	FAA	S5D_DH	CI03	22.00	22.50	25.70	19.70	16.40	20.13	35	19	16	1	4	55	40	95	A 6	L(A)	CL
26.33	FAA	S5D_DH	CR04	26.00	26.65				15.09	N.D.	N.D.	N.P.	1	58	32	9	44	A 4	S,L[A]	SM
29.75	FAA	S5D_DH	CI04	29.50	30.00	26.10	20.23	16.95	18.45	23	19	4	3	37	47	13	63	A 4	L(S,A)	ML
33.33	FAA	S5D_DH	CR05	33.00	33.65				2.93	29	20	9	0	24	56	20	79	A 4	L(S,A)	CL
9.63	FAA	S6D_PZ	CR02	9.30	9.95				6.31	43	27	16	0	13	45	42	89	A 7-6	L(A,S)	ML
12.55	FAA	S6D_PZ	CI02	12.30	12.80	25.30	19.34	15.73	22.93	38	22	16	0	12	51	38	80	A 6	L(A,S)	CL
10.25	FAA	S10	C3	10.00	10.50		20.96	18.28	14.66										L(S)	
15.15	FAA	S10	C4	15.00	15.30		20.23	17.41	17.80										S(L)	
6.13	FAA	S7D	CR01	5.80	6.45				18.81	37	26	10	0	15	61	24	87	A 6	L(A,S)	ML
12.25	FAA	S7D	CI01	12.00	12.50	26.10	20.40	17.56	16.16	31	21	10	0	21	59	21	81	A 4	L(S,A)	CL
18.33	FAA	S7D	CR02	18.00	18.65				20.63	N.D.	N.D.	N.P.	2	61	30	8	43	A 4	S,L[A]	SM
22.30	FAA	S7D	CI02	22.00	22.60	26.70	19.50	15.68	24.36	30	22	7	0	37	47	16	68	A 4	L(S,A)	CL
4.68	FAA	S8D	CR01	4.35	5.00					37	23	14	0	27	51	23	75	A 6	L(S,A)	CL
9.25	FAA	S8D	CI01	9.00	9.50	25.90	18.48	15.48	19.36	29	22	6	0	37	46	18	67	A 4	L(S,A)	ML
14.68	FAA	S8D	CR02	14.35	15.00					36	22	13	0	15	55	30	88	A 6	L(A,S)	CL
18.65	FAA	S8D	CI02	18.40	18.90	27.00	20.70	17.78	16.45	33	20	13	0	9	54	37	92	A 6	L(A,S)	CL
10.75	FAA	S11	C3	10.50	11.00		20.49	17.35	17.29										L(A)	
10.73	FAA	S9D	CR01	10.40	11.05					45	30	15	0	15	45	40	87	A 7-6	L(A,S)	ML
14.45	FAA	S9D	CI02	14.20	14.70	25.90	20.66	17.85	15.73	37	23	14	0	14	50	36	85	A 6	L(A,S)	CL
19.33	FAA	S9D	CR02	19.30	19.35					36	33	3	0	17	55	28	86	A 4	L(A,S)	ML
7.63	FAA	S10D_PZ	CR01	7.30	7.95					49	27	21	0	8	50	42	93	A 7-6	L(A,S)	CL
10.30	FAA	S10D_PZ	CI02	10.00	10.60	26.30	20.03	16.89	18.56	42	24	18	0	4	53	43	96	A 7-6	L(A)	CL
16.25	FAA	S10D_PZ	CI03	16.00	16.50		20.76	17.82	16.49	41	26	15	0	14	45	41	87	A 7-6	L(A,S)	CL
19.70	FAA	S10D_PZ	CR02	19.40	20.00					46	30	16	0	15	52	33	87	A 7-6	L(A,S)	ML
22.25	FAA	S10D_PZ	CI04	22.00	22.50		20.20	17.62	14.65	47	27	20	0	12	52	36	89	A 7-6	L(A,S)	CL
8.20	FAA	S12	C2	8.00	8.40		21.54	18.16	18.63										A(L)	
12.20	FAA	S12	C3	12.00	12.40		21.26	18.28	16.32										A(L)	
16.25	FAA	S12	C4	16.00	16.50		21.15	18.04	17.15										L(A,S)	
6.25	FAA	S13	C2	6.00	6.50		20.04	16.34	21.55	43	22	21							A(L)	
13.70	FAA	S13	C3	13.50	13.90		21.44	18.54	15.59										L(S)	
16.15	FAA	S13	C4	16.00	16.30		21.60	18.81	14.88										L(S)	
25.25	FAA	S13	C5	25.00	25.50		20.27	17.36	13.94										S(L)	
10.75	FAA	S14	C3	10.50	11.00		18.92	16.72	14.08										L(S)	
15.25	FAA	S14	C4	15.00	15.50		21.78	18.99	14.64										L(S)	
9.65	FAA	S15	C1	9.50	9.80		22.05	18.93	16.50										L(S)	
13.85	FAA	S15	C2	13.70	14.00		21.10	18.47	14.81										L(S)	
18.25	FAA	S15	C3	18.00	18.50		21.20	18.46	14.84	24	22	2							A(L)	

Profondità media campione	Unità geotecnica	Sondaggio	Campione indisturbato	Profondità		Peso specifico dei granuli	Peso di volume naturale	Peso di volume secco	Contenuto naturale d'acqua	Limiti di Atterberg			Composizione granulometrica				Classificazione CNR-UNI	Classificazione AGI	Classificazione USCS	
7.68	FAA	S11D_DH	CR02	7.35	8.00					25	19	6	8	53	26	14	43	A 4	S,L[G]	SM
10.25	FAA	S11D_DH	CI01	10.00	10.50	25.70	18.77	14.89	26.06	N.D.	N.D.	N.P.	1	31	59	9	71	A 4	L,S[A]	CH
12.33	FAA	S11D_DH	CR03	12.00	12.65					29	22	8	0	26	57	17	77	A 4	L,S[A]	CL
15.30	FAA	S11D_DH	CI02	15.00	15.60	25.90	20.77	17.90	16.05	43	24	19	0	17	48	35	85	A 7-6	L,A(S)	CL
19.78	FAA	S11D_DH	CR04	19.55	20.00					N.D.	N.D.	N.P.	48	27	16	9	26	A2-4	G,S[S]	-
24.00	FAA	S11D_DH	CI03	22.00	26.00		19.78	16.72	18.35	45	28	17	0	5	43	52	94	A 7-6	A,L[S]	ML
10.28	FAA	S12D_PZ	CI01	10.00	10.55	25.30	19.93	16.88	18.06	30	21	10	0	23	56	21	80	A 4	L(S,A)	CL
12.68	FAA	S12D_PZ	CR03	12.35	13.00					28	20	8	1	30	51	18	73	A 4	L,S[A]	CL
15.30	FAA	S12D_PZ	CI02	15.00	15.60	25.30	20.03	17.00	17.84	34	22	13	0	12	54	34	89	A 6	L,A(S)	CL
19.13	FAA	S12D_PZ	CR04	18.80	19.45					39	24	14	1	7	51	41	93	A 6	L,A(S)	CL
21.35	FAA	S12D_PZ	CI03	21.00	21.70		19.98	16.96	15.38	24	18	6	2	37	45	16	64	A 4	L,S[A]	CL-ML
10.10	FAA	S16	C2	10.00	10.20		19.70	17.12	15.11										L[S]	
11.65	FAA	S16	C3	11.50	11.80		20.78	17.96	15.69										L[S]	
14.20	FAA	S16	C4	14.00	14.40		19.23	16.74	14.87	25	21	4							L[S]	
7.65	FAA	S17	C2	7.40	7.90		20.21	17.46	15.75										L[S]	
11.45	FAA	S17	C3	11.20	11.70		19.32	16.89	14.95	29	22	7							L[S]	
16.25	FAA	S17	C4	16.00	16.50		22.04	19.45	13.31										L[S]	
7.75	FAA	S13D	CI01	7.50	8.00	25.90	19.46	16.49	18.05	33	22	11	1	30	42	28	73	A 6	L,S,A	CL
9.13	FAA	S13D	CR02	8.80	9.45					32	20	11	0	24	54	22	78	A 6	L(S,A)	CL
14.25	FAA	S13D	CI02	14.00	14.50		19.77	16.89	17.05	27	20	7	1	24	59	17	79	A 4	L(S,A)	CL-ML
21.25	FAA	S13D	CI03	21.00	21.50		21.02	18.30	14.87	39	19	20	0	29	40	31	74	A 6	L,A,S	CL
7.75	FAA	S18	C2	7.50	8.00		18.67	15.91	17.36	27	23	4							L(A)	
13.25	FAA	S18	C3	13.00	13.50		21.72	18.72	16.02										L(A)	
9.25	FAA	S14D_DH	CI01	9.00	9.50		18.39	15.61	17.82	34	22	13	0	38	54	8	67	A 6	L,S[A]	CL
9.83	FAA	S14D_DH	CR02	9.50	10.15					N.D.	N.D.	N.P.	0	36	56	8	67	A 4	L,S[A]	CH
14.25	FAA	S14D_DH	CI02	14.00	14.50	26.50	18.92	14.93	26.78	33	26	6	0	23	57	20	80	A 4	L(S,A)	ML
23.30	FAA	S14D_DH	CI03	23.00	23.60		20.24	18.12	15.05	40	19	21	0	15	52	33	87	A 6	L,A(S)	CL

Tabella 12 - Prove di identificazione geotecnica sui campioni dell'unità "FAA" - Risultati

Profondità media campione	Unità geotecnica	Sondaggio	Campione indisturbato	Profondità		Peso specifico dei granuli	Peso di volume naturale	Peso di volume secco	Contenuto naturale d'acqua	Limiti di Atterberg			Composizione granulometrica				Classificazione CNR-UNI	Classificazione AGI	Classificazione USCS	
6.25	FAAa	S1	C1	6.00	6.50		20.07	16.29	23.58										A(L)	
9.75	FAAa	S1D_PZ	CI02	9.50	10.00	25.4	20.25	17.39	16.45	35	22	13	0	17	60	23	84	A 6	L(A,S)	CL
9.45	FAAa	S2	C2	9.20	9.70		19.82	15.96	24.18										LS(L)	
3.33	FAAa	S2D_DH	CR01	3.00	3.65					47	25	22	0	16	48	36	84	A 7-6	L,A(S)	CL
6.30	FAAa	S2D_DH	CI01	6.00	6.60	25.3	19.49	16.59	17.47	36	24	13	0	16	54	30	85	A 6	L,A(S)	CL
4.23	FAAa	S5	C1	4.00	4.45		20.90	17.57	18.66										L(A)	
11.20	FAAa	S5	C2	11.00	11.40		19.62	15.69	23.18	36	22	14						A 6	L(A)	
2.75	FAAa	S6	C1	2.50	3.00		20.48	17.55	16.69	41	27	14						A 7-6	L(A)	
5.25	FAAa	S8	C2	5.00	5.50		20.78	17.65	17.70										L(A,S)	
4.33	FAAa	S3D_PZ	CR01	4.00	4.65				25.15	39	22	17	2	17	48	33	83	A 6	L,A(S)	CL
4.25	FAAa	S9	C2	4.00	4.50		19.52	15.46	25.31	29	21	8							A(L)	
9.25	FAAa	S9	C3	9.00	9.50		19.34	15.21	27.15										L(S,A)	
14.75	FAAa	S9	C4	14.50	15.00		18.94	14.41	31.93										L(S,A)	
5.55	FAAa	S4D_PZ	CI01	5.30	5.80	27.00	19.76	16.54	19.50	48	26	22	2	19	48	31	80	A 7-6	L,A(S)	CL
10.68	FAAa	S4D_PZ	CR01	10.35	11.00					30	20	18	0	13	63	24	90	A 6	L(A,S)	CL
14.75	FAAa	S4D_PZ	CI02	14.50	15.00	26.20	18.94	15.31	23.67	29	23	6	0	28	56	16	76	A 4	L,S[A]	ML
8.25	FAAa	S5D_DH	CI01	8.00	8.50	25.80	20.49	17.58	16.61	32	19	13	0	24	55	21	79	A 6	L(S,A)	CL
6.95	FAAa	S6D_PZ	CI01	6.70	7.20	25.10	19.01	15.45	22.97	50	20	30	2	13	33	52	86	A 7-6	A,L(S)	CH
4.65	FAAa	S11	C2	4.50	4.80		19.42	16.19	18.36	37	22	15						A 6	L(A)	
5.25	FAAa	S9D	CI01	5.00	5.50	26.60	19.20	15.84	21.17	44	23	21	0	7	48	45	95	A 7-6	L,A(S)	CL
3.25	FAAa	S10D_PZ	CI01	3.00	3.50	26.90	17.29	14.42	19.90	46	29	18	0	17	46	37	84	A 7-6	L,A(S)	ML
3.25	FAAa	S12	C1	3.00	3.50		19.89	16.44	21.38	49	26	23						A 7-6	A(L)	
2.75	FAAa	S13	C1	2.50	3.00		19.31	15.68	21.44									A 7-6	L(S,A)	
2.85	FAAa	S14	C1	2.70	3.00		20.21	17.98	12.35	36	22	14						A 6	L(A)	
4.75	FAAa	S14	C2	4.50	5.00		19.11	16.74	14.18	35	21	14						A 6	L(A)	

Tabella 13 - Prove di identificazione geotecnica sui campioni dell'unità "FAAa" - Risultati

Profondità media campione [m]	Unità geotecnica	Sondaggio	Campione Indisturbato	Profondità [m]	Peso specifico dei grani $\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso di volume naturale $\gamma_N$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso di volume secco $\gamma_0$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Contenuto naturale d'acqua $W_N$ [%]	Limiti di Atterberg				Composizione granulometrica					Classificazione CNR-UNI [-]	Classificazione AGI [-]	Classificazione USCS [-]
									$W_L$ [%]	$W_p$ [%]	IP [%]	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Limo [%]	Argilla [%]	< 0.075 mm [%]				
2.83	bs	S1D_PZ	CR1	2.50	3.15			24	21	3	12	50	25	14	40	A 4	S(L,A,G)	SM		
4.90	bs	S1D_PZ	CR1	4.70	5.10	25.1	18.51	21.82	27	20	7	7	47	29	17	48	A 4	S,L(A)[G]	SM	
7.23	bs	S1D_PZ	CR2	6.90	7.55			N.D.	N.D.	N.P.	71	20	5	4	10	A1-a	G(S)[L]	GW-GC		
1.95	bs	S2	C1	1.70	2.20		21.29	19.00	12.00								A(L)			
1.65	bl	S8	C1	1.50	1.80		20.14	16.81	19.81									L(A)		
1.75	bl	S9	C1	1.50	2.00		19.72	16.43	20.98									L(A)		
3.70	bl	S5D_DH	CR01	3.40	4.00			10.67	35	21	14	1	21	56	23	79	A 6	L(A,S)	CL	
3.63	bl	S6D_PZ	CR01	3.30	3.95			23.62	37	22	15	3	21	50	26	78	A 6	L(A,S)	CL	
3.20	bl	S10	C1	3.00	3.40		20.86	17.61	18.38									A(L)		
4.25	bl	S10	C2	4.00	4.50		19.41	16.09	20.77									A(L)		
2.10	bl	S11	C1	1.70	2.50		20.11	16.77	19.96									L(A)		
4.33	bg	S11D_DH	CR01	4.00	4.65				N.D.	N.D.	N.P.	65	32	2	2	5	A1-a	G,S	GW-GM	
3.33	bg	S12D_PZ	CR01	3.00	3.65							78	16		7	7	A1-a	G(S)[L]		
7.53	bg	S12D_PZ	CR02	7.20	7.85				N.D.	N.D.	N.P.	59	25	7	9	17	A1-b	G,S(L)[A]	GM	
3.75	bg	S16	C1	3.50	4.00		19.93	16.60	14.62									G(L,S)		
1.75	bg	S17	C1	1.50	2.00		19.89	16.86	17.99									L(S)		
4.68	bg	S13D	CR01	4.35	5.00				N.D.	N.D.	N.P.	31	62	4	4	8	A1-b	S,G	SW-SM	
1.25	bg	S18	C1	1.00	1.50		21.60	19.11	13.04									L(S)		
3.13	bg	S14D_DH	CR01	2.80	3.45					30	21	9	2	39	38	22	63	A 4	S,L(A)	CL

Tabella 14 - Prove di identificazione geotecnica sui campioni dell'unità "bs", "bl" e "bg" – Risultati

Di seguito si riassumono le caratteristiche fisiche desunte dai risultati delle prove di identificazione (cfr. anche i relativi grafici mostrati in Capitolo 18) per le principali unità geotecniche.

### Unità "FAA" – Argille azzurre

Classificazione AGI = *argille limose, argille debolmente limose, limi con argilla, limi con argilla da debolmente sabbiosi a sabbiosi, limi sabbiosi argillosi, sabbie con limo da debolmente argillose ad argillose*

Classificazione USCS = CL, ML, CL-ML, (CH); lenti di SM  
 Classificazione CNR-UNI 10006 = A6, A7-6, A4 (A2-4)  
 Contenuto di materiale fine (< 0.075 mm) = 45 ÷ 95 %  
 Indice di plasticità  $I_P$  = 5 ÷ 20 %  
 Peso di volume naturale  $\gamma_N$  = 19 ÷ 21 kN/m<sup>3</sup>  
 Contenuto naturale d'acqua  $W_N$  = 15 ÷ 25 %  
 Peso specifico dei grani  $\gamma_s$  = 25 ÷ 27 kN/m<sup>3</sup>

### Unità "FAAa" – Argille azzurre alterate

Classificazione AGI = *limi sabbiosi argillosi, limi con argilla sabbiosi, argille con limi sabbiosi, limi con argilla debolmente sabbiosi, limi argillosi, argille limose*

Classificazione USCS = CL, ML (CH)  
 Classificazione CNR-UNI 10006 = A7-6, A6, A4  
 Contenuto di materiale fine (< 0.075 mm) = 75 ÷ 95 %  
 Indice di plasticità  $I_P$  = 15 ÷ 25 %  
 Peso di volume naturale  $\gamma_N$  = 18 ÷ 21 kN/m<sup>3</sup>  
 Contenuto naturale d'acqua  $W_N$  = 17 ÷ 27 %  
 Peso specifico dei grani  $\gamma_s$  = 25 ÷ 27 kN/m<sup>3</sup>

### Unità "bs" – Sabbie limose argillose (alluvionali)

Classificazione AGI = *sabbie con limo argillose debolmente ghiaiose, sabbie limose argillose ghiaiose, ghiaie sabbiose debolmente limose, argille limose*

Classificazione USCS		=	SM, GW-GC
Classificazione CNR-UNI 10006		=	A4, A1-a
Contenuto di materiale fine (< 0.075 mm)		=	10 ÷ 50 %
Indice di plasticità	I <sub>P</sub>	=	3 ÷ 7 %
Peso di volume naturale	γ <sub>N</sub>	=	18 ÷ 20 kN/m <sup>3</sup>
Contenuto naturale d'acqua	w <sub>N</sub>	=	12 ÷ 21 %

### Unità "bl" – Limi sabbiosi argillosi (alluvionali)

Classificazione AGI = *limi sabbiosi argillosi, limi argillosi, argille limose, argille debolmente limose*

Classificazione USCS		=	CL
Classificazione CNR-UNI 10006		=	A6
Contenuto di materiale fine (< 0.075 mm)		=	80 %
Indice di plasticità	I <sub>P</sub>	=	15 %
Peso di volume naturale	γ <sub>N</sub>	=	19 ÷ 20 kN/m <sup>3</sup>
Contenuto naturale d'acqua	w <sub>N</sub>	=	10 ÷ 21 %

### Unità "bg" – Ghiaie con sabbie limose (alluvionali)

Classificazione AGI = *ghiaie con sabbie limose, ghiaie sabbiose limose debolmente argillose, ghiaie con sabbie, sabbie con ghiaie, limi sabbiosi, sabbie con limi argillosi*

Classificazione USCS		=	GM, GW-GM, SW-SM
Classificazione CNR-UNI 10006		=	A1-a, A1-b; A4
Contenuto di materiale fine (< 0.075 mm)		=	5 ÷ 60 %
Indice di plasticità	I <sub>P</sub>	=	0 ÷ 9 %
Peso di volume naturale	γ <sub>N</sub>	=	17 ÷ 19 kN/m <sup>3</sup>
Contenuto naturale d'acqua	w <sub>N</sub>	=	13 ÷ 17 %

## 8.3 Proprietà meccaniche delle unità geotecniche dai risultati di prove penetrometriche standard SPT e di prove CPT-DPSH

Come anticipato al punto 3.3.2, durante la campagna integrativa 2019 all'interno dei fori di sondaggio sono state eseguite delle prove penetrometriche dinamiche SPT, a profondità variabili. In particolare, sono state eseguite n° 46 prove che sono andate ad aggiungersi alle prove della campagna 2009 (n° 80 prove SPT).

Di seguito si riassumono le proprietà meccaniche delle unità geotecniche principali desunte dai risultati delle prove SPT (cfr. anche i relativi grafici mostrati in **Appendice 1**).

### Unità "FAA" – Argille azzurre

Resistenza alla penetrazione dinamica	N <sub>SPT</sub>	=	20 ÷ 100	colpi/30cm
Coesione non drenata	c <sub>u</sub>	=	200	kPa
Modulo edometrico	M <sub>ds</sub>	=	20	MPa

### Unità "FAAa" – Argille azzurre alterate

Resistenza alla penetrazione dinamica	$N_{SPT}$	= 9 ÷ 57	colpi/30cm
Coazione non drenata	$c_u$	= 75	kPa
Modulo edometrico	$M_{ds}$	= 10	MPa

### Unità "bs" – Sabbie limose argillose (alluvionali)

Resistenza alla penetrazione dinamica	$N_{SPT}$	= 19 ÷ 62	colpi/30cm
Densità relativa	$D_R$	= 65 ÷ 100	%
Angolo di attrito efficace	$\varphi'$	= 32	°
Modulo di elasticità a grandi deformazioni	$E'_{25}$	= 15	MPa

### Unità "bl" – Limi sabbiosi argillosi (alluvionali)

Resistenza alla penetrazione dinamica	$N_{SPT}$	= 8 ÷ 22	colpi/30cm
Coazione non drenata	$c_u$	= 75	kPa
Modulo edometrico	$M_{ds}$	= 10	MPa

### Unità "bg" – Ghiaie con sabbie limose (alluvionali)

Resistenza alla penetrazione dinamica	$N_{SPT}$	= 6 ÷ 46	colpi/30cm
Densità relativa	$D_R$	= 40 ÷ 95	%
Angolo di attrito efficace	$\varphi'$	= 35	°
Modulo di elasticità a grandi deformazioni	$E'_{25}$	= 10	MPa

Durante la campagna di indagine 2009, a completamento dei sondaggi a carotaggio continuo e delle prospezioni sismiche, sono state eseguite n°17 prove penetrometriche statiche CPT, di profondità variabile fino ad un massimo di 15 m da p.c. circa. In alcune verticali, la modalità statica si è interrotta a profondità limitata e pertanto la prova è stata convertita in dinamica (prove tipo "superpesante", DPSH) e proseguita fino alle profondità richieste o rifiuto.

La sintesi dei risultati originali di tali prove sono riportati nell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_RE01\_A** – "Documentazione indagini geognostiche preesistenti – Indagini in sito", mentre l'ubicazione e l'interpretazione dei risultati di resistenza sono disponibili rispettivamente negli elaborati **T00\_GE01\_GEO\_PU01÷03\_B** - "Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche" (3 tavv.) e **T00\_GE03\_GET\_FG01÷03\_B** - "Profilo geotecnico asse principale – Carreggiata Est" (3 tavv.).

Dall'interpretazione dei risultati e, in particolare, dei valori di resistenza punta  $q_c$  (MPa) delle prove statiche di tipo CPT e del numero di colpi  $N_{20}$  (n°colpi/20 cm) delle prove DPSH, in relazione ai terreni attraversati, è stato possibile definire quanto segue.

L'unità delle *argille azzurre* (FAA) riporta valori di resistenza alla punta  $q_c$  caratteristici pari a circa 10 MPa con valori massimi di non più di 40 MPa. Quando la prova è passata da statica a dinamica (DPSH) il numero di colpi ogni 20 cm ( $N_{20}$ ) misurati in questa unità sono risultati compresi tra 14 e 70, con valori mediamente di circa 25.

La fascia di alterazione superficiale delle argille azzurre, denominata *argille azzurre alterate* (FAAa), riporta valori caratteristici di 5 MPa come resistenza alla punta da prova statica CPT, con valori massimi non superiori a 20 MPa e valori di  $N_{20}$  mediamente di 12 dove la prova è stata convertita in dinamica.

Analogamente, le unità dei *depositi alluvionali limosi (bl)* e dei *depositi eluvio-colluviali (b2)* di alterazione delle argille, riportano valori medi di 5 MPa per ciò che concerne la resistenza alla punta (prove CPT), con intervalli globalmente compresi tra 1 e 10 MPa.

Le prove CPT e DPSH hanno interessato anche le unità alluvionali ghiaiose (*depositi alluvionali ghiaiosi, bg*) in corrispondenza del viadotto Riluogo in località Ruffolo. I risultati registrati dalla punta del penetrometro CPT nei terreni attraversati risultano pari a circa 3 MPa mediamente, con valori massimi prossimi al 20 MPa (specie per la discreta componente fine presente) e numero di colpi  $N_{20}$  compresi tra 7 e 27 dove la prova è continuata come dinamica (DPSH).

#### 8.4 Permeabilità delle unità geotecniche

In n° 14 verticali di sondaggio sono state eseguite prove di permeabilità tipo Lefranc. Tale prova, che consente di determinare il valore del *coefficiente di permeabilità K* del terreno, è stata eseguita a carico idraulico variabile, poiché in terreni limoso-argillosi prevalenti. I risultati delle prove eseguite sono mostrati nella sottostante e hanno consentito di confrontare i valori del *coefficiente di permeabilità K* delle principali unità geotecniche rinvenute.

Questi risultati, unitamente alle analisi bibliografiche e dei dati di pozzo disponibili (cfr. **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** - "Relazione geologica") consentono di definire, oltre che per le unità geotecniche **FAA**, **FAAa** e **bl**, **bs**, per le quali sono state effettuate le prove, un range di permeabilità anche delle restanti unità geotecniche coinvolte nell'area di studio.

Come rappresentato nell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_CI01+03\_B** - "Carta idrogeologica" – Scala 1.2000 (4 tavv.) il grado di permeabilità dei terreni è strettamente legato alla granulometria delle unità riconosciute. Trattandosi principalmente di depositi superficiali olocenici e di depositi pliocenici non cementati, la permeabilità è una permeabilità primaria per porosità, che risulta generalmente variabile da media a molto bassa a seconda della granulometria prevalente dei depositi. Per quanto riguarda in particolare l'unità della *argille azzurre* plioceniche, la bassa permeabilità di tali depositi, misurata attraverso prove di permeabilità Lefranc a carico variabile, è risultata generalmente variabile nell'ambito di un range piuttosto esteso: da bassa a molto bassa per la litofacies argilloso-limosa (variabile tra  $1E-7$  e  $1E-9$  m/s) e generalmente medio-bassa per la litofacies limoso-sabbiosa (variabile tra  $1E-5$  e  $1E-7$  m/s). Inoltre, come è stato possibile osservare nelle stratigrafie dei pozzi per acqua ubicati in ambito collinare (cfr. *Allegato 2* dell'elaborato **T00\_GE01\_GEO\_RE08\_A** - "Relazione geologica"), per quanto la loro descrizione non sia del tutto precisa, nel complesso delle *argille azzurre* plioceniche sono presenti livelli di sabbie acquifere di spessore variabile generalmente tra 2÷3 m e 10 m circa, con una soggiacenza del livello piezometrico variabile tra 20 e 60 m circa (solo in un caso è pari a 3 m, ma in un ambito di transizione tra il piede della collina e la piana alluvionale) e una portata dei pozzi generalmente modesta, variabile tra un minimo di 0.01 l/s e un massimo di 2 l/s.

In generale, si deve considerare che la permeabilità dei depositi a componente più sabbiosa nel complesso risulta comunque sempre mediamente bassa, specie per l'elevato contenuto di materiale fine limoso-argilloso evidente dall'osservazione delle carote di sondaggio e dalle analisi granulometriche di laboratorio, con valori minimi stimati del tutto paragonabili a quelli dei terreni argillosi pliocenici, ma la cui componente sabbiosa in ogni caso li rende non del tutto impermeabili.

	Unità	Sondaggio	Litologia	Prof. Prova	K
		[-]	[-]	[m]	[m/s]
Svincolo Cerchiaia e Viadotto Tressa	bs	S01D-PZ	sabbia a grana fine limosa	5,10	7,7E-06
	FAA	S01D-PZ	limo con sabbia e argilla	10,00	1,8E-07
	FAAa	S02D-DH	sabbia a grana fine limosa	5,00	3,0E-05
	FAA	S02D-DH	limo argilloso sabbioso	10,00	5,8E-06
Galleria S. Lazero	FAA	S3	argilla limosa	4,70	6,2E-09
	FAA	S4	argilla limosa	6,20	7,3E-09
	FAA	S5	argilla limosa	11,20	5,7E-09
	FAA	S6	limo argilloso	3,70	6,1E-10
Galleria Bucciano	FAAa	S10D-PZ	limo argilloso sabbioso	2,00	5,8E-08
	FAA	S10D-PZ	argilla limosa	17,00	4,0E-08
	FAA	S12	argilla debolmente limosa	5,20	1,2E-09
	FAA	S13	argilla sabbiosa	6,70	9,8E-09
	FAA	S14	argilla sabbiosa	8,20	6,7E-09
Svincolo Ruffolo e Viadotto Riluogo	bg	S11D-DH	ghiaia sabbiosa debolmente argillosa	5,00	1,8E-05
	FAA	S11D-DH	limo sabbioso argilloso	11,00	1,7E-06
	bg	S12D-PZ	ghiaia sabbiosa limosa	5,00	2,3E-05
	FAA	S12D-PZ	limo con sabbia e argilla	11,60	1,3E-06
	bg	S13D	sabbia con ghiaia limosa argillosa	4,50	2,3E-05
	FAA	S13D	limo argilloso sabbioso	11,00	3,4E-08
	FAA	S14D-DH	limo sabbioso argilloso	6,50	2,9E-06
	FAA	S14D-DH	argilla limosa	15,00	7,0E-08

**Tabella 15** - Risultati delle prove Lefranc in termini di coefficiente di permeabilità del terreno

Negli elaborati T00\_GE01\_GEO\_CI01÷03\_B – “Carta idrogeologica” – Scala 1:2000 (3 tavv.) allegati al progetto, sono stati rappresentati i range di permeabilità delle unità litostratigrafiche riconosciute (cfr. anche **Figura 1**).

In generale, il sottosuolo del tracciato in esame è caratterizzato nel complesso da terreni a permeabilità **da media a molto bassa**, con valori che variano mediamente tra  $10^{-4}$  m/s e  $10^{-9}$  m/s.

## 8.5 Proprietà meccaniche delle unità geotecniche dalla prove pressiometriche

Sono state eseguite n°11 prove pressiometriche in foro, al fine di ottenere risultati utili alla progettazione geotecnica delle opere di sostegno e di fondazione. In particolare, per ciascun sondaggio è stata realizzata una tasca di prova in cui è stato possibile, mediante una sonda cilindrica espandibile, costituita da una cella centrale di misurazione e due celle di guardia laterali (sonda tricellulare tipo Ménard), determinare in maniera diretta i parametri di deformabilità e resistenza dei terreni quali *modulo pressiometrico* e *pressione limite*. I risultati di ciascuna prova, effettuate all'interno dell'unità *argille azzurre*, sono riportati nella tabella sottostante (cfr. **Tabella 16**).

I risultati delle prove hanno mostrato una discreta dispersione dei valori di modulo pressiometrico  $E_M$ , comunque mediamente variabile tra 30 e 170 MPa, e valori di pressione limite  $P_{LIM}$  mediamente variabili tra 3 e 8 MPa.

Sondaggio	Prova	Profondità di prova	descrizione litologia	Modulo pressiometrico	Pressione limite $P_{LIM}$
[-]	[-]	[m]	[-]	[MPa]	[MPa]
S01D-PZ	P1	17,50	<i>Pelite da consistente a molto consistente</i>	34,1	4,10
S02-PZ	P1	18,50	<i>Pelite molto consistente</i>	130,3	6,80
S06D-bis	P1	17,50	<i>Limo argilloso debolmente marnoso molto consistente</i>	20,1	3,30
S06D-bis	P2	22,50	<i>Limo argilloso debolmente marnoso molto consistente</i>	629,8*	5,5*
S10D-PZ	P1	8,50	<i>Pelite da consistente a molto consistente</i>	83,0	6,00
S10D-PZ	P2	13,50	<i>Pelite da consistente a molto consistente</i>	61,2	6,90
S11D-DH	P1	17,50	<i>Limo con sabbia argilloso da consistente a molto consistente</i>	22,8	4,60
S11D-DH	P2	25,50	<i>Pelite da consistente a molto consistente</i>	173,6	7,80
S12D-PZ	P1	17,50	<i>Limo con sabbia e argilla da moder. consistente a consistente</i>	16,7	4,00
S13D	P1	17,50	<i>Altern.za sabbia fine deb. argillosa e peliti da cons. a molto cons.</i>	39,1	4,60
S14D-DH	P1	16,50	<i>Pelite molto consistene, dura</i>	153,6	8,10

**Tabella 16** - Risultati prove pressiometriche di ciascun sondaggio

Tutte le prove sono state eseguite nell'unità delle *argille azzurre* plioceniche, nell'ambito della quale le prove eseguite in corrispondenza della facies *limoso-argillosa* hanno fornito i valori più elevati di modulo pressiometrico  $E_M$ , quasi sempre superiori a 60 MPa e con valori di pressione limite  $P_{LIM}$  mediamente variabili tra 5 e 8 MPa, mentre in corrispondenza della facies *limoso-sabbiosa* sono stati registrati generalmente valori inferiori (modulo pressiometrico  $E_M$  non superiore a 40 MPa).

Bisogna segnalare inoltre che la prova P2 del sondaggio S06D-bis (profondità di 22,5 m) fornisce valori di modulo pressiométrico e di pressione limite non totalmente affidabili, prodotto, probabilmente, di un errore strumentale in fase di misurazione.

## **8.6 Parametri di resistenza meccanica delle unità geotecniche dalle prove di taglio diretto e dalle prove triassiali**

I parametri di resistenza meccanica in termini di sforzi efficaci, per le principali unità geotecniche riconosciute, sono stati ottenuti a mezzo di prove di taglio diretto consolidate lente e prove triassiali consolidate drenate e non drenate, eseguite nel corso della recente campagna di indagini integrativa (2019) e della precedente campagna di indagine del 2009.

I campioni sottoposti a prova, in tutte le campagne considerate, sono stati distribuiti a diverse profondità nell'ambito delle differenti unità. Sono quindi stati costruiti, distintamente per le varie unità, opportuni grafici  $\tau/\sigma_n$  nei quali, per le prove di taglio diretto sono state inserite tutte le coppie di valori per ogni provino ricavate dalle prove eseguite, mentre per le prove triassiali sono state inserite direttamente i risultati delle prove TX-CIU e TX-CID in termini di coesione efficace  $c'$  e di angolo di attrito efficace  $\varphi'$ .

I risultati delle prove di taglio diretto sono stati distinti per colore in funzione della campagna di indagine di appartenenza. Si sottolinea che i valori di resistenza ottenuti nelle prove eseguite durante la campagna 2019 (in colore rosso nei grafici) risultano discretamente ma non totalmente sovrapponibili a quelli della campagna 2009 (in colore verde), che mostrano generalmente valori di resistenza inferiori.

I risultati delle prove così rappresentati (cfr. grafici in **Appendice 1**) hanno consentito di ricavare dei valori di resistenza caratteristici per le diverse unità geotecniche individuate.

Di seguito si riportano quindi i valori caratteristici, corrispondenti ai valori medi cautelativi, dei parametri di resistenza per le unità geotecniche principali:

### **Unità FAA – Argille azzurre:**

- $c' = 30$  kPa
- $\varphi' = 28^\circ$

### **Unità FAAa – Argille azzurre alterate:**

- $c' = 20$  kPa
- $\varphi' = 24^\circ$

### **Unità bs – Sabbie limose argillose (alluvionali):**

- $c' = 18$  kPa
- $\varphi' = 32^\circ$

### **Unità bl – Limi sabbiosi argillosi (alluvionali):**

- $c' = 15$  kPa
- $\varphi' = 30^\circ$

## 8.7 Proprietà geotecniche dei depositi eluvio-colluviali "b<sub>2</sub>"

Per l'unità dei *depositi eluvio-colluviali* (*b<sub>2</sub>*) non risultano disponibili campioni sottoposti a prove di laboratorio né campioni sottoposti a prove in sito dinamiche tipo SPT, mentre diverse porzioni di terreno di questa unità sono state attraversate da prove statiche di tipo CPT.

Analizzando i risultati delle prove CPT7, CPT12 e CPT14 che coinvolgono l'unità in tutta la loro profondità (circa 2,00 m), i depositi eluvio-colluviali di alterazione delle argille riportano valori medi di 5 MPa per ciò che concerne la resistenza alla punta (prove CPT), con intervalli globalmente compresi tra 1 e 10 MPa, in analogia con i valori risultanti nei terreni associati alle unità dei *depositi alluvionali limosi* (*b1*).

Il comportamento dei depositi eluvio-colluviali, dunque, da un punto di vista meccanico, è stato assimilato a quello dei depositi alluvionali più limosi e dunque i parametri di resistenza caratteristici per i *depositi eluvio-colluviali "b<sub>2</sub>"* risultano essere i seguenti:

### Unità b<sub>2</sub> – Limi sabbiosi e sabbie limose (eluvio-colluviali):

- $c' = 15$  kPa
- $\varphi' = 30^\circ$
- $c_u = 75$  kPa

## 8.8 Proprietà geotecniche dei depositi antropici (riporti stradali e ferroviari)

Non sono disponibili né prove di identificazione né prove meccaniche di resistenza sui materiali che costituiscono i rilevati stradali e ferroviari presenti nell'area, a rappresentare i *depositi antropici attuali* (*r*). Tali materiali, presumibilmente non coesivi e con un buon grado di addensamento, possono essere caratterizzati, cautelativamente, con i seguenti parametri geotecnici:

- $\gamma_N = 18\div 19$  KN/m<sup>3</sup>
- $c' = 0$  kPa
- $\varphi' = 35^\circ$
- $E = 10$  MPa

Si deve sottolineare che, in corrispondenza dello scavo in naturale della Galleria S. Lazzero, con particolare riguardo alla carreggiata ovest ove la sezione attuale della galleria verrà allargata sono stati ipotizzati spessori di ricoprimento antropico massimi (in corrispondenza della S.R. 2 "Cassia") pari circa 10÷12 m. Pertanto, dato che tali spessori di ricoprimento hanno comportato senz'altro un certo grado di compattazione, è possibile considerare, ai fini della progettazione della Galleria San Lazzero, valori di modulo elastico dei depositi antropici pari a circa 15÷20 MPa.

## 8.9 Proprietà geotecniche dei materiali dei rilevati di nuova realizzazione

Per i nuovi rilevati realizzati con materiali non coesivi con le caratteristiche di compattazione previste dalle specifiche tecniche di capitolato, si possono ipotizzare i seguenti parametri geotecnici:

- $\gamma_N = 20$  KN/m<sup>3</sup>
- $c' = 0$  kPa
- $\varphi' = 38^\circ$
- $E = 20$  MPa

## 8.10 Proprietà geotecniche delle Sabbie di San Vivaldo

In tale unità verrà eseguita, in carreggiata ovest, un'opera di sostegno provvisoria, costituita da una paratia di pali a grande diametro tirantata, in prossimità della spalla 1 del Viadotto Rilugio, le cui fondazioni saranno anch'esse in tale unità.

Dato che non risultano disponibili indagini specifiche sull'unità geologica delle Sabbie di San Vivaldo, tenuto conto che l'unità ha una componente limosa non trascurabile così come non risulta trascurabile la componente limoso-sabbiosa nelle argille azzurre (unità FAA) e considerato che le prove sulle due litofacies (limoso-argillosa e limoso-sabbiosa) delle argille hanno fornito valori di resistenza paragonabili, è possibile assumere per le Sabbie di San Vivaldo i valori di peso di volume, dei parametri di resistenza drenati e del modulo elastico utilizzati per le argille azzurre.

- $\gamma_N = 20 \div 21 \text{ KN/m}^3$
- $c' = 30 \text{ kPa}$
- $\phi' = 28^\circ$
- $E = 20 \text{ MPa}$

Resta inteso che per la progettazione esecutiva dell'opera dovrà essere eseguita una adeguata caratterizzazione geotecnica dell'unità geotecnica delle Sabbie di San Vivaldo attraverso l'esecuzione di almeno un sondaggio a carotaggio continuo con prove in foro e prove geotecniche di laboratorio su campioni indisturbati per la determinazione diretta dei parametri di resistenza e deformabilità

## 8.11 Sintesi dei parametri geotecnici principali delle unità

A conclusione del processo di caratterizzazione geotecnica di cui ai punti precedenti, di seguito si riporta una sintesi dei principali parametri geotecnici caratteristici delle diverse unità, da utilizzare per le verifiche geotecniche di progetto (cfr. **Tabella 17**).

Unità geotecniche	Peso di volume naturale	Peso di volume saturo	Coesione efficace	Angolo di resistenza a taglio	Coesione non drenata	Modulo di elasticità
	$\gamma_N \text{ [kN/m}^3\text{]}$	$\gamma_{\text{sat}} \text{ [kN/m}^3\text{]}$	$c' \text{ [kPa]}$	$\phi' \text{ [}^\circ\text{]}$	$c_u \text{ [kPa]}$	$E \text{ [MPa]}$
Unità r - Depositi antropici attuali	18,0	19,0	0	35,0	-	10
Unità bg - Depositi alluvionali - Ghiaie con sabbie limose	18,0	20,0	0	35,0	-	10
Unità bs - Depositi alluvionali - Sabbie limose argillose	19,0	20,0	18	32,0	-	15
Unità bl - Depositi alluvionali - Limi sabbiosi argillosi	19,5	20,5	15	30,0	75	10
Unità b2 - Depositi eluvio-colluviali - Limi sabbiosi e sabbie limose	19,5	20,5	15	30,0	75	10
Unità FAAa - Argille azzurre plioceniche alterate	19,5	20,5	20	24,0	75	10
Unità FAA - Argille azzurre plioceniche	20	21	30	28,0	200	20

**Tabella 17 - Caratterizzazione geotecnica (parametri di resistenza e deformabilità)**

## 9 RILEVATI E TRINCEE

Lo studio geologico e geotecnico del tracciato in progetto ha consentito di verificare terreni superficiali molto eterogenei, limoso-sabbioso-argillosi, appartenenti a contesti geologici differenti a seconda delle zone.

Da inizio tracciato fino alla p.k. 1+100 circa, in località Cerchiaia, tali terreni sono ricoperti da discreti spessori (7-8 m) di depositi alluvionali nei quale prevalgono terreni sabbioso-limosi, anch'essi caratterizzati da una bassa plasticità ( $I_p < 10\%$  e  $W_L << 50\%$ ).

Dalla p.k. 1+100 circa, in corrispondenza di tutti i principali impluvi, i depositi alluvionali che ricoprono i terreni limoso-argillosi derivanti dall'alterazione delle argille azzurre sono sostanzialmente assimilabili a questi ultimi in termini di granulometria (limi argillosi prevalenti) e plasticità ( $I_p$  circa 15% e  $W_L < 50\%$ ).

Dalla p.k. 4+300 circa a fine tracciato, verso la piana alluvionale in località Ruffolo, l'unità delle argille azzurre viene ricoperta da depositi alluvionali a granulometria ghiaiosa prevalente: si tratta di ghiaie poco compatte, con sabbie, in matrice limoso-argillosa, non plastiche.

Pertanto, lungo tutto il tracciato, le lavorazioni prederanno la fornitura di materiale da rilevato sabbioso-ghiaioso previo scotico, bonifica ed interposizione di un foglio di TNT 500 g/mq per il piano di posa dei rilevati. Analogamente, per la sistemazione in trincea è prevista, oltre alla semplice compattazione, la posa di un foglio di geotessile TNT da 500 g/mq e resistenza a trazione  $\geq 35$  kN/m.

### 9.1 Formazione dei rilevati

Per il corpo del rilevato dovranno essere impiegati materiali appartenenti ai gruppi A1-a, A1-b, A2-4, A2-5 e A3. In caso di utilizzo materiale appartenente al gruppo A3, il coefficiente di uniformità ( $D_{60}/D_{10}$ ) dovrà essere maggiore o uguale a 7.

L'ultimo strato del rilevato, che andrà a costituire il piano di posa della fondazione stradale, dovrà avere uno spessore non inferiore a 30 cm dovrà essere realizzato con materiali appartenenti esclusivamente ai gruppi A1-a e A3.

I materiali impiegati dovranno essere del tutto esenti da frazioni o componenti vegetali, organiche e da elementi solubili, gelivi o comunque instabili nel tempo, non essere di natura argillo-scistosa nonché alterabili o molto fragili.

L'impiego di rocce frantumate è ammesso nella restante parte del rilevato, se di natura non geliva, se stabili con le variazioni del contenuto d'acqua e se tali da presentare pezzature massime non eccedenti i 20 cm. Di norma la dimensione delle massime pezzature ammesse non dovrà superare i due terzi dello spessore dello strato compattato. Inoltre, il materiale a pezzatura grossa (compreso tra 7 e 20 cm) deve essere di pezzatura disuniforme e non deve costituire più del 30% del volume del rilevato. In particolare, dovrà essere realizzato un accurato intasamento dei vuoti, in modo da ottenere, per ogni strato, una massa ben assestata e compattata.

A compattazione avvenuta i materiali costituenti il corpo del rilevato, ad eccezione dello strato terminale, di seguito descritto, dovranno presentare una massa volumica del secco pari o superiore al 90% della massa volumica del secco massima individuata dalle prove di compattazione AASHO Mod. (UNI EN 13286), (CNR 22-1972) e un valore del modulo di

deformabilità Md al primo ciclo non inferiore a 20 MPa (nell'intervallo di carico compreso tra 50÷150 kPa (0.05 e 0.15 N/mm<sup>2</sup>), (CNR 146 - 1992).

L'ultimo strato di 30 cm, costituente il piano di posa della fondazione della pavimentazione, dovrà invece presentare un grado di costipamento pari o superiore al 95% della massa volumica del secco massima individuata dalle prove di compattazione AASHTO Mod. (UNI EN 13286), (CNR 22-1972); il modulo di deformazione al primo ciclo di carico su piastra (diametro 30 cm) dovrà risultare non inferiore a 50 MPa, nell'intervallo compreso tra 150÷250 kPa (0,15 - 0.25 N/mm<sup>2</sup>) sul piano di posa della fondazione della pavimentazione stradale in rilevato.

La variazione di detti valori minimi al variare della posizione all'interno del corpo del rilevato, al termine del costipamento del singolo strato, dovrà risultare lineare.

Le caratteristiche di deformabilità dovranno essere accertate in modo rigoroso e dovranno essere garantite, anche a lungo termine, nelle condizioni climatiche e idrogeologiche più sfavorevoli

Su ciascuna sezione trasversale i materiali impiegati per ciascuno strato dovranno essere dello stesso gruppo.

Le scarpate sono profilate con pendenza 2V:3H, con strato di vegetale di spessore medio 30 cm inerbito mediante idrosemina, che si rastrema in corrispondenza dell'arginello e sostituito da materiale stabilizzato compattato, al fine di garantire la corretta infissione della barriera in un materiale che ne permetta il corretto funzionamento in caso di urto.

La raccolta acque è gestita mediante sistema chiuso con canalette con predisposizione di foro per l'inserimento di caditoie con griglia non carrabile, utili a collettare le acque di piattaforma in tubazioni correnti per il conferimento alla vasca di trattamento e quindi al ricettore finale delle portate d'acqua captate. Come sistema di sicurezza, sono previste canalette tipo embrice posizionate lungo la scarpata che in caso di troppo pieno del sistema canaletta/tubazione convogliano le acque di piattaforma in fossi di guardia rivestiti al piede del rilevato.

La costruzione del rilevato infine dovrà essere programmata in maniera tale che il cedimento residuo da scontare, terminati i lavori, non sia superiore al 10% del cedimento teorico a fine consolidazione e comunque non superiore ai 5 cm.

Ogni qualvolta i rilevati dovranno poggiare su declivi con pendenza superiore al 20%, ultimata l'asportazione del terreno vegetale e fatta eccezione per diverse e più restrittive prescrizioni derivanti dalle specifiche condizioni di stabilità globale del pendio, si dovrà procedere all'esecuzione di una gradonatura con banche in leggera contropendenza (1% - 2%) e alzate verticali contenute in altezza.

Nella **Figura 3** è mostrata una sezione tipo in rilevato, in mezzacosta, dove si può osservare l'interposizione di un foglio di geotessile TNT da 500 g/mq e resistenza a trazione  $\geq 35$  kN/m, prima della stesa del materiale granulare di sostituzione dei terreni di scotico e bonifica.

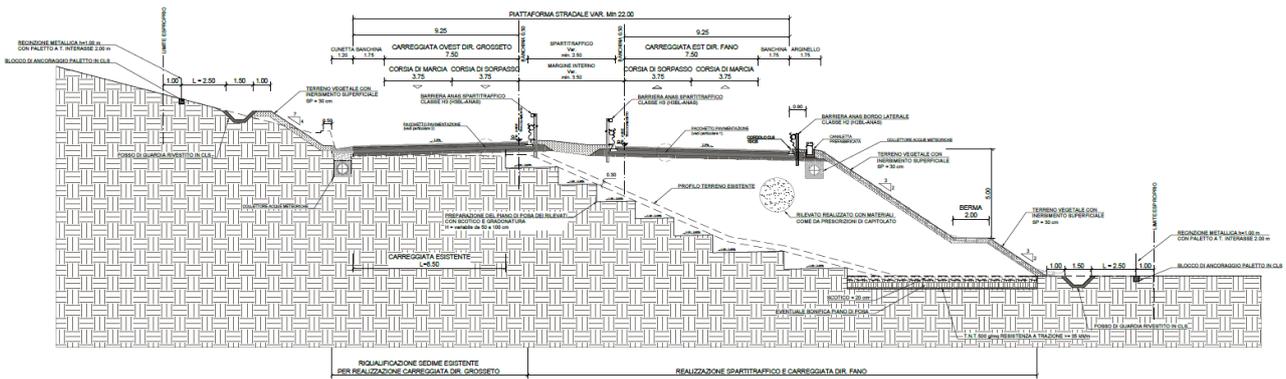


Figura 3 – Schema realizzazione del piano di posa e del corpo dei rilevati

## 9.2 Pavimentazione stradale dei tratti in trincea

Nei tratti in trincea le scarpate sono realizzate con pendenza al 4V:7H, in ragione delle caratteristiche meccaniche del terreno in sito, rivestite con uno strato di vegetale di 0,30 m ed inerbite. Il fondo dello scavo verrà compattato fino a raggiungere il grado di portanza idoneo al piano di posa della pavimentazione stradale.

Le acque meteoriche vengono raccolte mediante cunette laterali con predisposizione di foro per l'inserimento di caditoia con griglia carrabile, e convogliate nei pozzetti di raccolta, mediante condotte idrauliche poste in asse alla cunetta stessa. In testa alla scarpata viene realizzato un fosso di guardia di larghezza di marcia minima totale di 1,50 m, a protezione del tratto stradale in trincea.

In corrispondenza degli assi stradali in trincea, al di sotto dello strato di fondazione in misto granulare stabilizzato, si prevede l'interposizione di un foglio di geotessile da 500 g/mq e resistenza a trazione  $\geq 35$  kN/m (cfr. **Figura 4**).

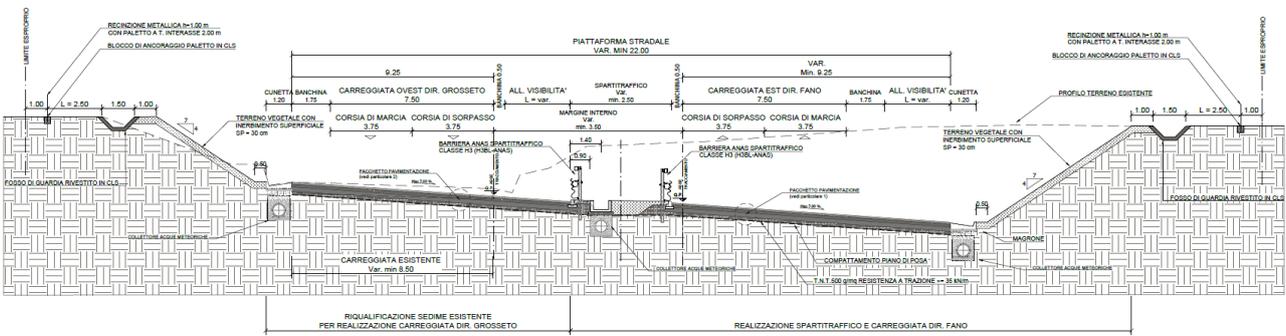


Figura 4 - Schema preparazione piano di posa della pavimentazione

## 10 DETERMINAZIONE DEGLI SPESSORI DI SCOTICO E BONIFICA

Come descritto al punto **3.3.6** del presente elaborato, nel corso della campagna di indagini integrativa sono stati eseguiti n° 12 pozzetti esplorativi che hanno raggiunto la profondità di 2.0 m dal p.c. e di 0,30 m dal p.c., con prelievo di n° 1 campione rimaneggiato di terreno per ogni pozzetto nell'intervallo di profondità 0.30÷0.50 m.

L'esecuzione dei pozzetti esplorativi ha consentito di riconoscere, al di sotto di uno spessore di terreno vegetale costituito da limo argilloso-sabbioso di 0,30-0,50 m (PZ1, PZ2, PZ4, PZ7, PZ8, PZ11 e PZ13) oppure di uno spessore di terreno di riporto sabbioso-limoso di 0,30-0,50 m (PZ3, PZ5, PZ6, PZ9 e PZ10), terreni costituiti perlopiù da limi con argille, in parte sabbiosi o debolmente ghiaiosi, da poco consistenti a mediamente consistenti.

Le prove di identificazione, eseguite sui campioni prelevati in ciascun pozzetto hanno consentito di verificare che i terreni di sottofondo dei rilevati in progetto sono costituiti perlopiù da *limi con argilla sabbiosi*. La determinazione dei limiti di consistenza ha permesso di verificare che il materiale fine (passante al setaccio n.40) risulta perlopiù poco o mediamente plastico ( $I_p = 10 \div 25\%$ ). I terreni risultano classificabili, secondo la classificazione CNR-UNI 10006, principalmente come A7-6 e A7-5 e, secondo la classificazione USCS, come CL, ML.

Sono state eseguite n° 11 prove di carico a doppio ciclo su piastra circolare, con piano di posa a 0,30 m di profondità dal p.c., al fine di determinare le caratteristiche di deformabilità dei terreni di sottofondo dei rilevati e delle fondazioni stradali. I risultati delle prove di carico su piastra eseguite hanno fornito valori di modulo di deformazione del terreno di sottofondo compresi tra 8 e 15 MPa al 1° ciclo di carico e valori compresi tra 61 e 141 MPa al 2° ciclo (cfr. **Tabella 5**), che lascia presumere un buona risposta dei terreni alle operazioni di compattazione legate alla preparazione dei piani di posa dei rilevati e della fondazione della pavimentazione in trincea.

Data la sostanziale prevalenza di terreni limoso-argillosi, talvolta sabbiosi, lungo il tracciato in progetto, in corrispondenza dell'asse principale e comprese le rampe di svincolo, oltre allo spessore di scotico (20 cm) è stato previsto uno spessore di bonifica di 30 cm.

Per quanto riguarda la bonifica di 30 cm sotto lo scotico, il terreno in sito, dovrà essere sostituito con materiale selezionato, appartenente ai gruppi (UNI 13242 - UNI 14688 - UNI 13285):

- A1-a, A1-b, A3 se proveniente da cave di prestito; nel caso in cui il materiale appartenga al gruppo A3, esso deve presentare un coefficiente di uniformità ( $D_{60}/D_{10}$ ) maggiore o uguale a 7;
- A1, A2-4, A2-5, A3, se proveniente dagli scavi; il materiale appartenente al gruppo A3 deve presentare un coefficiente di uniformità ( $D_{60}/D_{10}$ ) maggiore o uguale a 7.

Il modulo di deformazione dello strato bonificato dovrà risultare non inferiore a 20 MPa (nell'intervallo di carico compreso tra 50 e 150 kPa (0.05 e 0.15 N/mm<sup>2</sup>).

Nel caso in cui la bonifica debba essere eseguita in presenza d'acqua, l'Impresa dovrà provvedere ai necessari emungimenti per mantenere costantemente asciutta la zona di scavo da bonificare fino ad ultimazione dell'attività stessa.

## 11 VERIFICHE DI STABILITÀ DEI FRONTI DI SCAVO PROVVISORIALI

### 11.1 Premessa

Nel presente capitolo si definiscono le metodologie e i risultati di sintesi delle analisi di stabilità delle sezioni di scavo provvisoriale.

Le analisi di seguito illustrate, in particolare, sono state svolte valutando la stabilità delle sezioni di scavo di fondazione delle opere maggiori e minori e in particolare dei fronti di scavo provvisoriale in corrispondenza dei principali viadotti.

Sono state verificate le stabilità delle sezioni di scavo di maggiore altezza e in particolare:

- il fronte di scavo di fondazione delle pile dei seguenti viadotti: Viadotto Luglie (sez. trasversale Pila 1), Viadotto Valli (sez. trasversale Pila 1), Viadotto Casone (sez. trasversale Pila 1), Viadotto Ribucciano (sez. trasversale Pila 4), Viadotto Rilugio (sez. trasversale Pila 7);
- il fronte di scavo di fondazione della Spalla 2 del Viadotto Tressa.

Le sezioni individuate per le analisi di stabilità sono state preliminarmente oggetto di analisi per la ricostruzione geologico-stratigrafica e rappresentate successivamente negli elaborati **T00\_GE01\_GEO\_SG01÷04\_A** - "Sezioni geologiche trasversali" (4 tavv.).

### 11.2 Generalità sulle verifiche di stabilità globale

Le verifiche di stabilità sono state eseguite nel rispetto della normativa vigente, in particolare:

- *D.M. 17.01.2018 "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni" (Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale", n.42 del 20.02.2018).*
- *Circ. 21/01/2019, 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*

Le norme suddette indicano che debba essere soddisfatta la seguente condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove  $E_d$  rappresenta il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione e  $R_d$  rappresenta il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

L'approccio seguito per ottenere le azioni e le resistenze di progetto è l'Approccio 1, in particolare è stata applicata la Combinazione 2: A2+M2+R2, in cui:

- A2 rappresenta il gruppo di coefficienti parziali  $\gamma_F$  da applicare alle azioni o all'effetto delle azioni (Tabella 6.2.I DM 17/01/2018);
- M2 rappresenta il gruppo di coefficienti parziali  $\gamma_M$  da applicare ai parametri del terreno (Tabella 6.2.II DM 17/01/2018);
- R2 rappresenta il gruppo di coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche di sicurezza (Tabella 6.8.I DM 17/01/2018).

CARICHI	EFFETTO	COEFFICIENTE PARZIALE ( $\gamma_F$ )	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	1.0	1.0

	Sfavorevole		1.3	1.0
Permanenti non strutturali	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0.0	0.8
	Sfavorevole		1.5	1.3
Variabili	Favorevole	$\gamma_Q$	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.3

**Tabella 18 - DM 17/01/2018: Tabella 6.2.I - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni**

PARAMETRO	GRANDEZZA	COEFFICIENTE PARZIALE ( $\gamma_M$ )	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	$c'_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1.0	1.0

**Tabella 19 - DM 17/01/2018: Tabella 6.2.II - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

COEFFICIENTE PARZIALE ( $\gamma_R$ )	R2
$\gamma_R$	1.1

**Tabella 20 - DM 17/01/2018: Tabella 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo**

Le verifiche sono state eseguite nelle sole condizioni statiche, in quanto trattasi di fronti di scavo di tipo provvisorio. I parametri sono stati abbattuti secondo quanto definito nel D.M. 17/01/2018 per l'Approccio 1 Combinazione 2 precedentemente definito.

Le verifiche di stabilità sono state condotte con il programma di calcolo SLIDE, che utilizza, nell'ambito dei metodi all'equilibrio limite per conci, diversi modelli di calcolo, sulla base dei quali il programma consente di calcolare il coefficiente di sicurezza per una singola superficie di rottura imposta dall'utente, oppure di ricercare in maniera automatica la superficie critica, mediante una tecnica di generazione casuale. Al fine di valutare le condizioni di stabilità dei rilevati sono state condotte analisi di stabilità con il metodo di Bishop, basato sull'equilibrio dei momenti e delle forze verticali, con risultante delle forze tra i conci contigui assunta orizzontale. Le analisi sono state condotte con ricerca automatica della superficie critica. Nella sezione analizzata è stata ricostruita la situazione geologico-strutturale e morfologica originaria; come detto in precedenza, l'analisi di stabilità è stata eseguita per le sole condizioni statiche.

### 11.3 Risultati

Il valore del coefficiente di sicurezza  $FS_{min}$  per i casi analizzati con le relative superfici di scorrimento, calcolate secondo il metodo di Bishop, sono riportati di seguito. In **Appendice 2 (Capitolo 18)** vengono riportati i tabulati di calcolo completi per le verifiche di stabilità di tutti i fronti di scavo in oggetto.

### 11.3.1 Sezione G-45 – Viadotto Tressa – Pila 1

Il fattore di sicurezza  $FS_{min}$  per la sezione di scavo G-45 (cfr. **Figura 5**) della Pila 1 del Viadotto Tressa, con fronte di altezza  $h=3.5$  m, risulta pari a 2.65, valore che soddisfa i requisiti minimi imposti dalla normativa vigente.

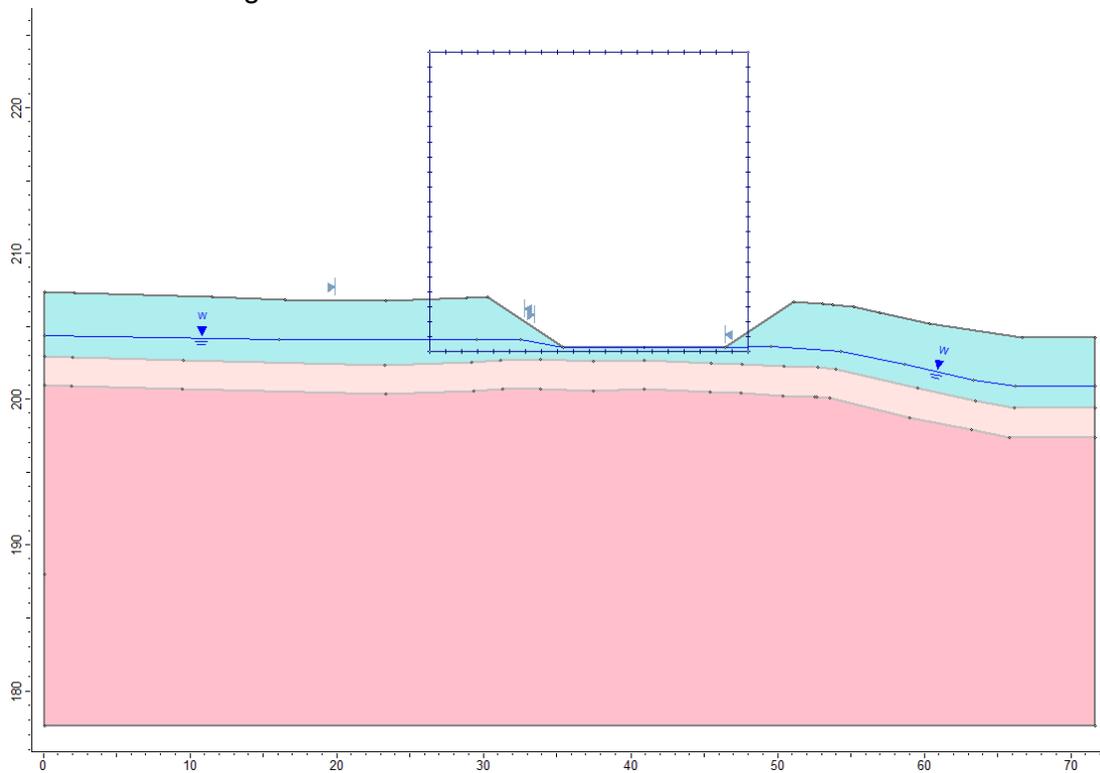


Figura 5 – Scavo provvisorio sez. G-55 – Viadotto Tressa – Pila 1: modello di calcolo

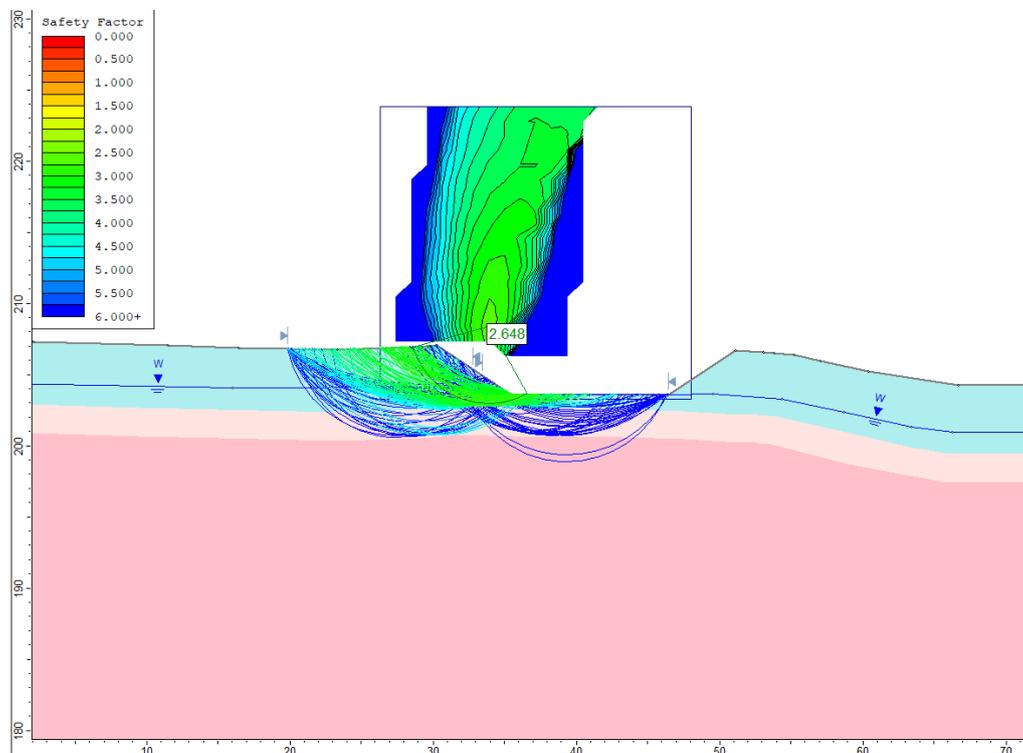


Figura 6 – Scavo provvisorio sez. G-55 – Viadotto Tressa – Pila 1: risultati

### 11.3.2 Sezione G-92 – Viadotto Luglie – Pila 1

Il fattore di sicurezza  $FS_{min}$  per la sezione di scavo G-92 (cfr. **Figura 7**) della Pila 1 del Viadotto Luglie, con fronte di altezza  $h=3,0$  m, risulta pari a 4.76, valore che soddisfa i requisiti minimi imposti dalla normativa vigente.

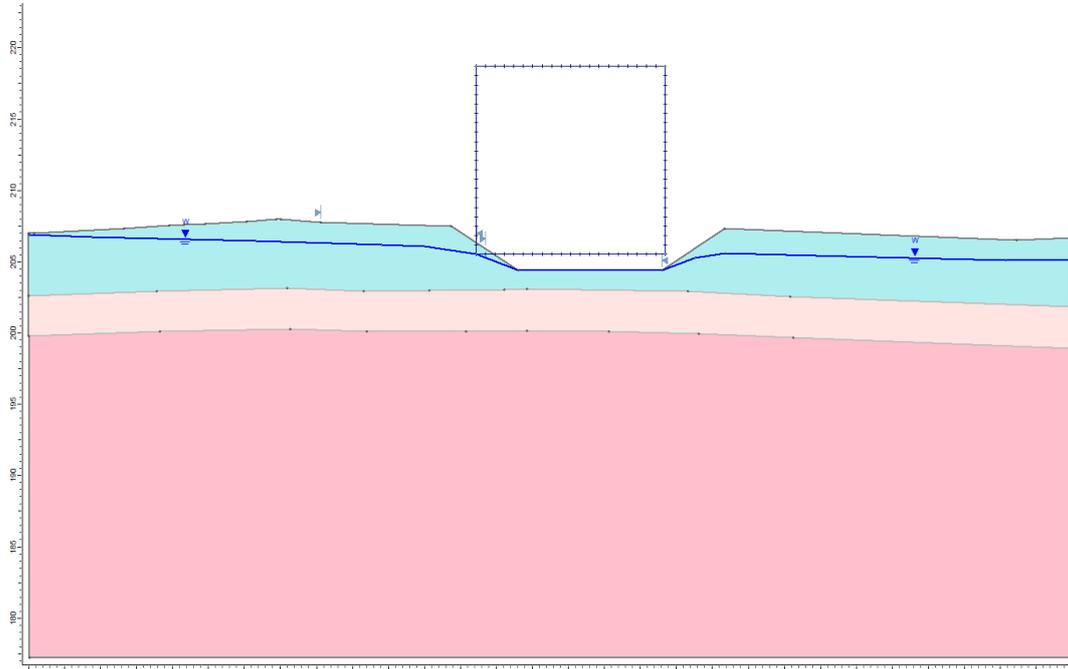


Figura 7 – Scavo provvisorio sez. G-92 – Viadotto Luglie – Pila 1: modello di calcolo

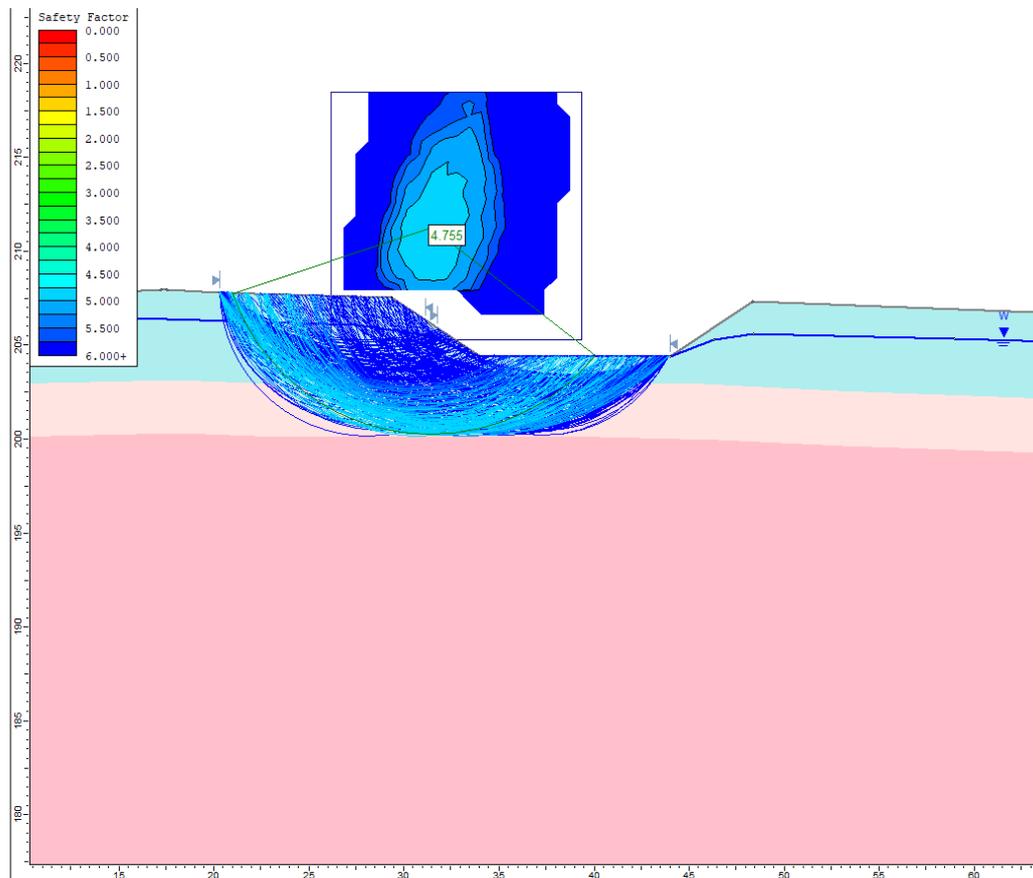


Figura 8 – Scavo provvisorio sez. G-92 – Viadotto Luglie – Pila 1: risultati

### 11.3.3 Sezione G-123 – Viadotto Valli – Pila 1

Il fattore di sicurezza  $FS_{min}$  per la sezione di scavo G-123 (cfr. **Figura 9**) della Pila 1 del Viadotto Valli, con fronte di altezza  $h=4,0$  m, risulta pari a 3.42, valore che soddisfa i requisiti minimi imposti dalla normativa vigente.

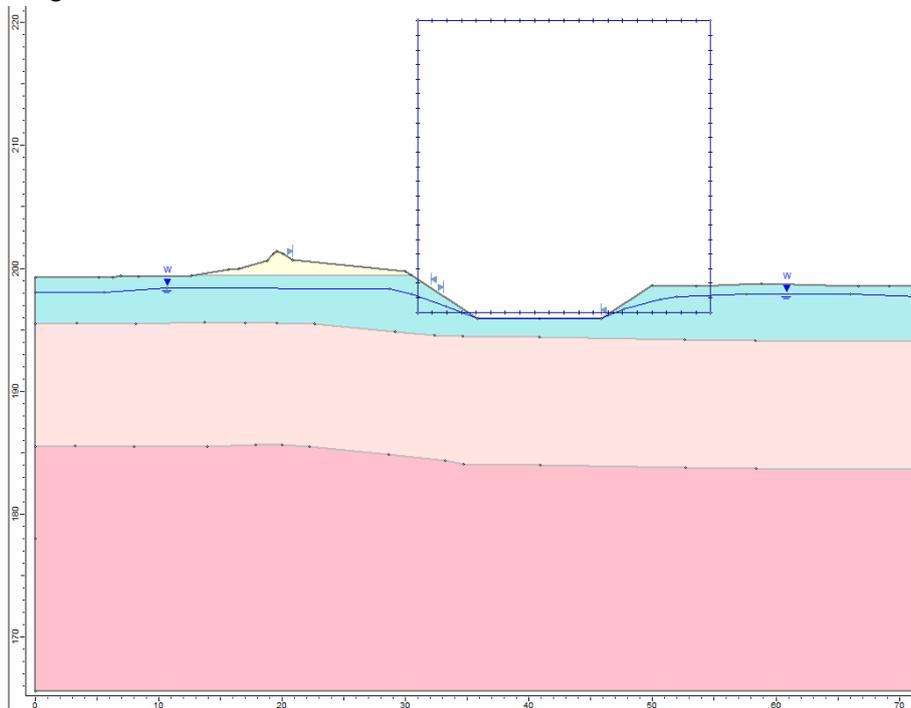


Figura 9 – Scavo provvisorio sez. G-123 – Viadotto Valli – Pila 1: modello di calcolo

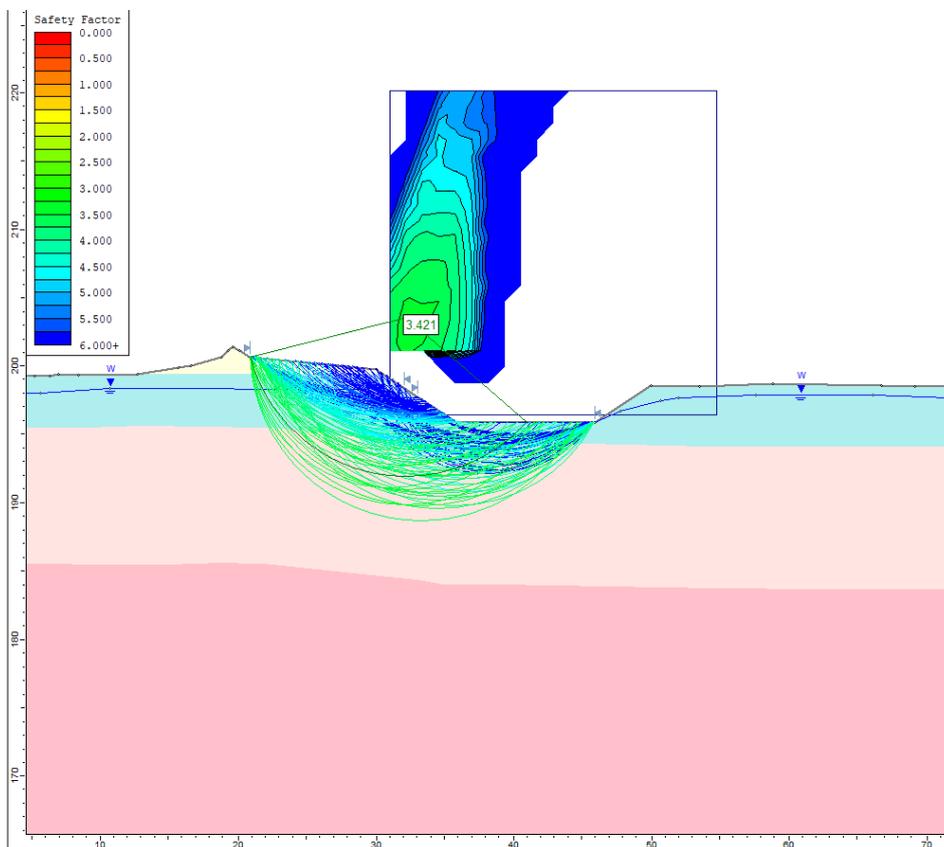


Figura 10 – Scavo provvisorio sez. G-123 – Viadotto Valli – Pila 1: risultati

### 11.3.4 Sezione G-153 – Viadotto Casone – Pila 1

Il fattore di sicurezza  $FS_{min}$  per la sezione di scavo G-153 (cfr. **Figura 11**) della Pila 1 del Viadotto Casone, con fronte di altezza  $h=3,4$  m, risulta pari a 4.50, valore che soddisfa i requisiti minimi imposti dalla normativa vigente.

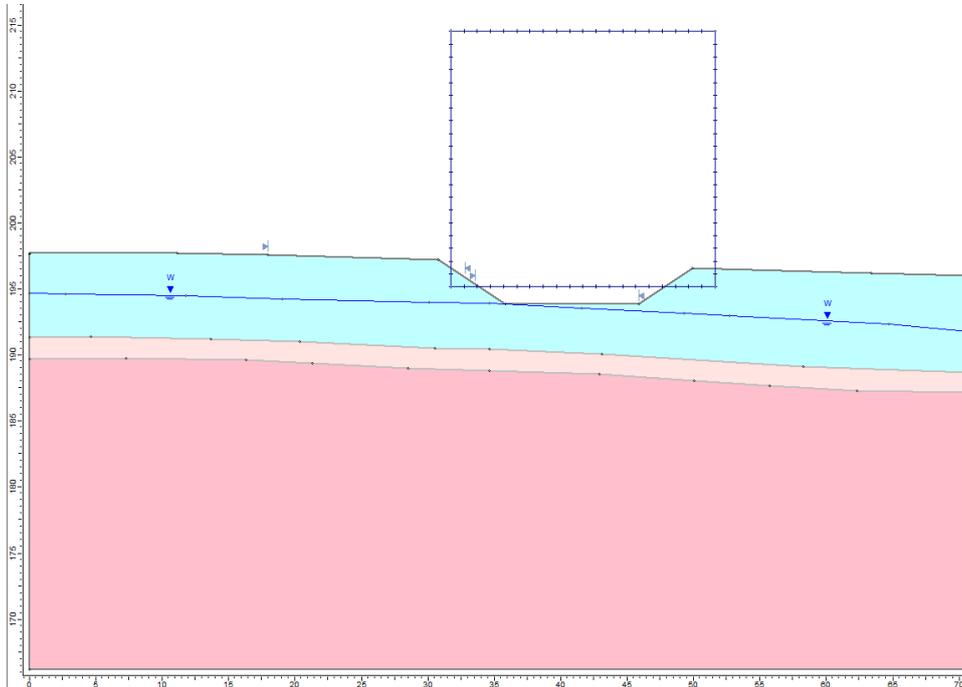


Figura 11 – Scavo provvisorio sez.G-153 – Viadotto Casone – Pila 1: modello di calcolo

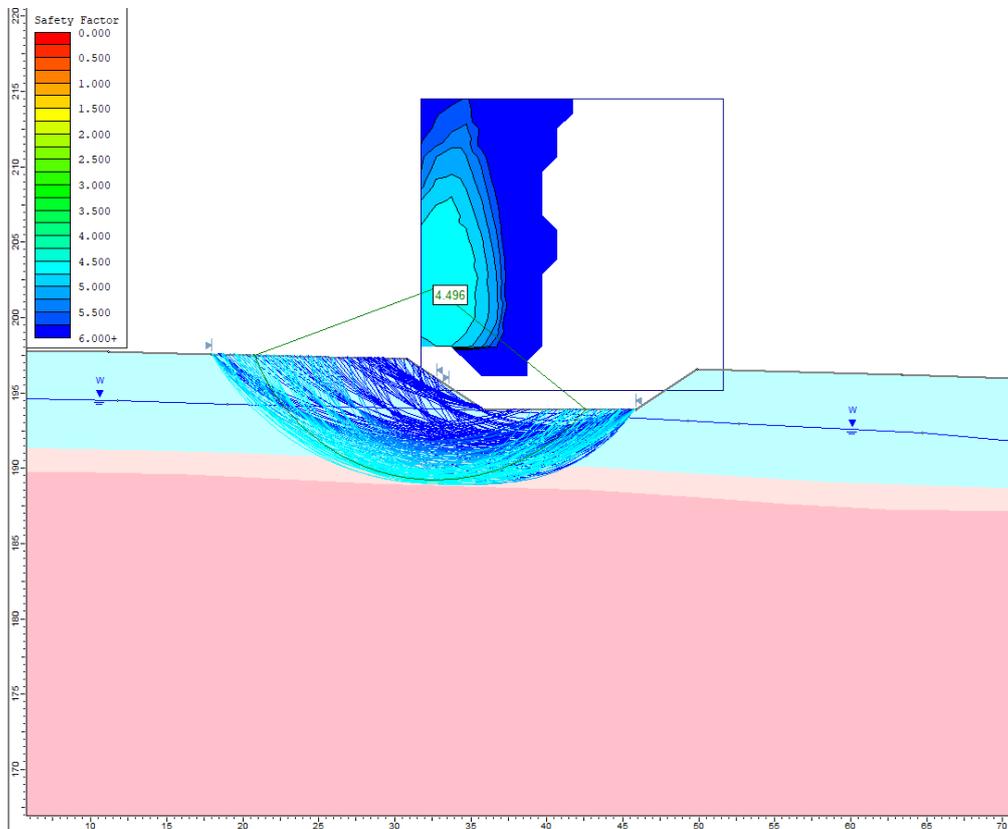


Figura 12 – Scavo provvisorio sez.G-153 – Viadotto Casone – Pila 1: risultati

### 11.3.5 Sezione G-173 – Viadotto Ribucciano – Pila 4

Il fattore di sicurezza  $FS_{min}$  per la sezione di scavo G-173 (cfr. **Figura 13**) della Pila 4 del Viadotto Ribucciano, con fronte di altezza  $h=2,6$  m, risulta pari a 6.08, valore che soddisfa i requisiti minimi imposti dalla normativa vigente.

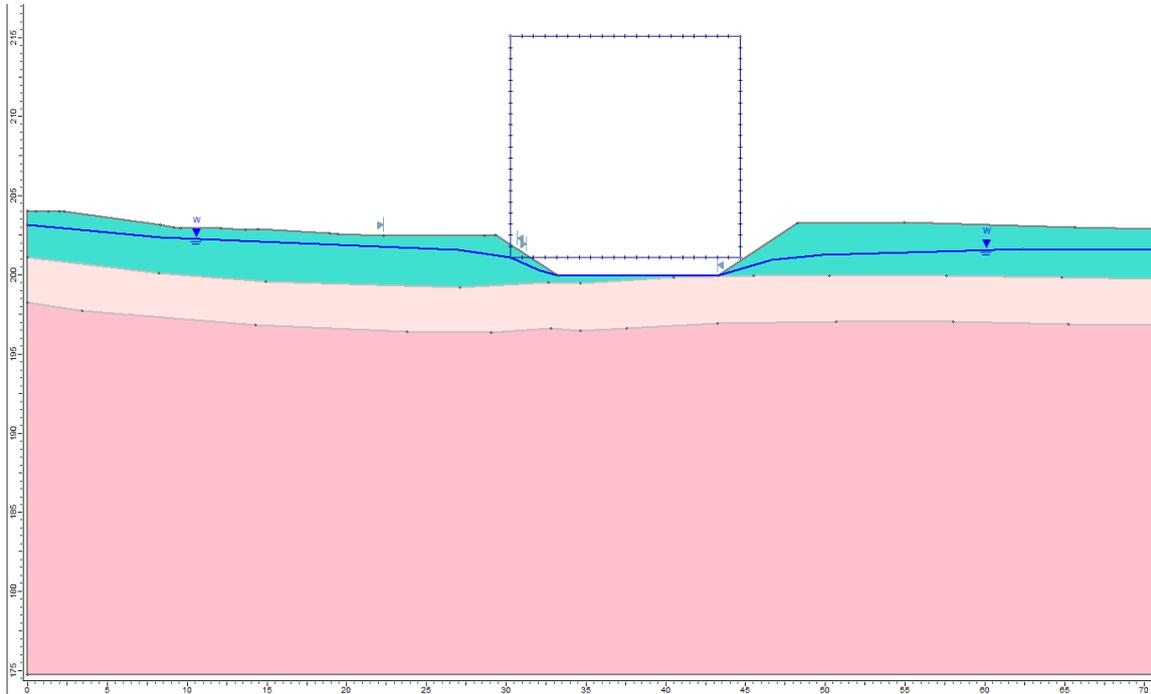


Figura 13 – Scavo provvisorio sez. G-173 – Viadotto Ribucciano – Pila 4: modello di calcolo

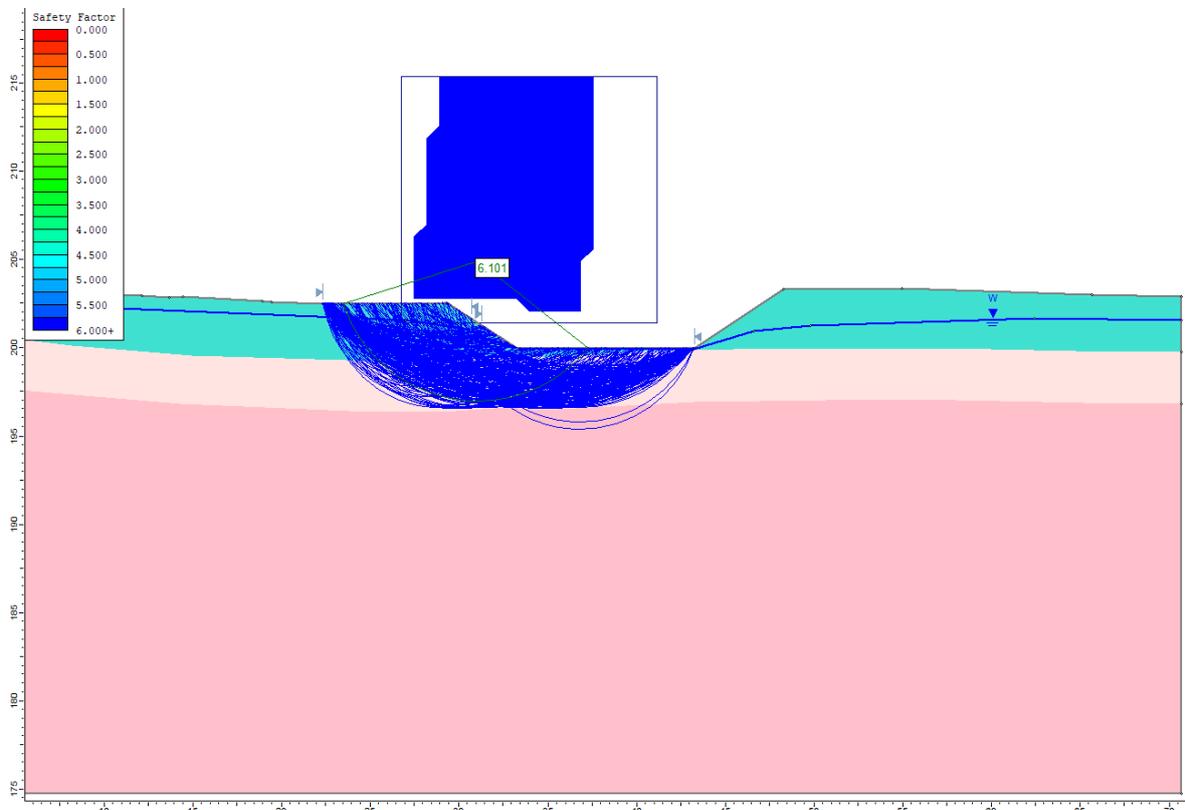


Figura 14 – Scavo provvisorio sez. G-173 – Viadotto Ribucciano – Pila 4: risultati

### 11.3.6 Sezione G-222 – Viadotto Rilugo – Pila 6

Il fattore di sicurezza  $FS_{min}$  per la sezione di scavo G-222 (cfr. **Figura 15**) della Pila 6 del Viadotto Rilugo, con fronte di altezza  $h=3.5$  m, risulta pari a 1.34, valore che soddisfa i requisiti minimi imposti dalla normativa vigente.

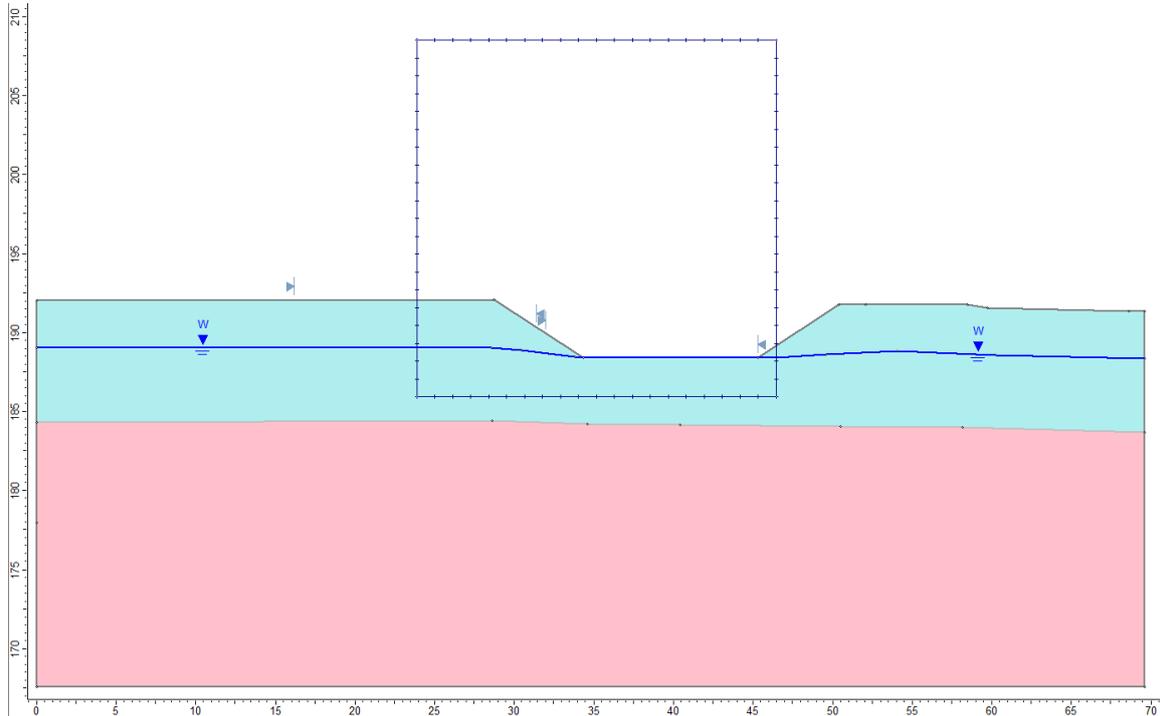


Figura 15 – Scavo provvisorio sez. G-222 – Viadotto Rilugo – Pila 6: modello di calcolo

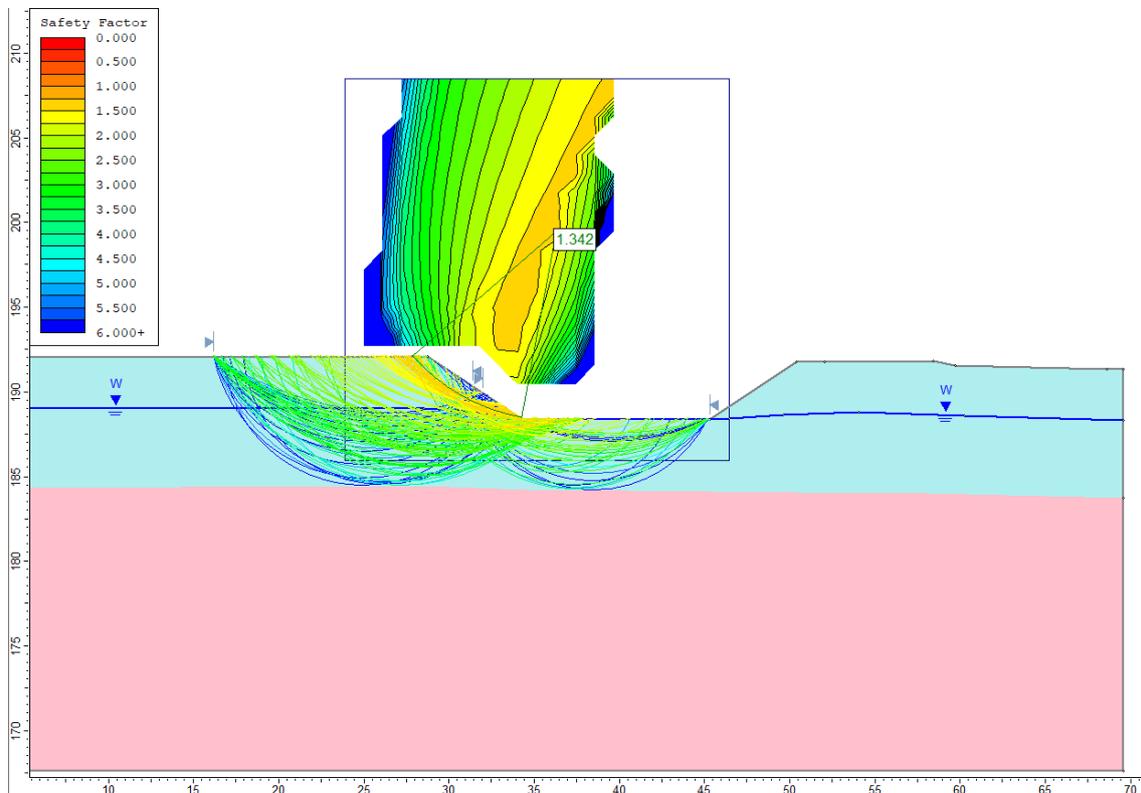


Figura 16 – Scavo provvisorio sez. G-222 – Viadotto Rilugo – Pila 6: risultati

## 12 VERIFICHE DI STABILITÀ DELLE SEZIONI IN RILEVATO

### 12.1 Premessa

Nel presente capitolo vengono definite le metodologie e i risultati delle verifiche di stabilità eseguite sulle sezioni in rilevato della sede stradale di progetto.

Le analisi illustrate in seguito sono state svolte valutando la stabilità delle sezioni di rilevato di maggiore altezza, sulla base della stratigrafia geotecnica.

Per maggiori dettagli sull'ubicazione delle sezioni e relativi profili geotecnici si rimanda ai seguenti elaborati:

- **T00\_GE01\_GEO\_PU01÷03\_B** - "Planimetria con ubicazione delle indagini geognostiche" – 3 tavv.
- **T00\_GE03\_GET\_FG01÷03\_B** - "Profilo geotecnico asse principale – Carreggiata Est" – 3 tavv.
- **T00\_GE03\_GEO\_FG04\_B** - "Profilo geotecnico Viadotto Tressa – Carreggiata Est"
- **T00\_GE03\_GEO\_FG05\_B** - "Profilo geotecnico Rami Svincolo Cerchiaia"
- **T00\_GE03\_GEO\_FG06\_B** - "Profilo geotecnico Viadotto Luglie – Carreggiata Est"
- **T00\_GE03\_GEO\_FG07\_B** - "Profilo geotecnico Viadotto Valli – Carreggiata Est"
- **T00\_GE03\_GEO\_FG08\_B** - "Profilo geotecnico Viadotto Casone – Carreggiata Est"
- **T00\_GE03\_GEO\_FG09\_B** - "Profilo geotecnico Viadotto Ribucciano – Carreggiata Est"
- **T00\_GE03\_GEO\_FG10\_B** - "Profilo geotecnico Viadotto Riluogo – Carreggiata Est"
- **T00\_GE03\_GEO\_FG11\_B** - "Profilo geotecnico Rami Svincolo Ruffolo"

### 12.2 Generalità sulle verifiche di stabilità globale

Le verifiche di stabilità sono state eseguite nel rispetto della normativa vigente, in particolare:

- *D.M. 17.01.2018 "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni" (Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale", n.42 del 20.02.2018).*
- *Circ. 21/01/2019, 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*

Le norme suddette indicano che debba essere soddisfatta la seguente condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove  $E_d$  rappresenta il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione e  $R_d$  rappresenta il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

L'approccio seguito per ottenere le azioni e le resistenze di progetto è l'Approccio 1, in particolare è stata applicata la Combinazione 2: A2+M2+R2, in cui:

- A2 rappresenta il gruppo di coefficienti parziali  $\gamma_F$  da applicare alle azioni o all'effetto delle azioni (Tabella 6.2.I DM 17/01/2018);
- M2 rappresenta il gruppo di coefficienti parziali  $\gamma_M$  da applicare ai parametri del terreno (Tabella 6.2.II DM 17/01/2018);

- R2 rappresenta il gruppo di coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche di sicurezza (Tabella 6.8.I DM 17/01/2018).

CARICHI	EFFETTO	COEFFICIENTE PARZIALE ( $\gamma_F$ )	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.3	1.0
Permanenti non strutturali	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0.0	0.8
	Sfavorevole		1.5	1.3
Variabili	Favorevole	$\gamma_Q$	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.3

**Tabella 21** - DM 17.01.2018: Tabella 6.2.I - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto di azioni

PARAMETRO	GRANDEZZA	COEFFICIENTE PARZIALE ( $\gamma_M$ )	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	$c'_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1.0	1.0

**Tabella 22** - DM 17.01.2018: Tabella 6.2.II - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

COEFFICIENTE PARZIALE ( $\gamma_R$ )	R2
$\gamma_R$	1.1

**Tabella 23** - DM 17.01.2018: Tabella 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezze di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

Le analisi sono state eseguite in condizioni a lungo termine, considerando i parametri del terreno in condizioni drenate.

Le verifiche sono state eseguite in condizioni statiche e in condizioni sismiche.

Nelle verifiche sismiche sono stati posti pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici (cfr. par. 7.11.4 del DM 17/01/2018), impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a  $\gamma_R = 1.2$ .

Le verifiche del raggiungimento della condizione di Stato Limite Ultimo (SLU) sono state quindi sviluppate considerando le seguenti condizioni di analisi:

#### Condizione statica

- Sovraccarico stradale pari al valore caratteristico 20 KPa amplificato per il coefficiente A2 corrispondente ai carichi variabili sfavorevoli (carico totale:  $20 \times 1.3 = 26$  KPa).

#### Condizione sismica: SISMA +

- Accelerazione sismica orizzontale, accelerazione sismica verticale diretta verso il basso;

- Sovraccarico stradale pari al valore caratteristico di 20 KPa ridotto per il coefficiente  $\psi_2$  (carico totale:  $20 \times 0.2 = 4$  KPa).

#### Condizione sismica: SISMA -

- Accelerazione sismica orizzontale, accelerazione sismica verticale diretta verso l'alto;
- Sovraccarico stradale pari al valore caratteristico di 20 KPa ridotto per il coefficiente  $\psi_2$  (carico totale:  $20 \times 0.2 = 4$  KPa).

La stabilità in condizioni sismiche è stata eseguita secondo il metodo pseudostatico che consente di rappresentare l'azione sismica mediante un'azione statica equivalente, costante nel tempo, proporzionale al peso  $W$  del volume di terreno potenzialmente instabile.

Come indicato in precedenza nelle verifiche allo Stato Limite Ultimo (SLV) le componenti orizzontali e verticali di tale forza possono essere definite come di seguito indicato:

$$F_h = k_h \cdot W$$
$$F_v = k_v \cdot W$$

con  $k_h$  e  $k_v$  rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale, variabili a seconda del tipo di categoria di sottosuolo e topografia caratterizzante ciascuna sezione analizzata (variabilità di  $a_{max}$  per SLV), nelle combinazioni seguenti:

- **Categoria B+T1:**  $k_h = \beta_s a_{max}/g = 0.079$ ;  $k_v = \pm 0.5 k_h = 0.039$
- **Categoria C+T1:**  $k_h = \beta_s a_{max}/g = 0.095$ ;  $k_v = \pm 0.5 k_h = 0.048$

Le verifiche di stabilità sono state condotte con il programma di calcolo *SLIDE 6.0*, che utilizza, nell'ambito dei metodi all'equilibrio limite per conci, diversi modelli di calcolo, sulla base dei quali il programma consente di calcolare il coefficiente di sicurezza per una singola superficie di rottura imposta dall'utente, oppure di ricercare in maniera automatica la superficie critica, mediante una tecnica di generazione casuale.

Al fine di valutare le condizioni di stabilità dei rilevati sono state condotte analisi di stabilità con il *metodo di Bishop*, basato sull'equilibrio dei momenti e delle forze verticali, con risultante delle forze tra i conci contigui assunta orizzontale. Le analisi sono state condotte con ricerca automatica della superficie critica.

Nelle sezioni analizzate sono state ricostruite le situazioni geologico-strutturali e morfologiche originarie e le analisi di stabilità sono state eseguite sia in condizioni statiche sia sismiche.

In **Appendice 2 (Capitolo 18)** vengono riportati i tabulati di calcolo completi per le verifiche di stabilità di tutti i rilevati in oggetto.

## 12.3 Risultati

Di seguito vengono riportati i risultati delle verifiche di stabilità globale per i rilevati stradali. In particolare, sono riportati i valori del *fattore di sicurezza*  $FS_{min}$  per i casi analizzati e relativi a superfici di scorrimento calcolate secondo il sopracitato metodo di Bishop.

Nella tabella seguente (cfr. **Tabella 24**) sono riportati i risultati di sintesi delle verifiche di stabilità globale effettuate per le diverse sezioni di calcolo.

Sezione di progetto	Fase statica	Fase sismica $k_v \downarrow$	Fase sismica $k_v \uparrow$
<b>G-97</b>	1.43	1.49	1.47
<b>G-164</b>	1.62	1.76	1.77
<b>G-201</b>	1.47	1.57	1.56
<b>G-234</b>	1.21	1.31	1.29

Tabella 24 - Verifiche di stabilità: sintesi dei risultati in termini di coefficiente di sicurezza  $FS_{min}$

### 12.3.1 Sezione G-97 – Rilevato alla p.k. 1+900 ( $h=8,4$ m)

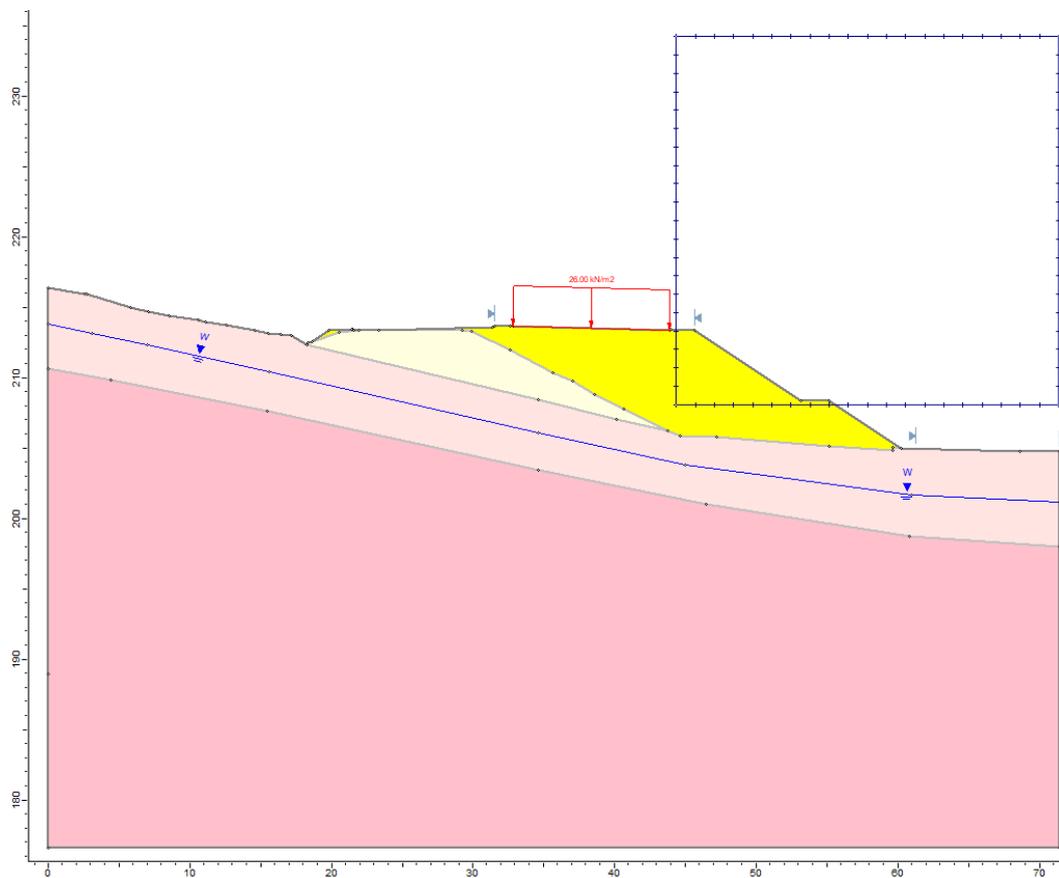


Figura 17 – Rilevato alla p.k. 1+900 – Modello di calcolo

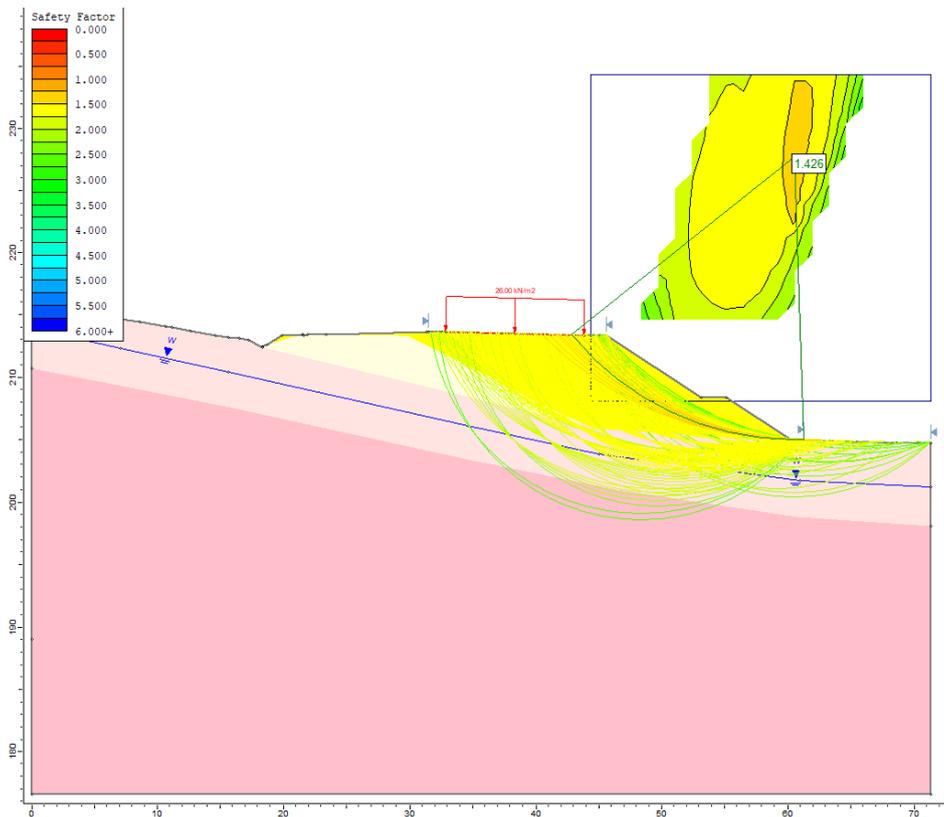


Figura 18 – Rilevato alla p.k. 1+900 – Verifica in condizioni statiche: risultati

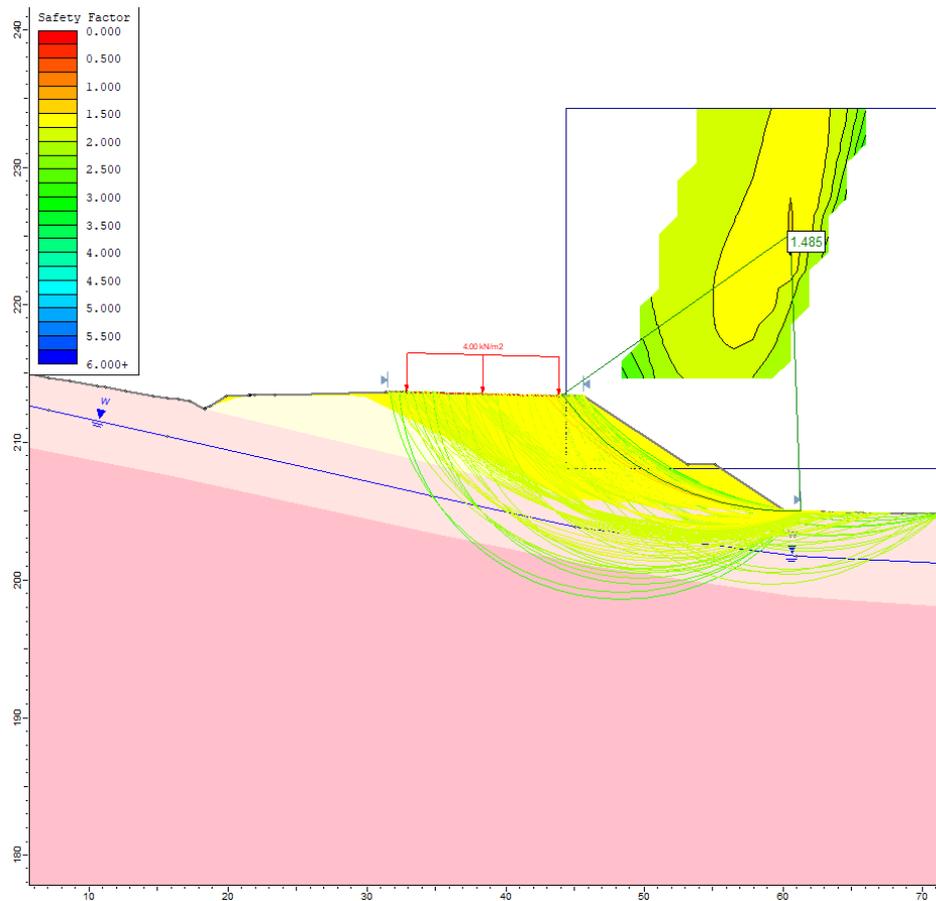


Figura 19 – Rilevato alla p.k. 1+900 – Verifica in condizioni sismiche (sisma+): risultati

12.3.2 Sezione G-164 – Rilevato alla p.k. 3+200 (h=5,5 m)

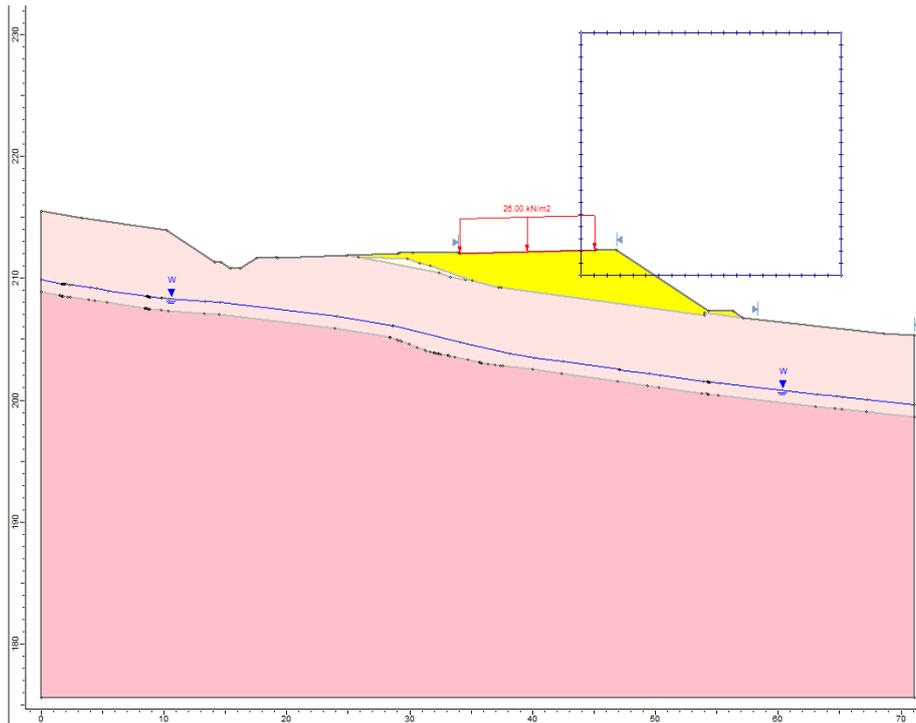


Figura 20 – Rilevato alla p.k. 3+200 – Modello di calcolo

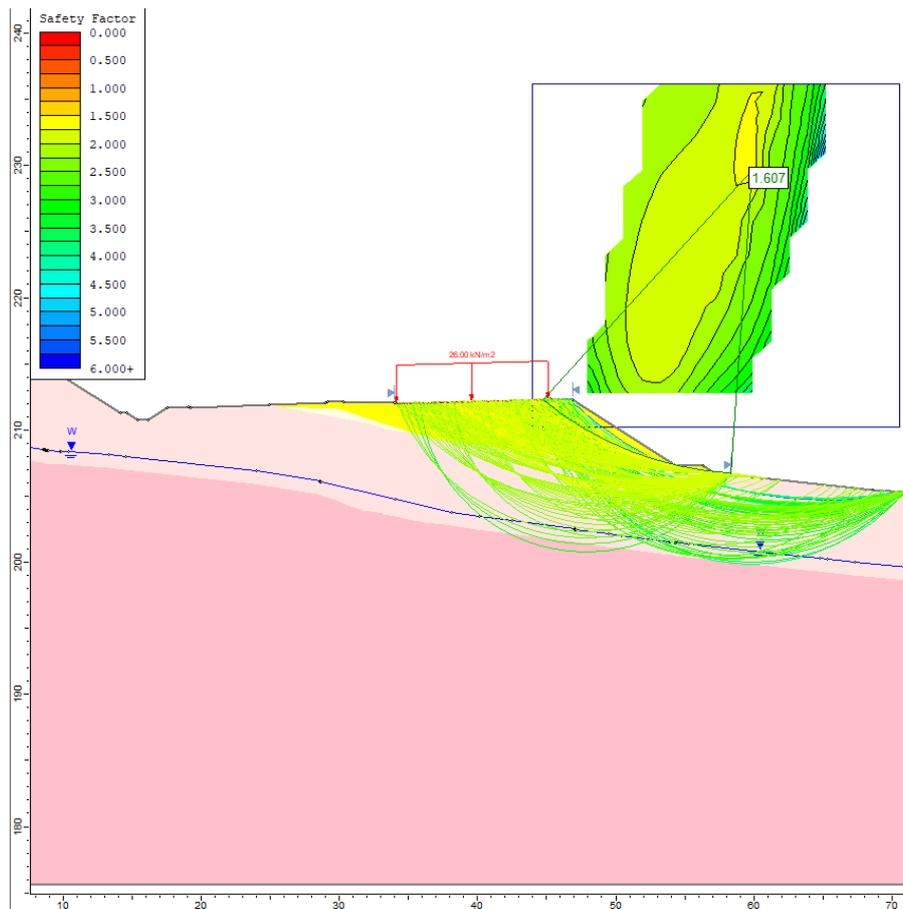


Figura 21 – Rilevato alla p.k. 3+200 – Verifica in condizioni statiche: risultati

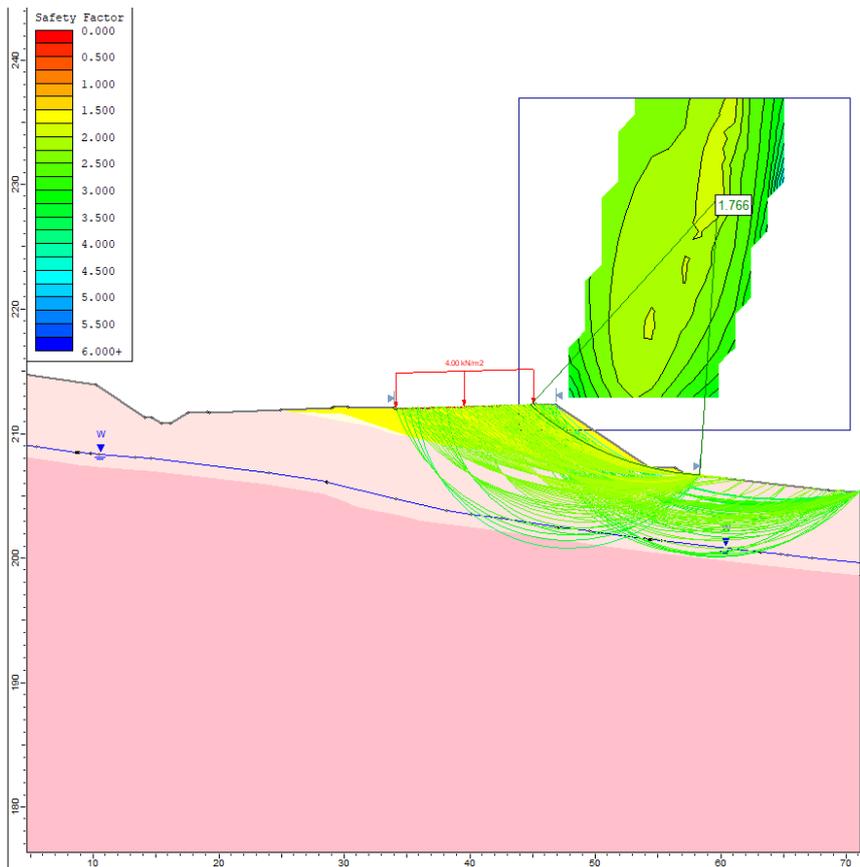


Figura 22 – Rilevato alla p.k. 3+200 – Verifica in condizioni sismiche (sisma+): risultati

12.3.3 Sezione G-201 – Rilevato alla p.k. 3+964 (h=6,0 m)

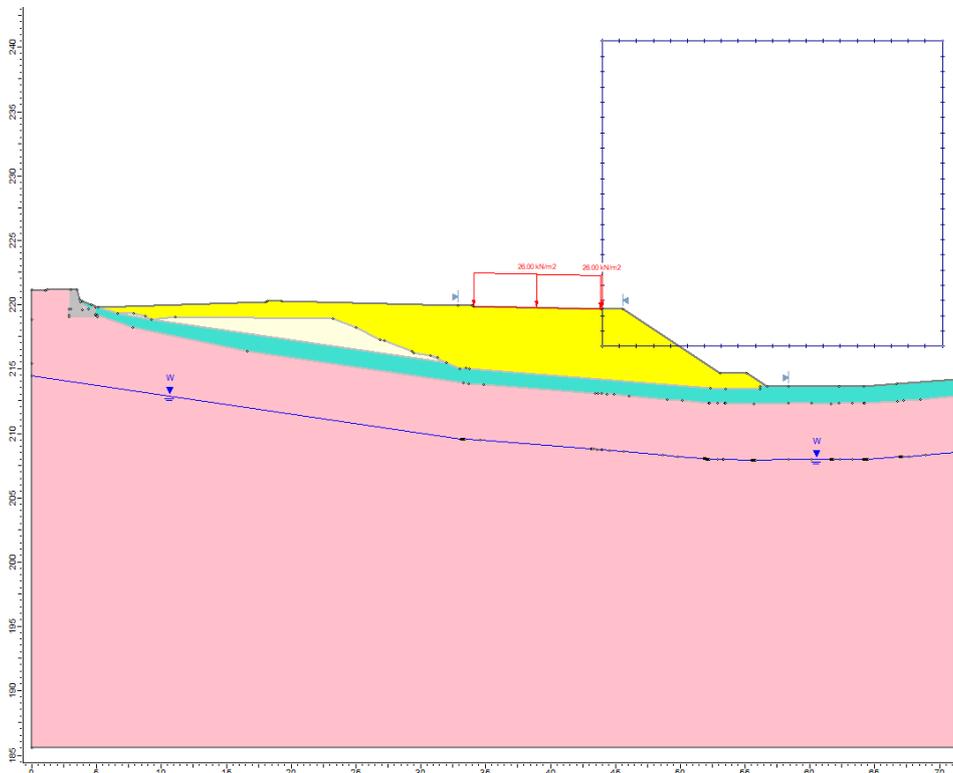


Figura 23 – Rilevato alla p.k. 3+964 - Modello di calcolo

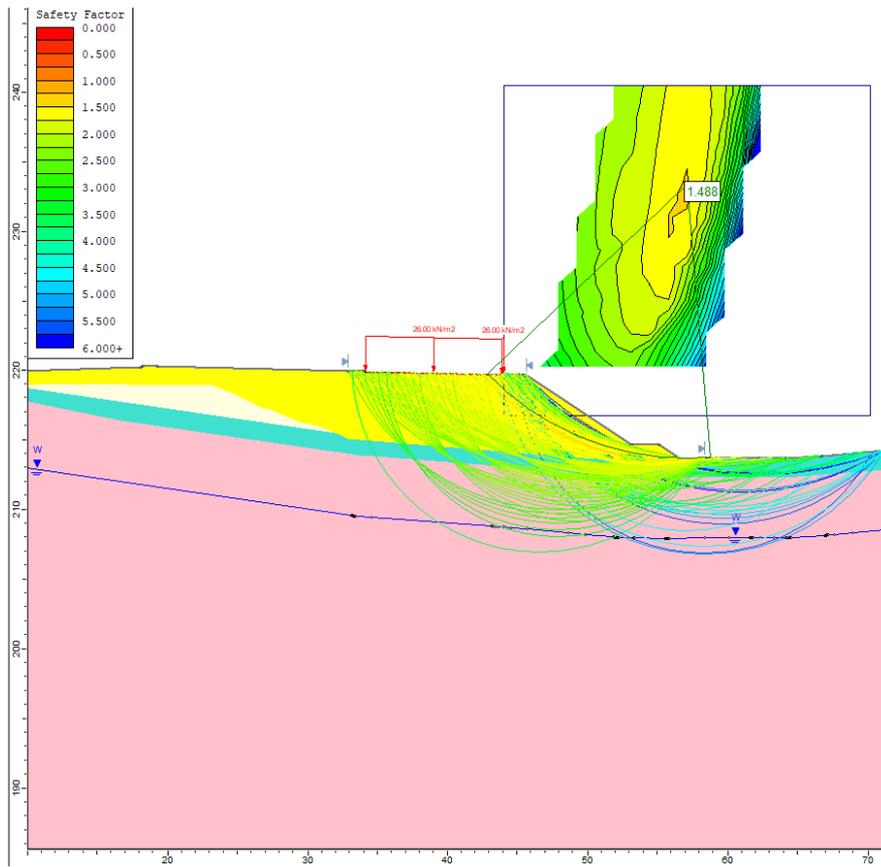


Figura 24 – Rilevato alla p.k. 3+964 – Verifica in condizioni statiche: risultati

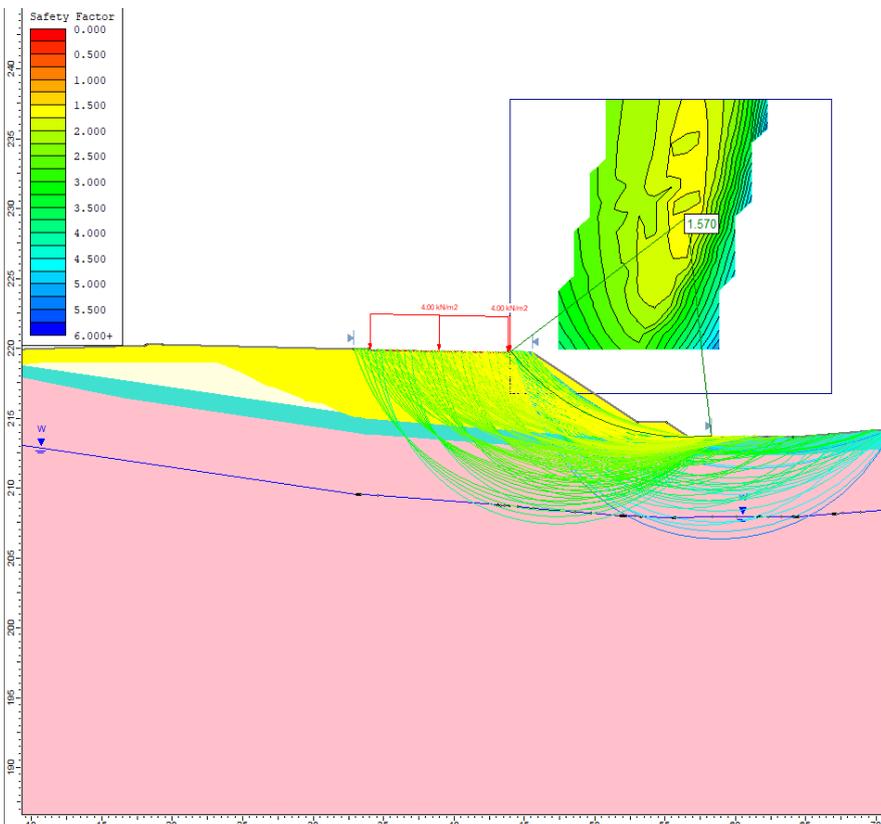


Figura 25 – Rilevato alla p.k. 3+964 – Verifica in condizioni sismiche (sisma+): risultati

12.3.4 Sezione G-234 – Rilevato alla p.k. 4+655 (h=6,6 m)

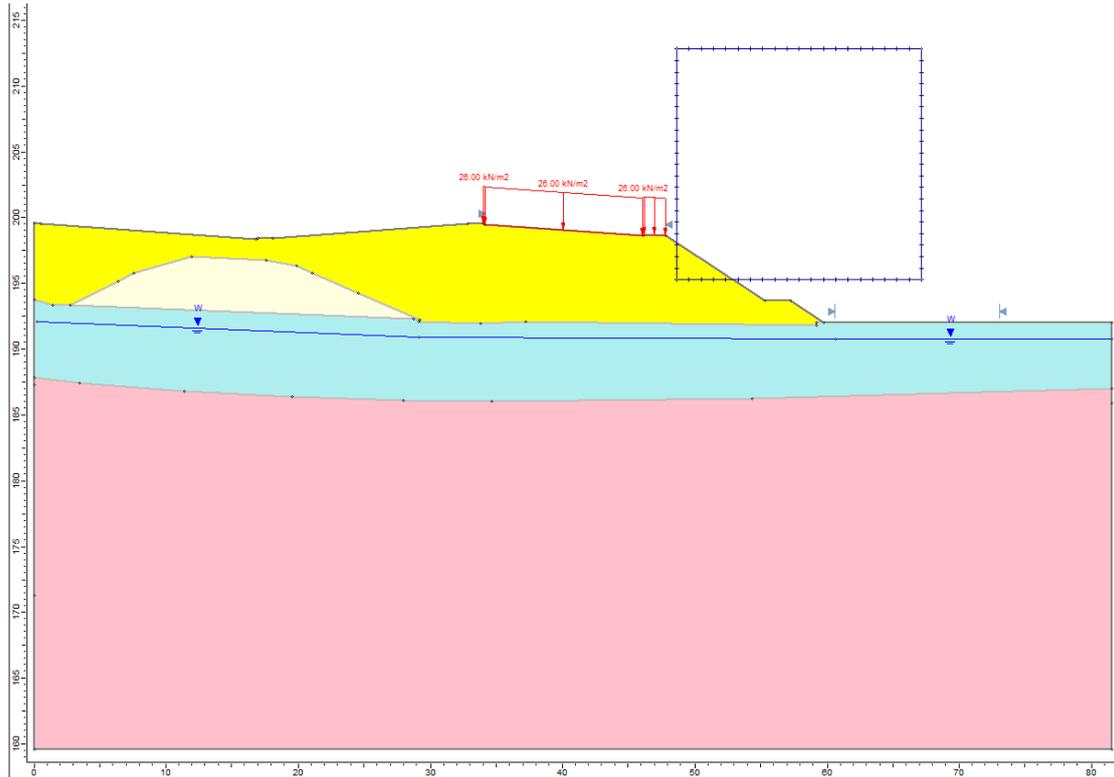


Figura 26 – Rilevato alla p.k. 4+655 - Modello di calcolo

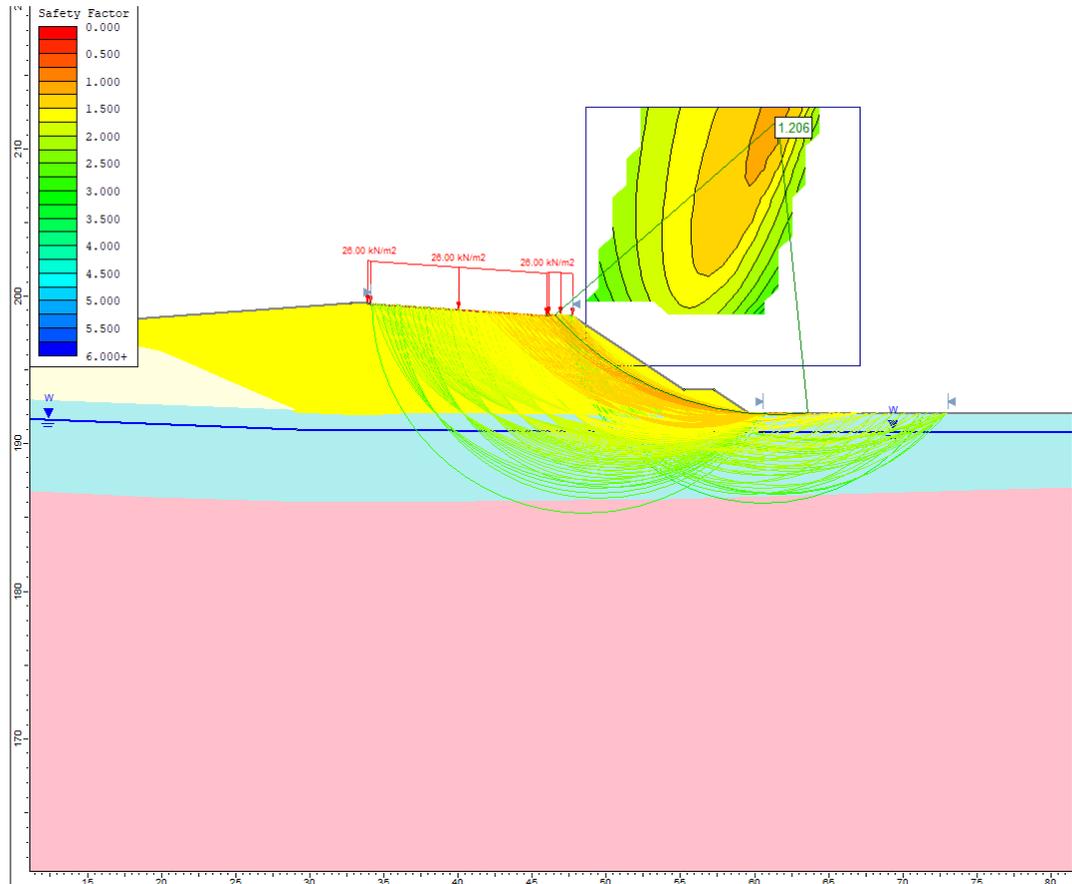


Figura 27 – Rilevato alla p.k. 4+655 – Verifica in condizioni statiche: risultati

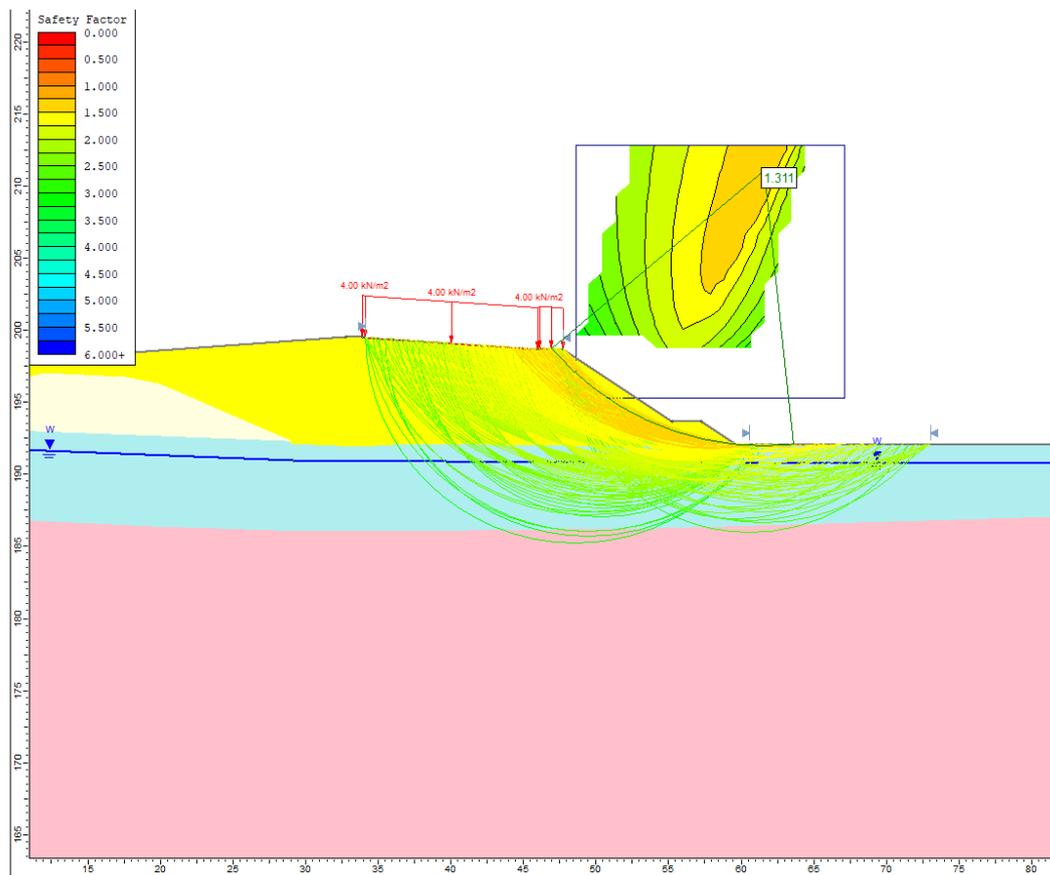


Figura 28 – Rilevato alla p.k. 4+655 – Verifica in condizioni sismiche (sisma+): risultati

## 13 VERIFICHE DEI CEDIMENTI DEI RILEVATI

Nei seguenti paragrafi viene descritto il metodo di calcolo impiegato per la stima dei cedimenti dei rilevati in progetto e sono presentati i risultati delle analisi eseguite in corrispondenza di differenti sezioni di calcolo.

### 13.1 Metodologia di calcolo dei cedimenti

Il calcolo dei cedimenti ha come obiettivo la determinazione delle deformazioni verticali del terreno indotte dai carichi agenti rappresentati dalla nuova sede stradale. La risultante delle deformazioni verticali che si manifestano in un terreno è comunemente indicata con il termine "cedimento" e di tale grandezza, nella pratica ingegneristica, interessa di solito conoscere sia l'entità sia l'evoluzione nel tempo.

La stima del valore di cedimento atteso è legata alle varie fasi di carico e dipende dal tipo di terreno incontrato.

In generale, i cedimenti che si verificano per effetto di deformazioni elasto-plastiche indotte dal carico applicato, sono definiti come cedimenti primari  $S_t$ , ottenuti dalla somma del cedimento immediato (o distorsionale)  $S_o$ , che si sviluppa nel momento in cui viene applicato il carico, ovvero al tempo uguale  $t=0$ , e quello di consolidazione primaria ( $S_c$ ), che avviene al tempo  $t > 0$ . Il cedimento primario è espresso in funzione delle suddette aliquote secondo l'espressione seguente:

$$S_t = S_o + S_c.$$

Il processo di consolidazione primaria è volto al termine quando tutte le sovrappressioni neutre, che sono state indotte dall'applicazione del carico, si sono dissipate e il sovraccarico totale applicato è interamente sopportato dallo scheletro solido (cioè interamente equilibrato da un incremento delle pressioni verticali efficaci). Non essendoci più variazioni di tensioni efficaci il terreno è in equilibrio con il carico esterno applicato.

Quasi al termine del processo di consolidazione primaria, in funzione delle caratteristiche dei terreni, è possibile che si verifichino delle deformazioni di tipo viscoso dello scheletro solido; tali deformazioni, che avvengono anche a pressione efficace costante, e quindi anche (ma non solo) a consolidazione primaria esaurita in assenza di carico, generano i così detti cedimenti secondari.

Nei terreni granulari, ad elevata permeabilità, il processo di consolidazione primaria è molto rapido, quindi il cedimento distorsionale e quello volumetrico si verificano praticamente contemporaneamente durante la fase di costruzione. Nel seguito quindi il contributo degli strati granulari verrà considerato nella sola stima del cedimento immediato.

Nella figura sottostante è rappresentato uno schema in cui in corrispondenza della storia temporale dei carichi, sono associati i corrispondenti cedimenti relativi al processo di consolidazione primaria e secondaria.

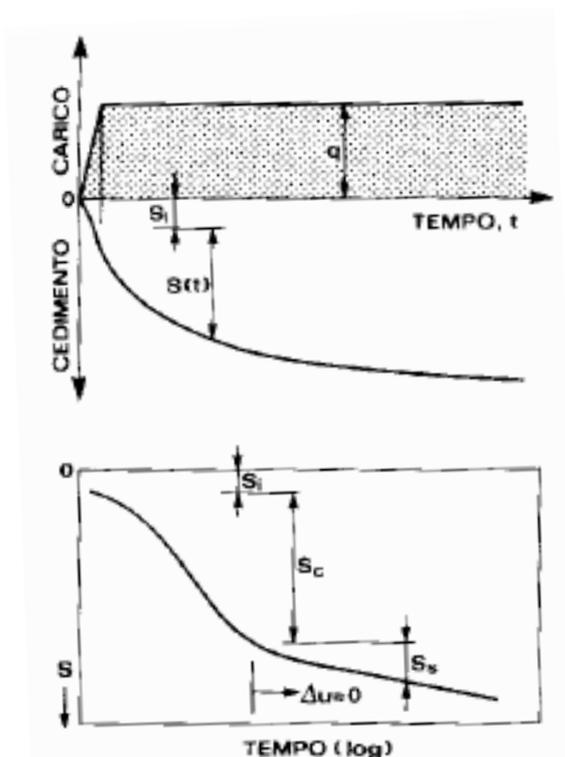


Figura 29 - Schema di riferimento curva carico-cedimenti (Viggiani, 1990)

Si tenga presente che la sommatoria dei cedimenti verticali è stata estesa a tutti gli strati, per i quali si producono incrementi degli sforzi verticali superiori al 10% dello sforzo verticale geostatico. In funzione di tale valore viene fissato lo spessore della zona compressibile ( $H_c$ ).

## 13.2 Cedimenti: immediati e di consolidazione

### 13.2.1 Terreni granulari

Gli spostamenti verticali indotti dal carico applicato nei terreni granulari sono calcolati mediante l'espressione di seguito riportata:

$$S_t = \sum_i^n \frac{[\Delta\sigma_{zi} - \nu'(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi})]h_i}{E'_i}$$

con:

$S_t$  = cedimento immediato;

$\Delta\sigma_{xi}$ ,  $\Delta\sigma_{yi}$ ,  $\Delta\sigma_{zi}$  = incrementi di sforzo indotti dal carico applicato di rilevato nello strato i-esimo. Tali incrementi sono calcolati mediante la teoria dell'elasticità, secondo le soluzioni di Boussinesq;

$h_i$  = spessore dello strato i-esimo;

$E'_i$  = modulo di Young dello strato i-esimo ( $E_{25}$ ).

$\nu'$  = coefficiente di Poisson dello strato i-esimo = 0.25;

$n$  = numero di strati, appartenenti al volume di terreno interessato dagli spostamenti.

### 13.2.2 Terreni coesivi sovraconsolidati ( $OCR > 1$ )

Per i terreni coesivi sovraconsolidati si considera, secondo quanto suggerito in (Lancellotta, 1980):

$$S_t = S_{ed};$$

$$S_{ed} = S_o + S_c.$$

in cui

$S_t$  = cedimento primario o di fine consolidazione;

$S_{ed}$  = cedimento edometrico;

$S_o$  = cedimento immediato.

$S_c$  = cedimento di consolidazione.

In genere il cedimento immediato atteso per questi materiali è compreso tra 1/3 e 2/3 rispetto al valore del cedimento di prima consolidazione:  $1/3 S_t < S_o < 2/3 S_t$ .

Il cedimento edometrico è dato dalle seguenti espressioni:

$$S_{ed} = \begin{cases} \sum_i^n h_i \cdot RR_i \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{z0i} + \Delta\sigma_{zi}}{\sigma'_{z0i}}\right) & \text{se } (\sigma'_{z0i} + \Delta\sigma_{zi}) \leq \sigma'_{pi} \\ \sum_i^n h_i \cdot \left[ RR_i \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{pi}}{\sigma'_{z0i}}\right) + CR_i \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{z0i} + \Delta\sigma_{zi}}{\sigma'_{pi}}\right) \right] & \text{se } (\sigma'_{z0i} + \Delta\sigma_{zi}) > \sigma'_{pi} \end{cases}$$

con:

$h_i$  = spessore dello strato i-esimo;

$RR_i, CR_i$  = rapporto di ricomprensione (RR) e di compressione (CR) dello strato i-esimo;

$\sigma'_{z0i}$  = sforzo verticale in sito;

$\Delta\sigma_{zi}$  = incremento di sforzo verticale indotto dal carico applicato di rilevato nello strato i-esimo, calcolato mediante la teoria dell'elasticità, secondo le soluzioni di Boussinesq;

$\sigma'_{pi}$  = sforzo di preconsolidazione.

### 13.2.3 Terreni coesivi normalconsolidati ( $OCR \approx 1$ )

Per i terreni coesivi normalconsolidati si considera, secondo quanto suggerito in (Lancellotta, 1980), che il cedimento edometrico corrisponda al cedimento di consolidazione e che il cedimento immediato sia circa il 10% di quello edometrico:

$$S_t \sim 1.1 S_{ed};$$

$$S_{ed} = S_c;$$

$$S_o \sim 0.1 S_{ed}.$$

in cui:

$S_t$  = cedimento primario o di fine consolidazione;

$S_{ed}$  = cedimento edometrico;

$S_o$  = cedimento immediato.

$S_c$  = cedimento di consolidazione.

Anche in questo caso il cedimento edometrico è dato dalle seguenti espressioni:

$$S_{ed} = \begin{cases} \sum_i^n h_i \cdot RR_i \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{z0i} + \Delta\sigma_{zi}}{\sigma'_{z0i}}\right) & \text{se } (\sigma'_{z0i} + \Delta\sigma_{zi}) \leq \sigma'_{pi} \\ \sum_i^n h_i \cdot \left[ RR_i \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{pi}}{\sigma'_{z0i}}\right) + CR_i \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{z0i} + \Delta\sigma_{zi}}{\sigma'_{pi}}\right) \right] & \text{se } (\sigma'_{z0i} + \Delta\sigma_{zi}) > \sigma'_{pi} \end{cases}$$

con:

$h_i$  = spessore dello strato i-esimo;

$RR_i, CR_i$  = rapporto di ricomprensione (RR) e di compressione (CR) dello strato i-esimo;

$\sigma'_{z0i}$  = sforzo verticale in sito;

$\Delta\sigma_{zi}$  = incremento di sforzo verticale indotto dal carico applicato di rilevato nello strato i-esimo, calcolato mediante la teoria dell'elasticità, secondo le soluzioni di Boussinesq;

$\sigma'_{pi}$  = sforzo di preconsolidazione.

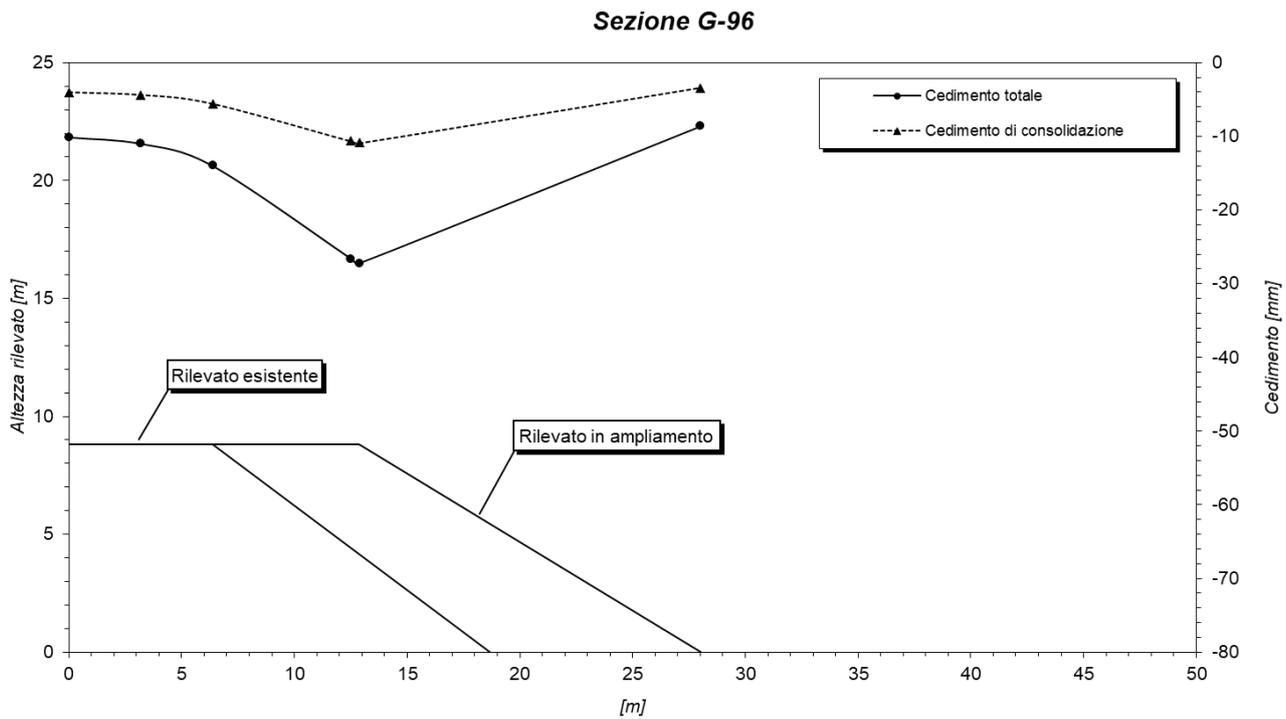
### 13.3 Sintesi dei risultati

La verifica dei cedimenti della sezione di maggiore altezza dei rilevati in progetto è stata eseguita in corrispondenza della sezione G-96 dell'asse principale, ubicata alla p.k. 1+887, in corrispondenza della sezione G-162 dell'asse principale, ubicata alla p.k. 3+148 e in corrispondenza della sezione G-234 dell'asse principale, ubicata alla p.k. 4+655.

#### 13.3.1 Rilevati in affiancamento

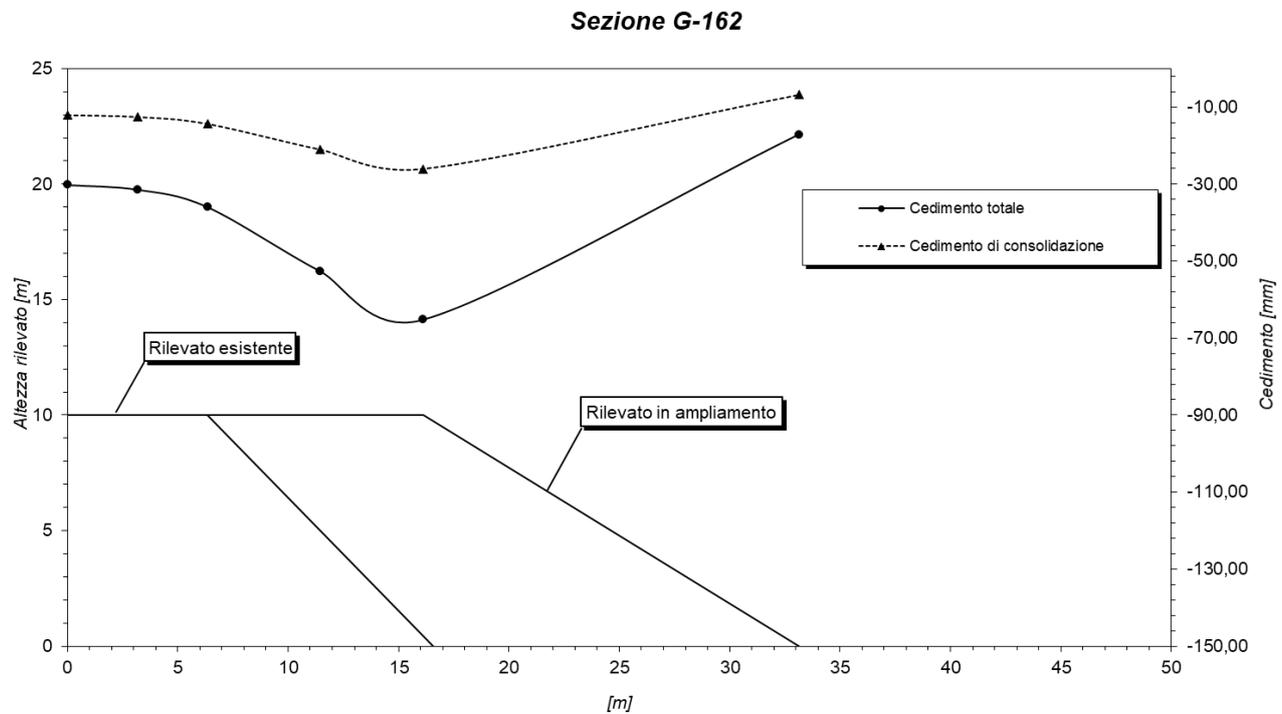
Le sezioni G-96 e G-162 rappresentano due casi di rilevati in affiancamento alla carreggiata esistente, e sono caratterizzate rispettivamente da un'altezza di progetto del nuovo rilevato pari a  $h=8,8$  m e  $h=10,0$  m circa.

Sulla base dei parametri geotecnici caratteristici dei terreni, sulla sezione G-96 è stato calcolato un cedimento massimo pari a 27,2 mm, ubicato in corrispondenza del ciglio del rilevato in ampliamento. Dato che i terreni a base del rilevato sono di natura perlopiù coesiva sovraconsolidata (unità *FAAa, FAA*), i cedimenti calcolati risultano perlopiù immediati (16,3 mm), scontati durante la costruzione dei rilevati, e solo subordinatamente di consolidazione (10,9 mm). I risultati ottenuti sono riassunti nel grafico sottostante (cfr. **Figura 30**).



**Figura 30 - Verifica dei cedimenti dei rilevati – Sezione G-96 – Risultati**

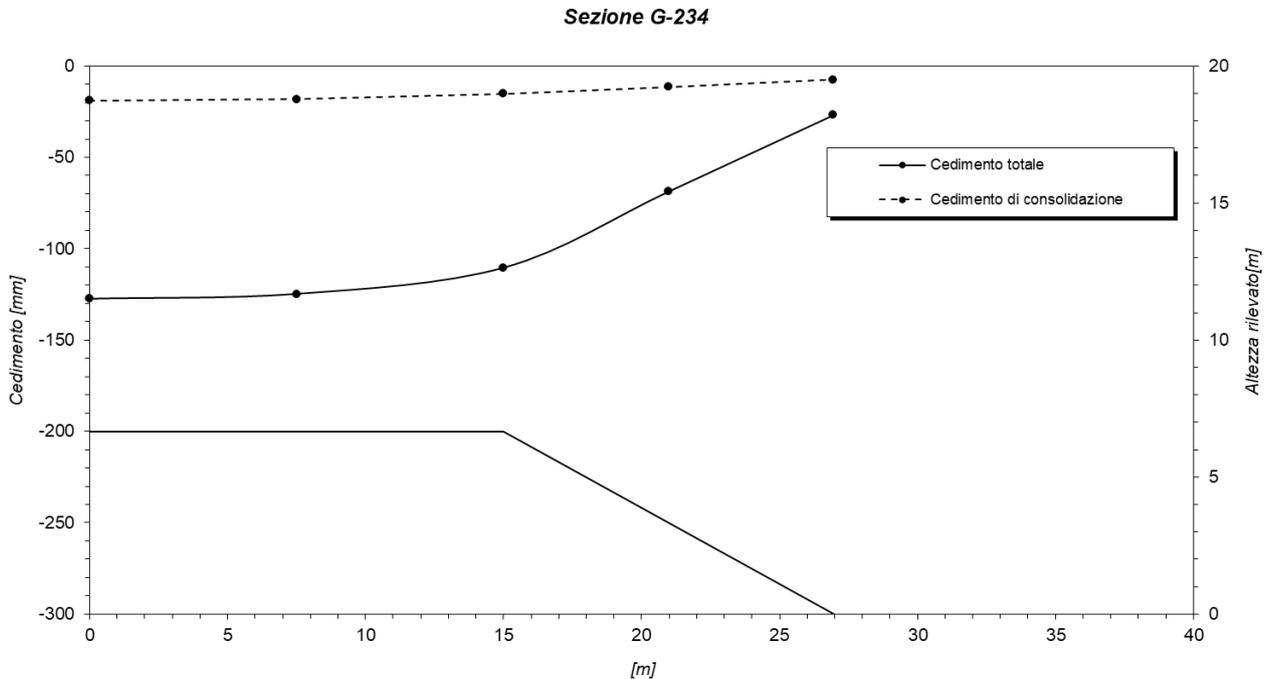
Per la sezione G-162, invece, sulla base dei parametri geotecnici caratteristici dei terreni, è stato calcolato un cedimento massimo pari a 65,2 mm, ubicato in corrispondenza del ciglio del rilevato in ampliamento. Dato che i terreni a base del rilevato sono di natura perlopiù coesiva sovraconsolidata (unità FAAa, FAA), i cedimenti calcolati risultano perlopiù immediati (39,1 mm), scontati durante la costruzione dei rilevati, e solo subordinatamente di consolidazione (26,1 mm). I risultati ottenuti sono riassunti nel grafico sottostante (cfr. **Figura 32**).



**Figura 31 - Verifica dei cedimenti dei rilevati – Sezione G-162 – Risultati**

### 13.3.2 Rilevati di nuova realizzazione

La sezione G-234 è caratterizzata da un'altezza di progetto del rilevato pari a  $h = 6,64$  m circa. Sulla base dei parametri geotecnici caratteristici dei terreni è stato calcolato un cedimento massimo pari a 127,5 mm, ubicato in corrispondenza dell'asse del rilevato. Dato che i terreni a base del rilevato sono di natura perlopiù non coesiva (unità *bg*) o comunque coesiva sovraconsolidata (unità *FAA*), i cedimenti calcolati risultano in gran parte immediati (108,5 mm), scontati durante la costruzione dei rilevati, e solo subordinatamente di consolidazione (19,0 mm). I risultati ottenuti sono riassunti nel grafico sottostante (cfr. **Figura 32**).



**Figura 32 - Verifica dei cedimenti dei rilevati – Sezione G-234 – Risultati**

## 14 MURI DI SOSTEGNO

### 14.1 Metodologia di calcolo

Le verifiche dei muri di sostegno sono condotte secondo il metodo degli Stati Limite, come prescritto dalle "Nuove norme tecniche sulle costruzioni" del 17 gennaio 2018.

Si eseguono verifiche agli stati limite ultimi, con lo scopo di verificare la sicurezza delle opere, e agli stati limite di esercizio, necessarie per verificare che i tassi di lavoro all'interno delle strutture garantiscano i livelli prestazionali richiesti per tutto il periodo di vita utile delle opere.

### 14.2 Verifiche agli Stati Limite Ultimi

Le verifiche sono effettuate con riferimento ai seguenti stati limite:

- SLU di tipo geotecnico (GEO):
  - scorrimento sul piano di posa;
  - collasso per carico limite del complesso fondazione-terreno;
  - ribaltamento;
  - stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno;
- SLU di tipo strutturale (STR)
  - raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali.

Per ogni stato limite considerato si accerta che sia soddisfatta la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove  $E_d$  e  $R_d$  rappresentano rispettivamente le sollecitazioni e le resistenze di progetto.

In accordo con le NTC 2018 le verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU) delle opere in oggetto sono effettuate secondo l'Approccio 2, con la combinazione A1 + M1 + R3 (dove il segno '+' in ossequio alla normativa ha il significato di 'combinato con').

I fattori di sicurezza parziali sulle azioni (A1), sui parametri geotecnici (M1) e sulle resistenze (R3) sono riportati rispettivamente in **Tabella 25**, **Tabella 26** e **Tabella 27**.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) per la spinta delle terre si faccia riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

**Tabella 25** - Coefficienti parziali  $\gamma_F$  e  $\gamma_E$  per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tabella 6.2.I NTC 18)

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

**Tabella 26** - Coefficienti parziali  $\gamma_M$  per i parametri geotecnici del terreno (Tabella 6.2.II NTC 18).

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE
	(R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$

**Tabella 27** - Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche agli stati limite ultimi di muri di sostegno (Tabella 6.5.I NTC 18)

La verifica di stabilità globale dell'insieme terreno-opera è effettuata secondo l'Approccio 1, Combinazione 2:

## A2+M2+R2

Il coefficiente parziale sulla resistenza R2 è pari a 1.1 (come riportato nella Tabella 6.8.I delle NTC2018), mentre i coefficienti A2 e M2 sono quelli già citati in precedenza.

Le verifiche degli stati limite ultimi in presenza di **azioni sismiche** devono essere eseguite ponendo pari a 1 i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto, con i coefficienti parziali  $\gamma_R$  indicati nel Capitolo 7 delle NTC 2018 e riportate in **Tabella 28**.

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE
	(R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,2$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,0$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,0$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,2$

**Tabella 28** - Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche agli stati limite ultimi in condizioni sismiche di muri di sostegno (Tabella 7.11.III NTC 18)

Anche per le verifiche di stabilità del complesso muro terreno si pongono pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e si impiegano le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a  $\gamma_R = 1.2$ .

### 14.2.1 Verifica a ribaltamento

Per la verifica a ribaltamento del muro si valutano il momento stabilizzante e quello ribaltante, controllando che il rapporto tra i due sia maggiore di  $\gamma_R = 1.15$  per le combinazioni statiche (Tabella 27) e  $\gamma_R = 1.0$  per le combinazioni sismiche (Tabella 28):

$$F_S = \frac{M_{STAB}}{M_{RIB}} = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot N_i \cdot b_{i-ORIZ(O)}}{\sum_i \beta_i \cdot V_i \cdot b_{i-vert}} \geq \gamma_R$$

dove:  $\alpha_i$  = coefficiente di combinazione della forza  $N_i$ ;

$N_i$  = forza stabilizzante;

$b_{i-ORIZ(O)}$  = braccio della forza verticale rispetto al centro di rotazione;

$\beta_i$  = coefficiente di combinazione della forza  $V_i$ ;

$V_i$  = forza instabilizzante;

$b_{i-vert}$  = braccio della forza orizzontale rispetto al centro di rotazione.

### 14.2.2 Verifica a scivolamento

Nelle verifiche a scivolamento si valutano i valori delle forze resistenti e delle forze sollecitanti e si verifica che la seguente espressione risulti maggiore di  $\gamma_R = 1.1$  per le combinazioni statiche (Tabella 27) e  $\gamma_R = 1.0$  per le combinazioni sismiche (cfr. **Tabella 28**):

$$F_S = \frac{T_{RES}}{T_{SOLL}} = \frac{\mu \cdot \sum_i \alpha_i \cdot N_i}{\sum_i \beta_i \cdot V_i} \geq \gamma_R$$

dove:  $\mu$  = coefficiente di attrito terreno/fondazione (posto pari alla tangente dell'angolo d'attrito  $\delta$  fra terreno e fondazione assunto pari ai 2/3 dell'angolo d'attrito  $\phi$  del terreno di fondazione);

$\alpha_i$  = coefficiente di combinazione della forza  $N_i$ ;

$N_i$  = forza verticale che genera un contributo resistente allo scorrimento;

$\beta_i$  = coefficiente di combinazione della forza  $V_i$ ;

$V_i$  = forza sollecitante.

### 14.2.3 Verifica di capacità portante della fondazione

La verifica di capacità portante della fondazione di un muro è soddisfatta se il rapporto tra la pressione limite e la pressione equivalente sul terreno risulta maggiore di  $\gamma_R = 1.4$  per le combinazioni statiche (cfr. **Tabella 27**) e  $\gamma_R = 1.2$  per le combinazioni sismiche (Tabella 28):

$$F_S = \frac{q_{lim}}{\sigma_{Sd}} \geq \gamma_R$$

dove:  $\sigma_{Sd}$  = pressione equivalente sul terreno;

$q_{lim}$  = pressione limite della fondazione, calcolata secondo Brinch-Hansen.

## 14.3 Verifiche agli Stati Limite di Esercizio

### 14.3.1 Verifiche di limitazione delle tensioni in esercizio

Le Verifiche di limitazione delle tensioni in condizioni di esercizio (SLE) sono svolte con riferimento ai valori caratteristici delle azioni e dei parametri di resistenza dei materiali e consistono nel controllare che i valori di tensione nei materiali strutturali siano inferiori ai limiti di normativa (punto 4.1.2.2.5 del D.M. 17/01/2018).

- Calcestruzzo compresso:
  - Combinazione caratteristica o rara  $\sigma_c < 0.60 \cdot f_{ck}$
  - Combinazione quasi permanente  $\sigma_c < 0.45 \cdot f_{ck}$
- Acciaio teso:
  - Combinazione caratteristica o rara  $\sigma_s < 0.80 \cdot f_{yk}$

### 14.3.2 Verifiche a fessurazione

Per poter procedere alle verifiche a fessurazione è necessario effettuare una valutazione relativa al grado di protezione delle armature metalliche contro la corrosione (in termini di condizioni ambientali e sensibilità delle armature stesse alla corrosione).

La **Tabella 29** riassume le condizioni ambientali previste dalle NTC 2018 in funzione delle classi di esposizione.

Condizioni ambientali	Classe di esposizione
Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto Aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4,

**Tabella 29** - Descrizione delle condizioni ambientali (da Tabella 4.1.III NTC 18)

Le armature possono essere distinte in:

- armature sensibili;
- armature poco sensibili.

I valori limite di apertura delle fessure ottenuti in base alle condizioni ambientali, alla sensibilità delle armature e alla combinazione di azioni sono riportati in **Tabella 30**.

Gruppi di esigenze	Condizioni ambientali	Combinazioni di azioni S.L.E.	Armature	$w_d$	Armature	
A	Ordinarie	frequente	Poco sensibili	$\leq w_3 = 0.4\text{mm}$	Sensibili	$\leq w_2 = 0.3\text{mm}$
		quasi permanente		$\leq w_2 = 0.3\text{mm}$		$\leq w_1 = 0.2\text{mm}$
B	Aggressive	frequente	Poco sensibili	$\leq w_2 = 0.3\text{mm}$	Sensibili	$\leq w_1 = 0.2\text{mm}$
		quasi permanente		$\leq w_1 = 0.2\text{mm}$		-
C	Molto aggressive	frequente	Poco sensibili	$\leq w_1 = 0.2\text{mm}$	Sensibili	-
		quasi permanente		$\leq w_1 = 0.2\text{mm}$		-

**Tabella 30** - Criteri di scelta dello stato limite di fessurazione (da Tabella 4.1.IV NTC 18)

#### 14.4 Azioni sismiche

L'azione sismica di progetto, desunta dal D.M. del 17/01/2018, deriva dalla pericolosità sismica di base del sito; in particolare, viene definita a partire dall'accelerazione orizzontale massima attesa in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale ( $a_g$ ).

Lo stato limite di esercizio indagato è lo Stato Limite di Danno (SLD), lo stato limite ultimo indagato è lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV).

A partire dalle accelerazioni su suolo rigido si ricavano le accelerazioni attese al sito ( $a_{max}$ ), ottenute moltiplicando  $a_g$  per i coefficienti correttivi che tengono conto delle possibili amplificazioni del moto del suolo dovute a effetti stratigrafici ( $S_s$ ) e topografici ( $S_T$ ):

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

I coefficienti sismici di progetto per le verifiche geotecniche e strutturali dei muri si deducono, in accordo con il D.M. del 17/01/2018, sulla base delle relazioni:

$$k_h = \beta_m \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

dove  $\beta_m$  è il coefficiente che porta in conto la riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito a causa della deformabilità dell'opera ed è pari a  $\beta_m = 0.47$  per lo Stato Limite di Danno e  $\beta_m = 0.38$  per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita.

Lo stato limite di ribaltamento deve essere trattato impiegando valori di  $\beta_m$  incrementati del 50% e comunque non superiori all'unità.

Per i muri non liberi di subire spostamenti relativi rispetto al terreno il coefficiente  $\beta_m$  assume valore unitario.

Per muri di sostegno ubicati in corrispondenza di versanti o in prossimità di pendii naturali devono essere soddisfatte le condizioni di stabilità del pendio, in presenza della nuova opera, con i metodi di analisi di cui al paragrafo 7.11.3.5 delle NTC 2018. Deve inoltre essere soddisfatta la verifica di stabilità del complesso muro-terreno con i criteri indicati al paragrafo 7.11.4 delle NTC 2018.

I coefficienti sismici di progetto per la verifica di stabilità globale dell'insieme terreno-opera si deducono, sulla base delle seguenti relazioni:

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{\max}}{g} \quad k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

Dove il valore del coefficiente  $\beta_s$ , che porta in conto la riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito a causa della deformabilità dell'opera, può essere desunto dalle indicazioni fornite nelle NTC 2018 ai paragrafi di cui sopra.

## 14.5 Analisi dei carichi

I carichi da considerare (se presenti) nell'analisi di un muro di sostegno sono:

- peso proprio degli elementi strutturali;
- carichi permanenti, tra cui ad esempio il peso del materiale di riempimento a tergo del muro);
- carichi accidentali, tra cui ad esempio il sovraccarico stradale;
- carichi eccezionali dovuti all'urto dei veicoli contro la barriera di sicurezza posta in sommità al muro;
- forze d'inerzia da considerarsi in fase sismica.

## 14.6 Spinta delle terre in fase statica

### 14.6.1 Coefficienti di spinta

#### 14.6.1.1 Coefficiente di spinta a riposo

Il coefficiente di spinta a riposo è calcolato attraverso le seguenti formulazioni:

$$k_0 = 1 - \text{sen}\phi \quad \text{per i terreni normalconsolidati}$$
$$k_0 = (1 - \text{sen}\phi) \cdot \sqrt{OCR} \quad \text{per i terreni sovraconsolidati}$$

con:

$\phi$  angolo di attrito interno del terreno

OCR grado di sovraconsolidazione del terreno

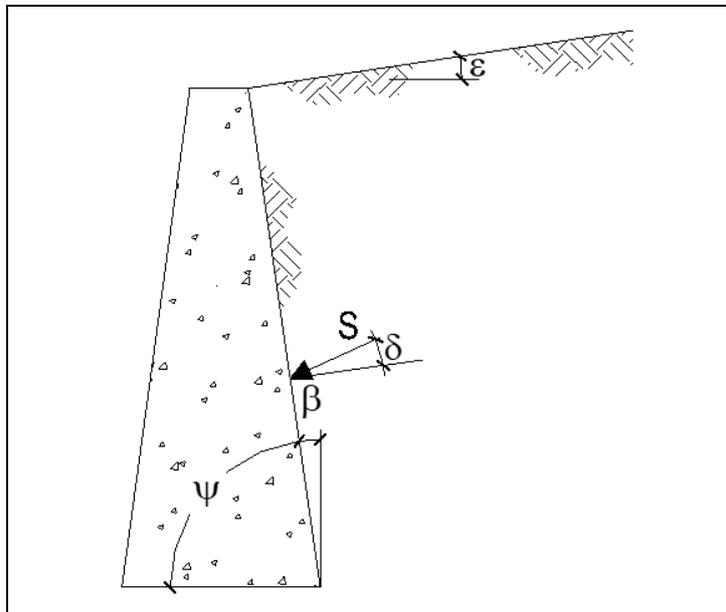
#### 14.6.1.2 Coefficiente di spinta attiva in fase statica

Il coefficiente di spinta attiva in fase statica è stato calcolato attraverso la relazione di Coulomb di seguito riportata.

Per le verifiche geotecniche, il coefficiente di spinta attiva a tergo del muro è stato valutato assumendo un'inclinazione della spinta delle terre  $\delta$  al massimo pari a  $2/3$  dell'angolo d'attrito del terreno di riempimento  $\phi$ , mentre per il calcolo delle sollecitazioni agenti sulla parte in elevazione del muro l'attrito terreno-muro è stato considerato, cautelativamente, nullo.

La relazione di Coulomb per il calcolo del coefficiente di spinta attiva è la seguente:

$$k_a = \frac{\text{sen}^2(\psi + \phi')}{\text{sen}^2\psi \cdot \text{sen}(\psi - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi' + \delta) \cdot \text{sen}(\phi' - \varepsilon)}{\text{sen}(\psi - \delta) \cdot \text{sen}(\psi + \varepsilon)}} \right]^2}$$



**Figura 33** - Rappresentazione grafica degli angoli presenti nell'espressione di Coulomb per il calcolo di  $k_a$

Gli angoli, rappresentati in Figura 33, assumono i seguenti significati:

$\phi$  angolo di attrito interno del terreno

$\psi$  inclinazione del paramento di monte del muro

$\delta$  angolo d'attrito lungo la superficie di rottura

$\varepsilon$  inclinazione del pendio a monte

### 14.6.2 Spinta del terreno

Per i muri liberi di subire spostamenti relativi rispetto al terreno le spinte del terreno sono valutate mediante le seguenti relazioni:

$$S_{ter,d} = \frac{1}{2} \cdot k_{a,d} \cdot \gamma_d \cdot H^2 - 2\sqrt{k_{a,d}} \cdot c'_d \cdot H$$

$$c'_d = \frac{c'_k}{\gamma_{c'}} \quad \text{con } \gamma_{c'} \text{ da Tabella 26}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_k}{\gamma_\gamma} \quad \text{con } \gamma_\gamma \text{ da Tabella 26}$$

con:

$\gamma_k$  valore caratteristico del peso del terreno da rilevato per unità di volume

$c'_k$  valore caratteristico della coesione efficace del terreno da rilevato

$k_{a,d}$  coefficiente di spinta attiva di progetto secondo la relazione di Coulomb calcolato considerando un angolo d'attrito muro-terreno paria a  $2/3 \cdot \phi$  (vedi paragrafo 14.6.1)

$H$  profondità alla quale si calcola la sollecitazione

Per i muri vincolati le spinte del terreno sono valutate mediante le seguenti relazioni:

$$S_{ter,d} = \frac{1}{2} \cdot k_{0,d} \cdot \gamma_d \cdot H^2$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_k}{\gamma_\gamma} \quad \text{con } \gamma_\gamma \text{ da Tabella 26}$$

con:

$\gamma_k$  valore caratteristico del peso del terreno da rilevato per unità di volume

$k_{0,d}$  coefficiente di spinta a riposo di progetto (vedi paragrafo 14.6.1)

### 14.6.3 Spinta dei sovraccarichi permanenti

Per i muri liberi di subire spostamenti relativi rispetto al terreno le spinte dovute all'azione del sovraccarico permanente sono valutate mediante la seguente relazione:

$$S_{perm,d} = k_{a,d} \cdot q_{per,d} \cdot H$$

dove:

$q_{perm}$  valore di progetto del sovraccarico permanente

$k_{a,d}$  coefficiente di spinta attiva secondo la relazione di Coulomb calcolato considerando un angolo d'attrito muro-terreno paria a  $2/3 \cdot \phi$  (vedi paragrafo 14.6.1)

$H$  profondità alla quale si calcola la sollecitazione

Per i muri vincolati le spinte dovute all'azione del sovraccarico permanente sono valutate mediante la seguente relazione:

$$S_{perm,d} = k_{0,d} \cdot q_{per,d} \cdot H$$

dove:

$k_{0,d}$  coefficiente di spinta a riposo di progetto (vedi paragrafo **14.6.1**)

#### **14.6.4 Spinta dei sovraccarichi accidentali**

Per i muri liberi di subire spostamenti relativi rispetto al terreno le spinte dovute all'azione del sovraccarico accidentale sono valutate mediante le seguenti relazioni:

$$S_{acc,d} = k_{a,d} \cdot q_{acc,d} \cdot H$$

dove:

$q_{acc}$  valore di progetto del sovraccarico accidentale

$k_{a,d}$  coefficiente di spinta attiva secondo la relazione di Coulomb calcolato considerando un angolo d'attrito muro-terreno paria a  $2/3 \cdot \phi$  (vedi paragrafo **14.6.1**)

$H$  profondità alla quale si calcola la sollecitazione

Per i muri vincolati le spinte dovute all'azione del sovraccarico accidentale sono valutate mediante la seguente relazione:

$$S_{acc,d} = k_{0,d} \cdot q_{acc,d} \cdot H$$

dove:

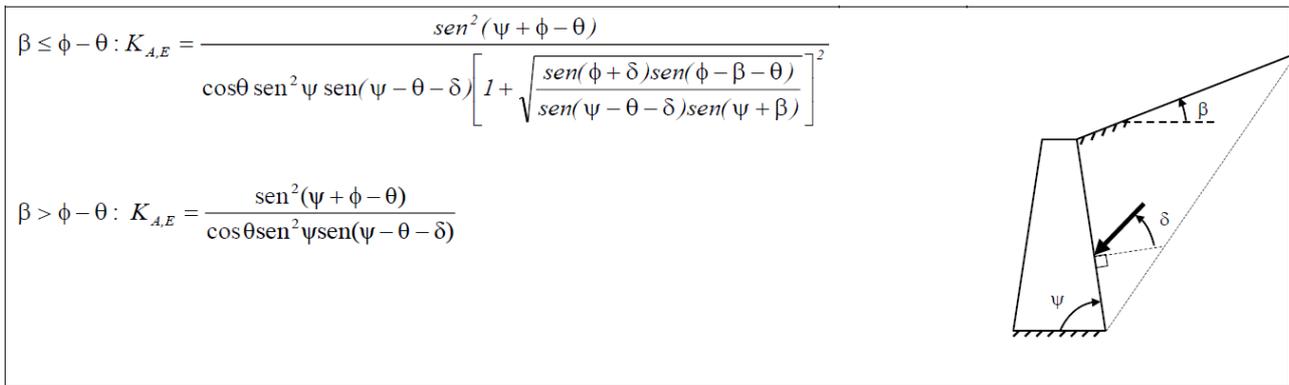
$k_{0,d}$  coefficiente di spinta a riposo di progetto (vedi paragrafo 14.6.1)

### **14.7 Spinta delle terre in fase sismica**

#### **14.7.1 Coefficienti di spinta**

##### 14.7.1.1 Coefficiente di spinta attiva in fase sismica

Il coefficiente di spinta attiva in fase sismica è stato valutato mediante la relazione di Mononobe – Okabe ipotizzando che la componente sismica orizzontale agisca contemporaneamente alla componente sismica verticale (assunta dapprima verso l'alto e poi verso il basso). Il coefficiente di spinta attiva in fase sismica assume l'espressione riportata in **Figura 34**:



**Figura 34** - Relazione di Mononobe – Okabe per il calcolo di  $k_{a,sism}$

La convenzione con cui sono definiti gli angoli presenti nell'espressione di Mononobe – Okabe è riportata in **Figura 34**; inoltre si definisce l'angolo  $\vartheta = \arctan\left(\frac{k_h}{1 \pm k_v}\right)$

Con il simbolo '↑' si intende che l'accelerazione sismica verticale è stata assunta positiva verso l'alto, e viceversa con '↓'.

Per il calcolo dei coefficienti  $k_h$  e  $k_v$ , necessari per la determinazione dell'angolo  $\vartheta$ , si veda quanto riportato al paragrafo 14.4.

### 14.7.2 Spinta del terreno

La spinta del terreno in fase sismica è valutata come la somma della spinta attiva in condizioni statiche e dell'incremento di spinta attiva in condizioni sismiche, mediante le seguenti relazioni:

$$S_{ter,d} = S_{a,d} + \Delta S_{a,sism,d}$$

$$\Delta S_{a,sism,d} = S_{a,sism,d} - S_{a,d}$$

$$S_{a,d} = \frac{1}{2} \cdot k_{a,d} \cdot \gamma_d \cdot H^2 - 2\sqrt{k_{a,d}} \cdot c'_d \cdot H$$

$$S_{a,sism,d} = \frac{1}{2} \cdot k_{a,sism,d} \cdot \gamma_d \cdot H^2 - 2\sqrt{k_{a,sism,d}} \cdot c'_d \cdot H$$

$$c'_d = \frac{c'_k}{\gamma_{c'}} \quad \text{con } \gamma_{c'} \text{ da Tabella 26}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_k}{\gamma_\gamma} \quad \text{con } \gamma_\gamma \text{ da Tabella 26}$$

con:

$\gamma_k$  valore caratteristico del peso del terreno da rilevato per unità di volume

$c'_k$  valore caratteristico della coesione efficace del terreno da rilevato

- $k_{a,d}$  coefficiente di spinta attiva di progetto secondo la relazione di Coulomb calcolato considerando un angolo d'attrito muro-terreno paria a  $2/3 \cdot \phi$  (vedi paragrafo **14.6.1**)
- $k_{a,sism,d}$  coefficiente di spinta attiva sismica di progetto secondo Mononobe-Okabe calcolato considerando un angolo d'attrito muro-terreno paria a  $2/3 \cdot \phi$  (vedi paragrafo **14.7.1.1**)
- $H$  profondità alla quale si calcola la sollecitazione

Per i muri liberi di subire spostamenti relativi rispetto al terreno si considera che la spinta attiva in condizioni statiche  $S_{a,d}$  e l'incremento di spinta attiva dovuto al sisma  $\Delta S_{a,sism,d}$  siano entrambe prodotte da un andamento delle tensioni orizzontali di tipo lineare.

Diversamente, per i muri vincolati, la spinta attiva in condizioni statiche  $S_{a,d}$  è considerata ancora come risultante di un andamento delle tensioni orizzontali di tipo lineare, mentre l'incremento di spinta attiva in condizioni sismiche  $\Delta S_{a,sism,d}$  è considerato come risultante di un andamento costante delle tensioni orizzontali.

### **14.7.3 Spinta dei sovraccarichi permanenti**

Le spinte dovute all'azione del sovraccarico permanente sono valutate mediante la seguente relazione:

$$S_{perm,d} = k_{a,sism,d} \cdot q_{per,d} \cdot H$$

dove:

- $q_{perm}$  valore di progetto del sovraccarico permanente
- $k_{a,sism,d}$  coefficiente di spinta attiva sismica di progetto secondo Mononobe-Okabe calcolato considerando un angolo d'attrito muro-terreno paria a  $2/3 \cdot \phi$  (vedi paragrafo **14.7.1.1**)
- $H$  profondità alla quale si calcola la sollecitazione

### **14.7.4 Spinta dei sovraccarichi accidentali**

Le spinte dovute all'azione del sovraccarico accidentale sono valutate mediante le seguenti relazioni:

$$S_{acc,d} = k_{a,sism,d} \cdot q_{acc,d} \cdot H$$

dove:

- $q_{acc}$  valore di progetto del sovraccarico accidentale
- $k_{a,sism,d}$  coefficiente di spinta attiva sismica di progetto secondo Mononobe-Okabe calcolato considerando un angolo d'attrito muro-terreno paria a  $2/3 \cdot \phi$  (vedi paragrafo **14.7.1.1**)
- $H$  profondità alla quale si calcola la sollecitazione

## 15 OPERE DI SOSTEGNO FLESSIBILI

Per opere di sostegno flessibili si intendono le seguenti tipologie di paratie:

- diaframmi;
- paratie di pali;
- berlinesi;
- palancole.

### 15.1 Metodologia di calcolo: condizioni statiche

#### 15.1.1 Stato limite ultimo (SLU)

La progettazione di una paratia, alla luce delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018, deve considerare i seguenti stati limite ultimi:

- SLU di tipo geotecnico (GEO) e di tipo idraulico (UPL e HYD):
  - Collasso per rotazione attorno a un punto dell'opera
  - Collasso per carico limite verticale
  - Sfilamento di uno o più ancoraggi
  - Instabilità del fondo scavo in terreni a grana fine in condizioni non drenate
  - Instabilità del fondo scavo per sollevamento
  - Sifonamento del fondo scavo
  - Instabilità globale dell'insieme terreno-opera
- SLU di tipo strutturale (STR)
  - Raggiungimento della resistenza in uno o più ancoraggi
  - Raggiungimento della resistenza in uno o più puntoni o sistemi di contrasto
  - Raggiungimento della resistenza strutturale della paratia

La verifica di stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno deve essere effettuata secondo la Combinazione 2 dell'Approccio 1 – A2+M2+R2, tenendo conto dei coefficienti parziali riportati in **Tabella 31** e **Tabella 32**.

Le verifiche allo stato limite ultimo, tra cui le verifiche strutturali dei tiranti, devono essere effettuate considerando due combinazioni di coefficienti, la prima generalmente dimensionante dal punto di vista strutturale, la seconda dal punto di vista geotecnico:

Comb 1: A1+M1+R1

Comb 2: A2+M2+R1

*Azioni (coefficienti A):*

La seguente tabella riporta i fattori di sicurezza parziali da applicare alle azioni nelle diverse combinazioni di carico.

carichi	effetto	coefficiente parziale	EQU	A1 (STR)	A2 (GEO)
Permanenti	favorevole	$\gamma_{G1}$	0.9	1.0	1.0
	sfavorevole		1.1	1.3	1.0
Permanenti non strutturali	favorevole	$\gamma_{G2}$	0.8	0.8	0.8
	sfavorevole		1.5	1.5	1.3
Variabili	favorevole	$\gamma_{Qi}$	0.0	0.0	0.0
	sfavorevole		1.5	1.5	1.3

**Tabella 31** - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

**Parametri geotecnici (coefficienti M):**

Le analisi allo stato limite ultimo prevedono l'utilizzo di due set di parametri: i parametri caratteristici e i parametri ridotti. I primi sono deducibili da prove in sito o di laboratorio su campioni significativi, i secondi sono ricavabili riducendo i parametri caratteristici con i coefficienti M2:

Parametro	simbolo	coefficiente parziale	M1	M2
tangente angolo di attrito	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1.00	1.25
coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1.00	1.25
resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1.00	1.40
peso unità di volume	$\gamma$	$\gamma_{\gamma}$	1.00	1.00

**Tabella 32** - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

**Resistenze (coefficienti R):**

I coefficienti parziali sulle resistenze assumono i seguenti valori:

$$R1 = 1 \quad \text{nelle analisi SLU e SLE}$$

$$R2 = 1.1 \quad \text{nelle analisi di stabilità globale}$$

Nelle verifiche di sicurezza dei tiranti di ancoraggio devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine.

Gli stati limite ultimi dei tiranti di ancoraggio si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che li compongono.

Per il dimensionamento geotecnico, deve risultare rispettata la condizione  $E_d \leq R_d$  con specifico riferimento ad uno stato limite di sfilamento della fondazione dell'ancoraggio. La verifica di tale condizione può essere effettuata con riferimento alla combinazione A1+M1+R3, tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle **Tabella 31** e **Tabella 32**.

La verifica a sfilamento della fondazione dell'ancoraggio si esegue confrontando la massima azione di progetto  $E_d$  con la resistenza di progetto  $R_{ad}$ , determinata applicando alla resistenza caratteristica  $R_{ak}$  i coefficienti parziali  $\gamma_r$  riportati nella seguente **Tabella 33**.

Tipologia ancoraggio	Simbolo	Coefficiente parziale
Ancoraggi temporanei	$\gamma_r$	1.1
Ancoraggi permanenti	$\gamma_r$	1.2

**Tabella 33** - Coefficienti parziali per la resistenza degli ancoraggi

Il valore caratteristico della resistenza allo sfilamento dell'ancoraggio  $R_{ak}$  può essere determinato mediante metodi di calcolo analitici, utilizzando i valori caratteristici dei parametri geotecnici dedotti dai risultati di prove in sito e/o di laboratorio.

Seguendo tale procedimento, il valore della resistenza caratteristica  $R_{ak}$  può essere ottenuto considerando il minore dei valori derivanti dall'applicazione dei fattori di correlazione  $\xi_{a3}$  e  $\xi_{a4}$  riportati in Tabella 34 rispettivamente al valor medio e al valor minimo delle resistenze  $R_{a,c}$  ottenute dal calcolo.

Per la valutazione dei fattori  $\xi_{a3}$  e  $\xi_{a4}$ , si deve tenere conto che i profili di indagine sono solo quelli che consentono la completa identificazione del modello geotecnico di sottosuolo per il terreno di fondazione dell'ancoraggio.

$$R_{ak} = \min \left( \frac{(R_{a,c})_{medio}}{\xi_{a3}}; \frac{(R_{a,c})_{min}}{\xi_{a4}} \right)$$

Numero di profili di indagine	1	2	3	4	≥ 5
$\xi_{a3}$	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60
$\xi_{a4}$	1,80	1,70	1,65	1,60	1,55

**Tabella 34** - Fattori di correlazione per derivare la resistenza caratteristica dalle prove geotecniche, in funzione del numero  $n$  di profili di indagine

### 15.1.2 Stato Limite di Esercizio (SLE)

In tutti i casi, nelle condizioni di esercizio, gli spostamenti dell'opera di sostegno e del terreno circostante devono essere valutati per verificarne la compatibilità con la funzionalità dell'opera e con la sicurezza e funzionalità di manufatti adiacenti.

Le verifiche allo stato limite d'esercizio vengono eseguite con tutti i coefficienti amplificativi unitari e con i parametri caratteristici dei terreni.

## 15.2 Metodologia di calcolo: condizioni sismiche

Per le paratie devono essere soddisfatte le condizioni di sicurezza nei confronti dei possibili stati limite ultimi (SLV) verificando il rispetto della condizione  $E_d \leq R_d$  ponendo unitari i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto, con i coefficienti parziali  $\gamma_r$  specificati al paragrafo 15.1.

Nelle verifiche, per azioni s'intendono le risultanti delle spinte a tergo della paratia e per resistenze s'intendono le risultanti delle spinte a valle della paratia e le reazioni dei sistemi di vincolo.

Nei metodi pseudo-statici l'azione sismica è definita mediante un'accelerazione equivalente, costante nello spazio e nel tempo. Le componenti orizzontale e verticale  $a_h$  e  $a_v$  dell'accelerazione equivalente devono essere ricavate in funzione delle proprietà del moto sismico atteso nel volume di terreno significativo per l'opera e della capacità dell'opera di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza. In mancanza di studi specifici,  $a_h$  può essere legata all'accelerazione di picco  $a_{max}$  attesa nel volume di terreno significativo per l'opera mediante la relazione:

$$a_h = k_h \cdot g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{max}$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $k_h$  è il coefficiente sismico in direzione orizzontale,  $\alpha \leq 1$  è un coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera e  $\beta \leq 1$  è un coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza.

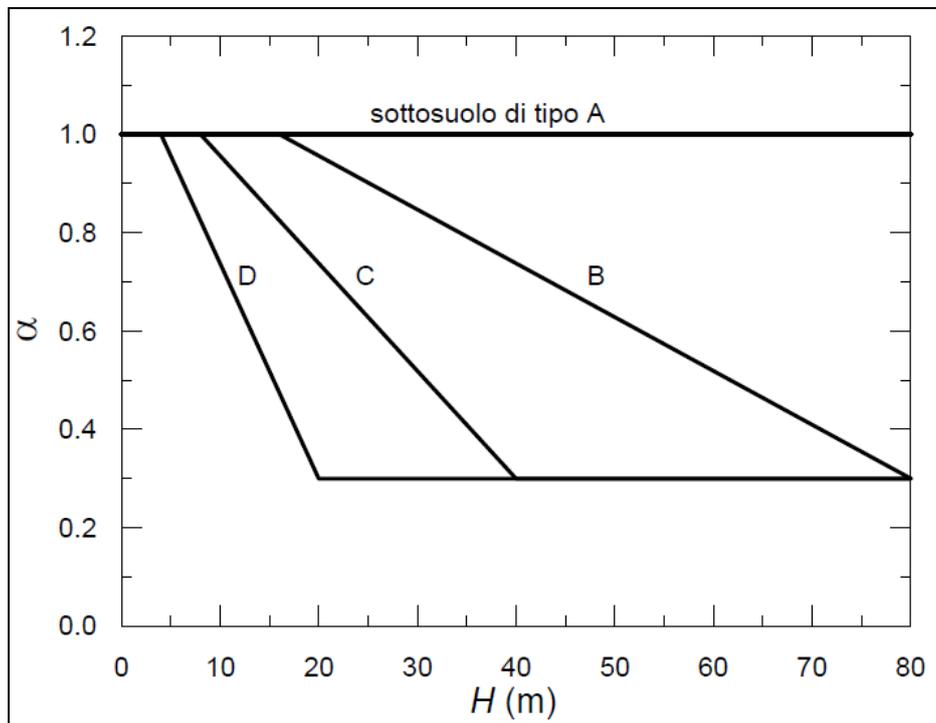
Per le paratie si può porre  $a_v = 0$ .

L'accelerazione di picco  $a_{max}$  è valutata mediante un'analisi di risposta sismica locale, oppure come:

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

dove  $S$  è il coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica ( $S_S$ ) e dell'amplificazione topografica ( $S_T$ ) di cui al paragrafo 3.2.3.2 delle NTC 2018, ed  $a_g$  è l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

Il valore del coefficiente  $\alpha$  può essere ricavato a partire dall'altezza complessiva  $H$  della paratia e dalla categoria di sottosuolo mediante il diagramma riportato in **Figura 35**.



**Figura 35** - Diagramma per la valutazione del coefficiente di deformabilità  $\alpha$

Per la valutazione della spinta nelle condizioni di equilibrio limite passivo deve porsi  $\alpha = 1$ .

Il valore del coefficiente  $\beta$  può essere ricavato dal diagramma di **Figura 36**, in funzione del massimo spostamento permanente  $u_s$  che l'opera può tollerare, verificando l'effettivo sviluppo di meccanismi duttili nel sistema. In assenza di tale verifica, il coefficiente  $\beta$  vale 1.

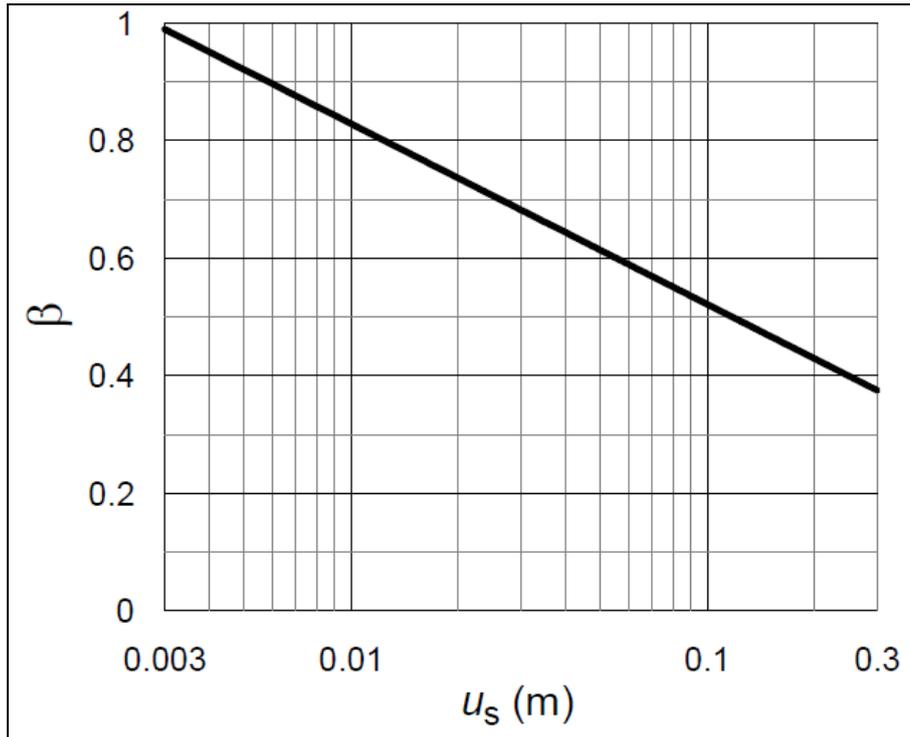
Per  $u_s = 0$  è  $\beta = 1$ . Deve comunque risultare:

$$u_s \leq 0.005 \cdot H$$

Se  $\alpha \cdot \beta \leq 0.2$  deve assumersi  $k_h = 0.2 \cdot a_{max}/g$ .

Possono inoltre essere trascurati gli effetti inerziali sulle masse che costituiscono la paratia.

Per valori dell'angolo di resistenza al taglio tra terreno e parete  $\delta > \phi'/2$ , ai fini della valutazione della resistenza passiva è necessario tener conto della non planarità delle superfici di scorrimento.



**Figura 36** - Diagramma per la valutazione del coefficiente di spostamento  $\beta$

L'analisi di stabilità globale in condizioni sismiche può essere eseguita mediante metodi pseudostatici, nei quali 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. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza. Nelle verifiche allo stato limite ultimo, in mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come  $F_h = k_h \cdot W$  ed  $F_v = k_v \cdot W$ , con  $k_h$  e  $k_v$  rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale:

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

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

Dove  $\beta_s$  è il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito e può essere ricavato dalla **Tabella 35** in base alla categoria di sottosuolo e al valore dell'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	$\beta_s$	$\beta_s$
$0,2 < a_g (g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g (g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g (g) \leq 0,1$	0,20	0,20

**Tabella 35** - Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito

Le verifiche di stabilità globale in condizioni sismiche devono essere eseguite ponendo unitari i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto, con i coefficienti parziali  $\gamma_r$  specificati al paragrafo **15.1**.

### 15.3 Spinta delle terre

#### 15.3.1 Coefficiente di spinta a riposo

Il coefficiente di spinta a riposo è calcolato attraverso le seguenti formulazioni:

$$k_0 = 1 - \text{sen}\phi \quad \text{per i terreni normalconsolidati}$$

$$k_0 = (1 - \text{sen}\phi) \cdot \sqrt{OCR} \quad \text{per i terreni sovraconsolidati}$$

con:

$\phi$  angolo di attrito interno del terreno

$OCR$  grado di sovraconsolidazione del terreno

#### 15.3.2 Coefficiente di spinta attiva in fase statica

I valori dei coefficienti di spinta attiva ( $k_a$ ) possono essere calcolati mediante l'utilizzo di comprovate formulazioni disponibili in letteratura (**Tabella 36**).

Autori	Sokolovskii (1965)	Rankine (1857)	Lancellotta (2002) Mylonakis et al. (2007)	Coulomb (1773) Muller Breslau (1906)	Caquot e Kerisel (1948)	Chen (1975)
metodo	linee caratter.	appr. statico	estr. inferiore appr. statico	equil. limite appr. cinematic. sup. piana	equil. limite appr. cinematic. sup. curvilinea	estr. superiore appr. cinematic. sup. curvilinea
$\delta$	sì	0	sì	0	sì	sì
$i$	0	sì	sì	0	sì	sì
$\beta$	sì	0	0	sì	0	sì

**Tabella 36** - Soluzioni disponibili per gli stati limite in condizioni statiche [2]

In **Tabella 36** sono specificati gli autori di alcune delle principali formulazioni per il calcolo di  $k_a$  disponibili in letteratura, indicando per ciascuna di esse:

- la tipologia di metodo utilizzato per il calcolo di  $k_a$  (approccio statico, approccio cinematico, equilibrio limite, linee caratteristiche);
- se nel caso di metodo cinematico la superficie di scorrimento considerata sia piana o curvilinea;
- se la formulazione tiene conto o meno degli angoli  $\delta$ ,  $i$  e  $\beta$ , rispettivamente angolo di attrito terreno-opera di sostegno, angolo di inclinazione del piano campagna e angolo di inclinazione del paramento dell'opera (l'angolo  $\beta$  è misurato a partire dalla verticale per cui si ha  $\beta=0$  per un'opera di sostegno con paramento verticale).

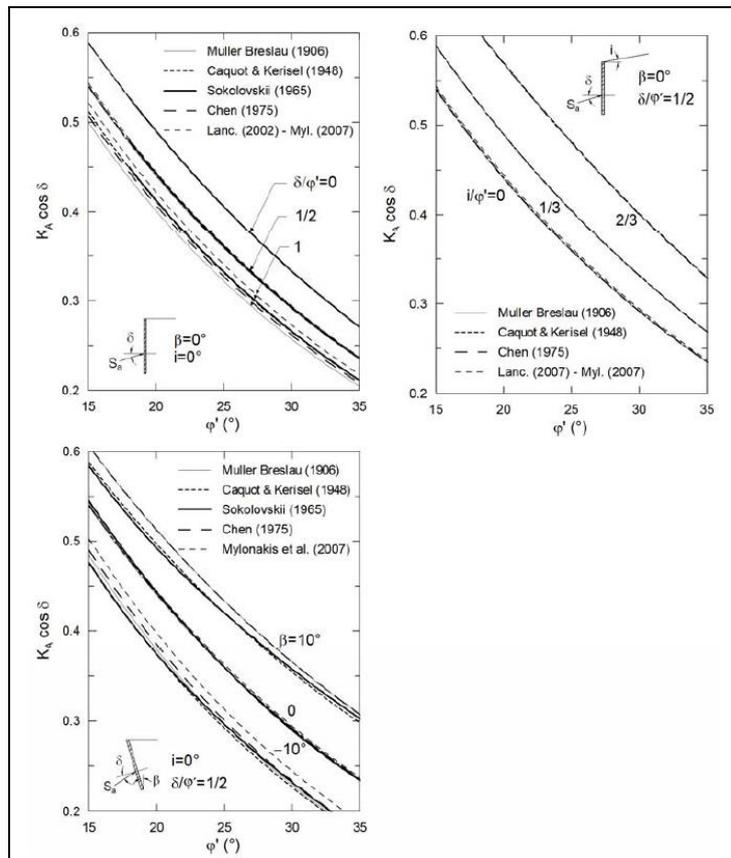
Nel caso di condizioni attive, i valori di  $k_a$  ottenibili dalle formulazioni di **Tabella 36** non differiscono in modo significativo come mostrato dai grafici in

**Figura 37.** Pertanto, la scelta della specifica formulazione da utilizzare per il calcolo del coefficiente di spinta attiva è lasciata alla discrezione del progettista.

Nel caso si consideri l'angolo d'attrito fra terreno e opera di sostegno, questo non dovrà essere superiore ai 2/3 del valore dell'angolo d'attrito del terreno ( $\delta \leq 2/3 \phi'$ ).

A titolo esemplificativo, si riporta di seguito l'espressione analitica della formulazione di Coulomb – Muller Breslau.

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \beta)}{\cos^2\beta \cdot \cos(\delta + \beta) \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \delta) \cdot \sin(\phi' - i)}{\cos(\delta + \beta) \cdot \cos(i - \beta)}} \right)^2}$$



**Figura 37** - Confronto tra i valori di  $K_a \cdot \cos \delta$  ottenuti in condizioni statiche da alcune soluzioni di letteratura [2]

### 15.3.3 Coefficiente di spinta passiva in fase statica

I valori dei coefficienti di spinta passiva ( $k_p$ ) possono essere calcolati mediante l'utilizzo delle medesime formulazioni riportate in **Tabella 36**. Ciononostante, dal momento che i risultati di tali formulazioni possono risultare molto differenti fra loro, come mostrato dai grafici in **Figura 38** è consigliabile utilizzare le formulazioni ottenute mediante un approccio statico o mediante un approccio cinematico che tenga conto della non planarità della superficie di scorrimento.

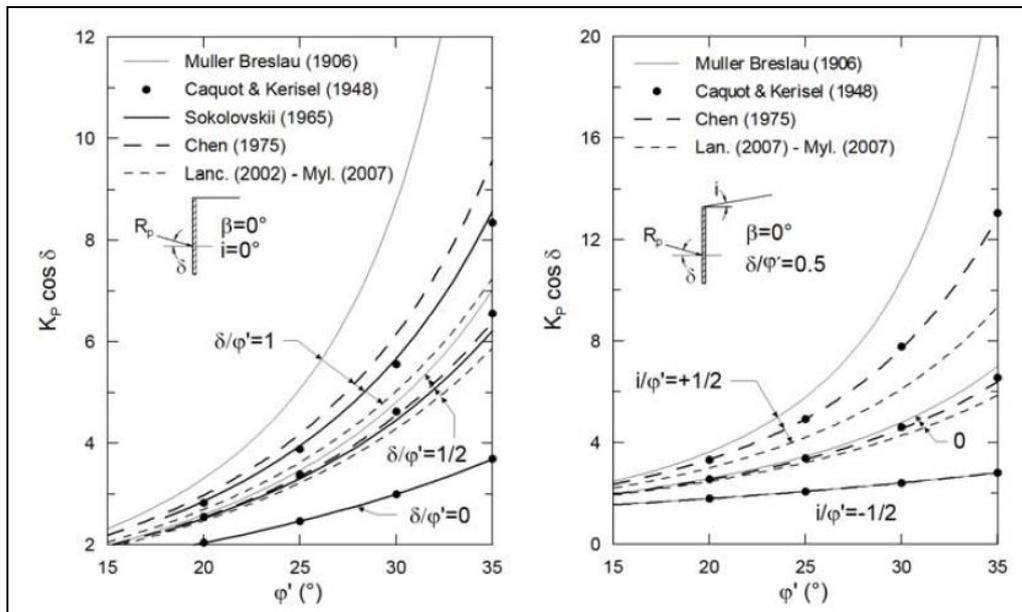
Nel caso si consideri l'angolo d'attrito fra terreno e opera di sostegno, questo non dovrà essere superiore ai 2/3 del valore dell'angolo d'attrito del terreno ( $\delta \leq 2/3 \phi'$ ).

Inoltre, se  $\delta > \phi'/2$  (e comunque  $\leq 2/3 \phi'$ ), nel caso si utilizzi una formulazione derivante da un approccio cinematico, sarà necessario tenere conto della non planarità delle superfici di scorrimento.

A titolo esemplificativo, si riporta di seguito l'espressione analitica della formulazione di Lancellotta 2002 (formulazione cautelativa in quanto ottenuta mediante approccio statico).

$$K_p = \frac{\cos \delta + \sqrt{\sin^2(\phi') - \sin^2(\delta)}}{\cos i - \sqrt{\sin^2(\phi') - \sin^2(i)}} \cdot e^{+2\Psi \tan \phi'}$$

$$2\Psi = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \delta}{\sin \phi'}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{\sin i}{\sin \phi'}\right) + \delta + i$$



**Figura 38** - Confronto tra i valori di  $K_p \cdot \cos \delta$  ottenuti in condizioni statiche da alcune soluzioni di letteratura [2]

### 15.3.4 Coefficiente di spinta attiva in fase sismica

Le azioni sismiche possono essere tenute in considerazione mediante il metodo pseudostatico, nel quale si assume che un fissato valore di accelerazione agisce uniformemente nel volume di terreno esaminato.

I valori dei coefficienti di spinta attiva in condizioni sismiche ( $k_{a,sim}$ ) possono essere calcolati mediante l'utilizzo di comprovate formulazioni disponibili in letteratura (cfr. **Tabella 37**).

Autore	Lancellotta (2007)	Mylonakis <i>et al.</i> (2007)	Mononobe – Okabe (1924) (1929)	Chang (1981)
metodo	estr. inferiore appr. statico	estr. inferiore appr. statico	equil. limite appr. cinemat. sup. piana	estr. superiore appr. cinemat. sup. curvilinea
$\delta$	sì	sì	sì	sì
$i$	sì	sì	sì	sì
$\beta$	0	si	si	sì

**Tabella 37** - Soluzioni disponibili per gli stati limite in condizioni pseudostatiche [2]

Analogamente a quanto già detto per il calcolo del  $k_a$  statico (cfr. paragrafo **15.3.2**), anche nel caso di condizioni sismiche, la scelta della specifica formulazione da utilizzare per il calcolo del coefficiente  $k_{a,sim}$  è lasciata alla discrezione del progettista, in quanto le varie formulazioni forniscono risultati simili come mostrato dai grafici riportati in **Figura 39**.

A titolo esemplificativo, si riporta di seguito l'espressione analitica della formulazione di Lancellotta 2007.

$$K_{a,sism} = \frac{\cos \delta - \sqrt{\sin^2(\phi') - \sin^2(\delta)}}{\cos(i + \vartheta) + \sqrt{\sin^2(\phi') - \sin^2(i + \vartheta)}} \cdot e^{-2\Psi_e \tan \phi'} \cdot \frac{\cos i}{\cos \vartheta}$$

$$2\Psi_e = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \delta}{\sin \phi'}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{\sin(i + \vartheta)}{\sin \phi'}\right) - \delta + i - \vartheta$$

$$\vartheta = \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1 - k_v}\right)$$

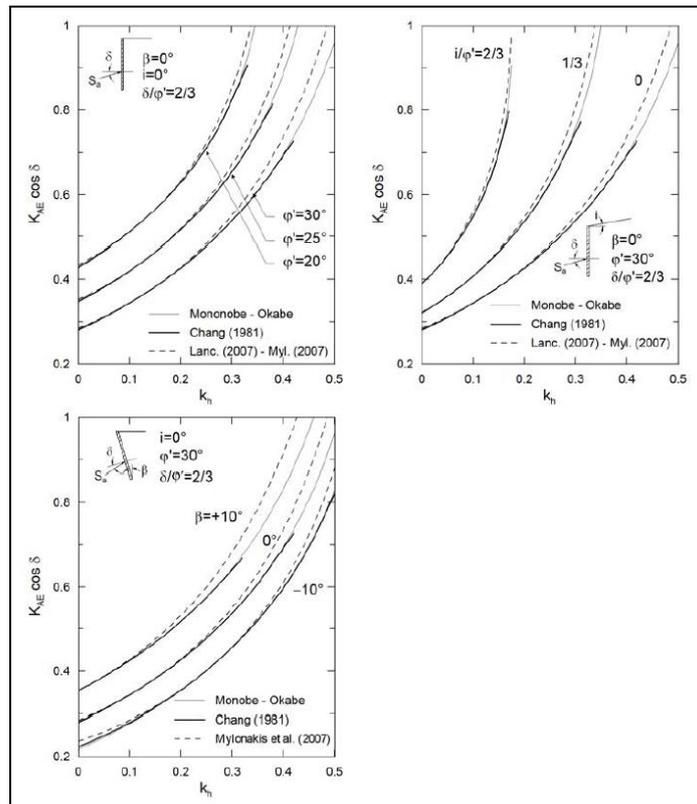


Figura 39 - Confronto tra i valori di  $K_{a,sism} \cdot \cos \delta$  ottenuti con  $k_v = 0$  [2]

### 15.3.5 Coefficiente di spinta passiva in fase sismica

I valori dei coefficienti di spinta passiva in condizioni sismiche ( $k_{p,sism}$ ) possono essere calcolati mediante l'utilizzo delle medesime formulazioni riportate in **Tabella 37**. Ciononostante, dal momento che i risultati di tali formulazioni possono risultare molto differenti fra loro, come mostrato dai grafici in **Figura 40** è consigliabile utilizzare le formulazioni ottenute mediante un approccio statico o mediante un approccio cinematico che tenga conto della non planarità della superficie di scorrimento.

Nel caso si consideri l'angolo d'attrito fra terreno e opera di sostegno, questo non dovrà essere superiore ai 2/3 del valore dell'angolo d'attrito del terreno ( $\delta \leq 2/3 \phi'$ ).

Inoltre, se  $\delta > \phi'/2$  (e comunque  $\leq 2/3 \phi'$ ), nel caso si utilizzi una formulazione derivante da un approccio cinematico, sarà necessario tenere conto della non planarità delle superfici di scorrimento.

A titolo esemplificativo, si riporta di seguito l'espressione analitica della formulazione di Lancellotta 2007 (formulazione cautelativa in quanto ottenuta mediante approccio statico).

$$K_{p,sism} = \frac{\cos \delta + \sqrt{\sin^2(\phi') - \sin^2(\delta)}}{\cos(i + \vartheta) - \sqrt{\sin^2(\phi') - \sin^2(i + \vartheta)}} \cdot e^{+2\psi_e \tan \phi'} \cdot \frac{\cos i}{\cos \vartheta}$$

$$2\psi_e = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \delta}{\sin \phi'} \right) + \sin^{-1} \left( \frac{\sin(i + \vartheta)}{\sin \phi'} \right) + \delta + i - \vartheta$$

$$\vartheta = \tan^{-1} \left( \frac{k_h}{1 - k_v} \right)$$

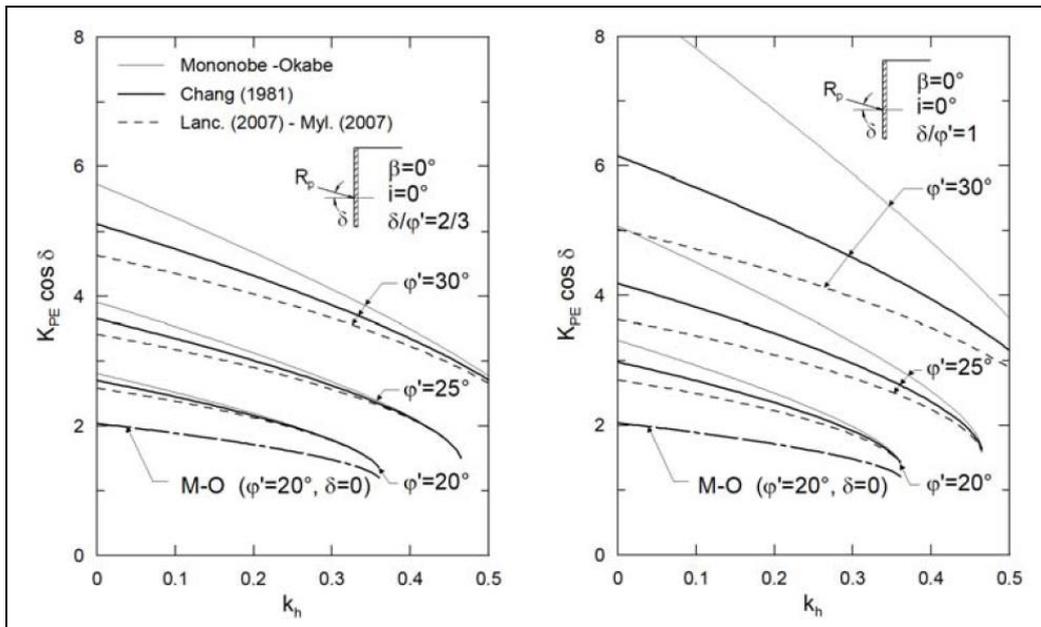


Figura 40 - Confronto tra i valori di  $K_{p,sism} \cdot \cos \delta$  ottenuti con  $k_v = 0$  [2]

## 16 FONDAZIONI SU PALI

### 16.1 Metodologia di calcolo delle azioni in testa al palo

Il calcolo delle sollecitazioni assiale e tagliante in testa al singolo palo, a partire dalle sollecitazioni scaricate dalla sovrastruttura sulla platea di fondazione (considerate alla quota d'imposta della platea stessa) è stato eseguito tramite le seguenti formule analitiche:

$$N_i = \frac{N}{n} + \left[ \frac{(M_x + \sum M_{tix}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \right] - \left[ \frac{(M_y + \sum M_{tiy}) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \right]$$
$$V_{x,i} = \frac{V_x}{n}$$
$$V_{y,i} = \frac{V_y}{n}$$

dove, considerando un sistema di riferimento XYZ destrorso avente origine nel baricentro della palificata, asse x longitudinale al viadotto, asse y trasversale al viadotto e asse z rivolto verso l'alto, risultano:

- n, numero di pali;
- N, azione assiale sulla platea di fondazione;
- $M_x$ , momento sulla palificata attorno all'asse x;
- $M_y$ , momento sulla palificata attorno all'asse y;
- $M_{tix}$ , momento in testa all'i-esimo palo attorno all'asse x;
- $M_{tiy}$ , momento in testa all'i-esimo palo attorno all'asse y;
- $x_i$ , distanza dall'asse y baricentrico della palificata;
- $y_i$ , distanza dall'asse x baricentrico della palificata;
- $V_x$ , taglio sulla palificata in direzione x;
- $V_y$ , taglio sulla palificata in direzione y;
- $V_{x,i}$ , taglio in testa all'i-esimo palo in direzione x;
- $V_{y,i}$ , taglio in testa all'i-esimo palo in direzione y.

Il collegamento fra i pali di fondazione e la platea è stato schematizzato, a favore di sicurezza, come un incastro perfetto.

Per il calcolo del momento di incastro in testa all'i-esimo palo è stato considerato il comportamento a taglio-flessione del palo tenendo conto dell'interazione fra il palo e il terreno mediante molle elasto-plastiche orizzontali così come definite al successivo paragrafo **16.6.2**.

I valori delle azioni sulla platea di fondazione, utilizzati nelle equazioni sopra riportate, tengono conto dei rispettivi coefficienti amplificativi utilizzati nella fase progettuale della sovrastruttura in funzione dello stato limite e della combinazione di verifica considerata.

## 16.2 Verifica agli stati limite ultimi (SLU)

Nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine.

Gli stati limite ultimi delle fondazioni su pali si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono la fondazione stessa.

Nel caso di fondazioni posizionate su o in prossimità di pendii naturali o artificiali deve essere effettuata la verifica con riferimento alle condizioni di stabilità globale del pendio includendo nelle verifiche le azioni trasmesse dalle fondazioni.

Le verifiche delle fondazioni su pali devono essere effettuate con riferimento almeno ai seguenti stati limite, accertando che la condizione  $E_d \leq R_d$  sia soddisfatta per ogni stato limite considerato:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
  - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali;
  - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali;
  - collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione;
  - stabilità globale;
- SLU di tipo strutturale (STR)
  - raggiungimento della resistenza dei pali;
  - raggiungimento della resistenza della struttura di collegamento dei pali.

La verifica di stabilità globale deve essere effettuata secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1 tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle **Tabella 38** e **Tabella 39** per le azioni e i parametri geotecnici, e di  $\gamma_R = 1.1$  per le resistenze globali.

Le rimanenti verifiche devono essere effettuate secondo l'Approccio 2, con la combinazione (A1+M1+R3), tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle **Tabella 38** e **Tabella 39**, **Tabella 40** e **Tabella 41**.

Nelle verifiche nei confronti di SLU di tipo strutturale, il coefficiente  $\gamma_R$  non deve essere portato in conto.

*Azioni (coefficienti A):*

La seguente tabella riporta i fattori di sicurezza parziali da applicare alle azioni nelle diverse combinazioni di carico.

carichi	effetto	coefficiente parziale	EQU	A1 (STR)	A2 (GEO)
Permanenti	favorevole	$\gamma_{G1}$	0.9	1.0	1.0
	sfavorevole		1.1	1.3	1.0
Permanenti non strutturali	favorevole	$\gamma_{G2}$	0.8	0.8	0.8
	sfavorevole		1.5	1.5	1.3
Variabili	favorevole	$\gamma_{Qi}$	0.0	0.0	0.0
	sfavorevole		1.5	1.5	1.3

**Tabella 38** - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

**Parametri geotecnici (coefficienti M):**

Le analisi allo stato limite ultimo prevedono l'utilizzo di due set di parametri: i parametri caratteristici e i parametri ridotti di progetto. I primi sono deducibili da prove in sito o di laboratorio su campioni significativi, i secondi sono ricavabili riducendo i parametri caratteristici con i coefficienti M2:

Parametro	simbolo	coefficiente parziale	M1	M2
tangente angolo di attrito	$\tan \varphi^k$	$\gamma_{\varphi'}$	1.00	1.25
coesione efficace	$c^k$	$\gamma_{c'}$	1.00	1.25
resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1.00	1.40
peso unità di volume	$\gamma$	$\gamma_{\gamma}$	1.00	1.00

**Tabella 39** - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

### 16.3 Resistenze di pali soggetti a carichi assiali

Il valore di progetto  $R_d$  della resistenza si ottiene a partire dal valore caratteristico  $R_k$  applicando i coefficienti parziali  $\gamma_R$  riportati in **Tabella 46**.

Tipologia di palo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
Resistenza	R3	R3	R3
Base $\gamma_b$	1.15	1.35	1.3
Laterale in compressione $\gamma_s$	1.15	1.15	1.15
Laterale in trazione $\gamma_{st}$	1.25	1.25	1.25

**Tabella 40** - Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali

#### 16.4 Resistenze di pali soggetti a carichi trasversali

Il valore di progetto  $R_{tr,d}$  della resistenza trasversale si ottiene a partire dal valore caratteristico  $R_k$  applicando il coefficiente parziale  $\gamma_R$  riportato in **Tabella 47**.

<b>Coefficiente parziale (R3)</b>	$\gamma_t = 1.3$
-----------------------------------	------------------

**Tabella 41** - Coefficiente parziale  $\gamma_T$  per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali

#### 16.5 Condizioni sismiche

Le verifiche di capacità portante dei pali in presenza di azioni sismiche consistono nel confronto tra le azioni (forza assiale e forza trasversale sul palo) e le corrispondenti resistenze, nel rispetto della condizione  $E_d \leq R_d$  ponendo unitari i coefficienti amplificativi delle azioni e dei materiali e considerando i medesimi coefficienti di cui ai paragrafi **16.3** e **16.4** per le resistenze.

#### 16.6 Capacità portante dei pali di fondazione

Nel seguito si riporta la procedura utilizzata per il calcolo della capacità portante verticale e orizzontale dei pali di fondazione.

Il calcolo della capacità portante è stato effettuato considerando le condizioni drenate e non drenate in funzione della tipologia di terreno.

Si specifica che in presenza di azioni sismiche sono state considerate le sole condizioni non drenate ritenendo che la sollecitazione sismica, dato il ridotto lasso di tempo in cui agisce, debba necessariamente essere studiata in condizioni a breve termine.

##### 16.6.1 Capacità portante verticale

Il calcolo delle curve di capacità portante verticale dei pali è stato condotto in accordo con le NTC 2018, considerando i valori dei coefficienti parziali definiti per l'Approccio 2, combinazione A1+M1+R3 di cui ai paragrafi **16.2**, **16.3**, **16.4** e **16.5** rispettivamente in condizioni statiche e sismiche.

La capacità portante ultima dei pali è stata valutata mediante la seguente espressione:

$$R_k = R_{c,k} + R_{b,k} - W$$

dove:

- $R_{c,k}$  capacità portante caratteristica per attrito laterale
- $R_{b,k}$  capacità portante caratteristica di punta

- W peso del palo

La vigente normativa prevede di calcolare le resistenze caratteristiche  $R_{c,k}$  e  $R_{b,k}$  sopra menzionate a partire dalle resistenze di calcolo ottenute considerando i parametri medi e minimi dei terreni, e opportunamente fattorizzate:

$$R_{c/b,k} = \min \left( R_{cal,media} / \xi_3 ; R_{cal,min} / \xi_4 \right)$$

Le resistenze di calcolo, in condizione drenate e non drenate, sono state valutate mediante le seguenti espressioni:

Condizioni non drenate:  $R_{c,cal} = \sum (\alpha \cdot c_u \cdot p \cdot \Delta L)$

$$R_{b,cal} = 9 \cdot c_u \cdot A_p$$

Condizioni drenate:  $R_{c,cal} = \sum (\alpha \cdot c + K \cdot p_0' \cdot \tan \delta) \cdot p \cdot \Delta L$

$$R_{b,cal} = A_p \cdot [(q + L \cdot \gamma') \cdot N_q + c \cdot N_c]$$

dove:

- $\alpha$  coefficiente riduttivo dipendente dalle modalità di costruzione
- $c_u$  coesione non drenata
- $c$  coesione drenata
- $p$  perimetro palo
- $A_p$  area della base del palo
- $\Delta L$  lunghezza tratto omogeneo
- $p_0'$  pressione geostatica efficace a metà del tratto  $\Delta L$
- $K$  coefficiente di spinta laterale sul palo
- $\gamma'$  peso di volume efficace del terreno di fondazione
- $N_q, N_c$  coefficienti di capacità portante
- $L$  lunghezza del palo (limitata superiormente da un valore pari a 15 diametri)
- $\delta$  angolo d'attrito fra terreno e palo
- $q$  sovraccarico

Come si evince dalle formule sopra riportate, e in accordo con le prove sperimentali di Skempton, la capacità portante di punta  $R_{b,cal}$  in condizioni non drenate è stata calcolata trascurando il contributo del sovraccarico  $qN_q$ .

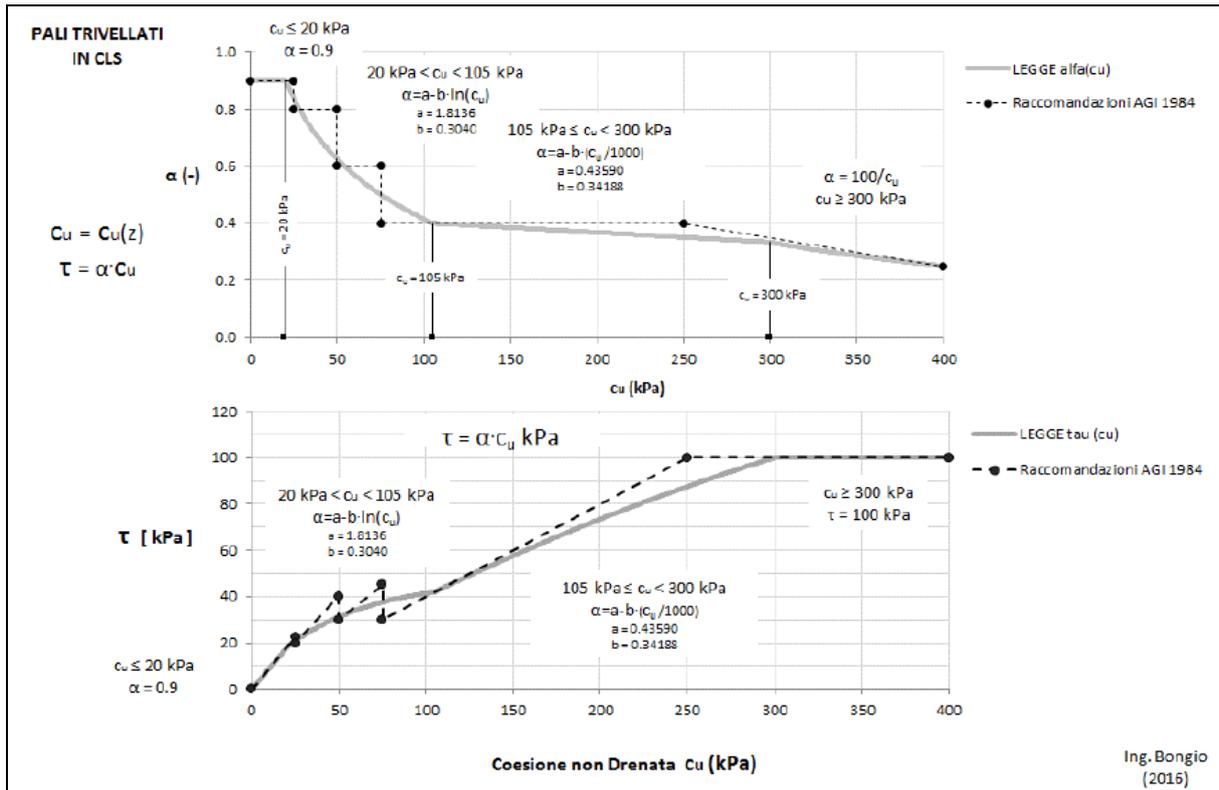
Da letteratura, sono stati assunti i seguenti valori:

$$K = 1 - \sin \phi \text{ (e comunque } K \leq 0.5)$$

$$\delta = 0.7\phi$$

Per la stima del parametro  $\alpha$  per terreni di tipo coesivo si è fatto riferimento alle raccomandazioni AGI (1984) secondo cui risulta:

- $\alpha$  Coefficiente riduttivo, assunto per pali trivellati:
- $\alpha = 0.9$  Per  $c_u \leq 25 \text{ kPa}$
- $\alpha = 0.8$  Per  $25 \text{ kPa} < c_u \leq 50 \text{ kPa}$
- $\alpha = 0.6$  Per  $50 \text{ kPa} < c_u \leq 75 \text{ kPa}$
- $\alpha = 0.4$  Per  $c_u > 75 \text{ kPa}$



L'aderenza laterale è stata limitata a 100 KPa.

La capacità portante di base in condizione drenate è stata limitata superiormente al relativo valore calcolato ad una profondità L pari a 15 volte il diametro del palo.

I coefficienti  $\xi$ , viceversa, assumono i valori riportati nella seguente **Tabella 42** in funzione del numero di verticali indagate:

numero verticali indagate	1	2	3	4	5	7	$\geq 10$
$\xi_3$	1.7	1.65	1.6	1.55	1.5	1.45	1.4
$\xi_4$	1.7	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

**Tabella 42** - Fattori di correlazione  $\xi$  per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate

Per la scelta dei fattori di correlazione  $\xi_3$  e  $\xi_4$  in funzione del numero di verticali indagate (cfr. **Tabella 42** - Tab. 6.4.IV delle NTC 2018), le NTC 2018 e la relativa circolare (cfr. Circ. 21/01/2019, n.7 C.S.LL.PP.) prevedono di considerare il numero di verticali di indagine presenti per ciascun sistema di fondazione.

Secondo le NTC 2018, *“fatta salva la necessità di almeno una verticale di indagine per ciascun sistema di fondazione, nell’ambito dello stesso sistema di fondazione, ai fini del conteggio delle verticali di indagine per la scelta dei coefficienti  $\xi$  in Tab. 6.4.IV delle NTC2018 si devono prendere solo le verticali lungo le quali al singola indagine (sondaggio con prelievo di campioni indisturbati, prove penetrometriche, ecc.) sia stata spinta ad una profondità superiore alla lunghezza dei pali, in grado di consentire una completa identificazione del modello geotecnico di sottosuolo”.*

Inoltre, secondo la Circ. 21/01/2019, n.7 C.S.LL.PP., *“i valori dei fattori di correlazione permettono di valorizzare la qualità del modello geotecnico di sottosuolo, la cui accuratezza è migliorata al crescere del numero di verticali d’indagine per ciascuna delle quali sia possibile desumere una completa caratterizzazione geotecnica dei terreni. A questo proposito si deve ribadire che il numero di verticali d’indagine, con i requisiti necessari innanzi richiamati per ciascuna di esse, deve essere riferito al volume significativo. Ciò significa, ad esempio, che per gli edifici il volume significativo deve essere riferito a ciascun corpo di fabbrica, mentre per un’opera lineare, come un viadotto, il volume significativo riguarda ogni singola fondazione.”*

Nel caso specifico delle opere previste nell’ambito della realizzazione del Lotto 0, in aggiunta alla campagna di indagini pregressa fornita dal Comune di Siena, consistita in n° 18 sondaggi a carotaggio continuo di lunghezza variabile tra 20 e 35 m, nella campagna di indagine integrativa del 2019 sono stati eseguiti ulteriori n° 15 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, distribuiti sui diversi viadotti con profondità variabile tra 15 e 35 m in funzione delle quote di progetto con prelievo, di n° 39 campioni indisturbati (almeno 2 campioni prelevati per ciascun sondaggio) per l’esecuzione di prove geotecniche di laboratorio.

Nonostante il numero elevato di verticali di indagine eseguite (33) su una distanza di circa 3700 m, senza considerare le prove penetrometriche la cui lunghezza è molto inferiore alla lunghezza dei pali, tale numero risulta comunque inferiore al numero delle singole fondazioni dei diversi viadotti, per cui, a rigore, dovrebbe essere utilizzato un valore di  $\xi$  non inferiore a 1.7.

Tuttavia, si deve sottolineare che tutti sondaggi realizzati hanno raggiunto, dopo pochi metri di perforazione nei depositi sciolti di copertura (depositi alluvionali, coltre eluvio-colluviale o materiali di riporto), il substrato costituito dall’unità delle argille azzurre plioceniche (unità geotecnica FAA e relativo spessore di alterazione FAAa). Tale unità, che costituisce il principale terreno di fondazione dei pali in progetto, è stata caratterizzata appoggiandosi su una solida base di dati, utilizzando tutte le indagini e prove disponibili lungo l’intero tracciato in progetto. Anche da un punto di vista sismico tale unità di substrato mostra una discreta omogeneità, essendo caratterizzata da valori di  $V_p$  e  $V_s$  gradualmente crescenti con la profondità (cfr. prospezioni sismiche down-hole e indagini sismiche a rifrazione con elaborazione tomografica dei risultati) e rispettivamente pari a circa 1800÷2400 m/s ( $V_p$ ) e 500 m/s ( $V_s$ ) a circa 30÷35 di profondità.

Pertanto, in tale contesto geologico, pressoché omogeneo lungo lo sviluppo del tracciato, per le opere di fondazione dei viadotti previste nell’ambito della realizzazione dell’infrastruttura in oggetto, il progetto dei pali di fondazione può essere sviluppato con valori dei fattori di correlazione  $\xi_3$  e  $\xi_4$  corrispondenti ad un numero di verticali indagate  $\geq 10$ .

La capacità portante di progetto del singolo palo è stata valutata fattorizzando la capacità portante laterale  $R_{c,k}$  e la capacità portante di base  $R_{b,k}$ , come prescritto dalla vigente normativa.

I valori dei coefficienti R3 utilizzati per il calcolo dei valori di progetto della capacità portante verticale, utilizzati per la realizzazione delle curve di capacità portante, sono quelli riportati in **Tabella 40** (paragrafo **16.3**) per pali di tipo trivellato.

$$R_{c,d} = R_{c,k} / \gamma_s \quad \text{Capacità portante di progetto per attrito laterale in compressione}$$

$$R_{t,d} = R_{c,k} / \gamma_{st} \quad \text{Capacità portante di progetto per attrito laterale in trazione}$$

$$R_{b,d} = R_{b,k} / \gamma_b \quad \text{Capacità portante di progetto di punta}$$

$$N_{Rd,c} = R_{c,d} + R_{b,d} - W \cdot \gamma_G \quad \text{Resistenza di progetto in compressione}$$

$$N_{Rd,t} = R_{t,d} + W \cdot \gamma_G \quad \text{Resistenza di progetto in trazione}$$

Dove  $W$  rappresenta il peso del palo.

Per il calcolo della capacità portante a compressione, il coefficiente parziale amplificativo del peso del palo ( $\gamma_G$ ) è stato assunto pari ad 1.3 nelle combinazioni STR e GEO e pari ad 1 nella combinazione SLV.

Per il calcolo della capacità portante a trazione  $N_{Rd,t}$  il coefficiente  $\gamma_G$  è stato assunto unitario in tutte le combinazioni.

#### 16.6.1.1 Verifica di capacità portante verticale dei pali di fondazione

La verifica di capacità portante verticale dei pali risulta soddisfatta quando valgono le seguenti disequazioni:

- in caso di palo soggetto ad azione di compressione

$$N_{Rd,c} \geq |N_{Ed}|$$

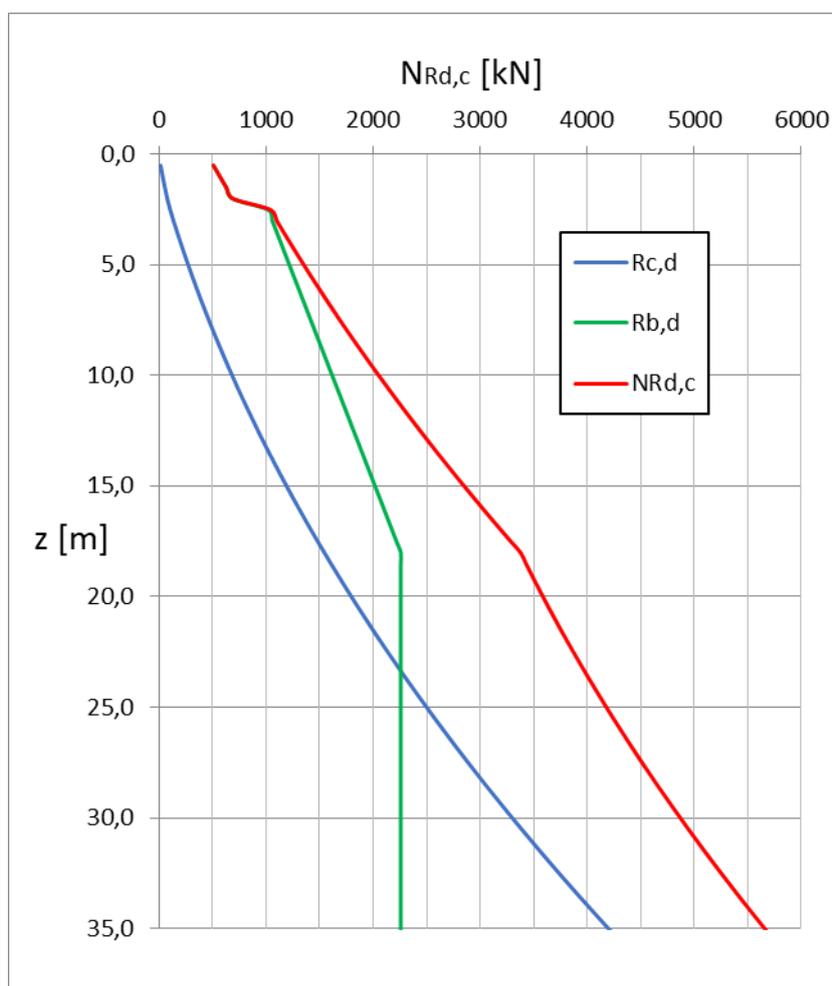
- in caso di palo soggetto ad azione di trazione

$$N_{Rd,t} \geq |N_{Ed}|$$

dove  $N_{Rd,c}$  e  $N_{Rd,t}$  sono rispettivamente le resistenze di progetto a compressione e a trazione del palo definite al paragrafo **16.6.1** mentre  $N_{Ed}$  è l'azione assiale sollecitante in testa al palo.

Si precisa che per le verifiche di capacità portante presentate nelle rispettive relazioni di calcolo il valore di  $N_{Rd,c}$  (o  $N_{Rd,t}$ ) è il minimo fra quelli calcolati nelle condizioni drenate e non drenate, statiche e sismiche.

In **Figura 41** si riporta a titolo d'esempio una curva di capacità portante verticale per pali compressi la quale fornisce il valore di  $N_{Rd,c}$  al variare dell'altezza  $H$  del palo.



**Figura 41** - Esempio di curva di capacità portante verticale (contributo laterale in blu e contributo di base in verde)

Le curve di capacità portante verticale sono riportate nelle specifiche relazioni di calcolo per ciascuna delle opere in progetto che presentino fondazioni su pali.

### 16.6.2 Capacità portante orizzontale

Nel seguito si riporta una sintetica descrizione della teoria delle curve  $p-y$ , nonché la metodologia utilizzata per la definizione di tali curve necessarie al fine di poter studiare il comportamento a taglio-flessione del palo tenendo conto dell'interazione fra questo e il terreno.

Tali curve verranno riportate per ciascuna opera in progetto nelle specifiche relazioni di calcolo.

Successivamente è riportato il procedimento utilizzato per eseguire la verifica di capacità portante trasversale dei pali di fondazione.

#### 16.6.2.1 Teoria delle curve $p-y$

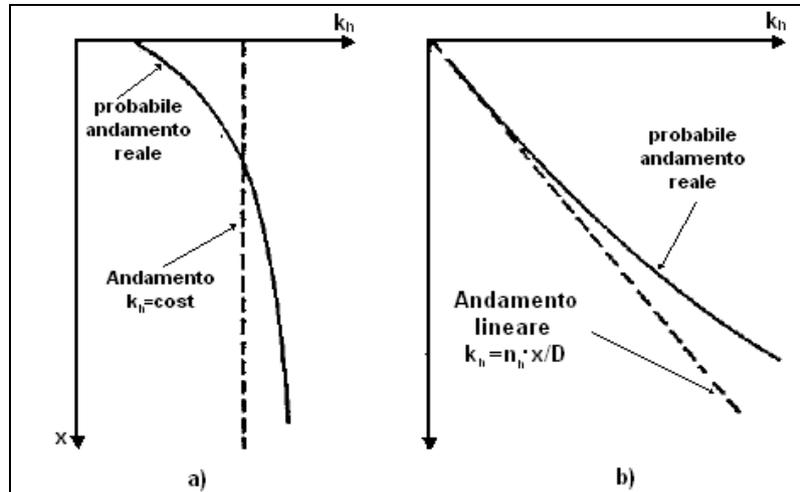
Nel caso di palo caricato in testa da una forza di taglio e da un momento flettente, per lo studio dell'interazione fra palo e terreno è possibile utilizzare un modello alla Winkler secondo il quale il terreno è assimilato ad un letto di molle orizzontali.

Il metodo richiede la definizione della legge *carico – spostamento* delle molle (curve  $p-y$ ); la quale generalmente può variare con la profondità. Il modo più semplice per definire tale legge consiste

nell'utilizzare un modello elastico lineare. In questo caso definiti  $k_h$  ( $\text{kN/m}^3$ ) il coefficiente di reazione orizzontale del terreno,  $y$  lo spostamento orizzontale di un punto del palo ad una generica profondità  $x$  dalla testa del palo e  $p$  la pressione orizzontale alla stessa profondità, si ha:

$$k_h \cdot y = p$$

Si possono assumere diversi andamenti di  $k_h$  con la profondità:



**Figura 42** - Andamenti del coefficiente di reazione orizzontale del terreno  $k_h$  ( $\text{kN/m}^3$ )

a) argille sovraconsolidate, b) argille normalmente consolidate (Rossi & Salvi, 1996)

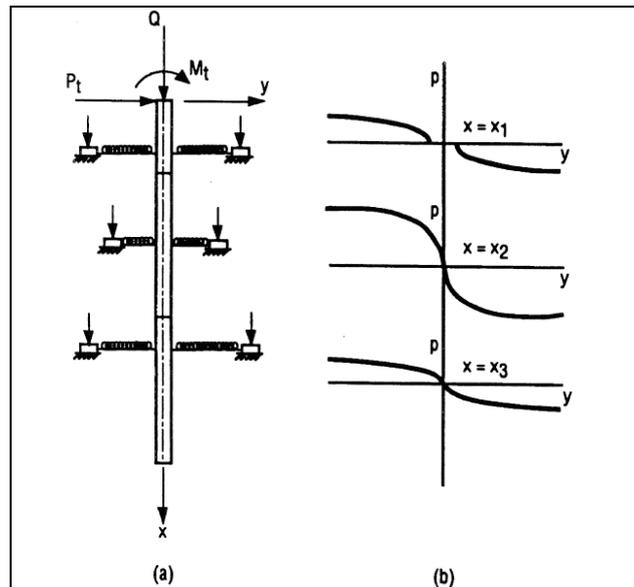
Il modello elastico lineare anche se concettualmente semplice non tiene conto del reale comportamento del terreno.

È ragionevole, infatti, pensare che il comportamento del terreno non sia perfettamente lineare con la profondità (cfr. **Figura 42**) e che, di conseguenza, la pressione orizzontale  $p$  non vari linearmente con la profondità.

Inoltre, la pressione nel terreno deve essere limitata ad un valore massimo definito in funzione della profondità:  $p = p_u$ .

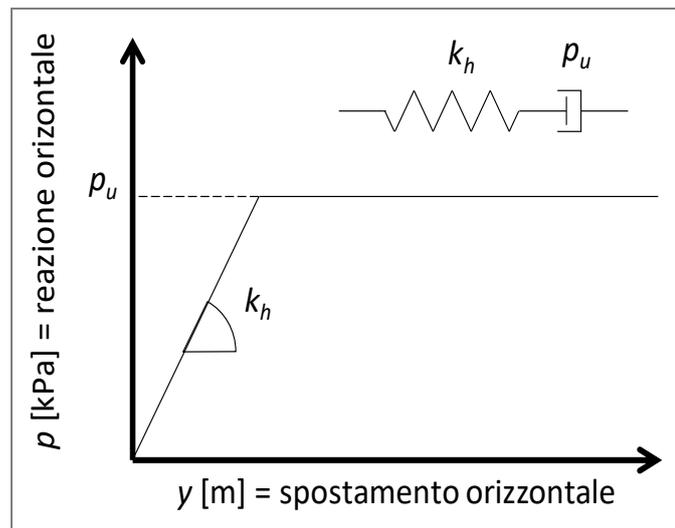
Il comportamento del terreno attorno al palo viene quindi modellato tramite una serie di molle non lineari e quindi da leggi  $p$ - $y$  non lineari (in **Figura 43** sono riportate alcune possibili curve  $p$ - $y$ ).

La definizione delle curve  $p$ - $y$  a diverse profondità sta quindi alla base della soluzione del problema di un palo caricato lateralmente e da questa dipendono le sollecitazioni che si sviluppano nel palo.



**Figura 43** - Modellazione di un palo caricato lateralmente usando le curve  $p-y$

In **Figura 44** è riportato un esempio di curva  $p-y$  ottenuta considerando un legame costitutivo elastico-perfettamente plastico.



**Figura 44** - Esempio di curva  $p-y$  con legame costitutivo elastico-perfettamente plastico

### 16.6.2.2 Definizione delle curve $p-y$

#### Terreni non coesivi

Per la determinazione delle curve  $p-y$  in presenza di terreni non coesivi è possibile seguire le procedure sotto riportate.

#### Procedura A

- si calcola l'andamento di  $k_h$  (espresso in  $\text{kN/m}^3$ ) con la profondità, ad esempio calcolandone il valore a ogni metro di profondità del palo, secondo la seguente formula:

$$k_h = n_h \cdot \frac{x}{D}$$

Dove  $n_h$  assume indicativamente i valori riportati in **Tabella 43**.

Sabbie	Densità relativa		
	Sciolta	Media	Densa
Asciutte o umide	2200	6700	18000
Immerse	1300	4500	11000

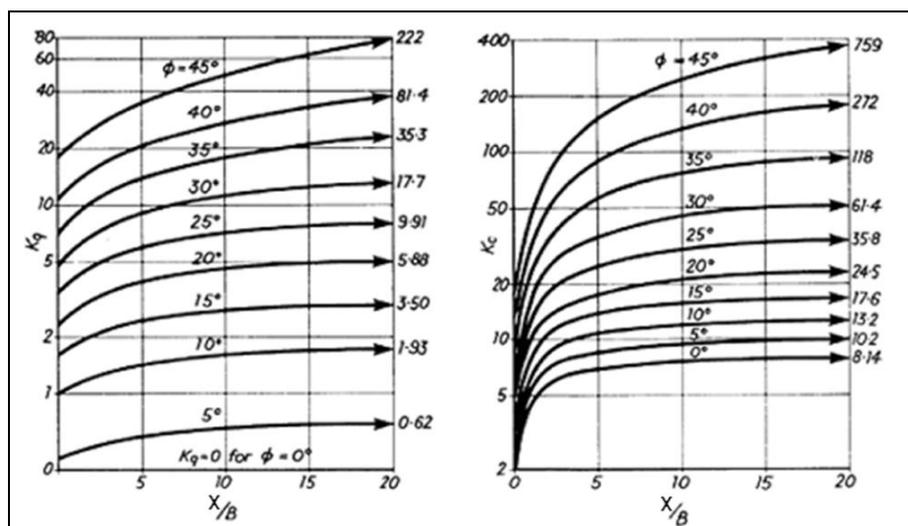
**Tabella 43** - Valori del coefficiente  $n_h$  [ $kN/m^3$ ] (Ricceri, 1975)

- Si valuta la pressione limite  $p_u$  (espressa in kPa) che il terreno è in grado di sopportare all'aumentare della profondità. Tale resistenza limite ad una profondità  $x$  dalla testa del palo è data dalla seguente espressione:

$$p_u = (q \cdot K_q + c \cdot K_c)$$

Dove:

- $q = \gamma \cdot x + q_{superficie}$  pressione litostatica che tiene conto anche dell'eventuale presenza di un sovraccarico;
- $c$  coesione efficace;
- $K_c, K_q$  coefficienti diagrammati in **Figura 45**.



**Figura 45** - Coefficienti del metodo di Brinch Hansen (Tomlinson, 2004)

- Si valuta lo spostamento limite  $y_u$  per ogni profondità come rapporto tra  $k_h$  e  $p_u$ .
- Si costruisce ad ogni profondità la curva  $p$ - $y$  secondo il seguente schema:

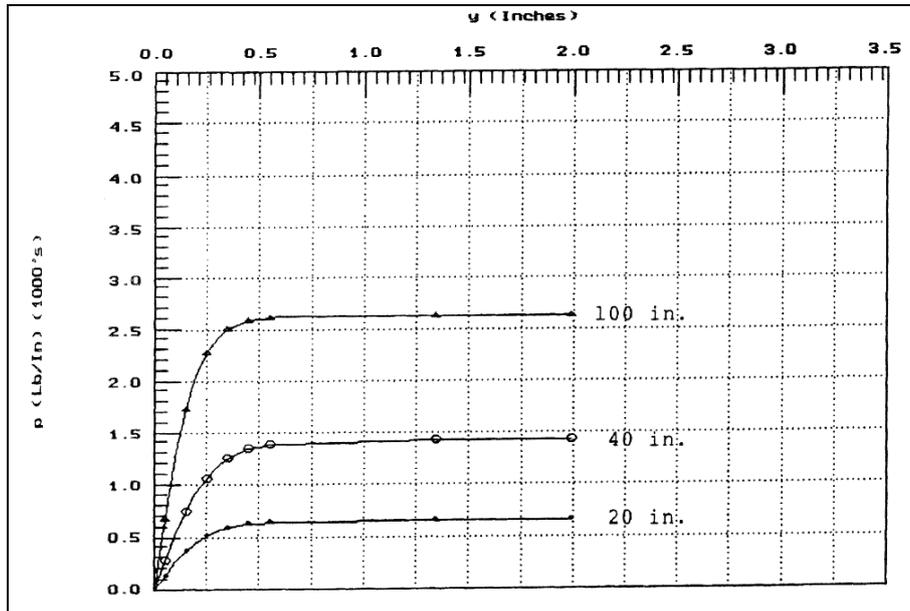
$$p_u = \begin{cases} k_h \cdot y & \text{per } y < y_u \\ p_u(x) & \text{per } y \geq y_u \end{cases}$$

## Procedura B

Un altro metodo per il calcolo delle curve  $p$ - $y$  è quello raccomandato dall'Istituto Americano del

Petrolio (API) la cui validità è stata confermata mediante l'esecuzione di prove in sito.

In **Figura 46** sono riportate a titolo esemplificativo delle curve  $p$ - $y$  ottenute con il metodo API.



**Figura 46** - Curve  $p$ - $y$  ottenute con il metodo API

Tali curve, riferite ad una fissata profondità, possono essere ottenute mediante le formule di seguito riportate.

La resistenza limite del terreno per unità di lunghezza e per unità di diametro del palo  $p_u$  [kN/m<sup>2</sup>] viene calcolata come il minimo dei due valori  $p_{us}$  e  $p_{ud}$ :

$$p_{us} = (C_1 \cdot x + C_2) \cdot \gamma' \cdot x$$

$$p_{ud} = C_3 \cdot \gamma' \cdot x$$

Dove  $x$  è la profondità da piano campagna.

I valori di  $C_i$  possono essere ricavati da **Figura 47** in funzione dell'angolo d'attrito del terreno.

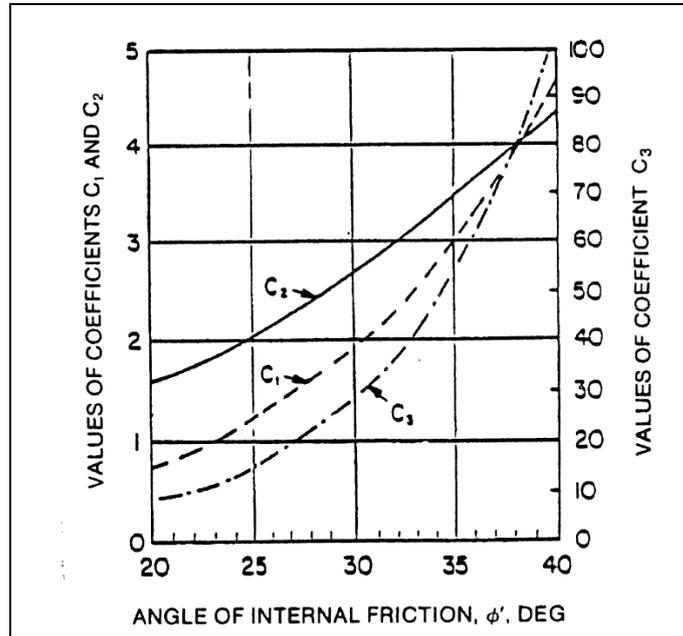
La curva  $p$ - $y$  si ottiene mediante la seguente espressione:

$$p = A \cdot p_u \cdot \tanh\left(\frac{k_h \cdot x}{A \cdot p_u} y\right)$$

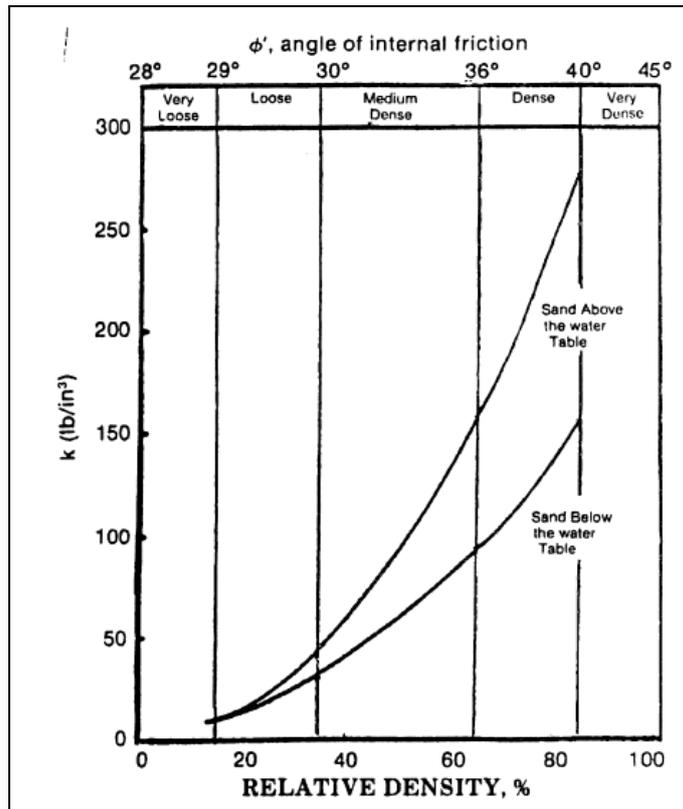
Dove il coefficiente  $A$  assume i seguenti valori a seconda che si consideri un carico di tipo ciclico o statico.

$$A = \begin{cases} 0.9 & \text{per carico ciclico} \\ \left(3.0 - 0.8 \frac{x}{D}\right) \geq 0.9 & \text{per carico statico} \end{cases}$$

Il valore di  $k_h$  può essere ottenuto da **Figura 48**.



**Figura 47** - Coefficienti da utilizzare per il calcolo di  $p_u$  con il metodo API



**Figura 48** - Coefficiente di reazione orizzontale  $k_h$  secondo API

## Terreni coesivi

Per la determinazione delle curve  $p$ - $y$  in presenza di terreni coesivi è possibile seguire le procedure sotto riportate.

### **Procedura A**

- Si sceglie un valore di  $k_h$  (espresso in  $\text{kN/m}^3$ ) da considerarsi costante con la profondità. I valori di  $k_h$  che si possono trovare in letteratura sono caratterizzati da un'elevata variabilità perciò sarà compito del progettista scegliere di volta in volta il valore più adatto al caso in esame.
- La rigidità delle molle  $k_h$  si può ottenere a partire dal valore della coesione non drenata  $c_u$  (Poulos & Davis, 2002 [1]) utilizzando la correlazione proposta da Broms e di seguito riportata:

$$k_h = 1.67 \cdot \frac{E_{50}}{D}$$

Usando un valore di  $E_{50}$  compreso tra 50 e 200 volte  $c_u$ , come suggerito da Skempton, si ottiene:

$$k_h = (80 \div 320) \frac{c_u}{D}$$

In particolare, per il calcolo del valore di  $k_h$  è stata cautelativamente utilizzata la seguente formula:

$$k_h = 100 \frac{c_u}{D}$$

- Si valuta la pressione limite  $p_u$  (espressa in  $\text{kPa}$ ) che il terreno è in grado di sopportare all'aumentare della profondità. Tale resistenza limite ad una determinata profondità  $x$  dalla testa del palo è fornita dalla seguente espressione:

$$p_u = \begin{cases} \left( \frac{7 \cdot c_u}{3 \cdot D} x + 2 \cdot c_u \right) & \text{per } x \leq 3 \cdot D \\ 9 \cdot c_u & \text{per } x > 3 \cdot D \end{cases}$$

Infatti, per quanto riguarda la pressione limite tutti gli autori concordano sul fatto che il valore massimo a cui si può arrivare è  $9c_u$ ; inoltre (Poulos & Davis, 2002 [1]) riportano l'andamento della  $p_u$  con la profondità (**Figura 49b**).

Si è quindi scelto di assumere uno schema simile alla distribuzione reale così come riportata da (Poulos & Davis, 2002) e, in particolare, di adottare un andamento della  $p_u$  lineare fino a  $3D$  e successivamente costante con la profondità (**Figura 49c**).

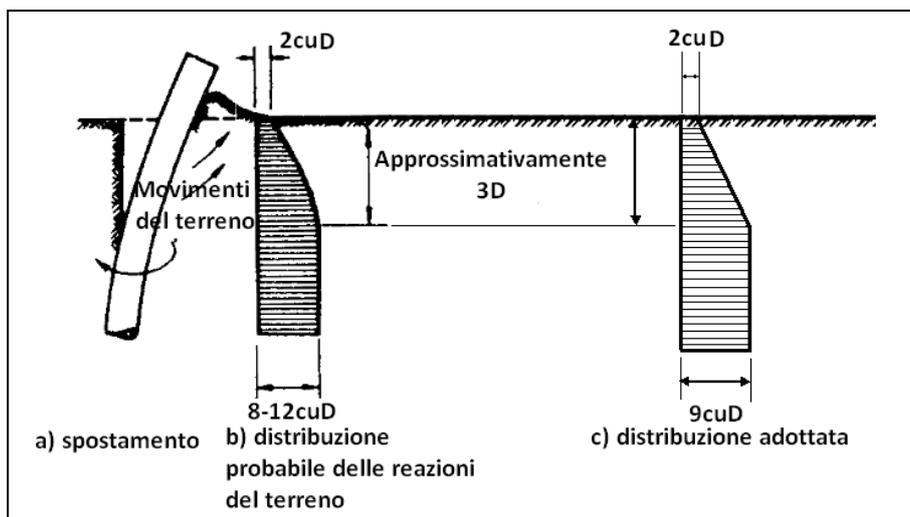


Figura 49 - Distribuzione della resistenza laterale lungo il palo da (Poulos & Davis, 2002 [1])

- Si valuta lo spostamento limite  $y_u$  per ogni profondità come rapporto tra  $k_h$  e  $p_u$ ;
- Si costruisce ad ogni profondità la curva  $p$ - $y$  secondo il seguente schema:

$$p_u = \begin{cases} k_h \cdot y & \text{per } y < y_u \\ p_u(x) & \text{per } y \geq y_u \end{cases}$$

### Procedura B

Le curve  $p$ - $y$  per terreni coesivi normalconsolidati possono essere ottenute mediante le correlazioni empiriche da letteratura fornite da Matlock (1970), le quali si basano sui risultati di prove in sito eseguite su pali caricati lateralmente in argille tenere.

In particolare, il metodo di Matlock (1970) prevede il calcolo di curve  $p$ - $y$  a diverse profondità mediante la schematizzazione di seguito descritta e riportata in **Figura 50**:

- quando lo spostamento trasversale del palo ad una quota fissata raggiunge un valore pari a  $8 \cdot y_{50}$  la pressione nel terreno raggiunge il valore limite costante  $p_u$ ;
- il tratto iniziale della curva  $p$ - $y$  è definito dalla seguente espressione:

$$\frac{p}{p_u} = 0.5 \cdot \left( \frac{y}{y_{50}} \right)^3$$

Dove  $y_{50}$  è lo spostamento trasversale del palo ad una quota fissata corrispondente ad una pressione pari a  $0.5 \cdot p_u$  come mostrato in **Figura 50**.

Per il calcolo di  $y_{50}$  si può utilizzare la seguente formula nella quale  $\epsilon_{50}$  rappresenta la deformazione principale massima del terreno corrispondente ad uno spostamento trasversale del palo pari a  $y_{50}$  e può essere ricavato da **Tabella 44**.

$$y_{50} = 2.50 \cdot \epsilon_{50} \cdot D$$

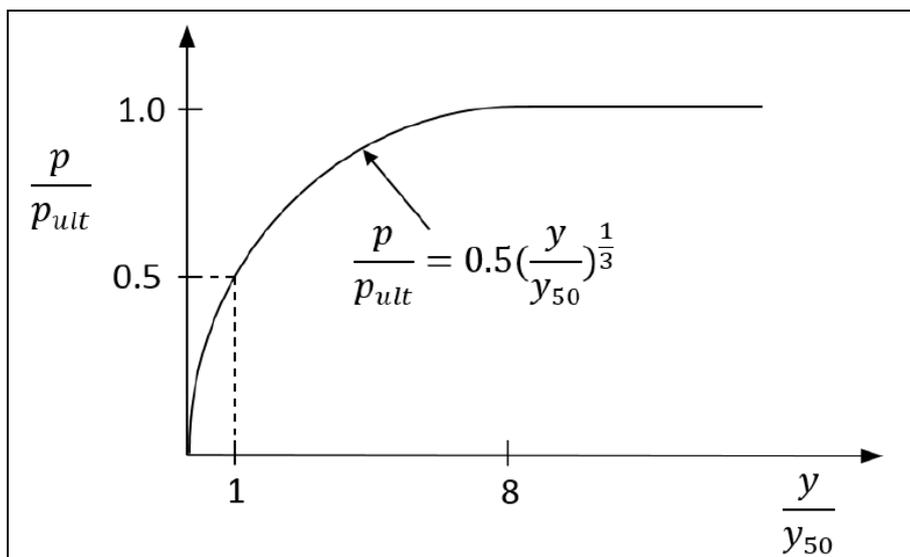


Figura 50 - Curva p-y per terreni coesivi normalconsolidati – Matlock, 1970

Consistenza	Cu media [kPa]	$\epsilon_{50}$ [-]
Tenera	<48	0.020
Media	48-96	0.010
Compatta	96-192	0.005

Tabella 44 - Valori di  $\epsilon_{50}$  per argille normalconsolidate (Peck et al. 1974)

La resistenza limite del terreno per unità di lunghezza e per unità di diametro  $p_u$  [kN/m<sup>2</sup>] viene calcolata come il valore minimo fornito dalle due seguenti espressioni:

$$p_u = \left[ 3 + \frac{\gamma'}{c_u} x + \frac{J}{D} x \right] c_u$$

$$p_u = 9 \cdot c_u$$

Il valore del parametro J è stato determinato da Matlock sperimentalmente e, per argille normalconsolidate può essere assunto pari a  $J=0.5$ .

Il valore del peso proprio  $\gamma'$  da utilizzare deve tenere conto dell'effettiva posizione della falda.

Si precisa che le due espressioni per il calcolo di  $p_u$  sopra riportate sono state ricavate considerando lo sviluppo di due possibili meccanismi di rottura differenti.

La prima espressione, infatti, si riferisce allo svilupparsi, nella parte superficiale del terreno, di un meccanismo di rottura di tipo cuneo, così come mostrato in **Figura 51**.

La seconda espressione invece si riferisce allo svilupparsi di un meccanismo di rottura di flusso del terreno attorno al palo come quello mostrato in **Figura 52**.

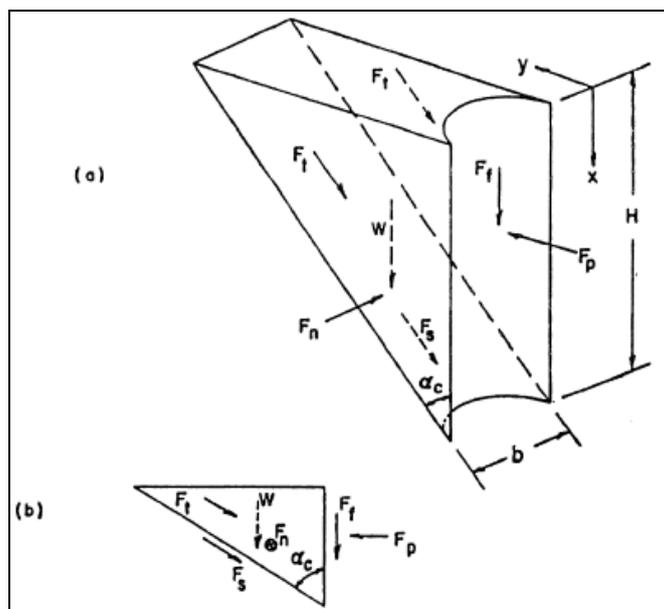


Figura 51 - Cuneo di rottura

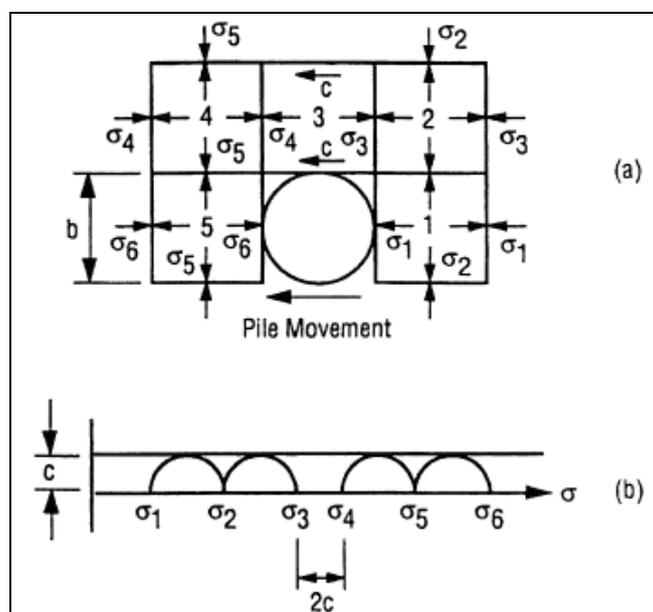


Figura 52 - Rottura del terreno per flusso del terreno attorno al palo

### 16.6.2.3 Verifica di capacità portante trasversale dei pali di fondazione

Affinché la verifica allo Stato Limite Ultimo di tipo geotecnico nei riguardi di carichi orizzontali sia soddisfatta deve risultare che la sommatoria delle pressioni esercitate dal terreno a contatto con il palo ( $p_{sollecitante}$ ), sia inferiore alla resistenza trasversale di progetto  $H_{lim}$ .

$$H_{lim} \geq \sum p_{sollecitante}$$

Si evidenzia che le pressioni dovute alla reazione del terreno possono svilupparsi, in funzione del comportamento del palo alle azioni orizzontali, o lungo tutto il fusto del palo (comportamento di palo corto) o interessando principalmente una sola porzione dello stesso (comportamento di palo

lungo). In quest'ultimo caso l'altezza  $\bar{H}$  da considerare per il calcolo sia delle azioni resistenti che delle azioni sollecitanti, risulta minore dell'altezza  $H$  totale del palo.

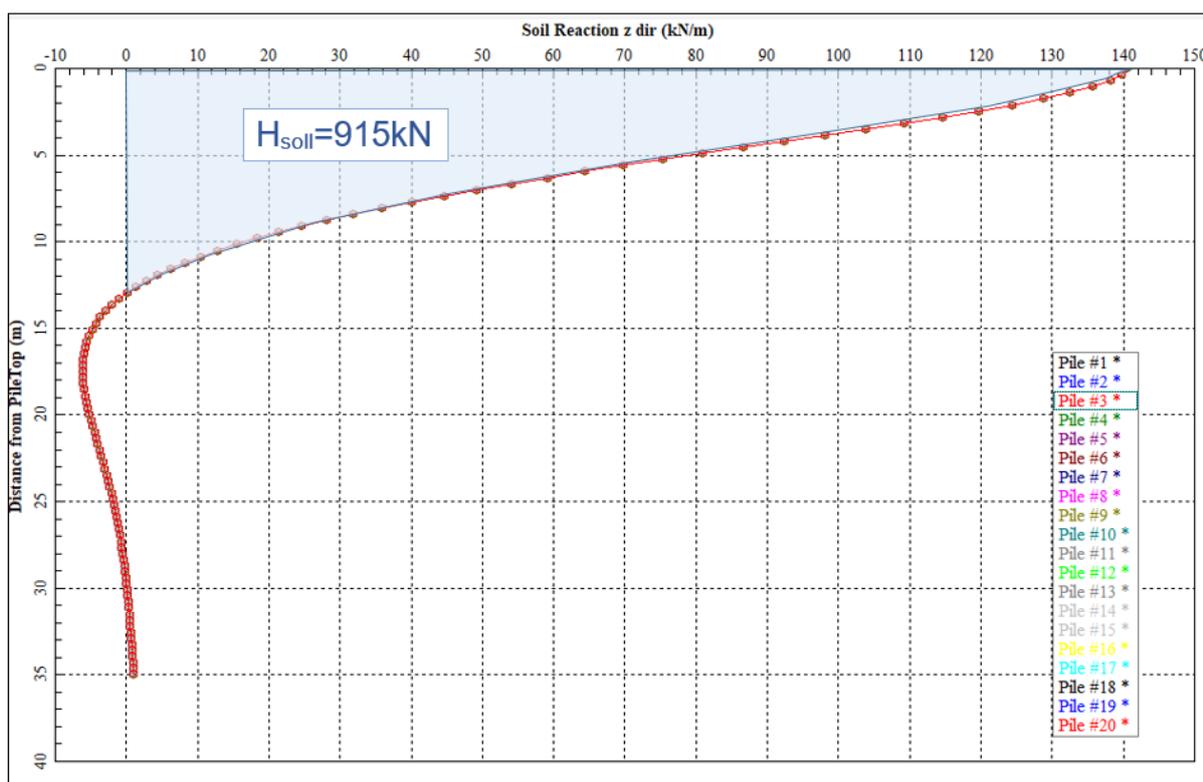
Il calcolo della resistenza trasversale di progetto  $H_{lim}$  può essere effettuato, tenendo conto delle curve  $p-y$ , così come definite al precedente paragrafo **16.6.2.2**, e considerando le indicazioni fornite dalle NTC 2018 di cui ai paragrafi **16.2** e **16.6** della presente relazione, mediante la procedura di seguito descritta.

Nota l'andamento delle curve  $p-y$  e quindi anche della resistenza ultima del terreno  $p_u$  con la profondità,  $H_{lim}$  risulta uguale alla sommatoria delle  $p_u$ , per un'altezza  $\bar{H}$  minore o uguale all'altezza totale del palo  $H$ , divisa per i coefficienti  $\xi_i$  e  $\gamma_T$  forniti dalla normativa (riportati rispettivamente in **Tabella 42** e in **Tabella 41**).

$$H_{lim} = \frac{\sum p_u}{\xi_i \cdot \gamma_T}$$

L'altezza  $\bar{H}$  ( $\leq H$ ) da considerare sia per il calcolo dell'azione sollecitante ( $\sum p_{sollecitante}$ ) che per la definizione della resistenza di progetto  $H_{lim}$  può essere ricavata dall'osservazione dell'andamento delle pressioni che si sviluppano nel terreno a contatto con il palo.

A titolo d'esempio si riporta in **Figura 53** l'andamento di tali pressioni espresse in kN per metro di profondità.



**Figura 53** - Esempio di andamento delle pressioni nel terreno a contatto con il palo

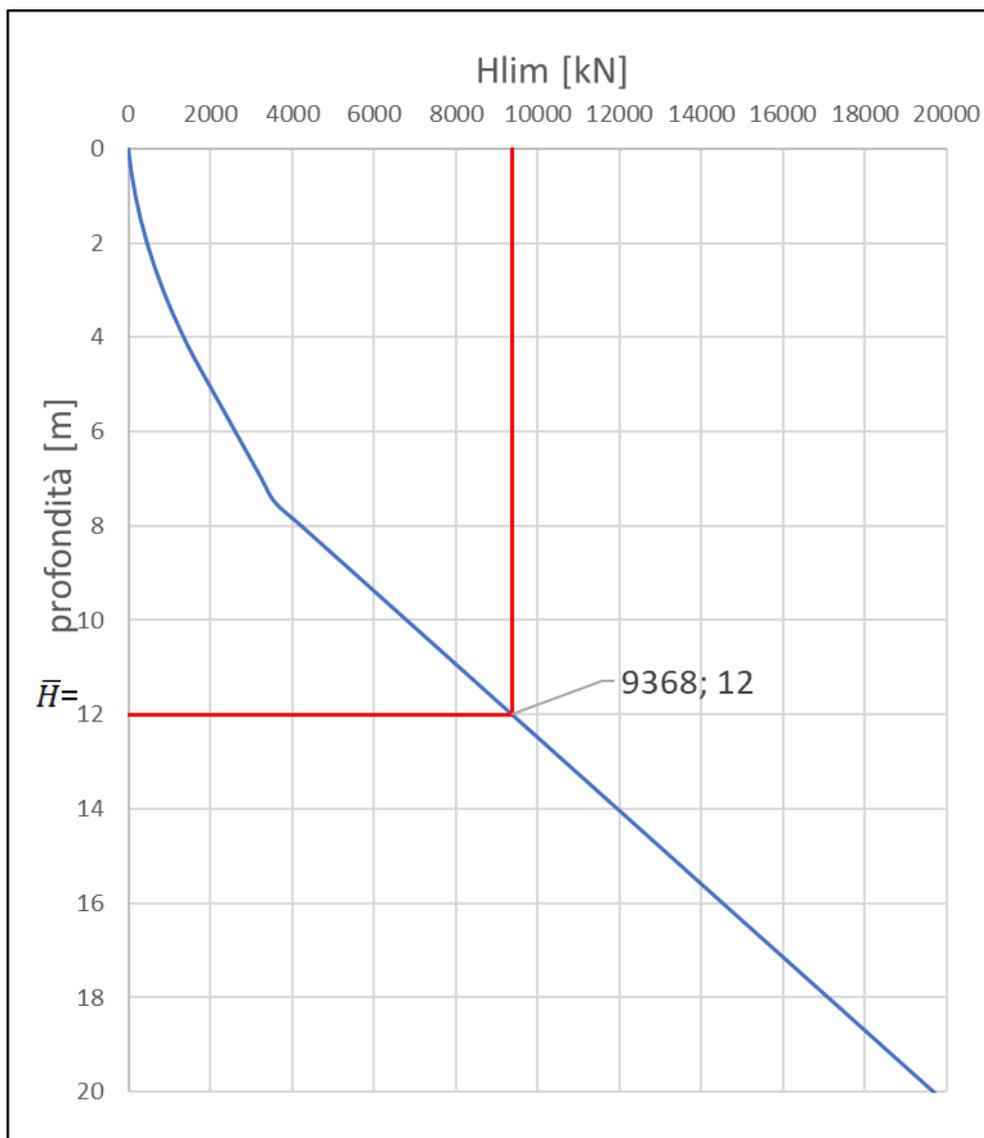
Il grafico di **Figura 53** mostra che il terreno a contatto con il palo si mobilita in modo significativo non lungo tutta l'altezza del palo bensì, solo per i primi 12 m di profondità, pertanto il valore di  $\bar{H}$ , cioè il valore di altezza da utilizzare per definire  $H_{lim}$ , può essere assunto, in questo esempio specifico, pari a 12 m.

Di conseguenza, in questo caso, la verifica di capacità portante trasversale è soddisfatta se vale la seguente disequazione:

$$H_{lim} = \frac{1}{\xi_i \cdot \gamma_T} \sum_0^{\bar{H}=12\text{ m}} p_u \geq \sum_0^{\bar{H}=12\text{ m}} p_{sollecitanti} = H_{soll}$$

Ancora con riferimento alla **Figura 53**, in questo caso risulta che la sollecitazione  $H_{soll}$  da considerare per la verifica geotecnica di capacità portante trasversale vale 915 kN.

Nel seguito si riporta in **Figura 54**, sempre con riferimento all'esempio di cui sopra, la curva di capacità portante orizzontale la quale fornisce il valore di  $H_{lim}$  al variare dell'altezza  $\bar{H}$ .



**Figura 54** - Esempio di andamento della  $H_{lim}$  con la profondità

Dalla curva di capacità portante orizzontale in **Figura 54** il valore di  $H_{lim}$ , per un'altezza utile del palo  $\bar{H}$  di 12 m, risulta pari a 9368 kN.

Pertanto, nell'esempio studiato, la verifica di capacità portante orizzontale del palo risulta soddisfatta in quanto:

$$H_{lim} = 9368 \text{ kN} \geq H_{soll} = 915 \text{ kN}$$

Si rimanda alle specifiche relazioni di calcolo di ciascuna opera per il dimensionamento dei pali e per la visualizzazione delle relative curve di capacità portante orizzontale.

In alternativa alla procedura sopra riportata, per il calcolo della capacità portante trasversale è possibile fare riferimento alla formulazione analitica di Broms (1964).

Secondo tale formulazione si considerano tre possibili meccanismi di rottura (a palo "corto", "intermedio" e "lungo") e la resistenza di calcolo del palo nei confronti delle sollecitazioni orizzontali viene determinata con riferimento alla seguente formula:

$$H_{limd} = \frac{\min(H_1; H_2, H_3)}{\xi \cdot \gamma_T}$$

dove:

$\xi$  = fattore di correlazione;

$\gamma_T$  = coefficiente parziale per la verifica agli SLU di pali soggetti a carichi trasversali;

adottando l'Approccio 2 di progetto, in accordo alla Tabella 6.4.VI delle NTC 2018, si assume un valore di  $\gamma_T$  pari a 1.3.

$H_1$  = carico limite nell'ipotesi di rottura a palo "corto", pari a

$$H_1 = 1.5 \cdot L^2 \cdot k_p \cdot \gamma \cdot D$$

$H_2$  = carico limite nell'ipotesi di rottura a palo "intermedio", pari a

$$H_2 = \left[ 0.5 \cdot \left( \frac{L}{D} \right)^2 + \frac{M_y}{k_p \gamma D^4} \cdot \frac{D}{L} \right] \cdot k_p \cdot \gamma \cdot D^3$$

$H_3$  = carico limite nell'ipotesi di rottura a palo "lungo", pari a

$$H_2 = \left[ 3.676 \frac{M_y}{k_p \gamma D^4} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot k_p \cdot \gamma \cdot D^3$$

Nelle precedenti formule i simboli riportati assumo il seguente significato:

$\gamma$  = peso specifico del terreno

$k_p$  = coefficiente di spinta passiva del terreno

$D$  = diametro del palo di fondazione

$L$  = lunghezza del palo di fondazione

$M_y$  = momento di plasticizzazione della sezione armata del palo.

## 16.7 Verifiche agli Stati Limite di Esercizio

Per i pali di fondazione in condizioni SLE sono state considerate le verifiche di limitazione delle tensioni in esercizio e le verifiche a fessurazione già precedentemente trattate ai rispettivi paragrafi **14.3.1** e **14.3.2** ai quali si rimanda.

Devono inoltre essere presi in considerazione i seguenti stati limite di esercizio, quando pertinenti:

- eccessivi cedimenti o sollevamenti;
- eccessivi spostamenti trasversali.

Specificamente, si devono calcolare i valori degli spostamenti e delle distorsioni nelle combinazioni caratteristiche previste per gli stati limite di esercizio al paragrafo 2.5.3 delle NTC 2018, per verificarne la compatibilità con i requisiti prestazionali della struttura in elevazione.

## 17 FONDAZIONI SU MICROPALI

Le verifiche delle fondazioni su micropali sono condotte secondo il metodo degli Stati Limite, come prescritto dalle "Nuove norme tecniche sulle costruzioni" del 17 gennaio 2018.

### 17.1 Verifiche agli Stati Limite Ultimi

Le verifiche sono effettuate con riferimento ai seguenti stati limite:

- SLU di tipo geotecnico (GEO):
  - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi assiali;
  - collasso per carico limite della palificata nei riguardi dei carichi trasversali;
  - collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione;
  - stabilità globale.
- SLU di tipo strutturale (STR)
  - raggiungimento della resistenza dei pali;
  - raggiungimento della resistenza della struttura di collegamento dei pali.

Per ogni stato limite considerato si accerta che sia soddisfatta la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove  $E_d$  e  $R_d$  rappresentano rispettivamente le sollecitazioni e le resistenze di progetto.

In accordo con le NTC 2018 le verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU) delle opere in oggetto sono effettuate secondo l'Approccio 2, con la combinazione A1+M1+R3 (dove il segno '+' in ossequio alla normativa ha il significato di 'combinato con').

I fattori di sicurezza parziali sulle azioni (A1), sui parametri geotecnici (M1) e sulle resistenze (R3) sono riportati nelle **Tabella 45**, **Tabella 46**, **Tabella 47** e **Tabella 48**.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> per la spinta delle terre si faccia riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

**Tabella 45** - Coefficienti parziali  $\gamma_F$  e  $\gamma_E$  per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tabella 6.2.1 NTC 18)

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_Y$	$\gamma_Y$	1,0	1,0

**Tabella 46** - Coefficienti parziali  $\gamma_M$  per i parametri geotecnici del terreno (Tabella 6.2.II NTC 18)

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	$\gamma_R$	(R3)	(R3)	(R3)
Base	$\gamma_b$	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	$\gamma_s$	1,15	1,15	1,15
Totale (*)	$\gamma$	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	$\gamma_{st}$	1,25	1,25	1,25
(*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto				

**Tabella 47** - Coefficienti parziali  $\gamma_R$  da applicare alle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali (Tabella 6.4.II NTC 18)

Resistenza	Simbolo	Coefficiente parziale (R3)
Trasversale	$\gamma_T$	1,3

**Tabella 48** - Coefficienti parziali  $\gamma_T$  per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali (Tabella 6.4.VI NTC 18)

## 17.2 Condizioni sismiche

Le verifiche di capacità portante dei micropali in presenza di azioni sismiche consistono nel confronto tra le azioni (forza assiale e forza trasversale sul micropalo) e le corrispondenti resistenze, nel rispetto della condizione  $E_d \leq R_d$  ponendo unitari i coefficienti amplificativi delle azioni e dei materiali e considerando i medesimi coefficienti di cui al paragrafo 17.1 per le resistenze.

### 17.3 Verifica di resistenza nei confronti dei carichi assiali

La verifica di resistenza nei confronti dei carichi assiali per i micropali è soddisfatta se le azioni sollecitanti di progetto  $N_{c,Ed}$  di compressione e  $N_{t,Ed}$  di trazione risultano inferiori alle rispettive resistenze di progetto  $R_{c,d}$  e  $R_{t,d}$ .

$$N_{c,Ed} \leq R_{c,d}$$

$$N_{t,Ed} \leq R_{t,d}$$

Il valore di progetto della resistenza  $R_d$  si ottiene a partire dal valore della resistenza caratteristica  $R_{c,k}$  applicando i coefficienti presentati al paragrafo 17.1.

$$R_{c,d} = \frac{R_k}{\gamma_s}$$

$$R_{t,d} = \frac{R_k}{\gamma_{st}}$$

dove:

$R_{c,d}$  capacità portante di progetto in compressione

$R_{t,d}$  capacità portante di progetto in trazione

La capacità portante caratteristica del singolo micropalo è valutata ipotizzando che tutta la resistenza si sviluppi per aderenza laterale, mediante la seguente espressione:

$$R_k = R_{c,k}$$

dove:

$R_{c,k}$  capacità portante caratteristica per attrito laterale

Nel caso di resistenza caratteristica ottenuta tramite metodi di calcolo analitici, la vigente normativa prevede di calcolare la resistenza caratteristica  $R_k$  a partire dalle resistenze di calcolo ottenute considerando i parametri geotecnici medi e minimi dei terreni, opportunamente fattorizzate:

$$R_{c,k} = \min \left( \frac{(R_{c,cal})_{media}}{\xi_3}; \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right)$$

I coefficienti  $\xi$  assumono i valori riportati **Tabella 49** in funzione del numero di verticali indagate.

numero verticali indagate	1	2	3	4	5	7	>10
$\xi_3$	1.7	1.65	1.60	1.55	1.50	1.45	1.40
$\xi_4$	1.7	1.55	1.48	1.42	1.34	1.28	1.21

**Tabella 49** - Fattore di correlazione per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali indagate (Tabella 6.4.IV NTC 18)

La resistenza di calcolo  $R_{c,cal}$  è valutata mediante la seguente formula:

$$R_{c,cal} = \sum_i \tau_{lim\ i} \cdot \pi \cdot \alpha_i \cdot \phi_{perf} \cdot L_i$$

dove:

$\tau_{lim\ i}$  aderenza tra l'i-esimo strato di terreno e il micropalo

$\alpha_i$  coefficiente empirico funzione del terreno e delle modalità esecutive

$\phi_{perf}$  diametro di perforazione del micropalo

$L_i$  lunghezza del tratto di micropalo nell'i-esimo strato di terreno

#### 17.4 Verifica di resistenza nei confronti di carichi trasversali

Per la procedura metodologica relativa alla verifica di resistenza dei micropali nei confronti di carichi trasversali si possono seguire le disposizioni presentate al paragrafo **16.6.2** nel quale è riportato il calcolo della capacità portante orizzontale per pali di grande diametro.

#### 17.5 Verifiche agli Stati Limite di Esercizio

Per i micropali di fondazione è stata considerata la verifica SLE di limitazione delle tensioni in esercizio esclusivamente lato acciaio già trattata al precedente paragrafo **14.3.1** al quale si rimanda.

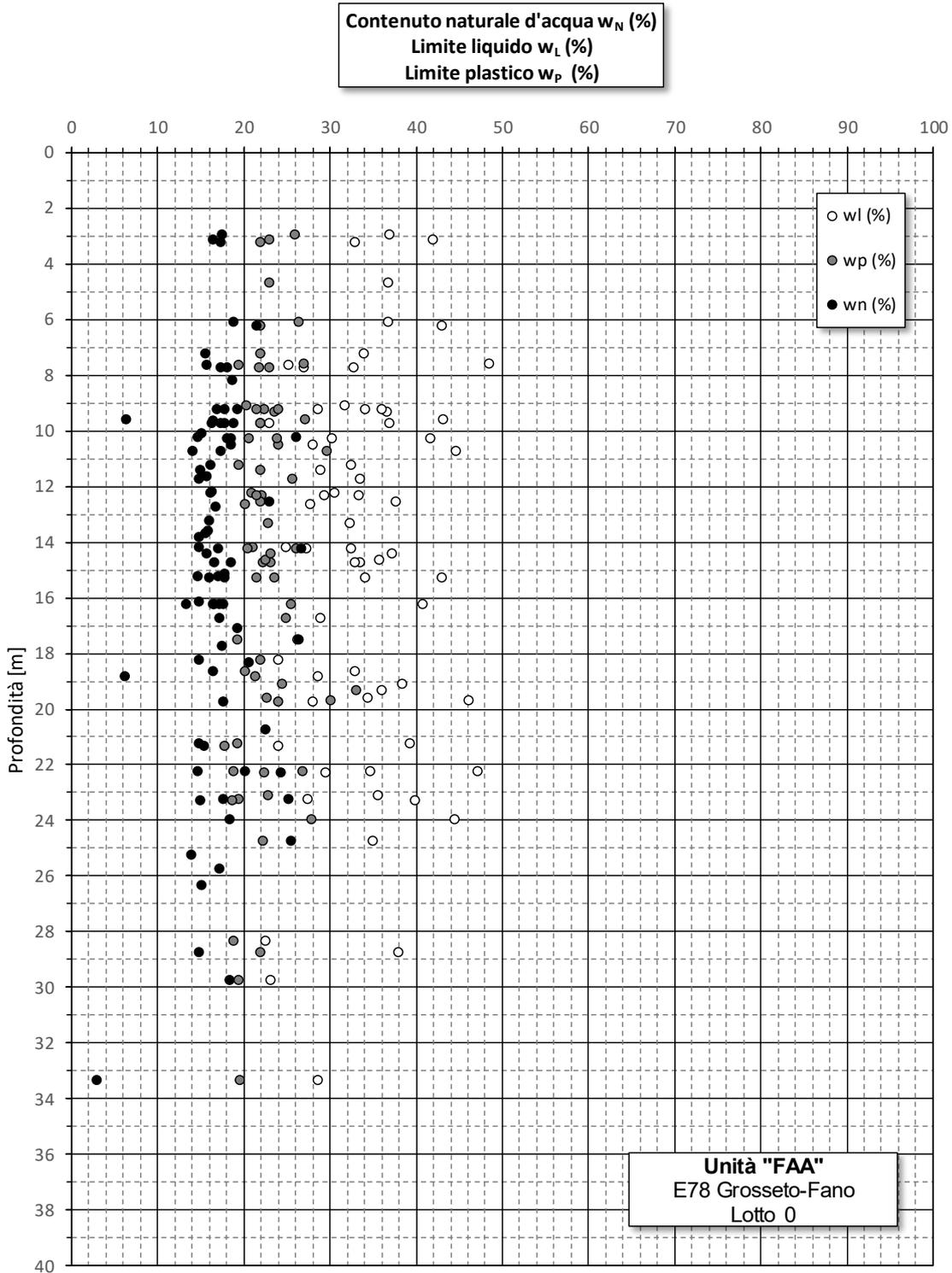
Devono inoltre essere presi in considerazione i seguenti stati limite di esercizio, quando pertinenti:

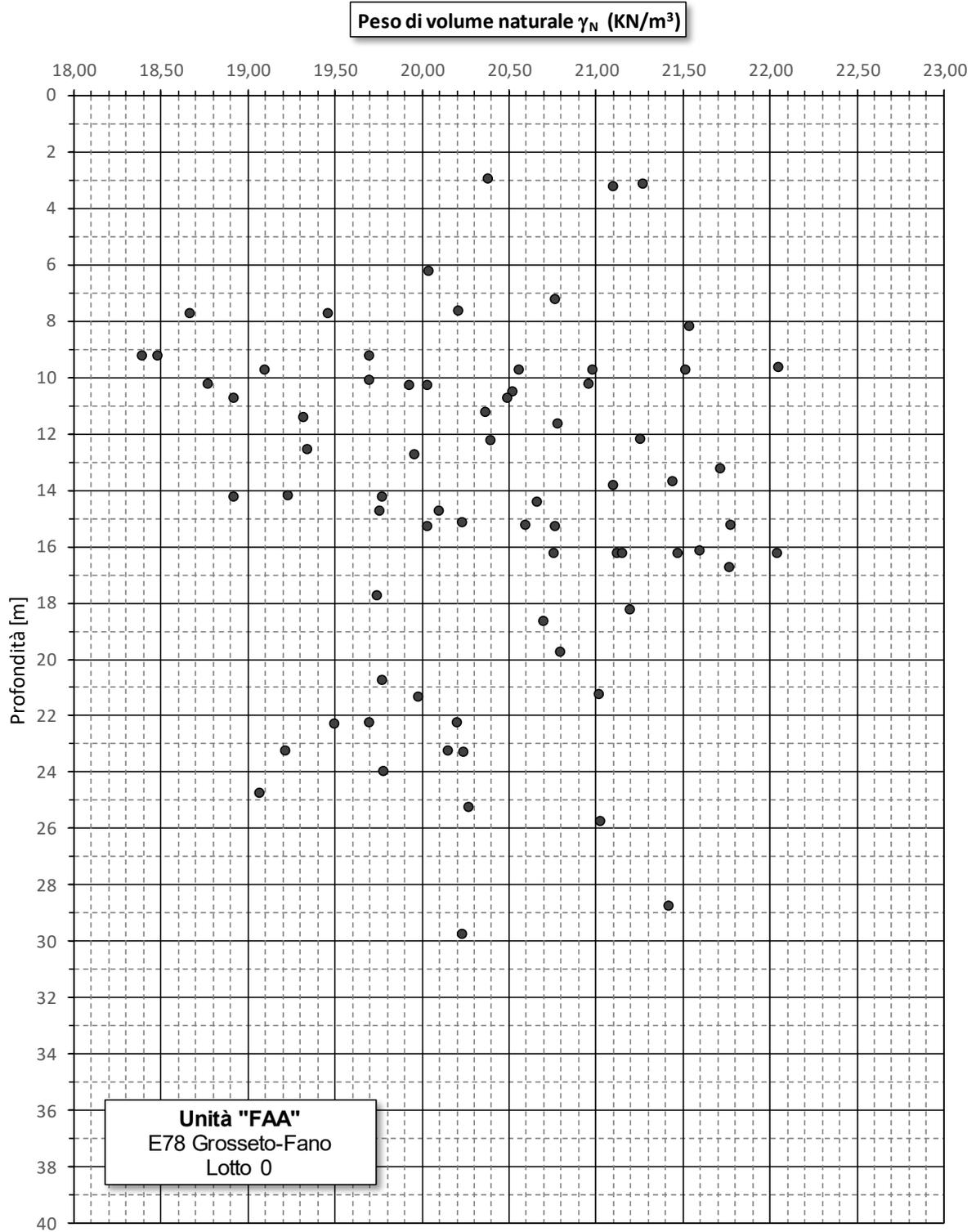
- eccessivi cedimenti o sollevamenti;
- eccessivi spostamenti trasversali.

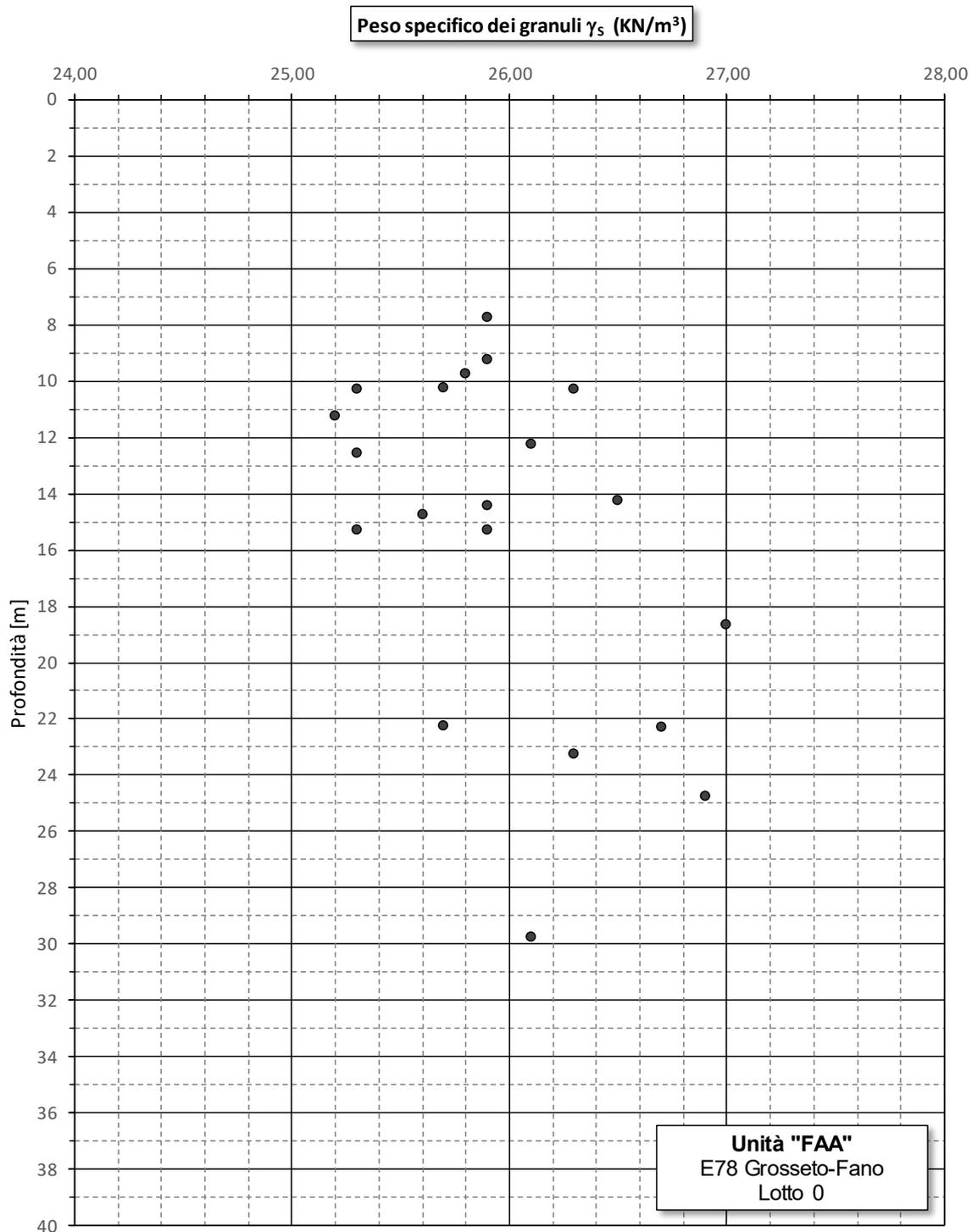
Specificamente, si devono calcolare i valori degli spostamenti e delle distorsioni nelle combinazioni caratteristiche previste per gli stati limite di esercizio al paragrafo 2.5.3 delle NTC 2018, per verificarne la compatibilità con i requisiti prestazionali della struttura in elevazione.

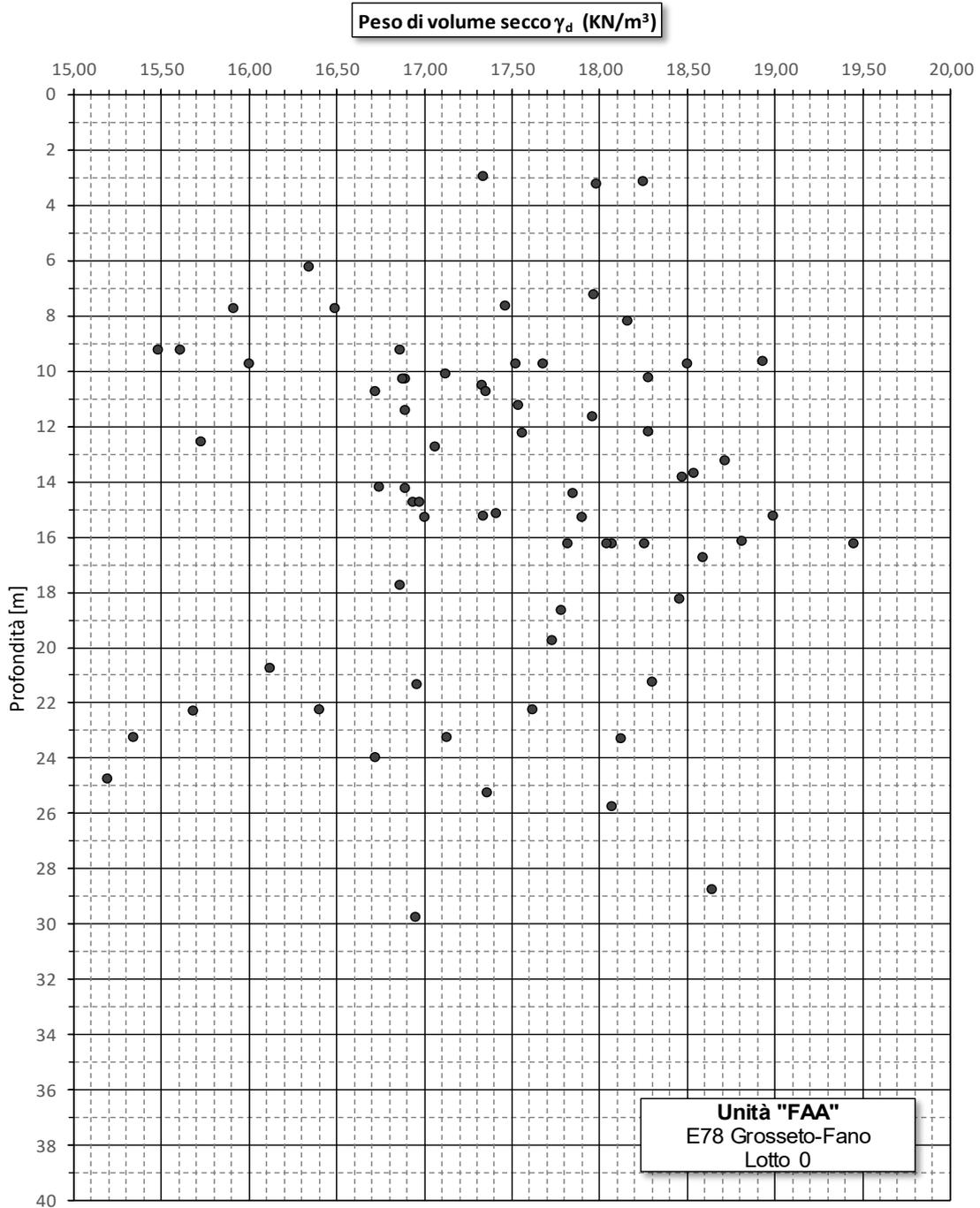
## 18 APPENDICE 1 – CARATTERISTICHE FISICHE E MECCANICHE DETERMINATE DALLE PROVE IN SITO E DALLE PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO

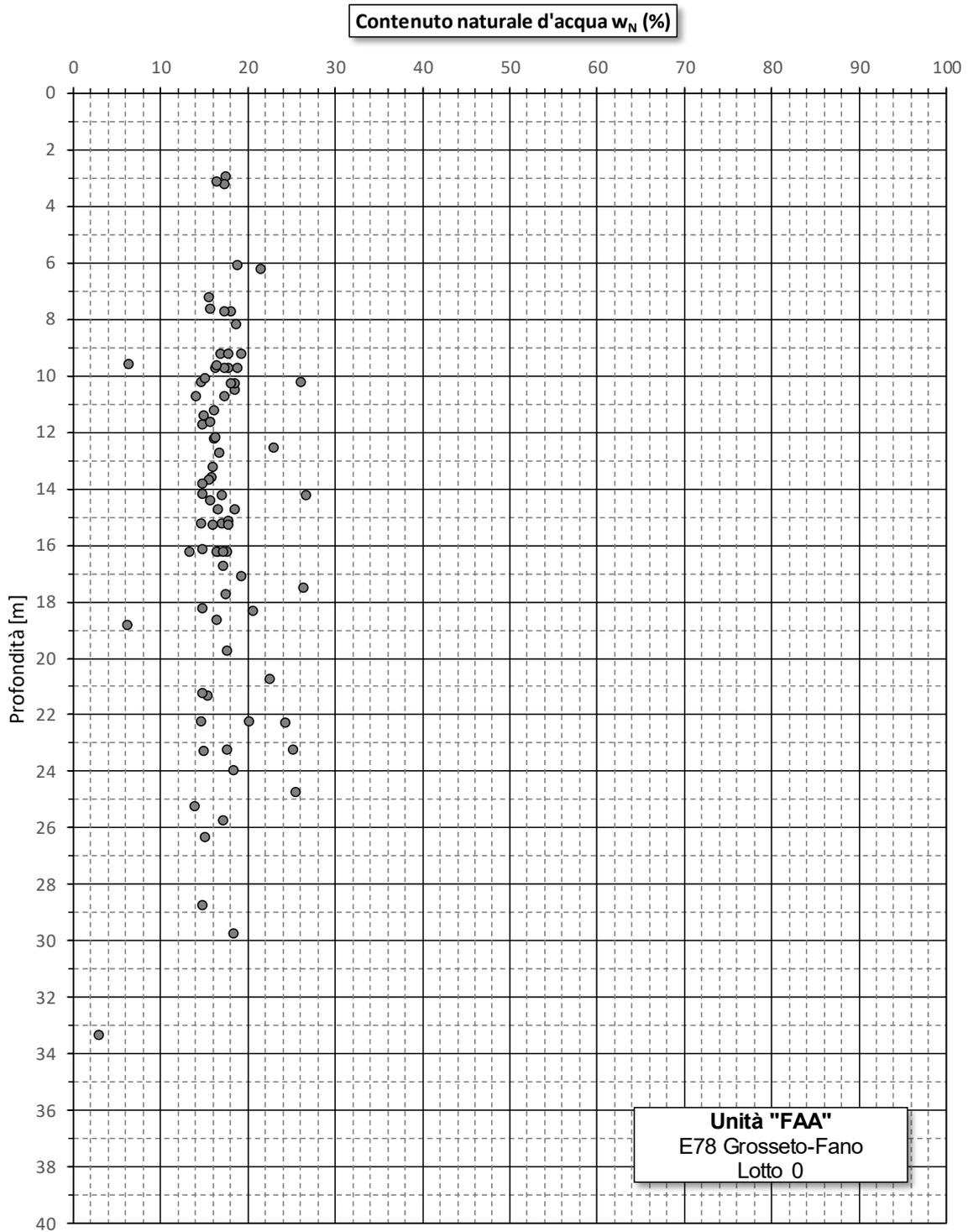
18.



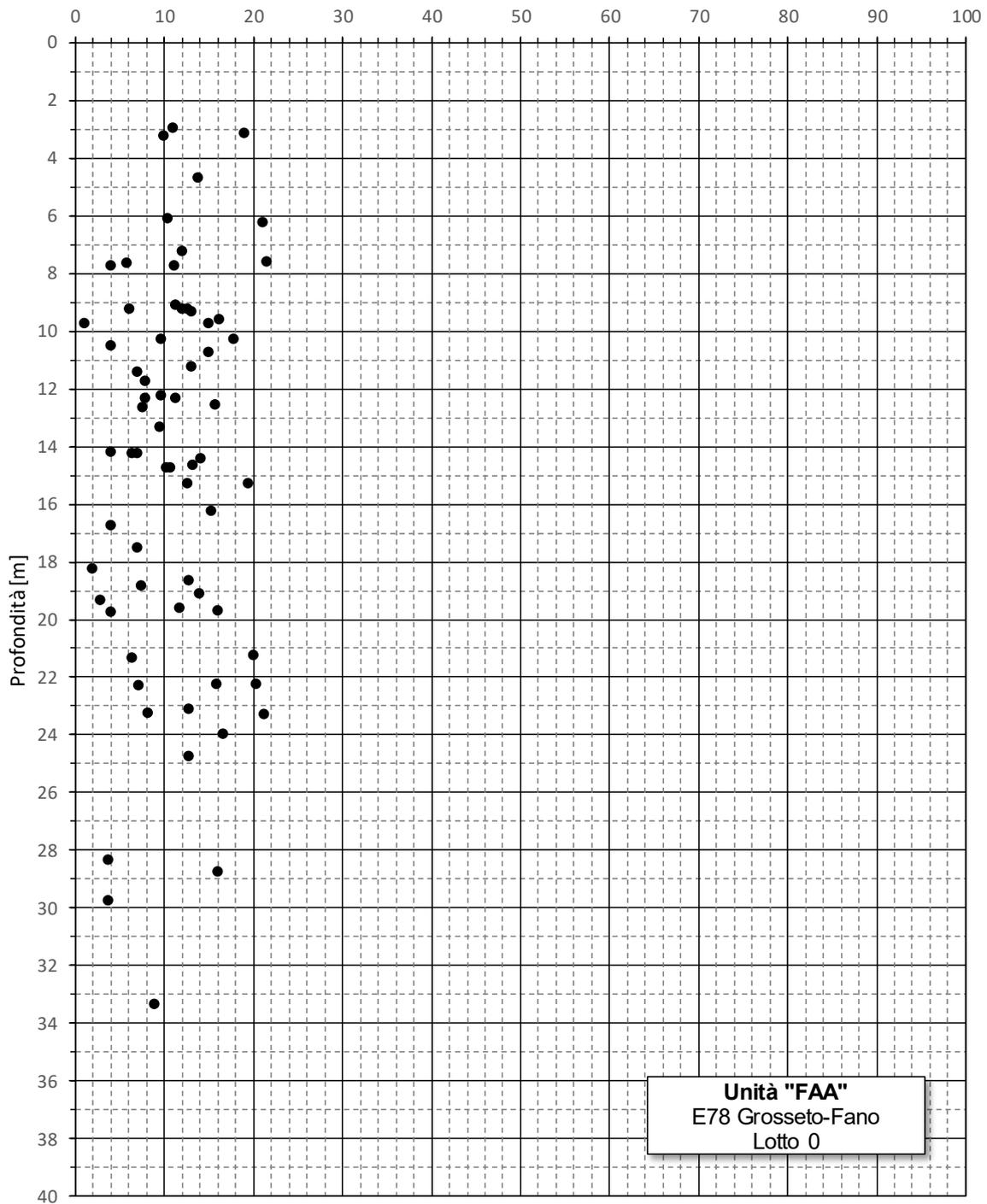






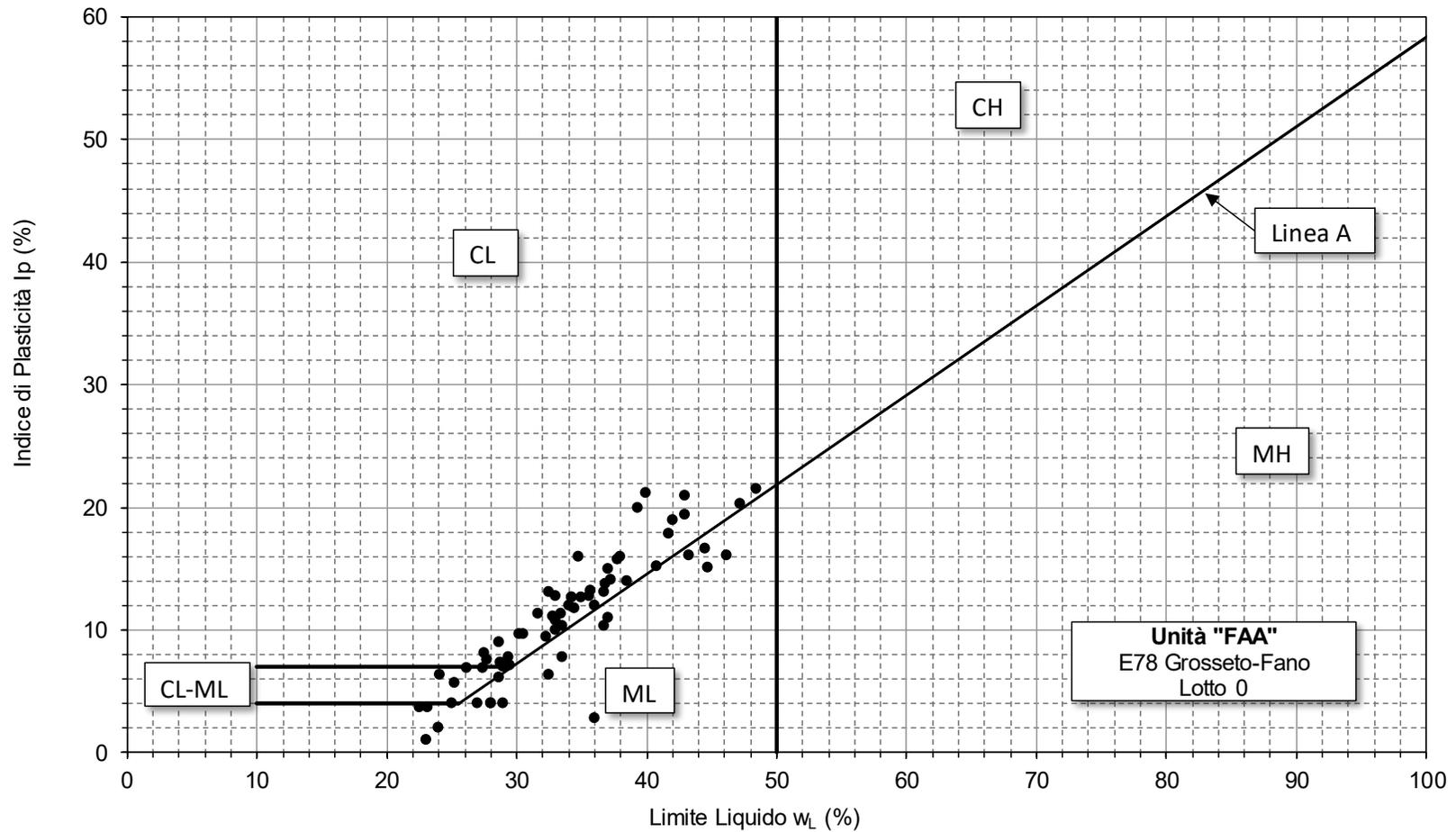


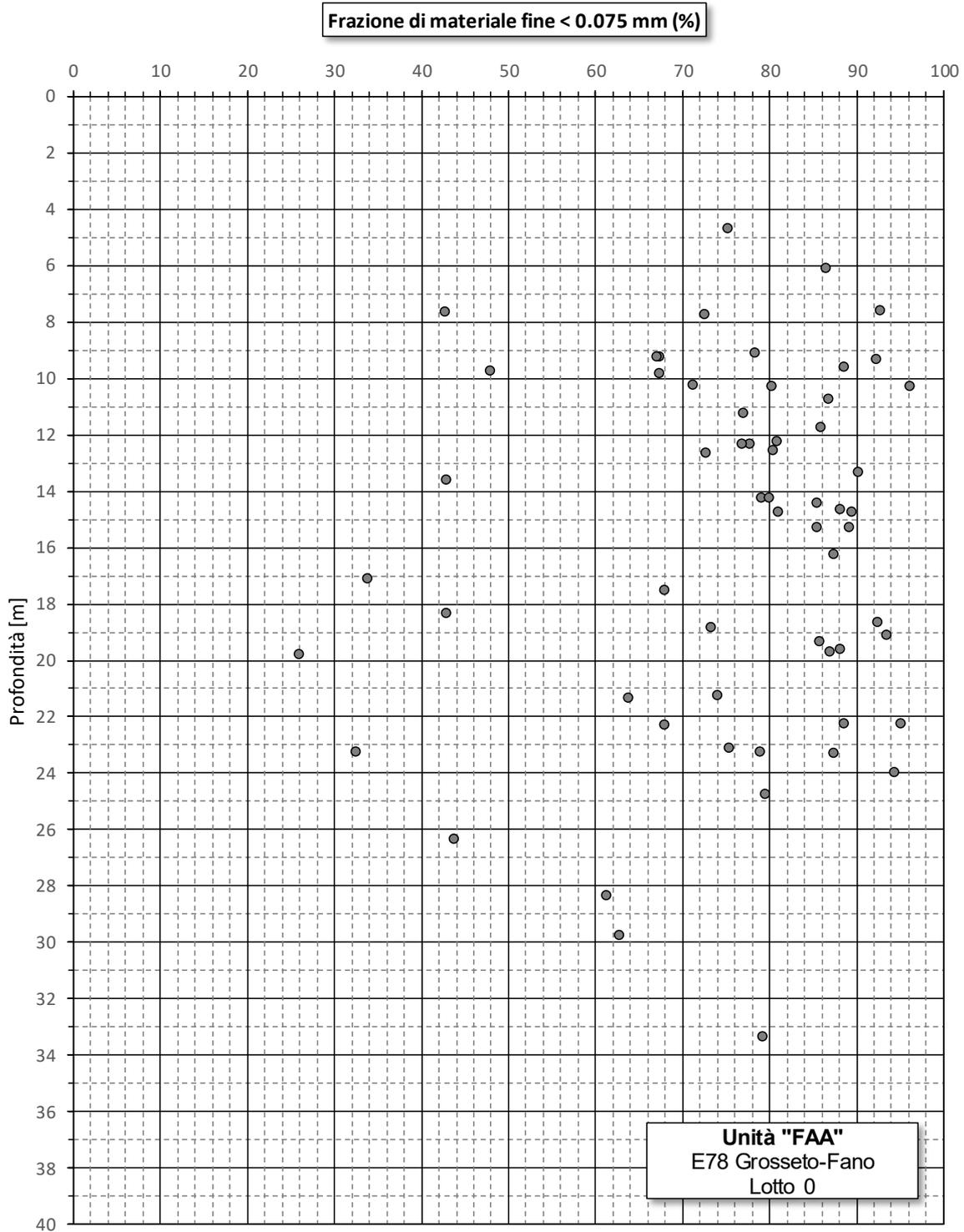
Indice di plasticità  $I_p$  (%)

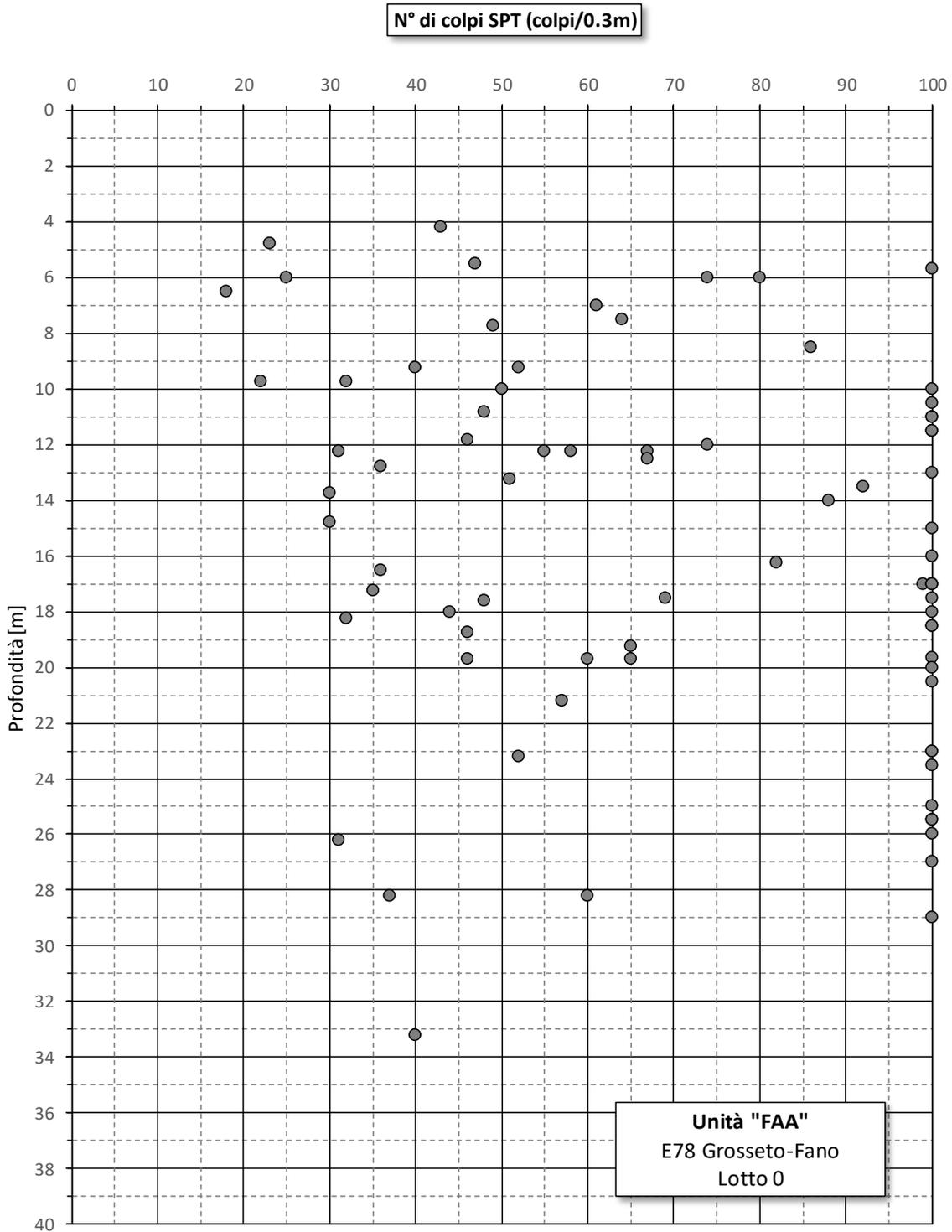


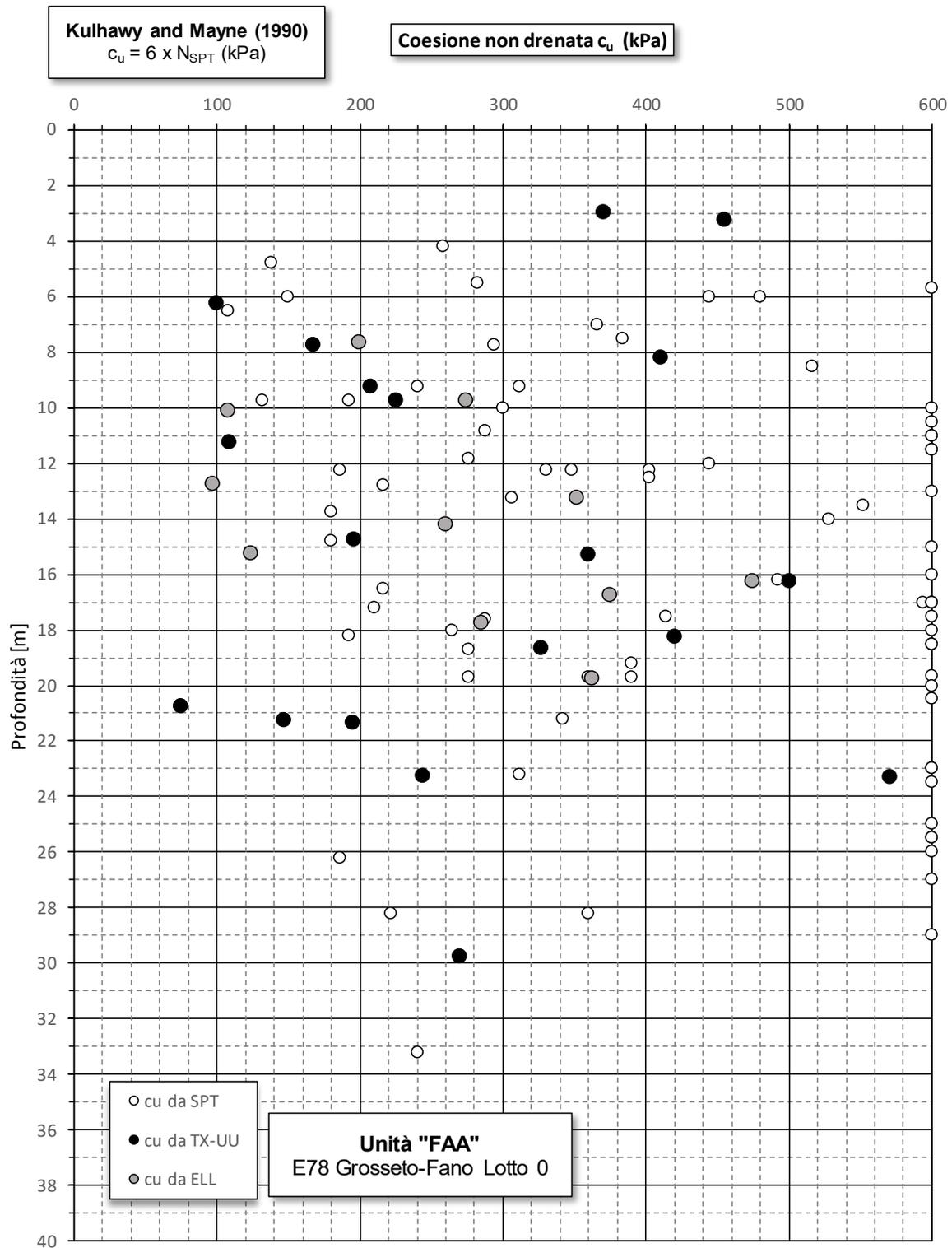
Unità "FAA"  
E78 Grosseto-Fano  
Lotto 0

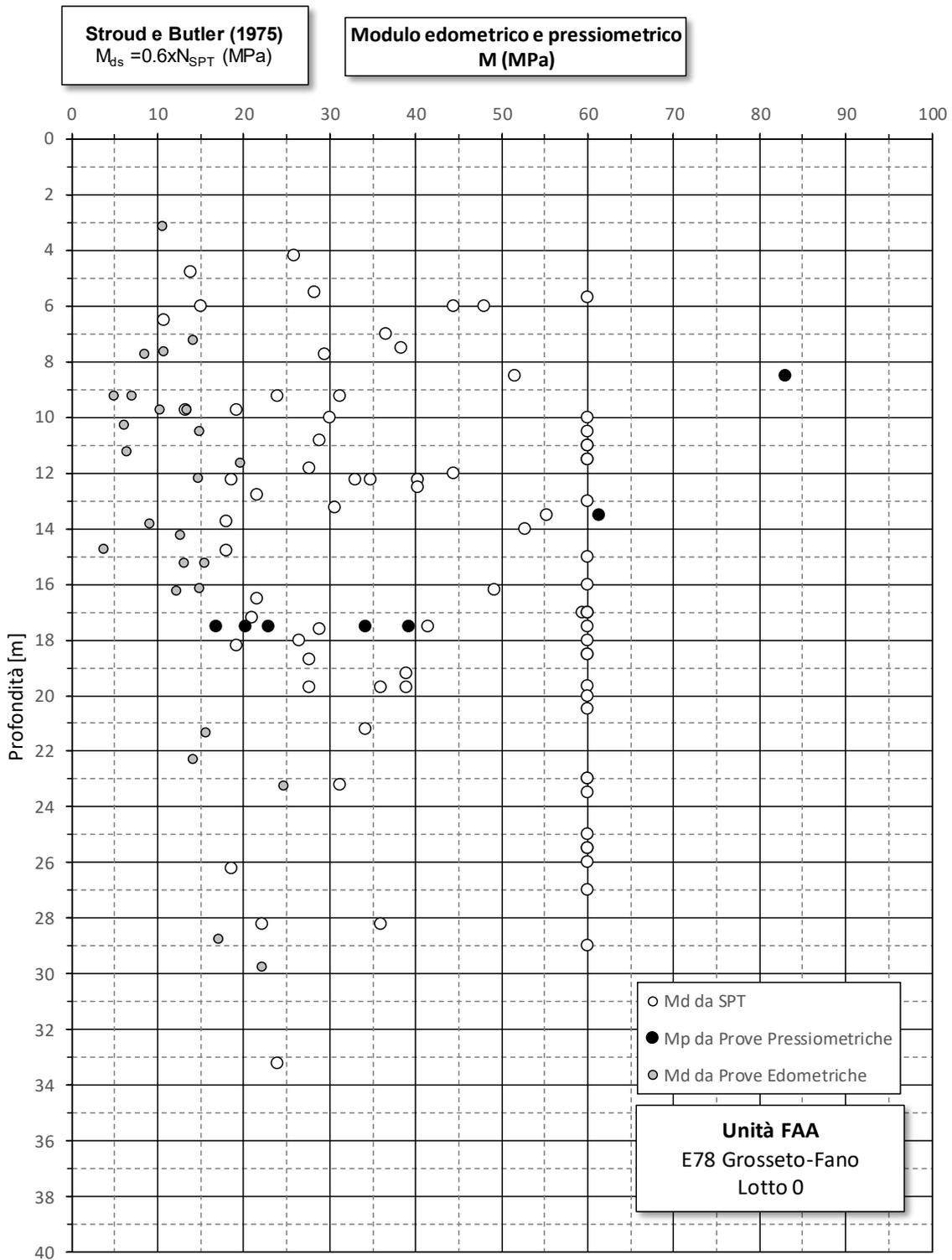
### Carta di Plasticità

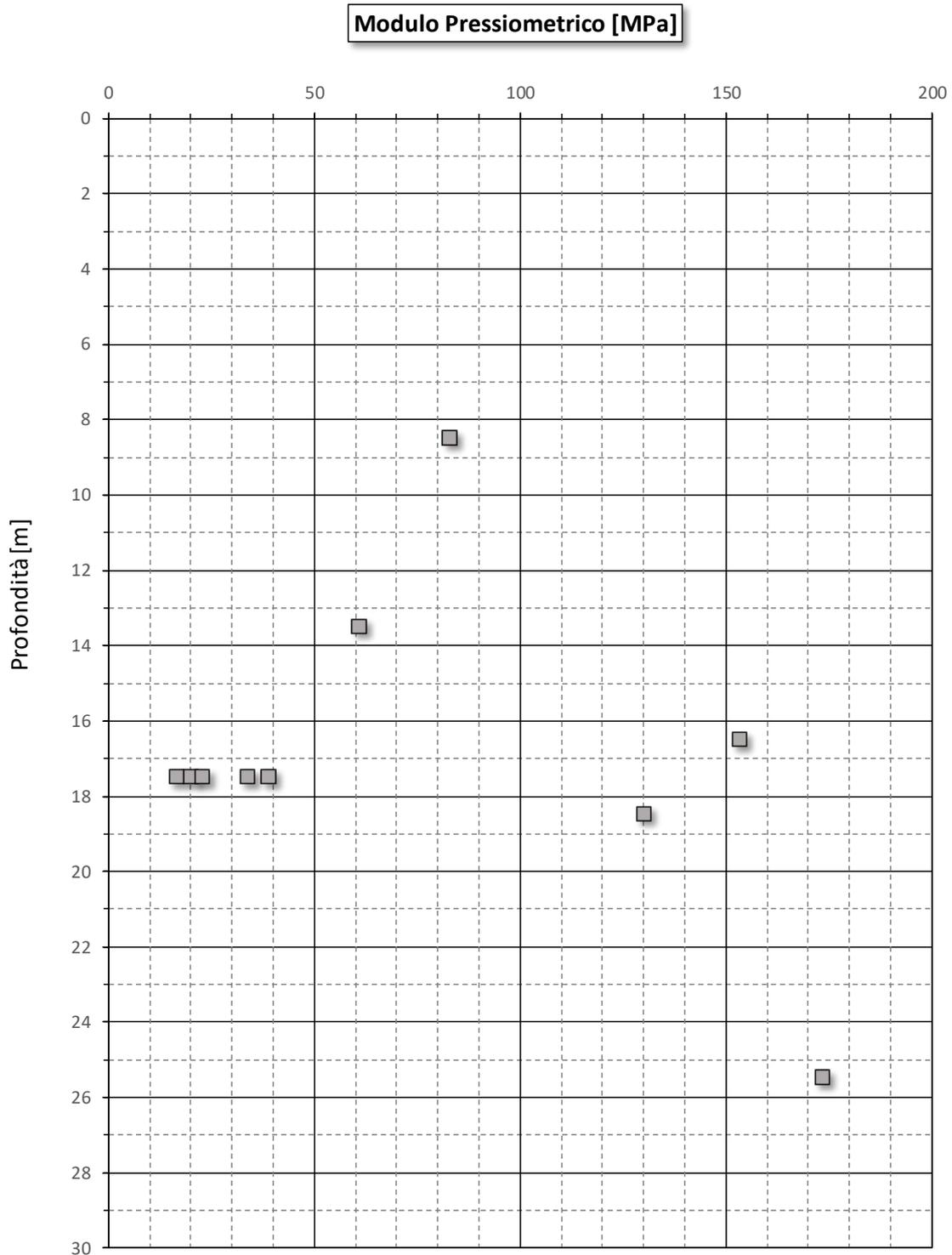


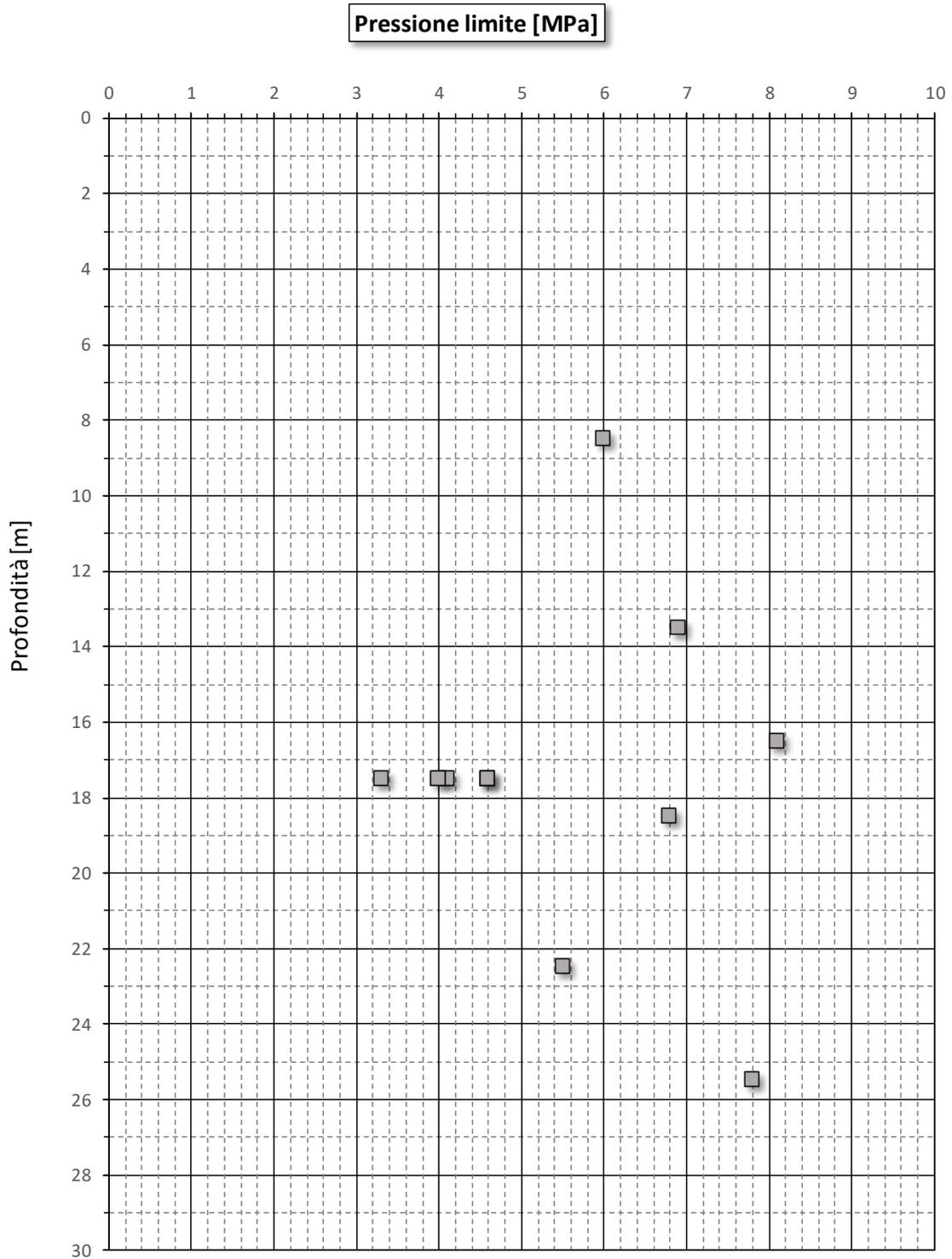


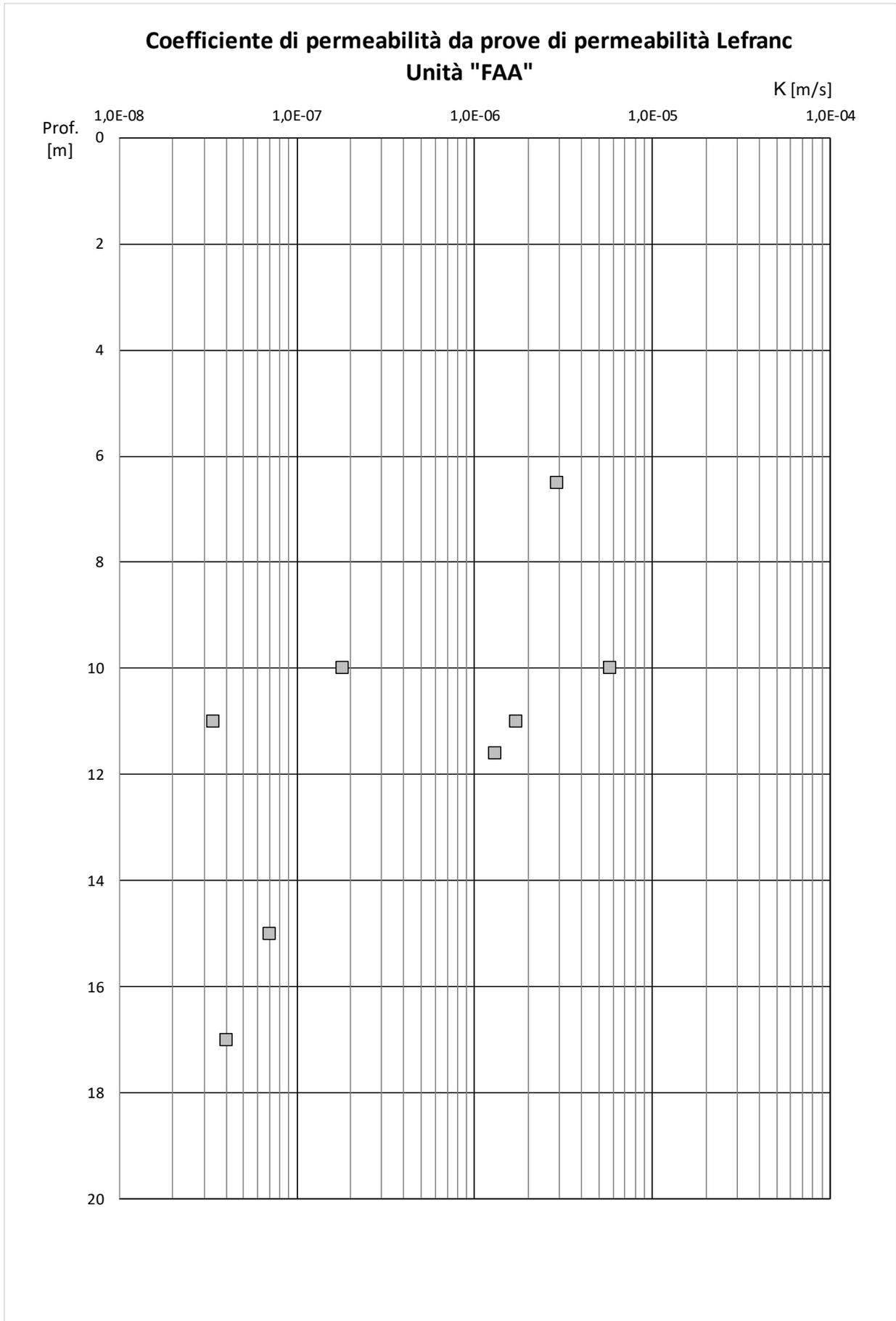




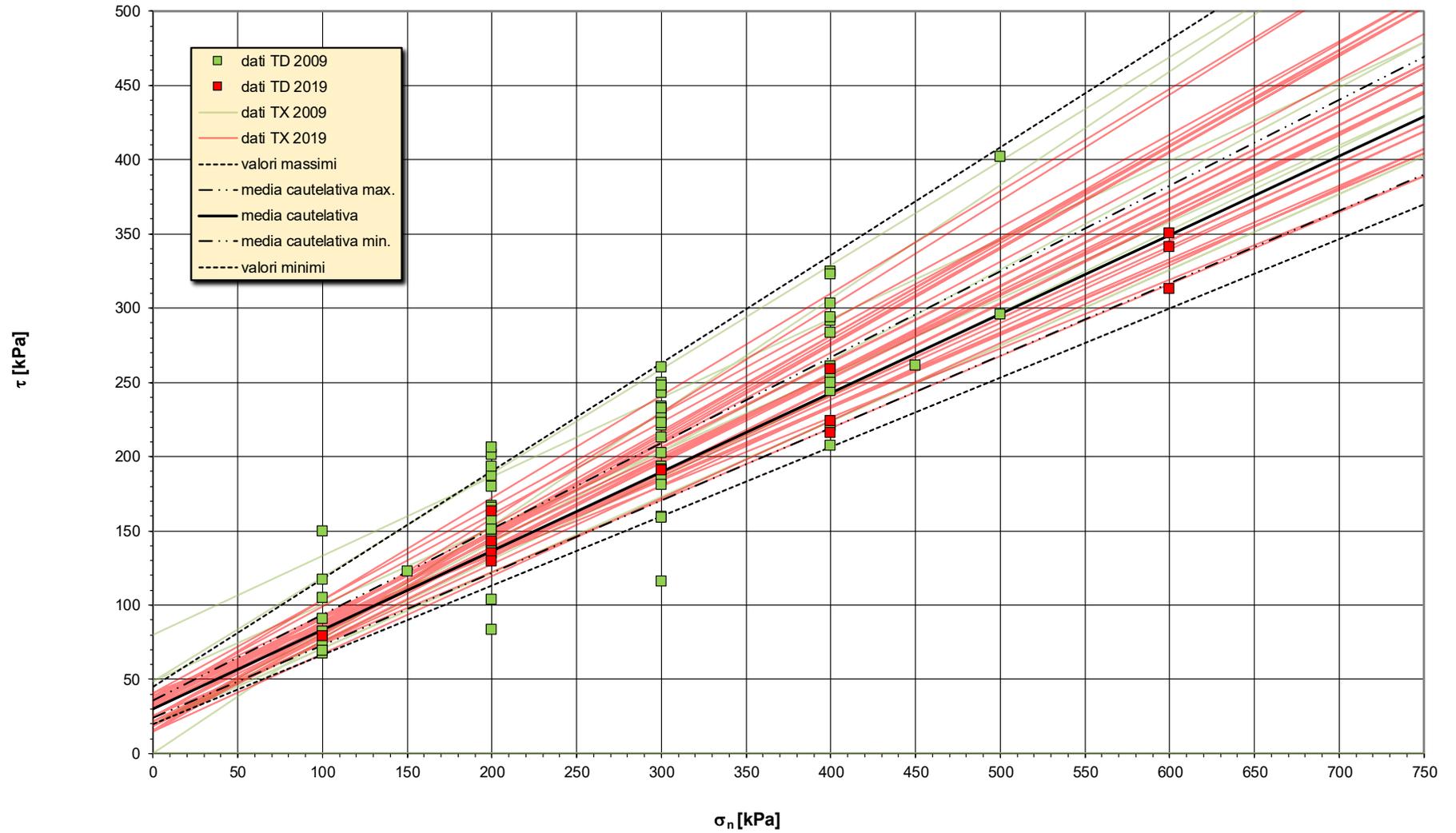


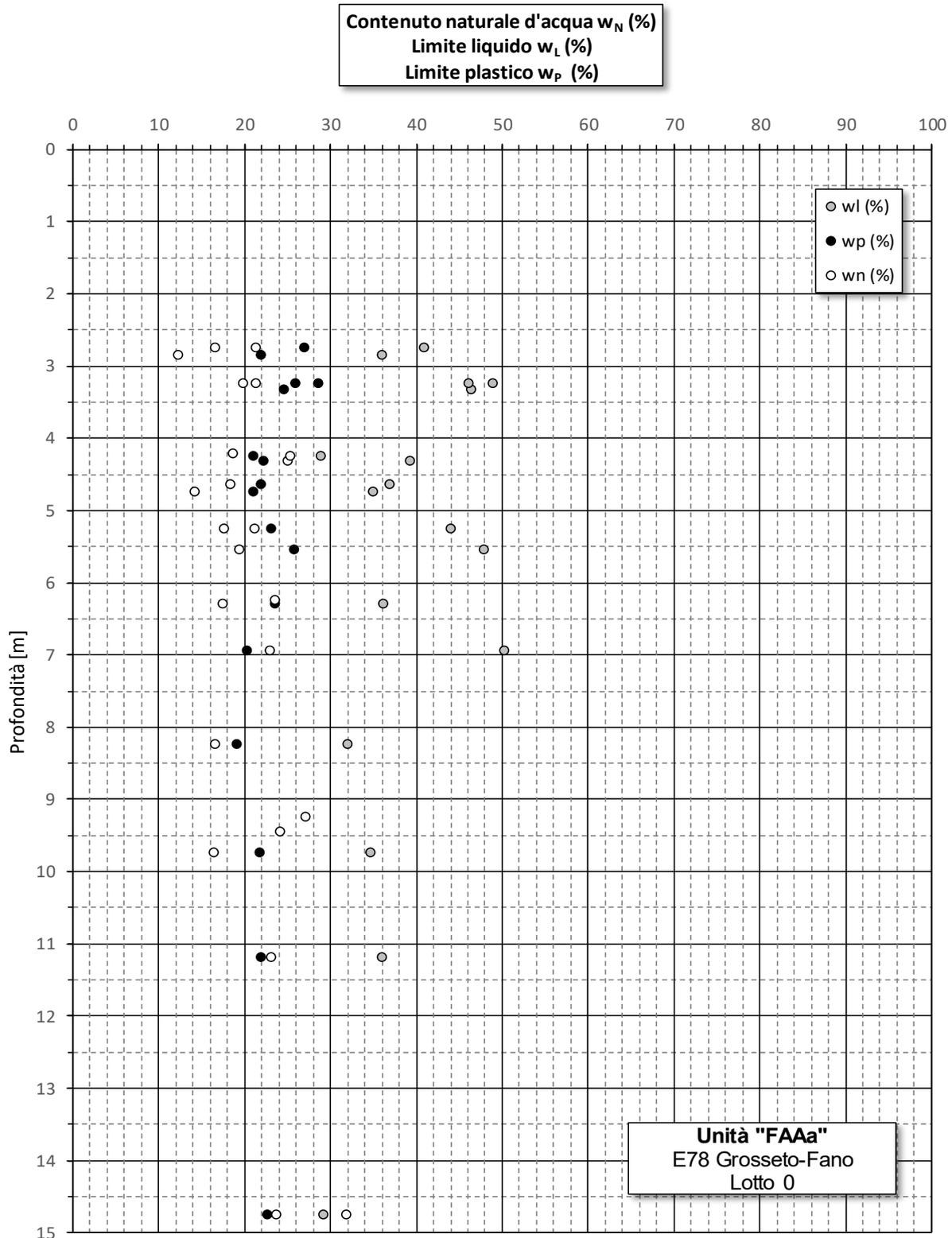


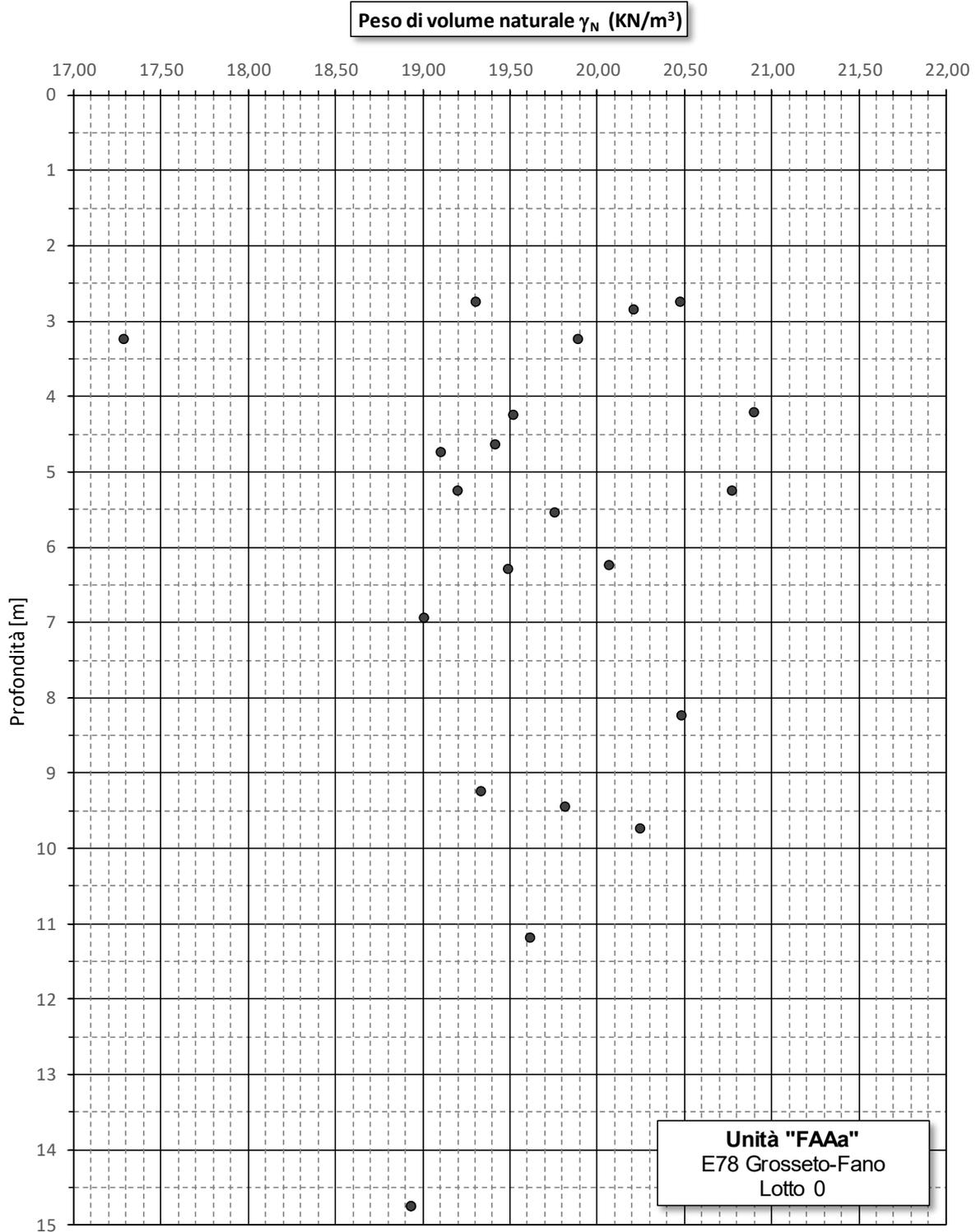


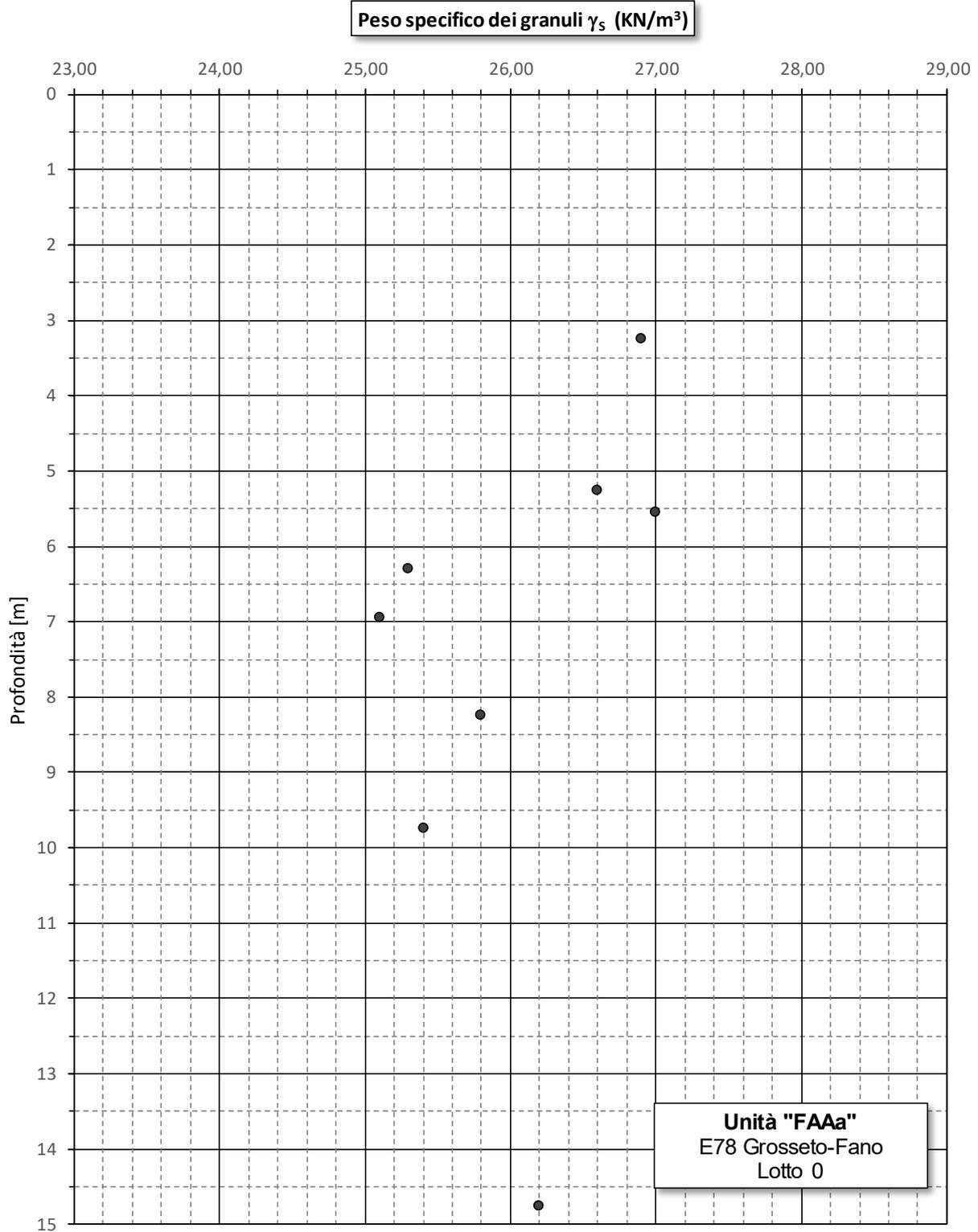


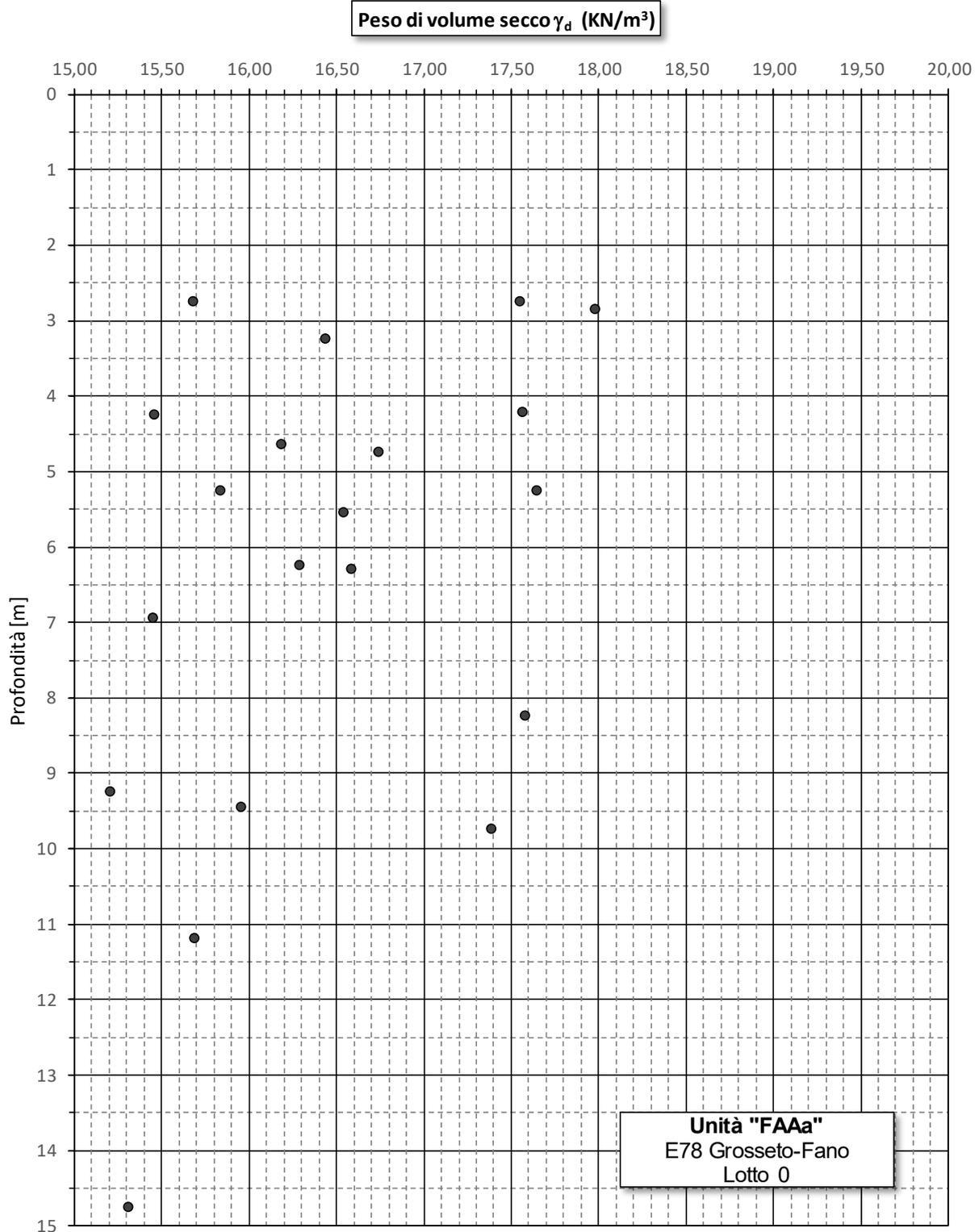
**Resistenza al taglio di picco da prove di taglio diretto e prove triassiali - Argille plioceniche (FAA)**

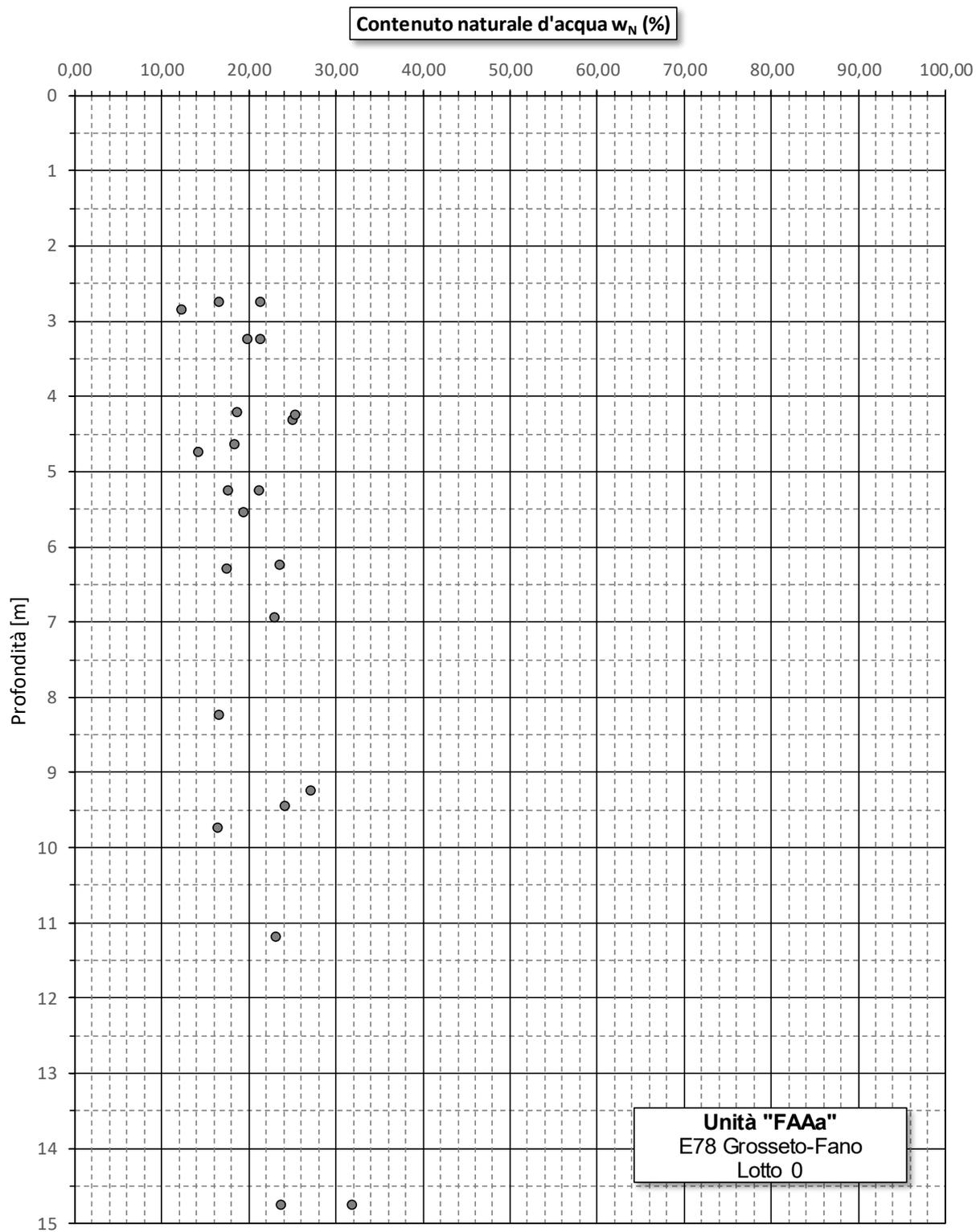


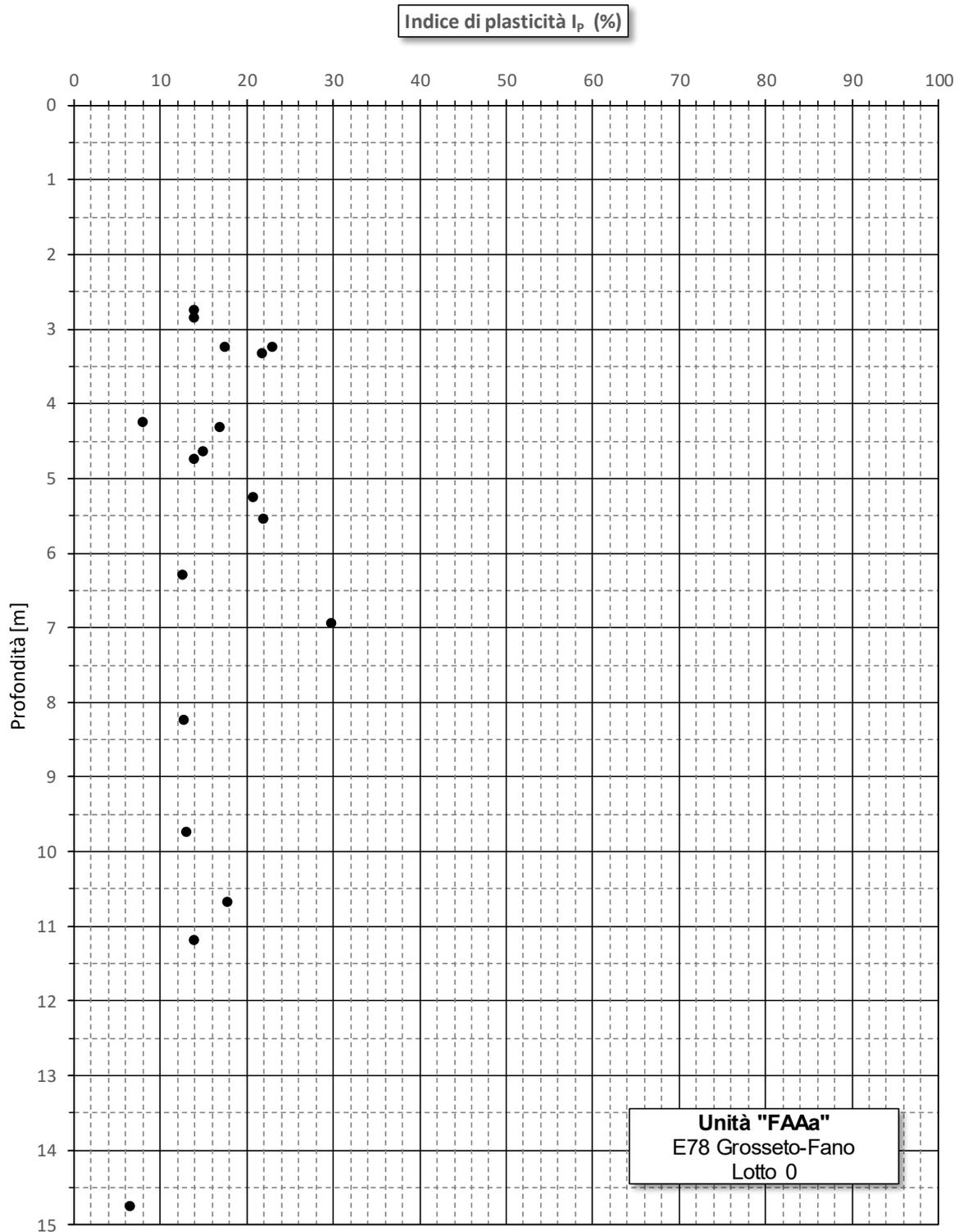


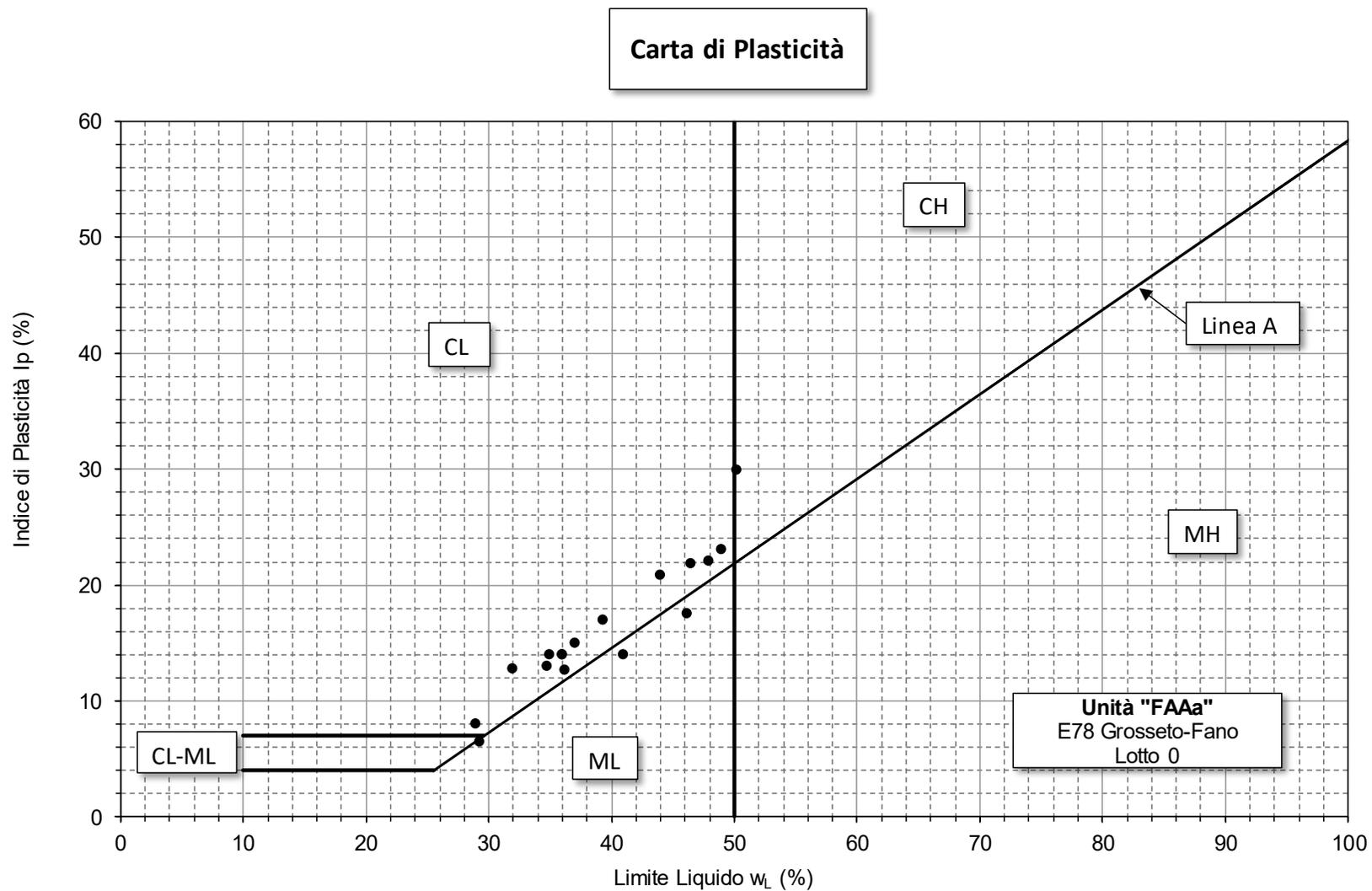


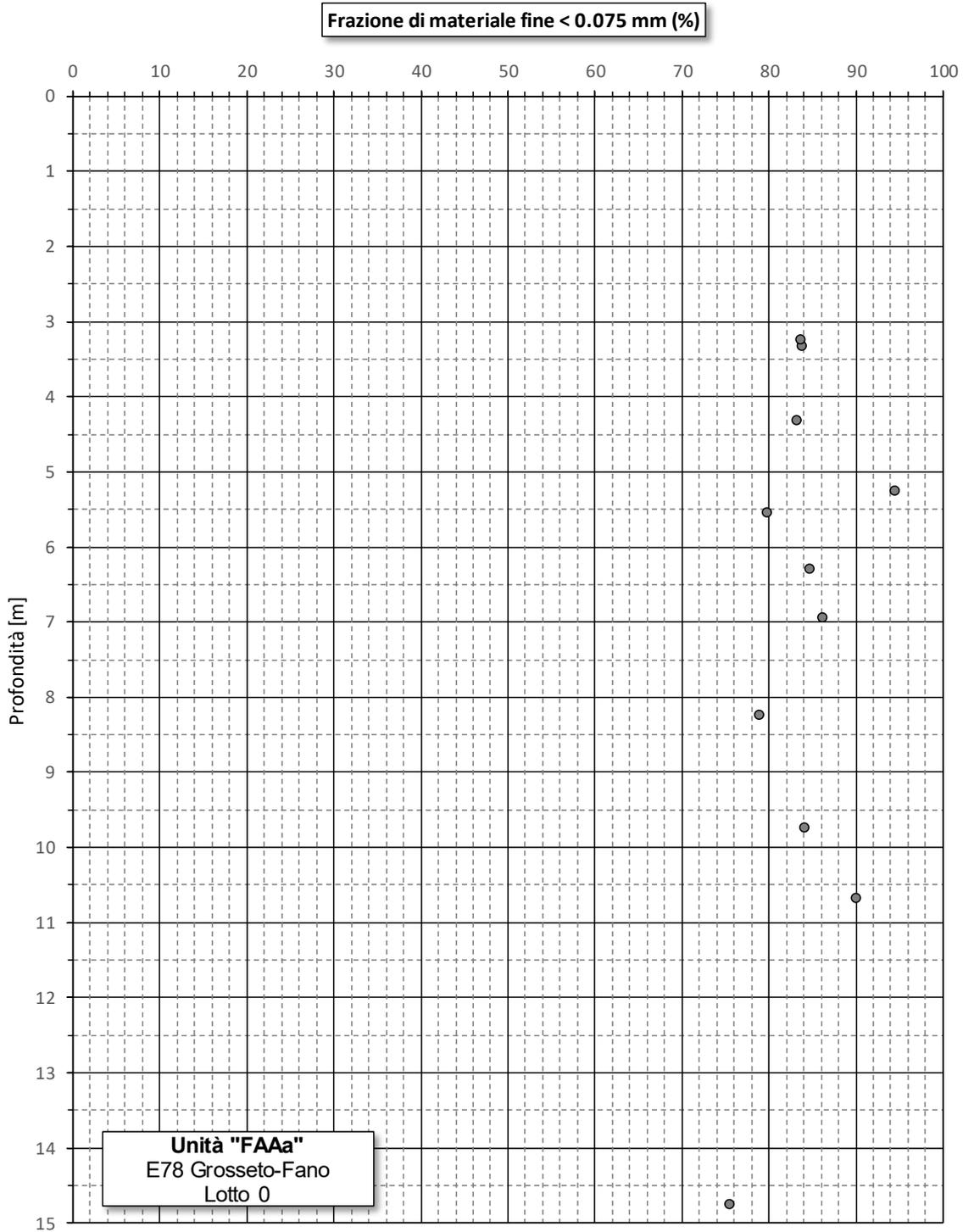


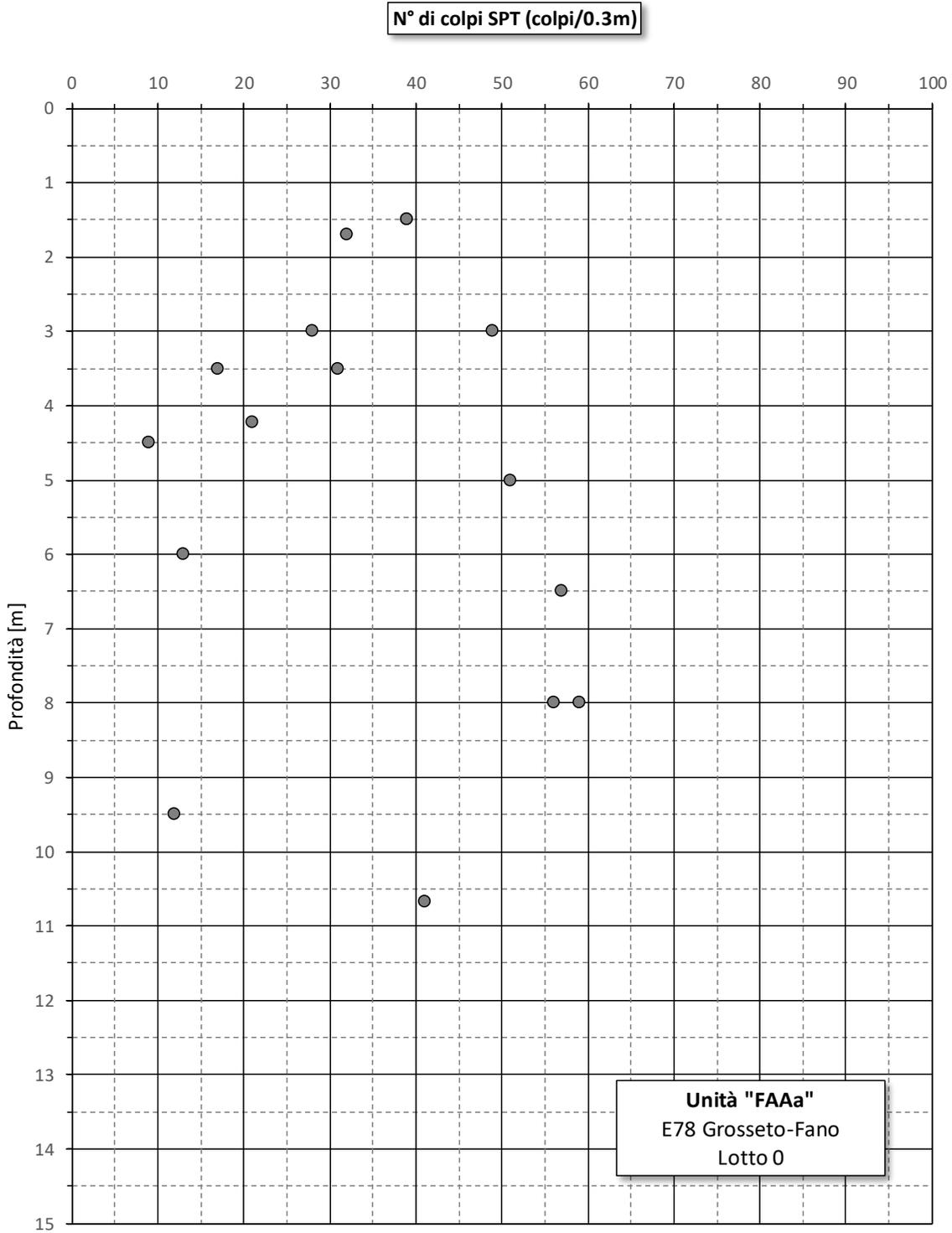


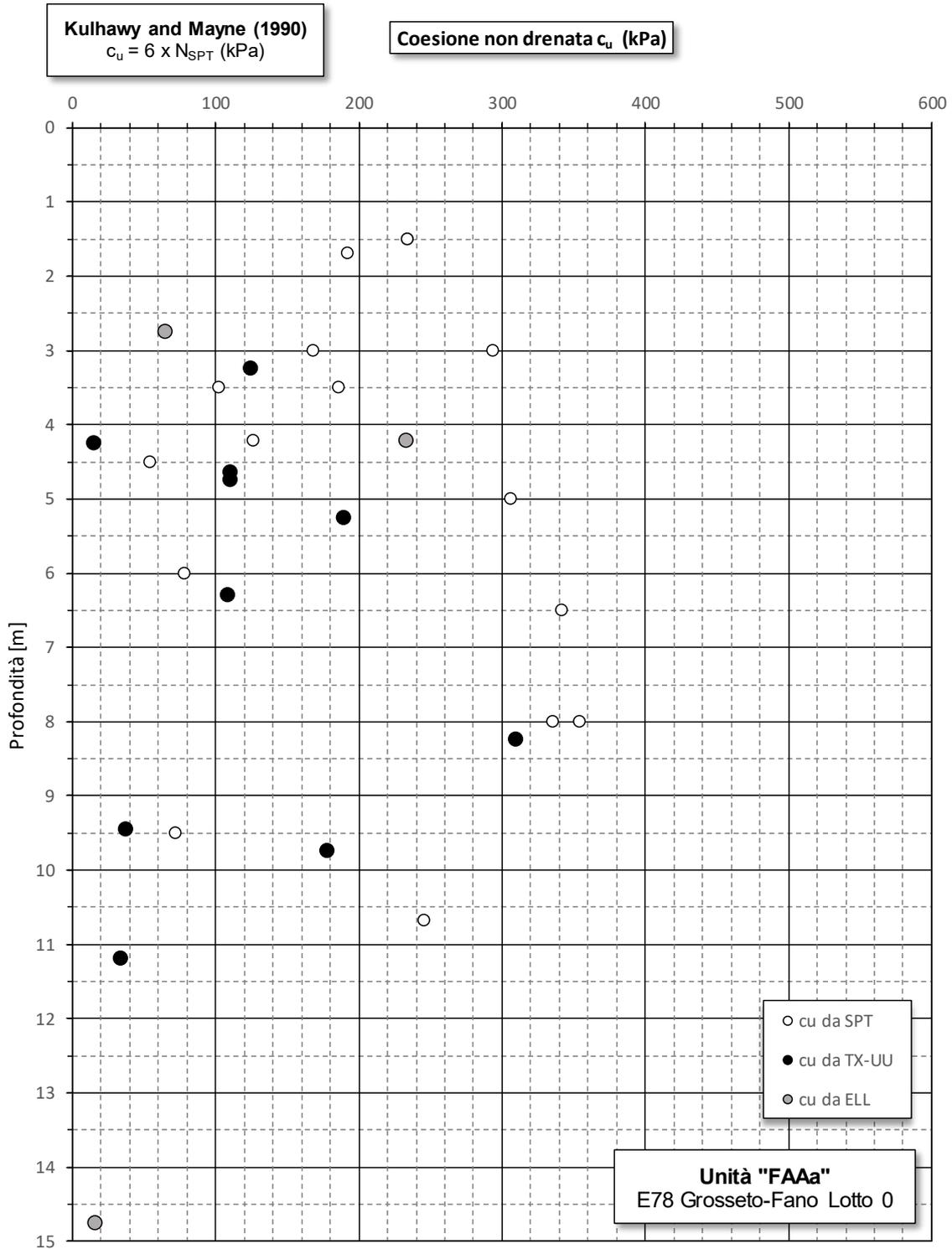


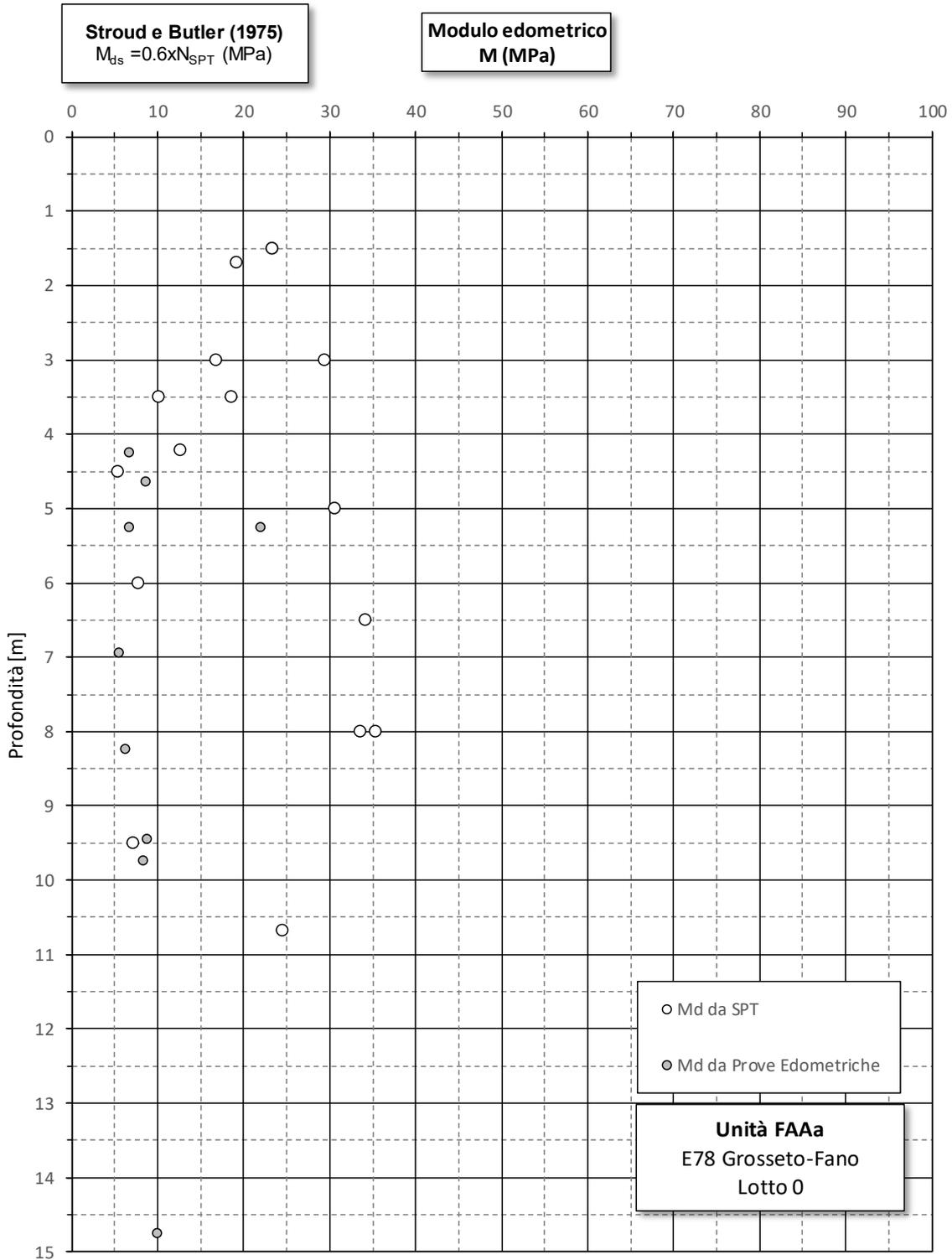




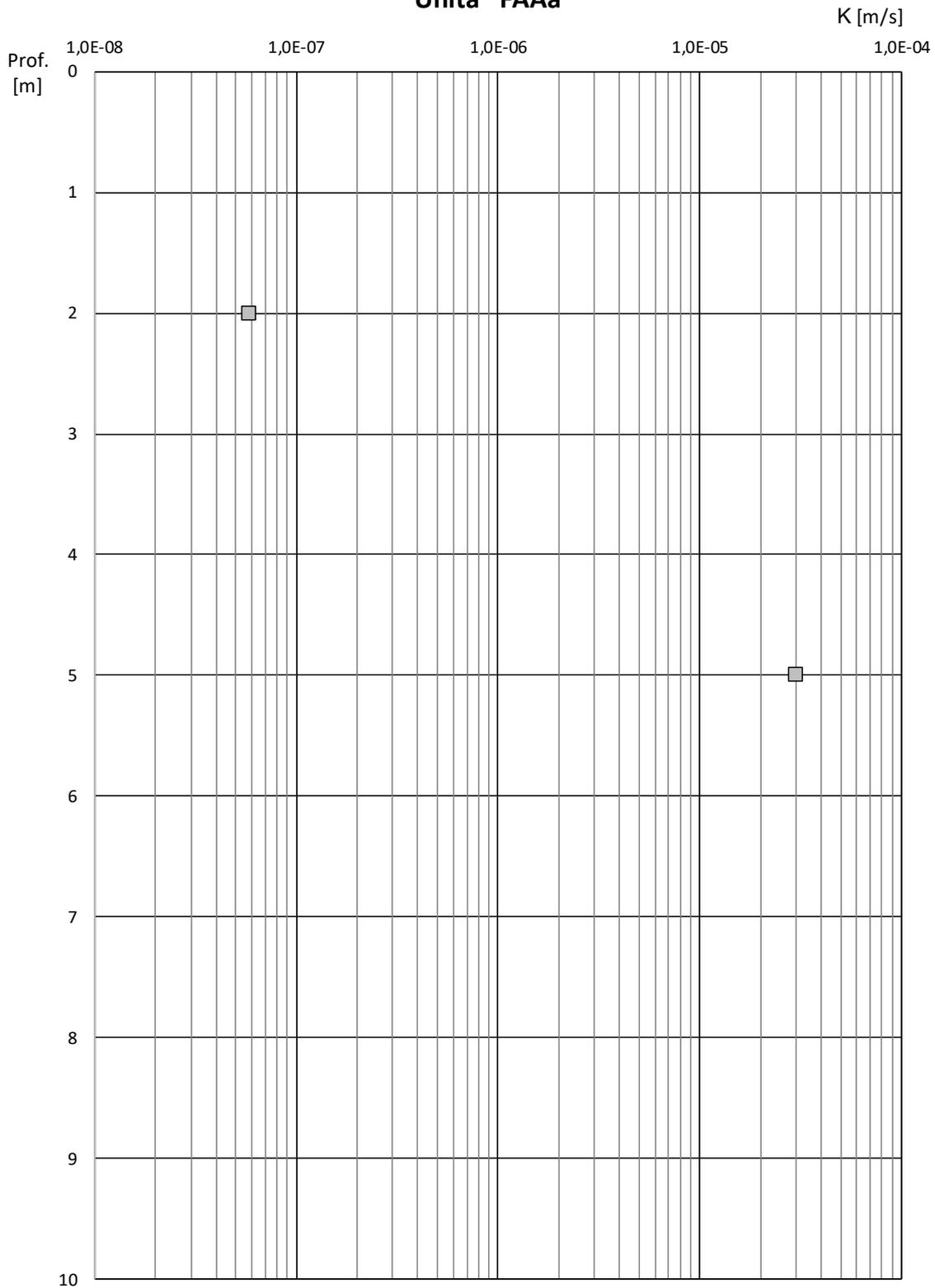




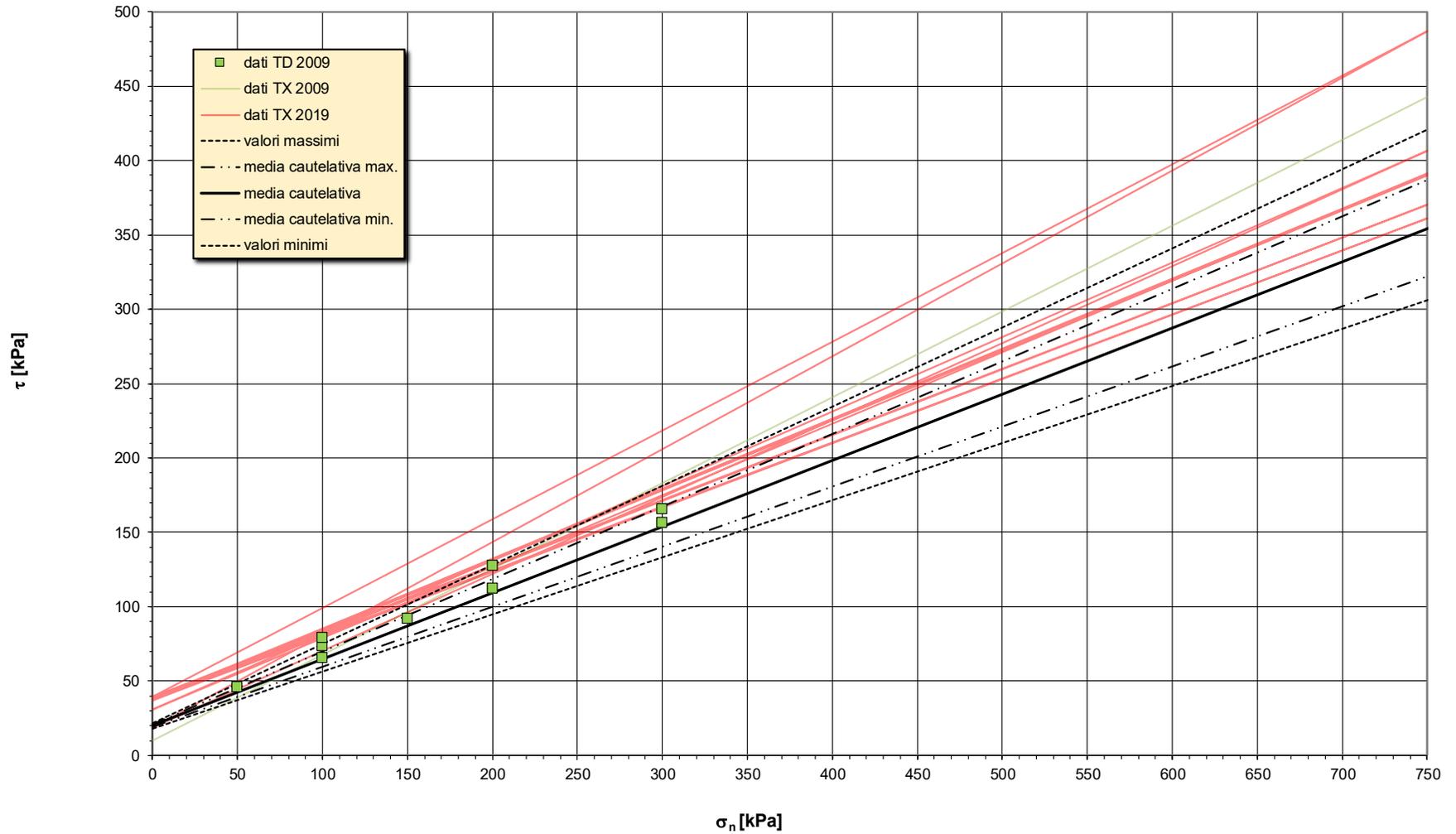




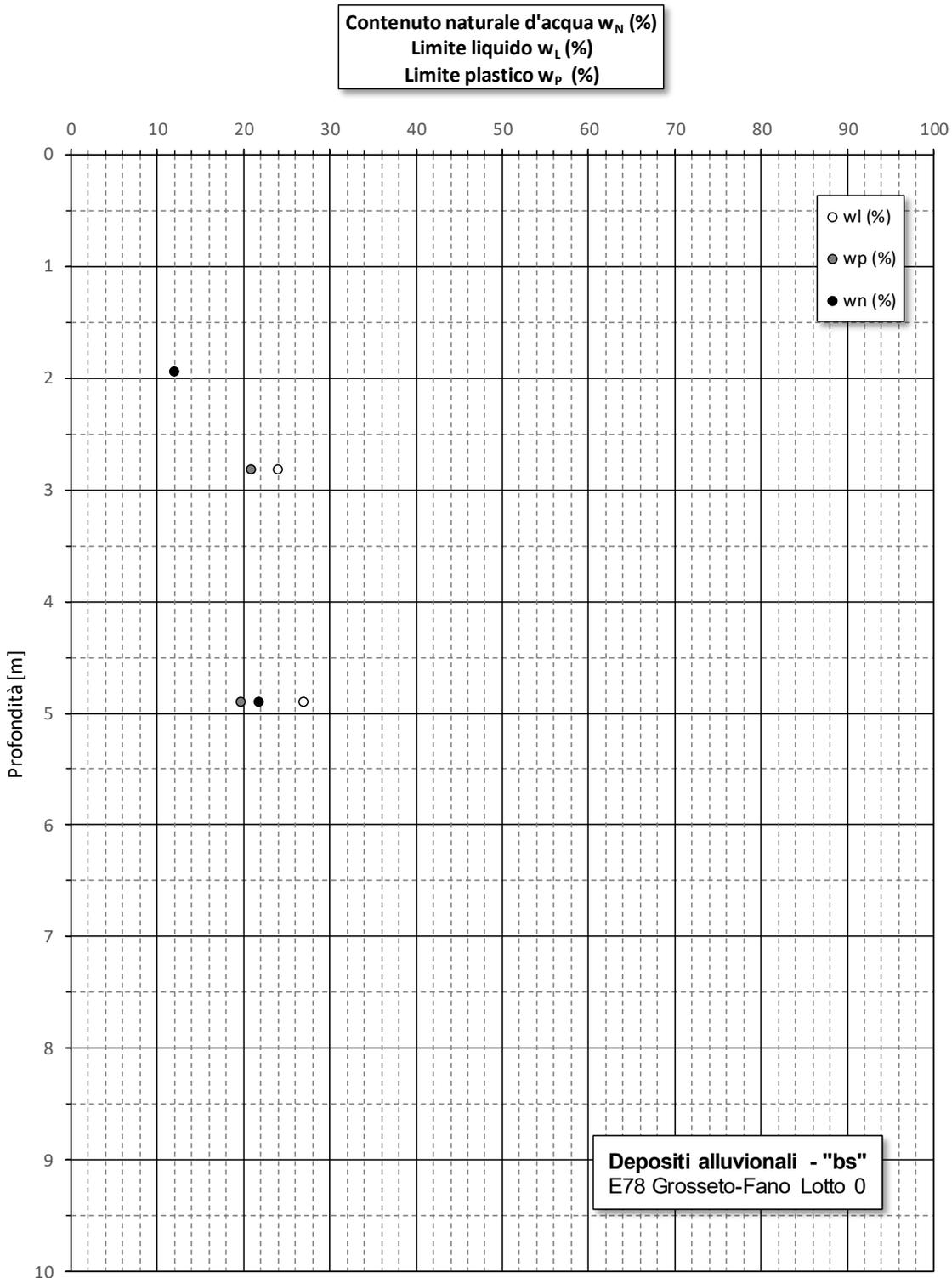
### Coefficiente di permeabilità da prove di permeabilità Lefranc Unità "FAAa"

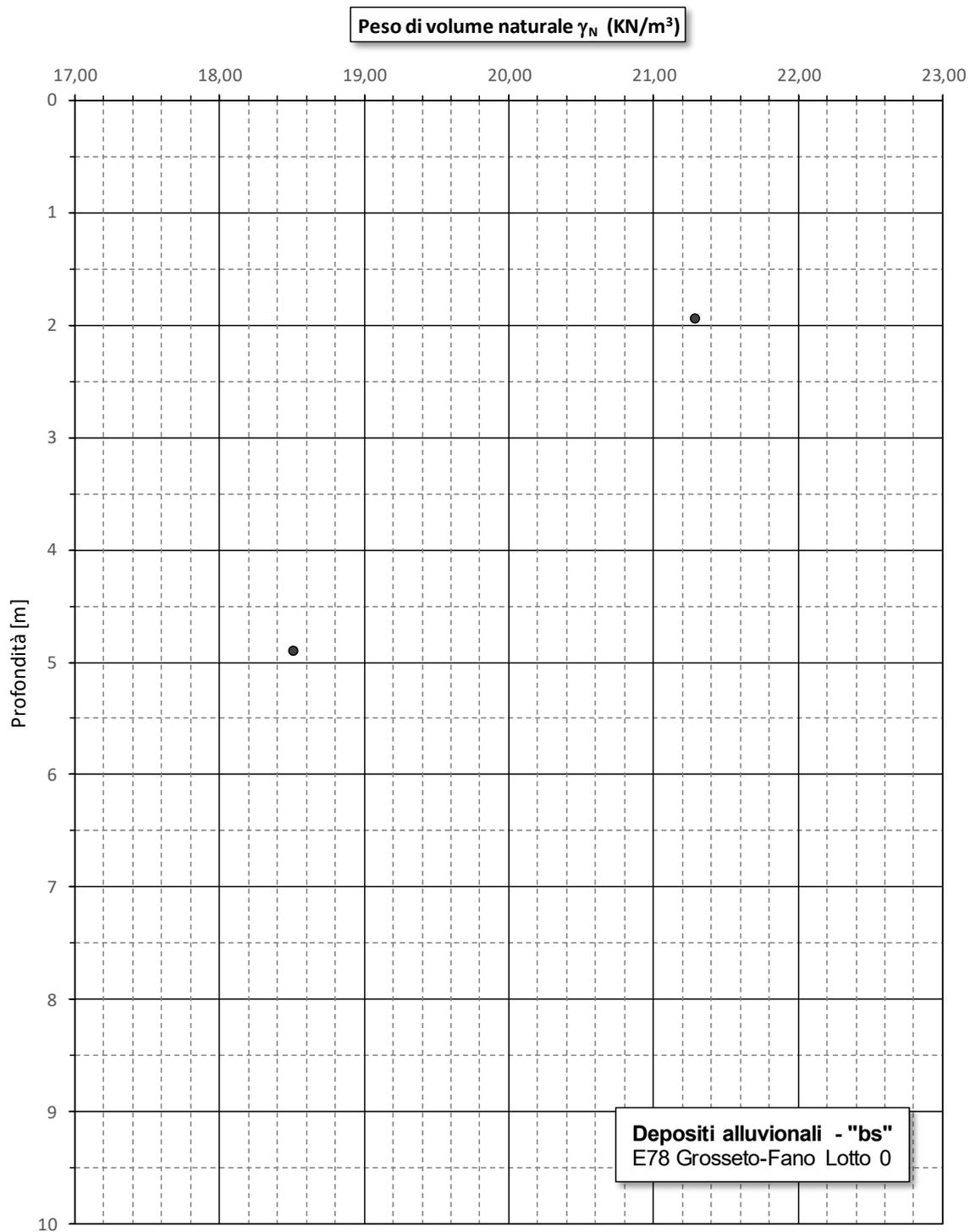


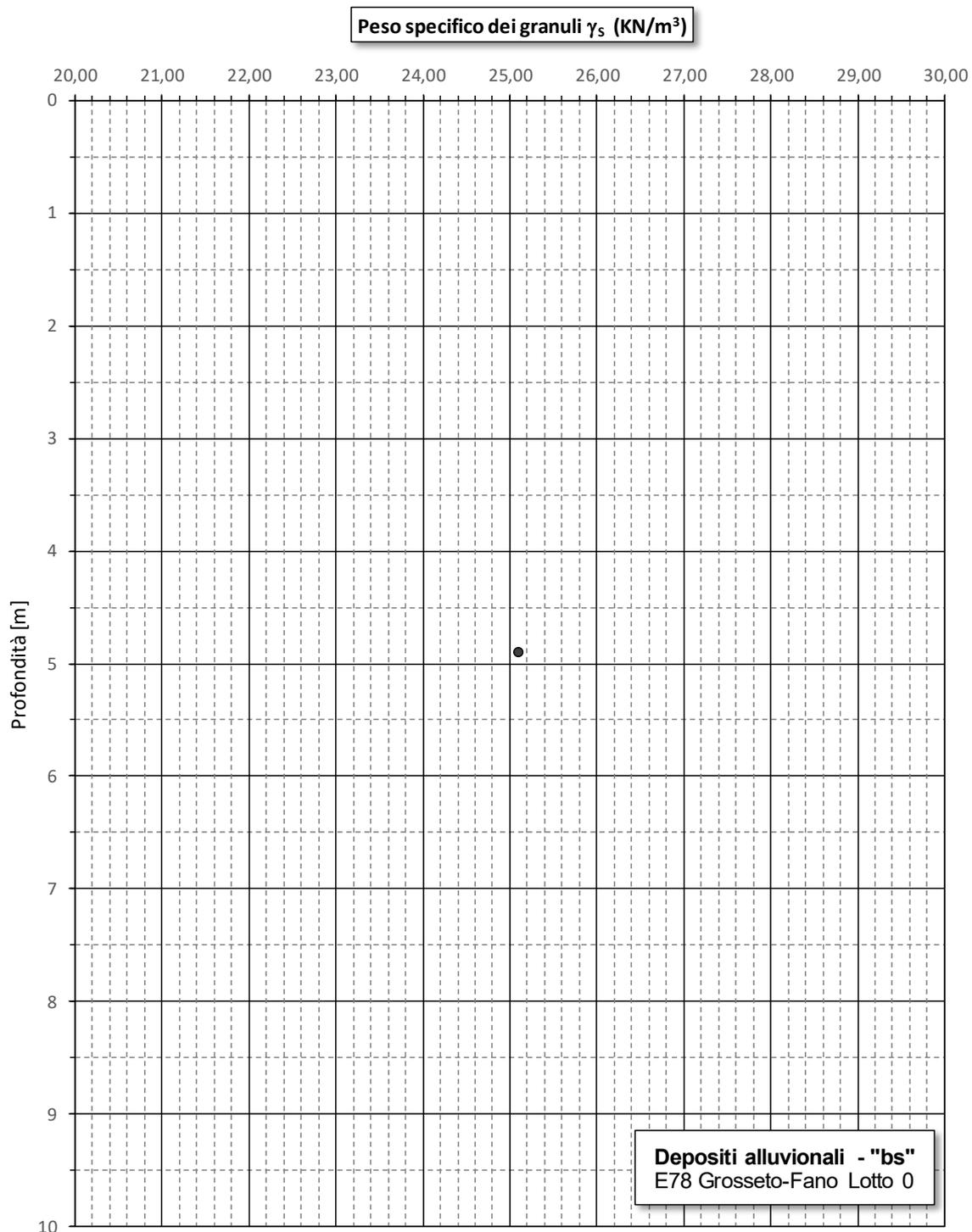
**Resistenza al taglio di picco da prove di taglio diretto e prove triassiali - Argille plioceniche fascia di alterazione (FAAa)**

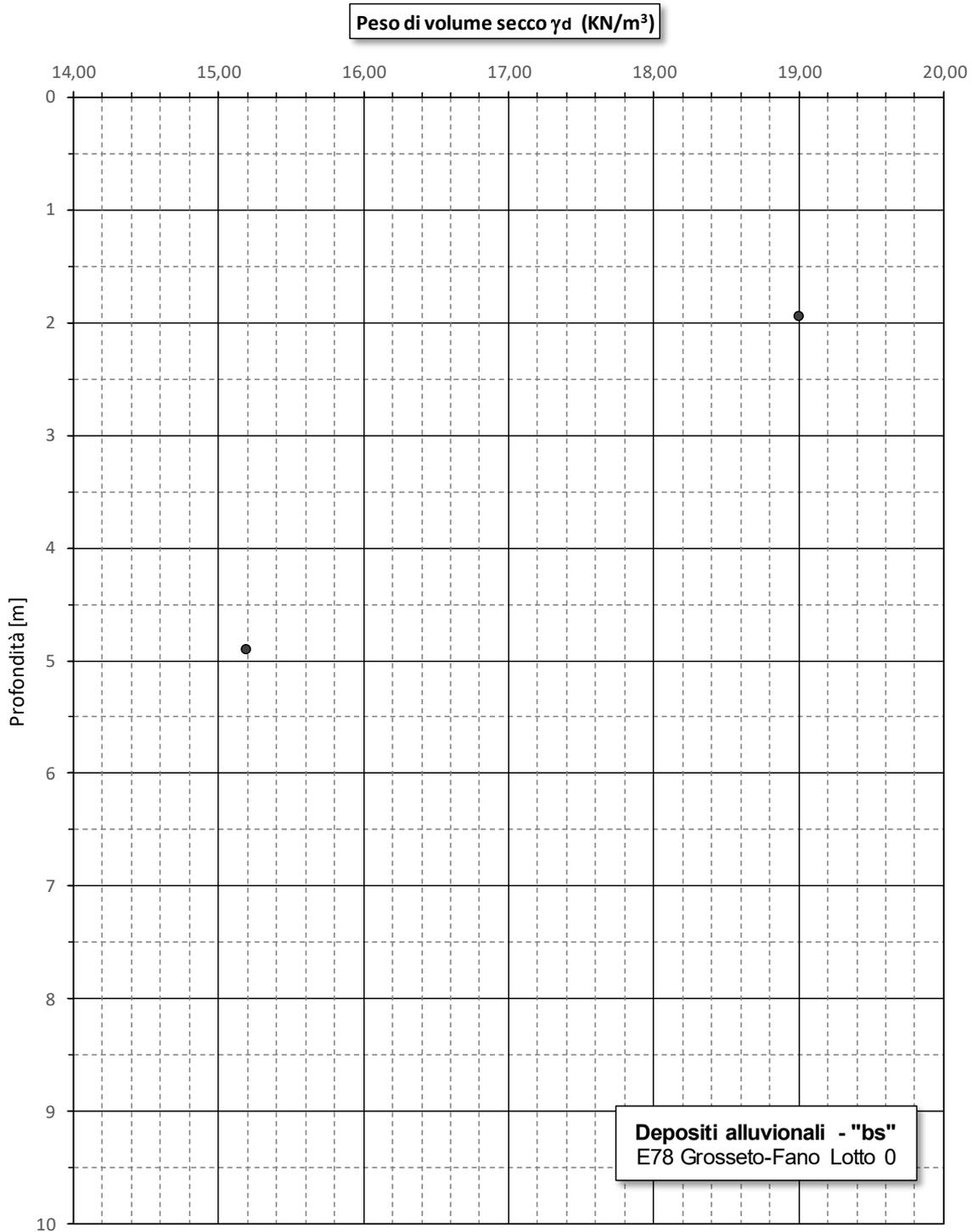


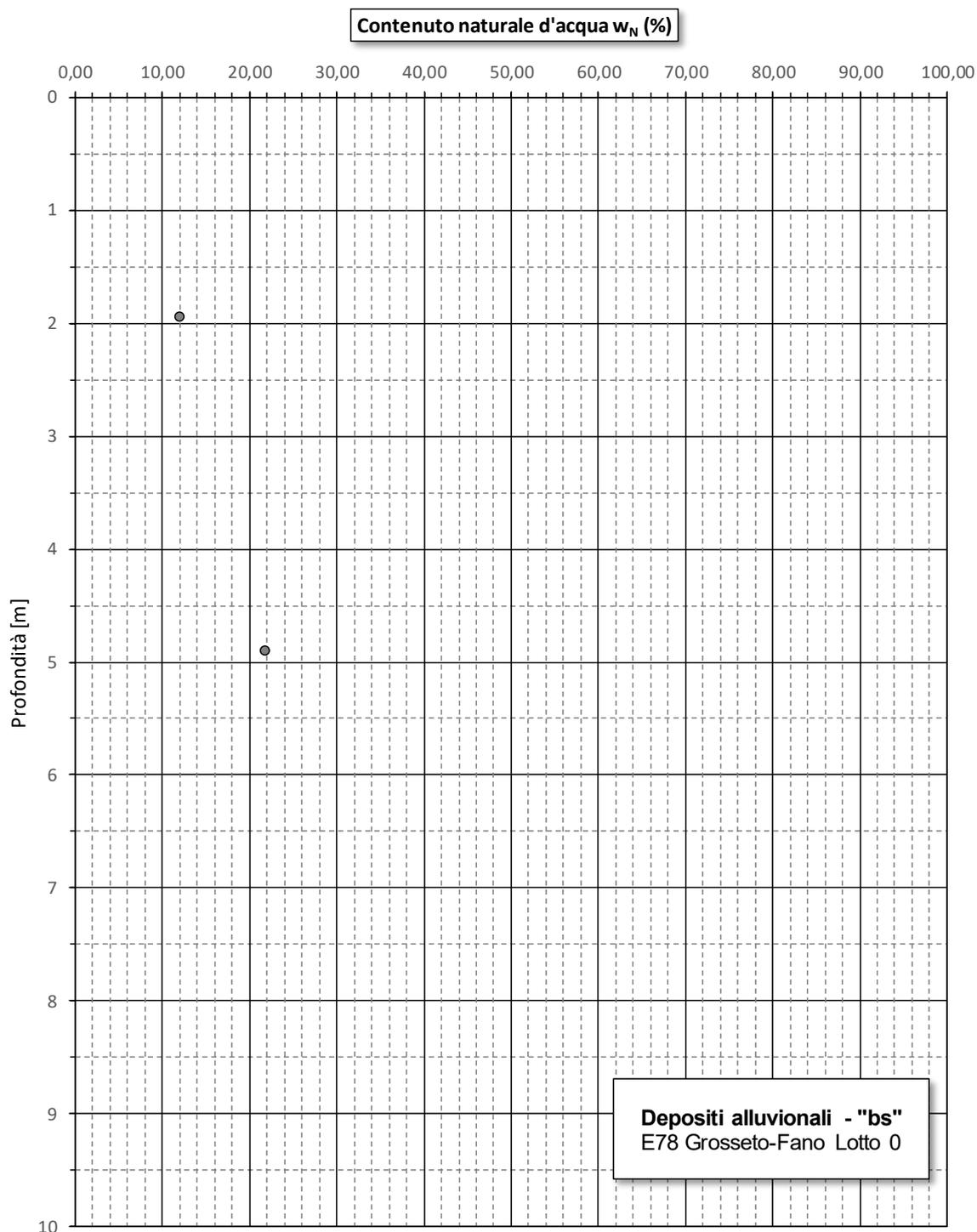
18.

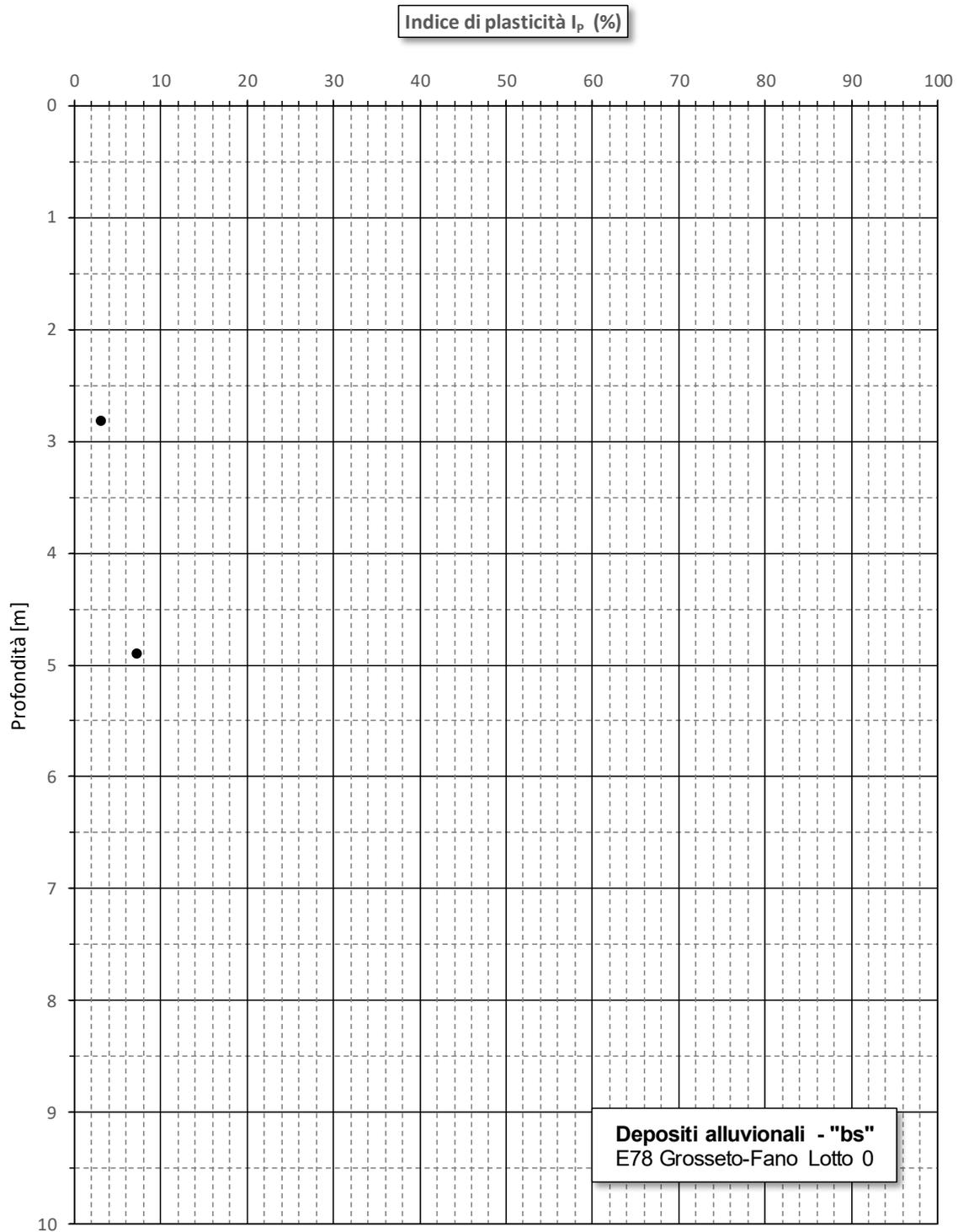


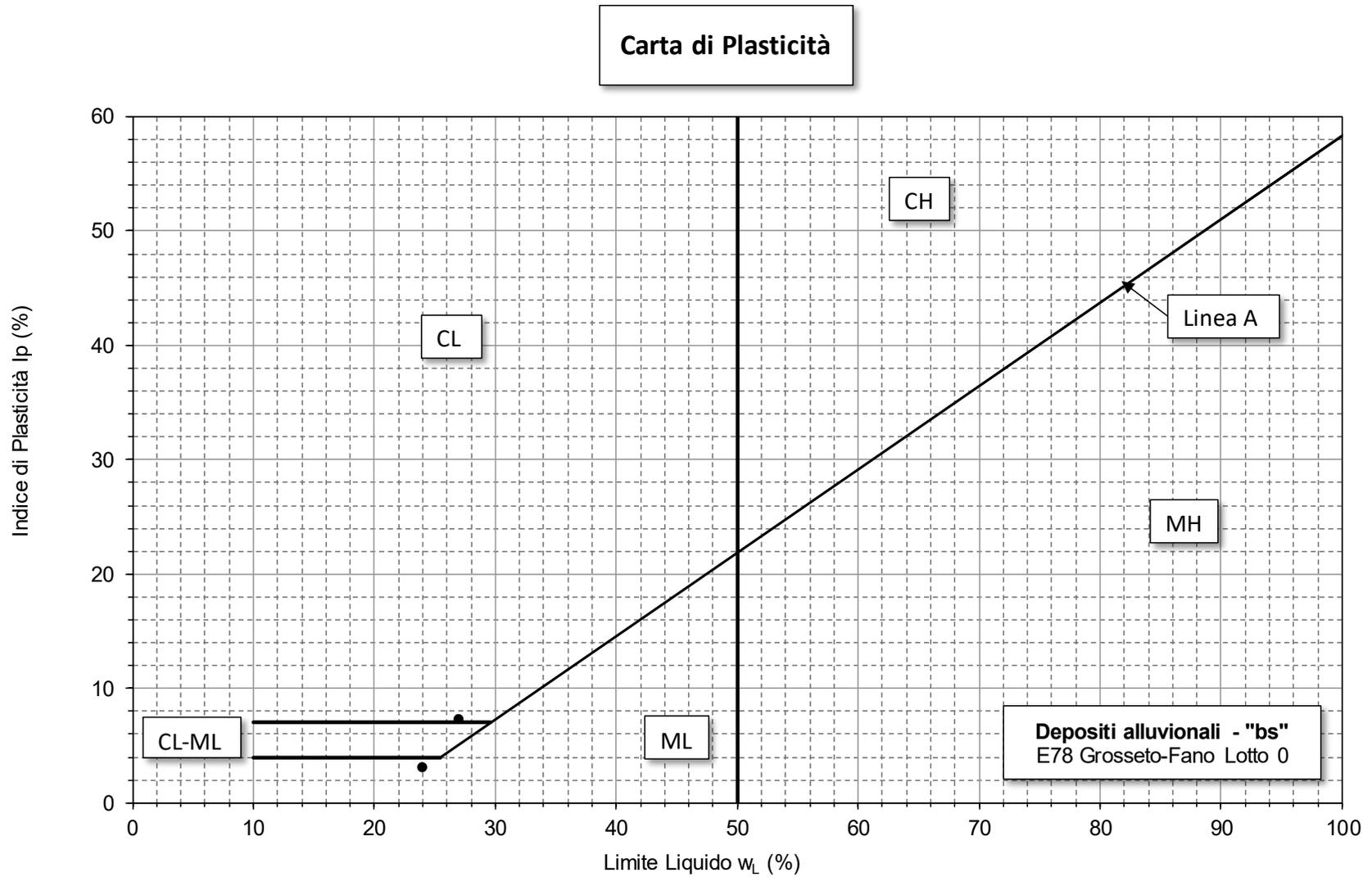


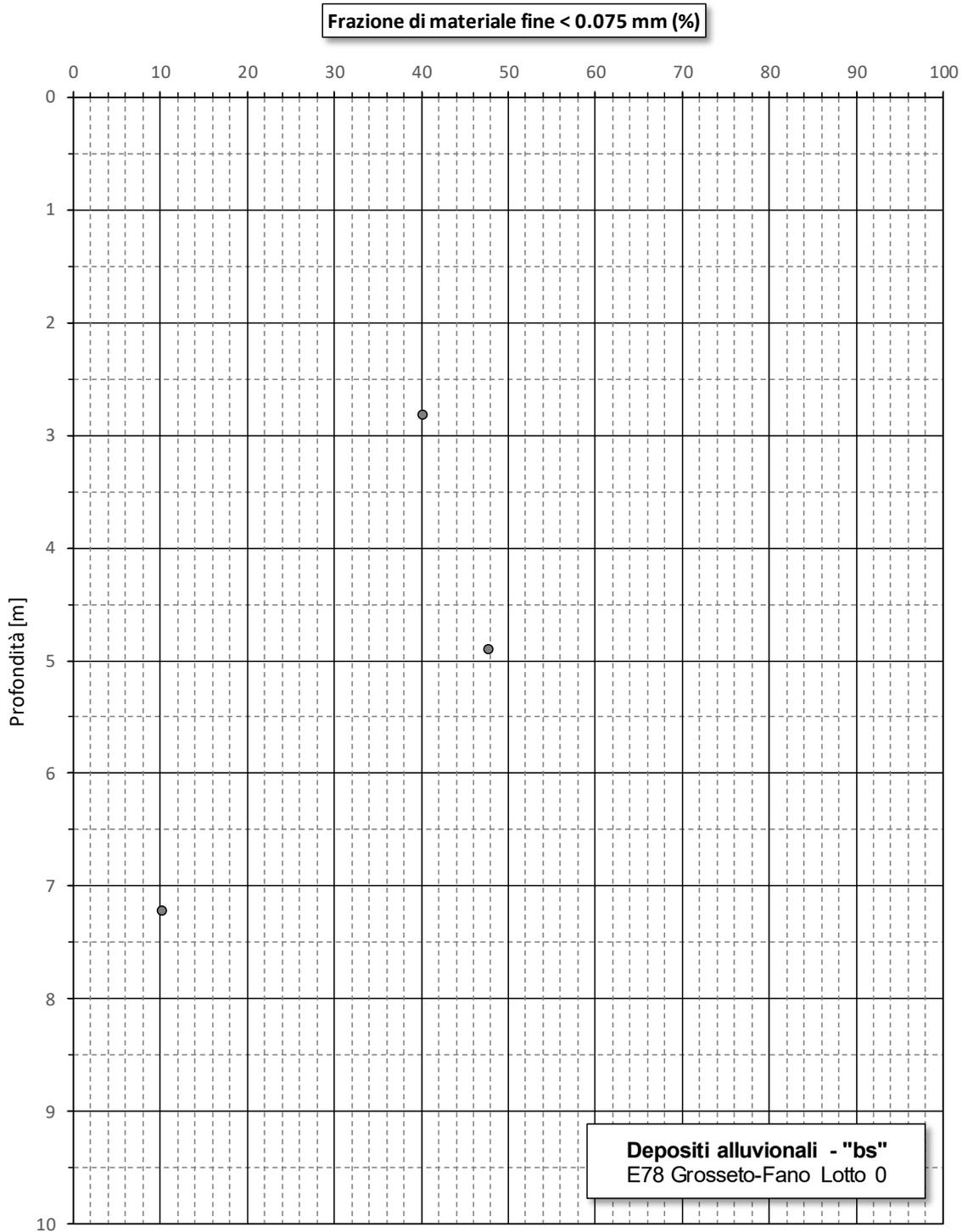


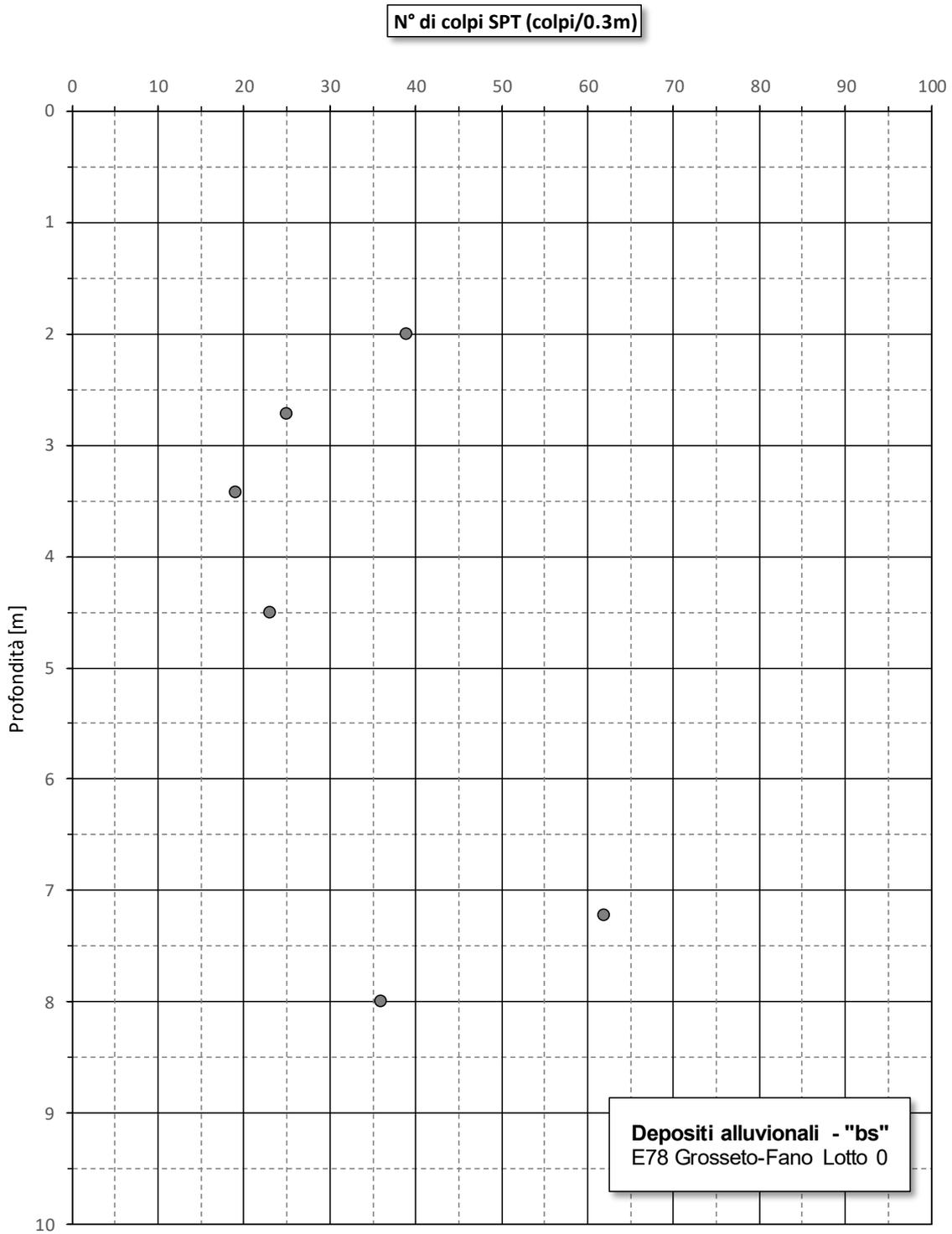


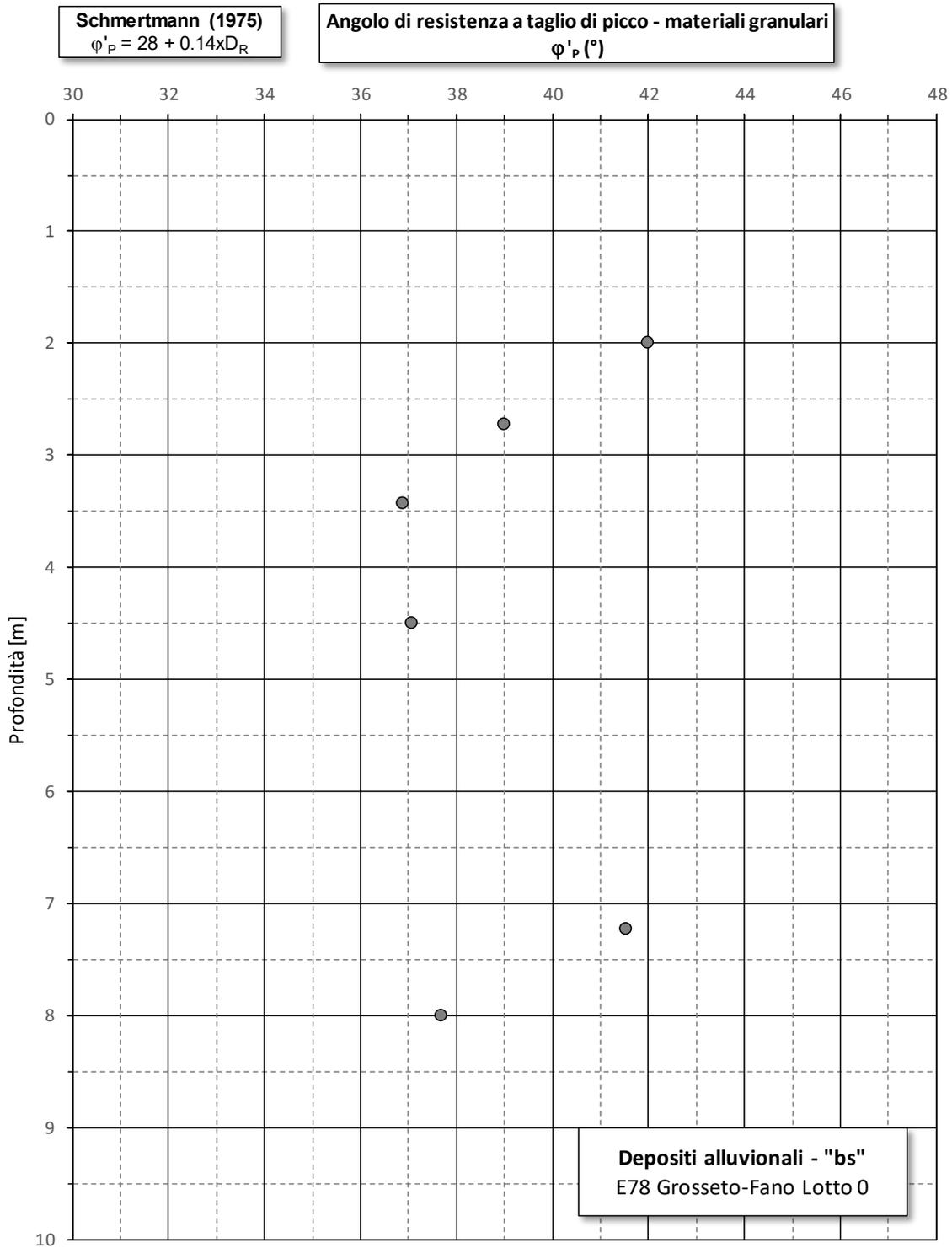


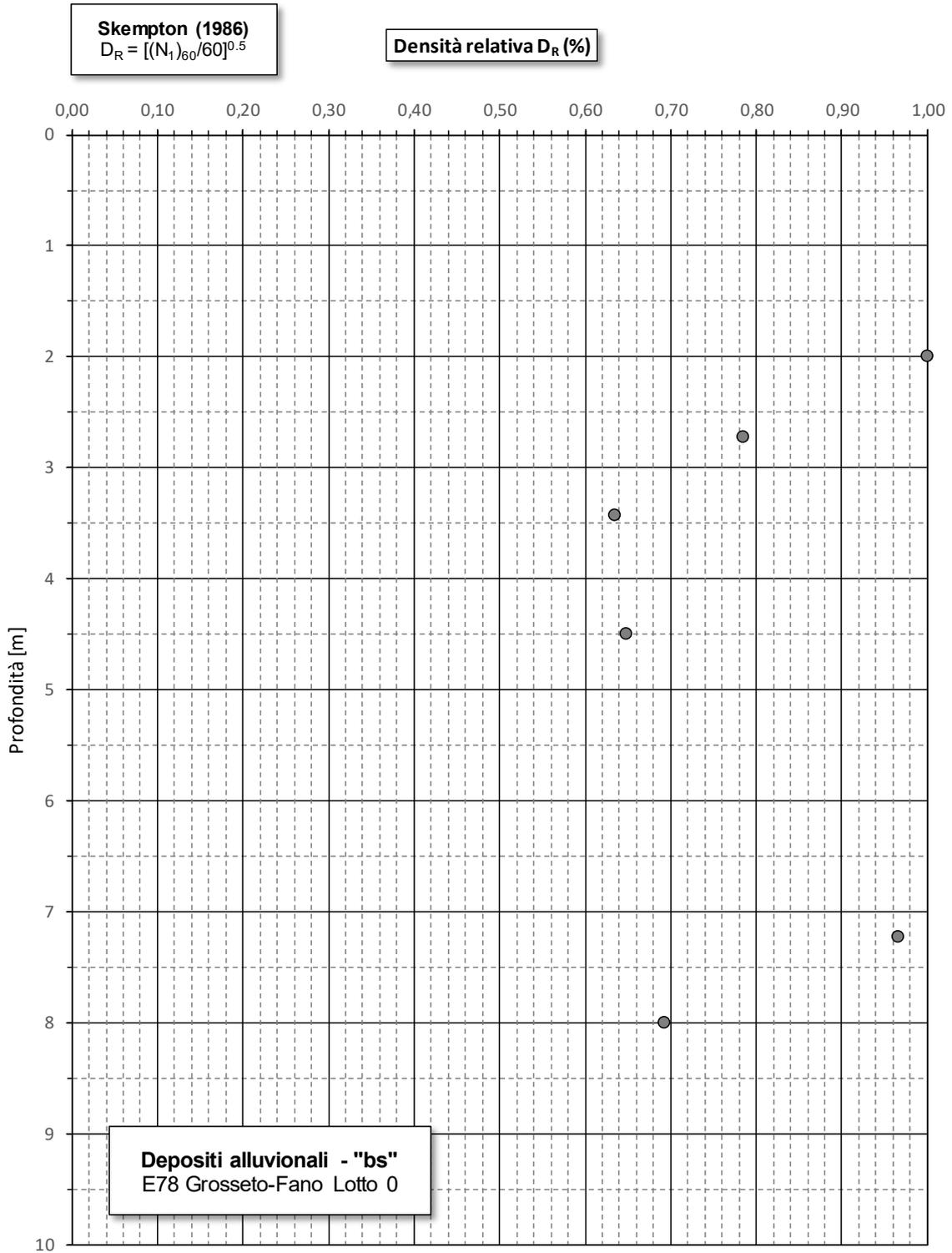


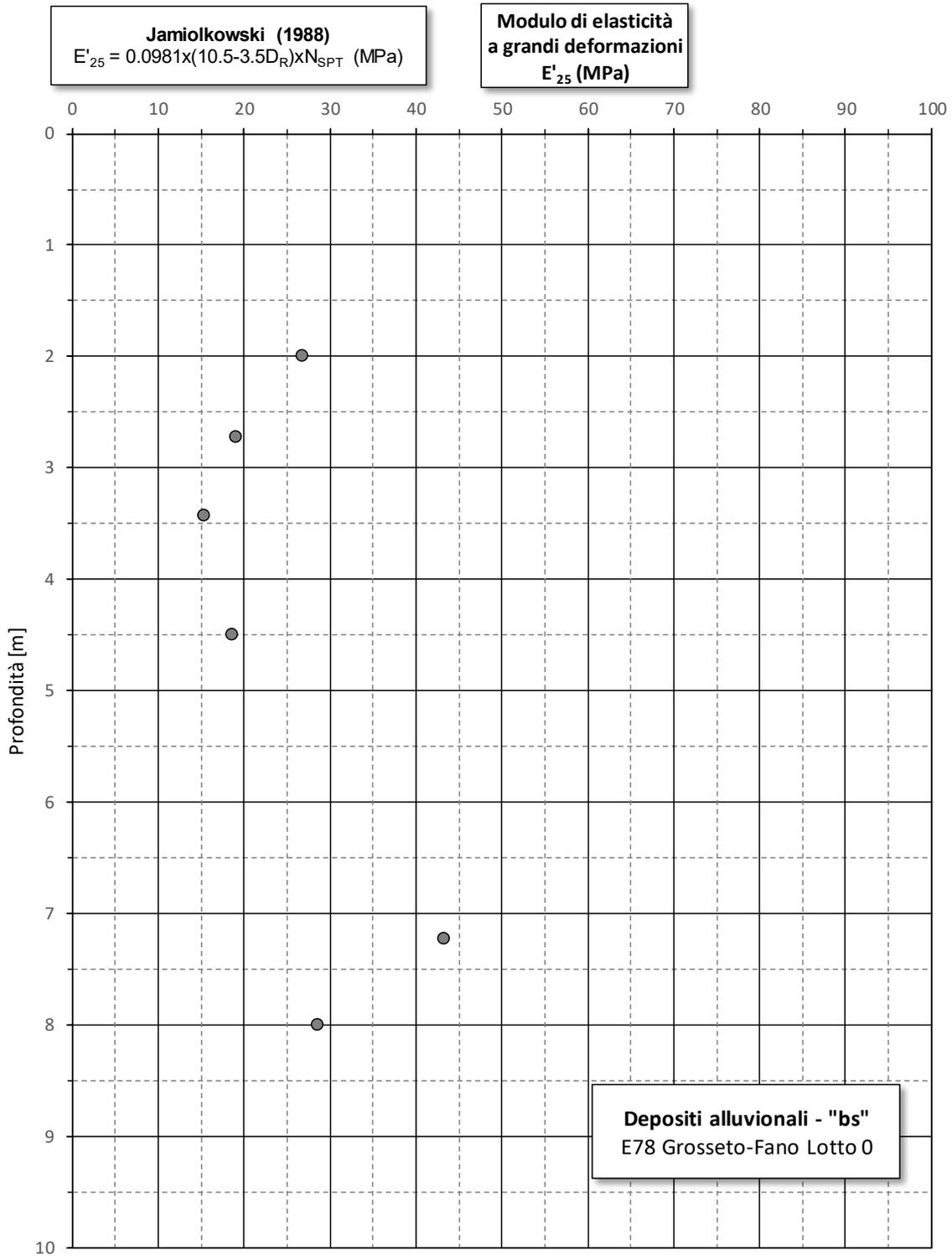








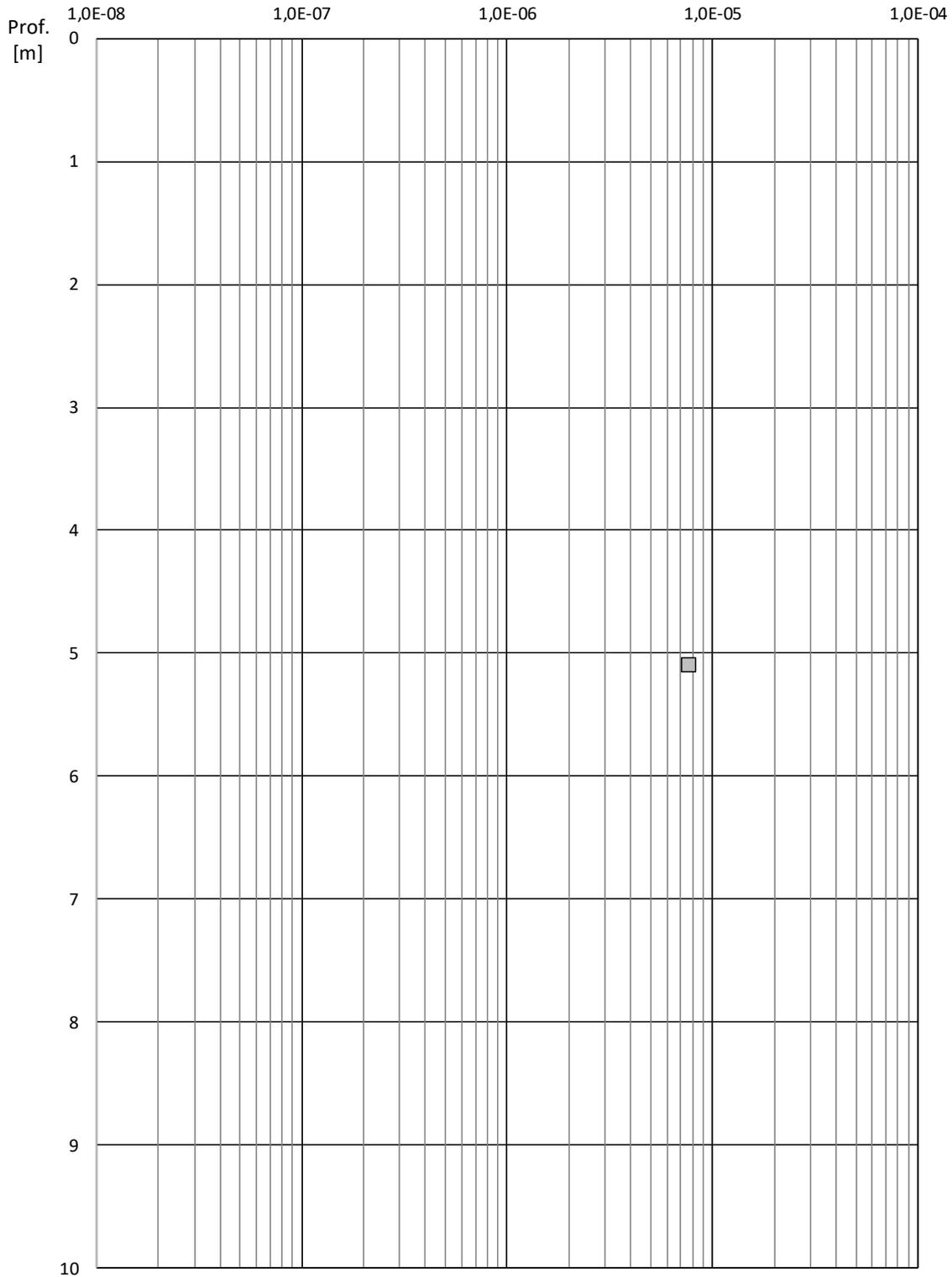




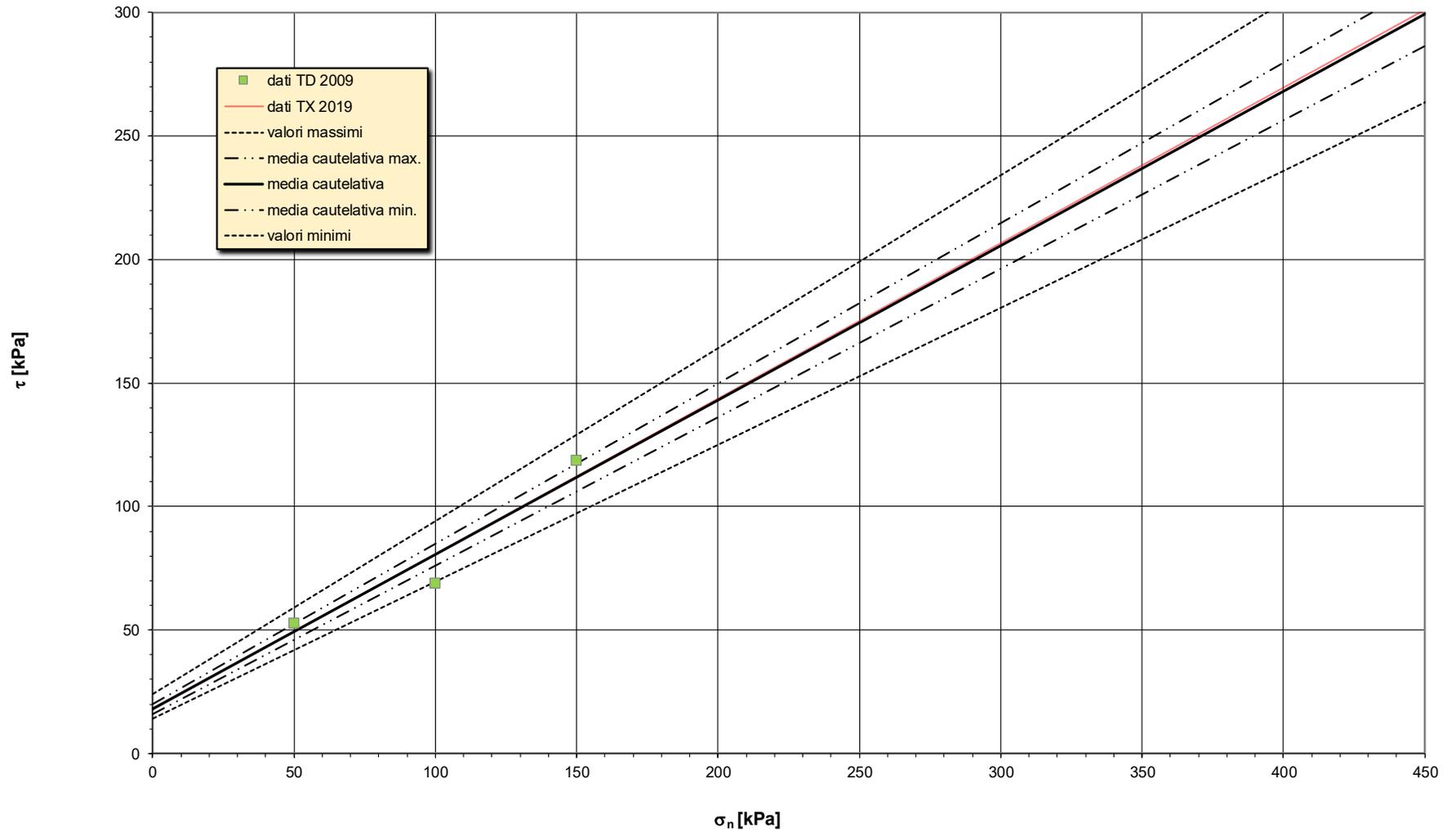
### Coefficiente di permeabilità da prove di permeabilità Lefranc

Unità "bs"

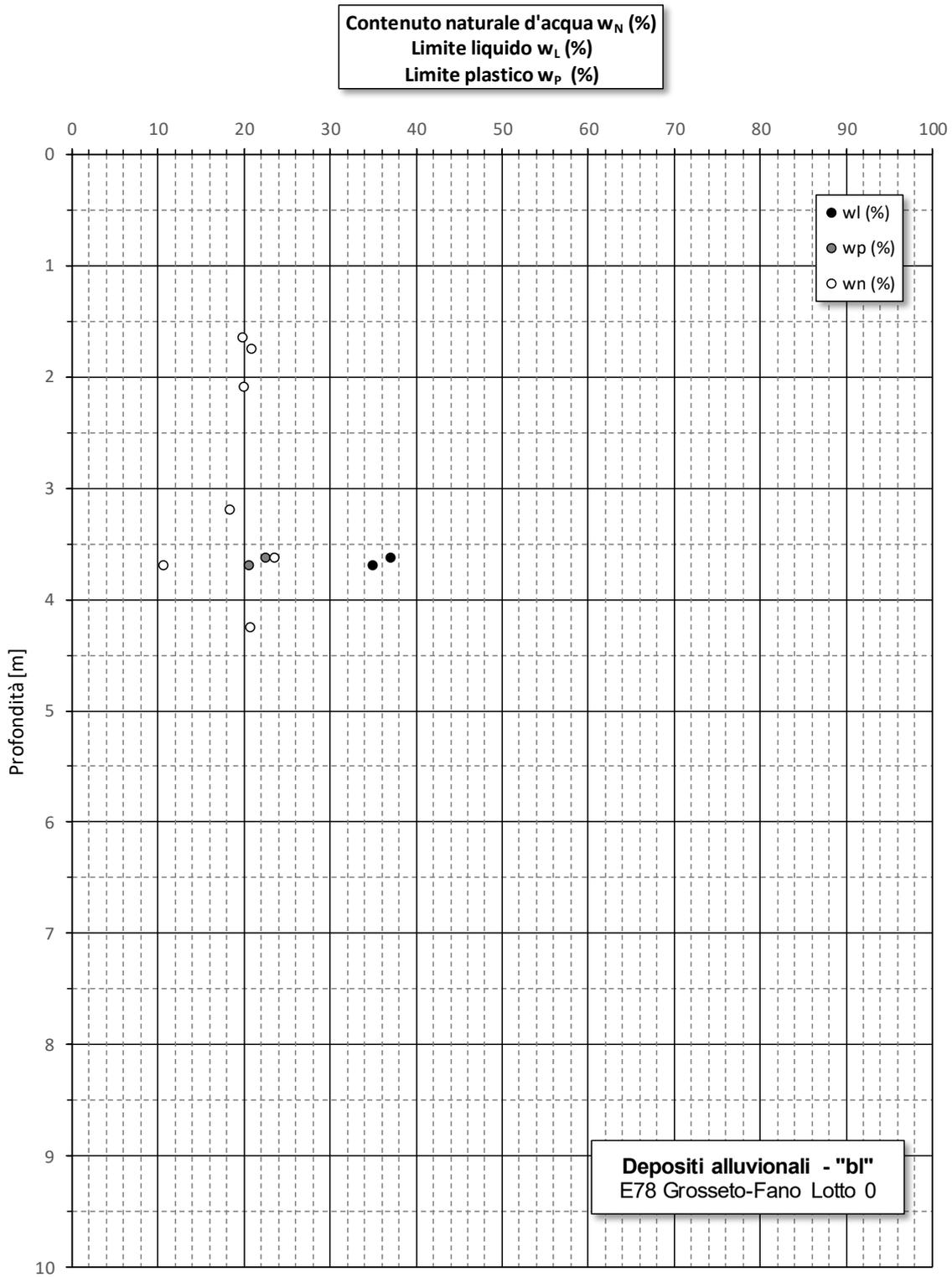
K [m/s]

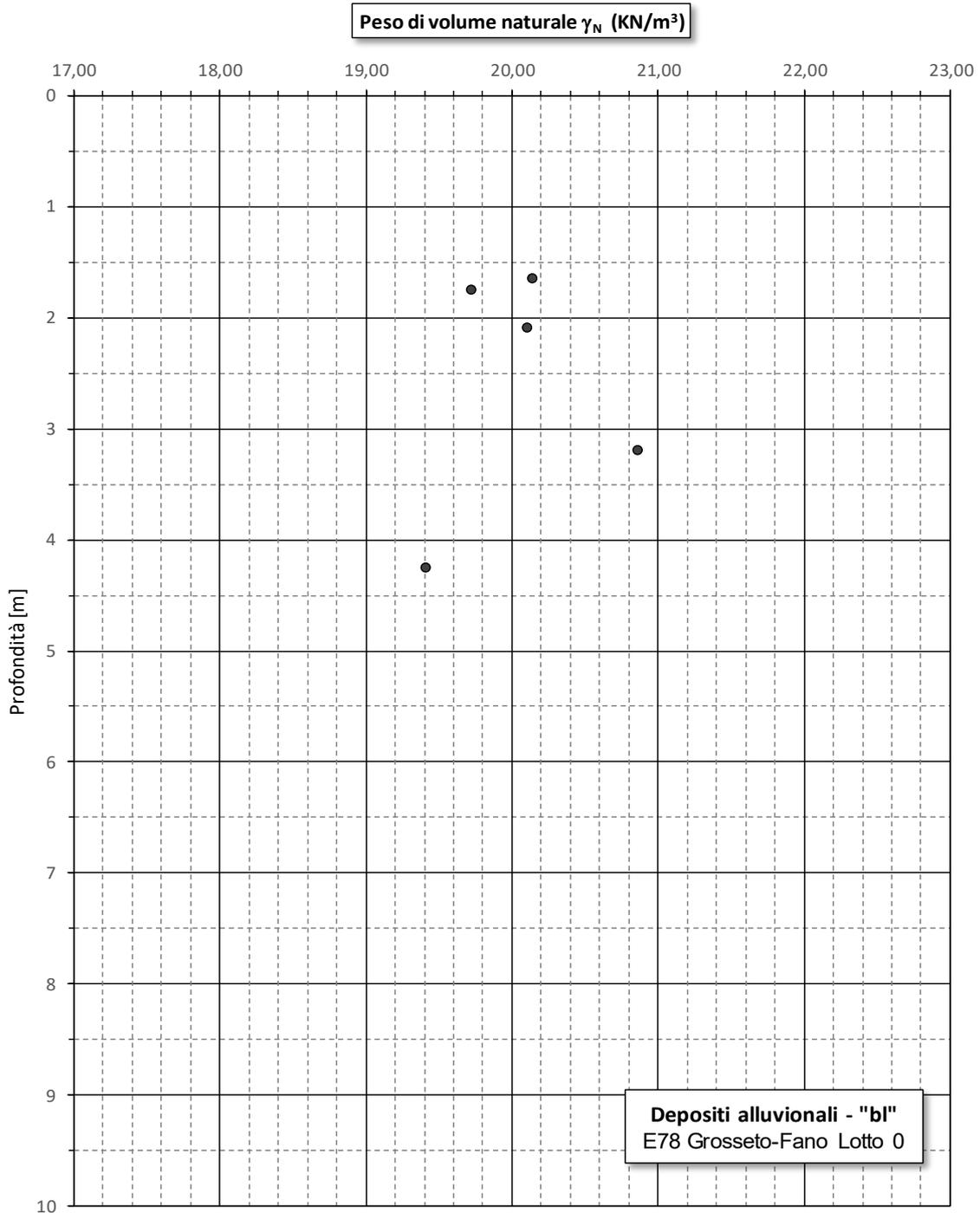


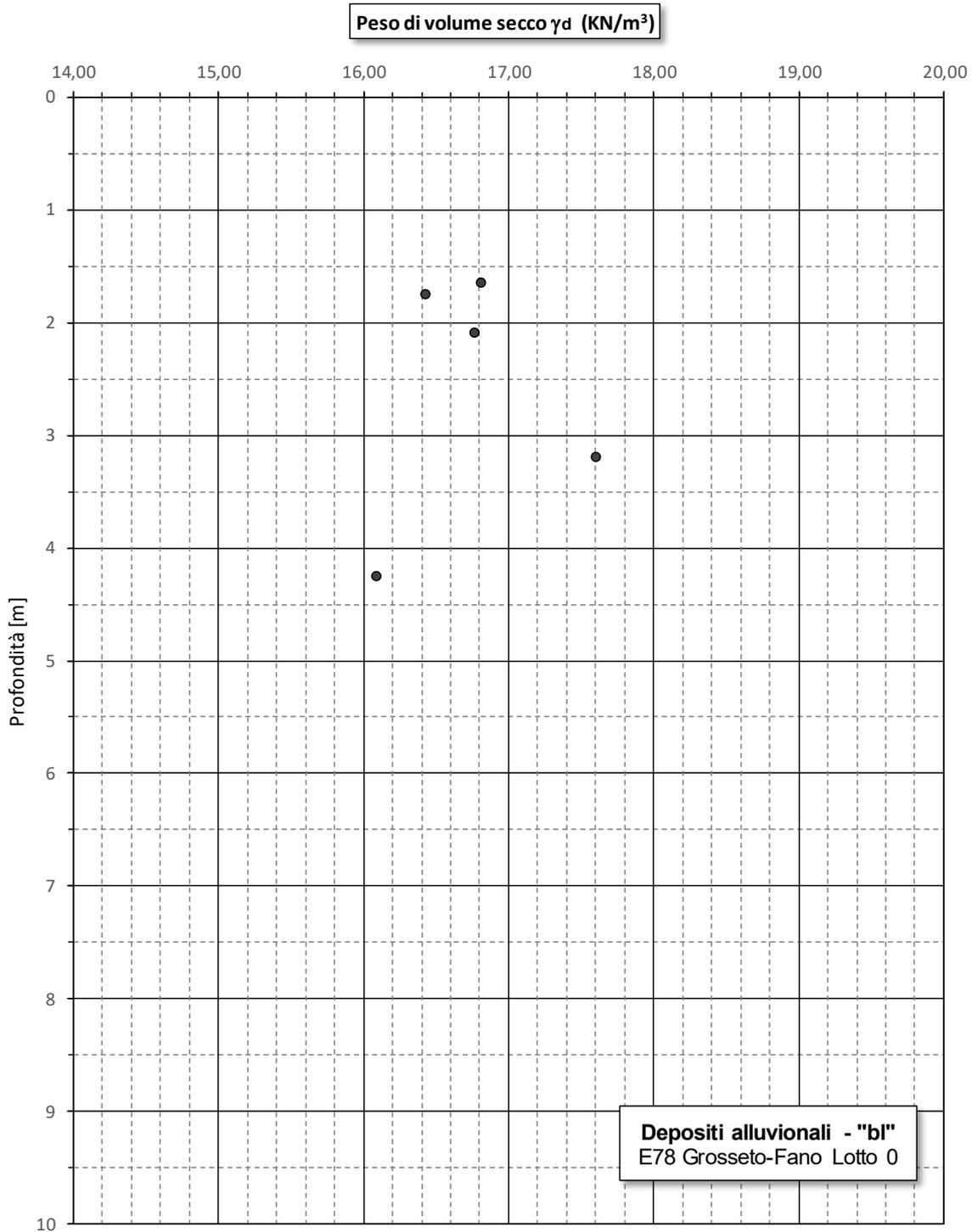
**Resistenza al taglio di picco da prove di taglio diretto e prove triassiali - Sabbie limose argillose ("bs", alluvionali)**

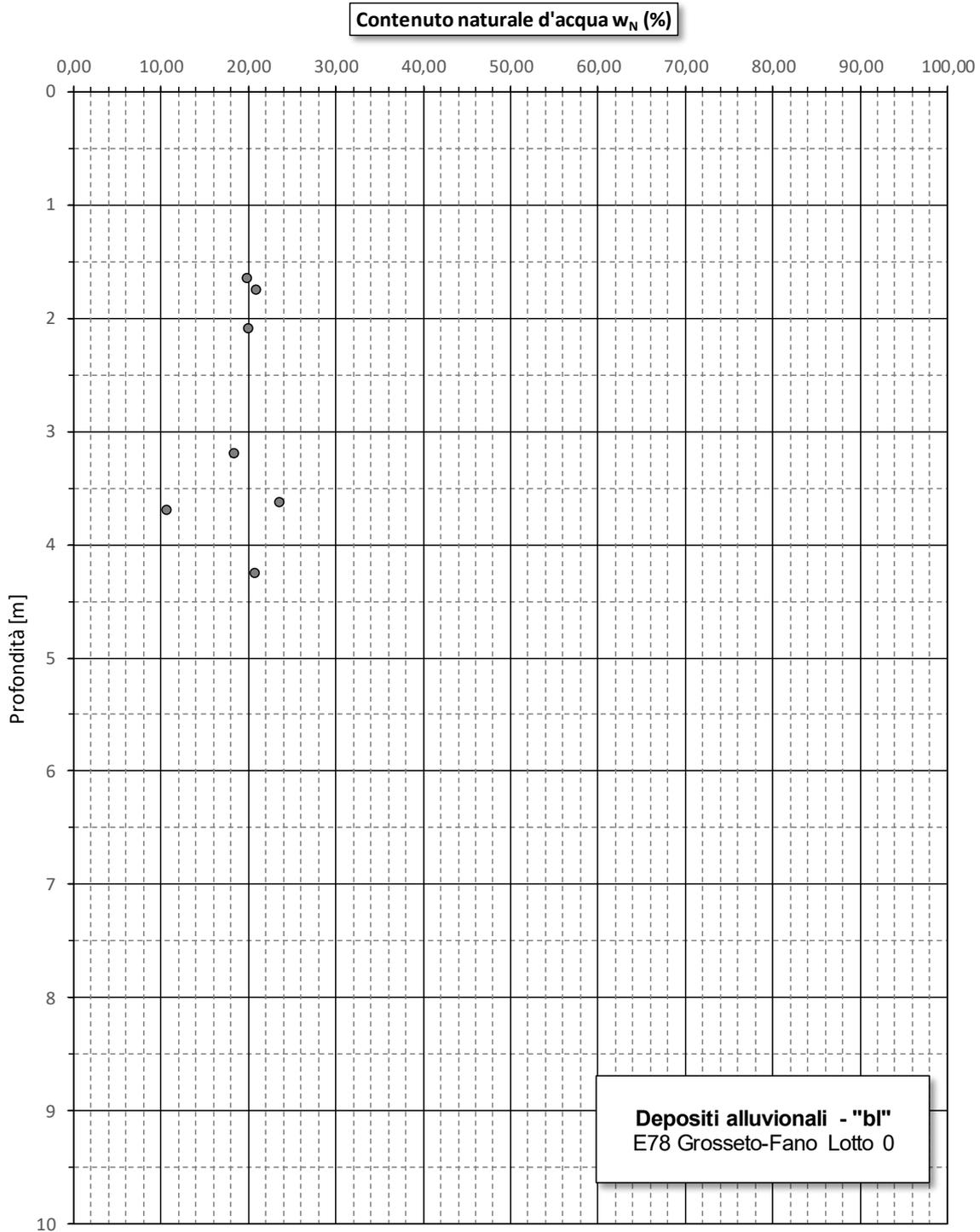


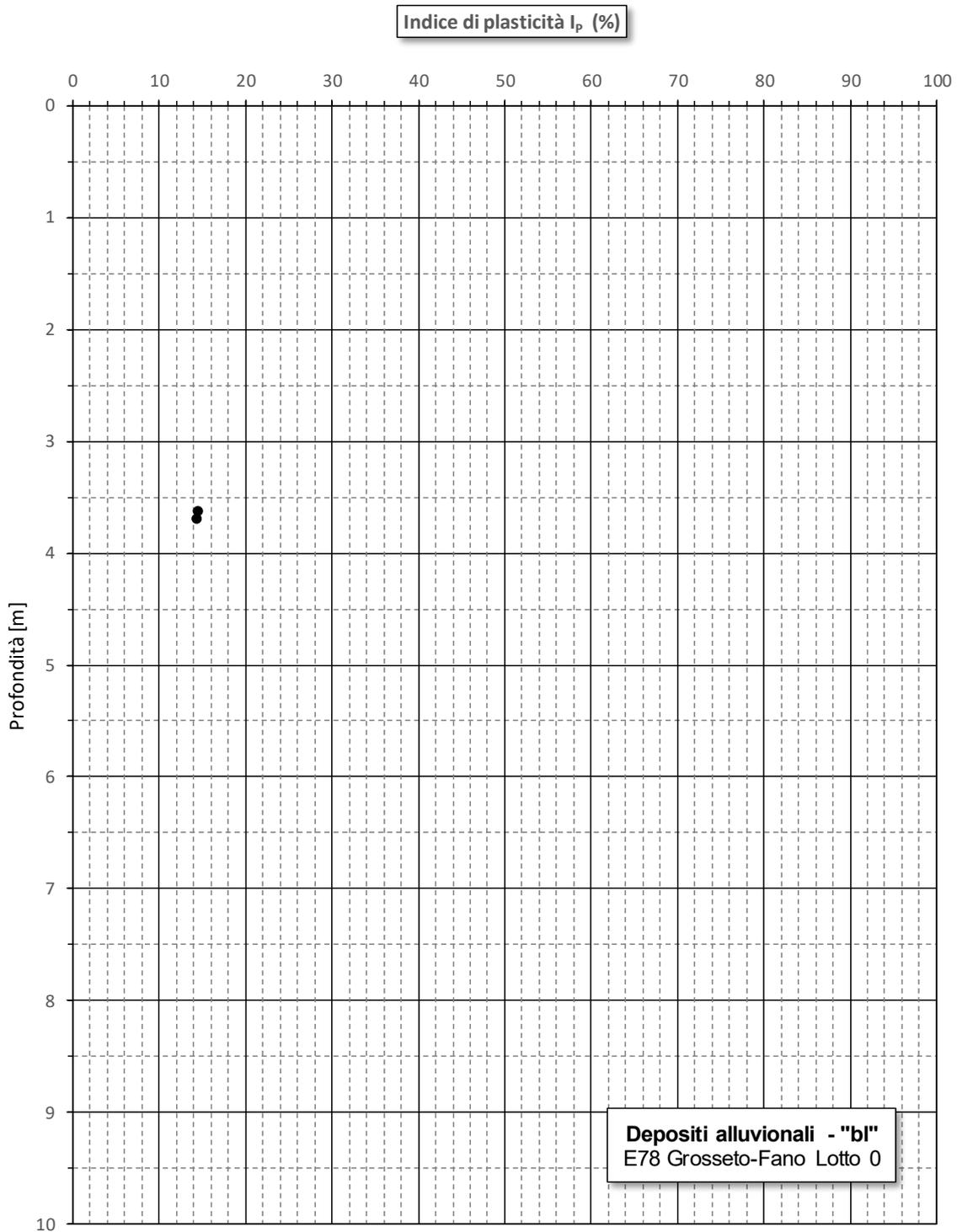
18

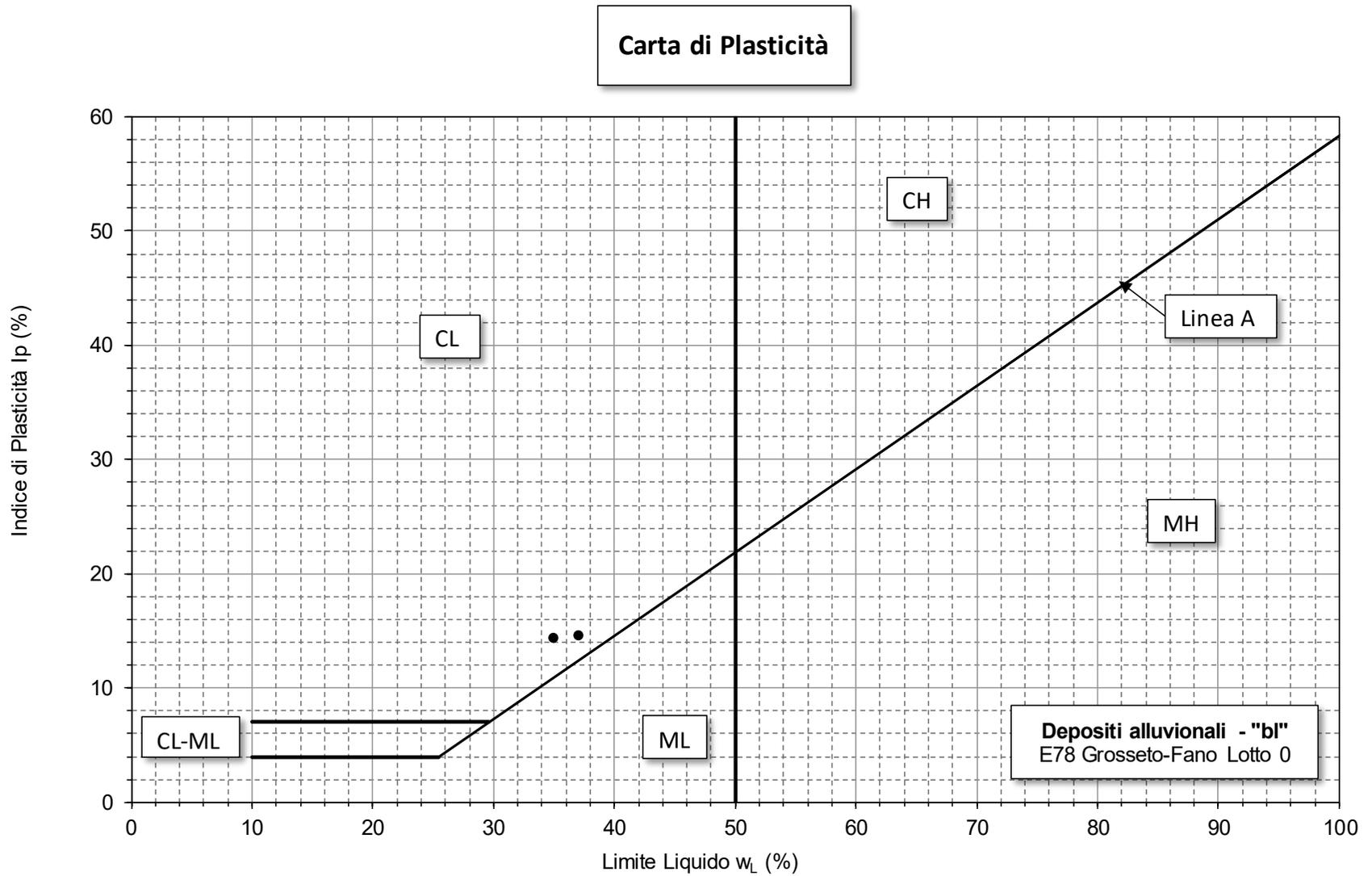


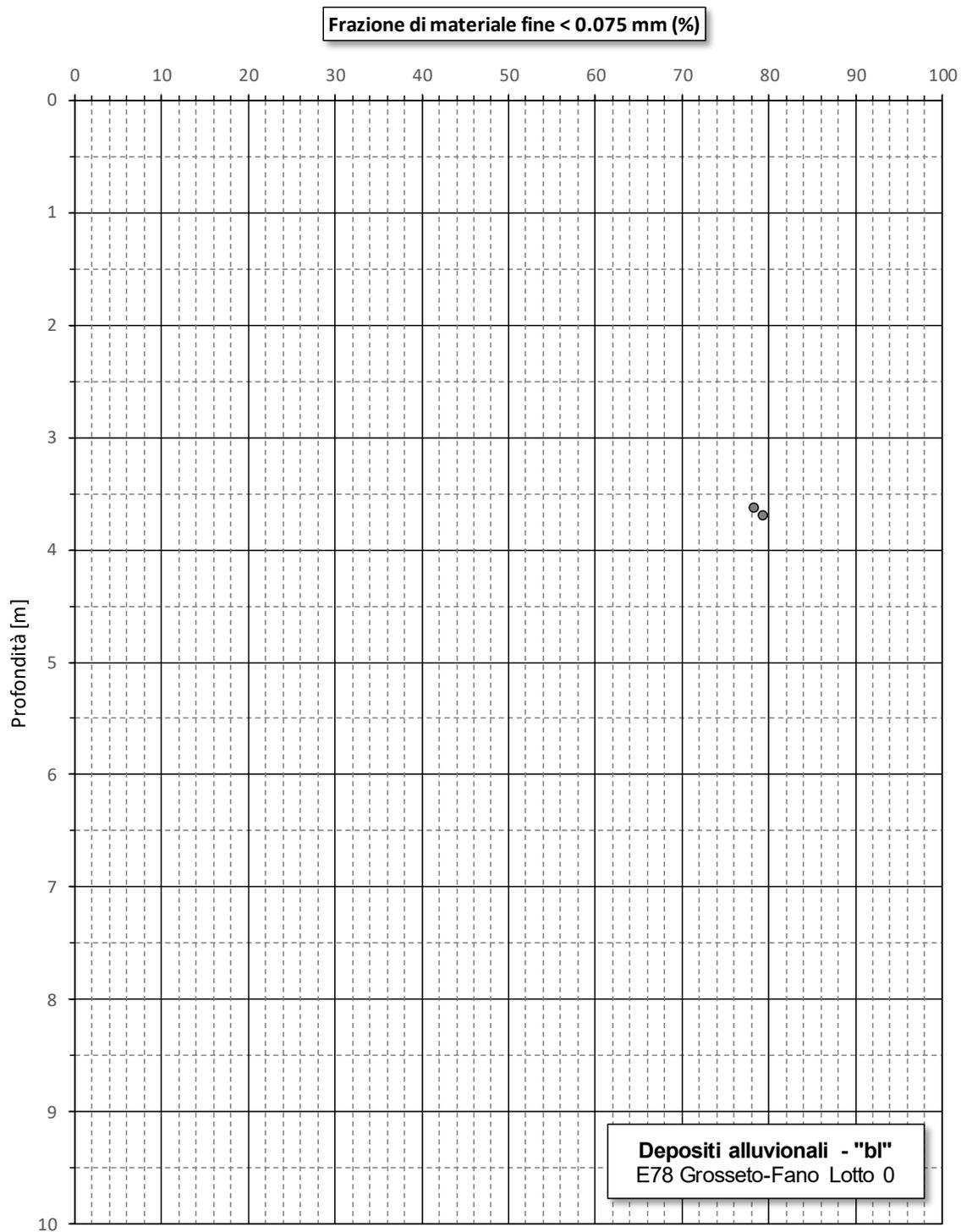


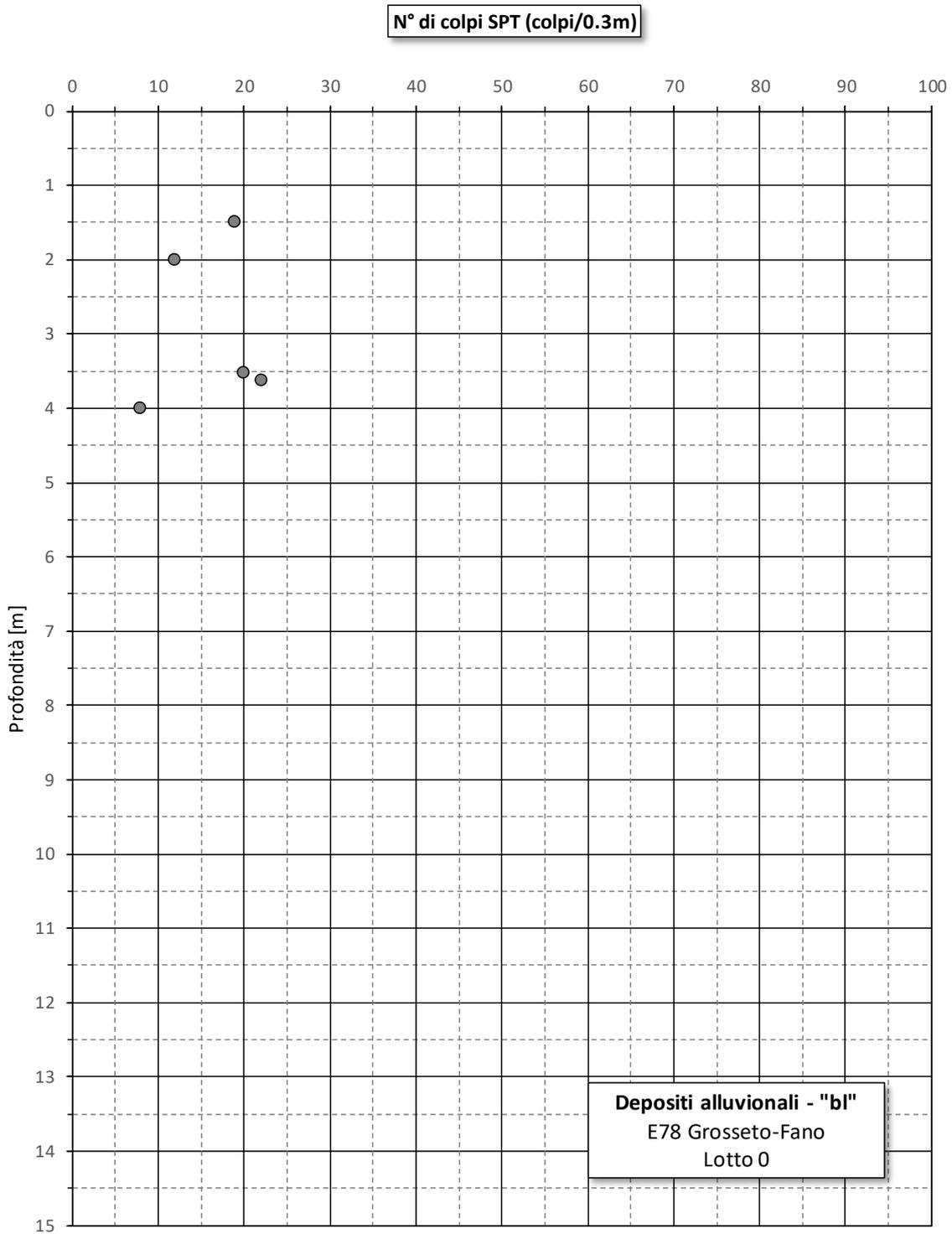


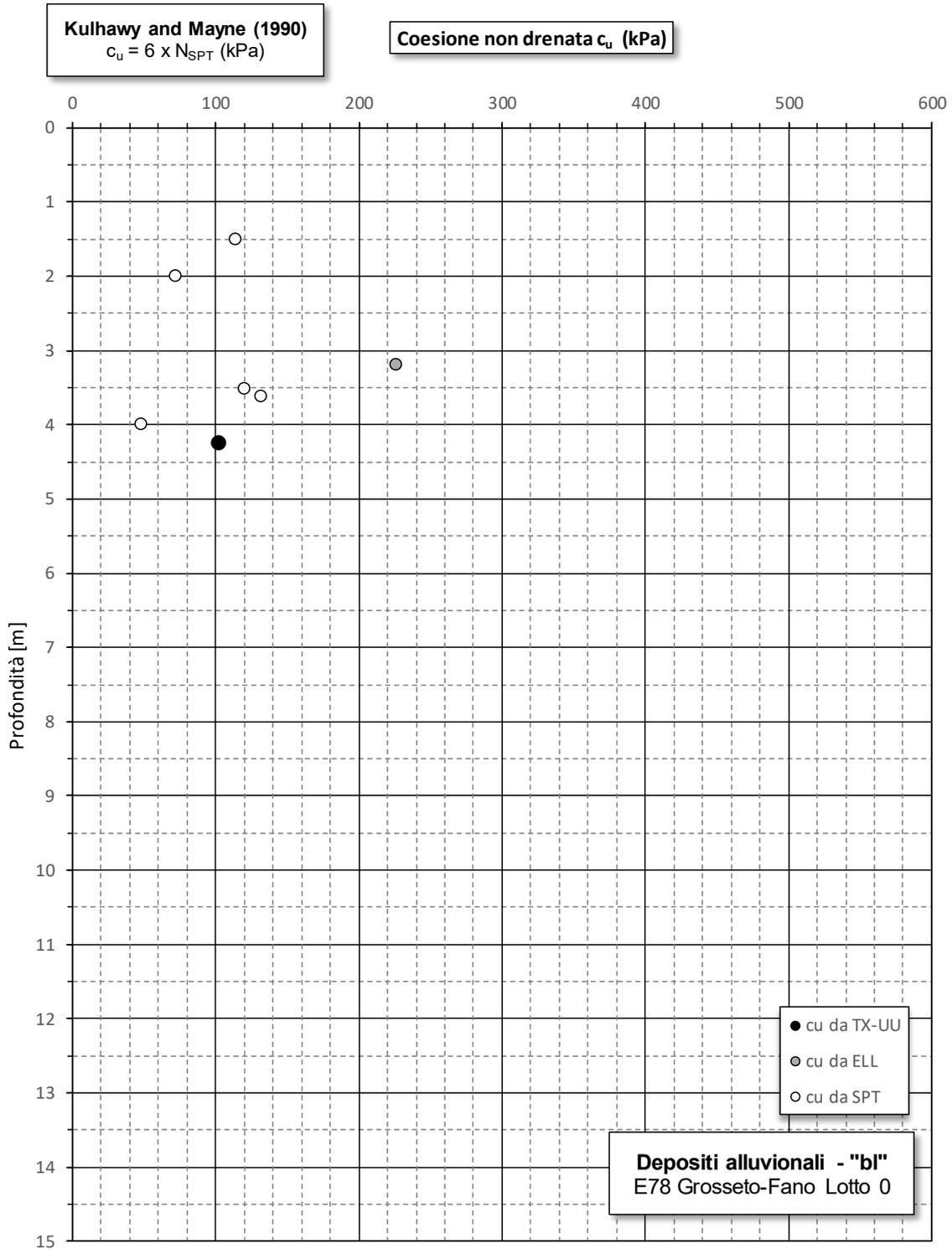


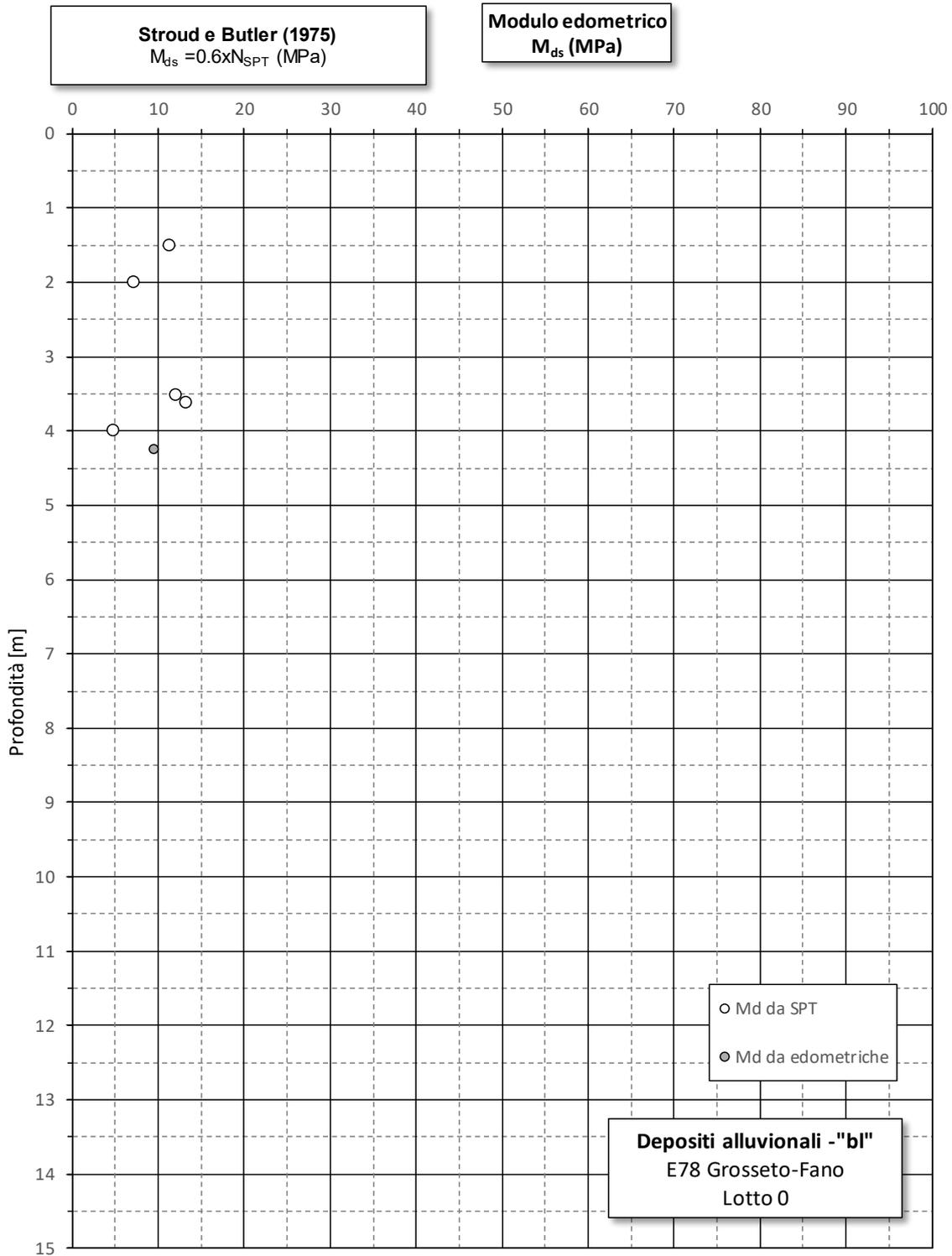




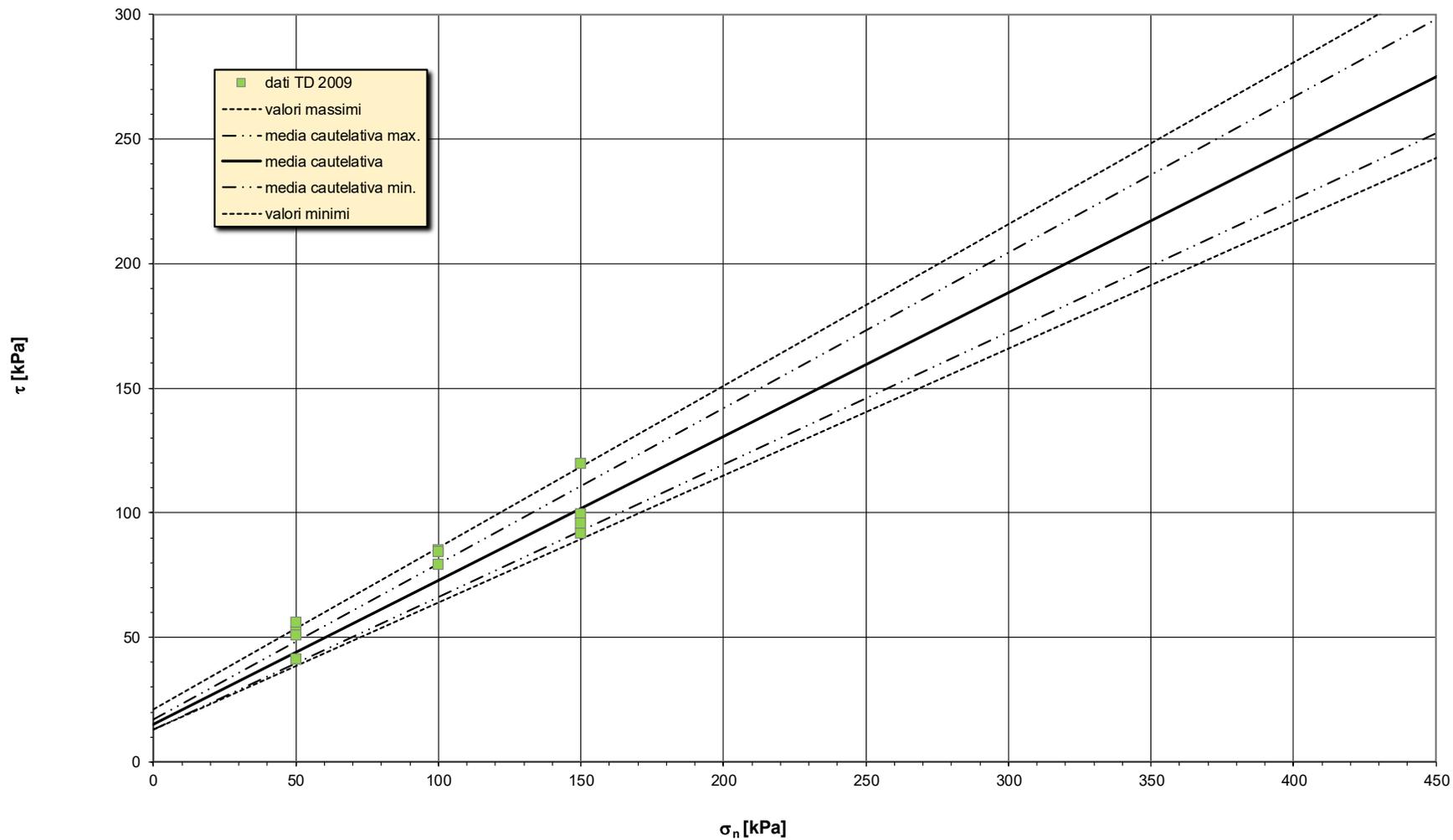




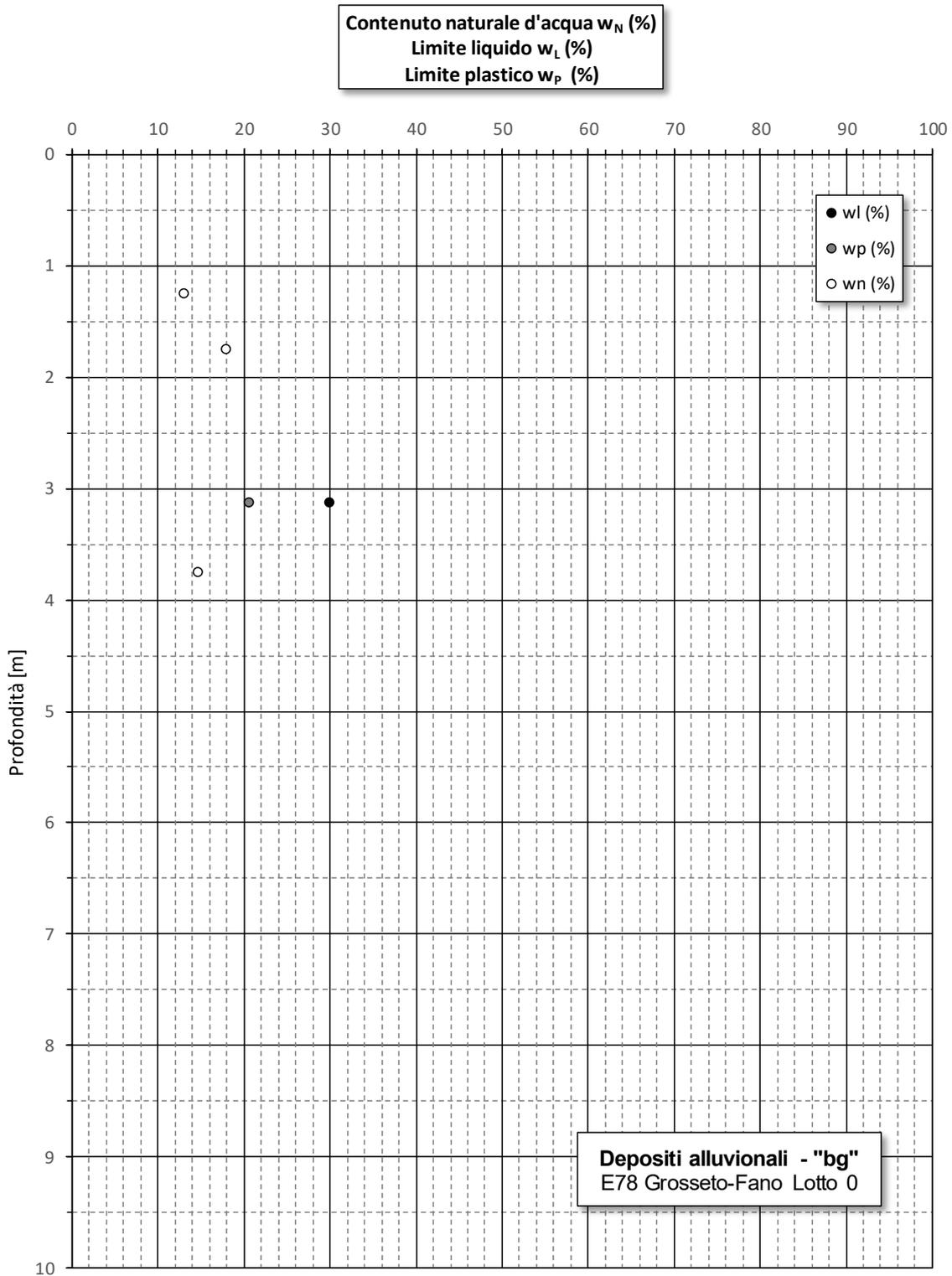


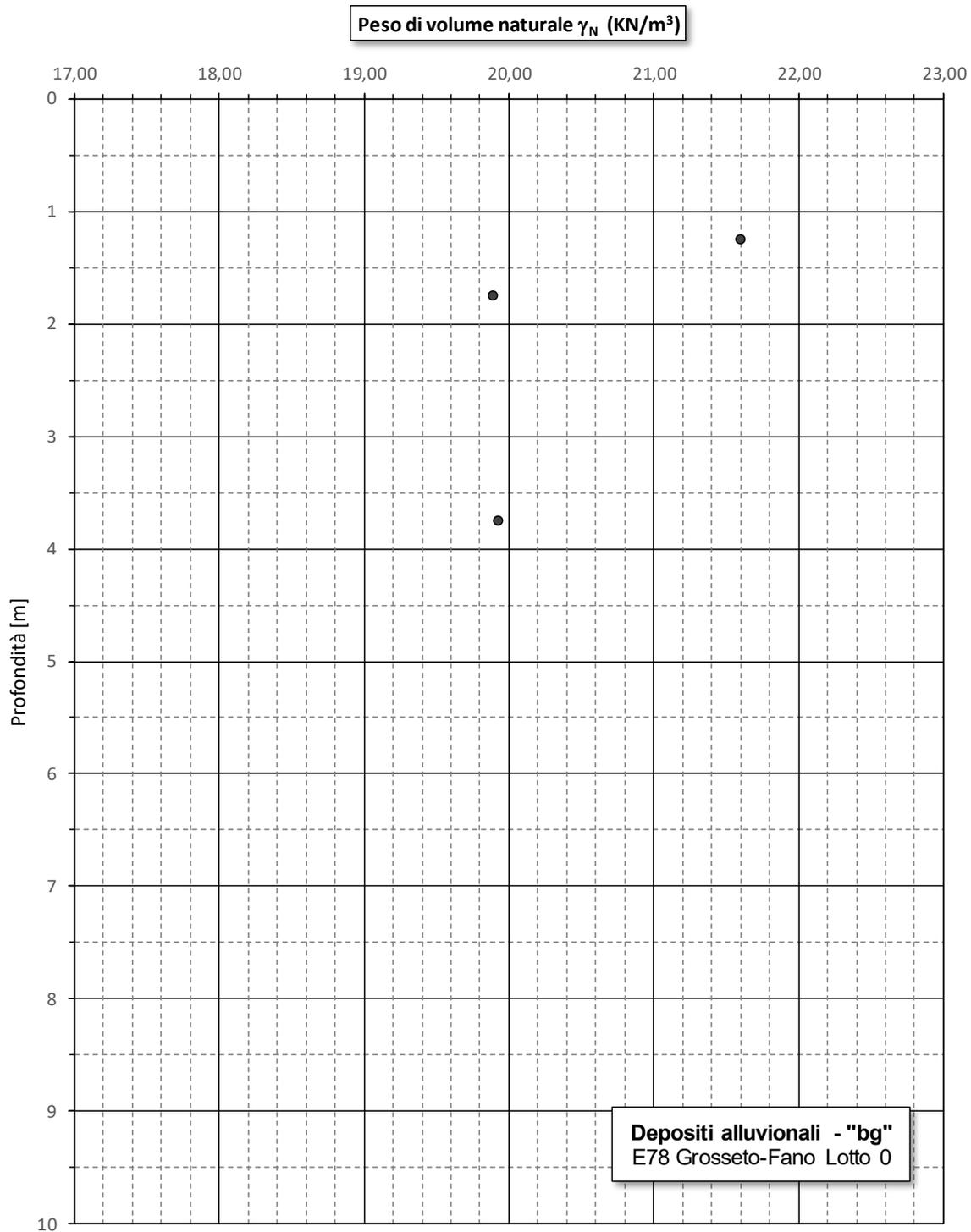


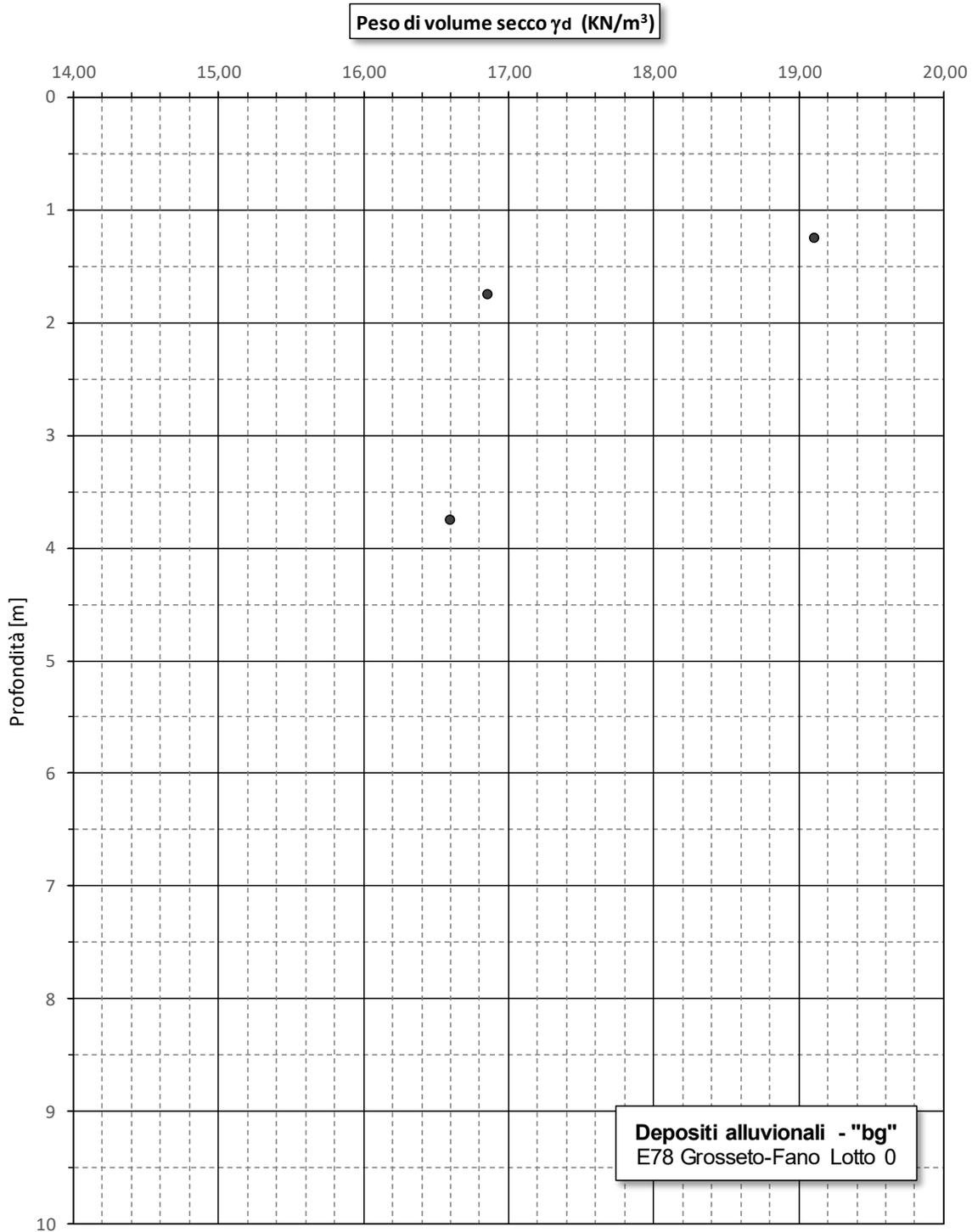
**Resistenza al taglio di picco da prove di taglio diretto - Limi sabbiosi argillosi ("bl", alluvionali)**

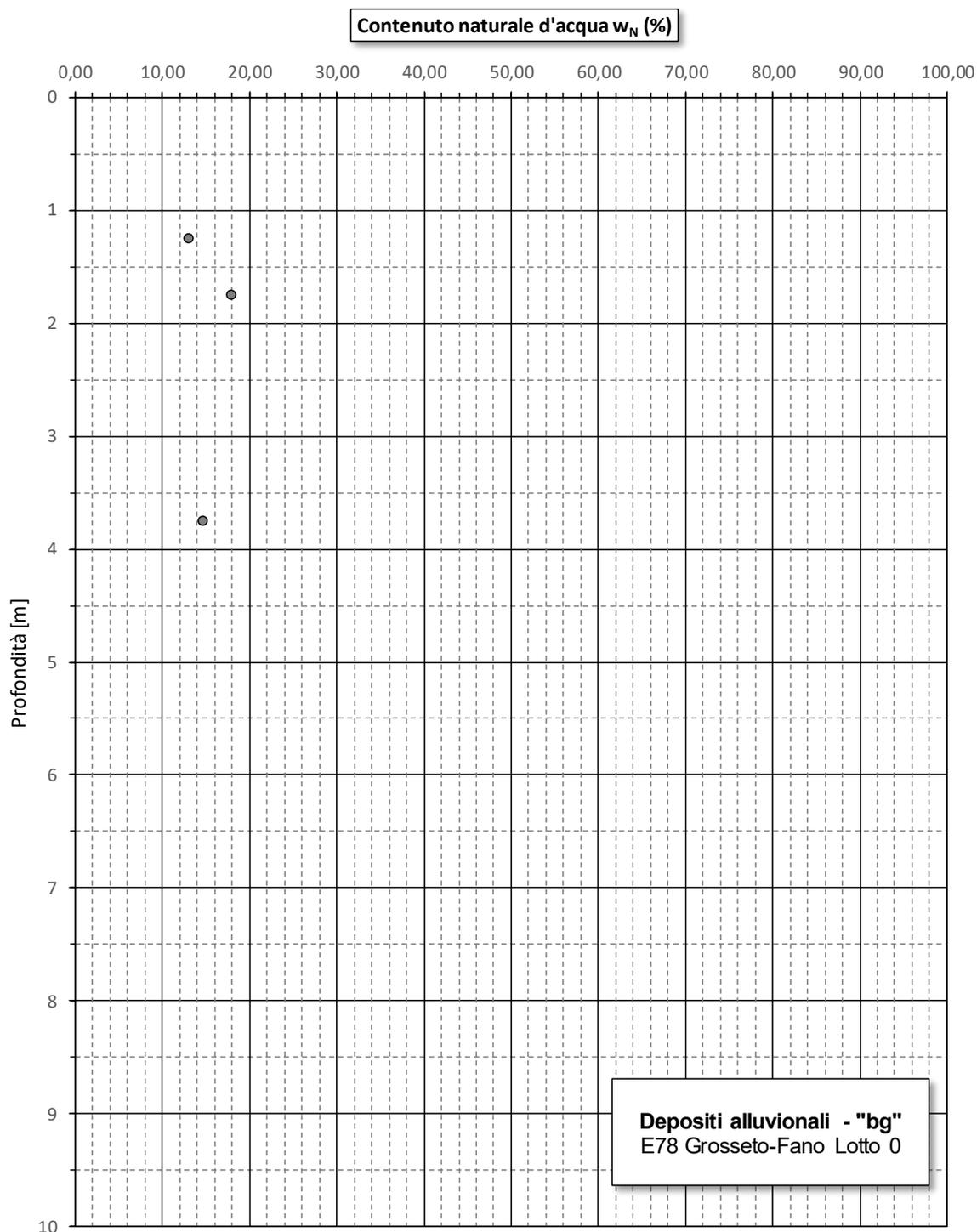


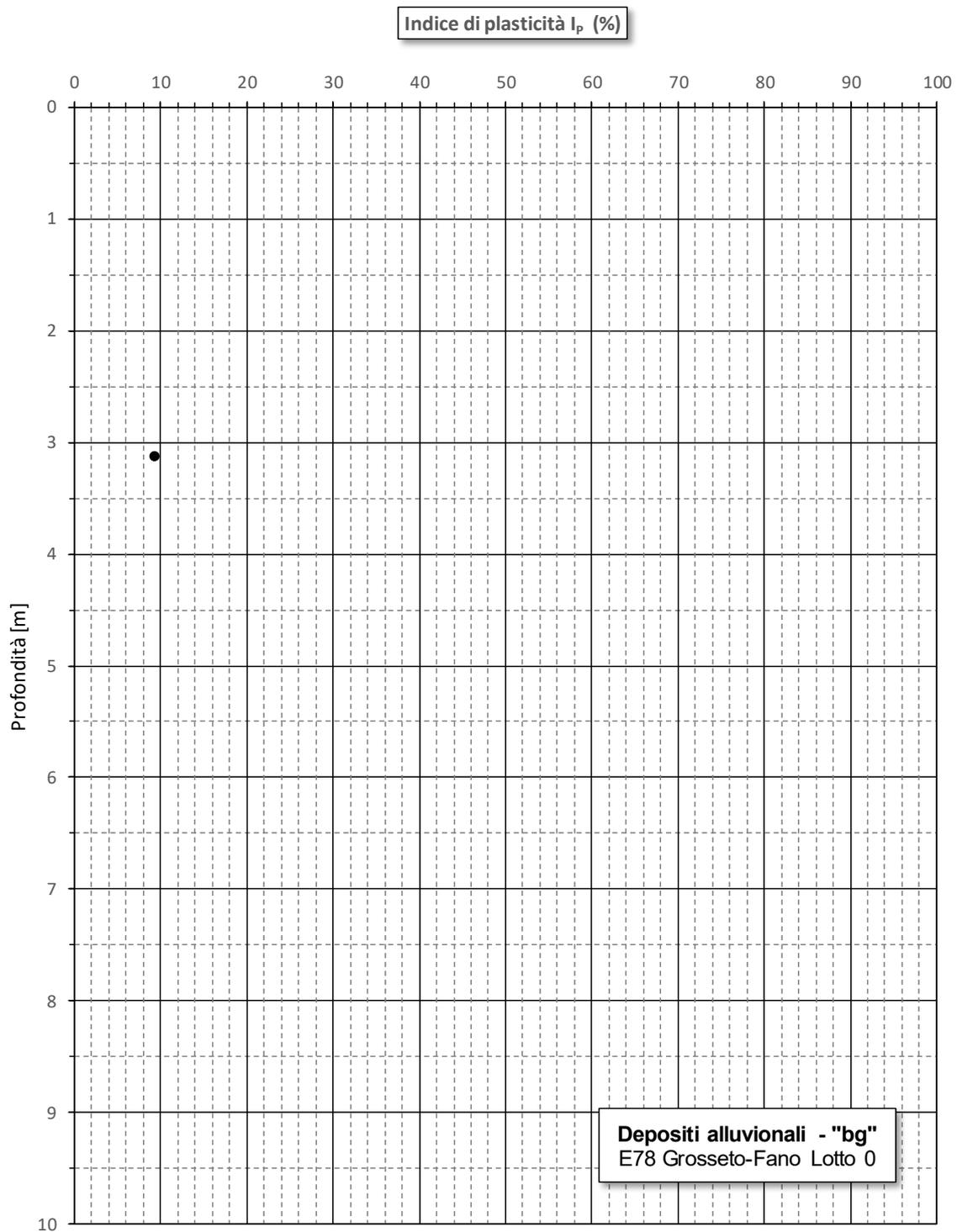
18

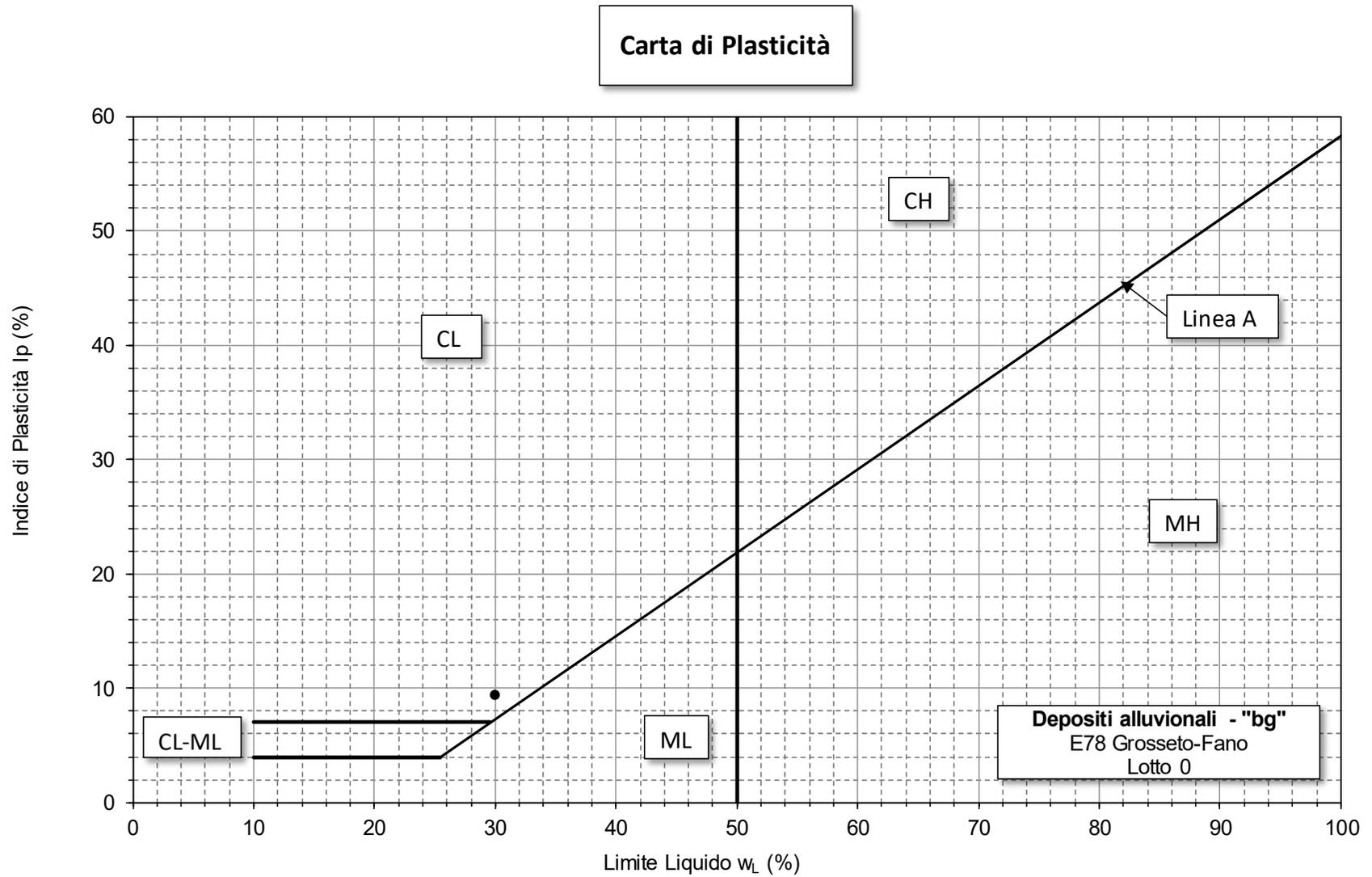


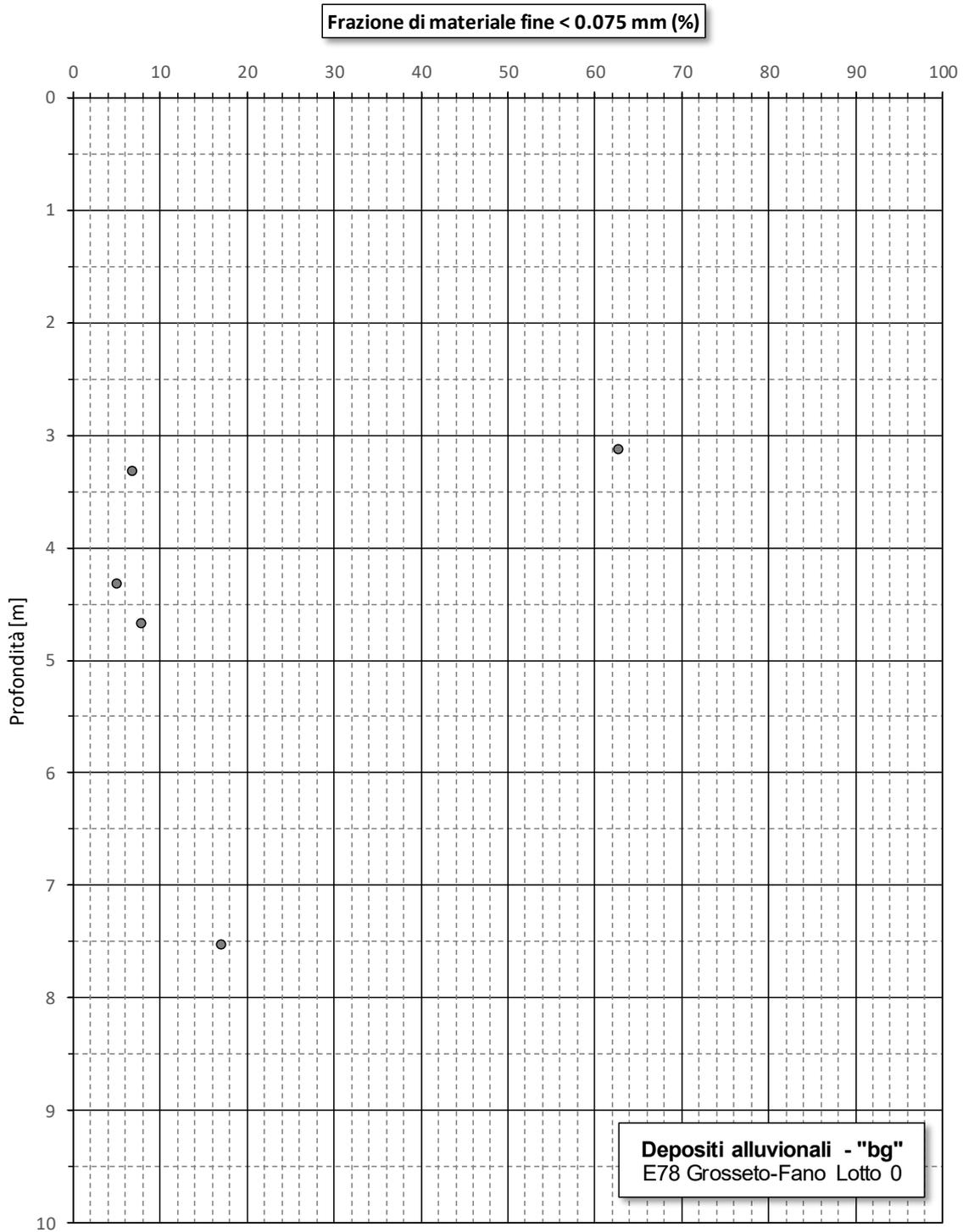


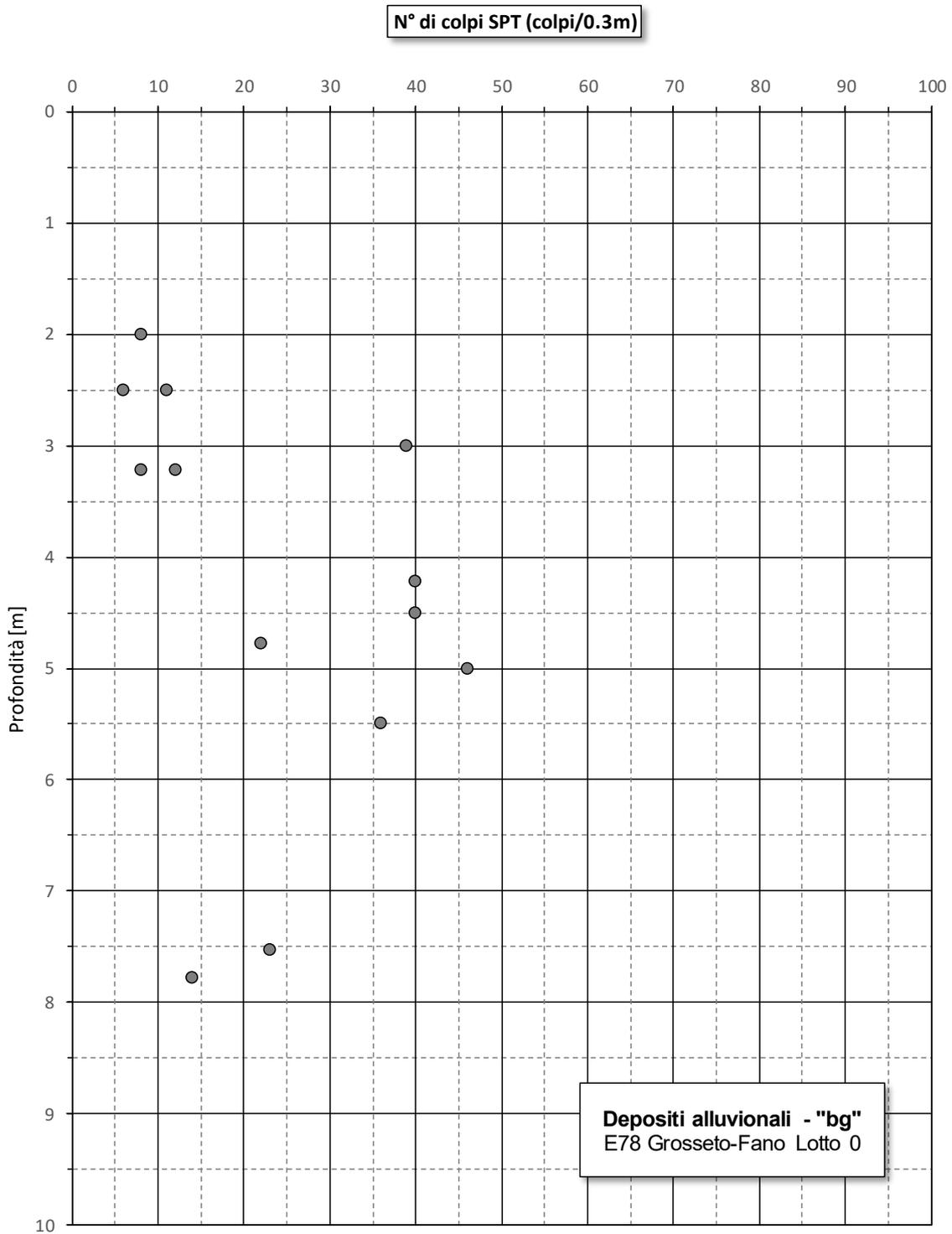


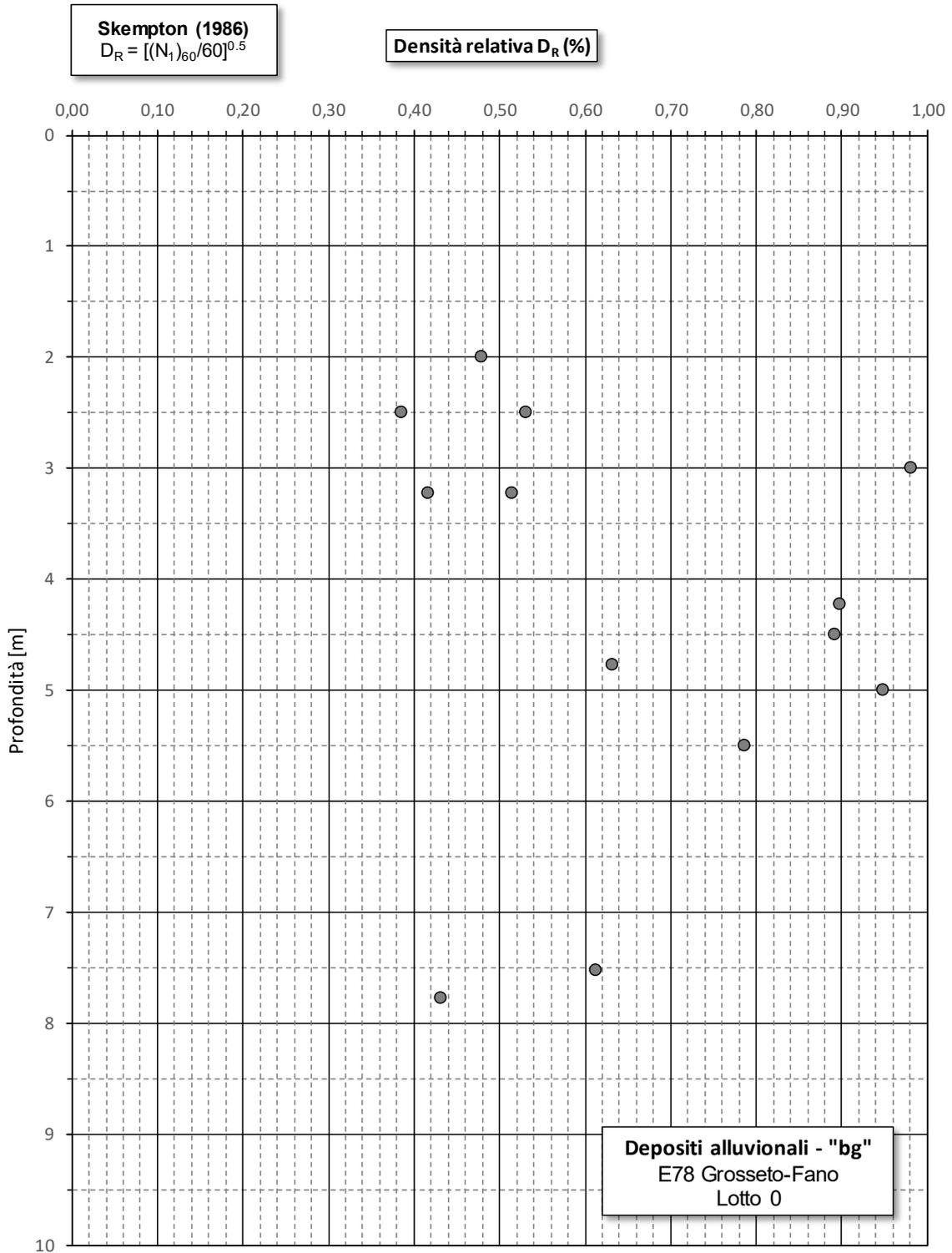


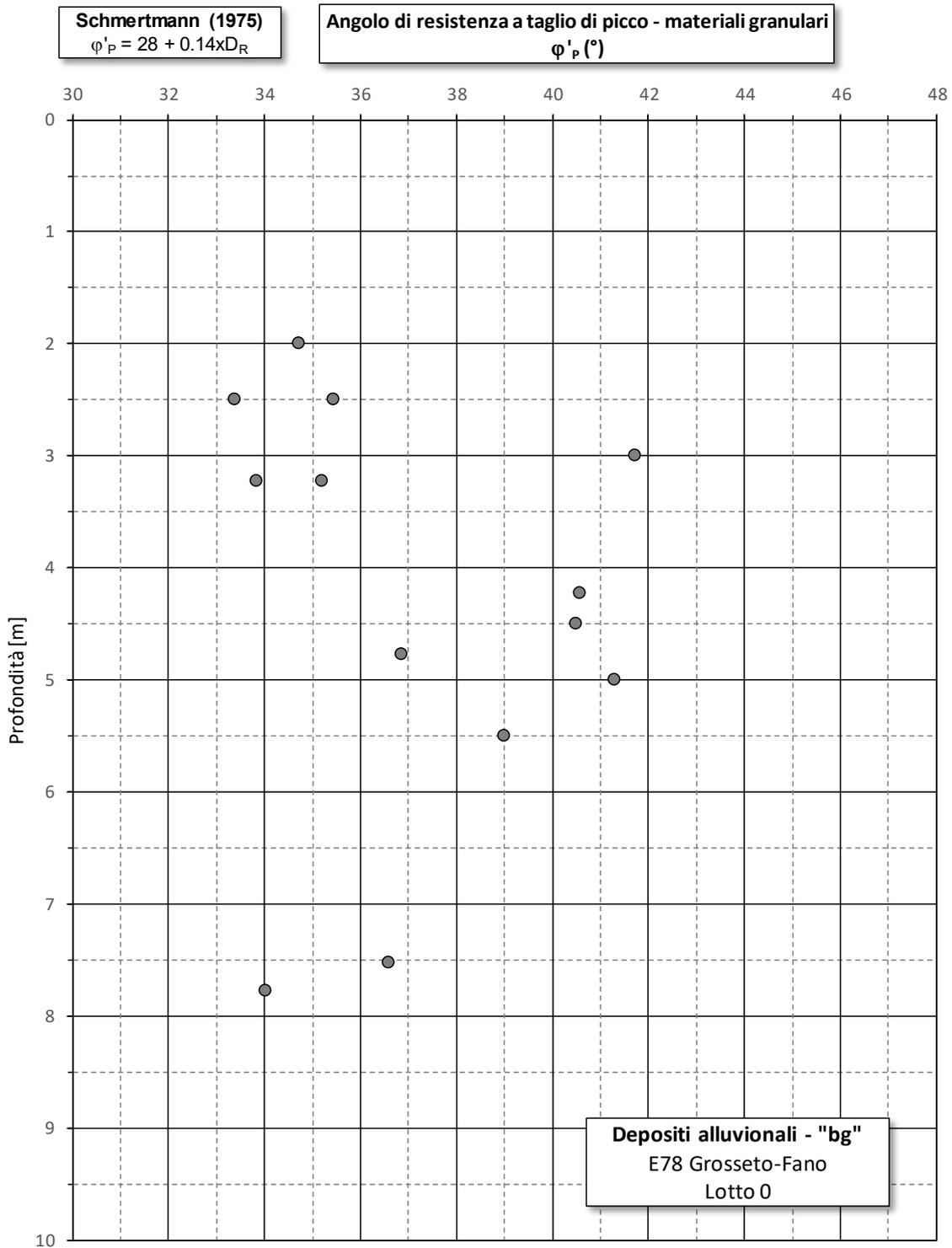


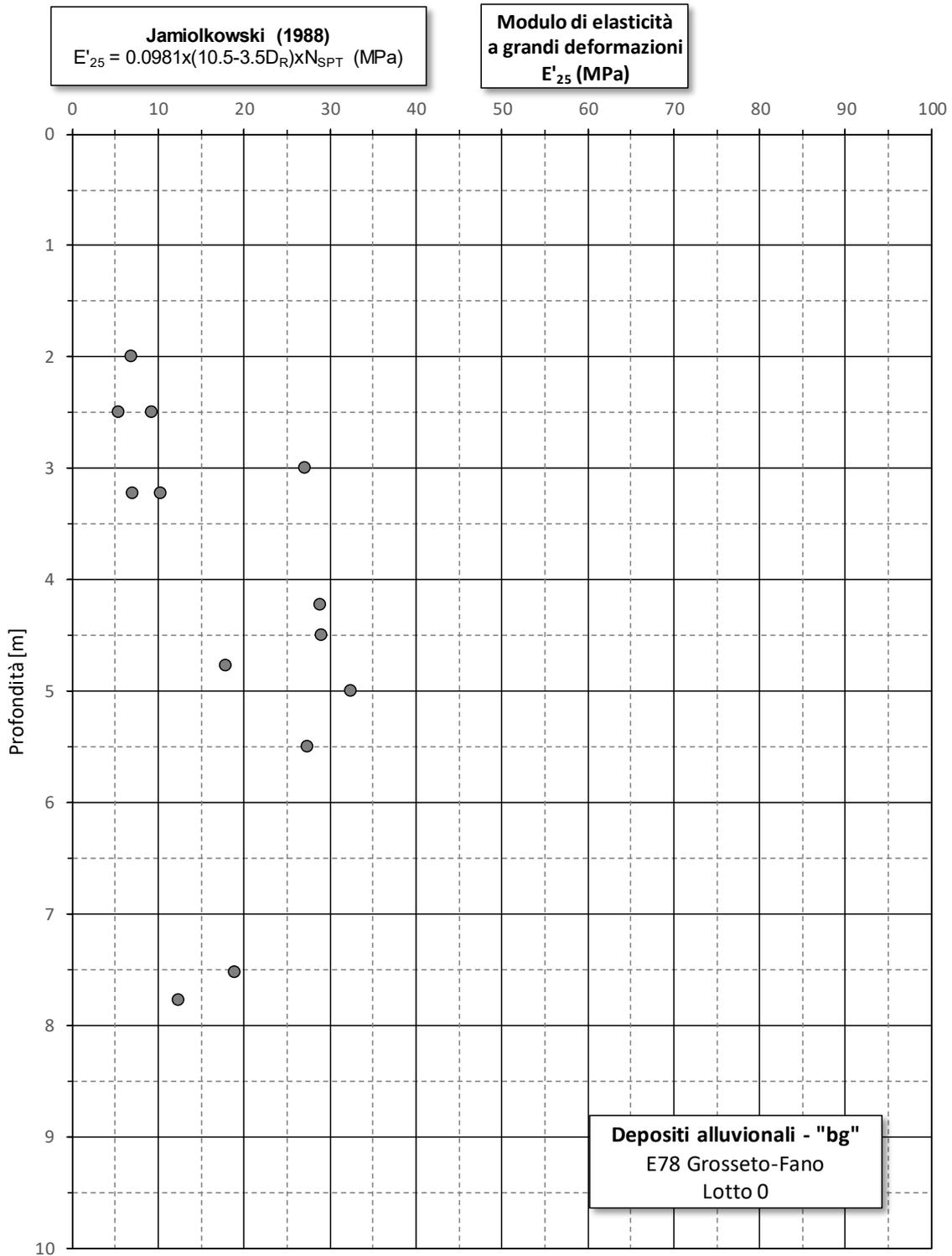




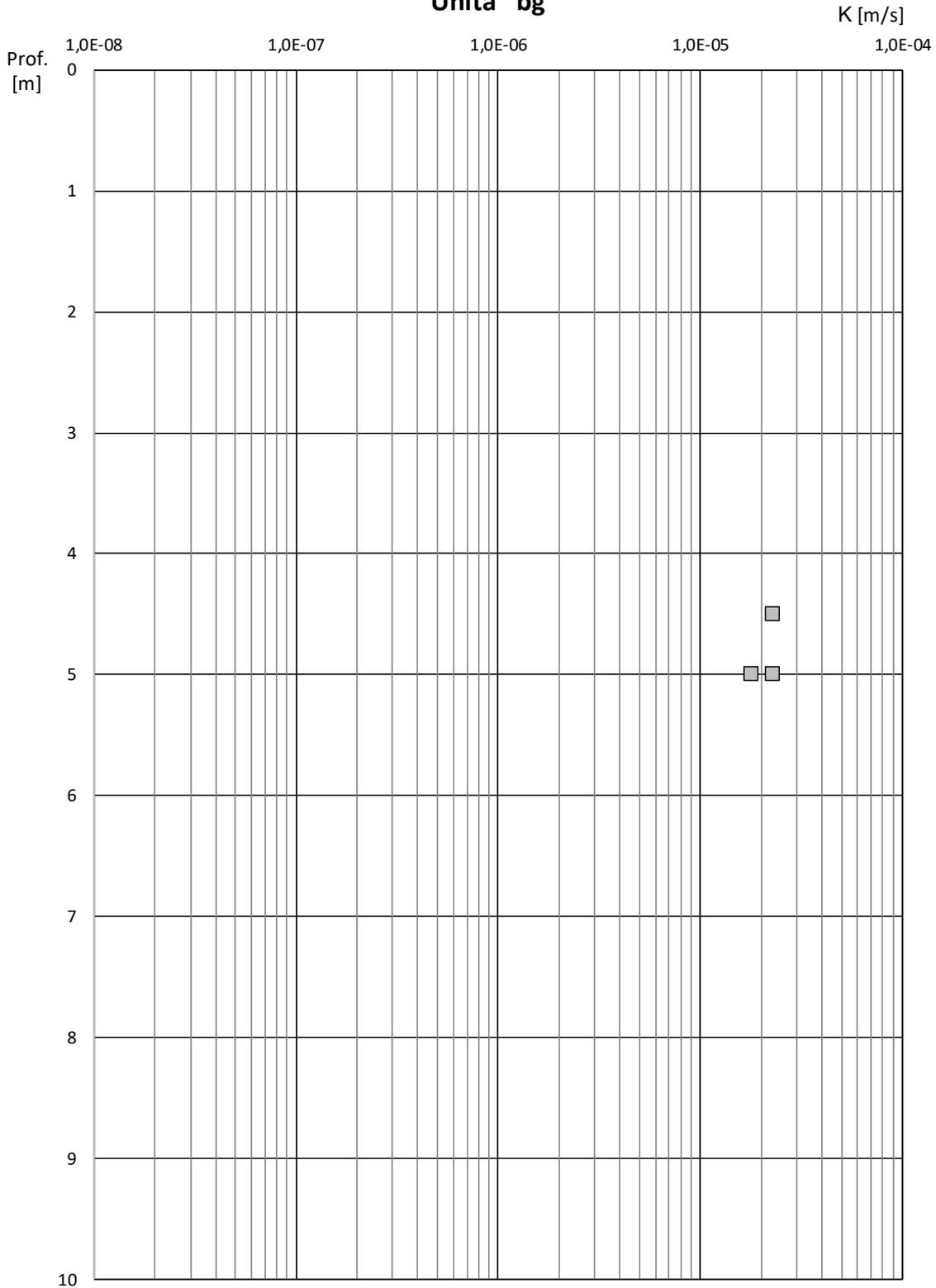








### Coefficiente di permeabilità da prove di permeabilità Lefranc Unità "bg"



## 19 APPENDICE 2 – TABULATI DI CALCOLO VERIFICHE DI STABILITÀ DEI FRONTI DI SCAVO PROVVISORIALI E DEI RILEVATI

## 19.1 Sezione G-45

### *Slide Analysis Information*

## *SLIDE - An Interactive Slope Stability Program*

### *Project Summary*

---

- File Name: Sezione G-45\_Pila 1 Tressa.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### *General Settings*

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### *Analysis Options*

---

#### **Analysis Methods Used**

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### *Groundwater Analysis*

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### *Random Numbers*

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### *Surface Options*

Relazione Geotecnica Generale

201

**RTP di progettazione:**

**Mandataria**



**Mandanti**



- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Material Properties

Property	bs	FAAa	FAA
Color			
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unsaturated Unit Weight [kN/m3]	19	19.5	20
Saturated Unit Weight [kN/m3]	20	20.5	21
Cohesion [kPa]	14.4	54	143
Friction Angle [deg]	26.6	0	0
Water Surface	Water Table	Water Table	Water Table
Hu Value	1	1	1

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 2.648200
- Center: 33.900, 208.404
- Radius: 5.513
- Left Slip Surface Endpoint: 28.587, 206.932
- Right Slip Surface Endpoint: 36.570, 203.581
- Resisting Moment=1405.03 kN-m
- Driving Moment=530.558 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 1995
- Number of Invalid Surfaces: 2856

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 51 surfaces
- Error Code -113 reported for 18 surfaces
- Error Code -114 reported for 508 surfaces
- Error Code -115 reported for 442 surfaces
- Error Code -1000 reported for 1837 surfaces

### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -113 = Surface intersects outside slope limits.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

### Slice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 2.6482

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.31934	2.65434	bs	14.4	26.6	4.63837	12.2833	-4.22687	0	-4.22687
2	0.31934	7.17071	bs	14.4	26.6	7.18786	19.0349	9.25567	0	9.25567
3	0.31934	10.4778	bs	14.4	26.6	9.16276	24.2648	19.6996	0	19.6996
4	0.31934	13.1432	bs	14.4	26.6	10.8177	28.6474	28.4514	0	28.4514
5	0.31934	15.3804	bs	14.4	26.6	12.2529	32.4482	36.0416	0	36.0416
6	0.31934	16.7608	bs	14.4	26.6	13.247	35.0807	41.2982	0	41.2982
7	0.31934	17.0531	bs	14.4	26.6	13.4057	35.501	43.6759	1.538	42.1379
8	0.31934	17.1372	bs	14.4	26.6	13.3293	35.2986	45.3509	3.61723	41.7336
9	0.31934	17.0263	bs	14.4	26.6	13.1687	34.8733	46.2812	5.39679	40.8844
10	0.31934	16.742	bs	14.4	26.6	12.9346	34.2533	46.5561	6.91009	39.646
11	0.31934	16.3004	bs	14.4	26.6	12.6344	33.4585	46.2407	8.18179	38.0589
12	0.31934	15.7136	bs	14.4	26.6	12.2739	32.5037	45.3826	9.23034	36.1523
13	0.31934	14.9857	bs	14.4	26.6	11.8782	31.4559	43.9967	9.93688	34.0598
14	0.31934	14.1173	bs	14.4	26.6	11.4905	30.4291	42.0856	10.0761	32.0095
15	0.31934	13.1239	bs	14.4	26.6	11.0528	29.2701	39.7189	10.0239	29.695
16	0.31934	12.0092	bs	14.4	26.6	10.5666	27.9826	36.9094	9.78566	27.1237
17	0.31934	10.7755	bs	14.4	26.6	10.0325	26.5681	33.6634	9.36434	24.2991
18	0.31934	9.42327	bs	14.4	26.6	9.45031	25.0263	29.9814	8.76117	21.2203
19	0.31934	7.95225	bs	14.4	26.6	8.81937	23.3555	25.8591	7.97548	17.8836

20	0.31934	6.36073	bs	14.4	26.6	8.13826	21.5517	21.2864	7.00468	14.2817
21	0.31934	4.64571	bs	14.4	26.6	7.40482	19.6094	16.2472	5.84422	10.403
22	0.31934	3.05735	bs	14.4	26.6	6.76224	17.9078	11.5585	4.55363	7.00483
23	0.31934	2.29669	bs	14.4	26.6	6.57965	17.4242	9.56695	3.52768	6.03927
24	0.31934	1.48621	bs	14.4	26.6	6.41112	16.9779	7.43081	2.2828	5.14801
25	0.31934	0.522071	bs	14.4	26.6	6.19429	16.4037	4.80322	0.801892	4.00133

## Interslice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 2.6482

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	28.5869	206.932	0	0	0
2	28.9062	206.068	-5.13202	0	0
3	29.2256	205.481	-1.99309	0	0
4	29.5449	205.024	4.09297	0	0
5	29.8642	204.648	11.3224	0	0
6	30.1836	204.332	18.809	0	0
7	30.5029	204.062	25.73	0	0
8	30.8223	203.83	31.5797	0	0
9	31.1416	203.631	36.3676	0	0
10	31.4609	203.46	40.0695	0	0
11	31.7803	203.315	42.6965	0	0
12	32.0996	203.193	44.2842	0	0
13	32.419	203.094	44.8871	0	0
14	32.7383	203.015	44.5666	0	0
15	33.0576	202.956	43.3848	0	0
16	33.377	202.916	41.4411	0	0
17	33.6963	202.895	38.8479	0	0
18	34.0157	202.893	35.7322	0	0
19	34.335	202.908	32.2375	0	0
20	34.6543	202.943	28.5267	0	0
21	34.9737	202.997	24.7865	0	0
22	35.293	203.07	21.2321	0	0
23	35.6124	203.164	17.9904	0	0
24	35.9317	203.279	14.7874	0	0
25	36.251	203.418	11.7132	0	0
26	36.5704	203.581	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
---	---

0.0732305	204.366
16.0146	204.086
29.4676	204.117
32.494	204.082
35.4132	203.581
46.4132	203.581
49.5264	203.641
54.316	203.26
58.665	202.376
63.348	201.336
66.246	200.926
71.6732	200.926

### External Boundary

X	Y
28.8434	206.94
23.327	206.76
16.4158	206.86
11.4476	207.034
2.05749	207.293
0.0732305	207.366
0.0732305	202.963
0.0732305	200.962
0.0732305	188
0.0732305	177.6
71.6732	177.6
71.6732	197.392
71.6732	199.436
71.6732	204.273
66.66	204.273
60.37	205.209
56.993	205.959
55.1986	206.374
53.7893	206.509
53.0858	206.577
51.0863	206.697
46.4132	203.581
40.9132	203.581
35.4132	203.581
30.226	207.039

### Material Boundary

X	Y
0.0732305	200.962

1.88435	200.895
9.46048	200.679
23.2722	200.36
29.2625	200.554
31.2341	200.695
33.8481	200.713
37.459	200.601
40.897	200.679
45.4335	200.503
47.4901	200.437
50.3494	200.261
52.5321	200.192

### Material Boundary

X	Y
0.0732305	202.963
1.94952	202.894
9.51215	202.678
23.2629	202.36
29.1584	202.551
31.1556	202.695
33.8722	202.713
37.4673	202.602
40.9132	202.68
45.5042	202.502
47.5836	202.435
50.4407	202.259
52.7234	202.191
53.9869	202.07
59.574	200.758
63.499	199.863
66.112	199.436
71.6732	199.436

### Material Boundary

X	Y
52.5321	200.192
52.6635	200.188
53.5361	200.104
58.989	198.723
63.189	197.893
65.79	197.392
71.6732	197.392

## 19.2 Sezione G-92

### Slide Analysis Information

## SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### Project Summary

---

- File Name: Sezione G-92\_Pila 1 Luglie.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### General Settings

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### Analysis Options

---

#### Analysis Methods Used

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### Groundwater Analysis

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### Random Numbers

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### Surface Options

Relazione Geotecnica Generale

207

RTP di progettazione:

Mandataria



Mandanti



- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Material Properties

Property	bl	FAAa	FAA
Color			
Strength Type	Undrained	Undrained	Undrained
Unsaturated Unit Weight [kN/m3]	19.5	19.5	20
Saturated Unit Weight [kN/m3]	20.5	20.5	21
Cohesion Type	54	54	143
Water Surface	None	None	None
Ru Value	0	0	0

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 4.754860
- Center: 31.718, 211.455
- Radius: 11.343
- Left Slip Surface Endpoint: 20.991, 207.767
- Right Slip Surface Endpoint: 40.604, 204.404
- Resisting Moment=14861.2 kN-m
- Driving Moment=3125.47 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 1883
- Number of Invalid Surfaces: 2968

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 94 surfaces
- Error Code -112 reported for 8 surfaces
- Error Code -113 reported for 1 surface
- Error Code -114 reported for 388 surfaces
- Error Code -115 reported for 486 surfaces
- Error Code -1000 reported for 1991 surfaces

### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -112 = The coefficient  $M\text{-Alpha} = \cos(\alpha)(1+\tan(\alpha)\tan(\phi))/F < 0.2$  for the final iteration of the safety factor calculation. This screens out some slip surfaces which may not be valid in the context of the analysis, in particular, deep seated slip surfaces with many high negative base angle slices in the passive zone.
- -113 = Surface intersects outside slope limits.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

### Slice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 4.75486

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.80696	14.0935	bl	54	0	11.3568	54	-8.05171	0	-8.05171
2	0.80696	38.5607	bl	54	0	11.3568	54	30.1482	0	30.1482
3	0.80696	56.5483	bl	54	0	11.3568	54	56.4135	0	56.4135
4	0.80696	70.6677	bl	54	0	11.3568	54	76.5173	0	76.5173
5	0.812618	82.7254	FAAa	54	0	11.3568	54	92.6858	0	92.6858
6	0.812618	92.2442	FAAa	54	0	11.3568	54	105.954	0	105.954
7	0.812618	100.058	FAAa	54	0	11.3568	54	116.876	0	116.876
8	0.812618	106.414	FAAa	54	0	11.3568	54	125.836	0	125.836
9	0.812618	111.445	FAAa	54	0	11.3568	54	133.051	0	133.051
10	0.812618	115.264	FAAa	54	0	11.3568	54	138.692	0	138.692
11	0.812618	116.058	FAAa	54	0	11.3568	54	140.555	0	140.555
12	0.812618	109.966	FAAa	54	0	11.3568	54	133.906	0	133.906
13	0.812618	102.452	FAAa	54	0	11.3568	54	125.483	0	125.483
14	0.607874	71.097	FAAa	54	0	11.3568	54	117.079	0	117.079

15	0.798725	85.3755	FAAa	54	0	11.3568	54	107.715	0	107.715
16	0.798725	75.4198	FAAa	54	0	11.3568	54	96.0654	0	96.0654
17	0.798725	66.3796	FAAa	54	0	11.3568	54	85.5877	0	85.5877
18	0.798725	62.5269	FAAa	54	0	11.3568	54	81.6455	0	81.6455
19	0.798725	58.1131	FAAa	54	0	11.3568	54	77.0608	0	77.0608
20	0.798725	52.5665	FAAa	54	0	11.3568	54	71.1426	0	71.1426
21	0.798725	45.7693	FAAa	54	0	11.3568	54	63.7784	0	63.7784
22	0.798725	37.553	FAAa	54	0	11.3568	54	54.8103	0	54.8103
23	0.798725	27.6701	FAAa	54	0	11.3568	54	44.0129	0	44.0129
24	0.637517	13.7003	bl	54	0	11.3568	54	32.6095	0	32.6095
25	0.637517	4.81076	bl	54	0	11.3568	54	20.6609	0	20.6609

## Interslice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 4.75486

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	20.9911	207.767	0	0	0
2	21.7981	205.954	-23.763	0	0
3	22.605	204.7	4.85429	0	0
4	23.412	203.73	50.4546	0	0
5	24.2189	202.944	101.398	0	0
6	25.0316	202.292	152.622	0	0
7	25.8442	201.751	200.713	0	0
8	26.6568	201.303	243.791	0	0
9	27.4694	200.937	280.621	0	0
10	28.282	200.644	310.349	0	0
11	29.0946	200.419	332.381	0	0
12	29.9073	200.257	345.931	0	0
13	30.7199	200.156	350.289	0	0
14	31.5325	200.113	346.391	0	0
15	32.1404	200.119	338.745	0	0
16	32.9391	200.177	323.421	0	0
17	33.7378	200.293	303.269	0	0
18	34.5365	200.467	279.265	0	0
19	35.3353	200.704	250.888	0	0
20	36.134	201.006	218.494	0	0
21	36.9327	201.381	182.757	0	0
22	37.7314	201.837	144.639	0	0
23	38.5302	202.385	105.524	0	0
24	39.3289	203.044	67.4481	0	0
25	39.9664	203.668	39.8535	0	0
26	40.6039	204.404	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
0.0327432	206.902
4.38176	206.727
15.7988	206.443
24.4973	206.197
27.5062	206.08
31.0592	205.525
34.008	204.404
44.008	204.404
46.2952	205.287
48.3865	205.616
58.937	205.333
67.8839	205.094
72.4188	205.094

### External Boundary

X	Y
0.0327432	177.23
72.4188	177.23
72.4188	198.929
72.4188	201.827
72.4188	206.68
68.6327	206.513
48.3617	207.307
44.008	204.404
34.008	204.404
29.3487	207.51
20.3058	207.788
17.5419	207.974
17.1994	207.972
15.1122	207.824
12.278	207.649
10.8081	207.583
9.77706	207.559
6.60775	207.318
0.358663	207.001
-8.88349e-005	207.001
0.00474994	202.614
0.00788045	199.775

## Material Boundary

X	Y
0.00474994	202.614
8.88819	202.947
17.9768	203.13
23.2577	202.932
27.8225	202.989
33.0311	203.045
34.6327	203.115
45.762	202.946
52.8849	202.559
72.4188	201.827

## Material Boundary

X	Y
0.00788045	199.775
9.10164	200.116
18.1903	200.299
23.4712	200.101
30.406	200.101
34.6327	200.145
40.336	200.101
46.5724	199.951
53.108	199.652
72.4188	198.929

## 19.3 Sezione G-123

### *Slide Analysis Information*

## *SLIDE - An Interactive Slope Stability Program*

### *Project Summary*

---

- File Name: Sezione G-123\_Pila 1 Valli.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### *General Settings*

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### *Analysis Options*

---

#### **Analysis Methods Used**

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### *Groundwater Analysis*

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### *Random Numbers*

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### *Surface Options*

---

- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Material Properties

Property	r esistente	bl	FAAa	FAA
Color				
Strength Type	Mohr-Coulomb	Undrained	Undrained	Undrained
Unsaturated Unit Weight [kN/m3]		19.5	19.5	20
Saturated Unit Weight [kN/m3]		20.5	20.5	21
Cohesion [kPa]	0			
Friction Angle [deg]	29.3			
Cohesion Type		54	54	143
Water Surface	None	None	None	None
Ru Value	0	0	0	0

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 3.420850
- Center: 32.159, 203.540
- Radius: 11.685
- Left Slip Surface Endpoint: 20.830, 200.675
- Right Slip Surface Endpoint: 40.976, 195.872
- Resisting Moment=15300.1 kN-m
- Driving Moment=4472.6 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 1397
- Number of Invalid Surfaces: 3454

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 85 surfaces

- Error Code -112 reported for 21 surfaces
- Error Code -113 reported for 24 surfaces
- Error Code -114 reported for 257 surfaces
- Error Code -115 reported for 559 surfaces
- Error Code -1000 reported for 2508 surfaces

### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -112 = The coefficient  $M\text{-Alpha} = \cos(\alpha)(1+\tan(\alpha)\tan(\phi))/F < 0.2$  for the final iteration of the safety factor calculation. This screens out some slip surfaces which may not be valid in the context of the analysis, in particular, deep seated slip surfaces with many high negative base angle slices in the passive zone.
- -113 = Surface intersects outside slope limits.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

### Slice Data

#### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 3.42085

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.385849	4.38297	r esistente	0	29.3	1.22225	4.18115	7.45072	0	7.45072
2	0.875431	34.9468	bl	54	0	15.7856	54	6.85951	0	6.85951
3	0.875431	61.1762	bl	54	0	15.7856	54	46.7583	0	46.7583
4	0.875431	80.1598	bl	54	0	15.7856	54	73.6474	0	73.6474
5	0.823546	88.8815	FAAa	54	0	15.7856	54	93.3959	0	93.3959
6	0.823546	99.3098	FAAa	54	0	15.7856	54	108.544	0	108.544
7	0.823546	107.753	FAAa	54	0	15.7856	54	120.818	0	120.818
8	0.823546	114.547	FAAa	54	0	15.7856	54	130.79	0	130.79
9	0.823546	119.915	FAAa	54	0	15.7856	54	138.824	0	138.824
10	0.823546	124.01	FAAa	54	0	15.7856	54	145.169	0	145.169
11	0.823546	126.851	FAAa	54	0	15.7856	54	149.89	0	149.89
12	0.823546	127.584	FAAa	54	0	15.7856	54	151.978	0	151.978
13	0.823546	121.63	FAAa	54	0	15.7856	54	145.9	0	145.9
14	0.823546	113.651	FAAa	54	0	15.7856	54	137.336	0	137.336
15	0.823546	104.686	FAAa	54	0	15.7856	54	127.564	0	127.564
16	0.823546	94.732	FAAa	54	0	15.7856	54	116.598	0	116.598

17	0.823546	83.7564	FAAa	54	0	15.7856	54	104.415	0	104.415
18	0.823546	71.7504	FAAa	54	0	15.7856	54	91.0249	0	91.0249
19	0.823546	59.47	FAAa	54	0	15.7856	54	77.3676	0	77.3676
20	0.823546	52.8043	FAAa	54	0	15.7856	54	70.6232	0	70.6232
21	0.823546	46.4213	FAAa	54	0	15.7856	54	64.3564	0	64.3564
22	0.823546	38.6471	FAAa	54	0	15.7856	54	56.5915	0	56.5915
23	0.823546	29.275	FAAa	54	0	15.7856	54	47.1647	0	47.1647
24	0.742915	16.8264	bl	54	0	15.7856	54	36.5088	0	36.5088
25	0.742915	5.92971	bl	54	0	15.7856	54	24.5275	0	24.5275

## Interslice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 3.42085

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	20.8304	200.675	0	0	0
2	21.2163	199.441	8.72175	0	0
3	22.0917	197.608	7.47914	0	0
4	22.9671	196.326	53.6207	0	0
5	23.8426	195.332	112.988	0	0
6	24.6661	194.574	170.784	0	0
7	25.4897	193.946	225.986	0	0
8	26.3132	193.423	276.153	0	0
9	27.1368	192.99	319.787	0	0
10	27.9603	192.636	355.919	0	0
11	28.7838	192.353	383.903	0	0
12	29.6074	192.137	403.287	0	0
13	30.4309	191.984	413.614	0	0
14	31.2545	191.89	414.241	0	0
15	32.078	191.856	406.015	0	0
16	32.9016	191.879	390.036	0	0
17	33.7251	191.961	367.495	0	0
18	34.5487	192.102	339.715	0	0
19	35.3722	192.306	308.188	0	0
20	36.1958	192.575	274.378	0	0
21	37.0193	192.914	237.411	0	0
22	37.8429	193.331	197.588	0	0
23	38.6664	193.835	156.055	0	0
24	39.49	194.441	114.47	0	0
25	40.2329	195.094	78.9282	0	0
26	40.9758	195.872	0	0	0

## List Of Coordinates

## Water Table

X	Y
4.3739e-005	198.027
5.62021	198.052
10.6873	198.373
28.6739	198.32
30.4831	197.926
33.266	196.924
35.85	195.872
45.85	195.872
47.7185	196.72
50.6107	197.472
51.9552	197.703
57.5713	197.918
66.0253	197.876
71.6	197.693

## External Boundary

X	Y
4.3739e-005	199.238
4.3739e-005	195.475
4.3739e-005	185.484
4.3739e-005	178
4.3739e-005	165.6
71.6	165.6
71.6	183.641
71.6	194.051
71.6	198.517
69.1266	198.517
66.6532	198.57
58.8157	198.733
53.505	198.528
49.9483	198.605
45.85	195.872
40.85	195.872
35.85	195.872
30.3984	199.507
30.0076	199.767
20.8304	200.675
20.0783	201.165
19.6017	201.402
19.265	201.158
18.7635	200.641
16.5247	200
15.6687	199.889

12.6863	199.381
8.38747	199.366
6.91863	199.435
6.33227	199.279
5.17486	199.277

### Material Boundary

X	Y
4.3739e-005	185.484
3.23749	185.548
8.00308	185.508
13.9482	185.464
17.8451	185.61
19.9883	185.61
22.1804	185.513
28.6589	184.831
33.1846	184.359
34.7117	184.08
40.8845	184.018
52.6536	183.773
58.3747	183.691
71.6	183.641

### Material Boundary

X	Y
4.3739e-005	195.475
3.38435	195.542
8.14994	195.502
13.7049	195.641
17.0172	195.544
19.5989	195.544
22.6676	195.447
29.1462	194.814
32.3123	194.57
34.6559	194.49
40.8287	194.428
52.5978	194.183
58.3189	194.101
71.6	194.051

### Material Boundary

X	Y
12.6863	199.381
30.3984	199.507

## 19.4 Sezione G-153

### *Slide Analysis Information*

## *SLIDE - An Interactive Slope Stability Program*

### *Project Summary*

---

- File Name: Sezione G-153\_Pila 1 Casone.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### *General Settings*

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### *Analysis Options*

---

#### **Analysis Methods Used**

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $m\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### *Groundwater Analysis*

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### *Random Numbers*

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### *Surface Options*

Relazione Geotecnica Generale

219

**RTP di progettazione:**

**Mandataria**



**Mandanti**



- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Material Properties

Property	bl	FAAa	FAA
Color			
Strength Type	Undrained	Undrained	Undrained
Unsaturated Unit Weight [kN/m3]	19.5	19.5	20
Saturated Unit Weight [kN/m3]	20.5	20.5	21
Cohesion Type	54	54	143
Water Surface	None	None	None
Ru Value	0	0	0

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 4.496090
- Center: 32.713, 201.943
- Radius: 12.766
- Left Slip Surface Endpoint: 20.747, 197.495
- Right Slip Surface Endpoint: 42.604, 193.874
- Resisting Moment=18485.6 kN-m
- Driving Moment=4111.47 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 1640
- Number of Invalid Surfaces: 3211

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 45 surfaces
- Error Code -112 reported for 3 surfaces
- Error Code -113 reported for 21 surfaces
- Error Code -114 reported for 232 surfaces
- Error Code -115 reported for 589 surfaces
- Error Code -1000 reported for 2321 surfaces

### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -112 = The coefficient  $M\text{-Alpha} = \cos(\alpha)(1+\tan(\alpha)\tan(\phi))/F < 0.2$  for the final iteration of the safety factor calculation. This screens out some slip surfaces which may not be valid in the context of the analysis, in particular, deep seated slip surfaces with many high negative base angle slices in the passive zone.
- -113 = Surface intersects outside slope limits.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

### Slice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 4.49609

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.851852	15.0407	bl	54	0	12.0104	54	-8.18049	0	-8.18049
2	0.851852	40.8031	bl	54	0	12.0104	54	29.3942	0	29.3942
3	0.851852	60.2058	bl	54	0	12.0104	54	56.1091	0	56.1091
4	0.851852	76.2219	bl	54	0	12.0104	54	77.5536	0	77.5536
5	0.851852	89.3902	bl	54	0	12.0104	54	94.9949	0	94.9949
6	0.851852	100.344	bl	54	0	12.0104	54	109.447	0	109.447
7	0.851852	109.482	bl	54	0	12.0104	54	121.514	0	121.514
8	0.863367	118.689	FAAa	54	0	12.0104	54	131.641	0	131.641
9	0.863367	125.048	FAAa	54	0	12.0104	54	140.069	0	140.069
10	0.863367	130.113	FAAa	54	0	12.0104	54	146.909	0	146.909
11	0.863367	133.98	FAAa	54	0	12.0104	54	152.298	0	152.298
12	0.863367	136.398	FAAa	54	0	12.0104	54	155.963	0	155.963
13	0.863367	131.269	FAAa	54	0	12.0104	54	150.856	0	150.856
14	0.863367	122.552	FAAa	54	0	12.0104	54	141.579	0	141.579

15	0.863367	112.797	FAAa	54	0	12.0104	54	131.093	0	131.093
16	0.863367	102.004	FAAa	54	0	12.0104	54	119.412	0	119.412
17	0.863367	90.1481	FAAa	54	0	12.0104	54	106.517	0	106.517
18	0.863367	78.0203	FAAa	54	0	12.0104	54	93.3375	0	93.3375
19	0.863367	71.9529	FAAa	54	0	12.0104	54	87.2245	0	87.2245
20	0.863367	66.348	FAAa	54	0	12.0104	54	81.7129	0	81.7129
21	0.934124	63.937	bl	54	0	12.0104	54	74.43	0	74.43
22	0.934124	54.0012	bl	54	0	12.0104	54	65.1063	0	65.1063
23	0.934124	41.9426	bl	54	0	12.0104	54	53.7352	0	53.7352
24	0.934124	27.3346	bl	54	0	12.0104	54	39.9827	0	39.9827
25	0.934124	9.54923	bl	54	0	12.0104	54	23.4117	0	23.4117

## Interslice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 4.49609

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	20.7469	197.495	0	0	0
2	21.5988	195.663	-25.222	0	0
3	22.4506	194.35	3.12652	0	0
4	23.3025	193.317	50.8672	0	0
5	24.1543	192.471	106.226	0	0
6	25.0062	191.766	162.978	0	0
7	25.858	191.174	217.558	0	0
8	26.7099	190.677	267.724	0	0
9	27.5733	190.258	312.529	0	0
10	28.4366	189.915	350.174	0	0
11	29.3	189.642	379.888	0	0
12	30.1634	189.435	401.116	0	0
13	31.0267	189.29	413.41	0	0
14	31.8901	189.204	415.906	0	0
15	32.7535	189.178	409.283	0	0
16	33.6168	189.21	394.719	0	0
17	34.4802	189.301	373.495	0	0
18	35.3436	189.452	347.032	0	0
19	36.2069	189.665	316.734	0	0
20	37.0703	189.945	282.008	0	0
21	37.9337	190.294	243.063	0	0
22	38.8678	190.76	197.203	0	0
23	39.8019	191.327	149.034	0	0
24	40.736	192.014	100.892	0	0
25	41.6702	192.848	56.3356	0	0
26	42.6043	193.874	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
9.01552e-005	194.7
2.6996	194.649
11.7735	194.513
19.0021	194.218
30.081	194
34.6001	193.906
41.5822	193.541
49.2585	193.158
52.6772	192.98
64.7323	192.329
70.7039	191.787

### External Boundary

X	Y
9.01552e-005	197.638
9.01552e-005	191.339
9.01552e-005	189.718
9.01552e-005	166.2
70.6375	166.2
70.6842	187.142
70.6876	188.673
70.7039	195.984
63.4009	196.177
49.9209	196.588
45.8501	193.874
35.8501	193.874
30.8002	197.241
17.9443	197.566
11.1467	197.71
9.01552e-005	197.71

### Material Boundary

X	Y
9.01552e-005	189.718
7.2632	189.787
16.3318	189.607
21.2676	189.354
28.5001	188.979
34.6001	188.821

42.9202	188.526
50.0785	188.071
55.7366	187.65
62.3111	187.269
70.6842	187.142

## Material Boundary

X	Y
9.01552e-005	191.339
4.6094	191.383
13.678	191.203
20.3401	190.989
30.5388	190.49
34.6001	190.421
43.1144	190.097
58.2333	189.096
70.6876	188.673

## 19.5 Sezione G-173

### *Slide Analysis Information*

## *SLIDE - An Interactive Slope Stability Program*

### *Project Summary*

---

- File Name: Sezione G-173\_Pila 4 Ribucciano.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### *General Settings*

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### *Analysis Options*

---

#### **Analysis Methods Used**

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $m\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### *Groundwater Analysis*

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### *Random Numbers*

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### *Surface Options*

- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Material Properties

Property	b2	FAAa	FAA
Color			
Strength Type	Undrained	Undrained	Undrained
Unsaturated Unit Weight [kN/m3]	19.5	19.5	20
Saturated Unit Weight [kN/m3]	20.5	20.5	21
Cohesion Type	54	54	143
Water Surface	None	None	None
Ru Value	0	0	0

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 6.083410
- Center: 30.979, 205.301
- Radius: 8.604
- Left Slip Surface Endpoint: 22.849, 202.482
- Right Slip Surface Endpoint: 37.714, 199.946
- Resisting Moment=8536.45 kN-m
- Driving Moment=1403.23 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 1856
- Number of Invalid Surfaces: 2995

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 83 surfaces
- Error Code -112 reported for 42 surfaces
- Error Code -113 reported for 5 surfaces
- Error Code -114 reported for 208 surfaces
- Error Code -115 reported for 534 surfaces
- Error Code -1000 reported for 2123 surfaces

## Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -112 = The coefficient  $M\text{-Alpha} = \cos(\alpha)(1+\tan(\alpha)\tan(\phi))/F < 0.2$  for the final iteration of the safety factor calculation. This screens out some slip surfaces which may not be valid in the context of the analysis, in particular, deep seated slip surfaces with many high negative base angle slices in the passive zone.
- -113 = Surface intersects outside slope limits.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 6.08341

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.659201	9.42444	b2	54	0	8.8766	54	-5.24016	0	-5.24016
2	0.659201	25.7412	b2	54	0	8.8766	54	25.7423	0	25.7423
3	0.659201	37.502	b2	54	0	8.8766	54	46.6826	0	46.6826
4	0.601535	42.3092	FAAa	54	0	8.8766	54	62.0848	0	62.0848
5	0.601535	48.5854	FAAa	54	0	8.8766	54	73.9229	0	73.9229
6	0.601535	53.798	FAAa	54	0	8.8766	54	83.7294	0	83.7294
7	0.601535	58.1262	FAAa	54	0	8.8766	54	91.8946	0	91.8946
8	0.601535	61.6664	FAAa	54	0	8.8766	54	98.6332	0	98.6332
9	0.601535	64.5208	FAAa	54	0	8.8766	54	104.15	0	104.15
10	0.601535	66.9692	FAAa	54	0	8.8766	54	108.933	0	108.933
11	0.601535	68.6038	FAAa	54	0	8.8766	54	112.323	0	112.323
12	0.601535	65.6093	FAAa	54	0	8.8766	54	107.989	0	107.989
13	0.601535	61.4778	FAAa	54	0	8.8766	54	101.75	0	101.75
14	0.601535	56.7627	FAAa	54	0	8.8766	54	94.5326	0	94.5326

15	0.601535	51.5273	FAAa	54	0	8.8766	54	86.4532	0	86.4532
16	0.601535	45.7995	FAAa	54	0	8.8766	54	77.5673	0	77.5673
17	0.601535	39.557	FAAa	54	0	8.8766	54	67.8478	0	67.8478
18	0.601535	35.1526	FAAa	54	0	8.8766	54	61.2187	0	61.2187
19	0.601535	32.5184	FAAa	54	0	8.8766	54	57.582	0	57.582
20	0.601535	29.2344	FAAa	54	0	8.8766	54	52.9352	0	52.9352
21	0.601535	25.2301	FAAa	54	0	8.8766	54	47.19	0	47.19
22	0.601535	20.4041	FAAa	54	0	8.8766	54	40.222	0	40.222
23	0.601535	14.607	FAAa	54	0	8.8766	54	31.8542	0	31.8542
24	0.601535	7.60504	FAAa	54	0	8.8766	54	21.8281	0	21.8281
25	0.254826	0.797191	b2	54	0	8.8766	54	13.7779	0	13.7779

## Interslice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 6.08341

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	22.8492	202.482	0	0	0
2	23.5084	201.031	-13.4542	0	0
3	24.1676	200.043	6.13267	0	0
4	24.8268	199.285	35.6679	0	0
5	25.4283	198.726	65.041	0	0
6	26.0299	198.262	93.9971	0	0
7	26.6314	197.875	121.029	0	0
8	27.2329	197.554	145.178	0	0
9	27.8345	197.291	165.785	0	0
10	28.436	197.081	182.399	0	0
11	29.0375	196.918	194.758	0	0
12	29.6391	196.801	202.549	0	0
13	30.2406	196.728	205.116	0	0
14	30.8421	196.697	202.894	0	0
15	31.4437	196.709	196.469	0	0
16	32.0452	196.763	186.481	0	0
17	32.6468	196.859	173.627	0	0
18	33.2483	197.001	158.688	0	0
19	33.8498	197.189	141.813	0	0
20	34.4514	197.428	122.727	0	0
21	35.0529	197.722	101.835	0	0
22	35.6544	198.077	79.7153	0	0
23	36.256	198.505	57.1987	0	0
24	36.8575	199.018	35.5151	0	0
25	37.459	199.64	16.5884	0	0
26	37.7139	199.946	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
-1.56928e-007	203.14
8.30972	202.356
27.0096	201.571
30.2583	201.116
32.0023	200.312
33.2462	199.946
43.2279	199.934
46.6095	200.937
49.8021	201.24
62.3969	201.659
70.7038	201.586

### External Boundary

X	Y
43.2462	199.946
33.2462	199.946
29.3065	202.551
28.6125	202.469
22.3155	202.483
19.4481	202.59
18.906	202.64
14.4183	202.878
13.6634	202.872
12.1325	202.955
9.59764	202.963
9.14443	203.001
8.30842	203.147
2.29444	204.018
1.97753	204.033
1.32624	204.017
0.546001	204.003
-1.56811e-007	204.059
-1.56811e-007	201.109
-1.56811e-007	198.239
-1.56811e-007	174.75
70.7038	174.75
70.7038	196.83
70.7038	199.746
70.7038	202.903

65.6543	203.001
54.962	203.349
48.2644	203.291

### Material Boundary

X	Y
-1.56811e-007	201.109
8.22374	200.125
14.9373	199.579
27.1067	199.217
32.6463	199.509
34.6177	199.471
40.481	199.819
45.4813	199.94
50.2406	199.94
57.5832	199.964
64.7964	199.82
70.7038	199.746

### Material Boundary

X	Y
-1.56811e-007	198.239
3.40023	197.754
14.2775	196.835
23.8035	196.4
29.0714	196.385
32.7791	196.6
34.6177	196.471
37.5375	196.602
43.2637	196.946
50.6696	197.022
58.0122	197.046
65.2253	196.902
70.7038	196.83

## 19.6 Sezione G-222

### *Slide Analysis Information*

## *SLIDE - An Interactive Slope Stability Program*

### *Project Summary*

---

- File Name: Sezione G-222\_Pila 6 Riluogo.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### *General Settings*

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### *Analysis Options*

---

#### **Analysis Methods Used**

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### *Groundwater Analysis*

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### *Random Numbers*

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### *Surface Options*

---

- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Material Properties

Property	bg	FAA
Color		
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unsaturated Unit Weight [kN/m3]	18	20
Saturated Unit Weight [kN/m3]	20	21
Cohesion [kPa]	2	143
Friction Angle [deg]	29.3	0
Water Surface	Water Table	Water Table
Hu Value	1	1

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 1.341550
- Center: 36.284, 199.489
- Radius: 11.231
- Left Slip Surface Endpoint: 27.815, 192.113
- Right Slip Surface Endpoint: 34.242, 188.445
- Resisting Moment=650.5 kN-m
- Driving Moment=484.888 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 1935
- Number of Invalid Surfaces: 2916

### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 11 surfaces
- Error Code -113 reported for 11 surfaces
- Error Code -114 reported for 807 surfaces
- Error Code -115 reported for 393 surfaces
- Error Code -1000 reported for 1694 surfaces

### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -113 = Surface intersects outside slope limits.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.34155

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.257112	0.661989	bg	2	29.3	1.75579	2.35548	0.63345	0	0.63345
2	0.257112	1.94297	bg	2	29.3	3.24769	4.35694	4.20004	0	4.20004
3	0.257112	3.14215	bg	2	29.3	4.69893	6.30385	7.66938	0	7.66938
4	0.257112	4.19757	bg	2	29.3	6.02709	8.08564	10.8445	0	10.8445
5	0.257112	4.59277	bg	2	29.3	6.60159	8.85636	12.2179	0	12.2179
6	0.257112	4.79051	bg	2	29.3	6.94617	9.31863	13.0417	0	13.0417
7	0.257112	4.93027	bg	2	29.3	7.2221	9.68881	13.7013	0	13.7013
8	0.257112	5.01591	bg	2	29.3	7.43136	9.96954	14.2015	0	14.2015
9	0.257112	5.05074	bg	2	29.3	7.57566	10.1631	14.5465	0	14.5465
10	0.257112	5.03764	bg	2	29.3	7.65654	10.2716	14.7399	0	14.7399
11	0.257112	4.97914	bg	2	29.3	7.6753	10.2968	14.7847	0	14.7847
12	0.257112	4.87744	bg	2	29.3	7.63311	10.2402	14.6839	0	14.6839
13	0.257112	4.73451	bg	2	29.3	7.53095	10.1031	14.4396	0	14.4396
14	0.257112	4.55207	bg	2	29.3	7.36963	9.88673	14.054	0	14.054
15	0.257112	4.33165	bg	2	29.3	7.14986	9.5919	13.5286	0	13.5286
16	0.257112	4.07464	bg	2	29.3	6.87219	9.21939	12.8648	0	12.8648
17	0.257112	3.78225	bg	2	29.3	6.53704	8.76976	12.0636	0	12.0636

18	0.257112	3.45558	bg	2	29.3	6.1447	8.24342	11.1256	0	11.1256
19	0.257112	3.0956	bg	2	29.3	5.69536	7.64061	10.0514	0	10.0514
20	0.257112	2.7032	bg	2	29.3	5.18909	6.96142	8.84116	0	8.84116
21	0.257112	2.27916	bg	2	29.3	4.62583	6.20578	7.49461	0	7.49461
22	0.257112	1.82418	bg	2	29.3	4.0054	5.37345	6.01143	0	6.01143
23	0.257112	1.33887	bg	2	29.3	3.32755	4.46408	4.39095	0	4.39095
24	0.257112	0.823796	bg	2	29.3	2.59186	3.47711	2.63218	0	2.63218
25	0.257112	0.279441	bg	2	29.3	1.79782	2.41186	0.733927	0	0.733927

## Interslice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.34155

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	27.8146	192.113	0	0	0
2	28.0717	191.828	-0.269166	0	0
3	28.3288	191.561	0.0187801	0	0
4	28.586	191.311	0.73153	0	0
5	28.8431	191.077	1.7319	0	0
6	29.1002	190.856	2.73599	0	0
7	29.3573	190.649	3.66432	0	0
8	29.6144	190.453	4.49341	0	0
9	29.8715	190.269	5.20609	0	0
10	30.1286	190.095	5.7905	0	0
11	30.3857	189.932	6.23939	0	0
12	30.6429	189.778	6.54952	0	0
13	30.9	189.633	6.72117	0	0
14	31.1571	189.497	6.7578	0	0
15	31.4142	189.369	6.66575	0	0
16	31.6713	189.249	6.45398	0	0
17	31.9284	189.137	6.13392	0	0
18	32.1855	189.032	5.7193	0	0
19	32.4426	188.935	5.22604	0	0
20	32.6997	188.845	4.67221	0	0
21	32.9569	188.762	4.07792	0	0
22	33.214	188.686	3.46532	0	0
23	33.4711	188.616	2.85859	0	0
24	33.7282	188.553	2.28396	0	0
25	33.9853	188.496	1.76972	0	0
26	34.2424	188.445	0	0	0

## List Of Coordinates

## Water Table

X	Y
5.31961e-005	189.025
28.541	189.025
30.4777	188.908
33.8268	188.468
34.318	188.395
45.318	188.395
46.4706	188.432
49.6234	188.652
54.0725	188.827
60.2318	188.574
69.6001	188.342

## External Boundary

X	Y
5.31961e-005	192.025
5.31961e-005	184.325
5.31961e-005	178
5.31961e-005	167.6
69.6001	167.6
69.6001	183.719
69.6001	191.342
68.6001	191.364
59.738	191.557
58.4458	191.803
52.064	191.769
50.3859	191.773
45.318	188.395
34.318	188.395
28.7356	192.116

## Material Boundary

X	Y
5.31961e-005	184.325
28.6073	184.407
34.6001	184.232
40.4305	184.167
50.4991	184.072
58.1616	184.019
69.6001	183.719

## 19.7 Sezione G-97

### Slide Analysis Information

## SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### Project Summary

---

- File Name: Sezione G-97.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### General Settings

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### Analysis Options

---

#### Analysis Methods Used

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check malpha < 0.2: Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### Groundwater Analysis

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### Random Numbers

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### Surface Options

---

- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Loading

- 1 Distributed Load present

### Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kN/m<sup>2</sup>]: 26
- Orientation: Vertical

## Material Properties

Property	r	r esistente	FAAa	FAA
Color				
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unsaturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			19.5	20
Saturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			20.5	21
Cohesion [kPa]	0	0	16	24
Friction Angle [deg]	32	29.3	19.6	23
Water Surface	None	None	Water Table	Water Table
Hu Value			1	1
Ru Value	0	0		

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 1.426180
- Center: 60.505, 227.732
- Radius: 22.763
- Left Slip Surface Endpoint: 42.807, 213.416
- Right Slip Surface Endpoint: 61.240, 204.981
- Resisting Moment=11150 kN-m

- Driving Moment=7818.14 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 1673
- Number of Invalid Surfaces: 3178

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 20 surfaces
- Error Code -114 reported for 485 surfaces
- Error Code -1000 reported for 2673 surfaces

#### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.42618

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.728482	6.08772	r	0	32	9.94096	14.1776	22.6888	0	22.6888
2	0.728482	18.2454	r	0	32	10.6224	15.1495	24.2443	0	24.2443
3	0.728482	29.1593	r	0	32	12.2956	17.5358	28.0631	0	28.0631
4	0.728482	38.5678	r	0	32	16.682	23.7916	38.0746	0	38.0746
5	0.728482	42.891	r	0	32	18.9881	27.0805	43.3378	0	43.3378
6	0.728482	44.1572	r	0	32	19.9727	28.4846	45.5849	0	45.5849
7	0.728482	44.7548	r	0	32	20.6519	29.4533	47.1351	0	47.1351
8	0.728482	44.7388	r	0	32	21.0364	30.0017	48.0128	0	48.0128
9	0.728482	44.1549	r	0	32	21.1349	30.1422	48.2375	0	48.2375
10	0.728482	43.041	r	0	32	20.9544	29.8848	47.8257	0	47.8257
11	0.728482	41.4291	r	0	32	20.5006	29.2376	46.7899	0	46.7899
12	0.728482	39.3462	r	0	32	19.7777	28.2066	45.14	0	45.14
13	0.728482	36.8154	r	0	32	18.7889	26.7964	42.8832	0	42.8832
14	0.728482	33.8562	r	0	32	17.536	25.0095	40.0237	0	40.0237

15	0.728482	33.1722	r	0	32	17.4318	24.8609	39.7858	0	39.7858
16	0.728482	36.4221	r	0	32	19.4128	27.6862	44.3071	0	44.3071
17	0.728482	39.2896	r	0	32	21.2355	30.2856	48.4671	0	48.4671
18	0.728482	37.4654	r	0	32	20.5308	29.2806	46.8589	0	46.8589
19	0.728482	32.5729	r	0	32	18.0957	25.8077	41.301	0	41.301
20	0.728482	27.3221	r	0	32	15.3868	21.9443	35.1182	0	35.1182
21	0.728482	21.7191	r	0	32	12.3988	17.6829	28.2985	0	28.2985
22	0.728482	15.7685	r	0	32	9.12522	13.0142	20.8271	0	20.8271
23	0.728482	9.47389	r	0	32	5.5581	7.92685	12.6856	0	12.6856
24	0.838628	2.97019	FAAa	16	19.6	12.034	17.1627	3.2653	0	3.2653
25	0.838628	0.280906	FAAa	16	19.6	11.3417	16.1752	0.492159	0	0.492159

## Interslice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.42618

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	42.8072	213.416	0	0	0
2	43.5357	212.56	12.1934	0	0
3	44.2642	211.782	23.3061	0	0
4	44.9927	211.073	34.2613	0	0
5	45.7211	210.423	46.8544	0	0
6	46.4496	209.827	58.8857	0	0
7	47.1781	209.278	69.3536	0	0
8	47.9066	208.773	78.1123	0	0
9	48.6351	208.309	85.0944	0	0
10	49.3636	207.882	90.2972	0	0
11	50.092	207.49	93.7728	0	0
12	50.8205	207.132	95.6207	0	0
13	51.549	206.805	95.9826	0	0
14	52.2775	206.508	95.0391	0	0
15	53.006	206.24	93.0068	0	0
16	53.7344	205.999	89.8841	0	0
17	54.4629	205.786	85.2191	0	0
18	55.1914	205.598	78.8548	0	0
19	55.9199	205.436	71.5131	0	0
20	56.6484	205.298	64.0173	0	0
21	57.3768	205.185	56.7881	0	0
22	58.1053	205.096	50.2836	0	0
23	58.8338	205.031	45.0026	0	0
24	59.5623	204.989	41.4878	0	0
25	60.4009	204.97	31.4655	0	0
26	61.2395	204.981	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
1.84192e-006	213.814
3.16066	213.203
7.034	212.367
15.6047	210.425
34.6	206.15
44.9852	203.874
60.9117	201.737
71.35	201.215

### Line Load

X	Y
43.8305	213.387
32.86	213.699

### External Boundary

X	Y
1.84216e-006	216.409
1.84216e-006	210.71
1.84216e-006	189
1.84216e-006	176.6
71.35	176.6
71.35	198.059
71.35	204.782
68.6	204.782
60.1729	205.01
55.0996	208.392
53.0996	208.392
45.6	213.392
43.9	213.456
43.8305	213.387
32.86	213.699
32.5884	213.699
31.4902	213.699
31.3384	213.638
23.3384	213.433
21.9215	213.414
21.5884	213.409
21.5384	213.459
21.4384	213.459

19.8384	213.395
18.6706	212.617
18.3388	212.502
18.3044	212.391
17.2048	213.034
16.447	213.126
15.5786	213.209
14.6	213.386
12.6	213.746
11.1591	214.011
10.6	214.107
8.6	214.465
7.07493	214.693
5.81335	215
2.77548	216
2.6	216
0.0473819	216.402

### Material Boundary

X	Y
18.3044	212.391
34.6	208.5
40.1207	207.056
43.7403	206.29
44.563	205.916
47.1685	205.79
55.0996	205.201
59.5623	204.857
59.5623	205.057
60.1729	205.01

### Material Boundary

X	Y
18.6706	212.617
20.5813	213.239
21.9215	213.414
29.2027	213.394
29.9267	213.29
32.6	211.99
35.6584	210.384
37.0523	209.795
38.6	208.837
40.6151	207.8
43.7403	206.29

d

## Material Boundary

X	Y
1.84216e-006	210.71
4.44757	209.853
15.4459	207.672
34.6	203.45
46.4029	201.051
60.7534	198.792
71.35	198.059

## Slide Analysis Information

### SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

#### Project Summary

---

- File Name: Sezione G-97\_sisma.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

#### General Settings

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

#### Analysis Options

---

##### Analysis Methods Used

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $m_{\alpha} < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

#### Groundwater Analysis

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

#### Random Numbers

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

#### Surface Options

---

- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Loading

- Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.095
- Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.048
- 1 Distributed Load present

## Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kN/m<sup>2</sup>]: 4
- Orientation: Vertical

## Material Properties

Property	r	r esistente	FAAa	FAA
Color				
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unsaturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			19.5	20
Saturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			20.5	21
Cohesion [kPa]	0	0	20	30
Friction Angle [deg]	38	35	24	28
Water Surface	None	None	Water Table	Water Table
Hu Value			1	1
Ru Value	0	0		

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 1.484830
- Center: 60.505, 225.118
- Radius: 20.150
- Left Slip Surface Endpoint: 44.077, 213.450
- Right Slip Surface Endpoint: 61.240, 204.981

- Resisting Moment=10017.3 kN-m
- Driving Moment=6746.42 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 1673
- Number of Invalid Surfaces: 3178

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 20 surfaces
- Error Code -114 reported for 485 surfaces
- Error Code -1000 reported for 2673 surfaces

#### Error Codes

*The following errors were encountered during the computation:*

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.48483

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.673289	5.8504	r	0	38	2.82184	4.18996	5.36291	0	5.36291
2	0.673289	16.922	r	0	38	8.52845	12.6633	16.2082	0	16.2082
3	0.673289	25.292	r	0	38	13.2396	19.6585	25.1617	0	25.1617
4	0.673289	28.7393	r	0	38	15.557	23.0995	29.5661	0	29.5661
5	0.673289	31.1574	r	0	38	17.3824	25.8099	33.0351	0	33.0351
6	0.673289	32.8438	r	0	38	18.8347	27.9663	35.7953	0	35.7953
7	0.673289	33.8771	r	0	38	19.9276	29.5891	37.8723	0	37.8723
8	0.673289	34.3194	r	0	38	20.6725	30.6952	39.288	0	39.288
9	0.673289	34.2209	r	0	38	21.0789	31.2986	40.0604	0	40.0604
10	0.673289	33.6228	r	0	38	21.1541	31.4103	40.2034	0	40.2034
11	0.673289	32.5591	r	0	38	20.9038	31.0386	39.7276	0	39.7276
12	0.673289	31.0583	r	0	38	20.3321	30.1897	38.641	0	38.641

13	0.673289	29.1444	r	0	38	19.4414	28.8671	36.9482	0	36.9482
14	0.673289	27.9209	r	0	38	18.9686	28.1652	36.0497	0	36.0497
15	0.673289	30.7963	r	0	38	21.2986	31.6248	40.4779	0	40.4779
16	0.673289	33.7977	r	0	38	23.7868	35.3193	45.2066	0	45.2066
17	0.673289	35.2581	r	0	38	25.2456	37.4854	47.9791	0	47.9791
18	0.673289	31.9464	r	0	38	23.2671	34.5477	44.219	0	44.219
19	0.673289	27.8876	r	0	38	20.6572	30.6725	39.2591	0	39.2591
20	0.673289	23.5072	r	0	38	17.7082	26.2936	33.6542	0	33.6542
21	0.673289	18.8109	r	0	38	14.4109	21.3978	27.3879	0	27.3879
22	0.673289	13.8035	r	0	38	10.755	15.9694	20.4399	0	20.4399
23	0.673289	8.48866	r	0	38	6.72746	9.98914	12.7855	0	12.7855
24	0.838628	2.97441	FAAa	20	24	14.4715	21.4878	3.34164	0	3.34164
25	0.838628	0.293248	FAAa	20	24	13.6435	20.2582	0.579988	0	0.579988

## Interslice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.48483

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	44.0767	213.45	0	0	0
2	44.7499	212.555	3.45411	0	0
3	45.4232	211.755	12.3067	0	0
4	46.0965	211.031	24.0066	0	0
5	46.7698	210.374	35.7075	0	0
6	47.4431	209.774	46.7881	0	0
7	48.1164	209.226	56.8793	0	0
8	48.7897	208.723	65.7332	0	0
9	49.463	208.262	73.1963	0	0
10	50.1363	207.84	79.1909	0	0
11	50.8095	207.453	83.7023	0	0
12	51.4828	207.1	86.7691	0	0
13	52.1561	206.779	88.4772	0	0
14	52.8294	206.487	88.9545	0	0
15	53.5027	206.223	88.3447	0	0
16	54.176	205.987	86.5022	0	0
17	54.8493	205.778	83.1987	0	0
18	55.5226	205.593	78.4132	0	0
19	56.1958	205.434	72.8566	0	0
20	56.8691	205.298	66.9304	0	0
21	57.5424	205.187	61.0163	0	0
22	58.2157	205.098	55.5362	0	0
23	58.889	205.033	50.955	0	0
24	59.5623	204.99	47.785	0	0
25	60.4009	204.968	36.0189	0	0

26	61.2395	204.981	0	0	0
----	---------	---------	---	---	---

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
1.84192e-006	213.814
3.16066	213.203
7.034	212.367
15.6047	210.425
34.6	206.15
44.9852	203.874
60.9117	201.737
71.35	201.215

### Line Load

X	Y
43.8305	213.387
32.86	213.699

### External Boundary

X	Y
1.84216e-006	216.409
1.84216e-006	210.71
1.84216e-006	189
1.84216e-006	176.6
71.35	176.6
71.35	198.059
71.35	204.782
68.6	204.782
60.1729	205.01
55.0996	208.392
53.0996	208.392
45.6	213.392
43.9	213.456
43.8305	213.387
32.86	213.699
32.5884	213.699
31.4902	213.699
31.3384	213.638
23.3384	213.433
21.9215	213.414

21.5884	213.409
21.5384	213.459
21.4384	213.459
19.8384	213.395
18.6706	212.617
18.3388	212.502
18.3044	212.391
17.2048	213.034
16.447	213.126
15.5786	213.209
14.6	213.386
12.6	213.746
11.1591	214.011
10.6	214.107
8.6	214.465
7.07493	214.693
5.81335	215
2.77548	216
2.6	216
0.0473819	216.402

### Material Boundary

X	Y
18.3044	212.391
34.6	208.5
40.1207	207.056
43.7403	206.29
44.563	205.916
47.1685	205.79
55.0996	205.201
59.5623	204.857
59.5623	205.057
60.1729	205.01

### Material Boundary

X	Y
18.6706	212.617
20.5813	213.239
21.9215	213.414
29.2027	213.394
29.9267	213.29
32.6	211.99
35.6584	210.384
37.0523	209.795

38.6	208.837
40.6151	207.8
43.7403	206.29

## Material Boundary

X	Y
1.84216e-006	210.71
4.44757	209.853
15.4459	207.672
34.6	203.45
46.4029	201.051
60.7534	198.792
71.35	198.059

## 19.8 Sezione G-164

### *Slide Analysis Information*

## *SLIDE - An Interactive Slope Stability Program*

### *Project Summary*

---

- File Name: Sezione G-164.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### *General Settings*

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### *Analysis Options*

---

#### **Analysis Methods Used**

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### *Groundwater Analysis*

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### *Random Numbers*

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### *Surface Options*

---

- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Loading

- 1 Distributed Load present

### Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kN/m<sup>2</sup>]: 26
- Orientation: Vertical

## Material Properties

Property	r	r esistente	FAAa	FAA
Color				
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unsaturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			19.5	20
Saturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			20.5	21
Cohesion [kPa]	0	0	16	24
Friction Angle [deg]	32	29.3	19.6	23
Water Surface	None	None	Water Table	Water Table
Hu Value			1	1
Ru Value	0	0		

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 1.621440
- Center: 59.821, 230.109
- Radius: 23.524
- Left Slip Surface Endpoint: 44.493, 212.264
- Right Slip Surface Endpoint: 58.340, 206.631

- Resisting Moment=4404.6 kN-m
- Driving Moment=2716.48 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 2601
- Number of Invalid Surfaces: 2250

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 47 surfaces
- Error Code -114 reported for 312 surfaces
- Error Code -115 reported for 21 surfaces
- Error Code -1000 reported for 1870 surfaces

#### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.62144

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.565978	2.74767	r	0	32	9.00761	14.6053	23.3735	0	23.3735
2	0.565978	8.54022	r	0	32	4.97933	8.07368	12.9206	0	12.9206
3	0.565978	13.2964	r	0	32	7.05947	11.4465	18.3182	0	18.3182
4	0.565978	17.5975	r	0	32	9.46948	15.3542	24.5718	0	24.5718
5	0.565978	20.1988	r	0	32	11.0095	17.8513	28.5681	0	28.5681
6	0.565978	19.9975	r	0	32	11.0345	17.8918	28.6329	0	28.6329
7	0.565978	19.4988	r	0	32	10.8871	17.6528	28.2503	0	28.2503
8	0.565978	18.7648	r	0	32	10.5972	17.1828	27.4982	0	27.4982
9	0.565978	17.8059	r	0	32	10.1672	16.4855	26.3822	0	26.3822

10	0.565978	16.6314	r	0	32	9.59875	15.5638	24.9073	0	24.9073
11	0.565978	15.2495	r	0	32	8.89339	14.4201	23.0771	0	23.0771
12	0.565978	13.6676	r	0	32	8.05235	13.0564	20.8946	0	20.8946
13	0.565978	11.892	r	0	32	7.07643	11.474	18.3623	0	18.3623
14	0.565978	9.92865	r	0	32	5.9661	9.67367	15.4811	0	15.4811
15	0.565978	7.78256	r	0	32	4.72167	7.65591	12.252	0	12.252
16	0.565978	5.45832	r	0	32	3.34307	5.42058	8.67474	0	8.67474
17	0.565978	2.95997	r	0	32	1.82994	2.96713	4.74841	0	4.74841
18	0.565978	1.03764	r	0	32	0.647468	1.04983	1.68007	0	1.68007
19	0.565978	2.11585	r	0	32	1.33241	2.16043	3.45742	0	3.45742
20	0.565978	3.38626	r	0	32	2.15198	3.4893	5.58406	0	5.58406
21	0.505492	3.96597	FAAa	16	19.6	11.1935	18.1496	6.03686	0	6.03686
22	0.505492	3.21151	FAAa	16	19.6	10.9285	17.7198	4.82988	0	4.82988
23	0.505492	0.727205	FAAa	16	19.6	9.92777	16.0973	0.273219	0	0.273219
24	0.505492	0.236652	FAAa	16	19.6	9.76567	15.8345	-	0	-
								0.464919		0.464919
25	0.505492	0.0969233	FAAa	16	19.6	9.75174	15.8119	-	0	-
								0.528346		0.528346

## Interslice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.62144

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	44.4931	212.264	0	0	0
2	45.0591	211.793	5.91373	0	0
3	45.625	211.351	8.80966	0	0
4	46.191	210.936	12.423	0	0
5	46.757	210.546	16.6513	0	0
6	47.323	210.179	20.8906	0	0
7	47.8889	209.835	24.4978	0	0
8	48.4549	209.513	27.4556	0	0
9	49.0209	209.21	29.7764	0	0
10	49.5869	208.927	31.4905	0	0
11	50.1529	208.663	32.6439	0	0
12	50.7188	208.417	33.2977	0	0
13	51.2848	208.188	33.5266	0	0
14	51.8508	207.976	33.4187	0	0
15	52.4168	207.78	33.0745	0	0
16	52.9827	207.6	32.607	0	0
17	53.5487	207.436	32.1411	0	0
18	54.1147	207.287	31.8139	0	0
19	54.6807	207.153	31.673	0	0
20	55.2467	207.034	31.3325	0	0

21	55.8126	206.929	30.7019	0	0
22	56.3181	206.847	25.5418	0	0
23	56.8236	206.776	20.3626	0	0
24	57.3291	206.717	15.3644	0	0
25	57.8346	206.669	10.4094	0	0
26	58.3401	206.631	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
3.49595e-007	209.904
1.67924	209.562
1.68529	209.561
1.69134	209.559
1.69739	209.558
1.70344	209.557
1.70949	209.556
1.71554	209.555
1.7216	209.553
1.72765	209.552
1.73371	209.551
1.73977	209.55
1.74583	209.549
1.75189	209.548
1.75795	209.546
1.76401	209.545
1.77008	209.544
1.77615	209.543
1.78221	209.542
1.78828	209.541
1.79435	209.54
1.80042	209.539
1.80649	209.537
1.81257	209.536
1.81864	209.535
1.82472	209.534
1.8308	209.533
1.83687	209.532
1.84295	209.531
1.84903	209.53
1.85512	209.529
1.8612	209.528
1.86728	209.527

1.87337	209.526
1.87945	209.525
1.88554	209.524
1.89163	209.523
1.89772	209.522
1.90381	209.521
1.9099	209.52
1.916	209.519
1.92209	209.518
1.92818	209.517
1.93428	209.516
1.94038	209.515
1.94648	209.514
1.95258	209.513
1.95868	209.512
1.96478	209.511
1.97088	209.51
2.30575	209.461
2.47733	209.435
2.4778	209.435
2.47827	209.435
2.47874	209.435
2.47922	209.435
2.47969	209.435
2.48016	209.435
2.48064	209.435
2.48111	209.435
2.48158	209.434
2.48205	209.434
2.48253	209.434
2.483	209.434
2.48347	209.434
2.48394	209.434
2.48442	209.434
2.48489	209.434
2.48536	209.434
2.48584	209.434
2.48631	209.434
2.48678	209.434
2.48726	209.434
2.48773	209.434
2.4882	209.433
2.48867	209.433
2.48915	209.433
2.48962	209.433

2.49009	209.433
2.49057	209.433
2.49104	209.433
2.49151	209.433
2.49198	209.433
2.49246	209.433
2.49293	209.433
2.4934	209.433
2.49388	209.433
2.49435	209.433
2.49482	209.433
2.4953	209.432
2.49577	209.432
2.49624	209.432
2.49671	209.432
2.49719	209.432
2.49766	209.432
2.49813	209.432
2.49861	209.432
2.49908	209.432
2.49955	209.432
2.50003	209.432
4.02004	209.212
4.49981	209.139
5.50108	208.985
8.57986	208.514
8.5868	208.513
8.59373	208.512
8.60067	208.511
8.60761	208.51
8.61455	208.509
8.62149	208.508
8.62844	208.507
8.63538	208.506
8.64233	208.505
8.64927	208.504
8.65622	208.503
8.66317	208.502
8.67012	208.501
8.67707	208.5
8.68403	208.499
8.69098	208.498
8.69793	208.497
8.70489	208.496
8.71185	208.495

8.71881	208.494
8.72577	208.494
8.73273	208.493
8.73969	208.492
8.74665	208.491
8.75362	208.49
8.76058	208.489
8.76755	208.488
8.77452	208.488
8.78148	208.487
8.78845	208.486
8.79542	208.485
8.80239	208.484
8.80937	208.484
8.81634	208.483
8.82331	208.482
8.83029	208.481
8.83727	208.481
8.84424	208.48
8.85122	208.479
8.8582	208.478
8.86518	208.478
8.87216	208.477
8.87914	208.476
8.88612	208.476
8.89311	208.475
8.90009	208.474
8.90708	208.474
8.91406	208.473
9.80535	208.392
9.80693	208.391
9.8085	208.391
9.81008	208.391
9.81166	208.391
9.81323	208.391
9.81481	208.391
9.81639	208.391
9.81796	208.39
9.81954	208.39
9.82112	208.39
9.82269	208.39
9.82427	208.39
9.82585	208.39
9.82743	208.39
9.829	208.389

9.83058	208.389
9.83216	208.389
9.83374	208.389
9.83531	208.389
9.83689	208.389
9.83847	208.389
9.84005	208.388
9.84162	208.388
9.8432	208.388
9.84478	208.388
9.84636	208.388
9.84793	208.388
9.84951	208.388
9.85109	208.388
9.85267	208.387
9.85424	208.387
9.85582	208.387
9.8574	208.387
9.85898	208.387
9.86056	208.387
9.86213	208.387
9.86371	208.387
9.86529	208.386
9.86687	208.386
9.86845	208.386
9.87003	208.386
9.8716	208.386
9.87318	208.386
9.87476	208.386
9.87634	208.386
9.87792	208.385
9.8795	208.385
9.88107	208.385
10.4431	208.341
13.3598	208.115
14.572	208.016
24.0243	206.883
28.6166	206.124
28.6181	206.123
28.6195	206.123
28.621	206.122
28.6225	206.121
28.624	206.121
28.6255	206.12
28.627	206.12

28.6285	206.119
28.63	206.119
28.6314	206.118
28.6329	206.117
28.6344	206.117
28.6359	206.116
28.6374	206.116
28.6389	206.115
28.6404	206.114
28.6419	206.114
28.6434	206.113
28.6448	206.113
28.6463	206.112
28.6478	206.112
28.6493	206.111
28.6508	206.11
28.6523	206.11
28.6538	206.109
28.6553	206.109
28.6568	206.108
28.6583	206.108
28.6598	206.107
28.6612	206.106
28.6627	206.106
28.6642	206.105
28.6657	206.105
28.6672	206.104
28.6687	206.104
28.6702	206.103
28.6717	206.102
28.6732	206.102
28.6747	206.101
28.6762	206.101
28.6777	206.1
28.6792	206.1
28.6806	206.099
28.6821	206.098
28.6836	206.098
28.6851	206.097
28.6866	206.097
28.6881	206.096
34.0797	204.779
38.1592	203.802
40.122	203.497
42.4972	203.18

47.0416	202.509
47.0426	202.509
47.0437	202.509
47.0447	202.509
47.0458	202.509
47.0468	202.509
47.0479	202.509
47.0489	202.508
47.05	202.508
47.051	202.508
47.0521	202.508
47.0531	202.508
47.0542	202.508
47.0552	202.507
47.0563	202.507
47.0573	202.507
47.0584	202.507
47.0594	202.507
47.0605	202.507
47.0615	202.507
47.0626	202.506
47.0636	202.506
47.0647	202.506
47.0657	202.506
47.0668	202.506
47.0678	202.506
47.0689	202.506
47.0699	202.505
47.071	202.505
47.072	202.505
47.0731	202.505
47.0741	202.505
47.0752	202.505
47.0762	202.504
47.0773	202.504
47.0783	202.504
47.0794	202.504
47.0805	202.504
47.0815	202.504
47.0826	202.504
47.0836	202.503
47.0847	202.503
47.0857	202.503
47.0868	202.503
47.0878	202.503

47.0889	202.503
47.0899	202.503
47.091	202.502
47.092	202.502
49.5054	202.169
50.4031	202.045
53.8983	201.562
53.9225	201.558
54.2868	201.506
54.2907	201.505
54.2945	201.505
54.2984	201.504
54.3022	201.504
54.306	201.503
54.3099	201.503
54.3137	201.502
54.3175	201.502
54.3214	201.501
54.3252	201.501
54.3291	201.5
54.3329	201.5
54.3367	201.499
54.3406	201.499
54.3444	201.498
54.3483	201.498
54.3521	201.497
54.356	201.497
54.3598	201.496
54.3636	201.496
54.3675	201.495
54.3713	201.495
54.3752	201.494
54.379	201.494
54.3829	201.493
54.3867	201.493
54.3906	201.492
54.3944	201.492
54.3982	201.491
54.4021	201.491
54.4059	201.49
54.4098	201.49
54.4136	201.489
54.4175	201.489
54.4213	201.488
54.4252	201.488

54.429	201.487
54.4329	201.487
54.4367	201.487
54.4406	201.486
54.4444	201.486
54.4483	201.485
54.4521	201.485
54.456	201.484
54.4598	201.484
54.4637	201.484
54.4675	201.483
54.4714	201.483
55.2489	201.398
63.1523	200.487
63.153	200.486
63.1537	200.486
63.1544	200.486
63.1551	200.486
63.1558	200.486
63.1565	200.486
63.1572	200.486
63.1579	200.486
63.1586	200.486
63.1593	200.486
63.16	200.486
63.1606	200.486
63.1613	200.486
63.162	200.485
63.1627	200.485
63.1634	200.485
63.1641	200.485
63.1648	200.485
63.1655	200.485
63.1662	200.485
63.1669	200.485
63.1676	200.485
63.1683	200.485
63.169	200.485
63.1696	200.485
63.1703	200.484
63.171	200.484
63.1717	200.484
63.1724	200.484
63.1731	200.484
63.1738	200.484

63.1745	200.484
63.1752	200.484
63.1759	200.484
63.1766	200.484
63.1773	200.484
63.1779	200.484
63.1786	200.484
63.1793	200.483
63.18	200.483
63.1807	200.483
63.1814	200.483
63.1821	200.483
63.1828	200.483
63.1835	200.483
63.1842	200.483
63.1849	200.483
63.1856	200.483
64.7474	200.312
65.2701	200.255
67.267	200.037
71.1	199.616

### Line Load

X	Y
34.1	211.997
45.0964	212.279

### External Boundary

X	Y
3.49362e-007	215.542
3.49362e-007	208.884
3.49362e-007	175.6
71.1	175.6
71.1	198.61
71.1	205.3
68.6	205.474
57.1117	206.77
56.3461	207.28
54.3461	207.28
46.8464	212.28
45.2464	212.344
45.0964	212.279
34.1	211.997
33.9483	212.058

30.2684	212.116
29.1684	212.116
29.0184	212.036
24.9235	211.892
19.2679	211.693
19.1179	211.763
17.5179	211.699
16.1613	210.794
15.4113	210.794
14.6613	211.294
14.1613	211.293
10.2089	213.928
3.29432	214.925

### Material Boundary

X	Y
32.3981	210.485
33.3103	210.088
34.5496	209.852
35.0562	209.8
37.2491	209.254
37.4465	209.227
53.9733	206.954
54.0005	207.15
57.1117	206.77

### Material Boundary

X	Y
24.9235	211.892
25.8097	211.725
32.3981	210.485

### Material Boundary

X	Y
25.8097	211.725
29.8275	211.622
30.8422	211.264
31.6736	211
35.0562	209.8

### Material Boundary

X	Y
---	---

3.49362e-007	208.884
1.50805	208.576
1.57238	208.564
1.63684	208.552
1.70141	208.541
1.7661	208.53
1.81287	208.523
2.15854	208.472
2.34351	208.444
3.87282	208.223
4.34849	208.15
5.34976	207.997
8.4572	207.521
8.52276	207.512
8.58842	207.503
8.65416	207.495
8.71998	207.488
8.78587	207.481
8.82296	207.477
9.74868	207.393
9.7943	207.389
10.3656	207.344
13.2803	207.118
14.4717	207.021
23.8831	205.893
28.3861	205.142
28.4202	205.129
28.965	204.94
29.0312	204.92
29.2589	204.856
29.3023	204.845
29.9391	204.611
30.6082	204.322
31.2416	204.074
31.2847	204.059
31.6766	203.945
31.986	203.874
32.0305	203.865
32.1642	203.839
32.2985	203.817
32.3433	203.81
32.3882	203.804
32.5232	203.786
33.108	203.662
33.1741	203.648

33.2404	203.634
33.6408	203.565
34.7624	203.333
35.6807	203.095
35.7454	203.078
35.8103	203.063
35.8753	203.048
36.4003	202.953
36.9222	202.898
37.3407	202.846
37.5678	202.817
39.9922	202.505
42.3581	202.19
46.9253	201.516
49.3684	201.178
50.2662	201.054
53.7699	200.57
54.1769	200.512
54.2449	200.503
54.313	200.494
54.3562	200.489
55.1375	200.404
63.0574	199.491
64.6388	199.318
65.1615	199.261
67.1584	199.043
71.1	198.61

## Slide Analysis Information

### SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

#### Project Summary

---

- File Name: Sezione G-164\_sisma.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

#### General Settings

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

#### Analysis Options

---

##### Analysis Methods Used

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

#### Groundwater Analysis

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

#### Random Numbers

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

#### Surface Options

---

- Surface Type: Circular

- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Loading

- Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.079
- Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.039
- 1 Distributed Load present

## Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kN/m2]: 4
- Orientation: Vertical

## Material Properties

Property	r	r esistente	FAAa	FAA
Color				
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unsaturated Unit Weight [kN/m3]			19.5	20
Saturated Unit Weight [kN/m3]			20.5	21
Cohesion [kPa]	0	0	20	30
Friction Angle [deg]	38	35	24	28
Water Surface	None	None	Water Table	Water Table
Hu Value			1	1
Ru Value	0	0		

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 1.755640
- Center: 59.821, 229.116
- Radius: 22.534
- Left Slip Surface Endpoint: 44.851, 212.273
- Right Slip Surface Endpoint: 58.355, 206.630

- Resisting Moment=4538.88 kN-m
- Driving Moment=2585.32 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 2601
- Number of Invalid Surfaces: 2250

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 47 surfaces
- Error Code -114 reported for 312 surfaces
- Error Code -115 reported for 21 surfaces
- Error Code -1000 reported for 1870 surfaces

#### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.75564

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.533296	2.77029	r	0	38	2.32959	4.08993	5.23488	0	5.23488
2	0.533296	7.78708	r	0	38	4.96646	8.71931	11.1602	0	11.1602
3	0.533296	12.0224	r	0	38	7.7914	13.6789	17.5082	0	17.5082
4	0.533296	15.8712	r	0	38	10.4433	18.3346	23.4672	0	23.4672
5	0.533296	17.004	r	0	38	11.352	19.93	25.5091	0	25.5091
6	0.533296	16.9209	r	0	38	11.4543	20.1096	25.7392	0	25.7392
7	0.533296	16.6146	r	0	38	11.398	20.0107	25.6126	0	25.6126
8	0.533296	16.0963	r	0	38	11.1853	19.6374	25.1348	0	25.1348
9	0.533296	15.3758	r	0	38	10.8185	18.9934	24.3105	0	24.3105

10	0.533296	14.4617	r	0	38	10.2991	18.0815	23.1433	0	23.1433
11	0.533296	13.3617	r	0	38	9.62834	16.9039	21.6361	0	21.6361
12	0.533296	12.0825	r	0	38	8.80722	15.4623	19.7908	0	19.7908
13	0.533296	10.6303	r	0	38	7.83623	13.7576	17.609	0	17.609
14	0.533296	9.01043	r	0	38	6.71578	11.7905	15.0911	0	15.0911
15	0.533296	7.22766	r	0	38	5.44576	9.5608	12.2373	0	12.2373
16	0.533296	5.2863	r	0	38	4.02581	7.06788	9.04648	0	9.04648
17	0.533296	3.19016	r	0	38	2.45526	4.31055	5.51725	0	5.51725
18	0.533296	1.01524	r	0	38	0.789564	1.38619	1.77424	0	1.77424
19	0.533296	1.18492	r	0	38	0.931119	1.63471	2.09233	0	2.09233
20	0.533296	2.4355	r	0	38	1.93361	3.39472	4.34504	0	4.34504
21	0.533296	3.54264	r	0	38	2.84153	4.98871	6.38526	0	6.38526
22	0.576181	4.37938	FAAa	20	24	12.8842	22.62	5.88465	0	5.88465
23	0.576181	1.52941	FAAa	20	24	11.7057	20.551	1.23764	0	1.23764
24	0.576181	0.253348	FAAa	20	24	11.2125	19.6851	-	0	-
								0.707169		0.707169
25	0.576181	0.112386	FAAa	20	24	11.2214	19.7007	-	0	-
								0.672189		0.672189

## Interslice Data

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.75564

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	44.8511	212.273	0	0	0
2	45.3844	211.814	1.38275	0	0
3	45.9177	211.382	4.16774	0	0
4	46.451	210.977	8.06773	0	0
5	46.9843	210.596	12.7076	0	0
6	47.5176	210.237	17.1512	0	0
7	48.0509	209.9	21.0634	0	0
8	48.5842	209.584	24.4172	0	0
9	49.1174	209.286	27.2046	0	0
10	49.6507	209.008	29.4349	0	0
11	50.184	208.747	31.1329	0	0
12	50.7173	208.503	32.3381	0	0
13	51.2506	208.275	33.103	0	0
14	51.7839	208.064	33.4931	0	0
15	52.3172	207.868	33.5858	0	0
16	52.8505	207.687	33.4706	0	0
17	53.3838	207.521	33.248	0	0
18	53.9171	207.369	33.0305	0	0
19	54.4504	207.231	32.9348	0	0
20	54.9837	207.107	32.7921	0	0

21	55.517	206.997	32.435	0	0
22	56.0503	206.9	31.822	0	0
23	56.6265	206.809	25.2864	0	0
24	57.2027	206.735	18.7659	0	0
25	57.7788	206.675	12.2932	0	0
26	58.355	206.63	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
3.49595e-007	209.904
1.67924	209.562
1.68529	209.561
1.69134	209.559
1.69739	209.558
1.70344	209.557
1.70949	209.556
1.71554	209.555
1.7216	209.553
1.72765	209.552
1.73371	209.551
1.73977	209.55
1.74583	209.549
1.75189	209.548
1.75795	209.546
1.76401	209.545
1.77008	209.544
1.77615	209.543
1.78221	209.542
1.78828	209.541
1.79435	209.54
1.80042	209.539
1.80649	209.537
1.81257	209.536
1.81864	209.535
1.82472	209.534
1.8308	209.533
1.83687	209.532
1.84295	209.531
1.84903	209.53
1.85512	209.529
1.8612	209.528
1.86728	209.527

1.87337	209.526
1.87945	209.525
1.88554	209.524
1.89163	209.523
1.89772	209.522
1.90381	209.521
1.9099	209.52
1.916	209.519
1.92209	209.518
1.92818	209.517
1.93428	209.516
1.94038	209.515
1.94648	209.514
1.95258	209.513
1.95868	209.512
1.96478	209.511
1.97088	209.51
2.30575	209.461
2.47733	209.435
2.4778	209.435
2.47827	209.435
2.47874	209.435
2.47922	209.435
2.47969	209.435
2.48016	209.435
2.48064	209.435
2.48111	209.435
2.48158	209.434
2.48205	209.434
2.48253	209.434
2.483	209.434
2.48347	209.434
2.48394	209.434
2.48442	209.434
2.48489	209.434
2.48536	209.434
2.48584	209.434
2.48631	209.434
2.48678	209.434
2.48726	209.434
2.48773	209.434
2.4882	209.433
2.48867	209.433
2.48915	209.433
2.48962	209.433

2.49009	209.433
2.49057	209.433
2.49104	209.433
2.49151	209.433
2.49198	209.433
2.49246	209.433
2.49293	209.433
2.4934	209.433
2.49388	209.433
2.49435	209.433
2.49482	209.433
2.4953	209.432
2.49577	209.432
2.49624	209.432
2.49671	209.432
2.49719	209.432
2.49766	209.432
2.49813	209.432
2.49861	209.432
2.49908	209.432
2.49955	209.432
2.50003	209.432
4.02004	209.212
4.49981	209.139
5.50108	208.985
8.57986	208.514
8.5868	208.513
8.59373	208.512
8.60067	208.511
8.60761	208.51
8.61455	208.509
8.62149	208.508
8.62844	208.507
8.63538	208.506
8.64233	208.505
8.64927	208.504
8.65622	208.503
8.66317	208.502
8.67012	208.501
8.67707	208.5
8.68403	208.499
8.69098	208.498
8.69793	208.497
8.70489	208.496
8.71185	208.495

8.71881	208.494
8.72577	208.494
8.73273	208.493
8.73969	208.492
8.74665	208.491
8.75362	208.49
8.76058	208.489
8.76755	208.488
8.77452	208.488
8.78148	208.487
8.78845	208.486
8.79542	208.485
8.80239	208.484
8.80937	208.484
8.81634	208.483
8.82331	208.482
8.83029	208.481
8.83727	208.481
8.84424	208.48
8.85122	208.479
8.8582	208.478
8.86518	208.478
8.87216	208.477
8.87914	208.476
8.88612	208.476
8.89311	208.475
8.90009	208.474
8.90708	208.474
8.91406	208.473
9.80535	208.392
9.80693	208.391
9.8085	208.391
9.81008	208.391
9.81166	208.391
9.81323	208.391
9.81481	208.391
9.81639	208.391
9.81796	208.39
9.81954	208.39
9.82112	208.39
9.82269	208.39
9.82427	208.39
9.82585	208.39
9.82743	208.39
9.829	208.389

9.83058	208.389
9.83216	208.389
9.83374	208.389
9.83531	208.389
9.83689	208.389
9.83847	208.389
9.84005	208.388
9.84162	208.388
9.8432	208.388
9.84478	208.388
9.84636	208.388
9.84793	208.388
9.84951	208.388
9.85109	208.388
9.85267	208.387
9.85424	208.387
9.85582	208.387
9.8574	208.387
9.85898	208.387
9.86056	208.387
9.86213	208.387
9.86371	208.387
9.86529	208.386
9.86687	208.386
9.86845	208.386
9.87003	208.386
9.8716	208.386
9.87318	208.386
9.87476	208.386
9.87634	208.386
9.87792	208.385
9.8795	208.385
9.88107	208.385
10.4431	208.341
13.3598	208.115
14.572	208.016
24.0243	206.883
28.6166	206.124
28.6181	206.123
28.6195	206.123
28.621	206.122
28.6225	206.121
28.624	206.121
28.6255	206.12
28.627	206.12

28.6285	206.119
28.63	206.119
28.6314	206.118
28.6329	206.117
28.6344	206.117
28.6359	206.116
28.6374	206.116
28.6389	206.115
28.6404	206.114
28.6419	206.114
28.6434	206.113
28.6448	206.113
28.6463	206.112
28.6478	206.112
28.6493	206.111
28.6508	206.11
28.6523	206.11
28.6538	206.109
28.6553	206.109
28.6568	206.108
28.6583	206.108
28.6598	206.107
28.6612	206.106
28.6627	206.106
28.6642	206.105
28.6657	206.105
28.6672	206.104
28.6687	206.104
28.6702	206.103
28.6717	206.102
28.6732	206.102
28.6747	206.101
28.6762	206.101
28.6777	206.1
28.6792	206.1
28.6806	206.099
28.6821	206.098
28.6836	206.098
28.6851	206.097
28.6866	206.097
28.6881	206.096
34.0797	204.779
38.1592	203.802
40.122	203.497
42.4972	203.18

47.0416	202.509
47.0426	202.509
47.0437	202.509
47.0447	202.509
47.0458	202.509
47.0468	202.509
47.0479	202.509
47.0489	202.508
47.05	202.508
47.051	202.508
47.0521	202.508
47.0531	202.508
47.0542	202.508
47.0552	202.507
47.0563	202.507
47.0573	202.507
47.0584	202.507
47.0594	202.507
47.0605	202.507
47.0615	202.507
47.0626	202.506
47.0636	202.506
47.0647	202.506
47.0657	202.506
47.0668	202.506
47.0678	202.506
47.0689	202.506
47.0699	202.505
47.071	202.505
47.072	202.505
47.0731	202.505
47.0741	202.505
47.0752	202.505
47.0762	202.504
47.0773	202.504
47.0783	202.504
47.0794	202.504
47.0805	202.504
47.0815	202.504
47.0826	202.504
47.0836	202.503
47.0847	202.503
47.0857	202.503
47.0868	202.503
47.0878	202.503

47.0889	202.503
47.0899	202.503
47.091	202.502
47.092	202.502
49.5054	202.169
50.4031	202.045
53.8983	201.562
53.9225	201.558
54.2868	201.506
54.2907	201.505
54.2945	201.505
54.2984	201.504
54.3022	201.504
54.306	201.503
54.3099	201.503
54.3137	201.502
54.3175	201.502
54.3214	201.501
54.3252	201.501
54.3291	201.5
54.3329	201.5
54.3367	201.499
54.3406	201.499
54.3444	201.498
54.3483	201.498
54.3521	201.497
54.356	201.497
54.3598	201.496
54.3636	201.496
54.3675	201.495
54.3713	201.495
54.3752	201.494
54.379	201.494
54.3829	201.493
54.3867	201.493
54.3906	201.492
54.3944	201.492
54.3982	201.491
54.4021	201.491
54.4059	201.49
54.4098	201.49
54.4136	201.489
54.4175	201.489
54.4213	201.488
54.4252	201.488

54.429	201.487
54.4329	201.487
54.4367	201.487
54.4406	201.486
54.4444	201.486
54.4483	201.485
54.4521	201.485
54.456	201.484
54.4598	201.484
54.4637	201.484
54.4675	201.483
54.4714	201.483
55.2489	201.398
63.1523	200.487
63.153	200.486
63.1537	200.486
63.1544	200.486
63.1551	200.486
63.1558	200.486
63.1565	200.486
63.1572	200.486
63.1579	200.486
63.1586	200.486
63.1593	200.486
63.16	200.486
63.1606	200.486
63.1613	200.486
63.162	200.485
63.1627	200.485
63.1634	200.485
63.1641	200.485
63.1648	200.485
63.1655	200.485
63.1662	200.485
63.1669	200.485
63.1676	200.485
63.1683	200.485
63.169	200.485
63.1696	200.485
63.1703	200.484
63.171	200.484
63.1717	200.484
63.1724	200.484
63.1731	200.484
63.1738	200.484

63.1745	200.484
63.1752	200.484
63.1759	200.484
63.1766	200.484
63.1773	200.484
63.1779	200.484
63.1786	200.484
63.1793	200.483
63.18	200.483
63.1807	200.483
63.1814	200.483
63.1821	200.483
63.1828	200.483
63.1835	200.483
63.1842	200.483
63.1849	200.483
63.1856	200.483
64.7474	200.312
65.2701	200.255
67.267	200.037
71.1	199.616

### Line Load

X	Y
34.1	211.997
45.0964	212.279

### External Boundary

X	Y
3.49362e-007	215.542
3.49362e-007	208.884
3.49362e-007	175.6
71.1	175.6
71.1	198.61
71.1	205.3
68.6	205.474
57.1117	206.77
56.3461	207.28
54.3461	207.28
46.8464	212.28
45.2464	212.344
45.0964	212.279
34.1	211.997
33.9483	212.058

30.2684	212.116
29.1684	212.116
29.0184	212.036
24.9235	211.892
19.2679	211.693
19.1179	211.763
17.5179	211.699
16.1613	210.794
15.4113	210.794
14.6613	211.294
14.1613	211.293
10.2089	213.928
3.29432	214.925

### Material Boundary

X	Y
32.3981	210.485
33.3103	210.088
34.5496	209.852
35.0562	209.8
37.2491	209.254
37.4465	209.227
53.9733	206.954
54.0005	207.15
57.1117	206.77

### Material Boundary

X	Y
24.9235	211.892
25.8097	211.725
32.3981	210.485

### Material Boundary

X	Y
25.8097	211.725
29.8275	211.622
30.8422	211.264
31.6736	211
35.0562	209.8

### Material Boundary

X	Y
---	---

3.49362e-007	208.884
1.50805	208.576
1.57238	208.564
1.63684	208.552
1.70141	208.541
1.7661	208.53
1.81287	208.523
2.15854	208.472
2.34351	208.444
3.87282	208.223
4.34849	208.15
5.34976	207.997
8.4572	207.521
8.52276	207.512
8.58842	207.503
8.65416	207.495
8.71998	207.488
8.78587	207.481
8.82296	207.477
9.74868	207.393
9.7943	207.389
10.3656	207.344
13.2803	207.118
14.4717	207.021
23.8831	205.893
28.3861	205.142
28.4202	205.129
28.965	204.94
29.0312	204.92
29.2589	204.856
29.3023	204.845
29.9391	204.611
30.6082	204.322
31.2416	204.074
31.2847	204.059
31.6766	203.945
31.986	203.874
32.0305	203.865
32.1642	203.839
32.2985	203.817
32.3433	203.81
32.3882	203.804
32.5232	203.786
33.108	203.662
33.1741	203.648

33.2404	203.634
33.6408	203.565
34.7624	203.333
35.6807	203.095
35.7454	203.078
35.8103	203.063
35.8753	203.048
36.4003	202.953
36.9222	202.898
37.3407	202.846
37.5678	202.817
39.9922	202.505
42.3581	202.19
46.9253	201.516
49.3684	201.178
50.2662	201.054
53.7699	200.57
54.1769	200.512
54.2449	200.503
54.313	200.494
54.3562	200.489
55.1375	200.404
63.0574	199.491
64.6388	199.318
65.1615	199.261
67.1584	199.043
71.1	198.61

## 19.9 Sezione G-201

### *Slide Analysis Information*

## *SLIDE - An Interactive Slope Stability Program*

### *Project Summary*

---

- File Name: Sezione G-201.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### *General Settings*

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### *Analysis Options*

---

#### **Analysis Methods Used**

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### *Groundwater Analysis*

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### *Random Numbers*

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### *Surface Options*

- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Loading

- 1 Distributed Load present

### Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kN/m<sup>2</sup>]: 26
- Orientation: Vertical

## Material Properties

Property	r	r esistente	b2	FAA	cls
Color					
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Infinite strength
Unsaturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			19.5	20	
Saturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			20.5	21	
Cohesion [kPa]	0	0	12	24	
Friction Angle [deg]	32	29.3	24.8	23	
Water Surface	None	None	None	Water Table	None
Hu Value				1	
Ru Value	0	0	0		0

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 1.473650
- Center: 56.555, 231.510
- Radius: 17.909
- Left Slip Surface Endpoint: 43.075, 219.718

- Right Slip Surface Endpoint: 58.311, 213.686
- Resisting Moment=5011.57 kN-m
- Driving Moment=3400.79 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 2060
- Number of Invalid Surfaces: 2791

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 63 surfaces
- Error Code -114 reported for 363 surfaces
- Error Code -115 reported for 22 surfaces
- Error Code -1000 reported for 2343 surfaces

#### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.47365

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.623596	4.14424	r	0	32	9.4779	13.9671	22.3521	0	22.3521
2	0.623596	12.5509	r	0	32	9.9411	14.6497	23.4444	0	23.4444
3	0.623596	19.8521	r	0	32	9.7952	14.4347	23.1004	0	23.1004
4	0.623596	26.1736	r	0	32	13.236	19.5053	31.2149	0	31.2149
5	0.623596	29.6971	r	0	32	15.3607	22.6363	36.2256	0	36.2256
6	0.623596	30.0416	r	0	32	15.8676	23.3833	37.4212	0	37.4212
7	0.623596	29.9015	r	0	32	16.1063	23.7351	37.9841	0	37.9841
8	0.623596	29.3196	r	0	32	16.0879	23.708	37.9408	0	37.9408

9	0.623596	28.3265	r	0	32	15.8193	23.3121	37.307	0	37.307
10	0.623596	26.948	r	0	32	15.3054	22.5548	36.0953	0	36.0953
11	0.623596	25.2054	r	0	32	14.5503	21.442	34.3144	0	34.3144
12	0.623596	23.1167	r	0	32	13.5564	19.9774	31.9705	0	31.9705
13	0.623596	20.6973	r	0	32	12.3251	18.1629	29.0667	0	29.0667
14	0.623596	17.9598	r	0	32	10.8566	15.9989	25.6036	0	25.6036
15	0.623596	14.9152	r	0	32	9.15014	13.4841	21.5791	0	21.5791
16	0.623596	11.5725	r	0	32	7.20354	10.6155	16.9884	0	16.9884
17	0.623596	10.1669	r	0	32	6.42057	9.46168	15.1419	0	15.1419
18	0.623596	11.4204	r	0	32	7.31653	10.782	17.2548	0	17.2548
19	0.623596	12.4081	r	0	32	8.06419	11.8838	19.018	0	19.018
20	0.623596	11.7769	r	0	32	7.7648	11.4426	18.312	0	18.312
21	0.623596	7.23388	r	0	32	4.83908	7.13111	11.4122	0	11.4122
22	0.535152	2.21506	b2	12	24.8	9.42164	13.8842	4.07778	0	4.07778
23	0.535152	0.447449	b2	12	24.8	8.46723	12.4777	1.03392	0	1.03392
24	0.535152	0.385885	b2	12	24.8	8.51137	12.5428	1.17468	0	1.17468
25	0.535152	0.156642	b2	12	24.8	8.45587	12.461	0.99768	0	0.99768

## Interslice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.47365

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	43.0753	219.718	0	0	0
2	43.6989	219.041	9.22484	0	0
3	44.3225	218.429	17.386	0	0
4	44.9461	217.872	24.1361	0	0
5	45.5697	217.365	31.7186	0	0
6	46.1933	216.902	38.9184	0	0
7	46.8169	216.479	44.8559	0	0
8	47.4405	216.093	49.4857	0	0
9	48.0641	215.741	52.8172	0	0
10	48.6877	215.421	54.9051	0	0
11	49.3113	215.13	55.8432	0	0
12	49.9349	214.869	55.7604	0	0
13	50.5585	214.634	54.8173	0	0
14	51.1821	214.425	53.2051	0	0
15	51.8057	214.241	51.1442	0	0
16	52.4293	214.082	48.8843	0	0
17	53.0529	213.946	46.7047	0	0
18	53.6764	213.833	44.4133	0	0
19	54.3	213.743	41.4123	0	0
20	54.9236	213.675	37.6816	0	0
21	55.5472	213.628	33.6867	0	0

22	56.1708	213.604	30.9479	0	0
23	56.706	213.601	25.9236	0	0
24	57.2411	213.613	21.3825	0	0
25	57.7763	213.642	16.7972	0	0
26	58.3114	213.686	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
-3.97093e-007	214.484
33.0784	209.575
33.0788	209.575
33.0792	209.575
33.0797	209.575
33.0801	209.575
33.0805	209.575
33.0809	209.575
33.0814	209.575
33.0818	209.575
33.0822	209.575
33.0826	209.575
33.0831	209.575
33.0835	209.575
33.0839	209.575
33.0844	209.575
33.0848	209.575
33.0852	209.575
33.0856	209.575
33.0861	209.575
33.0865	209.575
33.0869	209.575
33.0874	209.575
33.0878	209.575
33.0882	209.575
33.0886	209.575
33.0891	209.575
33.0895	209.575
33.0899	209.575
33.0904	209.575
33.0908	209.575
33.0912	209.575
33.0916	209.575
33.0921	209.575

33.0925	209.575
33.0929	209.575
33.0933	209.575
33.0938	209.575
33.0942	209.575
33.0946	209.575
33.0951	209.575
33.0955	209.575
33.0959	209.575
33.0963	209.575
33.0968	209.575
33.0972	209.575
33.0976	209.575
33.0981	209.575
33.0985	209.575
33.0989	209.575
33.106	209.575
33.1131	209.574
33.1202	209.573
33.1273	209.572
33.1344	209.571
33.1415	209.571
33.1486	209.57
33.1557	209.569
33.1628	209.569
33.1699	209.568
33.177	209.567
33.1841	209.566
33.1912	209.566
33.1983	209.565
33.2054	209.564
33.2125	209.564
33.2196	209.563
33.2267	209.562
33.2338	209.562
33.2409	209.561
33.248	209.56
33.2552	209.56
33.2623	209.559
33.2694	209.559
33.2765	209.558
33.2836	209.557
33.2907	209.557
33.2978	209.556
33.305	209.556

33.3121	209.555
33.3192	209.555
33.3263	209.554
33.3334	209.554
33.3405	209.553
33.3477	209.553
33.3548	209.552
33.3619	209.552
33.369	209.551
33.3761	209.551
33.3833	209.55
33.3904	209.55
33.3975	209.549
33.4046	209.549
33.4118	209.549
33.4189	209.548
33.426	209.548
33.4331	209.547
33.4403	209.547
34.5726	209.487
43.1202	208.803
43.1211	208.803
43.122	208.803
43.1229	208.803
43.1238	208.803
43.1247	208.803
43.1256	208.803
43.1265	208.803
43.1274	208.803
43.1283	208.803
43.1292	208.802
43.1301	208.802
43.131	208.802
43.1319	208.802
43.1328	208.802
43.1337	208.802
43.1346	208.802
43.1355	208.802
43.1364	208.802
43.1373	208.802
43.1382	208.802
43.1391	208.802
43.14	208.802
43.1409	208.802
43.1418	208.802

43.1427	208.801
43.1437	208.801
43.1446	208.801
43.1455	208.801
43.1464	208.801
43.1473	208.801
43.1482	208.801
43.1491	208.801
43.15	208.801
43.1509	208.801
43.1518	208.801
43.1527	208.801
43.1536	208.801
43.1545	208.801
43.1554	208.801
43.1563	208.8
43.1572	208.8
43.1581	208.8
43.159	208.8
43.1599	208.8
43.1608	208.8
43.1617	208.8
43.1626	208.8
43.1635	208.8
43.3285	208.788
43.6069	208.767
43.9523	208.739
43.9531	208.739
43.9539	208.738
43.9548	208.738
43.9556	208.738
43.9564	208.738
43.9572	208.738
43.958	208.738
43.9589	208.738
43.9597	208.738
43.9605	208.738
43.9613	208.738
43.9621	208.738
43.963	208.738
43.9638	208.738
43.9646	208.738
43.9654	208.738
43.9662	208.737
43.967	208.737

43.9679	208.737
43.9687	208.737
43.9695	208.737
43.9703	208.737
43.9711	208.737
43.972	208.737
43.9728	208.737
43.9736	208.737
43.9744	208.737
43.9752	208.737
43.9761	208.737
43.9769	208.737
43.9777	208.737
43.9785	208.737
43.9793	208.736
43.9802	208.736
43.981	208.736
43.9818	208.736
43.9826	208.736
43.9834	208.736
43.9842	208.736
43.9851	208.736
43.9859	208.736
43.9867	208.736
43.9875	208.736
43.9883	208.736
43.9892	208.736
43.99	208.736
43.9908	208.736
43.9916	208.736
44.5218	208.696
45.6616	208.597
48.6105	208.328
49.7743	208.222
51.7943	208.039
51.8037	208.038
51.8132	208.037
51.8226	208.036
51.8321	208.035
51.8416	208.034
51.851	208.034
51.8605	208.033
51.8699	208.032
51.8794	208.031
51.8889	208.031

51.8983	208.03
51.9078	208.029
51.9173	208.029
51.9267	208.028
51.9362	208.027
51.9457	208.027
51.9551	208.026
51.9646	208.026
51.9741	208.025
51.9836	208.025
51.993	208.024
52.0025	208.023
52.012	208.023
52.0215	208.022
52.031	208.022
52.0404	208.022
52.0499	208.021
52.0594	208.021
52.0689	208.02
52.0784	208.02
52.0878	208.019
52.0973	208.019
52.1068	208.019
52.1163	208.018
52.1258	208.018
52.1353	208.018
52.1448	208.018
52.1542	208.017
52.1637	208.017
52.1732	208.017
52.1827	208.017
52.1922	208.016
52.2017	208.016
52.2112	208.016
52.2207	208.016
52.2302	208.016
52.2397	208.016
52.2491	208.015
52.8508	208.009
53.2529	208.005
53.2552	208.005
53.2574	208.005
53.2597	208.005
53.2619	208.004
53.2642	208.004

53.2664	208.004
53.2687	208.004
53.271	208.004
53.2732	208.004
53.2755	208.004
53.2777	208.004
53.28	208.004
53.2822	208.004
53.2845	208.003
53.2868	208.003
53.289	208.003
53.2913	208.003
53.2935	208.003
53.2958	208.003
53.298	208.003
53.3003	208.003
53.3025	208.003
53.3048	208.003
53.3071	208.002
53.3093	208.002
53.3116	208.002
53.3138	208.002
53.3161	208.002
53.3183	208.002
53.3206	208.002
53.3229	208.002
53.3251	208.002
53.3274	208.002
53.3296	208.002
53.3319	208.002
53.3341	208.001
53.3364	208.001
53.3387	208.001
53.3409	208.001
53.3432	208.001
53.3454	208.001
53.3477	208.001
53.3499	208.001
53.3522	208.001
53.3545	208.001
53.3567	208.001
53.359	208.001
53.3612	208.001
55.4905	207.937
55.4973	207.936

55.5041	207.936
55.5109	207.936
55.5177	207.936
55.5245	207.936
55.5313	207.935
55.5381	207.935
55.5449	207.935
55.5516	207.935
55.5584	207.935
55.5652	207.935
55.572	207.935
55.5788	207.935
55.5856	207.935
55.5924	207.934
55.5992	207.934
55.606	207.934
55.6128	207.934
55.6196	207.934
55.6263	207.934
55.6331	207.934
55.6399	207.934
55.6467	207.934
55.6535	207.934
55.6603	207.934
55.6671	207.934
55.6739	207.934
55.6807	207.934
55.6875	207.934
55.6943	207.934
55.701	207.934
55.7078	207.934
55.7146	207.934
55.7214	207.934
55.7282	207.934
55.735	207.934
55.7418	207.935
55.7486	207.935
55.7554	207.935
55.7622	207.935
55.769	207.935
55.7757	207.935
55.7825	207.935
55.7893	207.935
55.7961	207.936
55.8029	207.936

55.8097	207.936
55.8165	207.936
58.364	208.006
60.1106	207.99
61.5628	207.978
61.5682	207.977
61.5737	207.977
61.5791	207.977
61.5846	207.977
61.5901	207.977
61.5955	207.977
61.601	207.977
61.6065	207.977
61.6119	207.977
61.6174	207.977
61.6229	207.977
61.6283	207.977
61.6338	207.977
61.6393	207.977
61.6447	207.977
61.6502	207.977
61.6556	207.977
61.6611	207.978
61.6666	207.978
61.672	207.978
61.6775	207.978
61.683	207.978
61.6884	207.978
61.6939	207.978
61.6994	207.978
61.7048	207.978
61.7103	207.978
61.7158	207.978
61.7212	207.978
61.7267	207.978
61.7321	207.979
61.7376	207.979
61.7431	207.979
61.7485	207.979
61.754	207.979
61.7595	207.979
61.7649	207.979
61.7704	207.979
61.7758	207.98
61.7813	207.98

61.7868	207.98
61.7922	207.98
61.7977	207.98
61.8032	207.98
61.8086	207.981
61.8141	207.981
61.8195	207.981
61.825	207.981
62.3281	208
63.2632	207.995
64.0952	207.991
64.1037	207.991
64.1123	207.991
64.1208	207.991
64.1293	207.991
64.1379	207.991
64.1464	207.991
64.155	207.991
64.1635	207.991
64.172	207.991
64.1806	207.991
64.1891	207.991
64.1977	207.991
64.2062	207.991
64.2147	207.991
64.2233	207.992
64.2318	207.992
64.2404	207.992
64.2489	207.992
64.2574	207.992
64.266	207.993
64.2745	207.993
64.283	207.993
64.2916	207.993
64.3001	207.993
64.3087	207.994
64.3172	207.994
64.3257	207.994
64.3343	207.995
64.3428	207.995
64.3513	207.995
64.3599	207.996
64.3684	207.996
64.3769	207.996
64.3854	207.997

64.394	207.997
64.4025	207.998
64.411	207.998
64.4196	207.998
64.4281	207.999
64.4366	207.999
64.4452	208
64.4537	208
64.4622	208.001
64.4707	208.001
64.4792	208.002
64.4878	208.002
64.4963	208.003
64.5048	208.003
66.9103	208.165
66.9154	208.165
66.9204	208.165
66.9254	208.165
66.9304	208.166
66.9354	208.166
66.9404	208.166
66.9454	208.166
66.9504	208.167
66.9554	208.167
66.9604	208.167
66.9654	208.167
66.9704	208.168
66.9754	208.168
66.9804	208.168
66.9854	208.168
66.9904	208.169
66.9954	208.169
67.0004	208.169
67.0054	208.17
67.0104	208.17
67.0154	208.17
67.0204	208.171
67.0254	208.171
67.0304	208.171
67.0354	208.172
67.0404	208.172
67.0454	208.172
67.0504	208.173
67.0554	208.173
67.0604	208.173

67.0654	208.174
67.0704	208.174
67.0754	208.174
67.0804	208.175
67.0854	208.175
67.0904	208.175
67.0953	208.176
67.1003	208.176
67.1053	208.177
67.1103	208.177
67.1153	208.177
67.1203	208.178
67.1253	208.178
67.1303	208.178
67.1353	208.179
67.1403	208.179
67.1453	208.18
67.1503	208.18
67.6124	208.22
68.9102	208.331
71.247	208.531

### Line Load

X	Y
34.1	219.896
43.8488	219.702
43.9988	219.767

### External Boundary

X	Y
32.86	219.961
19.277	220.28
18.1765	220.28
18.0265	220.215
5.12319	219.828
4.58432	220.003
3.90072	220.312
3.68731	220.439
3.5049	221.172
3.0415	221.172
1.1517	221.172
1.03405	221.093
-3.97093e-007	221.154
-3.97093e-007	218.882

-3.97093e-007	215.459
-3.97093e-007	185.6
71.247	185.6
71.247	208.531
71.247	212.896
71.247	214.231
66.6663	213.84
64.1249	213.671
62.2369	213.681
58.3114	213.686
56.6903	213.642
55.0984	214.703
53.0984	214.703
45.5988	219.703
43.9988	219.767
43.8488	219.702
34.1	219.896
33.9502	219.961

### Material Boundary

X	Y
30.7122	216.031
31.9852	215.479

### Material Boundary

X	Y
3.0415	221.172
3.04221	219.682
2.84321	219.682
2.84321	219.182
2.84324	219.032
5.03225	219.033
5.04313	219.213
4.93631	219.183
4.9359	219.252
4.93274	219.783
4.37537	219.703
3.88798	219.632
3.74373	220.212
3.68731	220.439

### Material Boundary

X	Y
---	---

9.20109	218.861
8.77399	219.116
7.83288	219.354
6.61247	219.345
9.20109	218.861
31.9852	215.479
33.0238	215.055
33.5029	215.066
33.7392	215.019
52.3091	213.495
53.4848	213.481
56.1708	213.428
56.1708	213.628
56.6903	213.642

### Material Boundary

X	Y
9.20109	218.861
11.0803	219.04
23.2615	218.941
24.9713	218.254
26.8369	217.254
27.1885	217.227
29.2893	216.38
29.4416	216.254
30.7122	216.031
31.291	215.884

### Material Boundary

X	Y
5.12319	219.828
6.61247	219.345

### Material Boundary

X	Y
16.622	216.415
33.2441	213.948
33.6692	213.891
34.8606	213.828
43.4723	213.139
43.6486	213.126
43.9484	213.104
44.3136	213.074

44.8731	213.031
46.0468	212.93
49.0048	212.66
50.1686	212.555
52.2229	212.368
52.2773	212.366
52.8967	212.359
53.4462	212.351
53.487	212.349
55.6555	212.284
55.6945	212.284
58.3237	212.356
60.149	212.34
61.6318	212.328
62.2582	212.351
63.286	212.345
64.1519	212.341
64.2009	212.343
66.7233	212.511
66.7693	212.514
67.2417	212.554
68.5395	212.665
71.247	212.896

### Material Boundary

X	Y
4.9359	219.252
5.04313	219.213
7.79454	218.233
16.622	216.415

### Material Boundary

X	Y
3.74373	220.212
4.37537	219.703

## Slide Analysis Information

### SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

#### Project Summary

---

- File Name: Sezione G-201\_sisma.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

#### General Settings

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

#### Analysis Options

---

##### Analysis Methods Used

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

#### Groundwater Analysis

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

#### Random Numbers

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

#### Surface Options

---

- Surface Type: Circular

- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Loading

- Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.095
- Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.048
- 1 Distributed Load present

## Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kN/m<sup>2</sup>]: 4
- Orientation: Vertical

## Material Properties

Property	r	r resistente	b2	FAA	cls
Color					
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Infinite strength
Unsaturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			19.5	20	
Saturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			20.5	21	
Cohesion [kPa]	0	0	15	30	
Friction Angle [deg]	38	35	30	28	
Water Surface	None	None	None	Water Table	None
Hu Value				1	
Ru Value	0	0	0		0

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 1.570140
- Center: 56.555, 229.406
- Radius: 15.817
- Left Slip Surface Endpoint: 44.014, 219.767

- Right Slip Surface Endpoint: 58.311, 213.686
- Resisting Moment=4461.82 kN-m
- Driving Moment=2841.67 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 2060
- Number of Invalid Surfaces: 2791

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 63 surfaces
- Error Code -114 reported for 363 surfaces
- Error Code -115 reported for 22 surfaces
- Error Code -1000 reported for 2343 surfaces

#### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -115 = Surface too shallow, below the minimum depth.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.57014

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.578895	3.97416	r	0	38	2.22462	3.49296	4.47078	0	4.47078
2	0.578895	11.4819	r	0	38	6.69921	10.5187	13.4634	0	13.4634
3	0.578895	18.0363	r	0	38	10.9092	17.1289	21.9239	0	21.9239
4	0.578895	20.9933	r	0	38	13.11	20.5846	26.3471	0	26.3471
5	0.578895	22.2153	r	0	38	14.2797	22.4211	28.6977	0	28.6977
6	0.578895	22.9134	r	0	38	15.1236	23.7462	30.3937	0	30.3937
7	0.578895	23.1413	r	0	38	15.6539	24.5788	31.4595	0	31.4595
8	0.578895	22.9413	r	0	38	15.8802	24.9342	31.9143	0	31.9143

9	0.578895	22.3478	r	0	38	15.8101	24.824	31.7733	0	31.7733
10	0.578895	21.3888	r	0	38	15.4491	24.2573	31.0479	0	31.0479
11	0.578895	20.0873	r	0	38	14.8012	23.24	29.7458	0	29.7458
12	0.578895	18.4626	r	0	38	13.8686	21.7757	27.8717	0	27.8717
13	0.578895	16.5307	r	0	38	12.6521	19.8655	25.4266	0	25.4266
14	0.578895	14.3049	r	0	38	11.1506	17.508	22.4093	0	22.4093
15	0.578895	11.7964	r	0	38	9.36203	14.6997	18.8147	0	18.8147
16	0.578895	9.22589	r	0	38	7.45297	11.7022	14.9781	0	14.9781
17	0.578895	9.57539	r	0	38	7.87248	12.3609	15.8213	0	15.8213
18	0.578895	10.7373	r	0	38	8.98372	14.1057	18.0545	0	18.0545
19	0.578895	11.6448	r	0	38	9.91523	15.5683	19.9265	0	19.9265
20	0.578895	10.6778	r	0	38	9.25325	14.5289	18.5963	0	18.5963
21	0.578895	6.66701	r	0	38	5.88109	9.23414	11.8192	0	11.8192
22	0.535152	2.33163	b2	15	30	11.2019	17.5886	4.48356	0	4.48356
23	0.535152	0.557784	b2	15	30	10.0527	15.7841	1.3581	0	1.3581
24	0.535152	0.467811	b2	15	30	10.1146	15.8813	1.5264	0	1.5264
25	0.535152	0.187721	b2	15	30	10.037	15.7595	1.31554	0	1.31554

## Interslice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.57014

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	44.014	219.767	0	0	0
2	44.5929	219.057	2.26405	0	0
3	45.1718	218.424	8.01121	0	0
4	45.7507	217.854	15.9133	0	0
5	46.3296	217.338	23.9071	0	0
6	46.9085	216.871	31.1795	0	0
7	47.4874	216.446	37.5269	0	0
8	48.0663	216.059	42.8283	0	0
9	48.6452	215.708	47.0286	0	0
10	49.2241	215.39	50.1257	0	0
11	49.803	215.102	52.1631	0	0
12	50.3819	214.843	53.2236	0	0
13	50.9608	214.611	53.4261	0	0
14	51.5397	214.405	52.9224	0	0
15	52.1186	214.224	51.8965	0	0
16	52.6975	214.066	50.5639	0	0
17	53.2764	213.932	49.1392	0	0
18	53.8553	213.821	47.26	0	0
19	54.4341	213.731	44.6976	0	0
20	55.013	213.664	41.4159	0	0
21	55.5919	213.618	37.9355	0	0

22	56.1708	213.593	35.4602	0	0
23	56.706	213.589	29.712	0	0
24	57.2411	213.603	24.3726	0	0
25	57.7763	213.636	18.9614	0	0
26	58.3114	213.686	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
-3.97093e-007	214.484
33.0784	209.575
33.0788	209.575
33.0792	209.575
33.0797	209.575
33.0801	209.575
33.0805	209.575
33.0809	209.575
33.0814	209.575
33.0818	209.575
33.0822	209.575
33.0826	209.575
33.0831	209.575
33.0835	209.575
33.0839	209.575
33.0844	209.575
33.0848	209.575
33.0852	209.575
33.0856	209.575
33.0861	209.575
33.0865	209.575
33.0869	209.575
33.0874	209.575
33.0878	209.575
33.0882	209.575
33.0886	209.575
33.0891	209.575
33.0895	209.575
33.0899	209.575
33.0904	209.575
33.0908	209.575
33.0912	209.575
33.0916	209.575
33.0921	209.575

33.0925	209.575
33.0929	209.575
33.0933	209.575
33.0938	209.575
33.0942	209.575
33.0946	209.575
33.0951	209.575
33.0955	209.575
33.0959	209.575
33.0963	209.575
33.0968	209.575
33.0972	209.575
33.0976	209.575
33.0981	209.575
33.0985	209.575
33.0989	209.575
33.106	209.575
33.1131	209.574
33.1202	209.573
33.1273	209.572
33.1344	209.571
33.1415	209.571
33.1486	209.57
33.1557	209.569
33.1628	209.569
33.1699	209.568
33.177	209.567
33.1841	209.566
33.1912	209.566
33.1983	209.565
33.2054	209.564
33.2125	209.564
33.2196	209.563
33.2267	209.562
33.2338	209.562
33.2409	209.561
33.248	209.56
33.2552	209.56
33.2623	209.559
33.2694	209.559
33.2765	209.558
33.2836	209.557
33.2907	209.557
33.2978	209.556
33.305	209.556

33.3121	209.555
33.3192	209.555
33.3263	209.554
33.3334	209.554
33.3405	209.553
33.3477	209.553
33.3548	209.552
33.3619	209.552
33.369	209.551
33.3761	209.551
33.3833	209.55
33.3904	209.55
33.3975	209.549
33.4046	209.549
33.4118	209.549
33.4189	209.548
33.426	209.548
33.4331	209.547
33.4403	209.547
34.5726	209.487
43.1202	208.803
43.1211	208.803
43.122	208.803
43.1229	208.803
43.1238	208.803
43.1247	208.803
43.1256	208.803
43.1265	208.803
43.1274	208.803
43.1283	208.803
43.1292	208.802
43.1301	208.802
43.131	208.802
43.1319	208.802
43.1328	208.802
43.1337	208.802
43.1346	208.802
43.1355	208.802
43.1364	208.802
43.1373	208.802
43.1382	208.802
43.1391	208.802
43.14	208.802
43.1409	208.802
43.1418	208.802

43.1427	208.801
43.1437	208.801
43.1446	208.801
43.1455	208.801
43.1464	208.801
43.1473	208.801
43.1482	208.801
43.1491	208.801
43.15	208.801
43.1509	208.801
43.1518	208.801
43.1527	208.801
43.1536	208.801
43.1545	208.801
43.1554	208.801
43.1563	208.8
43.1572	208.8
43.1581	208.8
43.159	208.8
43.1599	208.8
43.1608	208.8
43.1617	208.8
43.1626	208.8
43.1635	208.8
43.3285	208.788
43.6069	208.767
43.9523	208.739
43.9531	208.739
43.9539	208.738
43.9548	208.738
43.9556	208.738
43.9564	208.738
43.9572	208.738
43.958	208.738
43.9589	208.738
43.9597	208.738
43.9605	208.738
43.9613	208.738
43.9621	208.738
43.963	208.738
43.9638	208.738
43.9646	208.738
43.9654	208.738
43.9662	208.737
43.967	208.737

43.9679	208.737
43.9687	208.737
43.9695	208.737
43.9703	208.737
43.9711	208.737
43.972	208.737
43.9728	208.737
43.9736	208.737
43.9744	208.737
43.9752	208.737
43.9761	208.737
43.9769	208.737
43.9777	208.737
43.9785	208.737
43.9793	208.736
43.9802	208.736
43.981	208.736
43.9818	208.736
43.9826	208.736
43.9834	208.736
43.9842	208.736
43.9851	208.736
43.9859	208.736
43.9867	208.736
43.9875	208.736
43.9883	208.736
43.9892	208.736
43.99	208.736
43.9908	208.736
43.9916	208.736
44.5218	208.696
45.6616	208.597
48.6105	208.328
49.7743	208.222
51.7943	208.039
51.8037	208.038
51.8132	208.037
51.8226	208.036
51.8321	208.035
51.8416	208.034
51.851	208.034
51.8605	208.033
51.8699	208.032
51.8794	208.031
51.8889	208.031

51.8983	208.03
51.9078	208.029
51.9173	208.029
51.9267	208.028
51.9362	208.027
51.9457	208.027
51.9551	208.026
51.9646	208.026
51.9741	208.025
51.9836	208.025
51.993	208.024
52.0025	208.023
52.012	208.023
52.0215	208.022
52.031	208.022
52.0404	208.022
52.0499	208.021
52.0594	208.021
52.0689	208.02
52.0784	208.02
52.0878	208.019
52.0973	208.019
52.1068	208.019
52.1163	208.018
52.1258	208.018
52.1353	208.018
52.1448	208.018
52.1542	208.017
52.1637	208.017
52.1732	208.017
52.1827	208.017
52.1922	208.016
52.2017	208.016
52.2112	208.016
52.2207	208.016
52.2302	208.016
52.2397	208.016
52.2491	208.015
52.8508	208.009
53.2529	208.005
53.2552	208.005
53.2574	208.005
53.2597	208.005
53.2619	208.004
53.2642	208.004

53.2664	208.004
53.2687	208.004
53.271	208.004
53.2732	208.004
53.2755	208.004
53.2777	208.004
53.28	208.004
53.2822	208.004
53.2845	208.003
53.2868	208.003
53.289	208.003
53.2913	208.003
53.2935	208.003
53.2958	208.003
53.298	208.003
53.3003	208.003
53.3025	208.003
53.3048	208.003
53.3071	208.002
53.3093	208.002
53.3116	208.002
53.3138	208.002
53.3161	208.002
53.3183	208.002
53.3206	208.002
53.3229	208.002
53.3251	208.002
53.3274	208.002
53.3296	208.002
53.3319	208.002
53.3341	208.001
53.3364	208.001
53.3387	208.001
53.3409	208.001
53.3432	208.001
53.3454	208.001
53.3477	208.001
53.3499	208.001
53.3522	208.001
53.3545	208.001
53.3567	208.001
53.359	208.001
53.3612	208.001
55.4905	207.937
55.4973	207.936

55.5041	207.936
55.5109	207.936
55.5177	207.936
55.5245	207.936
55.5313	207.935
55.5381	207.935
55.5449	207.935
55.5516	207.935
55.5584	207.935
55.5652	207.935
55.572	207.935
55.5788	207.935
55.5856	207.935
55.5924	207.934
55.5992	207.934
55.606	207.934
55.6128	207.934
55.6196	207.934
55.6263	207.934
55.6331	207.934
55.6399	207.934
55.6467	207.934
55.6535	207.934
55.6603	207.934
55.6671	207.934
55.6739	207.934
55.6807	207.934
55.6875	207.934
55.6943	207.934
55.701	207.934
55.7078	207.934
55.7146	207.934
55.7214	207.934
55.7282	207.934
55.735	207.934
55.7418	207.935
55.7486	207.935
55.7554	207.935
55.7622	207.935
55.769	207.935
55.7757	207.935
55.7825	207.935
55.7893	207.935
55.7961	207.936
55.8029	207.936

55.8097	207.936
55.8165	207.936
58.364	208.006
60.1106	207.99
61.5628	207.978
61.5682	207.977
61.5737	207.977
61.5791	207.977
61.5846	207.977
61.5901	207.977
61.5955	207.977
61.601	207.977
61.6065	207.977
61.6119	207.977
61.6174	207.977
61.6229	207.977
61.6283	207.977
61.6338	207.977
61.6393	207.977
61.6447	207.977
61.6502	207.977
61.6556	207.977
61.6611	207.978
61.6666	207.978
61.672	207.978
61.6775	207.978
61.683	207.978
61.6884	207.978
61.6939	207.978
61.6994	207.978
61.7048	207.978
61.7103	207.978
61.7158	207.978
61.7212	207.978
61.7267	207.978
61.7321	207.979
61.7376	207.979
61.7431	207.979
61.7485	207.979
61.754	207.979
61.7595	207.979
61.7649	207.979
61.7704	207.979
61.7758	207.98
61.7813	207.98

61.7868	207.98
61.7922	207.98
61.7977	207.98
61.8032	207.98
61.8086	207.981
61.8141	207.981
61.8195	207.981
61.825	207.981
62.3281	208
63.2632	207.995
64.0952	207.991
64.1037	207.991
64.1123	207.991
64.1208	207.991
64.1293	207.991
64.1379	207.991
64.1464	207.991
64.155	207.991
64.1635	207.991
64.172	207.991
64.1806	207.991
64.1891	207.991
64.1977	207.991
64.2062	207.991
64.2147	207.991
64.2233	207.992
64.2318	207.992
64.2404	207.992
64.2489	207.992
64.2574	207.992
64.266	207.993
64.2745	207.993
64.283	207.993
64.2916	207.993
64.3001	207.993
64.3087	207.994
64.3172	207.994
64.3257	207.994
64.3343	207.995
64.3428	207.995
64.3513	207.995
64.3599	207.996
64.3684	207.996
64.3769	207.996
64.3854	207.997

64.394	207.997
64.4025	207.998
64.411	207.998
64.4196	207.998
64.4281	207.999
64.4366	207.999
64.4452	208
64.4537	208
64.4622	208.001
64.4707	208.001
64.4792	208.002
64.4878	208.002
64.4963	208.003
64.5048	208.003
66.9103	208.165
66.9154	208.165
66.9204	208.165
66.9254	208.165
66.9304	208.166
66.9354	208.166
66.9404	208.166
66.9454	208.166
66.9504	208.167
66.9554	208.167
66.9604	208.167
66.9654	208.167
66.9704	208.168
66.9754	208.168
66.9804	208.168
66.9854	208.168
66.9904	208.169
66.9954	208.169
67.0004	208.169
67.0054	208.17
67.0104	208.17
67.0154	208.17
67.0204	208.171
67.0254	208.171
67.0304	208.171
67.0354	208.172
67.0404	208.172
67.0454	208.172
67.0504	208.173
67.0554	208.173
67.0604	208.173

67.0654	208.174
67.0704	208.174
67.0754	208.174
67.0804	208.175
67.0854	208.175
67.0904	208.175
67.0953	208.176
67.1003	208.176
67.1053	208.177
67.1103	208.177
67.1153	208.177
67.1203	208.178
67.1253	208.178
67.1303	208.178
67.1353	208.179
67.1403	208.179
67.1453	208.18
67.1503	208.18
67.6124	208.22
68.9102	208.331
71.247	208.531

### Line Load

X	Y
34.1	219.896
43.8488	219.702
43.9988	219.767

### External Boundary

X	Y
32.86	219.961
19.277	220.28
18.1765	220.28
18.0265	220.215
5.12319	219.828
4.58432	220.003
3.90072	220.312
3.68731	220.439
3.5049	221.172
3.0415	221.172
1.1517	221.172
1.03405	221.093
-3.97093e-007	221.154
-3.97093e-007	218.882

-3.97093e-007	215.459
-3.97093e-007	185.6
71.247	185.6
71.247	208.531
71.247	212.896
71.247	214.231
66.6663	213.84
64.1249	213.671
62.2369	213.681
58.3114	213.686
56.6903	213.642
55.0984	214.703
53.0984	214.703
45.5988	219.703
43.9988	219.767
43.8488	219.702
34.1	219.896
33.9502	219.961

### Material Boundary

X	Y
30.7122	216.031
31.9852	215.479

### Material Boundary

X	Y
3.0415	221.172
3.04221	219.682
2.84321	219.682
2.84321	219.182
2.84324	219.032
5.03225	219.033
5.04313	219.213
4.93631	219.183
4.9359	219.252
4.93274	219.783
4.37537	219.703
3.88798	219.632
3.74373	220.212
3.68731	220.439

### Material Boundary

X	Y
---	---

9.20109	218.861
8.77399	219.116
7.83288	219.354
6.61247	219.345
9.20109	218.861
31.9852	215.479
33.0238	215.055
33.5029	215.066
33.7392	215.019
52.3091	213.495
53.4848	213.481
56.1708	213.428
56.1708	213.628
56.6903	213.642

### Material Boundary

X	Y
9.20109	218.861
11.0803	219.04
23.2615	218.941
24.9713	218.254
26.8369	217.254
27.1885	217.227
29.2893	216.38
29.4416	216.254
30.7122	216.031
31.291	215.884

### Material Boundary

X	Y
5.12319	219.828
6.61247	219.345

### Material Boundary

X	Y
16.622	216.415
33.2441	213.948
33.6692	213.891
34.8606	213.828
43.4723	213.139
43.6486	213.126
43.9484	213.104
44.3136	213.074

44.8731	213.031
46.0468	212.93
49.0048	212.66
50.1686	212.555
52.2229	212.368
52.2773	212.366
52.8967	212.359
53.4462	212.351
53.487	212.349
55.6555	212.284
55.6945	212.284
58.3237	212.356
60.149	212.34
61.6318	212.328
62.2582	212.351
63.286	212.345
64.1519	212.341
64.2009	212.343
66.7233	212.511
66.7693	212.514
67.2417	212.554
68.5395	212.665
71.247	212.896

### Material Boundary

X	Y
4.9359	219.252
5.04313	219.213
7.79454	218.233
16.622	216.415

### Material Boundary

X	Y
3.74373	220.212
4.37537	219.703

## 19.10 Sezione G-234

### *Slide Analysis Information*

## *SLIDE - An Interactive Slope Stability Program*

### *Project Summary*

---

- File Name: Sezione G-234.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

### *General Settings*

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

### *Analysis Options*

---

#### **Analysis Methods Used**

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $m\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

### *Groundwater Analysis*

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

### *Random Numbers*

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

### *Surface Options*

Relazione Geotecnica Generale

322

**RTP di progettazione:**

**Mandataria**



**Mandanti**



- Surface Type: Circular
- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Loading

- 1 Distributed Load present

### Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kN/m<sup>2</sup>]: 26
- Orientation: Vertical

## Material Properties

Property	r	r esistente	bg	FAA
Color				
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unsaturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			18	20
Saturated Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]			20	21
Cohesion [kPa]	0	0	0	24
Friction Angle [deg]	32	29.3	29.3	23
Water Surface	None	None	Water Table	Water Table
Hu Value			1	1
Ru Value	0	0		

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 1.206220
- Center: 61.565, 211.932
- Radius: 20.016
- Left Slip Surface Endpoint: 46.535, 198.714
- Right Slip Surface Endpoint: 63.618, 192.022

- Resisting Moment=3722.21 kN-m
- Driving Moment=3085.85 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 2451
- Number of Invalid Surfaces: 2400

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 59 surfaces
- Error Code -114 reported for 691 surfaces
- Error Code -1000 reported for 1650 surfaces

#### Error Codes

*The following errors were encountered during the computation:*

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.20622

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.681491	4.83526	r	0	32	11.0026	13.2716	21.239	0	21.239
2	0.681491	13.9061	r	0	32	14.0586	16.9578	27.1382	0	27.1382
3	0.681491	18.2175	r	0	32	9.47356	11.4272	18.2874	0	18.2874
4	0.681491	19.9573	r	0	32	10.6707	12.8712	20.5983	0	20.5983
5	0.681491	21.0146	r	0	32	11.5276	13.9048	22.2523	0	22.2523
6	0.681491	21.4555	r	0	32	12.0538	14.5395	23.2681	0	23.2681
7	0.681491	21.3333	r	0	32	12.2571	14.7848	23.6607	0	23.6607
8	0.681491	20.6914	r	0	32	12.144	14.6483	23.4422	0	23.4422
9	0.681491	19.5656	r	0	32	11.7188	14.1355	22.6215	0	22.6215
10	0.681491	17.9859	r	0	32	10.9849	13.2502	21.2048	0	21.2048
11	0.681491	15.9774	r	0	32	9.94387	11.9945	19.1953	0	19.1953
12	0.681491	13.5612	r	0	32	8.59611	10.3688	16.5935	0	16.5935

13	0.681491	10.8889	r	0	32	7.02667	8.47571	13.564	0	13.564
14	0.681491	11.9576	r	0	32	7.85271	9.47209	15.1586	0	15.1586
15	0.681491	14.6082	r	0	32	9.76049	11.7733	18.8412	0	18.8412
16	0.681491	16.6774	r	0	32	11.3349	13.6724	21.8804	0	21.8804
17	0.681491	14.0794	r	0	32	9.7328	11.7399	18.7878	0	18.7878
18	0.681491	9.51045	r	0	32	6.68643	8.06531	12.9072	0	12.9072
19	0.681491	4.61322	r	0	32	3.29869	3.97895	6.36766	0	6.36766
20	0.689143	0.699006	bg	0	29.3	0.453535	0.547063	0.974855	0	0.974855
21	0.689143	0.932114	bg	0	29.3	0.614296	0.740976	1.3204	0	1.3204
22	0.689143	1.23291	bg	0	29.3	0.825449	0.995673	1.77427	0	1.77427
23	0.689143	1.23903	bg	0	29.3	0.842914	1.01674	1.81181	0	1.81181
24	0.689143	0.950481	bg	0	29.3	0.657231	0.792765	1.41269	0	1.41269
25	0.689143	0.36624	bg	0	29.3	0.257494	0.310594	0.553472	0	0.553472

## Interslice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.20622

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	46.5345	198.714	0	0	0
2	47.216	197.977	8.16144	0	0
3	47.8975	197.309	16.7249	0	0
4	48.579	196.7	21.4042	0	0
5	49.2605	196.145	25.5878	0	0
6	49.942	195.636	29.0531	0	0
7	50.6235	195.171	31.6745	0	0
8	51.305	194.746	33.404	0	0
9	51.9865	194.357	34.2574	0	0
10	52.6679	194.002	34.3049	0	0
11	53.3494	193.68	33.6644	0	0
12	54.0309	193.388	32.4968	0	0
13	54.7124	193.126	31.003	0	0
14	55.3939	192.891	29.4023	0	0
15	56.0754	192.684	27.2046	0	0
16	56.7569	192.502	23.9812	0	0
17	57.4384	192.346	19.6827	0	0
18	58.1199	192.215	15.5263	0	0
19	58.8014	192.108	12.3574	0	0
20	59.4829	192.025	10.642	0	0
21	60.172	191.965	10.3884	0	0
22	60.8611	191.929	10.0135	0	0
23	61.5503	191.916	9.4674	0	0
24	62.2394	191.928	8.86678	0	0
25	62.9286	191.963	8.36488	0	0

26	63.6177	192.022	0	0	0
----	---------	---------	---	---	---

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
0.188999	192.083
29.1368	190.935
60.6662	190.74
81.526	190.74

### Line Load

X	Y
33.95	199.558
34.1	199.497
46.0027	198.659
46.1527	198.729
47.7527	198.665

### External Boundary

X	Y
-1.14343e-006	171.312
-1.14343e-006	159.6
81.526	159.6
81.526	185.907
81.526	187.038
81.526	192.022
59.7166	192.022
57.2524	193.665
55.2524	193.665
47.7527	198.665
46.1527	198.729
46.0027	198.659
34.1	199.497
33.95	199.558
32.8041	199.558
18.0462	198.434
16.9341	198.434
16.7824	198.373
0.484418	199.547
-1.14343e-006	199.605
-1.14343e-006	193.764

-1.14343e-006	187.835
-1.14343e-006	187.317
-1.14343e-006	187.262

### Material Boundary

X	Y
-1.14343e-006	193.764
1.42623	193.312
2.746	193.312
28.6724	192.283

### Material Boundary

X	Y
2.746	193.312
6.37292	195.172
7.53135	195.776
11.9271	197.007
17.5757	196.772
19.8616	196.312
21.0153	195.812
24.5321	194.282
29.1697	192.265
28.6724	192.283
29.1181	192.087
33.8011	191.929
37.1623	192.097
59.1652	191.829
59.1652	192.029
59.7166	192.022

### Material Boundary

X	Y
-1.14343e-006	187.835
3.44658	187.455
11.3359	186.771
19.4989	186.406
27.9355	186.133
34.6	186.02
54.3082	186.272
81.526	187.038

## Slide Analysis Information

### SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

#### Project Summary

---

- File Name: Sezione G-234\_isma.slim
- Slide Modeler Version: 6.008
- Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

#### General Settings

---

- Units of Measurement: Metric Units
- Time Units: days
- Permeability Units: meters/second
- Failure Direction: Left to Right
- Data Output: Standard
- Maximum Material Properties: 20
- Maximum Support Properties: 20

#### Analysis Options

---

##### Analysis Methods Used

- Bishop simplified
- Number of slices: 25
- Tolerance: 0.005
- Maximum number of iterations: 50
- Check  $\alpha < 0.2$ : Yes
- Initial trial value of FS: 1
- Steffensen Iteration: Yes

#### Groundwater Analysis

---

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m<sup>3</sup>
- Advanced Groundwater Method: None

#### Random Numbers

---

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

#### Surface Options

---

- Surface Type: Circular

- Search Method: Grid Search
- Radius Increment: 10
- Composite Surfaces: Disabled
- Reverse Curvature: Invalid Surfaces
- Minimum Elevation: Not Defined
- Minimum Depth: 1

## Loading

- Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.095
- Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.048
- 1 Distributed Load present

## Distributed Load 1

- Distribution: Constant
- Magnitude [kN/m2]: 4
- Orientation: Vertical

## Material Properties

Property	r	r esistente	bg	FAA
Color				
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unsaturated Unit Weight [kN/m3]			18	20
Saturated Unit Weight [kN/m3]			20	21
Cohesion [kPa]	0	0	0	30
Friction Angle [deg]	38	35	35	28
Water Surface	None	None	Water Table	Water Table
Hu Value			1	1
Ru Value	0	0		

## Global Minimums

### Method: bishop simplified

- FS: 1.310610
- Center: 61.565, 211.056
- Radius: 19.142
- Left Slip Surface Endpoint: 46.946, 198.697
- Right Slip Surface Endpoint: 63.601, 192.022

- Resisting Moment=3654.75 kN-m
- Driving Moment=2788.58 kN-m

## Valid / Invalid Surfaces

### Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 2451
- Number of Invalid Surfaces: 2400

#### Error Codes:

- Error Code -101 reported for 59 surfaces
- Error Code -114 reported for 691 surfaces
- Error Code -1000 reported for 1650 surfaces

#### Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -101 = Only one (or zero) surface / slope intersections.
- -114 = Surface with Reverse Curvature.
- -1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

## Slice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.31061

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.660877	4.72758	r	0	38	4.11332	5.39096	6.90011	0	6.90011
2	0.660877	12.0461	r	0	38	7.43449	9.74372	12.4714	0	12.4714
3	0.660877	14.8085	r	0	38	9.04808	11.8585	15.1782	0	15.1782
4	0.660877	16.6751	r	0	38	10.5183	13.7854	17.6446	0	17.6446
5	0.660877	17.8668	r	0	38	11.6051	15.2098	19.4677	0	19.4677
6	0.660877	18.4525	r	0	38	12.3168	16.1425	20.6615	0	20.6615
7	0.660877	18.4872	r	0	38	12.66	16.5923	21.2371	0	21.2371
8	0.660877	18.0153	r	0	38	12.6397	16.5657	21.2032	0	21.2032
9	0.660877	17.0733	r	0	38	12.2594	16.0673	20.5652	0	20.5652
10	0.660877	15.6917	r	0	38	11.5207	15.0992	19.3262	0	19.3262
11	0.660877	13.8956	r	0	38	10.4238	13.6616	17.4861	0	17.4861
12	0.660877	11.7066	r	0	38	8.9672	11.7525	15.0425	0	15.0425
13	0.660877	9.68519	r	0	38	7.57183	9.92372	12.7018	0	12.7018
14	0.660877	11.6446	r	0	38	9.28804	12.173	15.5807	0	15.5807

15	0.660877	14.1974	r	0	38	11.5502	15.1378	19.3754	0	19.3754
16	0.660877	15.9352	r	0	38	13.2203	17.3266	22.177	0	22.177
17	0.660877	13.0301	r	0	38	11.0227	14.4464	18.4905	0	18.4905
18	0.660877	8.77601	r	0	38	7.56965	9.92086	12.6981	0	12.6981
19	0.660877	4.20817	r	0	38	3.70114	4.85075	6.20868	0	6.20868
20	0.68301	0.64912	bg	0	35	0.507735	0.665442	0.95035	0	0.95035
21	0.68301	0.952202	bg	0	35	0.758663	0.994311	1.42002	0	1.42002
22	0.68301	1.25774	bg	0	35	1.02099	1.33812	1.91104	0	1.91104
23	0.68301	1.26328	bg	0	35	1.04515	1.36979	1.95626	0	1.95626
24	0.68301	0.968836	bg	0	35	0.817245	1.07109	1.52968	0	1.52968
25	0.68301	0.373274	bg	0	35	0.321196	0.420963	0.601197	0	0.601197

## Interslice Data

### • Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.31061

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	46.9463	198.697	0	0	0
2	47.6072	197.955	2.85909	0	0
3	48.268	197.285	7.46773	0	0
4	48.9289	196.676	12.1574	0	0
5	49.5898	196.121	16.6056	0	0
6	50.2507	195.615	20.5257	0	0
7	50.9116	195.151	23.738	0	0
8	51.5724	194.728	26.1482	0	0
9	52.2333	194.342	27.7319	0	0
10	52.8942	193.989	28.5244	0	0
11	53.5551	193.67	28.6129	0	0
12	54.2159	193.38	28.1313	0	0
13	54.8768	193.12	27.2573	0	0
14	55.5377	192.887	26.1479	0	0
15	56.1986	192.681	24.3486	0	0
16	56.8594	192.501	21.5841	0	0
17	57.5203	192.345	17.8341	0	0
18	58.1812	192.215	14.2312	0	0
19	58.8421	192.108	11.4366	0	0
20	59.503	192.025	9.91624	0	0
21	60.186	191.963	9.69096	0	0
22	60.869	191.926	9.31778	0	0
23	61.552	191.913	8.76663	0	0
24	62.235	191.925	8.15245	0	0
25	62.918	191.961	7.63303	0	0
26	63.601	192.022	0	0	0

## List Of Coordinates

### Water Table

X	Y
0.188999	192.083
29.1368	190.935
60.6662	190.74
81.526	190.74

### Line Load

X	Y
33.95	199.558
34.1	199.497
46.0027	198.659
46.1527	198.729
47.7527	198.665

### External Boundary

X	Y
-1.14343e-006	171.312
-1.14343e-006	159.6
81.526	159.6
81.526	185.907
81.526	187.038
81.526	192.022
59.7166	192.022
57.2524	193.665
55.2524	193.665
47.7527	198.665
46.1527	198.729
46.0027	198.659
34.1	199.497
33.95	199.558
32.8041	199.558
18.0462	198.434
16.9341	198.434
16.7824	198.373
0.484418	199.547
-1.14343e-006	199.605
-1.14343e-006	193.764
-1.14343e-006	187.835
-1.14343e-006	187.317
-1.14343e-006	187.262

### Material Boundary

X	Y
-1.14343e-006	193.764
1.42623	193.312
2.746	193.312
28.6724	192.283

### Material Boundary

X	Y
2.746	193.312
6.37292	195.172
7.53135	195.776
11.9271	197.007
17.5757	196.772
19.8616	196.312
21.0153	195.812
24.5321	194.282
29.1697	192.265
28.6724	192.283
29.1181	192.087
33.8011	191.929
37.1623	192.097
59.1652	191.829
59.1652	192.029
59.7166	192.022

### Material Boundary

X	Y
-1.14343e-006	187.835
3.44658	187.455
11.3359	186.771
19.4989	186.406
27.9355	186.133
34.6	186.02
54.3082	186.272
81.526	187.038