

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTO DEFINITIVO

LINEA MODANE-TORINO

ADEGUAMENTO LINEA STORICA TRATTA BUSSOLENO-AVIGLIANA

REALIZZAZIONE DI PRECEDENZE A MODULO 750m NELLE LOCALITA' DI BORGONE-BRUZOLO (BIN. DISPARI) E CONDOVE-VAIE (BIN. PARI)

GEOTECNICA

Relazione Geotecnica

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

NT01 04 D 26 GE GE0005 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	A.Ingletti	Dic.2018	G. Nitti	Dic.2018	F. Perrone	Dic.2018	F. Sacchi	Dic.2018

ITALFERR - UO INFRASTRUTTURE NORD  
Dott. Ing. Francesco Sacchi  
Online degli Ingegneri della Provincia di Roma  
n. 23172 Sez. A

File:NT0104D26GEGE0005001A.doc

n. Elab.:

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>NORME E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>INDAGINI DISPONIBILI</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>GEOLOGIA</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>SEZIONI GEOTECNICHE</b>	<b>9</b>
<b>6.1</b>	<b>DESCRIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE</b>	<b>9</b>
<b>6.2</b>	<b>CARATTERISTICHE DELLA FALDA</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DEI TERRENI</b>	<b>10</b>
<b>7.1</b>	<b>CORRELAZIONI UTILIZZATE PER L'INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI DELLE INDAGINI IN SITO</b>	<b>10</b>
<b>7.2</b>	<b>UNITA' GEOTECNICHE</b>	<b>14</b>
<b>7.2.1</b>	<i>Unità A – Sabbie e ghiaie</i>	<i>14</i>
<b>7.2.2</b>	<i>Unità B - Limi sabbiosi</i>	<i>28</i>
<b>8</b>	<b>RIEPILOGO DEI PARAMETRI</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>CLASSIFICAZIONE SISMICA E STABILITA' DEL SITO</b>	<b>42</b>
<b>9.1</b>	<b>DEFINIZIONE DELL'ANALISI SISMICA</b>	<b>42</b>
<b>9.2</b>	<b>VALUTAZIONE DEL RISCHIO LIQUEFAZIONE NELLE AREE DI PROGETTO</b>	<b>53</b>
<b>9.3</b>	<b>STIMA DEI CEDIMENTI PERMANENTI NEI TERRENI GRANULARI SATURI LIQUEFACIBILI</b>	<b>64</b>

## 1 PREMESSA

La presente Relazione Geotecnica si riferisce alla progettazione definitiva delle opere finalizzate all'adeguamento della linea ferroviaria tra i comuni di Avigliana e Bussoleno –Lotto 4, inerenti alla realizzazione delle nuove linee in adiacenza all'esistente nei siti di Condove e Bruzolo.

In considerazione della sostanziale uniformità litostratigrafica presente nel territorio oggetto dell'intervento, ai fini della presente caratterizzazione geotecnica, si è ritenuto di utilizzare tutti i dati di carattere geognostico-geotecnico disponibili e relativi all'intero tratto della linea dal km 21+750 al km 43+350.0, considerandoli in ogni caso rappresentativi.

Nello specifico, sono stati considerati i risultati delle campagne d'indagine in precedenza effettuate nell'area d'interesse, costituite da alcuni sondaggi presenti negli archivi ARPA, prendendo in considerazione le verticali ricadenti nell'ambito territoriale degli interventi in progetto e ulteriori 11 sondaggi a carotaggio continuo eseguiti nell'ambito della fase progettuale corrente (campagna Italferr 2018); durante tali perforazioni (2018) della profondità massima di 30 m, sono state realizzate prove SPT (6 in ogni sondaggio), prelevati campioni rimaneggiati e indisturbati ed eseguite prove di permeabilità Lefranc (1 in ogni sondaggio), infine, 9 verticali d'indagine sono state attrezzate con piezometro.

Nel corso della fase progettuale corrente sono state anche eseguite apposite indagini di tipo geofisico (Campagna Italferr 2018) costituite da 29 prospezione sismiche di tipo MASW-HVSR (MASW-HVSR 1÷29), distribuite lungo tutto il tracciato. Per i dettagli dell'ubicazione si rimanda alle relative tavole descrittive.

In particolare nella presente relazione sono affrontati i seguenti aspetti:

- Breve inquadramento geologico;
- Descrizione delle indagini geotecniche eseguite in sito ed in laboratorio;
- Descrizione dei criteri in base ai quali sono stati interpretati i risultati delle indagini geotecniche effettuate;
- Interpretazione dei risultati delle indagini geotecniche e definizione dei parametri geotecnici, in termini di proprietà fisiche e meccaniche (resistenza al taglio e deformabilità), per le unità geotecniche individuate;
- Risposta sismica del sito;
- Verifica della suscettibilità alla liquefazione;
- Stima dei cedimenti permanenti nei terreni granulari saturi liquefacibili

## 2 NORME E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- D.M. LL.PP. del 16/01/1996 "Norme Tecniche per le Costruzioni in zone sismiche";
- UNI EN del 1997 "Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica";
- UNI EN del 1998 "Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica";
- D.P.R. 380 del 06/06/2001 "Testo unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia";
- D.M. Infrastrutture del 17/01/2018 "Nuove Norme Tecniche per Costruzioni";
- D.M. II.TT. del 04/02/2008 - Circolare 617 del 2 febbraio 2009 "Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni» di cui al D.M. Infrastrutture del 17/01/2018".

## 3 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Codifica elaborato	Descrizione elaborato
NT0I01D69RGGE0001001A	Relazione geologica
NT0I01D04GEGE0005001A	Profilo Geotecnico 1/2
NT0I01D04GEGE0005002A	Profilo Geotecnico 2/2
NT0I04D69IGGE0000001A	Indagini geofisiche (2018)
NT0I04D69SGGE0000001A	Esiti indagini e prove in situ
NT0I07D69IGGE0005002A	Stratigrafia pozzi e sondaggi pregressi
NT0I07D69FZGE0001001-6A	Profilo geologico-tecnico in asse al tracciato
NT0I07D69G5GE0001001-6A	Carta geologica

#### 4 INDAGINI DISPONIBILI

La caratterizzazione geotecnica dei terreni presenti nell'area d'interesse è svolta sulla base delle campagne di indagine riepilogate sopra e di seguito enucleate:

- N°11 sondaggi a carotaggio continuo (Italferr 2018)
- N°37 sondaggi a carotaggio continuo (campagne ARPA - SMAT)
- Prove geofisiche – 29 MASW-HVSR (Italferr 2018)

#### Sondaggi

L'ubicazione dei sondaggi lungo la tratta è riportata negli elaborati relativi.

Per le stratigrafie e le foto delle cassette dei sondaggi si rimanda ai documenti di riferimento.

Nella Tabella 1 sono elencati tutti i sondaggi geognostici eseguiti nell'ambito della campagna italferr 2018, con indicazione, dei principali dati tecnici relativi ad ogni singola posizione (pk, coordinate, quota, strumentazione, profondità, numero dei campioni, numero prove SPT). Nella Tabella 2 sono elencati tutti i sondaggi geognostici eseguiti in precedenza e ritenuti utili ai fini della presente fase progettuale.

**Tabella 1** -Riassunto dei sondaggi e prove eseguite nel tratto d'interesse (Campagna Italferr 2018).

Sigla	pk	Quota m s.l.m.	N	E	Strumentazione	Profondità m	Campioni	SPT	Lefranc/Lugeon
PNNT0IF01		443.7	5000063	353852	Piezometro	20	6	6	1
PNNT0IF02		421.1	4999144	358526	Piezometro	20	6	6	2
PNNT0IF03		399.2	4998225	361174	Piezometro	30	11	10	1
SCNT0IU04		393.2	4997515	362238	Non attrezzato	20	6	6	1
PNNT0IF05		383.6	4996561	364226	Piezometro	20	6	6	1
PNNT0IU06		374.6	4996325	366074	Piezometro	20	7	6	1
SCNT0IR07		371.2	4996284	367383	Non attrezzato	20	6	7	1
PNNT0IR08		363.1	4995104	368855	Piezometro	20	6	6	1
PNNT0IR09		357.6	4995835	370539	Piezometro	20	7	6	1
PNNT0IF10		356.2	4994462	371070	Piezometro	20	7	6	1

Sigla	pk	Quota m s.l.m.	N	E	Strumentazione	Profondità m	Campioni	SPT	Lefranc/Lugeon
PNNT0IU11		352.4	4994648	372475	Piezometro	20	7	6	1
S87		366.0	4996210	367690	Piezometro	22.5	5	4	4

**Tabella 2** - Riassunto dei sondaggi e prove eseguite nel tratto d'interesse (Campagne precedenti).

Sigla	Località	Profondità m	Campioni	SPT
12-ARPA	Km 32 Strada statale 25 canale dell'interno nel comune di Vaie	25.5	7	17
26-ARPA	Nord ferrovia, km 31.7 Strada Statale 25 nel comune di Vaie	21.0	1	13
33-ARPA	150 m sud S.S. 25 km 38 nel comune di Borgone di Susa	25.5	3	9
35-ARPA	Viabilità: Collegamento tra Bardonecchia e Torino (tang. Nord-Rivoli) - V tronco	10.5	-	-
106855-ARPA	Venaus - Nuova linea T.A.V. Torino-Lione Acciaieria Beltrame	60.0	-	8
108098-ARPA	Borgone di Susa (TO)	10.0	-	-

Nella Tabella 3 sono elencati i risultati delle prove Lefranc.

### Prove Lefranc

**Tabella 3** – Posizione delle prove geosismiche

Sondaggi	Profondità (m)	k (cm/s)
PNNT0IF01	7.5	$3.27 \cdot 10^{-4}$
PNNT0IF02	1.5	$1.74 \cdot 10^{-4}$
PNNT0IF02	12	$2.68 \cdot 10^{-3}$
PNNT0IF03	7.5	$1.40 \cdot 10^{-3}$

SCNTOIR04	13.5	$3.27 \cdot 10^{-3}$
PNNT0IF05	7.5	$1.38 \cdot 10^{-3}$
PNNT0IU06	10.5	$5.94 \cdot 10^{-4}$
SCNTOIR07	5.0	$2.75 \cdot 10^{-3}$
PNNT0IF08	13.0	$6.47 \cdot 10^{-3}$
PNNT0IF09	7.5	$6.5 \cdot 10^{-3}$
PNNT0IF10	9.0	$1.00 \cdot 10^{-3}$
PNNT0IU11	7.0	$2.07 \cdot 10^{-3}$
S87	9	$4.43 \cdot 10^{-4}$
S87	12	$2.1 \cdot 10^{-3}$
S87	17	$4.96 \cdot 10^{-3}$
S87	21	$1.22 \cdot 10^{-3}$

**Prospezioni geofisiche MASW-HVSR**

**Tabella 4** – Posizione delle prove geosismiche

Indagine	Velocità
MASW 1	554
MASW 2	466
MASW 3	413
MASW 4	404
MASW 5	389
MASW 6	309
MASW 7	361
MASW 8	371
MASW 9	334
MASW 10	312
MASW 11	354
MASW 12	390
MASW 13	302
MASW 14	326
MASW 15	416
MASW 16	336
MASW 17	338
MASW 18	327
MASW 19	393
MASW 20	354
MASW 21	396

MASW 22	416
MASW 23	315
MASW 24	315
MASW 25	427
MASW 26	335
MASW 27	353
MASW 28	351
MASW 29	512

## 5 GEOLOGIA

Per la ricostruzione dell'assetto litologico-stratigrafico dell'area di studio si è fatto riferimento alla cartografia CARG disponibile, dalla quale si riporta in Figura 1 l'inquadramento dell'area.

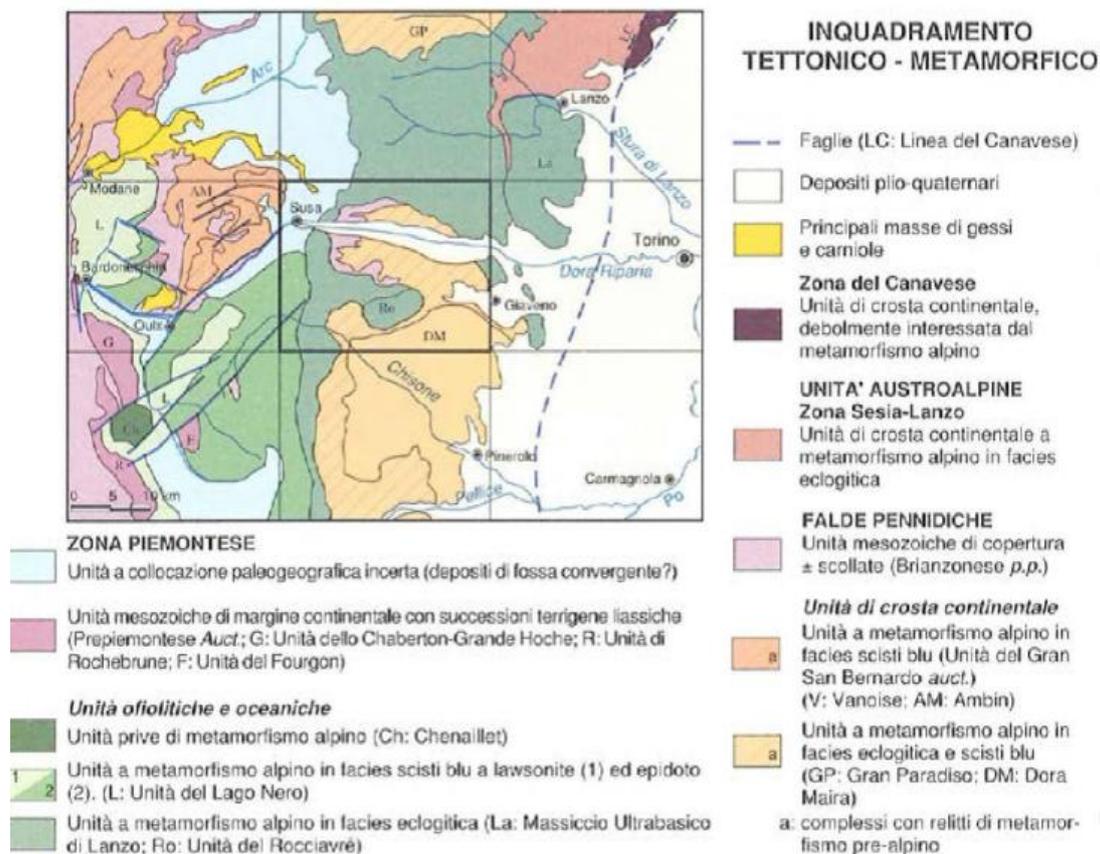


Figura 1- Inquadramento geologico-tettonico

La valle di Susa è interamente compresa nel dominio Pennidico. Nella bassa valle in particolare prevalgono rocce attribuibili all'unità del Dora-Maira rappresentante il margine continentale europeo. Si tratta per lo più di rocce di basamento cristallino polimetamorfico (micascisti e gneiss) che conservano minerali metamorfici di età pre-alpina; si rinvengono inoltre metagraniti ed ortogneiss, derivati da originarie rocce magmatiche intruse nel basamento cristallino.

Sono inoltre ben sviluppate le unità di crosta oceanica e del sottostante mantello, derivanti dalla chiusura del bacino Ligure – Piemontese, le unità di copertura dei margini continentali affacciati sull'oceano e rocce sedimentarie derivate dallo smantellamento dei margini continentali durante l'orogenesi. In questo dominio si ritrovano sia rocce metamorfiche derivate dal substrato oceanico (metagabbri, serpentiniti), sia le rocce metamorfiche originatesi da sedimenti marnosi originariamente depositi sui fondali oceanici (calcesisti).

Lungo il tracciato in progetto si rinvengono essenzialmente depositi fluviali ghiaiosi e sabbiosi di età olocenica; tali depositi sono riferibili al Sintema di Palazzolo, Subsintema di Ghiaia Grande, costituito da ghiaie sabbiose a supporto di clasti e sabbie ghiaiose a supporto di matrice con intercalazioni sabbiose, passanti verso l'alto a sabbie siltose inalterate o debolmente alterate di spessore metrico, sono presenti lenti anche di spessore metrico costituite da depositi limosi e sabbioso-limosi.

## 6 SEZIONI GEOTECNICHE

Nel profilo geotecnico si riportano le stratigrafie delle unità geotecniche individuate, le misure eseguite in sito (SPT), la posizione dei campioni estratti, le quote della falda rilevate nel corso delle perforazioni e la tabella riepilogativa dei parametri geotecnici.

### 6.1 Descrizione delle unità geotecniche

In accordo con quanto assunto nella relazione geologica, sono state individuate 7 unità litologiche. Il sottosuolo, nell'area di progetto, è costituito da:

- Unità A: Sabbie e ghiaie
- Unità B: Limi e sabbie limose

### 6.2 Caratteristiche della falda

Al momento dello studio non sono disponibili dati di monitoraggio piezometrico e pertanto sono stati utilizzati i dati del livello idrico sotterraneo registrato in fase di perforazione.

Di seguito si riportano i dati del livello piezometrico registrato in fase di perforazione per tutti i punti di indagine disponibili, con indicazione delle principali caratteristiche del foro (Sigla, Piezometro, Data, Quota e Note).

Sigla	Piezometro	Data	Profondità falda <i>m b.f.</i>
PNNT0IF01	SI	03.09.18	-16.94
PNNT0IF02	SI	08.08.18	-3.30
PNNT0IF03	SI	10.08.18	-6.80
SCNT0IU04	NO	-	-
PNNT0IF05	SI	09.08.18	-5.32
PNNT0IU06	SI	30.08.18	-2.71
SCNT0IR07	NO	-	-
PNNT0IR08	SI	04.09.18	-2.52
PNNT0IR09	SI	28.08.18	-2.66
PNNT0IF10	SI	27.08.18	-3.13
PNNT0IU11	SI	29.08.18	-3.98

## 7 CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DEI TERRENI

La caratterizzazione dei terreni presenti nell'area di studio è stata svolta sulla base delle risultanze delle indagini in sito. Si riportano nel paragrafo seguente le modalità seguite per interpretare i risultati delle indagini svolte.

### 7.1 Correlazioni utilizzate per l'interpretazione dei risultati delle indagini in sito

I parametri geotecnici sono stati ricavati sulla base di correlazioni empiriche che legano gli stessi al numero di colpi  $N_{SPT}$  ( $N_2+N_3$ ). Nel caso di prove eseguite sulle sabbie limose al di sotto del livello di falda, per valori di  $N_{spt}>15$  è stata considerata la seguente correzione al numero di colpi  $N_{spt}$  (Terzaghi-Peck 1948):  $15 + 0.5(N_{spt} - 15)$

in particolare per i parametri di resistenza sono state utilizzate le seguenti relazioni:

#### TERRENI INCOERENTI

- Sowers:

$$\varphi = 0.28N_{SPT} + 28$$

La relazione è valida per le sabbie in genere e trova le sue condizioni ottimali di applicabilità per profondità inferiori a circa a 4m per terreni sopra falda e inferiori a circa 7m per terreni in falda.

- **Japanese National Railway:**

$$\varphi = 0.3N_{sPT} + 27$$

La relazione è valida per le sabbie fini o limose e trova le sue condizioni di applicabilità per profondità di prova inferiori a 8-10 m per terreni sopra falda e inferiori a 15m per terreni IN falda.

#### TERRENI COESIVI

Le relazioni sono valide per le argille mediamente plastiche

- **Terzaghi e Peck**

$$C_u = 0.067N_{spt} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

- **Sanglerat**

$$C_u = 0.1N_{spt} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Mentre per i parametri di **deformabilità**:

#### TERRENI INCOERENTI

- **Denver:**

$$E(\text{kg/cm}^2) = S1N_{spt} + S2$$

La relazione non considera l'influenza della pressione efficace. I parametri S1 ed S2 sono determinati in funzione della granulometria dalla tabella che segue:

n. curva	S1 (Kg/cmq)	S2 (Kg/cmq)	Note
1	7.56	187.5	Sabbia e ghiaia (1)
2	10.43	367.9	Sabbia (2)
3	5.17	74.6	
4	4.78	71.7	Sabbia satura (4)
5	3.16	15.8	Sabbia argillosa (5)

Con riferimento alle sabbie e ghiaie (curva n.1).

- **D'APPOLONIA** - valido per sabbie e ghiaie:

$$E(MPa) = 19.1 + 0.771N_{SPT}$$

## TERRENI COESIVI

Relativamente ai litotipi coesivi, la valutazione del modulo di Young in condizioni non drenate ( $E_u$ ) è stata effettuata secondo la relazione fornita da Duncan e Buchignani (1976), che correla il valore del modulo alla coesione non drenata, al grado di sovraconsolidazione e all'indice di plasticità dei terreni.

In particolare, nel caso in esame, è stato adottato un rapporto:  $\frac{E_u}{C_u} = 300$

Il valore del modulo di Young in condizioni drenate ( $E'$ ) è stato ricavato a partire dalla teoria dell'elasticità dai valori di  $E_u$ :

$$E' = \frac{(1 + \nu)}{1.5} E_u$$

## 7.2 UNITA' GEOTECNICHE

### 7.2.1 Unità A – Sabbie e ghiaie

I depositi dell'unità A costituiscono il litotipo prevalente che caratterizza l'area di progetto della nuova infrastruttura.

Sono indicati nelle seguenti tabelle i valori ottenuti dalle prove SPT e le relative elaborazioni in termini di parametri meccanici, che sono poi stati utilizzate ai fini della determinazione dei parametri caratteristici per il litotipo in esame.

#### 7.2.1.1 Prove in sito: SPT

**Tabella 5-** Prove SPT in corrispondenza Unità A.

PROVE SPT										
Sondaggio	Quota slm	prof falda da p.c	Z <sub>inizio</sub> prova (m)	N2	N3	N'=15+0.5(Nspt-15)	sigma	zw (m)	u	sigma'
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	1,5	4	2	6	29	0	0	29
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	4,5	3	3	6	86	0	0	86
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	7,5	21	19	40	143	0	0	143
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	10,5			100	200	0	0	200
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	15			100	285	0	0	285
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	19,5			100	371	3	26	345
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	4,5	3	4	7	86	1	12	74
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	7,5	32	37	42	143	4	42	101
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	10,5	34	42	45,5	200	7	72	128
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	15			100	285	12	117	168
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	20			100	380	17	167	213
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	3	9	11	20	57	0	0	57
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	6	37	21	58	114	0	0	114
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	9	35	37	43,5	171	2	22	149
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	12			100	228	5	52	176
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	27	34	39	44	513	20	202	311
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	30	29	31	37,5	570	23	232	338
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	1,5	9	11	20	29	0	0	29
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	4,5			100	86	0	0	86
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	7,5	25	26	33	143	2	22	121
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	10,5	32	36	41,5	200	5	52	148
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	15	30	36	40,5	285	10	97	188
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	3	18	24	42	57	0	0	57
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	6	24	31	35	114	3	29	85
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	12	22	23	30	228	9	89	139
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	15	20	19	27	285	12	119	166
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	18	24	24	31,5	342	15	149	193
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	1,5			100	29	0	0	29
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	4,5	8	5	13	86	2	20	66
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	7,5	15	27	28,5	143	5	50	93
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	15	27	33	37,5	285	12	125	160
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	20	31	35	40,5	380	17	175	205
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	4,5	2	2	4	86	2	18	67
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	7,5	25	22	31	143	5	48	94
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	10,5	5	3	8	200	8	78	121
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	15	17	21	26,5	285	12	123	162
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	20	19	24	29	380	17	173	207

PROVE SPT										
Sondaggio	Quota slm	prof falda da p.c	Z <sub>inizio prova</sub> (m)	N2	N3	N'=15+0,5(Nspt-15)	sigma	zw (m)	u	sigma'
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	3	7	5	12	57	0	3	54
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	12	18	25	29	228	9	93	135
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	15	37	35	43,5	285	12	123	162
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	18	23	32	35	342	15	153	189
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	3	12	11	23	57	0	0	57
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	6	14	10	19,5	114	2	20	94
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	12	4	5	9	228	8	80	148
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	15	23	20	29	285	11	110	175
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	18	21	24	30	342	14	140	202
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	1,5	12	10	22	29	0	0	29
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	4,5	14	12	20,5	86	2	17	69
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	7,5	11	12	19	143	5	47	96
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	10,5	18	17	25	200	8	77	123
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	13,5	12	19	23	257	11	107	150
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	15	27	29	35,5	285	12	122	163
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	20			<b>100</b>	380	17	172	208
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	1,5	6	5	11	29	0	0	28,5
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	4,5	9	11	17,5	86	1,7	17	68,5
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	7,5	9	13	18,5	143	4,7	47	95,5
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	10,5	14	14	21,5	200	7,7	77	122,5
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	15	24	27	33	285	12,2	122	163
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	20	28	25	34	380	17,2	172	208
S87	366	6,1	5	2	1	3	95	0	0	95
S87	366	6,1	9	21	14	25	171	2,9	29	142
S87	366	6,1	14	18	23	28	266	7,9	79	187
12 -ARPA (1986)	-	2,71	1,5	7	9	16	28,5	0	0	28,5
12 -ARPA (1986)	-	2,71	3	8	11	17	57	0,29	2,9	54,1
12 -ARPA (1986)	-	2,71	4,5			<b>100</b>	85,5	1,79	17,9	67,6
12 -ARPA (1986)	-	2,71	6	11	9	17,5	114	3,29	32,9	81,1
12 -ARPA (1986)	-	2,71	7,5	5	7	12	142,5	4,79	47,9	94,6
12 -ARPA (1986)	-	2,71	9	11	15	20,5	171	6,29	62,9	108,1
12 -ARPA (1986)	-	2,71	10,5	26	20	30,5	199,5	7,79	77,9	121,6
12 -ARPA (1986)	-	2,71	12	13	19	23,5	228	9,29	92,9	135,1
12 -ARPA (1986)	-	2,71	13,5	20	32	33,5	256,5	10,79	107,9	148,6
12 -ARPA (1986)	-	2,71	15	23	19	28,5	285	12,29	122,9	162,1
12 -ARPA (1986)	-	2,71	16,5	16	17	24	313,5	13,79	137,9	175,6
12 -ARPA (1986)	-	2,71	18	19	21	27,5	342	15,29	152,9	189,1
12 -ARPA (1986)	-	2,71	19,5	16	23	27	370,5	16,79	167,9	202,6
12 -ARPA (1986)	-	2,71	21	16	30	30,5	399	18,29	182,9	216,1
12 -ARPA (1986)	-	2,71	22,5	23	30	34	427,5	19,79	197,9	229,6
12 -ARPA (1986)	-	2,71	24	21	36	36	456	21,29	212,9	243,1
12 -ARPA (1986)	-	2,71	25,5	12	29	28	484,5	22,79	227,9	256,6

PROVE SPT										
Sondaggio	Quota slm	prof falda da p.c	Z <sub>inizio</sub> prova (m)	N2	N3	N'=15+0.5(Nspt-15)	sigma	zw (m)	u	sigma
26 - ARPA (1987)	-	2,71	1,5	4	7	11	28,5	0	0	28,5
26 - ARPA (1987)	-	2,71	3	12	18	22,5	57	0,29	2,9	54,1
26 - ARPA (1987)	-	2,71	4,5	6	12	16,5	85,5	1,79	17,9	67,6
26 - ARPA (1987)	-	2,71	6	6	9	15	114	3,29	32,9	81,1
26 - ARPA (1987)	-	2,71	7,5	8	14	18,5	142,5	4,79	47,9	94,6
26 - ARPA (1987)	-	2,71	9	11	19	22,5	171	6,29	62,9	108,1
26 - ARPA (1987)	-	2,71	12	9	14	19	228	9,29	92,9	135,1
26 - ARPA (1987)	-	2,71	13,5	12	17	22	256,5	10,79	107,9	148,6
26 - ARPA (1987)	-	2,71	15	9	13	18,5	285	12,29	122,9	162,1
26 - ARPA (1987)	-	2,71	16,5	12	23	25	313,5	13,79	137,9	175,6
26 - ARPA (1987)	-	2,71	18	11	18	22	342	15,29	152,9	189,1
26 - ARPA (1987)	-	2,71	19,5	14	20	24,5	370,5	16,79	167,9	202,6
26 - ARPA (1987)	-	2,71	21	11	23	24,5	399	18,29	182,9	216,1
33 - ARPA (1986)	-	3,3	1,5	13	21	34	28,5	0	0	28,5
33 - ARPA (1986)	-	3,3	3	29	40	42	57	0	0	57
33 - ARPA (1986)	-	3,3	4,5	5	7	12	85,5	1,2	12	73,5
33 - ARPA (1986)	-	3,3	6	18	23	28	114	2,7	27	87
33 - ARPA (1986)	-	3,3	7,5	38	42	47,5	142,5	4,2	42	100,5
33 - ARPA (1986)	-	3,3	9	35	40	45	171	5,7	57	114
33 - ARPA (1986)	-	3,3	10,5	29	33	38,5	199,5	7,2	72	127,5
33 - ARPA (1986)	-	3,3	12	27	38	40	228	8,7	87	141
33 - ARPA (1986)	-	3,3	13,5	5	5	10	256,5	10,2	102	154,5
33 - ARPA (1986)	-	3,3	19,5	13	17	22,5	370,5	16,2	162	208,5
33 - ARPA (1986)	-	3,3	21	19	32	33	399	17,7	177	222
33 - ARPA (1986)	-	3,3	22,5	33	43	45,5	427,5	19,2	192	235,5
33 - ARPA (1986)	-	3,3	24	39	47	50,5	456	20,7	207	249
33 - ARPA (1986)	-	3,3	25,5	38	42	47,5	484,5	22,2	222	262,5
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	3	4	4	8	57	0	0	57
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	6	12	7	17	114	2,7	27	87
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	9	5	7	12	171	5,7	57	114
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	12	24	22	30,5	228	8,7	87	141
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	15	11	20	23	285	11,7	117	168
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	18	13	24	26	342	14,7	147	195
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	21	23	29	33,5	399	17,7	177	222
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	24	20	16	25,5	456	20,7	207	249

**Tabella 6-** Interpretazione Prove SPT in corrispondenza Unità A.

Sondaggio	PROVE SPT			$\Phi$ (°)		E (Mpa)	
	Quota slm	prof falda da p.c	Z <sub>inizio</sub> prova (m)	Sowers	JNR	Denver 1	D'Appolonia
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	1,5	30	29	23,286	23,726
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	4,5	30	29	23,286	23,726
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	7,5	39	39	48,99	49,94
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	10,5				
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	15				
PNNT0IF01 (2018)	443,7	16,94	19,5				
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	4,5	30	29	24,042	24,497
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	7,5	40	40	50,502	51,482
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	10,5	41	41	53,148	54,1805
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	15				
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	20				
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	3	34	33	33,87	34,52
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	6	44	44	62,598	63,818
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	9	40	40	51,636	52,6385
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	12				
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	27	40	40	52,014	53,024
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	30	39	38	47,1	48,0125
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	1,5	34	33	33,87	34,52
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	4,5				
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	7,5	37	37	43,698	44,543
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	10,5	40	39	50,124	51,0965
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	15	39	39	49,368	50,3255
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	3	40	40	50,502	51,482
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	6	38	38	45,21	46,085
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	12	36	36	41,43	42,23
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	15	36	35	39,162	39,917
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	18	37	36	42,564	43,3865
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	1,5				
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	4,5	32	31	28,578	29,123
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	7,5	36	36	40,296	41,0735
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	15	39	38	47,1	48,0125
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	20	39	39	49,368	50,3255
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	4,5	29	28	21,774	22,184
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	7,5	37	36	42,186	43,001
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	10,5	30	29	24,798	25,268
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	15	35	35	38,784	39,5315
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	20	36	36	40,674	41,459

Sondaggio	PROVESPT			Φ (°)		E (Mpa)	
	Quota slm	prof falda da p.c	Z <sub>inizio</sub> prova (m)	Sowers	JNR	Denver I	D'Appolonia
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	3	31	31	27,822	28,352
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	12	36	36	40,674	41,459
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	15	40	40	51,636	52,6385
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	18	38	38	45,21	46,085
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	3	34	34	36,138	36,833
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	6	33	33	33,492	34,1345
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	12	31	30	25,554	26,039
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	15	36	36	40,674	41,459
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	18	36	36	41,43	42,23
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	1,5	34	34	35,382	36,062
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	4,5	34	33	34,248	34,9055
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	7,5	33	33	33,114	33,749
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	10,5	35	35	37,65	38,375
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	13,5	34	34	36,138	36,833
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	15	38	38	45,588	46,4705
SCNT0IR07 (2018)	371,2	2,82	20				
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	1,5	31	30	27,066	27,581
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	4,5	33	32	31,98	32,5925
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	7,5	33	33	32,736	33,3635
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	10,5	34	33	35,004	35,6765
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	15	37	37	43,698	44,543
SCNT0IU04 (2018)	393,2	2,8	20	38	37	44,454	45,314
S87	366	6,1	5	28,84	27,9	21,018	21,413
S87	366	6,1	9	35	34,5	37,65	38,375
S87	366	6,1	14	35,84	35,4	39,918	40,688
12 -ARPA (1986)	-	2,71	1,5	32,48	31,8	30,846	31,436
12 -ARPA (1986)	-	2,71	3	32,76	32,1	31,602	32,207
12 -ARPA (1986)	-	2,71	4,5				
12 -ARPA (1986)	-	2,71	6	32,9	32,25	31,98	32,5925
12 -ARPA (1986)	-	2,71	7,5	31,36	30,6	27,822	28,352
12 -ARPA (1986)	-	2,71	9	33,74	33,15	34,248	34,9055
12 -ARPA (1986)	-	2,71	10,5	36,54	36,15	41,808	42,6155
12 -ARPA (1986)	-	2,71	12	34,58	34,05	36,516	37,2185
12 -ARPA (1986)	-	2,71	13,5	37,38	37,05	44,076	44,9285
12 -ARPA (1986)	-	2,71	15	35,98	35,55	40,296	41,0735
12 -ARPA (1986)	-	2,71	16,5	34,72	34,2	36,894	37,604
12 -ARPA (1986)	-	2,71	18	35,7	35,25	39,54	40,3025
12 -ARPA (1986)	-	2,71	19,5	35,56	35,1	39,162	39,917
12 -ARPA (1986)	-	2,71	21	36,54	36,15	41,808	42,6155
12 -ARPA (1986)	-	2,71	22,5	37,52	37,2	44,454	45,314
12 -ARPA (1986)	-	2,71	24	38,08	37,8	45,966	46,856
12 -ARPA (1986)	-	2,71	25,5	35,84	35,4	39,918	40,688

Sondaggio	PROVE SPT			$\Phi$ (°)		E (Mpa)	
	Quota slm	prof falda da p.c	Z <sub>inizio</sub> prova (m)	Sowers	JNR	Denver 1	D'Appolonia
26 - ARPA (1987)	-	2,71	1,5	31,08	30,3	27,066	27,581
26 - ARPA (1987)	-	2,71	3	34,3	33,75	35,76	36,4475
26 - ARPA (1987)	-	2,71	4,5	32,62	31,95	31,224	31,8215
26 - ARPA (1987)	-	2,71	6	32,2	31,5	30,09	30,665
26 - ARPA (1987)	-	2,71	7,5	33,18	32,55	32,736	33,3635
26 - ARPA (1987)	-	2,71	9	34,3	33,75	35,76	36,4475
26 - ARPA (1987)	-	2,71	12	33,32	32,7	33,114	33,749
26 - ARPA (1987)	-	2,71	13,5	34,16	33,6	35,382	36,062
26 - ARPA (1987)	-	2,71	15	33,18	32,55	32,736	33,3635
26 - ARPA (1987)	-	2,71	16,5	35	34,5	37,65	38,375
26 - ARPA (1987)	-	2,71	18	34,16	33,6	35,382	36,062
26 - ARPA (1987)	-	2,71	19,5	34,86	34,35	37,272	37,9895
26 - ARPA (1987)	-	2,71	21	34,86	34,35	37,272	37,9895
33 - ARPA (1986)	-	3,3	1,5	37,52	37,2	44,454	45,314
33 - ARPA (1986)	-	3,3	3	39,76	39,6	50,502	51,482
33 - ARPA (1986)	-	3,3	4,5	31,36	30,6	27,822	28,352
33 - ARPA (1986)	-	3,3	6	35,84	35,4	39,918	40,688
33 - ARPA (1986)	-	3,3	7,5	41,3	41,25	54,66	55,7225
33 - ARPA (1986)	-	3,3	9	40,6	40,5	52,77	53,795
33 - ARPA (1986)	-	3,3	10,5	38,78	38,55	47,856	48,7835
33 - ARPA (1986)	-	3,3	12	39,2	39	48,99	49,94
33 - ARPA (1986)	-	3,3	13,5	30,8	30	26,31	26,81
33 - ARPA (1986)	-	3,3	19,5	34,3	33,75	35,76	36,4475
33 - ARPA (1986)	-	3,3	21	37,24	36,9	43,698	44,543
33 - ARPA (1986)	-	3,3	22,5	40,74	40,65	53,148	54,1805
33 - ARPA (1986)	-	3,3	24	42,14	42,15	56,928	58,0355
33 - ARPA (1986)	-	3,3	25,5	41,3	41,25	54,66	55,7225
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	3	30,24	29,4	24,798	25,268
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	6	32,76	32,1	31,602	32,207
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	9	31,36	30,6	27,822	28,352
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	12	36,54	36,15	41,808	42,6155
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	15	34,44	33,9	36,138	36,833
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	18	35,28	34,8	38,406	39,146
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	21	37,38	37,05	44,076	44,9285
106855 - ARPA (2003)	-	3,3	24	35,14	34,65	38,028	38,7605

Nelle seguenti Figure 2÷6 si riportano in forma grafica gli andamenti con la profondità dei valori ottenuti dalle prove SPT e le relative elaborazioni in termini di parametri meccanici (angolo d'attrito e deformabilità), che sono poi state utilizzate ai fini della determinazione dei parametri caratteristici per il litotipo in esame.

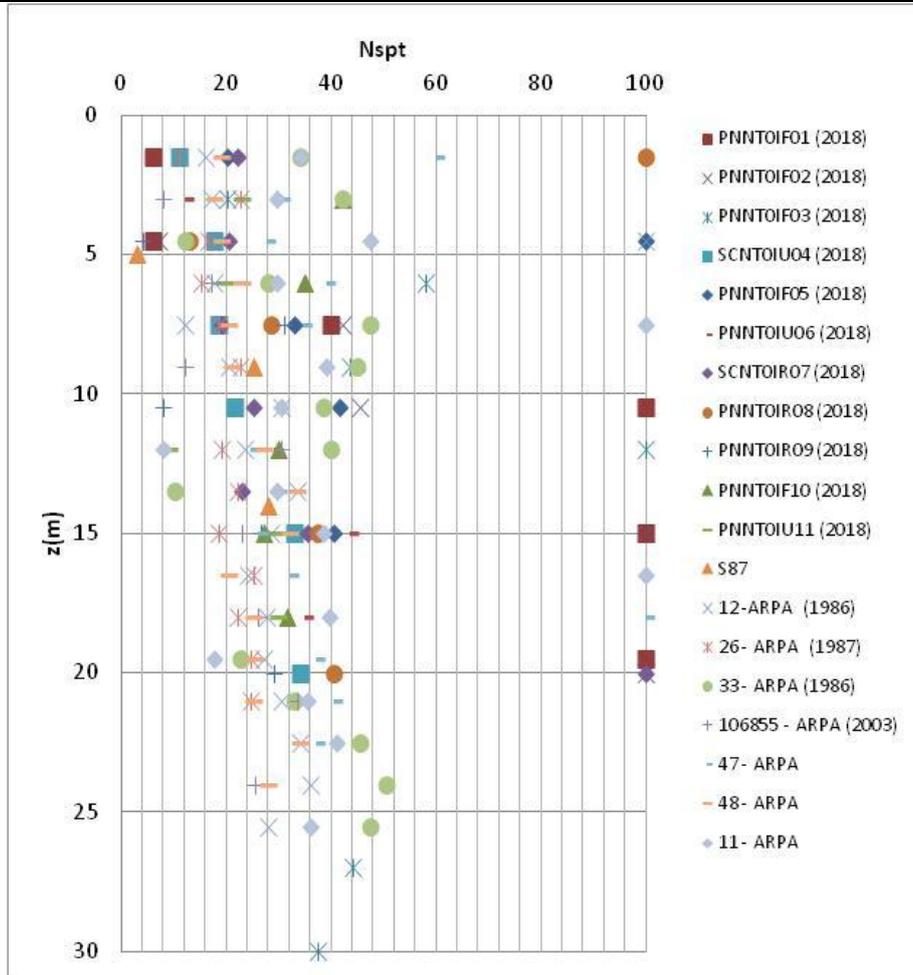


Figura 2- Nspt

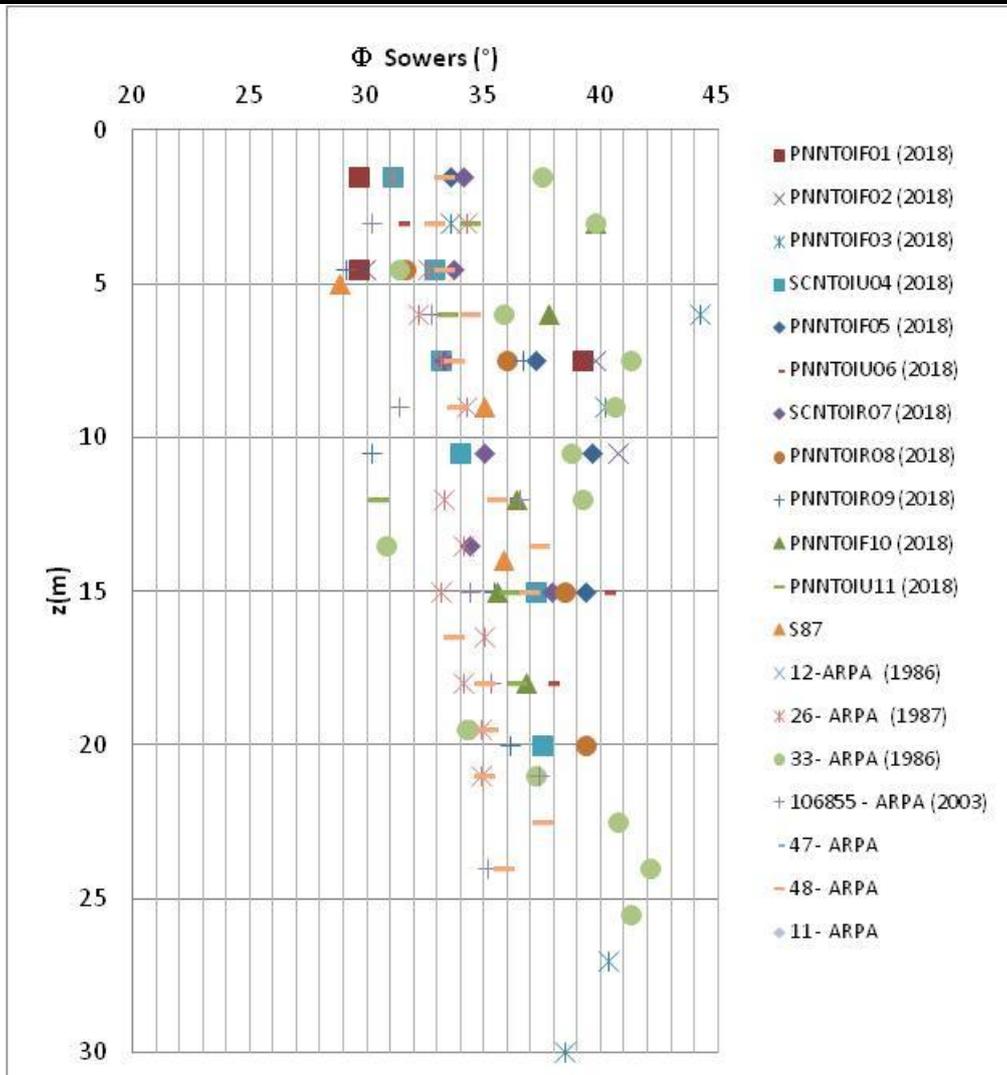


Figura 3- Angolo d'attrito - Sowers

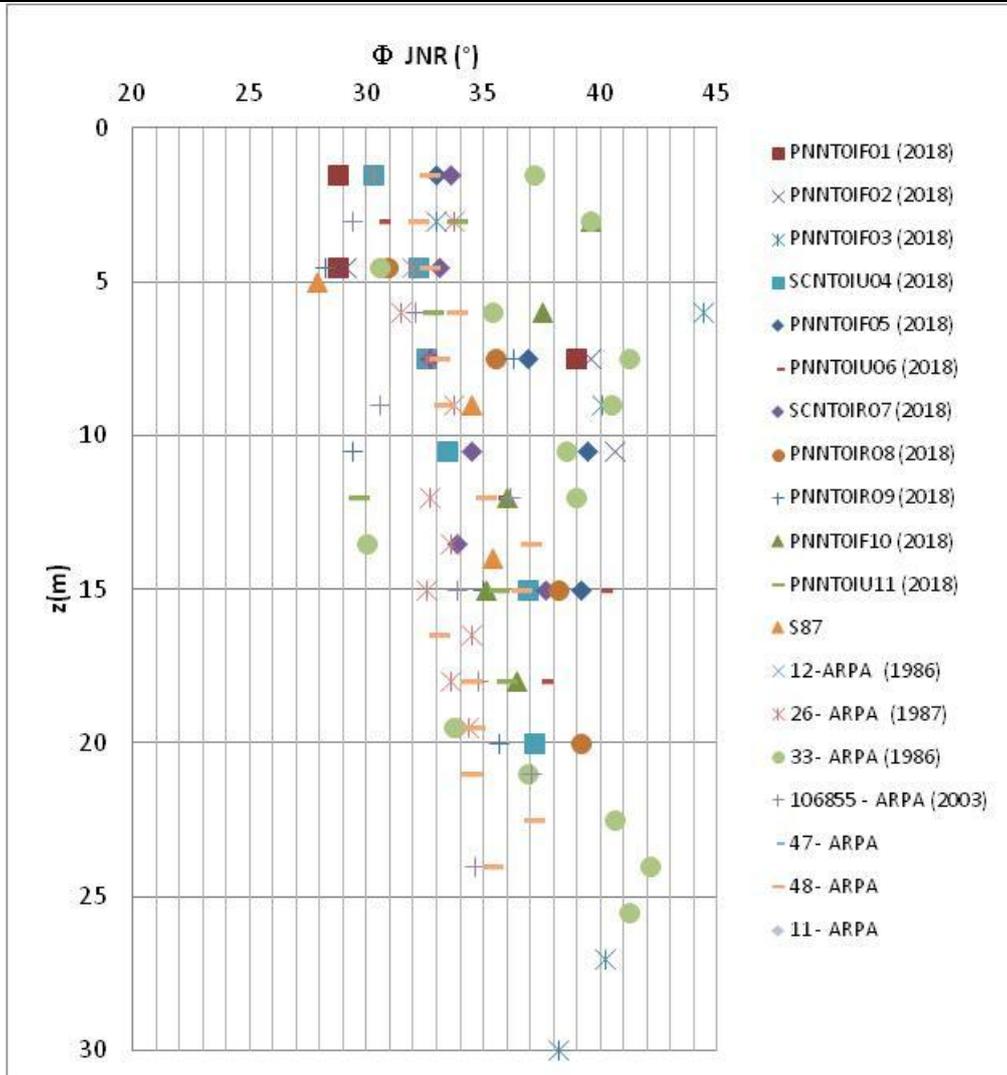


Figura 4- Angolo d'attrito - JNR

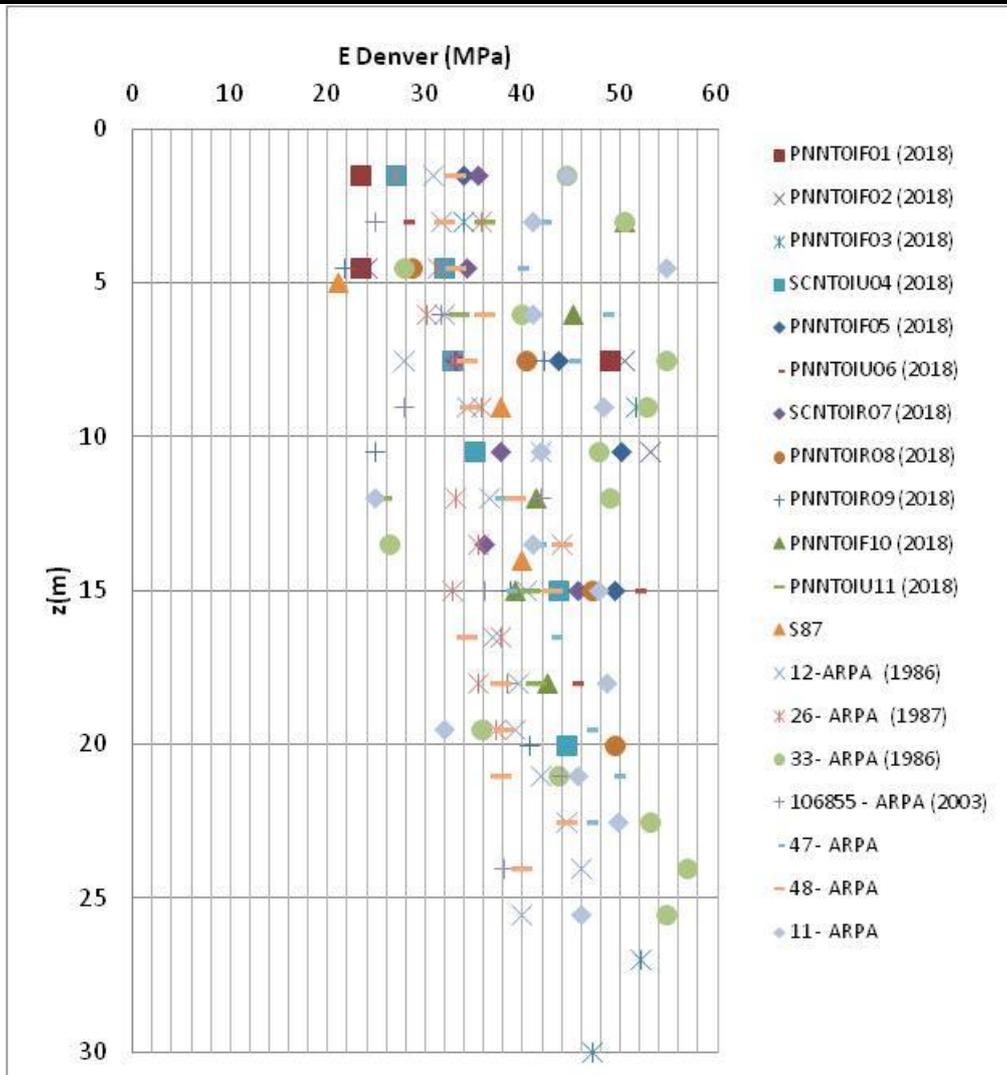
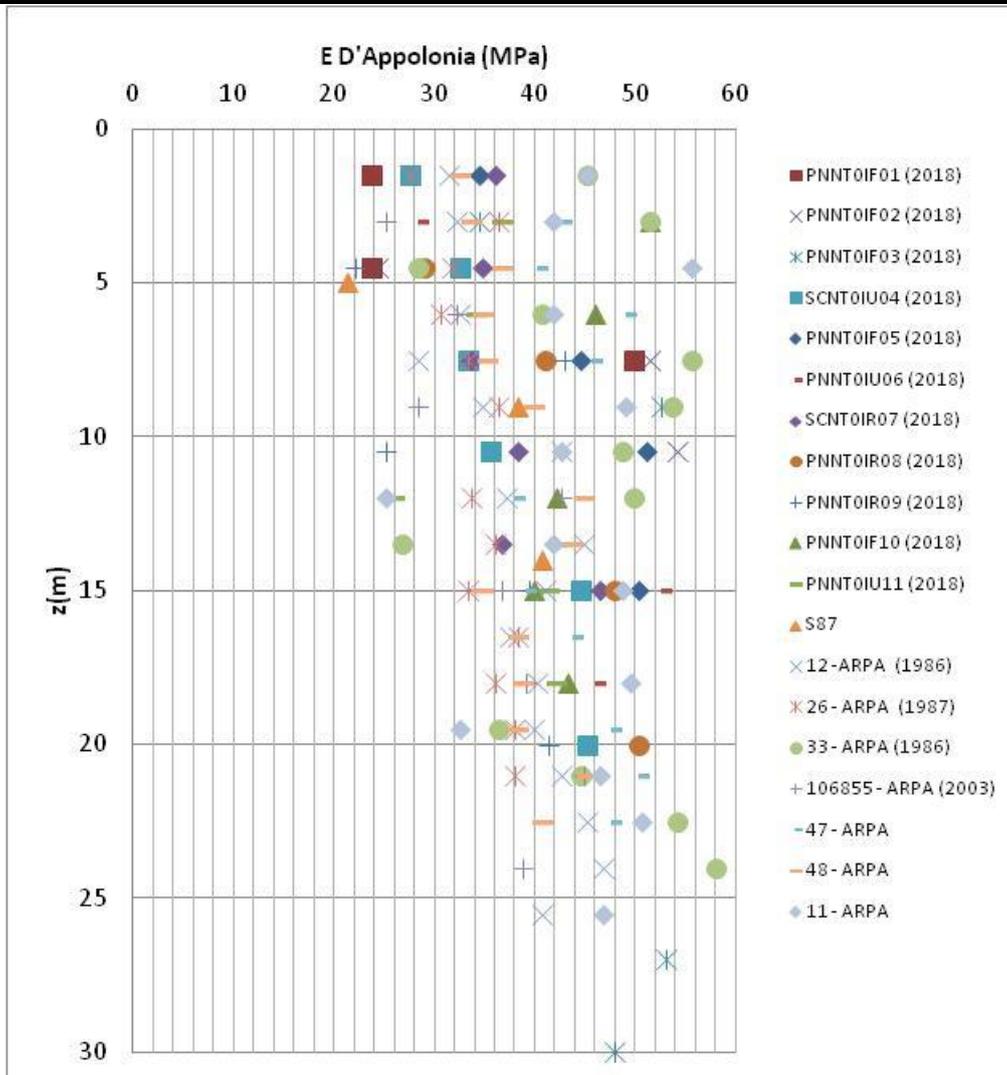
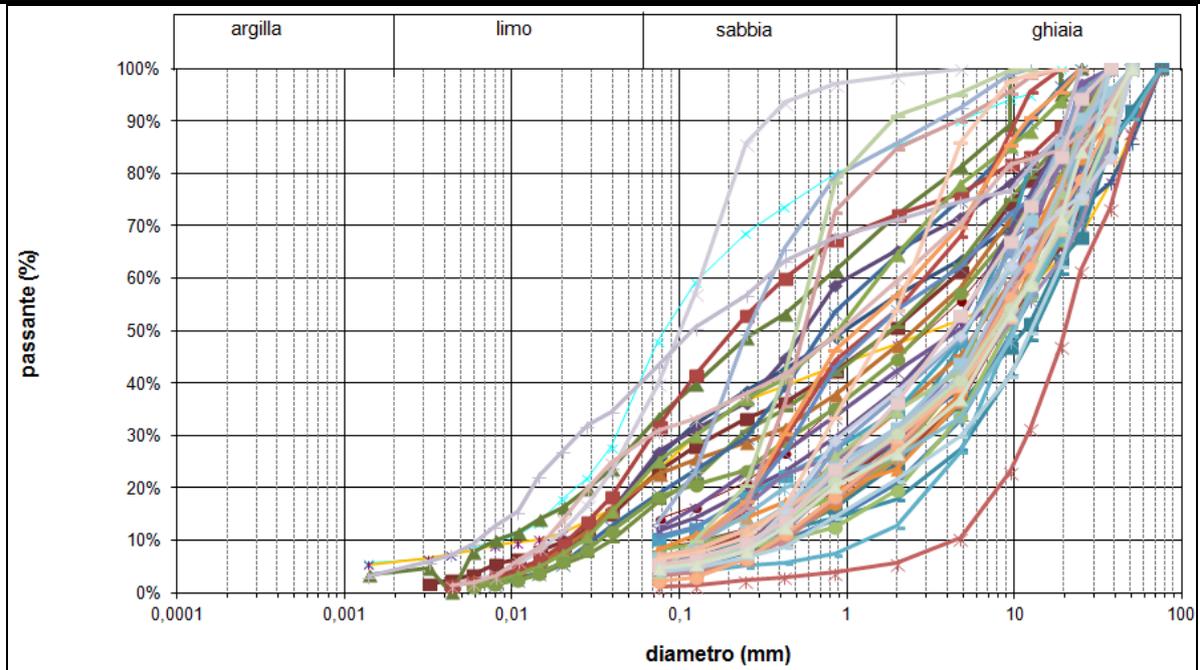


Figura 5- Modulo di rigidità - Denver



**Figura 6-** Modulo di rigidezza – D'Appolonia

Nella seguente figura 7 si riportano i fusi granulometrici rilevati nei campioni rimaneggiati prelevati in corrispondenza delle prove Nspt, dai quali si evince come si tratti in prevalenza di sabbie e ghiaie a tratti debolmente limose.



PNNT0IF01 CR1 1,5-2,0	PNNT0IF01 CR2 4,5-5,0	PNNT0IF01 CR3 7,5-8,0	PNNT0IF01 CR4 10,5-11,0	PNNT0IF01 CR5 15,0-15,5
PNNT0IF01 CR6 19,5-20,0	PNNT0IF02 CR2 4,5-5,0	PNNT0IF02 CR3 7,5-8,0	PNNT0IF02 CR4 10,5-11,0	PNNT0IF02 CR5 15,0-15,5
PNNT0IF02 CR6 19,5-20,0	PNNT0IF03 CR1 3,0-3,5	PNNT0IF03 CR2 6,0-6,5	PNNT0IF03 CR3 9,0-9,5	PNNT0IF03 CR7 21,0-21,5
PNNT0IF03 CR9 27,0-27,5	PNNT0IF03 CR10 29,5-30,0	PNNT0IF05 CR1 1,5-2,0	PNNT0IF05 CR2 4,5-5,0	PNNT0IF05 CR3 7,5-8,0
PNNT0IF05 CR4 10,5-11,0	PNNT0IF05 CR5 15,0-15,5	PNNT0IF10 CR1 3,0-3,5	PNNT0IF10 CR2 6,0-6,5	PNNT0IF10 CR4 12,0-12,5
PNNT0IF10 CR6 18,0-18,5	PNNT0IF08 CR1 1,5-2,0	PNNT0IF08 CR2 4,5-5,0	PNNT0IF08 CR3 7,5-8,0	PNNT0IF08 CR5 15,0-15,5
PNNT0IF08 CR6 19,5-20,0	PNNT0IF09 CR2 4,5-5,0	PNNT0IF09 CR3 7,5-8,0	PNNT0IF09 CR4 10,5-11,0	PNNT0IF09 CR5 15,0-15,5
PNNT0IF09 CR6 19,5-20,0	PNNT0IU06 CR1 3,0-3,5	PNNT0IU06 CR4 12,0-12,3	PNNT0IU06 CR5 15,0-15,5	PNNT0IU06 CR6 18,0-18,5
PNNT0IU11 CR1 3,0-3,5	PNNT0IU11 CR2 6,0-6,5	PNNT0IU11 CR4 12,0-12,5	PNNT0IU11 CR5 15,0-15,5	PNNT0IU11 CR6 18,0-18,5
SCNT0IR07 CR1 1,5-2,0	SCNT0IR07 CR2 4,5-5,0	SCNT0IR07 CR3 7,5-8,0	SCNT0IR07 CR4 10,5-11,0	SCNT0IR07 CR5 15,0-15,5
SCNT0IR07 CR6 19,5-20,0	SCNT0IU04 CR1 1,5-2,0	SCNT0IU04 CR4 4,5-5,0	SCNT0IU04 CR1 7,5-8,0	SCNT0IU04 CR1 10,5-11,0
SCNT0IU04 CR1 15,0-15,5	SCNT0IU04 CR1 19,5-20,0			

Figura 7- Granulometrie

### 7.2.1.2 Parametri caratteristici

Sulla base dei valori dei risultati delle prove in sito (prove penetrometriche dinamiche) e in ragione delle caratteristiche granulometriche dei depositi è stata definita la parametrizzazione per la stessa Unità.

Scelta dei parametri caratteristici (z da 0 a 5 m dal p.c.):

	$\varphi$ (°)	E (kPa)	$\gamma$ (MPa)	$c_u$ (MPa)	$c'$ (kPa)	k (cm/s)
min	28	21				1,74E-04
max	45	65				2,75E-03
media	34	35				1,08E-03
mediana	33	33				3,27E-04
valore k						

Scelta dei parametri caratteristici (z > 5 m dal p.c.):

	$\varphi$ (°)	E (kPa)	$\gamma$ (MPa)	$c_u$ (MPa)	$c'$ (kPa)	k (cm/s)
min	29	25				1,22E-03
max	45	64				6,50E-03
media	36	42				2,84E-03
mediana	36	41				2,10E-04
valore k						

Riepilogo dei parametri caratteristici (z da 0 a 5 m dal p.c.):

- Coesione efficace  $c' = 0$
- Angolo di resistenza al taglio  $\varphi' \cong 30^\circ \div 34^\circ$
- Modulo di Young  $E' \cong 20 \div 30 \text{ MPa}$
- Peso per unità di volume  $\gamma_{nat} \cong 19 \div 20 \text{ kN/m}^3$
- Numero colpi  $N_{spt} \quad N_{spt} = 10 \div 20$

Riepilogo dei parametri caratteristici (z > 5 m dal p.c.):

- Coesione efficace  $c' = 0$
- Angolo di resistenza al taglio  $\varphi' \cong 35^\circ \div 37^\circ$

- Modulo di Young  $E' \cong 35 \div 45 \text{ MPa}$
- Peso per unità di volume  $\gamma_{nat} \cong 19.0 \div 20.0 \text{ kN/m}^3$
- Numero colpi Nspt  $Nspt=25 \div 35$

### 7.2.2 Unità B - Limi sabbiosi

I depositi dell'unità B sono presenti come elementi lentiformi, anche di spessore metrico, rilevati lungo tutto lo sviluppo del tracciato; tali depositi sono caratterizzati da un prevalente contenuto di frazione fine a granulometria limosa. Sono indicati nelle seguenti tabelle i valori ottenuti dalle prove SPT e le relative elaborazioni in termini di parametri meccanici, che sono poi state utilizzate ai fini della determinazione dei parametri caratteristici per il litotipo in esame.

#### 7.2.2.1 Prove in sito: SPT

**Tabella 7-** Prove SPT in corrispondenza Unità B.

PROVE SPT										
Sondaggio	Quota slm	prof falda da p.c	$Z_{inizio}$ prova (m)	N2	N3	$N'=15+0.5(Nspt-15)$	sigma (kPa)	zw (m)	u (kPa)	sigma' (kPa)
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	18	8	10	16,5	288	11	112	176
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	21	11	13	19,5	336	14	142	194
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	24	16	15	23	384	17	172	212
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	20	13	12	20	320	15	147	173
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	9	5	6	11	144	6	59	85
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	10,5	4	6	10	168	8	80	88
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	6	2	3	5	96	3	33	63
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	9	2	4	6	144	6	63	81
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	9	4	7	11	144	5	50	94
S87	366	6,1	19	2	1	3	304	12,9	129	175
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	1,5	2	1	3	24	0	0	24
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	15	7	9	15,5	240	8,2	82	158
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	1,5	2	2	4	24	0	0	24

**Tabella 8-** Interpretazione Prove SPT in corrispondenza Unità B.

PROVE SPT									
Sondaggio	Quota slm	prof falda da p.c	Z <sub>inizio prova</sub> (m)	Cu kPa (Terzaghi)	Cu kPa (Sanglerat)	Eu (Mpa) TERZAGHI	Eu (Mpa) SANGLERAT	E' (Mpa) TERZAGHI	E' (Mpa) SANGLERAT
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	18	110,55	165	33,165	49,5	27,626445	41,2335
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	21	130,65	195	39,195	58,5	32,649435	48,7305
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	24	154,1	230	46,23	69	38,50959	57,477
PNNT0IF05 (2018)	383,6	5,32	20	134	200	40,2	60	33,4866	49,98
PNNT0IF10 (2018)	356,2	3,13	9	73,7	110	22,11	33	18,41763	27,489
PNNT0IR08 (2018)	363,1	2,52	10,5	67	100	20,1	30	16,7433	24,99
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	6	33,5	50	10,05	15	8,37165	12,495
PNNT0IU06 (2018)	374,6	2,71	9	40,2	60	12,06	18	10,04598	14,994
PNNT0IU11 (2018)	352,4	3,98	9	73,7	110	22,11	33	18,41763	27,489
S87	366	6,1	19	20,1	30	6,03	9	5,02299	7,497
PNNT0IF02 (2018)	421,1	3,3	1,5	20,1	30	6,03	9	5,02299	7,497
PNNT0IF03 (2018)	399,2	6,8	15	103,85	155	31,155	46,5	25,952115	38,7345
PNNT0IR09 (2018)	357,6	2,66	1,5	26,8	40	8,04	12	6,69732	9,996

Nelle seguenti figure 8÷13 si riportano in forma grafica gli andamenti con la profondità dei valori ottenuti dalle prove SPT e le relative elaborazioni in termini di parametri meccanici (angolo d'attrito e deformabilità), che sono poi state utilizzate ai fini della determinazione dei parametri caratteristici per il litotipo in esame.

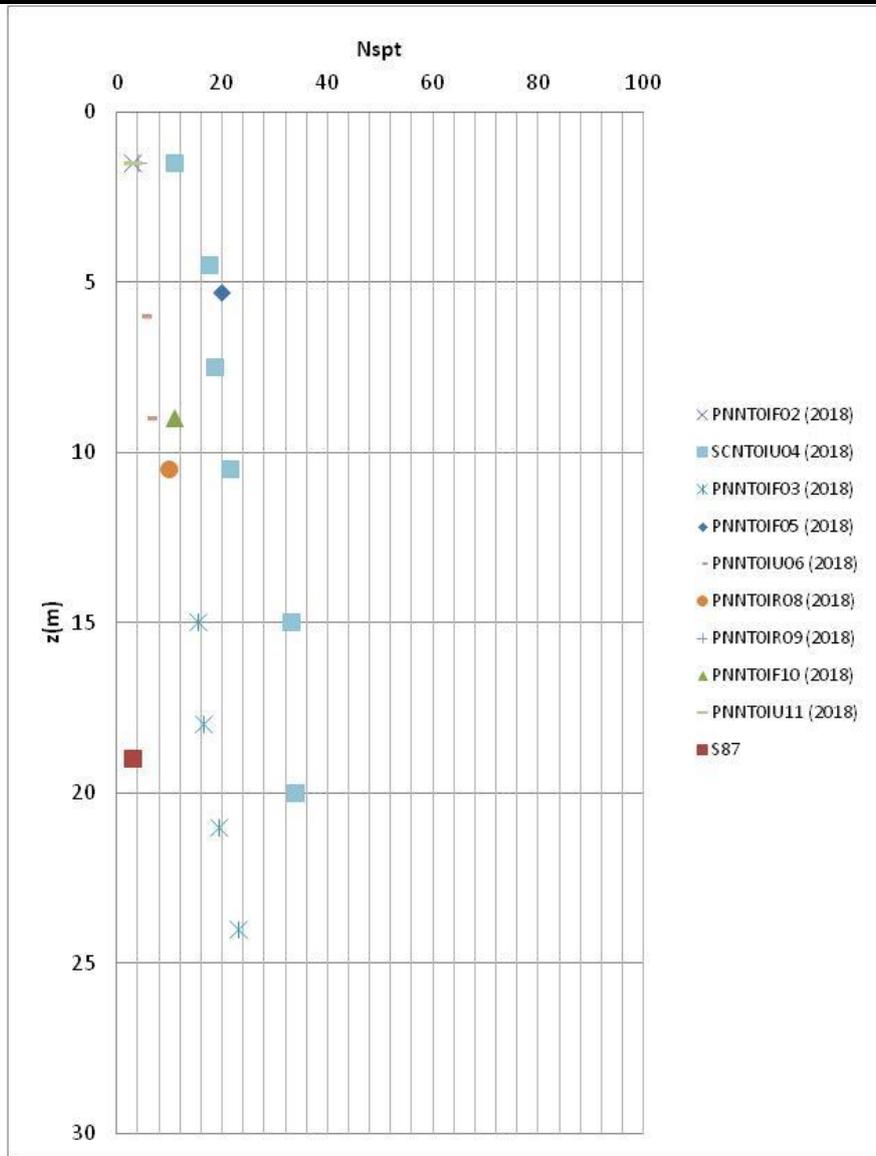
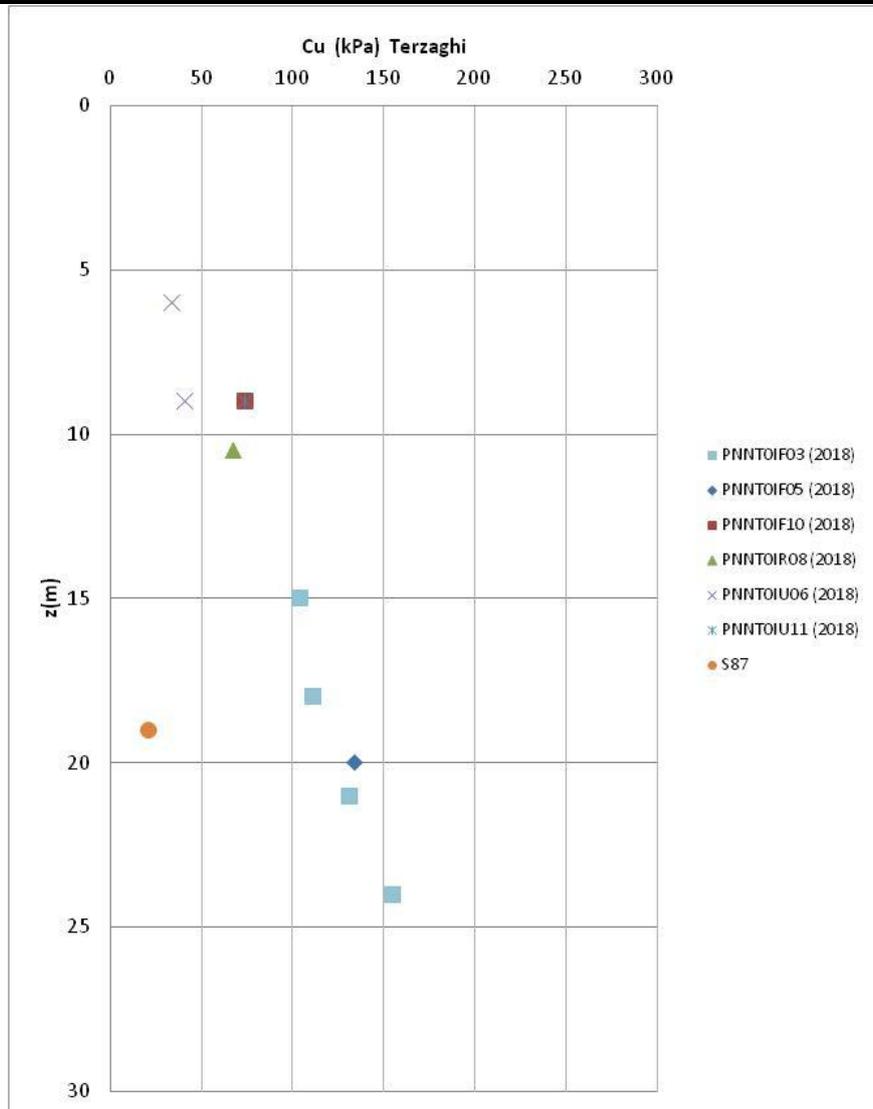


Figura 8- Nspt



**Figura 9- Cu - Terzaghi**

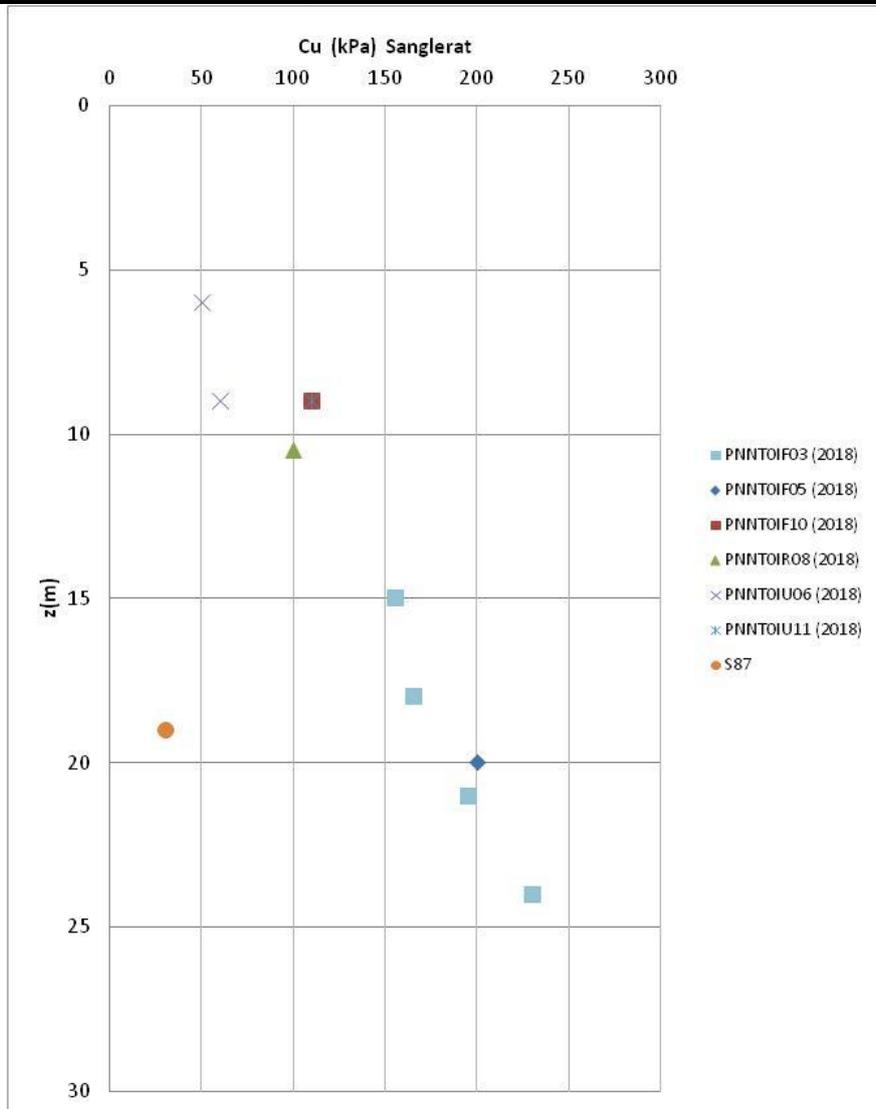


Figura 10- Cu - Sanglerat

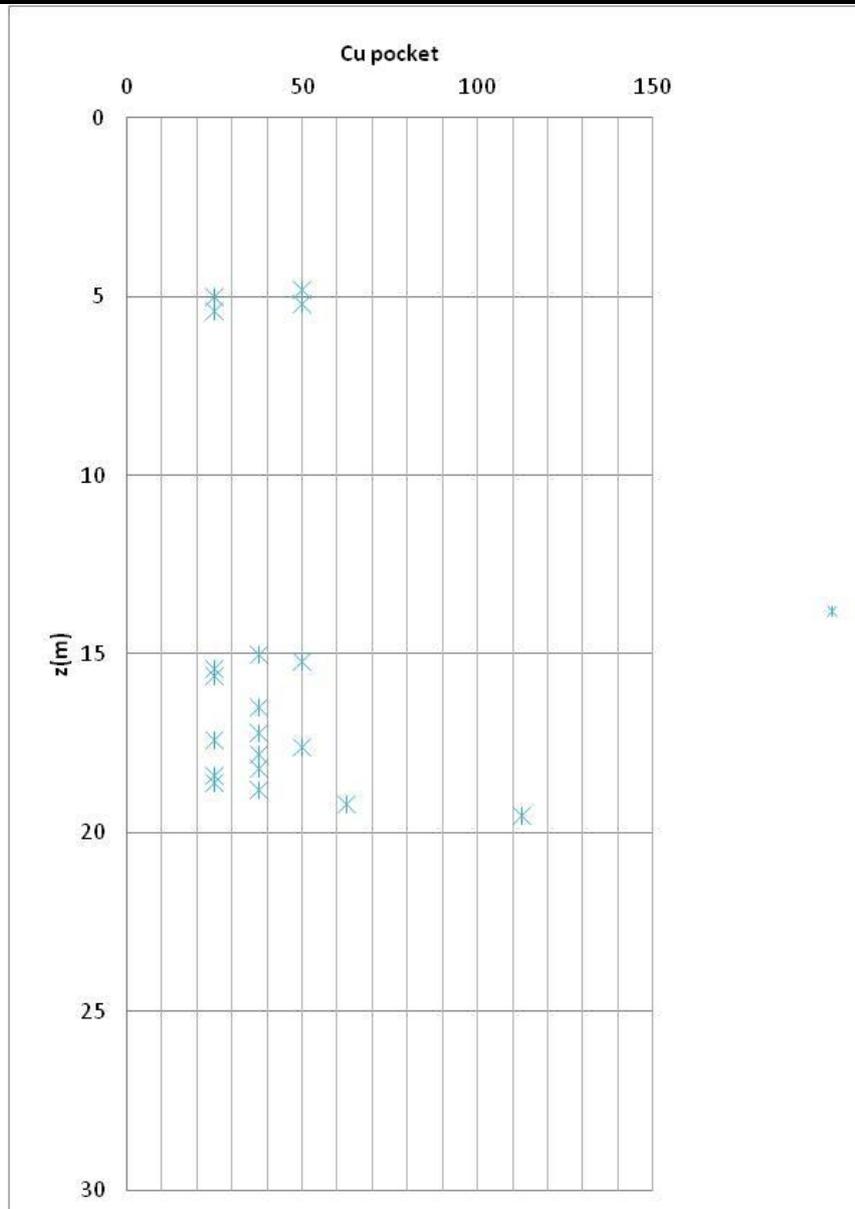
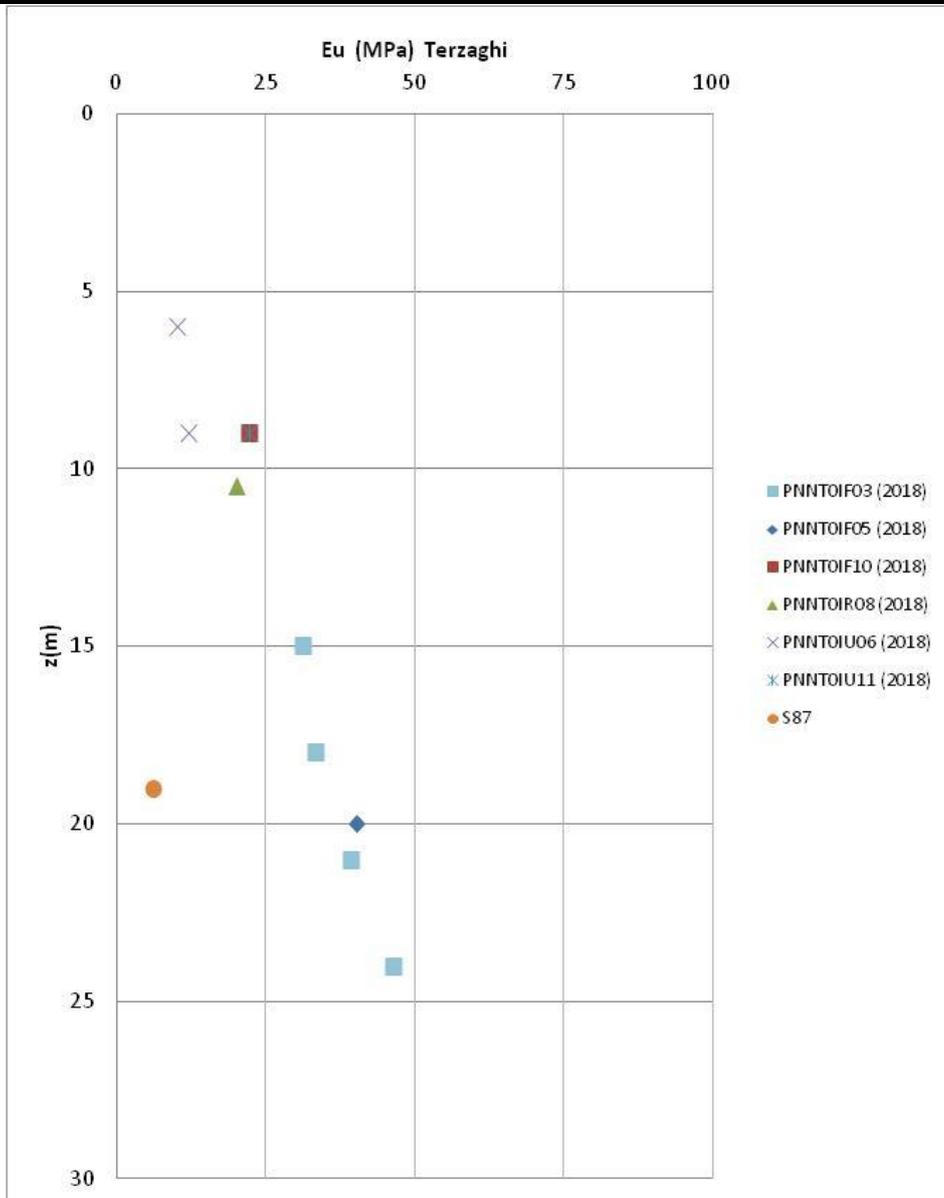
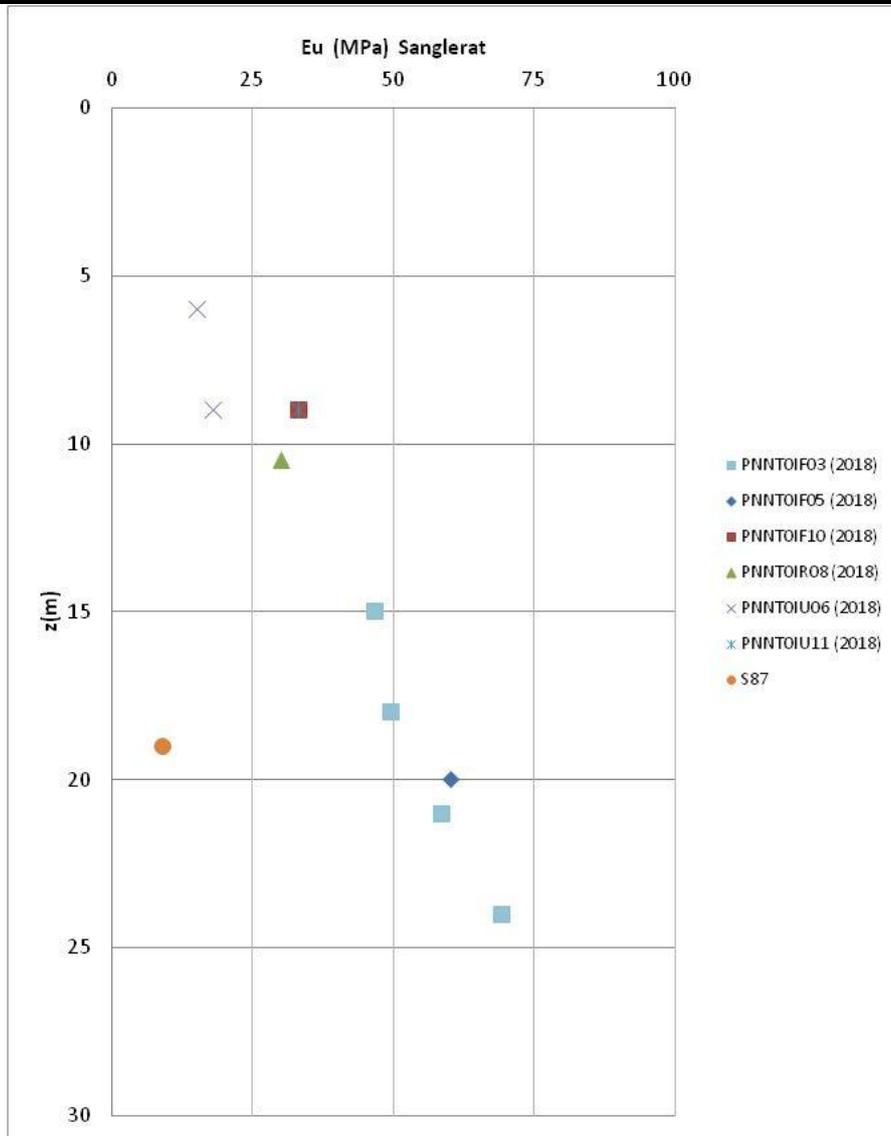


Figura 11- Cu – Pocket Pentrometer

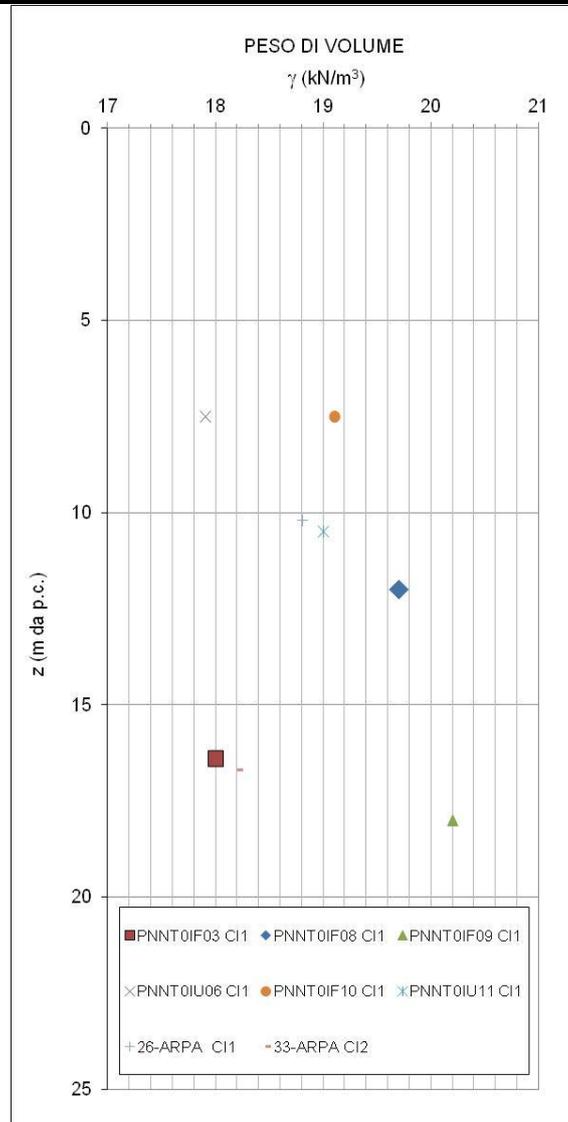


**Figura 12- Eu – Terzaghi**



**Figura 13-** Eu – Sanglerat

Nelle seguenti figure 14÷18 si riportano i risultati delle prove di laboratorio eseguite nei campioni prelevati nell'ambito dell'unità B.



**Figura 14-** Peso di volume

Dall'esame della figura 15 si osservano valori del peso di volume compresi tra 18.0 e 20.0 kN/m<sup>3</sup>.

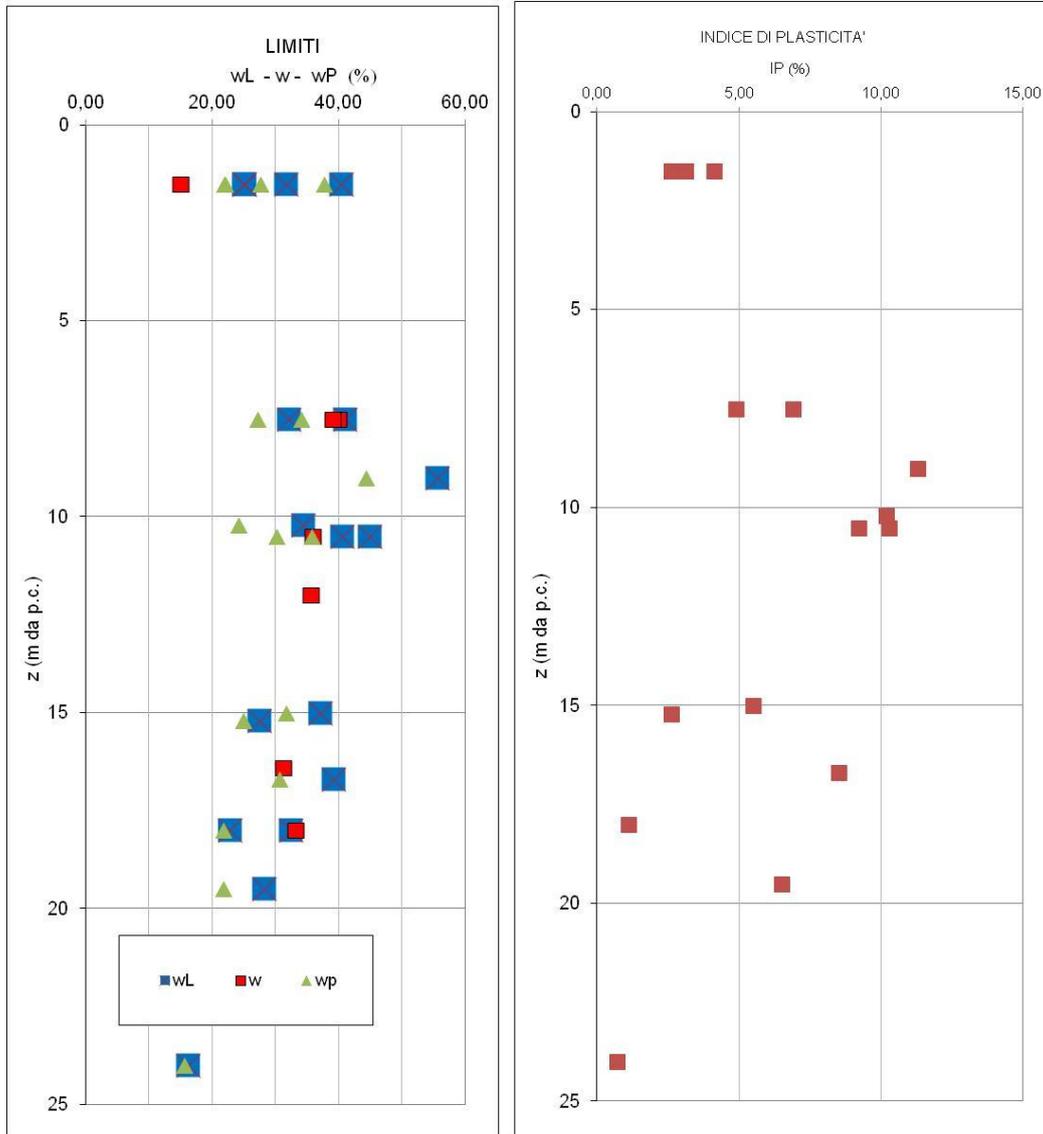
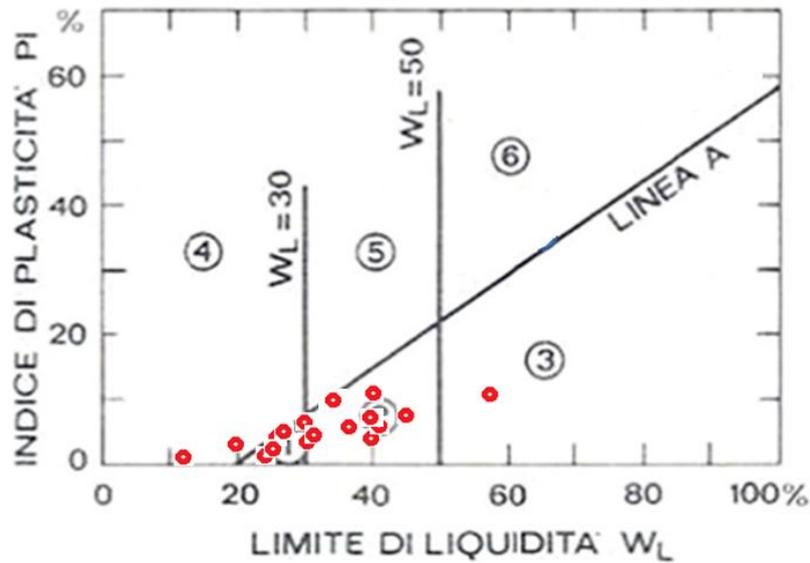


Figura 15- Limiti di Atterberg, contenuto d'acqua e indice di plasticità

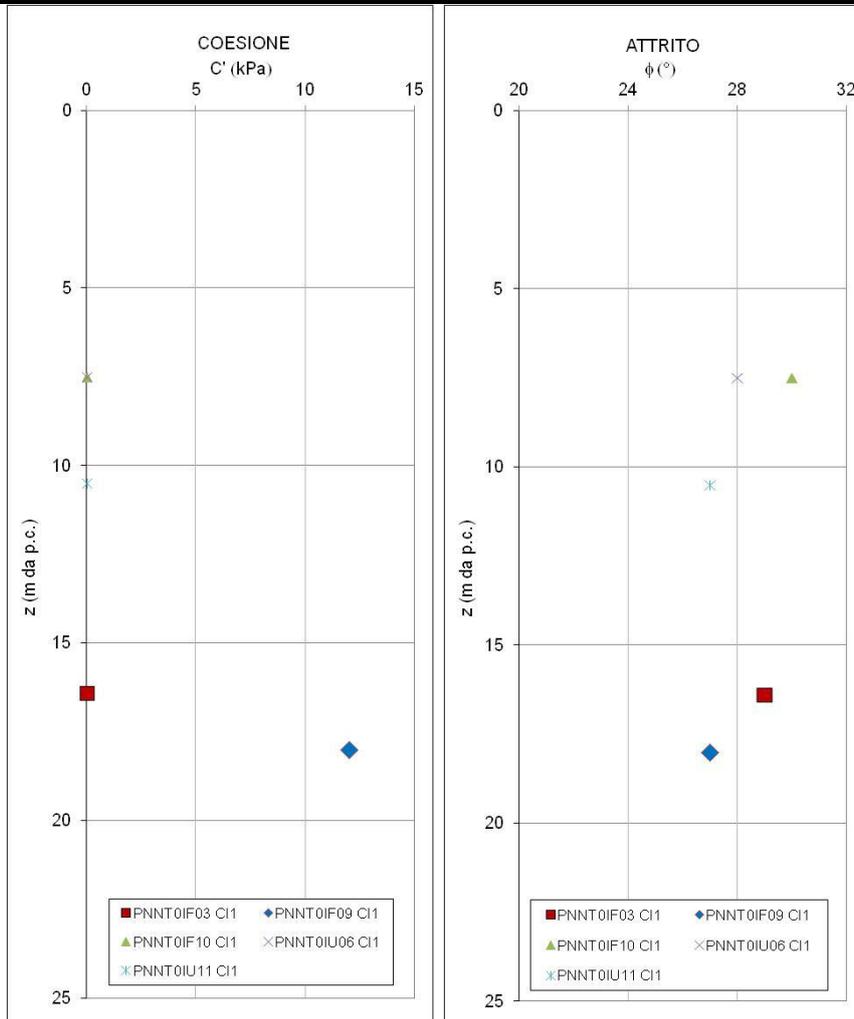
Carta di plasticità di Casagrande



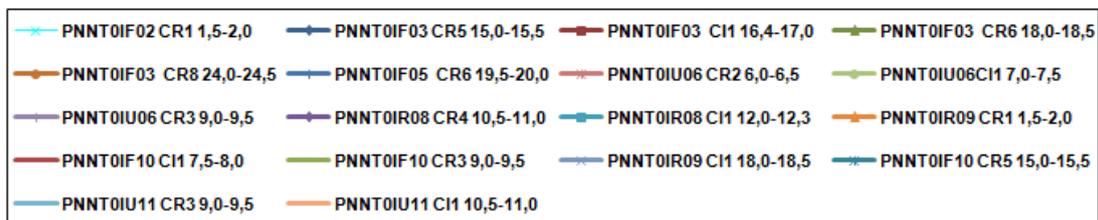
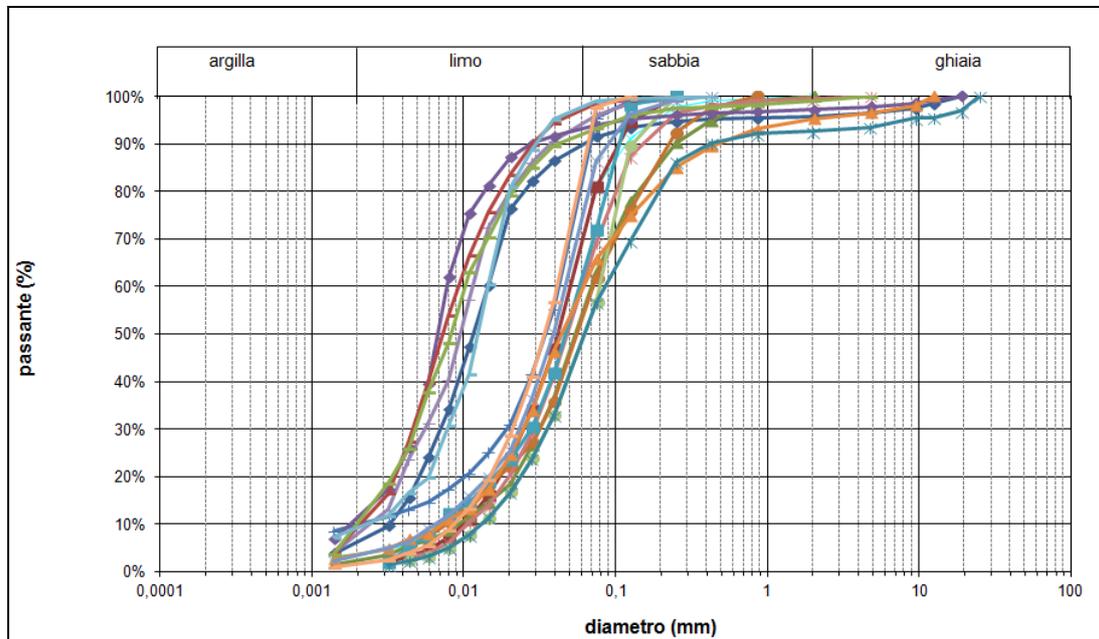
- ① Limi inorganici di bassa compressibilità
- ② Limi inorganici di media compressibilità e limi organici
- ③ Limi inorganici di alta compressibilità e argille organiche
- ④ Argille inorganiche di bassa plasticità
- ⑤ Argille inorganiche di media plasticità
- ⑥ Argille inorganiche di alta plasticità

**Figura 16-** Carta di Casagrande

Dall'esame delle figure 16 e 17 si osservano valori del contenuto d'acqua compresi tra il 20% e 40%, i valori dei limiti sono in linea con le caratteristiche di plasticità dei depositi, trattandosi di limi caratterizzati da medio-bassa compressibilità.



**Figura 17-** Resistenza – coesione e angolo d'attrito



**Figura 18-** Granulometrie

Nella figura 18 sono riportati i fusi granulometrici rilevati nei campioni rimaneggiati e indisturbati prelevati, dai quali si evince come si tratti in prevalenza di limi e limi sabbiosi.

I valori della coesione e dell'angolo d'attrito sono compresi tra rispettivamente tra 0 e 10 kPa e tra 26° e 30°.

	$\phi$ (°)	$E_u$ (kPa)	$E'$ (kPa)	$\nu$ (MPa)	$c_u$ /MPa	$c'$ (kPa)	$k$ (cm/s)
<b>min</b>	26	6	5	18	20	0	4,43E-04
<b>max</b>	30	69	57	20,2	230	10	5,94E-04
<b>media</b>	28	28	24	19,1	95	5	5,19E-04
<b>mediana</b>	28	26	22	19,65	87	5	5,56E-04

Riepilogo dei parametri caratteristici:

- Coesione efficace  $c' = 0 \div 5$  kPa
- Angolo di resistenza al taglio  $\varphi' \cong 26^\circ \div 30^\circ$
- Modulo di deformabilità non drenato  $E_u \cong 25 \div 30$  MPa
- Modulo di deformabilità drenato  $E' \cong 20 \div 25$  MPa
- Coesione non drenata  $c_u \cong 80 \div 100$  kPa
- Peso per unità di volume  $\gamma_{nat} \cong 18.0 - 20.0$  kN/m<sup>3</sup>

## 8 RIEPILOGO DEI PARAMETRI

Si procede quindi alla definizione dei modelli geotecnici di riferimento che saranno adottati per la progettazione e la verifica delle strutture in progetto. Nelle tabelle che seguono si riportano i parametri caratteristici adottati.

**Tabella 9** - Modello geotecnico

Tipologia	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi$ (°)	$c_u$ (kPa)	$E_u$ (MPa)	$E'$ (MPa)	$k$ (cm/s)
Unità A – Sabbie e ghiaie	19.0-20.0	0	30-34 (da 0 a 5m dal p.c.) 35-37 (>5 m dal p.c.)	-	-	20-30 (da 0 a 5 m dal p.c.) 35-45 (>5 m dal p.c.)	$1.08 \cdot 10^{-3}$ (da 0 a 5m dal p.c.) $2.84 \cdot 10^{-3}$ (>5 m dal p.c.)
Unità B – Limi sabbiosi	18.0-20.0	0-5	26-30	80-100	25-30	20-25	$5.19 \cdot 10^{-4}$

## 9 CLASSIFICAZIONE SISMICA E STABILITA' DEL SITO

### 9.1 Definizione dell'analisi sismica

L'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I risultati dello studio di pericolosità sono forniti, in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km) e nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$ , del valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale  $F_0$ , del periodo di inizio del tratto costante dello spettro in accelerazione orizzontale  $T_c^*$ ;
- per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi.

Pertanto, per individuare, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche occorre fissare:

- la vita di riferimento  $V_R$  della costruzione;
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{V_R}$  associate a ciascuno degli stati limite considerati.

Infatti, fissata la vita di riferimento  $V_R$ ,  $T_R$  è esprimibile in funzione di  $P_{V_R}$  mediante l'espressione:

La vita di riferimento è calcolata come:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

dove  $V_N$  è la vita nominale dell'opera e  $C_U$  la classe d'uso.

Si è posto  $V_N = 50 \text{ anni}$  e  $C_U = 1.0$ .

Nota l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido  $a_g$ , l'accelerazione di picco  $a_{\max}$  è valutata sulla base della risposta sismica locale:

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

dove  $S_S$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione stratigrafica,  $S_T$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione topografica.

Sulla base della vigente normativa, la classificazione sismica del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1,H} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

dove  $h_i$  e  $V_i$  indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio  $\gamma < 10^{-6}$ ) dello strato  $i$ -esimo, per un totale di  $N$  strati presenti.

Nel seguito si riportano le categorie di suolo definite dalla normativa vigente:

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

Nell'ambito del presente studio, le categorie di sottosuolo per l'area di intervento sono state definite in funzione delle n. 29 prove MASW appositamente realizzate durante la fase progettuale. Con particolare riferimento alle prove eseguite nell'ambito dei siti in progetto:

Condove: MASW 18-19-20

Bruzolo: MASW 8-9

**Tabella 10 – Sintesi prove geofisiche**

	MASW 1	MASW 2	MASW 3	MASW 4	MASW 5	MASW 6	MASW 7	MASW 8
$V_{Seq}$ (m/s)	554	466	413	404	389	309	361	371
Categoria di suolo di fondazione	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>E</b>	<b>B</b>	<b>B</b>

	MASW 9	MASW 10	MASW 11	MASW 12	MASW 13	MASW 14	MASW 15	MASW 16
$V_{Seq}$ (m/s)	334	312	354	390	302	326	416	336
Categoria di suolo di fondazione	<b>E</b>	<b>E</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>E</b>	<b>B</b>	<b>E</b>

	MASW 17	MASW 18	MASW 19	MASW 20	MASW 21	MASW 22	MASW 23	MASW 24
$V_{Seq}$ (m/s)	338	327	393	354	396	416	315	315
Categoria di suolo di fondazione	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>C</b>

	MASW 25	MASW 26	MASW 27	MASW 28	MASW 29
$V_{Seq}$ (m/s)	427	335	353	351	512
Categoria di suolo di fondazione	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>B</b>

Per quanto concerne le caratteristiche della superficie topografica, essendo le aree in oggetto localizzate in ambito di pianura e non essendovi particolari emergenze topografiche che possano dar luogo ad effetti di amplificazione sismica locale, le morfologie possono essere ricondotte ad una delle configurazioni superficiali semplici previste nel D.M. 17/01/2018.

In particolare, i siti in oggetto possono essere classificati di categoria T1, “Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$ ”, caratterizzata da un coefficiente di amplificazione topografica  $S_T = 1,0$ .

Si assume per le aree in progetto la categoria di sottosuolo di fondazione “C” relativamente al sito di Condove e categoria “E” relativamente al sito di Bruzolo.

## Sito di Condove

**FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO**

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE  
7,3087

LATITUDINE  
45,1183

Ricerca per comune

REGIONE  
Piemonte

PROVINCIA  
Torino

COMUNE  
Condove

Elaborazioni grafiche

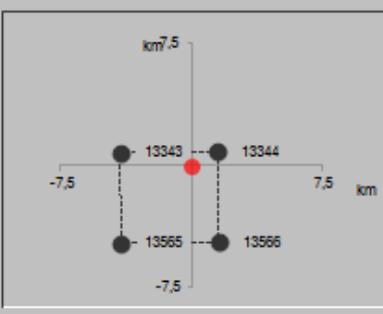
Grafici spettri di risposta ||>

Variabilità dei parametri ||>

Elaborazioni numeriche

Tabella parametri ||>

Nodi del reticolo intorno al sito



Reticolo di riferimento

Controllo sul reticolo

- Sito esterno al reticolo
- Interpolazione su 3 nodi
- Interpolazione corretta



Interpolazione

superficie rigata

La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO

**FASE 1**

FASE 2

FASE 3

## FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) -  $V_N$   info

Coefficiente d'uso della costruzione -  $C_U$   info

### Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) -  $V_R$   info

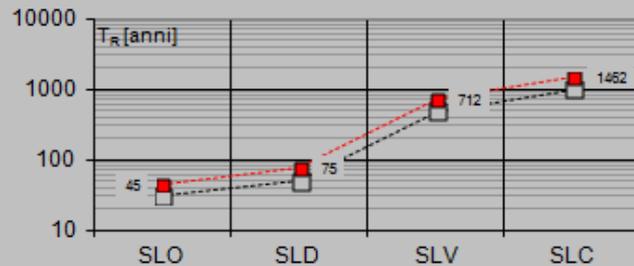
Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) -  $T_R$  info

Stati limite di esercizio - SLE	{ SLO - $P_{VR} = 81\%$	<input type="text" value="45"/>
	{ SLD - $P_{VR} = 63\%$	<input type="text" value="75"/>
Stati limite ultimi - SLU	{ SLV - $P_{VR} = 10\%$	<input type="text" value="712"/>
	{ SLC - $P_{VR} = 5\%$	<input type="text" value="1462"/>

### Elaborazioni

- Grafici parametri azione
- Grafici spettri di risposta
- Tabella parametri azione

### Strategia di progettazione



### LEGENDA GRAFICO

---□--- Strategia per costruzioni ordinarie    -.-.-■-.-.- Strategia scelta

INTRO

FASE 1

**FASE 2**

FASE 3

## FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

### Stato Limite

Stato Limite considerato **SLV**

### Risposta sismica locale

Categoria di sottosuolo **C**

$S_S =$

$C_C =$

Categoria topografica **T1**

$h/H =$

$S_T =$

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

### Compon. orizzontale

Spettro di progetto elastico (SLE)

Smorzamento  $\xi$  (%)

$\eta =$

Spettro di progetto inelastico (SLU)

Fattore  $q_o$

Regol. in altezza **si**

### Compon. verticale

Spettro di progetto

Fattore  $q$

$\eta = 1/q =$

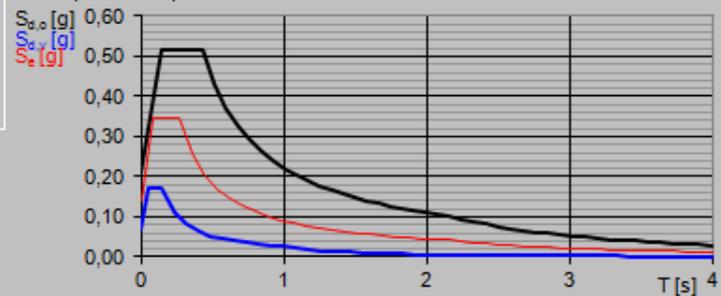
### Elaborazioni

Grafici spettri di risposta

Parametri e punti spettri di risposta

- Spettro di progetto - componente orizzontale
- Spettro di progetto - componente verticale
- Spettro elastico di riferimento (Cat. A-T1,  $\xi = 5\%$ )

### Spettri di risposta

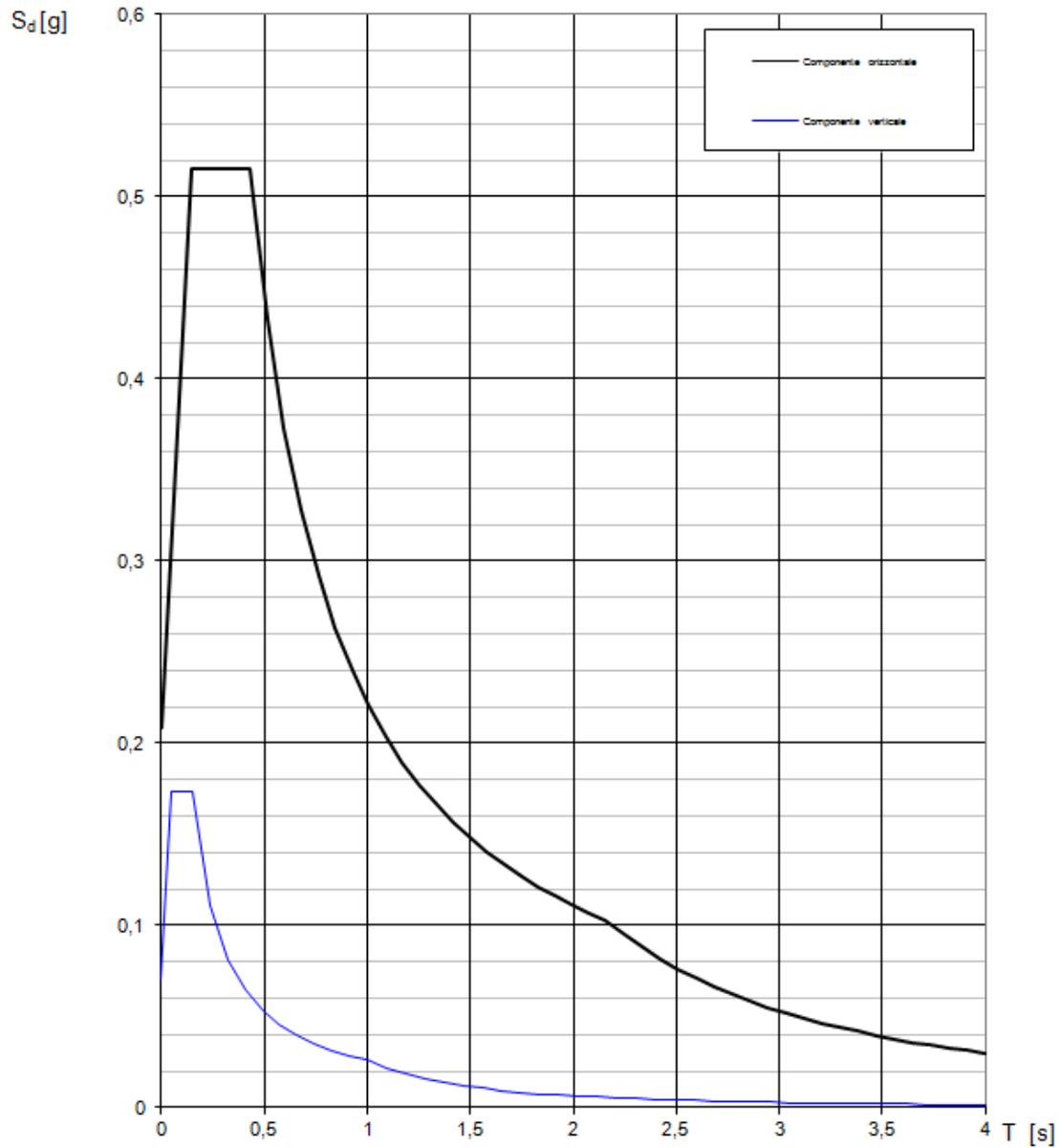


INTRO

FASE 1

FASE 2

**FASE 3**



SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	45	0,044	2,453	0,216
SLD	75	0,057	2,463	0,231
SLV	712	0,140	2,472	0,265
SLC	1462	0,175	2,503	0,274

**Sito di Bruzolo**

## FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE  
7,1995

LATITUDINE  
45,1406

---

Ricerca per comune

REGIONE  
Piemonte

PROVINCIA  
Torino

COMUNE  
Bruzolo

---

**Elaborazioni grafiche**

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

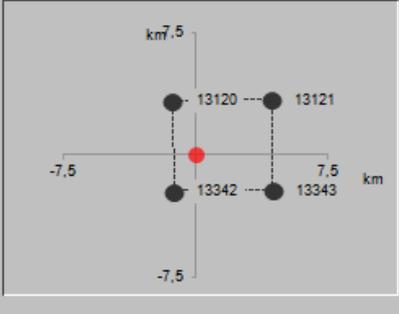
---

**Elaborazioni numeriche**

Tabella parametri

---

Nodi del reticolo intorno al sito



Reticolo di riferimento



Controllo sul reticolo

- Sito esterno al reticolo
- Interpolazione su 3 nodi
- Interpolazione corretta

Interpolazione

superficie rigata

La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, a "Ricerca per coordinate".

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3

## FASE 2. SCELTA DELLA STRATEGIA DI PROGETTAZIONE

Vita nominale della costruzione (in anni) -  $V_N$   info

Coefficiente d'uso della costruzione -  $C_U$   info

### Valori di progetto

Periodo di riferimento per la costruzione (in anni) -  $V_R$   info

Periodi di ritorno per la definizione dell'azione sismica (in anni) -  $T_R$  info

Stati limite di esercizio - SLE {

SLO - $P_{VR} = 81\%$	<input type="text" value="45"/>
SLD - $P_{VR} = 63\%$	<input type="text" value="75"/>

Stati limite ultimi - SLU {

SLV - $P_{VR} = 10\%$	<input type="text" value="712"/>
SLC - $P_{VR} = 5\%$	<input type="text" value="1462"/>

### Elaborazioni

- Grafici parametri azione
- Grafici spettri di risposta
- Tabella parametri azione

### Strategia di progettazione



### LEGENDA GRAFICO

---□--- Strategia per costruzioni ordinarie    -.-■-.- Strategia scelta

INTRO

FASE 1

**FASE 2**

FASE 3

## FASE 3. DETERMINAZIONE DELL'AZIONE DI PROGETTO

### Stato Limite

Stato Limite considerato **SLV** info

### Risposta sismica locale

Categoria di sottosuolo **E** info

$S_S = 1,589$

$C_D = 1,953$  info

Categoria topografica **T1** info

$h/H = 0,000$

$S_T = 1,000$  info

(h=quota sito, H=altezza rilievo topografico)

### Compon. orizzontale

Spettro di progetto elastico (SLE)

Smorzamento  $\xi$  (%) **5**

$\eta = 1,000$  info

Spettro di progetto inelastico (SLU)

Fattore  $q_0$  **1**

Regol. in altezza **si** info

### Compon. verticale

Spettro di progetto

Fattore  $q$  **1**

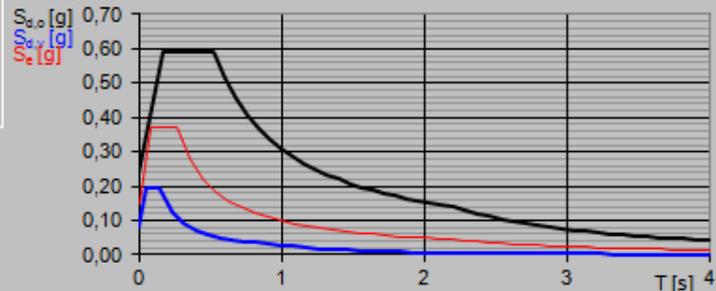
$\eta = 1/q = 1,000$  info

### Elaborazioni

Grafici spettri di risposta

Parametri e punti spettri di risposta

### Spettri di risposta



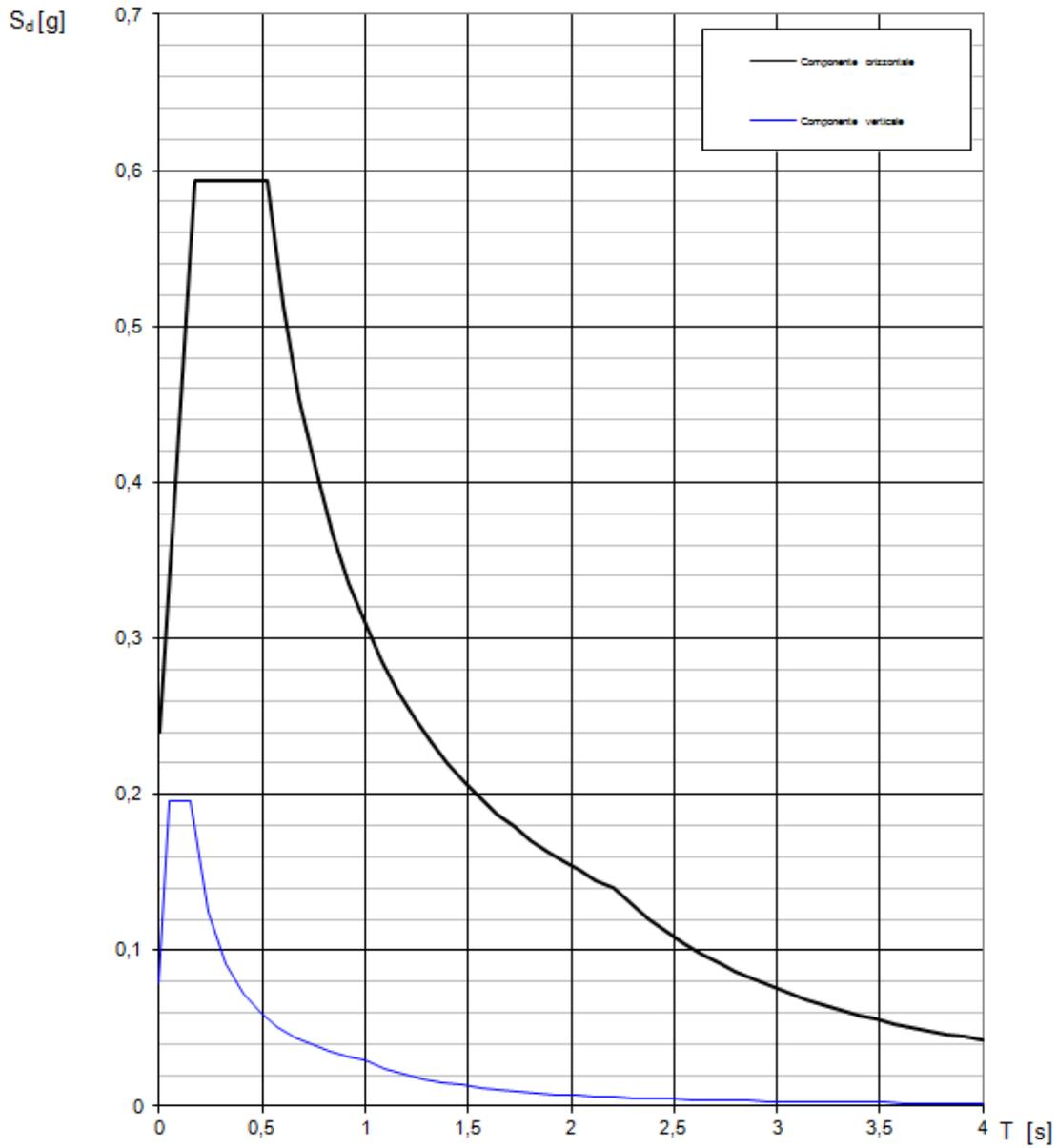
- Spettro di progetto - componente orizzontale
- Spettro di progetto - componente verticale
- Spettro elastico di riferimento (Calc. A-T1, z = 5%)

INTRO

FASE 1

FASE 2

**FASE 3**



SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	45	0,048	2,421	0,222
SLD	75	0,062	2,431	0,232
SLV	712	0,151	2,473	0,266
SLC	1462	0,187	2,510	0,275

## 9.2 Valutazione del rischio liquefazione nelle aree di progetto

Per la valutazione del rischio di liquefazione relativamente ai depositi presenti lungo il tracciato di progetto sono stati presi in esame i risultati delle indagini eseguite nel 2018, con particolare riferimento a:

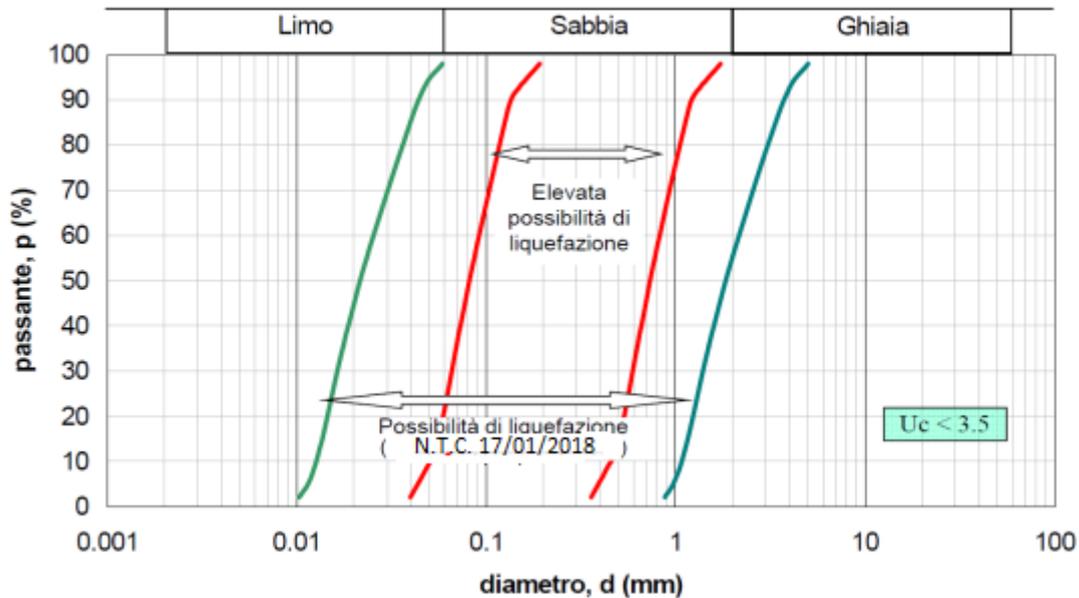
- prove spt eseguite nei sondaggi della campagna indagini 2018
- granulometrie dei depositi sabbiosi e sabbioso-limosi presenti nei primi 15-20 m;
- Andamento delle onde di taglio Vs (MASW campagna indagini 2018)

In particolare, dalle stratigrafie dei sondaggi disponibili e analizzati (campagna 2018), si segnala la presenza di orizzonti metrici di limi sabbiosi e/o sabbie limose sotto falda caratterizzate da valori di resistenza penetrometrica bassi.

E' necessario considerare che la liquefazione non possa avvenire generalmente se è soddisfatta almeno una delle seguenti condizioni:

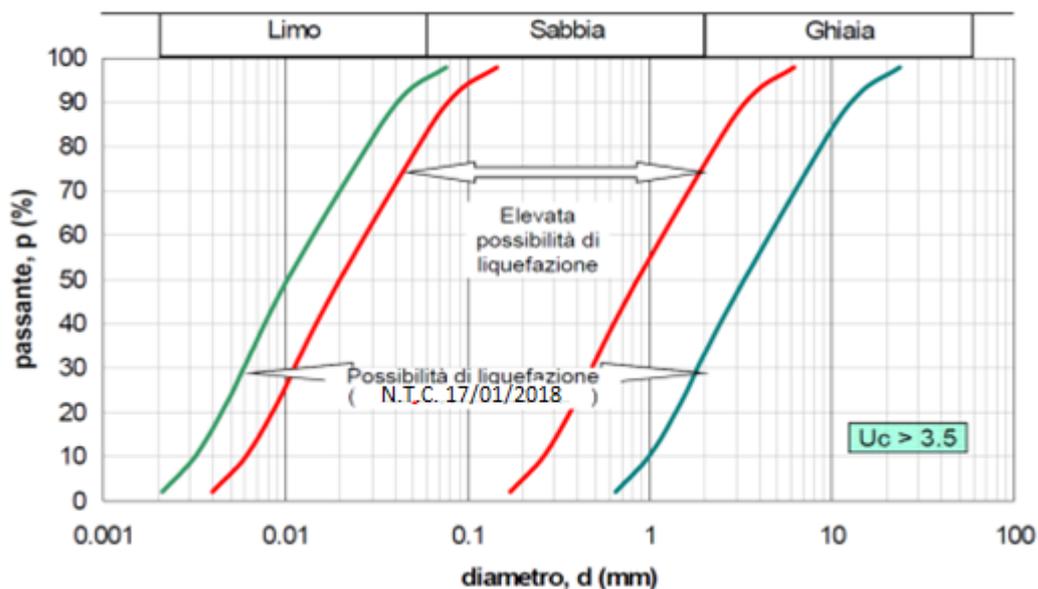
1. Evento sismico atteso di magnitudo  $M < 5$ ;
2. Accelerazione massima attesa al p.c. in assenza di manufatti (free-field) minori di 0,1g;
3. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal p.c., per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
4. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} > 30$  oppure  $qc_{1N} > 180$  dove  $(N1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e dove  $qc_{1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
5. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nello schema A, nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$ , e nello schema B, nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3,5$ .

### Fasce critiche (coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ )



A – Distribuzione granulometrica con terreni con  $U_c < 3.5$

### Fasce critiche (coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$ )



B - Distribuzione granulometrica con terreni con  $U_c > 3.5$

Con riferimento alla "condizione 1", che non risulta soddisfatta, per la stima della Magnitudo del sito d'interesse è stato fatto riferimento al testo del Gruppo di Lavoro MS,

2008, "Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica", Conferenza delle Regioni e delle Provincie Autonome, Dipartimento Protezione Civile, Roma.

In particolare, con riferimento alla zonazione sismogenetica ZS9, il territorio attraversato dall'infrastruttura in progetto ricade all'interno della zona 908, che unitamente alla zona 909 disegna l'arco alpino occidentale. Alle zone sismogenetiche 908 e 909 compete la Magnitudo massima  $M_{max}=6.14$ .

### Valori $M_{max}$ per le zone sismogenetiche di ZS9

Nome ZS	Numero ZS	$M_{wmax}$
Colli Albani, Etna	922, 936	5.45
Ischia-Vesuvio	928	5.91
Altre zone	901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 916, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934	6.14
Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza Sanremo	918, 919, 910	6.37
Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana-Mugello, Calabria Jonica	905, 906, 915, 930	6.60
Molise-Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto	924, 925, 931	6.83
Appennino Abruzzese, Sannio – Irpinia-Basilicata	923, 927	7.06
Calabria tirrenica, Iblei	929, 935	7.29

La "**condizione 2**" non risulta soddisfatta in relazione all'accelerazione  $a_{gmax}$  attesa al piano campagna (condizioni di campo libero).

Le azioni sismiche sulle opere vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento VR che si ricava, per ciascun tipo di opera, moltiplicandone la vita nominale VN per il coefficiente d'uso CU :

$$V_R = V_N \times C_U$$

In accordo con quanto riportato nel piano di progettazione si sono utilizzate le seguenti assunzioni:

$$V_R = V_N \times C_U = 50 \times 1.5 = 75 \text{ anni}$$

Considerando il periodo di riferimento  $V_R = 75$  anni ne consegue la valutazione del Tempo di ritorno TR in anni:

Stati Limite	PVR	TR [VR 50 anni]
SLO	81%	45
SLD	63%	75
SLV	10%	712
SLC	5%	1462

Le azioni di progetto si ricavano, ai sensi delle N.T.C. 2018, dalle accelerazioni  $a_g$  e dalle relative forme spettrali. A partire dall'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento  $a_g$ , si può ricavare l'accelerazione di picco  $a_{g_{max}}$  è valutata sulla base della risposta sismica locale:

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

dove  $S_S$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione stratigrafica,  $S_T$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione topografica.

### **Sito di Condove**

Il sito in esame ricadendo nella categoria di sottosuolo **C** secondo la tab.3.2.II delle NTC 2018. Ne deriva una  $a_g = 0.209$  (allo stato limite SLV).

### **Sito di Bruzolo**

Il sito in esame ricadendo nella categoria di sottosuolo **E** secondo la tab.3.2.II delle NTC 2018. Ne deriva una  $a_g = 0.238$  (allo stato limite SLV).

La "**condizione 3**", non risulta soddisfatta, tenuto della profondità della falda acquifera principale, che si ubica a profondità comprese tra 2-3 m e 16.94 m dal piano campagna (dati misurati subito dopo la realizzazione dei sondaggi).

La "**condizione 4**" non risulta soddisfatta in quanto dalle indagini eseguite i valori di  $N_{spt}$  evidenziati all'interno degli strati potenzialmente liquefacibili sono anche minori di 30.

Con riferimento alla "**condizione 5**", non risulta soddisfatta in quanto sono presenti distribuzioni granulometriche caratterizzate da potenziale rischio.

Non sussistendo nessuna delle condizioni di esclusione sopra specificate si procederà alla verifica della suscettibilità alla liquefazione.

Per verificare la possibilità di fenomeni di liquefazione dei terreni presenti nel sito d'interesse è impiegato di seguito il metodo semplificato di Idriss e Boulanger (2004). Tale metodo si basa sulle prove geotecniche svolte in sito (SPT) e sulla valutazione, ad ogni quota  $z$  del deposito compresa nei primi 20m, del fattore di sicurezza:

$$F_s = \frac{CRR_{(M=7.5)}}{CSR_{(M=7.5)}}$$

Dove CRR (Cyclic Resistance Ratio) indica la resistenza del terreno a sforzi di taglio ciclico e CSR (Cyclic Stress Ratio) la sollecitazione di taglio massima indotta dal sisma.

Secondo l'EC8, se il fattore  $F_s \geq 1.25$  la liquefazione è da escludere, se  $F_s < 1.25$  è possibile che avvengano fenomeni di liquefazione. Si osserva che anche quando  $F_s > 1$  si possono avere, dopo il sisma, cedimenti permanenti del terreno.

Il rapporto CSR è stimata con la relazione di Seed e Idriss:

$$(CSR)_{M=7.5} = 0.65 \cdot \frac{\sigma_v \cdot a_{\max}}{\sigma'_v} \cdot r_d \cdot \frac{1}{MSF} \cdot \frac{1}{K_\sigma}$$

Dove:

- $a_{\max}$  è l'accelerazione massima al piano campagna, espressa in g ( $a_{\max}=0.211$ )
- $\sigma_v$  ed  $\sigma'_v$  sono rispettivamente la tensione totale verticale e la tensione efficace verticale;
- $r_d$  è un coefficiente riduttivo dell'azione sismica che porta in conto la deformabilità del sottosuolo;
- $K_\sigma$  è un coefficiente di correzione della tensione litostatica;
- MSF è il fattore di scala in funzione della magnitudo attesa.
- Il coefficiente  $r_d$  è determinato con la relazione di Idriss (valida per  $z \leq 20m$ ) che tiene conto anche della magnitudo  $M$  ( $M=6.14$ ):

$$\ln(r_d) = \alpha + \beta M$$

$$\alpha = -1.012 - 1.126 \operatorname{sen}\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta = 0.106 + 0.118 \operatorname{sen} \left( \frac{z}{11.28} + 5.142 \right)$$

- Il coefficiente MSF è determinato come il minore tra 1.8 e il valore ottenuto con la relazione di Idriss (2004):

$$MSF = 6.9 \exp \left( \frac{-M}{4} \right) - 0.058$$

- Il coefficiente  $K_\sigma$  è determinato con la relazione

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln \left( \frac{\sigma'_v}{P_a} \right) \leq 1.0$$

Dove il  $C_\sigma$  può essere determinato in funzione di SPT:

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55(N_{1,60,cs})} \leq 0.3$$

Il parametro indice  $N_{1,60,cs}$  è determinato a partire dai valori  $N_{30}$  attraverso la relazione:

$$N_{1,60,cs} = N_{1,60} + CF = (N_{60} \cdot CN) + CF = (N_{30} \cdot CE \cdot CR \cdot CB \cdot CS) \cdot CN + CF$$

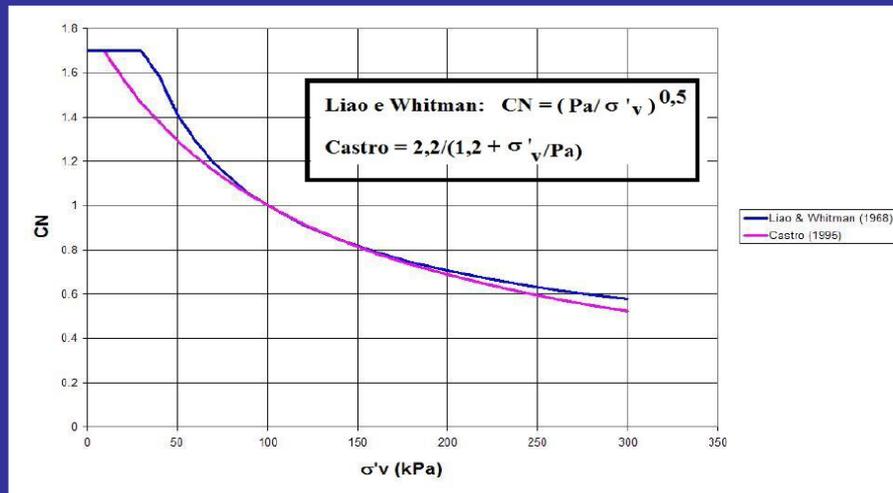
dove:

Fattore correttivo	Variabile	Valore del fattore correttivo
Diametro del foro di sondaggio, $C_B$	65 ÷ 115 mm <sup>8</sup>	1.00
	150 mm	1.05
	200 mm	1.15
Lunghezza delle aste, $C_R$	3 ÷ 4 m	0.75
	4 ÷ 6 m	0.85
	6 ÷ 10 m	0.95
	10 ÷ 30 m	1.0
	> 30 m	> 1.0
Tipo di fustella, $C_S$	Campionatore standard	1.0
	Campionatore <b>non apribile</b>	1.1 ÷ 1.3

- CE è il coefficiente di correzione per l'energia trasmessa dalle aste (CE=1)
- CN è il coefficiente per normalizzare  $N_{60}$  alla pressione litostatica (si usa di seguito la relazione di Liao e Withman )

## Fattori di correzione al valore di N

CN



CN riporta il valore di N60 al valore che si avrebbe se la pressione litostatica efficace alla profondità di misura di N60 fosse pari alla pressione atmosferica Pa (1 atm, ≈ 1 Kg/cmq, ≈ 101 kPa)

- CF è il coefficiente di correzione per il contenuto di fini (dove FC rappresenta la percentuale di passante allo 0,074mm). Si usa di seguito la relazione di Idriss&Boulanger (2004)

## Fattori di correzione al valore di N

CF

Autore	CF
Seed (1997)	$CF = \alpha + \beta (N_{1,60})$ $\alpha = 0$ per $FC \leq 5\%$ $\alpha = \exp(1,76 - (190/FC^2))$ per $5\% < FC < 35\%$ $\alpha = 5$ per $FC \geq 35\%$ $\beta = 1$ per $FC \leq 5\%$ $\beta = 0,99 + (FC^{1,5}/1000)$ $\beta = 1,2$ per $FC \geq 35\%$
Robertson & Wride (1997)	$CF = 1 + [(0,75/30)(FC - 5)]$
Cetin et al. (2004)	$CF = (1 + 0,004 FC) + 0,05 (FC/N_{1,60})$
Idriss & Boulanger (2004)	$CF = \exp [1,63 + (9,7/FC) - (15,7/FC)^2]$

FC = contenuto di fine - % passante al setaccio 0,074 mm (n. 200)

Per la determinazione della resistenza CRR ( $M=7.5$ ) è stata utilizzata la relazione di Idriss e Boulanger (2004):

$$CRR = \exp \left[ \left( \frac{N1,60, cs}{14.1} \right) + \left( \frac{N1,60, cs}{14.1} \right)^2 - \left( \frac{N1,60, cs}{23.6} \right)^3 + \left( \frac{N1,60, cs}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right]$$

se  $z \geq z_w$

Il concetto della probabilità di liquefazione PL nasce dalla considerazione che nei metodi semplificati il coefficiente di sicurezza teorico ( $FS=CRR/CSR$ ) non implica in pratica che se  $FS \leq 1$  si ha liquefazione e se  $FS > 1$  non si ha liquefazione. Negli anni recenti vi è stato un continuo sforzo per diminuire il grado di conservatorismo esistente nelle curve di soglia e valutare quindi il potenziale di liquefazione in termini probabilistici. Il suo utilizzo è particolarmente indicato nelle applicazioni di ingegneria sismica. La sua valutazione è stata oggetto di numerosi studi da parte di vari Autori (in particolare di Juang C.H., oggi professore alla Università di Clemson, Carolina del Sud).

L'equazione più recente per determinare la probabilità di liquefazione PL a partire dai valori  $N_{spt}$  è espressa dalla seguente relazione (Chen e Juang, 2000):

$$PL = \frac{1}{1 + \left( \frac{FS}{0.98} \right)^{1.6}}$$

Sulla base dei valori di PL si hanno le seguenti probabilità.

Valori di PL	Classe	Probabilità di liquefazione
$0,85 \leq PL < 1,00$	5	Liquefazione quasi certa
$0,65 \leq PL < 0,85$	4	Liquefazione probabile
$0,35 \leq PL < 0,65$	3	Liquefazione incerta
$0,15 \leq PL < 0,35$	2	Liquefazione improbabile
$0,00 \leq PL < 0,15$	1	Non liquefazione quasi certa

Nella seguente tabella sono riepilogati i risultati ottenuti dalle verifiche condotte con riferimento alle situazioni più critiche riscontrate ( $F_s \leq 1.25$ ).

A favore di sicurezza è stata assunta come riferimento la massima accelerazione ( $a_{max}$ ) riscontrata e pari a  $a_{max}=0.238$  (Sito di Bruzolo).

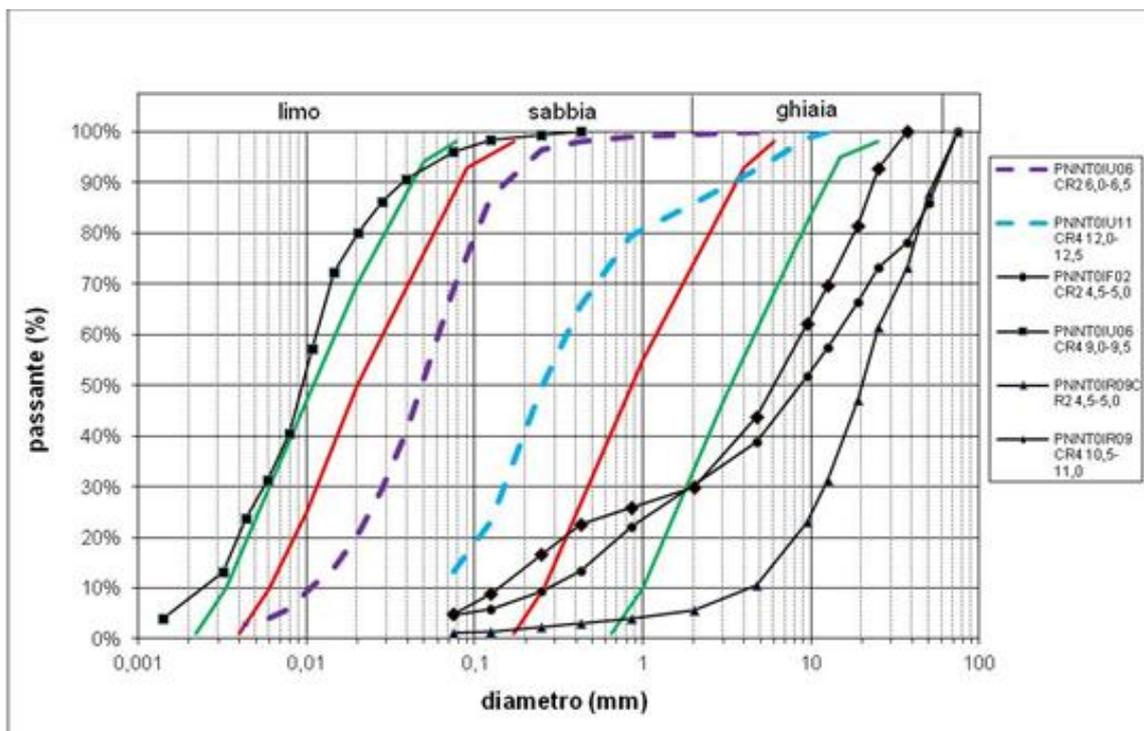
 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	Progetto Definitivo Adeguamento della linea Avigliana – Bussoleno – Lotto 4 – Posti Movimento					
	<b>Relazione geotecnica</b>					
COMMESSA NT01	LOTTO 04	CODIFICA D 26 XX	DOCUMENTO XX XX XX XXX	REV. A	FOGLIO 62 di 66	

**Tabella 11** – Risultati analisi del rischio liquefazione

campagna	sondaggio	prof. Falda (m)	Prof. Prova (m)	N2	N3	Nspt	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_v$ (kN/m <sup>3</sup> )	Pw (kPa)	$\sigma'_v$ (kN/m <sup>3</sup> )	CB	CR	CS	CE	CN	N1,60	a_max	rd	M	FC	$U_C$ (Coeff. Uniformità)	MSF	CSR	CF	N1,60,cs	Cs	Ks	<b>CRR</b>
<b>2018</b>	PNNT0IF02	3,3	4,5	<b>3</b>	<b>4</b>	7	<b>19</b>	85,5	12	73,5	<b>1</b>	0,85	1	1	1,17	6,94	<b>0,23</b>	0,93	6,14	<b>5,00</b>	<b>50</b>	1,43	0,114	0,00	6,94	0,08	1,00	0,098
<b>2018</b>	PNNT0IR09	2,66	4,5	2	2	4	<b>19</b>	85,5	18	67,1	<b>1</b>	0,85	1	1	1,22	4,15	<b>0,23</b>	0,93	6,14	<b>1,00</b>	<b>5</b>	1,43	0,124	0,00	4,15	0,07	1,00	0,081
<b>2018</b>	PNNT0IR09	2,66	10,5	5	3	8	<b>19</b>	199,5	78	121,1	<b>1</b>	1,00	1	1	0,91	7,27	<b>0,23</b>	0,80	6,14	<b>5,00</b>	<b>76</b>	1,43	0,139	0,00	7,27	0,08	0,98	0,100
<b>2018</b>	PNNT0IU06	2,71	6	2	3	5	<b>19</b>	114	33	81,1	<b>1</b>	0,85	1	1	1,11	4,72	<b>0,23</b>	0,90	6,14	<b>70,00</b>	<b>5.5</b>	1,43	0,132	5,57	10,29	0,09	1,00	0,120
<b>2018</b>	PNNT0IU06	2,71	9	2	4	6	<b>19</b>	171	63	108,1	<b>1</b>	0,95	1	1	0,96	5,48	<b>0,23</b>	0,83	6,14	<b>96,00</b>	<b>4.5</b>	1,43	0,139	5,50	10,98	0,10	0,99	0,125
<b>2018</b>	PNNT0IU11	3,98	12	4	5	9	<b>19</b>	228	80	147,8	<b>1</b>	1,00	1	1	0,82	7,40	<b>0,23</b>	0,76	6,14	<b>15,00</b>	<b>4.6</b>	1,43	0,127	3,26	10,66	0,09	0,963	0,123

campagna	sondaggio	Prof. Prova (m)	<b>FS</b>	<b>PL</b>	Probabilità di Liq.
<b>2018</b>	PNNT0IF02	4,5	<b>0,862</b>	<b>0,551</b>	Liquefazione incerta
<b>2018</b>	PNNT0IR09	4,5	<b>0,654</b>	<b>0,65</b>	Liquefazione incerta
<b>2018</b>	PNNT0IR09	10,5	<b>0,717</b>	<b>0,623</b>	Liquefazione incerta
<b>2018</b>	PNNT0IU06	6	<b>0,907</b>	<b>0,531</b>	Liquefazione incerta
<b>2018</b>	PNNT0IU06	9	<b>0,901</b>	<b>0,533</b>	Liquefazione incerta
<b>2018</b>	PNNT0IU11	12	<b>0,963</b>	<b>0,507</b>	Liquefazione incerta

Nella seguente figura sono confrontati con le distribuzioni granulometriche caratterizzate dalla possibilità del verificarsi della liquefazione (N.T.C. 17/01/2018), i fusi granulometrici rilevati in corrispondenza dei campioni rimaneggiati, prelevati alle quote di esecuzione delle prove Nspt esaminate, limitatamente a quelle a cui sono associati i coefficienti di sicurezza inferiori a  $F_s=1.25$  evidenziate nella precedente tabella.



**Figura 19-** Distribuzioni granulometriche ( $U_c > 3.5$ )

Dal confronto si può desumere come il rischio effettivo sussista esclusivamente per le prove eseguite nei sondaggi: PNNT0IU06 (CR2 6,0-6,5) e PNNT0IU11 (CR4 12,0-12,5), evidenziati nella seguente tabella riepilogativa, essendo le altre caratterizzate da fusi sostanzialmente esterni alle aree critiche.

**Tabella 12** – Riepilogo dei risultati delle analisi del rischio liquefazione

campagna	sondaggio	Prof. Prova (m)	FS	PL	Probabilità di Liq.
2018	PNNT0IF02	4,5	0,862	0,551	Liquefazione incerta
2018	PNNT0IR09	4,5	0,654	0,65	Liquefazione incerta
2018	PNNT0IR09	10,5	0,717	0,623	Liquefazione incerta
<b>2018</b>	<b>PNNT0IU06</b>	<b>6</b>	<b>0,907</b>	<b>0,531</b>	<b>Liquefazione incerta</b>
2018	PNNT0IU06	9	0,901	0,533	Liquefazione incerta
<b>2018</b>	<b>PNNT0IU11</b>	<b>12</b>	<b>0,963</b>	<b>0,507</b>	<b>Liquefazione incerta</b>

Il rischio liquefazione risulta in ogni caso caratterizzato da una probabilità di verificarsi incerta ( $0.35 < PL < 0.65$  – classe di rischio 3).

### 9.3 Stima dei cedimenti permanenti nei terreni granulari saturi liquefacibili

Al fine di fornire una valutazione circa gli effetti potenzialmente indotti dall'innescarsi del fenomeno di liquefazione, in prima approssimazione, è possibile valutare il cedimento permanente post-sismico associato agli strati soggetti a tale fenomeno (terreni liquefacibili con  $FL \leq 1$ ). Tale cedimento può essere stimato con la seguente espressione:

$$\Delta H = \varepsilon_v H$$

Dove:  $\Delta H$  = altezza dello strato liquefacibile ed  $\varepsilon_v$  è la deformazione volumetrica post-ciclica (%).

$$\varepsilon_v = \frac{\alpha C_r}{1 + e_0} \log \left( \frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_0}} \right)$$

dove:

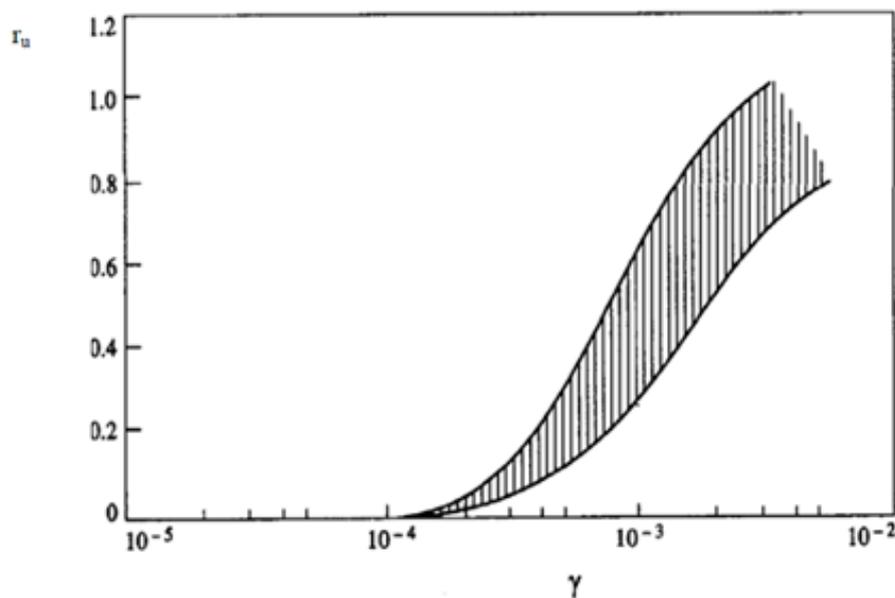
$\alpha$  = costante sperimentale che può essere posta pari a 1.0-1.5;

$e_0$  = indice dei vuoti iniziale;

$C_r$  = indice di riconsolidazione postciclica, che può essere ipotizzato pari a  $0,225 \cdot C_c$  ( $C_c$  rappresenta l'indice di compressione, valutato con la correlazione di Terzaghi  $C_c \approx 0.9(w_L - 0.1)$ );

$ru = \Delta u_N / \sigma'_{v0}$  = rapporto di pressione interstiziale

Il valore del rapporto di pressione interstiziale può essere valutato a partire dalla deformazione di taglio massima in base al grafico riportato nella seguente Figura.



**Figura 20-** Deformazione volumetrica – rapporto pressione interstiziale

L'ampiezza della deformazione di taglio massima  $\gamma_{max}$  può essere valutata con l'espressione:

$$\gamma_{max} = 0.65 \frac{a_{max,s}}{g} \sigma_v r_d \frac{1}{G}$$

dove  $a_{max,s}$  è il picco di accelerazione al piano campagna del terremoto di riferimento;  $g$  è l'accelerazione di gravità;  $\sigma$  è la tensione totale verticale;  $G$  è il modulo di taglio corrispondente al livello deformativo  $\gamma_{max,r}$ , che può essere determinato mediante la seguente Tabella applicando un fattore riduttivo al modulo di taglio  $G_0$ .

$a_{max}$ [g]	G/G <sub>0</sub>
0.10	0.80
0.20	0.50
0.30	0.35
0.40	0.28

Il coefficiente  $r_d$  è determinato con la relazione di Idriss (valida per  $z \leq 20m$ ) che tiene conto anche della magnitudo  $M$  ( $M=6.14$ ):

$$\ln(r_d) = \alpha + \beta M$$

$$\alpha = -1.012 - 1.126 \operatorname{sen}\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta = 0.106 + 0.118 \operatorname{sen}\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

Con riferimento ai tratti in progetto, la verticale potenzialmente interessata dal fenomeno è la PNNT0IU06 campione (CR2 6,0-6,5), essendo lo strato liquefacibile compreso tra  $z=3.0$  m e  $z=9$  m dal p.c.

La seguente Tabella riassume il risultato ottenuto:

Cc	Cr	$\alpha$	$e_0$	$a_{max}/g$	$\sigma_v$ (kPa)	$r_d$	$r_u$ <sup>1</sup>	G/Go	$\gamma$ max	G (kPa)	$\varepsilon_v$	H (cm)	$\Delta H$ (cm)
0.315	0.071	1.5	0.6	0.238	114	0.9	0.78	0.44	$1.5 \cdot 10^{-3}$	9340	0.043	600	26

1: valore massimo del fuso (cfr. Figura 20)

Tale valore del cedimento permanente post-sismico si ritiene comunque accettabile in questa fase, ammettendo eventuali potenziali fuori uso e/o rifacimenti locali del corpo stradale ferroviario a seguito dell'evento sismico.

Si ritiene comunque necessario evidenziare come nella successiva fase progettuale esecutiva, sarà necessario un idoneo approfondimento delle conoscenze nell'area interessata, prevedendo una integrazione delle indagini finalizzato nello specifico a valutare l'effettiva entità ed estensione plano-altimetrica degli spessori interessati da eventuali fenomeni di liquefazione.