

COMUNE DI MIRANDOLA

Provincia di Modena

# PROVVEDIMENTO AUTORIZZATORIO UNICO REGIONALE

REALIZZAZIONE DI IMPIANTO DI RECUPERO RIFIUTI SPECIALI UBICATO  
PRESSO L'AREA IN VIA DI MEZZO SNC

## COMMITTENTE:

Costruzioni Edili Baraldini Quirino SpA  
Via di Mezzo 84 - 41037  
Mirandola (MO)



## STAFF DI PROGETTO:

Dott. Geol. Matteo Mattioli  
Dott.ssa Michela Costa  
Dott.ssa Rita Costa  
Ing. Gianmarco Maroncelli  
Geol. Davide Sasdelli  
Ing. Giusy Pellegrino

## STUDIO MATTIOLI srl

Via Santo Stefano 30  
40125, Bologna (BO)

studio.mattioli@studiomattioli.com

studiomattioli.com



STUDIO MATTIOLI

## CONSULENTI SPECIALISTI:

Progettista idraulico: Ing. Daniele Barbetti  
Progettista strutturale: Ing. Daniele Barbetti  
Progettista strutturale: Ing. Nicola Bertaccini  
Geologo: Dott. Geol. Sara Cafaggi  
Progettista architettonico: Ing. Federica Botti  
Progettista elettrico: P.I. Loris Amaduzzi

Studio  
AZ srl



DEPOSITO SISMICO

PS.06.1\_Relazione geologica

CODICE ELABORATO

SIS.08.07.R1

COMMESSA

25-C021

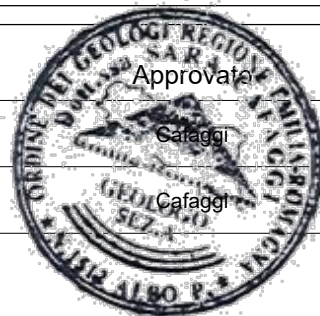
SPECIALISTICA

SIS

SCALA

-

Rev.	Data	Note	Redatto	Verificato
0	04/08/2025	Prima emissione	Cafaggi	Cafaggi
1	20/03/2026	Aggiornamento a seguito CdS	Cafaggi	Barbetti
2				



Approvato

Cafaggi

Cafaggi

r\_emiro.Giunta - Prot.

16/04/2026.0385834.F

Copia conforme dell

originale sottoscrit

to digitalmente da Barbetti Daniele, Cafaggi Sara

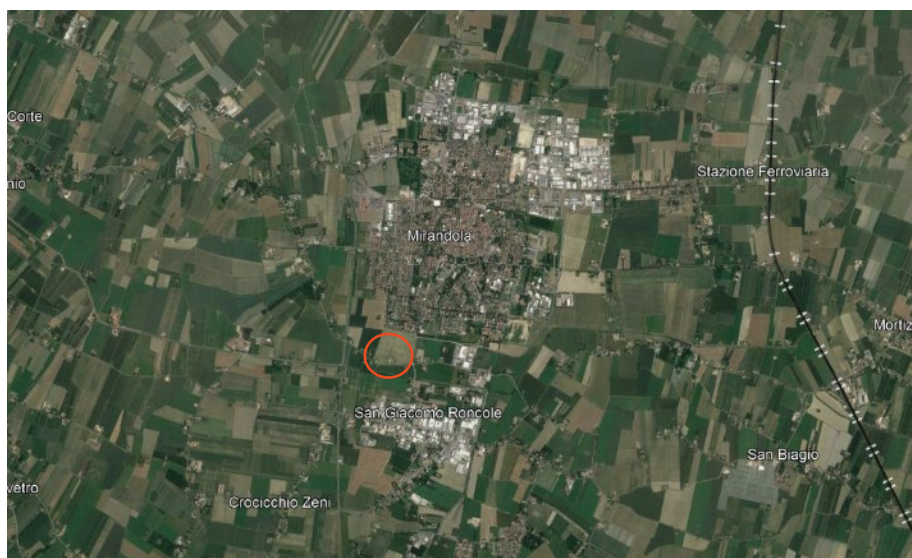


## SOMMARIO

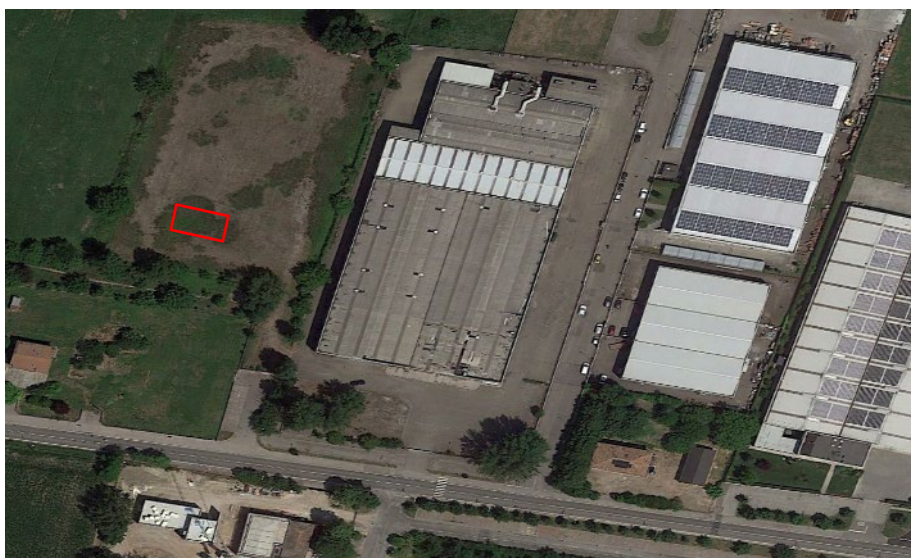
<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
1.1. Norme di riferimento .....	4
1.2. Documenti di riferimento .....	4
1.3. Allegati .....	4
<b>2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO.....</b>	<b>5</b>
<b>3. INQUADRAMENTO SISMICO .....</b>	<b>13</b>
<b>4. CAMPAGNE GEOGNOSTICHE.....</b>	<b>18</b>
4.1. Prove penetrometriche .....	19
4.2. Indagini geofisiche .....	22
4.3. Modello sismico di sottosuolo .....	25
4.4. Modello geologico.....	28
<b>5. ASPETTI SISMICI .....</b>	<b>29</b>
5.1. Azione sismica di base.....	29
5.2. Risposta sismica locale.....	31
5.3. Classificazione stratigrafica e topografica del sito .....	33
<b>6. RISCHIO .....</b>	<b>34</b>
6.1. Stabilità nei confronti della liquefazione.....	34
6.2. Rischio alluvioni .....	37
<b>7. VINCOLI .....</b>	<b>38</b>
<b>8. CONCLUSIONI.....</b>	<b>40</b>

## 1. PREMESSA

La presente Relazione Geologica è redatta a supporto dell'intervento di realizzazione di una nuova tettoia ad uso ricovero mezzi, con l'obiettivo di definire il quadro delle caratteristiche geologiche del sito interessato. L'opera è prevista nella frazione di San Giacomo Roncole, nel comune di Mirandola (MO), in via di Mezzo snc, foglio 134, mappale 544, e consiste in una struttura in elevazione in acciaio da carpenteria strutturale. La caratterizzazione del sottosuolo è stata condotta sulla base di indagini geognostiche disponibili, eseguite in area limitrofa al sito di intervento. Tali dati sono stati utilizzati ai fini della presente valutazione assumendone la rappresentatività su scala locale, fermo restando che eventuali variazioni puntuali delle condizioni stratigrafiche non possono essere escluse.



*Figura 1 - Inquadramento geografico di riferimento*



*Figura 2 - Dettagli area di intervento*



### 1.1. Norme di riferimento

Si elencano nel seguito le principali normative vigenti prese come riferimento per la stesura della presente Relazione Geologica:

- D.P.R. 380/2001 – Testo Unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia;
- D.M. 17/01/2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni;
- Circolare 21/01/2019 – Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni di cui al D.M. del 17 gennaio 2018.

### 1.2. Documenti di riferimento

Di seguito si elencano i documenti di riferimenti utilizzati come bibliografia per la stesura della presente Relazione Geologica:

- Piano Strutturale Comunale di Mirandola, B – Sistema Naturale e ambientale, Microzonazione sismica;
- NOTE ILLUSTRATIVE della CARTA GEOLOGICA D'ITALIA alla scala 1:50.000 Foglio 184 MIRANDOLA;
- Esperienze e prospettive nel monitoraggio delle acque sotterranee, Marco Farina, Marco Marcaccio e Adriano Zavatti
- 

### 1.3. Allegati

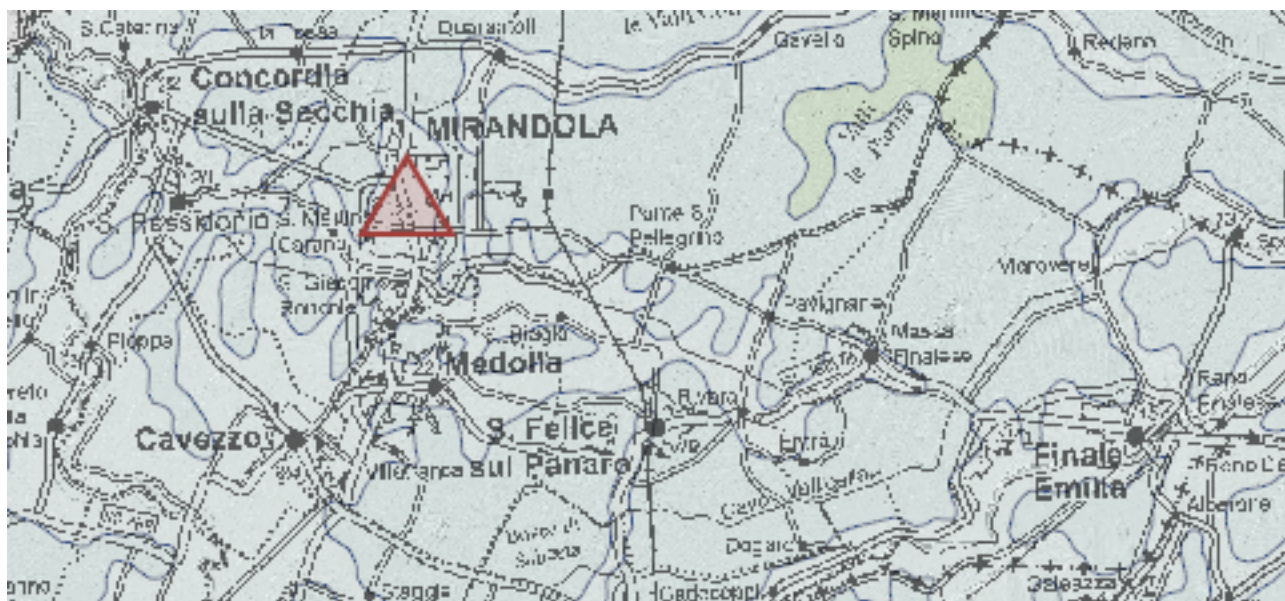
Gli allegati della presente Relazione sono i seguenti:

- ALLEGATO A “Relazione geologica sulle indagini” (2012 - G.G.A. srl);
- ALLEGATO B “Prove penetrometriche statiche a punta elettrica e verifica del potenziale di liquefazione eseguite nel comune di Mirandola in Via Minelli” (2023 – R.d.R. srl);
- ALLEGATO C “Carta di Microzonazione sismica livello 3” del Piano Strutturale Comunale di
- Mirandola;
- ALLEGATO D “Carta Piano Gestione Rischio Alluvioni” tratta dal Piano Strutturale Comunale di
- Mirandola;
- ALLEGATO E “Analisi della Risposta Sismica Locale”



## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Il sito di interesse si trova all'interno dell'area comunale di Mirandola (MO) nella bassa pianura Modenese, a sud del centro cittadino, in zona artigianale e industriale nella frazione di San Giacomo Roncole. Mirandola si colloca nel contesto geologico del Bacino Padano ovvero un'area di avanfossa originatasi dalla subduzione della placca padano-adriatica al di sotto dell'orogene appenninico.



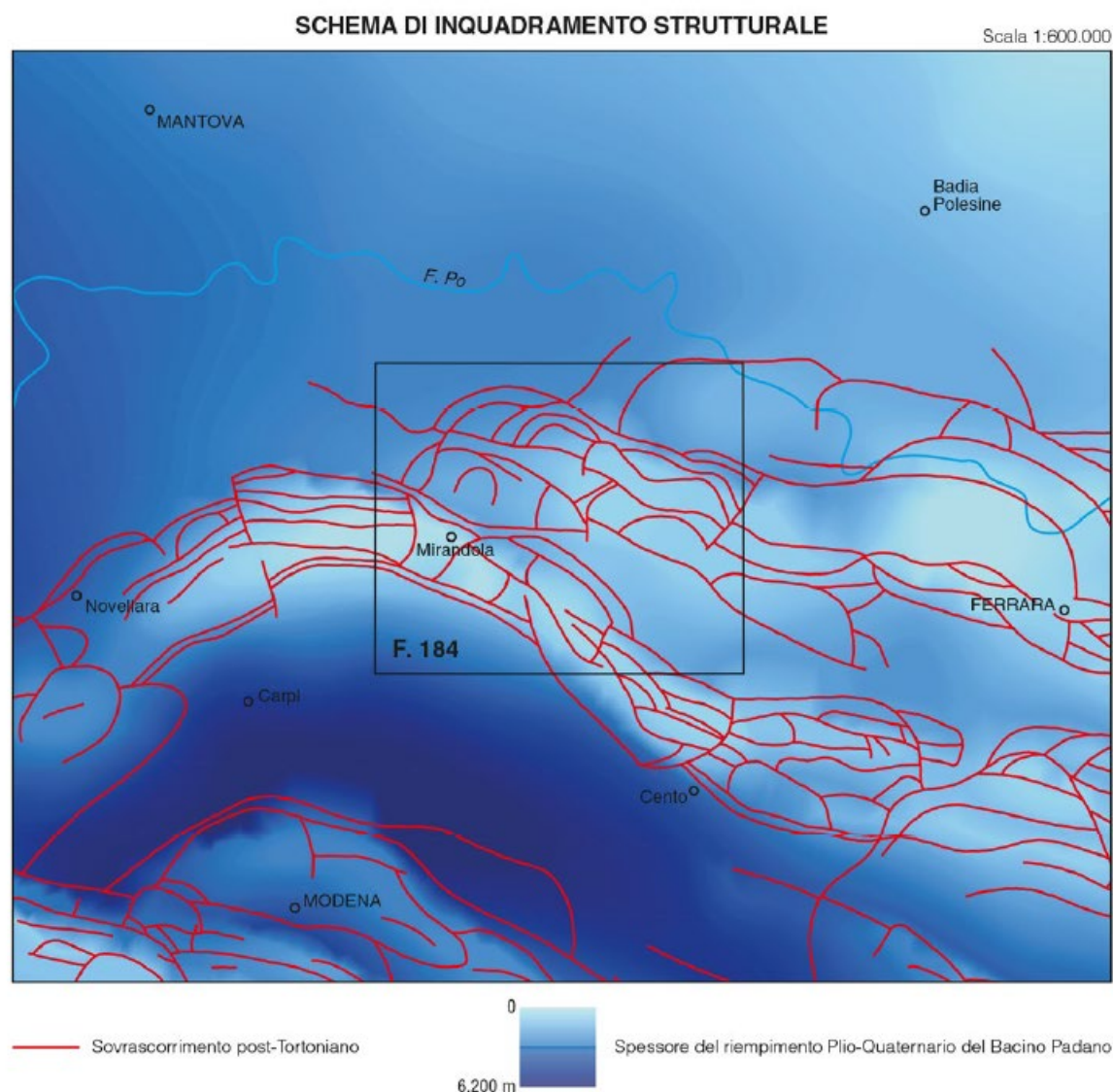
*Figura 3 Stralcio carta geologica da portale cartografico regionale - scala 1:250.000*



*Figura 4 Stralcio della CTR scala 1:5.000.*

Il Bacino Padano rappresenta il riempimento sedimentario Plio-quadernario di un sistema di avansfossa sviluppatosi a fronte di due catene montuose con vergenza opposta, le Alpi Meridionali e gli Appennini. L'evoluzione di queste catene ha avuto inizio rispettivamente nel Cretacico e nell'Eocene superiore, in seguito alla chiusura dell'Oceano ligure-piemontese e alla subduzione della litosfera oceanica sotto la placca di Adria (Boccaletti et alii, 1971; Carminati & Doglioni, 2012). Nel sottosuolo della Pianura Padana, la struttura del prisma di accrezione nord-appenninico è caratterizzata da tre sistemi arcuati di sovrascorrimenti (Amadori et alii, 2019), strettamente associati a pieghe anticlinali — le pieghe del Monferrato, emiliane e ferraresi-adriatiche — oggi sepolte sotto spesse successioni sedimentarie Plio-quadernarie. Ciascun sistema di pieghe, ricostruito grazie a una fitta rete di dati sismici e di pozzo (Pieri & Groppi, 1981; Toscani et alii, 2009; Fantoni & Franciosi, 2010; Ghielmi et alii, 2013; Turrini et alii, 2014; Martelli et alii, 2017; Livani et alii, 2018; Amadori et alii, 2019), è costituito da più fronti di accavallamento. Al tetto delle anticlinali sepolte, lo spessore dei sedimenti del Bacino Padano risulta generalmente ridotto (~100 m), mentre nelle aree depocentrali — caratterizzate dai più elevati tassi di subsidenza (Carminati et alii, 2003; Ghielmi et alii, 2010; Martelli et alii, 2017; Bruno et alii, 2020) — la successione Plio-quadernaria può raggiungere spessori fino a 6–8 km (Amadori et alii, 2019). L'arco ferrarese costituisce una delle strutture più esterne della catena appenninica ed è tettonicamente attivo sin dal Pliocene inferiore (Maesano et alii, 2015; DISS Working Group, 2018). È caratterizzato da diversi fronti di sovrascorrimento distribuiti in aree geografiche distinte. Tra questi, l'alto strutturale di Cavone/Mirandola, situato nel settore occidentale dell'arco ferrarese, include una serie di faglie sismogenetiche approfonditamente studiate in seguito al terremoto del 2012 (Bonini et alii, 2014; Govoni et alii, 2014; Martelli et alii, 2017). Gli eventi sismici del maggio 2012 rappresentano i più elevati valori di magnitudo mai registrati nella pianura emiliana (Rovida et alii, 2022). Tra gli effetti cosismici più rilevanti si osservano diffusi fenomeni di liquefazione, concentrati soprattutto lungo sistemi di canali e rotture fluviali affioranti o poco profondi (Di Manna et alii, 2012; Papathanassiou et alii, 2012; Fontana et alii, 2015, 2019; Amorosi et alii, 2016; Minarelli et alii, 2022). In queste aree sono state individuate tre principali tipologie di effetti geologici superficiali: liquefazione dovuta alla sovrappressione delle falde acquifere contenute in corpi sabbiosi sepolti; liquefazione associata a fratture con estensione dell'ordine delle decine di metri; fratturazioni estensionali non accompagnate da manifestazioni superficiali di liquefazione (Emergeo Working Group, 2013).

Il comune di Mirandola è ubicato appunto in corrispondenza della zona delle "Pieghe Ferraresi", strutture deformative sepolte che rappresentano il fronte appenninico che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta secondo una serie di archi paralleli al bordo appenninico. Mirandola è posta in corrispondenza dell'alto strutturale conosciuto come "alto di Mirandola" dove la base del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), datata a 0,45 Ma, è ad una profondità inferiore a –100 metri sul livello del mare (Boccaletti et al., 2004).



*Figura 5 Schema di inquadramento strutturale – Foglio 184 CARG*

Questo settore del bacino del Po è riempito da una spessa coltre di sedimenti clastici sin-tettonici, di età prevalentemente pliocenica e pleistocenica, che sigillano le strutture deformative. La fase pliocenica viene denominata di flysch, in contrasto con i sedimenti di molassa che hanno caratterizzato la fase successiva, nella quale divenne dominante l'input di materiale erosivo proveniente dallo smantellamento della catena Appenninica (Zoetemeijer, 1993).

Sintema Emiliano – Romagnolo Superiore (AES) comprende la quasi totalità dei depositi affioranti in quest'area, come già detto sopra questo varia da un minimo di 80 m in corrispondenza dell'anticlinale di Mirandola sino ad un massimo di circa 200 m nella zona depocentrale.

La superficie di discontinuità alla base di AES corrisponde ad una fase di modifica del reticolo idrografico padano e alla riorganizzazione del sistema di dispersione su di una più vasta scala evidenziata da un cambiamento brusco di provenienza del sedimento da area fonte Sud Alpina ai depositi alimentati dal fiume PO.

Il Sintema Emiliano Romagnolo Superiore - AES è formato prevalentemente da depositi continentali, l'assetto stratigrafico di AES è dominato dalla sequenza di pacchi di argille e limi di palude/piana inondabile poco drenata (le sabbie sono subordinate e rappresentate da corpi sabbiosi di origine fluviale - *channel belt*) e facies di piana inondabile drenata.

AES è suddiviso in subsistemi marcati da superfici di discontinuità spesso definite da paleosuoli che rappresentano il principale strumento di correlazione all'interno dei sintemi alluvionali.

Dal punto di vista geotecnico questi suoli rappresentano orizzonti sovra consolidati contraddistinti da valori di resistenza alla penetrazione molto elevati.

In corrispondenza dell'alto di Mirandola e della sua prosecuzione verso SE i paleosuoli si configurano in una geometria convessa verso l'alto che mimano una piega anticlinale.

Assumendo una geometria originaria del paleosuolo orizzontale questa struttura può testimoniare il coinvolgimento dei paleosuoli in una deformazione recente. Ulteriore elemento a supporto è l'assetto dei sedimenti palustri appartenenti ad AES7 che devono per forza essersi depositati orizzontalmente assumono una geometria leggermente convessa verso l'alto in corrispondenza della piega antiforale di Mirandola.

Il Subsintema affiorante in quest'area è AES8 di età Pleistocenica Medio-Attuale, rappresenta l'elemento sommitale del sintema Emiliano – Romagnolo Superiore. Il Subsintema di Ravenna dal punto di vista stratigrafico sequenziale si compone di un sintema trasgressivo TST e del sovrastante sistema di stazionamento del mare HST. In quest'area è caratterizzato da depositi interamente continentali e il marker su cui si basa il riconoscimento di AES8 è appunto il paleosuolo che comprende il limite Pleistocene-Olocene. In coincidenza dell'anticlinale di Mirandola il paleosuolo si mostra rilevato rispetto alle zone circostanti di quasi 10m.

AES8 presenta spessore variabile tra i 10 e i 20 m, la parte inferiore dell'unità si compone prevalentemente di argille e torbe di ambiente palustre. Questo corpo sedimentario tende a chiudersi a cuneo in direzione dell'anticlinale di Mirandola. Superiormente AES8 è dominato invece da facies di piana inondabile con subordinati corpi sabbiosi nastriformi di origine fluviale di scarsa estensione laterale.

L'ultima fase di riorganizzazione del reticolo idrografico, datata I Medioevo ha permesso di depositare l'unità informale regionale AES8a – Unità di Modena associata a dossi fluviali, raggiungendo uno spessore massimo di 8m,





*Figura 6 - Stralcio Carta Geologica - Foglio 184 CARG*

costituita alla base da depositi palustri di spessore inferiore a 3m e sovrastata da depositi di canale fluviale di scarsa estensione laterale (alcune decine di metri) e spessore minore di 7m localmente organizzati in pattern distributivo che passa lateralmente da depositi di argine e rotta fluviale a depositi di piana inondabile (lo stralcio di carta geologica CARG mostra in blu ventagli di esondazione fluviale cartografati nell'unità informale di Modena AESa).

Il limite inferiore è riconosciuto da un paleosuolo a basso grado di alterazione, parzialmente decarbonatato, caratterizzato dalla presenza di resti archeologici di età romana. Quello superiore è rappresentato invece da suoli calcarei a bassissimo grado di alterazione Olocenici.





#### SUBSISTEMA DI RAVENNA AES<sub>8</sub>

Sabbie medio-grossolane e fini di canale fluviale, da poco a mediamente addensate, in corpi sedimentari a base erosiva, localmente amalgamati su sabbie più antiche (AES<sub>7</sub>), tendenza granulometrica *fining-upward* e rare intercalazioni limoso-argillose. Passaggio graduale verso l'alto ad argille limose con sostanza organica. Composizione delle sabbie quarzoso-feldspatica con abbondanti litici metamorfici e localmente silicoclastico-carbonatica. Questi depositi compongono un reticolo di corpi a geometria nastriforme con spessore compreso tra circa 4 e 15 m ed estensione laterale massima < di 6 km, che risulta da ripetuti fenomeni di avulsione e deposizione da parte del Fiume Po (e subordinatamente dei suoi affluenti appenninici).

Età: *OLOCENE*



Isobata del tetto delle sabbie di AES<sub>8</sub> (in metri s.l.m.)

Figura 7 - AES<sub>8a</sub>

Nel sottosuolo della pianura e sul Margine Appenninico Padano sono stati riconosciuti tre Gruppi Acquiferi separati da barriere di permeabilità di estensione regionale, informalmente denominati Gruppo Acquifero A, B e C a partire dal piano campagna.

L'acquifero A corrisponde al sistema Emiliano-romagnolo superiore, dominato da depositi fluviali, il B a quello inferiore e il C a diverse unità affioranti in Appennino, la più recente delle quali è quella delle sabbie gialle Imola.

All'interno dei gruppi acquiferi vengono contraddistinti i complessi acquiferi: unità idrostratigrafiche gerarchicamente inferiori corrispondenti ad una sequenza deposizionale.

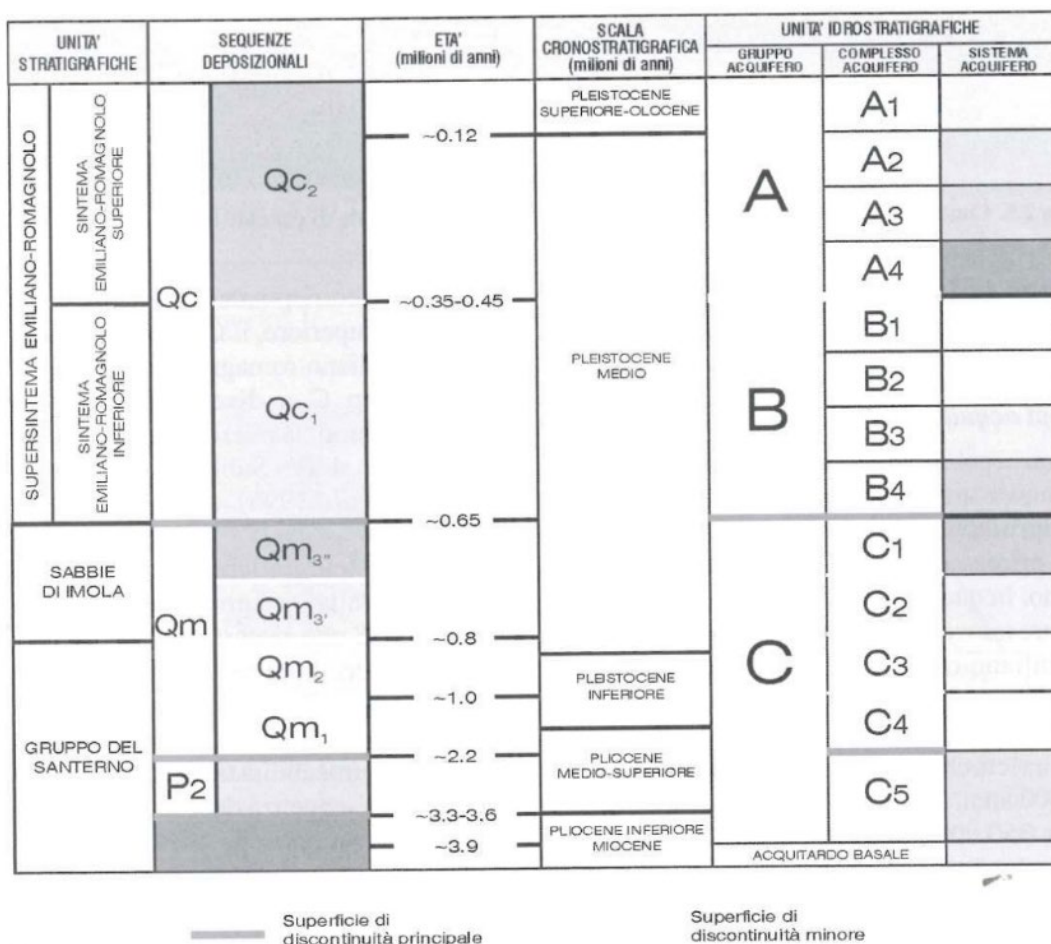


Figura 8 Stratigrafia per il sottosuolo padano (Regione Emilia - Romagna e ENI - Agip, 1998)

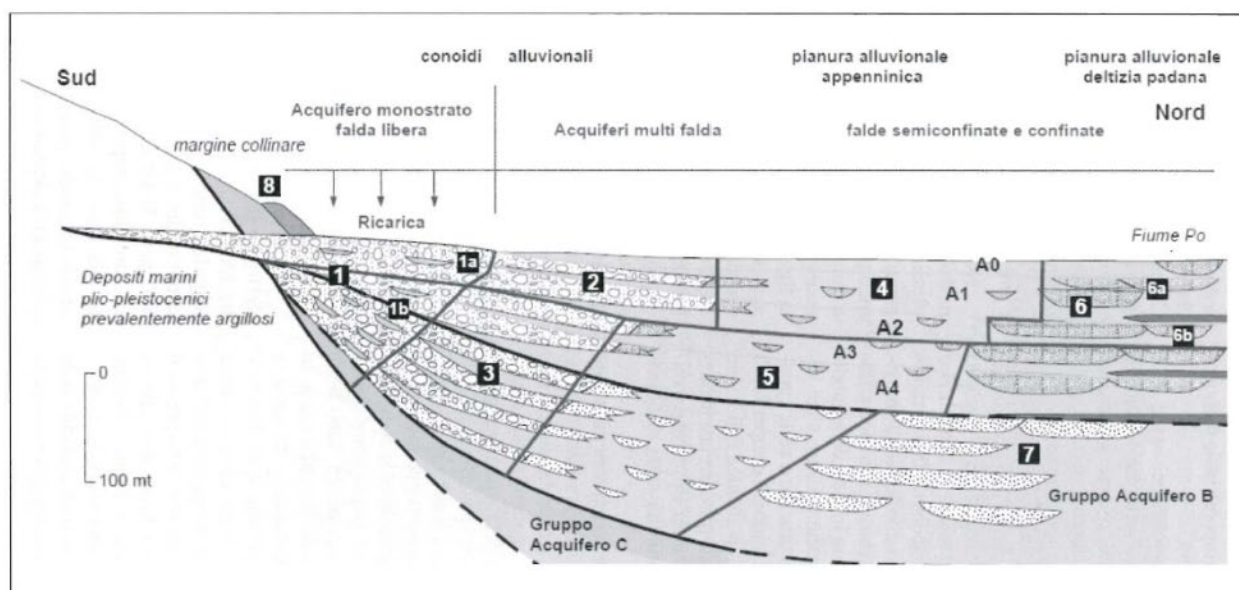


Figura 9 - Sezione schematica del sottosuolo della pianura Padana (Esperienze e prospettive nel monitoraggio delle acque sotterranee, Marco Farina, Marco Marcaccio e Adriano Zavatti).



In figura vediamo che a partire da dove si approfondiscono le ghiaie di conoide proximale si approfondiscono sotto la pianura è presente sopra di esse un livello di sedimenti prevalentemente fini che poi prosegue verso nord in tutta la pianura ed è sede di una falda freatica dello spessore di una decina di metri. Dal punto di vista stratigrafico questi sedimenti sono riconducibili ad AES8 equivalente all'unità idrostratigrafica A0 (ISPRA, 2009). La base dell'unità è frequentemente costituita da un livello argilloso ricco in sostanza organica di cui si è detto in precedenza. Al di sopra troviamo sedimenti fini, costituiti da alternanza di sedimenti limosi, sabbiosi e argillosi in proporzioni varie che riflettono depositi di canale fluviale, argine e pianura inondabile.

### 3. INQUADRAMENTO SISMICO

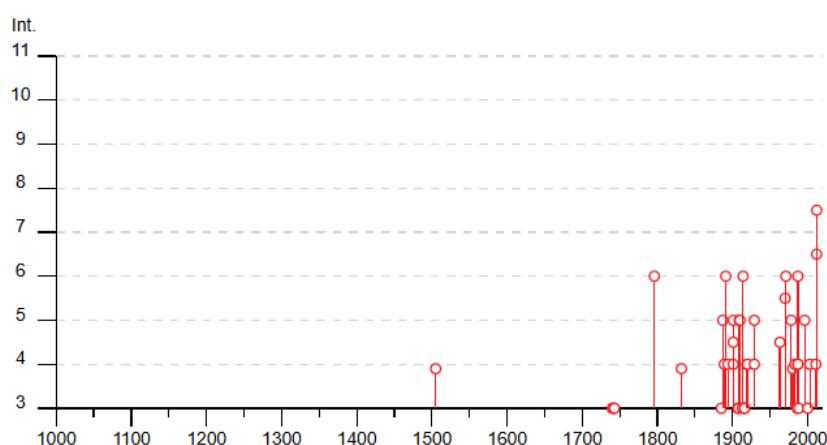
Per l'analisi della sismicità storica dell'area è stato utilizzato il Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15), impiegato anche per la costruzione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI). Il DBMI15 raccoglie in modo omogeneo dati di intensità macrosismica provenienti da diverse fonti, relativi ai terremoti di interesse per il territorio italiano con intensità massima pari o superiore a 5, nel periodo compreso tra il 1000 e il 2014.

Per il comune di Mirandola vengono registrati un numero significativo di sismi con intensità superiore a 5 (figura 11).

#### Mirandola



PlaceID IT\_38539  
Coordinate (lat, lon) 44.887, 11.065  
Comune (ISTAT 2015) Mirandola  
Provincia Modena  
Regione Emilia-Romagna  
Numero di eventi riportati 52



Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
F	1505	01	03	02			Bolognese	31	8	5.62
3	1740	03	06	05	40		Garfagnana	32	8	5.64
3	1742	01	27	11	20		Livornese	16	6	4.87
3	1743	02	20				Ionio settentrionale	84	9	6.68
6	1796	10	22	04			Emilia orientale	27	7	5.45
F	1832	03	13	03	30		Reggiano	97	7-8	5.51



3		1885 02 26 20 48	Pianura Padana	78	6	5.01
5		1887 02 23 05 21 5	Liguria occidentale	1511	9	6.27
4		1889 03 08 02 57 0	Bolognese	38	5	4.53
6		1891 06 07 01 06 1	Valle d'Ilasi	403	8-9	5.87
4		1894 11 27 05 07	Bresciano	183	6	4.89
4		1901 01 20 06 30	Bassa modenese	10	4	3.68
5		1901 01 20 06 34 2	Bassa modenese	12	5	4.11
4-5		1901 10 30 14 49 5	Garda occidentale	289	7-8	5.44
3		1907 04 25 04 52	Veronese	122	6	4.79
3		1908 06 28 03 19	Finale Emilia	11	4-5	3.93
5		1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
5		1910 03 22 23 29	Bassa modenese	15	5	4.16
2		1911 02 19 07 18 3	Forlivese	181	7	5.26
3		1913 11 25 20 55	Appennino parmense	73	4-5	4.65
6		1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7	5.63
3		1916 05 17 12 50	Riminese	132	8	5.82
3		1916 08 16 07 06 1	Riminese	257	8	5.82
4		1919 06 29 15 06 1	Mugello	565	10	6.38
4		1920 09 07 05 55 4	Garfagnana	750	10	6.53
2		1923 06 28 15 12	Modenese	22	6	5.04
5		1929 04 19 04 16	Bolognese	82	6-7	5.13
4		1929 04 22 08 26	Bolognese	41	6-7	5.10
NF		1930 10 30 07 13	Senigallia	268	8	5.83
4-5		1963 04 05 13 49 4	Finale Emilia	6	4-5	3.93
5-6		1970 11 02 08 42 1	Bassa modenese	3	4-5	3.93
6		1971 07 15 01 33 2	Parmense	228	8	5.51
5		1978 12 25 22 53 4	Bassa modenese	28	5	4.39
F		1980 12 23 12 01 0	Piacentino	69	6-7	4.57
4		1983 11 09 16 29 5	Parmense	850	6-7	5.04
NF		1984 04 29 05 02 5	Umbria settentrionale	709	7	5.62
3		1986 12 06 17 07 1	Ferrarese	604	6	4.43
4		1987 04 24 02 30 2	Reggiano	54	6	4.64
6		1987 05 02 20 43 5	Reggiano	802	6	4.71
4		1987 05 08 11 10 2	Bassa modenese	24	6	4.44
3		1988 03 15 12 03 1	Reggiano	160	6	4.57
5		1996 10 15 09 55 5	Pianura emiliana	135	7	5.38
NF		1996 10 26 04 56 5	Pianura emiliana	63	5-6	3.94















3		1988 03 15 12 03 1	Reggiano	160	6	4.57
5		1996 10 15 09 55 5	Pianura emiliana	135	7	5.38
NF		1996 10 26 04 56 5	Pianura emiliana	63	5-6	3.94
NF		1996 11 25 19 47 5	Pianura emiliana	65	5-6	4.29
NF		1996 12 16 09 09 5	Pianura emiliana	115	5-6	4.06
NF		1998 02 21 02 21 1	Pianura emiliana	104	5	3.93
3		2000 06 18 07 42 0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40
NF		2002 11 13 10 48 0	Franciacorta	768	5	4.21
4		2003 09 14 21 42 5	Appennino bolognese	133	6	5.24
4		2011 07 17 18 30 2	Pianura lombardo-veneta	73	5	4.79
6-7		2012 05 20 02 03 5	Pianura emiliana	53	7	6.09
7-8		2012 05 29 07 00 0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90

Figura 10 - Eventi riportati nel Database Macrosismico Italiano per il comune di Mirandola

Secondo la zonazione sismogenetica del territorio italiano (ZS9), utilizzata per compilare la mappa della pericolosità sismica in riferimento all'OPCM 3519/2006, il territorio nazionale è suddiviso in 36 zone in cui sono previsti terremoti con  $M_w \geq 5$ . Presuppone inoltre che i terremoti con  $M_w$  fino a 5 possano verificarsi ovunque al di fuori delle zone sismogeniche, sebbene la probabilità associata sia piuttosto bassa. Ogni zona è caratterizzata anche dalla sua profondità sismogenica media (la profondità del volume crostale che presumibilmente rilascerà futuri terremoti) e meccanismo focale predominante (il loro meccanismo di rottura più probabile). L'area di Mirandola ricade entro la zona 912.

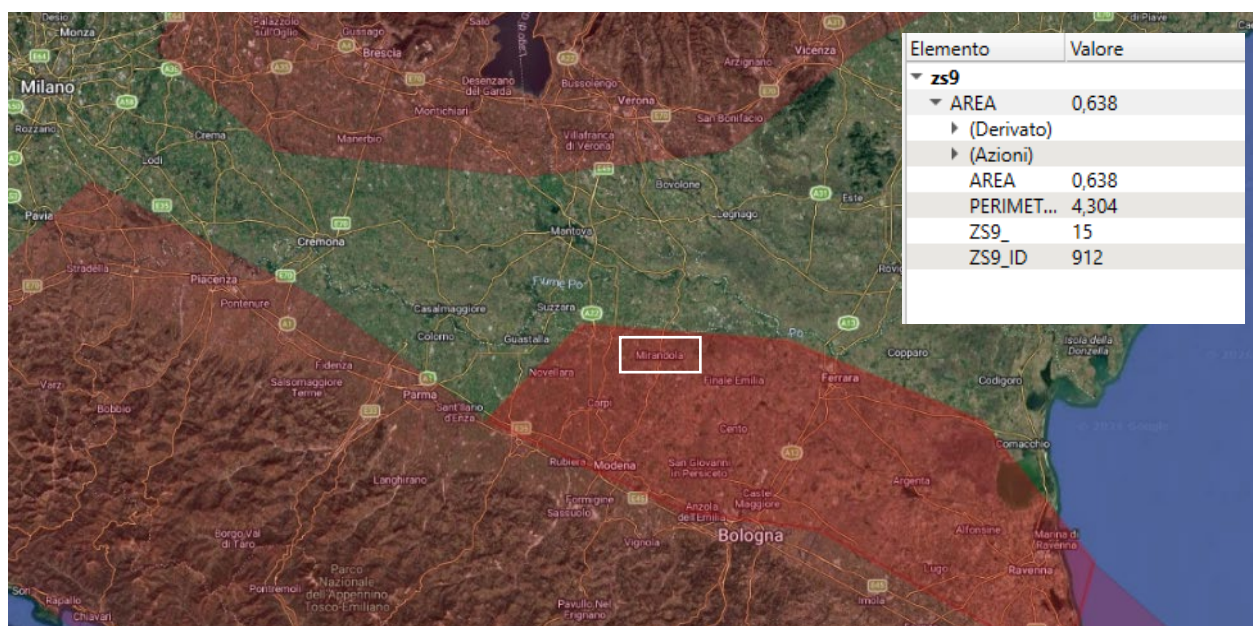


Figura 11 - Zonazione sismica SZ9

Per quanto concerne l'individuazione delle sorgenti sismogenetiche, dalla consultazione del DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) risulta che sono presenti sorgenti sismogenetiche in corrispondenza del centro abitato di Mirandola. La mappa evidenzia la distribuzione delle principali strutture sismogenetiche, organizzate in una serie di archi compressivi sepolti appartenenti al sistema delle Pieghe Ferraresi.

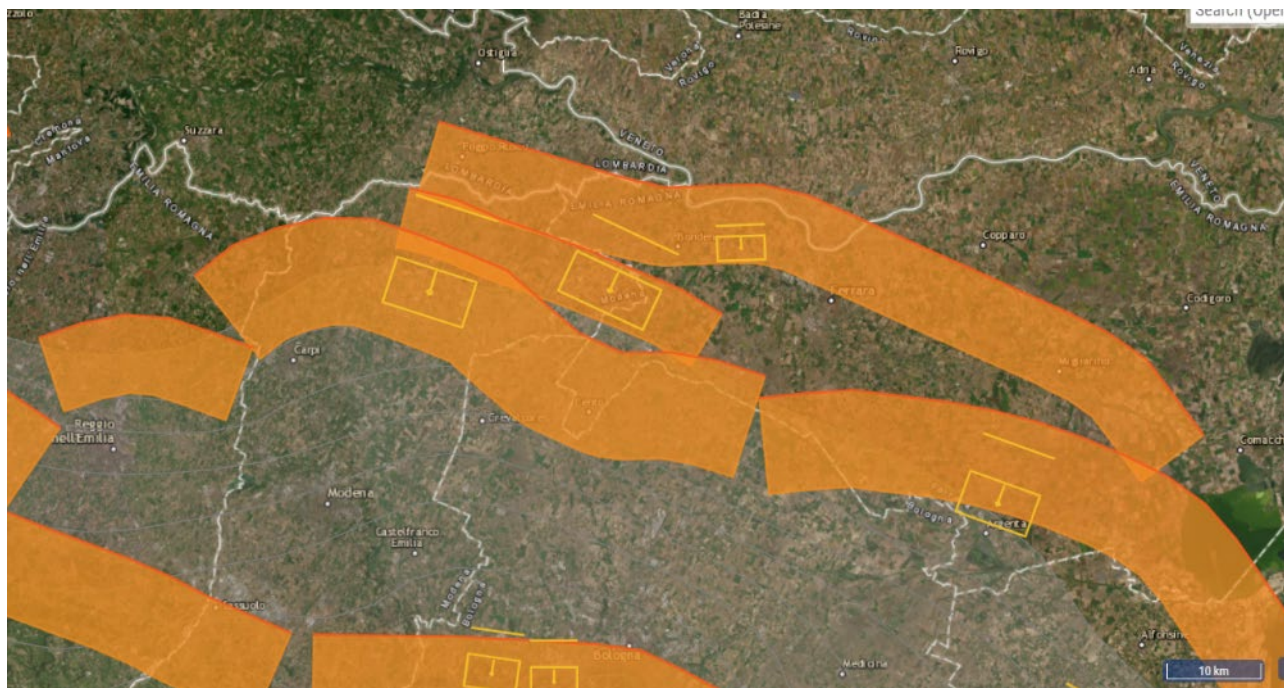
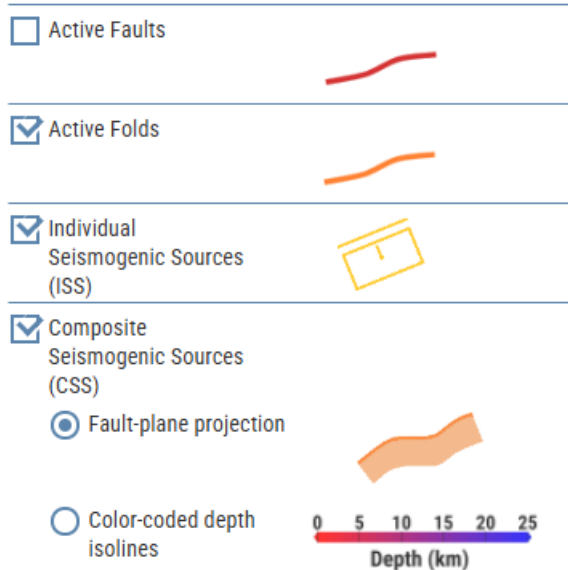


Figura 12 - Estratto della mappa del DISS

### DISS 3.3.1





Il portale ITHACA (ITaly Hazards from Capable faults) è il catalogo nazionale delle faglie capaci in Italia, che raccoglie informazioni sulle faglie attive sulla base di una revisione critica della letteratura. Una faglia è definita capace se può produrre, in tempi rilevanti per la società, deformazioni della superficie terrestre, sia come spostamenti lungo un piano di rottura (offset) sia come deformazioni distribuite (warping). Come mostra l'immagine di seguito la zona è caratterizzata dalla presenza di faglie capaci. Come evidenziato in figura, l'area è caratterizzata dalla presenza di faglie capaci prevalentemente di tipo inverso, in accordo con il contesto tettonico compressivo del fronte appenninico settentrionale.

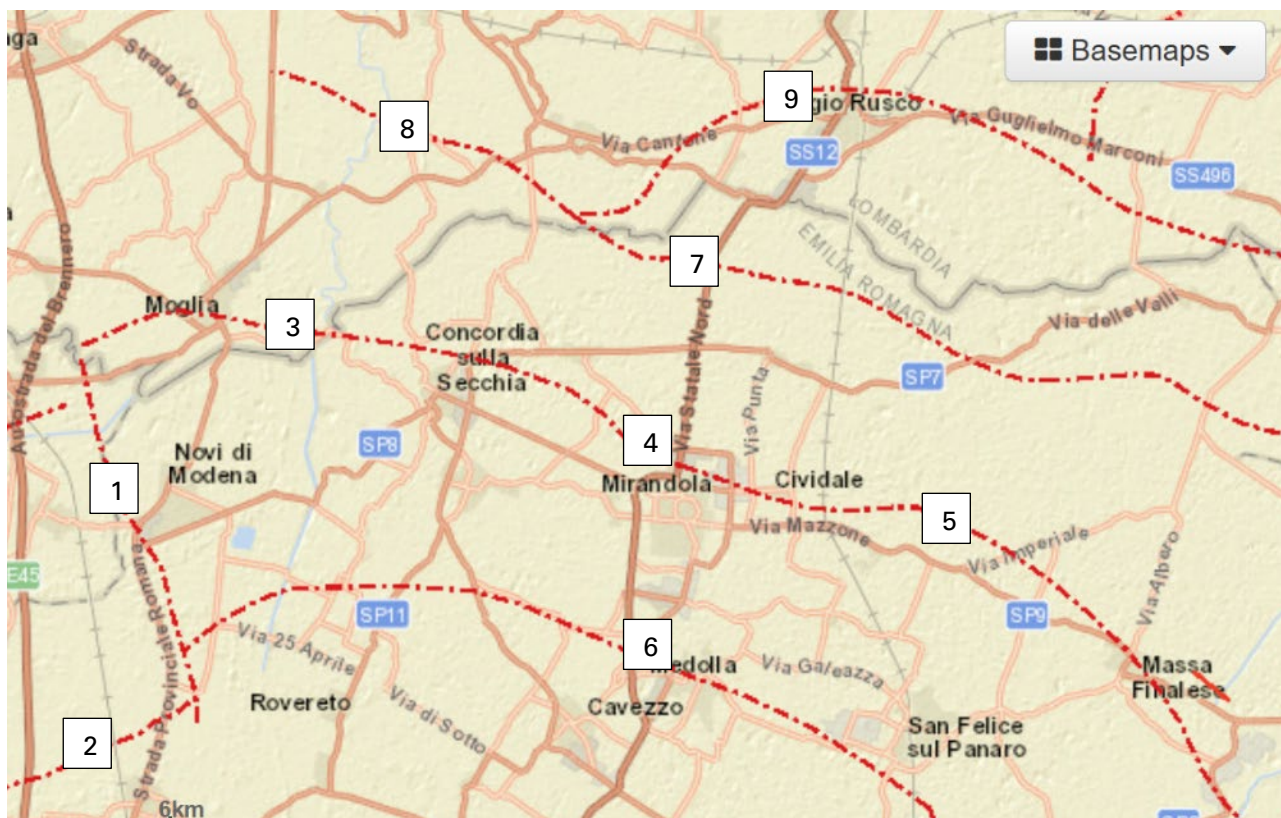


Figura 13 - Stralcio visualizzatore ITHACA

Le principali riportate nello stralcio:

1. Codice faglia 91502, Faglia Novi Modena – Modena. Faglia secondaria inversa;
2. Codice faglia 93760, Faglia Budrione – Modena. Faglia secondaria inversa;
3. Codice faglia 93759, Faglia Concordia sulla Secchia – Modena. Faglia primaria inversa;
4. Codice faglia 90903, Faglia San Giustina – Modena. Faglia primaria inversa;
5. Codice faglia 90815, Faglia Mirandola – Modena. Faglia primaria inversa;
6. Codice faglia 93761, Faglia San Felice sul Panaro – Modena. Faglia secondaria inversa;
7. Codice faglia 93766, Faglia Finale Emilia - Ferrara. Faglia secondaria inversa;
8. Codice faglia 91200, Faglia Vallata. Faglia primaria inversa;
9. Codice faglia 90800, Faglia Ferrara Ridge - Faglia primaria inversa;

#### 4. CAMPAGNE GEOGNOSTICHE

Le informazioni disponibili, derivate dallo studio geologico e geotecnico eseguito dallo studio "G.G.A. S.r.l." (2012) e dalla successiva integrazione nell'anno 2023, consentono la definizione di un modello geologico concettuale di carattere generale. Si evidenzia che le indagini, pur risultando coerenti con il contesto geologico locale, sono state eseguite in area limitrofa e pertanto la loro rappresentatività è da intendersi a scala generale, con possibili variazioni litostratigrafiche locali. In particolare, nella campagna del 2012 si sono svolte le seguenti indagini geognostiche:

- n°2 prove CPT (punti in rosso);
- n°1 prova MASW (linea in giallo);
- n°2 prove HVSr (punti in blu).

Lo studio sopra citato è stato integrato a settembre del 2023 da "RdR Studio" al fine di indagare la suscettibilità nei confronti della liquefazione dell'area.

- n°2 prove penetrometriche statiche a punta elettrica con piezocono CPTU (punti in arancione).

Entrambi i documenti vengono condivisi di seguito negli allegati A e B della presente relazione geologica.



Figura 14 Ubicazione prove – stralcio CTR scala 1:5.000.

#### 4.1. Prove penetrometriche

La successione individuata, con copertura fine coesiva nei primi metri, presenza di orizzonti sabbiosi intermedi e livelli granulari più addensati in profondità, appare in buon accordo con le caratteristiche litostratigrafiche dell'unità AES8 – Subsintema di Ravenna (descritto in precedenza), cui sono riferibili depositi alluvionali di piana costituiti da limi, argille, sabbie e locali ghiaie.

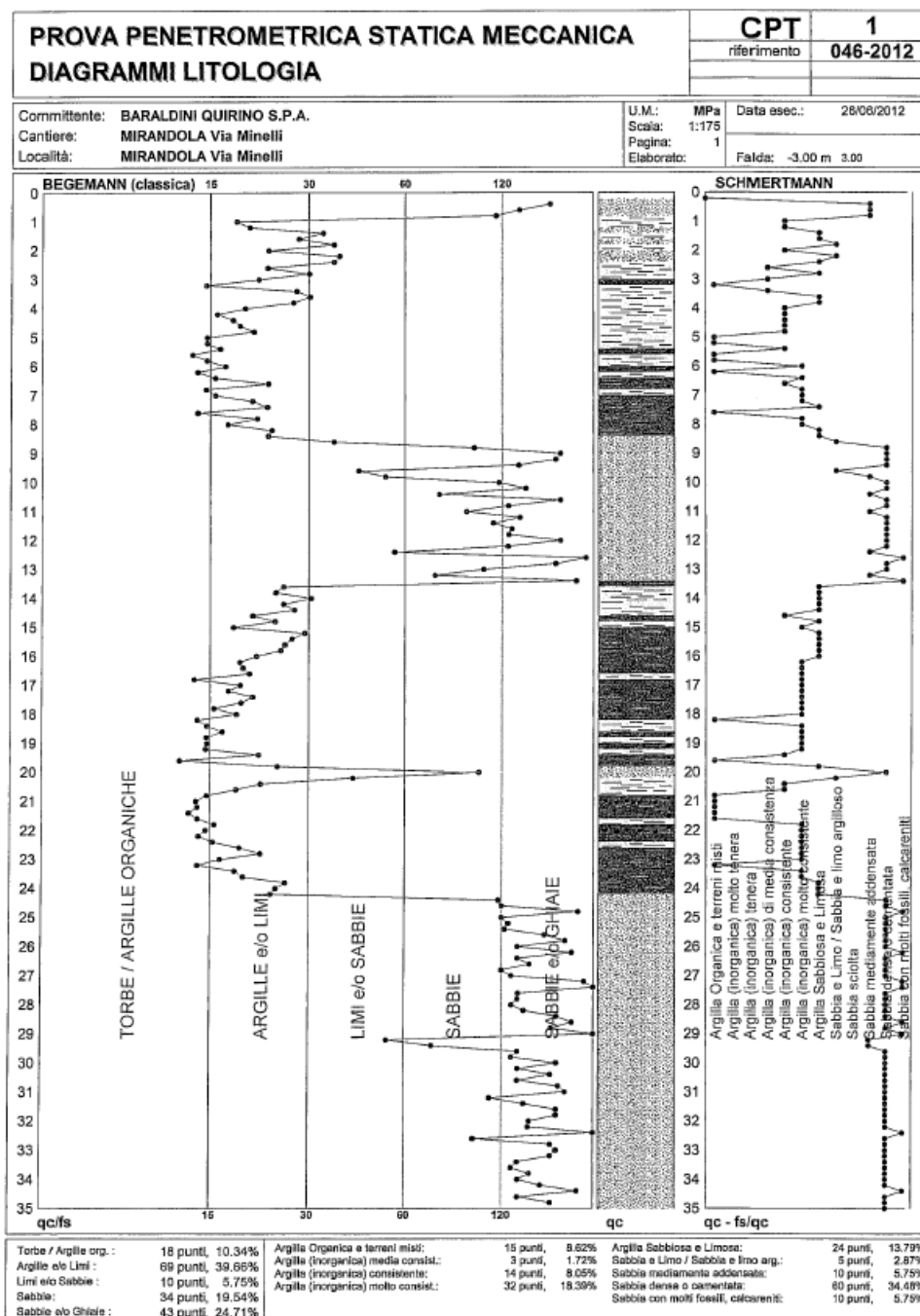


Figura 15 - Prova CPT1 - Campagna geognostica giugno 2012



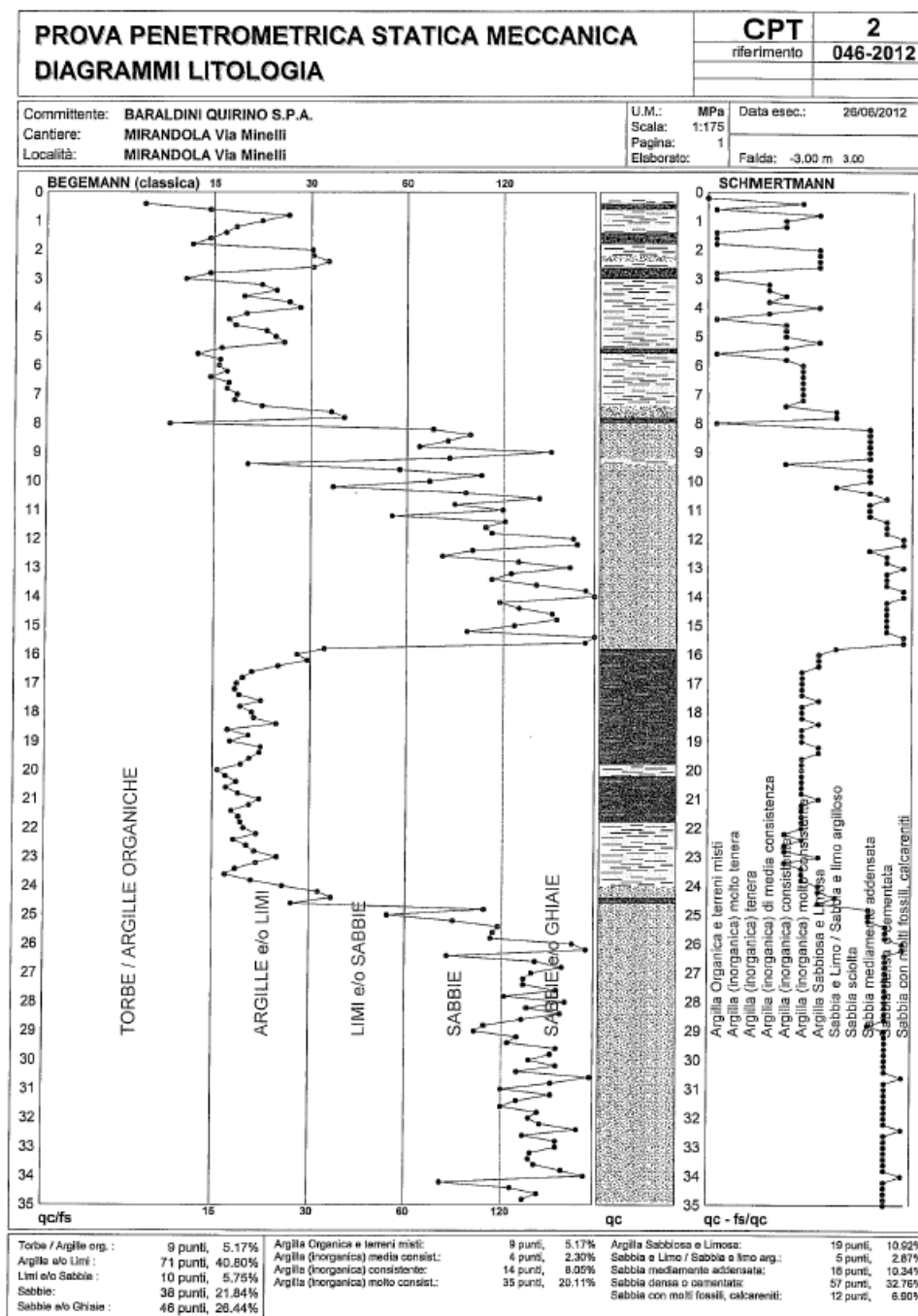


Figura 16 – Prova CPT 2 - Campagna geognostica giugno 2012

**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna  
Cell. 393 8376620  
<http://www.roccocarbonella.it>

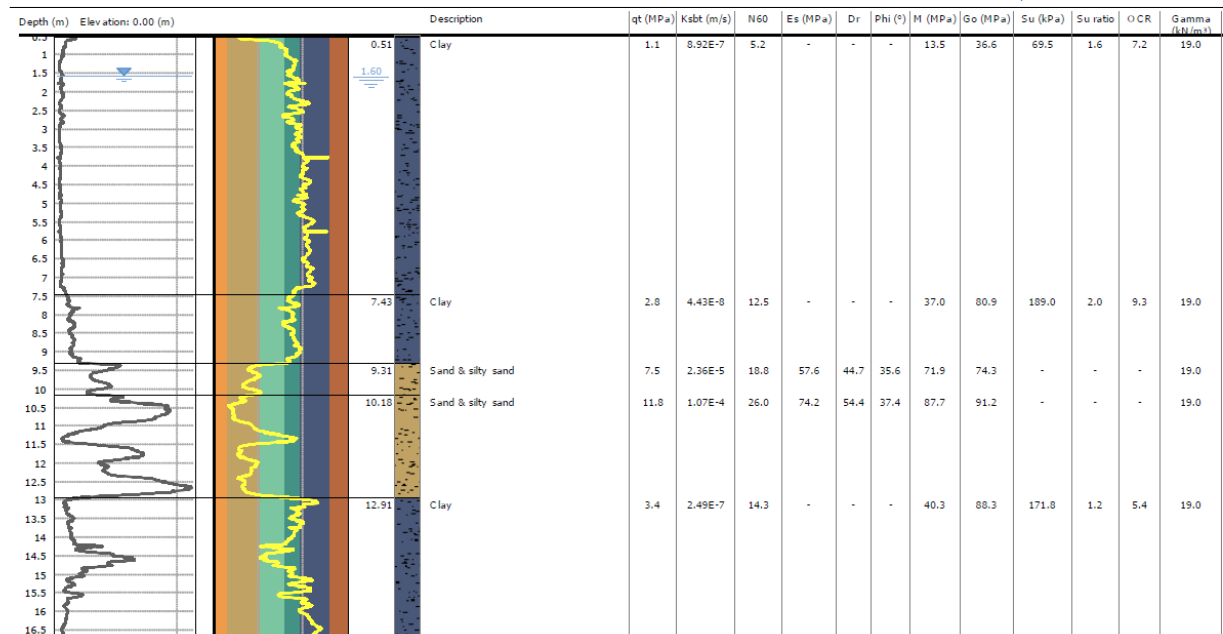
**Project:**

**Location: Mirandola - Via Minelli**

**CPT: CPTU1**

Total depth: 16.69 m, Date: 30/10/2023  
Surface Elevation: 0.00 m  
Coords: X:0.00, Y:0.00  
Cone Type: PAGANI

Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA



**Figura 17 - Prova CPTU1 - Campagna 2023**

**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna  
Cell. 393 8376620  
<http://www.roccocarbonella.it>

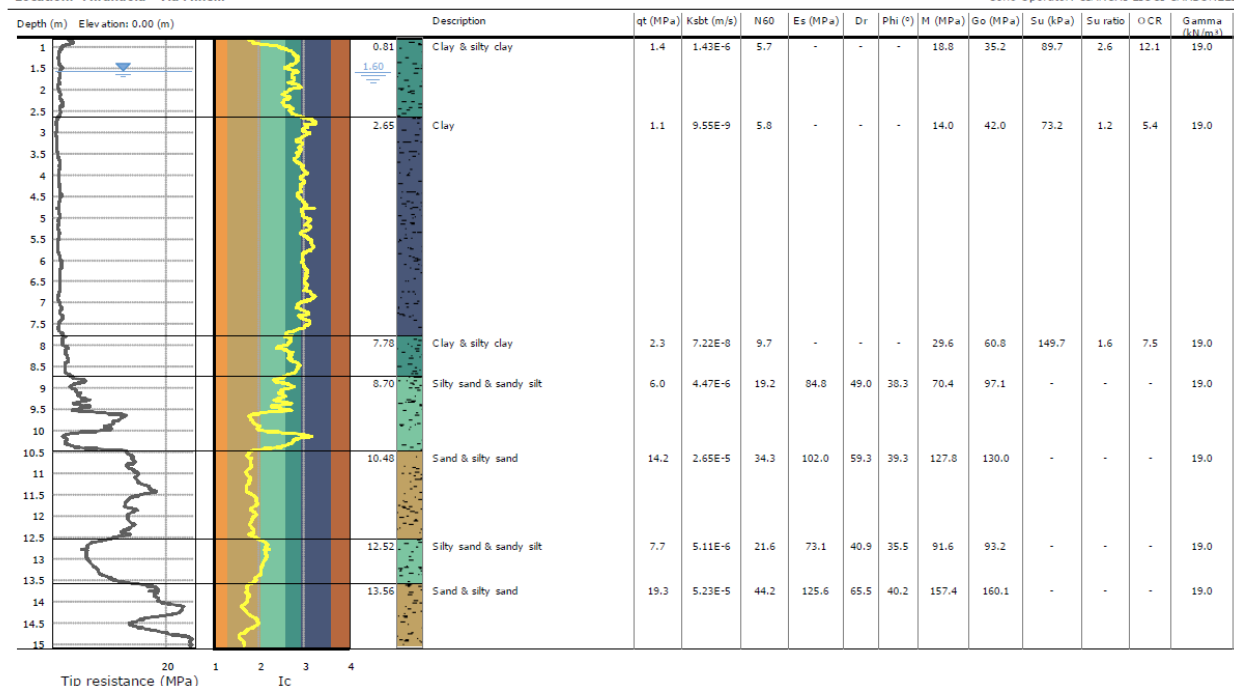
**Project:**

**Location: Mirandola - Via Minelli**

**CPT: CPTU2**

Total depth: 15.03 m, Date: 30/10/2023  
Surface Elevation: 0.00 m  
Coords: X:0.00, Y:0.00  
Cone Type: PAGANI

Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA



**Figura 18 - Prova CPTU2 - Campagna 2023s**

## 4.2. Indagini geofisiche

Si riporta e analizza di seguito quanto emerso dalle indagini geofisiche effettuate nel giugno 2012 da G.G.A S.r.l. La campagna comprendeva l'esecuzione di due HVSR e una MASW.



### MIRANDOLA Via Minelli 14, HVRS - 1

Strumento: TRZ-0121/01-11  
Inizio registrazione: 25/05/12 18:57:28 Fine registrazione: 25/05/12 19:17:28  
Nominali canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN  
Dato GPS: LAT 44,868440° - LONG 11,054387°  
Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 57% tracciato (selezione manuale)  
Freq. campionamento: 128 Hz  
Lunghezza finestra: 20 s - Tipo di liscio: Triangularwindow - Liscio: 10%

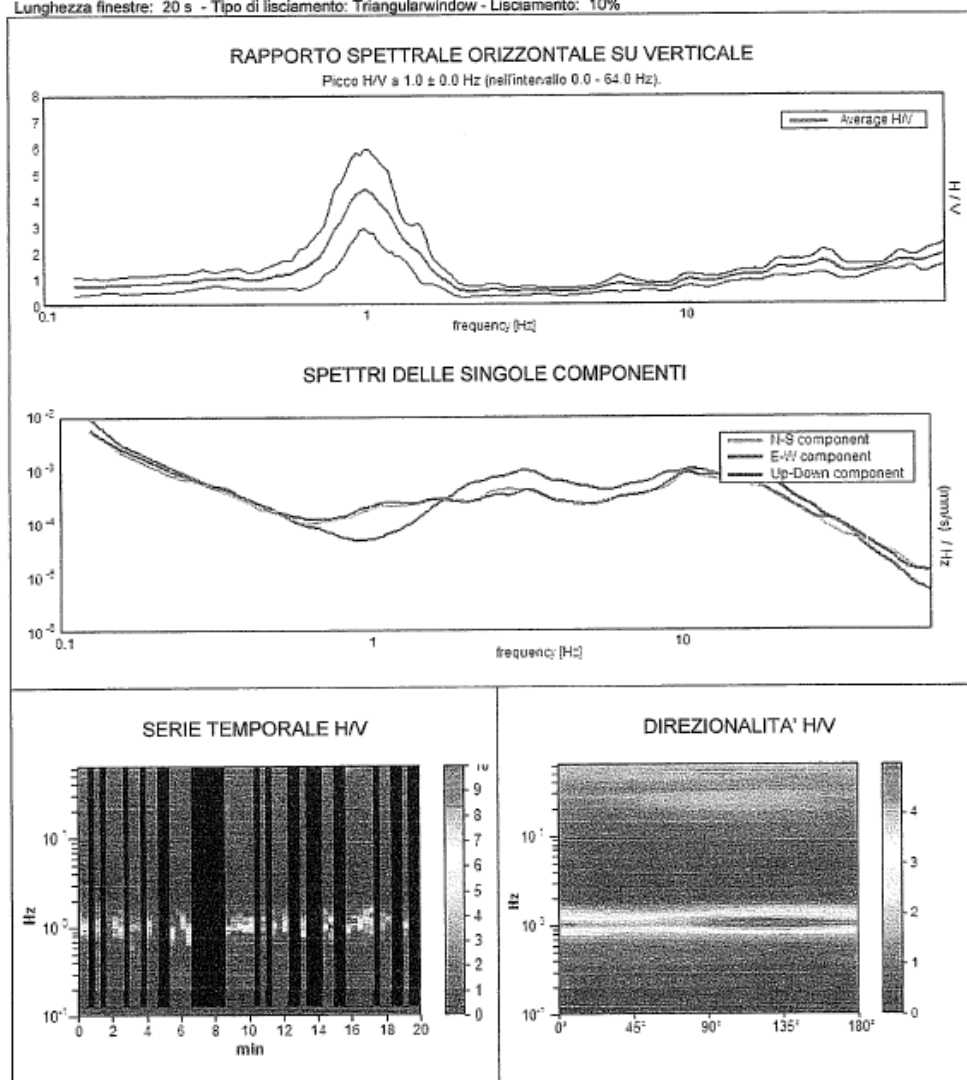


Figura 19 – HVSR 1 – Indagini campagna 2012



## MIRANDOLA Via Minelli 14, HVSR - 2

Strumento: TRZ-0121/01-11

Inizio registrazione: 25/06/12 19:23:07 Fine registrazione: 25/06/12 19:43:07

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS: LAT 44,869094° - LONG 11,055232°

Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 50% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestra: 20 s - Tipo di lisciamento: Triangularwindow - Lisciamento: 10%

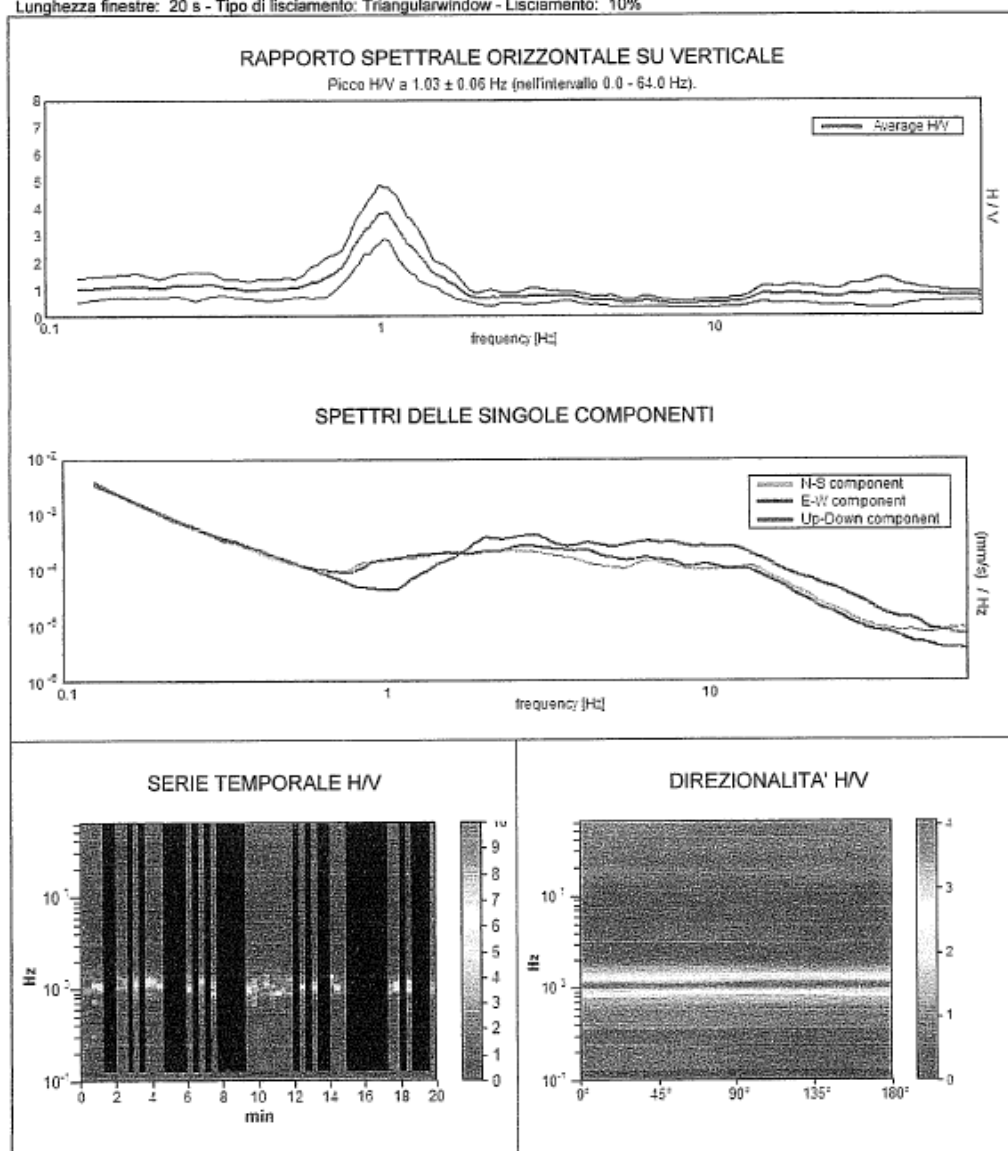
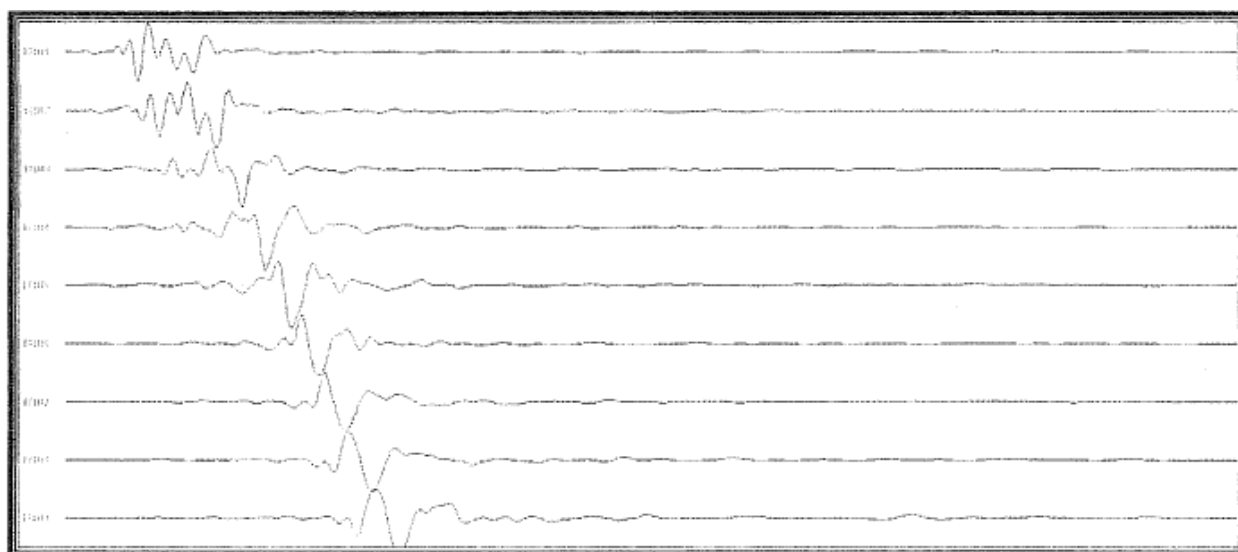


Figura 20 - HVSR2 - Indagini 2012

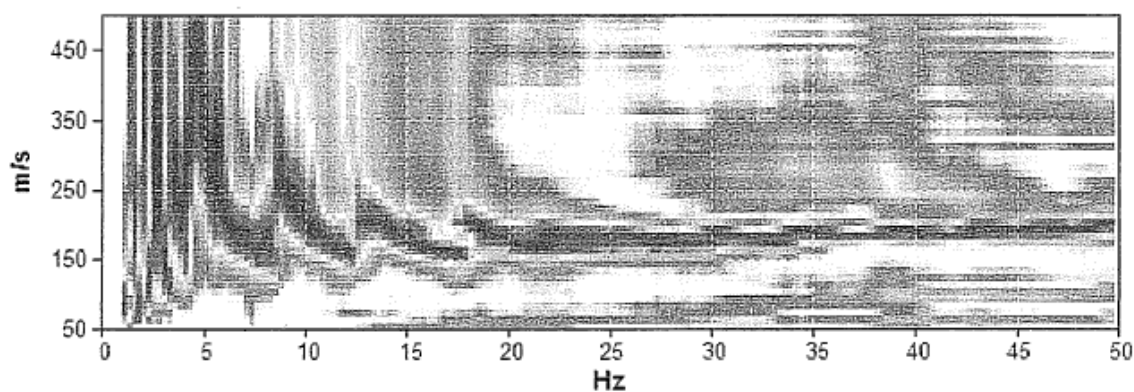
L'analisi HVSR1 mostra la presenza di un picco principale ben marcato a una frequenza di circa 1.0 Hz, con ampiezza compresa tra 5 e 6, attribuibile a un significativo contrasto di impedenza localizzato a profondità medio-elevate. Analogamente, anche la misura HVSR2 evidenzia un picco principale alla

medesima frequenza, con ampiezza leggermente inferiore (circa 4–5), confermando quanto osservato nella precedente analisi.

Per quanto riguarda l'indagine MASW, i valori di velocità di fase risultano compresi indicativamente tra 120 e 300 m/s, evidenziando un progressivo aumento della rigidità dei terreni nei primi metri di sottosuolo. L'andamento della curva di dispersione non risulta perfettamente regolare, suggerendo una struttura stratigrafica eterogenea, coerente con la presenza di alternanze litologiche a diversa rigidità già individuate nelle prove penetrometriche.



**SPETTRO VELOCITA' DI FASE:**



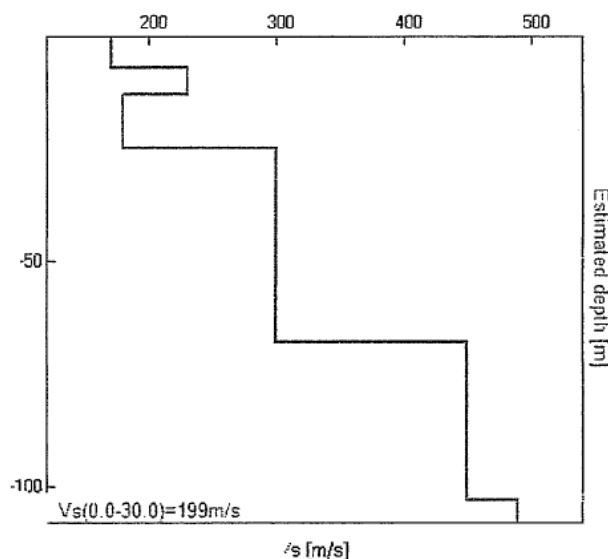


#### 4.3. Modello sismico di sottosuolo

Il modello sismico di sottosuolo è stato definito sulla base delle indagini geofisiche disponibili (MASW e HVSR), eseguite nel 2012 e riportate in Allegato A, integrate con le informazioni stratigrafiche ricavate dalle prove penetrometriche CPT e CPTU. I risultati evidenziano un incremento della rigidità dei terreni con la profondità, con andamento non uniforme nei primi metri, in relazione alla presenza di alternanze litologiche tra livelli più fini e livelli più granulari. Il picco individuato nelle analisi HVSR è interpretabile come associato a un contrasto di impedenza localizzato a profondità maggiori rispetto a quelle investigate mediante prove penetrometriche, mentre i primi metri di sottosuolo risultano caratterizzati da una successione eterogenea con variazioni locali delle proprietà meccaniche, che non costituiscono il contrasto principale.

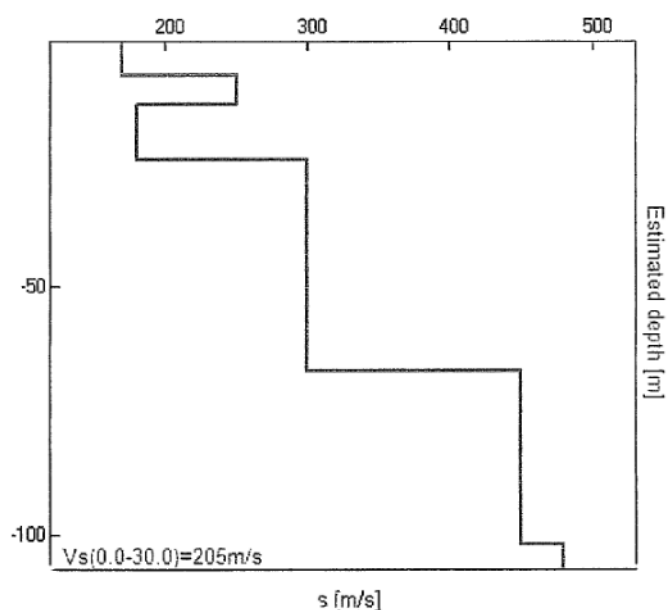
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
7.00	7.00	170	0.49
13.00	6.00	230	0.45
25.00	12.00	180	0.49
68.00	43.00	300	0.42
103.00	35.00	450	0.42
inf.	inf.	490	0.42

$V_s(0.0-30.0)=199\text{m/s}$



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
7.00	7.00	170	0.49
13.00	6.00	250	0.45
24.00	11.00	180	0.49
67.00	43.00	300	0.42
102.00	35.00	450	0.42
inf.	inf.	480	0.42

$V_s(0.0-30.0)=205\text{m/s}$



Sulla base dei dati disponibili (Allegato A), la velocità equivalente delle onde di taglio nei primi 30 m ( $V_{s,30}$ ) risulta pari a circa 200 m/s.

Il modello così definito ha carattere indicativo e pertanto non si escludono variazioni locali delle proprietà dei terreni.

Alla luce della variabilità stratigrafica del sottosuolo, l'azione sismica di progetto è stata definita mediante analisi di risposta sismica locale (RSL), in accordo con le NTC 2018.

Viene di seguito riportata la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  (m/s) definita dall'espressione:

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

Dove:

$h_i$  spessore dell' $i$ -esimo strato

$V_{s,i}$  velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato (m/s)

$N$  numero di strati

$H$  profondità del substrato sismico (m) definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $v_s$  non inferiori a 800 m/s.

Per depositi con profondità  $H$  del substrato superiore a 30 m la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  è di fatto definita dal parametro  $V_{s,30}$  ottenuto ponendo  $H=30$  m nell'espressione della  $V_{s,eq}$ .

*Tabella 1 – Valori di  $V_{s,30}$*

PROVA	$V_{s,30}$
HVSR1	199 m/s
HVSR2	205 m/s
MASW	202 m/s

Si rimanda all'allegato A per ulteriori specifiche.

#### 4.4. Modello geologico

Le prove penetrometriche CPT e CPTU evidenziano una successione litostratigrafica eterogenea, costituita da terreni fini superficiali con intercalazioni di livelli sabbiosi a diversa profondità, coerente con un modello deposizionale di piana alluvionale a dinamica fluviale, in cui corpi sabbiosi di canale o di esondazione si inseriscono entro una matrice prevalentemente limoso-argillosa. Sulla base delle indagini disponibili, è stato definito il seguente schema stratigrafico di riferimento, a carattere interpretativo:

*Tabella 2 - Schema stratigrafico di riferimento a carattere interpretativo, derivato da prove CPT e CPTU*

Unità	Profondità (m)	Litologia
U1	0.00 – 8.0 / 9.0	Costituita prevalentemente da argille limose e limi argillosi, con locali intercalazioni organiche.
U2	8.0 / 9.0 – 12.0 / 13.0	Costituita da sabbie limose, limi sabbiosi, sabbie e localmente frazioni ghiaiose.
U3	12.0 / 13.0 – 15.0 / 16.0	Alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi e locali livelli a comportamento coesivo.
U4	15.0 / 16.0 – 24.0 / 25.0	Argille limose, limi argillosi
U5	> 24.0 / 25.0	Sabbie, sabbie limose, locali sabbie ghiaiose

Le profondità delle interfacce stratigrafiche sono indicative e possono presentare variazioni laterali, in relazione alla natura deposizionale dei terreni (ambienti di piana alluvionale con apporti di ventagli di esondazione), caratterizzati da geometrie lentiformi e discontinuità locali.

La falda, in entrambe le prove CPTU viene riscontrata a circa ad 1,5 m da p.c.



## 5. ASPETTI SISMICI

### 5.1. Azione sismica di base

L'azione sismica viene valutata a partire dalla cosiddetta "pericolosità sismica di base" riferita a un sito con suolo rigido (categoria A) e superficie topografica orizzontale. Allo stato attuale la pericolosità sismica di base sul territorio italiano è fornita dai dati pubblicati sul sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica; in particolare, per il sito in oggetto, la mappa Interattiva di Pericolosità Sismica dell'INGV indica un'accelerazione di picco al suolo di tipo A con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni ( $TR=475$  anni) pari a  $PGA=0.125-0.150$  g.

I parametri di pericolosità sismica di base sopra riportati sono stati utilizzati esclusivamente per la definizione dell'input sismico dell'analisi di risposta sismica locale (RSL), dalla quale derivano gli spettri di progetto.

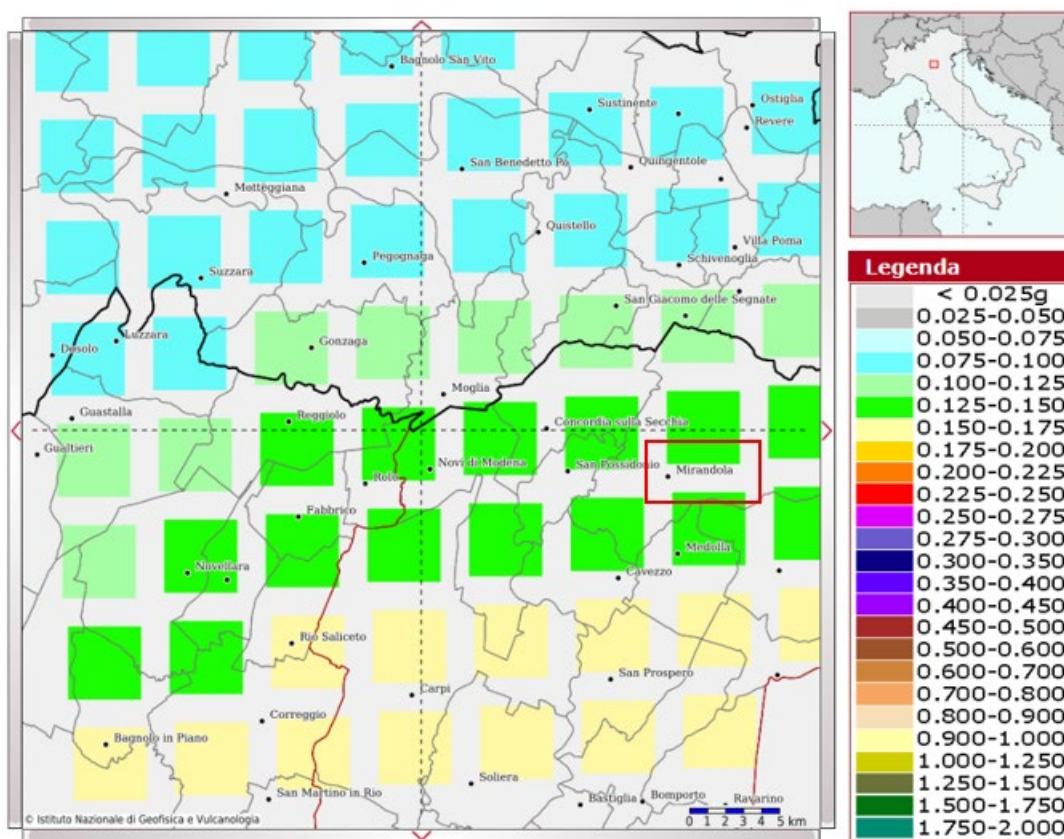


Figura 21 - Mappa di pericolosità sismica per l'area di Mirandola

Il grafico di disaggregazione mostra come la pericolosità di base sia imputabile soprattutto a terremoti con magnitudo comprese tra 4.0 e 6.0 con distanze epicentrali entro i 40 km: il contributo percentuale maggiore è dato dalla coppia M-D 5-5,5 /entro i 10 km.

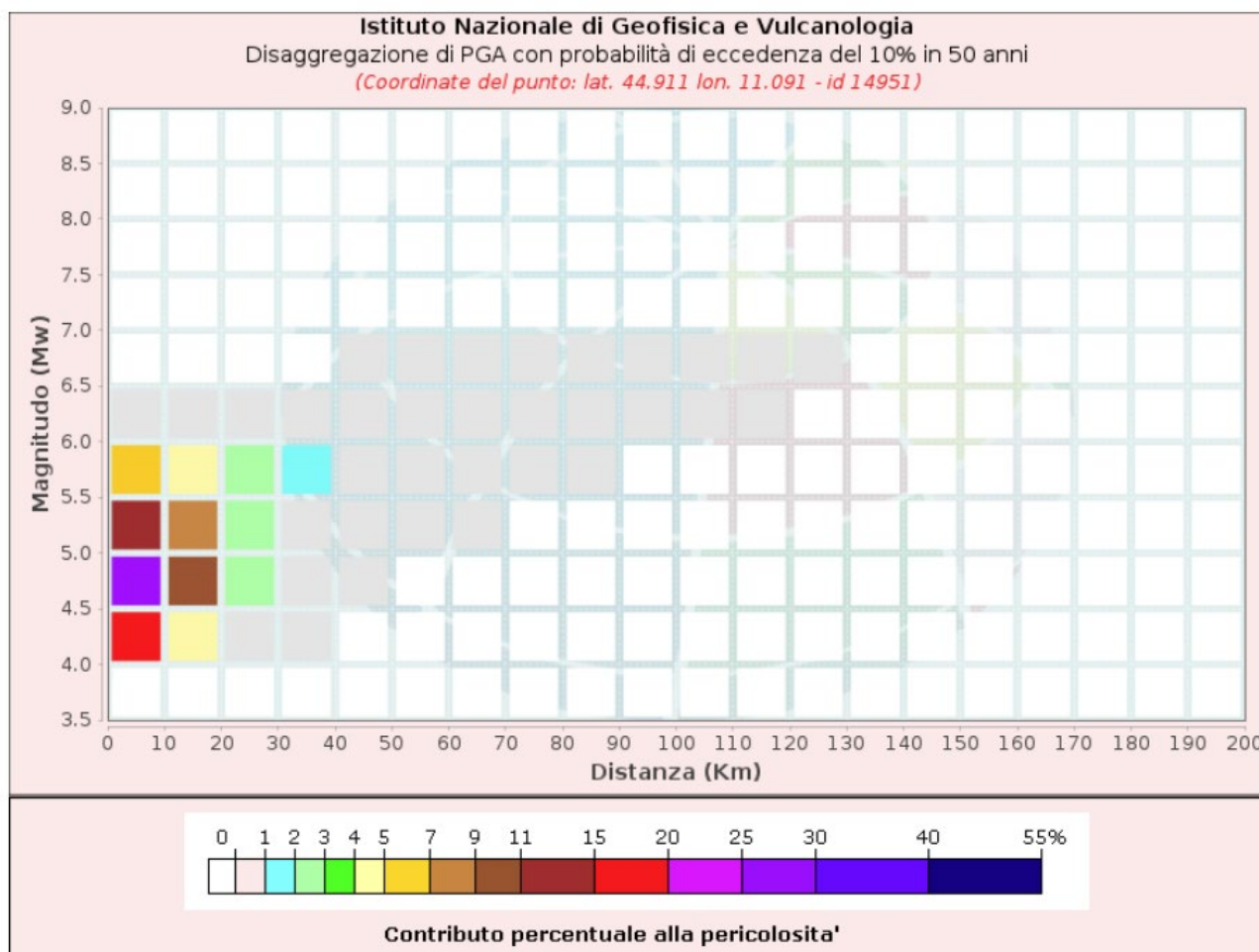


Figura 22 - Grafico disaggregazione

## 5.2. Risposta sismica locale

In conformità a quanto previsto dalle NTC 2018 (§3.2.2 e §7.11.3), in presenza di analisi di risposta sismica locale (RSL), l'azione sismica di progetto è definita direttamente dagli spettri di risposta ottenuti in sostituzione dell'approccio semplificato basato sui coefficienti di amplificazione stratigrafica. Al fine di tenere conto delle specifiche condizioni stratigrafiche del sito, è stata pertanto eseguita un'analisi di risposta sismica locale monodimensionale.

I risultati dell'analisi, riportati integralmente in Allegato E, comprendono gli spettri di risposta in superficie relativi agli stati limite considerati (SLV e SLD), che costituiscono il riferimento per la definizione dell'azione sismica di progetto.

### SLV

Punto di controllo	$A_g$ [g]	$F_0$	$S$	$A_{max}$ [g]	$T_b$ [sec]	$T_c$ [sec]	$T_d$ [sec]
P (1)	0.143	2.466	1.263	0.181	0.164	0.491	2.172

dove:

- $A_g$  : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$  : valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $S$  : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- $A_{max}$  : punto di ancoraggio a  $T=0$  dello spettro di output;
- $T_b$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- $T_c$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- $T_d$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

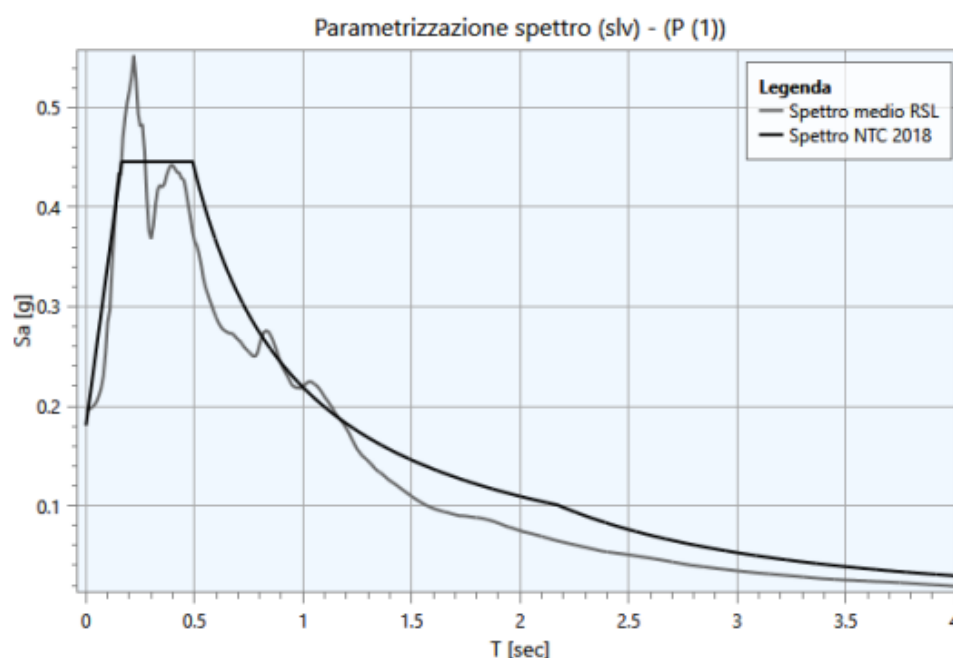


Figura 23 – Spettro SLV

### SLD

Punto di controllo	$A_g [g]$	$F0$	$S$	$A_{max} [g]$	$T_b [sec]$	$T_c [sec]$	$T_d [sec]$
P (1)	0.048	2.456	1.515	0.073	0.154	0.462	1.792

dove:

- $A_g$  : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F0$  : valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $S$  : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- $A_{max}$  : punto di ancoraggio a  $T=0$  dello spettro di output;
- $T_b$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- $T_c$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- $T_d$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

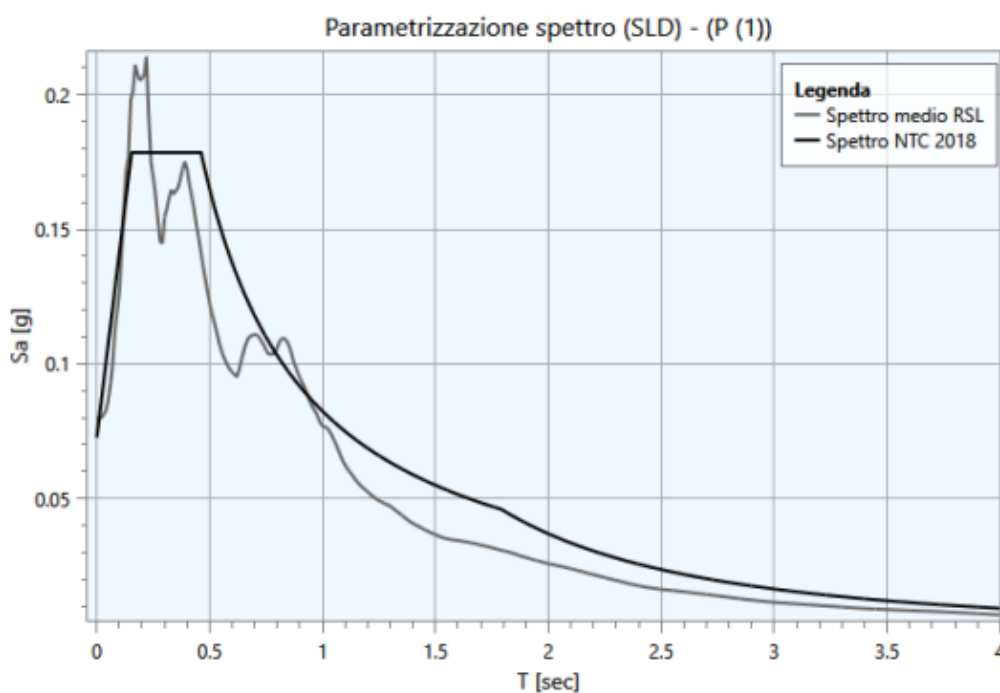


Figura 24 – Spettro SLD



### 5.3. Classificazione stratigrafica e topografica del sito

A fini descrittivi i terreni vengono classificati nella **categoria di sottosuolo C** (*Tabella 3.2. II NTC 2018*) sulla base della  $V_{s,30}$  e nella **categoria topografica T1** (*Tabella 3.2.IV NTC 2018*) poiché ci si trova in corrispondenza di superficie pianeggiante.

**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 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.</i>
B	<i>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.</i>
C	<i>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 la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi 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.</i>
E	<i>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.</i>

*Figura 25* Tabella 3.2. II NTC18 Categorie di sottosuolo

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

*Figura 27* Categorie topografiche secondo NTC 2018

La classificazione stratigrafica sopra riportata ha carattere descrittivo, in quanto l'azione sismica di progetto è stata definita mediante analisi di risposta sismica locale.

## 6. RISCHIO

### 6.1. Stabilità nei confronti della liquefazione

L'area, come mostra lo stralcio della "Carta di Microzonazione sismica Livello 3" riportata di seguito (sintesi per il Piano Strutturale Comunale) è interessata da effetti locali. È infatti caratterizzata da fattori predisponenti come la falda a circa 1,60 m da p.c. e da depositi alluvionali recenti.



*Figura 27 Stralcio carta di microzonazione sismica – Livello 3.*

Ai sensi del §7.11.3.4.2 delle NTC 2018 non risulta infatti escludibile la verifica di stabilità nei confronti della liquefazione in quanto il sito non soddisfa le condizioni previste per l'esclusione e presenta valori di accelerazione sismica attesa superiori alla soglia di riferimento.

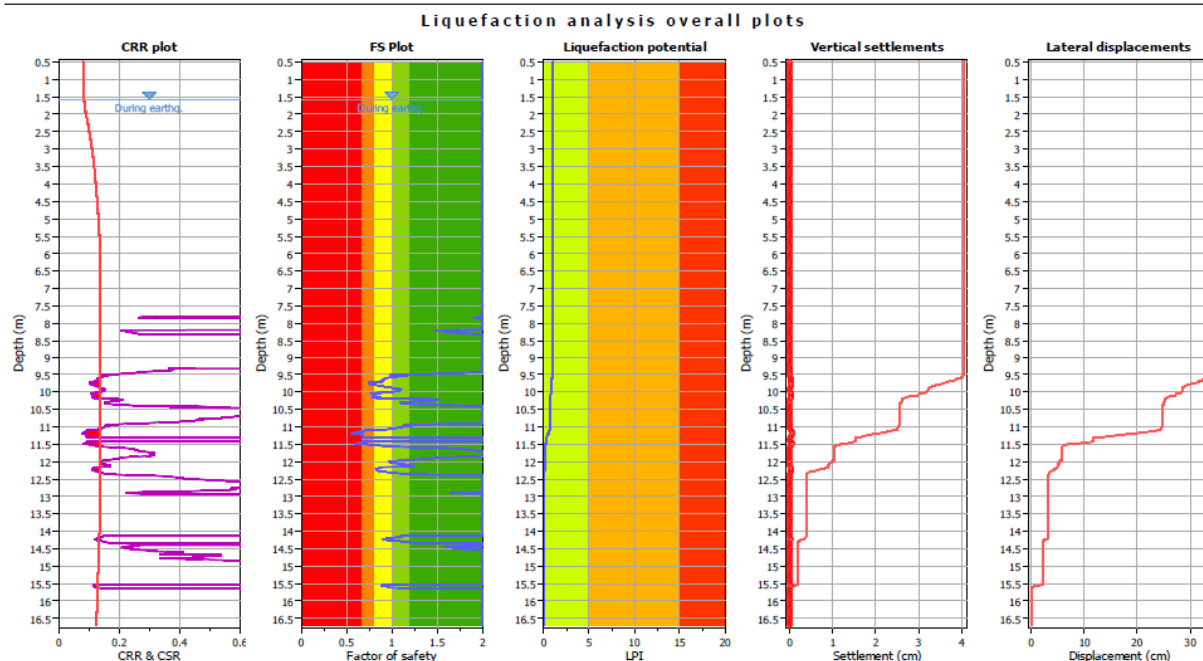
Al fine di valutare la suscettibilità del sito, la campagna geognostica del 2012 è stata integrata mediante l'esecuzione di n. 2 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU), i cui risultati sono riportati integralmente nell'Allegato B.

Si riportano i grafici complessivi relativi alle prove CPTU-1 e CPTU-2 e ai valori ottenuti dell'indice di rischio del potenziale di liquefazione.

Secondo le normative europee (EC08) un terreno è suscettibile di liquefazione quando lo sforzo di taglio generato dal terremoto supera l'80% dello sforzo critico ( $CSR \geq 0.80 CRR$ ) e il Fattore di Sicurezza deve risultare  $\leq 1,25$ . Le verifiche a liquefazione sono state condotte mediante approccio semplificato, utilizzando un valore di accelerazione massima al piano campagna pari a 0.21 g, assunto in modo cautelativo rispetto ai valori derivanti dall'analisi di risposta sismica locale.

This software is licensed to:

CPT name: CPTU1



This software is licensed to:

CPT name: CPTU2

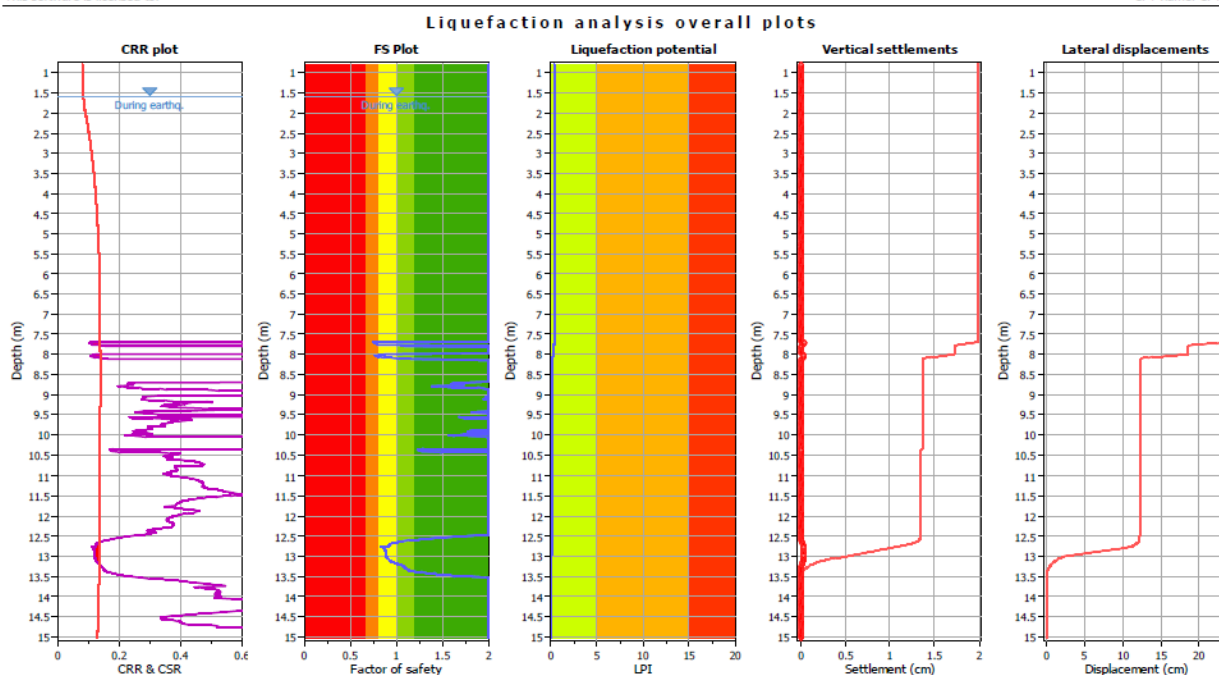
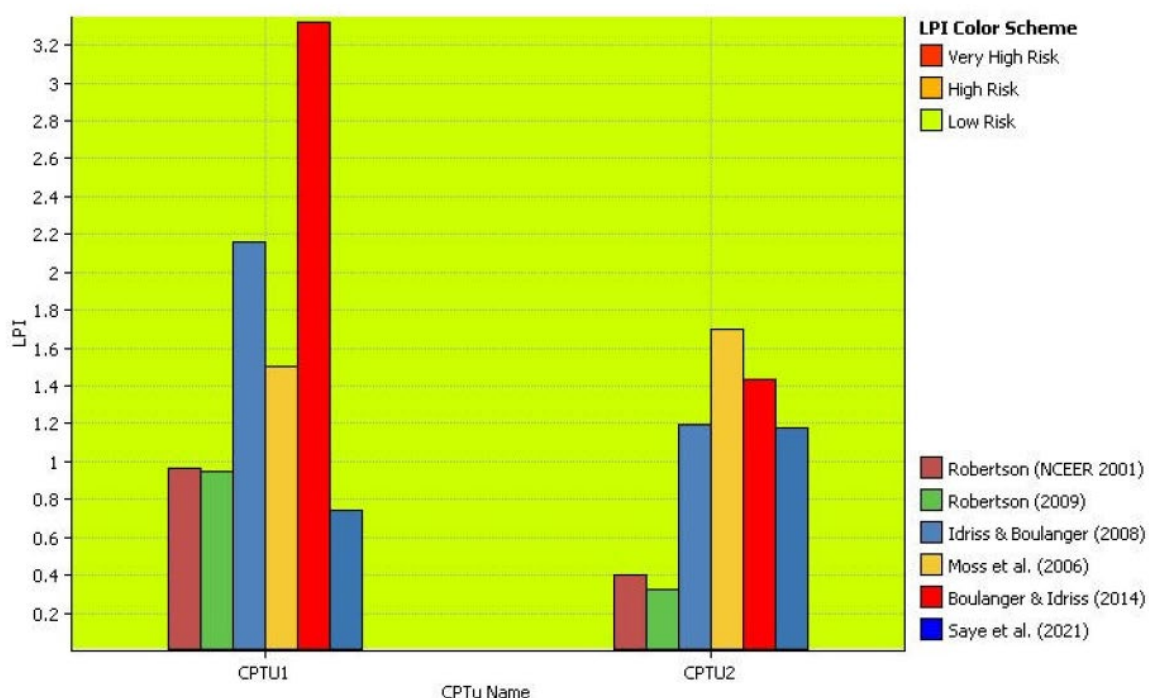


Figura 28- Risultati ottenuti per la verifica a liquefazione delle CPTU1 e CPTU2

L'analisi dei risultati evidenzia la presenza di condizioni favorevoli all'innesco del fenomeno della liquefazione sismica in corrispondenza di alcuni livelli stratigrafici granulari nei quali il fattore di sicurezza (FS) risulta localmente inferiore all'unità. Il contesto territoriale di riferimento, come documentato in letteratura e dagli eventi sismici recenti (in particolare il sisma dell'Terremoto dell'Emilia del 2012), ha evidenziato fenomeni diffusi di liquefazione nell'area di Mirandola, confermando la suscettibilità dei terreni locali.

Alla luce di tali elementi — presenza di strati critici, limitata rappresentatività puntuale delle indagini e comprovata suscettibilità dell'area — si ritiene che il sito presenti una probabilità significativa di liquefazione in caso di evento sismico.

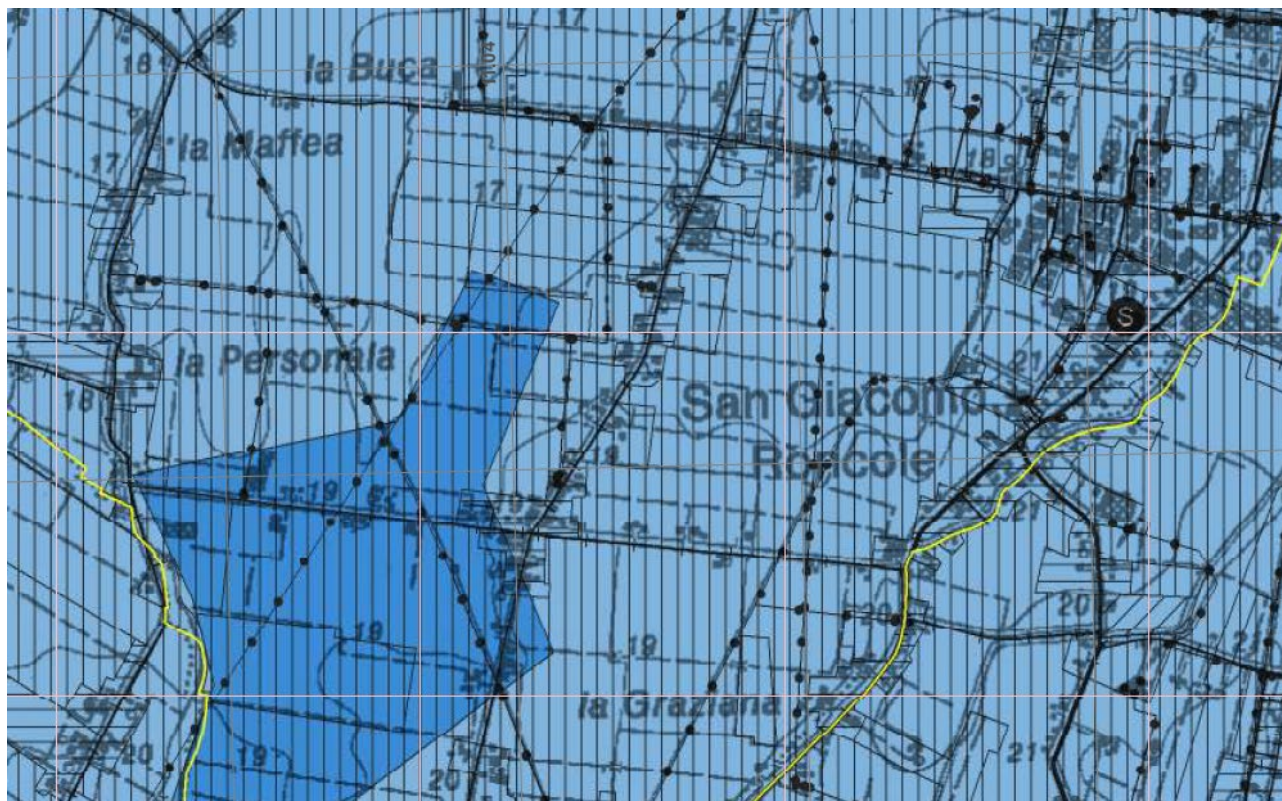


*Figura 29 - Calcolo potenziale di liquefazione con i vari metodi di calcolo*



## 6.2. Rischio alluvioni

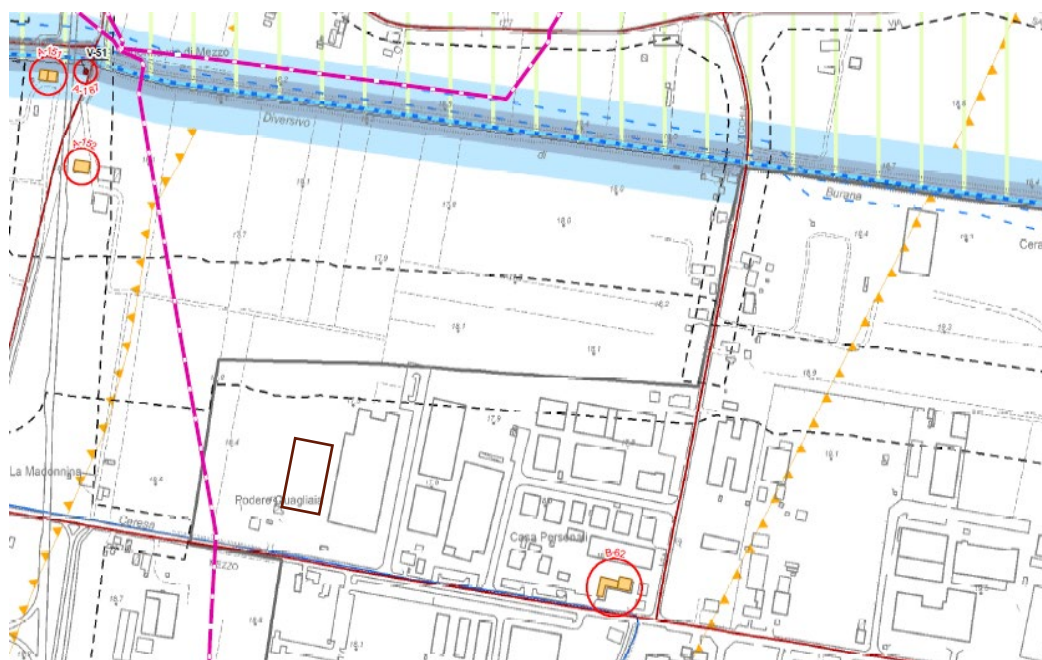
Lo stralcio della carta sotto riportata configura il quadro conoscitivo della pericolosità di alluvioni relativa al reticolo secondario artificiale dei canali di bonifica; è presente nei pressi del sito oggetto del presente studio il canale Sabbioncello (circa 400 m). La zona di San Giacomo di Roncole (MO) si trova all'interno della zona P2-M (Alluvioni poco frequenti: tempo di ritorno tra 100 e 200 anni – media probabilità). Viene riportata in allegato la carta integrale.



*Figura 30 Stralcio carta 183SE*

## 7. VINCOLI

Al fine di inquadrare il regime dei vincoli insistenti sull'area, si riportano di seguito gli stralci della carta dei vincoli desunti dal PUG e dal PSC, entrambi vigenti alla data di redazione della presente relazione.



Permesso di  
costruire

Realizzazione di impianto di recupero rifiuti  
speciali ubicato presso l'area in via di Mezzo  
snc a Mirandola (MO)

Relazione geologica

SIS.08.07  
PS.06.1



L'area oggetto di intervento non risulta direttamente interessata da vincoli ma nelle immediate vicinanze sono cartografati il passaggio di gasdotti e il reticolo idrografico della Bonifica di Burana.

## 8. CONCLUSIONI

Alla luce delle analisi svolte e dei dati disponibili, il sito oggetto di intervento risulta inserito in un contesto geologico di pianura alluvionale caratterizzato da una stratigrafia eterogenea, con prevalenza di terreni fini superficiali e presenza di livelli granulari intercalati a diversa profondità.

Le indagini disponibili registrano la presenza della falda a circa 1,50 m da p.c.

Le indagini geognostiche disponibili risultano coerenti con il quadro geologico locale e consentono la definizione di un modello stratigrafico rappresentativo a scala di sito, fermo restando il possibile verificarsi di variazioni laterali puntuali, tipiche degli ambienti deposizionali fluviali.

Dal punto di vista sismico, il sito è caratterizzato da una pericolosità significativa, come evidenziato sia dai parametri di normativa sia dal quadro sismotettonico locale, che include strutture attive e una documentata sismicità storica. L'azione sismica di progetto è stata definita mediante analisi di risposta sismica locale (RSL), che ha consentito di valutare in modo più rappresentativo gli effetti stratigrafici e le specifiche condizioni del sito.

Le verifiche di stabilità nei confronti della liquefazione evidenziano la presenza di livelli granulari saturi suscettibili all'innescio del fenomeno, nei quali il fattore di sicurezza risulta localmente inferiore all'unità. Tali condizioni risultano coerenti sia con il contesto geologico del sito sia con le evidenze osservate nel territorio in occasione degli eventi sismici del 2012, durante i quali si sono manifestati fenomeni di liquefazione. Le verifiche sono state condotte mediante approccio semplificato, adottando un valore di accelerazione massima al piano campagna assunto in modo cautelativo rispetto ai risultati dell'analisi di risposta sismica locale (RSL), risultando pertanto coerenti con il quadro sismico di sito.

L'indice di potenziale di liquefazione (LPI), che rappresenta una misura degli effetti del fenomeno in funzione della profondità e dello spessore degli strati suscettibili, assume valori compresi nell'intervallo  $2 < LPI \leq 5$ , classificati in letteratura come indicativi di suscettibilità moderata (Sonmez, 2003).





## **ALLEGATO A**

### **“Relazione geologica sulle indagini”**

# **RELAZIONE GEOGNOSTICA SULLE INDAGINI ESEGUITE IN SITO**

## **MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL SITO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL VOLUME SIGNIFICATIVO DI TERRENO INTERESSATO DALLA MESSA IN SICUREZZA DI UN CAPANNONE ESISTENTE**

### **ANALISI SISMICA DEL SITO RIPORTANTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE**

D.P.R. 380/2001

DECRETO MINISTERIALE 14 GENNAIO 2008

Legge Regionale 30 Ottobre 2008 n. 19 "Norme per la riduzione del rischio sismico"

CIRCOLARE 02/02/2009 n. 617

Atto C.P. 112 del 22/07/2008 di Adozione della Variante Generale al P.T.C.P. della Provincia di Modena approvato con D.C.P. n°46 del 18/03/2009

COMMITTENTE: BARALDINI QUIRINO S.P.A.

CANTIERE : Via Luciano Minelli – San Giacomo Roncole - MIRANDOLA –

DATA: GIUGNO 2012



<b>1.PREMESSA</b>	<b>pag.3</b>
<b>2.RIFERIMENTI NORMATIVI</b>	<b>pag.3</b>
<b>3.MODELLO GEOLOGICO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA</b>	<b>pag.4</b>
3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO PAESAGGISTICO	pag.4
3.2 DESCRIZIONE DEI PROCESSI DI MODELLAMENTO GEOMORFOLOGICO DELL'AREA	pag.6
3.3 CARATTERISTICHE TECNICHE DI INDAGINE	pag.8
3.4 INTERPRETAZIONE LITOLOGICA	pag.9
3.5 PARAMETRI GEOTECNICI MEDI E CARATTERISTICI	pag.10
3.6 PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO	pag.13
<b>4. ANALISI SISMICA RIPORTANTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE DEL SITO</b>	<b>pag.14</b>
4.1 SISMICITA' DEL TERRITORIO	pag.14
4.1.1 <i>Cenni sulla sismotettonica della pianura padana</i>	pag.14
4.2 MODELLO SISMICO DEL SOTTOSUOLO	pag.16
4.2.1. <i>Definizione categoria sismica mediante analisi HVRS del sottosuolo e mediante analisi onde di superficie MASW</i>	pag.16
4.2.1.1 Prospezione sismica HVSR – Cenni di teoria	pag.16
4.2.1.2 Effetti di percorso	pag.16
4.2.1.3 Definizioni.	pag.17
4.2.1.4 Tecnica impiegata	pag.17
4.2.1.5 Strumentazione - Caratteristiche del campionamento ed elaborazione	pag.18
4.2.1.6 Schede di acquisizione elaborazione e interpretazione	pag.18
4.2.2 <i>MASW - In Onde Rayleigh</i>	pag.21
4.2.2.1 Schede di acquisizione elaborazione e interpretazione	pag.22
4.2.3 <i>Modello sismico del sottosuolo</i>	pag.23
4.3 ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE	pag.28
4.3.1 <i>Spettri Di Risposta Elastici</i>	pag.29
4.3.2 <i>Analisi Del Rischio Di Liquefazione Da Prove In Sito</i>	pag.32
<b>5.CONCLUSIONI</b>	<b>pag.38</b>
<b>ALLEGATI</b>	<b>pag.43</b>

## **1.PREMESSA**

Su incarico e per conto del Committente si produce una modellazione geologica del sito, una analisi di pericolosità sismica locale riportando gli effetti attesi e una caratterizzazione geotecnica del volume significativo di terreno interessato dalla messa in sicurezza di un capannone esistente in elementi prefabbricati sito in Via Luciano Minelli in frazione di San Giacomo Roncole, in Comune di Mirandola.

La caratterizzazione litologica di dettaglio e la definizione dei parametri geotecnici del volume di terreno influenzato dalla struttura su cui operare sono ricavati dai risultati di n. 2 prove penetrometriche statiche di tipo meccanico, eseguite in sito in data 26/06/2012 dal Laboratorio di prove geotecniche in sito GEOPROGETTI S.r.l. di Medolla.

Le prove sono state spinte alla profondità di - 35.00 m per la definizione in dettaglio delle caratteristiche litologiche e stratigrafiche fino a tale quota.

Al fine di produrre un'analisi di pericolosità sismica locale, determinare il valore della velocità di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m e fornire la frequenza fondamentale del sito, si sono realizzate in data 25/06/2012 n. 2 prove di sismica passiva con tomografo digitale modello TRZ-0121/01/11 progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico e un rilievo geofisico in onde di superficie MASW con strumento SoilSpy Rosina modello SAB-0019/02-11.

Le prove sismiche sono state realizzate dallo Studio Geologico del Dott. Salvatore Mucci di Castelfranco Emilia (MO).

Scopo dell'indagine è stato fornire un modello geologico dell'area in epigrafe, una caratterizzazione geotecnica del volume di terreno influenzato dalla costruzione di progetto e un'analisi di pericolosità sismica locale che riporti il valore dell'accelerazione di propagazione delle onde sismiche attesa al suolo rigido di riferimento, il valore di amplificazione litologica quale effetto di sito atteso, il valore di accelerazione atteso in superficie, il valore della frequenza fondamentale del sito e gli spettri di risposta. In dettaglio si condurrà anche un'analisi di rischio liquefazione dei terreni sabbiosi saturi presenti.

Il rapporto delle prove penetrometriche statiche eseguite in sito e l'ubicazione delle indagini sono allegati alla presente relazione. All. n. 1 e 2.

## **2.RIFERIMENTI NORMATIVI**

D.P.R. 380/2001

DECRETO MINISTERIALE 14 GENNAIO 2008

Legge Regionale 30 Ottobre 2008 n. 19 "Norme per la riduzione del rischio sismico"

CIRCOLARE 02/02/2009 n. 617

Atto C.P. 112 del 22/07/2008 di Adozione della Variante Generale al P.T.C.P. della Provincia di Modena approvato con D.C.P. n°46 del 18/03/2009



### **3. MODELLO GEOLOGICO E CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA**

#### **3.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO PAESAGGISTICO**

La zona oggetto di studio si trova a sud rispetto il centro cittadino di Mirandola in zona artigianale ed industriale nella frazione di San Giacomo Roncole.

Le coordinate geografiche dell'area sono 44°52' 06.85"N e 11°03'17.29"E .

Il sito ha accesso da Via Luciano Minelli, laterale di Via di Mezzo.

I centri abitati vicini sono:

Mirandola a circa 2.40 Km a nord

Medolla a circa 2.50 Km a sud-sud-est

San Possidonio a circa 5.20 Km a ovest-nord-ovest

San Biagio a circa 5.40 Km est

Oltre che a varie case sparse di campagna.

Il territorio del Comune di Mirandola è situato a Nord della provincia di Modena e ricade nel settore assiale della Pianura Padana "propriamente detta".

L'area, secondo quanto indicato nel Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale di Modena redatto nel Marzo 2000, ricade nell'Unità di Paesaggio indicata con il numero 2 " Dossi e zone più rilevate nella Bassa e Media Pianura".

Nell'ambito del PTCP per unità di paesaggio è stato inteso individuare un territorio che presenta elementi omogenei nel paesaggio che ha subito la stessa formazione ed evoluzione.

I caratteri ambientali dell'Unità di Paesaggio n. 2 sono caratterizzati dalla trama degli antichi paleoalvei fluviali, morfologicamente emergenti sull'intorno delle aree vallive riscattate dalla bonifica. Sono presenti vari dossi con disegno complesso e con digitazioni dall'andamento vario; le caratteristiche morfologiche dei dossi hanno determinato storicamente la disposizione delle infrastrutture e degli insediamenti per evidenti ragioni di sicurezza nei confronti della divagazione delle acque, prima e durante le grandi opere di bonifica.

I principali caratteri ambientali sono una limitata vegetazione spontanea, a seguito dell'estensione delle coltivazioni agrarie su tutto il territorio, a quella erbacea tipica degli ambienti umidi e dei canali. E' quasi assente la vegetazione arborea, che attualmente ha un carattere marginale ed è costituita da alberi isolati peraltro molto radi. La fauna è quella tipica delle campagne coltivate con una concentrazione di fauna ornitica di passo e stanziale, in corrispondenza delle zone umide.










L'orientamento produttivo prevalente è il seminativo estensivo con pressoché totale assenza della zootecnia e rarefazione delle produzioni frutticole, mentre sui dossi le caratteristiche pedologiche, generalmente buone, favoriscono lo sviluppo di colture orticole e frutticole di maggior pregio e coltivazioni di tipo intensivo rispetto alle adiacenti zone vallive.

L'orientamento agronomico prevalente delle aziende è a carattere viticolo e zootecnico. Sono presenti anche aziende di grandi dimensioni a carattere misto, in cui permane anche la produzione frutticola, ed aziende di tipo estensivo a seminativi.

Nel PRG Vigente l'area di ubicazione della struttura è classificata in zona omogenea D2, artigianali e industriali prevalentemente edificate, (art.52).

**Piano Regolatore**

**Variente Generale**

-  Zone omogenee B5 soggette a disciplina conservativa (ART.47 rif.B1)
-  Zone omogenee C3 (ART.45)
-  Zone omogenee D2 artigianali e industriali prevalentemente edificate (ART.52)
-  Zone omogenee F/G1 servizi e attrezzature (ART.62)
-  Zone destinate a Parcheggi pubblici (ART.65)
-  Aree per viabilità e parcheggi (ART.64)
-  Zone omogenee F/G2 impianti sportivi e parchi (ART.63)
-  Con presenza di vegetazione da salvare (ART.19)
-  Zone di tutela dei caratteri ambientali di laghi, bacini e corsi d'acqua (ART.25)

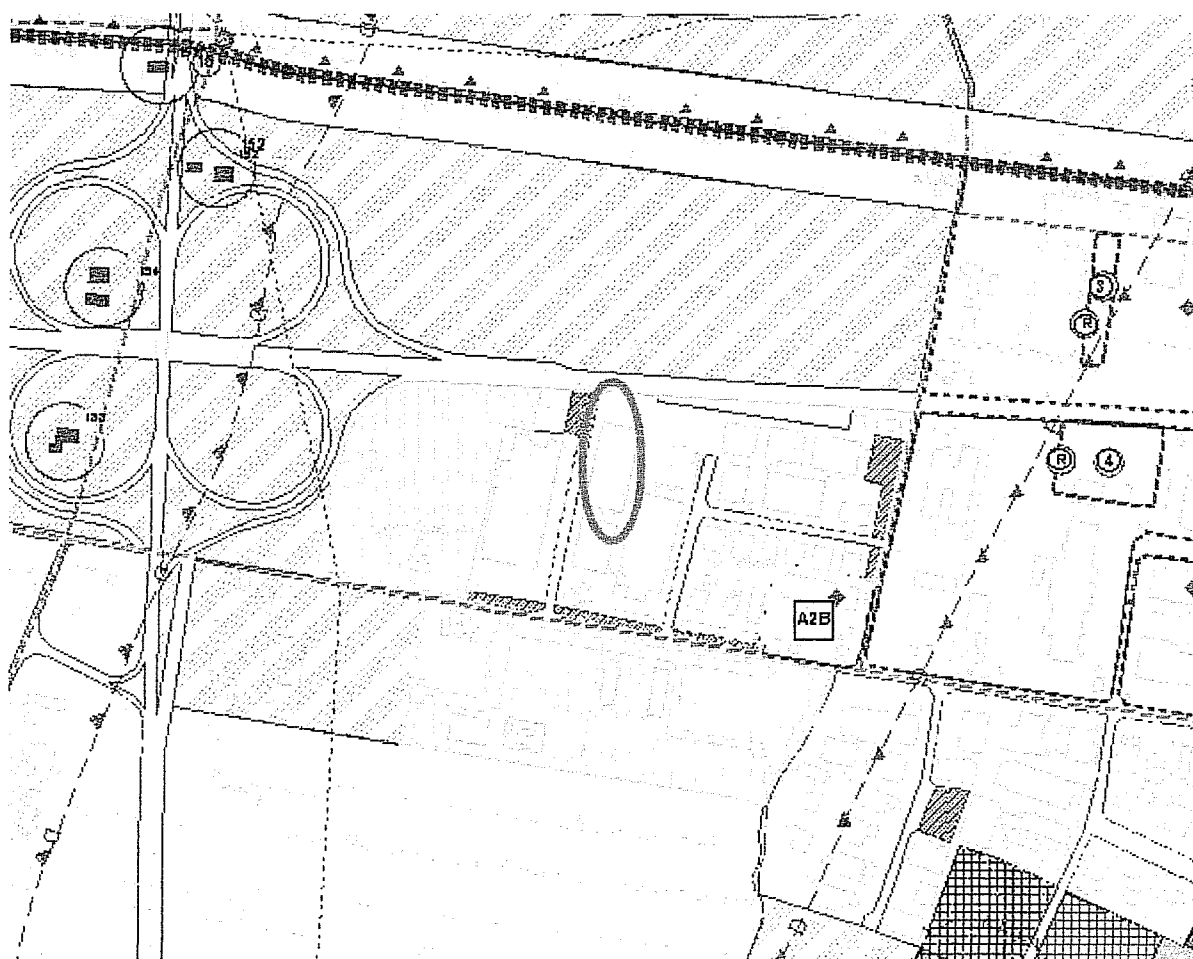


Fig.1: Stralcio PRG Vigente con indicata la zona di ubicazione del sito di intervento

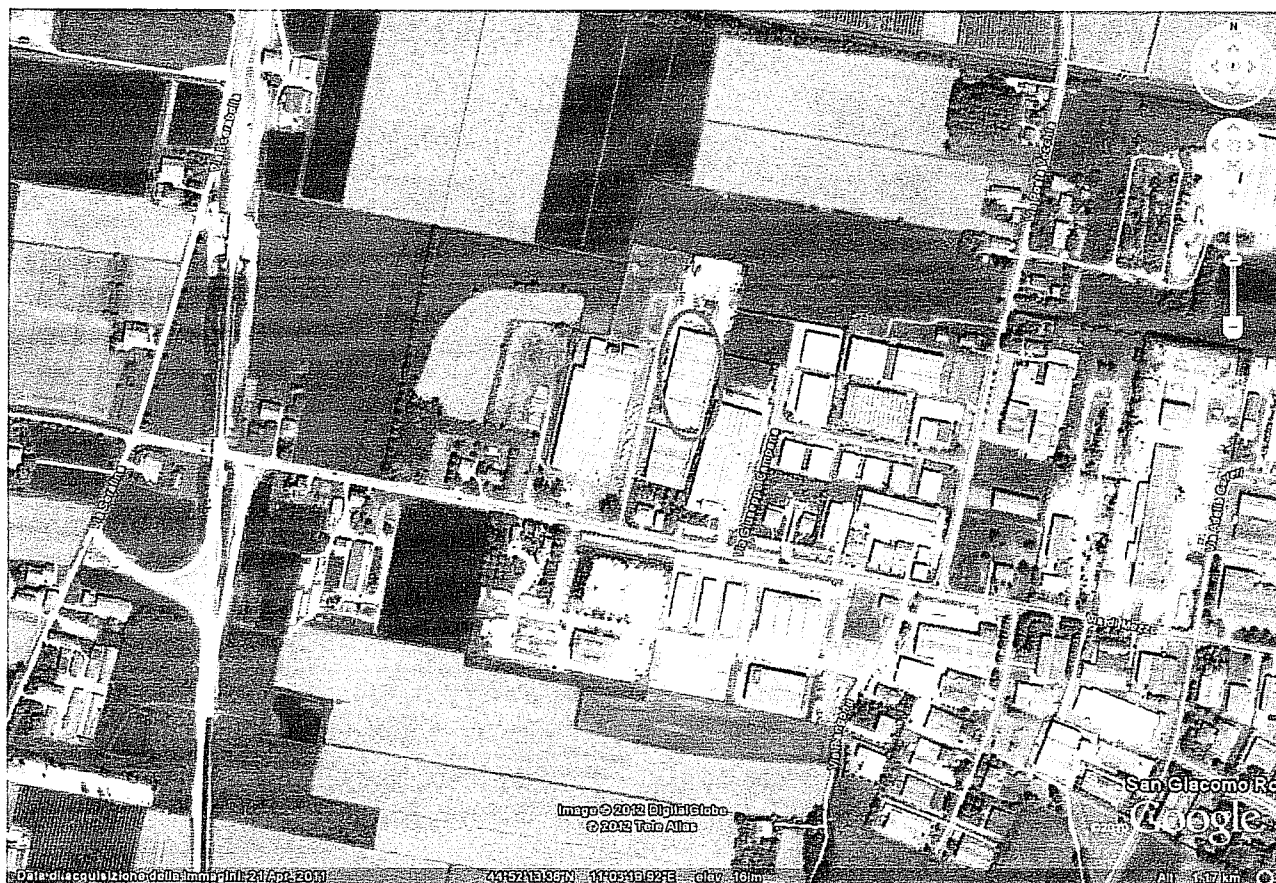


Fig.2: Fotorilievo della zona di studio.

### 3.2 DESCRIZIONE DEI PROCESSI DI MODELLAMENTO GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

Il Comune di Mirandola è inserito nella pianura alluvionale entro la quale, negli ultimi 4.000-5.000 anni dell'Olocene, gli affluenti appenninici del fiume Po (particolarmente il Panaro nell'area di studio), hanno determinato l'attuale assetto morfologico ed altimetrico del territorio che, a sua volta, dipende dai movimenti tettonici, dalla subsidenza naturale e dall'intervento antropico.

I fiumi che scorrono in questa porzione di bassa pianura (particolarmente il fiume Panaro nell'area di studio) si trovano in uno stadio di maturità evolutiva in cui la fase deposizionale prevale su quella erosiva a causa della bassa capacità di deflusso e della esigua capacità di trasporto; questo quadro è confermato dalla presenza di meandri e di alvei pensili che hanno reso necessaria la costruzione di argini artificiali.

In assenza di argini artificiali i fiumi tendono a divagare e quando le acque di piena traboccano si verifica un deposito differenziato con la sedimentazione di elementi fini o grossolani in funzione della diversa energia cinetica della corrente. In prossimità dell'alveo il fiume tende a depositare materiali più grossolani formando dossi di tracimazione (argini naturali), oltre che ventagli e canali di esondazione in corrispondenza delle rotte; tali emergenze

morfologiche si manifestano sia lungo i corsi attuali dei fiumi che in corrispondenza di alvei abbandonati (paleoalvei).

Nelle aree distali più depresse, poste tra un fiume e l'altro, l'energia cinetica della corrente diminuisce ed i depositi si fanno sempre più fini per diventare prevalentemente argillosi nelle basse dove la prolungata permanenza delle acque favorisce la sedimentazione delle particelle in sospensione; per la maggiore costipabilità dei materiali fini rispetto a quelli sabbiosi, si determina poi un aumento dei dislivelli fra i dossi dei paleoalvei e le valli, oltre che fra la rete idrografica ed il livello medio del territorio.

In questa situazione, in concomitanza con gli eventi alluvionali, è possibile che un fiume cambi il suo percorso.

Nell'area di studio abbondanti sono i paleoalvei la cui datazione ed attribuzione idrografica è stata oggetto di studio da parte di autori che si sono occupati della ricostruzione paleoidrografica della zona: Pellegrini (1969), Veggiani (1947), Castaldini e Alii (1979), Cremaschi ed Alii (1980), Gasperi e Pellegrini (1981, 1984).

I paleoalvei sono aree generalmente più elevate di qualche metro rispetto al contorno, la tessitura granulometrica risulta variabile dal franco al franco - sabbioso; sono zone di infiltrazione meteorica con percentuali variabili dal 20 - 30 % del totale.

In questo meccanismo "naturale" è intervenuto l'uomo che, innalzando argini artificiali ed emungendo acqua dal sottosuolo, accelerando i processi di costipazione e di subsidenza, ha modificato la dinamica deposizionale e quindi l'assetto morfologico del territorio.

La costruzione di argini artificiali, in questa zona, si è completata nel XV secolo; a partire da questo periodo i fiumi sono stati canalizzati entro percorsi ben definiti e non hanno più avuto la possibilità di aprirsi, dopo un rotta, nuovi percorsi. Di conseguenza le alluvioni degli ultimi 500 anni hanno determinato un classamento ben preciso dei depositi per cui troviamo sedimenti più grossolani e sedimenti più fini rispettivamente nelle vicinanze e nelle zone più lontane dai percorsi attuali dei fiumi; questo spiega perchè antichi dossi corrispondenti a paleoalvei siano stati ricoperti da sedimenti più fini che hanno notevolmente uniformato la morfologia dell'area.

Altre morfologie del territorio sono le aree di bassa o valli, depressioni in cui le acque sino all'inizio del secolo scorso ristagnavano permanentemente e per un lungo periodo dell'anno e sono state bonificate in tempi recenti. Tali zone, come già descritto, hanno generalmente elevati contenuti in argilla.

Altre forme di notevole interesse sono i numerosi ventagli d'erosione che indicano che in quel punto del fiume si è verificata una rotta non contrastata da interventi di riparazione degli argini.

**La zona si trova ubicata in un'area priva di strutture geomorfologiche importanti, come indicato nell'estratto della carta "Tutela delle risorse paesistiche e storico culturali" del PTCP della Provincia di Modena approvato il 18 Marzo 2009 di cui si riporta uno stralcio.**

	Zone di tutela naturalistica (Art. 24)
	Zone di particolare interesse paesaggistico-ambientale (Art. 39)
	Terreni interessati da bonifiche storiche di pianura (Art. 43B)
	Viabilità storica (Art. 44A)
	Dossi di pianura (Art. 23A)
	<i>Paleodossi di accertato interesse (Art. 23A, comma 2, lettera a)</i>
	<i>Dossi di ambito fluviale recente (Art. 23A, comma 2, lettera b)</i>
	<i>Paleodossi di modesta rilevanza (Art. 23A, comma 2, lettera c)</i>

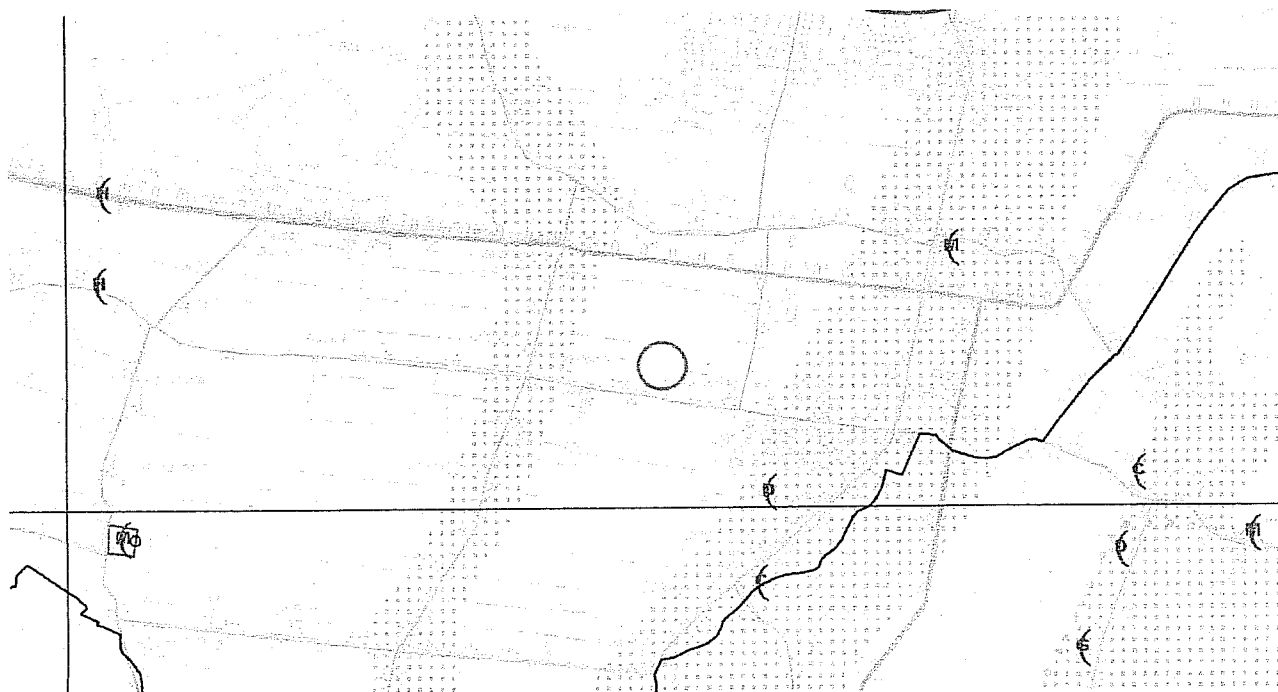


Fig.3: Estratto della tav. 1.1.02 PTCP "Tutela delle risorse paesistiche e storico culturali" del PTCP.

### 3.3 CARATTERISTICHE TECNICHE DI INDAGINE

Sulla base del contesto geologico dell'area e del tipo di caratterizzazione geotecnica richiesta, l'indagine in sito è stata condotta mediante esecuzione di numero 2 prove penetrometriche statiche.

Le prove sono state realizzate con un penetrometro statico da 300 KN dotato di punta meccanica " jacket friction cone " in cui l'avanzamento automatico è regolato da centraline elettroniche.



La prova penetrometrica statica consiste nell'infiggere a pressione nel terreno una punta conica misurando separatamente ma con continuità lo sforzo necessario per la penetrazione della punta e l'adesione terreno-acciaio di un manicotto posto al di sopra della punta.

L'infissione avviene tramite un pistone idraulico che spinge la batteria di aste su cui è montata la punta a velocità costante di 2 cm/s con una tolleranza di  $\pm 5$  mm/s, l'avanzamento è automatico e regolato da centraline elettroniche.

Il penetrometro meccanico possiede il manicotto di attrito che si muove indipendentemente dalla punta secondo il metodo Begemann.

Lo sforzo per l'infissione della punta è misurato mediante manometri collegati al martinetto che esercita la spinta. L'acquisizione dati viene rilevata da manometri meccanici a bagno d'olio con sensibilità minima pari a 0.1 Bar.

Le caratteristiche del penetrometro statico olandese tipo Gouda sono:

- punta conica meccanica  $\phi = 35.7$  mm - angolo di apertura  $\alpha = 60^\circ$  - area punta  $A_p = 10$  cm<sup>2</sup>
- manicotto laterale di attrito tipo "Begemann"  $\phi = 35.7$  mm. – h = 133 mm. – sup.lat.  $A_m = 150$  cm<sup>2</sup>
- le aste sono doppie: una cava  $\phi = 36$  mm. e una, il cui diametro è tale da essere contenuta all'interno delle aste cave

Durante l'esecuzione della prova ogni 20 cm vengono lette nei manometri la resistenza all'avanzamento della sola punta L.punta, la resistenza dell'avanzamento della punta e del manicotto L.laterale e la resistenza totale all'avanzamento delle sole aste cave.

Nei diagrammi vengono rappresentati:

- la resistenza alla punta  $q_c$  in MPa
- la resistenza laterale locale  $f_s$  in MPa
- la linea a destra rappresenta il rapporto  $q_c/f_s$  ( numero puro ).

### 3.4 INTERPRETAZIONE LITOLOGICA

La natura litologica dei terreni oggetto delle prove penetrometriche è dedotta dall'analisi dei diagrammi penetrometrici mediante "Guide for estimating soil type from dutch friction-cone ratio" (after Schmertmann, 1969), Raccomandazioni A.G.I. 1977.

Le sequenze stratigrafiche si presentano omogenee nei due punti indagati.

Al di sotto del riporto dello spessore di 0.60 m, fino alla quota di – 5.60 si trovano argille limose poco consistenti con livelli organici soffici e comprimibili;

da – 5.60 a – 8.00 m argille compatte;

da – 8.00 alla profondità variabile da – 13.40 m (prova n.1) a – 15.80 m (prova n. 2) sabbie inizialmente poco addensate poi addensate;

seguono, dopo il livello di sabbie, nuovamente argille compatte intercalate da rari livelli limosi;

da – 24.20 fino alla profondità indagata dalle prove (- 35.00 m) si trovano sabbie addensate.

Di seguito si riporta lo schema della sequenza stratigrafica dedotta dalla CPT n. 2 che si differenzia dalla sequenza ricavata dalla CPT n. 1 solo per lo spessore del livello sabbioso più superficiale.

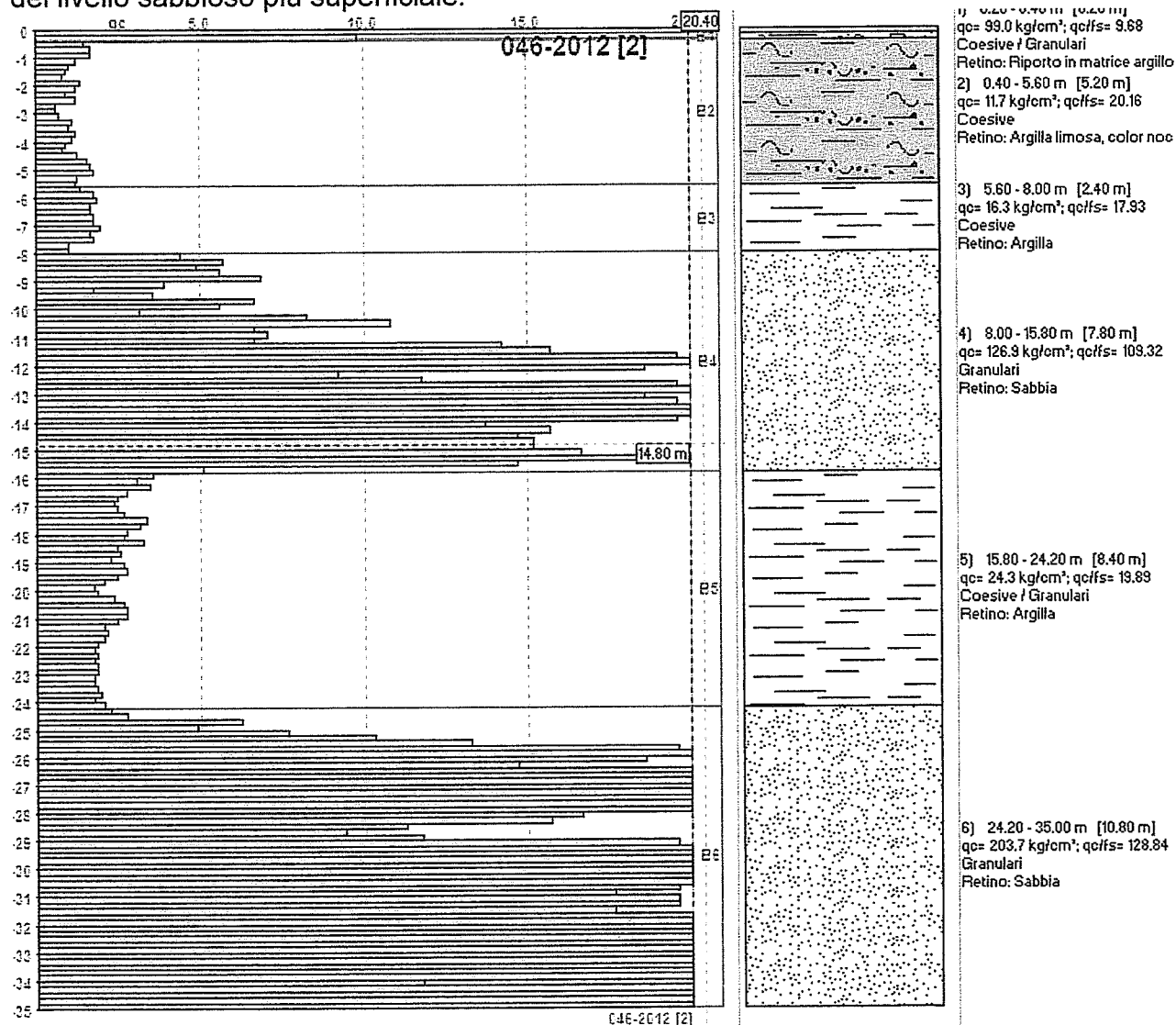


Fig. 4: Schema sequenza stratigrafica CPT

La stratigrafia di dettaglio è riportata nei diagrammi delle valutazioni litologiche e nelle tabelle dei parametri geotecnici. All. n. 3 e 4.

### 3.5 PARAMETRI GEOTECNICI MEDI E CARATTERISTICI

Al fine di caratterizzare i singoli strati della sequenza litologica riscontrata dalle indagini si riportano nella tabella di seguito i parametri geotecnici (valori meccanici del terreno) **medi** per ogni singolo strato individuato .

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA																							
SEZIONE GEOTECNICA																		riferimento		046-2012			
Committente: BARALDINI QUIRINO S.P.A.																		U.M.:		MPa			
Cantiere: MIRANDOLA Via Minelli																				1			
Località: MIRANDOLA Via Minelli																							
Param. 046-2012 [1]						NATURA COESIVA						NATURA GRANULARE											
Prof.		qc	qc/fs	$\gamma'$	$\sigma'_{vo}$	Vs	Cu	OCR	Eu50	Eu25	Mo	Dr	$\sigma_{Sc}$	$\sigma_{Ca}$	$\sigma_{Ko}$	$\sigma_{DB}$	$\sigma_{DM}$	$\sigma_{Me}$	F.L.	E'50	E'25	Mo	
m	m	MPa		kN/m <sup>3</sup>	kPa	m/s	kPa	%	MPa	MPa	MPa	%	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)		MPa	MPa	MPa	
0.20	0.80	6.4	127.5	161	11	196	—	—	—	—	—	97	43	41	29	36	43	32	2.00	10.62	15.93	19.11	
0.60	5.60	1.1	21.2	126	51	161	53	8.3	13.96	20.94	4.12	22	34	27	24	22	31	28	—	1.86	2.62	3.26	
5.60	9.00	1.9	17.4	94	67	166	76	5.3	23.79	35.69	5.84	22	34	26	22	21	29	28	—	3.66	5.49	6.59	
6.00	13.40	10.6	96.9	100	125	224	114	7.4	25.19	37.79	10.29	66	39	31	28	27	36	34	—	17.96	26.93	32.37	
13.40	24.20	2.4	20.6	94	203	170	93	2.2	44.85	67.27	6.66	10	32	23	19	18	26	28	—	4.71	7.07	8.46	
24.20	35.00	22.0	136.4	111	314	299	—	—	—	—	—	73	40	31	26	26	35	38	—	36.64	54.97	65.96	

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA																						
SEZIONE GEOTECNICA														riferimento		046-2012						
Committente: BARALDINI QUIRINO S.P.A.														U.M.: MPa								
Cantiere: MIRANDOLA Via Minelli														1								
Località: MIRANDOLA Via Minelli																						
Param. 046-2012 [2]						NATURA COESIVA						NATURA GRANULARE										
Prof.		qc	qc/fs	$\gamma'$	$\sigma'_{vo}$	Vs	Cu	OCR	Eu50	Eu25	Mo	Dr	$\sigma_{Sc}$	$\sigma_{Ca}$	$\sigma_{Ko}$	$\sigma_{DB}$	$\sigma_{DM}$	$\sigma_{Me}$	F.L.	E'50	E'25	Mo
m	m	MPa		kN/m³	kPa	m/s	kPa	%	MPa	MPa	MPa	%	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	MPa	MPa	MPa	MPa
0.20	0.40	9.8	9.7	161	7	218	327	99.9	55.53	83.30	29.40	100	43	46	43	40	45	34	-16.35	24.60	29.40	
0.40	5.60	1.1	20.2	130	46	161	53	11.6	13.16	19.77	4.06	16	33	26	22	21	29	26	- 1.80	2.70	3.23	
5.60	9.00	1.6	17.9	93	67	164	66	4.7	23.76	35.84	5.17	11	33	24	20	19	27	27	- 2.61	3.92	4.70	
6.00	15.80	12.4	109.3	101	136	235	74	3.8	21.01	46.51	5.50	67	39	32	29	27	36	35	-21.19	31.79	38.15	
15.80	24.20	2.4	19.9	94	217	170	96	2.1	47.74	71.61	7.20	8	32	23	19	18	26	28	- 4.34	6.51	7.91	
24.20	35.00	20.0	131.9	109	314	264	95	1.8	54.01	81.01	8.23	65	39	30	27	25	34	37	-33.27	49.90	59.86	

Fig.5: Valori GEOTECNICI MEDI per ogni strato riscontrato in entrambe le sequenze litologiche dedotte dalle due prove.

Per quanto attiene ai parametri geotecnici caratteristici, con il DM 2008 si ragiona in termini non più di valori deterministici, ma in termini di variabili aleatorie, cioè le resistenze dei terreni vengono scelte secondo una stima cautelativa del valore medio delle stesse.

Stima cautelativa perché la variabile può essere rappresentata da più parametri ma la trattazione deve necessariamente riguardare tutti i possibili valori della variabile, e non solo il valore atteso (media), deve cioè tener conto di tutta la distribuzione della variabile.

La variabile aleatoria da prendere in considerazione **negli strati coesivi** studiati per il tipo di indagini geognostiche svolte direttamente in sito è il **parametro geotecnico caratteristico cu**; la variabile aleatoria da prendere in considerazione **negli strati sciolti** studiati per il tipo di indagini geognostiche svolte direttamente in sito è il **parametro geotecnico caratteristico  $\phi$** .

Il valore caratteristico scelto è pari al 5° percentile della media della distribuzione lognormale del parametro geotecnico (cu) per gli strati coesivi, è pari invece al 5° percentile della media della distribuzione normale del parametro geotecnico  $\phi$  per gli strati sciolti.

La formula utilizzata per il calcolo del 5° percentile della distribuzione lognormale del parametro geotecnico ( $c_u$ ) è :

$$L_{1-\alpha}(\bar{Y}, S^2) = \bar{Y} + \frac{S^2}{2} - \frac{t_{1-\alpha/2}(n-1)}{\sqrt{n}} * \sqrt{S^2(1 + \frac{S^2}{2})}$$

La formula utilizzata per il calcolo del 5° percentile della distribuzione normale del parametro geotecnico ( $\phi$ ) è :

$$\mu = t(n-1) \left( \frac{s}{\sqrt{n-1}} \right) + \bar{x}$$

I dati immessi nei calcoli sono i valori di  $c_u$  e di  $\phi$  derivati dalle correlazioni dei valori di  $q_c$  e  $f_s$  ricavati direttamente dalle prove penetrometriche mediante le correlazioni standard (Raccomandazioni AGI 1977-Ricceri et Altri 1974 – Marsal et al. 1974/1979).

COESIONE NON DRENATA Terreni COESIVI $c_u = R_p/\beta$		
CORRELAZIONI STANDARD - Raccomandazioni A.G.I. 1977 - Ricceri et altri 1974 - Marsland et al. 1974/1979		
- Argille normalmente consolidate N.C. ( $q_c \leq 10 \text{ kg/cm}^2$ )	$\beta = 25$	(valore standard: 20)
- Argille intermedie ( $10 < q_c < 30 \text{ kg/cm}^2$ )	$\beta = \text{valore interpolato}$	
- Argille sovra consolidate S.C. ( $q_c \geq 30 \text{ kg/cm}^2$ )	$\beta = 40$	(valore standard: 30)

Fig.6: Correlazioni per il calcolo di  $c_u$  dai valori di  $q_c$  e  $f_s$ .

I valori immessi nella formula utilizzata per il calcolo del 5° percentile della distribuzione relativi ai parametri geotecnici di interesse sono quelli significativi per i singoli strati indagati.

Lo scopo è fornire un valore di  $c_u$  e  $\phi$  che caratterizzi lo strato nel suo complesso.

Nei calcoli vengono quindi eliminati, se presenti, i valori di picco di livelli centimetrici non rappresentativi delle caratteristiche litologiche dello strato.

Se si considerano tutti i valori definiti ogni 20 cm dalle prove penetrometriche senza fare un'analisi ragionata delle proprietà litologiche dello strato si rischia di ottenere dei parametri geotecnici che falsano le reali caratteristiche dello strato.

**I dati immessi nei calcoli sono i valori di  $c_u$  e di  $\phi$  derivati dalle correlazioni dei valori di  $q_c$  e  $f_s$  ricavati direttamente dalle prove penetrometriche e interpretate e "ragionate" dalla scrivente.**

**Primo strato, da sotto il riporto fino alla quota di - 5.60 m: argille limose poco consistenti con livelli organici soffici e comprimibili:  $c_{uk} = 43.90 \text{ kPa}$ ;**

**Secondo strato da - 5.60 m a - 8.00 m argille compatte,  $c_{uk} = 64.50 \text{ kPa}$ ;**

**Terzo strato da - 8.00 a alla profondità variabile da - 13.40 m (prova n.1) a - 15.80 m (prova n. 2) sabbie inizialmente poco addensate poi addensate,  $\phi_k = 28.30^\circ$ ;**

**Quarto strato da - 13.4/15.80 a - 24.20 m argille compatte:  $c_{uk} = 72.20 \text{ kPa}$ ;**

**Quinto strato da -24.20 a - 35.00 m sabbie addensate,  $\phi_k = 30.50^\circ$ .**

### 3.6 PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO

Le verifiche con il metodo semiprobabilistico degli stati limite secondo le indicazioni del D.M. 14 gennaio 2008 viene eseguite includendo per le azioni e le resistenze, fattori di sicurezza parziali FS applicati a valori medi dei parametri di interesse.

Il fattore di sicurezza globale viene quindi diviso in fattori di sicurezza parziali applicati ai singoli valori caratteristici dei carichi o dei parametri geotecnici in modo che la disequazione finale  $E_d \leq R_d$  venga sempre verificata.

Cioè l'effetto delle azioni di progetto ( $E_d$ ) deve essere sempre non superiore alle Resistenze di progetto ( $R_d$ ) in condizioni di stabilità della struttura.

Se si utilizza l'approccio 2 proposto dal DM 2008 (A1 combinato con M1 combinato con R3) al parametro geotecnico caratteristico si applicano coefficienti riduttivi uguali all'unità quindi il parametro  $c_u$  di progetto è uguale al parametro  $c_u$  caratteristico  $c_{u,d} = c_{u,k}$ .

Se si utilizza l'approccio 1 combinazione 2 (A2 combinato con M2 combinato con R2), il parametro geotecnico di interesse da utilizzare è quello caratteristico ridotto dal coefficiente di sicurezza parziale definiti nella tabella 6.2.II del DM 2008 e di seguito riportata .

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

I valori di  $c_u$  e di  $\phi$  di progetto degli strati della sequenza litologica riscontrata nel sito di studio sono:

**Primo strato, da sotto il riporto fino alla quota di – 5.60 m: argille limose poco consistenti con livelli organici soffici e comprimibili:  $c_{u,d} = 31.30$  kPa;**

**Secondo strato da – 5.60 m a – 8.00 m argille compatte,  $c_{u,d} = 46.00$  kPa;**

**Terzo strato da – 8.00 a alla profondità variabile da – 13.40 m (prova n.1) a – 15.80 m (prova n. 2) sabbie inizialmente poco addensate poi addensate,  $\phi_d = 23.30^\circ$ ;**

**Quarto strato da – 13.4/15.80 a – 24.20 m argille compatte:  $c_{u,d} = 51.60$  kPa;**

**Quinto strato da –24.20 a – 35.00 m sabbie addensate,  $\phi_k = 25.30^\circ$ .**



## **4. ANALISI SISMICA RIPORTANTE LA PERICOLOSITA' SISMICA DI BASE DEL SITO**

### **4.1 SISMICITA' DEL TERRITORIO**

Il 20 Marzo 2003 è stata promulgata l'ordinanza n. 3274 della presidenza del Consiglio dei Ministri "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" che fissa le regole per l'identificazione dei comuni sismici e definisce le norme tecniche costruttive per la progettazione di edifici e per le opere di fondazione.

Nella nuova classificazione tutto il territorio viene suddiviso in 4 zone di cui la n. 1 è la più pericolosa.

Per quanto riguarda la Regione Emilia Romagna la novità consiste in un allargamento della zona 3 ed in un ampliamento della zona 2 entro la quale ricadono alcuni comuni.

Il comune di Mirandola la zona d'indagine ricadono nella zona 3 e vengono definiti a "bassa sismicità".

Tale classificazione è destinata a cambiare dopo la grossa recente crisi sismica verificatasi la mattina del 20 Maggio 2012 con un terremoto di magnitudo locale pari a 5.8 con epicentro Finale Emilia e la mattina del 29 Maggio con terremoto di magnitudo locale pari a 5.9 ed epicentro fra i Comuni di Medolla e Cavezzo. La zona indagata non può più essere considerata caratterizzata da sismi a bassa energia.

#### ***4.1.1 Cenni sulla sismotettonica della pianura padana***

**(Carta della Sismotettonica redatta dalla Regione Emilia Romagna nel Luglio 2004)**

In Pianura Padana la superficie di base del Sistema Emiliano Romagnolo (0.45 Ma) è la più recente superficie di discordanza angolare in scala regionale.

**La geometria di questa superficie è articolata in zone più o meno depresse. In particolare sono evidenti gli alti di Mirandola – San Possidonio e Finale Emilia (tra Reggio Emilia e Ferrara), di San Bartolomeo in Bosco (a sud di Ferrara) e di Bondeno-Casaglia-Occhiobello (a nord-ovest di Ferrara), dove la base del SERS è a una profondità inferiore a - 100 m s.l.m. Queste zone di alto (dove si trova l'area di studio) ricadono tutte sul culmine della dorsale ferrarese, permettendo di ipotizzare un'attività tardo – pleistocenica di questa struttura.**

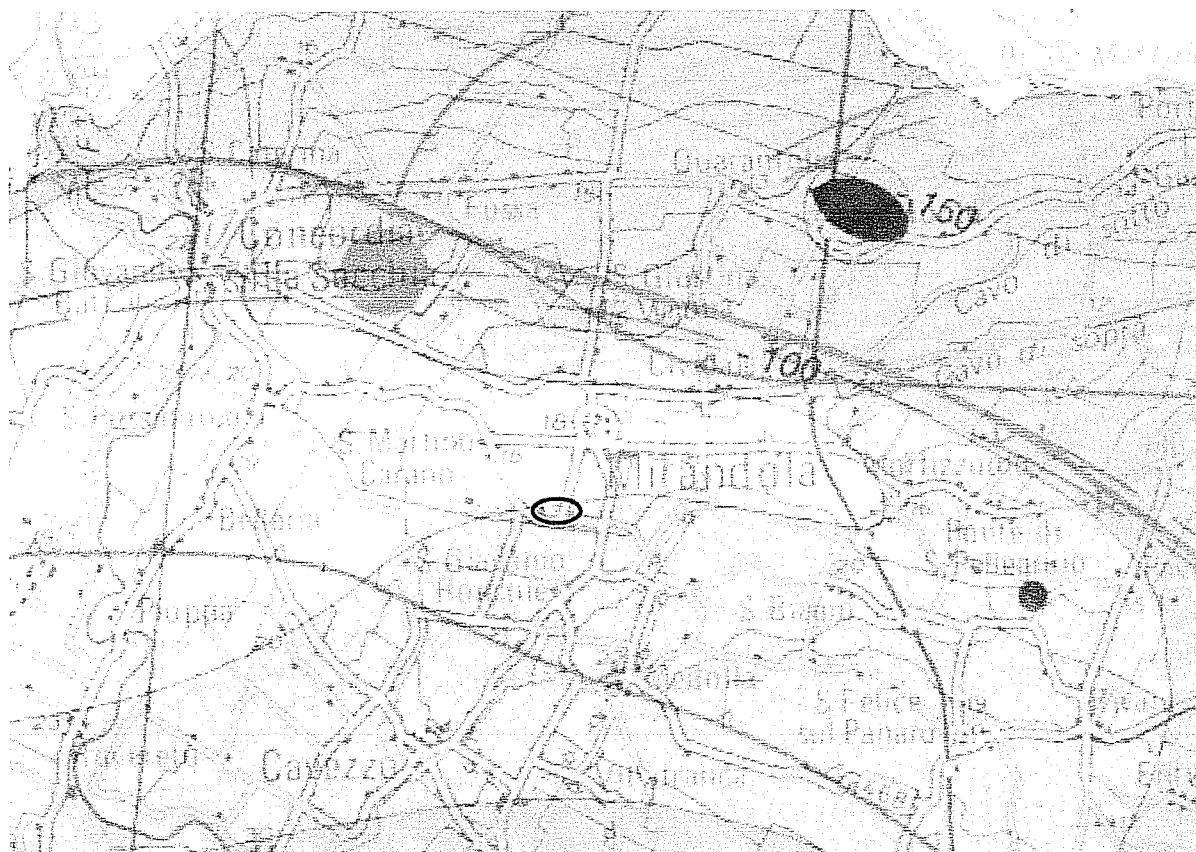
Lo studio in dettaglio delle strutture sepolte della Pianura Padana è possibile soprattutto grazie all'interpretazione di profili sismici.

I terreni più recenti che registrano diffuse deformazioni alla mesoscala sono le Sabbie di Imola e il Sistema Emiliano-Romagnolo inferiore (SERI) di età compresa tra 0.8 e 0.45 Ma; risulta dunque evidente, anche da osservazioni di campagna, che gran parte del margine appenninico-padano e del sottosuolo padano-adriatico sono stati interessati da deformazioni più recenti di 0.45 Ma.

Le maggiori evidenze di strutture attive segnalate nella Carta della Sismotettonica della Regione Emilia Romagna sono nel settore del margine compreso tra Salsomaggiore e la valle dell'Idice, a est di Bologna, sul fronte sepolto delle pieghe emiliane tra Piacenza e Reggio Emilia e al tetto delle dorsale ferrarese tra Reggio Emilia e le Valli di Comacchio dove si trova il sito di studio.

L'attività recente e attuale della dorsale ferrarese è indicata oltre che dagli ultimi eventi sismici anche da alcune evidenze morfologiche. Alcuni depositi di canali dei fiumi appenninici non raggiungono né il Po, né il mare e sembrano non oltrepassare l'alto della dorsale ferrarese. Anche il corso del Po, a nord di Reggio Emilia, fa una brusca deviazione verso nord immediatamente prima di raggiungere Novellara e Mirandola, zone in cui il fronte della dorsale ferrarese è molto vicino alla superficie.

**Nell'area di studio la SERS è indicata a una profondità compresa fra 50 e 100 metri. Dall'analisi delle prove eseguite con sismica passiva HVRS risulta che fino alla profondità di circa 70 m si registrano aumenti delle velocità di propagazione delle onde sismiche fino a circa 300 m/s poi si passa a una velocità di propagazione delle onde sismiche pari a 450 m/s. La profondità di - 70 m può essere considerata come la quota del bedrock sismico.**



*Fig.7 Carta della Sismotettonica redatta dalla Regione Emilia Romagna nel Luglio 2004*

## 4.2 MODELLO SISMICO DEL SOTTOSUOLO

### 4.2.1. Definizione categoria sismica mediante analisi HVRS del sottosuolo e mediante analisi onde di superficie MASW

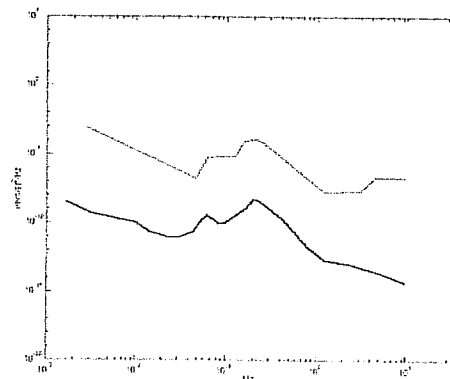
La ricostruzione del modello sismico del sottosuolo e la stima della velocità media delle onde di taglio nel volume di terreno investigato sono ricavati dall'analisi delle due prove eseguite con tomografo digitale e da un rilievo geofisico in onde di superficie MASW tarati dalla sequenza litostratigrafica definita dall'analisi della prova penetrometrica statica.

#### 4.2.1.1 Prospezione sismica HVSR – Cenni di teoria

Le prospezioni sismiche HVSR si basano sulla registrazione del rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche microtremore in quanto riguarda oscillazioni molto piccole ( $10-15 \text{ [m/s}^2\text{]}^2$  in termini di accelerazione), molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

Nelle zone in cui non è presente alcuna sorgente di rumore locale, in assenza di vento e nel caso in cui il terreno sia roccioso e pianeggiante, lo spettro in frequenza del rumore di fondo in un terreno roccioso e pianeggiante presenta l'andamento illustrato in figura a lato, dove la curva bassa rappresenta il rumore di fondo 'minimo' di riferimento secondo il servizio geologico statunitense (USGS) mentre la curva superiore rappresenta il 'massimo' di tale rumore, e dove i picchi a 0.14 e 0.07 Hz sono comunemente interpretati come originati dalle onde oceaniche.



Tali componenti spettrali vengono attenuate molto poco, anche dopo tragitti di migliaia di chilometri per effetto di guida d'onda. A tale andamento generale, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie o anche il semplice passeggiare di una persona) e naturali che però si attenuano fortemente a frequenze superiori a 20 Hz, a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno delle rocce.

#### 4.2.1.2 Effetti di percorso

Nel tragitto dalla sorgente  $s$  al sito  $x$  le onde elastiche (sia di terremoto che di microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che, se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica di "ray tracing", è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere

estratta e che contiene le informazioni relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore.

Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazione. Questa informazione è però 'sepolta' all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

Una di queste è la tecnica dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR.

#### 4.2.1.3 Definizioni.

Il tipo di stratigrafia che le tecniche di sismica passiva possono restituire si basa sul concetto di contrasto di impedenza. Per strato si intende cioè un'unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

#### 4.2.1.4 Tecnica impiegata.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è la tecnica dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (HVSR), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970). Il metodo fu in seguito reso popolare principalmente da Nakamura (1989) come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. Mentre su questo punto non è ancora stato raggiunto consenso, è invece ampiamente riconosciuto che l'HVSR è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli. Riconosciuta questa capacità e dato che, se è disponibile una stima delle velocità delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo HVSR può essere in linea di principio usato come strumento stratigrafico.

Le basi teoriche dell'HVSR sono relativamente semplici in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D). Considerando il sistema in figura a lato in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ). Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene (parzialmente) riflessa dall'orizzonte che separa i due strati. L'onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $h$  del primo strato. In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a

$$f_r = VP1/(4 h) \quad [1]$$

mentre quella relativa alle onde S è

$$f_r = VS1/(4 h) \quad [2]$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima delle velocità, è in grado di fornire previsioni sullo spessore  $h$  degli strati. Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per il contenuto in frequenza, la risposta strumentale

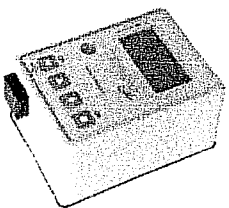
e l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto. La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Rileviamo inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti da onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994). Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S. L'applicabilità pratica della semplice formula [2] è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica che nell'ambito ingegneristico (Gallipoli et al., 2000; Mucciarelli e Gallipoli, 2001; Castellaro et al., 2005). Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (si veda Ibs-Von Seht e Wohlenberg, 1999).

#### 4.2.1.5 Strumentazione - Caratteristiche del campionamento ed elaborazione

Lo strumento utilizzato è stato il TROMINO ZERO, modello TRZ-0121/01-11 realizzato dalla Micromed Spa, Moglione Veneto - Treviso.

Di seguito si riporta la descrizione dello strumento:

Codice	Descrizione
<b>TROMINO® ZERO</b>  	Registratore digitale tutto in uno 10 x 7 x 13 cm, ~ 1 kg 1 Gb di memoria alimentazione a batteria (AA, 2 x 1.5 V) 2 set di piedini per accoppiamento al suolo banda di lavoro 0.1-200 Hz <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 canali velocimetrici per microtremore sismico ambientale (saturazione <math>\pm 1.2</math> mm/s in banda),</li> <li>• frequenze di campionamento 128, 256, 512 Hz su tutti i canali,</li> <li>• valigetta rigida per il trasporto</li> <li>• cavo USB per trasferimento dati al PC</li> </ul>

Il campionamento è stato effettuato ad una frequenza di 128 Hz, per una durata di 16 minuti, il nord dello strumento è stato orientato con il nord geografico.

L'elaborazione è stata effettuata con il software Grilla in dotazione a TROMINO, secondo la procedura descritta in Castellaro (2010), relativamente ai parametri utilizzati, ossia banda di frequenza analizzata, lunghezza delle finestre, tipo e percentuale del lisciamento si rimanda alle singole schede.

#### 4.2.1.6 Schede di acquisizione elaborazione e interpretazione



## MIRANDOLA Via Minelli 14, HVRS - 1

Strumento: TRZ-0121/01-11

Inizio registrazione: 25/06/12 18:57:28 Fine registrazione: 25/06/12 19:17:28

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS: LAT 44,868440° - LONG 11,054387°

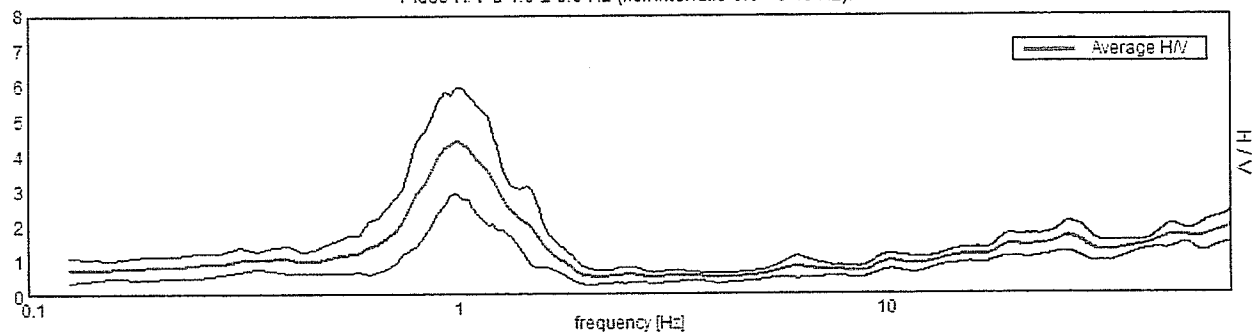
Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 57% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

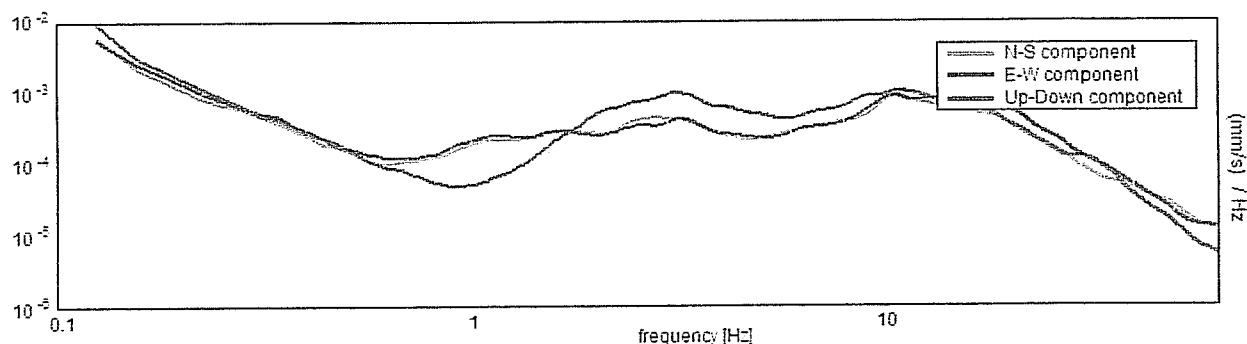
Lunghezza finestre: 20 s - Tipo di lisciamento: Triangularwindow - Lisciamento: 10%

### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

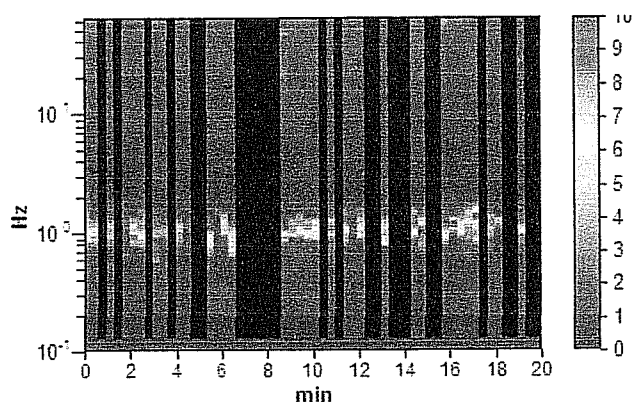
Picco H/V a  $1.0 \pm 0.0$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



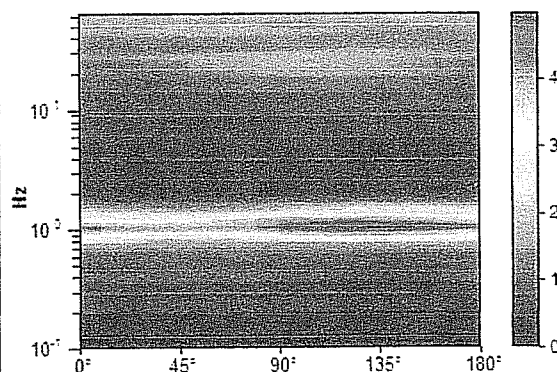
### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



### SERIE TEMPORALE H/V



### DIREZIONALITA' H/V



## MIRANDOLA Via Minelli 14, HVRS - 2

Strumento: TRZ-0121/01-11

Inizio registrazione: 25/06/12 19:23:07 Fine registrazione: 25/06/12 19:43:07

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS: LAT 44,869094° - LONG 11,055232°

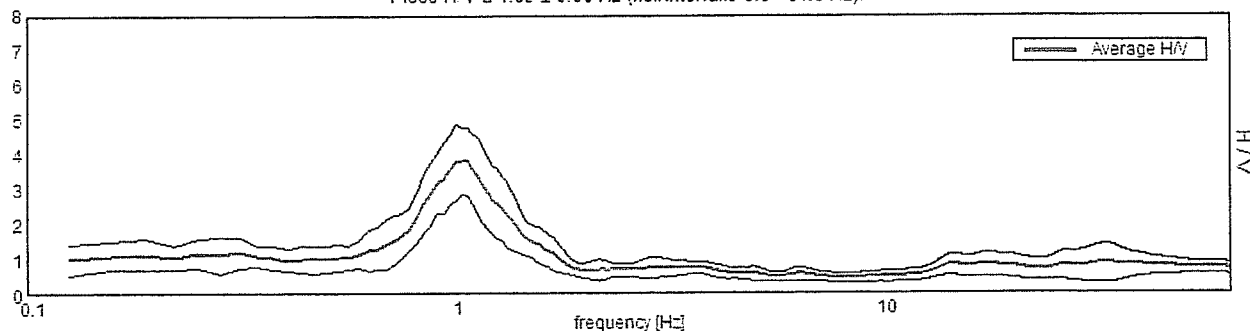
Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 50% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

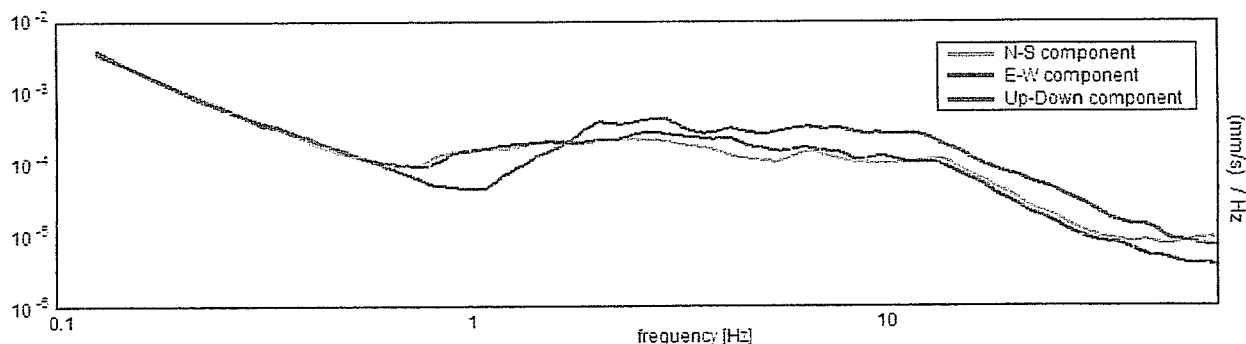
Lunghezza finestre: 20 s - Tipo di lisciamento: Triangularwindow - Lisciamento: 10%

### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

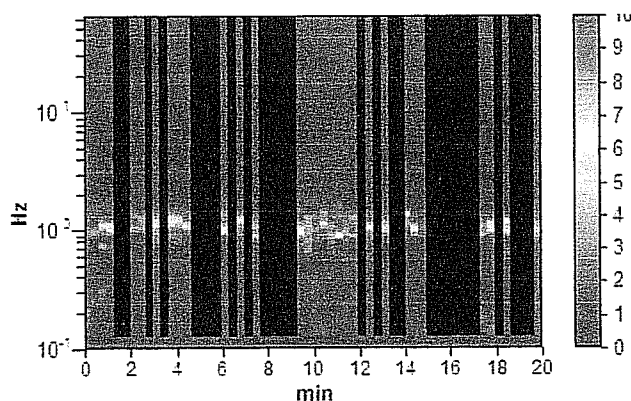
Picco H/V a  $1.03 \pm 0.06$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



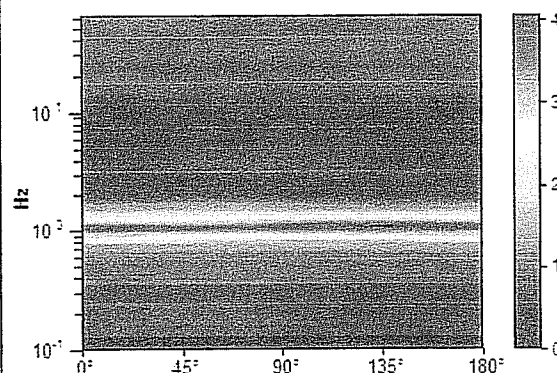
### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



### SERIE TEMPORALE H/V

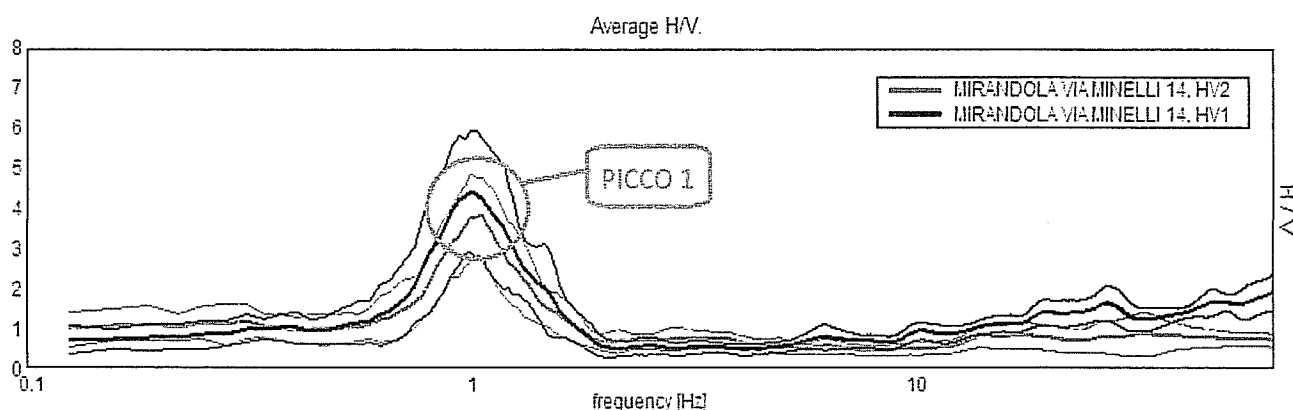


### DIREZIONALITA' H/V



Tutte le acquisizioni HVSR, risultano completamente convalidate dalle linee guida SESAME 2005.

Relativamente alle **frequenze caratteristiche di sito**, dal diagramma del confronto delle curve H/V, di seguito riportato, abbiamo:



**Un picco stratigrafico**, caratteristico, così caratterizzato:

Picchi Stratigrafici	Rapporto H/V (valori medi)	Frequenza(Hz) Caratteristica (valori medi)	Periodo (s) Caratteristico (valori medi)
1	4,10	~ 1,00	~ 1,00

Il picco (1), rappresenta il passaggio al pseudo Bedrock sismico, si tratta di un contrasto di impedenza profondo circa 70 m. con Vs approssimabile a 450/500 m/s, confermato dai dati di letteratura, vedi carta Sismotettonica Regione Emilia Romagna.

L'amplificazione massima si ha quindi alla frequenza fondamentale del sito pari a 1.0 Hz corrispondente al periodo caratteristico di 1.0 s da confrontare con il periodo della struttura.

#### 4.2.2 MASW - In Onde Rayleigh

Le indagini MASW (*Multichannel Acquisition Surf Wave*) hanno come obiettivo quello di ricostruire il profilo sismostratigrafico di un sito, valutando in particolare la distribuzione della velocità delle onde "S" sia per la ricostruzione del profilo del sottosuolo che per la definizione *in situ* della Vs30.

Dopo l'allestimento del dispositivo di ricezione si provvede a generare artificialmente vibrazioni impulsive ad alta frequenza in corrispondenza di un punto prestabilito lungo il profilo (punto di scoppio): nello stesso istante di partenza della vibrazione viene trasmesso al sismografo il comando di avvio della registrazione (trigger). Da questo istante inizia l'acquisizione digitale con tempo di registrazione pari ad almeno 2 secondi alla frequenza di 512 Hz.

#### 4.2.2.1 Schede di acquisizione elaborazione e interpretazione

MASW - In Onde Rayleigh (ZVFDX4MO15)

• **Strumento e Parametri di acquisizione**

Strumento: SAB – 0019 / 02 - 11

Inizio registrazione: 25/06/12 19:48:12 Fine registrazione: 25/06/12 19:49:36

Durata registrazione: 0h00'02". - Freq. campionamento: 512 Hz

• **Geometria Array**

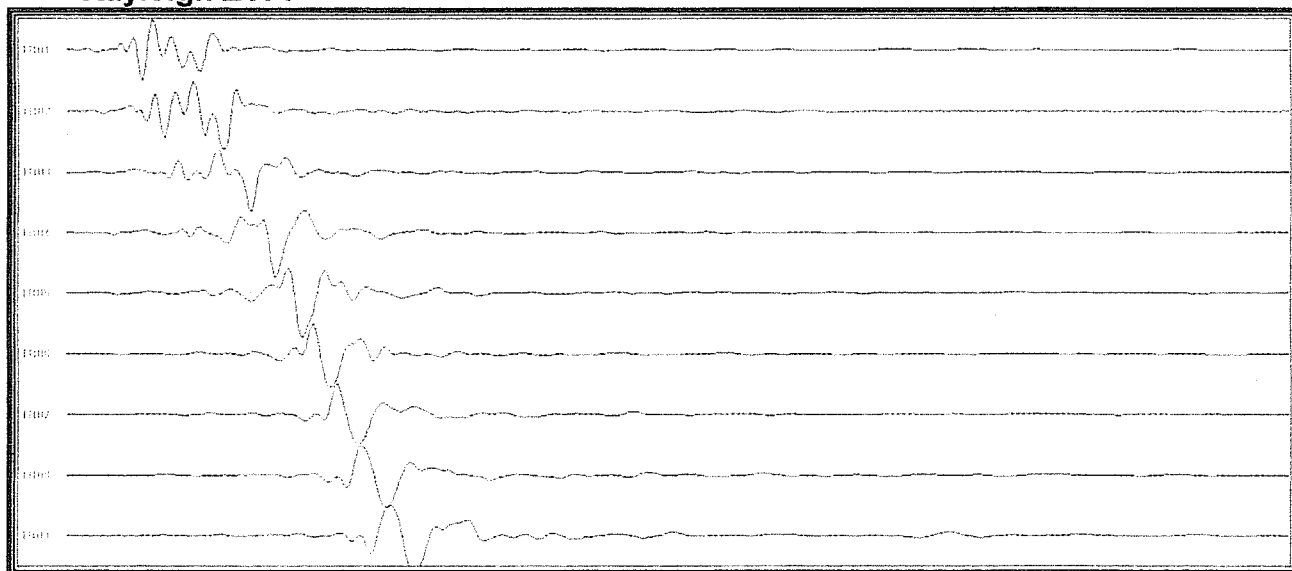
Nomi canali : TR01 ; TR02 ; TR03 ; TR04 ; TR05 ; TR06 ; TR07 ; TR08 ; TR09

Array geometry (x): 0.0 4.0 8.0 12.0 16.0 20.0 24.0 28.0 32.0 m.

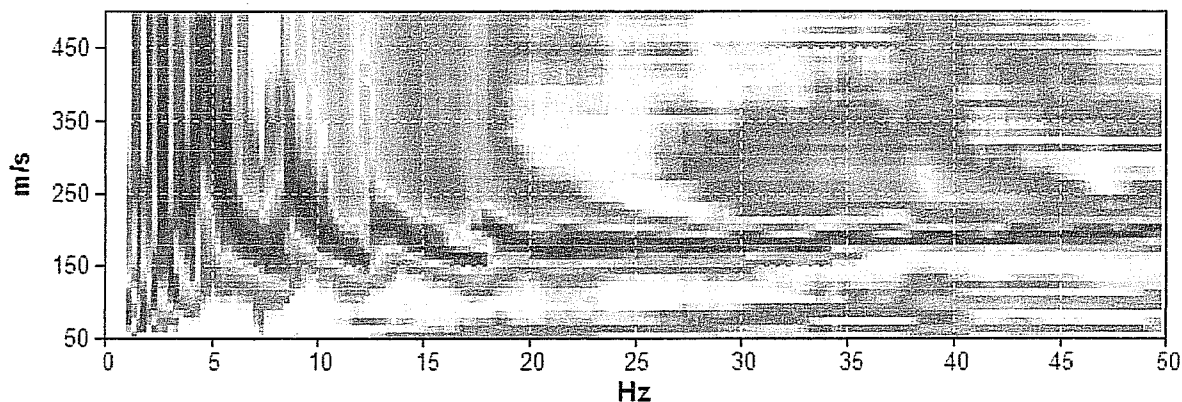
Distanza intergeofonica : DX = 4,00 m.

Offset minimo ( distanza tra TR01 e scoppio) MO = 15,00 m.

**Dataset normalizzato nell'intervallo (0 – 1 s) – Componente Verticale onde Rayleigh ZVF:**



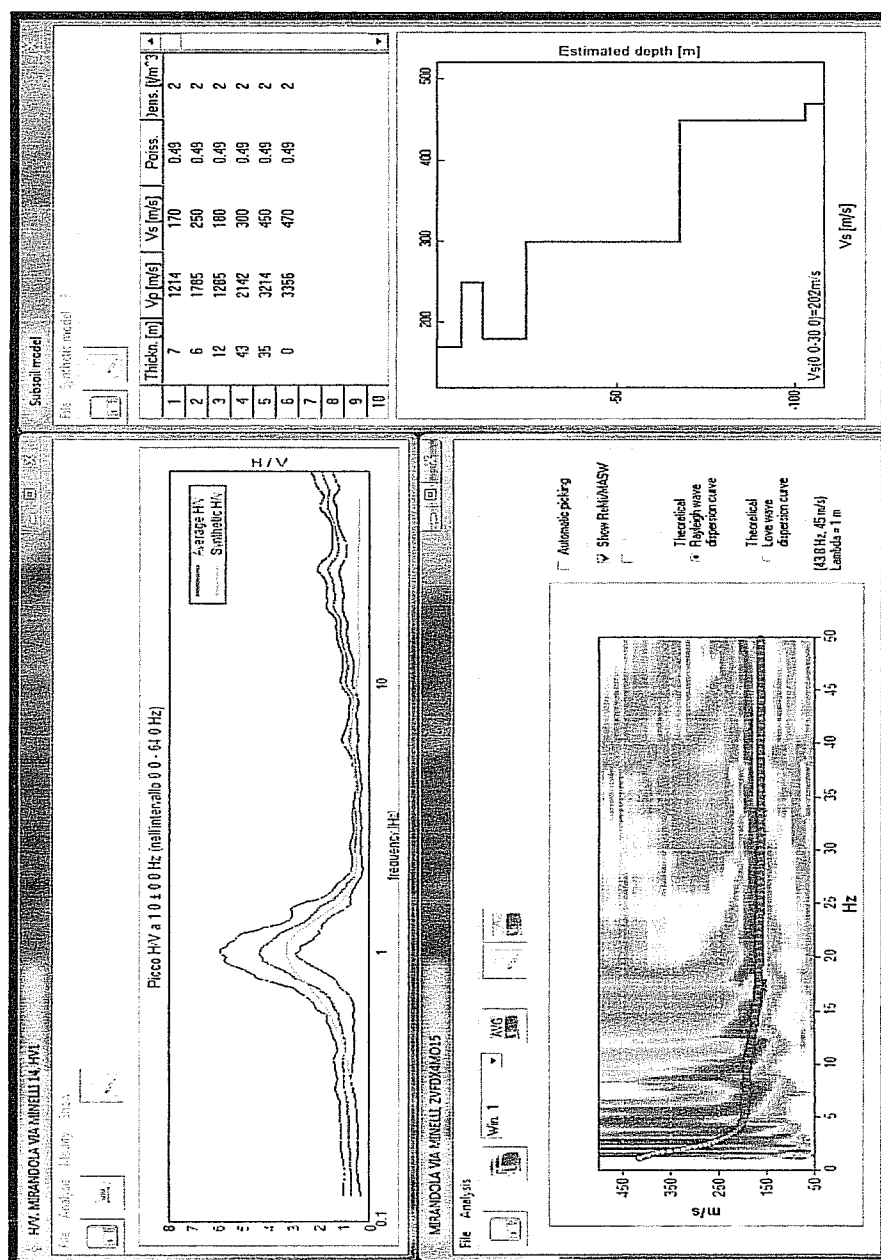
#### SPETTRO VELOCITA' DI FASE:



#### 4.2.4 Modello sismico del sottosuolo

La modellazione in termini di  $V_s$ , è stata effettuata, su tutte le registrazioni, vincolando le curve spettrali alla curva di dispersione MASW e alla prove CPT. In particolare è stato fatto il Fit congiunto MASW – HVSR, dove il modello di sottosuolo  $V_s$ , viene confrontato contemporaneamente, tramite la curva di dispersione “effetto della dispersione delle onde superficiali”, per la parte superficiale “13.30 m.”, e i picchi di risonanza della curva H/V “effetto della risonanza del micro tremore dovuti ai contrasti di impedenza, superficiali e profondi”, per la parte profonda.

##### • Fit congiunto MASW – HVSR





Per il calcolo si è applicato il procedimento di calcolo indicato dalla Normativa secondo la formula:

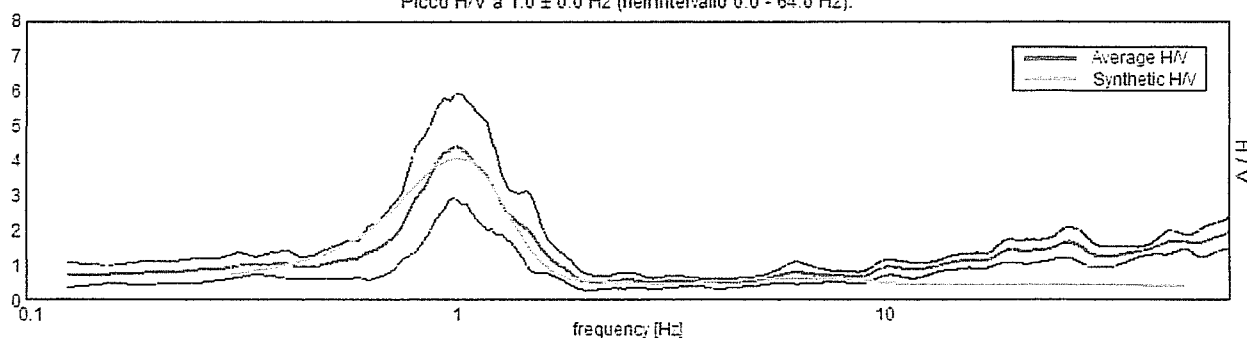
$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,n} \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

I calcoli sono stati condotti considerando 30 metri di sottosuolo a partire dal p.c. e i risultati sono:

**HVSR 1 Vs (30) = 199 m/s - HVSR 2 Vs (30) = 205 m/s - MASW Vs (30) = 202 m/s**

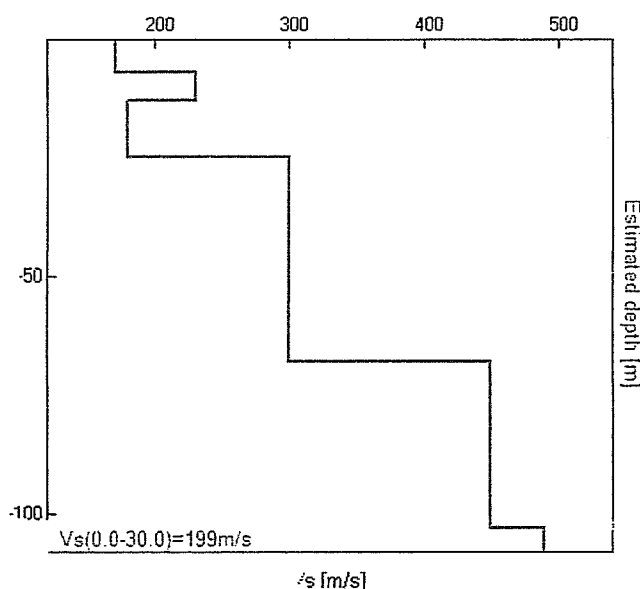
**H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO**

Picco H/V a  $1.0 \pm 0.0$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

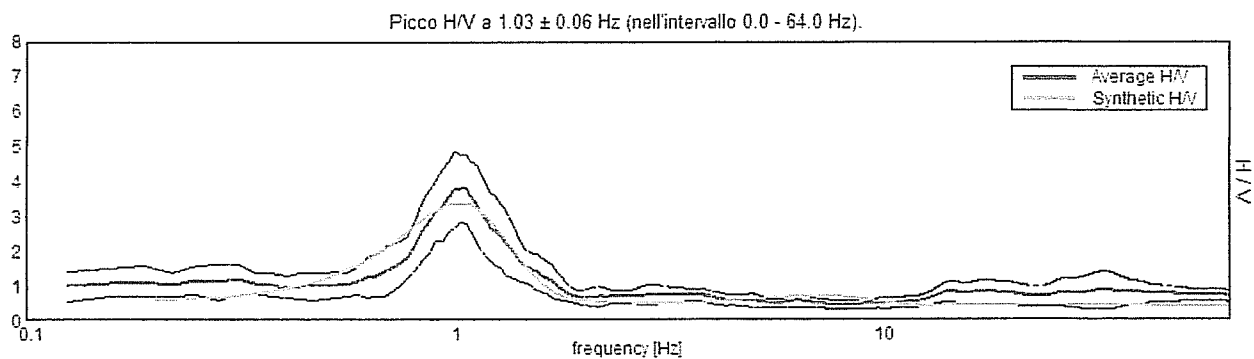


Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
7.00	7.00	170	0.49
13.00	6.00	230	0.45
25.00	12.00	180	0.49
68.00	43.00	300	0.42
103.00	35.00	450	0.42
inf.	inf.	490	0.42

$V_{s(0.0-30.0)}=199\text{m/s}$

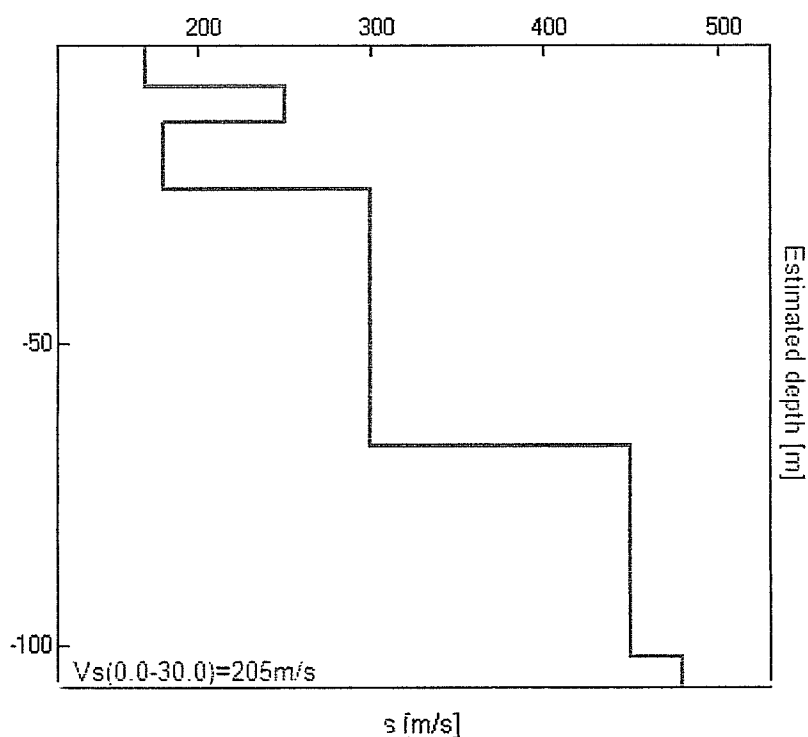


**H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO**



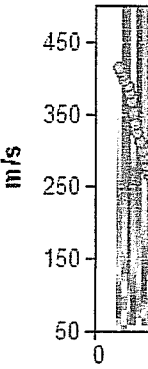
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
7.00	7.00	170	0.49
13.00	6.00	250	0.45
24.00	11.00	180	0.49
67.00	43.00	300	0.42
102.00	35.00	450	0.42
inf.	inf.	480	0.42

$V_s(0.0-30.0)=205\text{m/s}$





MODELLED



Depth at the the layer
7.0
13.0
25.0
68.0
103.0
inf

Per confronto si è calcolato il valore delle  $V_{s30}$  mediante correlazioni indirette dei valori di  $Q_c$  definiti con le prove penetrometriche statiche spinte a – 35.00 m secondo la formula di Iyisan (1996)  $V_s = 55.3 q_c^{0.377}$ .

I valori ottenuti sono schematizzati nelle tabelle di seguito

**PROVA CPT N.1**

Strato	Spessore medio (m)	$V_s$ (m/s)
1	8	165
2	4.6	230
3	10.60	170
4	6.80	287

Il valore  $V_{s30}$  risulta essere pari a 199 m/s.

**PROVA CPT N.2**

Strato	Spessore medio (m)	$V_s$ (m/s)
1	7.40	163
2	7.40	237
3	9.20	171
4	6	283

Il valore  $V_{s30}$  risulta essere pari a 198 m/s.

**Facendo riferimento a un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento conformemente a quanto espresso nel DM 2008 che definisce le seguenti categorie:**

A – Amassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori  $V_{s30}$  superiori a 800 m/s eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione con spessore massimo pari a 3 m.

B – Rocce tenere e depositi terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica  $N_{spt} > 50$  nei terreni a grana grossa o coesione non drenata  $C_{u,30} > 250$  kPa nei terreni a grana fine).

C – Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi 180 m/s e 360 m/s ( $15 < N_{spt} < 50$  nei terreni a grana grossa,  $70 < C_{u,30} < 250$  kPa nei terreni a grana fine).

D – Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fine scarsamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30} < 180$  m/s ( $N_{spt} < 15$  nei terreni a grana grossa,  $C_u < 70$  kPa nei terreni a grana fine).

E – Terreni del sottosuolo di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento con valori di  $V_{s30} > 800$  m/s.

In aggiunta a queste categorie se ne definiscono altre due, per le quali sono richiesti specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche, particolarmente nei casi in cui la presenza di terreni suscettibili di liquefazione

e/o di argille d'elevata sensitività possa comportare fenomeni di collasso del terreno.

S1 – Depositi di terreni caratterizzati da valore  $V_{s,30}$  inferiori a 100 m/s ( ovvero  $10 < C_{u,30} < 20$  kPa ) che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fine di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.

S2 - Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

**Il sito rientra in classe sismica di tipo C:** Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi 180 m/s e 360 m/s ( $15 < N_{spt} < 50$  nei terreni a grana grossa,  $70 < C_{u,30} < 250$  kPa nei terreni a grana fine).

#### 4.3 ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

Nella carta del rischio sismico : carta delle aree suscettibili di effetti locali elaborata per il Nuovo P.T.C.P approvato dalla Provincia di Modena con atto D.C.P. n.46 del 18/03/2009, l'area di studio ricade in zona 7: aree soggette ad amplificazione per caratteristiche litologiche e a potenziale liquefazione. Gli studi richiesti per un approfondimento di III livello sono: valutazione del coefficiente di amplificazione litologica e valutazione dei cedimenti attesi.

7	Area soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche e a potenziale liquefazione studi: valutazione del coefficiente di amplificazione litologica, del potenziale di liquefazione e dei cedimenti attesi; microzonazione sismica: approfondimenti di III livello.
8	Area soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche e a potenziali cedimenti studi: valutazione del coefficiente di amplificazione litologica e dei cedimenti attesi; microzonazione sismica: sono necessari sufficienti approfondimenti di III livello per la valutazione del coefficiente di amplificazione litologica e sono necessari approfondimenti di III livello per la stima degli eventuali cedimenti.

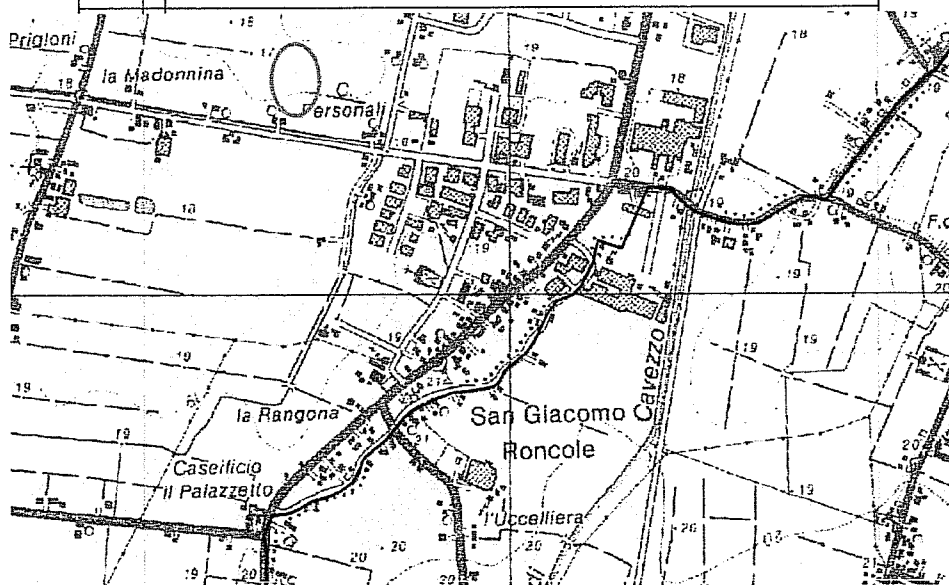


Fig.8: Tav. 2.2a.2 PTCP 2009 "Carta delle aree suscettibili di effetti locali".

#### 4.3.1 Spettri di risposta elastici ed amplificazione litologica

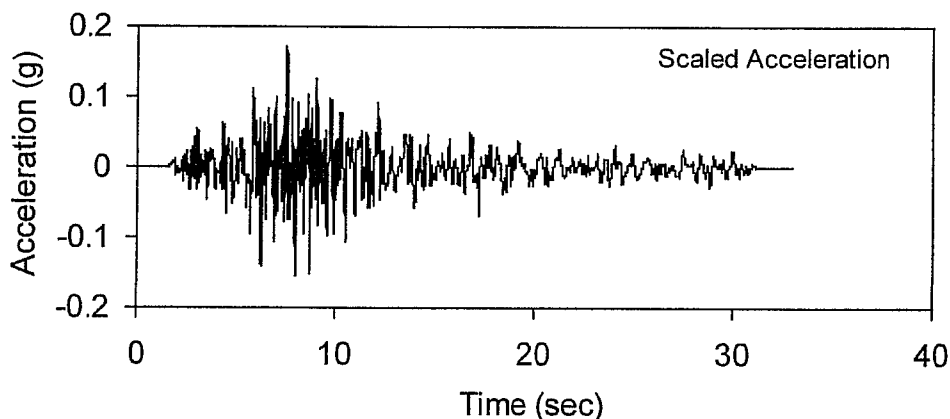
Il modello sismico del sottosuolo evidenzia un'inversione di velocità alla profondità media di – 13.00 m per il passaggio da litologie sabbiose addensate a terreni argillosi compatti. L'inversione di velocità non è elevata si passa da una velocità di propagazione pari a 230/250 m/s a una velocità di 170/180 m/s.

Considerando tale inversione di velocità e l'ampiezza notevole registrata con l'analisi in sismica passiva del picco alla frequenza fondamentale di 1 Hz, si è scelto di fare un'analisi di risposta sismica locale mediante modellazione numerica al fine di fornire gli spettri di risposta con periodo di ritorno di 712 anni e smorzamento  $\xi = 5\%$  con analisi monodimensionale e lineare equivalente con modello viscoelastico e non utilizzare il metodo semplificato che fa riferimento alle categorie di sottosuolo secondo quanto espresso dal DM 2008.

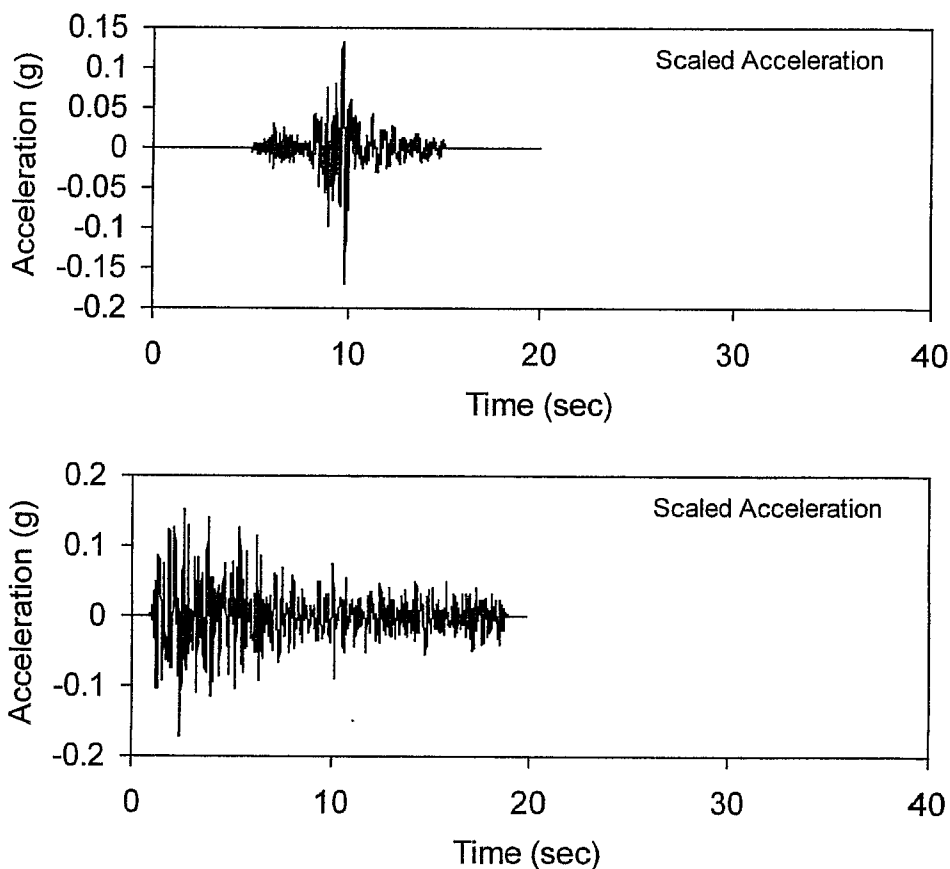
Come input sismico di riferimento ( $PGA_0$ ) si è utilizzato quello che deriva dai dati imposti secondo le NTC (2008) per il comune di Mirandola, scalato per un coefficiente d'uso 1.5 che corrisponde ad una classe d'uso III (costruzione il cui uso preveda affollamenti significativi), vita nominale  $\geq 50$  anni (opere ordinarie) pari a  $a_g(g) = \text{accelerazione orizzontale massima attesa al sito di riferimento rigido} = 0.17$

Gli accelerogrammi spettro-compattibili sono stati selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motion Database" (ISESD) attraverso una procedura che valuta la similarità tra una forma spettrale di riferimento (nel nostro caso questa forma spettrale corrisponde alla forma dello spettro di risposta isoprobabile con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni) e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati ISESD.

Gli accelerogrammi forniti dal Servizio Regionale, per il Comune di Mirandola scalati per l'accelerazione orizzontale massima attesa al sito di riferimento rigido sono graficati di seguito.







*Fig.9 Accelerogrammi spettro-compattibili selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motion Database" (ISESD) per il Comune di Mirandola*

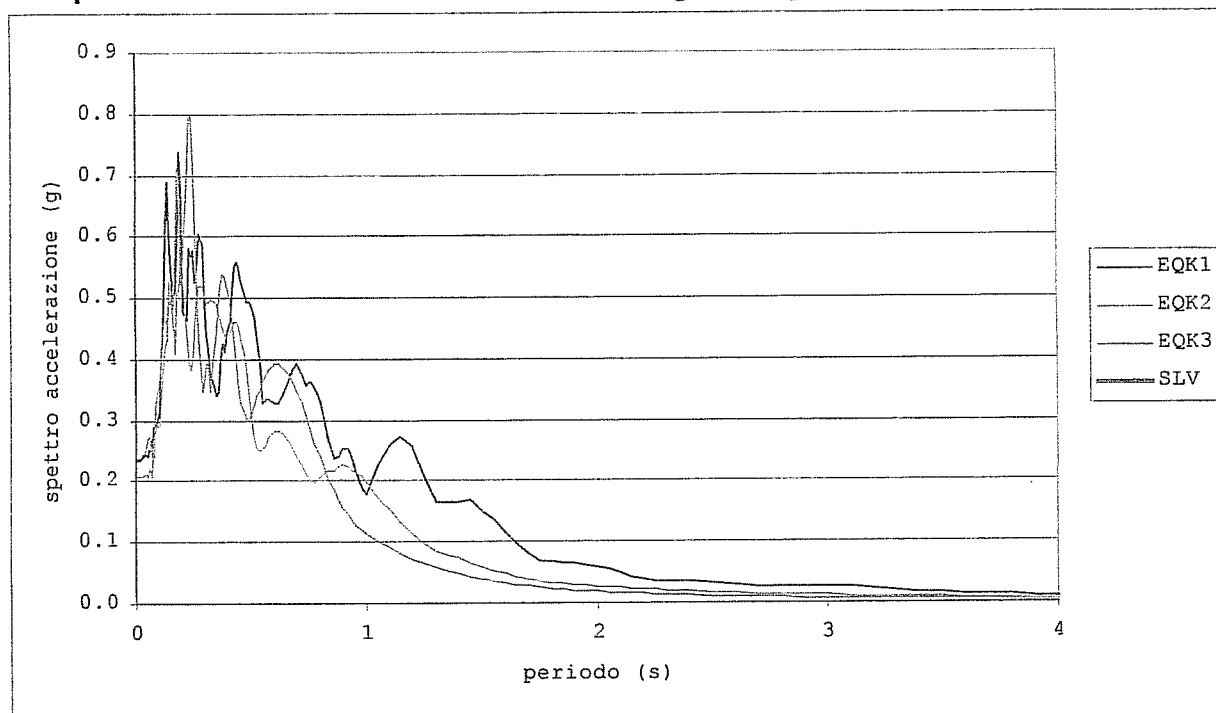
Nel cerchio, in ogni accelerogramma è indicata la  $PGA_0$  di 0.17g cioè la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido.

Per la definizione del profilo stratigrafico si sono utilizzati i risultati della procedura d'inversione eseguita sulle prove realizzate con tomografo digitale e considerando le sequenze stratigrafiche definite con le prove penetrometriche. I dati ottenuti e immessi nel programma sono elencati nella tabella di seguito.

Layer Number	Soil Material Type	Thickness of layer (m)	Maximum shear modulus $G_{max}$ (MPa)	Initial critical damping ratio (%)	Total unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Shear wave velocity (m/sec)	Location and type of earthquake input motion	Location of water table	Depth at middle of layer (m)	Vertical effective stress (kPa)
Surface	1	7.0	48.28		18.50	160			3.5	30.41
	2	6.0	117.43		20.00	240			10.0	91.40
	1	12.0	62.75		19.00	180			19.0	177.11
	2	43.0	192.66		21.00	300			46.5	472.83
	2	35.0	433.49		21.00	450			85.5	909.24
Bedrock	0		770.64		21.00	600	Autocrop		103.0	1105.07

Il programma utilizzato per il calcolo degli spettri di accelerazione orizzontale attesi al suolo mediante analisi monodimensionale e lineare equivalente con modello viscoelastico è il codice EERA che lavora bene per piccole e medie deformazioni.

**Gli spettri attesi con periodo di ritorno di 712 anni e smorzamento  $\xi = 5\%$  per il sito di studio sono indicati nella figura seguente.**



*Fig.10 Spettri attesi con periodo di ritorno di 475 anni e smorzamento  $\xi = 5\%$  per il sito di studio*

**Le accelerazioni massime attese in superficie (PGA) per i tre sismi di riferimento sono:**

$$a_{maxg}=0.233g$$

$$a_{maxg}=0.207g$$

$$a_{maxg}=0.237g$$

**Quindi la massima accelerazione attesa in superficie approssimata a due cifre decimali  $PGA = 0.24g$**

**I fattori amplificativi in termini di  $PGA/PGA_0$  per i tre sismi di riferimento sono:**

**amplificazione  $PGA/PGA_0$  per il primo sisma di riferimento: 1.37**

**amplificazione  $PGA/PGA_0$  per il secondo sisma di riferimento: 1.21**

**amplificazione  $PGA/PGA_0$  per il terzo sisma di riferimento: 1.39**

**amplificazione  $PGA/PGA_0 =$  fattore di amplificazione stratigrafica  $S_s$  massimo (DM 2008) = 1.39**

**Si riporta di seguito la funzione di trasferimento superficie/bedrock in cui è rappresentato il valore di amplificazione del moto del suolo alle varie frequenze dal bedrock alla superficie.**

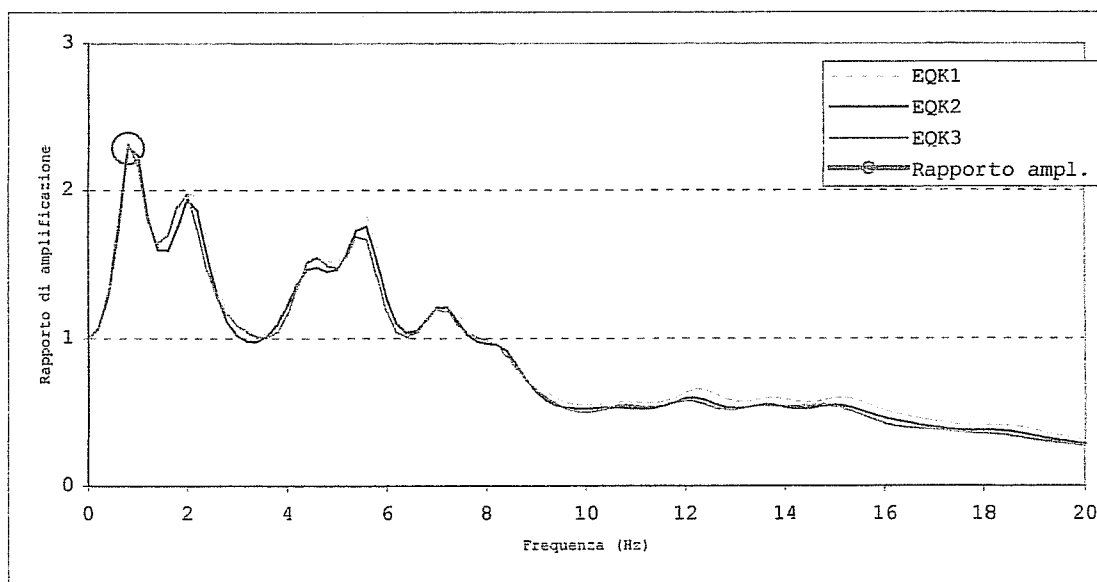


Fig.11 Valore di amplificazione del moto del suolo alle varie frequenze dal bedrock alla superficie

L'amplificazione massima per i tre sismi di riferimento alla frequenza fondamentale di 0.8 Hz è pari a:

2.264 per il primo sisma di riferimento

2.292 per il secondo sisma di riferimento

2.292 per il terzo sisma di riferimento.

Quindi l'amplificazione massima è di 2.9.

La frequenza fondamentale di 0.8 Hz è paragonabile a quella calcolata con le prove sismiche passive eseguite in sito HVRS (picco pari a 1.00 Hz) che individua un contrasto di impedenza profondo circa 70.00 m. Tale banda di frequenza (0.8 ÷ 1.0 Hz) è quella fondamentale del sito corrispondente al periodo caratteristico che va da 1.0 a 1.25 s da confrontare con il periodo della struttura esistente da mettere in sicurezza.

#### 4.3.2 Analisi del rischio di liquefazione da prove in sito

Per liquefazione di un terreno s'intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi.

La liquefazione si verifica in depositi sabbiosi saturi, infatti se si esprime la resistenza al taglio attraverso la relazione di Coulomb:

$$\tau = c + (\sigma_{vo} - u) \tan \phi$$

è evidente che la grandezza  $\tau$  si può annullare solo nel caso in cui siano verificate le condizioni:

$$c = 0$$

$$(\sigma_{vo} - u) = 0.$$

La prima condizione vieta che il fenomeno della liquefazione possa verificarsi in terreni coesivi o incoerenti ma con una significativa frazione argillosa o limosa plastica.

La seconda condizione si verifica quando la pressione interstiziale uguaglia la pressione totale esercitata ad una data profondità della colonna di terreno sovrastante e dagli eventuali sovraccarichi presenti in superficie ( $\sigma_{vo} - u$ ).

In definitiva il fenomeno della liquefazione si può verificare in depositi sciolti non coesivi posti sotto falda in seguito ad eventi che producano un forte aumento della pressione interstiziale dell'acqua.

In conclusione si possono ritenere potenzialmente liquefacibili quei depositi sciolti che presentano le seguenti caratteristiche:

- granulometricamente sono sabbie da fini a medie con contenuto in fine variabile generalmente dallo 0 al 25%;
- si trovano sotto falda;
- sono da poco a mediamente addensati;
- si trovano a profondità relativamente basse (di solito inferiori ai 15 metri).

L'altra variabile che provoca fenomeni di liquefazione è il sisma.

Durante un terremoto il terreno può essere visto come sottoposto ad una serie di cicli di carico variabili in intensità e numero in funzione della magnitudo del sisma stesso.

In terremoti di elevata magnitudo è sufficiente un numero ridotto di cicli di carico per ridurre la liquefazione del deposito, poiché ad ogni ciclo è associata una sollecitazione dinamica di maggiore intensità. In terremoti di minore magnitudo lo stesso effetto lo si ottiene con un numero superiore di cicli di carico.

I maggiori terremoti storici, nella regione Emilia Romagna si sono verificati in Romagna e dopo la recente crisi sismica del Maggio 2012, nella parte nord della provincia di Modena e Ferrara con magnitudo stimata pari a 5.9. In queste zone quindi si possono verificare terremoti a energia media.

Le sequenze stratigrafiche dedotte dalle prove eseguite nel sito oggetto di studio evidenzia terreni di natura coesiva, argille e limi con una componente di coesione tale da non essere soggetti a fenomeni di liquefazione fino alla quota di - 8.00 metri quando si trova un livello dello spessore di 8 metri costituito da sabbie da poco addensate ad addensate sottofalda potenzialmente liquefacibile. Più in profondità, al di sotto della quota di - 25.00 m si trovano sabbie addensate, troppo profonde per essere liquefacibili (il peso della colonna litostatica non sarà mai uguagliata dalla pressione interstiziale dei pori).

Sullo strato sabbioso compreso fra 8 e 16 metri è stata verificata la possibilità che si manifestino fenomeni di liquefazione mediante procedure denominate "metodi semplificati".

Il fattore di sicurezza,  $F_L$ , nella verifica di resistenza alla liquefazione di un livello di terreno è per definizione il rapporto fra la capacità di resistenza alla liquefazione, espressa in termini di rapporto di resistenza ciclica,  $R = CRR$ , e la domanda di resistenza alla liquefazione, espressa in termini di rapporto di tensione ciclica,  $L = CSR$ .

$$F_L = R/L$$

Se il fattore  $F_L > 1.00$  la liquefazione è da escludere ; se  $F_L < 1.00$  è possibile che avvengano fenomeni di liquefazione.

Il metodo di Robertson & Wride (1997) utilizzato in questa verifica, permette di correlare la resistenza al taglio mobilitata nel terreno con i risultati della prova penetrometrica statica.

La procedura di calcolo si basa sulle due seguenti equazioni:

$$R = 0.883 [(qc_{1n})_{cs}/1000] + 0.05 \quad \text{per } (qc_{1n})_{cs} < 50$$

$$R = 93 [(qc_{1n})_{cs}/1000]^3 + 0.08 \quad \text{per } 50 < (qc_{1n})_{cs} < 160$$

$L$  dipende dai parametri del sisma di progetto (accelerazione sismica e magnitudo di progetto):

$$L = 0.65 (a_{max}/g \times \sigma_{v0}/\sigma_{v0'}) r_d \times 1/MSF$$

L'indice di liquefazione  $I_L$  è indicativo dell'estensione che il fenomeno della liquefazione può avere nel deposito, ed è ottenuto dalla espressione

$$(1.9)I_L = \int_0^{20} F W(z) dz$$

dove

$$F = 1 - F_S \quad \text{per } F_S \leq 1$$

$$F = 0 \quad \text{per } F_S > 1$$

$$W(z) = 10 - 0.5z$$

Valori di $I_L$	Rischio di liquefazione
$I_L = 0$	Molto basso
$0 < I_L \leq 5$	Basso
$5 < I_L \leq 15$	Alto
$15 < I_L$	Molto alto

La verifica è stata eseguita con l'accelerazione massima attesa in superficie calcolata con smorzamento  $\xi = 5\%$  :  $a_{max}$  in superficie (g) = 0.24.

Magnitudo momento definita sulla base della recente crisi sismica del Maggio 2012 con epicentro Finale Emilia e Medolla:

$M_{aw} = 5.90$  ( anno 2012).

Il fattore di correzione della magnitudo  $MSF = 1.85$  NCEER (Seed R. B. et al.1997; 2003)

Infine il livello della soggiacenza della falda più alto misurato nel sito di studio nel Giugno 2012 pari a - 3.00 m dal p.c.

**Negli strati sabbiosi sottofalda studiati risultano non liquefacibili con  $F_L > 1$  e rischio liquefazione alto. rischio di liquefazione molto basso  $I_L=0$ .**

### Dati generali

Numero di strati = 3

Profondità della falda = 3 m

Magnitudo del sisma = 5.9

Accelerazione massima al suolo = 0.24

Strato Nr.	Descrizio ne (-)	Quota iniziale (m)	Quota finale (m)	Peso di volume secco (KN/mc)	Peso di volume saturato (KN/mc)	Nr. colpi medio (Nspt)	D50 dei granuli (mm)	Resisten za qc (KPa)	Resisten za all'attrito laterale fs (KPa)	Velocità Vs (m/s)
1	Argilla	0	8.0	10	18.5	0	0	800	50	160
2	Sabbia limosa	8.0	10.20	10	20	0	0	4000	70	200
3	Sabbia pulita	10.20	16.00	10	21	0	0	12000	100	230

### Metodo di Robertson e Wride (1997)

#### Risultati

Correzione per la magnitudo (MSF) = 1.85

Verific a Nr.	Profo ndità dal p. c. (m)	Pressi one litosta tica totale (KPa)	Pressi one vertic ale efficace (KPa)	Resist enza alla punta norm alizza ta Q	Attrito lateral e norm alizza to F (%)	Indice di comp ortam ento lc	Corre zione per la punta one litosta tica efficace CQ	Resist enza alla punta corret ta qc1N (KPa)	Coeffi ciente ridutti vo (rd)	Resist enza alla liquef azion e (CRR)	Sforz o di taglio norm alizza to (CSR)	Coeffi ciente di sicure zza (Fs)	Susce ttibilit à di liquef azion e	Indice di liquef azion e	Rischi di liquef azion e
1	3.20	33.70	31.73 87										NL	0	Molto basso
2	3.40	37.40	33.47 73										NL	0	Molto basso
3	3.60	41.10	35.21 6										NL	0	Molto basso
4	3.80	44.80	36.95 47										NL	0	Molto basso
5	4.00	48.50	38.69 34										NL	0	Molto basso
6	4.20	52.20	40.43 2										NL	0	Molto basso
7	4.40	55.90	42.17 07										NL	0	Molto basso
8	4.60	59.60	43.90 94										NL	0	Molto basso
9	4.80	63.30	45.64 8										NL	0	Molto basso
10	5.00	67.00	47.38 67										NL	0	Molto basso
11	5.20	70.70	49.12 54										NL	0	Molto basso
12	5.40	74.40	50.86 4										NL	0	Molto basso
13	5.60	78.10	52.60 27										NL	0	Molto basso
14	5.80	81.80	54.34 14										NL	0	Molto basso



15	6.00	85.50	56.08											NL	0	Molto
16	6.20	89.20	57.81											NL	0	Molto
17	6.40	92.90	59.55											NL	0	Molto
18	6.60	96.60	61.29											NL	0	Molto
19	6.80	100.3	63.03											NL	0	Molto
20	7.00	104.0	64.77											NL	0	Molto
21	7.20	107.7	66.51											NL	0	Molto
22	7.40	111.4	68.25											NL	0	Molto
23	7.60	115.1	69.98											NL	0	Molto
24	7.80	118.8	71.72											NL	0	Molto
25	8.00	122.5	73.46											NL	0	Molto
26	8.20	126.5	75.50	46.03	1.807	2.333	1.150	94.91	0.937	0.159	0.132	1.20		NL	0	Molto
27	8.40	130.5	77.54	45.42	1.809	2.338	1.135	94.41	0.935	0.158	0.133	1.19		NL	0	Molto
28	8.60	134.5	79.58	44.83	1.810	2.343	1.121	93.94	0.934	0.157	0.133	1.18		NL	0	Molto
29	8.80	138.5	81.62	44.27	1.812	2.347	1.106	93.48	0.932	0.156	0.133	1.17		NL	0	Molto
30	9.00	142.5	83.66	43.73	1.814	2.352	1.093	93.04	0.931	0.154	0.133	1.16		NL	0	Molto
31	9.20	146.5	85.69	43.20	1.816	2.356	1.080	92.62	0.928	0.153	0.134	1.15		NL	0	Molto
32	9.40	150.5	87.73	42.70	1.818	2.360	1.067	92.21	0.923	0.152	0.133	1.14		NL	0	Molto
33	9.60	154.5	89.77	42.21	1.820	2.365	1.055	91.82	0.917	0.152	0.133	1.14		NL	0	Molto
34	9.80	158.5	91.81	41.74	1.822	2.369	1.043	91.43	0.912	0.151	0.133	1.14		NL	0	Molto
35	10.00	162.5	93.85	41.28	1.824	2.373	1.032	91.07	0.907	0.150	0.132	1.13		NL	0	Molto
36	10.20	166.5	95.89	40.84	1.826	2.377	1.021	90.71	0.901	0.149	0.132	1.13		NL	0	Molto
37	10.40	170.7	98.13	121.1	0.845	1.799	1.009	134.0	0.896	0.303	0.131	2.31		NL	0	Molto
38	10.60	174.9	100.3	119.7	0.845	1.803	0.998	132.8	0.891	0.298	0.131	2.27		NL	0	Molto
39	10.80	179.1	102.6	118.4	0.846	1.807	0.987	131.7	0.885	0.292	0.130	2.24		NL	0	Molto
40	11.00	183.3	104.8	117.1	0.846	1.811	0.976	130.6	0.880	0.287	0.129	2.21		NL	0	Molto
41	11.20	187.5	107.0	115.9	0.846	1.814	0.966	129.5	0.875	0.282	0.129	2.18		NL	0	Molto
42	11.40	191.7	109.3	114.7	0.846	1.818	0.956	128.5	0.869	0.277	0.128	2.16		NL	0	Molto
43	11.60	195.9	111.5	113.6	0.847	1.821	0.946	127.5	0.864	0.273	0.128	2.13		NL	0	Molto

		0	628	113	2	8	8	749	3	1	1				basso
44	11.80	200.1	113.8	112.4	0.847	1.825	0.937	126.6	0.858	0.268	0.127	2.11	NL	0	Molto
		0	015	883	5	2	4	048	9	7	5				basso
45	12.00	204.3	116.0	111.3	0.847	1.828	0.928	125.6	0.853	0.264	0.126	2.08	NL	0	Molto
		0	402	979	8	6	3	664	6	6	9				basso
46	12.20	208.5	118.2	110.3	0.848	1.831	0.919	124.7	0.848	0.260	0.126	2.06	NL	0	Molto
		0	788	387	1	9	5	602	3	6	3				basso
47	12.40	212.7	120.5	109.3	0.848	1.835	0.910	123.8	0.842	0.256	0.125	2.04	NL	0	Molto
		0	175	091	4	2	9	73	9	8	6				basso
48	12.60	216.9	122.7	108.3	0.848	1.838	0.902	123.0	0.837	0.253	0.125	2.03	NL	0	Molto
		0	562	077	7	4	6	189	6	1					basso
49	12.80	221.1	124.9	107.3	0.849	1.841	0.894	122.1	0.832	0.249	0.124	2.01	NL	0	Molto
		0	948	335		6	4	71	2	6	3				basso
50	13.00	225.3	127.2	106.3	0.849	1.844	0.886	121.3	0.826	0.246	0.123	1.99	NL	0	Molto
		0	335	85	3	7	5	57	9	2	6				basso
51	13.20	229.5	129.4	105.4	0.849	1.847	0.878	120.5	0.821	0.243	0.123	1.98	NL	0	Molto
		0	722	613	6	8	8	635	6						basso
52	13.40	233.7	131.7	104.5	0.849	1.850	0.871	119.7	0.816	0.239	0.122	1.96	NL	0	Molto
		0	108	612	9	8	3	909	2	9	3				basso
53	13.60	237.9	133.9	103.6	0.850	1.853	0.864	119.0	0.810	0.236	0.121	1.95	NL	0	Molto
		0	495	838	2	7		395	9	9	6				basso
54	13.80	242.1	136.1	102.8	0.850	1.856	0.856	118.3	0.805	0.234	0.120	1.94	NL	0	Molto
		0	882	28	5	7	9	096	5		9				basso
55	14.00	246.3	138.4	101.9	0.850	1.859	0.849	117.5	0.800	0.231	0.120	1.92	NL	0	Molto
		0	268	932	8	5	9	876	2	2	2				basso
56	14.20	250.5	140.6	101.1	0.851	1.862	0.843	116.9	0.794	0.228	0.119	1.91	NL	0	Molto
		0	655	783	1	4	2	015	9	6	5				basso
57	14.40	254.7	142.9	100.3	0.851	1.865	0.836	116.2	0.789	0.226	0.118	1.90	NL	0	Molto
		0	042	827	4	2	5	099	5		8				basso
58	14.60	258.9	145.1	99.60	0.851	1.867	0.83	115.5	0.784	0.223	0.118	1.89	NL	0	Molto
		0	429	55	7	9		409	2	4	1				basso
59	14.80	263.1	147.3	98.84	0.852	1.870	0.823	114.8	0.778	0.221	0.117	1.88	NL	0	Molto
		0	815	62		6	7	945	8	1	4				basso
60	15.00	267.3	149.6	98.10	0.852	1.873	0.817	114.2	0.773	0.218	0.116	1.87	NL	0	Molto
		0	202	39	3	3	5	572	5	7	7				basso
61	15.20	271.5	151.8	97.37	0.852	1.876	0.811	113.6	0.768	0.216	0.116	1.87	NL	0	Molto
		0	589	81	6		5	431	2	5					basso
62	15.40	275.7	154.0	96.66	0.852	1.878	0.805	113.0	0.762	0.214	0.115	1.86	NL	0	Molto
		0	975	82	9	6	6	384	8	3	2				basso
63	15.60	279.9	156.3	95.97	0.853	1.881	0.799	112.4	0.757	0.212	0.114	1.85	NL	0	Molto
		0	362	35	2	1	8	433	5	2	5				basso
64	15.80	284.1	158.5	95.29	0.853	1.883	0.794	111.8	0.752	0.210	0.113	1.85	NL	0	Molto
		0	749	37	5	7	1	578	1	2	8				basso
65	16.00	288.3	160.8	94.62	0.853	1.886	0.788	111.2	0.746	0.208	0.113	1.84	NL	0	Molto
		0	136	8	8	2	6	963	8	2					basso

## 5. CONCLUSIONI

Su incarico e per conto del Committente si produce una modellazione geologica del sito, una analisi di pericolosità sismica locale riportando gli effetti attesi e una caratterizzazione geotecnica del volume significativo di terreno interessato dalla messa in sicurezza di un capannone esistente in elementi prefabbricati sito in Via Luciano Minelli in frazione San Giacomo Roncole, in Comune di Mirandola.

La caratterizzazione litologica di dettaglio e la definizione dei parametri geotecnici del volume di terreno influenzato dalla struttura su cui operare sono ricavati dai risultati di n. 2 prove penetrometriche statiche di tipo meccanico, eseguite in sito in data 26/06/2012 dal Laboratorio di prove geotecniche in sito GEOPROGETTI S.r.l. di Medolla.

Le prove sono state spinte alla profondità di - 35.00 m per la definizione in dettaglio delle caratteristiche litologiche e stratigrafiche fino a tale quota.

Al fine di produrre un'analisi di pericolosità sismica locale, determinare il valore della velocità di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m e fornire la frequenza fondamentale del sito, si sono realizzate in data 25/06/2012 n. 2 prove di sismica passiva con tomografo digitale modello TRZ-0121/01/11 progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico e un rilievo geofisico in onde di superficie MASW con strumento SoilSpy Rosina modello SAB-0019/02-11.

Le prove sismiche sono state realizzate dallo Studio Geologico del Dott. Salvatore Mucci di Castelfranco Emilia (MO).

Scopo dell'indagine è stato fornire un modello geologico dell'area in epigrafe, una caratterizzazione geotecnica del volume di terreno influenzato dalla costruzione di progetto e un'analisi di pericolosità sismica locale che riporti il valore dell'accelerazione di propagazione delle onde sismiche attesa al suolo rigido di riferimento, il valore di amplificazione litologica quale effetto di sito atteso, il valore di accelerazione atteso in superficie, il valore della frequenza fondamentale del sito e gli spettri di risposta. In dettaglio si è condotto anche un'analisi di rischio liquefazione dei terreni sabbiosi saturi presenti.

La zona oggetto di studio si trova a sud rispetto il centro cittadino di Mirandola in zona artigianale ed industriale nella frazione di San Giacomo Roncole.

Le coordinate geografiche dell'area sono 44°52' 06.85"N e 11°03'17.29"E.

Il sito ha accesso da Via Luciano Minelli, laterale di Via di Mezzo.

I centri abitati vicini sono:

Mirandola a circa 2.40 Km a nord

Medolla a circa 2.50 Km a sud-sud-est

San Possidonio a circa 5.20 Km a ovest-nord-ovest

San Biagio a circa 5.40 Km est

Oltre che a varie case sparse di campagna.

Il territorio del Comune di Mirandola è situato a Nord della provincia di Modena e ricade nel settore assiale della Pianura Padana "propriamente detta".

L'area, secondo quanto indicato nel Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale di Modena redatto nel Marzo 2000, ricade nell'Unità di Paesaggio

indicata con il numero 2 “ Dossi e zone più rilevate nella Bassa e Media Pianura”.

I caratteri ambientali dell'Unità di Paesaggio n. 2 sono caratterizzati dalla trama degli antichi paleoalvei fluviali, morfologicamente emergenti sull'intorno delle aree vallive riscattate dalla bonifica. Sono presenti vari dossi con disegno complesso e con digitazioni dall'andamento vario. **La zona di studio si trova ubicata in un'area priva di strutture geomorfologiche importanti.** Nel PRG Vigente l'area di ubicazione della struttura è classificata in zona omogenea D2, artigianali e industriali prevalentemente edificate, (art.52).

**La litologia profonda riscontrata nell'area presenta diversi livelli litologici. Al di sotto del riporto dello spessore di 0.60 m, fino alla quota di – 5.60 si trovano argille limose poco consistenti con livelli organici soffici e comprimibili;**

**da – 5.60 a – 8.00 m argille compatte;**

**da – 8.00 alla profondità variabile da – 13.40 m (prova n.1) a – 15.80 m (prova n. 2) sabbie inizialmente poco addensate poi addensate;**

**seguono, dopo il livello di sabbie, nuovamente argille compatte intercalate da rari livelli limosi;**

**da – 24.20 fino alla profondità indagata dalle prove (- 35.00 m) si trovano sabbie addensate.**

I parametri geotecnici caratteristici per i vari strati riscontrati nella sequenza litologica sono derivati dalle correlazioni dei valori di  $q_c$  e  $f_s$  ricavati direttamente dalle prove penetrometriche e interpretate e “ragionate” dallo scrivente. I parametri caratteristici  $c_{uk}$  per gli strati coesivi e  $\phi_k$  per i terreni sciolti sono:

**Primo strato, da sotto il riporto fino alla quota di – 5.60 m: argille limose poco consistenti con livelli organici soffici e comprimibili,  $c_{uk}= 43.90$  kPa;**

**Secondo strato da – 5.60 m a – 8.00 m argille compatte,  $c_{uk}= 64.50$  kPa;**

**Terzo strato da – 8.00 a alla profondità variabile da – 13.40 m (prova n.1) a – 15.80 m (prova n. 2) sabbie inizialmente poco addensate poi addensate,  $\phi_k= 28.30^\circ$ ;**

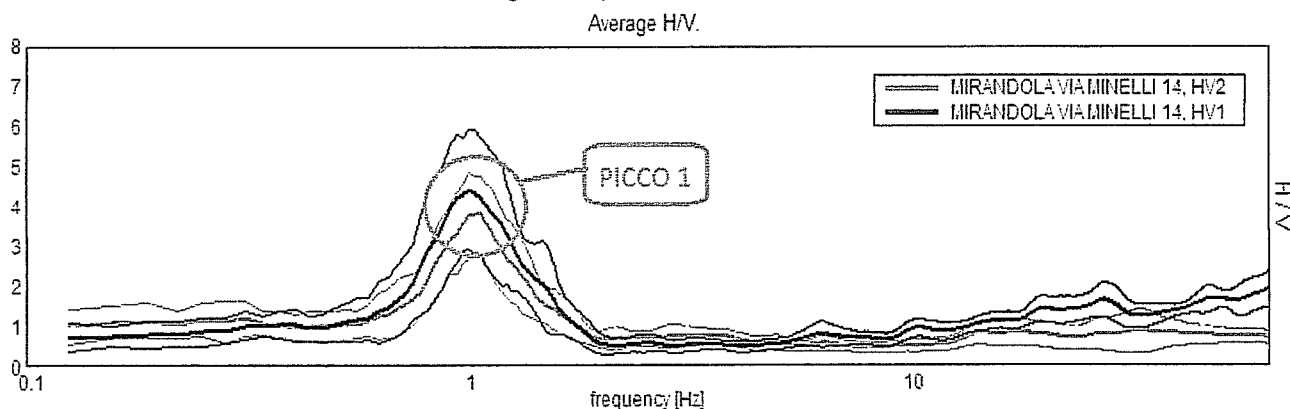
**Quarto strato da – 13.4/15.80 a – 24.20 m argille compatte:  $c_{uk}= 72.20$  kPa;**

**Quinto strato da –24.20 a – 35.00 m sabbie addensate,  $\phi_k= 30.50^\circ$ .**

Per l'analisi di pericolosità sismica di base si è condotto un approfondimento di III livello. Gli effetti attesi sono amplificazione per caratteristiche litologiche, potenziali cedimenti e liquefazione. In base a quanto richiesto si è quindi fornita l'amplificazione stratigrafica, gli spettri di risposta, accelerazione attesa al suolo rigido di riferimento e quella attesa in superficie e si è condotta un analisi rischio liquefazione dei terreni sabbiosi saturi riscontrati.

La ricostruzione del modello sismico del sottosuolo e la stima della velocità media delle onde di taglio nel volume di terreno investigato sono ricavati dall'analisi delle due prove eseguite con tomografo digitale e da un rilievo geofisico in onde di superficie MASW tarati dalla sequenza litostratigrafica definita dall'analisi della prova penetrometrica statica.

Relativamente alle **frequenze caratteristiche di sito**, dal diagramma del confronto delle curve H/V, di seguito riportato, abbiamo:



**Un picco stratigrafico**, caratteristico, così caratterizzato:

Picchi Stratigrafici	Rapporto H/V (valori medi)	Frequenza(Hz) Caratteristica (valori medi)	Periodo (s) Caratteristico (valori medi)
1	4,10	~ 1,00	~ 1,00

**Il picco (1), rappresenta il passaggio al pseudo Bedrock sismico, si tratta di un contrasto di impedenza profondo circa 70 m. con Vs approssimabile a 450/500 m/s, confermato dai dati di letteratura, vedi carta Sismotettonica Regione Emilia Romagna.**

La modellazione in termini di Vs, è stata effettuata, su tutte le registrazioni, vincolando le curve spettrali alla curva di dispersione MASW e alla prove CPT effettuata sullo stesso sito.

Si è applicato il procedimento di calcolo indicato dalla Normativa secondo la formula:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,n} \frac{h_i}{V_{Si}}}$$

I calcoli sono stati condotti considerando 30 metri di sottosuolo a partire dal p.c. e i risultati sono:

**HVSR 1 Vs (30) = 199 m/s - HVSR 2 Vs (30) = 205 m/s - MASW Vs (30) = 202 m/s**  
**Il sito rientra in classe sismica di tipo C:** Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs<sub>30</sub> compresi 180 m/s e 360 m/s (15 < N<sub>spt</sub> < 50 nei terreni a grana grossa, 70 < C<sub>u,30</sub> < 250 kPa nei terreni a grana fine).

Il modello sismico del sottosuolo evidenzia un inversione di velocità alla profondità media di - 13.00 m per il passaggio da litologie sabbiose addensate a terreni argillosi compatti. L'inversione di velocità non è elevata si passa da una velocità di propagazione pari a 230/250 m/s a una velocità di 170/180 m/s.

Considerando tale inversione di velocità e l'ampiezza notevole registrata con l'analisi in sismica passiva del picco alla frequenza fondamentale di 1 Hz, si è scelto di fare un'analisi di risposta sismica locale mediante modellazione numerica al fine di fornire gli spettri di risposta con periodo di ritorno di 712 anni e smorzamento  $\xi = 5\%$  con analisi monodimensionale e lineare equivalente con modello viscoelastico e non utilizzare il metodo semplificato che fa riferimento alle categorie di sottosuolo secondo quanto espresso dal DM 2008.

Come input sismico di riferimento ( $PGA_0$ ) si è utilizzato quello che deriva dai dati imposti secondo le NTC (2008) per il comune di Mirandola, scalato per un coefficiente d'uso 1.5 che corrisponde ad una classe d'uso III (costruzione il cui uso preveda affollamenti significativi), vita nominale  $\geq 50$  anni (opere ordinarie) pari a  $a_g(g) = \text{accelerazione orizzontale massima attesa al sito di riferimento rigido} = 0.17$

Per la definizione dello spettro di risposta elastico del sito si sono utilizzati gli accelerogrammi spettro-compatibili selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motion Database" (ISESD) attraverso una procedura che valuta la similarità tra una forma spettrale di riferimento (nel nostro caso questa forma spettrale corrisponde alla forma dello spettro di risposta isoprobabile con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni) e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati ISESD.

**Gli spettri attesi per il sito di studio sono indicati nella figura 10.**

**Le accelerazioni massime attese in superficie (PGA) per i tre sismi di riferimento sono:**

$a_{maxg}=0.233g$

$a_{maxg}=0.207g$

$a_{maxg}=0.237g$

**Quindi la massima accelerazione attesa in superficie approssimata a due cifre decimali  $PGA = 0.24g$**

**I fattori amplificativi in termini di  $PGA/PGA_0$  per i tre sismi di riferimento sono:**

**amplificazione  $PGA/PGA_0$  per il primo sisma di riferimento: 1.37**

**amplificazione  $PGA/PGA_0$  per il secondo sisma di riferimento: 1.21**

**amplificazione  $PGA/PGA_0$  per il terzo sisma di riferimento: 1.39**

**amplificazione  $PGA/PGA_0 = \text{fattore di amplificazione stratigrafica } S_s \text{ massimo (DM 2008)} = 1.39$**

**Si è riportato in figura 11 la funzione di trasferimento superficie/bedrock in cui è rappresentato il valore di amplificazione del moto del suolo alle varie frequenze dal bedrock alla superficie.**

**L'amplificazione massima per i tre sismi di riferimento alla frequenza fondamentale di 0.8 Hz è pari a:**

**2.264 per il primo sisma di riferimento**

**2.292 per il secondo sisma di riferimento**

**2.292 per il terzo sisma di riferimento.**

**Quindi l'amplificazione massima è di 2.9.**

**La frequenza fondamentale di 0.8 Hz è paragonabile a quella calcolata con le prove sismiche passive eseguite in sito HVRS (picco pari a 1.00 Hz) che individua un contrasto di impedenza profondo circa 70.00 m. Tale banda**



**di frequenza (0.8 ÷ 1.0 Hz) è quella fondamentale del sito corrispondente al periodo caratteristico che va da 1.0 a 1.25 s da confrontare con il periodo della struttura esistente da mettere in sicurezza.**

La colonna stratigrafica dedotta dalla prova eseguita nel sito oggetto di studio evidenzia terreni di natura coesiva, argille e limi con una componente di coesione tale da non essere soggetti a fenomeni di liquefazione fino alla quota di – 8.00 metri quando si trova un livello dello spessore di 8 metri costituito da sabbie da poco addensate ad addensate sottofalda.

Più in profondità, al di sotto della quota di – 25.00 m si trovano sabbie addensate, troppo profonde per essere liquefacibili (il peso della colonna litostatica non sarà mai uguagliata dalla pressione interstiziale dei pori).

Sullo strato sabbioso compreso fra 8 e 16 metri è stata verificata la possibilità che si manifestino fenomeni di liquefazione mediante procedure denominate "metodi semplificati".

La verifica è stata eseguita con l'accelerazione massima attesa in superficie calcolata con smorzamento  $\xi = 5\%$  :  $a_{\max \text{ in superficie (g)}} = 0.24$ .

Magnitudo momento definita sulla base della recente crisi sismica del Maggio 2012 con epicentro Finale Emilia e Medolla:

$M_{aw} = 5.90$  (anno 2012).

Il fattore di correzione della magnitudo  $MSF = 1.85$  NCEER (Seed R. B. et al. 1997; 2003)

Infine il livello della soggiacenza della falda più alto misurato nel sito di studio nel Giugno 2012 pari a – 3.00 m dal p.c.

**Negli strati sabbiosi sottofalda studiati risultano non liquefacibili con  $F_L > 1$  e rischio liquefazione alto. rischio di liquefazione molto basso  $I_L = 0$ .**

Il livello della frangia freatica superficiale di circolazione nel materasso alluvionale, è stato misurato in foro all'atto d'esecuzione delle prove, in data 26/06/2012, alla quota di – 3.00 m dal p.c.

La frangia freatica presente in superficie è un livello idrico sospeso, povero e non utilizzabile perché presente in terreni poco permeabili testimonianza di una circolazione ipodermica.

In questa situazione la presenza di acqua è fortemente influenzata dalle precipitazioni che percolano nei primi metri di terreno e nei livelli limo-sabbiosi a permeabilità maggiore.

Nei periodi carenti in precipitazioni tale livello idrico spesso è assente nei primi quattro metri in quanto non alimentato dall'acqua meteorica, tende invece a crescere nei periodi invernali o comunque nei periodi con piogge abbondanti.

Dott. Geol. CESTARI PAOLO



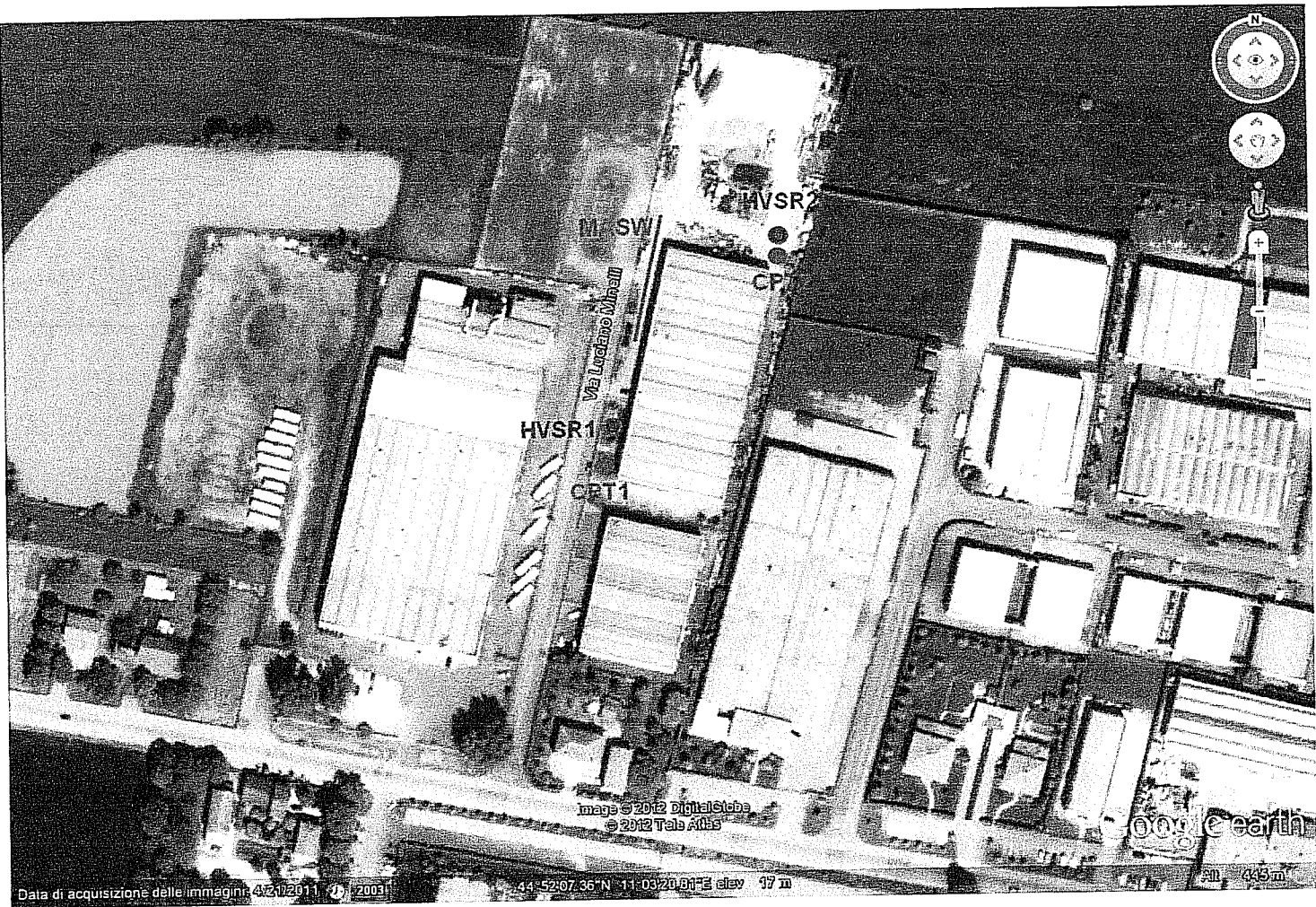
Dott. Geol. RITA BALLISTA



## ALLEGATI

- 1) UBICAZIONE INDAGINI ESEGUITE
- 2) DIAGRAMMI PROVE PENETROMETRICHE
- 3) DIAGRAMMI VALUTAZIONI LITOLOGICHE
- 4) PARAMETRI GEOTECNICI
- 5) TABELLE DI CAMPAGNA
- 6) DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

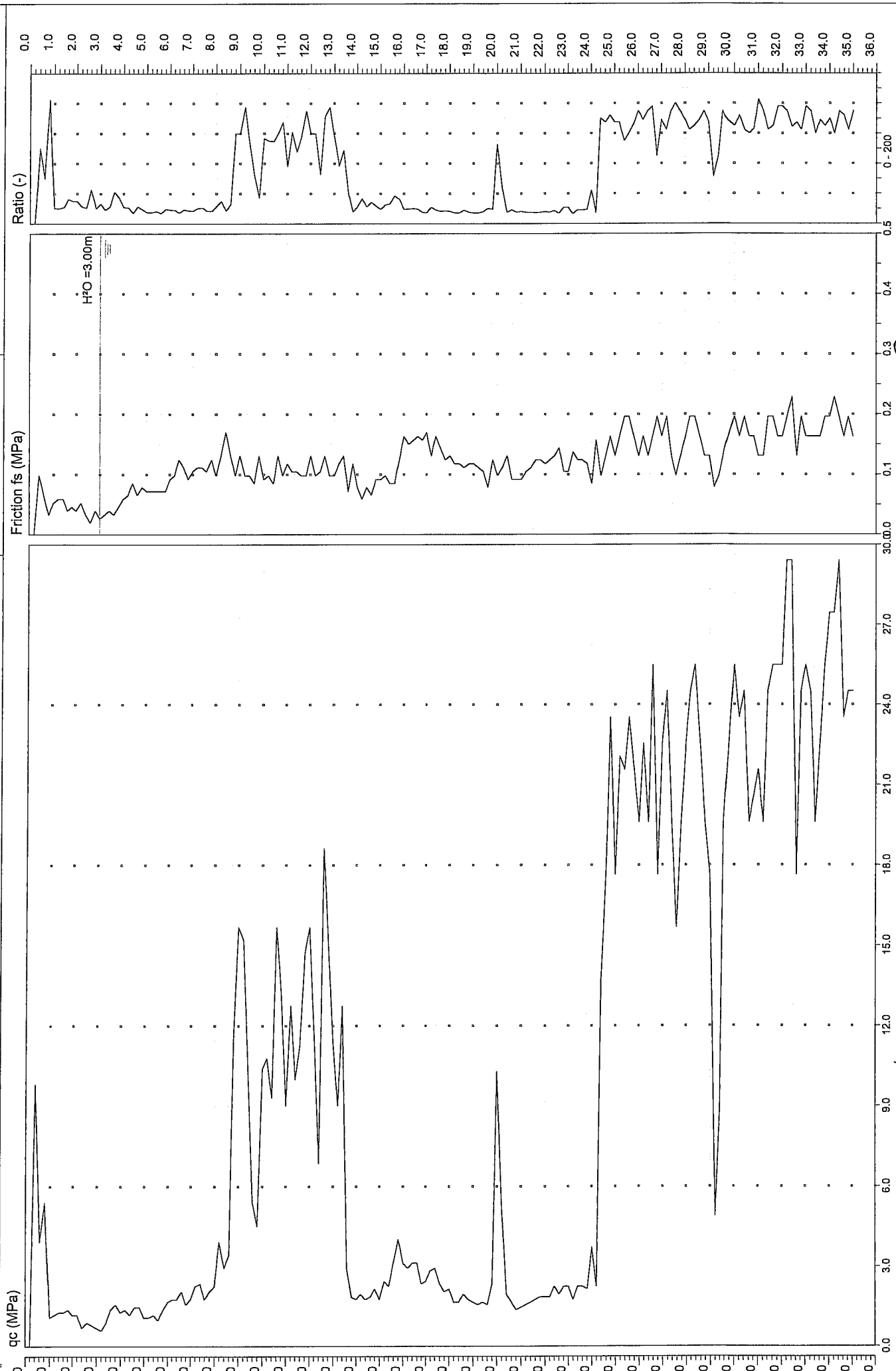






## **DIAGRAMMI PROVE PENETROMETRICHE**





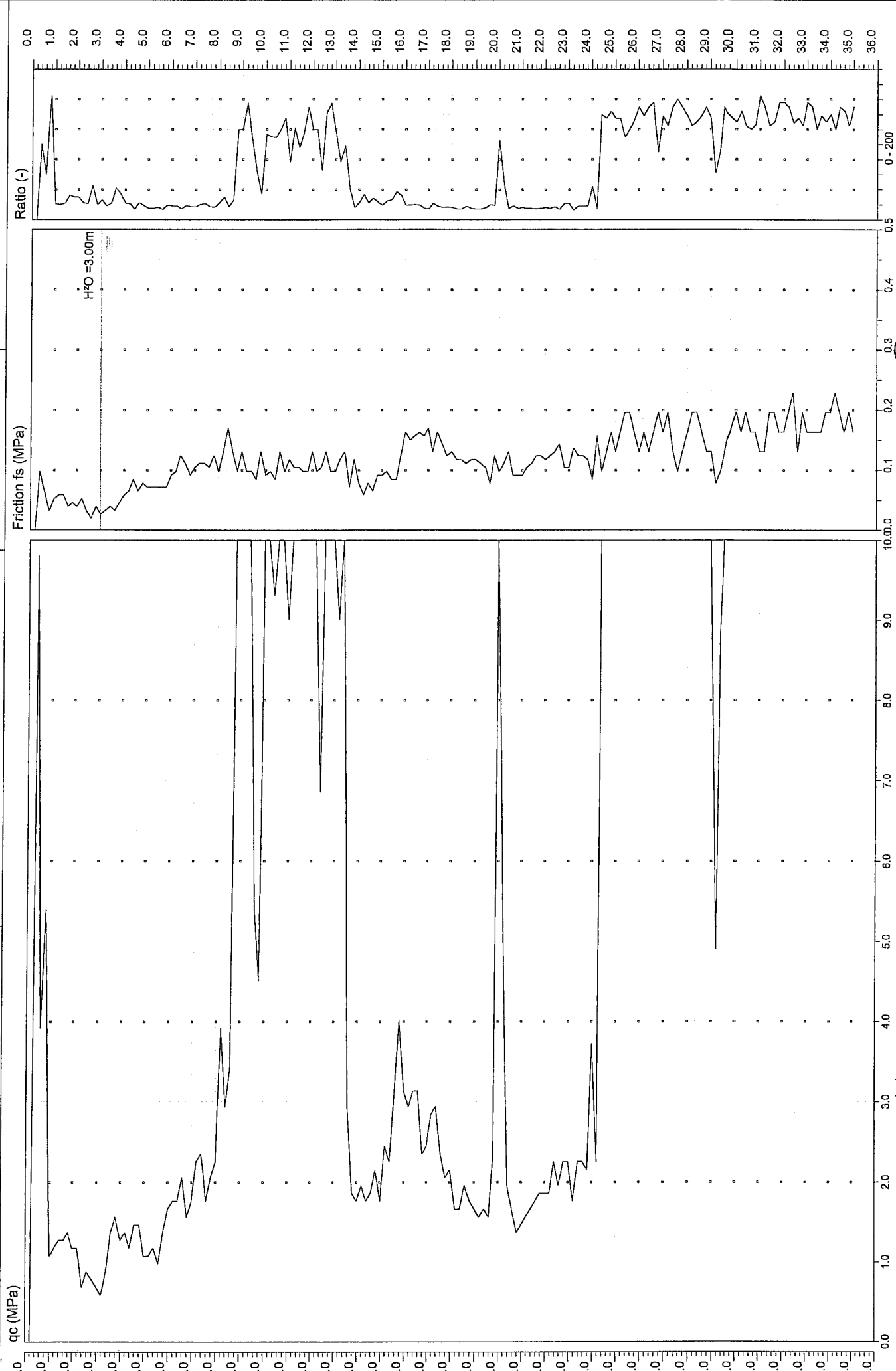
Comitente: BRAVALDINI QUIRINO S.P.A.  
Cantiere: MIRANDOLA Via Minelli  
Data: 26/06/2012

Quota:  
Preforo:  
Falda: -3.00

Prova n° 1

Laboratorio di prove geotecniche in sito  
Decreto di concessione n. 54420 del 27/01/2006  
Sede legale: Via Duca D'Este, 6 - 41036 Medolla (MO)

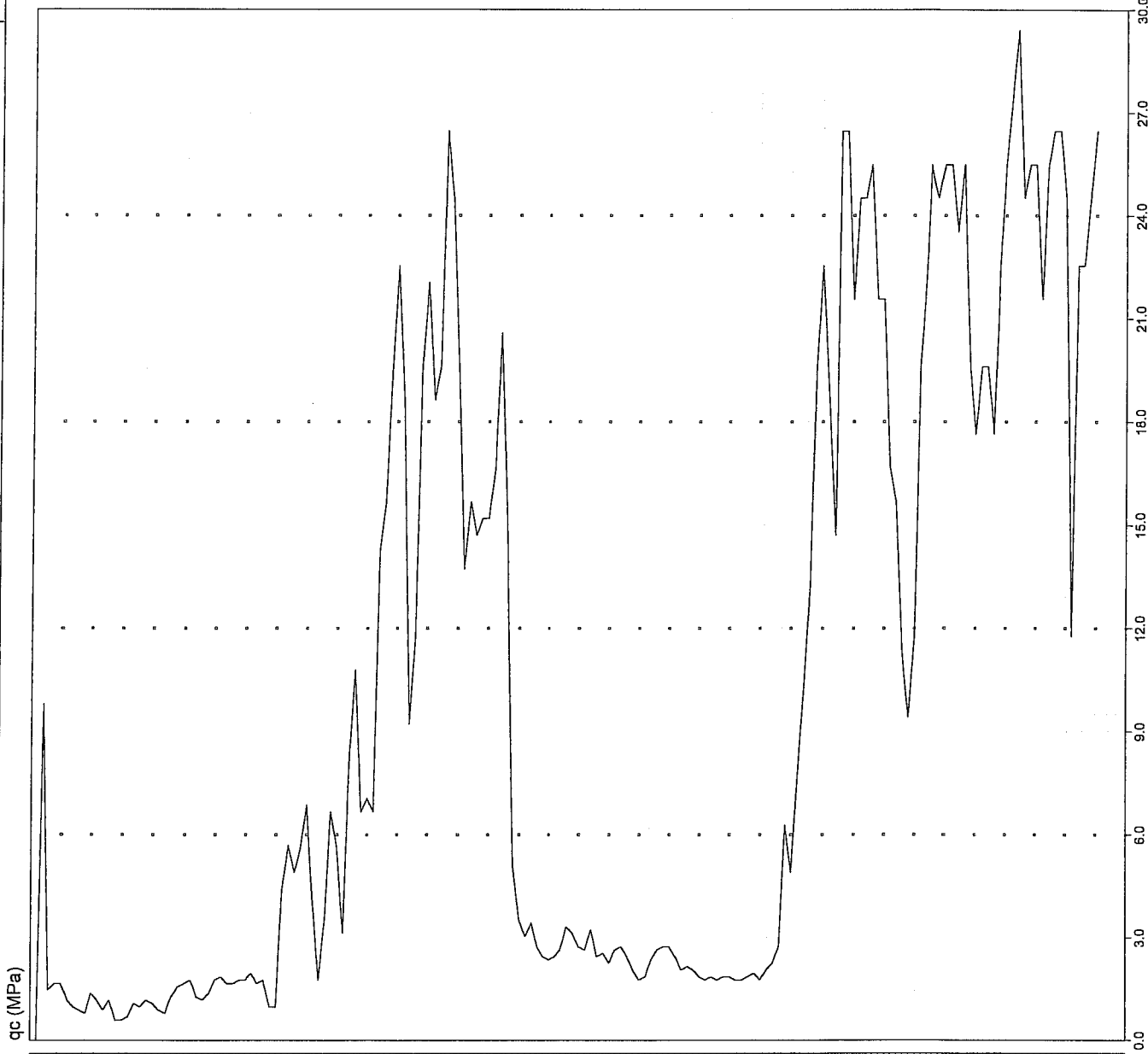
ROGETTI



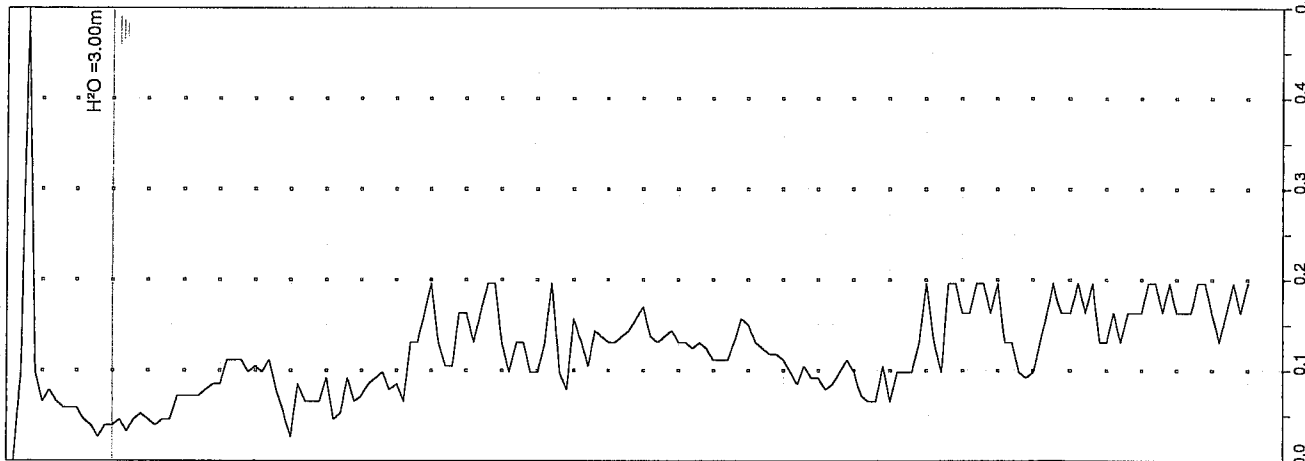
Direttore Laboratorio: Dott. Geol. RIVA BALLISTA

Sperimentatore: Dott. Geol. PAOLO CESTARI

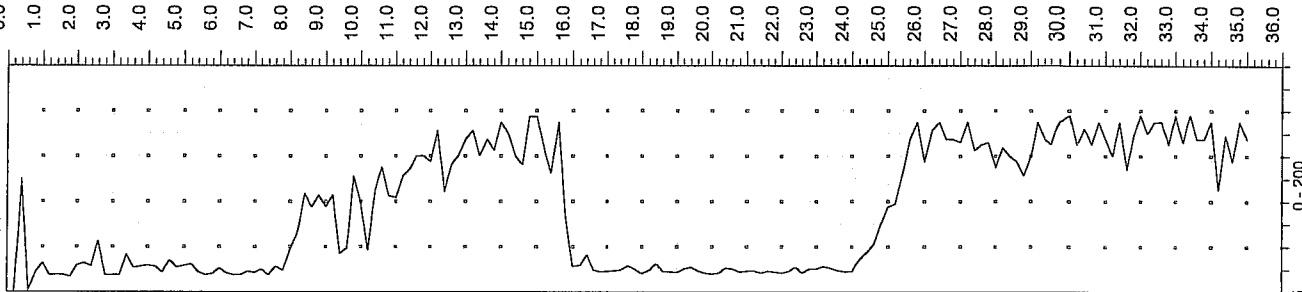
35.000 m

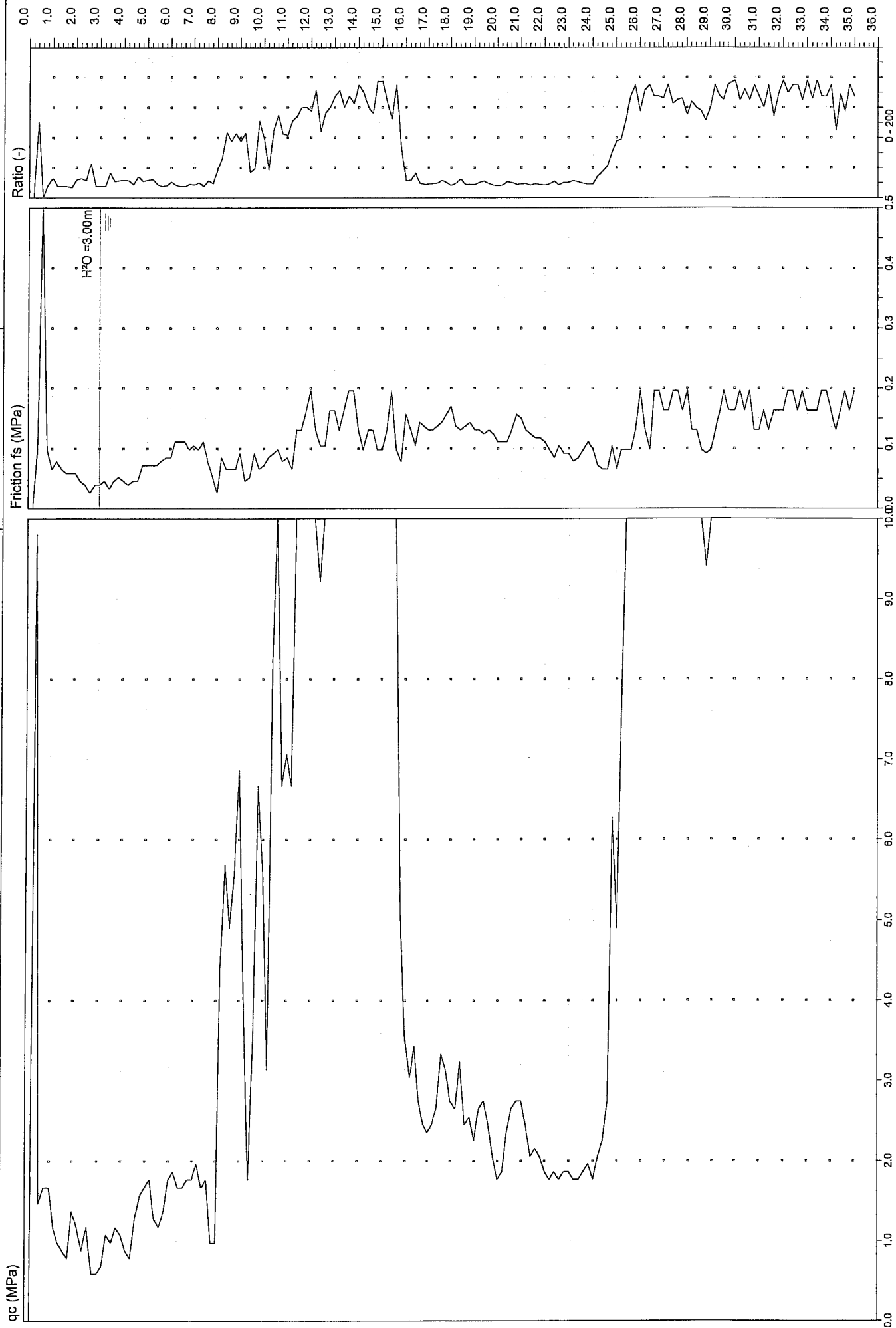


Friction fs (MPa)



Ratio (-)







# **LEGENDA VALUTAZIONI LITOLOGICHE CORRELAZIONI GENERALI**

**Valutazioni in base al rapporto:  $F = (q_c / f_s)$**

**Begemann 1965 - Raccomandazioni A.G.I. 1977**

Valide in via approssimata per terreni immersi in falda :

$F = q_c / f_s$	NATURA LITOLOGICA	PROPRIETA'
$F \leq 1470 \text{ kPa}$	TORBE ED ARGILLE ORGANICHE	COESIVE
$1470 \text{ kPa} < F \leq 2940 \text{ kPa}$	LIMI ED ARGILLE	COESIVE
$2940 \text{ kPa} < F \leq 5880 \text{ kPa}$	LIMI SABBIOSI E SABBIE LIMOSE	GRANULARI
$F > 5880 \text{ kPa}$	SABBIE E SABBIE CON GHIAIA	GRANULARI

**Vengono inoltre riportate le valutazioni stratigrafiche fornite da Schmertmann (1978),  
ricavabili in base ai valori di  $q_c$  e di  $FR = (f_s / q_c) \%$  :**

- AO = argilla organica e terreni misti
- Att = argilla (inorganica) molto tenera
- At = argilla (inorganica) tenera
- Am = argilla (inorganica) di media consistenza
- Ac = argilla (inorganica) consistente
- Acc = argilla (inorganica) molto consistente
- ASL = argilla sabbiosa e limosa
- SAL = sabbia e limo / sabbia e limo argilloso
- Ss = sabbia sciolta
- Sm = sabbia mediamente addensata
- Sd = sabbia densa o cementata
- SC = sabbia con molti fossili, calcareniti

Secondo Schmertmann il valore della resistenza laterale da usarsi, dovrebbe essere pari a:

- $1/3 \pm 1/2$  di quello misurato , per depositi sabbiosi
- quello misurato ( inalterato ) , per depositi coesivi.



# PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA

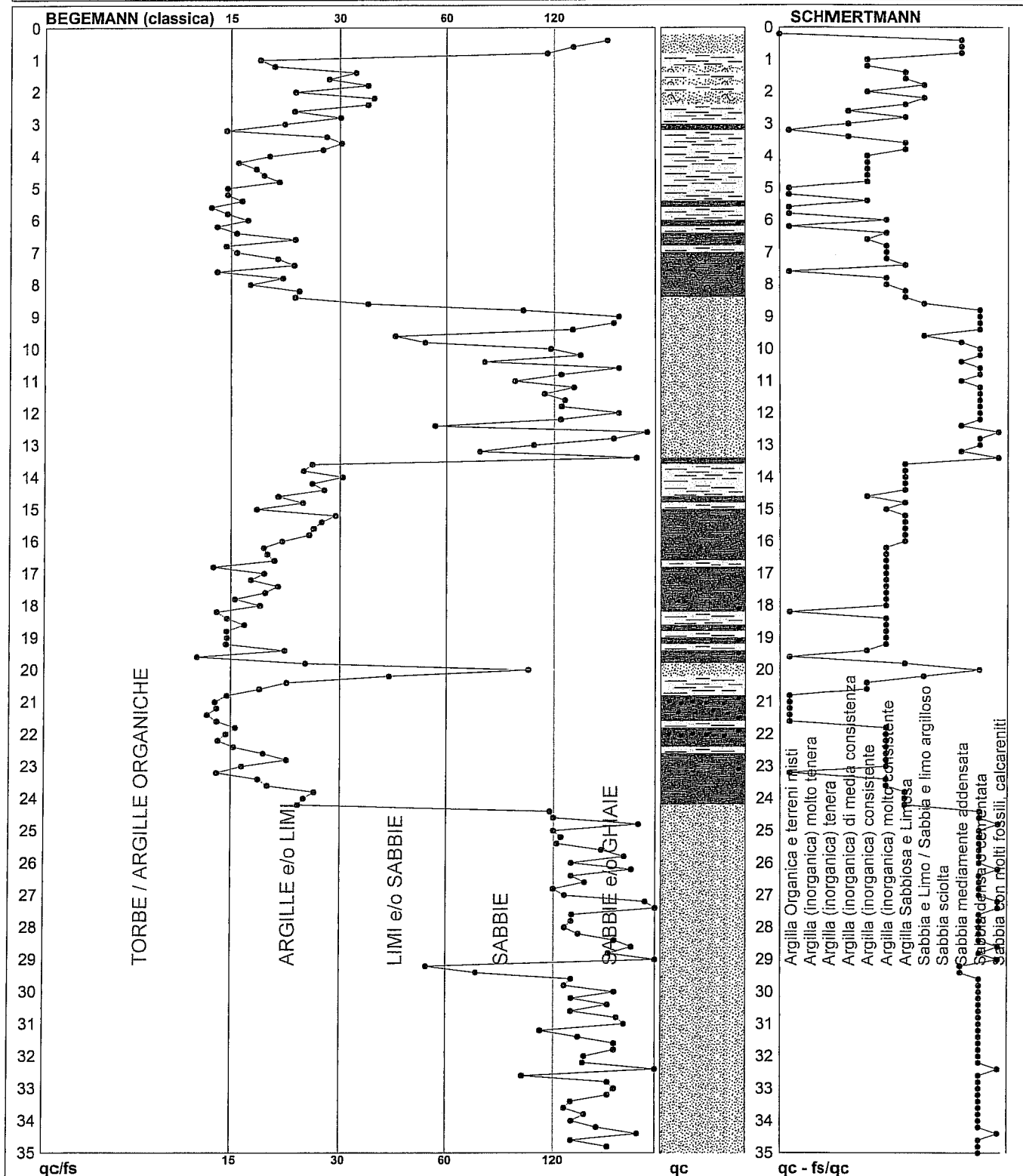
## DIAGRAMMI LITOLOGIA

**CPT****1**

riferimento

**046-2012**Committente: **BARALDINI QUIRINO S.P.A.**Cantiere: **MIRANDOLA Via Minelli**Località: **MIRANDOLA Via Minelli**U.M.: **MPa**Scala: **1:175**Pagina: **1**

Elaborato:

Data esec.: **26/06/2012**Falda: **-3.00 m 3.00**

Torbe / Argille org. :	18 punti, 10.34%	Argilla Organica e terreni misti:	15 punti, 8.62%	Argilla Sabbiosa e Limosa:	24 punti, 13.79%
Argille e/o Limi :	69 punti, 39.66%	Argilla (inorganica) media consist.:	3 punti, 1.72%	Sabbia e Limo / Sabbia e limo arg.:	5 punti, 2.87%
Limi e/o Sabbie :	10 punti, 5.75%	Argilla (inorganica) consistente:	14 punti, 8.05%	Sabbia mediamente addensata:	10 punti, 5.75%
Sabbie:	34 punti, 19.54%	Argilla (inorganica) molto consist.:	32 punti, 18.39%	Sabbia densa o cementata:	60 punti, 34.48%
Sabbie e/o Ghiaie :	43 punti, 24.71%			Sabbia con molti fossili, calcareniti:	10 punti, 5.75%

nota:

FON025

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA  
DIAGRAMMI LITOLOGIA

CPT

2

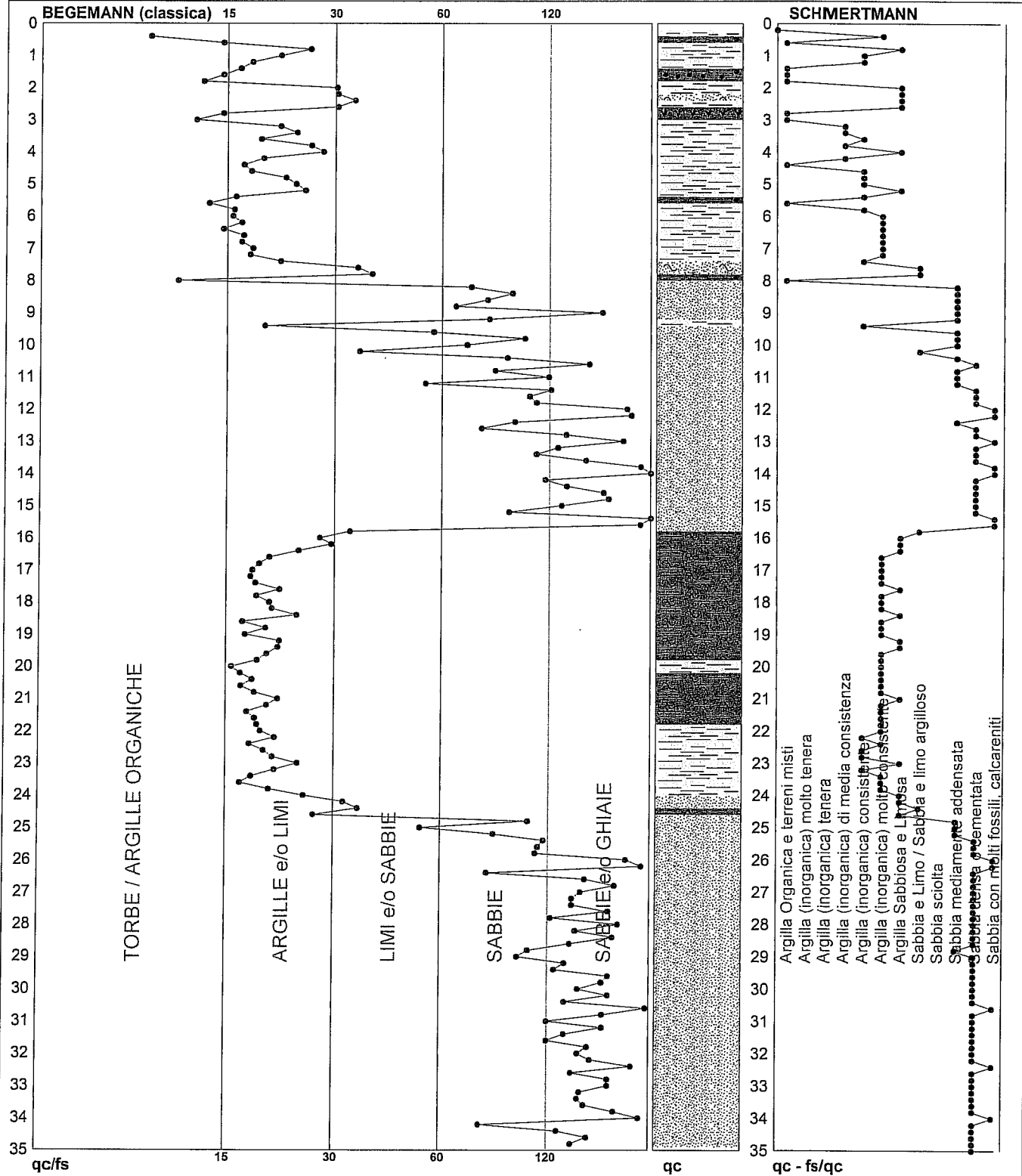
riferimento

046-2012

Committente: BARALDINI QUIRINO S.P.A.  
Cantiere: MIRANDOLA Via Minelli  
Località: MIRANDOLA Via Minelli

U.M.: MPa  
Scala: 1:175  
Pagina: 1  
Elaborato:

Data esec.: 26/06/2012  
Falda: -3.00 m 3.00

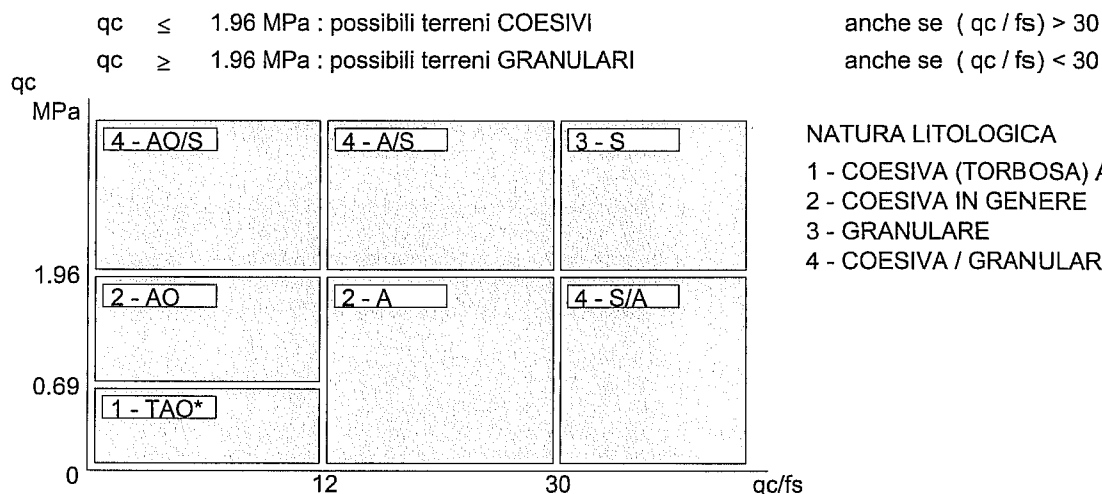


Torbe / Argille org. :	9 punti, 5.17%	Argilla Organica e terreni misti:	9 punti, 5.17%	Argilla Sabbiosa e Limosa:	19 punti, 10.92%
Argille e/o Limi :	71 punti, 40.80%	Argilla (inorganica) media consist.:	4 punti, 2.30%	Sabbia e Limo / Sabbia e limo arg.:	5 punti, 2.87%
Limi e/o Sabbie :	10 punti, 5.75%	Argilla (inorganica) consistente:	14 punti, 8.05%	Sabbia mediamente addensata:	18 punti, 10.34%
Sabbie:	38 punti, 21.84%	Argilla (inorganica) molto consist.:	35 punti, 20.11%	Sabbia densa o cementata:	57 punti, 32.76%
Sabbie e/o Ghiaie :	46 punti, 26.44%			Sabbia con molti fossili, calcareniti:	12 punti, 6.90%



# LEGENDA PARAMETRI GEOTECNICI SPECIFICHE TECNICHE

Le scelte litologiche vengono effettuate in base al rapporto  $q_c / f_s$  (Begemann 1965 - A.G.I. 1977) prevedendo altresì la possibilità di casi dubbi :



PARAMETRI GEOTECNICI ( validità orientativa ) - simboli - correlazioni - bibliografia

- $\gamma'$  = peso dell' unità di volume (efficace) del terreno [ correlazioni :  $\gamma' - q_c$  - natura ]  
( Terzaghi & Peck 1967 - Bowles 1982 )
- $\sigma'_{vo}$  = tensione verticale geostatica (efficace) del terreno ( valutata in base ai valori di  $\gamma'$  )
- $C_u$  = coesione non drenata (terreni coesivi ) [ correlazioni :  $C_u - q_c$  ]
- OCR = grado di sovra consolidazione (terreni coesivi ) [ correlazioni : OCR -  $C_u - \sigma'_{vo}$  ]  
( Ladd et al. 1972 / 1974 / 1977 - Lancellotta 1983 )
- $E_u$  = modulo di deformazione non drenato (terreni coesivi) [ correl. :  $E_u - C_u - OCR - I_p$   $I_p$ = ind.plast.]  
 $E_{u50} - E_{u25}$  corrispondono rispettivamente ad un grado di mobilitazione dello sforzo deviatorico pari al 50-25% (Duncan & Buchigani 1976 )
- $E'$  = modulo di deformazione drenato (terreni granulari) [ correlazioni :  $E' - q_c$  ]  
 $E'_{50} - E'_{25}$  corrispondono rispettivamente ad un grado di mobilitazione dello sforzo deviatorico pari al 50-25% (coeff. di sicurezza  $F = 2 - 4$  rispettivamente )  
Schmertmann 1970 / 1978 - Jamiolkowski ed altri 1983 )
- $M_o$  = modulo di deformazione edometrico (terreni coesivi e granulari) [ correl. :  $M_o - q_c$  - natura ]  
Sanglerat 1972 - Mitchell & Gardner 1975 - Ricceri et al. 1974 - Holden 1973 )
- $D_r$  = densità relativa (terreni granulari N. C. - normalmente consolidati)  
[ correlazioni :  $D_r - R_p - \sigma'_{vo}$  (Schmertmann 1976 ) ]
- $\phi'$  = angolo di attrito interno efficace (terreni granulari N.C. ) [ correl. :  $\phi' - D_r - q_c - \sigma'_{vo}$  ]  
  - $\phi'_{Ca} - Caquot$  (1948)
  - $\phi'_{Ko} - Koppejan$  (1948)
  - $\phi'_{DB} - De Beer$  (1965)
  - $\phi'_{Sc} - Schmertmann$  (1978)
  - $\phi'_{DM} - Durgunoglu \& Mitchell$  (1975) (sabbie N.C.)
  - $\phi'_{Me} - Meyerhof$  (1956 / 1976) (sabbie limose)
- F.L. = accelerazione al suolo che può causare liquefazione ( terreni granulari )  
(  $g$  = accelerazione gravità)(Seed & Idriss 1971 - Sirio 1976 ) [ correlazioni :  $(A_{max}/g) - D_r$  ]
- $V_s$  = velocità di propagazione delle onde sismiche ( Burrow e Stokoe 1983 )

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA  
PARAMETRI GEOTECNICI

CPT

riferimento

1

046-2012

Committente: BARALDINI QUIRINO S.P.A.

Cantiere: MIRANDOLA Via Minelli

Località: MIRANDOLA Via Minelli

U.M.:

MPa

Data esec.:

26/06/2012

Pagina:

1

Elaborato:

Falda: -3.00 m 3.00

NATURA COESIVA													NATURA GRANULARE												
Prof. m	qc U.M.	qc/fs	zone	$\gamma'$ t/m³	$\sigma'_{vo}$ kPa	Vs m/s	Cu kPa	OCR %	Eu50 U.M.	Eu25 U.M.	Mo U.M.	Dr %	$\phi_{Sc}$ (°)	$\phi_{Ca}$ (°)	$\phi_{Ko}$ (°)	$\phi_{DB}$ (°)	$\phi_{DM}$ (°)	$\phi_{Me}$ (°)	F.L.	E'50 U.M.	E'25 U.M.	Mo U.M.			
0.20	—	—	—	1.85	3.6	154	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
0.40	9.8	149.3	—	1.85	7.3	218	—	—	—	—	—	100	43	46	43	40	45	34	2.00	16.3	24.5	29.4			
0.60	3.9	121.2	—	1.85	10.9	180	—	—	—	—	—	94	43	39	36	34	43	30	2.00	6.5	9.8	11.8			
0.80	5.4	103.8	—	1.85	14.5	189	—	—	—	—	—	98	43	39	37	34	43	31	2.00	9.0	13.5	16.2			
1.00	1.1	18.3	—	1.85	18.1	161	52.6	23.8	8.9	13.4	4.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
1.20	1.2	20.0	—	1.85	21.8	162	56.0	20.5	9.5	14.3	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
1.40	1.3	32.5	—	1.85	25.4	162	59.3	18.1	10.1	15.1	4.6	35	35	29	26	25	33	26	—	2.1	3.2	3.8			
1.60	1.3	27.7	—	1.85	29.0	162	59.3	15.3	10.1	15.1	4.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
1.80	1.4	35.0	—	1.85	32.6	163	62.4	14.1	10.6	15.9	4.7	31	35	28	25	24	32	26	—	2.3	3.4	4.1			
2.00	1.2	22.6	—	1.85	36.3	162	56.0	10.8	9.5	14.3	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
2.20	1.2	36.4	—	1.85	39.9	162	56.0	9.6	9.6	14.4	4.4	21	34	27	23	22	30	26	—	2.0	2.9	3.5			
2.40	0.7	35.0	—	1.85	43.5	158	34.3	4.7	12.1	18.2	3.2	0	31	23	20	19	27	26	—	1.1	1.7	2.1			
2.60	0.9	22.5	—	1.85	47.1	160	44.1	5.8	12.6	18.9	3.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
2.80	0.8	29.6	—	1.85	50.8	159	39.2	4.5	14.1	21.2	3.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
3.00	0.7	21.2	—	0.84	52.4	158	34.3	3.7	14.8	22.2	3.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
3.20	0.6	15.0	—	0.46	53.3	158	29.4	3.0	3.0	4.4	0.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
3.40	0.9	27.3	—	0.88	55.0	160	44.1	4.8	15.3	22.9	3.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
3.60	1.4	29.8	—	0.94	56.9	163	62.4	7.0	14.2	21.4	4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
3.80	1.6	26.7	—	0.96	58.8	164	68.2	7.6	14.3	21.5	5.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
4.00	1.3	19.4	—	0.93	60.6	162	59.3	6.1	15.9	23.9	4.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
4.20	1.4	16.1	—	0.94	62.4	163	62.4	6.3	16.3	24.4	4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
4.40	1.2	17.9	—	0.92	64.2	162	56.0	5.3	17.6	26.3	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
4.60	1.5	18.8	—	0.95	66.1	164	65.3	6.2	17.3	26.0	4.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
4.80	1.5	20.5	—	0.95	68.0	164	65.3	6.0	18.0	27.0	4.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
5.00	1.1	15.1	—	0.91	69.7	161	52.6	4.4	19.5	29.2	4.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
5.20	1.1	15.1	—	0.91	71.5	161	52.6	4.3	20.0	30.0	4.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
5.40	1.2	16.4	—	0.92	73.3	162	56.0	4.5	20.5	30.7	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
5.60	1.0	13.7	—	0.90	75.1	160	49.0	3.7	21.2	31.8	3.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
5.80	1.4	15.1	—	0.94	76.9	163	62.4	4.8	21.3	32.0	4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
6.00	1.7	17.0	—	0.97	78.8	165	70.9	5.5	21.4	32.0	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
6.20	1.8	14.2	—	0.98	80.8	166	73.5	5.6	21.8	32.7	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
6.40	1.8	15.9	—	0.98	82.7	166	73.5	5.4	22.5	33.7	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
6.60	2.1	22.6	—	0.93	84.5	167	80.7	5.9	22.4	33.7	6.2	22	34	26	22	21	29	27	—	3.4	5.1	6.2			
6.80	1.6	15.0	—	0.96	86.4	164	68.2	4.7	24.0	36.0	5.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
7.00	1.8	15.9	—	0.98	88.3	166	73.5	5.0	24.4	36.6	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
7.20	2.3	20.4	—	0.94	90.1	169	85.1	5.8	24.0	36.1	6.8	24	34	26	23	21	29	28	—	3.8	5.6	6.8			
7.40	2.4	22.4	—	0.94	92.0	169	87.1	5.9	24.5	36.8	7.1	24	34	26	23	21	29	28	—	3.9	5.9	7.1			
7.60	1.8	14.2	—	0.98	93.9	166	73.5	4.6	26.1	39.2	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
7.80	2.1	21.0	—	0.93	95.7	167	80.7	5.1	26.4	39.5	6.2	19	34	25	22	21	28	27	—	3.4	5.1	6.2			
8.00	2.3	17.3	—	0.94	97.5	169	85.1	5.3	26.7	40.0	6.8	22	34	25	22	21	29	28	—	3.8	5.6	6.8			
8.20	3.9	23.1	—	1.00	99.5	180	130.7	8.8	23.6	35.4	11.8	40	36	28	25	23	32	30	—	6.5	9.8	11.8			
8.40	2.9	22.6	—	0.96	101.4	173	98.0	6.0	25.8	40.2	8.8	30	35	27	23	22	30	29	—	4.9	7.4	8.8			
8.60	3.4	35.0	—	0.89	103.1	176	—	—	—	—	—	35	35	27	24	23	31	29	—	5.7	8.6	10.3			
8.80	11.8	90.2	—	1.03	105.1	231	—	—	—	—	—	77	40	33	30	28	38	35	—	19.6	29.4	35.3			
9.00	15.7	160.0	—	1.09	107.3	256	—	—	—	—	—	86	42	35	32	30	39	36	—	26.1	39.2	47.0			
9.20	15.2	155.0	—	1.08	109.4	253	—	—	—	—	—	84	41	34	31	29	39	36	—	25.3	38.0	45.6			
9.40	10.3	120.7	—	1.01	111.4	221	—	—	—	—	—	71	40	32	29	27	37	34	—	17.2	25.7	30.9			
9.60	5.4	41.4	—	0.93	113.2	189	—	—	—	—	—	48	37	29	26	24	33	31	—	9.0	13.5	16.2			
9.80	4.5	49.5	—	0.91	115.0	183	—	—	—	—	—	41	36	28	25	23	32	31	—	7.5	11.3	13.5			
10.00	10.4	108.0	—	1.01	117.0	222	—	—	—	—	—	70	40	32	29	27	36	34	—	17.3	26.0	31.2			
10.20	10.8	126.4	—	1.02	118.9	224	—	—	—	—	—	71	40	32	29	27	36	34	—	18.0	27.0	32.3			
10.40	9.3	71.4	—	0.99	120.9	215	—	—	—	—	—	65	39	31	28	27	36	34	—	15.5	23.3	27.9			
10.60	15.7	160.0	—	1.09	123.0	256	—	—	—	—	—	83	41	34	31	29	38	36	—	26.1	39.2	47.0			
10.80	13.2	112.5	—	1.05	125.1	240	—	—	—	—	—	76	40	33	30	28	37	35	—	22.1	33.1	39.7			
11.00	9.0	86.0	—	0.99	127.0	213	—	—	—	—	—	63	39	31	28	26	35	33	—	15.0	22.5	27.0			
11.20	12.7	121.5	—	1.05	129.1	237	—	—	—	—	—	74	40	33	30	28	37	35	—	21.2	31.9	38.2			
11.40	10.0	102.0	—	1.00	131.0	219	—	—	—	—	—	66	39	31	28	27	35	34	—	16.7	25.0	30.0			
11.60	11.3	115.0	—	1.02	133.0	228	—	—	—	—	—	69	40	32	29	27	36	35	—	18.8	28.2	33.8			
11.80	14.7	112.8	—	1.08	135.1	250	—	—	—	—	—	78	41	33	30	28	37	36	—	24.5	36.8	44.1			
12.00	15.7																								

<b>PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA</b> <b>PARAMETRI GEOTECNICI</b>	<b>CPT</b>	<b>1</b>
	referimento	<b>046-2012</b>

Committente: <b>BARALDINI QUIRINO S.P.A.</b>	U.M.: <b>MPa</b>	Data esec.: <b>26/06/2012</b>
Cantiere: <b>MIRANDOLA Via Minelli</b>	Pagina: <b>2</b>	
Località: <b>MIRANDOLA Via Minelli</b>	Elaborato:	Falda: <b>-3.00 m 3.00</b>

							NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE											
Prof. m	qc U.M.	qc/fs	zone	$\gamma'$ t/m³	$\sigma'_{vo}$ kPa	Vs m/s	Cu kPa	OCR %	Eu50 U.M.	Eu25 U.M.	Mo U.M.	Dr %	$\phi_{Sc}$ (°)	$\phi_{Ca}$ (°)	$\phi_{Ko}$ (°)	$\phi_{DB}$ (°)	$\phi_{DM}$ (°)	$\phi_{Me}$ (°)	F.L.	E'50 U.M.	E'25 U.M.	Mo U.M.	
20.00	10.3	92.9		1.01	215.5	221	—	—	—	—	—	54	38	29	26	24	33	34	—	17.2	25.7	30.9	
20.20	5.2	39.8		0.92	217.3	188	—	—	—	—	—	31	35	26	22	21	29	31	—	8.7	13.0	15.6	
20.40	2.0	21.5		0.93	219.1	167	78.4	1.7	44.9	67.4	5.9	—	31	21	17	16	25	27	—	3.3	4.9	5.9	
20.60	1.7	18.3		0.97	221.0	165	70.9	1.5	41.3	62.0	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
20.80	1.4	15.1		0.94	222.9	163	62.4	1.3	36.9	55.3	4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
21.00	1.5	14.0		0.95	224.7	164	65.3	1.3	38.5	57.8	4.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
21.20	1.6	14.2		0.96	226.6	164	68.2	1.4	40.0	60.1	5.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
21.40	1.7	13.4		0.97	228.5	165	70.9	1.5	41.5	62.2	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
21.60	1.8	14.2		0.98	230.4	166	73.5	1.5	42.9	64.3	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
21.80	1.9	15.8		0.99	232.4	166	76.0	1.6	44.2	66.3	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
22.00	1.9	15.0		0.99	234.3	166	76.0	1.5	44.2	66.3	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
22.20	1.9	14.3		0.99	236.2	166	76.0	1.5	44.3	66.4	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
22.40	2.3	15.6		0.94	238.1	169	85.1	1.7	48.8	73.1	6.8	—	31	21	17	17	25	28	—	3.8	5.6	6.8	
22.60	2.0	18.7		0.93	239.9	167	78.4	1.6	45.6	68.4	5.9	—	31	20	17	16	25	27	—	3.3	4.9	5.9	
22.80	2.3	21.5		0.94	241.7	169	85.1	1.7	48.9	73.3	6.8	—	31	21	17	17	25	28	—	3.8	5.6	6.8	
23.00	2.3	16.4		0.94	243.6	169	85.1	1.7	48.9	73.4	6.8	—	31	21	17	16	25	28	—	3.8	5.6	6.8	
23.20	1.8	14.2		0.98	245.5	166	73.5	1.4	43.2	64.8	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
23.40	2.3	18.1		0.94	247.3	169	85.1	1.7	49.1	73.6	6.8	—	31	21	17	16	25	28	—	3.8	5.6	6.8	
23.60	2.3	19.2		0.94	249.1	169	85.1	1.6	49.1	73.7	6.8	—	31	21	17	16	25	28	—	3.8	5.6	6.8	
23.80	2.2	25.3		0.93	251.0	168	82.9	1.6	48.1	72.2	6.5	—	31	20	17	16	25	28	—	3.6	5.4	6.5	
24.00	3.7	23.8		0.99	252.9	178	124.1	2.6	65.1	97.7	11.2	16	33	23	20	19	26	30	—	6.2	9.3	11.2	
24.20	2.3	23.0		0.94	254.8	169	85.1	1.6	49.3	73.9	6.8	—	31	21	17	16	25	28	—	3.8	5.6	6.8	
24.40	13.7	105.3		1.06	256.8	244	—	—	—	—	—	60	38	30	26	25	33	36	—	22.9	34.3	41.2	
24.60	17.6	107.8		1.12	259.0	269	—	—	—	—	—	68	39	31	28	26	35	37	—	29.4	44.1	52.9	
24.80	23.5	180.5		1.15	261.3	308	—	—	—	—	—	78	41	32	29	27	36	39	—	39.2	58.8	70.6	
25.00	17.6	107.8		1.12	263.5	269	—	—	—	—	—	68	39	31	28	26	35	37	—	29.4	44.1	52.9	
25.20	22.1	112.5		1.15	265.7	298	—	—	—	—	—	76	40	32	29	27	36	39	—	36.8	55.1	66.2	
25.40	21.6	110.0		1.15	268.0	295	—	—	—	—	—	75	40	32	29	27	36	38	—	35.9	53.9	64.7	
25.60	23.5	143.7		1.15	270.2	308	—	—	—	—	—	77	41	32	29	27	36	39	—	39.2	58.8	70.6	
25.80	21.6	165.4		1.15	272.5	295	—	—	—	—	—	74	40	31	29	27	36	38	—	35.9	53.9	64.7	
26.00	19.6	119.8		1.15	274.7	282	—	—	—	—	—	71	40	31	28	26	35	38	—	32.7	49.0	58.8	
26.20	22.5	172.9		1.15	277.0	301	—	—	—	—	—	75	40	32	29	27	36	39	—	37.6	56.4	67.6	
26.40	19.6	119.8		1.15	279.3	282	—	—	—	—	—	70	40	31	28	26	35	38	—	32.7	49.0	58.8	
26.60	25.5	130.0		1.15	281.5	320	—	—	—	—	—	79	41	32	29	27	36	40	—	42.5	63.7	76.4	
26.80	17.6	107.8		1.12	283.7	269	—	—	—	—	—	66	39	30	27	26	34	37	—	29.4	44.1	52.9	
27.00	22.5	115.0		1.15	286.0	301	—	—	—	—	—	74	40	31	29	27	36	39	—	37.6	56.4	67.6	
27.20	24.5	188.0		1.15	288.2	314	—	—	—	—	—	77	41	32	29	27	36	39	—	40.8	61.3	73.5	
27.40	19.6	200.0		1.15	290.5	282	—	—	—	—	—	69	40	31	28	26	35	38	—	32.7	49.0	58.8	
27.60	15.7	120.3		1.09	292.6	256	—	—	—	—	—	61	39	30	27	25	33	36	—	26.1	39.2	47.0	
27.80	19.6	119.8		1.15	294.9	282	—	—	—	—	—	69	40	31	28	26	35	38	—	32.7	49.0	58.8	
28.00	22.5	115.0		1.15	297.1	301	—	—	—	—	—	74	40	31	28	27	35	39	—	37.6	56.4	67.6	
28.20	24.5	125.0		1.15	299.4	314	—	—	—	—	—	76	40	32	29	27	36	39	—	40.8	61.3	73.5	
28.40	25.5	155.7		1.15	301.6	320	—	—	—	—	—	77	41	32	29	27	36	40	—	42.5	63.7	76.4	
28.60	22.5	172.9		1.15	303.9	301	—	—	—	—	—	73	40	31	28	26	35	38	—	37.6	56.4	67.6	
28.80	19.6	150.4		1.15	306.1	282	—	—	—	—	—	68	39	30	27	26	34	38	—	32.7	49.0	58.8	
29.00	17.6	225.0		1.12	308.3	269	—	—	—	—	—	64	39	30	27	25	34	37	—	29.4	44.1	52.9	
29.20	4.9	50.0		0.92	310.1	186	—	—	—	—	—	20	34	23	20	19	27	31	—	8.2	12.3	14.7	
29.40	8.8	67.7		0.98	312.0	212	—	—	—	—	—	40	36	26	23	22	30	33	—	14.7	22.1	26.5	
29.60	19.6	119.8		1.15	314.3	282	—	—	—	—	—	67	39	30	27	26	34	38	—	32.7	49.0	58.8	
29.80	22.5	115.0		1.15	316.5	301	—	—	—	—	—	72	40	31	28	26	35	39	—	37.6	56.4	67.6	
30.00	25.5	155.7		1.15	318.8	320	—	—	—	—	—	76	40	32	29	27	36	40	—	42.5	63.7	76.4	
30.20	23.5	120.0		1.15	321.1	308	—	—	—	—	—	73	40	31	28	26	35	39	—	39.2	58.8	70.6	
30.40	24.5	149.7		1.15	323.3	314	—	—	—	—	—	74	40	31	28	27	35	39	—	40.8	61.3	73.5	
30.60	19.6	119.8		1.15	325.6	282	—	—	—	—	—	67	39	30	27	25	34	38	—	32.7	49.0	58.8	
30.80	20.6	157.9		1.15	327.8	288	—	—	—	—	—	68	39	30	27	26	34	38	—	34.3	51.5	61.7	
31.00	21.6	165.4		1.15	330.1	295	—	—	—	—	—	69	40	31	28	26	35	38	—	35.9	53.9	64.7	
31.20	19.6	100.0		1.15	332.3	282	—	—	—	—	—	66	39	30	27	25	34	38	—	32.7	49.0	58.8	
31.40	24.5	125.0		1.15	334.6	314	—	—	—	—	—	74	40	31	28	26	35	39	—	40.8	61.3	73.5	
31.60	25.5	155.7		1.15	336.8	320	—	—	—	—	—	75	40	31	28	26	35	40	—	42.5	63.7	76.4	
31.80	25.5	155.7		1.15	339.1	320	—	—	—	—	—	75	40	31	28	26	35	40	—	42.5	63.7	7	

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA						CPT		2
PARAMETRI GEOTECNICI						riferimento		046-2012
Committente: BARALDINI QUIRINO S.P.A.						U.M.:	MPa	Data esec.: 26/06/2012
Cantiere: MIRANDOLA Via Minelli						Pagina:	1	
Località: MIRANDOLA Via Minelli						Elaborato:		Falda: -3.00 m 3.00

NATURA COESIVA												NATURA GRANULARE											
Prof. m	qc U.M.	qc/fs	zone	$\gamma'$ t/m³	$\sigma'_{vo}$ kPa	Vs m/s	Cu kPa	OCR %	Eu50 U.M.	Eu25 U.M.	Mo U.M.	Dr %	$\sigma_{Sc}$ (°)	$\sigma_{Ca}$ (°)	$\sigma_{Ko}$ (°)	$\sigma_{DB}$ (°)	$\sigma_{DM}$ (°)	$\sigma_{Me}$ (°)	F.L.	E'50 U.M.	E'25 U.M.	Mo U.M.	
0.20	—	—		1.85	3.6	154	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
0.40	9.8	9.7		1.85	7.3	218	326.7	99.9	55.5	83.3	29.4	100	43	46	43	40	45	34	—	16.3	—	29.4	
0.60	1.5	15.0		1.85	10.9	164	65.3	59.0	11.1	16.7	4.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
0.80	1.7	25.4		1.85	14.5	165	70.9	45.6	12.1	18.1	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1.00	1.7	21.3		1.85	18.1	165	70.9	34.5	12.1	18.1	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1.20	1.2	17.9		1.85	21.8	162	56.0	20.5	9.5	14.3	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1.40	1.0	16.7		1.85	25.4	160	49.0	14.3	8.3	12.5	3.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1.60	0.9	15.0		1.85	29.0	160	44.1	10.6	7.5	11.2	3.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1.80	0.8	13.3		1.85	32.6	159	39.2	7.9	7.9	11.8	3.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2.00	1.4	29.8		1.85	36.3	163	62.4	12.4	10.6	15.9	4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2.20	1.2	30.0		1.85	39.9	162	56.0	9.6	9.6	14.4	4.4	21	34	27	23	22	30	26	—	2.0	2.9	3.5	
2.40	0.9	33.3		1.85	43.5	160	44.1	6.4	11.3	16.9	3.7	9	32	25	21	20	28	26	—	1.5	2.2	2.6	
2.60	1.2	30.0		1.85	47.1	162	56.0	7.8	11.4	17.1	4.4	17	33	26	23	21	29	26	—	2.0	2.9	3.5	
2.80	0.6	15.0		1.85	50.8	158	29.4	3.2	2.8	4.2	0.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3.00	0.6	12.8		0.46	51.7	158	29.4	3.1	2.9	4.3	0.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3.20	0.7	21.2		0.84	53.3	158	34.3	3.6	15.1	22.6	3.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3.40	1.1	23.4		0.91	55.1	161	52.6	5.9	14.6	22.0	4.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3.60	1.0	18.9		0.90	56.9	160	49.0	5.2	15.6	23.4	3.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3.80	1.2	25.5		0.92	58.7	162	56.0	5.9	15.6	23.4	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4.00	1.1	27.5		0.91	60.4	161	52.6	5.3	16.5	24.8	4.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4.20	0.9	19.1		0.88	62.2	160	44.1	4.1	17.4	26.0	3.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4.40	0.8	17.0		0.86	63.9	159	39.2	3.4	18.0	26.9	3.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4.60	1.3	17.8		0.93	65.7	162	59.3	5.5	17.8	26.7	4.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
4.80	1.6	21.9		0.96	67.6	164	68.2	6.3	17.6	26.3	5.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5.00	1.7	23.3		0.97	69.5	165	70.9	6.4	18.0	26.9	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5.20	1.8	24.7		0.98	71.4	166	73.5	6.5	18.4	27.6	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5.40	1.3	16.3		0.93	73.2	162	59.3	4.8	20.3	30.5	4.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5.60	1.2	13.8		0.92	75.0	162	56.0	4.4	20.9	31.4	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5.80	1.4	16.1		0.94	76.9	163	62.4	4.8	21.3	32.0	4.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6.00	1.8	15.9		0.98	78.8	166	73.5	5.8	21.1	31.6	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6.20	1.9	16.8		0.99	80.7	166	76.0	5.8	21.6	32.3	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6.40	1.7	15.0		0.97	82.6	165	70.9	5.2	22.7	34.0	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6.60	1.7	17.0		0.97	84.5	165	70.9	5.0	23.3	34.9	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6.80	1.8	16.8		0.98	86.4	166	73.5	5.1	23.8	35.6	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7.00	1.8	18.0		0.98	88.4	166	73.5	5.0	24.4	36.6	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7.20	2.0	17.7		0.93	90.2	167	78.4	5.3	24.7	37.0	5.9	19	33	25	22	21	28	27	—	3.3	4.9	5.9	
7.40	1.7	21.3		0.97	92.1	165	70.9	4.5	25.7	38.5	5.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7.60	1.8	34.0		0.91	93.9	166	73.5	4.6	26.1	39.2	5.5	14	33	24	21	20	28	27	—	2.9	4.4	5.3	
7.80	1.0	37.0		0.86	95.6	160	49.0	2.7	25.2	37.8	3.9	—	—	31	21	18	17	25	26	—	1.6	2.5	2.9
8.00	1.0	11.5		0.90	97.3	160	49.0	2.7	25.4	38.1	3.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
8.20	4.4	67.2		0.91	99.1	183	—	—	—	—	—	44	37	29	26	24	32	31	—	7.4	11.0	13.2	
8.40	5.7	86.6		0.93	100.9	191	—	—	—	—	—	53	38	30	27	25	34	31	—	9.5	14.2	17.1	
8.60	4.9	74.6		0.92	102.7	186	—	—	—	—	—	47	37	29	26	24	33	31	—	8.2	12.3	14.7	
8.80	5.6	61.3		0.93	104.5	190	—	—	—	—	—	51	37	30	26	25	33	31	—	9.3	14.0	16.8	
9.00	6.9	148.9		0.95	106.4	199	—	—	—	—	—	58	38	30	27	26	35	32	—	11.4	17.2	20.6	
9.20	3.9	75.5		0.90	108.2	180	—	—	—	—	—	38	36	28	24	23	31	30	—	6.5	9.8	11.8	
9.40	1.8	19.4		0.98	110.1	166	73.5	3.8	31.0	46.5	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
9.60	3.5	53.7		0.89	111.8	177	—	—	—	—	—	34	35	27	24	22	31	30	—	5.9	8.8	10.6	
9.80	6.7	93.2		0.95	113.7	198	—	—	—	—	—	55	38	30	27	25	34	32	—	11.1	16.7	20.0	
10.00	5.6	65.5		0.93	115.5	190	—	—	—	—	—	49	37	29	26	24	33	31	—	9.3	14.0	16.8	
10.20	3.1	34.4		0.88	117.2	174	—	—	—	—	—	28	35	26	23	22	30	29	—	5.2	7.8	9.4	
10.40	8.2	84.0		0.97	119.1	208	—	—	—	—	—	61	39	31	28	26	35	33	—	13.7	20.6	24.7	
10.60	10.8	137.5		1.02	121.1	224	—	—	—	—	—	70	40	32	29	27	36	34	—	18.0	27.0	32.3	
10.80	6.7	78.2		0.95	123.0	198	—	—	—	—	—	53	38	30	27	25	34	32	—	11.1	16.7	20.0	
11.00	7.1	107.5		0.95	124.9	200	—	—	—	—	—	55	38	30	27	25	34	32	—	11.8	17.6	21.2	
11.20	6.7	51.1		0.95	126.7	198	—	—	—	—	—	52	38	29	26	25	33	32	—	11.1	16.7	20.0	
11.40	14.2	109.0		1.07	128.8	247	—	—	—	—	—	78	41	33	30	28	38	36	—	23.7	35.5	42.6	
11.60	15.7	95.8		1.09	130.9	256	—	—	—	—	—	81	41	34	31	29	38	36	—	26.1	39.2	47.0	
11.80	19.6	100.0		1.15	133.2	282	—	—	—	—	—	88	42	35	32	30	39	38	—	32.7	49.0	58.8	
12.00	22.5	172.9		1.15	135.5	301	—	—	—	—	—	93	42	35	32	30	39	39	—				



<b>PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA</b>  <b>PARAMETRI GEOTECNICI</b>	<b>CPT</b>	<b>2</b>
	riferimento	<b>046-2012</b>

Committente: <b>BARALDINI QUIRINO S.P.A.</b>	U.M.: <b>MPa</b>	Data esec.: <b>26/06/2012</b>
Cantiere: <b>MIRANDOLA Via Minelli</b>	Pagina: <b>2</b>	
Località: <b>MIRANDOLA Via Minelli</b>	Elaborato:	Falda: <b>-3.00 m 3.00</b>

							NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE										
Prof. m	qc U.M.	qc/fs	zone	$\gamma'$ t/m³	$\sigma'_{vo}$ kPa	Vs m/s	Cu	OCR	Eu50	Eu25	Mo	Dr	$\sigma_{Sc}$	$\sigma_{Ca}$	$\sigma_{Ko}$	$\sigma_{DB}$	$\sigma_{DM}$	$\sigma_{Me}$	F.L.	E'50 U.M.	E'25 U.M.	Mo U.M.
20.00	1.8	15.9		0.98	215.4	166	73.5	1.6	42.5	63.7	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20.20	1.9	16.8		0.99	217.4	166	76.0	1.7	43.7	65.6	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20.40	2.4	18.0		0.94	219.2	169	87.1	2.0	48.9	73.3	7.1	3	32	22	18	17	25	28	—	3.9	5.9	7.1
20.60	2.6	16.9		0.95	221.1	171	92.8	2.1	51.4	77.1	7.9	7	32	22	19	18	25	28	—	4.4	6.6	7.9
20.80	2.7	18.3		0.96	223.0	172	94.6	2.2	52.2	78.3	8.2	8	32	22	19	18	25	28	—	4.6	6.9	8.2
21.00	2.7	21.1		0.96	224.8	172	94.6	2.1	52.3	78.5	8.2	8	32	22	19	18	25	28	—	4.6	6.9	8.2
21.20	2.5	19.7		0.94	226.7	170	89.1	2.0	50.1	75.2	7.4	4	32	22	18	17	25	28	—	4.1	6.1	7.4
21.40	2.1	17.5		0.93	228.5	167	80.7	1.7	46.4	69.5	6.2	—	31	21	17	16	25	27	—	3.4	5.1	6.2
21.60	2.2	18.3		0.93	230.3	168	82.9	1.8	47.5	71.2	6.5	—	31	21	17	17	25	28	—	3.6	5.4	6.5
21.80	2.1	18.6		0.93	232.2	167	80.7	1.7	46.5	69.7	6.2	—	31	21	17	16	25	27	—	3.4	5.1	6.2
22.00	1.9	19.0		0.99	234.1	166	76.0	1.5	44.2	66.3	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22.20	1.8	20.7		0.98	236.0	166	73.5	1.5	43.0	64.5	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22.40	1.9	17.8		0.99	238.0	166	76.0	1.5	44.3	66.5	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22.60	1.8	19.4		0.98	239.9	166	73.5	1.4	43.1	64.6	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22.80	1.9	20.4		0.99	241.8	166	76.0	1.5	44.4	66.6	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23.00	1.9	23.8		0.99	243.8	166	76.0	1.5	44.4	66.7	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23.20	1.8	20.7		0.98	245.7	166	73.5	1.4	43.2	64.8	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23.40	1.8	18.0		0.98	247.6	166	73.5	1.4	43.2	64.8	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23.60	1.9	16.8		0.99	249.5	166	76.0	1.4	44.6	66.9	5.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23.80	2.0	20.0		0.93	251.4	167	78.4	1.5	45.8	68.8	5.9	—	31	20	16	16	25	27	—	3.3	4.9	5.9
24.00	1.8	24.7		0.98	253.3	166	73.5	1.3	43.3	65.0	5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
24.20	2.1	31.3		0.85	255.0	167	—	—	—	—	—	—	31	20	17	16	25	27	—	3.4	5.1	6.2
24.40	2.3	34.3		0.86	256.6	169	—	—	—	—	—	—	31	21	17	16	25	28	—	3.8	5.6	6.8
24.60	2.7	26.2		0.96	258.5	172	94.6	1.8	54.0	81.0	8.2	5	32	22	18	17	25	28	—	4.6	6.9	8.2
24.80	6.3	95.5		0.94	260.4	195	—	—	—	—	—	33	35	26	22	21	29	32	—	10.5	15.7	18.8
25.00	4.9	50.0		0.92	262.2	186	—	—	—	—	—	24	34	24	21	20	28	31	—	8.2	12.3	14.7
25.20	7.6	78.0		0.96	264.0	204	—	—	—	—	—	39	36	26	23	22	30	33	—	12.7	19.1	22.9
25.40	10.3	105.0		1.01	266.0	221	—	—	—	—	—	49	37	28	25	23	32	34	—	17.2	25.7	30.9
25.60	13.2	101.5		1.05	268.1	240	—	—	—	—	—	58	38	29	26	24	33	35	—	22.1	33.1	39.7
25.80	19.6	100.0		1.15	270.3	282	—	—	—	—	—	71	40	31	28	26	35	38	—	32.7	49.0	58.8
26.00	22.5	172.9		1.15	272.6	301	—	—	—	—	—	76	40	32	29	27	36	39	—	37.6	56.4	67.6
26.20	18.6	190.0		1.14	274.8	276	—	—	—	—	—	69	40	31	28	26	35	37	—	31.0	46.6	55.9
26.40	14.7	75.0		1.08	276.9	250	—	—	—	—	—	61	39	30	26	25	33	36	—	24.5	36.8	44.1
26.60	26.5	135.0		1.15	279.2	327	—	—	—	—	—	81	41	32	29	28	37	40	—	44.1	66.2	79.4
26.80	26.5	161.7		1.15	281.4	327	—	—	—	—	—	80	41	32	29	28	37	40	—	44.1	66.2	79.4
27.00	21.6	131.7		1.15	283.7	295	—	—	—	—	—	73	40	31	28	27	35	38	—	35.9	53.9	64.7
27.20	24.5	125.0		1.15	285.9	314	—	—	—	—	—	77	41	32	29	27	36	39	—	40.8	61.3	73.5
27.40	24.5	125.0		1.15	288.2	314	—	—	—	—	—	77	41	32	29	27	36	39	—	40.8	61.3	73.5
27.60	25.5	155.7		1.15	290.4	320	—	—	—	—	—	78	41	32	29	27	36	40	—	42.5	63.7	76.4
27.80	21.6	110.0		1.15	292.7	295	—	—	—	—	—	72	40	31	28	26	35	38	—	35.9	53.9	64.7
28.00	21.6	165.4		1.15	295.0	295	—	—	—	—	—	72	40	31	28	26	35	38	—	35.9	53.9	64.7
28.20	16.7	127.8		1.11	297.1	263	—	—	—	—	—	63	39	30	27	25	34	37	—	27.8	41.7	50.0
28.40	15.7	160.0		1.09	299.3	256	—	—	—	—	—	61	39	29	26	25	33	36	—	26.1	39.2	47.0
28.60	11.3	123.7		1.02	301.3	228	—	—	—	—	—	49	37	28	25	23	31	35	—	18.8	28.2	33.8
28.80	9.4	96.0		0.99	303.2	215	—	—	—	—	—	43	36	27	24	22	30	34	—	15.7	23.5	28.2
29.00	11.8	90.2		1.03	305.2	231	—	—	—	—	—	51	37	28	25	23	32	35	—	19.6	29.4	35.3
29.20	19.6	119.8		1.15	307.5	282	—	—	—	—	—	68	39	30	27	26	34	38	—	32.7	49.0	58.8
29.40	22.1	112.5		1.15	309.7	298	—	—	—	—	—	72	40	31	28	26	35	39	—	36.8	55.1	66.2
29.60	25.5	155.7		1.15	312.0	320	—	—	—	—	—	77	40	32	29	27	36	40	—	42.5	63.7	76.4
29.80	24.5	149.7		1.15	314.2	314	—	—	—	—	—	75	40	31	28	27	36	39	—	40.8	61.3	73.5
30.00	25.5	130.0		1.15	316.5	320	—	—	—	—	—	76	40	32	29	27	36	40	—	42.5	63.7	76.4
30.20	25.5	155.7		1.15	318.7	320	—	—	—	—	—	76	40	32	29	27	36	40	—	42.5	63.7	76.4
30.40	23.5	120.0		1.15	321.0	308	—	—	—	—	—	73	40	31	28	26	35	39	—	39.2	58.8	70.6
30.60	25.5	195.5		1.15	323.3	320	—	—	—	—	—	76	40	31	29	27	36	40	—	42.5	63.7	76.4
30.80	19.6	150.4		1.15	325.5	282	—	—	—	—	—	67	39	30	27	25	34	38	—	32.7	49.0	58.8
31.00	17.6	107.8		1.12	327.7	269	—	—	—	—	—	63	39	30	27	25	34	37	—	29.4	44.1	52.9
31.20	19.6	150.4		1.15	330.0	282	—	—	—	—	—	66	39	30	27	25	34	38	—	32.7	49.0	58.8
31.40	19.6	119.8		1.15	332.2	282	—	—	—	—	—	66	39	30	27	25	34	38	—	32.7	49.0	58.8
31.60	17.6	107.8		1.12	334.4	269	—	—	—	—	—	62	39	29	26	25	33	37	—	29.4	44.1	52.9
31.80	22.5	137.7		1.15	336.7	301	—	—	—	—	—	70	40	31	28	26	35	39	—	37.6	56.4	67.6
32.00	25.5	130.0		1.15	338.9	320	—	—	—	—	—	75	40	31</								



## LEGENDA VALORI DI RESISTENZA FATTORI DI CONVERSIONE

**Strumento utilizzato:**

**TG63-200 - Pagani - Piacenza**

Caratteristiche:

- punta conica meccanica  $\varnothing 35.7$  mm, area punta  $A_p = 10 \text{ cm}^2$
- punta conica meccanica angolo di apertura:  $\alpha = 60^\circ$
- manicotto laterale di attrito tipo 'Begemann' ( $\varnothing = 35.7$  mm -  $h = 133$  mm -  $A_m = 150 \text{ cm}^2$ )
- velocità di avanzamento costante  $V = 2 \text{ cm/sec}$  ( $\pm 0,5 \text{ cm / sec}$ )
- spinta max nominale dello strumento  $S_{max}$  variabile a seconda del tipo
- costante di trasformazione  $CT = SPINTA \text{ (Kg)} / LETTURA \text{ DI CAMPAGNA}$   
(dato tecnico legato alle caratteristiche del penetrometro utilizzato, fornito dal costruttore)

fase 1 - resistenza alla punta:  $q_c \text{ (MPa)} = (L_1) \times CT / 10$

fase 2 - resistenza laterale locale:  $f_s \text{ (kPa)} = [(L_2) - (L_1)] \times CT / 150$

fase 3 - resistenza totale:  $R_t \text{ (kPa)} = (L_t) \times CT$

- Prima lettura = lettura di campagna durante l' infissione della sola punta (fase 1)
- Seconda lettura = lettura di campagna relativa all'infissione di punta e manicotto (fase 2)
- Terza lettura = lettura di campagna relativa all'infissione delle aste esterne (fase 3)

N.B. : la spinta  $S \text{ (Kg)}$ , corrispondente a ciascuna fase, si ottiene moltiplicando la corrispondente lettura di campagna  $L$  per la costante di trasformazione  $CT$ .

N.B. : causa la distanza intercorrente (20 cm circa) fra il centro del manicotto laterale e la punta conica del penetrometro, la resistenza laterale locale  $f_s$  viene computata 20 cm sopra la punta.

### CONVERSIONI

1 kN (kiloNewton) = 1000 N  $\approx 100 \text{ kg} = 0,1 \text{ t}$

1 MN (megaNewton) = 1.000 kN = 1.000.000 N  $\approx 100 \text{ t}$

1 kPa (kiloPascal) = 1 kN/m<sup>2</sup> = 0,001 MN/m<sup>2</sup> = 0,001 MPa  $\approx 0,1 \text{ t/m}^2 = 0,01 \text{ kg/cm}^2$

1 MPa (megaPascal) = 1 MN/m<sup>2</sup> = 1.000 kN/m<sup>2</sup> = 1000 kPa  $\approx 100 \text{ t/m}^2 = 10 \text{ kg/cm}^2$

1 kg/cm<sup>2</sup> = 10 t/m<sup>2</sup>  $\approx 100 \text{ kN/m}^2 = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MN/m}^2 = 0,1 \text{ MPa}$

1 t = 1000 kg  $\approx 10 \text{ kN}$

# PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA

## LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI

**CPT**
**1**

riferimento

**046-2012**

 Committente: **BARALDINI QUIRINO S.P.A.**

 Cantiere: **MIRANDOLA Via Minelli**

 Località: **MIRANDOLA Via Minelli**

 U.M.: **MPa**

 Data esec.: **26/06/2012**

 Pagina: **1**

Elaborato:

 Falda: **-3.00 m 3.00**

H	L1	L2	Lt	qc	fs	H	L1	L2	Lt	qc	fs	H	L1	L2	Lt	qc	fs
m	-	-	-	MPa	kPa	m	-	-	-	MPa	kPa	m	-	-	-	MPa	kPa
0.20	0.0	0.0		0.0	100.00	17.20	29.0	49.0		2.8	167.00	34.20	280.0	315.0		27.4	200.00
0.40	100.0	115.0		9.8	67.00	17.40	30.0	55.0		2.9	147.00	34.40	300.0	330.0		29.4	167.00
0.60	40.0	50.0		3.9	33.00	17.60	24.0	46.0		2.4	127.00	34.60	240.0	265.0		23.5	200.00
0.80	55.0	60.0		5.4	53.00	17.80	21.0	40.0		2.1	133.00	34.80	250.0	280.0		24.5	167.00
1.00	11.0	19.0		1.1	60.00	18.00	22.0	42.0		2.2	120.00	35.00	250.0	275.0		24.5	
1.20	12.0	21.0		1.2	60.00	18.20	17.0	35.0		1.7	120.00						
1.40	13.0	22.0		1.3	40.00	18.40	17.0	35.0		1.7	113.00						
1.60	13.0	19.0		1.3	47.00	18.60	20.0	37.0		2.0	120.00						
1.80	14.0	21.0		1.4	40.00	18.80	18.0	36.0		1.8	120.00						
2.00	12.0	18.0		1.2	53.00	19.00	17.0	35.0		1.7	113.00						
2.20	12.0	20.0		1.2	33.00	19.20	16.0	33.0		1.6	107.00						
2.40	7.0	12.0		0.7	20.00	19.40	17.0	33.0		1.7	80.00						
2.60	9.0	12.0		0.9	40.00	19.60	16.0	28.0		1.6	127.00						
2.80	8.0	14.0		0.8	27.00	19.80	24.0	43.0		2.4	100.00						
3.00	7.0	11.0		0.7	33.00	20.00	105.0	120.0		10.3	113.00						
3.20	6.0	11.0		0.6	40.00	20.20	53.0	70.0		5.2	133.00						
3.40	9.0	15.0		0.9	33.00	20.40	20.0	40.0		2.0	93.00						
3.60	14.0	19.0		1.4	47.00	20.60	17.0	31.0		1.7	93.00						
3.80	16.0	23.0		1.6	60.00	20.80	14.0	28.0		1.4	93.00						
4.00	13.0	22.0		1.3	67.00	21.00	15.0	29.0		1.5	107.00						
4.20	14.0	24.0		1.4	87.00	21.20	16.0	32.0		1.6	113.00						
4.40	12.0	25.0		1.2	67.00	21.40	17.0	34.0		1.7	127.00						
4.60	15.0	25.0		1.5	80.00	21.60	18.0	37.0		1.8	127.00						
4.80	15.0	27.0		1.5	73.00	21.80	19.0	38.0		1.9	120.00						
5.00	11.0	22.0		1.1	73.00	22.00	19.0	37.0		1.9	127.00						
5.20	11.0	22.0		1.1	73.00	22.20	19.0	38.0		1.9	133.00						
5.40	12.0	23.0		1.2	73.00	22.40	23.0	43.0		2.3	147.00						
5.60	10.0	21.0		1.0	73.00	22.60	20.0	42.0		2.0	107.00						
5.80	14.0	25.0		1.4	93.00	22.80	23.0	39.0		2.3	107.00						
6.00	17.0	31.0		1.7	100.00	23.00	23.0	39.0		2.3	140.00						
6.20	18.0	33.0		1.8	127.00	23.20	18.0	39.0		1.8	127.00						
6.40	18.0	37.0		1.8	113.00	23.40	23.0	42.0		2.3	127.00						
6.60	21.0	38.0		2.1	93.00	23.60	23.0	42.0		2.3	120.00						
6.80	16.0	30.0		1.6	107.00	23.80	22.0	40.0		2.2	87.00						
7.00	18.0	34.0		1.8	113.00	24.00	38.0	51.0		3.7	160.00						
7.20	23.0	40.0		2.3	113.00	24.20	23.0	47.0		2.3	100.00						
7.40	24.0	41.0		2.4	107.00	24.40	140.0	155.0		13.7	133.00						
7.60	18.0	34.0		1.8	127.00	24.60	180.0	200.0		17.6	167.00						
7.80	21.0	40.0		2.1	100.00	24.80	240.0	265.0		23.5	133.00						
8.00	23.0	38.0		2.3	133.00	25.00	180.0	200.0		17.6	167.00						
8.20	40.0	60.0		3.9	173.00	25.20	225.0	250.0		22.1	200.00						
8.40	30.0	56.0		2.9	133.00	25.40	220.0	250.0		21.6	200.00						
8.60	35.0	55.0		3.4	100.00	25.60	240.0	270.0		23.5	167.00						
8.80	120.0	135.0		11.8	133.00	25.80	220.0	245.0		21.6	133.00						
9.00	160.0	180.0		15.7	100.00	26.00	200.0	220.0		19.6	167.00						
9.20	155.0	170.0		15.2	100.00	26.20	230.0	255.0		22.5	133.00						
9.40	105.0	120.0		10.3	87.00	26.40	200.0	220.0		19.6	167.00						
9.60	55.0	68.0		5.4	133.00	26.60	260.0	285.0		25.5	200.00						
9.80	46.0	66.0		4.5	93.00	26.80	180.0	210.0		17.6	167.00						
10.00	105.0	120.0		10.4	100.00	27.00	230.0	255.0		22.5	200.00						
10.20	110.0	125.0		10.8	87.00	27.20	250.0	280.0		24.5	133.00						
10.40	95.0	108.0		9.3	133.00	27.40	200.0	220.0		19.6	100.00						
10.60	160.0	180.0		15.7	100.00	27.60	160.0	175.0		15.7	133.00						
10.80	135.0	150.0		13.2	120.00	27.80	200.0	220.0		19.6	167.00						
11.00	92.0	110.0		9.0	107.00	28.00	230.0	255.0		22.5	200.00						
11.20	130.0	146.0		12.7	107.00	28.20	250.0	280.0		24.5	200.00						
11.40	102.0	118.0		10.0	100.00	28.40	260.0	290.0		25.5	167.00						
11.60	115.0	130.0		11.3	100.00	28.60	230.0	255.0		22.5	133.00						
11.80	150.0	165.0		14.7	133.00	28.80	200.0	220.0		19.6	167.00						
12.00	160.0	180.0		15.7	100.00	29.00	180.0	200.0		17.6	80.00						
12.20	120.0	135.0		11.8	107.00	29.20	50.0	62.0		4.9	100.00						
12.40	70.0	86.0		6.9	133.00	29.40	90.0	105.0		8.8	133.00						
12.60	190.0	210.0		18.6	100.00	29.60	200.0	220.0		19.6	167.00						
12.80	155.0	170.0		15.2	100.00	29.80	230.0	255.0		22.5	200.00						
13.00	115.0	130.0		11.3	120.00	30.00	260.0	290.0		25.5	167.00						
13.20	92.0	110.0		9.0	133.00	30.20	240.0	265.0		23.5	200.00						
13.40	130.0	150.0		12.7	73.00	30.40	250.0	280.0		24.5	167.00						
13.60	30.0	41.0		2.9	120.00	30.60	200.0	225.0		19.6	167.00						
13.80	19.0	37.0		1.9	80.00	30.80	210.0	235.0		20.6	133.00						
14.00	18.0	30.0		1.8	60.00	31.00	220.0	240.0		21.6	133.00						
14.20	20.0	29.0		2.0	80.00	31.20	200.0	220.0		19.6	200.00						
14.40	18.0	30.0		1.8	67.00	31.40	250.0	280.0		25.5	167.00						
14.60	19.0	29.0		1.9	93.00	31.60	260.0	290.0		25.5	167.00						
14.80	22.0	36.0		2.2	93.00	31.80	260.0	285.0		25.5	200.00						
15.00	18.0	32.0		1.8	100.00	32.00	260.0	285.0		25.5	200.00						
15.20	25.0	40.0		2.5	87.00	32.20	300.0	330.0		29.4	233.00						
15.40	23.0	36.0		2.3	87.00	32.40	300.0	335.0		29.4	133.00						
15.60	32.0	45.0		3.1	127.00	32.60	180.0	200.0		17.6	200.00						
15.80	41.0	60.0		4.0	167.00	32.80	250.0	280.0		24.5	167.00						
16.00	32.0	57.0		3.1	153.00	33.00	260.0	285.0		25.5	167.00						
16.20	30.0	53.0		2.9	160.00	33.20	250.0	275.0		24.5	167.00						
16.40	32.0	56.0		3.1	167.00	33.40	200.0	225.0		19.6	167.00						
16.60	32.0	57.0		3.1	160.00	33.60	230.0	255.0		22.5	200.00						
16.80	24.0	48.0		2.4	173.00	33.80	260.0	290.0		25.5	200.00						
17.00	25.0	51.0		2.5	133.00	34.00	280.0	310.0		27.4	233.00						

H = profondità

L1 = prima lettura (punta)

L2 = seconda lettura (punta + laterale)

Lt = terza lettura (totale)

<b>PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA</b> <b>LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI</b>	<b>CPT</b>	<b>2</b>
	riferimento	<b>046-2012</b>

Committente: <b>BARALDINI QUIRINO S.P.A.</b>	U.M.: <b>MPa</b>	Data esec.: <b>26/06/2012</b>
Cantiere: <b>MIRANDOLA Via Minelli</b>	Pagina: <b>1</b>	
Località: <b>MIRANDOLA Via Minelli</b>	Elaborato:	Falda: <b>-3.00 m 3.00</b>

H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc MPa	fs kPa	H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc MPa	fs kPa	H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc MPa	fs kPa
0,20	0,0	0,0		0,0	100,00	17,20	25,0	45,0		2,5	140,00	34,20	120,0	140,0		11,8	167,00
0,40	100,0	115,0		9,8	1033,00	17,40	27,0	48,0		2,6	147,00	34,40	230,0	255,0		22,5	200,00
0,60	15,0	170,0		1,5	100,00	17,60	34,0	56,0		3,3	160,00	34,60	230,0	260,0		22,5	167,00
0,80	17,0	32,0		1,7	67,00	17,80	32,0	56,0		3,1	173,00	34,80	250,0	275,0		24,5	200,00
1,00	17,0	27,0		1,7	80,00	18,00	28,0	54,0		2,7	140,00	35,00	270,0	300,0		26,5	
1,20	12,0	24,0		1,2	67,00	18,20	27,0	48,0		2,6	133,00						
1,40	10,0	20,0		1,0	60,00	18,40	33,0	53,0		3,2	140,00						
1,60	9,0	18,0		0,9	60,00	18,60	25,0	46,0		2,5	147,00						
1,80	8,0	17,0		0,8	60,00	18,80	26,0	48,0		2,5	133,00						
2,00	14,0	23,0		1,4	47,00	19,00	23,0	43,0		2,3	133,00						
2,20	12,0	19,0		1,2	40,00	19,20	27,0	47,0		2,6	127,00						
2,40	9,0	15,0		0,9	27,00	19,40	28,0	47,0		2,7	133,00						
2,60	12,0	16,0		1,2	40,00	19,60	25,0	45,0		2,5	127,00						
2,80	6,0	12,0		0,6	40,00	19,80	21,0	40,0		2,1	113,00						
3,00	6,0	12,0		0,6	47,00	20,00	18,0	35,0		1,8	113,00						
3,20	7,0	14,0		0,7	33,00	20,20	19,0	36,0		1,9	113,00						
3,40	11,0	16,0		1,1	47,00	20,40	24,0	41,0		2,4	133,00						
3,60	10,0	17,0		1,0	53,00	20,60	27,0	47,0		2,6	160,00						
3,80	12,0	20,0		1,2	47,00	20,80	28,0	52,0		2,7	153,00						
4,00	11,0	18,0		1,1	40,00	21,00	28,0	51,0		2,7	133,00						
4,20	9,0	15,0		0,9	47,00	21,20	25,0	45,0		2,5	127,00						
4,40	8,0	15,0		0,8	47,00	21,40	21,0	40,0		2,2	120,00						
4,60	13,0	20,0		1,3	73,00	21,60	22,0	40,0		2,2	120,00						
4,80	16,0	27,0		1,6	73,00	21,80	21,0	39,0		2,1	113,00						
5,00	17,0	28,0		1,7	73,00	22,00	19,0	36,0		1,9	100,00						
5,20	18,0	29,0		1,8	73,00	22,20	18,0	33,0		1,8	87,00						
5,40	13,0	24,0		1,3	80,00	22,40	19,0	32,0		1,9	107,00						
5,60	12,0	24,0		1,2	87,00	22,60	18,0	34,0		1,8	93,00						
5,80	14,0	27,0		1,4	87,00	22,80	19,0	33,0		1,9	93,00						
6,00	18,0	31,0		1,8	113,00	23,00	19,0	33,0		1,9	80,00						
6,20	19,0	36,0		1,9	113,00	23,20	18,0	30,0		1,8	87,00						
6,40	17,0	34,0		1,7	113,00	23,40	18,0	31,0		1,8	100,00						
6,60	17,0	34,0		1,7	100,00	23,60	19,0	34,0		1,9	113,00						
6,80	18,0	33,0		1,8	107,00	23,80	20,0	37,0		2,0	100,00						
7,00	18,0	34,0		1,8	100,00	24,00	18,0	33,0		1,8	73,00						
7,20	20,0	35,0		2,0	113,00	24,20	21,0	32,0		2,1	67,00						
7,40	17,0	34,0		1,7	80,00	24,40	23,0	33,0		2,3	67,00						
7,60	18,0	30,0		1,8	53,00	24,60	28,0	38,0		2,7	107,00						
7,80	10,0	18,0		1,0	27,00	24,80	64,0	80,0		6,3	67,00						
8,00	10,0	14,0		1,0	87,00	25,00	50,0	60,0		4,9	100,00						
8,20	45,0	58,0		4,4	67,00	25,20	78,0	93,0		7,6	100,00						
8,40	58,0	66,0		5,7	67,00	25,40	105,0	120,0		10,3	100,00						
8,60	50,0	60,0		4,9	67,00	25,60	135,0	150,0		13,2	133,00						
8,80	57,0	67,0		5,6	93,00	25,80	200,0	220,0		19,6	200,00						
9,00	70,0	84,0		6,9	47,00	26,00	230,0	260,0		22,5	133,00						
9,20	40,0	47,0		3,9	53,00	26,20	190,0	210,0		18,6	100,00						
9,40	18,0	26,0		1,8	93,00	26,40	150,0	165,0		14,7	200,00						
9,60	36,0	50,0		3,5	67,00	26,60	270,0	300,0		26,5	200,00						
9,80	68,0	78,0		6,7	73,00	26,80	270,0	300,0		26,5	167,00						
10,00	57,0	68,0		5,6	87,00	27,00	220,0	245,0		21,6	167,00						
10,20	32,0	45,0		3,1	93,00	27,20	250,0	275,0		24,5	200,00						
10,40	84,0	98,0		8,2	100,00	27,40	250,0	280,0		24,5	200,00						
10,60	110,0	125,0		10,8	80,00	27,60	260,0	290,0		25,5	167,00						
10,80	68,0	80,0		6,7	87,00	27,80	220,0	245,0		21,6	133,00						
11,00	72,0	85,0		7,1	67,00	28,00	220,0	250,0		21,6	133,00						
11,20	68,0	78,0		6,7	133,00	28,20	170,0	190,0		16,7	133,00						
11,40	145,0	165,0		14,2	133,00	28,40	160,0	180,0		15,7	100,00						
11,60	160,0	180,0		15,7	167,00	28,60	115,0	130,0		11,3	93,00						
11,80	200,0	225,0		19,6	200,00	28,80	96,0	110,0		9,4	100,00						
12,00	230,0	260,0		22,5	133,00	29,00	120,0	135,0		11,8	133,00						
12,20	190,0	210,0		18,6	107,00	29,20	200,0	220,0		19,6	167,00						
12,40	94,0	110,0		9,2	107,00	29,40	225,0	250,0		22,1	200,00						
12,60	120,0	135,0		11,8	167,00	29,60	260,0	290,0		25,5	167,00						
12,80	200,0	225,0		19,6	167,00	29,80	250,0	275,0		24,5	167,00						
13,00	225,0	250,0		22,1	133,00	30,00	260,0	285,0		25,5	200,00						
13,20	190,0	210,0		18,6	167,00	30,20	260,0	290,0		25,5	167,00						
13,40	200,0	225,0		19,6	200,00	30,40	240,0	265,0		23,5	200,00						
13,60	270,0	300,0		25,5	200,00	30,60	260,0	290,0		25,5	133,00						
13,80	250,0	280,0		24,5	133,00	30,80	200,0	220,0		19,6	133,00						
14,00	200,0	220,0		19,6	100,00	31,00	180,0	200,0		17,6	167,00						
14,20	140,0	155,0		13,7	133,00	31,20	200,0	225,0		19,6	133,00						
14,40	160,0	180,0		15,7	133,00	31,40	200,0	220,0		19,6	167,00						
14,60	150,0	170,0		14,7	100,00	31,60	180,0	205,0		17,6	167,00						
14,80	155,0	170,0		15,2	100,00	31,80	230,0	255,0		22,5	167,00						
15,00	155,0	170,0		15,2	133,00	32,00	260,0	285,0		25,5	200,00						
15,20	170,0	190,0		16,7	200,00	32,20	280,0	310,0		27,4	200,00						
15,40	210,0	240,0		20,6	100,00	32,40	300,0	330,0		29,4	167,00						
15,60	150,0	165,0		14,7	80,00	32,60	250,0	275,0		24,5	200,00						
15,80	52,0	64,0		5,1	160,00	32,80	260,0	290,0		25,5	167,00						
16,00	36,0	60,0		3,5	133,00	33,00	260,0	285,0		25,5	167,00						
16,20	31,0	51,0		3,0	107,00	33,20	220,0	245,0		21,6	167,00						
16,40	35,0	51,0		3,4	147,00	33,40	260,0	285,0		25,5	200,00						
16,60	28,0	50,0		2,7	140,00	33,60	270,0	300,0		26,5	200,00						
16,80	25,0	46,0		2,5	133,00	33,80	270,0	300,0		26,5	167,00						
17,00	24,0	44,0		2,4	133,00	34,00	250,0	275,0		24,5	133,00						

H = profondità	qc = resistenza di punta
L1 = prima lettura (punta)	fs = resistenza laterale calcolata
L2 = seconda lettura (punta + laterale)	0,20 m sopra quota qc
Lt = terza lettura (totale)	
CT = 10,00 costante di trasformazione	
nota:	FON025



## **DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**





**Prova con tomografo digitale**



**Stendimento sismico onde di superficie MASW**

Permesso di  
Costruire

Realizzazione di impianto di recupero rifiuti  
speciali ubicato presso l'area in via di Mezzo  
snc a Mirandola (MO)

Relazione geologica

SIS.08.07  
PS.06.1



## **ALLEGATO B**

**“Prove penetrometriche statiche a punta elettrica e verifica del potenziale di liquefazione  
eseguite nel comune di Mirandola in Via Minelli” (2023 – R.d.R. srl)”**

	<b>RDR Srl</b> Via Toscana 119 40141 Bologna PEC: <a href="mailto:info@rdrsrl.it">info@rdrsrl.it</a> C.F./P.IVA 04113831202 Cap.Soc. € 10.000 i.v.	<b>Carbonella Rocco</b> ( <a href="mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it">rocco.carbonella@fastwebnet.it</a> ) <i>Geologo</i> Mobile +39 393 8376620 (ITALY)	<b>FORM: RDR_DQ_01</b>  <b>COD. DOC.</b> <b>RDR_19_RGE_REV2</b>
<b>RELAZIONE TECNICA</b>	<b>R1_23_040_1_REV00</b>		pag. 1 di 14



**Prove penetrometriche statiche a punta elettrica e verifica del potenziale di  
liquefazione eseguite nel Comune di Mirandola in Via Minelli**

Committente:



costruzioni edili  
**BARALDINI QUIRINO S.p.A.**

 <p><b>RDR Srl</b>  Via Toscana 119  40141 Bologna  PEC: <a href="mailto:info@rdrsl.it">info@rdrsl.it</a>  C.F./P.IVA 04113831202  Cap.Soc. € 10.000 i.v.</p>	<p><b>Carbonella Rocco</b>  (<a href="mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it">rocco.carbonella@fastwebnet.it</a>)  <i>Geologo</i>  Mobile +39 393 8376620 (ITALY)</p>	FORM: RDR_DQ_01
		COD. DOC. RDR_19_RGE_REV2
RELAZIONE TECNICA	R1_23_040_1_REV00	pag. 2 di 14

## SOMMARIO

1	IDENTIFICAZIONE DOCUMENTO	3
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
3	PREMESSE	5
4	INDAGINI GEOGNOSTICHE E PRESENTAZIONE	7
5	IL FENOMENO DELLA LIQUEFAZIONE	9

 <b>RDR Srl</b> Via Toscana 119 40141 Bologna PEC: <a href="mailto:info@rdrsrl.it">info@rdrsrl.it</a> C.F./P.IVA 04113831202 Cap.Soc. € 10.000 i.v.	<b>Carbonella Rocco</b> ( <a href="mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it">rocco.carbonella@fastwebnet.it</a> ) <i>Geologo</i> Mobile +39 393 8376620 (ITALY)		FORM: RDR_DQ_01
			COD. DOC. RDR_19_RGE_REV2
<b>RELAZIONE TECNICA</b>	<b>R1_23_040_1_REV00</b>	pag. 3 di 14	

## 1. IDENTIFICAZIONE DOCUMENTO

### Identificazione.

Il presente lavoro viene identificato per mezzo del seguente codice R1\_23\_040\_REV00.

### Direzione indagini e coordinamento lavoro.

Dott. Geol. Rocco Carbonella.

### Collaboratori

Dott. Simone Vincenzo Lioci, Dott. Francesco Cianchi

### Redazione del documento.

Il presente documento è stato redatto dal Dott. Geol. Rocco Carbonella in data 30/10/2023

### Composizione del documento.

Il presente documento è formato da n° 14 pagine e n° 39 fogli allegati

 <b>RDR Srl</b> Via Toscana 119 40141 Bologna PEC: <a href="mailto:info@rdrsl.it">info@rdrsl.it</a> C.F./P.IVA 04113831202 Cap.Soc. € 10.000 i.v.	<b>Carbonella Rocco</b> ( <a href="mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it">rocco.carbonella@fastwebnet.it</a> ) Geologo Mobile +39 393 8376620 (ITALY)	FORM: RDR_DQ_01
		COD. DOC. RDR_19_RGE_REV2
RELAZIONE TECNICA	R1_23_040_1_REV00	pag. 4 di 14

## 2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- **Decreto Ministeriale**

Testo Unitario - Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 17/01/2018.

- **Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici**

Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M.14 gennaio 2008. Circolare 2 febbraio 2009.

- **Decreto Ministeriale**

Testo Unitario - Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14.01.2008.

- **Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici**

Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale.  
Allegato al voto n.36 del 27.07.2007.

- **Eurocodice 7.2 (2002)**

Progettazione geotecnica – Parte II: Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002). UNI.

- **Eurocodice 7.3 (2002)**

Progettazione geotecnica – Parte II: Progettazione assistita con prove in sito (2002). UNI.

- **Eurocodice 8 (1998)**

**Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture**

Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003).

- **Eurocodice 7.1 (1997)**

Progettazione geotecnica – Parte I: Regole Generali. UNI.

- **Circ. Min. LL.PP. n° 30483**

Istruzioni relative alle "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione"; 24 Settembre 1988.

- **Decreto Ministeriale**

"Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazioni". D.M. 11 Marzo 1988.



	<p><b>RDR Srl</b> Via Toscana 119 40141 Bologna PEC: <a href="mailto:info@rdrsl.it">info@rdrsl.it</a> C.F./P.IVA 04113831202 Cap.Soc. € 10.000 i.v.</p> <p><b>Carbonella Rocco</b> (<a href="mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it">rocco.carbonella@fastwebnet.it</a>) <i>Geologo</i> Mobile +39 393 8376620 (ITALY)</p>	<p><b>FORM: RDR_DQ_01</b></p> <p><b>COD. DOC.</b> <b>RDR_19_RGE_REV2</b></p>
<p><b>RELAZIONE TECNICA</b></p>	<p><b>R1_23_040_1_REV00</b></p>	<p>pag. 5 di 14</p>

### 3. PREMESSE

Su incarico della committenza, in data 25/10/2023, sono state eseguite alcune prove geotecniche. In particolare sono state realizzate le seguenti attività:

- n° 2 prove penetrometriche statiche a punta elettrica e piezocono (CPTU)

Nella figura seguente è indicata l'area in esame.



Figura 1. Ubicazione dei luoghi e delle indagini.



 <b>RDR Srl</b> Via Toscana 119 40141 Bologna PEC: <a href="mailto:info@rdrsl.it">info@rdrsl.it</a> C.F./P.IVA 04113831202 Cap.Soc. € 10.000 i.v.	<b>Carbonella Rocco</b> ( <a href="mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it">rocco.carbonella@fastwebnet.it</a> ) Geologo Mobile +39 393 8376620 (ITALY)	<b>FORM: RDR_DQ_01</b>
		<b>COD. DOC.</b> <b>RDR_19_RGE_REV2</b>
<b>RELAZIONE TECNICA</b>	<b>R1_23_040_1_REV00</b>	pag. 6 di 14

#### 4. INDAGINI GEOGNOSTICHE E PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Nel presente capitolo, dopo una breve descrizione della tipologia d'indagine, verranno presentati i risultati ottenuti in forma sintetica mentre in allegato sono riportati in forma estesa.

##### 4.1. *PROVE PENETROMETRICHE STATICHE A PUNTA ELETTRICA E PIEZOCONO*

Questa tipologia di prova è un'evoluzione della prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT). La prova consiste nell'infissione nel terreno di una batteria di aste precedute da una punta dotata di trasduttori e filtro poroso. Queste caratteristiche permettono alla prova di registrare in continuo valori di resistenza alla punta  $Q_c$ , resistenza laterale  $F_s$ , pressione neutra  $u$  e angolo di inclinazione della batteria di aste. Un'indicazione della stratigrafia dei terreni indagati è fornita dal rapporto tra la resistenza all'infissione statica della punta ( $Q_c$ ) e la resistenza per attrito laterale locale ( $F_s$ ) che il materiale sviluppa sul manicotto della punta meccanica. Nell'interpretazione quantitativa dei risultati, che consente di determinare le grandezze di alcuni parametri geotecnici dei terreni attraversati mediante formule empiriche, si è tenuto in considerazione che le prove sono assimilabili a prove rapide in condizioni di drenaggio impedito. Pertanto, in terreni coesivi, si ottiene una stima della coesione non drenata  $C_u$ . Nei terreni sabbiosi è possibile valutare il grado di addensamento e una stima del valore di angolo di attrito.



Figura 2 – Documentazione fotografica.



**RDR Srl**

Via Toscana 119  
40141 Bologna  
PEC: [info@rdrsrl.it](mailto:info@rdrsrl.it)  
C.F./P.IVA 04113831202  
Cap.Soc. € 10.000 i.v.

**Carbonella Rocco**

([rocco.carbonella@fastwebnet.it](mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it))  
*Geologo*  
Mobile +39 393 8376620 (ITALY)

**FORM: RDR\_DQ\_01**

**COD. DOC.**  
**RDR\_19\_RGE\_REV2**

**RELAZIONE TECNICA**

**R1\_23\_040\_1\_REV00**

pag. 7 di 14

Di seguito alcuni parametri geotecnici derivanti dall'elaborazione delle prove eseguite:

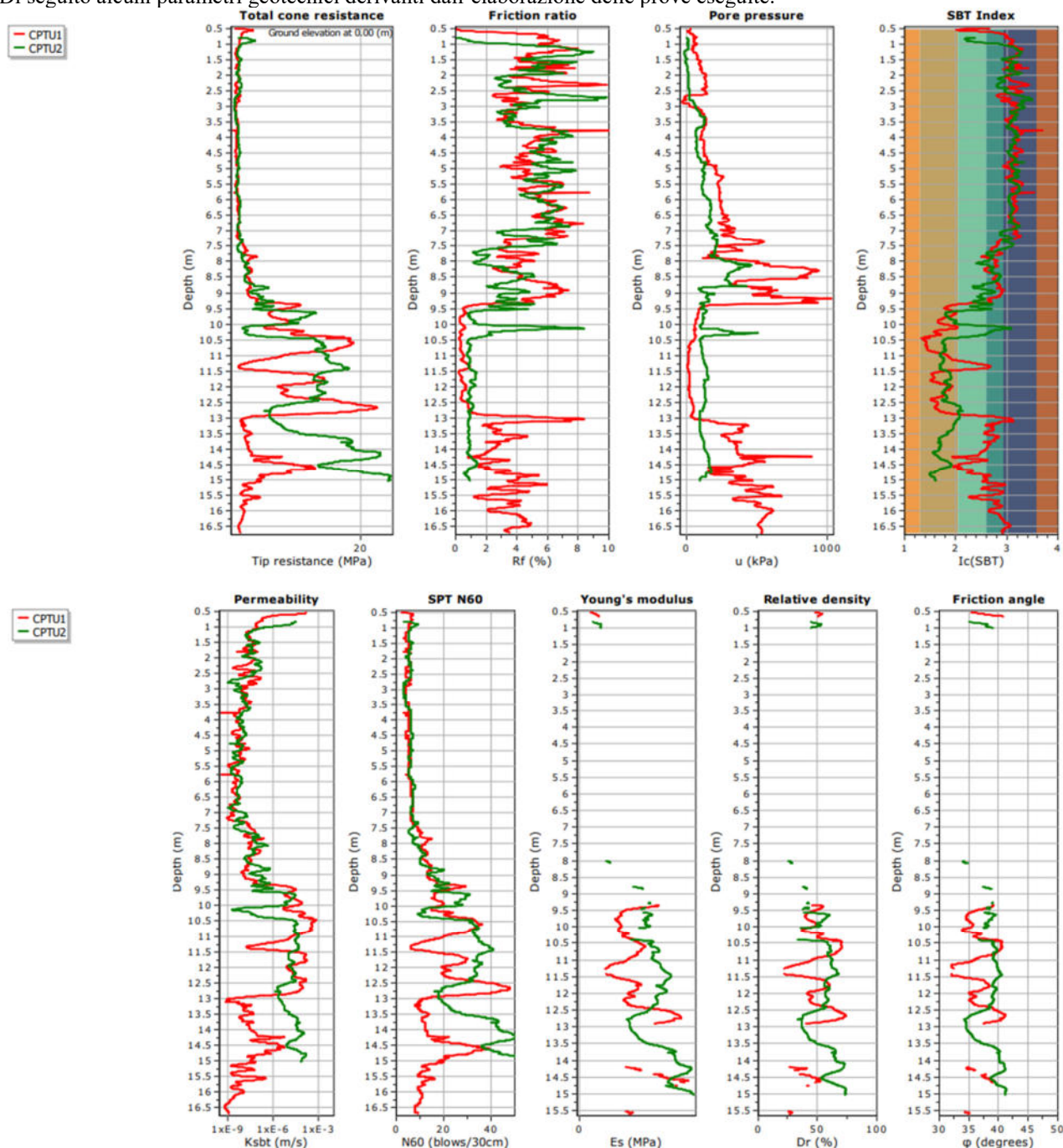


Figura 3. Variazione di alcuni parametri geotecnici con la profondità relativi alle prove eseguite



**RDR Srl**

Via Toscana 119  
40141 Bologna  
PEC: [info@rdrsl.it](mailto:info@rdrsl.it)  
C.F./P.IVA 04113831202  
Cap.Soc. € 10.000 i.v.

**Carbonella Rocco**

([rocco.carbonella@fastwebnet.it](mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it))  
*Geologo*  
Mobile +39 393 8376620 (ITALY)

FORM: RDR\_DQ\_01

COD. DOC.  
RDR\_19\_RGE\_REV2

RELAZIONE TECNICA

R1\_23\_040\_1\_REV00

pag. 8 di 14

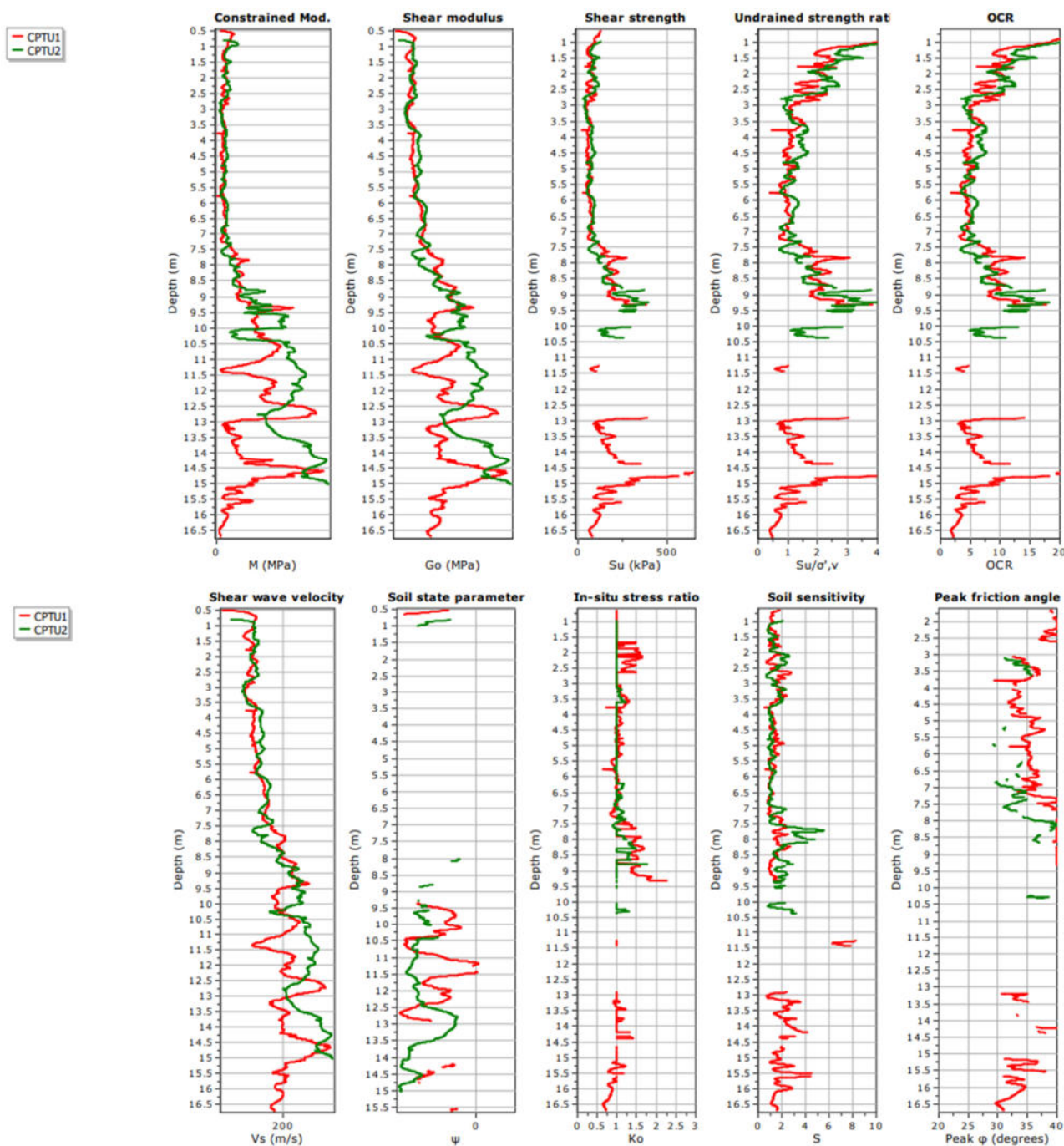


Figura 4. Variazione di alcuni parametri geotecnici con la profondità relativi alle prove eseguite

Al termine delle prove, i fori sono stati indagati con un freatimetro che ha evidenziato la presenza di acqua a -1.60 m dal piano campagna nella CPTU1 mentre nella CPTU 2 il foro è risultato chiuso.



 <b>RDR Srl</b> Via Toscana 119 40141 Bologna PEC: <a href="mailto:info@rdrsl.it">info@rdrsl.it</a> C.F./P.IVA 04113831202 Cap.Soc. € 10.000 i.v.	<b>Carbonella Rocco</b> ( <a href="mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it">rocco.carbonella@fastwebnet.it</a> ) Geologo Mobile +39 393 8376620 (ITALY)	<b>FORM: RDR_DQ_01</b>
		<b>COD. DOC.</b> <b>RDR_19_RGE_REV2</b>
<b>RELAZIONE TECNICA</b>	<b>R1_23_040_1_REV00</b>	pag. 9 di 14

## 5. IL FENOMENO DELLA LIQUEFAZIONE

.Nel linguaggio tecnico corrente con tale termine s'intende la perdita totale di resistenza dei terreni saturi sotto sollecitazioni statiche o dinamiche, in conseguenza delle quali il terreno raggiunge una condizione di fluidità pari a quella di una massa viscosa. Ciò avviene solitamente nei depositi di sabbie fini sciolte quando, sotto l'azione dei carichi applicati o di forze idrodinamiche, la pressione dell'acqua dei pori aumenta progressivamente fino ad eguagliare la pressione totale di confinamento, cioè fino a quando gli sforzi efficaci si riducono a zero.

La liquefazione di un deposito può avvenire sia in condizioni statiche sia sotto sollecitazioni dinamiche cicliche o monotoniche.

### 5.1. LIQUEFAZIONE DEI TERRENI SOTTO L'EFFETTO DI CARICHI CICLICI

Il fenomeno della liquefazione dei depositi sabbiosi saturi, sotto l'azione dei terremoti, trova spiegazione nell'evidenza sperimentale che una sabbia soggetta a vibrazione tende a compattarsi. La tendenza al decremento di volume si traduce (se il drenaggio è impedito) in un aumento della pressione interstiziale con conseguente riduzione della pressione sui grani. La struttura dei grani reagisce alla riduzione di pressione effettiva con un aumento di volume dello scheletro solido, compatibile con il fatto che in condizioni non drenate il volume complessivo deve rimanere costante. Il duplice meccanismo di tendenza alla riduzione di volume e al rigonfiamento dello scheletro solido guida il processo di sviluppo delle pressioni interstiziali, che aumentano, col proseguire delle vibrazioni, secondo un processo di accumulazione a gradini, fino ad eguagliare la pressione effettiva.

### 5.2. CRITERI DI PREVISIONE E METODI PER LA VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE.

Per una stima accurata della probabilità di liquefazione in un deposito sabbioso durante un terremoto, occorrerebbe tenere in conto di tutti i fattori che concorrono a creare le condizioni in cui il fenomeno può verificarsi. Dalle considerazioni esposte in precedenza si evince però l'impossibilità di inglobare in un unico modello tutti i parametri rappresentativi del fenomeno. Gli studi più recenti si sono sviluppati lungo due direttrici principali:

1. Osservazione delle caratteristiche sismiche, geologiche e geotecniche dei siti colpiti da terremoti distruttivi
2. Analisi del comportamento dei terreni in prove cicliche di laboratorio in condizioni controllate.

Sono emersi così i primi criteri empirici di previsione, basati sulle caratteristiche granulometriche e sullo stato di addensamento, cui hanno fatto seguito criteri e metodi più raffinati e complessi capaci di tener conto di un numero di parametri sempre più elevato.

E' possibile raggruppare la grande molteplicità di metodi per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei depositi in quattro classi:

1. **Criteri empirici:** si basano su parametri desunti da prove di identificazione o da misure della densità relativa ovvero da prove penetrometriche standard
2. **Metodi semplificati:** si basano sul confronto fra le sollecitazioni di taglio che producono liquefazione e quelle indotte dal terremoto; richiedono quindi la valutazione dei parametri sia relativi all'evento sismico sia al deposito
3. **Metodi di analisi dinamica semplificata:** richiedono la determinazione, alle diverse quote, della storia delle sollecitazioni delle tensioni e deformazioni di taglio, conseguente ad un input sismico, definito da una storia di accelerazioni al bedrock
4. **Metodi dinamici avanzati:** vengono condotte in genere in condizioni bidimensionali mediante l'impiego di codici di calcolo al elementi finiti o alle differenze finite ed in alcuni casi prevedono la modellazione integrata del sistema terreno-fondazione-struttura.

	<b>RDR Srl</b> Via Toscana 119 40141 Bologna PEC: <a href="mailto:info@rdrsl.it">info@rdrsl.it</a> C.F./P.IVA 04113831202 Cap.Soc. € 10.000 i.v.	<b>FORM: RDR_DQ_01</b>  <b>COD. DOC.</b> <b>RDR_19_RGE_REV2</b>
<b>RELAZIONE TECNICA</b>	<b>R1_23_040_1_REV00</b>	pag. 10 di 14

### 5.3. MOTIVI DI ESCLUSIONE DELLA VERIFICA A LIQUEFAZIONE

Sulla base di un'analisi preliminare della sismicità del sito e delle caratteristiche geotecniche del deposito, si può ritenere che la probabilità che si verifichi la liquefazione sia bassa o nulla nel caso si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

- ☐ Eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5
- ☐ Accelerazioni massime di progetto al piano campagna inferiori a 0.1 g
- ☐ Accelerazioni massime di progetto al piano campagna inferiori a 0.15 g e terreni con caratteristiche ricadenti in una delle seguenti categorie:

1. frazione fine (passante al setaccio 200, FC) maggiore del 20% e Indice plastico maggiore di 10.
2. FC > 35 % e resistenza N60 > 20
3. FC < 5 % e resistenza N60 > 25

Dove N60 è il valore normalizzato della resistenza penetrometrica della prova SPT.

- ☐ Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate in figura 4a nel caso di materiale con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  ed in figura 4b per coefficienti di uniformità  $U_c > 3.5$ .
- ☐ Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna.

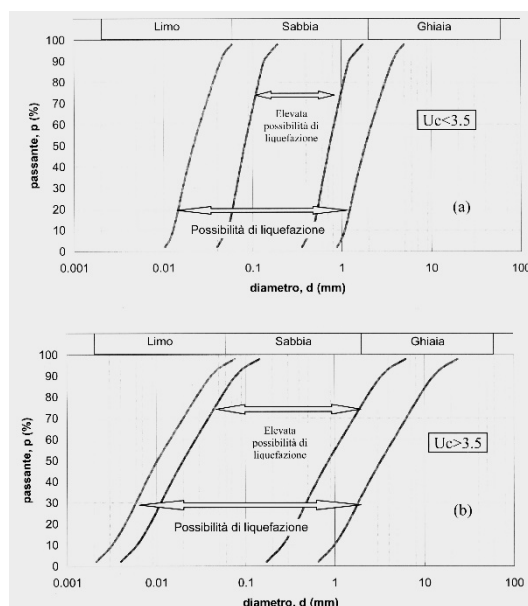


Figura 5 – Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione.

- ☐ Parametro di comportamento del terreno  $I_c$ ; tale parametro è funzione della resistenza alla punta,  $q_c$  e della resistenza laterale del manicotto,  $f_s$  misurate nelle prove CPT. In particolare:

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5}$$

Con Q e F funzioni di  $q_c$  e  $f_s$ .

Secondo Robertson e Wride (1998) se il valore di  $I_c$  è maggiore di 2.6 il terreno è classificabile come un materiale a comportamento argilloso, con scarse probabilità di liquefazione.

	<b>RDR Srl</b> Via Toscana 119 40141 Bologna PEC: <a href="mailto:info@rdrsr.it">info@rdrsr.it</a> C.F./P.IVA 04113831202 Cap.Soc. € 10.000 i.v.	<b>FORM: RDR_DQ_01</b>  <b>COD. DOC.</b> <b>RDR_19_RGE_REV2</b>
<b>RELAZIONE TECNICA</b>	<b>R1_23_040_1_REV00</b>	pag. 11 di 14

#### 5.4. METODI DI ANALISI SEMPLIFICATA

La verifica a liquefazione del deposito è effettuata in condizioni di free-field (assenza di manufatti sulla superficie del deposito) alle profondità dove sono presenti depositi potenzialmente liquefacibili. Il fattore di sicurezza, ad una generica profondità, è definito come rapporto tra resistenza disponibile alla liquefazione e sollecitazione indotta dall'azione sismica. Entrambi i parametri vengono normalizzati rispetto alla tensione verticale efficace agente in modo da definire un rapporto di resistenza ciclica (CRR) ed un rapporto di tensione ciclica (CSR). Il valore di CSR è stimato a partire dal valore dell'accelerazione massima attesa in superficie, mentre CRR deriva da abachi funzioni dei risultati di prove in sito tipo SPT, CPT e misure di propagazione della onde di taglio. Nel metodo di Seed & Idriss, la resistenza alla liquefazione assume la seguente espressione:

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d$$

Dove:

$a_{max}$  = accelerazione di picco al piano campagna del terremoto di progetto

$g$  = accelerazione di gravità

$\sigma_v/\sigma'_v$  = rapporto tra tensione totale ed efficace alla profondità considerata

$r_d$  = coefficiente riduttivo dell'azione sismica che porta in conto la deformabilità del sottosuolo.

Il rapporto di resistenza ciclica CRR, come detto in precedenza si ricava, dall'analisi di prove in sito. Dai dati normalizzati di SPT o CPT, si ricava in funzione del contenuto di fine del materiale in esame il valore di CRR. Siccome le procedure semplificate sono state elaborate sulla base di osservazioni del comportamento dei depositi durante eventi sismici con magnitudo pari a 7.5, occorre ridurre il carico sismico per eventi di magnitudo diversa. Si può fare riferimento agli studi di Seed e Idriss (1982) e Ambraseys (1988).

Il fattore di sicurezza (FL) si ricava nel modo seguente:

$$FL = CRR/CSR$$

#### 5.5. CONSIDERAZIONI SUL SITO IN ESAME

Per il sito in esame abbiamo una serie di fattori predisponenti la probabilità di liquefazione:

- Presenza di strati limoso/sabbiosi
- presenza della falda
- accelerazioni massime superiori a 0.15 g

Si procede, in via preliminare, ad una verifica della liquefazione del deposito calcolando l'indice  $I_c$  ed il potenziale di liquefazione.

Per l'analisi in esame sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- $a_g = 0.21$
- magnitudo: 6.14
- falda : 1.60 dal piano campagna

La figure seguenti compendiano i risultati ottenuti:



**RDR Srl**

Via Toscana 119  
40141 Bologna  
PEC: [info@rdrsl.it](mailto:info@rdrsl.it)  
C.F./P.IVA 04113831202  
Cap.Soc. € 10.000 i.v.

**Carbonella Rocco**

([rocco.carbonella@fastwebnet.it](mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it))  
*Geologo*  
Mobile +39 393 8376620 (ITALY)

FORM: RDR\_DQ\_01

COD. DOC.  
RDR\_19\_RGE\_REV2

RELAZIONE TECNICA

R1\_23\_040\_1\_REV00

pag. 12 di 14

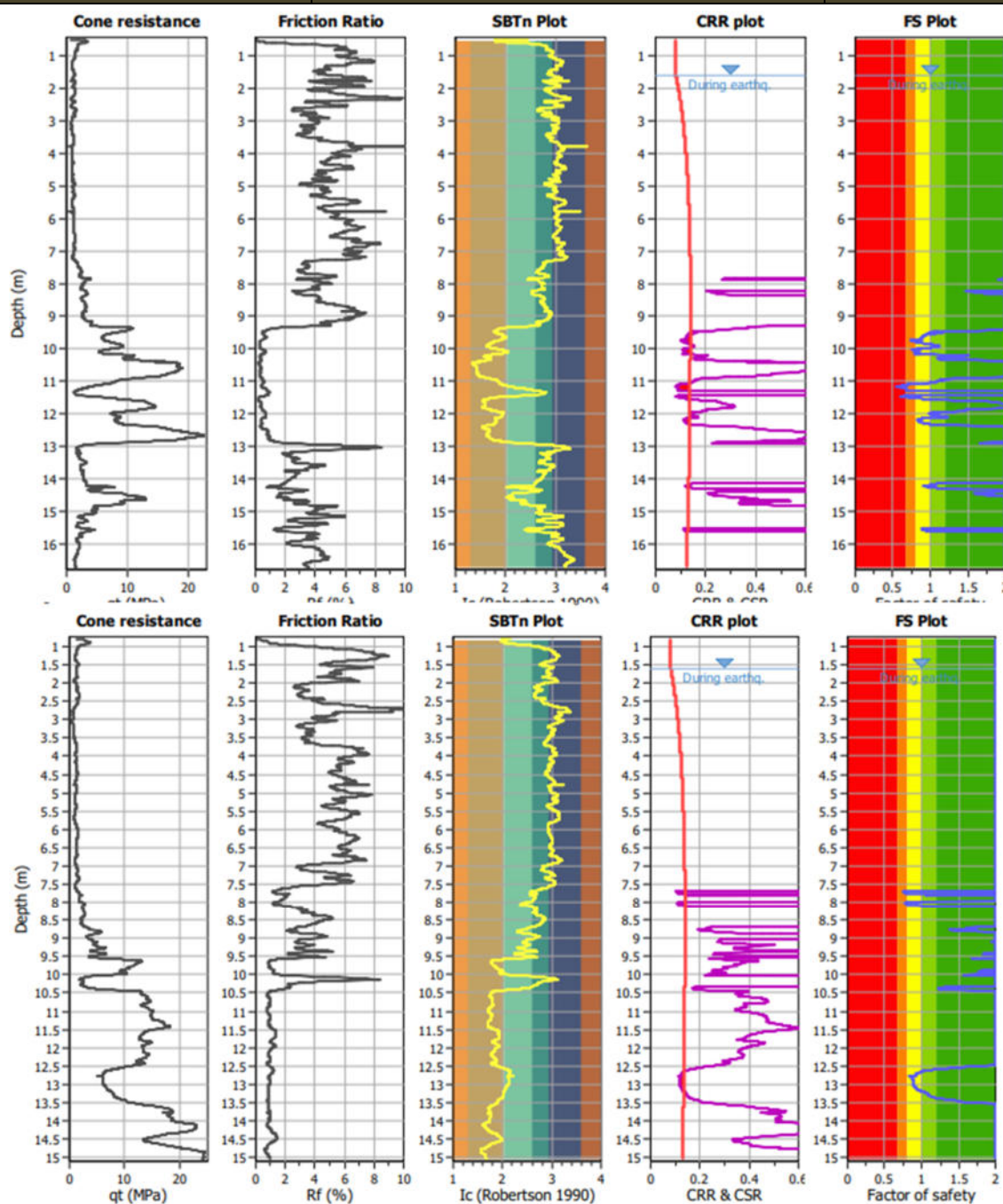


Figura 6 – Risultati ottenuti nel calcolo della liquefazione



 <b>RDR Srl</b> Via Toscana 119 40141 Bologna PEC: <a href="mailto:info@rdrsl.it">info@rdrsl.it</a> C.F./P.IVA 04113831202 Cap.Soc. € 10.000 i.v.	<b>Carbonella Rocco</b> ( <a href="mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it">rocco.carbonella@fastwebnet.it</a> ) Geologo Mobile +39 393 8376620 (ITALY)	<b>FORM: RDR_DQ_01</b>
		<b>COD. DOC.</b> <b>RDR_19_RGE_REV2</b>
<b>RELAZIONE TECNICA</b>	<b>R1_23_040_1_REV00</b>	pag. 13 di 14

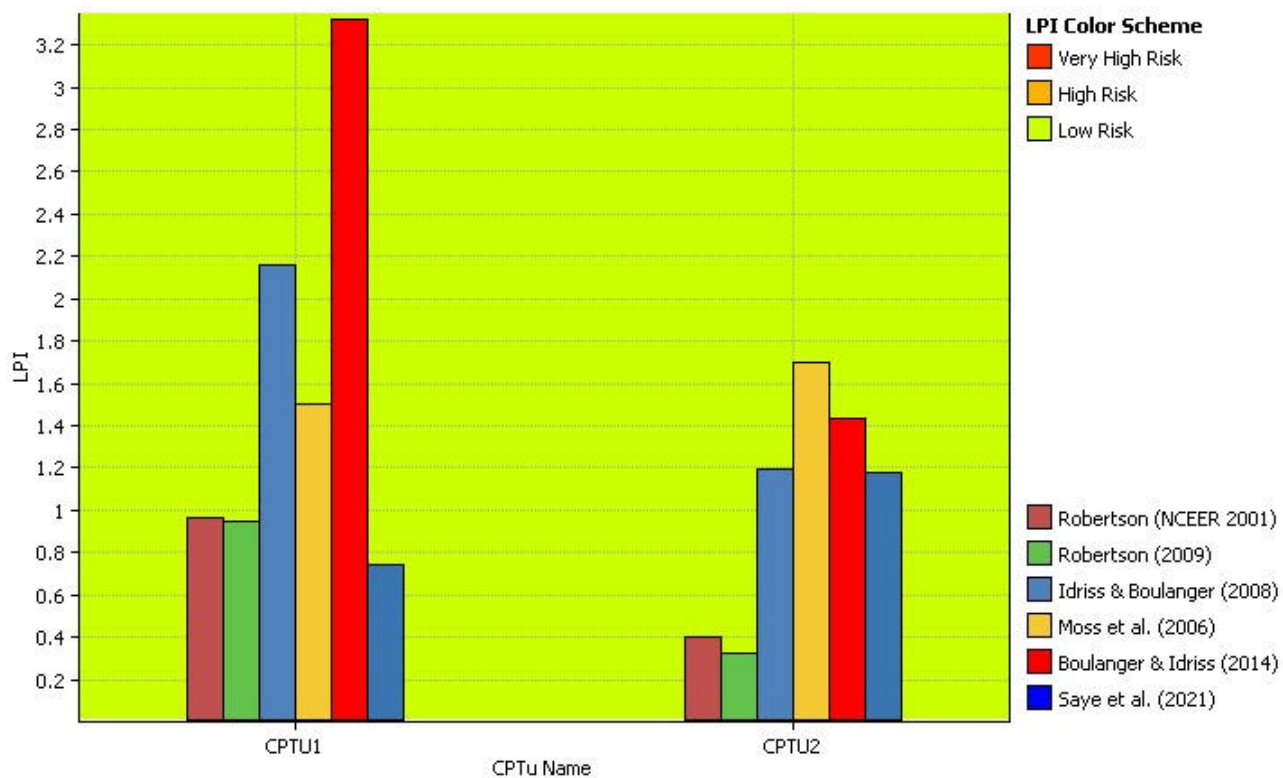


Figura 7 – confronto del potenziale di liquefazione con vari metodi di calcolo

Nel caso in esame l'indice di Sonnez è risultato inferiore a 5, ovvero in un intervallo in cui la liquefacibilità è poco probabile.

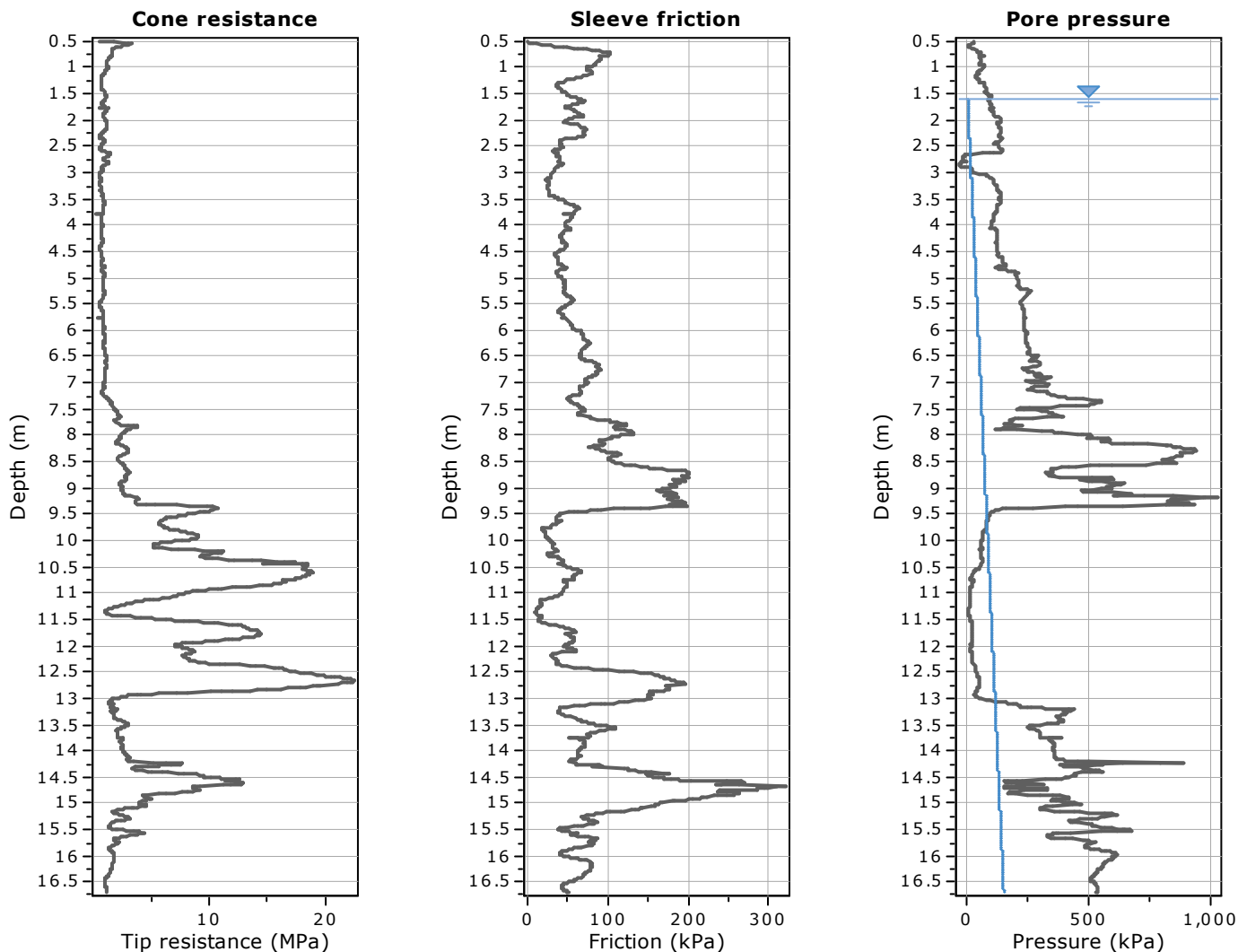
 <p><b>RDR Srl</b>  Via Toscana 119  40141 Bologna  PEC: <a href="mailto:info@rdrsrl.it">info@rdrsrl.it</a>  C.F./P.IVA 04113831202  Cap.Soc. € 10.000 i.v.</p>	<p><b>Carbonella Rocco</b>  (<a href="mailto:rocco.carbonella@fastwebnet.it">rocco.carbonella@fastwebnet.it</a>)  <i>Geologo</i>  Mobile +39 393 8376620 (ITALY)</p>		FORM: RDR_DQ_01
			COD. DOC. RDR_19_RGE_REV2
RELAZIONE TECNICA	R1_23_040_1_REV00	pag. 14 di 14	

# ALLEGATI

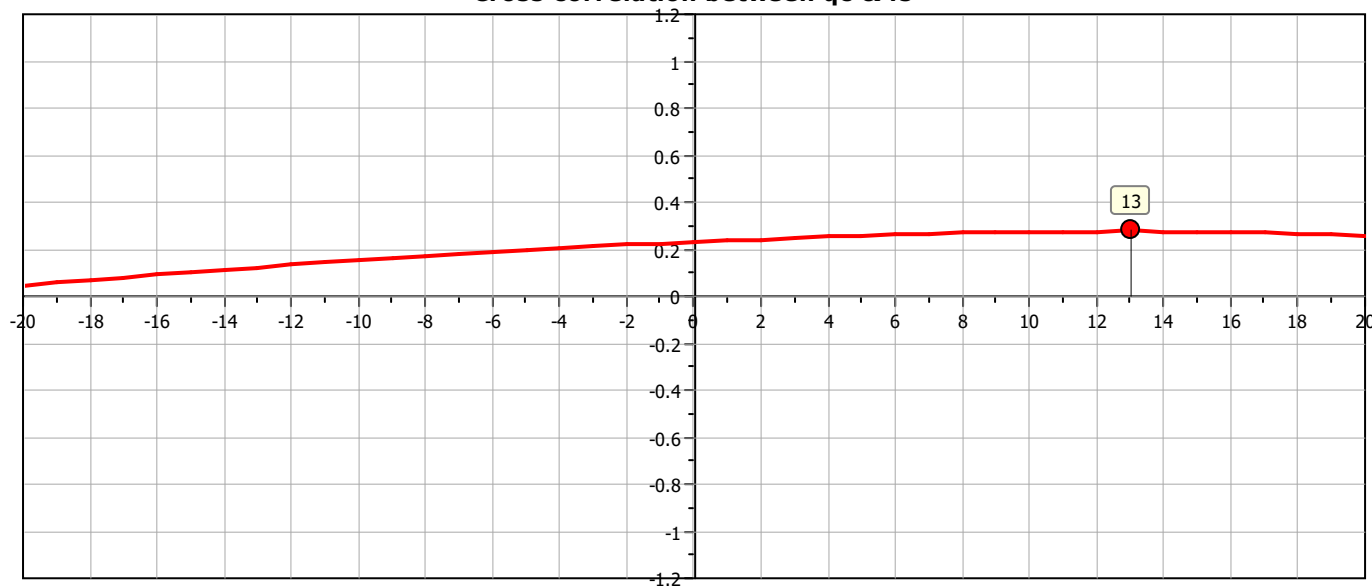
1. REPORT PROVE PENETROMETRICHE STATICHE A PUNTA ELETTRICA E PIEZOCONO (n° pagine 27)
2. REPORT LIQUEFAZIONE (n° pagine 12)

## Project:

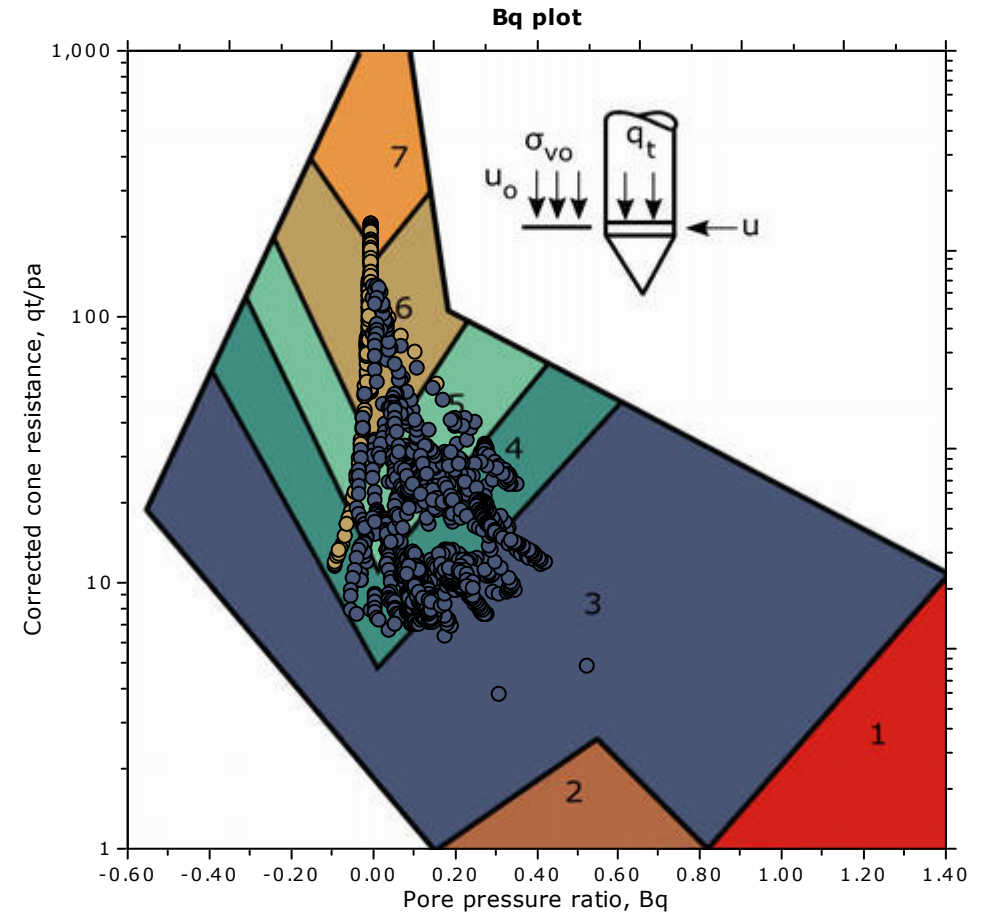
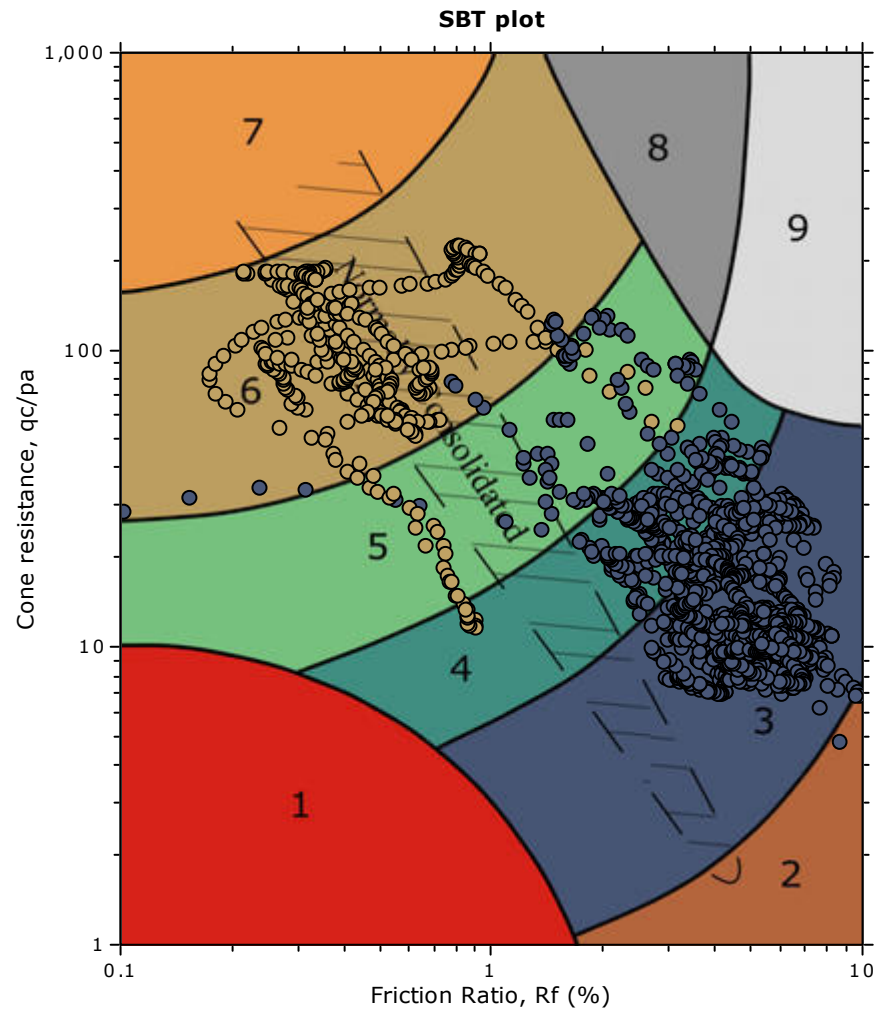
Location: Mirandola - Via Minelli



The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw  $q_c$  and  $f_s$  values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between  $q_c$  &  $f_s$ 

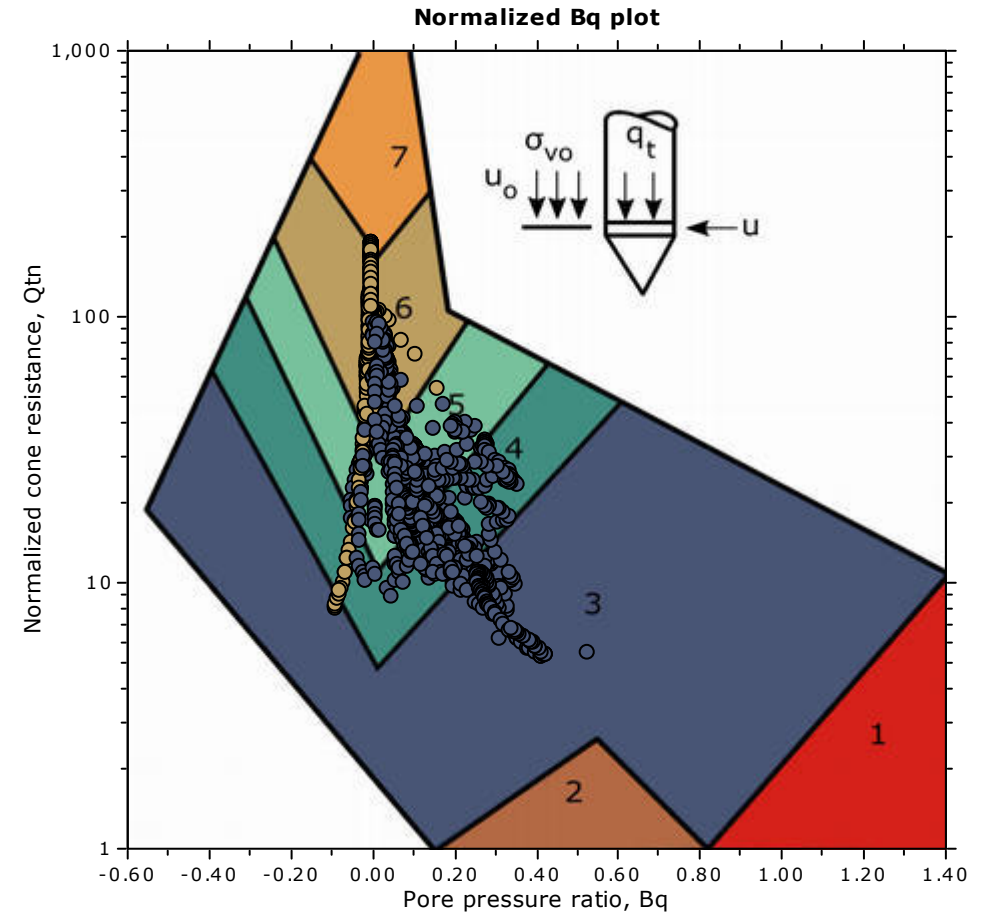
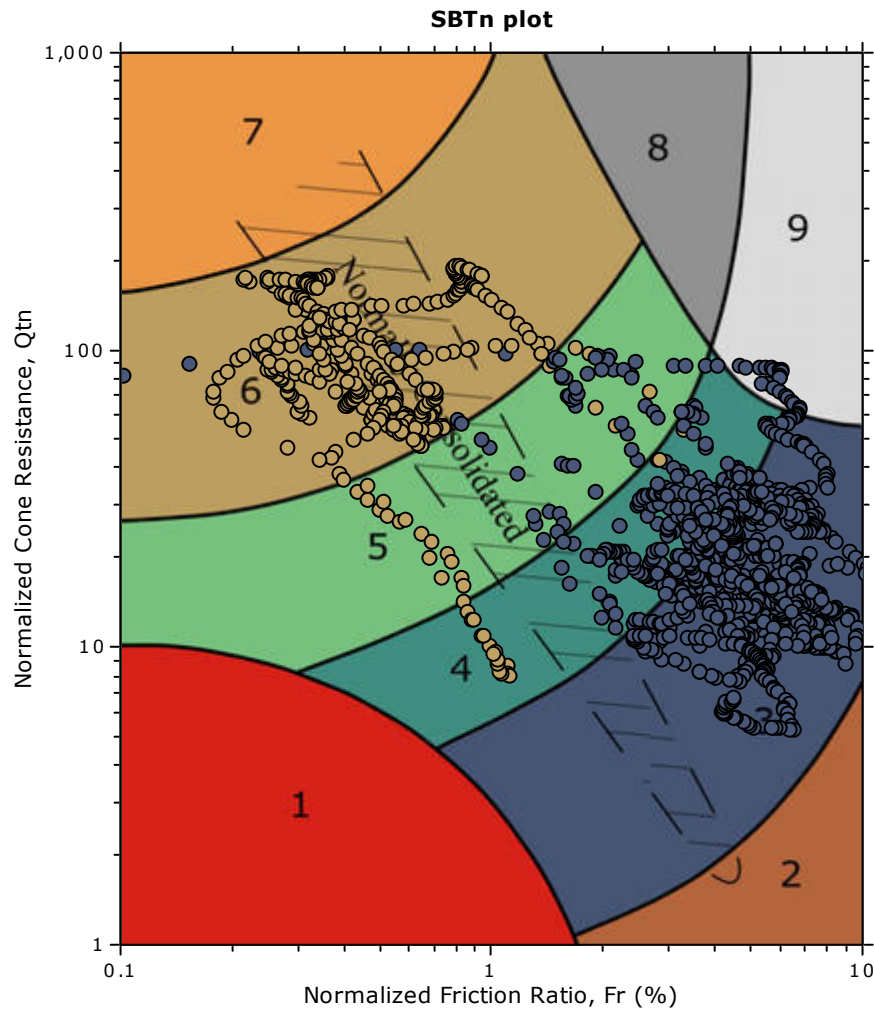
## SBT - Bq plots



## SBT legend

- |                           |                              |                                   |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravelly sand to sand          |
| 2. Organic material       | 5. Silty sand to sandy silt  | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty clay     | 6. Clean sand to silty sand  | 9. Very stiff fine grained        |

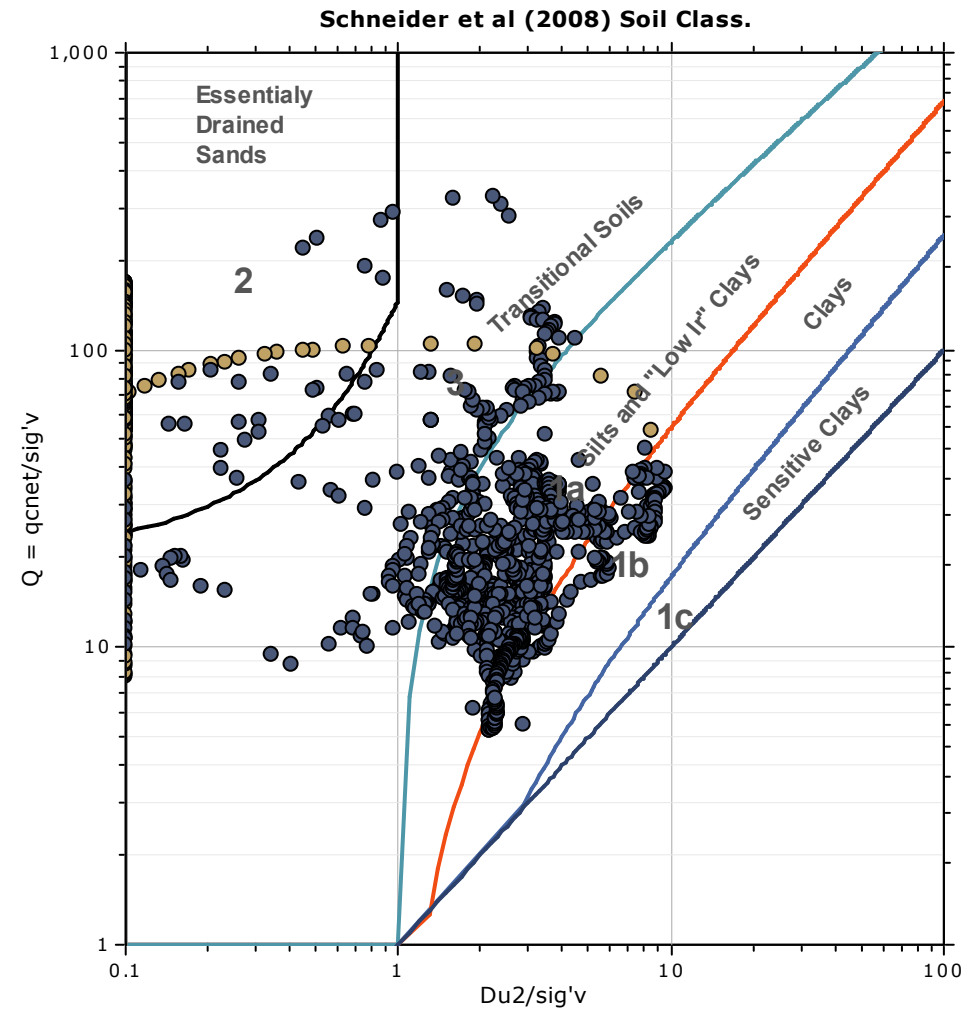
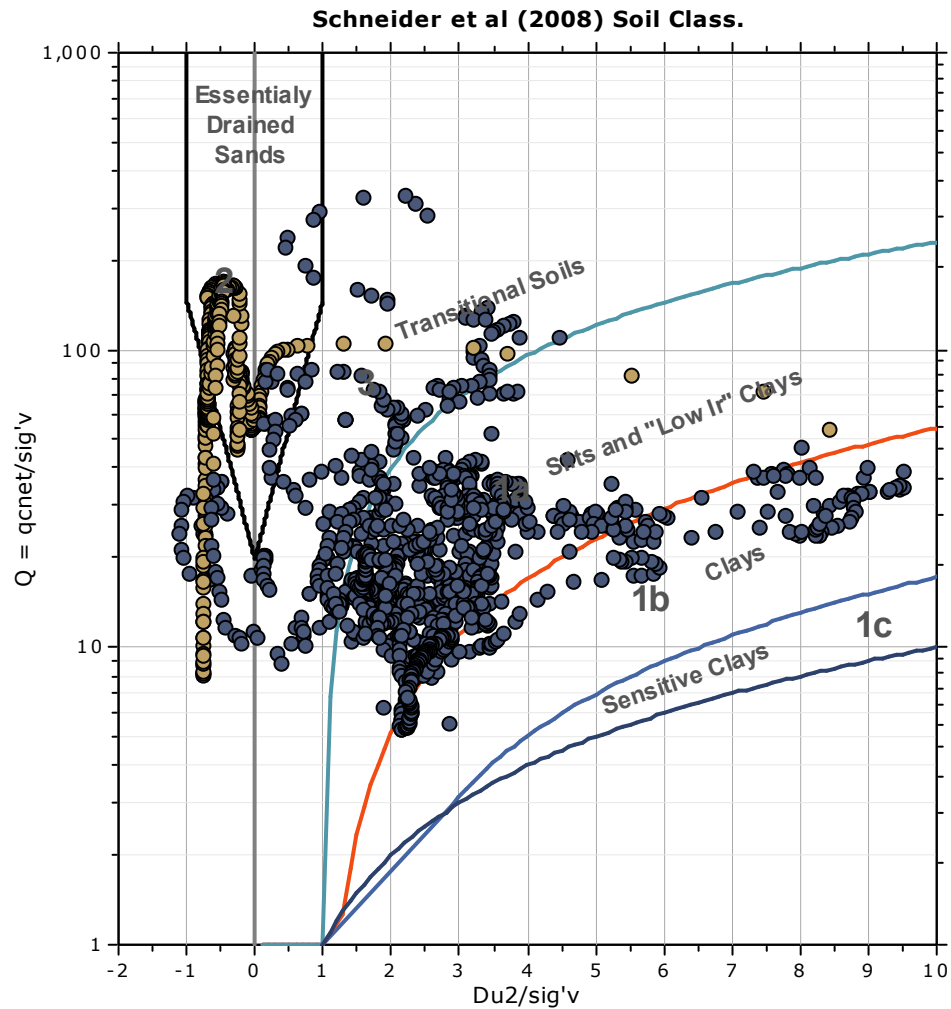
## SBT - Bq plots (normalized)

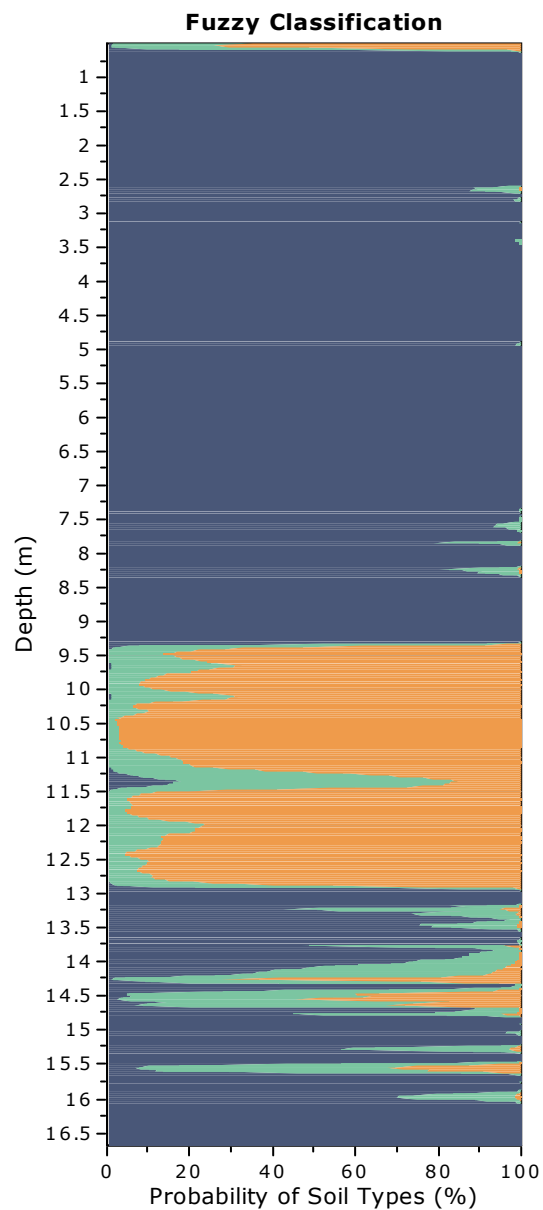
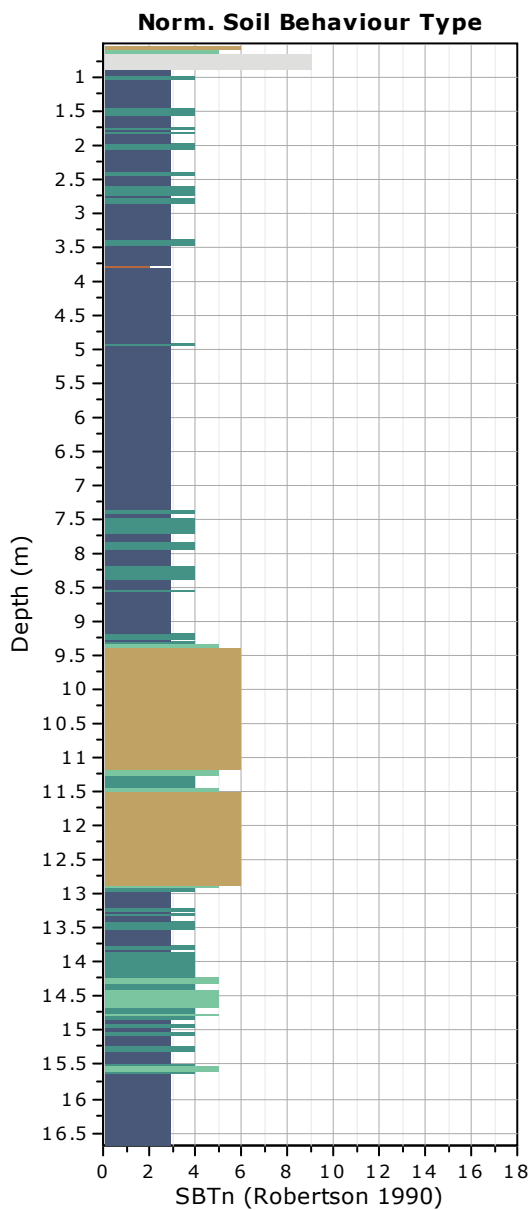


## SBTn legend

- |                           |                              |                                   |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravelly sand to sand          |
| 2. Organic material       | 5. Silty sand to sandy silt  | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty clay     | 6. Clean sand to silty sand  | 9. Very stiff fine grained        |

## Bq plots (Schneider)



**Fuzzy classification legend**

- Highly probable clayey soil
- Highly probable mixture soil
- Highly probable sandy soil



**Project:****Location:** Mirandola - Via Minelli

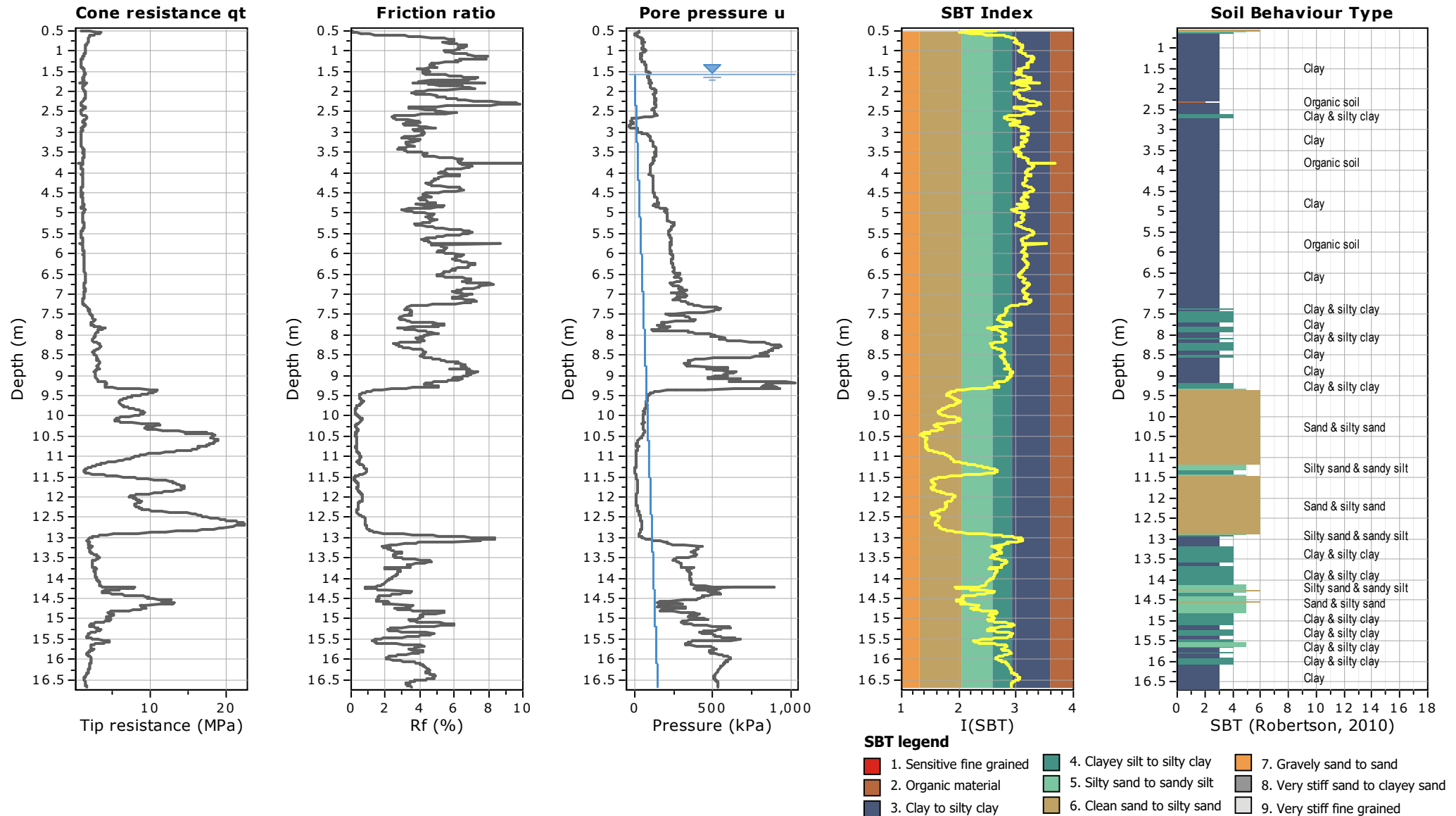
Total depth: 16.69 m, Date: 30/10/2023

Surface Elevation: 0.00 m

Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: PAGANI

Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA



**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna

Cell. 393 8376620

<http://www.roccocarbonella.it>**Project:****Location: Mirandola - Via Minelli****CPT: CPTU1**

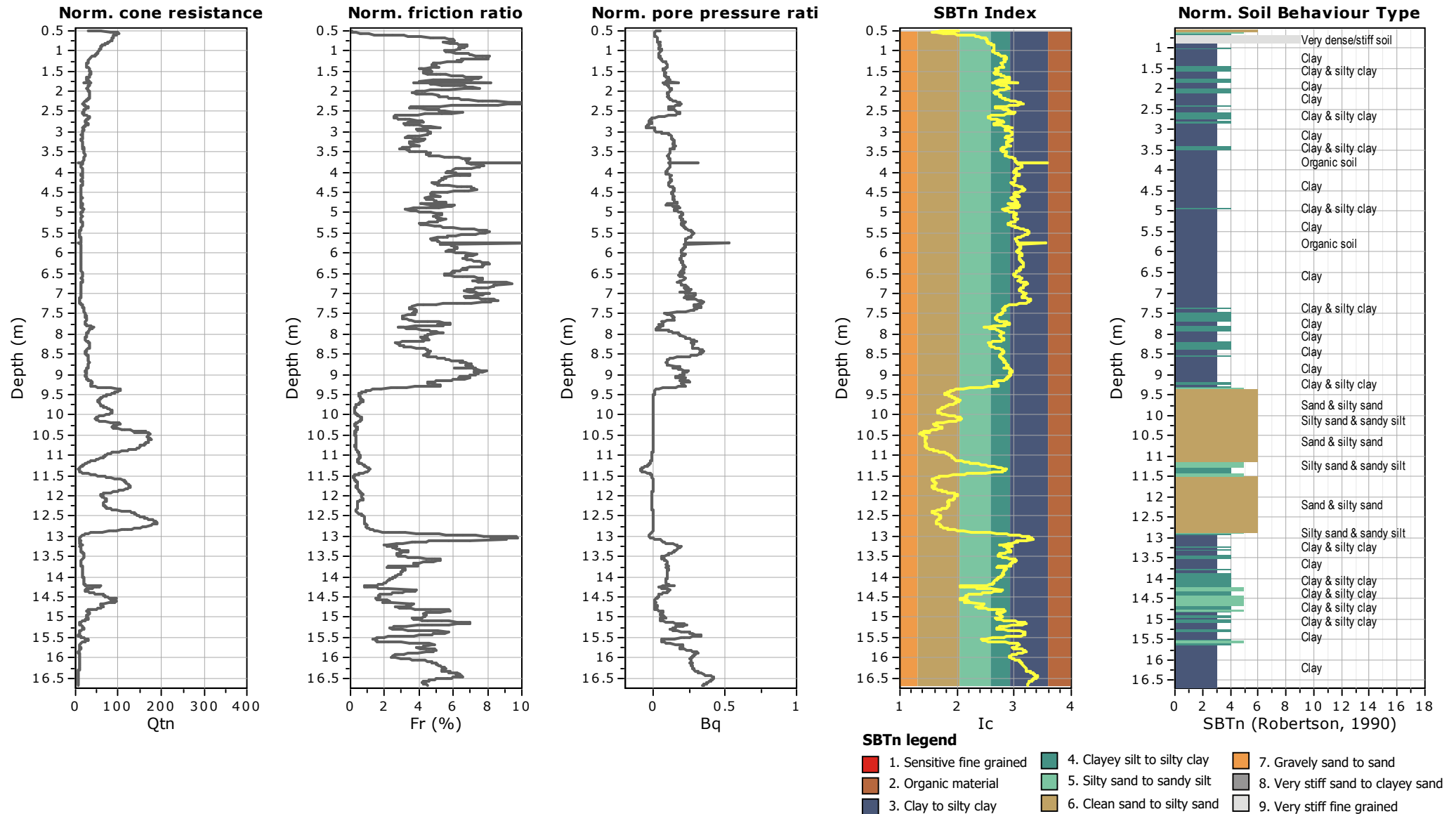
Total depth: 16.69 m, Date: 30/10/2023

Surface Elevation: 0.00 m

Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: PAGANI

Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA



**Project:****Location:** Mirandola - Via Minelli

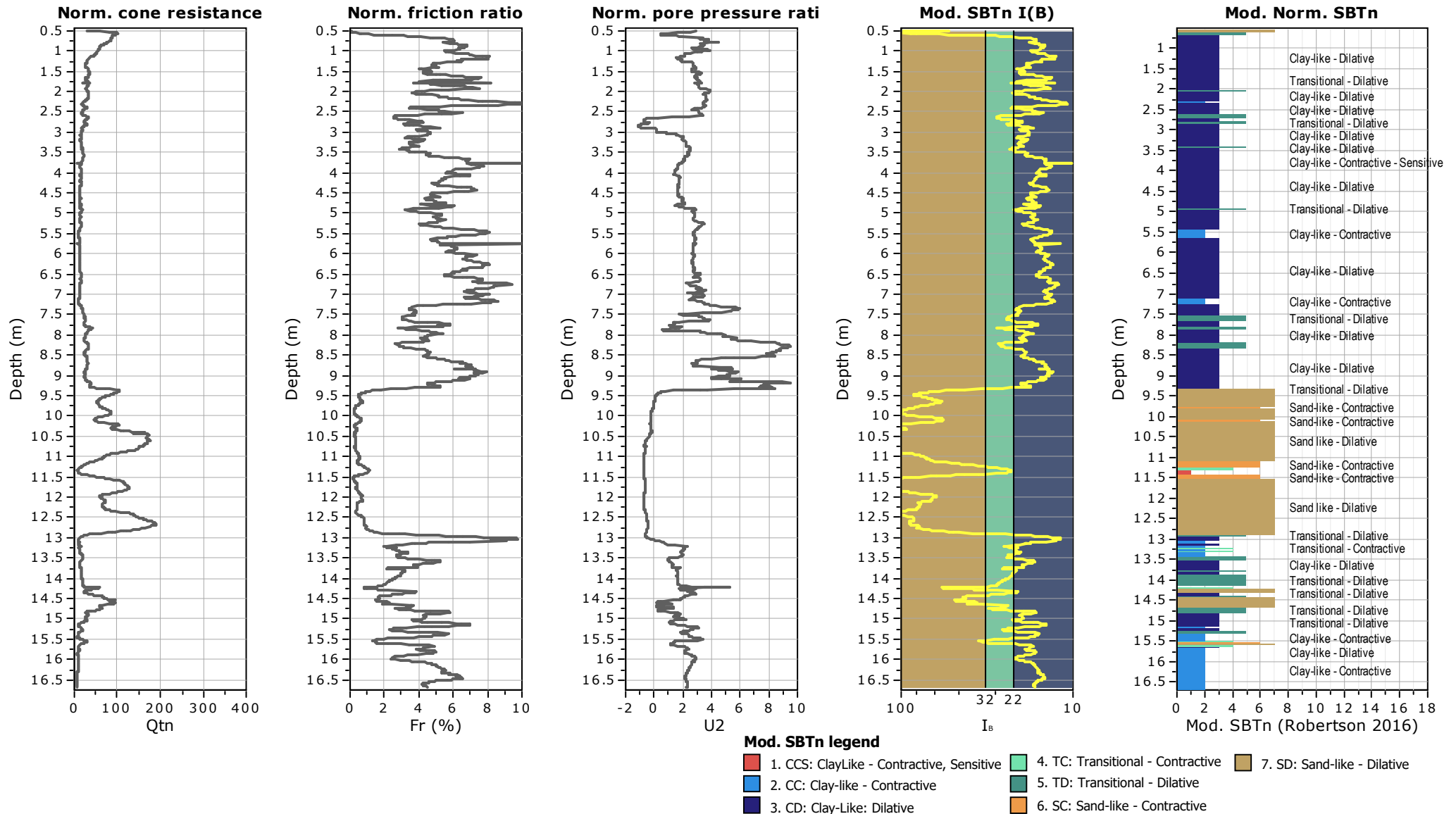
Total depth: 16.69 m, Date: 30/10/2023

Surface Elevation: 0.00 m

Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: PAGANI

Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA



**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna

Cell. 393 8376620

<http://www.roccocarbonella.it>**Project:****Location: Mirandola - Via Minelli****CPT: CPTU1**

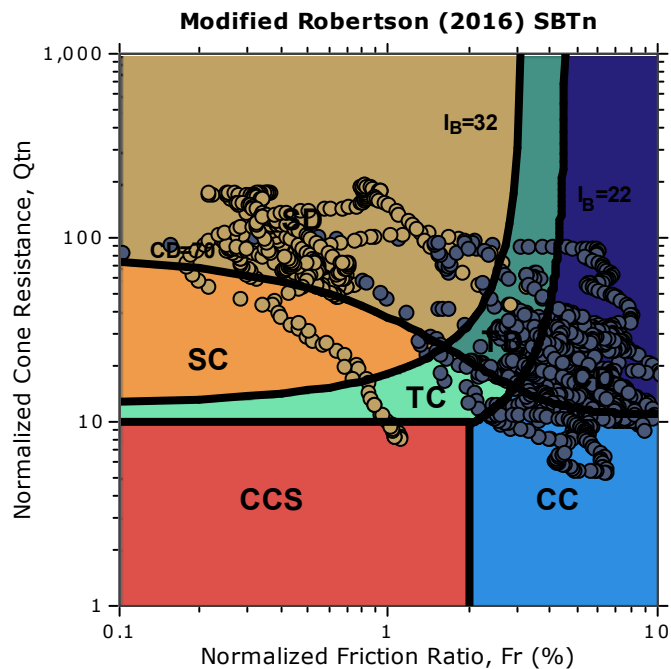
Total depth: 16.69 m, Date: 30/10/2023

Surface Elevation: 0.00 m

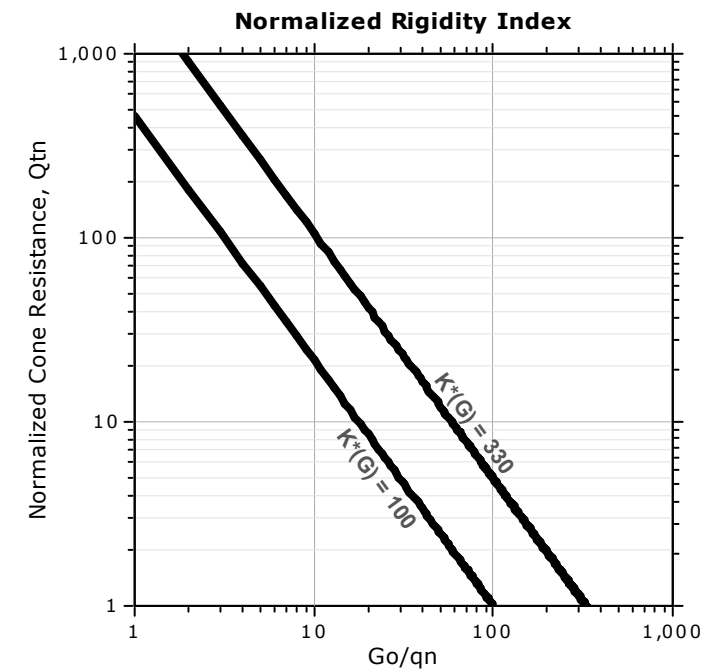
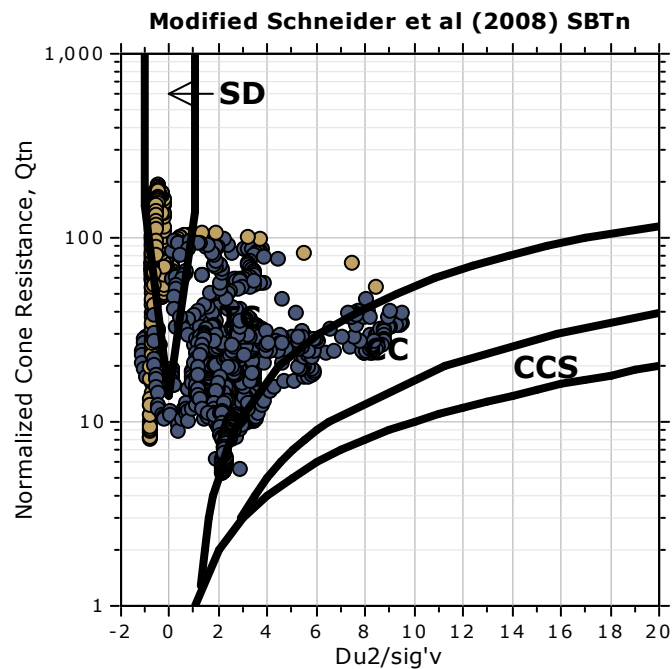
Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: PAGANI

Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA

**Updated SBTn plots**

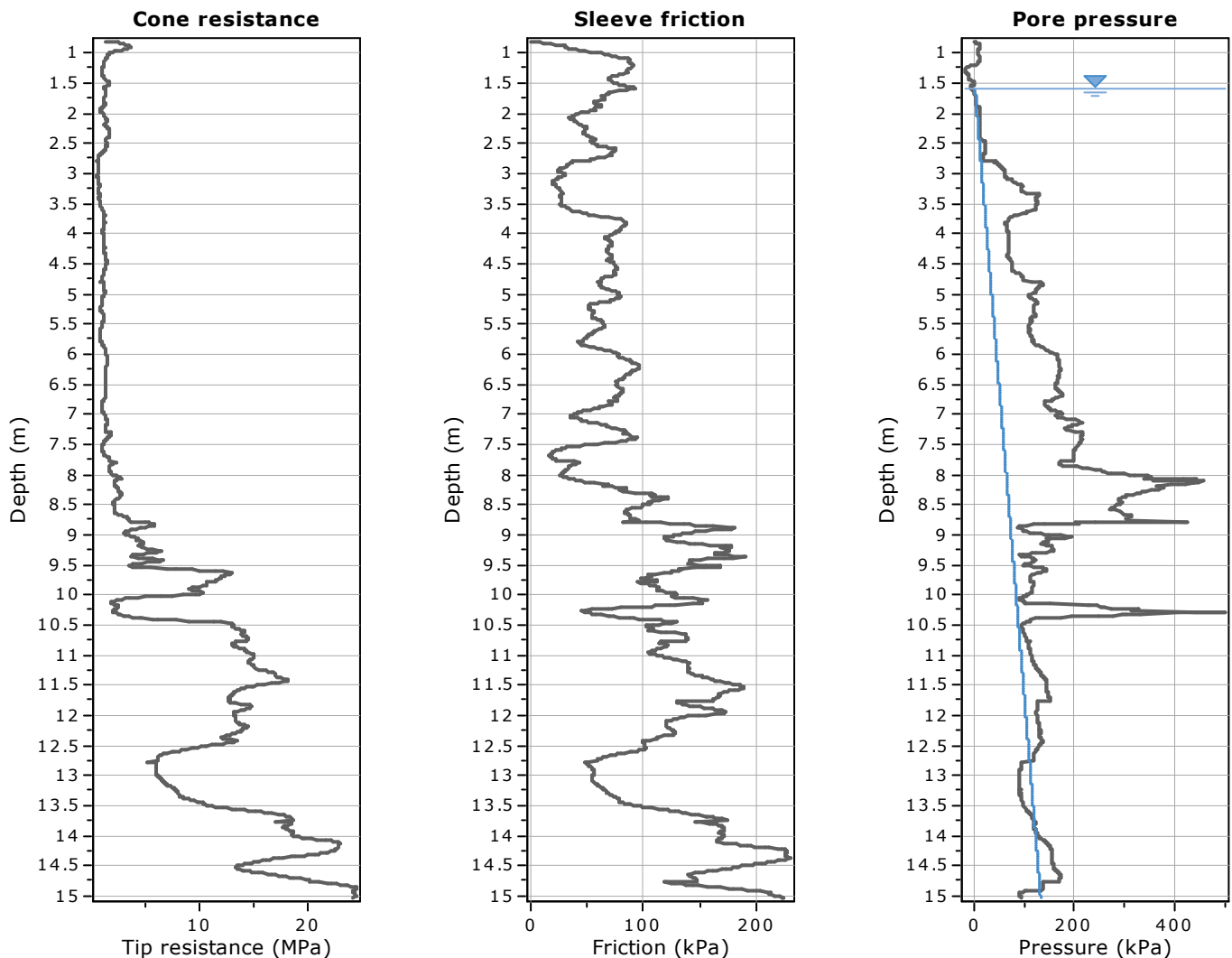
CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive  
 CC: Clay-like - Contractive  
 CD: Clay-like - Dilative  
 TC: Transitional - Contractive  
 TD: Transitional - Dilative  
 SC: Sand-like - Contractive  
 SD: Sand-like - Dilative



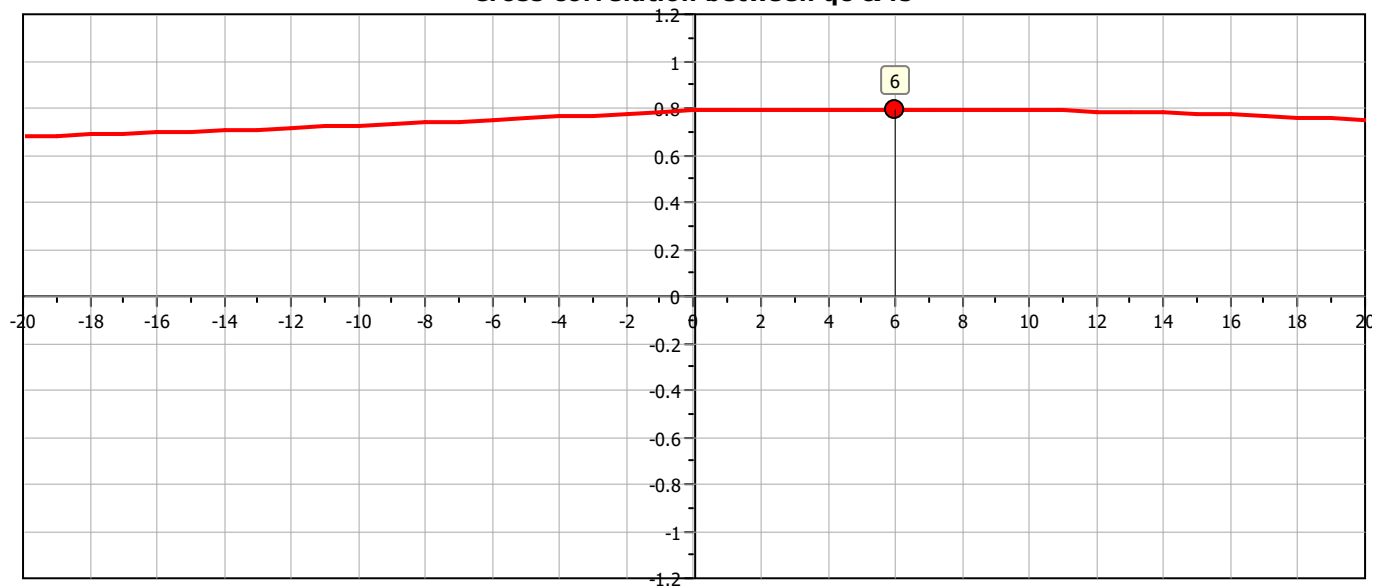
$K(G) > 330$ : Soils with significant microstructure  
 (e.g. age/cementation)

## Project:

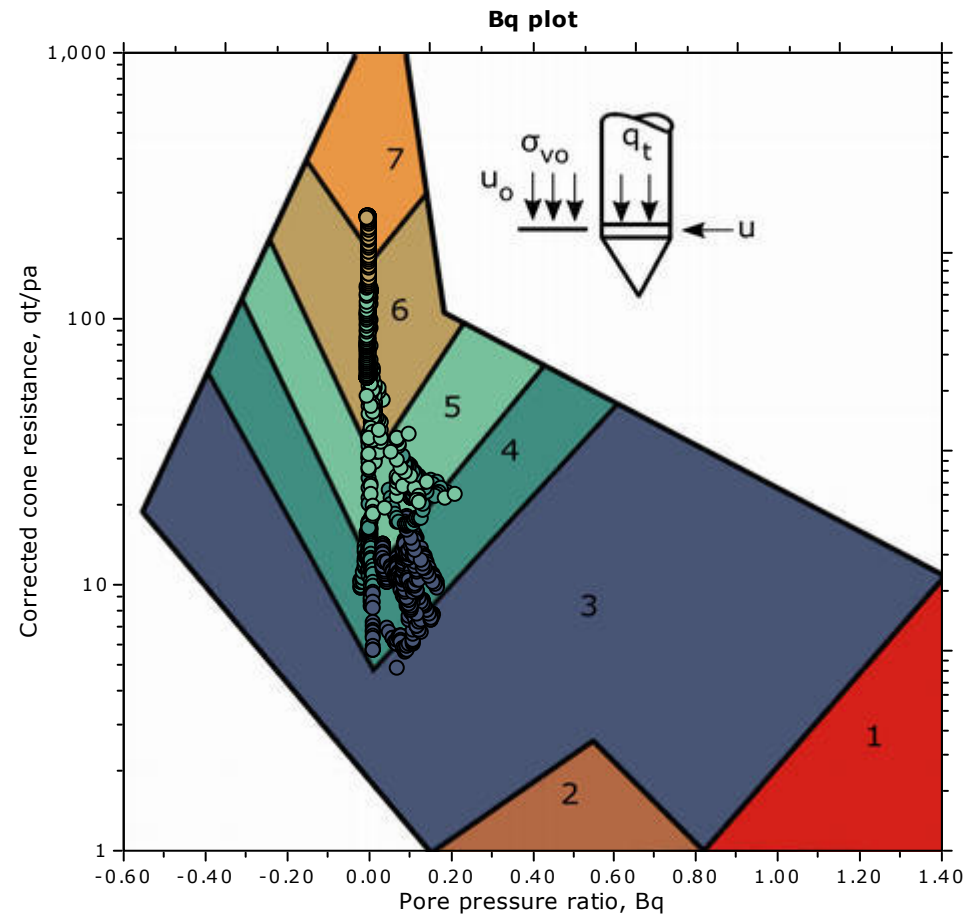
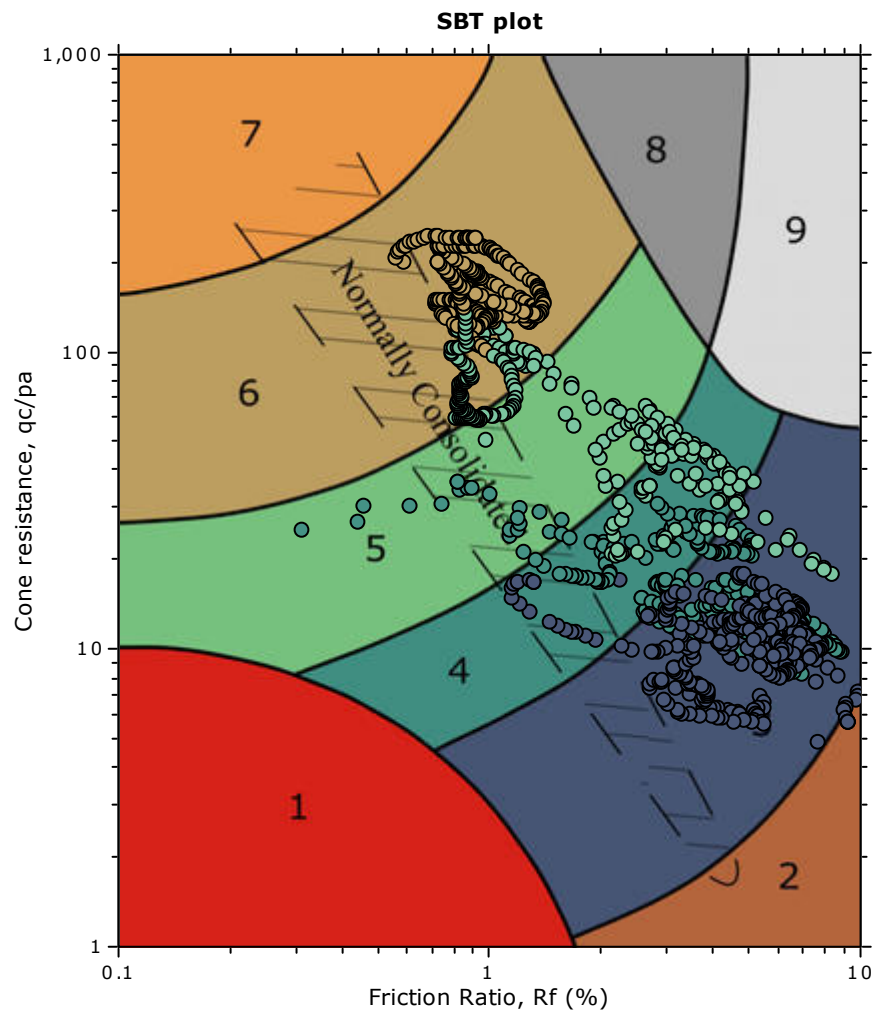
Location: Mirandola - Via Minelli



The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw  $q_c$  and  $f_s$  values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between  $q_c$  &  $f_s$ 

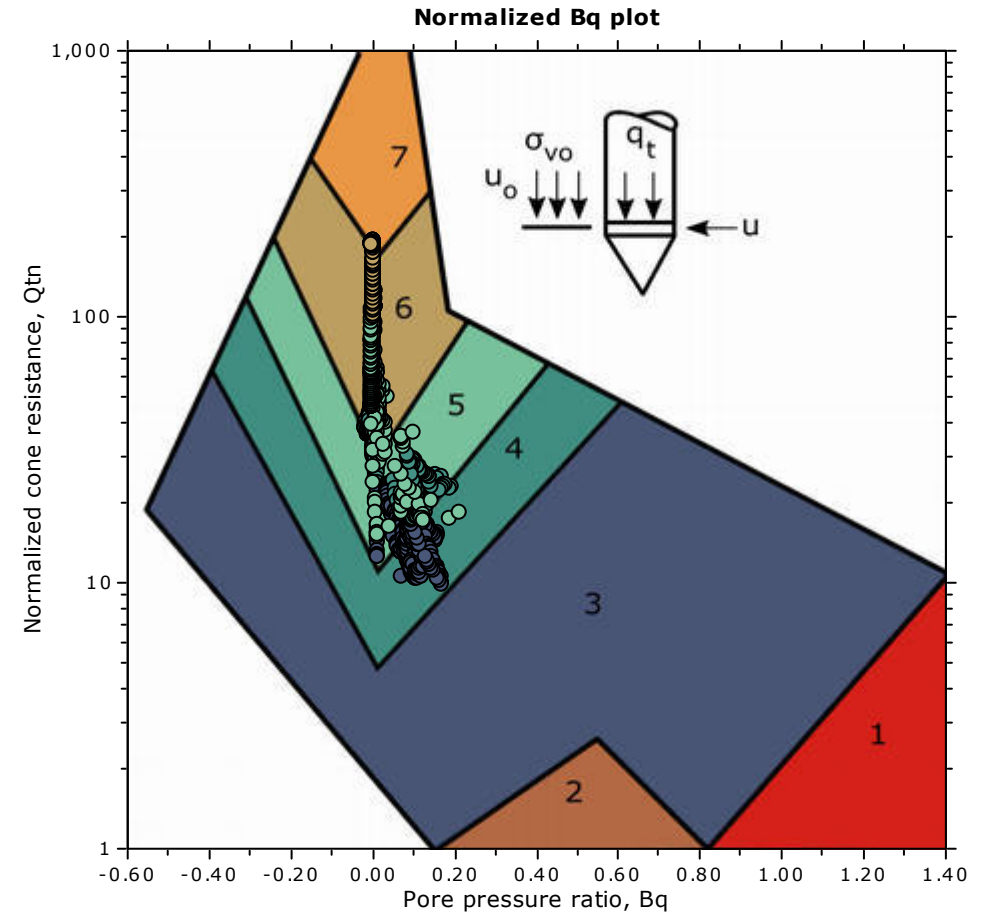
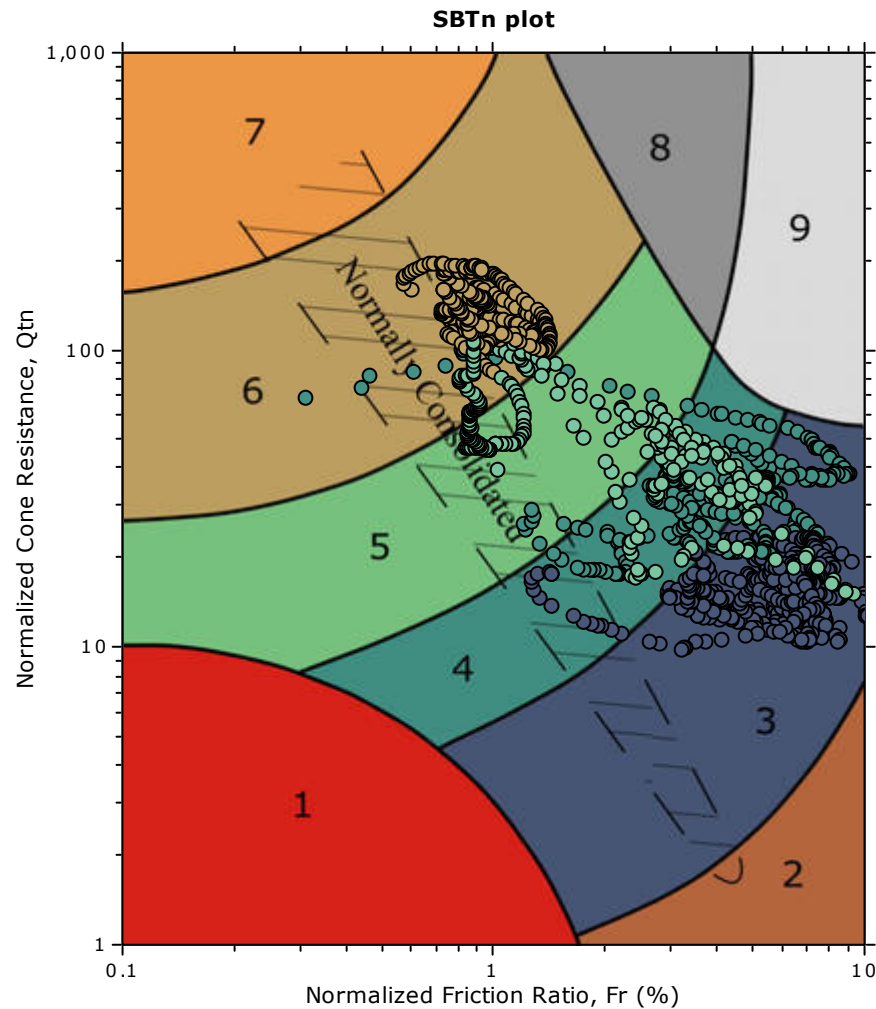
## SBT - Bq plots



## SBT legend

- |                           |                              |                                   |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravelly sand to sand          |
| 2. Organic material       | 5. Silty sand to sandy silt  | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty clay     | 6. Clean sand to silty sand  | 9. Very stiff fine grained        |

## SBT - Bq plots (normalized)

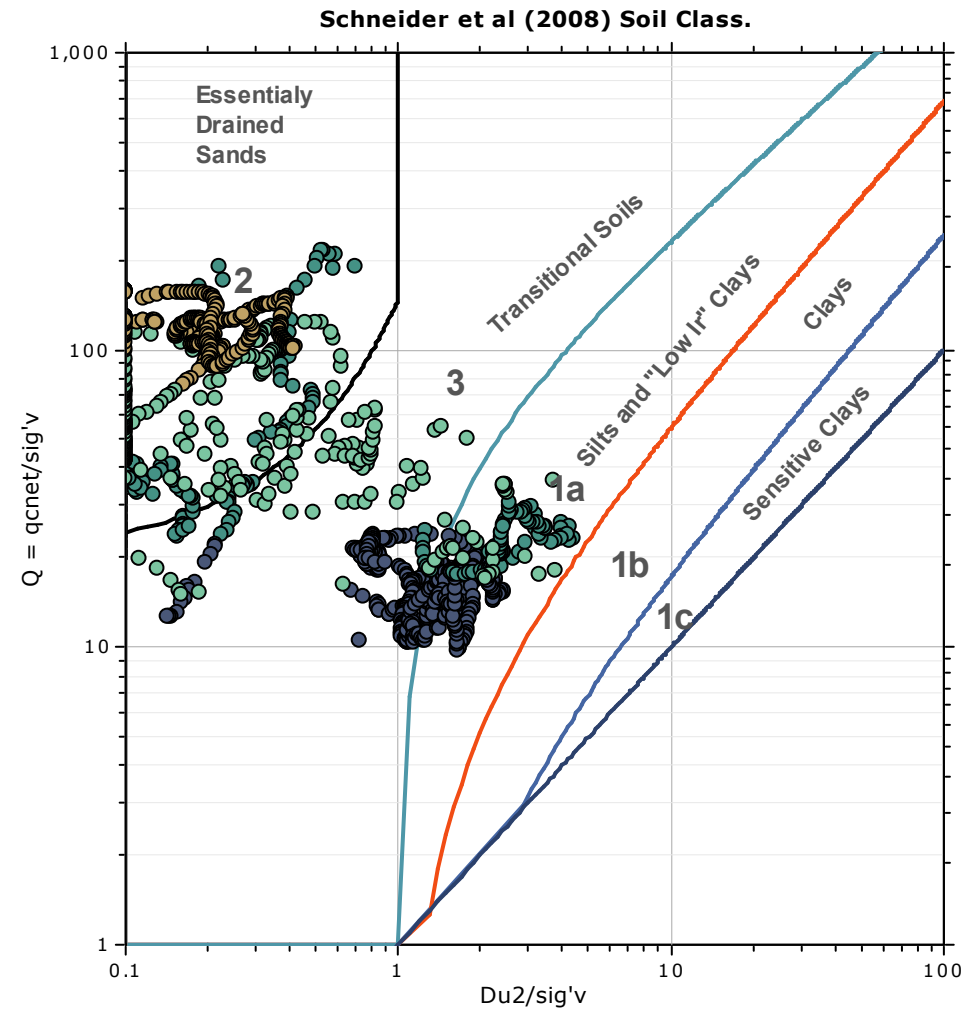
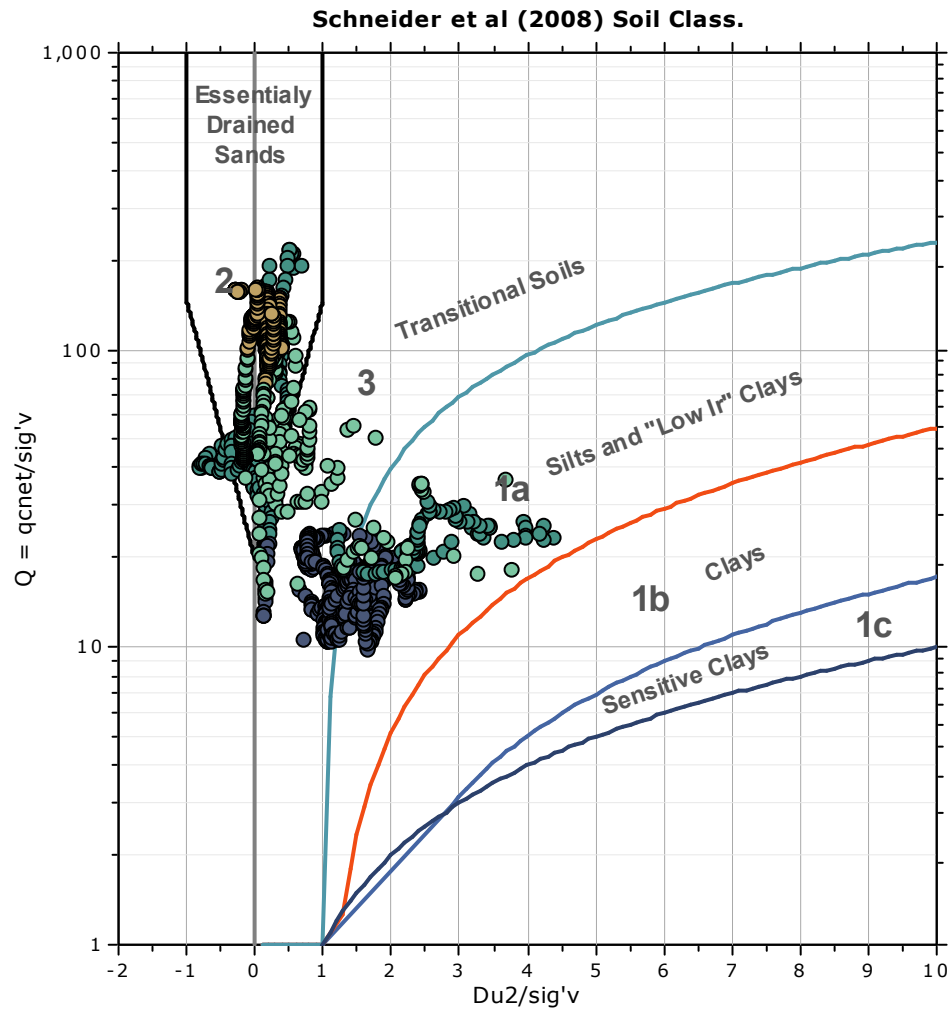


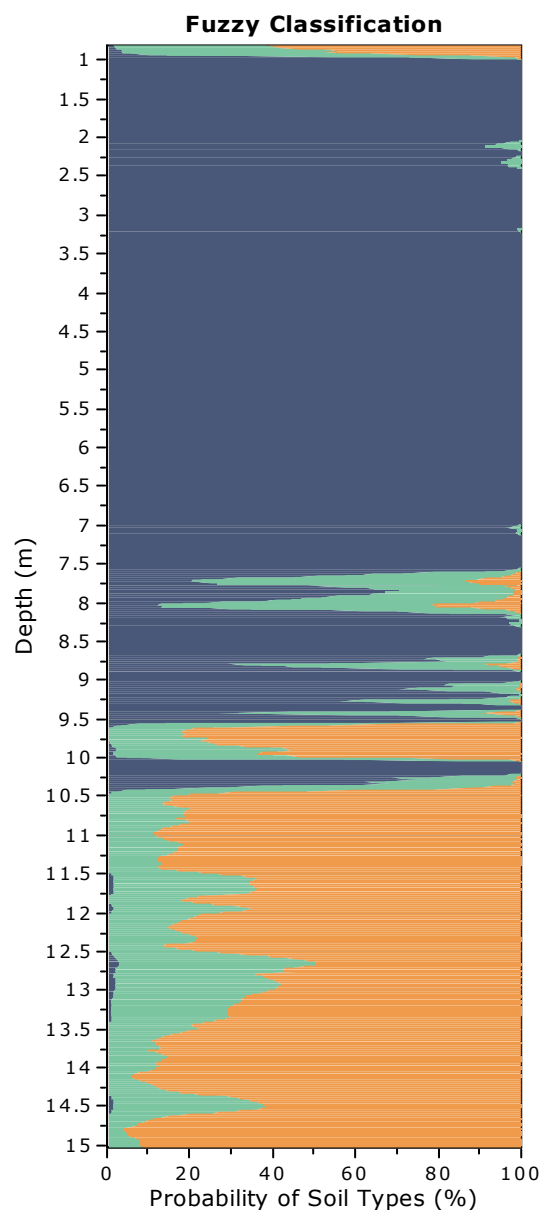
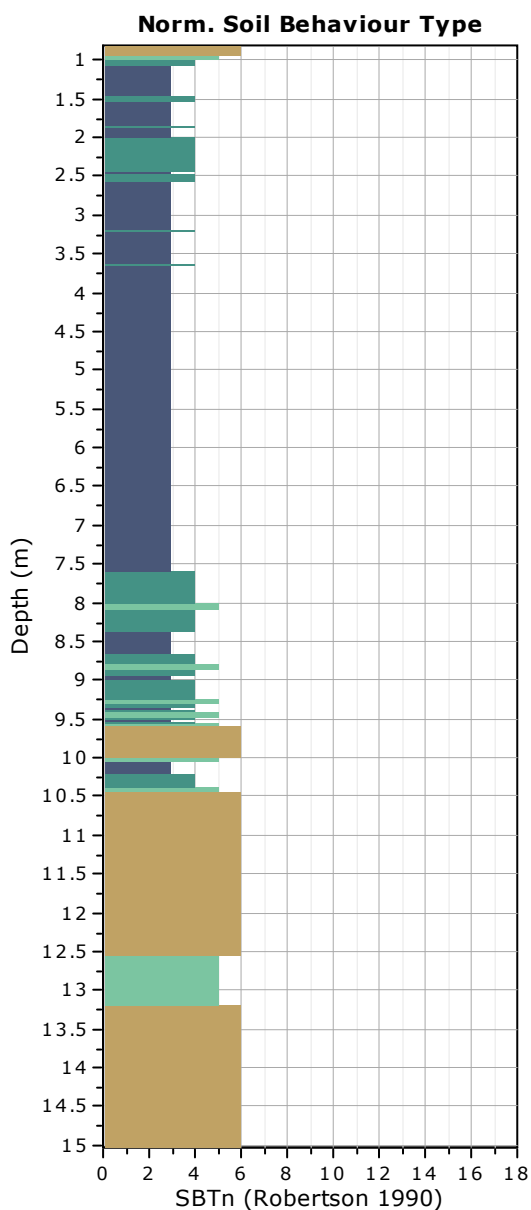
## SBTn legend

- |                           |                              |                                   |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravelly sand to sand          |
| 2. Organic material       | 5. Silty sand to sandy silt  | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty clay     | 6. Clean sand to silty sand  | 9. Very stiff fine grained        |



## Bq plots (Schneider)



**Fuzzy classification legend**

- Highly probable clayey soil
- Highly probable mixture soil
- Highly probable sandy soil

**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna

Cell. 393 8376620

<http://www.roccocarbonella.it>**Project:****Location: Mirandola - Via Minelli****CPT: CPTU2**

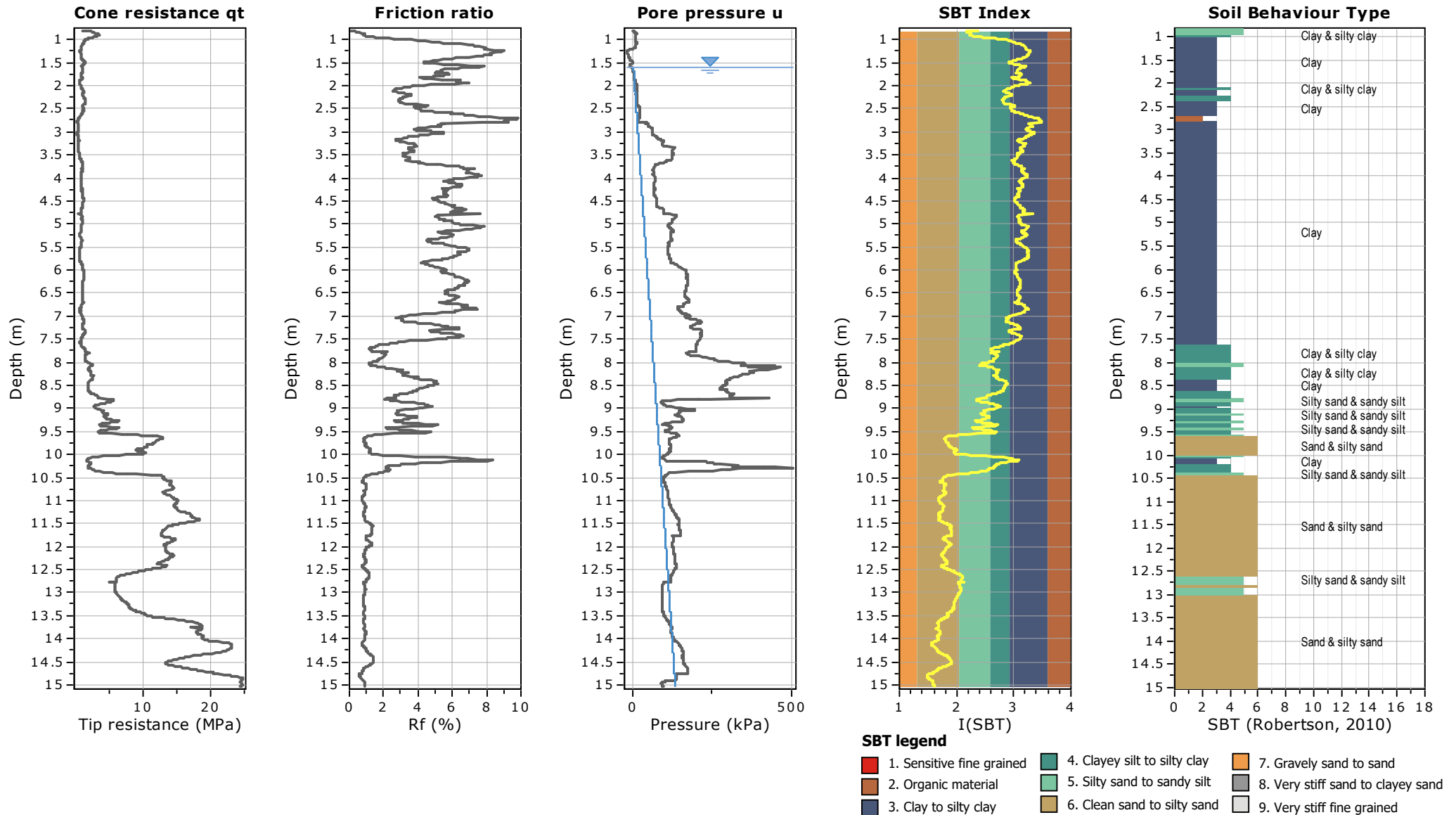
Total depth: 15.03 m, Date: 30/10/2023

Surface Elevation: 0.00 m

Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: PAGANI

Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA



**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna

Cell. 393 8376620

<http://www.roccocarbonella.it>**Project:****Location: Mirandola - Via Minelli****CPT: CPTU2**

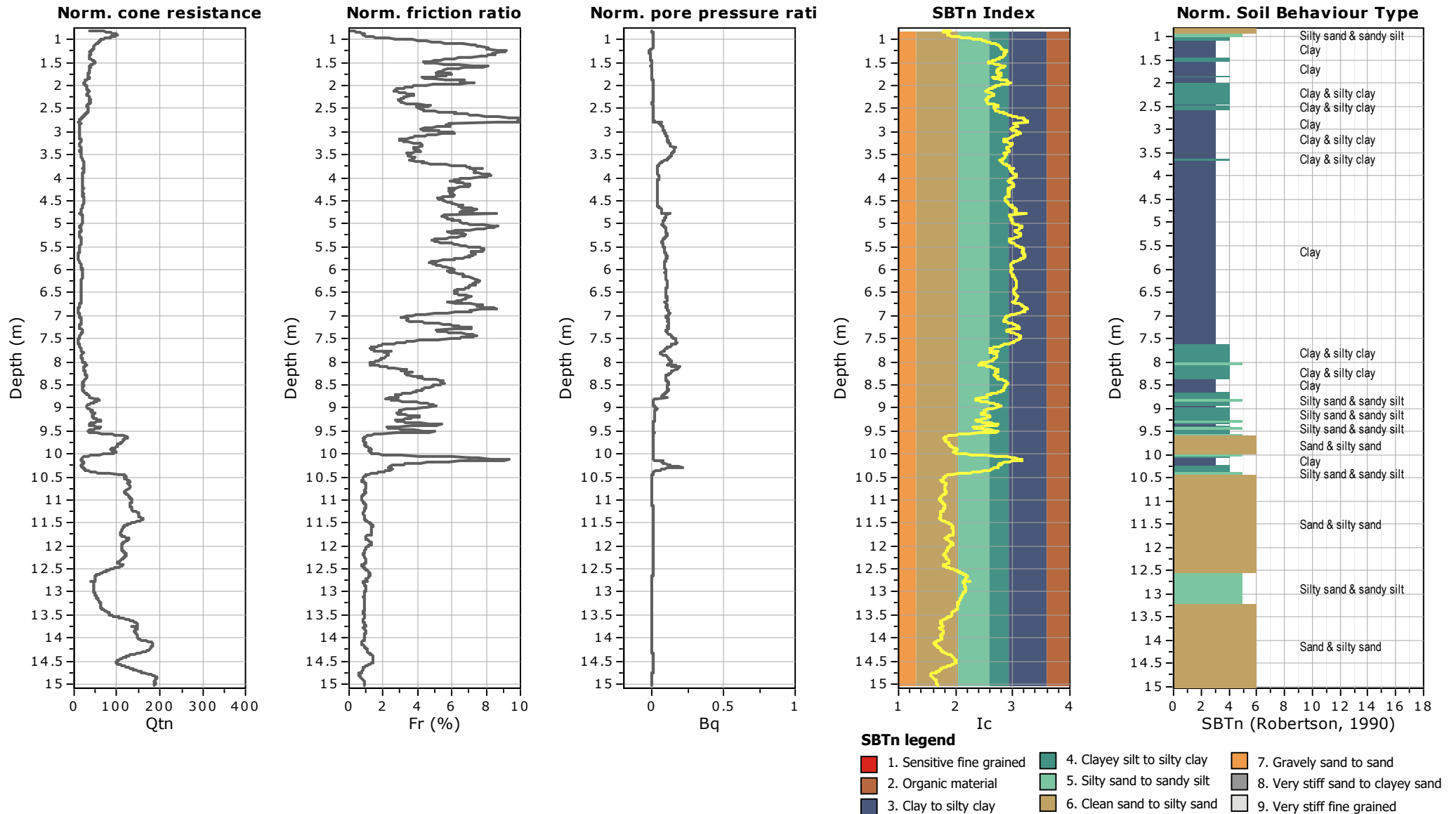
Total depth: 15.03 m, Date: 30/10/2023

Surface Elevation: 0.00 m

Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: PAGANI

Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA



**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna

Cell. 393 8376620

<http://www.roccocarbonella.it>**Project:****Location: Mirandola - Via Minelli****CPT: CPTU2**

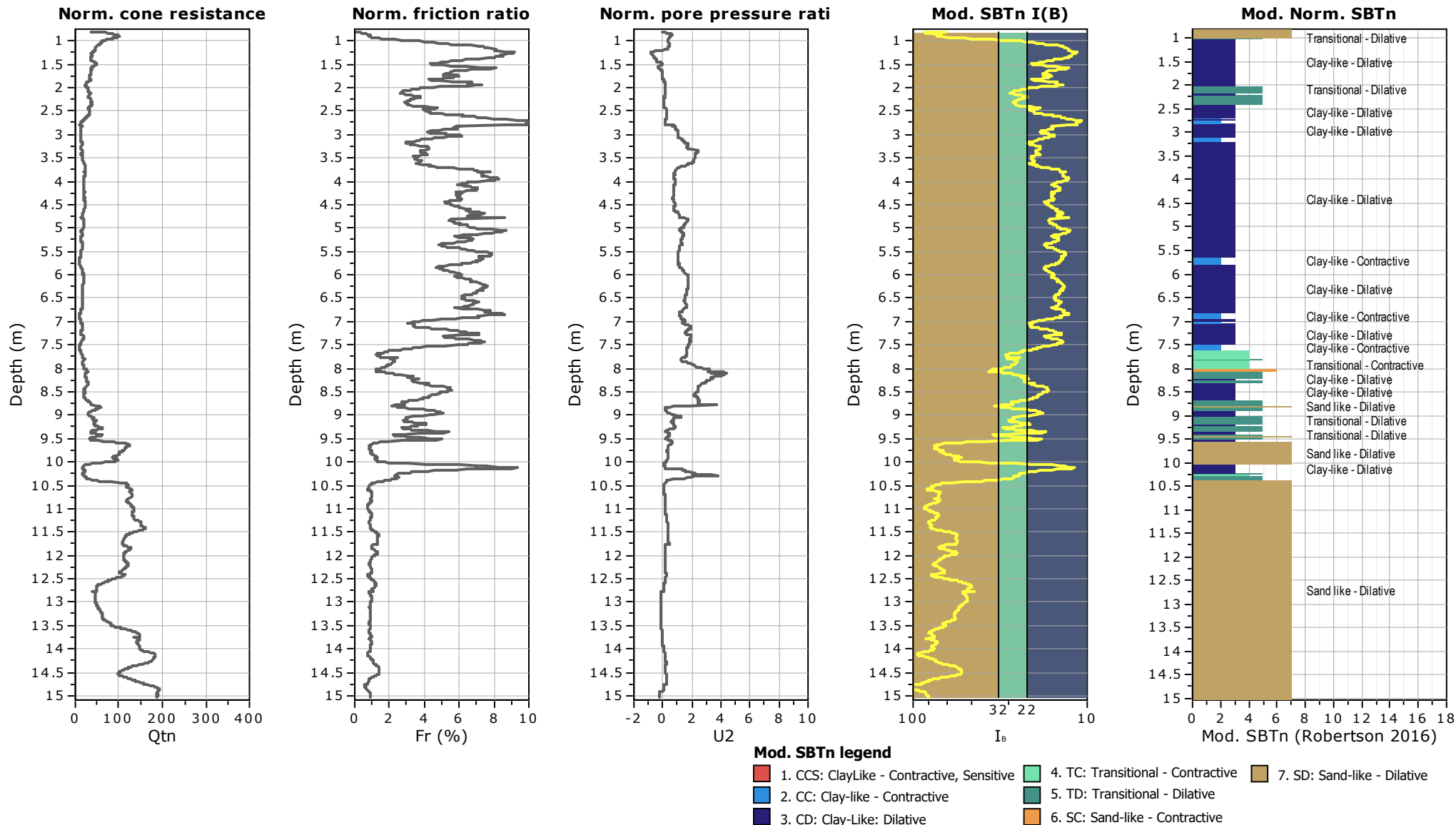
Total depth: 15.03 m, Date: 30/10/2023

Surface Elevation: 0.00 m

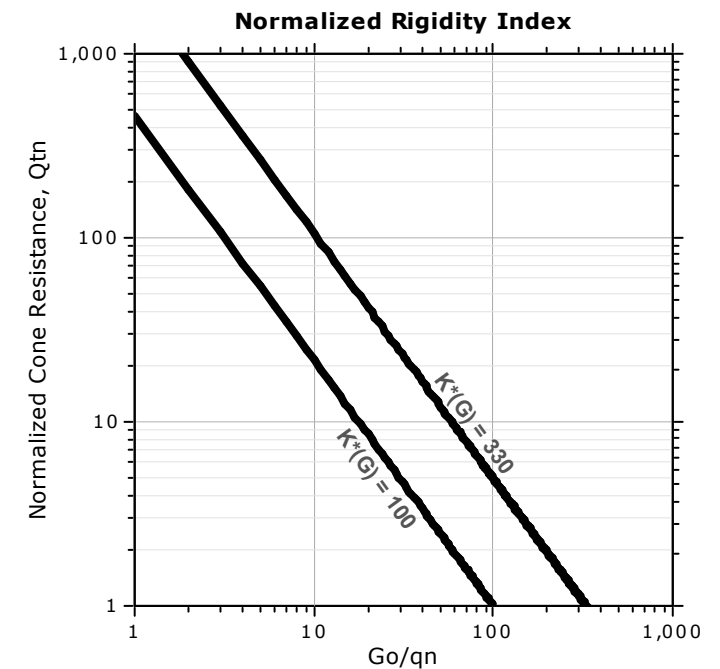
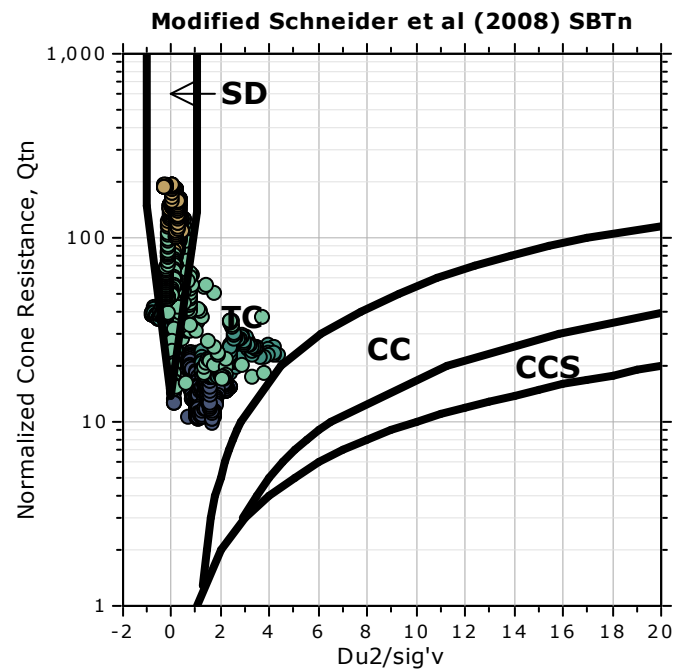
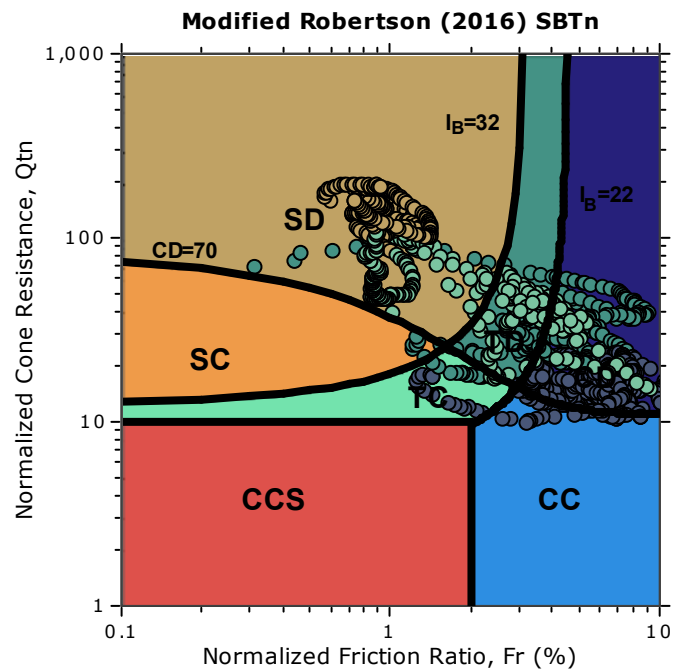
Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: PAGANI

Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA



## Updated SBTn plots



CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive  
 CC: Clay-like - Contractive  
 CD: Clay-like - Dilative  
 TC: Transitional - Contractive  
 TD: Transitional - Dilative  
 SC: Sand-like - Contractive  
 SD: Sand-like - Dilative

$K(G) > 330$ : Soils with significant microstructure  
 (e.g. age/cementation)

Presented below is a list of formulas used for the estimation of various soil properties. The formulas are presented in SI unit system and assume that all components are expressed in the same units.

**:: Unit Weight,  $g$  (kN/m<sup>3</sup>) ::**

$$g = g_w \cdot \left( 0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \right)$$

where  $g_w$  = water unit weight

**:: Permeability,  $k$  (m/s) ::**

$$I_c < 3.27 \text{ and } I_c > 1.00 \text{ then } k = 10^{0.952 - 3.04 \cdot I_c}$$

$$I_c \leq 4.00 \text{ and } I_c > 3.27 \text{ then } k = 10^{-4.52 - 1.37 \cdot I_c}$$

**::  $N_{SPT}$  (blows per 30 cm) ::**

$$N_{60} = \left( \frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

$$N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268 - 0.2817 \cdot I_c}}$$

**:: Young's Modulus,  $E_s$  (MPa) ::**

$$(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

(applicable only to  $I_c < I_{c\_cutoff}$ )

**:: Relative Density,  $Dr$  (%) ::**

$$100 \cdot \frac{\sqrt{Q_{tn}}}{k_{DR}} \quad \text{(applicable only to } SBT_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \text{ or } I_c < I_{c\_cutoff})$$

**:: State Parameter,  $\psi$  ::**

$$\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn,cs})$$

**:: Drained Friction Angle,  $\phi$  (°) ::**

$$\phi = \phi'_{cv} + 15.94 \cdot \log(Q_{tn,cs}) - 26.88$$

(applicable only to  $SBT_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8$  or  $I_c < I_{c\_cutoff}$ )

**:: 1-D constrained modulus,  $M$  (MPa) ::**

If  $I_c > 2.20$

$\alpha = 14$  for  $Q_{tn} > 14$

$\alpha = Q_{tn}$  for  $Q_{tn} \leq 14$

$$M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$$

If  $I_c \geq 2.20$

$$M_{CPT} = 0.03 \cdot (q_t - \sigma_v) \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

**:: Small strain shear Modulus,  $G_0$  (MPa) ::**

$$G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$$

**:: Shear Wave Velocity,  $V_s$  (m/s) ::**

$$V_s = \left( \frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$$

**:: Undrained peak shear strength,  $S_u$  (kPa) ::**

$$N_{kt} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$$

$$S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{kt}}$$

(applicable only to  $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$  or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

**:: Remolded undrained shear strength,  $S_u(rem)$  (kPa) ::**

$$S_{u(rem)} = f_s \quad \text{(applicable only to } SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9 \text{ or } I_c > I_{c\_cutoff})$$

**:: Overconsolidation Ratio, OCR ::**

$$k_{OCR} = \left[ \frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.25} \text{ or user defined}$$

$$OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$$

(applicable only to  $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$  or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

**:: In situ Stress Ratio,  $K_0$  ::**

$$K_0 = (1 - \sin \phi') \cdot OCR^{\sin \phi'}$$

(applicable only to  $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$  or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

**:: Soil Sensitivity,  $S_t$  ::**

$$S_t = \frac{N_s}{F_r}$$

(applicable only to  $SBT_n: 1, 2, 3, 4 \text{ and } 9$  or  $I_c > I_{c\_cutoff}$ )

**:: Peak Friction Angle,  $\phi'$  (°) ::**

$$\phi' = 29.5^\circ \cdot B_q^{0.121} \cdot (0.256 + 0.336 \cdot B_q + \log Q_t)$$

(applicable for  $0.10 < B_q < 1.00$ )

**References**

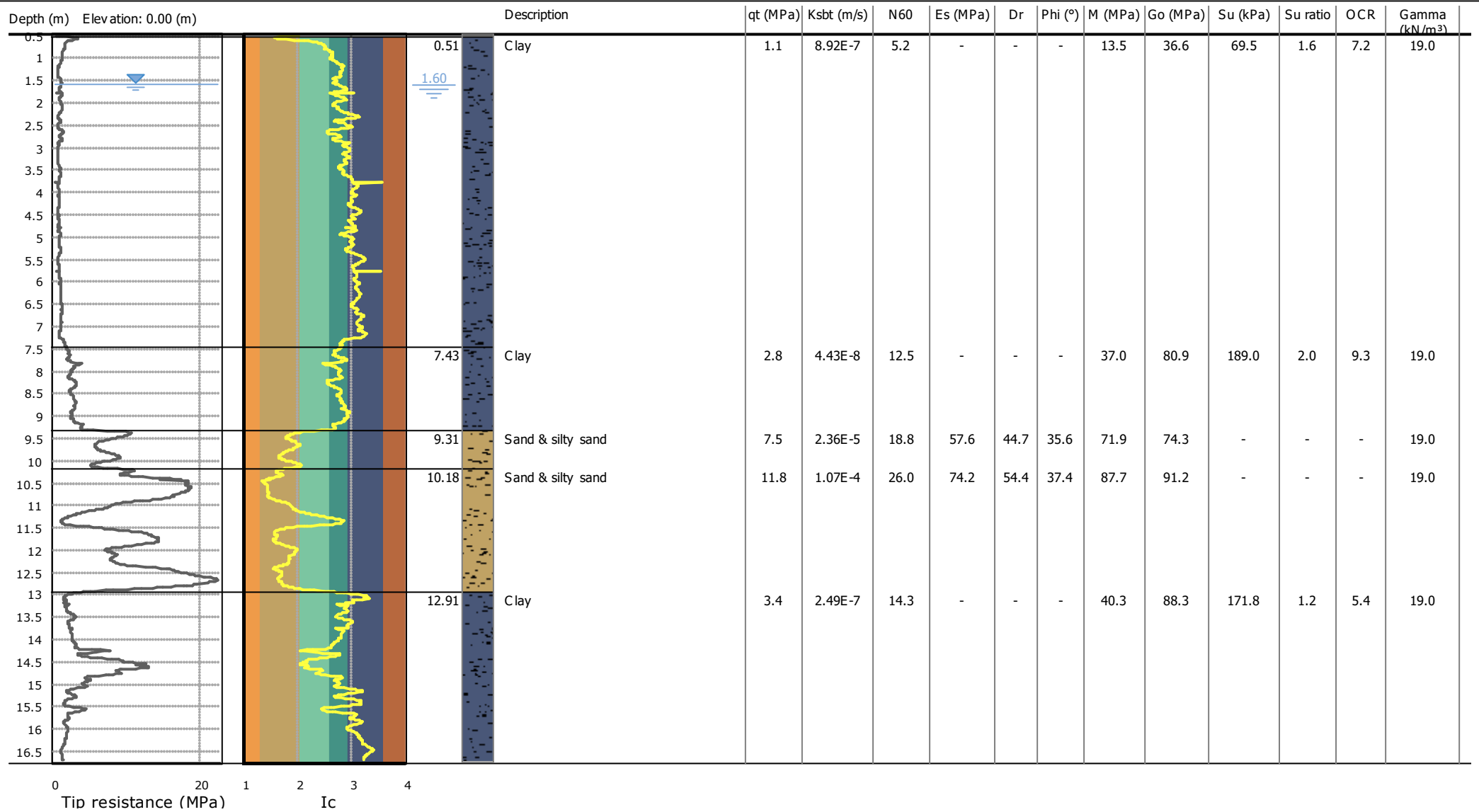
- Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 5<sup>th</sup> Edition, November 2012
- Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337–1355 (2009)
- N Barounis, J Philpot, Estimation of in-situ water content, void ratio, dry unit weight and porosity using CPT for saturated sands, Proc. 20th NZGS Geotechnical Symposium

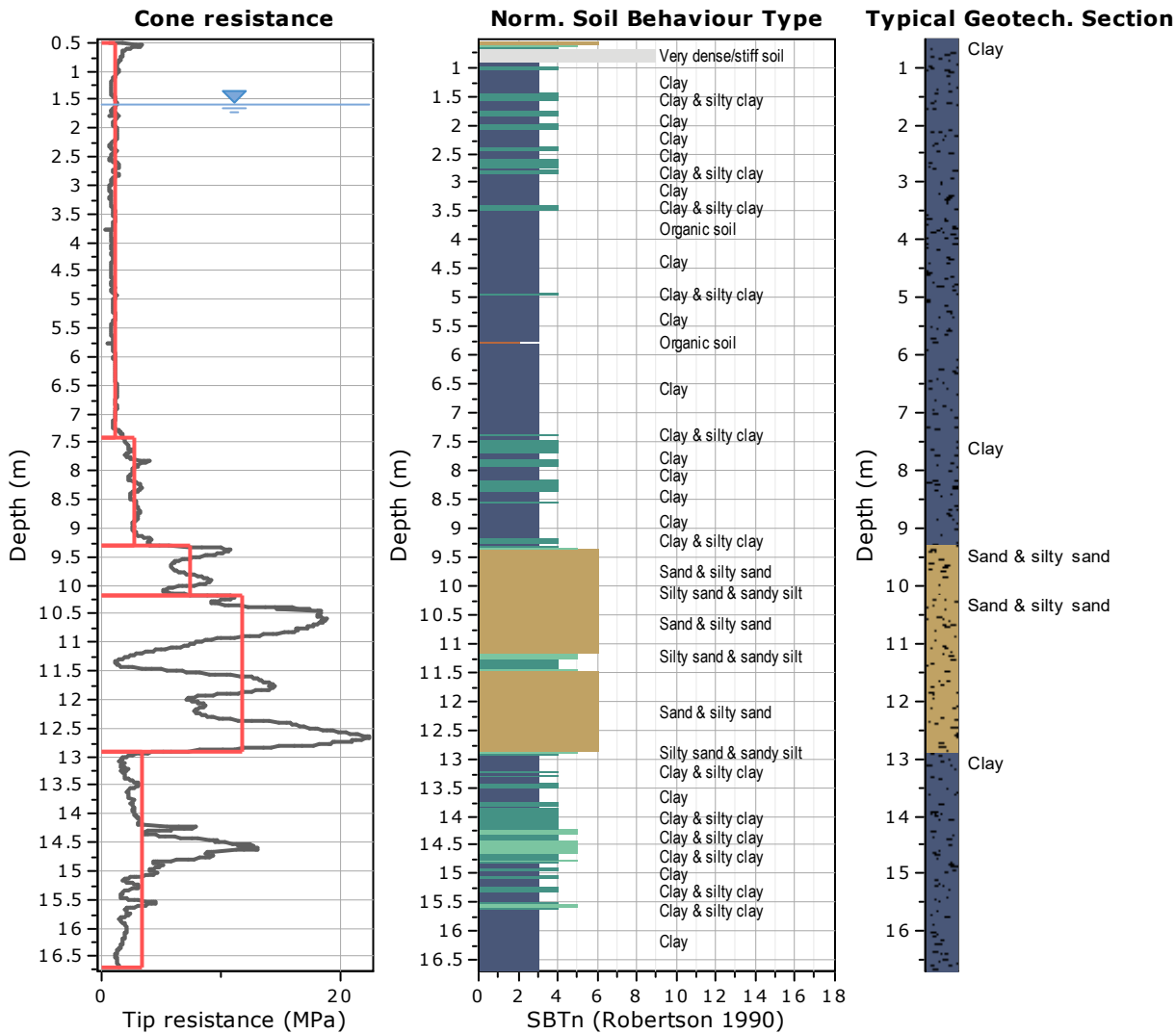


RDR SRL  
Via Toscana 119 - 40141 Bologna  
Cell. 393 8376620  
http://www.roccocarbonella.it

Project:  
Location: Mirandola - Via Minelli

CPT: CPTU1  
Total depth: 16.69 m, Date: 30/10/2023  
Surface Elevation: 0.00 m  
Coords: X:0.00, Y:0.00  
Cone Type: PAGANI  
Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA





### Tabular results

#### ::: Layer No: 1 :::

**Code:** Layer\_1     **Start depth:** 0.51 (m), **End depth:** 7.43 (m)

**Description:** Clay

#### Basic results

Total cone resistance:  $1.08 \pm 0.33$  MPa

Sleeve friction:  $54.21 \pm 17.75$  kPa

Ic:  $2.93 \pm 0.24$

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

#### Estimation results

Permeability:  $8.92E-07 \pm 9.92E-06$  m/s

N<sub>60</sub>:  $5.24 \pm 0.96$  blows

Es:  $0.00 \pm 0.00$  MPa

Dr (%):  $0.00 \pm 0.00$

$\phi$  (degrees):  $0.00 \pm 0.00$  °

Unit weight:  $19.00 \pm 0.00$  kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.:  $13.46 \pm 3.96$  MPa

Go:  $36.64 \pm 7.78$  MPa

Su:  $69.46 \pm 16.93$  kPa

Su ratio:  $1.55 \pm 1.04$

O.C.R.:  $7.18 \pm 4.80$

**::: Layer No: 2 :::****Code:** Layer\_2    **Start depth:** 7.43 (m), **End depth:** 9.31 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 2.80 ±0.55 MPa

Sleeve friction: 130.28 ±44.46 kPa

Ic: 2.77 ±0.11

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

**Estimation results**

Permeability: 4.43E-08 ±3.99E-08 m/s

N<sub>60</sub>: 12.46 ±2.14 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 37.04 ±7.59 MPa

Go: 80.94 ±14.44 MPa

Su: 188.96 ±38.70 kPa

Su ratio: 2.02 ±0.36

O.C.R.: 9.34 ±1.65

**::: Layer No: 3 :::****Code:** Layer\_3    **Start depth:** 9.31 (m), **End depth:** 10.18 (m)**Description:** Sand & silty sand**Basic results**

Total cone resistance: 7.47 ±1.65 MPa

Sleeve friction: 48.84 ±44.18 kPa

Ic: 1.91 ±0.16

SBT<sub>n</sub>: 6

SBTn description: Sand &amp; silty sand

**Estimation results**

Permeability: 2.36E-05 ±2.20E-05 m/s

N<sub>60</sub>: 18.83 ±3.82 blows

Es: 57.64 ±13.69 MPa

Dr (%): 44.68 ±5.14

φ (degrees): 35.60 ±1.43 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 71.87 ±16.09 MPa

Go: 74.28 ±18.09 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**::: Layer No: 4 :::****Code:** Layer\_4    **Start depth:** 10.18 (m), **End depth:** 12.91 (m)**Description:** Sand & silty sand**Basic results**

Total cone resistance: 11.79 ±5.64 MPa

Sleeve friction: 61.08 ±49.69 kPa

Ic: 1.80 ±0.33

SBT<sub>n</sub>: 6

SBTn description: Sand &amp; silty sand

**Estimation results**

Permeability: 1.07E-04 ±1.37E-04 m/s

N<sub>60</sub>: 25.96 ±10.44 blows

Es: 74.20 ±23.41 MPa

Dr (%): 54.35 ±12.73

φ (degrees): 37.42 ±2.53 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 87.67 ±34.70 MPa

Go: 91.19 ±32.08 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**::: Layer No: 5 :::****Code:** Layer\_5    **Start depth:** 12.91 (m), **End depth:** 16.69 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 3.38 ±2.58 MPa

Sleeve friction: 99.37 ±62.95 kPa

Ic: 2.87 ±0.32

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

**Estimation results**

Permeability: 2.49E-07 ±7.92E-07 m/s

N<sub>60</sub>: 14.34 ±7.01 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 40.31 ±36.96 MPa

Go: 88.34 ±29.85 MPa

Su: 171.76 ±108.04 kPa

Su ratio: 1.16 ±0.77

O.C.R.: 5.37 ±3.55

**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna

Cell. 393 8376620

<http://www.roccocarbonella.it>**Project:****Location: Mirandola - Via Minelli****CPT: CPTU1**

Total depth: 16.69 m, Date: 30/10/2023

Surface Elevation: 0.00 m

Coords: X:0.00, Y:0.00

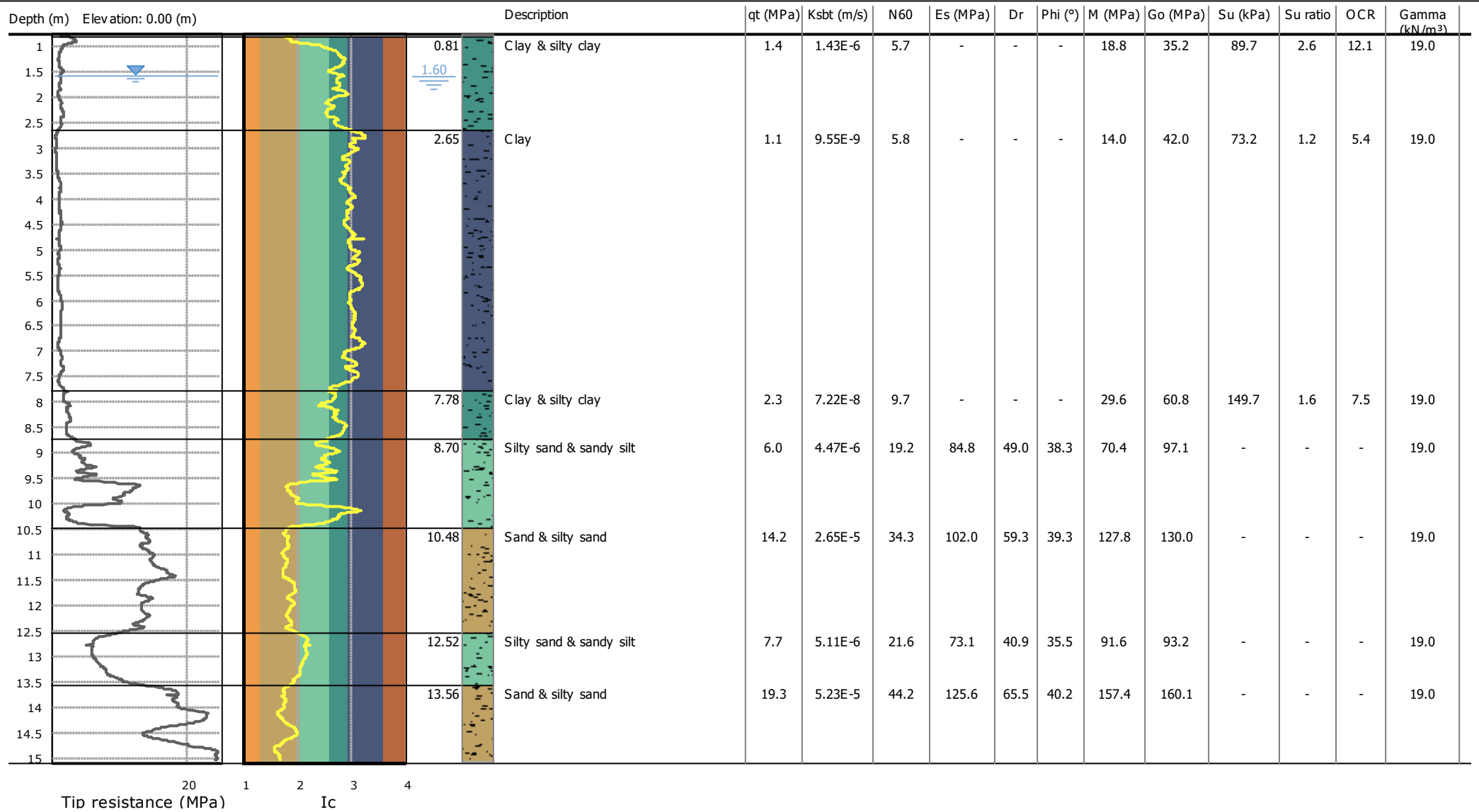
Cone Type: PAGANI

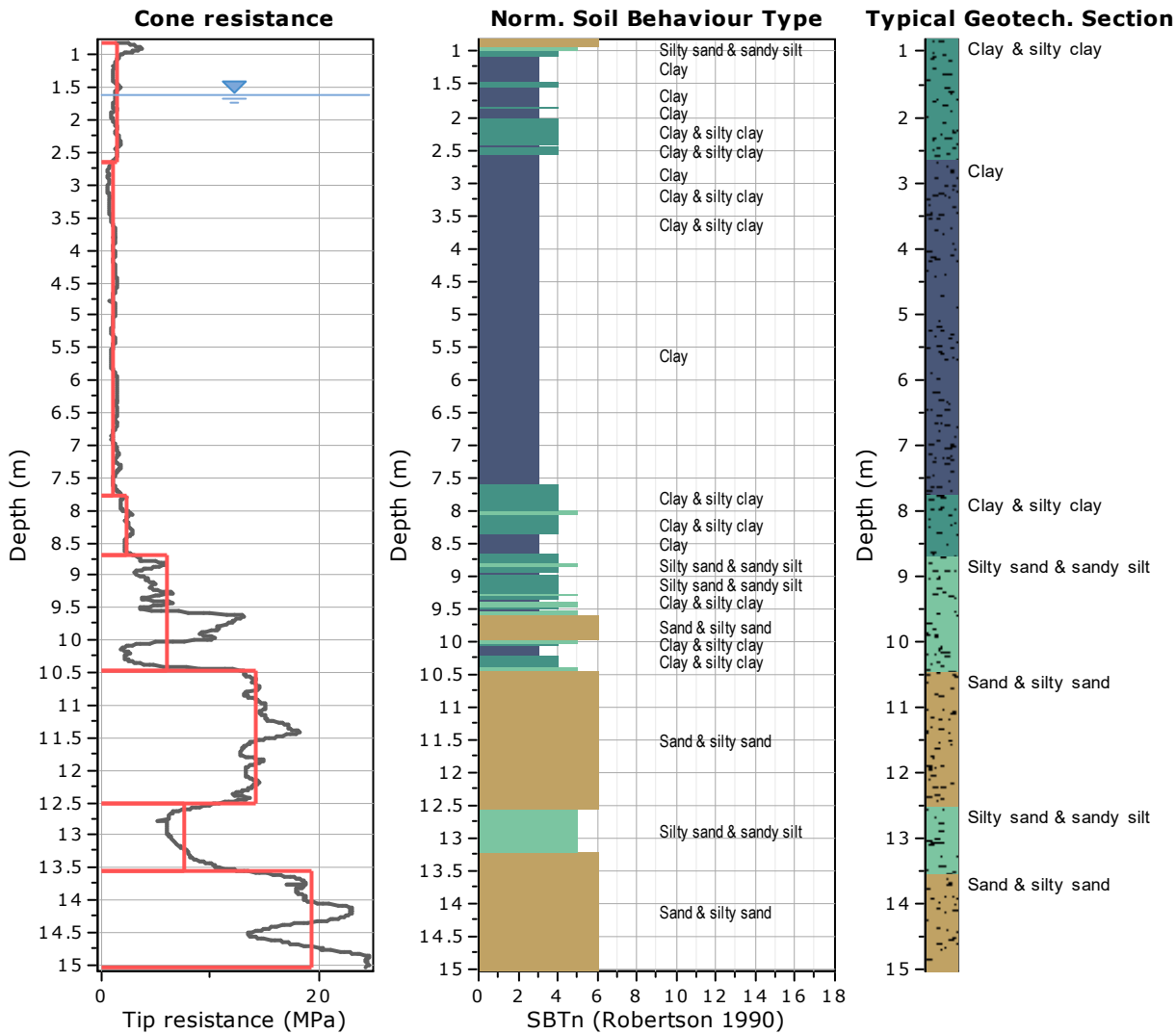
Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA

**Summary table of mean values**

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub> (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
0.51	6.92	8.92E-07	5.2	0.0	0.0	0.0	13.5	36.6	69.5	1.6	7.2	19.0
7.43		(±9.92E-06)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.0)	(±7.8)	(±16.9)	(±1.0)	(±4.8)	(±0.0)
7.43	1.88	4.43E-08	12.5	0.0	0.0	0.0	37.0	80.9	189.0	2.0	9.3	19.0
9.31		(±3.99E-08)	(±2.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.6)	(±14.4)	(±38.7)	(±0.4)	(±1.6)	(±0.0)
9.31	0.87	2.36E-05	18.8	57.6	44.7	35.6	71.9	74.3	0.0	0.0	0.0	19.0
10.18		(±2.20E-05)	(±3.8)	(±13.7)	(±5.1)	(±1.4)	(±16.1)	(±18.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)
10.18	2.73	1.07E-04	26.0	74.2	54.4	37.4	87.7	91.2	0.0	0.0	0.0	19.0
12.91		(±1.37E-04)	(±10.4)	(±23.4)	(±12.7)	(±2.5)	(±34.7)	(±32.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)
12.91	3.78	2.49E-07	14.3	0.0	0.0	0.0	40.3	88.3	171.8	1.2	5.4	19.0
16.69		(±7.92E-07)	(±7.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±37.0)	(±29.8)	(±108.0)	(±0.8)	(±3.6)	(±0.0)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface





### Tabular results

#### ::: Layer No: 1 :::

**Code:** Layer\_1    **Start depth:** 0.81 (m), **End depth:** 2.65 (m)

**Description:** Clay & silty clay

#### Basic results

Total cone resistance:  $1.45 \pm 0.56$  MPa

Sleeve friction:  $61.63 \pm 19.21$  kPa

Ic:  $2.65 \pm 0.26$

SBT<sub>n</sub>: 4

SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

#### Estimation results

Permeability:  $1.43\text{E-}06 \pm 5.25\text{E-}06$  m/s

N<sub>60</sub>:  $5.70 \pm 0.99$  blows

Es:  $0.00 \pm 0.00$  MPa

Dr (%):  $0.00 \pm 0.00$

φ (degrees):  $0.00 \pm 0.00$  °

Unit weight:  $19.00 \pm 0.00$  kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.:  $18.82 \pm 5.08$  MPa

Go:  $35.17 \pm 3.46$  MPa

Su:  $89.72 \pm 15.52$  kPa

Su ratio:  $2.62 \pm 0.59$

O.C.R.:  $12.10 \pm 2.72$

**::: Layer No: 2 :::****Code:** Layer\_2    **Start depth:** 2.65 (m), **End depth:** 7.78 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.12 ±0.27 MPa

Sleeve friction: 60.16 ±21.23 kPa

Ic: 3.01 ±0.11

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 9.55E-09 ±1.33E-08 m/s

N<sub>60</sub>: 5.81 ±1.31 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 13.95 ±3.91 MPa

Go: 42.01 ±9.40 MPa

Su: 73.25 ±17.89 kPa

Su ratio: 1.16 ±0.25

O.C.R.: 5.37 ±1.13

**::: Layer No: 3 :::****Code:** Layer\_3    **Start depth:** 7.78 (m), **End depth:** 8.70 (m)**Description:** Clay & silty clay**Basic results**

Total cone resistance: 2.27 ±0.34 MPa

Sleeve friction: 70.47 ±30.90 kPa

Ic: 2.72 ±0.12

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 7.22E-08 ±8.09E-08 m/s

N<sub>60</sub>: 9.68 ±1.58 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 29.61 ±4.76 MPa

Go: 60.81 ±11.69 MPa

Su: 149.66 ±24.38 kPa

Su ratio: 1.62 ±0.24

O.C.R.: 7.49 ±1.13

**::: Layer No: 4 :::****Code:** Layer\_4    **Start depth:** 8.70 (m), **End depth:** 10.48 (m)**Description:** Silty sand & sandy silt**Basic results**

Total cone resistance: 6.03 ±3.38 MPa

Sleeve friction: 126.57 ±33.06 kPa

Ic: 2.41 ±0.35

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 4.47E-06 ±8.04E-06 m/s

N<sub>60</sub>: 19.22 ±6.34 blows

Es: 84.81 ±6.06 MPa

Dr (%): 48.96 ±7.66

φ (degrees): 38.33 ±0.67 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 70.37 ±29.63 MPa

Go: 97.11 ±15.44 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**::: Layer No: 5 :::****Code:** Layer\_5    **Start depth:** 10.48 (m), **End depth:** 12.52 (m)**Description:** Sand & silty sand**Basic results**

Total cone resistance: 14.16 ±1.43 MPa

Sleeve friction: 136.40 ±23.93 kPa

Ic: 1.83 ±0.07

SBT<sub>n</sub>: 6SBT<sub>n</sub> description: Sand & silty sand**Estimation results**

Permeability: 2.65E-05 ±1.19E-05 m/s

N<sub>60</sub>: 34.29 ±2.60 blows

Es: 101.98 ±7.63 MPa

Dr (%): 59.30 ±3.47

φ (degrees): 39.32 ±0.55 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 127.82 ±9.56 MPa

Go: 129.95 ±9.72 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00



**:: Layer No: 6 ::****Code:** Layer\_6      **Start depth:** 12.52 (m), **End depth:** 13.56 (m)**Description:** Silty sand & sandy silt**Basic results**

Total cone resistance: 7.65 ±1.82 MPa

Sleeve friction: 69.96 ±16.95 kPa

Ic: 2.09 ±0.09

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 5.11E-06 ±3.92E-06 m/s

N<sub>60</sub>: 21.59 ±3.75 blows

Es: 73.12 ±9.14 MPa

Dr (%): 40.94 ±4.84

φ (degrees): 35.49 ±1.06 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 91.58 ±11.58 MPa

Go: 93.18 ±11.65 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**:: Layer No: 7 ::****Code:** Layer\_7      **Start depth:** 13.56 (m), **End depth:** 15.03 (m)**Description:** Sand & silty sand**Basic results**

Total cone resistance: 19.35 ±3.33 MPa

Sleeve friction: 176.67 ±31.02 kPa

Ic: 1.76 ±0.11

SBT<sub>n</sub>: 6SBT<sub>n</sub> description: Sand & silty sand**Estimation results**

Permeability: 5.23E-05 ±3.60E-05 m/s

N<sub>60</sub>: 44.23 ±5.18 blows

Es: 125.61 ±10.82 MPa

Dr (%): 65.46 ±6.06

φ (degrees): 40.17 ±0.78 °

Unit weight: 19.00 ±0.00 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 157.43 ±13.56 MPa

Go: 160.07 ±13.79 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna  
 Cell. 393 8376620  
<http://www.roccocarbonella.it>

**CPT: CPTU2**

Total depth: 15.03 m, Date: 30/10/2023  
 Surface Elevation: 0.00 m  
 Coords: X:0.00, Y:0.00  
 Cone Type: PAGANI  
 Cone Operator: CIANCHI-LIOCI-CARBONELLA

**Project:****Location: Mirandola - Via Minelli****Summary table of mean values**

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub> (%)	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m³)
0.81	1.84	1.43E-06	5.7	0.0	0.0	0.0	18.8	35.2	89.7	2.6	12.1	19.0
2.65		(±5.25E-06)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.1)	(±3.5)	(±15.5)	(±0.6)	(±2.7)	(±0.0)
2.65	5.13	9.55E-09	5.8	0.0	0.0	0.0	14.0	42.0	73.2	1.2	5.4	19.0
7.78		(±1.33E-08)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.9)	(±9.4)	(±17.9)	(±0.2)	(±1.1)	(±0.0)
7.78	0.92	7.22E-08	9.7	0.0	0.0	0.0	29.6	60.8	149.7	1.6	7.5	19.0
8.70		(±8.09E-08)	(±1.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.8)	(±11.7)	(±24.4)	(±0.2)	(±1.1)	(±0.0)
8.70	1.78	4.47E-06	19.2	84.8	49.0	38.3	70.4	97.1	0.0	0.0	0.0	19.0
10.48		(±8.04E-06)	(±6.3)	(±6.1)	(±7.7)	(±0.7)	(±29.6)	(±15.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)
10.48	2.04	2.65E-05	34.3	102.0	59.3	39.3	127.8	130.0	0.0	0.0	0.0	19.0
12.52		(±1.19E-05)	(±2.6)	(±7.6)	(±3.5)	(±0.6)	(±9.6)	(±9.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)
12.52	1.04	5.11E-06	21.6	73.1	40.9	35.5	91.6	93.2	0.0	0.0	0.0	19.0
13.56		(±3.92E-06)	(±3.8)	(±9.1)	(±4.8)	(±1.1)	(±11.6)	(±11.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)
13.56	1.47	5.23E-05	44.2	125.6	65.5	40.2	157.4	160.1	0.0	0.0	0.0	19.0
15.03		(±3.60E-05)	(±5.2)	(±10.8)	(±6.1)	(±0.8)	(±13.6)	(±13.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)

Depth values presented in this table are measured from free ground surface



**RDR SRL**

Via Toscana 119 - 40141 Bologna

Cell. 393 8376620

<http://www.roccocarbonella.it>

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

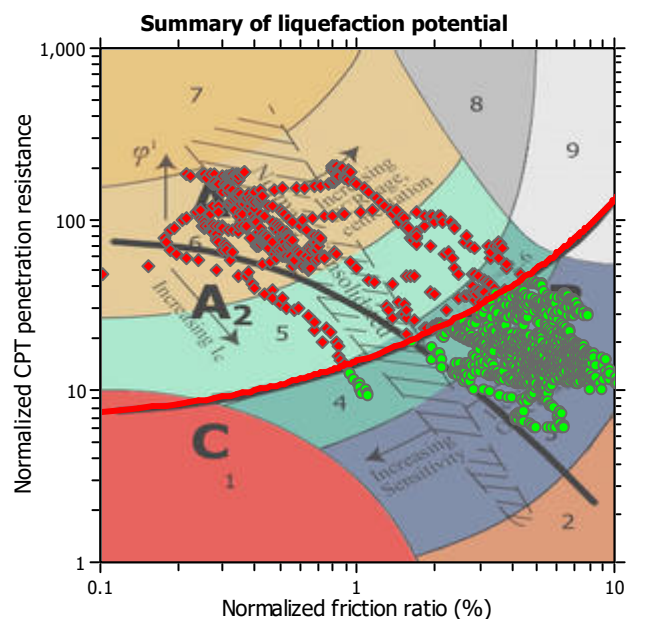
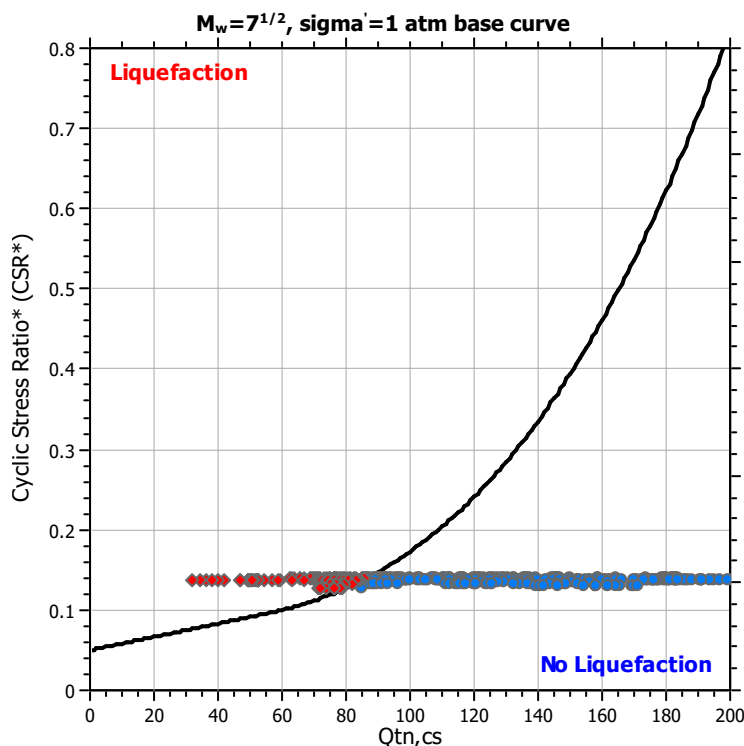
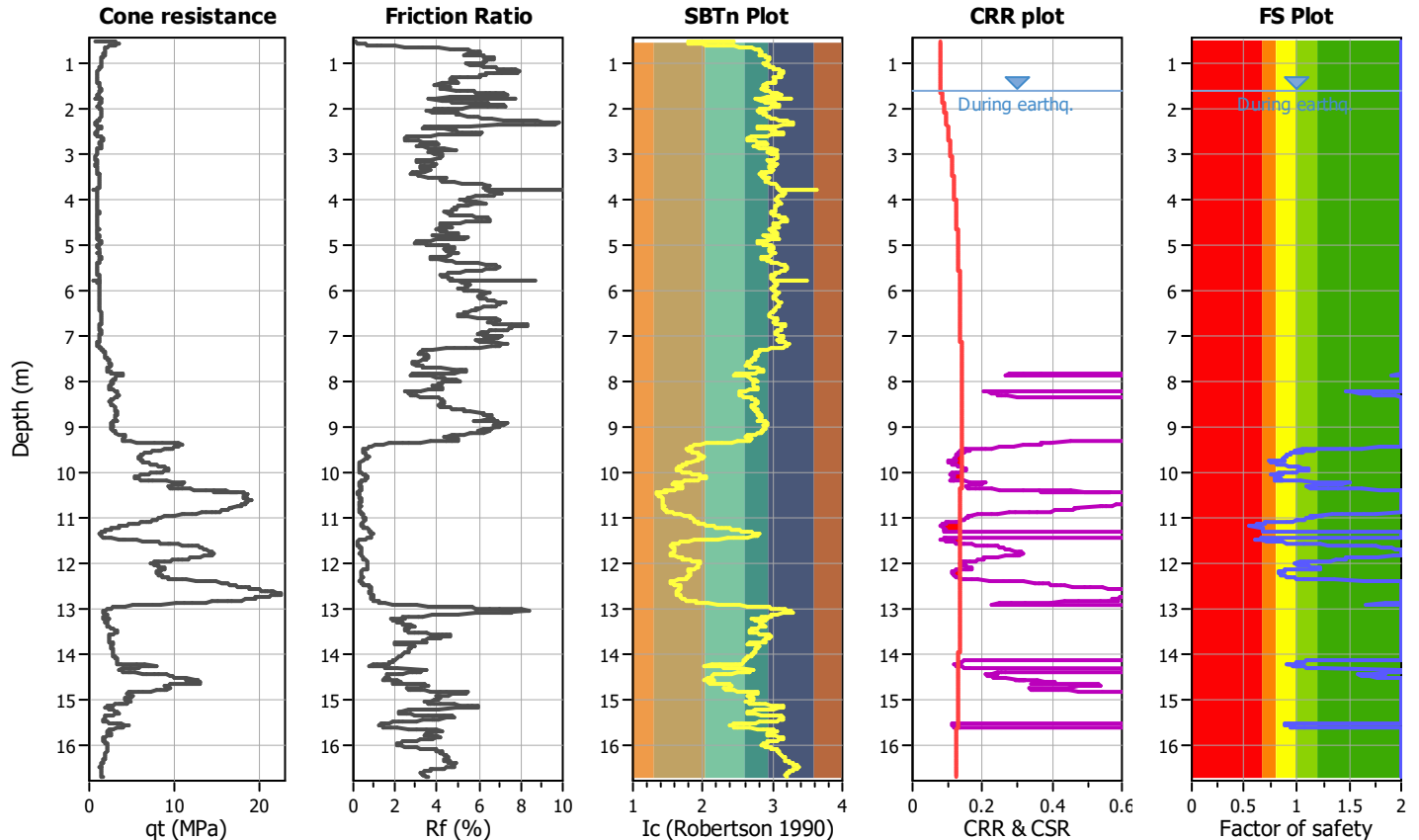
**Project title :**

**Location : Mirandola - Via Minelli**

**CPT file : CPTU1**

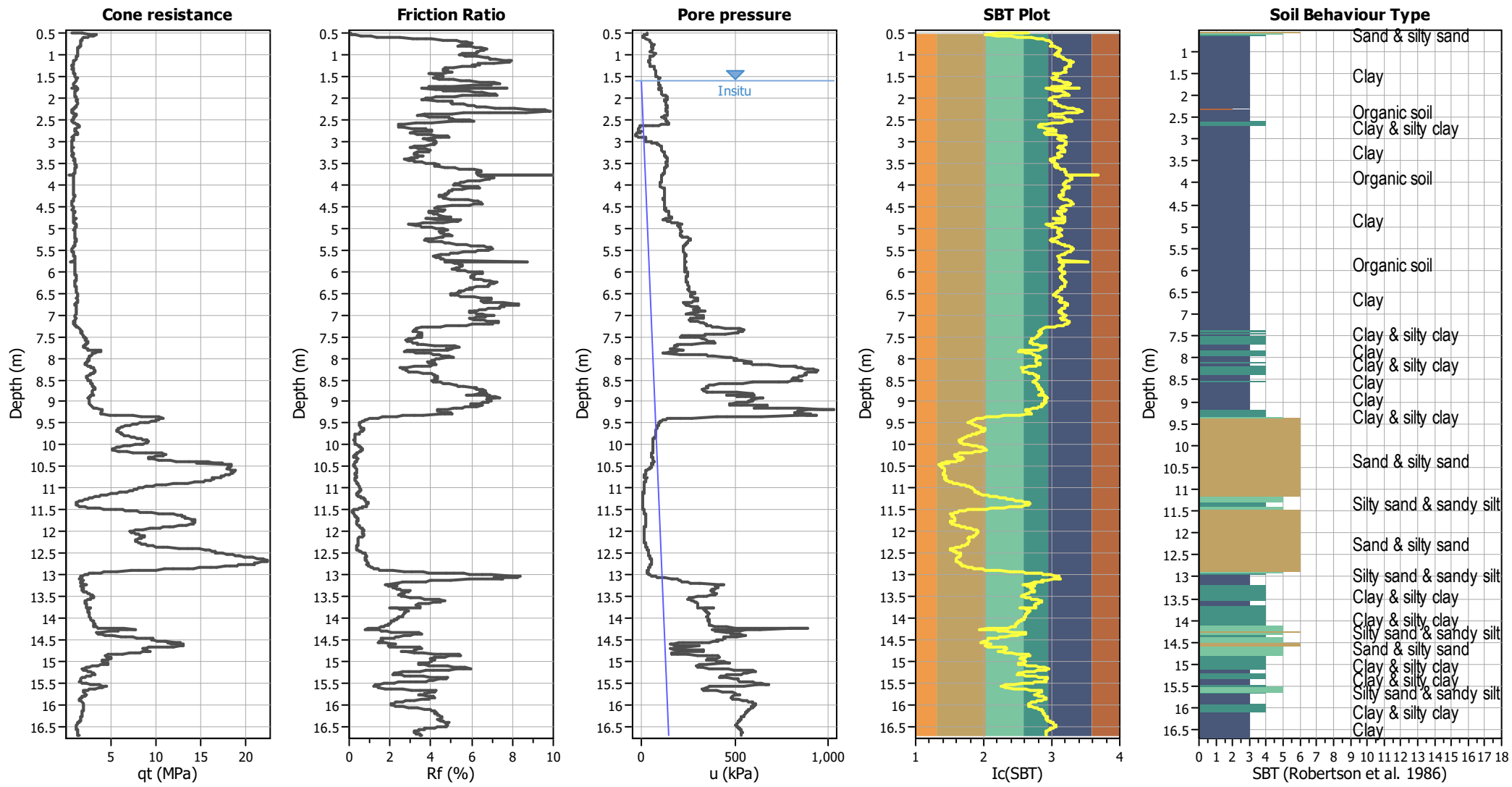
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	1.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.60 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	1	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	No
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	N/A
Peak ground acceleration:	0.21	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots

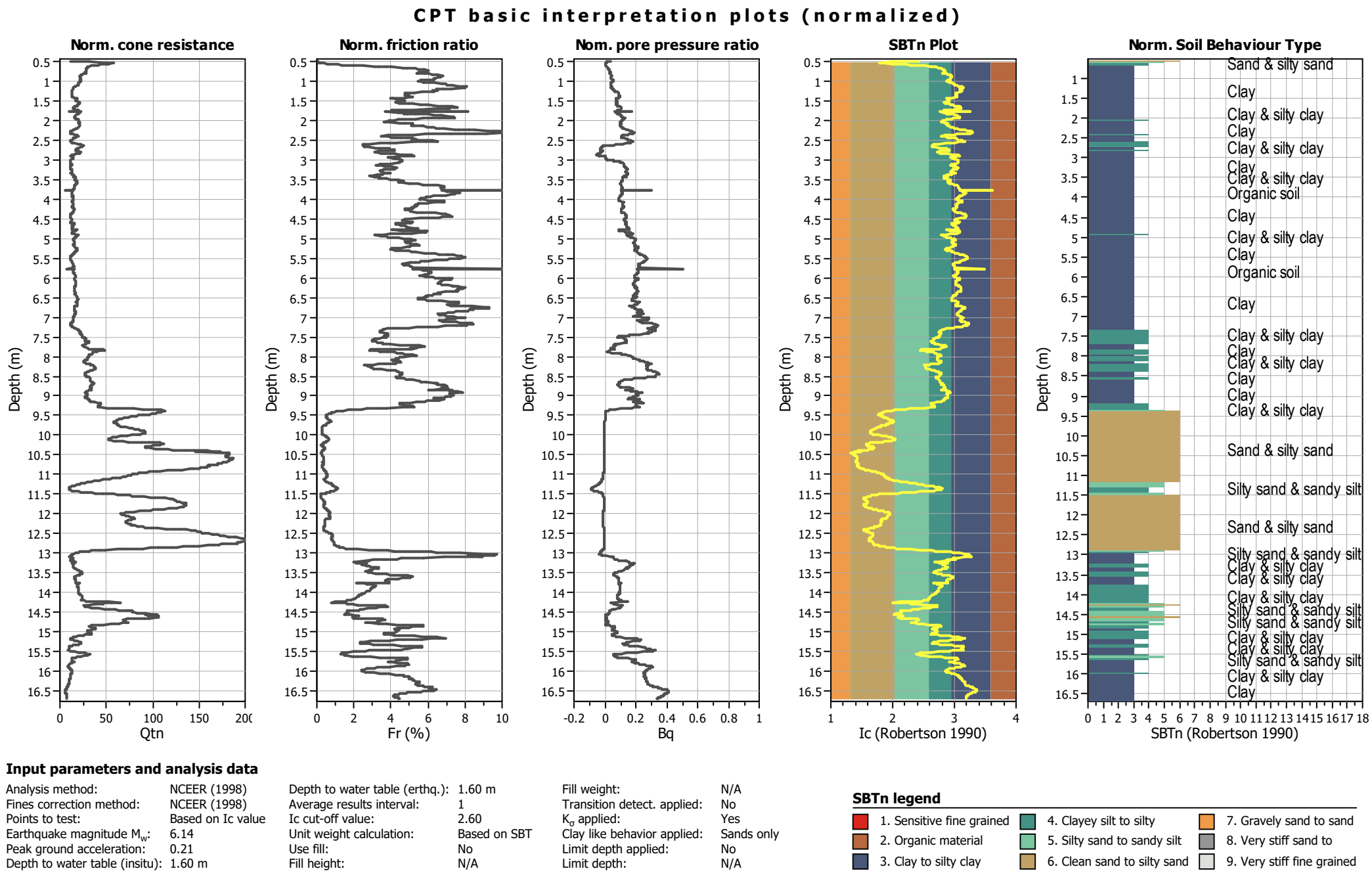


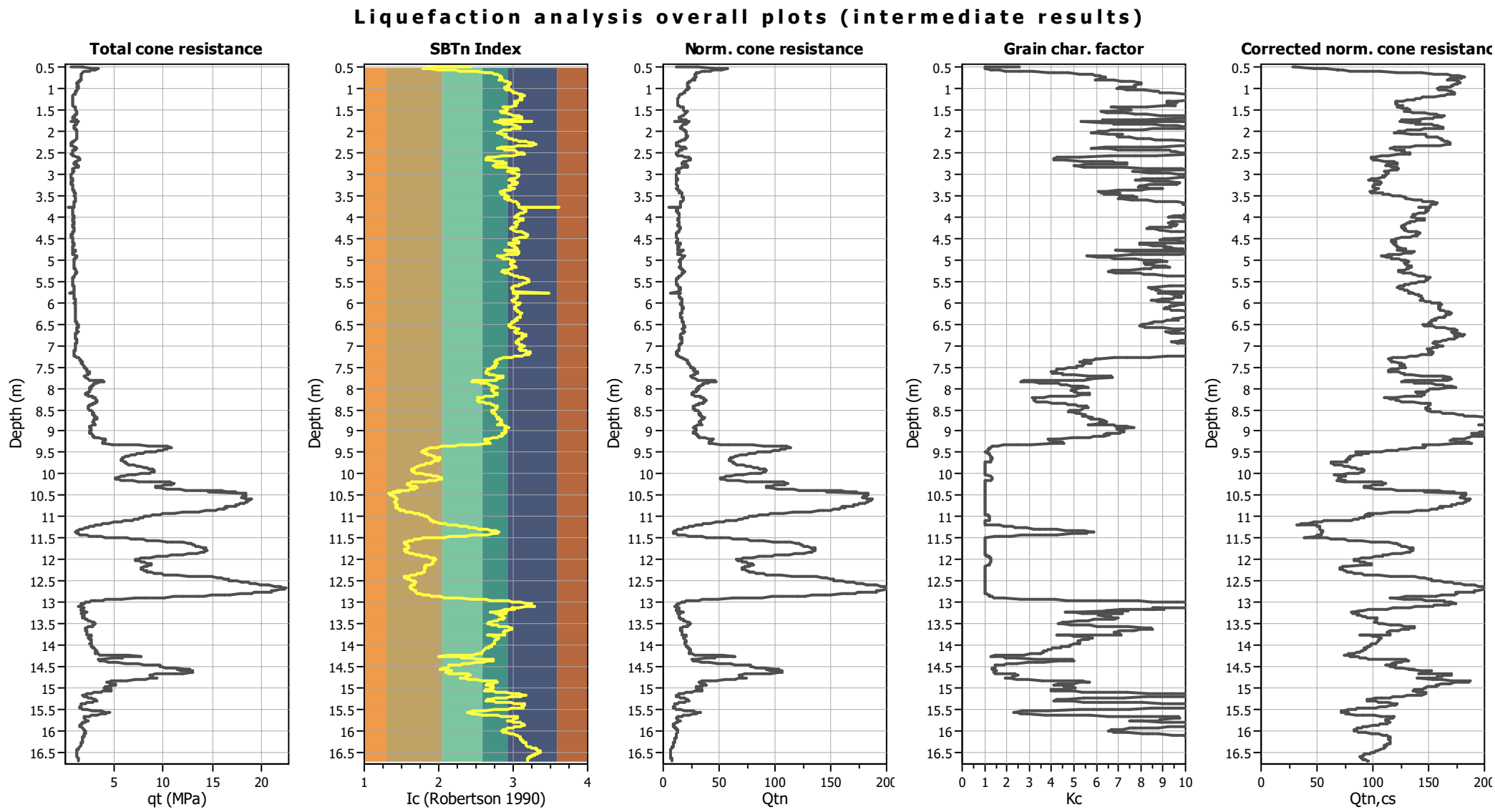
Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (erthq.):	1.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>g</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

SBT legend

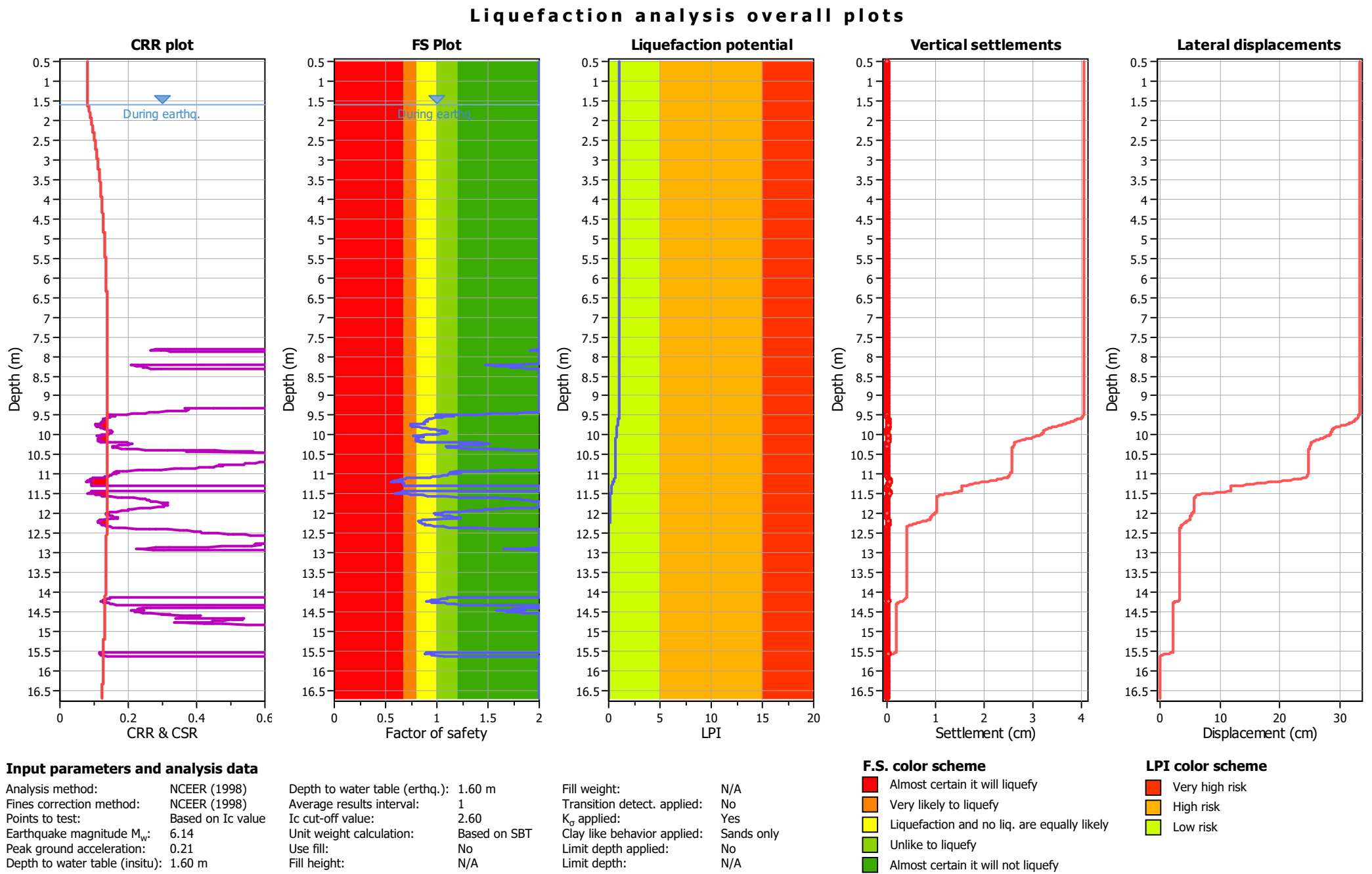
1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained





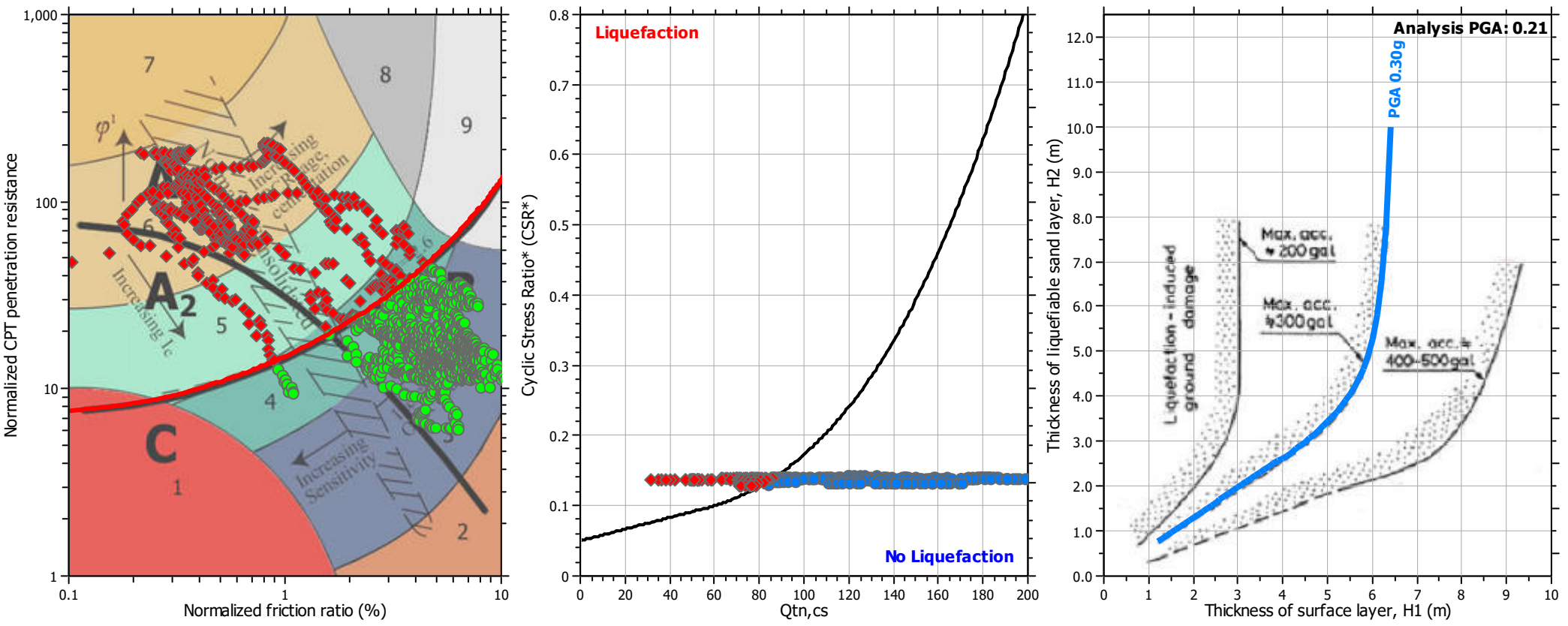
Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (erthq.):	1.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>o</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A





Liquefaction analysis summary plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (erthq.):	1.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on $I_c$ value	$I_c$ cut-off value:	2.60	$K_\sigma$ applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A



RDR SRL

Via Toscana 119 - 40141 Bologna

Cell. 393 8376620

http://www.roccocarbonella.it

## LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

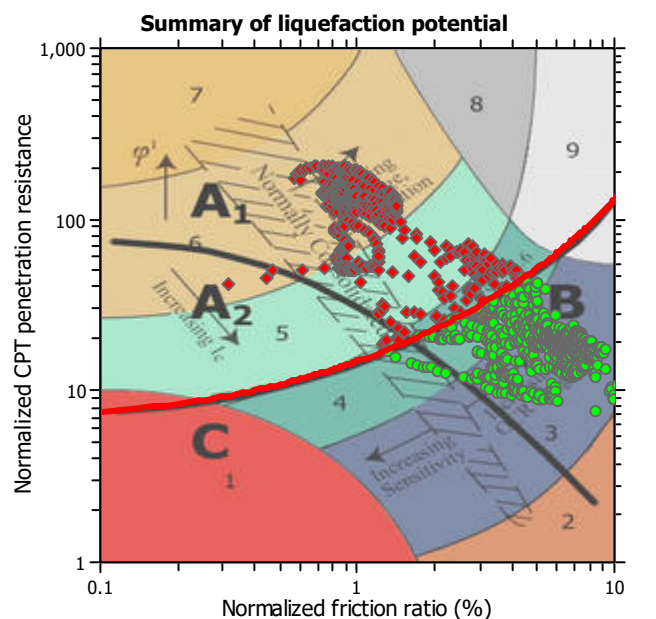
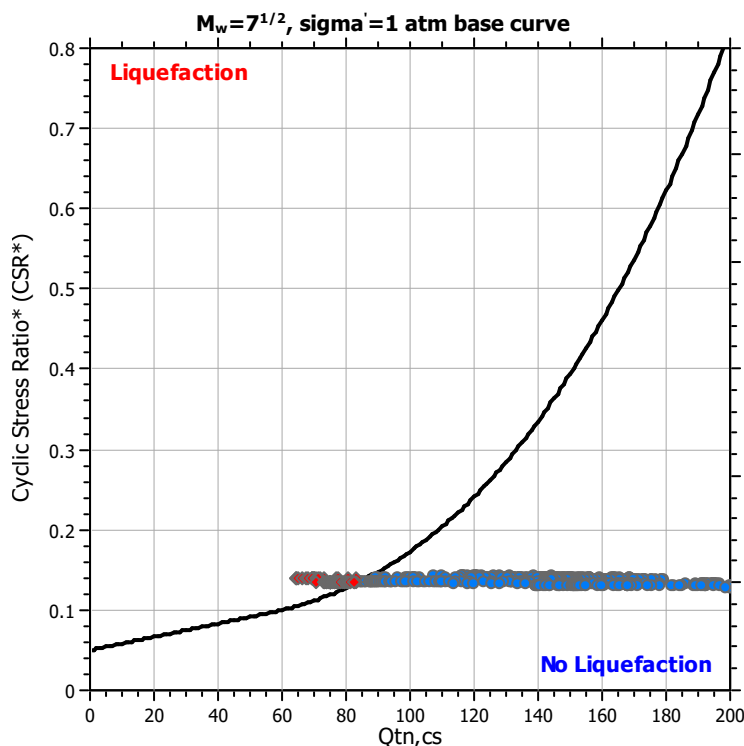
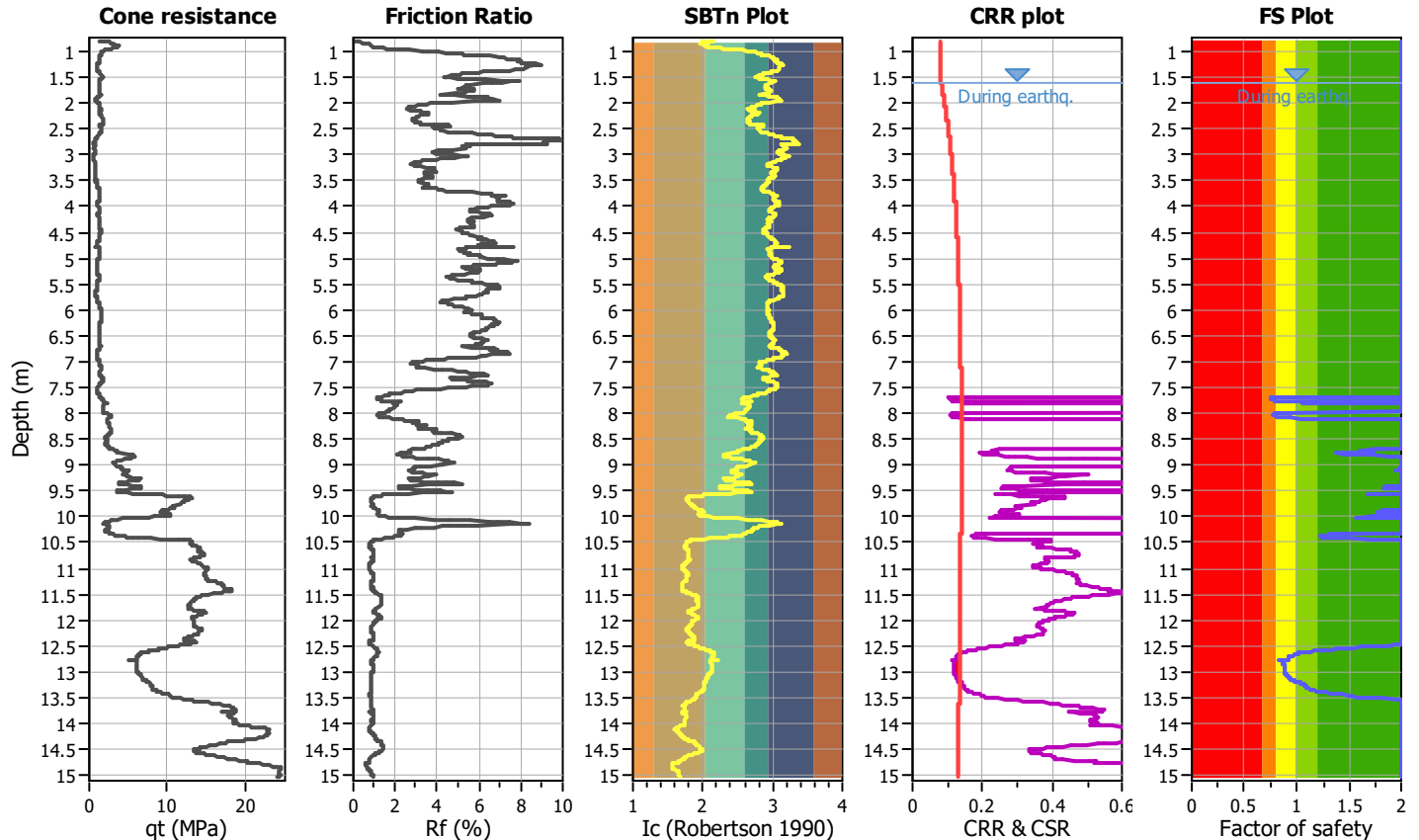
Project title :

Location : Mirandola - Via Minelli

CPT file : CPTU2

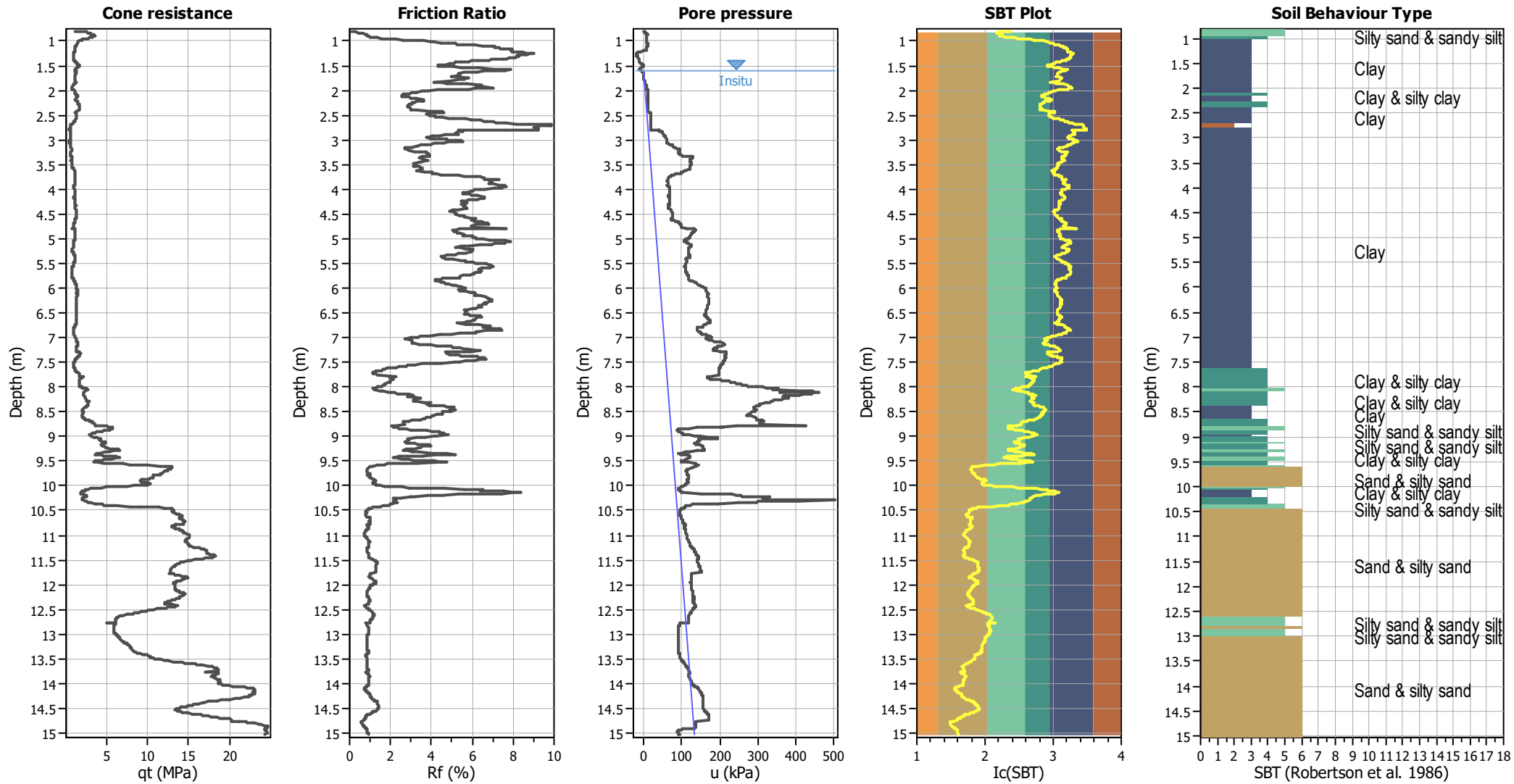
### Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	G.W.T. (in-situ):	1.60 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	NCEER (1998)	G.W.T. (earthq.):	1.60 m	Fill height:	N/A	applied:	Sands only
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	1	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	No
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	N/A
Peak ground acceleration:	0.21	Unit weight calculation:	Based on SBT	$K_0$ applied:	Yes	MSF method:	Method based



Zone A<sub>1</sub>: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading  
Zone A<sub>2</sub>: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry  
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening  
Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

CPT basic interpretation plots

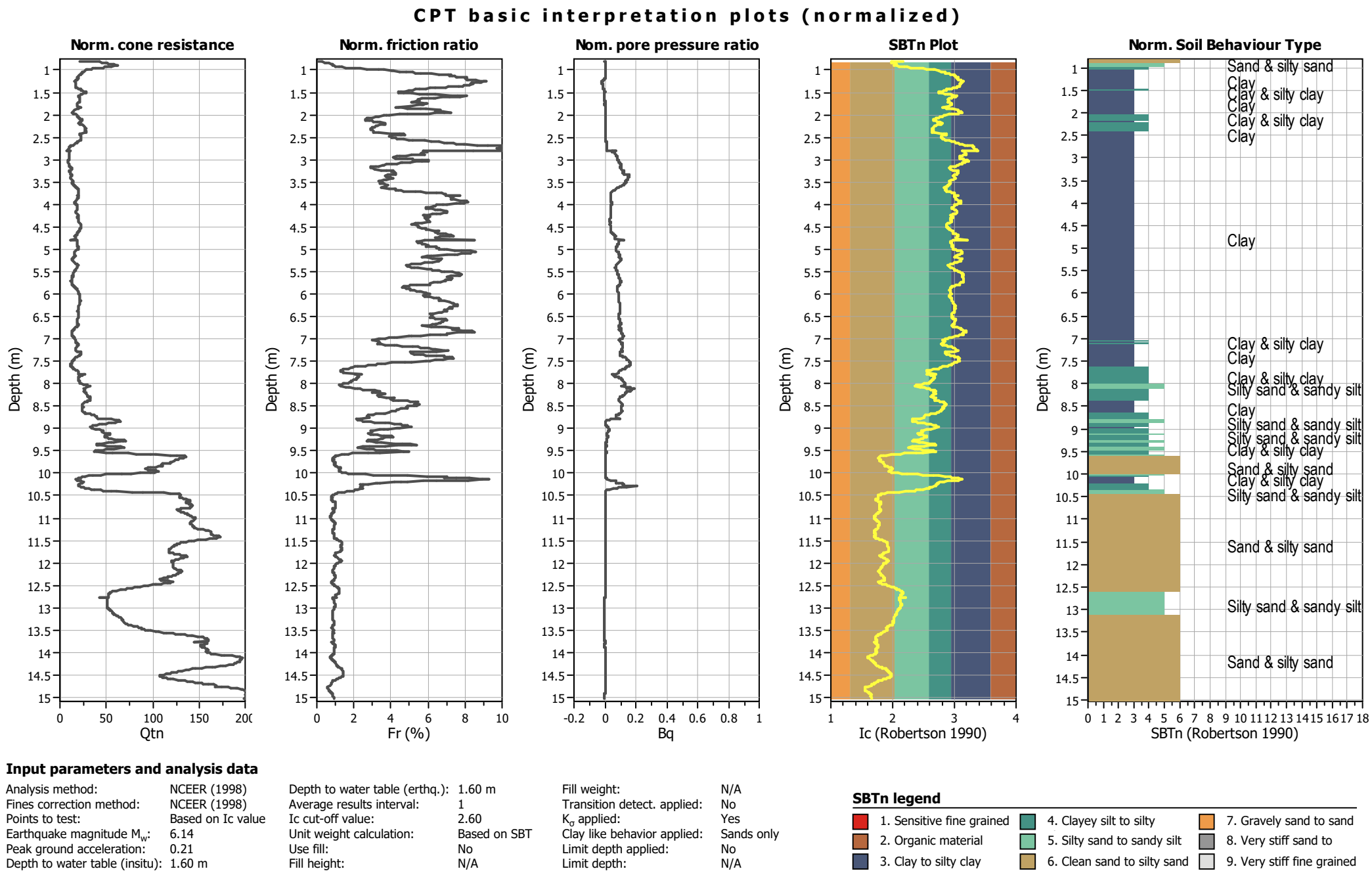


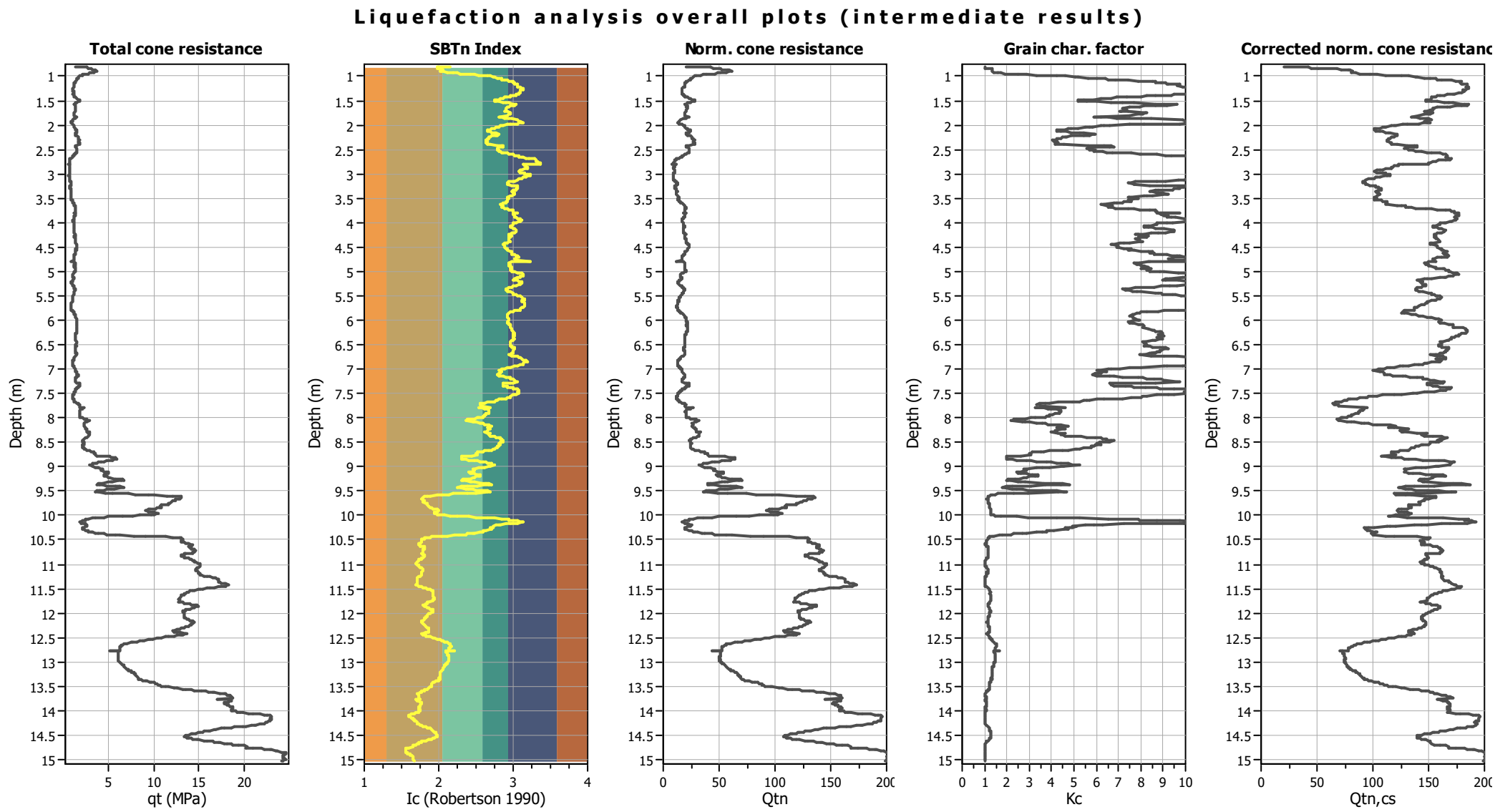
Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (erthq.):	1.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>0</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A

SBT legend

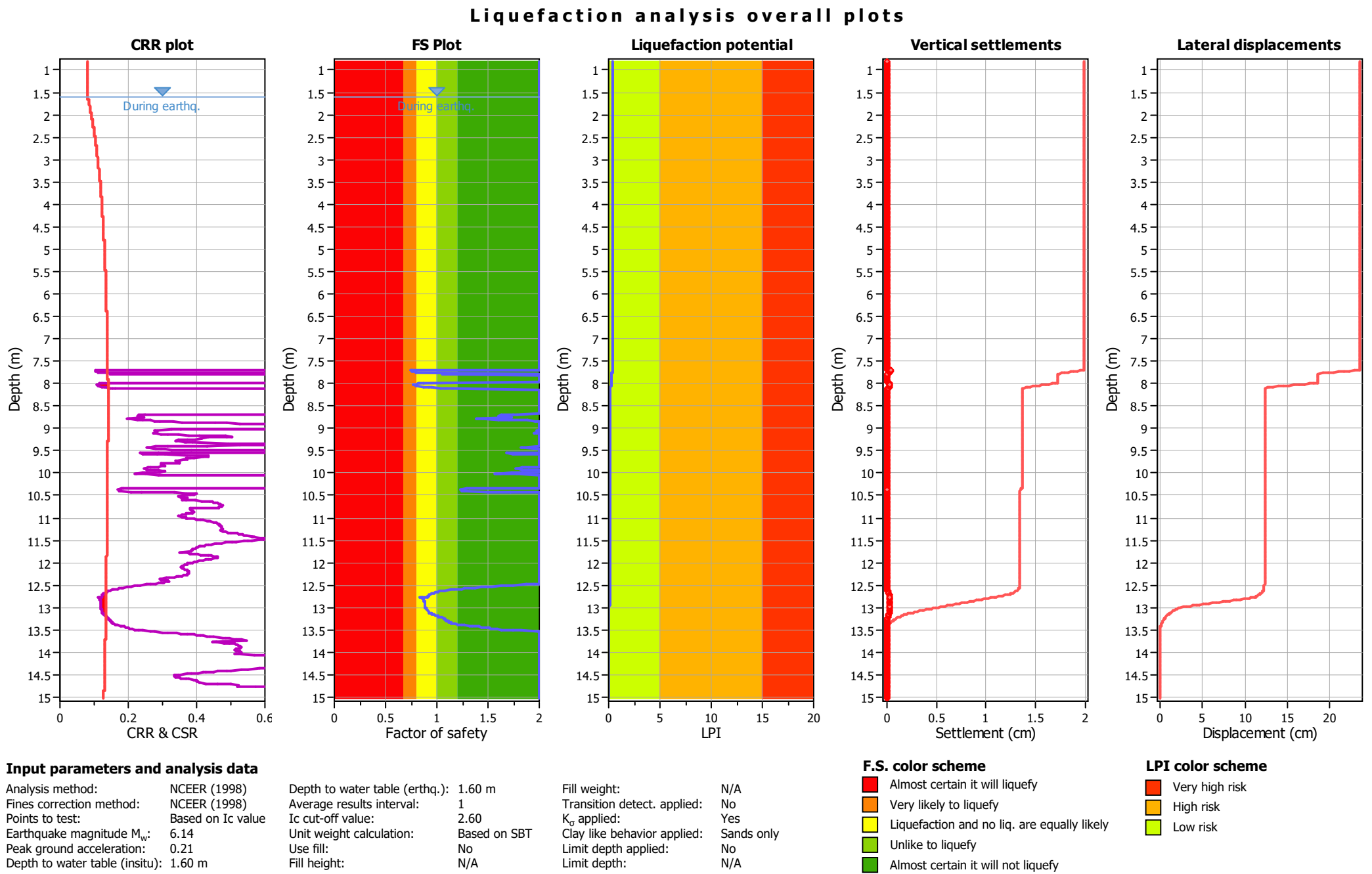
1. Sensitive fine grained	4. Clayey silt to silty	7. Gravely sand to sand
2. Organic material	5. Silty sand to sandy silt	8. Very stiff sand to
3. Clay to silty clay	6. Clean sand to silty sand	9. Very stiff fine grained



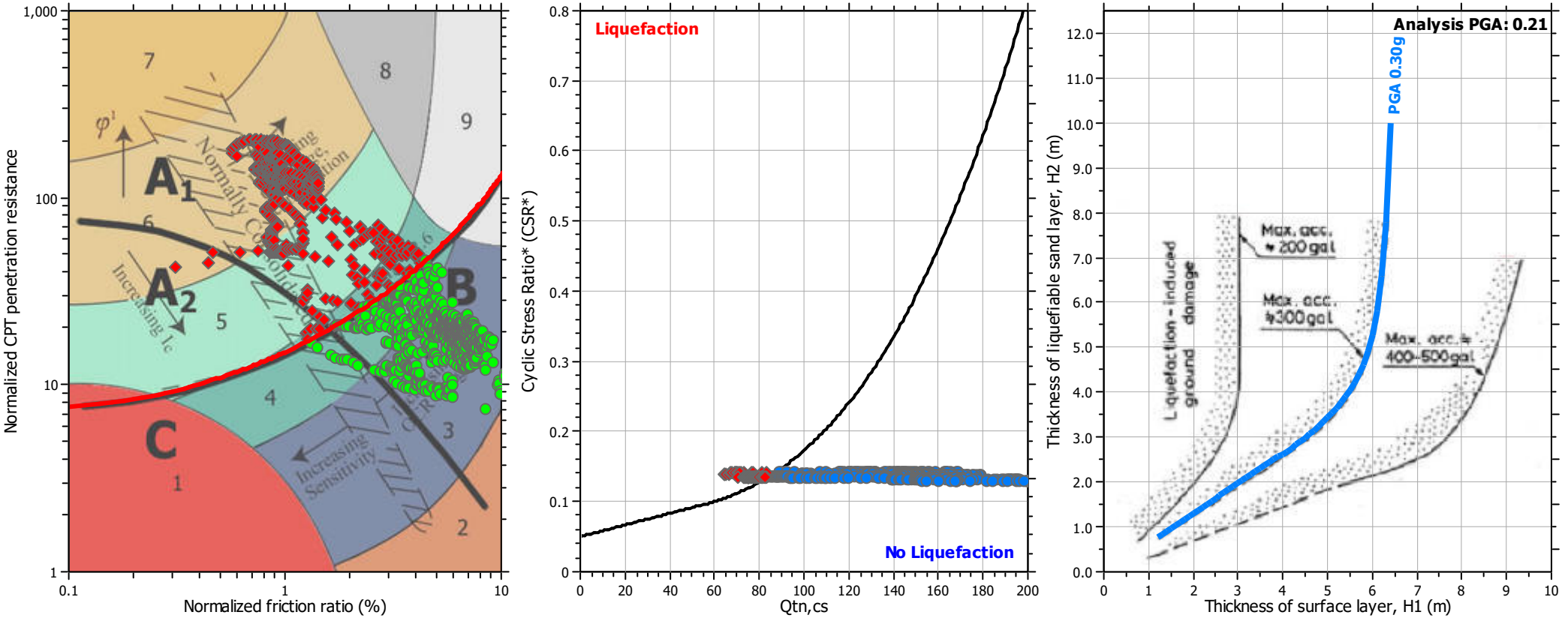


Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (erthq.):	1.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>o</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A



Liquefaction analysis summary plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	NCEER (1998)	Depth to water table (erthq.):	1.60 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	NCEER (1998)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on $I_c$ value	$I_c$ cut-off value:	2.60	$K_\sigma$ applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	6.14	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.21	Use fill:	No	Limit depth applied:	No
Depth to water table (insitu):	1.60 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	N/A



Permesso di  
Costruire

Realizzazione di impianto di recupero rifiuti  
speciali ubicato presso l'area in via di Mezzo  
snc a Mirandola (MO)

Relazione geologica

SIS.08.07  
PS.06.1



## **ALLEGATO C**

**“Carta di Microzonazione sismica livello 3 del Piano Strutturale Comunale di Mirandola”**



Attuazione dell'articolo 11 della Legge 24 giugno 2009, n.77

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Carta di microzonazione sismica

### Livello 3 (sintesi per PSC)

scala 1 : 10.000

Regione Emilia-Romagna

Comune di Mirandola

Tavola PSC-B, Ambiti di studio (urbanizzato e urbanizzabile)

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Geotema S.r.l.	15/03/2018

### Legenda

**Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali**

$FAPCA = 1,2$ ;  $FH_0,1 \leq 1,5$ ;  $FH_0,2 \leq 1,5$ ;  $FH_0,5 \leq 1,5$ ;  $FH_0,7 \leq 1,5$ ;  $FH_1,0 \leq 1,5$ ;  $FH_1,5 \leq 1,5$ ; Valori ricavati da analisi numeriche.

$FAPCA = 1,2$ ;  $FH_0,1 \leq 1,5$ ;  $FH_0,2 \leq 1,5$ ;  $FH_0,5 \leq 1,5$ ;  $FH_0,7 \leq 1,5$ ;  $FH_1,0 \leq 1,5$ ;  $FH_1,5 \leq 1,5$ ; Valori ricavati da analisi numeriche.

**Zone suscettibili di instabilità**

$Z_{3.6}$  Zone di suscettibilità per le liquefazioni  $2 < IL \leq 5$  con indicazione del valore medio

$Z_{9.9}$  Zone di suscettibilità per le liquefazioni  $5 < IL \leq 15$  con indicazione del valore medio

$Z_{17.4}$  Zone di suscettibilità per le liquefazioni  $IL > 15$  con indicazione del valore medio

$Z_{2.4}$  Zone di suscettibilità per le liquefazioni  $2 < IL \leq 5$  con indicazione del valore medio

$Z_{9.9}$  Zone di suscettibilità per le liquefazioni  $5 < IL \leq 15$  con indicazione del valore medio

$Z_{19.7}$  Zone di suscettibilità per le liquefazioni  $IL > 15$  con indicazione del valore medio

**Valore puntuale dell'Indice di Liquefazione IL** (Sonmez, 2003)

Per ogni verticale di indagine CPTU è riportato il valore puntuale di IL20 (Bodinger – Idriss, 2014)

1.4 Rischio di liquefazione potenzialmente basso ( $0 < IL \leq 2$ )

3.8 Rischio di liquefazione potenzialmente moderato ( $2 < IL \leq 5$ )

9.9 Rischio di liquefazione potenzialmente alto ( $5 < IL \leq 15$ )

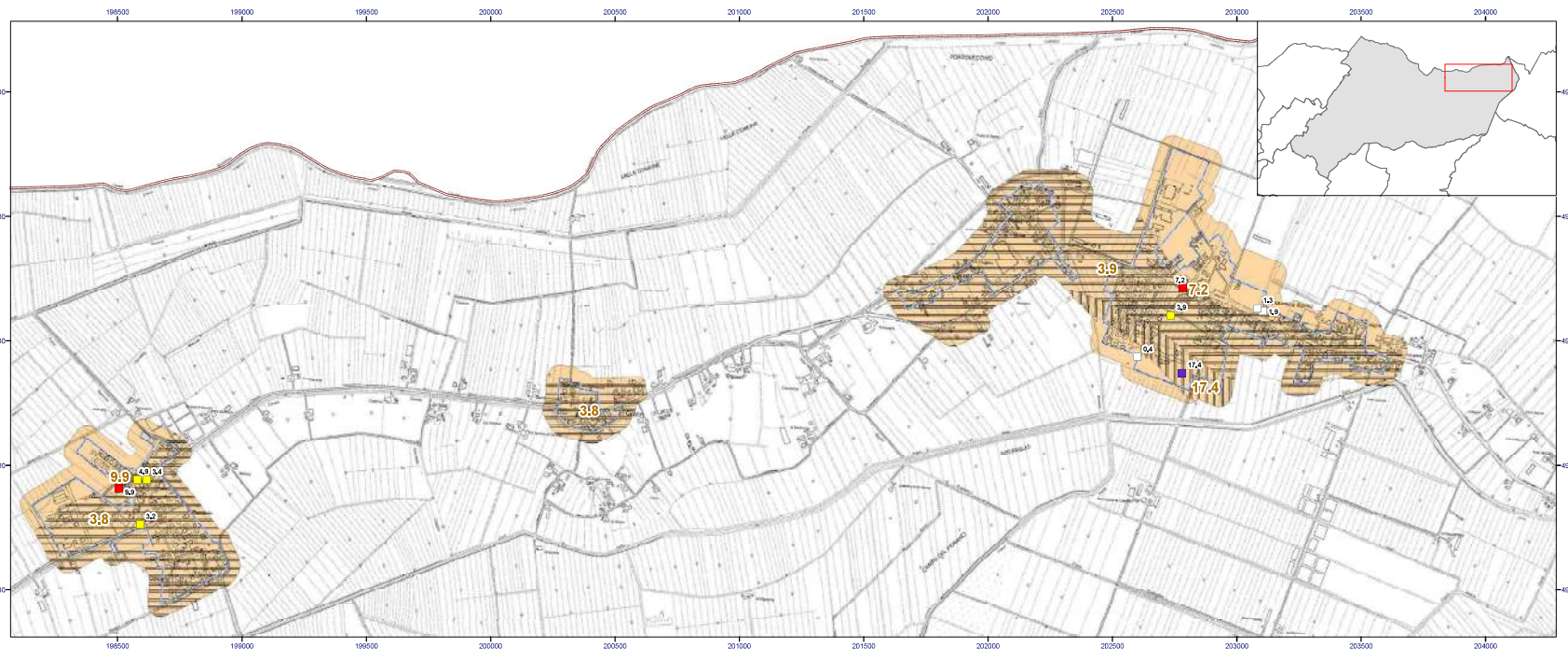
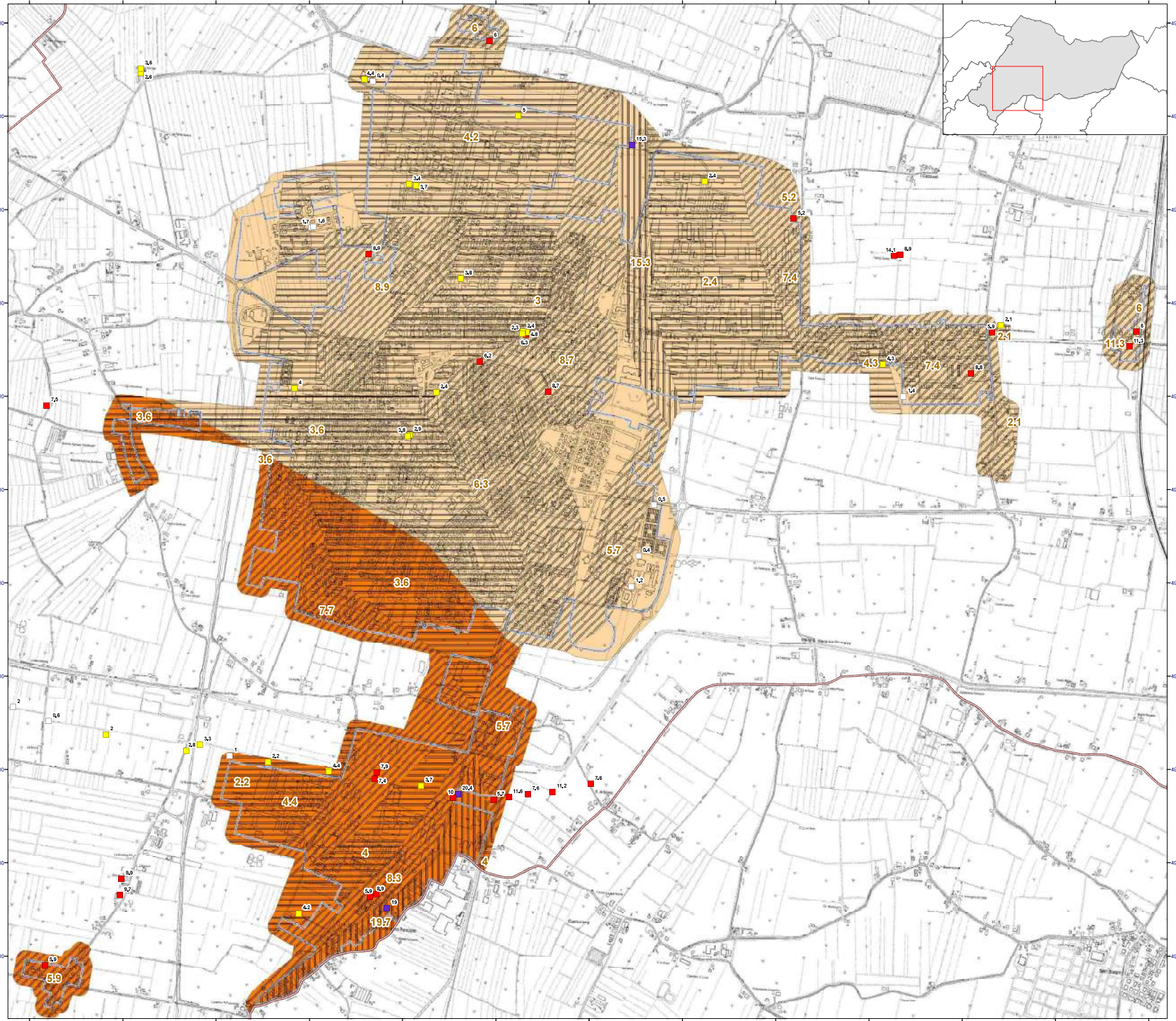
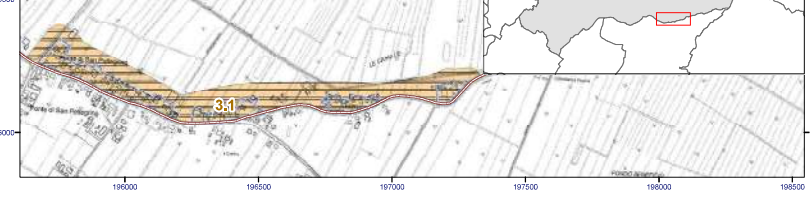
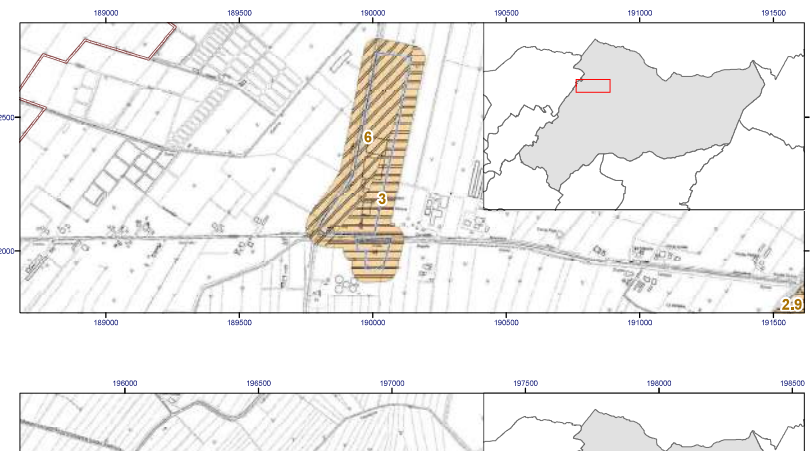
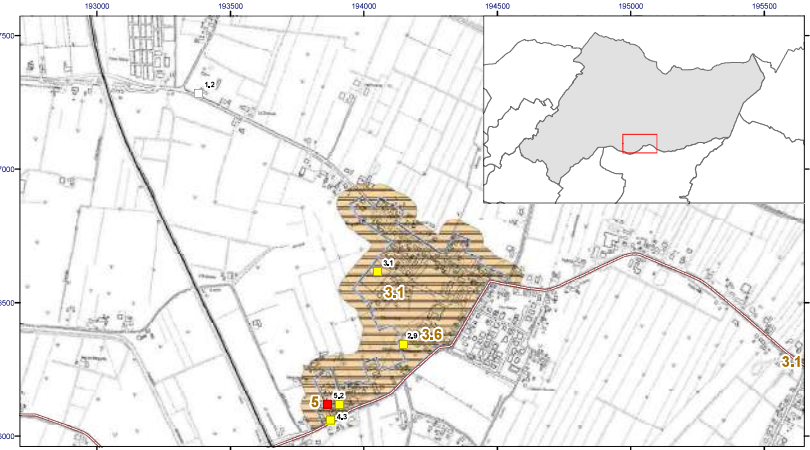
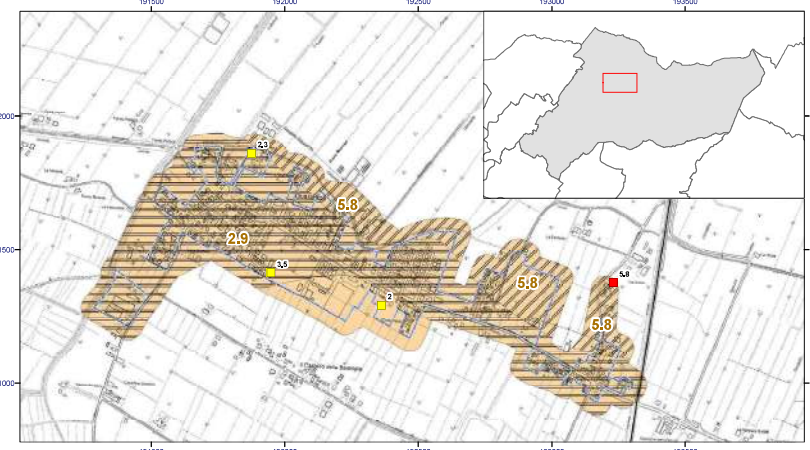
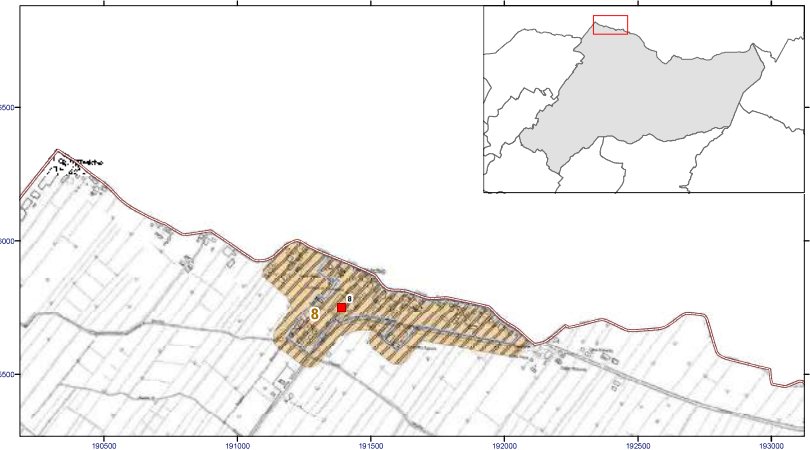
17.4 Rischio di liquefazione potenzialmente medio alto ( $IL > 15$ )

**Elementi cartografici**

Limiti amministrativi

Limiti ambiti comunali territorio urbanizzato ed urbanizzabile

0 250 500 Metri





Permesso di  
Costruire

Realizzazione di impianto di recupero rifiuti  
speciali ubicato presso l'area in via di Mezzo  
snc a Mirandola (MO)

Relazione geologica

SIS.08.07  
PS.06.1



## **ALLEGATO D**

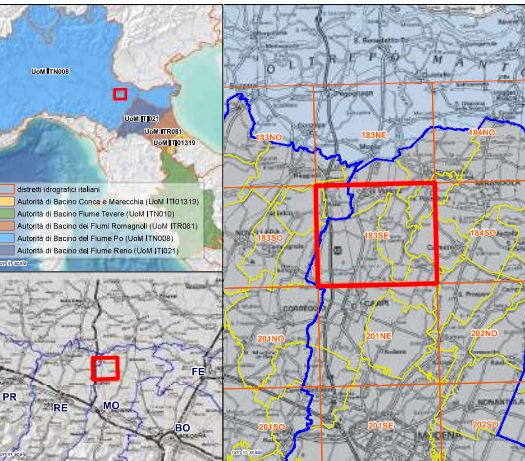
**“Carta Piano Gestione Rischio Alluvioni” tratta dal Piano Strutturale Comunale di Mirandola”**



Direttiva Europea 2007/60/CE relativa alla  
valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni  
Mappa della pericolosità e degli elementi potenzialmente esposti  
(art. 6 della Direttiva 2007/60/CE e art. 6 del D.Lgs. 49/2010)

Ambito territoriale: Reticolo Secondario di Pianura  
Dati consegnati nella seduta del Comitato Istituzionale dell'Autorità  
di Bacino del Fiume Po del 23/12/2013 (distretto padano)

183SE - NOVI DI MODENA



La cartografia rappresentata nella mappa consiste nel quadro conoscitivo della pericolosità di alluvioni relative al reticolo secondario di pianura artificiale (canali di bonifica) e degli elementi potenzialmente esposti, predisposto in attuazione della Direttiva 2007/60/CE e del D.Lgs. 49/2010.

I dati hanno valenza informativa e non giuridica e sono predisposti alla elaborazione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni in corso (la cui approvazione è attesa secondo quanto disposto dalle norme in dicembre 2015).

Le valutazioni tecniche condotte e le attività svolte dai Consorzi di Bonifica (responsabili della gestione del reticolo oggetto di mappatura) con il supporto degli Enti facenti parte del Gruppo di Lavoro hanno consentito il raggiungimento, sull'ambito specifico indagato, di un livello di confidenza complessivamente adeguato rispetto alla finalità della mappa e alla prima fase di gestione prevista dalla Direttiva europea 2007/60/CE.

A tale proposito, si precisa che la perimetrazione delle aree potenzialmente allagabili è stata effettuata con riferimento a due scenari alluvioni frequenti (per tempo di ritorno fino a 50 anni) e alluvioni poco frequenti (per tempo di ritorno fino a 200 anni). In ragione dell'elevata estensione del reticolo, della complessità del sistema e della presenza di zone morfologicamente depresse, il metodo di individuazione delle aree soggette ad alluvioni è di tipo prevalentemente storico-inventariale e si è sviluppato a partire dai dati e dalle informazioni sugli eventi avvenuti orientativamente in epoca successiva al 1950 censiti dai Consorzi di Bonifica, in quanto ritenuti maggiormente compatibili con l'attuale scenario di bonifica e di uso del suolo.

A questa tipologia di aree si aggiungono limitate zone individuate mediante modelli idrologico - idraulici (metodo completo) e aree delimitate sulla base del giudizio esperto degli enti gestori (metodo consensuale) in relazione alla generale incertezza del reticolo di rete fronte ad eventi di precipitazione caratterizzati da T<sub>r</sub> superiori (in media) a 50 anni: in questo caso (alluvioni poco frequenti), le aree perimetrate coincidono con gran parte dei settori di pianura dei bacini idrografici.

Le mappe della pericolosità non tengono conto della possibilità che si verifichino rotture arginali o malfunzionamenti degli impianti di sollevamento e delle opere di gestione delle piane (chiviche, paratoie, ecc.).

Il dettaglio della cartografia censuaria è riferito a una scala compresa tra 1:10.000 e 1:25.000.

Le Autorità di Bacino e la Regione non saranno ritenuti responsabili nel caso in cui i dati venissero modificati o utilizzati per scopi diversi da quelli indicati.

I contenuti della carta possono essere utilizzati, senza alterarli, citando esplicitamente la fonte, secondo la seguente dicitura:  
Fonte: Mappa della pericolosità di alluvioni e degli elementi potenzialmente esposti a scala 1:25.000, predisposta in attuazione dell'art. 6 della Direttiva 2007/60/CE e del D.Lgs. 49/2010.

Si precisa che il progetto di elaborazione delle mappe in versione pdf è relativo al solo territorio della Regione Emilia-Romagna.

Per approfondimenti:  
<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/verso-bacino/regioni/piano-di-gestione-del-rischio-di-alluvioni/piano-di-gestione-del-rischio-di-alluvioni>

Cartografia interattiva:  
<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/verso-bacino/regioni/piano-di-gestione-del-rischio-di-alluvioni/cartografia>

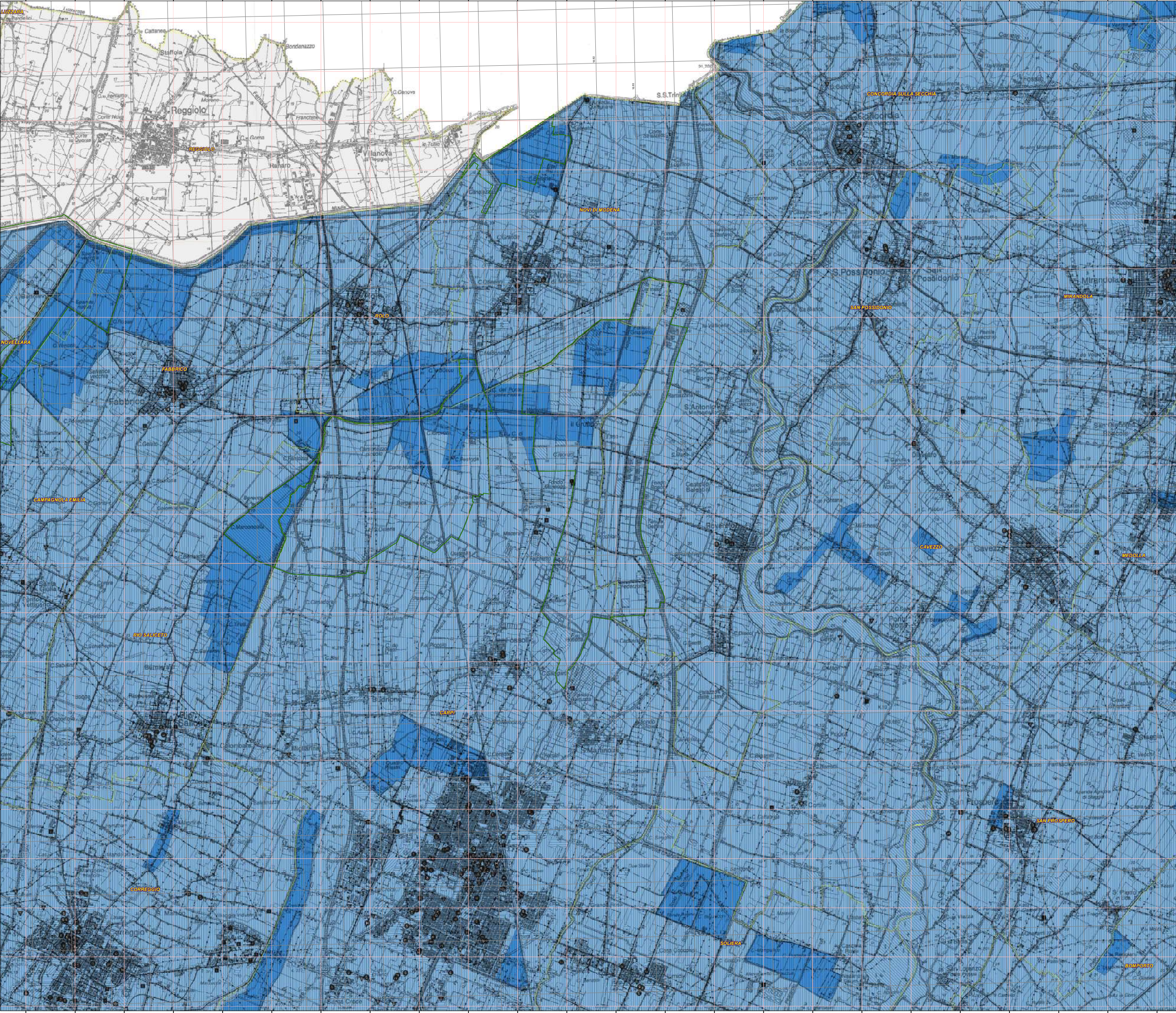
Per partecipare alla consultazione sul Progetto di Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni:  
<http://partecipazione.regione.emilia-romagna.it/partecipazione>

<http://partecipazione.regione.emilia-romagna.it/partecipazione/valutazione-e-gestione-del-rischio-di-alluvioni/verso-piano-di-gestione-del-rischio-di-alluvioni>

Per informazioni e contatti:  
[uffici@ambiente.regione.emilia-romagna.it](mailto:uffici@ambiente.regione.emilia-romagna.it)

Scenari di Pericolosità		Legenda		Aree Protette	
	P3 - H (Alluvioni frequenti: tempo di ritorno tra 20 e 50 anni - elevata probabilità)		Zone urbanizzate		Zone Parco
	P2 - M (Alluvioni poco frequenti: tempo di ritorno tra 100 e 200 anni - media probabilità)		Attività produttive		SIC - ZPS
	P1 - L (Scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi)		Strutture strategiche e reti di attività collettive		
			Infrastrutture strategiche		
			Insediamenti produttivi o impianti tecnologici potenzialmente pericolosi dal punto di vista ambientale		
			Beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse		

GRUPPO DI LAVORO PREDISPOSIZIONE MAPPE DELLA PERICOLOSITA' E DEL RISCHIO DI ALLUVIONI Del. 375/2011 D.G.R. 1248/2011		
Servizio Dires del Suolo, della Costa e Bonifica (DIO Ambiente e Dires del Suolo e della Costa, RER)	Coordinamento delle attività per l'attuazione della Direttiva 2007/60/CE e del D.Lgs. 49/2010. Rapporti con l'Autorità di Bacino nazionale, MATIM, ISPRA, supporto alla sicurezza di meteorologie e indicatori operativi.	
Autorità di Bacino del fiume Reno Autorità di Bacino Regionale Romagnoli Autorità di Bacino Marecchia - Conca Autorità di Bacino del fiume Po (coordinamento distretto padano) Autorità di Bacino del fiume Tevere (coordinamento distretto centrale) Autorità di Bacino del fiume Arno (coordinamento distretto appennino settentrionale)	Elaborazione mappe della pericolosità di alluvioni dei corsi d'acqua naturali, analisi del rischio e rapporti con la pianificazione di bacino regionale.	
Servizio Geologico, Sismico e del Suolo (DIO Ambiente e Dires del Suolo e della Costa, RER)	Elaborazione mappe della pericolosità e del rischio per fenomeni di inondazione marina. Sistematizzazione banche dati, elaborazioni cartografiche e supporto alla produzione delle mappe del rischio di alluvione. Supporto alla elaborazione delle mappe di pericolosità dell'ambito di bonifica e analisi morfologiche.	
Servizi Tecnici di Bacino e APO	Segnalazione orlata e vertice mappe	
Agenzia Regionale di Protezione Civile	Banche dati elementi esposti e rapporti con la pianificazione di emergenza	
Consorzi di Bonifica	Analisi della pericolosità di alluvioni della rete di bonifica.	
Province	Banche dati elementi esposti. Messi a disposizione PTOC (parte rischio idraulico). Piani di Emergenza Protezione Civile.	





Permesso di  
Costruire

Realizzazione di impianto di recupero rifiuti  
speciali ubicato presso l'area in via di Mezzo  
snc a Mirandola (MO)

Relazione geologica

SIS.08.07  
PS.06.1



## **ALLEGATO E**

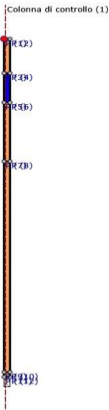
### **“Analisi della Risposta Sismica Locale”**

Ubicazione sito: Mirandola Via di Mezzo  
Coordinate (datum WGS84): lon. 0.0000° lat. 0.0000°

Archivio: mirandola.sara.lsr - Data : 18/09/2024

RELAZIONE DI CALCOLO

ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE



Oggetto:

Committente

Progettista







## Sommario

1 - Introduzione .....	2
1.1 - Impostazione del Problema di Calcolo dell'Amplificazione Locale .....	5
1.2 - Normativa di Riferimento.....	6
2 - Risposta Sismica Locale .....	7
3 - Metodo di calcolo adottato e descrizione del codice di calcolo LSR 2D .....	8
3.1 - Metodo lineare equivalente.....	8
3.2 - Soluzione alla singola iterazione mediante FEM.....	10
Smorzamento .....	11
Free-field boundaries .....	11
3.3 - Procedimento iterativo .....	12
3.4 - Interpretazione dei risultati .....	12
4 - Input .....	14
4.1 - Curve di Decadimento dei Materiali .....	14
4.2 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati.....	16
4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input .....	17
4.4 - Modello di Calcolo FEM.....	25
5 - Output .....	55
5.1 - Accelerogrammi Output.....	55
5.2 - Spettri Output .....	62
5.3 - Interpretazione dei risultati .....	70
5.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL .....	71

## 1 - Introduzione

In passato si è potuto osservare, a seguito di terremoti distruttivi, una distribuzione anomala del danneggiamento delle costruzioni, con forti differenziazioni fra zone contigue anche di modeste dimensioni.

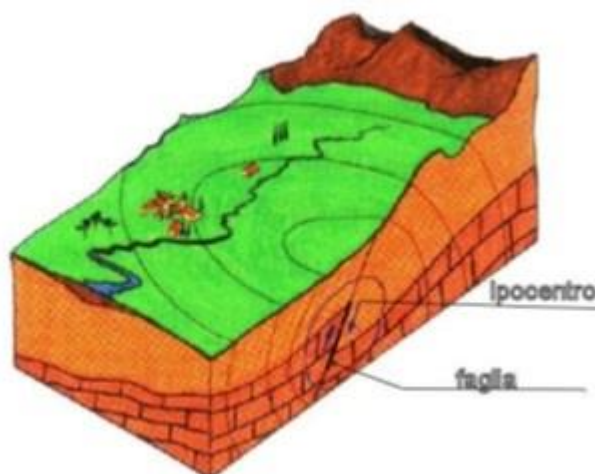
Oltre alle intrinseche differenze della vulnerabilità sismica delle costruzioni ed alle differenti caratteristiche dinamiche delle stesse, tali cause possono essere attribuite principalmente alle modificazioni delle caratteristiche del moto sismico indotte da condizioni geologiche e geomorfologiche locali.

Il moto sismico in un determinato sito, infatti, è influenzato da tre parametri importanti:

- Il meccanismo di sorgente;
- La propagazione;
- La risposta sismica locale;

I primi due fattori dipendono fortemente dalle caratteristiche dell'evento sismico; questi variano in funzione delle caratteristiche della sorgente (magnitudo e tipo di rottura della faglia) e dalla distanza tra il sito in esame e la sorgente.

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.



**Figura 1.** Schema della rottura del terreno e generazione e propagazione delle onde sismiche.

In altre parole, le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al., 1999).

Nella Figura 1 è rappresentato uno schema della rottura fragile del terreno in profondità con conseguente generazione di onde che si irradiano dall'ipocentro.

Se si ipotizza di avere installato un sismometro ad una grande distanza dall'ipocentro un possibile segnale registrato potrebbe essere quello mostrato nella Figura 2. Il segnale inizia con l'arrivo delle onde P caratterizzate da alte frequenze a bassa ampiezza. Successivamente arrivano le onde S che si propagano meno velocemente delle P e sono di frequenza più bassa e di maggiore ampiezza. Queste ultime sono in genere la causa dei maggiori danni. Le onde P e quelle S, come già descritto

nel capitolo A sono chiamate onde di volume per distinguerle da quelle di superficie che sono più lente.



**Figura 2.** Tipico sismogramma registrato in superficie a grande distanza.

In generale si può dire che le onde generate dalla sorgente sismica sono di due differenti tipi, cioè quelle associate a stati deformativi di compressione-dilatazione volumetrica, dette onde *P* che si propagano con velocità  $V_p$  pari a:

$$V_p = \sqrt{\frac{Mv}{\rho}}$$

con:

$$Mv = \lambda + 2G$$

dove:

- $\lambda$  = modulo di Lamé del terreno;
- $G$  = modulo elastico del taglio del terreno;
- $\rho$  = densità del volume del terreno;

Per le onde *P* il moto oscillatorio delle particelle di terreno avviene parallelamente alla direzione di propagazione.

Le onde *S* sono associate a deformazione di taglio ed hanno una velocità  $V_s$  pari a:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Il moto delle particelle di terreno è in tal caso perpendicolare alla direzione di propagazione. Il campo di spostamenti, in genere, è scomposto in due componenti perpendicolari tra di loro: le onde *SV* polarizzate nel piano verticale contenente la sorgente e le onde *SH* polarizzate nel piano orizzontale (piano della superficie libera del terreno in direzione perpendicolare al precedente).

Per maggiore chiarezza, se si considera il piano  $\pi$  verticale e contenente la direzione di propagazione dell'onda incidente, il moto della particella di terreno perpendicolare a tale piano costituisce l'onda *SH*, viceversa il moto nel piano costituisce l'onda *SV*.

Le onde *P* e *S* arrivate in superficie possono trasformarsi parzialmente in onde di diverso tipo (*P* in *S* oppure *S* in *P*) oppure in onde superficiali chiamate così perché viaggiano in superficie attenuandosi rapidamente con la profondità. Queste ultime si differenziano in onde di Rayleigh

quando il moto della particella di terreno è in un piano verticale oppure onde di Love quando il moto è in un piano orizzontale.

Con riferimento alla Figura 3, il fenomeno della propagazione delle onde può essere descritto come segue. Nella sua complessità morfologica, litologica e stratigrafica, un territorio può essere rappresentato come un insieme di formazioni superficiali, interessate dai loro fenomeni evolutivi tipici, poggianti su formazioni più profonde, i cui andamenti possono essere stati resi complessi fino alla creazione di affioramenti dai fenomeni tettonici ed orogenetici.

Prevalentemente, le formazioni profonde saranno costituite da rocce ignee o metamorfiche di origine sedimentaria, mentre quelle superficiali saranno di natura sedimentaria più recente, coerenti od incoerenti, e quindi di caratteristiche meccaniche ben differenziate rispetto alle prime. Le onde sismiche che si sono generate in profondità, e che sono già caratterizzate diversamente a seconda del meccanismo proprio della sorgente, subiscono una serie di modificazioni ulteriori (riflessioni e rifrazioni) nell'attraversare la crosta terrestre e giungere fino alle formazioni di base per il sito. Ad una certa distanza dall'epicentro, e per una porzione di territorio ragionevolmente limitata, il moto sismico apparirà come un fronte d'onda uniforme propagantesi dal basso verso l'alto, con una certa angolazione rispetto alla verticale, che viene trasmesso dalle formazioni di base a quelle superficiali.

Il moto al suolo tende a non dipendere più solamente dal tipo di rottura della sorgente e a diventare il risultato di due ulteriori meccanismi eventualmente combinati:

- la propagazione delle onde sismiche all'interno delle formazioni di base e dalla conformazione delle frontiere della stessa;
- la risposta dinamica delle formazioni superficiali.

Tutto ciò comporta una non omogeneità del moto vibratorio in superficie che può cambiare da punto a punto anche a breve distanza. Sugli aspetti quantitativi e qualitativi del fenomeno hanno pertanto grande rilevanza diversi fattori quali la natura delle onde sismiche incidenti ed in particolare il meccanismo di sorgente, le diversità fra le caratteristiche meccaniche dei terreni attraversati, ed in particolare tra formazioni di base e superficiali, la conformazione e la giacitura degli strati, la presenza di falde idriche, l'entità dei fenomeni dissipativi ed altri ancora.

Al variare delle condizioni locali, il moto alla superficie risulterà quindi differente per quanto attiene ai suoi caratteri principali e cioè: ampiezza, contenuto in frequenza e durata. Si osserva che tutti e tre questi caratteri sono significativi e concorrono a causare il danneggiamento delle strutture e l'instabilità dei terreni (frane, cedimenti, liquefazioni).

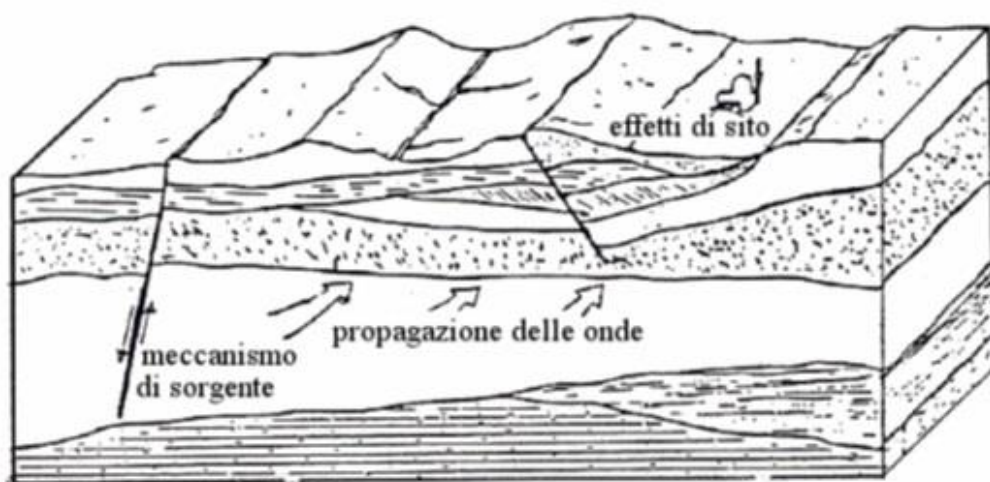


Figura 3. Schema di una situazione reale.

## 1.1 - Impostazione del Problema di Calcolo dell'Amplificazione Locale

Per illustrare gli aspetti principali del fenomeno della risposta sismica locale si paragoni il moto in corrispondenza di tre siti, indicati con A, B e C nella Figura 4, posti alla stessa distanza dalla sorgente sismica durante lo stesso evento sismico. Si supponga inoltre che il primo sito sia su un semispazio affiorante (per esempio roccia) e il secondo B su un deposito alluvionale posto al di sopra del semispazio ed il terzo C su di un rilievo.

In corrispondenza della coltre alluvionale si verifica, rispetto al moto sul semispazio affiorante, una amplificazione del moto in particolari campi di frequenza e una deamplificazione negli altri campi. Analogamente sul rilievo in C si verificheranno focalizzazioni oppure diradazioni di onde per effetto della forma del rilievo e della direzione di incidenza delle onde.

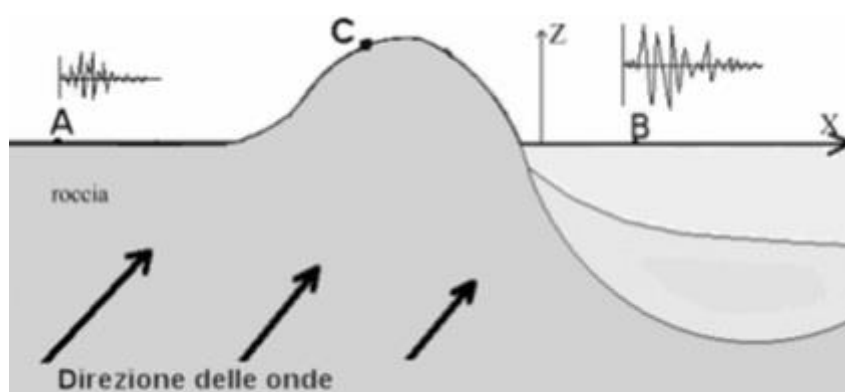


Figura 4. Schema della propagazione delle onde dalla sorgente e delle differenti condizioni locali.

In letteratura si parla di effetti stratigrafici o monodimensionali nel caso in cui le modifiche che il moto sismico subisce nel propagarsi in direzione prevalentemente verticale verso la superficie dal sottostante basamento roccioso siano essenzialmente attribuibili a fenomeni di filtraggio. L'amplificazione delle onde sismiche dipende, in questo caso dalla stratigrafia del sottosuolo, dalle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni e del contenuto in frequenza del moto sismico.

Il termine "effetti di bacino" è utilizzato quando le onde incidenti incontrano una valle alluvionale; in tal caso ai fenomeni sopra descritti si sovrappongono quelli dovuti al manifestarsi di fenomeni complessi di interazione tra le onde, che possono sommarsi o elidersi a vicenda, e generazione di onde superficiali. Spesso ai bordi della valle si verificano maggiori amplificazioni, dette: "effetti di bordo".

Con "effetti topografici" si intendono le modifiche delle caratteristiche del moto sismico causate essenzialmente da fenomeni di focalizzazione delle onde sismiche per effetto della particolare geometria della superficie (per es. la cresta di un rilievo o un canyon) e sono molto influenzati dalla lunghezza d'onda del moto incidente e dalla direzione di incidenza.

Lo scopo delle analisi di amplificazione sismica locale è quello di determinare il moto in B oppure in C una volta noto il moto nel sito di riferimento A. Tale moto di riferimento è in genere determinabile in via statistica (analisi di pericolosità) o deterministica dallo studio del meccanismo di rottura della sorgente nell'ipotesi che tra la sorgente stessa ed il sito in esame il mezzo sia omogeneo ed isotropo. Come è facile immaginare le caratteristiche del moto in superficie sono fortemente influenzate, oltre che dalla geometria degli strati e delle loro proprietà meccaniche, anche dalle caratteristiche



del moto incidente, cioè dalla direzione di propagazione, dal suo contenuto energetico e dalla direzione del moto delle particelle del terreno.

## **1.2 - Normativa di Riferimento**

La normative di riferimento per lo studio del problema in esame sono:

- NTC 2018 Cap 7.11.3.1 (Risposta Sismica Locale);
- Legge Regionale n. 35 del 19/10/2009 (Allegato 3 - Effetti di sito per interventi di tipo edilizio).

## 2 - Risposta Sismica Locale

Come già detto in precedenza, il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dei fattori anzidetti, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

1. Definizione input sismico;
2. Stima dell'accelerazione di base;
3. Dati di disaggregazione;
4. Estrazione, conversione e normalizzazione accelerogrammi di input;
5. Analisi di Risposta Sismica Locale;
6. Inserimento sismostratigrafia di input (derivata da indagine sismica MASW);
7. Esecuzione dell'analisi e restituzione grafica.

Le analisi numeriche che consentono di valutare gli effetti del sito nell'amplificazione delle onde sismiche possono essere distinte in:

- Analisi numeriche monodimensionali;
- Analisi numeriche bidimensionali;
- Analisi numeriche tridimensionali.

Il primo approccio consente di definire una realistica risposta sismica stratigrafica di terreni non affetti da problematiche bidimensionali. Questo approccio è ritenuto la via ufficiale delle NTC 2018 (Cap. 3.2.2) e consente, in determinati casi e mediante il confronto con la relativa categoria di sottosuolo, elementi di risparmio rispetto all'approccio semplificato di normativa, poiché identifica amplificazione per intervalli di periodi solitamente più limitati rispetto a quelli di normativa.

Il secondo approccio è da preferire in quelle situazioni in cui il sottosuolo presenta una geometria variabile in cui, oltre alla profondità, è importante considerare un'altra delle due restanti dimensioni spaziali. Un esempio di situazione che richiede l'utilizzo di modelli bidimensionali è il caso delle aree marginali delle valli alluvionali, in cui alle normali cause di amplificazione del moto sismico si sommano gli effetti di bordo connessi alla geometria del problema.

Il terzo approccio necessita di modelli complessi che richiedono capacità computazionali notevoli; solo recentemente iniziano ad avere una certa diffusione grazie al rapido sviluppo degli strumenti informatici. Il loro utilizzo è principalmente concentrato sulla valutazione delle amplificazioni in presenza di effetti morfologici, data l'importanza assunta in queste analisi dalla conoscenza precisa e dalla gestione di un modello tridimensionale del terreno.

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

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

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

#### 3.1 - Metodo lineare equivalente

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

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

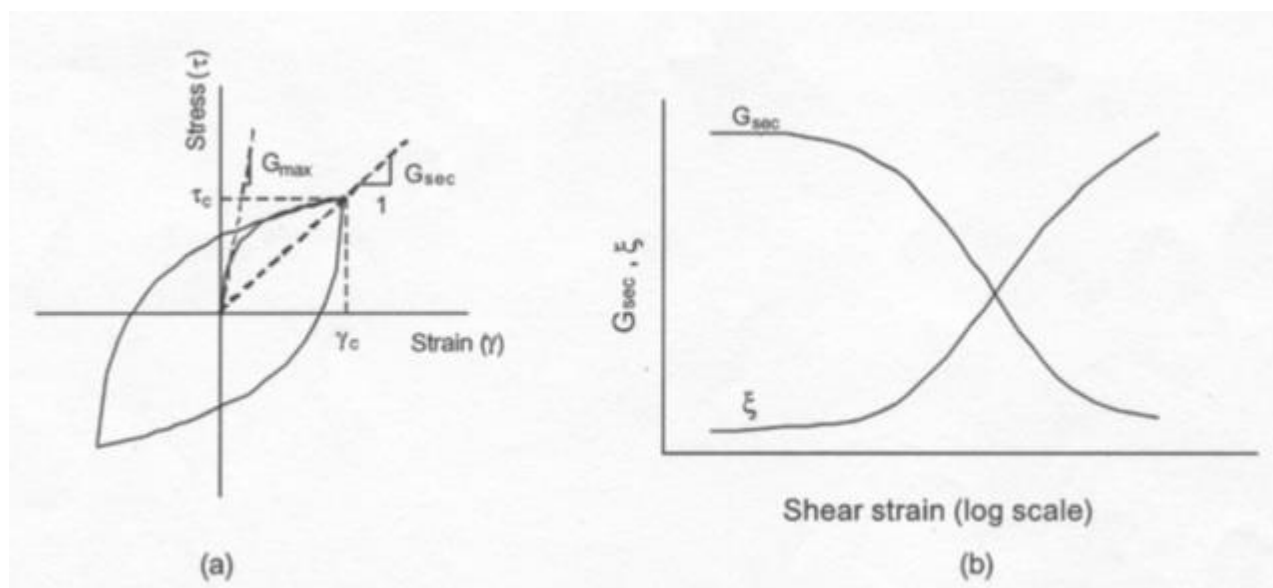
In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche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

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

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

dove:

- $G$  = Modulo di taglio;
- $\eta$  = viscosità del mezzo;



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

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

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

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

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

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

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

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

dove:

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

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

### 3.2 - Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

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

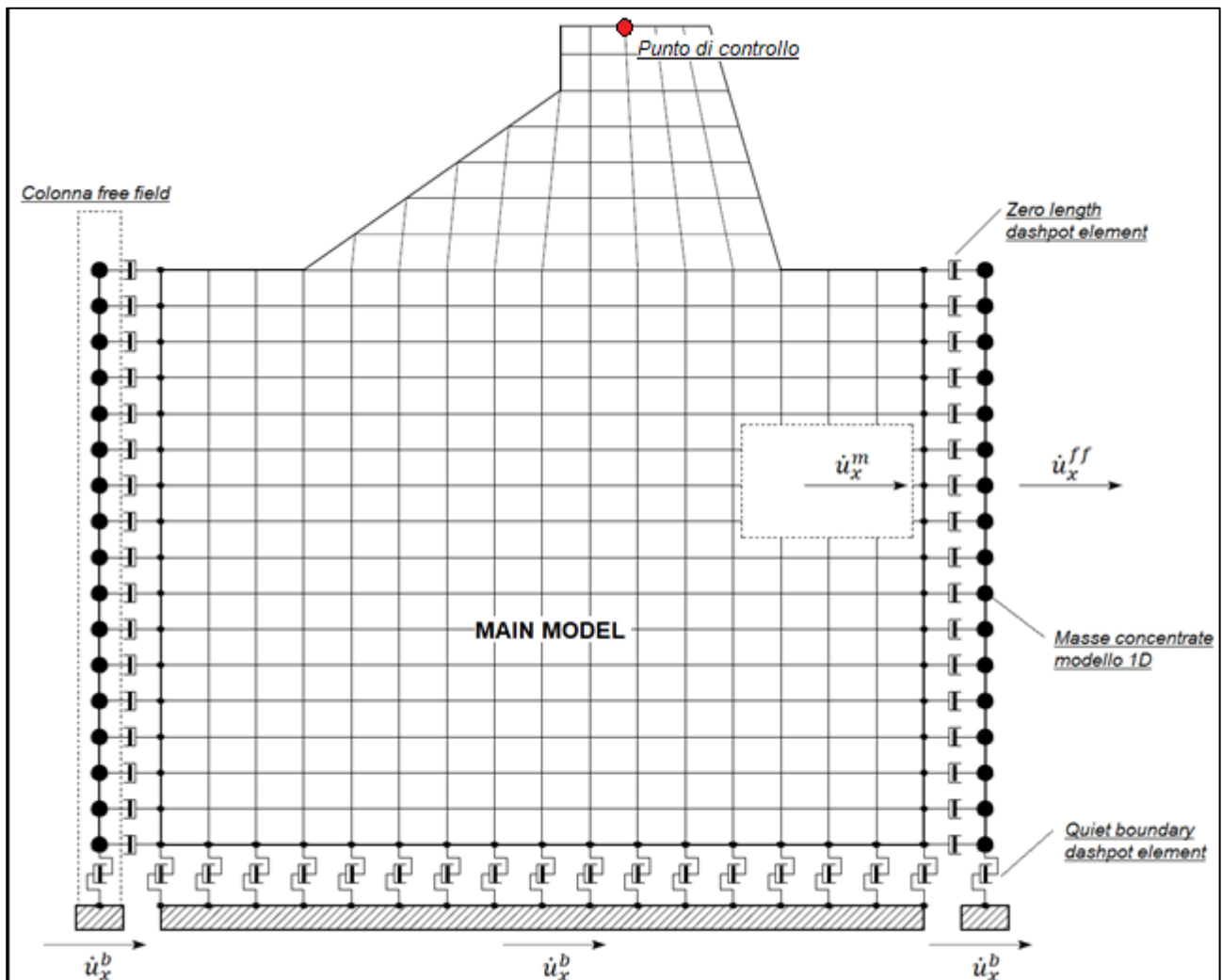


Figura 6. Discretizzazione FEM del deposito di terreno.

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

dove:

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

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

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

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

dove:

- $\Delta t$  = incremento temporale tra l'istante di tempo  $tn$  e  $tn - 1$ ;
- $\beta$  = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25;
- $\gamma$  = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50;

### Smorzamento

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

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

dove:

- $\alpha_q$  e  $\beta_q$  = coefficienti di smorzamento alla Rayleigh;

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

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

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

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

$$D_q = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha_q}{\omega} + \beta_q \omega \right)$$

dove:

- $\omega_1$  = frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega_2 = n * \omega_1$  con  $n = \omega_i / \omega_1$  (approssimato all'intero pari più grande) e  $\omega_i$  frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

### Free-field boundaries

Le condizioni di free-field sulle frontiere laterali vengono implementate mediante l'accoppiamento di smorzatori viscosi tra i nodi delle frontiere laterali del modello e i nodi di opportune colonne di terreno monodimensionali (colonne free-field) in grado di descrivere il moto in condizioni di campo libero. Le coordinate dei nodi delle frontiere laterali del modello e delle colonne free-field possono essere uguali. È necessario, affinché tali condizioni al contorno siano applicabili, che le frontiere laterali del modello siano perfettamente verticali. Le forze interne agli smorzatori possono essere ottenute mediante le seguenti equazioni:



$$F_x = -\rho V_p (\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff}) A \quad (1)$$

$$F_y = -\rho V_s (\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff}) A \quad (2)$$

dove:

- $\rho$ : densità di massa del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $V_p$ : velocità delle onde P del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $V_s$ : velocità delle onde S del terreno adiacente alla frontiera laterale;
- $A$ : area di influenza relativa al nodo su cui agisce lo smorzatore;
- $\dot{u}_x^m$ : velocità del nodo del modello in direzione x;
- $\dot{u}_y^m$ : velocità del nodo del modello in direzione y;
- $\dot{u}_x^{ff}$ : velocità del nodo della colonna free-field in direzione x;
- $\dot{u}_y^{ff}$ : velocità del nodo della colonna free-field in direzione y.

Le componenti della velocità dei nodi delle colonne laterali ad ogni istante di tempo vengono ottenute mediante una soluzione numerica monodimensionale a masse concentrate dell'equazione di propagazione delle onde. Tale soluzione è affidata ad un processo di calcolo che opera in parallelo rispetto a quello impiegato per la soluzione del modello principale. In altre parole, per il generico passo di integrazione temporale, vengono dapprima ottenute le componenti delle velocità delle colonne di campo libero attraverso la soluzione 1D, per poi essere convertite in carichi applicati al modello principale mediante le equazioni (1) e (2).

### 3.3 - Procedimento iterativo

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidezza e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Facendo riferimento alla Figura 7, lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico:

- definizione di curve  $G = G(\gamma)$  e  $D = D(\gamma)$  per i diversi strati;
- inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni ( $G_0$  e  $D_0$ );
- calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato ( $\gamma_1$ , Figura 7);
- aggiornamento dei valori  $G_1 = G(\gamma_1)$  e  $D_1 = D(\gamma_1)$ ;
- iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ( $\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$ ).

### 3.4 - Interpretazione dei risultati

Il risultato della procedura iterativa sopradescritta non è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM. Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione in superficie

in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica.

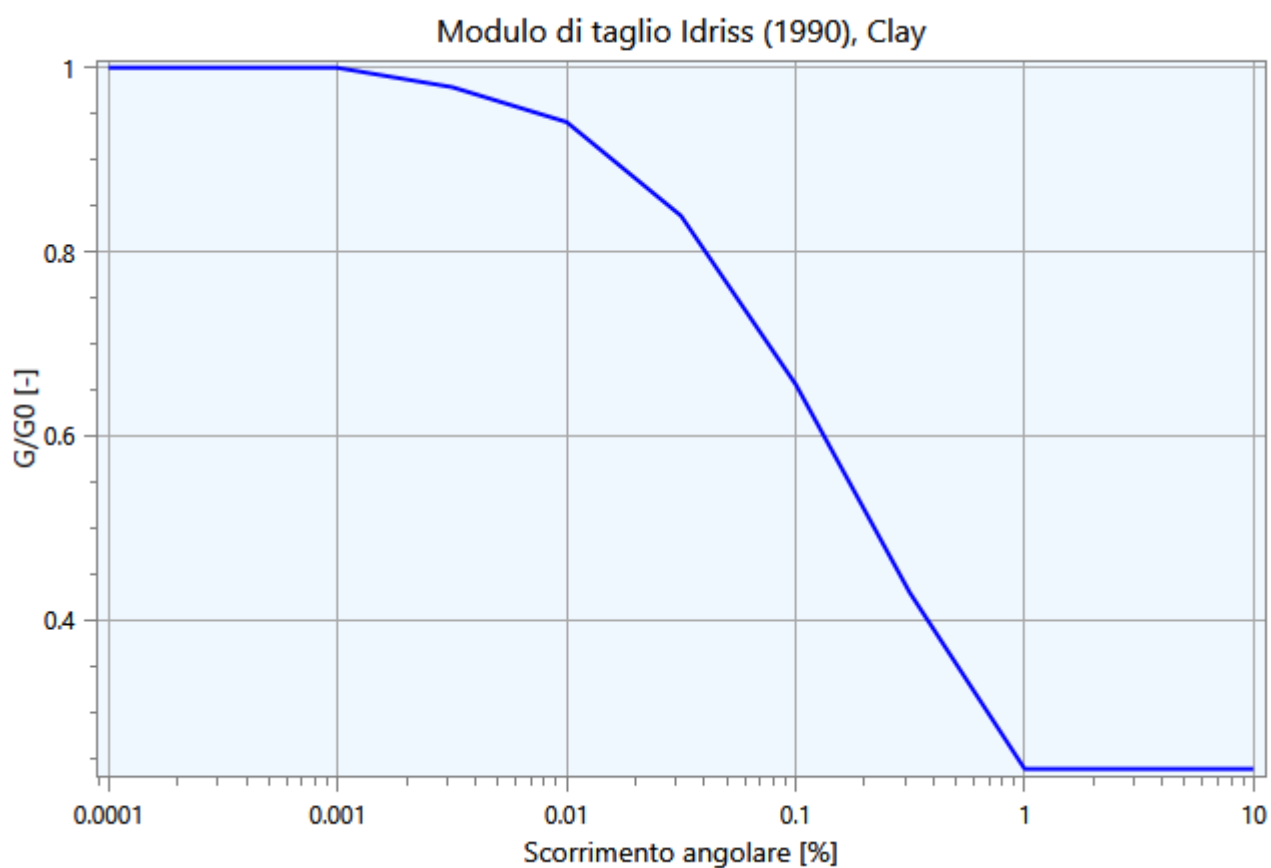
## 4 - Input

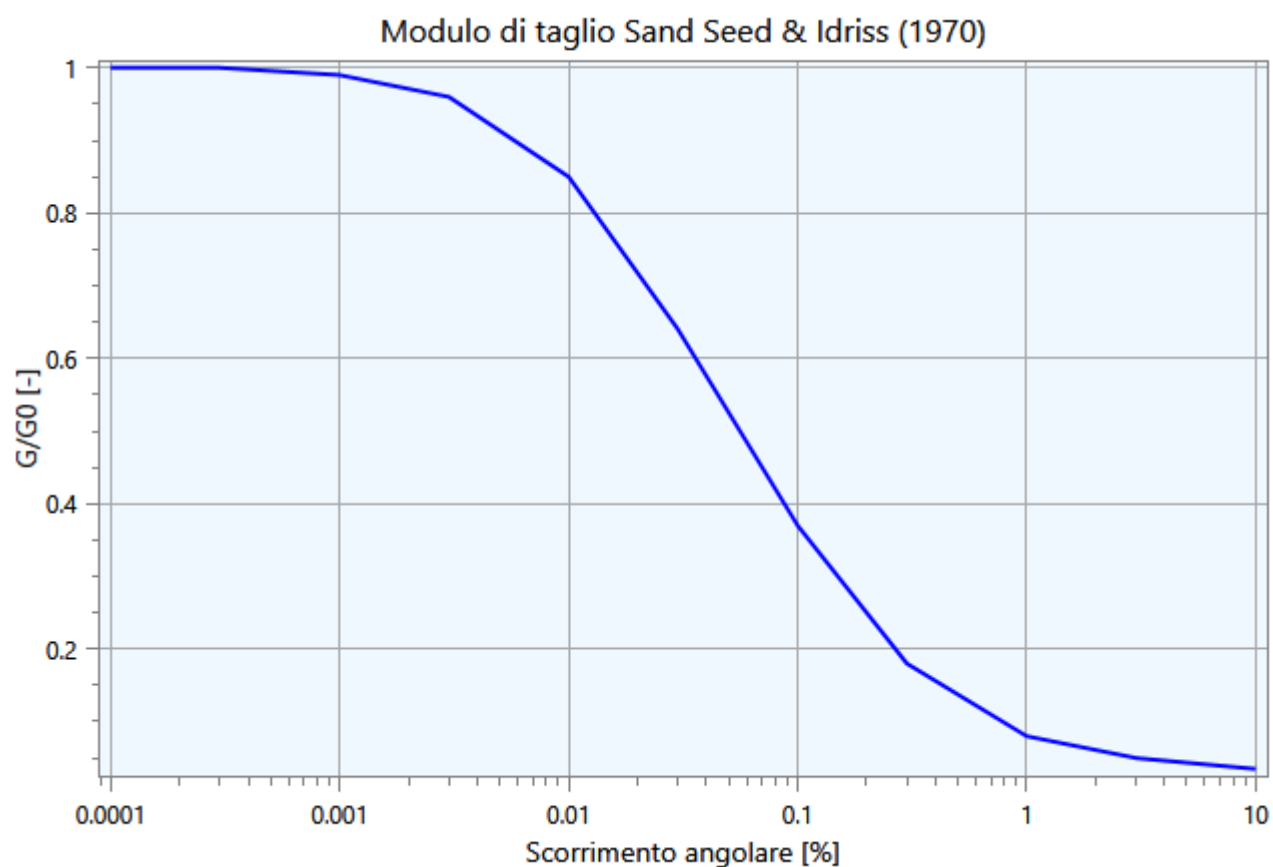
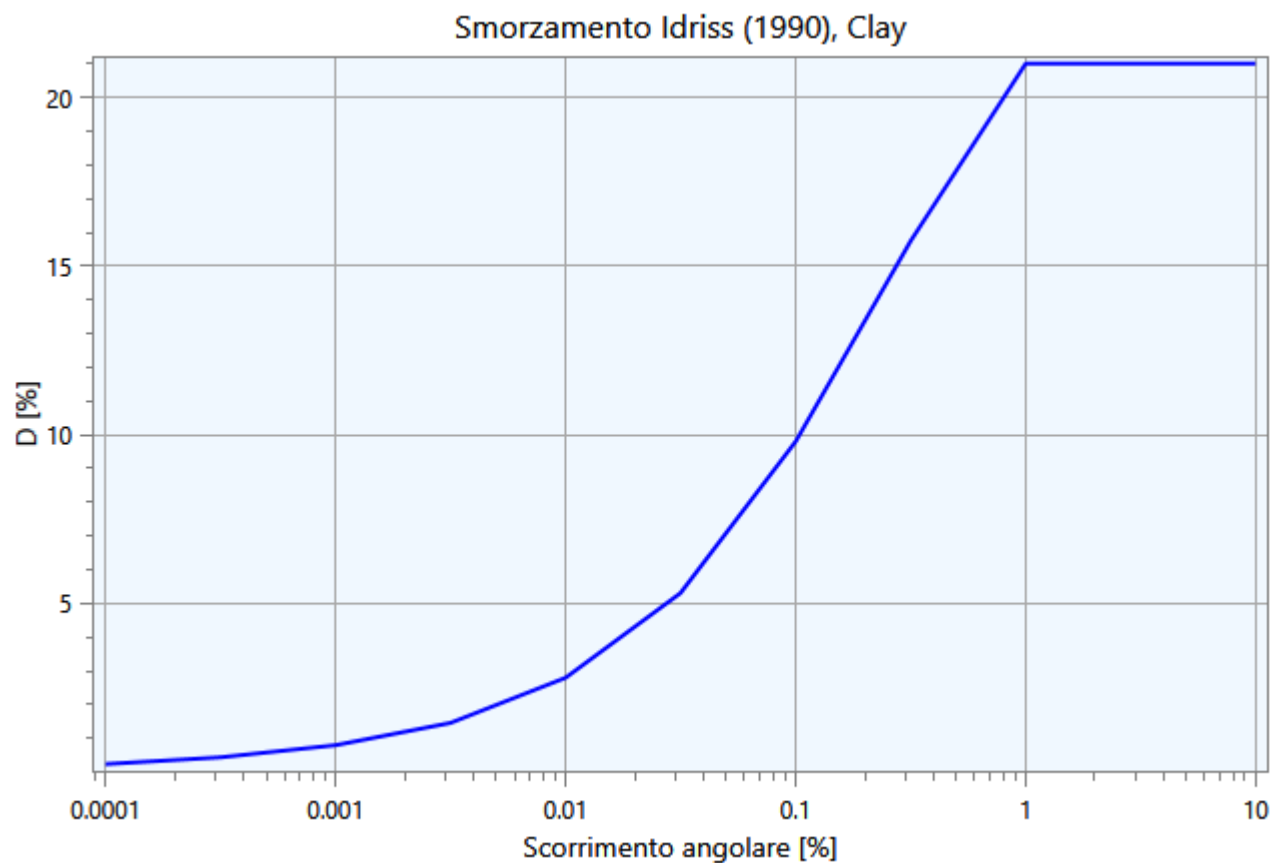
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai dati di input utilizzati per lo studio della risposta sismica locale del deposito.

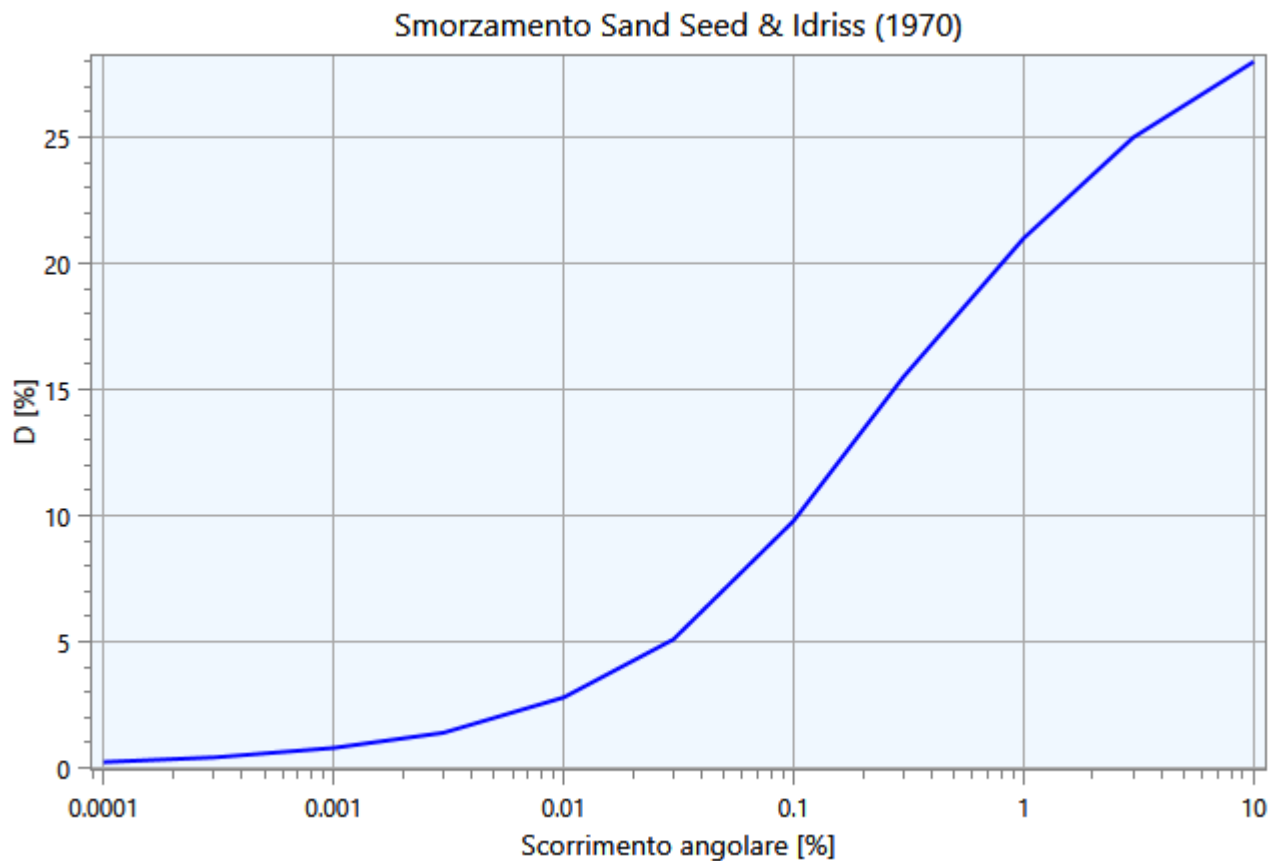
### 4.1 - Curve di Decadimento dei Materiali

All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio  $G$  ed un aumento del rapporto di smorzamento  $D$ . Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento una relativa a  $G$  ed una  $D$ .

Di seguito si riportano le curve di riferimento utilizzate nell'analisi:





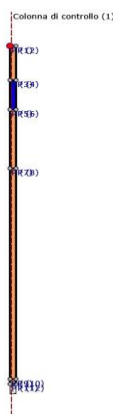


#### 4.2 - Stratigrafia e Caratteristiche meccaniche dei singoli strati

Sulla base del cosiddetto volume significativo di terreno interessato dal problema in esame, viene definita una stratigrafia di progetto che rappresenta l'andamento delle singole lenti di terreno in una sezione verticale.

Tale stratigrafia viene rappresentata nel piano verticale X-Z mediante una serie di spezzate ognuna delle quali identifica l'andamento del singolo strato. La prima di tali spezzate serve ad identificare l'orografia della porzione di sito oggetto di studio.

Di seguito si riporta una rappresentazione grafica della stratigrafia di progetto:



**Figura 7.** Stratigrafia di progetto.

Di seguito si riporta la tabella contenente le caratteristiche meccaniche dei singoli strati:

Strato	Descrizione	$S$ [m]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s]	$\gamma$	Curva decadimento
Strato (1)		7.00	1800.00	160.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (2)		6.00	1800.00	240.00	0.35	Sand Seed & Idriss (1970)
Strato (3)		12.00	1800.00	180.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (4)		43.00	1800.00	300.00	0.35	Idriss (1990), Clay
Strato (5)		1.00	1800.00	450.00	0.35	Idriss (1990), Clay

**Tabella 1.** Caratteristiche meccaniche strati.

dove:

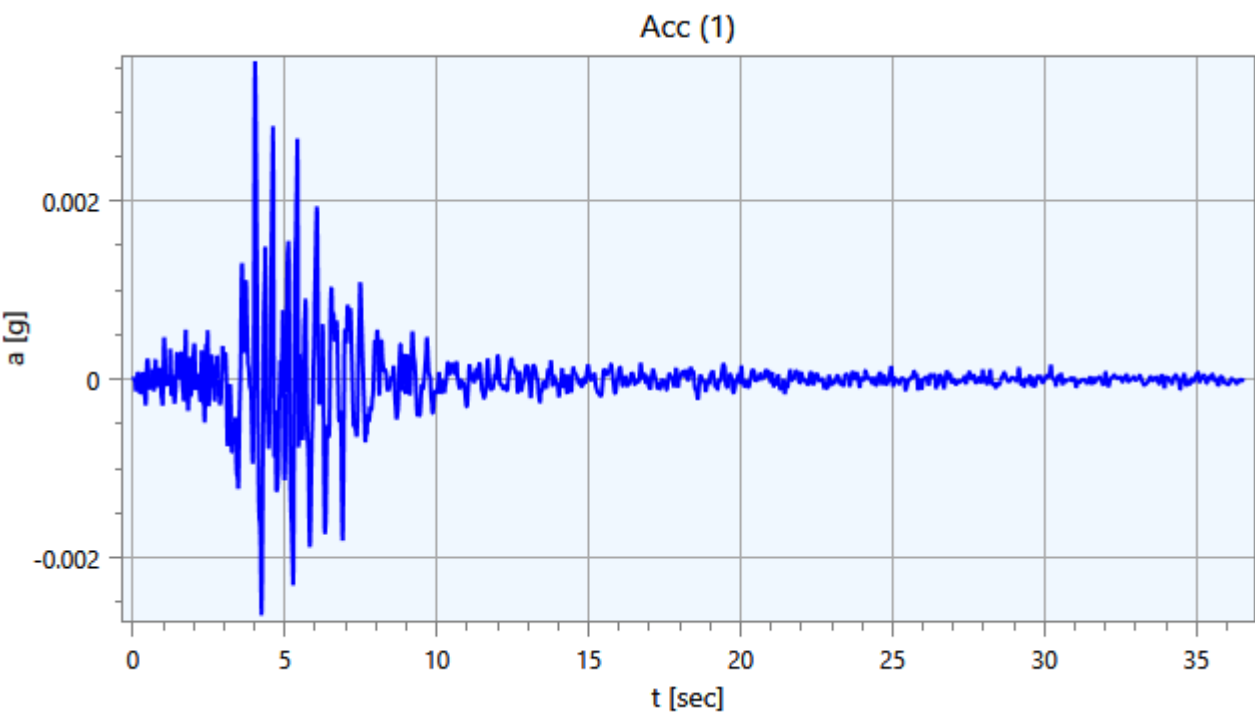
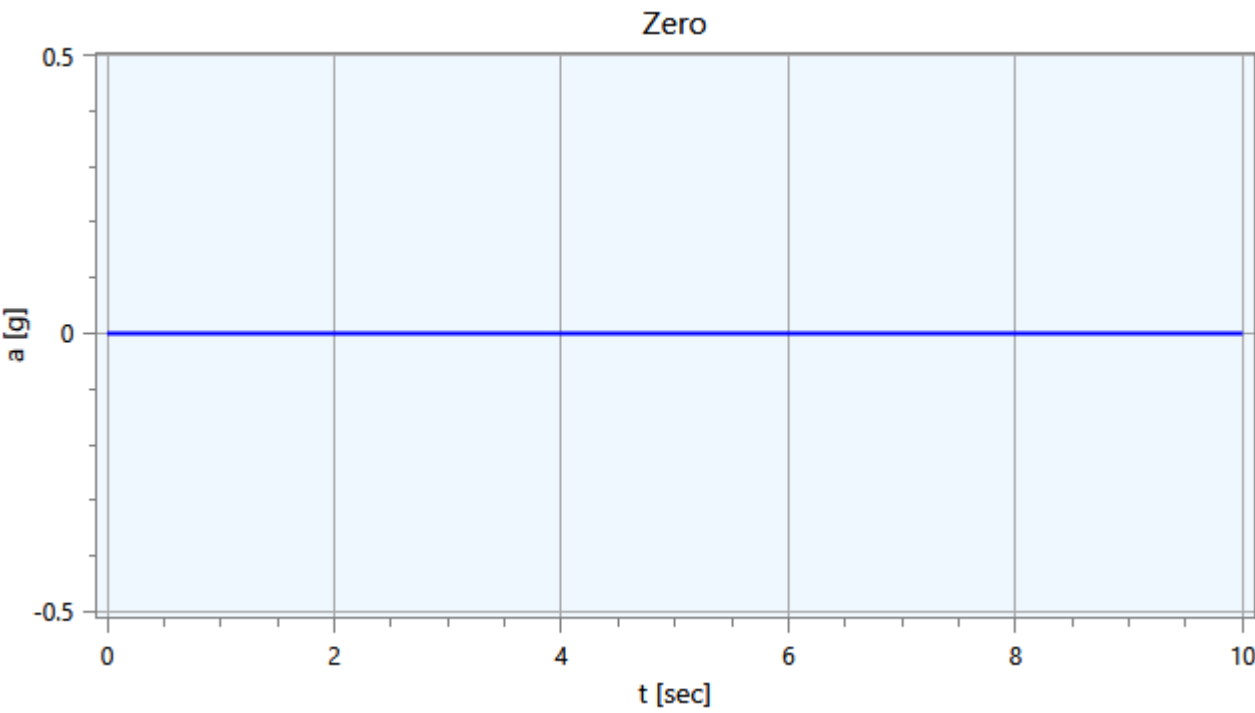
- $S$  = spessore del singolo strato;
- $\rho$  = densità di massa del singolo strato;
- $V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio del singolo strato;
- $\gamma$  = coefficiente di contrazione trasversale (di Poisson) del singolo strato;

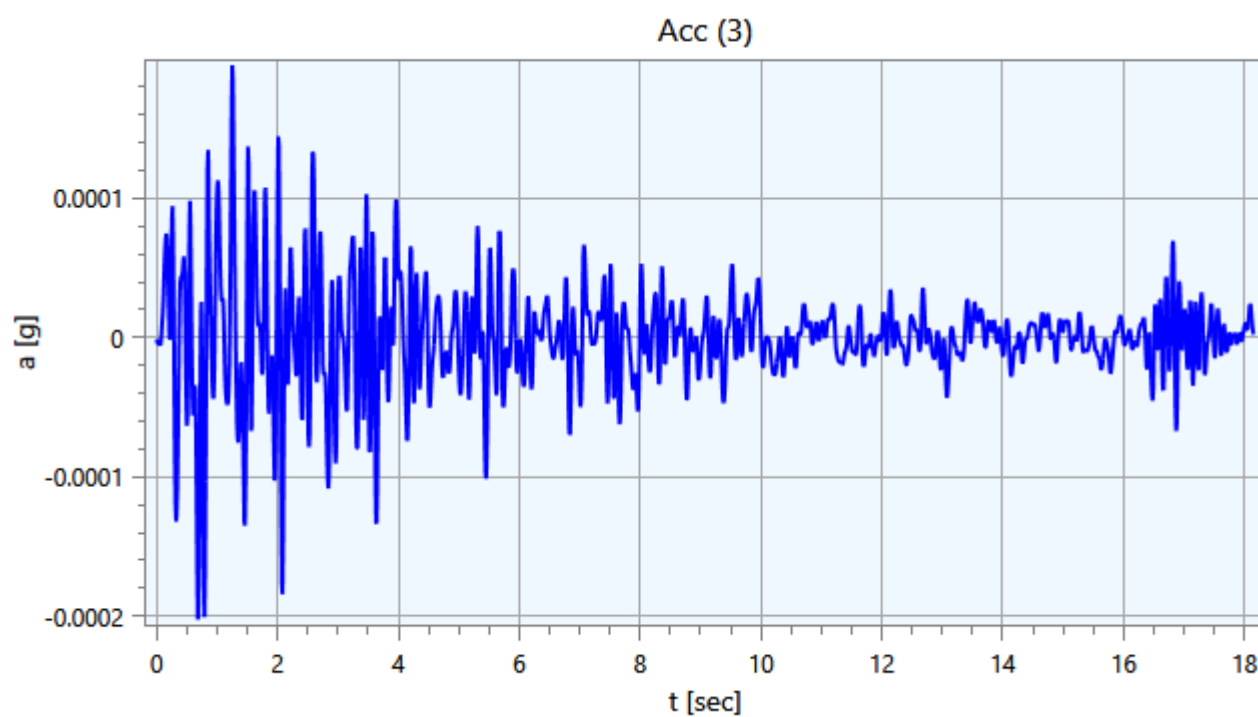
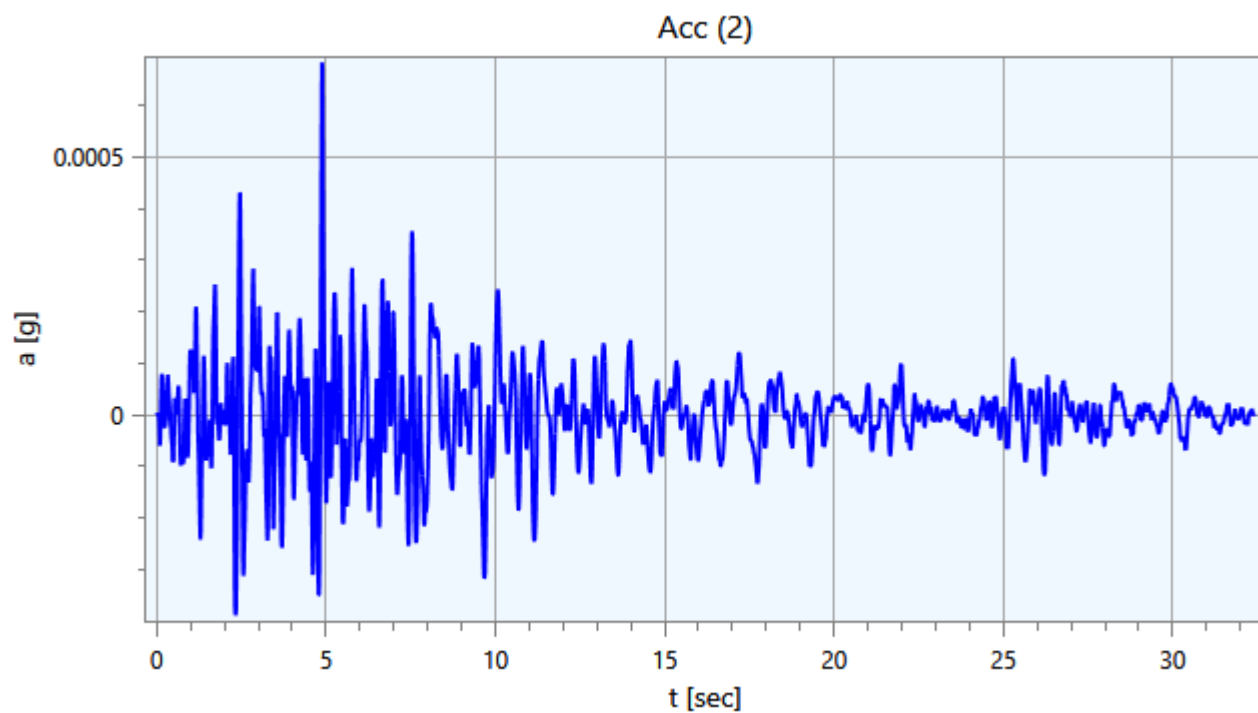
### 4.3 - Accelerogrammi e Spettri di Input

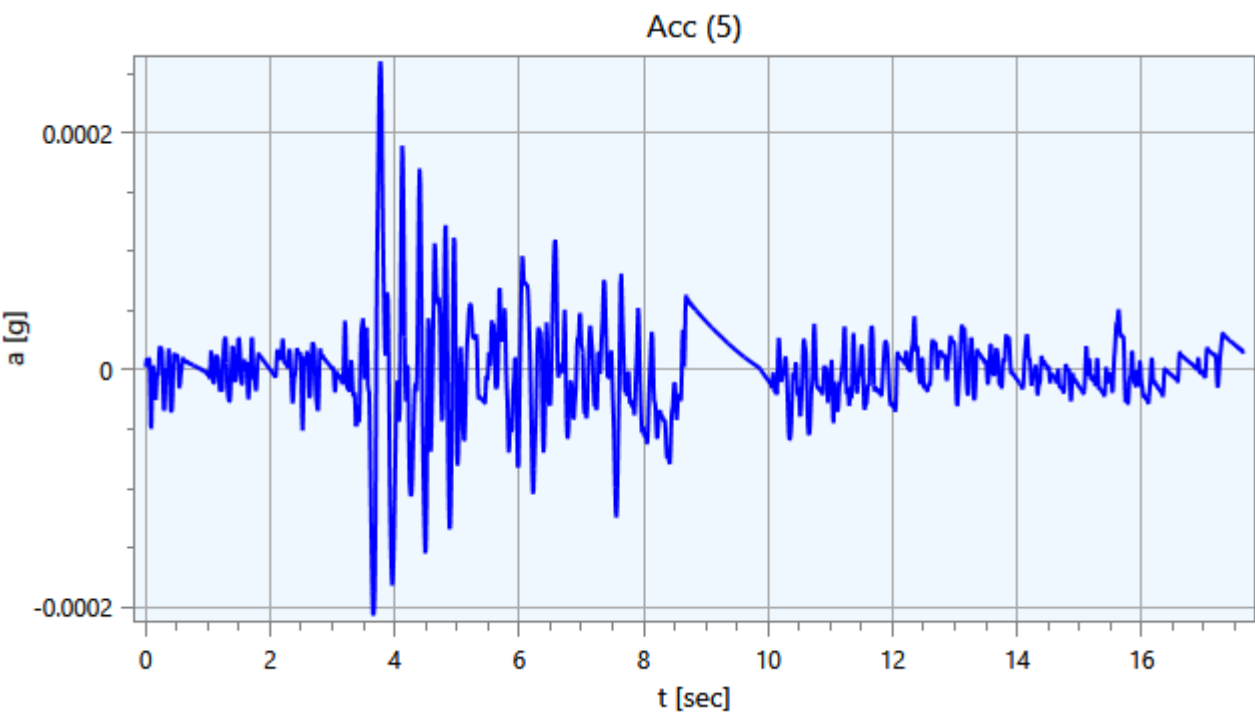
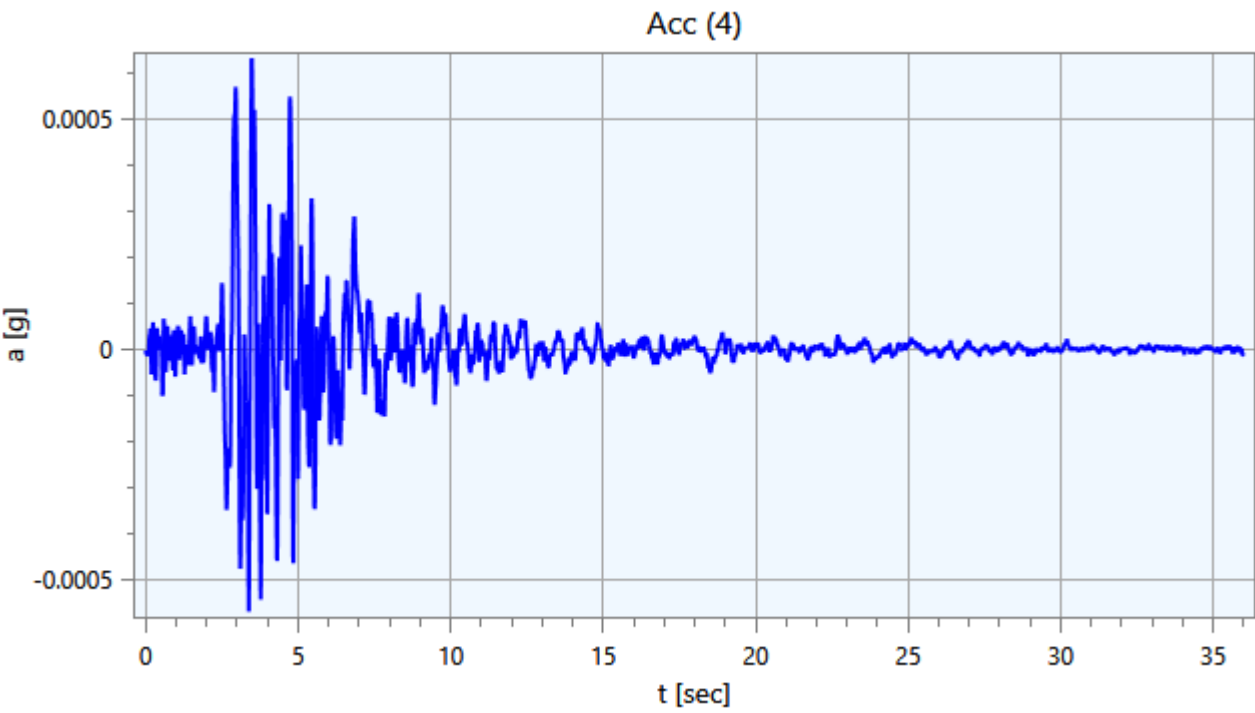
Gli accelerogrammi di input relativi allo stato limite in esame (ad esempio SLV) possono essere ottenuti tramite un'analisi con l'utilizzo dell'applicativo software REXEL v. 3.4 beta, che permette la ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con gli spettri delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018), dell'Eurocodice 8 (EC – CEN 2003), dell'ASCE/SEI 7-10 (ASCE, 2010). Il database utilizzato è l'Italian Accelerometric Archive (ITACA) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), scaricabile dal sito <http://itaca.mi.ingv.it>.

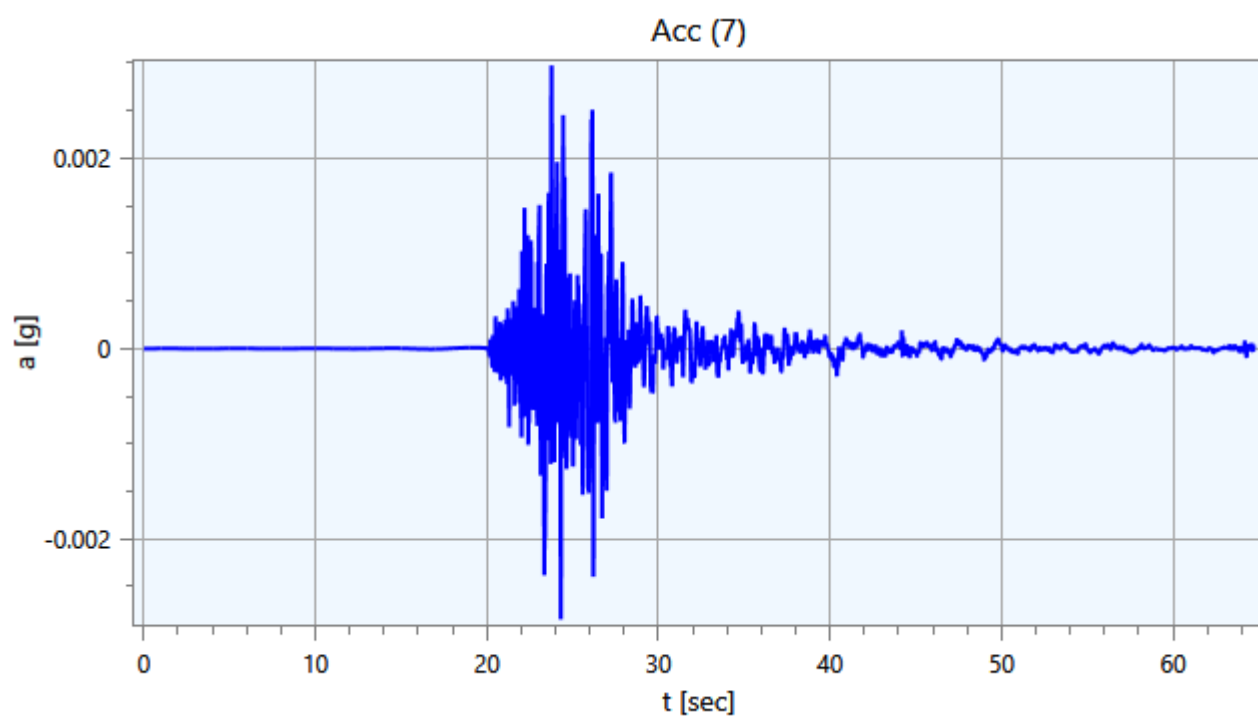
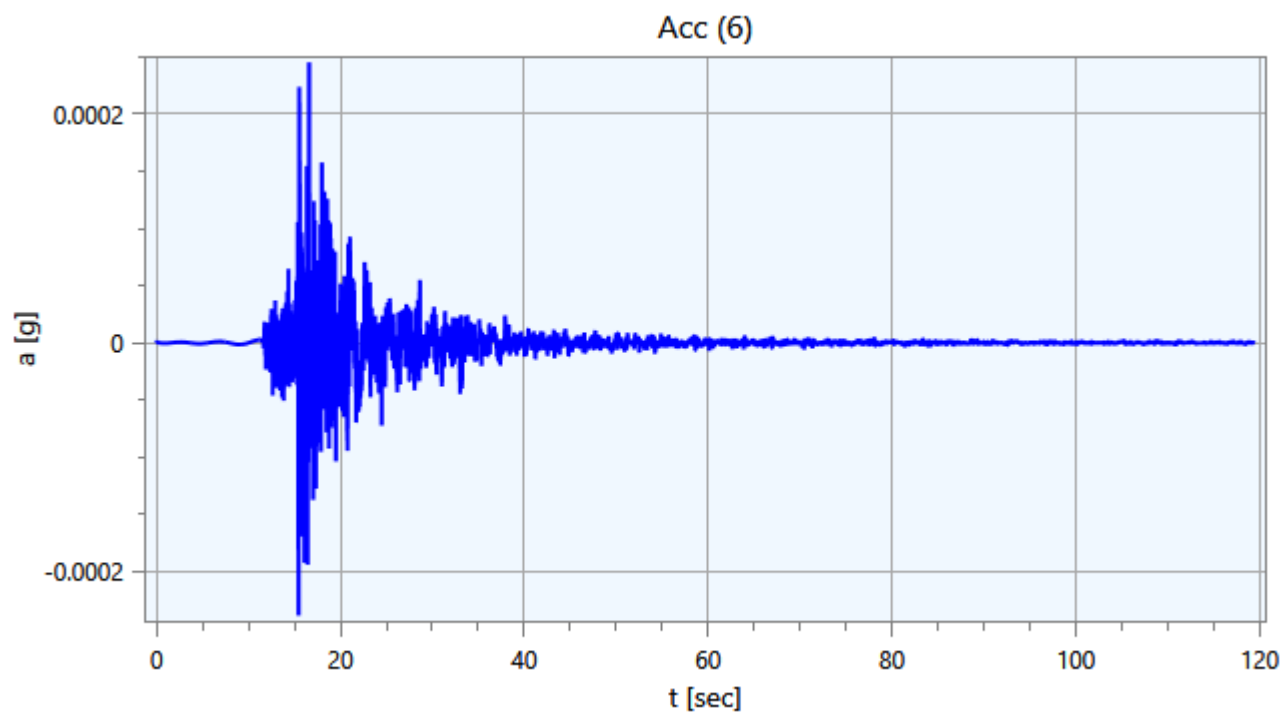
Di seguito si riportano gli accelerogrammi di progetto riferiti ad una condizione detta di 'outcrop':

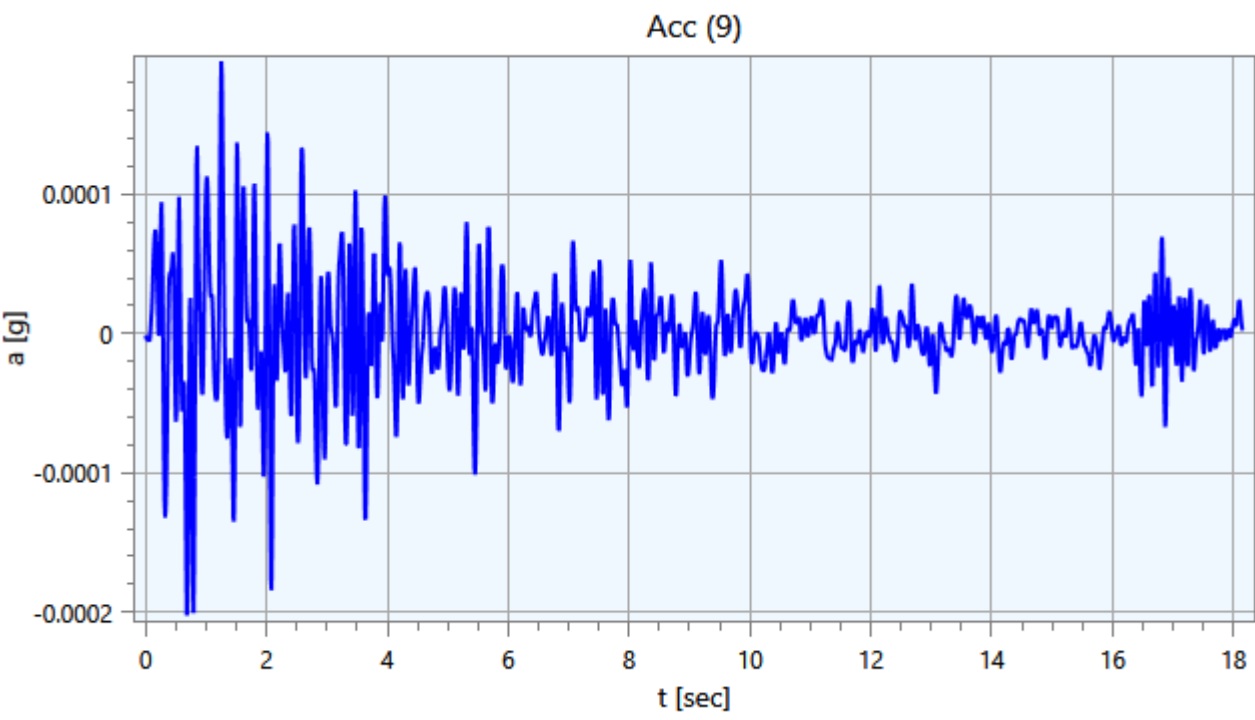
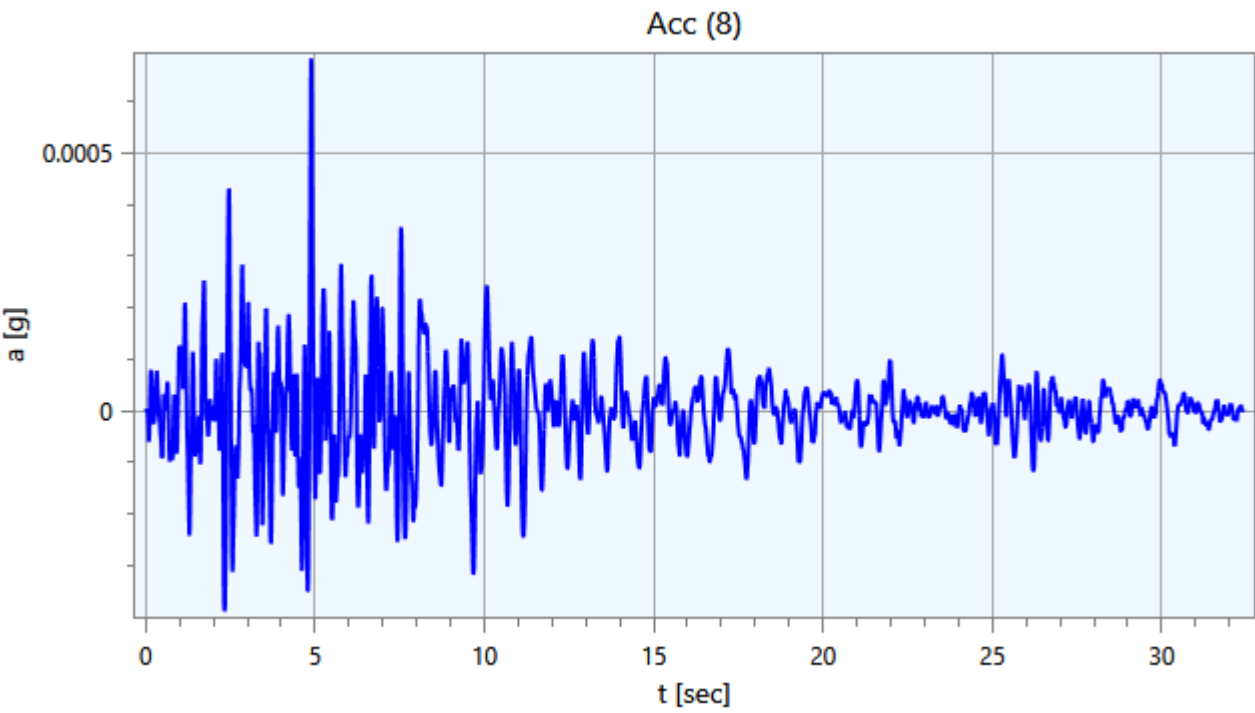


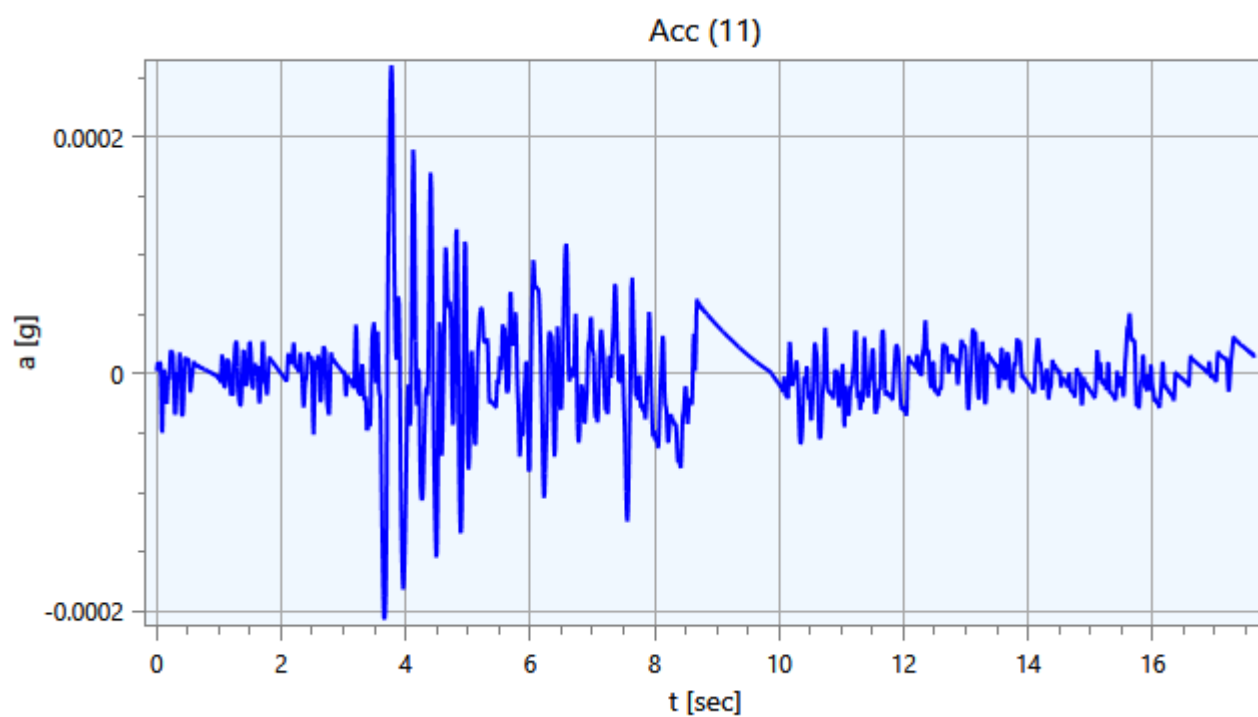
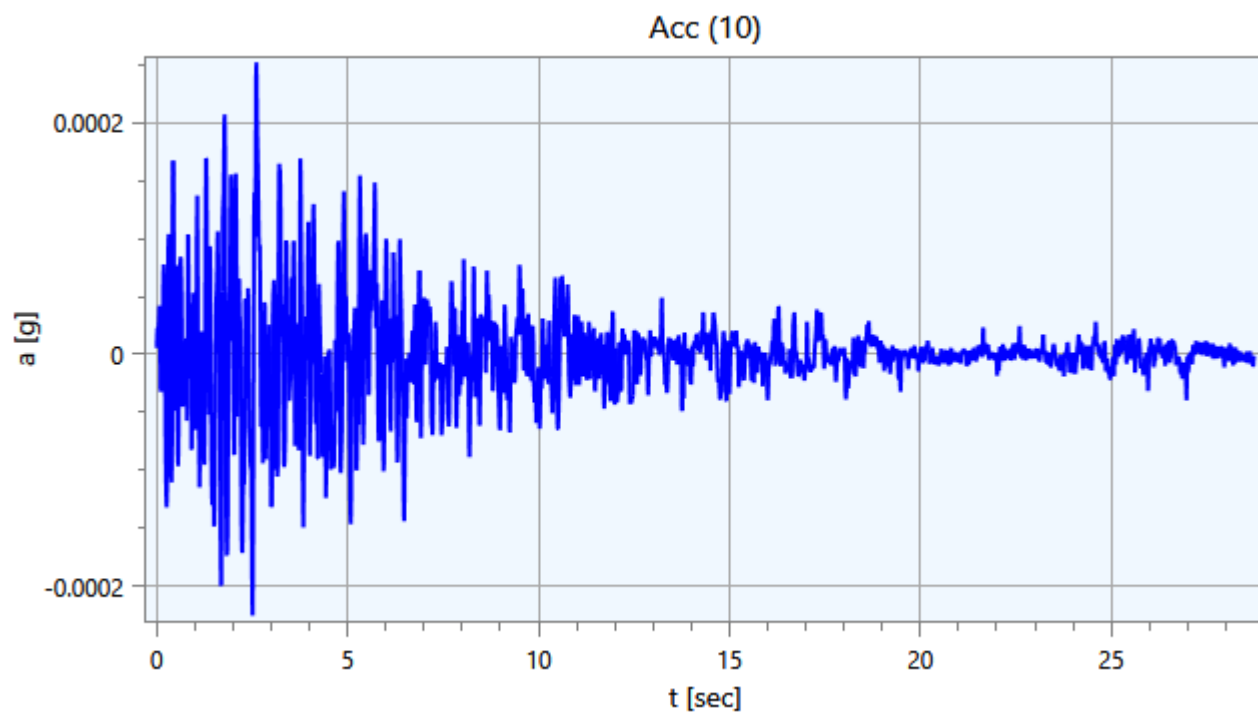


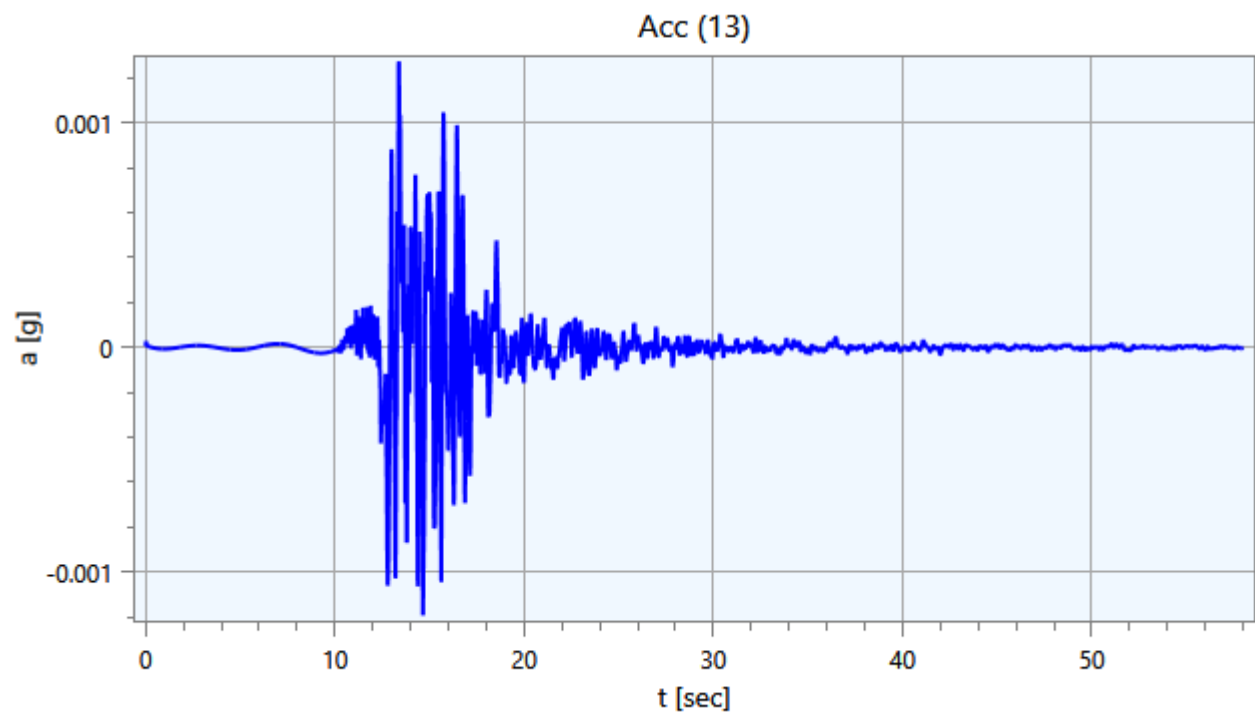
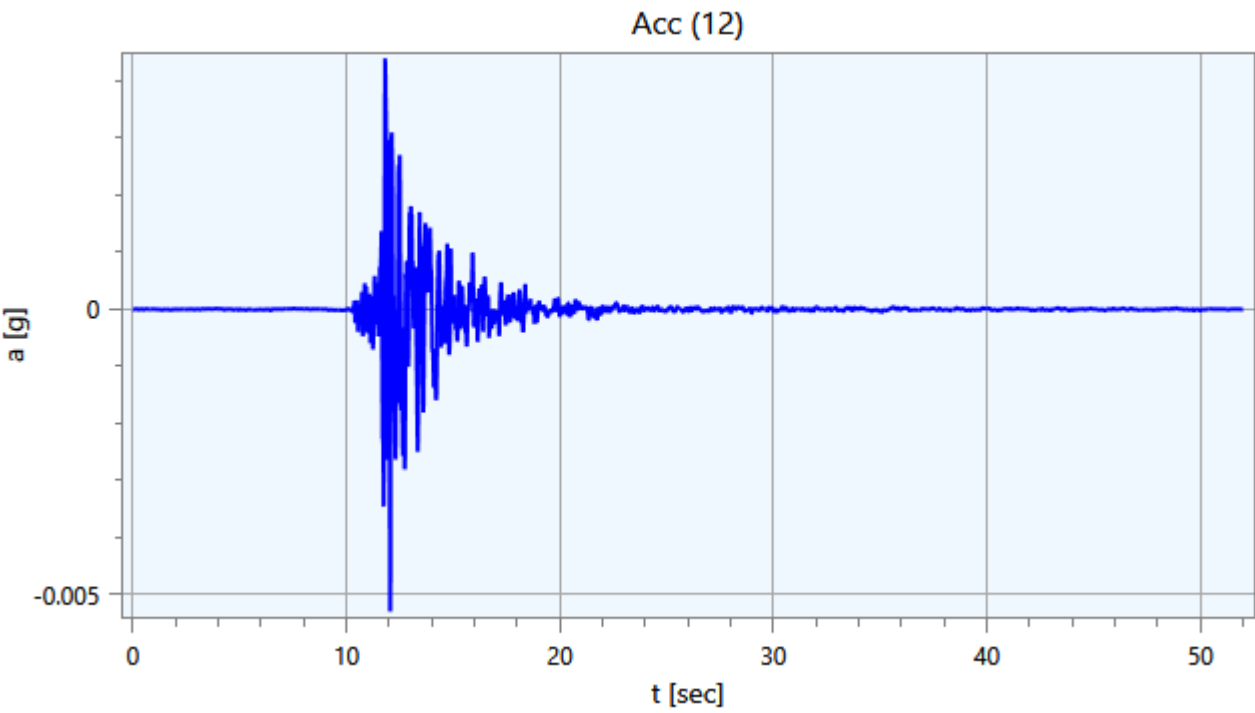




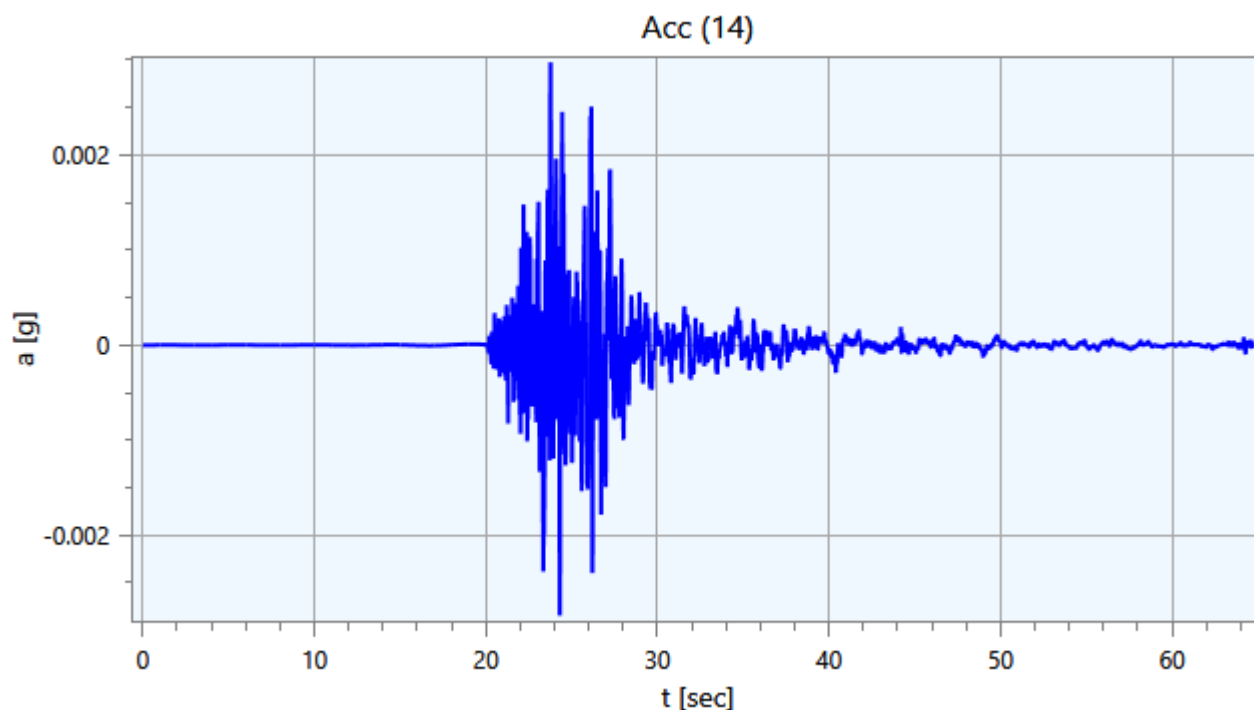












#### 4.4 - Modello di Calcolo FEM

Il modello di calcolo agli elementi finiti da utilizzare per lo studio della problematica in esame viene di seguito descritto.

Per ogni analisi, nel caso più generale, è necessario specificare due componenti di sollecitazione. In particolare vi sono, per ogni condizione, un accelerogramma di in direzione X (Orizzontale), ed uno in direzione Z (Verticale).

Ad ogni analisi corrispondono una serie di condizioni di carico. Per ognuna di esse vengono specificate due componenti di accelerazione di input in outcrop. In tabella vengono riportate le condizioni di carico relative al caso in esame:

slv

Condizione	Accelerogramma X
CDC (1)	Acc (1)
CDC (2)	Acc (2)
CDC (3)	Acc (3)
CDC (4)	Acc (4)
CDC (5)	Acc (5)
CDC (6)	Acc (6)
CDC (7)	Acc (7)

**Tabella 2.** Condizioni di carico.

SLD

Condizione	Accelerogramma X
CDC (1)	Acc (8)
CDC (2)	Acc (9)

CDC (3)	Acc (10)
CDC (4)	Acc (11)
CDC (5)	Acc (12)
CDC (6)	Acc (13)
CDC (7)	Acc (14)

**Tabella 3.** Condizioni di carico.

Il modello FEM viene ottenuto mediante una discretizzazione con elementi finiti piani a tre o a quattro nodi del dominio. Il passo ed i rapporti di infittimento della mesh in corrispondenza dei punti di controllo sono dati di input e possono variare a seconda del caso. Il passo della mesh deve soddisfare la seguente relazione:

$$p \leq \frac{V_{s,min}}{8 f_{max}}$$

dove:

- $p$  = passo della mesh;
- $V_{s,min}$  = velocità delle onde di taglio minima presente nel modello;
- $f_{max}$  = frequenza massima che si vuole analizzare;

Di seguito si riportano i nodi del modello con le rispettive coordinate nel riferimento X-Z:

Nodo	X [m]	Z [m]
1	-0.50	0.00
2	0.50	0.00
3	-0.50	0.00
4	0.50	0.00
5	-0.50	0.00
6	0.50	0.00
7	-0.50	0.00
8	0.50	0.00
9	-0.50	0.00
10	0.50	0.00
11	-0.50	0.00
12	0.50	0.00
13	-0.50	0.00
14	-0.50	0.00
15	-0.50	0.00
16	-0.50	0.00
17	-0.50	0.00
18	-0.50	0.00
19	-0.50	0.00
20	-0.50	0.00
21	-0.50	0.00
22	-0.50	0.00
23	-0.50	0.00
24	-0.50	0.00
25	-0.50	0.00
26	0.00	0.00
27	0.50	0.00
28	0.50	0.00
29	0.50	0.00
30	0.50	0.00
31	0.50	0.00
32	0.50	0.00

33	0.50	0.00
34	0.50	0.00
35	0.50	0.00
36	0.50	0.00
37	0.50	0.00
38	0.50	0.00
39	0.50	0.00
40	0.00	0.00
41	-0.50	0.00
42	-0.50	0.00
43	-0.50	0.00
44	-0.50	0.00
45	-0.50	0.00
46	-0.50	0.00
47	-0.50	0.00
48	-0.50	0.00
49	-0.50	0.00
50	-0.50	0.00
51	-0.50	0.00
52	0.00	0.00
53	0.50	0.00
54	0.50	0.00
55	0.50	0.00
56	0.50	0.00
57	0.50	0.00
58	0.50	0.00
59	0.50	0.00
60	0.50	0.00
61	0.50	0.00
62	0.50	0.00
63	0.50	0.00
64	-0.50	0.00
65	-0.50	0.00
66	-0.50	0.00
67	-0.50	0.00
68	-0.50	0.00
69	-0.50	0.00
70	-0.50	0.00
71	-0.50	0.00
72	-0.50	0.00
73	-0.50	0.00
74	-0.50	0.00
75	-0.50	0.00
76	-0.50	0.00
77	-0.50	0.00
78	-0.50	0.00
79	-0.50	0.00
80	-0.50	0.00
81	-0.50	0.00
82	-0.50	0.00
83	-0.50	0.00
84	-0.50	0.00
85	-0.50	0.00
86	-0.50	0.00
87	0.00	0.00

88	0.50	0.00
89	0.50	0.00
90	0.50	0.00
91	0.50	0.00
92	0.50	0.00
93	0.50	0.00
94	0.50	0.00
95	0.50	0.00
96	0.50	0.00
97	0.50	0.00
98	0.50	0.00
99	0.50	0.00
100	0.50	0.00
101	0.50	0.00
102	0.50	0.00
103	0.50	0.00
104	0.50	0.00
105	0.50	0.00
106	0.50	0.00
107	0.50	0.00
108	0.50	0.00
109	0.50	0.00
110	0.50	0.00
111	-0.50	0.00
112	-0.50	0.00
113	-0.50	0.00
114	-0.50	0.00
115	-0.50	0.00
116	-0.50	0.00
117	-0.50	0.00
118	-0.50	0.00
119	-0.50	0.00
120	-0.50	0.00
121	-0.50	0.00
122	-0.50	0.00
123	-0.50	0.00
124	-0.50	0.00
125	-0.50	0.00
126	-0.50	0.00
127	-0.50	0.00
128	-0.50	0.00
129	-0.50	0.00
130	-0.50	0.00
131	-0.50	0.00
132	-0.50	0.00
133	-0.50	0.00
134	-0.50	0.00
135	-0.50	0.00
136	-0.50	0.00
137	-0.50	0.00
138	-0.50	0.00
139	-0.50	0.00
140	-0.50	0.00
141	-0.50	0.00
142	-0.50	0.00

143	-0.50	0.00
144	-0.50	0.00
145	-0.50	0.00
146	-0.50	0.00
147	-0.50	0.00
148	-0.50	0.00
149	-0.50	0.00
150	-0.50	0.00
151	-0.50	0.00
152	-0.50	0.00
153	-0.50	0.00
154	-0.50	0.00
155	-0.50	0.00
156	-0.50	0.00
157	-0.50	0.00
158	-0.50	0.00
159	-0.50	0.00
160	-0.50	0.00
161	-0.50	0.00
162	-0.50	0.00
163	-0.50	0.00
164	-0.50	0.00
165	-0.50	0.00
166	-0.50	0.00
167	-0.50	0.00
168	-0.50	0.00
169	-0.50	0.00
170	-0.50	0.00
171	-0.50	0.00
172	-0.50	0.00
173	-0.50	0.00
174	-0.50	0.00
175	-0.50	0.00
176	-0.50	0.00
177	-0.50	0.00
178	-0.50	0.00
179	-0.50	0.00
180	-0.50	0.00
181	-0.50	0.00
182	-0.50	0.00
183	-0.50	0.00
184	-0.50	0.00
185	-0.50	0.00
186	-0.50	0.00
187	-0.50	0.00
188	-0.50	0.00
189	-0.50	0.00
190	-0.50	0.00
191	-0.50	0.00
192	-0.50	0.00
193	-0.50	0.00
194	-0.50	0.00
195	-0.50	0.00
196	0.00	0.00
197	0.50	0.00

198	0.50	0.00
199	0.50	0.00
200	0.50	0.00
201	0.50	0.00
202	0.50	0.00
203	0.50	0.00
204	0.50	0.00
205	0.50	0.00
206	0.50	0.00
207	0.50	0.00
208	0.50	0.00
209	0.50	0.00
210	0.50	0.00
211	0.50	0.00
212	0.50	0.00
213	0.50	0.00
214	0.50	0.00
215	0.50	0.00
216	0.50	0.00
217	0.50	0.00
218	0.50	0.00
219	0.50	0.00
220	0.50	0.00
221	0.50	0.00
222	0.50	0.00
223	0.50	0.00
224	0.50	0.00
225	0.50	0.00
226	0.50	0.00
227	0.50	0.00
228	0.50	0.00
229	0.50	0.00
230	0.50	0.00
231	0.50	0.00
232	0.50	0.00
233	0.50	0.00
234	0.50	0.00
235	0.50	0.00
236	0.50	0.00
237	0.50	0.00
238	0.50	0.00
239	0.50	0.00
240	0.50	0.00
241	0.50	0.00
242	0.50	0.00
243	0.50	0.00
244	0.50	0.00
245	0.50	0.00
246	0.50	0.00
247	0.50	0.00
248	0.50	0.00
249	0.50	0.00
250	0.50	0.00
251	0.50	0.00
252	0.50	0.00

253	0.50	0.00
254	0.50	0.00
255	0.50	0.00
256	0.50	0.00
257	0.50	0.00
258	0.50	0.00
259	0.50	0.00
260	0.50	0.00
261	0.50	0.00
262	0.50	0.00
263	0.50	0.00
264	0.50	0.00
265	0.50	0.00
266	0.50	0.00
267	0.50	0.00
268	0.50	0.00
269	0.50	0.00
270	0.50	0.00
271	0.50	0.00
272	0.50	0.00
273	0.50	0.00
274	0.50	0.00
275	0.50	0.00
276	0.50	0.00
277	0.50	0.00
278	0.50	0.00
279	0.50	0.00
280	0.50	0.00
281	0.50	0.00
282	-0.50	0.00
283	0.00	0.00
284	0.50	0.00
285	0.00	0.00
286	0.00	0.00
287	0.00	0.00
288	0.00	0.00
289	0.00	0.00
290	0.00	0.00
291	0.00	0.00
292	0.00	0.00
293	0.00	0.00
294	0.00	0.00
295	0.00	0.00
296	0.00	0.00
297	0.00	0.00
298	0.00	0.00
299	0.00	0.00
300	0.00	0.00
301	0.00	0.00
302	0.00	0.00
303	0.00	0.00
304	0.00	0.00
305	0.00	0.00
306	0.00	0.00
307	0.00	0.00



308	0.00	0.00
309	0.00	0.00
310	0.00	0.00
311	0.00	0.00
312	0.00	0.00
313	0.00	0.00
314	0.00	0.00
315	0.00	0.00
316	0.00	0.00
317	0.00	0.00
318	0.00	0.00
319	0.00	0.00
320	0.00	0.00
321	0.00	0.00
322	0.00	0.00
323	0.00	0.00
324	0.00	0.00
325	0.00	0.00
326	0.00	0.00
327	0.00	0.00
328	0.00	0.00
329	0.00	0.00
330	0.00	0.00
331	0.00	0.00
332	0.00	0.00
333	0.00	0.00
334	0.00	0.00
335	0.00	0.00
336	0.00	0.00
337	0.00	0.00
338	0.00	0.00
339	0.00	0.00
340	0.00	0.00
341	0.00	0.00
342	0.00	0.00
343	0.00	0.00
344	0.00	0.00
345	0.00	0.00
346	0.00	0.00
347	0.00	0.00
348	0.00	0.00
349	0.00	0.00
350	0.00	0.00
351	0.00	0.00
352	0.00	0.00
353	0.00	0.00
354	0.00	0.00
355	0.00	0.00
356	0.00	0.00
357	0.00	0.00
358	0.00	0.00
359	0.00	0.00
360	0.00	0.00
361	0.00	0.00
362	0.00	0.00

363	0.00	0.00
364	0.00	0.00
365	0.00	0.00
366	0.00	0.00
367	0.00	0.00
368	0.00	0.00
369	0.00	0.00
370	0.00	0.00
371	0.00	0.00
372	0.00	0.00
373	0.00	0.00
374	0.00	0.00
375	0.00	0.00
376	0.00	0.00
377	0.00	0.00
378	0.00	0.00
379	0.00	0.00
380	0.00	0.00
381	0.00	0.00
382	0.00	0.00
383	0.00	0.00
384	0.00	0.00
385	0.00	0.00
386	0.00	0.00
387	0.00	0.00
388	0.00	0.00
389	0.00	0.00
390	0.00	0.00
391	0.00	0.00
392	0.00	0.00
393	0.00	0.00
394	0.00	0.00
395	0.00	0.00
396	0.00	0.00
397	0.00	0.00
398	0.00	0.00
399	0.00	0.00
400	0.00	0.00
401	0.00	0.00
402	0.00	0.00
403	0.00	0.00
404	0.00	0.00
405	0.00	0.00
406	0.00	0.00
407	0.00	0.00
408	0.00	0.00
409	0.00	0.00
410	0.00	0.00
411	0.00	0.00
412	0.00	0.00
413	0.00	0.00
414	0.00	0.00
415	0.00	0.00
416	0.00	0.00
417	0.00	0.00

Tabella 4. Nodi del modello FEM.

Di seguito gli elementi:

Elemento	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
1	1	13	285	40
2	13	14	286	285
3	14	15	287	286
4	15	16	288	287
5	16	17	289	288
6	17	18	290	289
7	18	19	291	290
8	19	20	292	291
9	20	21	293	292
10	21	22	294	293
11	22	23	295	294
12	23	24	296	295
13	24	25	297	296
14	25	3	26	297
15	40	285	39	2
16	285	286	38	39
17	286	287	37	38
18	287	288	36	37
19	288	289	35	36
20	289	290	34	35
21	290	291	33	34
22	291	292	32	33
23	292	293	31	32
24	293	294	30	31
25	294	295	29	30
26	295	296	28	29
27	296	297	27	28
28	297	26	4	27
29	3	41	298	26
30	41	42	299	298
31	42	43	300	299
32	43	44	301	300
33	44	45	302	301
34	45	46	303	302
35	46	47	304	303
36	47	48	305	304
37	48	49	306	305
38	49	50	307	306
39	50	51	308	307
40	51	5	52	308
41	26	298	63	4
42	298	299	62	63
43	299	300	61	62
44	300	301	60	61
45	301	302	59	60
46	302	303	58	59
47	303	304	57	58
48	304	305	56	57
49	305	306	55	56
50	306	307	54	55

51	307	308	53	54
52	308	52	6	53
53	5	64	309	52
54	64	65	310	309
55	65	66	311	310
56	66	67	312	311
57	67	68	313	312
58	68	69	314	313
59	69	70	315	314
60	70	71	316	315
61	71	72	317	316
62	72	73	318	317
63	73	74	319	318
64	74	75	320	319
65	75	76	321	320
66	76	77	322	321
67	77	78	323	322
68	78	79	324	323
69	79	80	325	324
70	80	81	326	325
71	81	82	327	326
72	82	83	328	327
73	83	84	329	328
74	84	85	330	329
75	85	86	331	330
76	86	7	87	331
77	52	309	110	6
78	309	310	109	110
79	310	311	108	109
80	311	312	107	108
81	312	313	106	107
82	313	314	105	106
83	314	315	104	105
84	315	316	103	104
85	316	317	102	103
86	317	318	101	102
87	318	319	100	101
88	319	320	99	100
89	320	321	98	99
90	321	322	97	98
91	322	323	96	97
92	323	324	95	96
93	324	325	94	95
94	325	326	93	94
95	326	327	92	93
96	327	328	91	92
97	328	329	90	91
98	329	330	89	90
99	330	331	88	89
100	331	87	8	88
101	7	111	332	87
102	111	112	333	332
103	112	113	334	333
104	113	114	335	334
105	114	115	336	335

106	115	116	337	336
107	116	117	338	337
108	117	118	339	338
109	118	119	340	339
110	119	120	341	340
111	120	121	342	341
112	121	122	343	342
113	122	123	344	343
114	123	124	345	344
115	124	125	346	345
116	125	126	347	346
117	126	127	348	347
118	127	128	349	348
119	128	129	350	349
120	129	130	351	350
121	130	131	352	351
122	131	132	353	352
123	132	133	354	353
124	133	134	355	354
125	134	135	356	355
126	135	136	357	356
127	136	137	358	357
128	137	138	359	358
129	138	139	360	359
130	139	140	361	360
131	140	141	362	361
132	141	142	363	362
133	142	143	364	363
134	143	144	365	364
135	144	145	366	365
136	145	146	367	366
137	146	147	368	367
138	147	148	369	368
139	148	149	370	369
140	149	150	371	370
141	150	151	372	371
142	151	152	373	372
143	152	153	374	373
144	153	154	375	374
145	154	155	376	375
146	155	156	377	376
147	156	157	378	377
148	157	158	379	378
149	158	159	380	379
150	159	160	381	380
151	160	161	382	381
152	161	162	383	382
153	162	163	384	383
154	163	164	385	384
155	164	165	386	385
156	165	166	387	386
157	166	167	388	387
158	167	168	389	388
159	168	169	390	389
160	169	170	391	390

161	170	171	392	391
162	171	172	393	392
163	172	173	394	393
164	173	174	395	394
165	174	175	396	395
166	175	176	397	396
167	176	177	398	397
168	177	178	399	398
169	178	179	400	399
170	179	180	401	400
171	180	181	402	401
172	181	182	403	402
173	182	183	404	403
174	183	184	405	404
175	184	185	406	405
176	185	186	407	406
177	186	187	408	407
178	187	188	409	408
179	188	189	410	409
180	189	190	411	410
181	190	191	412	411
182	191	192	413	412
183	192	193	414	413
184	193	194	415	414
185	194	195	416	415
186	195	9	196	416
187	87	332	281	8
188	332	333	280	281
189	333	334	279	280
190	334	335	278	279
191	335	336	277	278
192	336	337	276	277
193	337	338	275	276
194	338	339	274	275
195	339	340	273	274
196	340	341	272	273
197	341	342	271	272
198	342	343	270	271
199	343	344	269	270
200	344	345	268	269
201	345	346	267	268
202	346	347	266	267
203	347	348	265	266
204	348	349	264	265
205	349	350	263	264
206	350	351	262	263
207	351	352	261	262
208	352	353	260	261
209	353	354	259	260
210	354	355	258	259
211	355	356	257	258
212	356	357	256	257
213	357	358	255	256
214	358	359	254	255
215	359	360	253	254

216	360	361	252	253
217	361	362	251	252
218	362	363	250	251
219	363	364	249	250
220	364	365	248	249
221	365	366	247	248
222	366	367	246	247
223	367	368	245	246
224	368	369	244	245
225	369	370	243	244
226	370	371	242	243
227	371	372	241	242
228	372	373	240	241
229	373	374	239	240
230	374	375	238	239
231	375	376	237	238
232	376	377	236	237
233	377	378	235	236
234	378	379	234	235
235	379	380	233	234
236	380	381	232	233
237	381	382	231	232
238	382	383	230	231
239	383	384	229	230
240	384	385	228	229
241	385	386	227	228
242	386	387	226	227
243	387	388	225	226
244	388	389	224	225
245	389	390	223	224
246	390	391	222	223
247	391	392	221	222
248	392	393	220	221
249	393	394	219	220
250	394	395	218	219
251	395	396	217	218
252	396	397	216	217
253	397	398	215	216
254	398	399	214	215
255	399	400	213	214
256	400	401	212	213
257	401	402	211	212
258	402	403	210	211
259	403	404	209	210
260	404	405	208	209
261	405	406	207	208
262	406	407	206	207
263	407	408	205	206
264	408	409	204	205
265	409	410	203	204
266	410	411	202	203
267	411	412	201	202
268	412	413	200	201
269	413	414	199	200
270	414	415	198	199



271	415	416	197	198
272	416	196	10	197
273	9	282	417	196
274	282	11	283	417
275	196	417	284	10
276	417	283	12	284

Tabella 4bis. Elementi del modello FEM.

Le condizioni al contorno del problema in esame (posizione del bedrock) vengono prese in considerazione sul modello FEM mediante l'applicazione di smorzatori viscosi sui nodi facenti parte della porzione di terreno a contatto con il bedrock. Tali smorzatori esprimono due componenti (una orizzontale ed una verticale) di forza proporzionali alla velocità.

Le costanti di smorzamento  $C_x$  e  $C_z$  sono rispettivamente:

$$C_x = \rho_b * V_{sb} * V_{sb} \text{ e } C_z = \rho_b * V_{pb} * V_{pb}$$

dove:

- $\rho_b$  = densità di massa del substrato;
- $V_{sb}$  = velocità delle onde di taglio del substrato;
- $V_{pb}$  = velocità delle onde p del substrato;

Sul modello possono essere applicati dei vincoli fissi nel caso in cui il substrato lo si volesse modellare come infinitamente rigido o per simulare un comportamento monodimensionale. In tal caso vengono applicati su tutti i nodi del modello dei vincoli in direzione verticale, in modo da consentire solo deformazioni di taglio.

Di seguito vengono indicati i vincoli applicati al modello (B: "bloccato"; L : "libero" ) :

Nodo	Direzione X	Direzione Z
1	L	B
2	L	B
3	L	B
4	L	B
5	L	B
6	L	B
7	L	B
8	L	B
9	L	B
10	L	B
11	L	B
12	L	B
13	L	B
14	L	B
15	L	B
16	L	B
17	L	B
18	L	B
19	L	B
20	L	B
21	L	B
22	L	B
23	L	B
24	L	B
25	L	B

26	L	B
27	L	B
28	L	B
29	L	B
30	L	B
31	L	B
32	L	B
33	L	B
34	L	B
35	L	B
36	L	B
37	L	B
38	L	B
39	L	B
40	L	B
41	L	B
42	L	B
43	L	B
44	L	B
45	L	B
46	L	B
47	L	B
48	L	B
49	L	B
50	L	B
51	L	B
52	L	B
53	L	B
54	L	B
55	L	B
56	L	B
57	L	B
58	L	B
59	L	B
60	L	B
61	L	B
62	L	B
63	L	B
64	L	B
65	L	B
66	L	B
67	L	B
68	L	B
69	L	B
70	L	B
71	L	B
72	L	B
73	L	B
74	L	B
75	L	B
76	L	B
77	L	B
78	L	B
79	L	B
80	L	B

81	L	B
82	L	B
83	L	B
84	L	B
85	L	B
86	L	B
87	L	B
88	L	B
89	L	B
90	L	B
91	L	B
92	L	B
93	L	B
94	L	B
95	L	B
96	L	B
97	L	B
98	L	B
99	L	B
100	L	B
101	L	B
102	L	B
103	L	B
104	L	B
105	L	B
106	L	B
107	L	B
108	L	B
109	L	B
110	L	B
111	L	B
112	L	B
113	L	B
114	L	B
115	L	B
116	L	B
117	L	B
118	L	B
119	L	B
120	L	B
121	L	B
122	L	B
123	L	B
124	L	B
125	L	B
126	L	B
127	L	B
128	L	B
129	L	B
130	L	B
131	L	B
132	L	B
133	L	B
134	L	B
135	L	B

136	L	B
137	L	B
138	L	B
139	L	B
140	L	B
141	L	B
142	L	B
143	L	B
144	L	B
145	L	B
146	L	B
147	L	B
148	L	B
149	L	B
150	L	B
151	L	B
152	L	B
153	L	B
154	L	B
155	L	B
156	L	B
157	L	B
158	L	B
159	L	B
160	L	B
161	L	B
162	L	B
163	L	B
164	L	B
165	L	B
166	L	B
167	L	B
168	L	B
169	L	B
170	L	B
171	L	B
172	L	B
173	L	B
174	L	B
175	L	B
176	L	B
177	L	B
178	L	B
179	L	B
180	L	B
181	L	B
182	L	B
183	L	B
184	L	B
185	L	B
186	L	B
187	L	B
188	L	B
189	L	B
190	L	B

191	L	B
192	L	B
193	L	B
194	L	B
195	L	B
196	L	B
197	L	B
198	L	B
199	L	B
200	L	B
201	L	B
202	L	B
203	L	B
204	L	B
205	L	B
206	L	B
207	L	B
208	L	B
209	L	B
210	L	B
211	L	B
212	L	B
213	L	B
214	L	B
215	L	B
216	L	B
217	L	B
218	L	B
219	L	B
220	L	B
221	L	B
222	L	B
223	L	B
224	L	B
225	L	B
226	L	B
227	L	B
228	L	B
229	L	B
230	L	B
231	L	B
232	L	B
233	L	B
234	L	B
235	L	B
236	L	B
237	L	B
238	L	B
239	L	B
240	L	B
241	L	B
242	L	B
243	L	B
244	L	B
245	L	B

246	L	B
247	L	B
248	L	B
249	L	B
250	L	B
251	L	B
252	L	B
253	L	B
254	L	B
255	L	B
256	L	B
257	L	B
258	L	B
259	L	B
260	L	B
261	L	B
262	L	B
263	L	B
264	L	B
265	L	B
266	L	B
267	L	B
268	L	B
269	L	B
270	L	B
271	L	B
272	L	B
273	L	B
274	L	B
275	L	B
276	L	B
277	L	B
278	L	B
279	L	B
280	L	B
281	L	B
282	L	B
283	L	B
284	L	B
285	L	B
286	L	B
287	L	B
288	L	B
289	L	B
290	L	B
291	L	B
292	L	B
293	L	B
294	L	B
295	L	B
296	L	B
297	L	B
298	L	B
299	L	B
300	L	B

301	L	B
302	L	B
303	L	B
304	L	B
305	L	B
306	L	B
307	L	B
308	L	B
309	L	B
310	L	B
311	L	B
312	L	B
313	L	B
314	L	B
315	L	B
316	L	B
317	L	B
318	L	B
319	L	B
320	L	B
321	L	B
322	L	B
323	L	B
324	L	B
325	L	B
326	L	B
327	L	B
328	L	B
329	L	B
330	L	B
331	L	B
332	L	B
333	L	B
334	L	B
335	L	B
336	L	B
337	L	B
338	L	B
339	L	B
340	L	B
341	L	B
342	L	B
343	L	B
344	L	B
345	L	B
346	L	B
347	L	B
348	L	B
349	L	B
350	L	B
351	L	B
352	L	B
353	L	B
354	L	B
355	L	B



356	L	B
357	L	B
358	L	B
359	L	B
360	L	B
361	L	B
362	L	B
363	L	B
364	L	B
365	L	B
366	L	B
367	L	B
368	L	B
369	L	B
370	L	B
371	L	B
372	L	B
373	L	B
374	L	B
375	L	B
376	L	B
377	L	B
378	L	B
379	L	B
380	L	B
381	L	B
382	L	B
383	L	B
384	L	B
385	L	B
386	L	B
387	L	B
388	L	B
389	L	B
390	L	B
391	L	B
392	L	B
393	L	B
394	L	B
395	L	B
396	L	B
397	L	B
398	L	B
399	L	B
400	L	B
401	L	B
402	L	B
403	L	B
404	L	B
405	L	B
406	L	B
407	L	B
408	L	B
409	L	B
410	L	B

411	L	B
412	L	B
413	L	B
414	L	B
415	L	B
416	L	B
417	L	B

**Tabella 5.** Vincoli esterni del Modello FEM.

I cinematismi di controllo, in corrispondenza dei quali vengono monitorate le storie temporali, sono di seguito riportati:

ID Nodo	Target in X	Target in Z
1	SI	NO
2	NO	NO
3	NO	NO
4	NO	NO
5	NO	NO
6	NO	NO
7	NO	NO
8	NO	NO
9	NO	NO
10	NO	NO
11	NO	NO
12	NO	NO
13	NO	NO
14	NO	NO
15	NO	NO
16	NO	NO
17	NO	NO
18	NO	NO
19	NO	NO
20	NO	NO
21	NO	NO
22	NO	NO
23	NO	NO
24	NO	NO
25	NO	NO
26	NO	NO
27	NO	NO
28	NO	NO
29	NO	NO
30	NO	NO
31	NO	NO
32	NO	NO
33	NO	NO
34	NO	NO
35	NO	NO
36	NO	NO
37	NO	NO
38	NO	NO
39	NO	NO
40	NO	NO
41	NO	NO

42	NO	NO
43	NO	NO
44	NO	NO
45	NO	NO
46	NO	NO
47	NO	NO
48	NO	NO
49	NO	NO
50	NO	NO
51	NO	NO
52	NO	NO
53	NO	NO
54	NO	NO
55	NO	NO
56	NO	NO
57	NO	NO
58	NO	NO
59	NO	NO
60	NO	NO
61	NO	NO
62	NO	NO
63	NO	NO
64	NO	NO
65	NO	NO
66	NO	NO
67	NO	NO
68	NO	NO
69	NO	NO
70	NO	NO
71	NO	NO
72	NO	NO
73	NO	NO
74	NO	NO
75	NO	NO
76	NO	NO
77	NO	NO
78	NO	NO
79	NO	NO
80	NO	NO
81	NO	NO
82	NO	NO
83	NO	NO
84	NO	NO
85	NO	NO
86	NO	NO
87	NO	NO
88	NO	NO
89	NO	NO
90	NO	NO
91	NO	NO
92	NO	NO
93	NO	NO
94	NO	NO
95	NO	NO
96	NO	NO

97	NO	NO
98	NO	NO
99	NO	NO
100	NO	NO
101	NO	NO
102	NO	NO
103	NO	NO
104	NO	NO
105	NO	NO
106	NO	NO
107	NO	NO
108	NO	NO
109	NO	NO
110	NO	NO
111	NO	NO
112	NO	NO
113	NO	NO
114	NO	NO
115	NO	NO
116	NO	NO
117	NO	NO
118	NO	NO
119	NO	NO
120	NO	NO
121	NO	NO
122	NO	NO
123	NO	NO
124	NO	NO
125	NO	NO
126	NO	NO
127	NO	NO
128	NO	NO
129	NO	NO
130	NO	NO
131	NO	NO
132	NO	NO
133	NO	NO
134	NO	NO
135	NO	NO
136	NO	NO
137	NO	NO
138	NO	NO
139	NO	NO
140	NO	NO
141	NO	NO
142	NO	NO
143	NO	NO
144	NO	NO
145	NO	NO
146	NO	NO
147	NO	NO
148	NO	NO
149	NO	NO
150	NO	NO
151	NO	NO

152	NO	NO
153	NO	NO
154	NO	NO
155	NO	NO
156	NO	NO
157	NO	NO
158	NO	NO
159	NO	NO
160	NO	NO
161	NO	NO
162	NO	NO
163	NO	NO
164	NO	NO
165	NO	NO
166	NO	NO
167	NO	NO
168	NO	NO
169	NO	NO
170	NO	NO
171	NO	NO
172	NO	NO
173	NO	NO
174	NO	NO
175	NO	NO
176	NO	NO
177	NO	NO
178	NO	NO
179	NO	NO
180	NO	NO
181	NO	NO
182	NO	NO
183	NO	NO
184	NO	NO
185	NO	NO
186	NO	NO
187	NO	NO
188	NO	NO
189	NO	NO
190	NO	NO
191	NO	NO
192	NO	NO
193	NO	NO
194	NO	NO
195	NO	NO
196	NO	NO
197	NO	NO
198	NO	NO
199	NO	NO
200	NO	NO
201	NO	NO
202	NO	NO
203	NO	NO
204	NO	NO
205	NO	NO
206	NO	NO

207	NO	NO
208	NO	NO
209	NO	NO
210	NO	NO
211	NO	NO
212	NO	NO
213	NO	NO
214	NO	NO
215	NO	NO
216	NO	NO
217	NO	NO
218	NO	NO
219	NO	NO
220	NO	NO
221	NO	NO
222	NO	NO
223	NO	NO
224	NO	NO
225	NO	NO
226	NO	NO
227	NO	NO
228	NO	NO
229	NO	NO
230	NO	NO
231	NO	NO
232	NO	NO
233	NO	NO
234	NO	NO
235	NO	NO
236	NO	NO
237	NO	NO
238	NO	NO
239	NO	NO
240	NO	NO
241	NO	NO
242	NO	NO
243	NO	NO
244	NO	NO
245	NO	NO
246	NO	NO
247	NO	NO
248	NO	NO
249	NO	NO
250	NO	NO
251	NO	NO
252	NO	NO
253	NO	NO
254	NO	NO
255	NO	NO
256	NO	NO
257	NO	NO
258	NO	NO
259	NO	NO
260	NO	NO
261	NO	NO

262	NO	NO
263	NO	NO
264	NO	NO
265	NO	NO
266	NO	NO
267	NO	NO
268	NO	NO
269	NO	NO
270	NO	NO
271	NO	NO
272	NO	NO
273	NO	NO
274	NO	NO
275	NO	NO
276	NO	NO
277	NO	NO
278	NO	NO
279	NO	NO
280	NO	NO
281	NO	NO
282	NO	NO
283	NO	NO
284	NO	NO
285	NO	NO
286	NO	NO
287	NO	NO
288	NO	NO
289	NO	NO
290	NO	NO
291	NO	NO
292	NO	NO
293	NO	NO
294	NO	NO
295	NO	NO
296	NO	NO
297	NO	NO
298	NO	NO
299	NO	NO
300	NO	NO
301	NO	NO
302	NO	NO
303	NO	NO
304	NO	NO
305	NO	NO
306	NO	NO
307	NO	NO
308	NO	NO
309	NO	NO
310	NO	NO
311	NO	NO
312	NO	NO
313	NO	NO
314	NO	NO
315	NO	NO
316	NO	NO



317	NO	NO
318	NO	NO
319	NO	NO
320	NO	NO
321	NO	NO
322	NO	NO
323	NO	NO
324	NO	NO
325	NO	NO
326	NO	NO
327	NO	NO
328	NO	NO
329	NO	NO
330	NO	NO
331	NO	NO
332	NO	NO
333	NO	NO
334	NO	NO
335	NO	NO
336	NO	NO
337	NO	NO
338	NO	NO
339	NO	NO
340	NO	NO
341	NO	NO
342	NO	NO
343	NO	NO
344	NO	NO
345	NO	NO
346	NO	NO
347	NO	NO
348	NO	NO
349	NO	NO
350	NO	NO
351	NO	NO
352	NO	NO
353	NO	NO
354	NO	NO
355	NO	NO
356	NO	NO
357	NO	NO
358	NO	NO
359	NO	NO
360	NO	NO
361	NO	NO
362	NO	NO
363	NO	NO
364	NO	NO
365	NO	NO
366	NO	NO
367	NO	NO
368	NO	NO
369	NO	NO
370	NO	NO
371	NO	NO

372	NO	NO
373	NO	NO
374	NO	NO
375	NO	NO
376	NO	NO
377	NO	NO
378	NO	NO
379	NO	NO
380	NO	NO
381	NO	NO
382	NO	NO
383	NO	NO
384	NO	NO
385	NO	NO
386	NO	NO
387	NO	NO
388	NO	NO
389	NO	NO
390	NO	NO
391	NO	NO
392	NO	NO
393	NO	NO
394	NO	NO
395	NO	NO
396	NO	NO
397	NO	NO
398	NO	NO
399	NO	NO
400	NO	NO
401	NO	NO
402	NO	NO
403	NO	NO
404	NO	NO
405	NO	NO
406	NO	NO
407	NO	NO
408	NO	NO
409	NO	NO
410	NO	NO
411	NO	NO
412	NO	NO
413	NO	NO
414	NO	NO
415	NO	NO
416	NO	NO
417	NO	NO

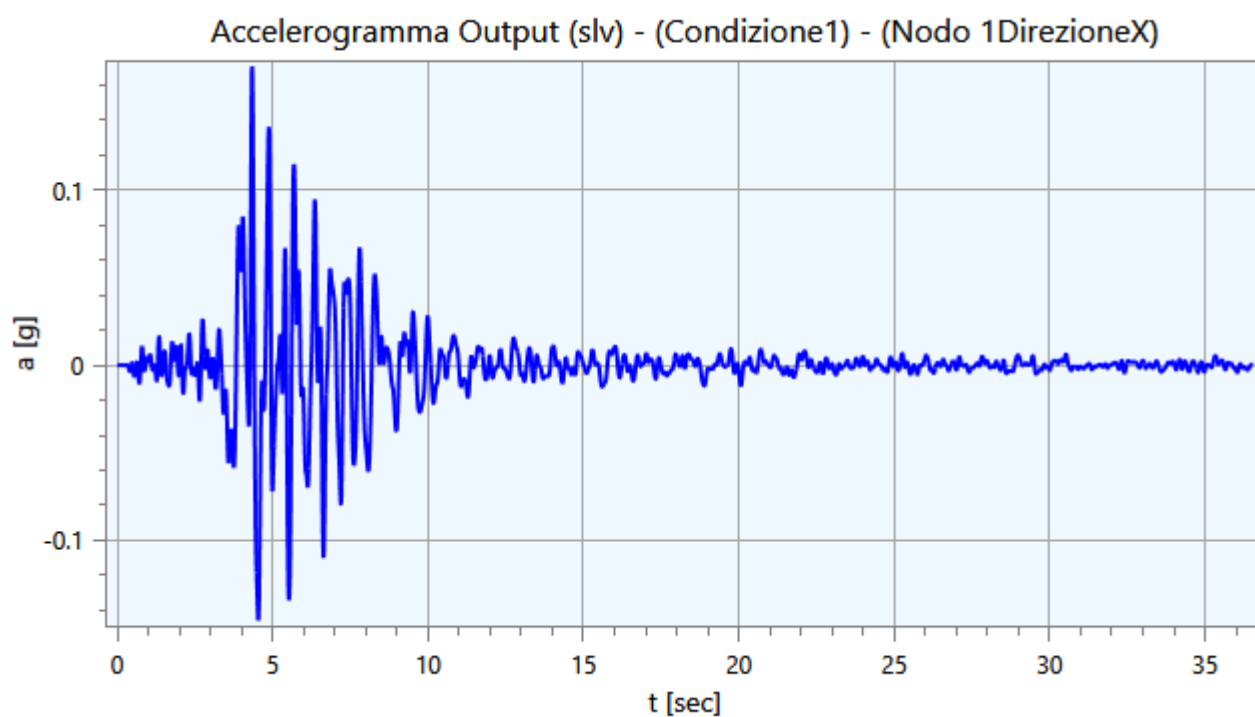
**Tabella 6.** Cinematismi di controllo.

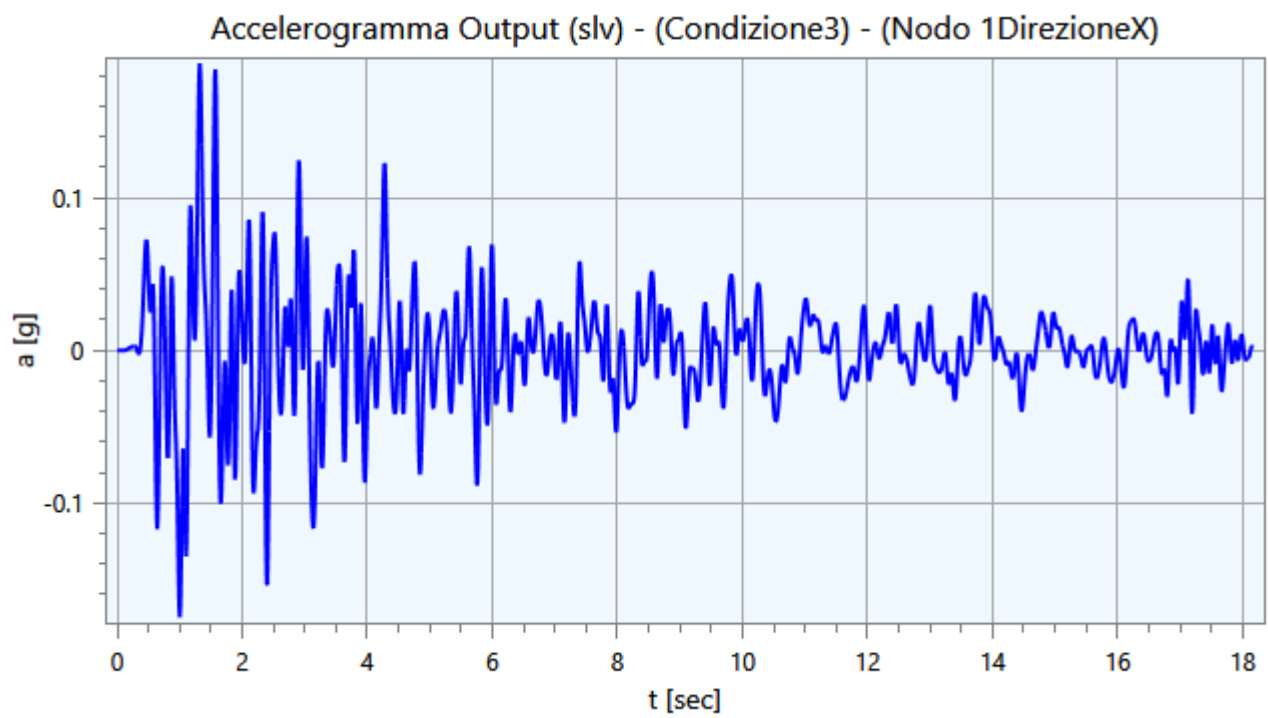
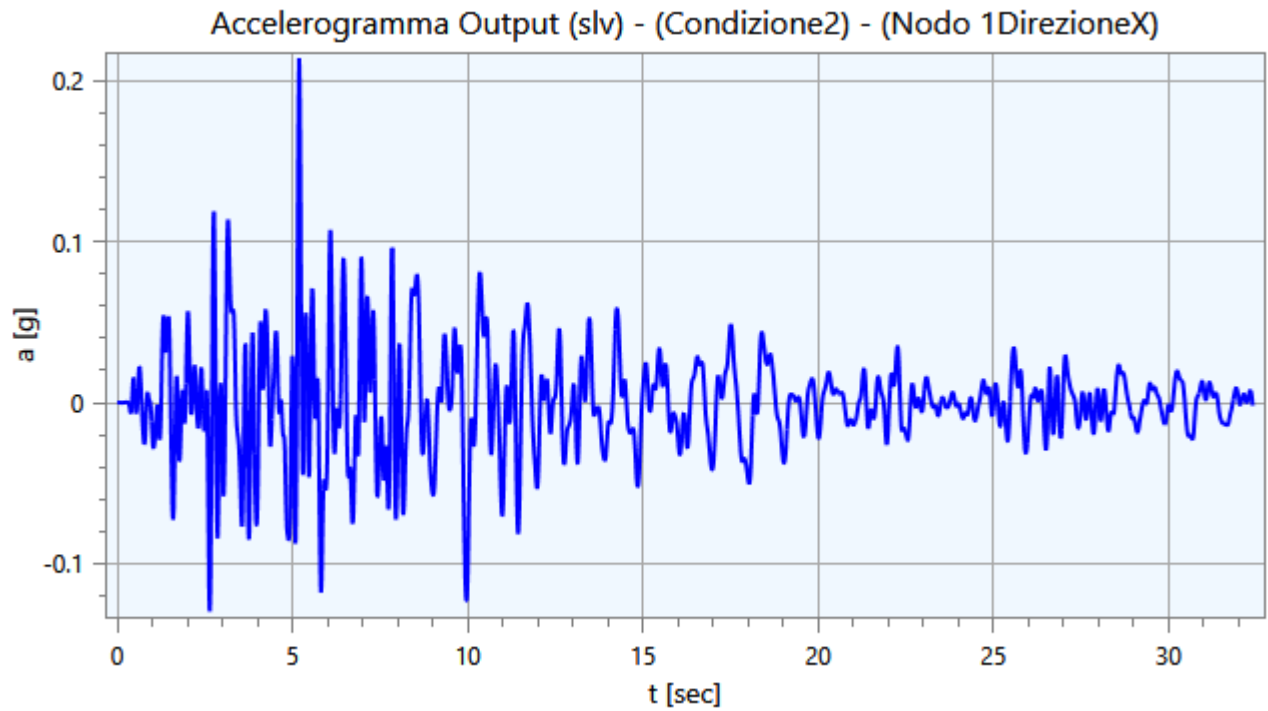
## 5 - Output

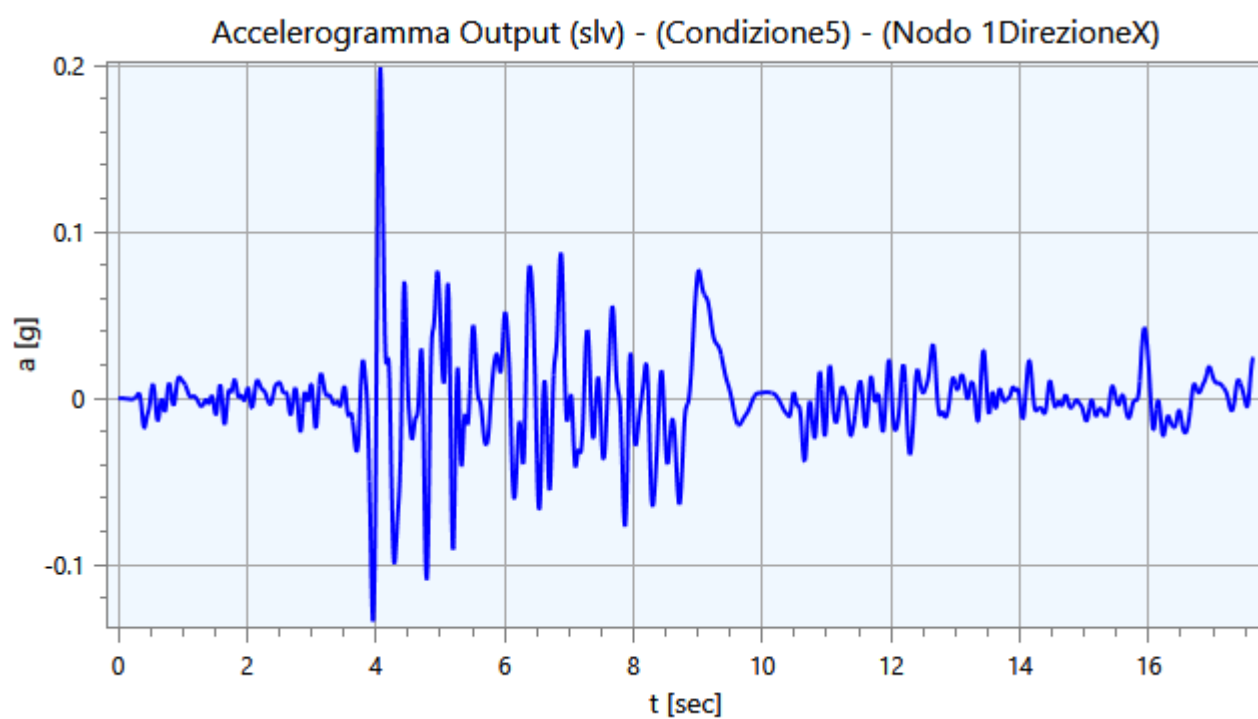
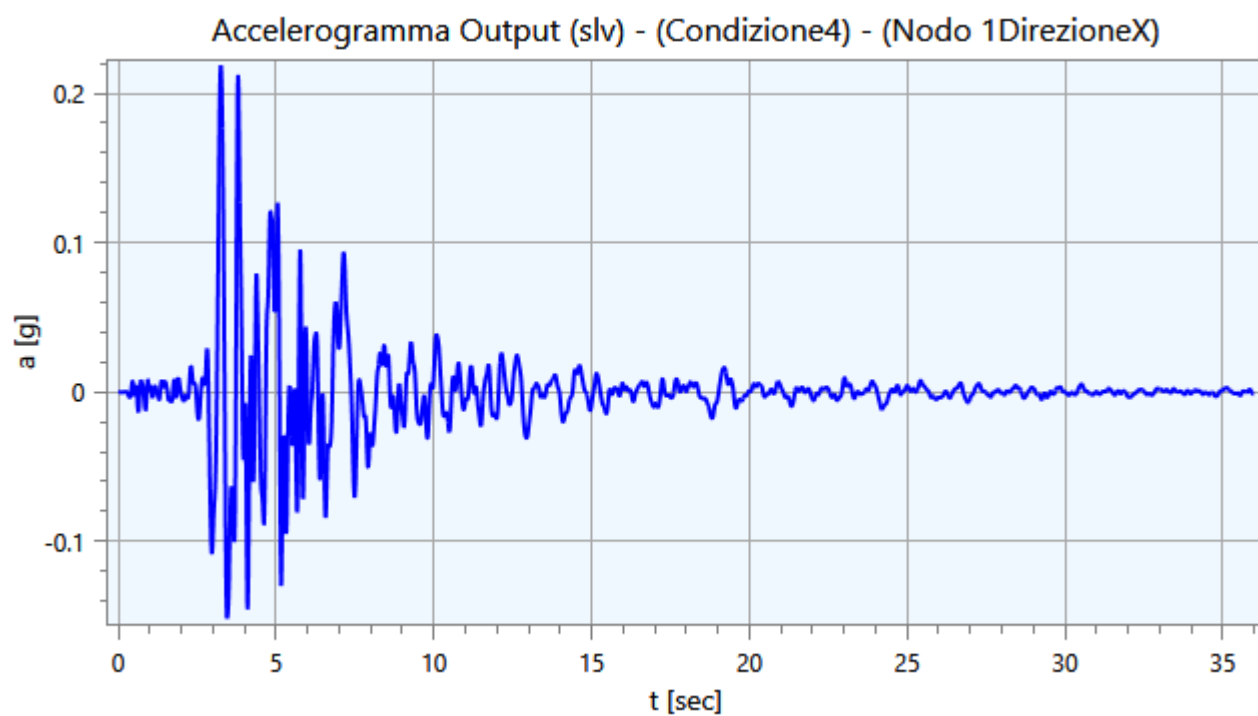
Nei paragrafi successivi vengono riportate le informazioni relative ai risultati del calcolo.

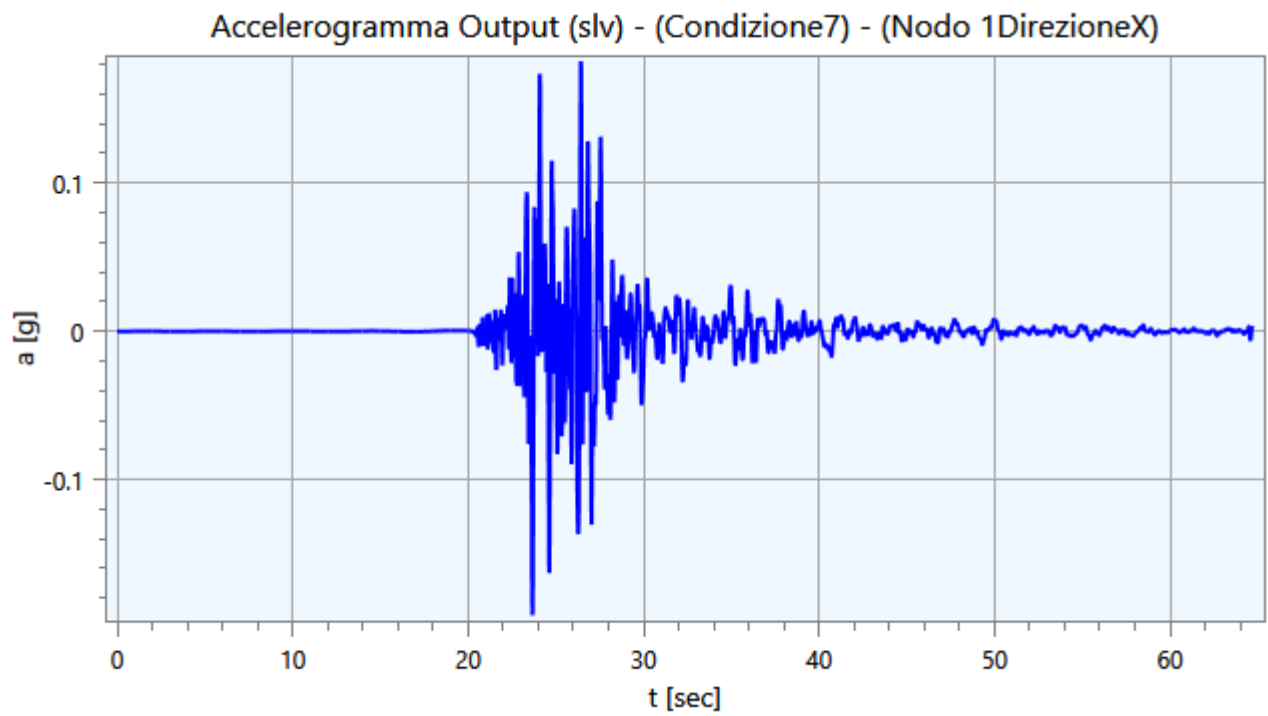
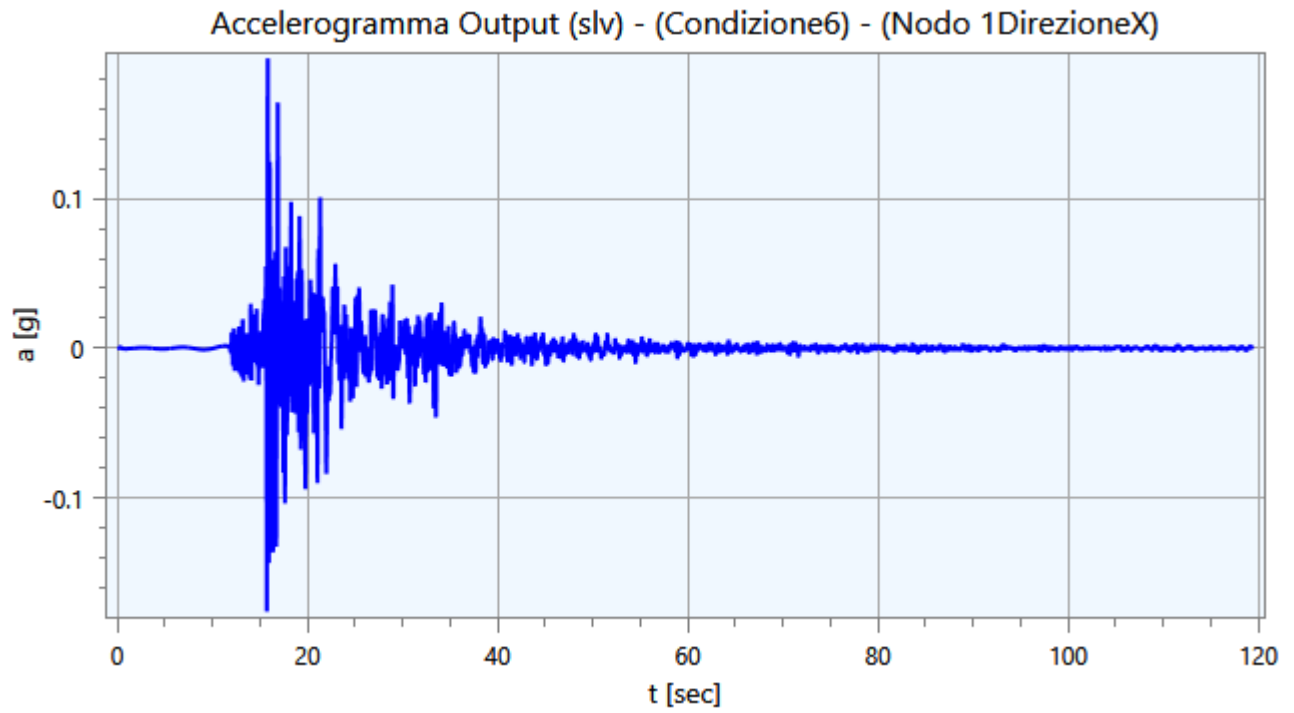
### 5.1 - Accelerogrammi Output

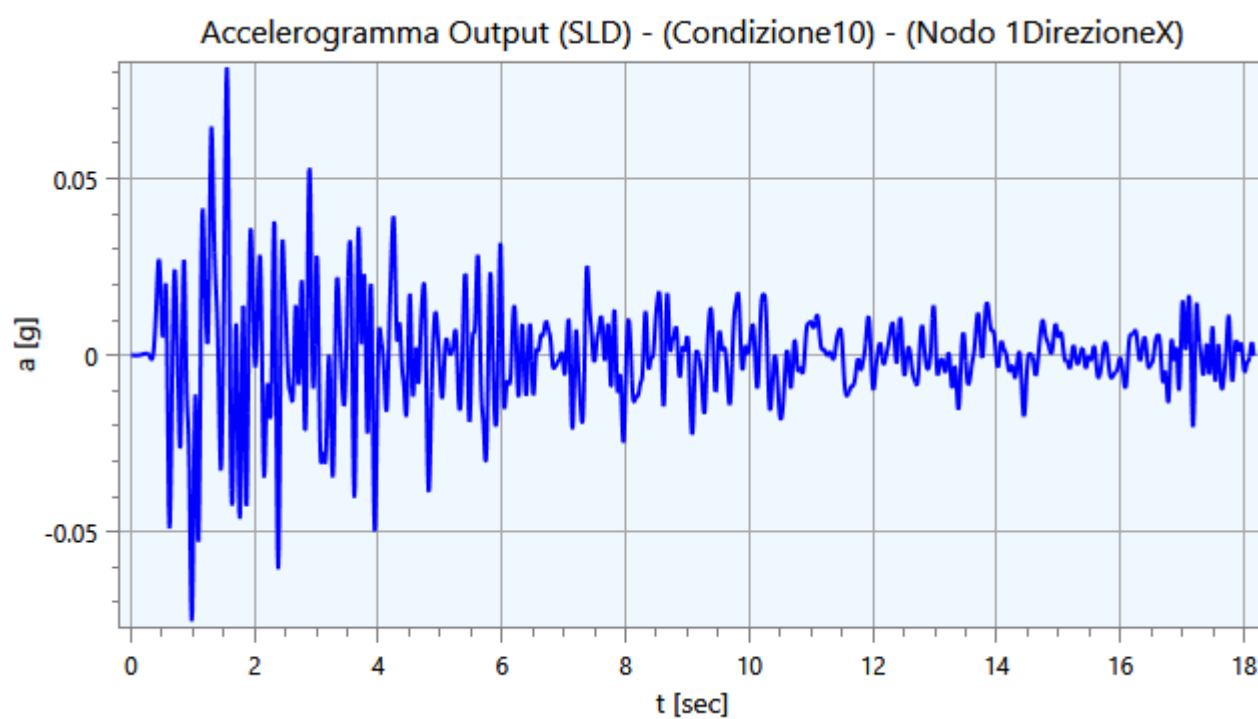
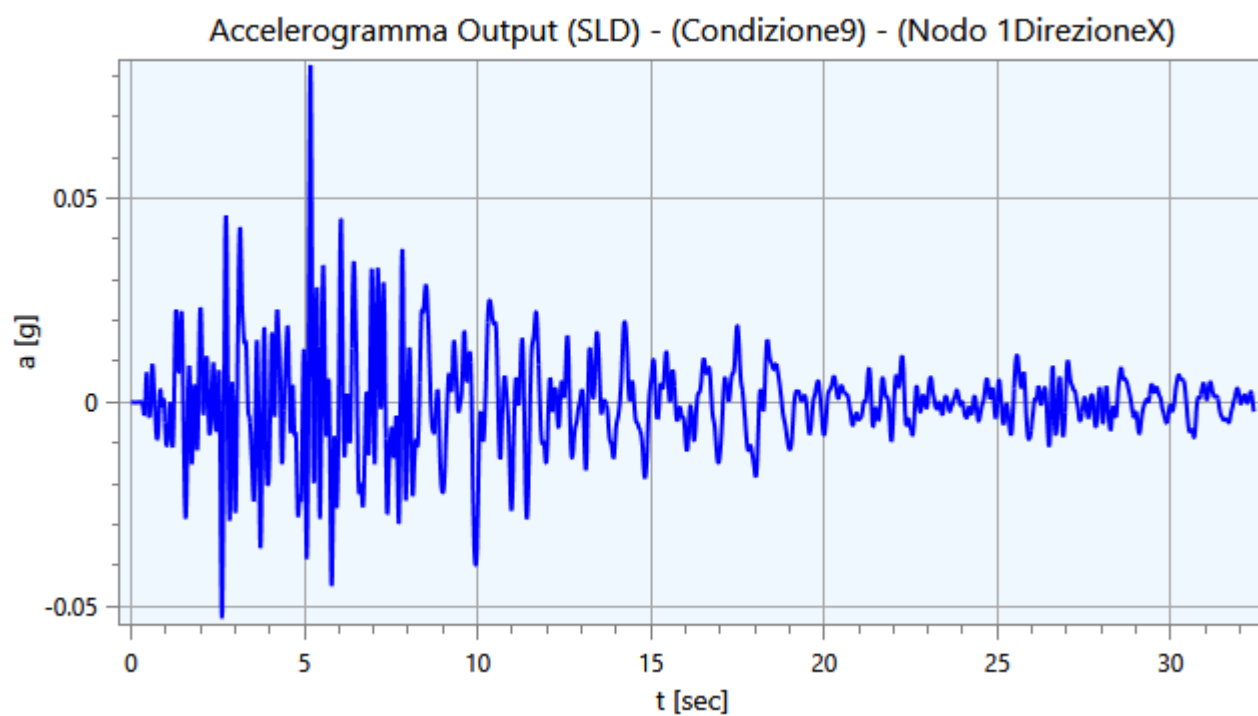
Di seguito vengono riportati gli accelerogrammi relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

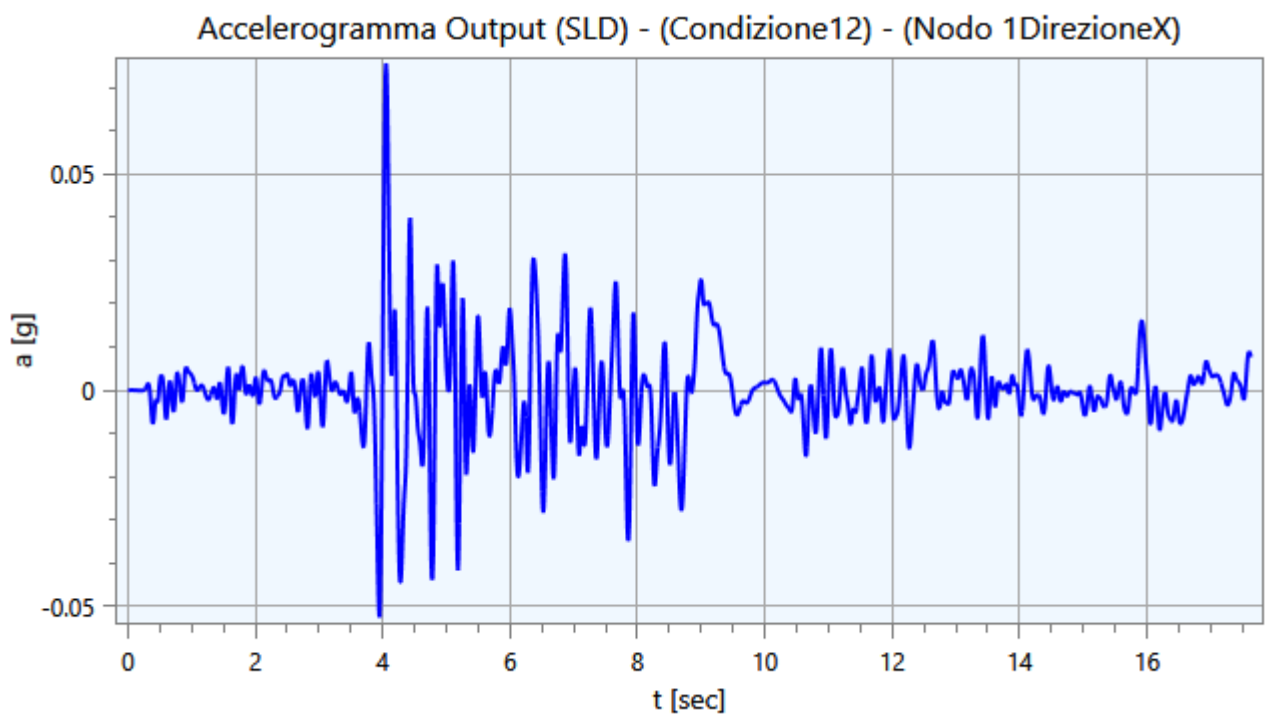
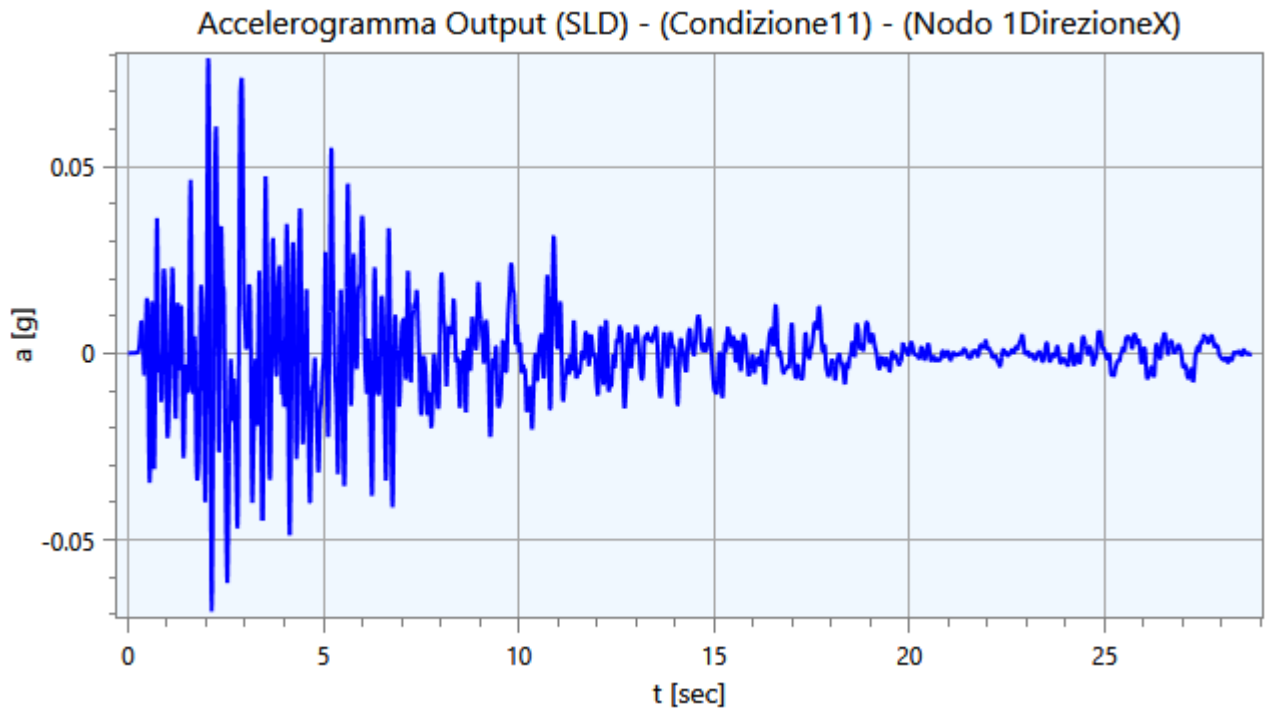




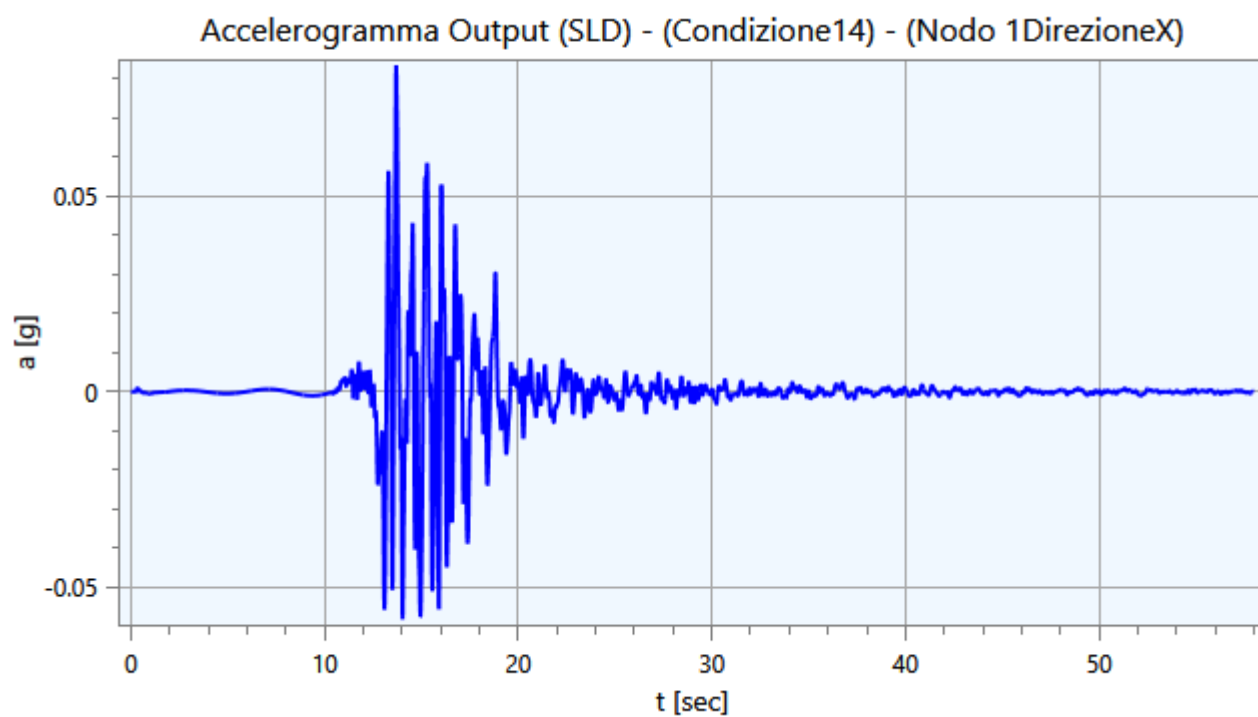
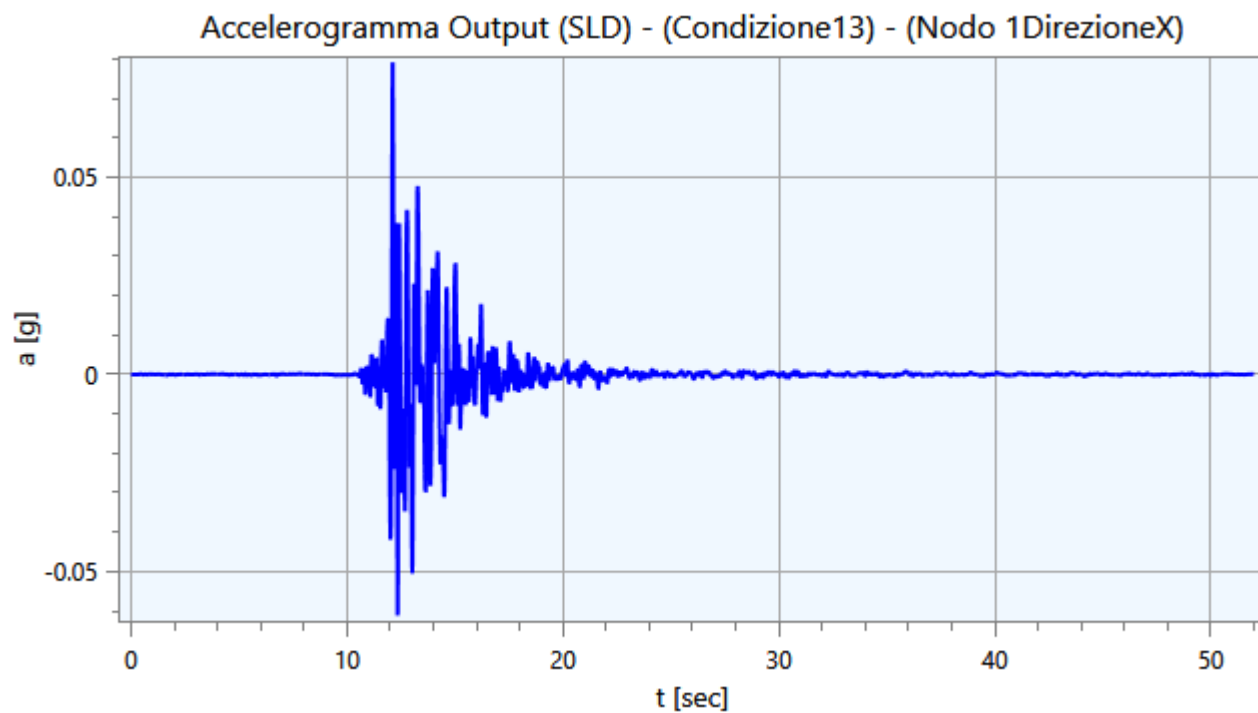


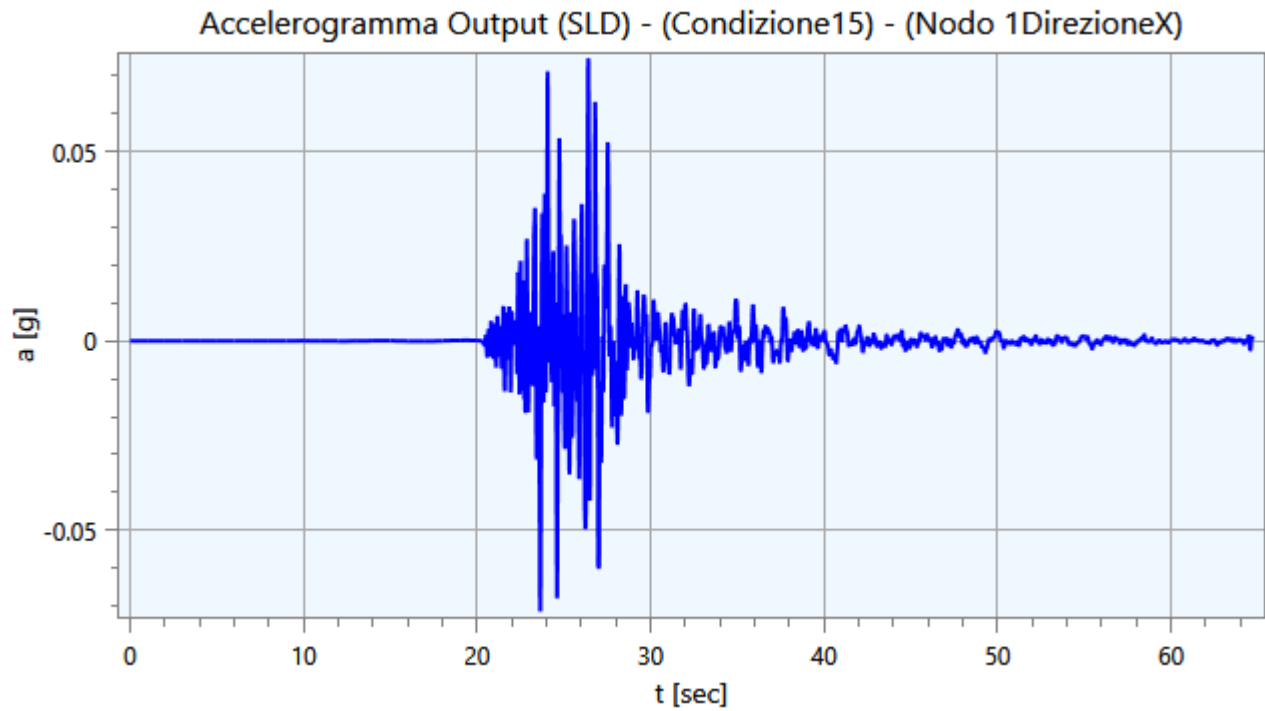






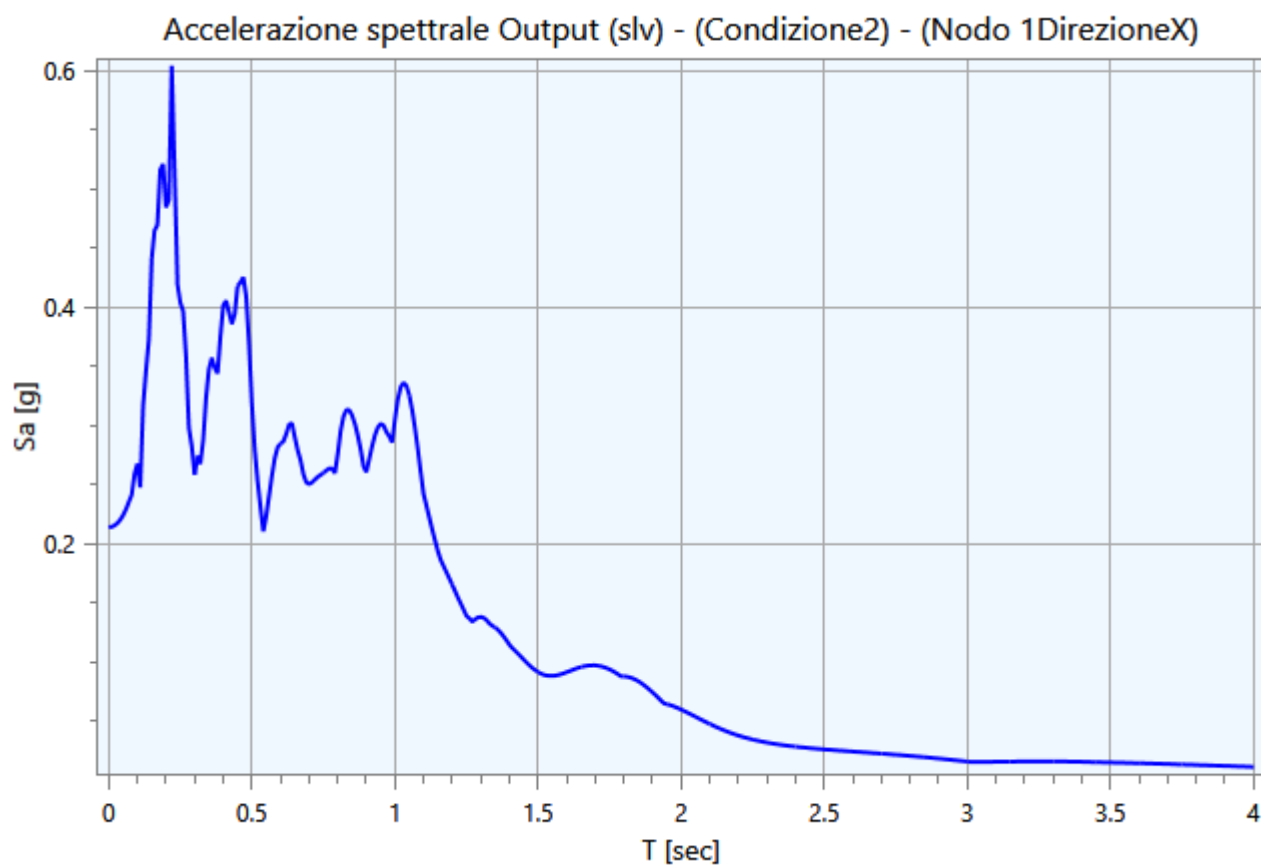
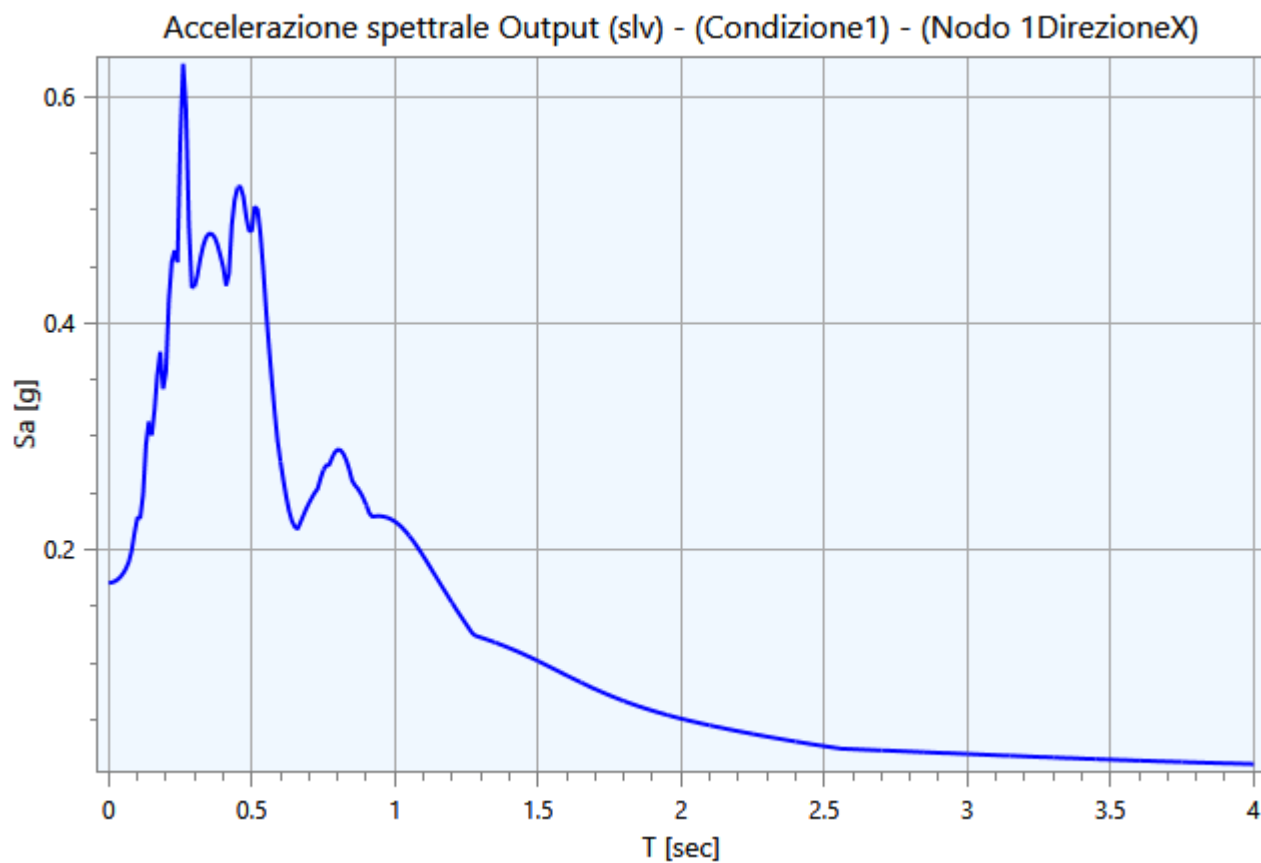


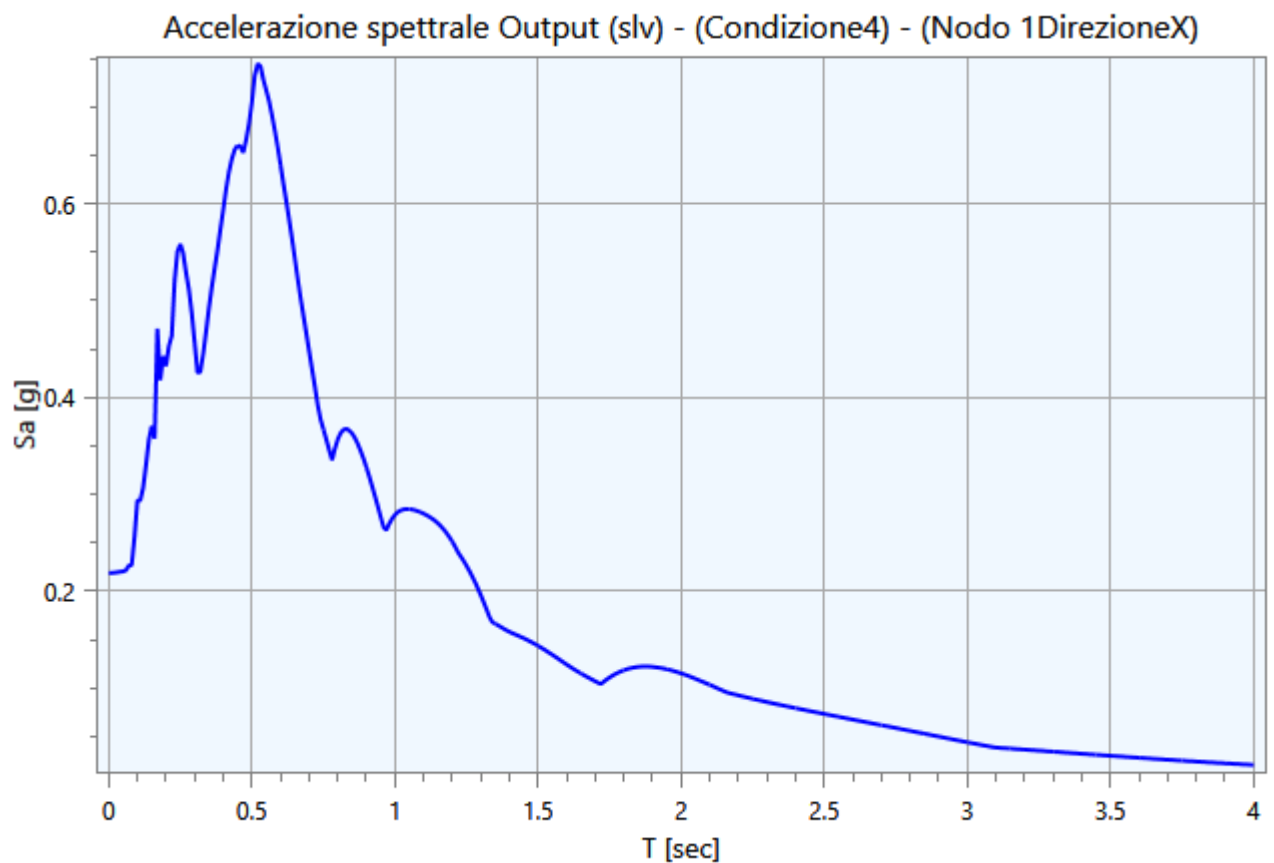
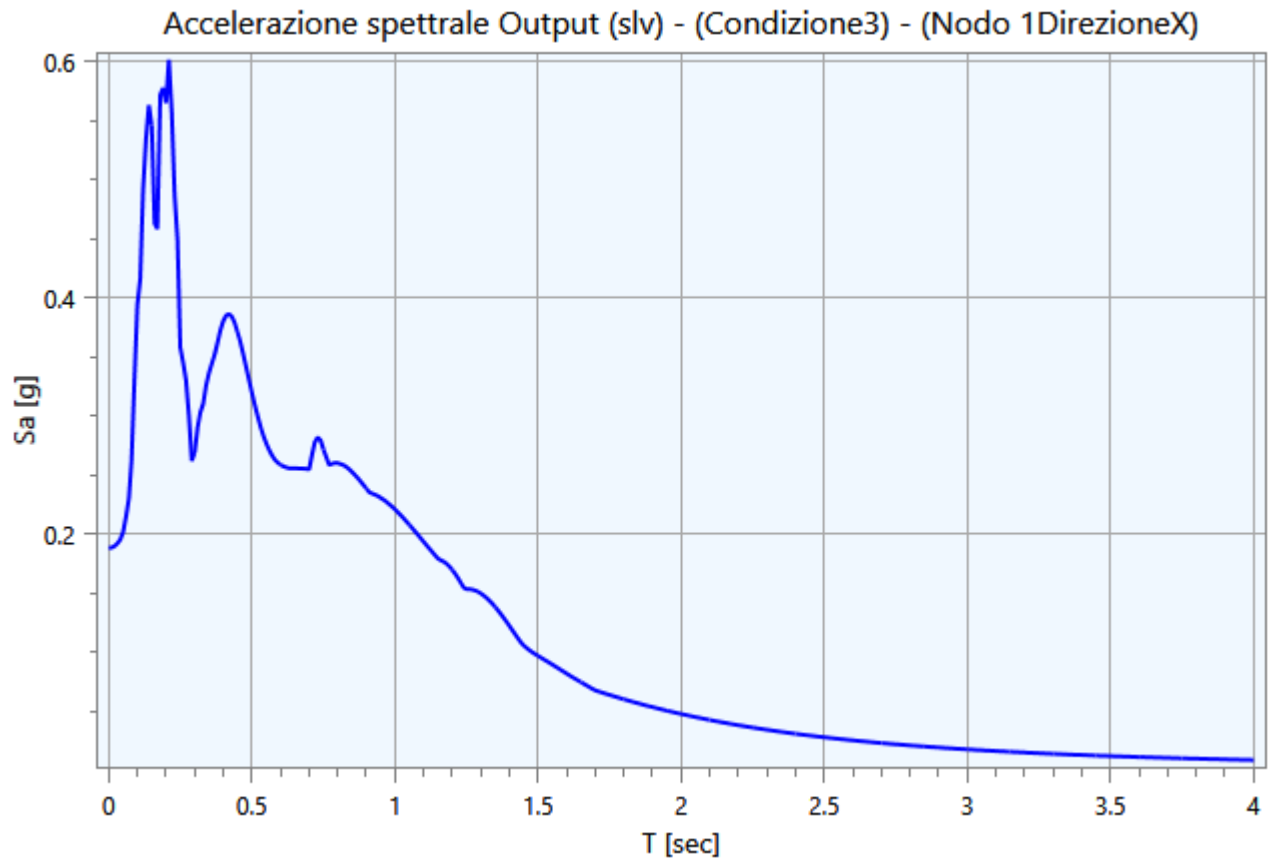


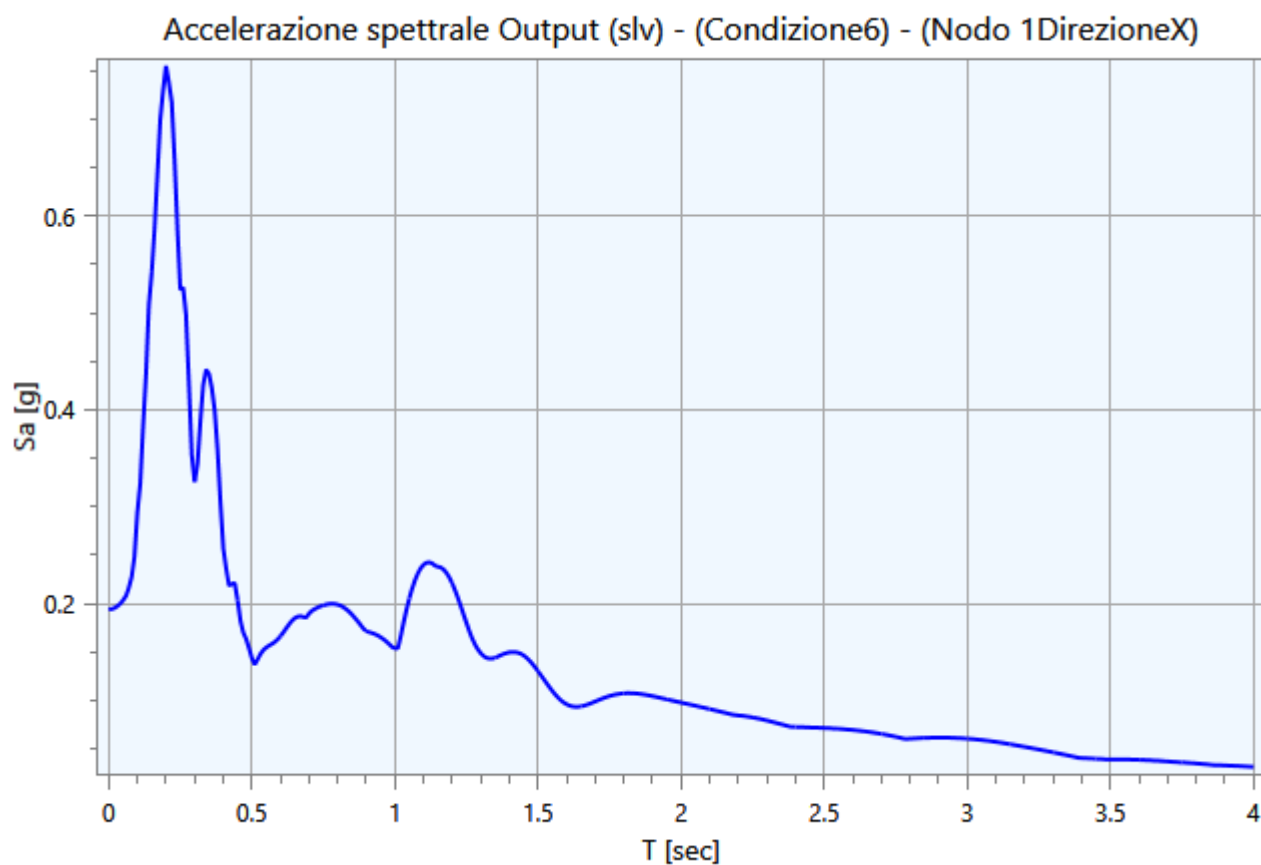
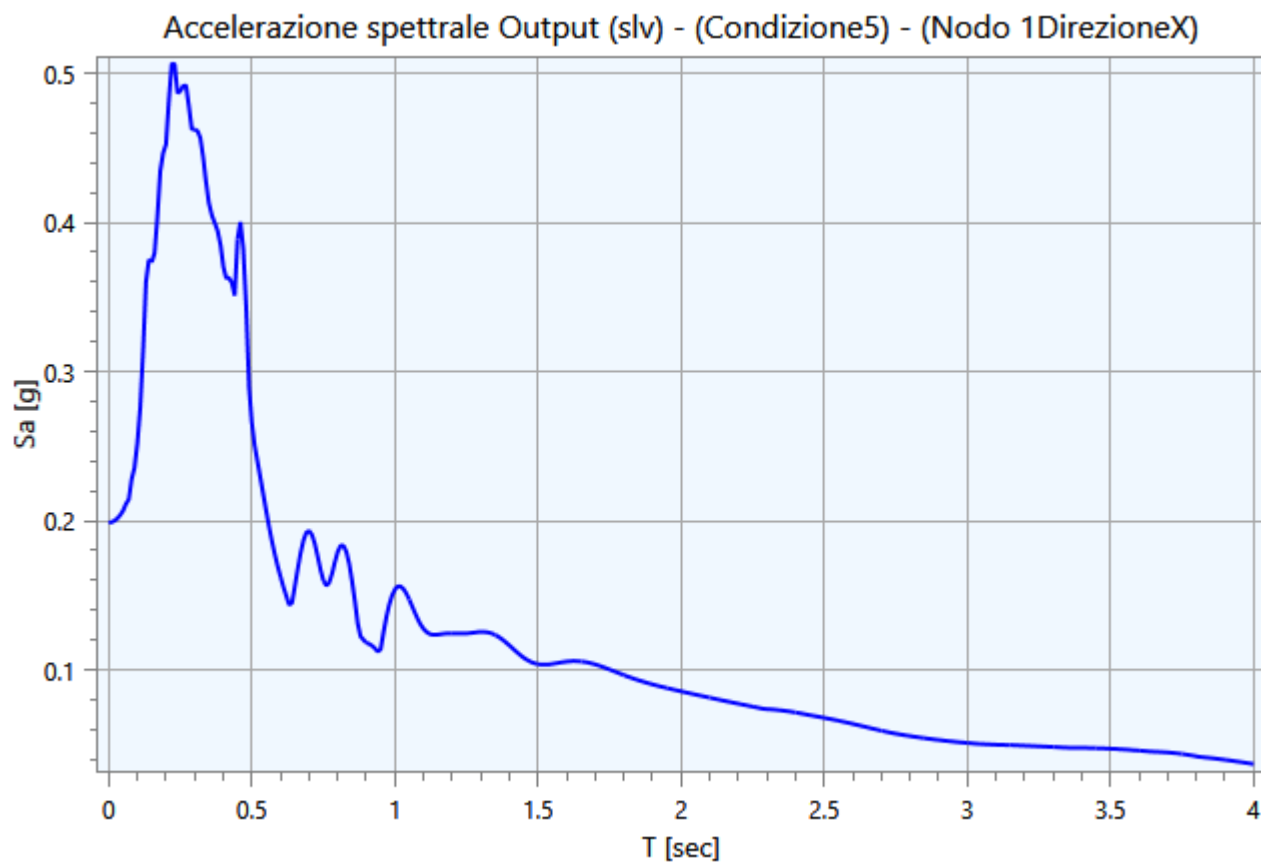


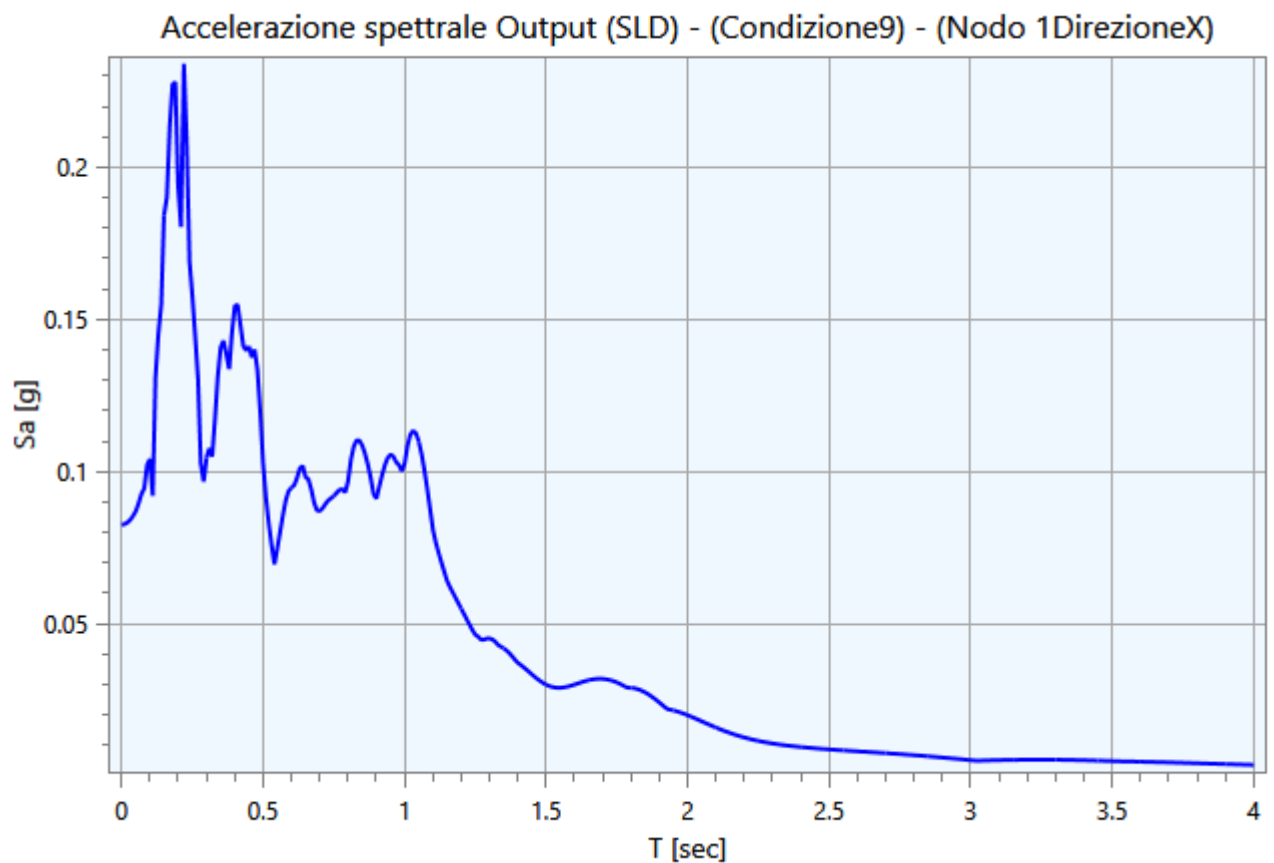
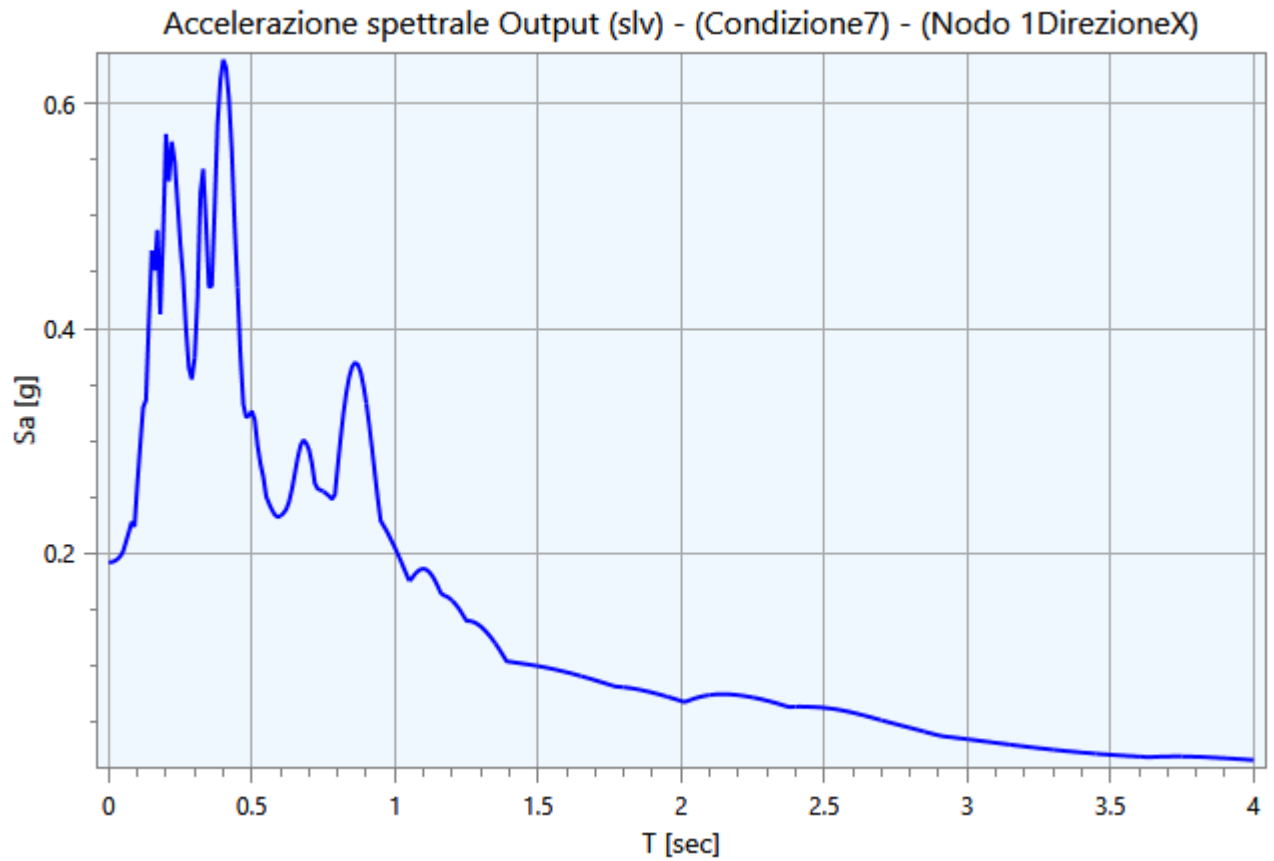
## 5.2 - Spettri Output

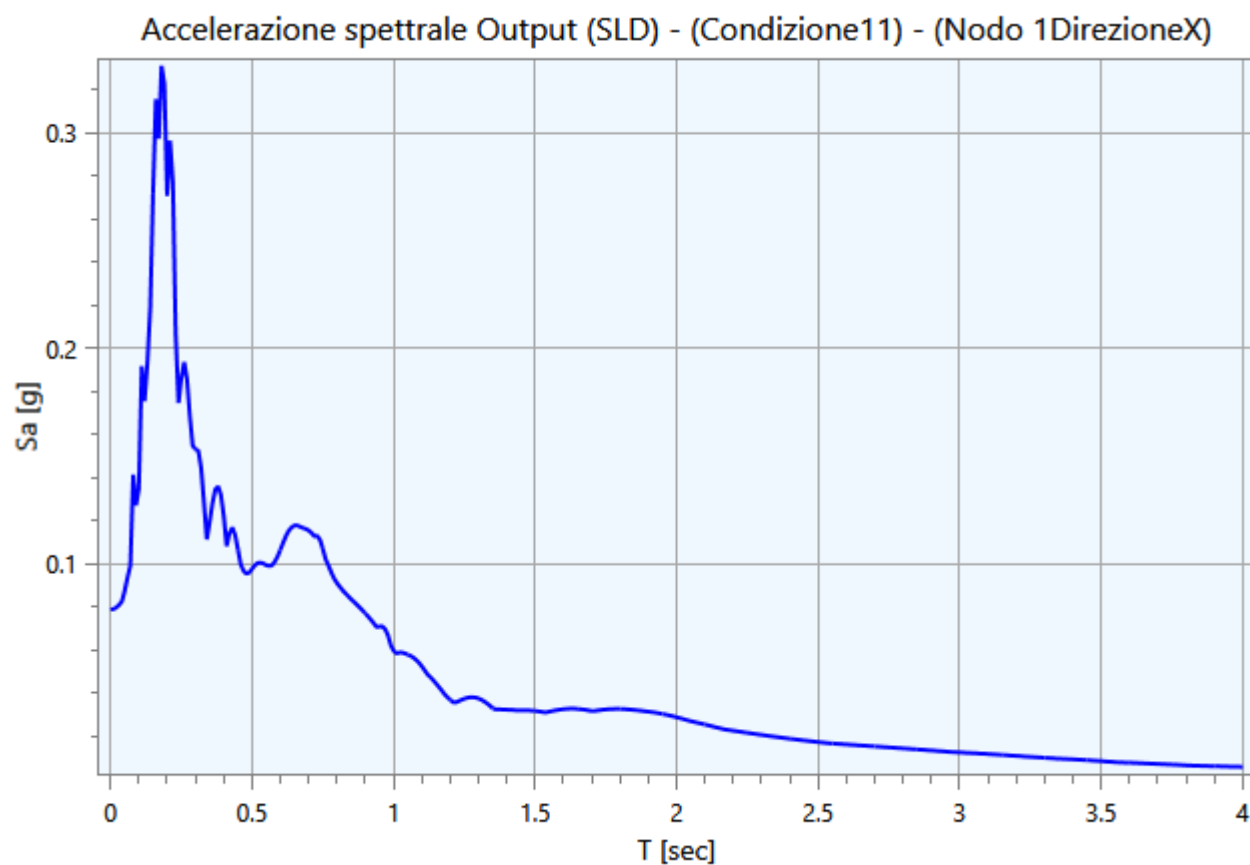
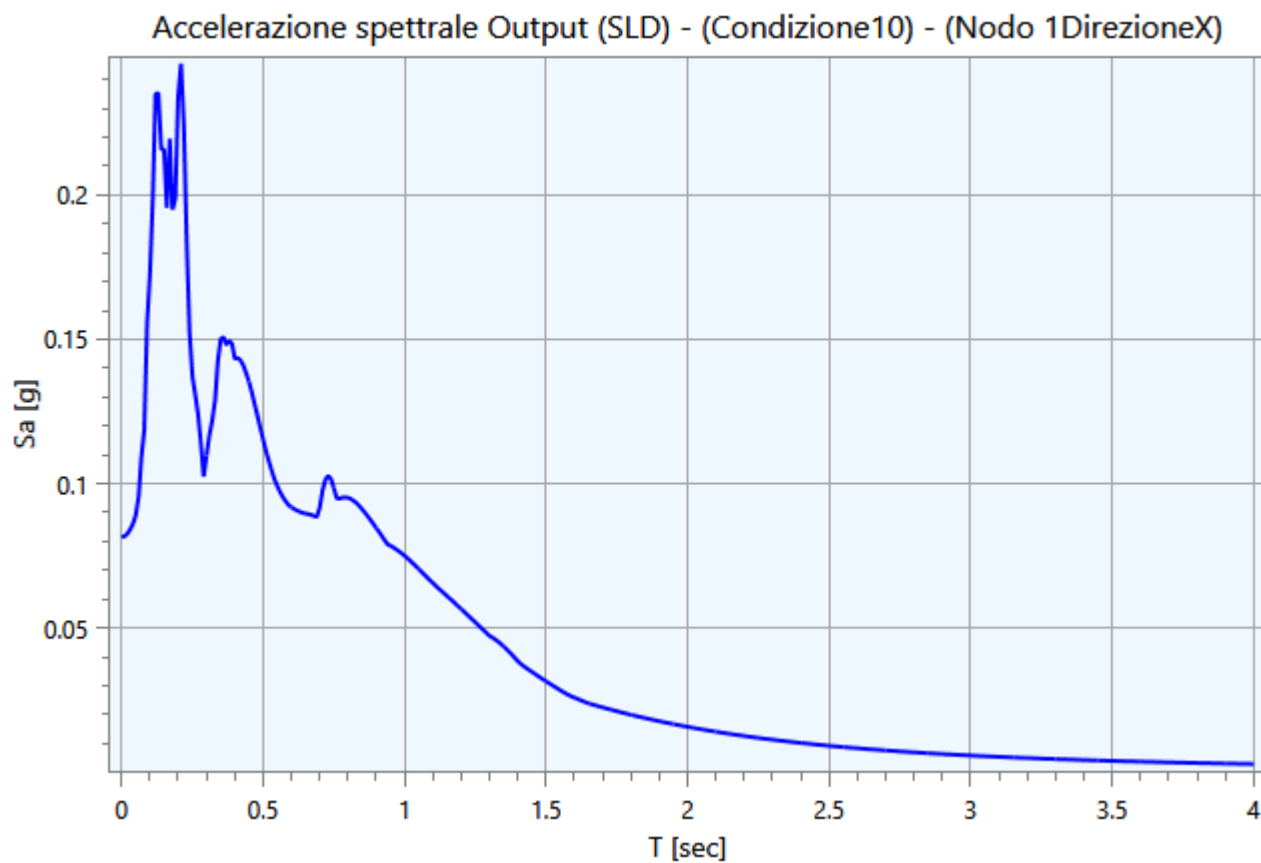
Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:

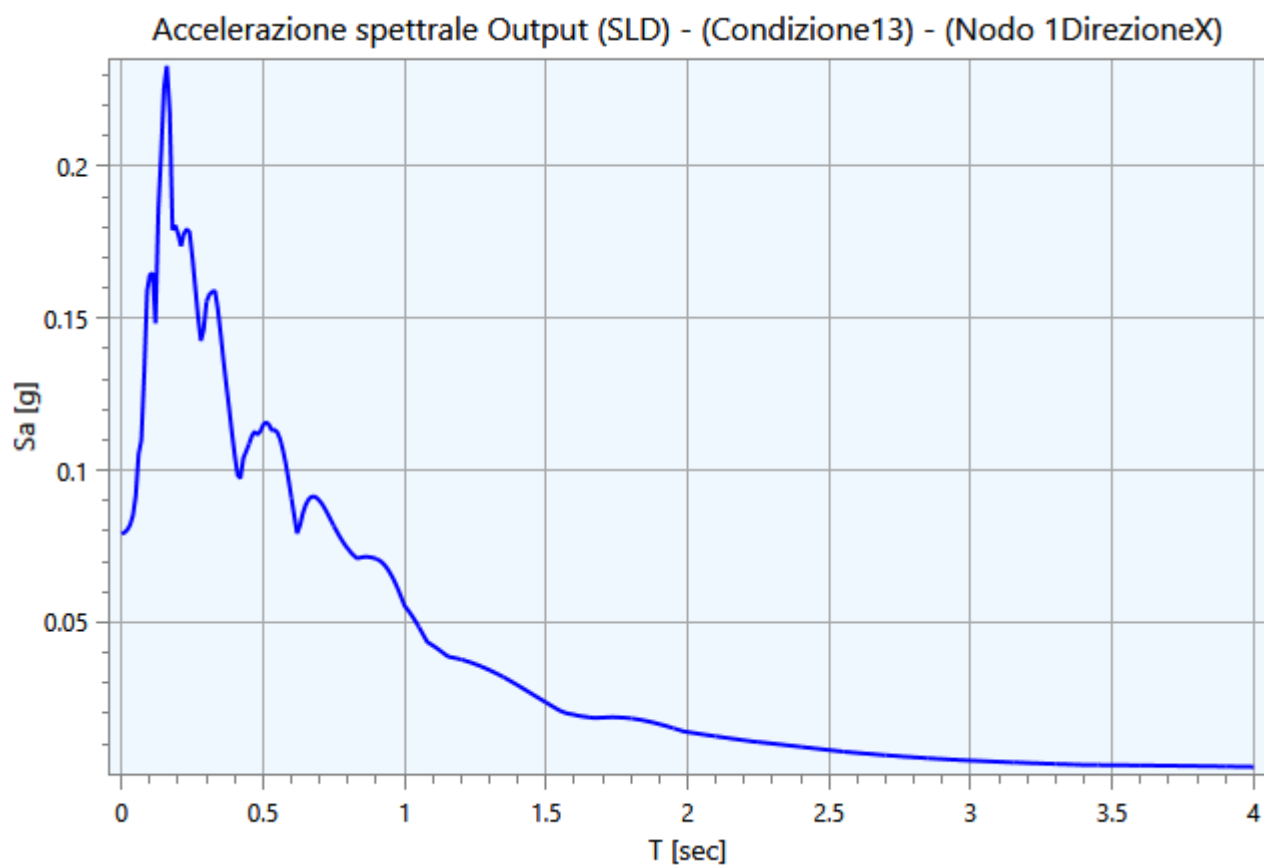
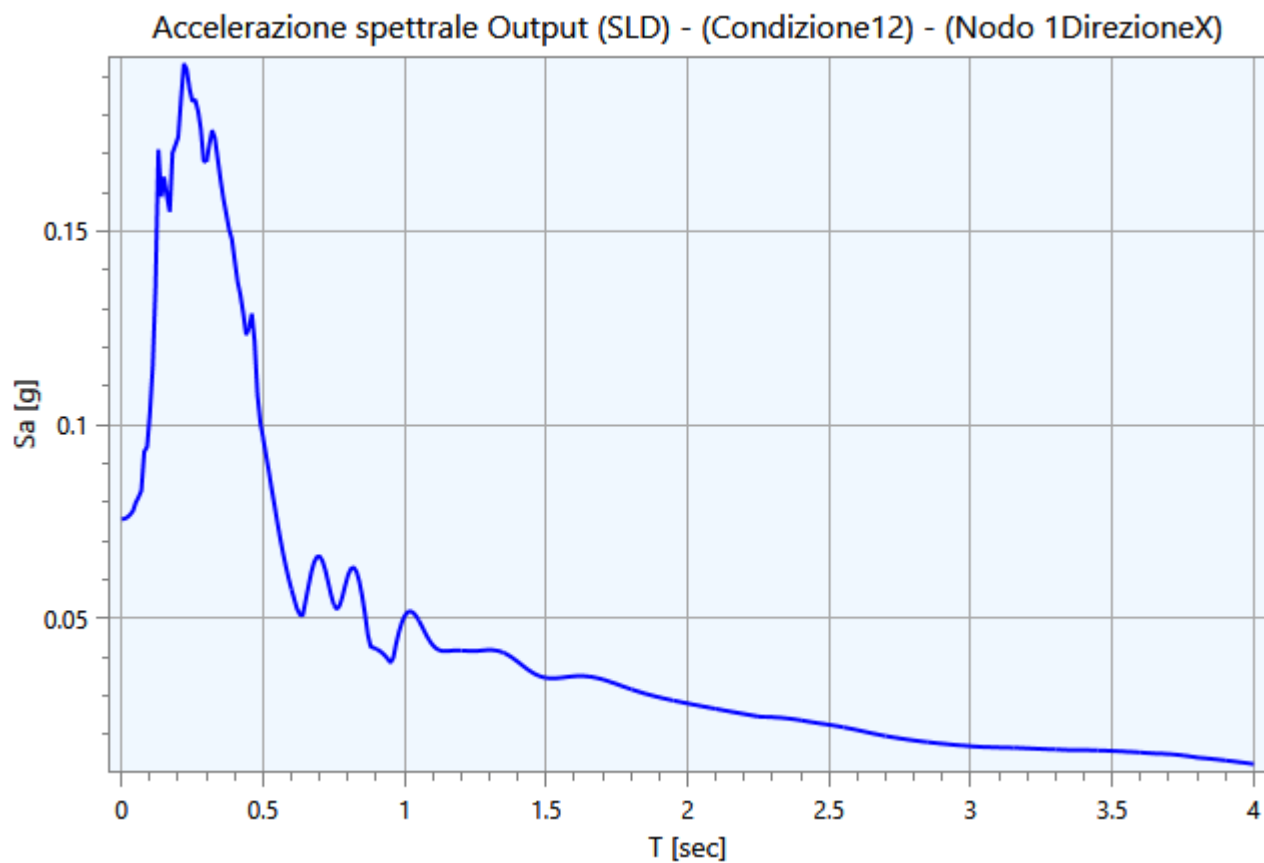




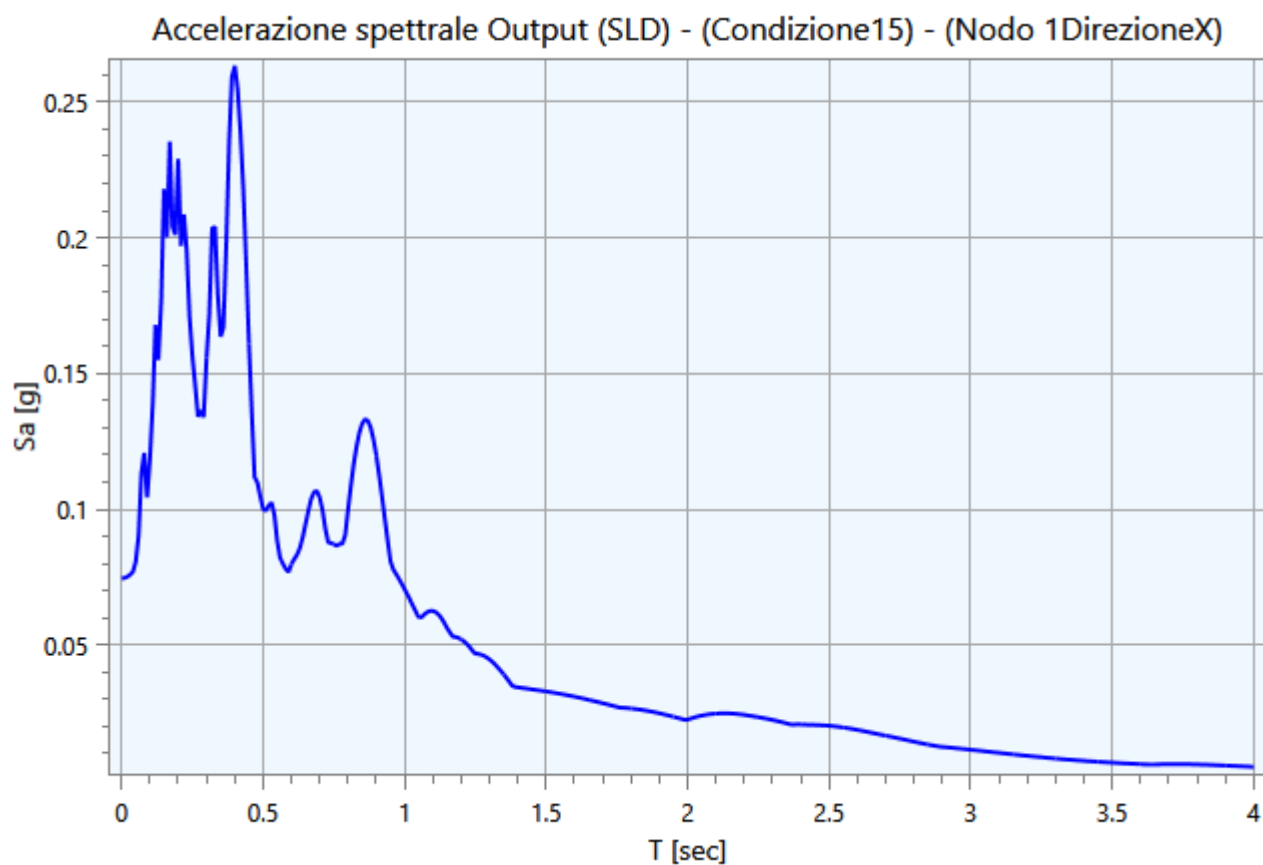
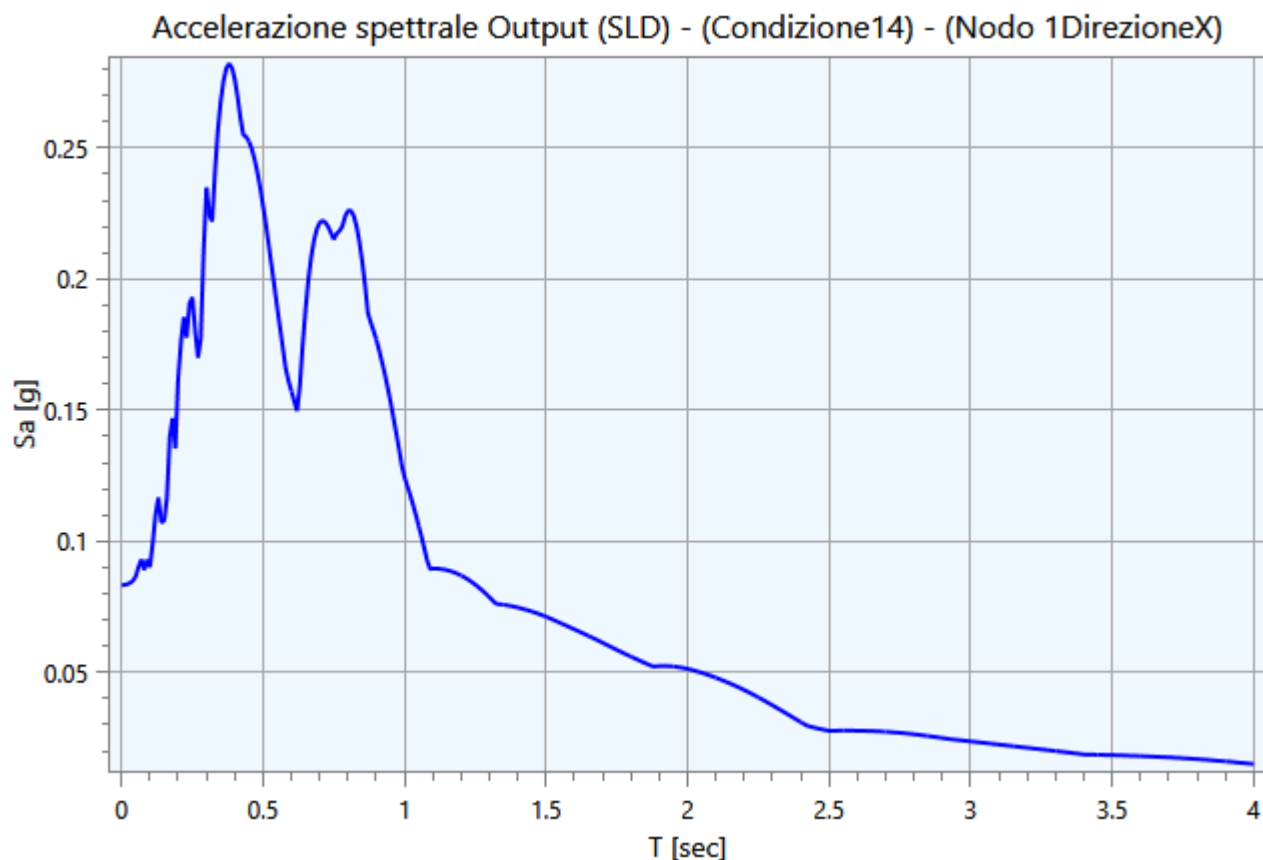






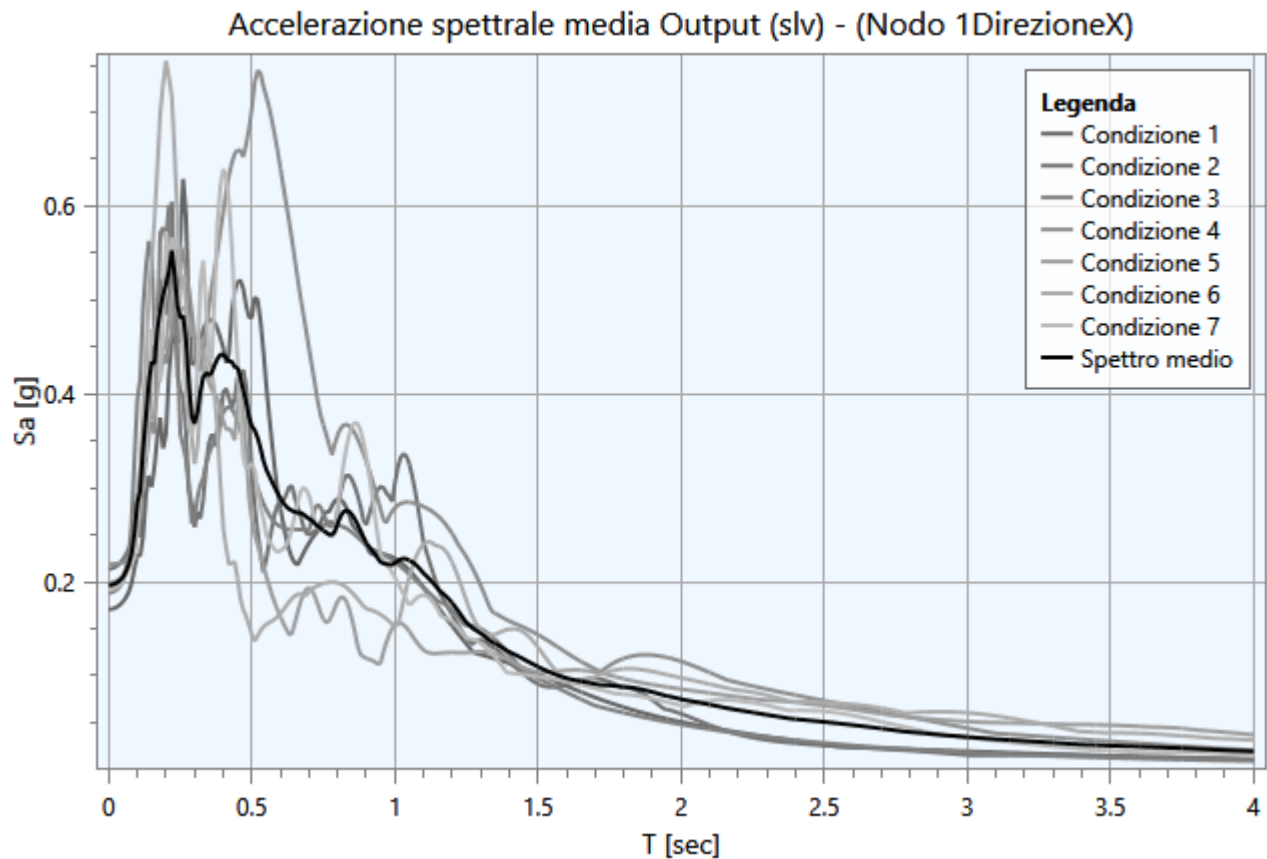


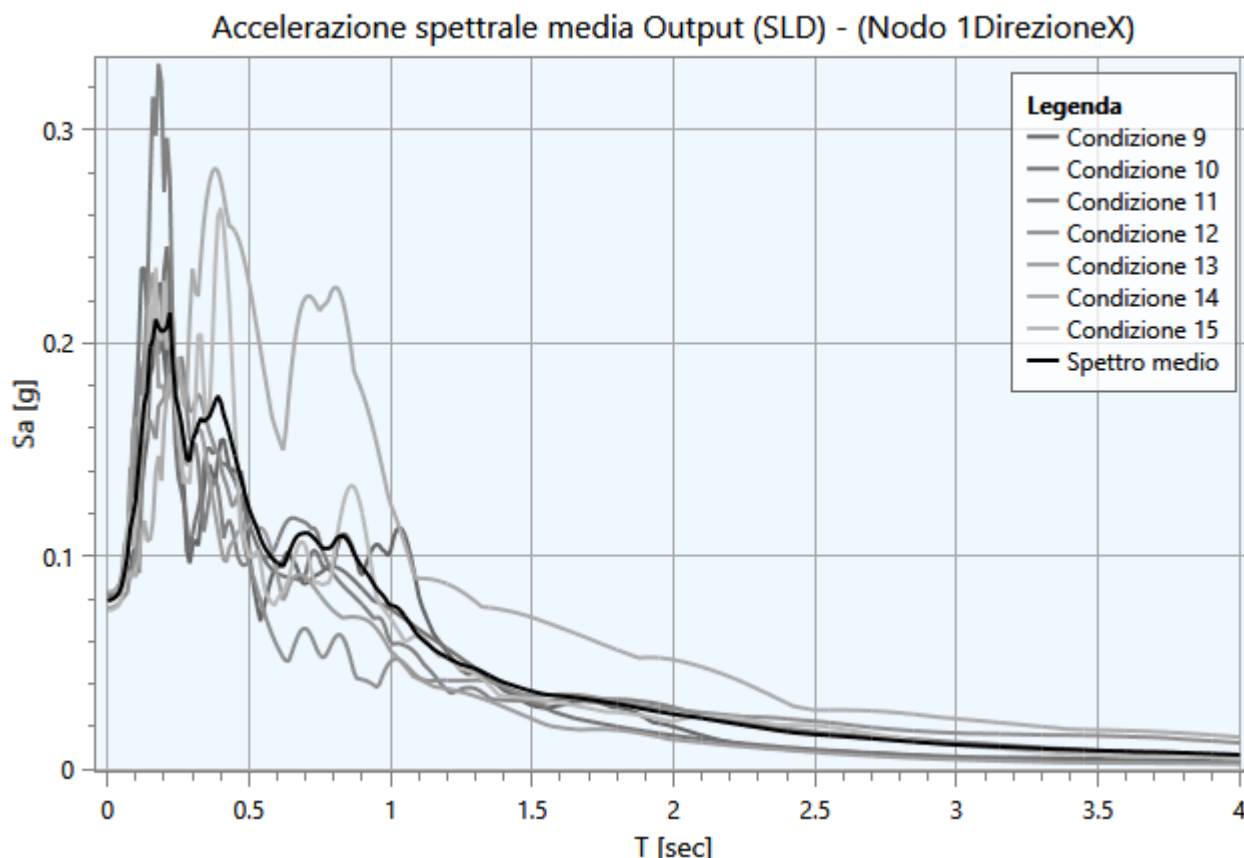




### 5.3 - Interpretazione dei risultati

Di seguito vengono riportati gli spettri relativi alle varie analisi effettuate ed alle rispettive condizioni di carico per i cinematismi di controllo:





## 5.4 - Parametrizzazione dello spettro di risposta derivante dalla RSL

La parametrizzazione degli spettri di risposta ottenuti nei vari punti di controllo viene condotta mediante la procedura suggerita dagli “Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica” (*GdL MS, 2008 – parti I e II – punto 2.5.4.3.1 pag 92*). Partendo dallo spettro di risposta medio in accelerazione rappresentativo dei 7 accelerogrammi, tale procedura prevede:

- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in accelerazione ( $TA$ );
- il calcolo del valor medio dello spettro in accelerazione ( $SA$ ) nell'intorno tra  $0.5 TA - 1.5 TA$ ;
- l'individuazione del periodo per il quale è massimo il valore dello spettro in pseudovelocità ( $TV$ );
- il calcolo del valor medio dello spettro in pseudovelocità ( $SV$ ) nell'intorno tra  $0.8 TV - 1.2 TV$ ;
- il calcolo del valore di  $T_c = 2\pi \frac{SV}{SA}$ ;
- il calcolo del valore di  $T_b = 1/3 T_c$ ;
- il calcolo del valore  $T_d = 4 a_g + 1.6$  con  $a_g$  uguale al valore di accelerazione a  $T$  uguale a zero;
- l'applicazione delle equazioni riportate nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) per la determinazione dei tratti dello spettro tra  $T_0, T_b, T_c, T_d, T_4$ .

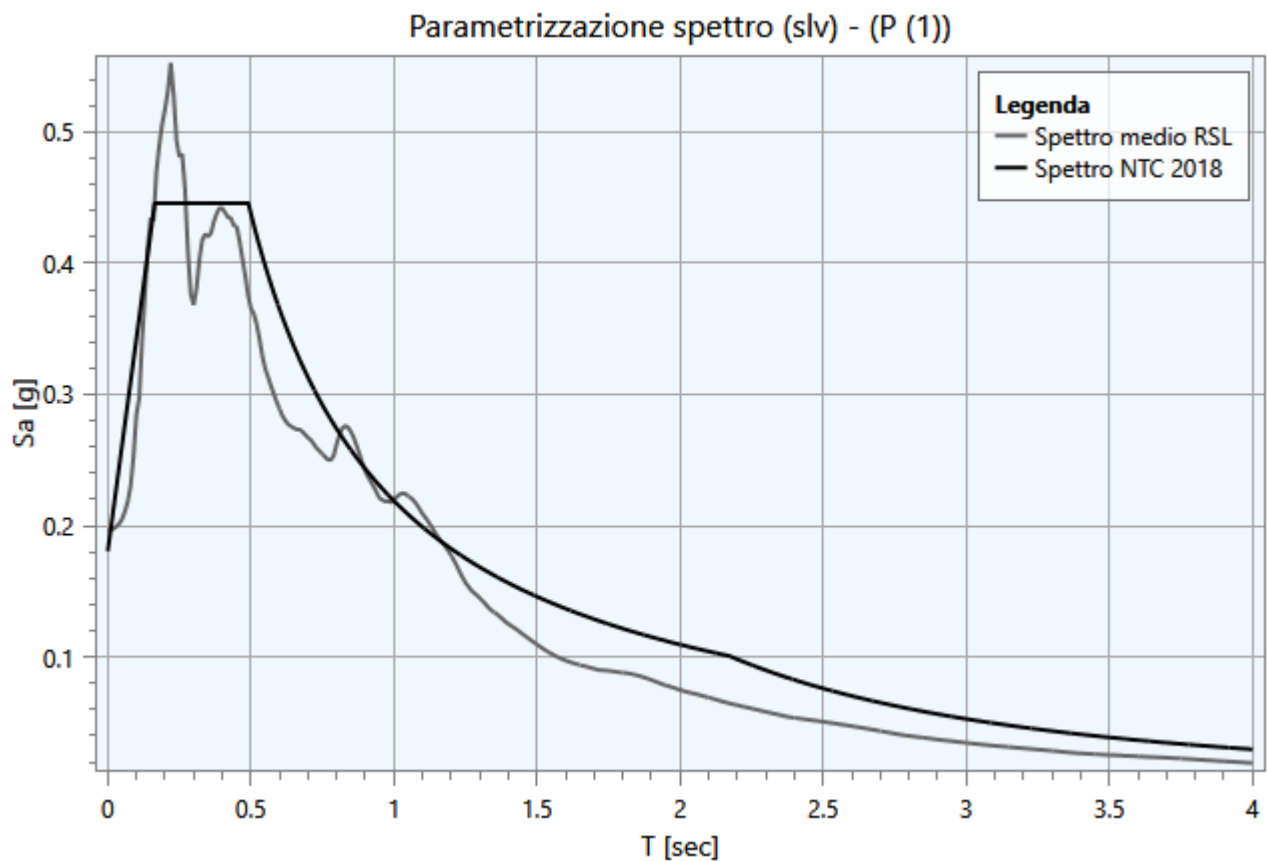
Di seguito vengono riportati, per ogni analisi, i parametri degli spettri parametrizzati per i vari punti di controllo presenti nella sezione oggetto di studio.

## SLV

<i>Punto di controllo</i>	<i>A<sub>g</sub> [g]</i>	<i>F0</i>	<i>S</i>	<i>A<sub>max</sub> [g]</i>	<i>T<sub>b</sub> [sec]</i>	<i>T<sub>c</sub> [sec]</i>	<i>T<sub>d</sub> [sec]</i>
P (1)	0.143	2.466	1.263	0.181	0.164	0.491	2.172

dove:

- $A_g$  : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F0$  : valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $S$  : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- $A_{max}$  : punto di ancoraggio a  $T=0$  dello spettro di output;
- $T_b$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- $T_c$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- $T_d$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.



## SLD

Punto di controllo	$A_g$ [g]	$F0$	$S$	$A_{max}$ [g]	$T_b$ [sec]	$T_c$ [sec]	$T_d$ [sec]
P (1)	0.048	2.456	1.515	0.073	0.154	0.462	1.792

dove:

- $A_g$  : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F0$  : valore massimo dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $S$  : coefficiente che tiene conto degli effetti di amplificazione (stratigrafici e/o topografici);
- $A_{max}$  : punto di ancoraggio a  $T=0$  dello spettro di output;
- $T_b$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante;
- $T_c$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a velocità costante;
- $T_d$  : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro a spostamento costante.

