

Dott. Saul Beghelli

GEOLOGO

(Ordine dei Geologi R.E.R. n°1018)

P. IVA 00874901200

C.F. BGH SLA 75A02 A944D

COMUNE DI BOLOGNA

Manifestazione di interesse agli interventi
da comprendere nel POC carburanti
relativa ad un'area situata in Viale Europa - Lato Nord

STUDIO GEOLOGICO
CON MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO

Committente:

KUWAIT PETROLEUM ITALIA S.p.A.
Servizio costruzioni e manutenzioni

Redazione:

DOTT. BEGHELLI SAUL



Bologna, lì 19 giugno 2017

Via Saragozza n° 72 - 40123 Bologna

Via Lavino n° 479 - 40050 Monte S. Pietro (BO)

Tel. e fax 051-6446165 / Cell. 339-1903302

E-mail: beghelli@rilgeo.it - beghelli@epap.sicurezzapostale.it

INDICE

1. PREMESSA	2
2. INDIVIDUAZIONE CARTOGRAFICA.....	3
3. ANALISI ELABORATI DI PIANO	3
3.1 PIANO TERRITORIALE DI COORDINAMENTO PROVINCIALE.....	3
3.2 PIANO STRALCIO PER IL SISTEMA IDRAULICO "NAVILE – SAVENA ABBANDONATO"	4
3.3 PIANO STRUTTURALE COMUNALE	4
4. INQUADRAMENTO MORFOLOGICO E SEDIMENTOLOGICO	5
5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO	7
5.1 DESCRIZIONE METODO DI INDAGINE	7
5.2 SITUAZIONE LITOSTRATIGRAFICA	8
5.3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	9
5.4 QUADRO IDROGEOLOGICO	11
6. CARATTERIZZAZIONE SISMICA.....	12
6.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE E MICROZONAZIONE SISMICA	12
6.1.1 Terzo livello di approfondimento.....	12
6.2 LIQUEFAZIONE DEI TERRENI IN CONDIZIONI SISMICHE	13
6.2.1 Verifica a liquefazione	14
6.3 CEDIMENTI POST-SISMICI	15
7. FATTIBILITÀ DELL'INTERVENTO.....	16

IN ALLEGATO:

Tavola 1: Corografia, scala 1:25.000;

Tavola 2: Inquadramento territoriale, scala 1:5.000;

Tavola 3: Individuazione area;

Tavola 4: Inquadramento geologico, scala 1:5.000;

Tavola 5: Vulnerabilità degli acquiferi, scala 1:20.000;

Tavola 6: Microzonazione sismica, scala 1:2.000;

Allegato A: Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU);

Allegato B: Elaborazioni geotecniche CPTU;

Allegato C: Studio sismico;

Allegato D: Verifica a liquefazione e cedimenti post-sismici da CPTU.

1. PREMESSA

Il presente elaborato è stato redatto nell'ambito della Manifestazione di interesse agli interventi da comprendere nel POC carburanti, relativa ad un'area situata in Viale Europa, lato Nord nel Comune di Bologna.

Lo studio intende definire le condizioni geologiche, morfologiche, litostratigrafiche e sismiche dell'area ed in particolare è indirizzato alla verifica della fattibilità dell'intervento ed alla valutazione di compatibilità della previsione urbanistica con la riduzione del rischio sismico e con le esigenze di protezione civile in adempimento della D.G.R. n. 2193 del 21/12/2015. Con tale delibera in particolare è stato approvato l'aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico, ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000, denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica ", di cui alla Deliberazione dell'Assemblea Legislativa n. 112 del 2 maggio 2007.

Al fine di perseguire gli obiettivi prefissati l'analisi si è sviluppata attraverso le seguenti fasi:

- acquisizione degli elaborati grafici a cura della società Q-Project S.r.l., che illustrano gli interventi in previsione;
- rilievo di superficie volto a definire il contesto d'inserimento e le condizioni morfologiche del comparto;
- ricostruzione di un quadro conoscitivo esauriente mediante l'esame degli elaborati redatti nell'ambito della pianificazione comunale e sovracomunale e della documentazione geologica già disponibile:
 - Piano territoriale di coordinamento provinciale (P.T.C.P.);
 - Piano Stralcio per il sistema idraulico "Navile - Savena abbandonato" a cura dell'Autorità di Bacino del Reno;
 - Piano Strutturale Comunale - Quadro conoscitivo;
 - Carta geologica di pianura dell'Emilia Romagna alla scala 1:250.000
 - Carta geologica d'Italia, Foglio 221 "Bologna" con Note illustrative;
 - Cartografia geologica a cura del Servizio geologico, sismico e dei suoli della Regione Emilia Romagna (Tavola 4);
 - Banca dati geognostica a cura del Servizio geologico, sismico e dei suoli regionale
 - Piezometrie e qualità delle acque sotterranee nella pianura emiliano-romagnola, a cura del Servizio geologico sismico e dei suoli regionale;
 - Bergonzoni A., Elmi C. (2003) - Il territorio di pianura del Comune di Bologna. Carta geomorfologica, Carta della litologia superficiale. Note illustrative. 31 pp. S.EL.CA., Firenze;
 - Ortofoto AGEA 2008 e AGEA 2011 – Carta forestale Città Metropolitana di Bologna;
- definizione delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni e ricostruzione del quadro litostratigrafico mediante la realizzazione di n°1 prova penetrometrica statica con piezocono (certificati di indagine riportati nell'Allegato A);
- caratterizzazione sismica mediante indagine MASW, abbinata alla registrazione del microtremore sismico ambientale con tecnica passiva a stazione singola (studio sismico nell'allegato C);
- verifica della resistenza alla liquefazione e calcolo dei cedimenti post-sismici (Allegato D);
- redazione del presente elaborato in ottemperanza alla normativa vigente, dove si riportano i risultati dello studio,

secondo le finalità dello stesso.

2. INDIVIDUAZIONE CARTOGRAFICA

Carta Topografica Regionale Scala 1:25.000	Carta Tecnica Regionale Scala 1:5.000	Cartografia catastale
Tavola n°221-NO "Bologna Nord-Est" Vedi Tavola 1	Elemento n°221052 "San Donato" Vedi Tavola 2	Foglio 85 Mappale 54 Comune di Bologna

3. ANALISI ELABORATI DI PIANO

Al fine di ricostruire un quadro conoscitivo esauriente, nel presente ambito sono stati analizzati gli elaborati, prodotti nell'ambito della pianificazione sovracomunale e comunale, ritenuti significativi per la definizione di un primo modello geologico di riferimento.

3.1 PIANO TERRITORIALE DI COORDINAMENTO PROVINCIALE

L'analisi degli Elaborati cartografici del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale ha evidenziato come l'area in oggetto presenti la situazione riportata nel seguente prospetto.

ELABORATI CARTOGRAFICI DI PIANO
Tavola 1 – Tutela dei sistemi ambientali e delle risorse naturali e storico-culturali
Nessun elemento segnalato
Tavola 2A – Rischio da frana, assetto dei versanti e gestione delle acque meteoriche
GESTIONE DELLE ACQUE METEORICHE Ambito di controllo degli apporti d'acqua in pianura (art. 4.8)
Tavola 2B – Tutela delle acque superficiali e sotterranee
Nessun elemento segnalato
Tavola 2C – Rischio sismico: carta delle aree suscettibili di effetti locali
A – Area potenzialmente soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche
Tavola 3 – Assetto evolutivo degli insediamenti, delle reti ambientali e delle reti per la mobilità
SISTEMA AMBIENTALE <u>Elementi riferiti alle politiche attive</u> Ambito agricolo periurbano dell'area bolognese (art. 11.10)
Tavola 4A – Assetto strategico delle infrastrutture per la mobilità
Nessun elemento segnalato

Tavola 4B – Assetto strategico delle infrastrutture e dei servizi per la mobilità collettiva
Nessun elemento segnalato
Tavola 5 – Reti ecologiche
Connettivo ecologico diffuso periurbano (art. 3.5)

3.2 PIANO STRALCIO PER IL SISTEMA IDRAULICO “NAVILE – SAVENA ABBANDONATO”

L’analisi del Piano Stralcio per il sistema idraulico “Navile - Savena abbandonato” a cura dell’Autorità di Bacino del Reno ha evidenziato come nell’area in esame non si individuino zonizzazioni o elementi che denotino situazioni di rischio idraulico.

3.3 PIANO STRUTTURALE COMUNALE

Nell’ambito del presente studio è stata prevista anche l’analisi degli elaborati cartografici, significativi per le valutazioni in corso, relativi al Quadro conoscitivo e al Rischio sismico del Piano Strutturale Comunale. Quanto emerso è riportato nel seguente prospetto.

ELABORATI CARTOGRAFICI DI PIANO
Tavola 2 – Litologia superficiale
DA – Argille inorganiche, argille limose
Tavola 3.2 – Carta geomorfologica di pianura
Dossi fluviali
Tavola 5 – Reticolo idrografico
Nessun elemento segnalato
Tavola 6 – Bacini scolanti
Scolo Calamosco
Tavola 7 – Vulnerabilità degli acquiferi
Grado di vulnerabilità basso (vedi Tavola 5)
Tavola 8 – Pericolosità antropica
In gran parte: grado di pericolosità medio; margine settentrionale: grado di pericolosità nullo

Tavola 9 – Rischio potenziale di inquinamento degli acquiferi	
In gran parte: rischio potenziale basso; margine settentrionale: rischio potenziale nullo	
Tavola 10 – Rischio idraulico	
Nessun elemento segnalato	
Rischio sismico	
TAV. E1 AREE POTENZIALMENTE SOGGETTE AD EFFETTI LOCALI PER EVENTI SISMICI	Depositi prevalentemente limosi e argillosi di piana alluvionale - Effetti attesi: amplificazione e cedimenti - Studi: valutazione amplificazione e cedimenti
TAV. E1 CARTA DEL SOTTOSUOLO	- Percentuale ghiaie (riferita ad uno spessore di 30 metri): 0 ÷ 10% (in gran parte); 10 ÷ 20% (margine sud-occidentale); - Tetto delle ghiaie compreso fra -20,0 e -25,0 m; - Non si individua presenza significativa di livelli sabbiosi potenzialmente a rischio di liquefazione e/o densificazione.
TAV. E2 CARTA COMUNALE DELLE AREE SUSCETTIBILI DI EFFETTI LOCALI	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 ritenuti sufficienti approfondimenti di II livello per la valutazione del coefficiente di amplificazione litologica e sono richiesti approfondimenti di III livello per la stima degli eventuali cedimenti.
TAV. E3 CARTA DI SINTESI DEI LIVELLI DI APPROFONDIMENTO	Aree che necessitano di approfondimenti di II livello

4. INQUADRAMENTO MORFOLOGICO E SEDIMENTOLOGICO

L'area in esame ricade nel settore nord-orientale del Comune di Bologna, lungo il lato Nord di Viale Europa, in prossimità dell'incrocio con Via Calamosco (vedi Foto 1). Si tratta di un ambito agricolo ad assetto sub-pianeggiante che si sviluppa ad una quota compresa fra 40 e 41 m s.l.m..

L'analisi morfologica ha evidenziato come il comparto ricada al margine orientale di un dosso fluviale poco rilevato, che si delinea a partire dal conoide del Savena e corrisponde con molta probabilità ad un paleo-percorso del torrente. Infatti il corso d'acqua allo sbocco in pianura, mutò più volte il proprio tracciato, fino a quello (il primo storicamente definibile con precisione) che con vari meandri verso Ovest, quasi lambiva il centro storico di Bologna fra le porte di San Vitale e di San Donato. Al termine del XVIII secolo (1776 – 1777), a causa di frequenti e fastidiose esondazioni al margine della città, fu realizzata un'imponente opera di deviazione che, iniziando in corrispondenza dell'attuale Via Cavedone (in prossimità di Via Liguria) portò le acque del Savena a confluire nel Torrente Idice (informazioni desunte da A. Bergonzoni e C. Elmi, 2000 – Il territorio di pianura del Comune di Bologna).

I terreni presenti sono di origine alluvionale, depositi da corsi d'acqua (Torrente Savena in primis) che, non essendo arginati, hanno subito nel tempo notevoli diversioni di alveo. I depositi alluvionali nel suo complesso sono costituiti da sedimenti a grana fine (argille e limi) o più grossolana (sabbie e subordinatamente ghiaie). I materiali limosi e argillosi sono prevalenti ai margini delle conoidi fluviali, in zone interposte fra le conoidi stesse oppure in aree di piana inondabile. Mentre i depositi sabbiosi e ghiaiosi si rinvenivano principalmente in corrispondenza dei paleo-alvei oppure dei conoidi fluviali, dove tuttavia la granulometria dei sedimenti tende a diminuire spostandosi verso la porzione distale della struttura morfologica.

In particolare nell'area in esame si individua nel primo sottosuolo una successione deposizionale, costituita limi e limi argillosi, con locali intercalazioni prettamente sabbiose, riconducibile ad una facies di canale e argine indifferenziati.

La Cartografia geologica a cura del Servizio geologico sismico e dei suoli della R.E.R. (vedi Tavola 4) inserisce l'area in corrispondenza del Subsistema di Ravenna (AES8) che, in base alla datazione con il ^{14}C , risulta datato da 12 ka fa all'attuale. Tale classificazione deriva dall'attribuzione dei depositi a insiemi più ampi, che per significato e caratteristiche fisiche si possono definire "Unconformity bounded subsurface units, o U.B.S.U." (Salvador, 1994), cioè corpi sedimentari compresi da superfici di discontinuità. Dal punto di vista litologico la medesima cartografia riporta superficialmente depositi limoso-sabbiosi.

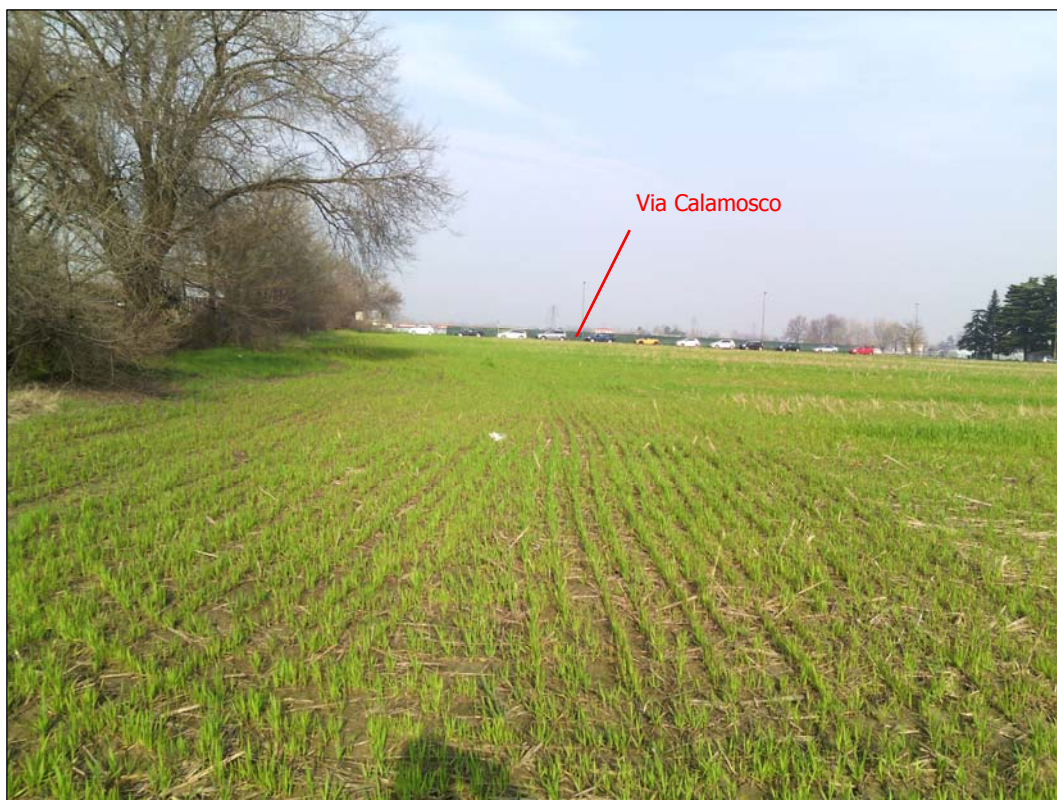


Foto 1: Vista dell'area in esame da Est.

5. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Al fine di ricostruire il modello del sottosuolo è stata realizzata n°1 prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU1), la cui ubicazione è individuata in Tavola 6 e nelle seguenti Fig.1 e Foto 2.

5.1 DESCRIZIONE METODO DI INDAGINE

La perforazione è stata eseguita con un penetrometro statico PAGANI TG63-200 dotato di una cella di carico da 20 t, che impiega una punta elettrica con piezocono, con un'apertura di 60° ed una superficie di 10 cm², ed un manicotto di frizione (friction jacket) della superficie di 150 cm².

L'indagine è stata eseguita con infissione nel terreno a velocità costante (2 cm/s +/- 0,4 cm/sec), mediante una batteria di aste (di lunghezza pari ad 1 m) azionate da un martinetto idraulico, misurando ad intervalli di 2 cm i seguenti dati:

- resistenza alla penetrazione della punta (qc);
- attrito laterale locale (fs);
- pressione dei pori (u).

Nell'Allegato A sono riportati i grafici elaborati con il software CPeT-IT v.2.0.1.61 della Geologismiki Geotechnical Software – Serres (Grecia). Per descrivere la natura litologica dei terreni ci si è basati sugli studi di caratterizzazione del terreno di Robertson 1990 e 2010, tarati su misure derivanti da CPTU (vedi colonne stratigrafiche SBT e SBTn).

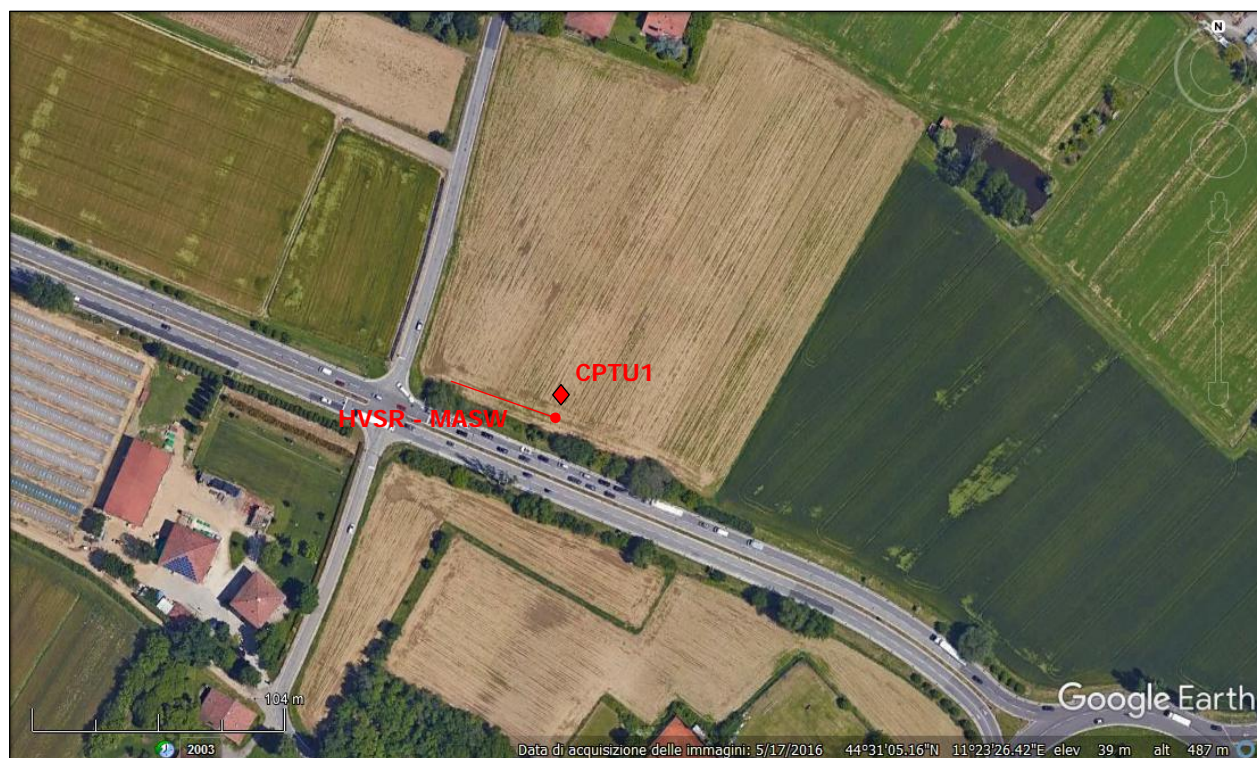


Fig. 1: Ubicazione prova penetrometrica CPTU1 ed indagini sismiche (HVSr + MASW) su immagine satellitare da Google Earth, acquisita il 17/05/2016.



Foto 2: Vista del punto di indagine CPTU1 da Sud-Ovest.

L'indagine CPTU1 è stata spinta fino a -20,30 m dal piano campagna ed ha permesso di definire le proprietà fisico-meccaniche e ricostruire la natura litologica dei terreni, che costituiscono il volume significativo, nell'area dove è previsto l'intervento.

5.2 SITUAZIONE LITOSTRATIGRAFICA

L'indagine CPTU1 ha evidenziato la seguente successione stratigrafica:

0,00 ÷ 0,60 m: sabbie limose e limi sabbiosi rimaneggiati durante le lavorazioni agricole e sovraconsolidati per essiccamento.

0,60 ÷ 2,10 m: alternanze di limi sabbiosi con limi argillosi caratterizzate da proprietà fisico-meccaniche discrete ($0,9 \text{ MPa} < q_c < 2,7 \text{ MPa}$).

2,10 ÷ 3,55 m: argille limose a consistenza media ($0,9 \text{ MPa} < q_c < 1,5 \text{ MPa}$). Proprietà fisico-meccaniche discrete.

3,55 ÷ 5,00 m: limi sabbiosi intercalati da un livello limoso-argilloso. Proprietà fisico-meccaniche nel complesso discrete.

5,00 ÷ 7,90 m: argille limose caratterizzate da una consistenza generalmente molle ($0,3 \text{ MPa} < q_c < 1,2 \text{ MPa}$). Proprietà fisico-meccaniche da modeste a mediocri, talora discrete.

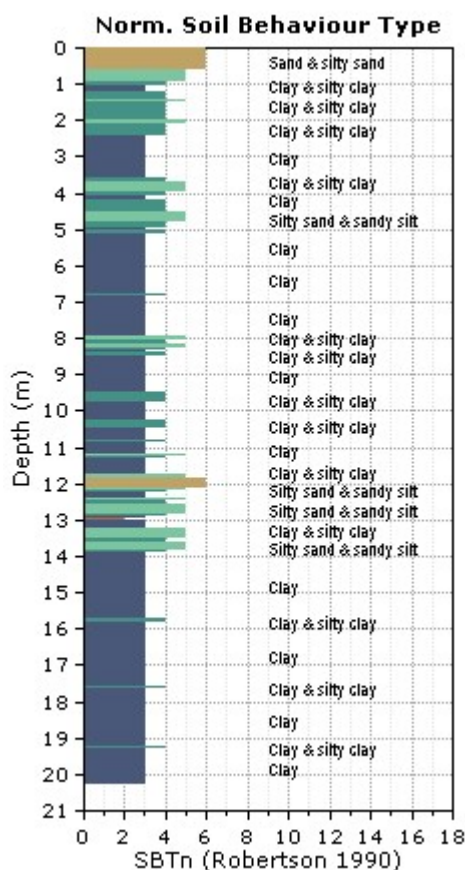
7,90 ÷ 11,80 m: alternanze di argille limose con limi argillosi e talora limi sabbiosi, messi in risalto da valori più alti di q_c . Proprietà fisico-meccaniche discrete, localmente mediocri.

11,80 ÷ 13,90 m: limi sabbiosi e talora sabbie limose evidenziate da picchi nei valori di q_c , a cui si intercalano livelletti di limi argillosi a consistenza da molle a media. Proprietà fisico-meccaniche variabili, nel complesso discrete.

13,90 ÷ 20,30 m (fondo foro): argille limose a consistenza media, con modeste intercalazioni di livelletti di limi argillosi, dove si registra un aumento dei valori di qc. Proprietà fisico-meccaniche discrete ($1,0 \text{ MPa} < q_c < 2,7 \text{ MPa}$).

Nel seguente grafico è riportata nel dettaglio la sequenza deposizionale ricostruita, in corrispondenza del punto di indagine, facendo riferimento alla classificazione di Robertson (1990).

CPTU1

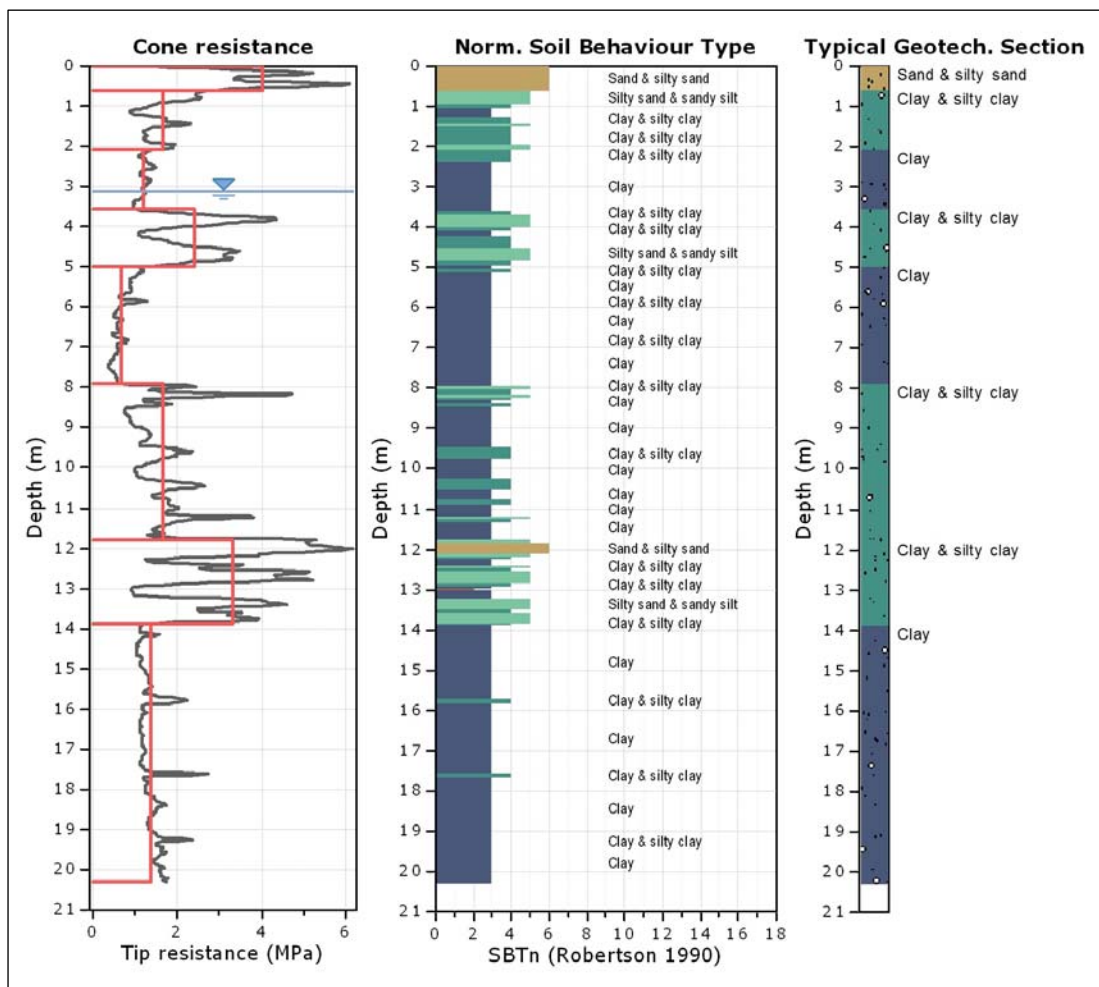


5.3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Al fine di caratterizzare i terreni dal punto di vista geotecnico in corrispondenza della prova CPTU1 è stata individuata una serie di unità, omogenee per caratteristiche litologiche e fisico-meccaniche. Per ciascuna unità identificata sono stati definiti i parametri geotecnici medi, con il range di variazione, ricavati mediante le correlazioni illustrate nell'Allegato A.

Di seguito si riportano le unità distinte e la relativa caratterizzazione geotecnica; l'elaborazione completa è riportata nell'Allegato B.

CPTU1



Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.60	9.61E-05	8.7	24.0	72.0	42.4	30.1	30.1	0.0	0.0	0.0	17.5
0.60		(±6.96E-05)	(±2.1)	(±5.6)	(±7.1)	(±1.0)	(±7.0)	(±7.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)
0.60	1.50	6.90E-07	6.0	27.5	0.0	0.0	22.7	33.5	95.2	3.1	14.4	17.8
2.10		(±1.25E-06)	(±1.2)	(±2.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±6.9)	(±3.0)	(±18.9)	(±0.7)	(±3.1)	(±0.2)
2.10	1.45	2.42E-08	5.7	0.0	0.0	0.0	16.0	39.5	81.7	1.6	7.6	17.8
3.55		(±2.40E-08)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.0)	(±5.0)	(±10.1)	(±0.3)	(±1.5)	(±0.4)
3.55	1.45	4.78E-07	8.8	38.7	0.0	0.0	32.2	48.8	118.2	1.7	8.1	17.8
5.00		(±8.55E-07)	(±2.5)	(±6.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±13.2)	(±9.9)	(±37.8)	(±0.5)	(±2.3)	(±0.5)
5.00	2.90	3.25E-09	4.0	0.0	0.0	0.0	4.8	28.9	40.4	0.5	2.4	16.4
7.90		(±5.46E-09)	(±0.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.1)	(±6.3)	(±16.4)	(±0.2)	(±1.1)	(±0.7)
7.90	3.90	1.10E-07	7.6	41.5	0.0	0.0	18.7	48.4	95.1	0.9	4.2	17.4
11.80		(±4.27E-07)	(±2.2)	(±7.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±12.3)	(±10.3)	(±34.2)	(±0.3)	(±1.4)	(±0.6)
11.80	2.10	1.41E-06	11.7	51.4	0.0	0.0	40.1	60.4	115.9	0.9	4.3	17.6
13.90		(±2.47E-06)	(±3.1)	(±5.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±20.9)	(±8.7)	(±57.6)	(±0.5)	(±2.2)	(±0.4)
13.90	6.40	3.04E-09	7.8	0.0	0.0	0.0	7.3	53.0	75.3	0.5	2.2	17.2
20.30		(±6.31E-09)	(±1.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.0)	(±6.8)	(±18.0)	(±0.1)	(±0.5)	(±0.3)

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

5.4 QUADRO IDROGEOLOGICO

La prova penetrometrica CPTU1 è stata eseguita in data 15-06-2017, a seguito di un periodo con scarsi apporti meteorici. Le verifiche effettuate in corrispondenza del punto di indagine hanno evidenziato una soggiacenza della falda superficiale pari a -3,12 m.

Si evidenzia tuttavia come i depositi del primo sottosuolo, fino ad almeno 20,0 m di profondità siano costituiti in prevalenza da limi e argille, con una frazione sabbiosa e sabbioso-limosa secondaria. Questa successione sedimentaria, facendo riferimento a quanto indicato in Tabella 1 (da Casagrande e Fadum, 1940) presenta valori indicativi del coefficiente di permeabilità (k) variabili fra 10^{-5} e 10^{-8} m/s. Si tratta pertanto di depositi caratterizzati, in base alla classificazione riportata in Tabella 2 [da Colombo-Colleselli (1996), Elementi di geotecnica, Zanichelli Editore], da un grado di permeabilità da basso a molto basso.

k (m/s)	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
<i>Drenaggio</i>	buono					povero				praticamente impermeabile		
	ghiaia pulita	sabbia pulita e miscele di sabbia e ghiaia pulita				sabbia fine, limi organici e inorganici, miscele di sabbia, limo e argilla, depositi di argilla stratificati				terreni impermeabili, argille omogenee sotto la zona alterata dagli agenti atmosferici		
					terreni impermeabili modificati dagli effetti della vegetazione e del tempo							

Tabella 1: Coefficiente di permeabilità terreni [da Casagrande e Fadum, 1940].

Grado di permeabilità	Valore di k (m/s)
alto	superiore a 10^{-3}
medio	$10^{-3} \div 10^{-5}$
basso	$10^{-5} \div 10^{-7}$
molto basso	$10^{-7} \div 10^{-9}$
impermeabile	minore di 10^{-9}

Tabella 2: Classificazione del terreno in funzione del valore di k .

Il primo livello acquifero significativo è rappresentato dall'orizzonte di sabbia e ghiaia, che si incontra ad una profondità variabile da -20,0 m a -32,0 m, a seconda dei punti di perforazione.

Tenendo in considerazione il quadro litostratigrafico ed idrogeologico, nonché il grado di permeabilità dei depositi presenti almeno fino a -20,0 m, si ritiene che questa falda presenti una vulnerabilità bassa come evidenziato anche dalla Tavola 7 del Quadro conoscitivo del PSC, dedicata a questo aspetto (vedi stralcio nella Tavola 5 a fine testo).

6. CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Il presente studio, al fine di caratterizzare il comparto dal punto di vista sismico e di adempiere alle richieste della normativa vigente (D.G.R. n°2193 del 21/12/2015 aggiornamento della D.A.L. n°112 del 02/05/2007), ha previsto un'analisi del microtremore sismico ambientale con tecnica passiva a stazione singola (HVSr) ed un'indagine di tipo attivo con tecnica MASW, utilizzando un tromografo digitale TROMINO. Le acquisizioni sono state effettuate nell'ambito indicato nella Fig. 1 ed in Tavola 6. Le metodologie di indagine ed i risultati sono presentati nell'Allegato C.

6.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE E MICROZONAZIONE SISMICA

La Regione Emilia Romagna, con Delibera dell'Assemblea Legislativa del 2 maggio 2007 (Oggetto n° 2131 – Prog. n° 112) aveva approvato l'atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, comma 1, della L.R. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", in merito a "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". Scopo del documento era fornire i criteri per l'individuazione delle aree soggette ad effetti locali e per la microzonazione sismica del territorio, in modo da orientare le scelte della pianificazione verso aree caratterizzate da minore pericolosità sismica. La D.G.R. n°2193 del 21/12/2015 ha approvato l'aggiornamento di tale atto di coordinamento tecnico.

Il presente studio ha provveduto, seguendo le indicazioni della normativa vigente, ad effettuare una prima fase di analisi delle condizioni geologiche, morfologiche, topografiche e litologico-stratigrafiche dell'area.

Il comparto in esame si inserisce in un contesto di piana alluvionale con depositi prevalentemente limosi e argillosi, dove sono attesi in concomitanza di eventi sismici fenomeni di amplificazione e cedimenti.

In considerazione di ciò e di quanto richiesto dal Comune di Bologna, è stato affrontato un terzo livello di approfondimento con un'analisi finalizzata a valutare l'effettivo grado di pericolosità sismica locale in un'area dove durante il primo livello di approfondimento sono emersi aspetti litostratigrafici che possono determinare effetti locali.

6.1.1 Terzo livello di approfondimento

Lo studio facendo riferimento al modello sismo-stratigrafico ricostruito, ha previsto un'elaborazione mediante il software Strata, che ha portato alla definizione dello spettro di risposta di riferimento (vedi Allegato C). A seguire sono stati ricavati i fattori di amplificazione (F.A.) in termini di accelerazione di picco orizzontale PGA/PGA_0 , e di intensità spettrale SI/SI_0 per tre diversi intervalli di periodo proprio T_0 (0,1 – 0,5 s; 0,5 – 1,0 s; 1,0 – 1,5 s). I valori emersi sono riportati nel seguente prospetto.

FATTORI DI AMPLIFICAZIONE			
F.A. PGA/PGA ₀	F.A. SI/SI ₀ (0,1s<T ₀ <0,5s)	F.A. SI/SI ₀ (0,5s<T ₀ <1,0s)	F.A. SI/SI ₀ (0,5s<T ₀ <1,0s)
1,45	1,60	2,38	2,11

Tabella 3: Fattori di amplificazione.

Per poter visionare in maniera integrale i risultati dello studio sismico e la descrizione delle metodologie utilizzate si rimanda all'Allegato C. Nella Tavola 6 "Microzonazione sismica" sono nuovamente presentati i fattori di amplificazione sismica emersi dallo studio, validi per l'intero comparto, in quanto le indagini a disposizione non hanno riscontrato situazioni che possano determinare variazioni significative.

Nell'ambito dello studio sismico sono stati ricavati anche i coefficienti sismici per la verifica della liquefazione e dei cedimenti post-sismici e per le prossime modellazioni del progettista strutturale. Tali parametri sono stati definiti allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), considerando una vita nominale della struttura (V_N) posta pari a 50 anni ed una classe d'uso II:

- a_{max} [m/s²] = accelerazione orizzontale massima attesa al sito = 2,383
- a_{max} [g] = accelerazione orizzontale massima attesa al sito = 0,243
- k_h = coefficiente sismico orizzontale = 0,058;
- k_v = coefficiente sismico verticale = $\pm 0,029$.

Per chiarezza si evidenzia che, ottenuto a_{max} , k_h è stato ricavato, utilizzando la formula 7.11.6 delle NTC08, da cui applicando la formula 7.11.7 (NTC08) è stato calcolato k_v . Il valore di β_m è stato posto pari a 0,24 facendo riferimento alla Tabella 7.11.II (NTC08).

6.2 LIQUEFAZIONE DEI TERRENI IN CONDIZIONI SISMICHE

La liquefazione nei terreni denota una diminuzione di resistenza a taglio e di rigidità, causata dall'aumento della pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante un evento sismico, tale da generare deformazioni permanenti significative o persino l'annullamento degli sforzi efficaci nel terreno.

Tale fenomeno si verifica quando si presentano simultaneamente alcune condizioni che riguardano le caratteristiche del terreno e dell'azione sismica.

Le condizioni predisponenti del terreno sono:

- profondità dello strato potenzialmente liquefacibile < 15-20 m dal p.c.;
- profondità della falda < 5 m;
- densità relativa D_r < 60%;
- diametro medio $0.02 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$
- frazione di fini (diametro < 0.005 mm) < 15%.

Tra i fattori geologici risultano inoltre fondamentali la presenza e lo spessore degli strati non liquefacibili superficiali, l'assenza di cementazione fra i grani, l'origine e l'età del deposito, la presenza di strati drenanti grossolani intercalati

alla sabbia fine liquefacibile e la morfologia. Tra i fattori geotecnici influiscono in maniera sostanziale: lo stato di addensamento, la granulometria, il grado di saturazione, le condizioni di drenaggio, lo stato tensionale efficace iniziale, la storia tensionale e deformativa.

Le condizioni scatenanti che riguardano le caratteristiche dell'azione sismica sono:

- magnitudo > 5,5;
- a_g (accelerazione orizzontale max su suolo rigido) > 0,15g;
- durata > 15-20 sec.

6.2.1 Verifica a liquefazione

Lo studio ha previsto la verifica della liquefazione delle sabbie in corrispondenza del punto investigato con prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU1).

Le elaborazioni sono state effettuate con il programma di calcolo "CLiq v.2.1.6.11" della Geologismiki Geotechnical Software – Serres (Grecia).

In particolare le analisi sono state condotte, utilizzando il metodo di calcolo di Robertson (NCEER R&W 1998, 2009), considerando i seguenti dati di input:

- Falda in sito: -3,12 m;
- Falda durante il sisma: -2,50 m;
- Magnitudo: 6,14, facendo riferimento alla magnitudo attesa massima per la zona sismogenetica 912 della Zonizzazione sismica ZS9;
- a_{max} : 0,24 g, derivante da 0,166 g (valore di a_{refg} per il Comune di Bologna - Allegato A4 Delibera RER 112/2007) x 1,45 (PGA/PGA₀ derivante dallo studio di risposta sismica locale).

L'analisi ha incluso anche i terreni argillosi e a comportamento simile a quelli argillosi ("clay-like-soil") per la valutazione della liquefazione e delle condizioni di "cyclic softening" dei sedimenti poco coesivi.

Le elaborazioni, che hanno considerato ogni intervallo da 2 cm acquisito dalla CPTU, hanno permesso di definire il fattore di sicurezza a liquefazione (F_{sL}), inteso come rapporto tra la capacità di resistenza a liquefazione (CRR) e la domanda di resistenza ciclica alla liquefazione (CSR).

$$F_{sL} = CRR_{eq}/CSR$$

Una volta valutato il fattore di sicurezza F_{sL} nei confronti della liquefazione a varie profondità lungo una verticale è opportuno introdurre un indice sintetico per quantificare il rischio di liquefazione in corrispondenza dell'intera verticale. A tale scopo è stato calcolato l'indice del potenziale di liquefazione (IP_L o LPI), basandosi sul metodo di Iwasaki e al. (1982).

I risultati della verifica a liquefazione sono riportati integralmente a fine testo (Allegato D). In particolare sono allegati il grafico F_s plot, con evidenziati gli strati in cui il fattore di sicurezza è inferiore a 2,0, ed il grafico LPI che individua il valore dell'indice del potenziale di liquefazione.

Nella seguente tabella è riportato il valore dell'indice del potenziale di liquefazione (IP_L o LPI) individuato in corrispondenza del punto investigato con la prova CPTU.

RISULTATI VERIFICA A LIQUEFAZIONE	
Indagine	Indice del potenziale di liquefazione
CPTU1	1,62

Tabella 4: Indice del potenziale di liquefazione.

In funzione del valore di LPI, Sonmez (2003) ha proposto le seguenti classi di rischio di liquefazione, che sono indicate anche nell'Allegato A3 della D.G.R. n°2193 del 21/12/2015.

CLASSI DI RISCHIO (Sonmez 2003)	
LPI	Rischio di liquefazione
0	Non liquefacibile
$0 < LPI \leq 2$	Basso
$2 < LPI \leq 5$	Moderato
$5 < LPI \leq 15$	Alto
$LPI > 15$	Molto alto

Tabella 5: Classi rischio di liquefazione.

Alla luce di quanto emerso si può affermare che il sito in esame è esposto ad un rischio di liquefazione basso, che denota una scarsa propensione alla liquefazione, anche considerando un'azione sismica cautelativa ($M_w = 6,14$; $a_{max} = 0,24g$).

6.3 CEDIMENTI POST-SISMICI

Il calcolo dei cedimenti post-sismici è stato effettuato con l'ausilio del programma di calcolo " CLiq v.2.1.6.11" della Geologismiki Geotechnical Software – Serres (Grecia).

In particolare nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto alla stima dei cedimenti utilizzando la recente procedura di Robertson (2009) e Zhang et. al. (2007). L'approccio si è basato sulla valutazione delle deformazioni volumetriche post-cicliche e ha quantificato i cedimenti sulla base dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione FL calcolato (se $< 1,20$) e sulla base degli esiti di densità relativa DR desunti dalle resistenze di punta $(q_{c1N})_{cs}$ (equivalent clean sand normalized CPT tip resistance).

Per i sedimenti fini coesivi (zone "B" e "C" della carta di comportamento di Robertson – 1990), il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche. Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari

ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti risultano statisticamente modesti anche per potenti intervalli di depositi di argille compressibili (Boulanger and Idriss, 2007).

Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009) ed i risultati dell'analisi sono illustrati nel grafico "Vertical settlement" dell'Allegato D. Nella seguente tabella è riportato il valore del cedimento post-sismico individuato in corrispondenza del punto investigato con la prova CPTU.

CALCOLO CEDIMENTI POST-SISMICI	
Indagine	Cedimenti [cm]
CPTU1	5,65

Tabella 6: Cedimenti post-sismici.

7. FATTIBILITÀ DELL'INTERVENTO

In considerazione di quanto emerso dalle analisi e dalle verifiche effettuate, l'area in oggetto non presenta elementi geologici ed idrogeologici che precludano l'accoglimento della Manifestazione di interesse agli interventi da comprendere nel POC carburanti, così come presentata negli elaborati grafici predisposti dalla Società Q-Project S.r.l..

Il rilievo geologico-morfologico di superficie, l'indagine geognostica e l'analisi geofisica hanno permesso infatti di delineare un quadro geologico, sismico ed idrogeologico dell'area privo di criticità, tali da determinare a priori situazioni di rischio.

Alla luce di quanto emerso si esprime pertanto un parere positivo riguardo la fattibilità dell'intervento, evidenziando come in fase di progettazione esecutiva occorrerà valutare, sia la tipologia fondale più idonea per le varie strutture, sia la modalità di lavoro a cui attenersi per i movimenti terra.

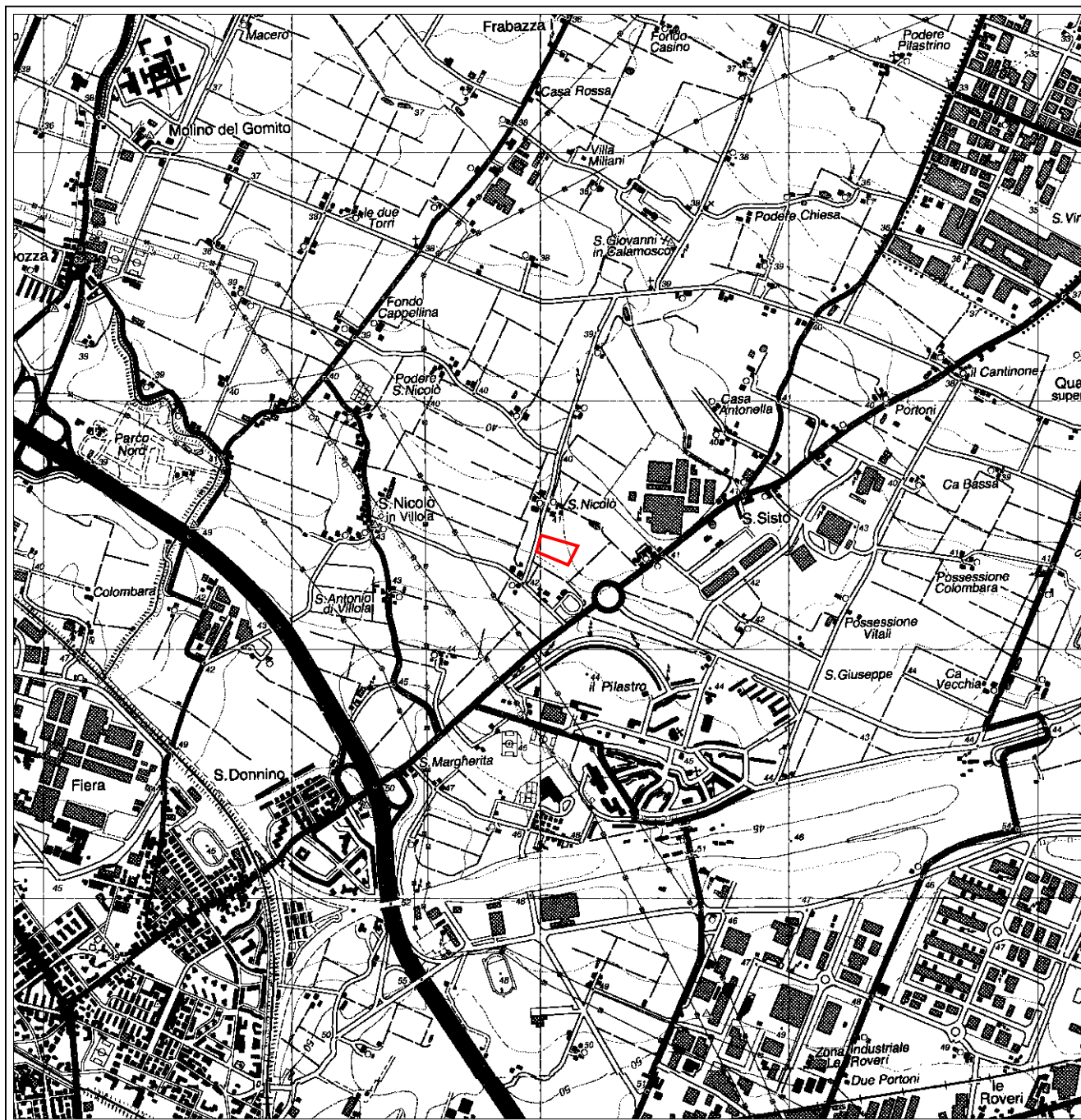


Dott. Saul Beghelli – GEOLOGO

Bologna, 19 giugno 2017.

COROGRAFIA

Scala 1:25.000

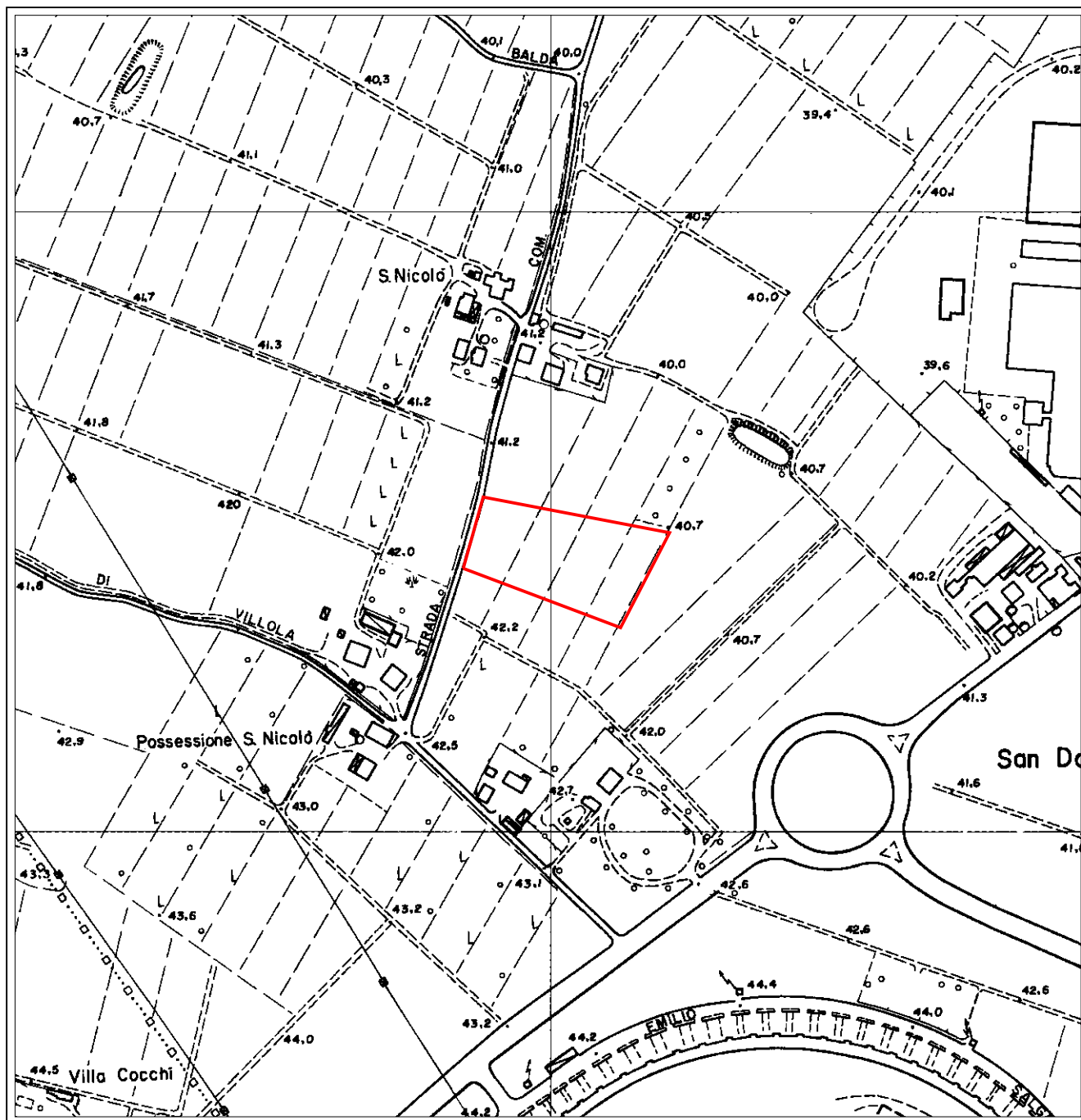


Stralcio Tavole n°221-NO "Bologna Nord-Est" e 221-SO "Bologna Sud-Est"
della Carta Topografica Regionale

Legenda:



Area in oggetto

INQUADRAMENTO TERRITORIALE**Scala 1:5.000**

Stralcio Elemento n°221052 "San Donato"
della Carta Tecnica Regionale

Legenda:

Area in oggetto

INDIVIDUAZIONE AREA



Immagine satellitare da Google earth
Data di acquisizione 09/06/2014

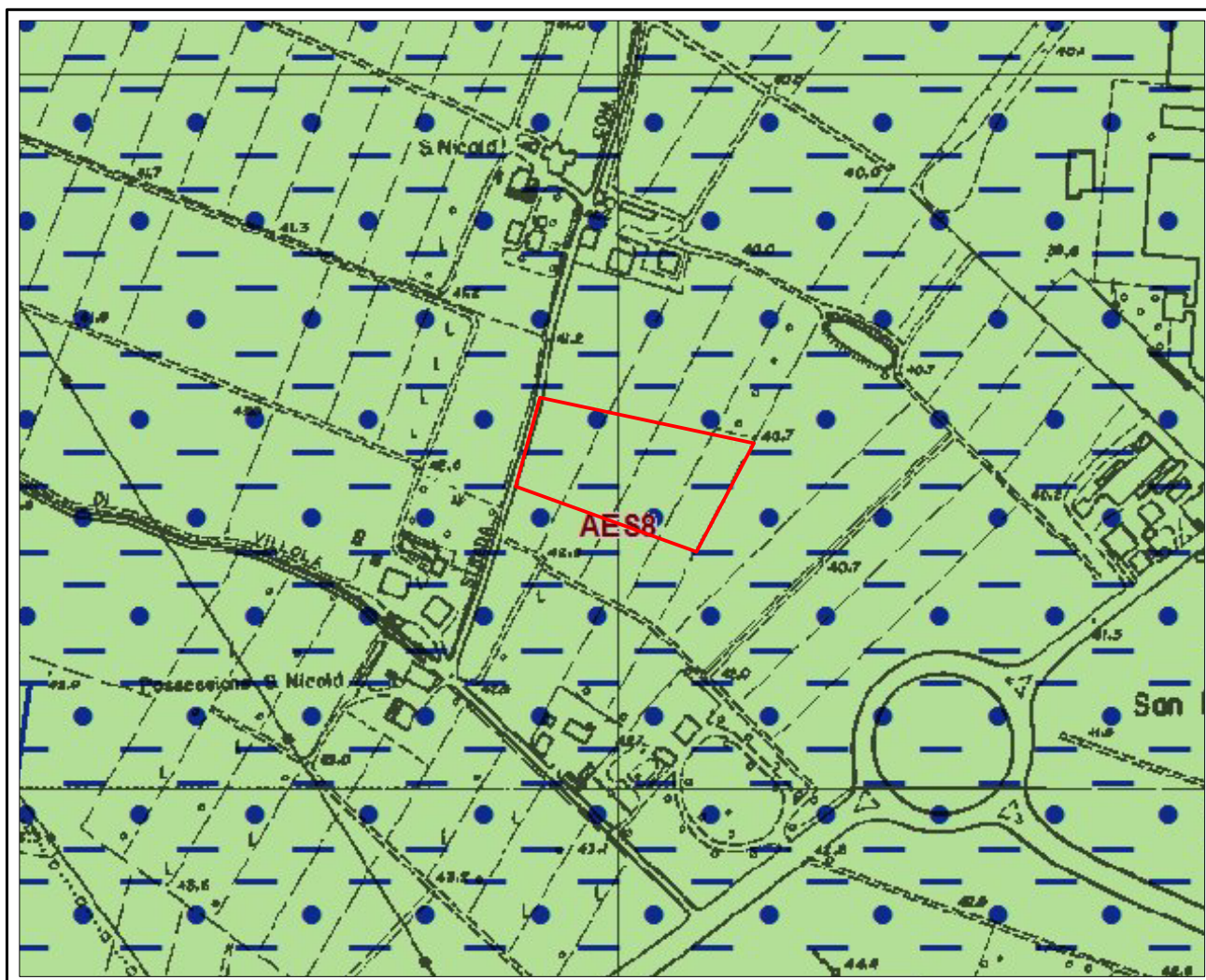
Legenda:



Area in oggetto

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Scala 1:5.000

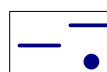


Cartografia geologica
a cura del Servizio geologico sismico e dei suoli della R.E.R.

Legenda:



Area in oggetto

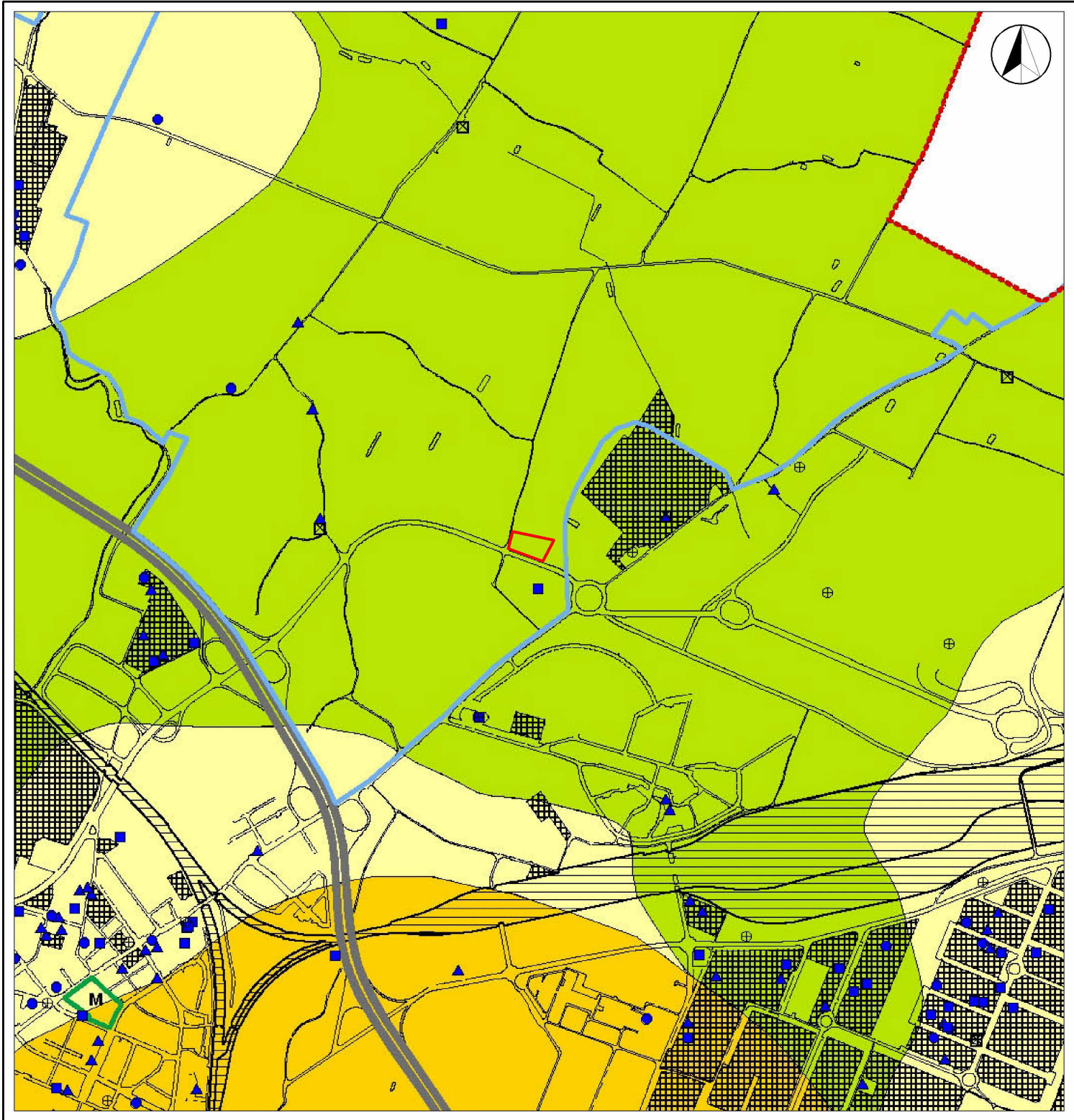


Limi sabbiosi
Piana alluvionale

AES8

SUBSISTEMA DI RAVENNA

VULNERABILITA' DEGLI ACQUIFERI
Scala 1:20.000



Stralcio Tavola 7 - Vulnerabilità degli acquiferi
Allegati capitolo F1 - relazione geologica
Quadro conoscitivo PSC
Comune di Bologna

Legenda:

Area in oggetto

	GRADI DI VULNERABILITA'	PROFONDITA' DEL TETTO DELLE GHIAIE (metri)	GRADI DI VULNERABILITA'
Alvei fluviali	Estremamente Elevato	0	Estremamente elevato
Zone di ricarica degli acquiferi superficiali	Elevato	$p < 2.5$ m	Elevato
	Alto	$2.5 < p < 5$ m	
	Medio	$5 < p < 10$ m	Alto
Zone di ricarica degli acquiferi superficiali	Basso	$p > 10$ m	
	Elevato	$p < 5$ m	Medio
	Alto	$5 < p < 12.5$ m	
	Medio	$12.5 < p < 20$ m	Basso
	Basso	$p > 20$ m	

Fattori antropici

- Attività industriali di tipo A:
 - verniciatura
 - stoccaggio rifiuti
 - trattamento metalli
 - lavasecco
 - fonderia
 - cosmetica/farmaceutica
 - aut carrozzeria
- Attività industriali di tipo B:
 - tornitura/fresatura
 - tipografia
 - stampaggio plastica
 - stampaggio
 - saldatura
 - officina meccanica
 - materiale elettrico
 - eliografia
 - lavorazione cuoio
 - conglomerato bituminoso
 - autolavaggio
 - aut officina
- Attività industriali di tipo C:
 - stampi
 - modelli per fonderia
 - macchine varie
 - lavorazione legno
 - lavorazione lamiera
 - fabbro
 - carpenteria
- Punti vendita carburante
- Serbatoi di carburante privati
- Cave attive
- Cave inattive
- Aree industriali
- Aree ferroviarie
- Perimetro urbano
- Autostrada
- Aeroporto
- Depuratore
- Discarica
- Strutture sanitarie
- Cimiteri
- Aree militari
- Confine comunale
- Margine collinare





MICROZONAZIONE SISMICA

Scala 1:2.000



Ortofoto AGEA 2011 e Carta Tecnica Regionale
da Cartografia del dissesto idrogeologico
a cura del Servizio geologico sismico e dei suoli della R.E.R.

Legenda:

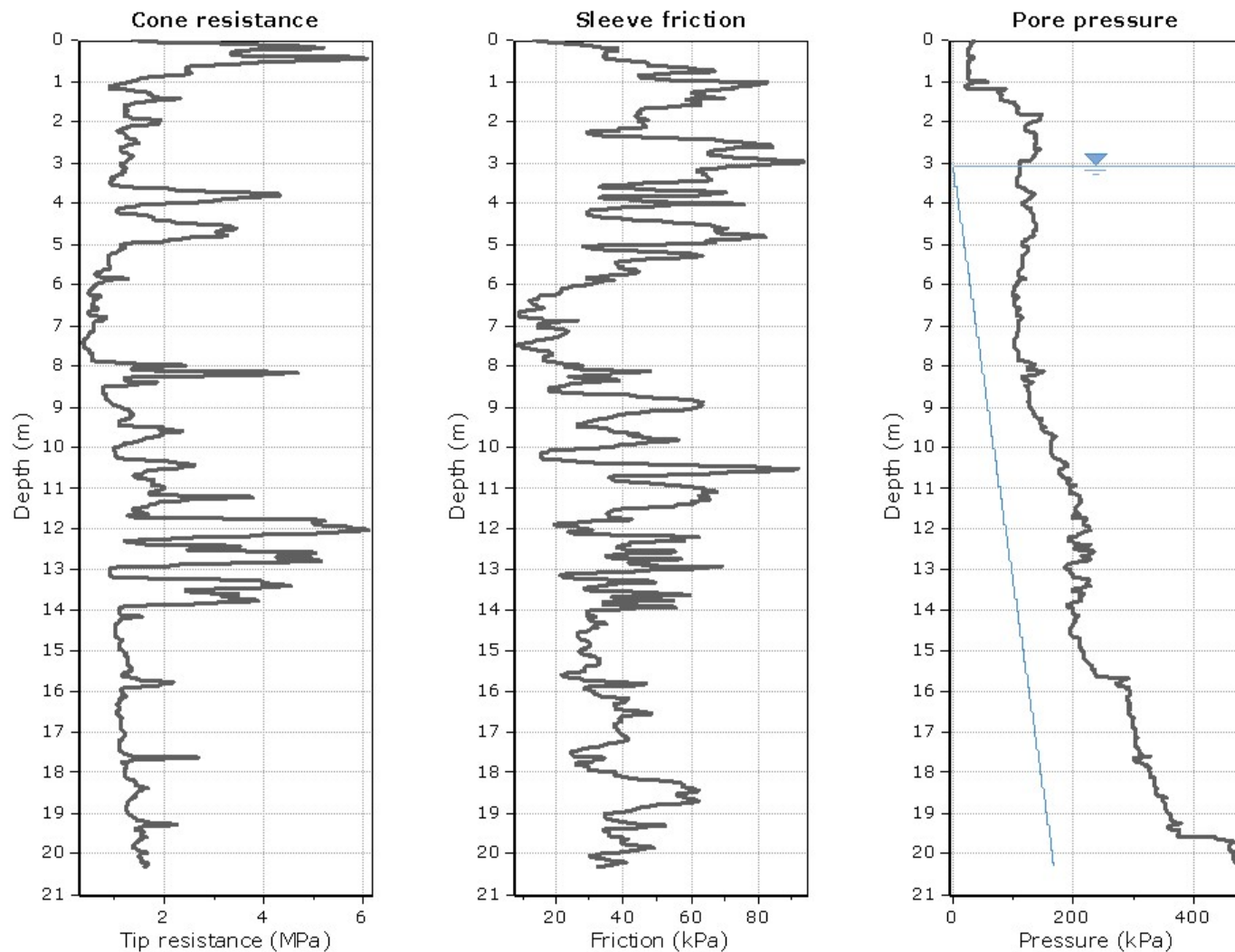
- | | |
|--|---|
|  | Area in oggetto
F.A. $PGA/PGA_0 = 1,45$
F.A. $SI/SI_0 (0.1s < T_0 < 0.5s) = 1,60$
F.A. $SI/SI_0 (0.5s < T_0 < 1.0s) = 2,38$
F.A. $SI/SI_0 (1.0s < T_0 < 1.5s) = 2,11$ |
|  Tr1 | Indagine sismica (HVSR) |
|  M1 | Indagine sismica (MASW) |
|  CPTU1 | Prova penetrometrica statica
con piezocono |

.....

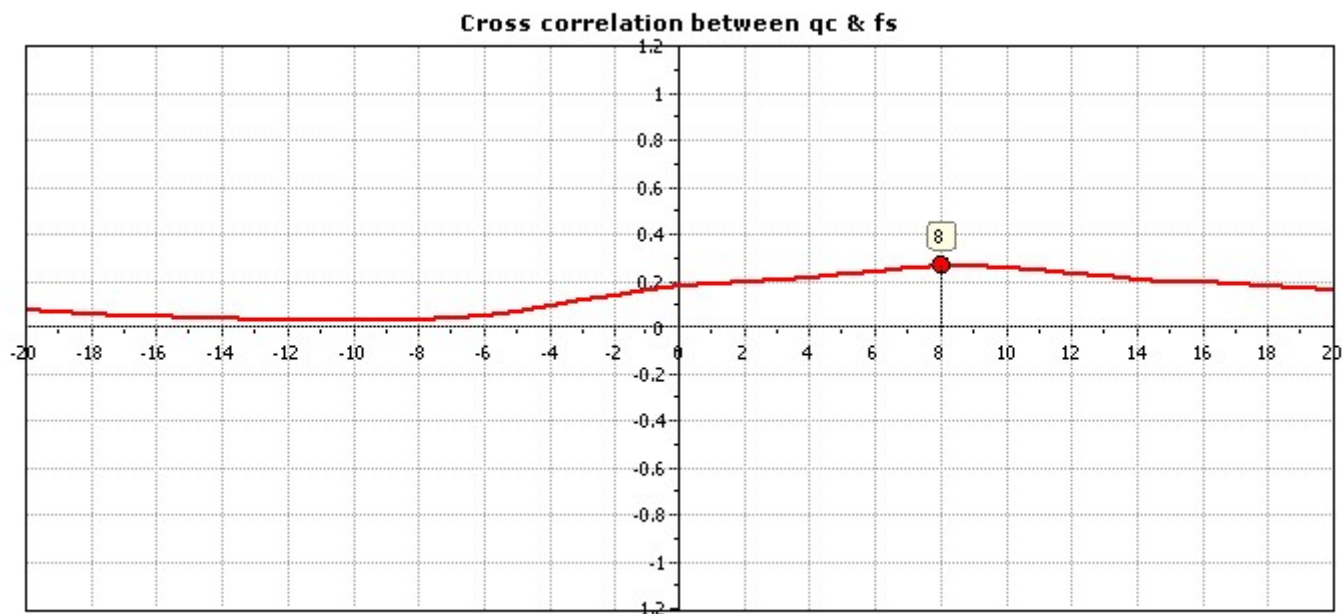
ALLEGATO A

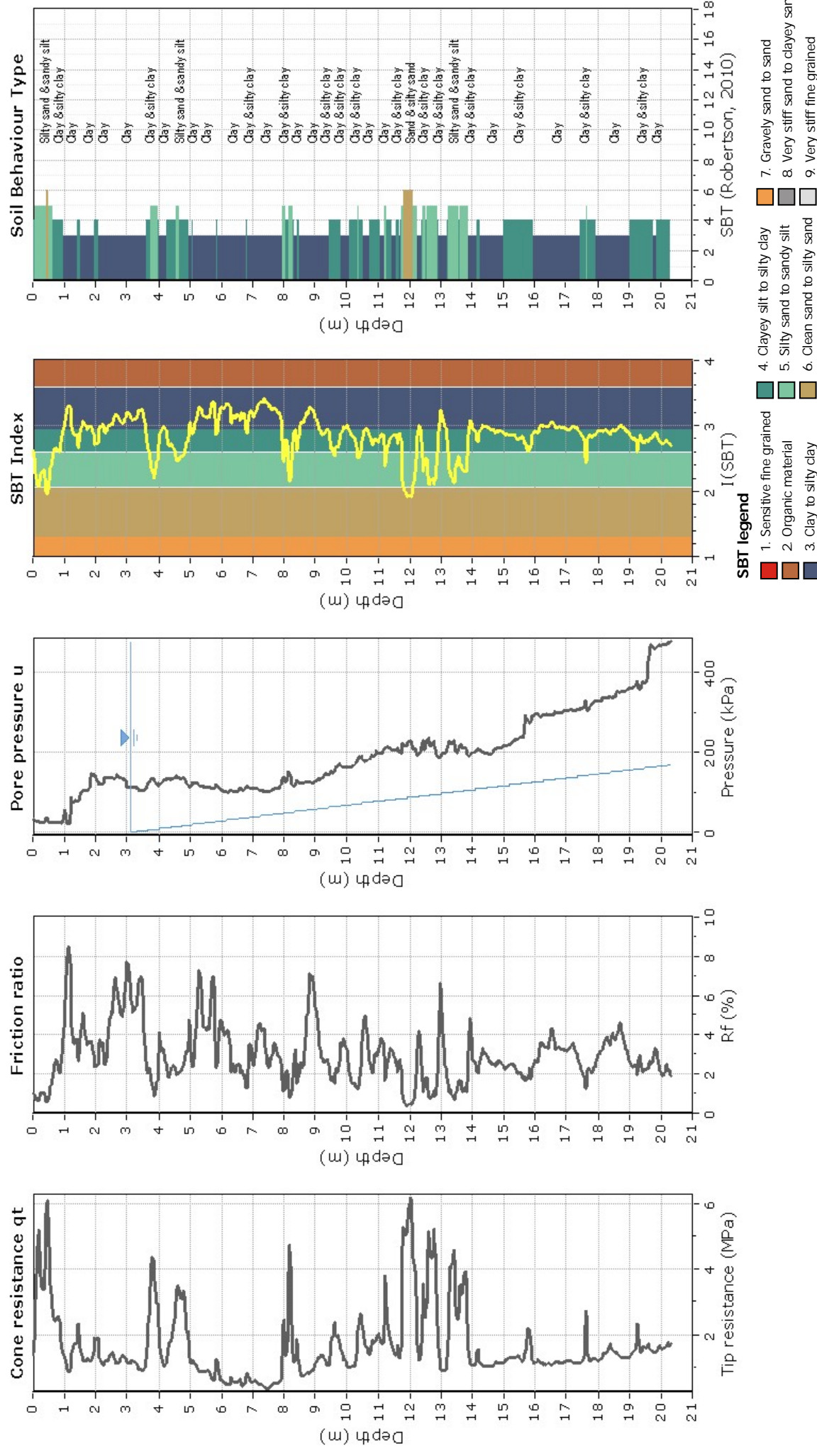
Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)

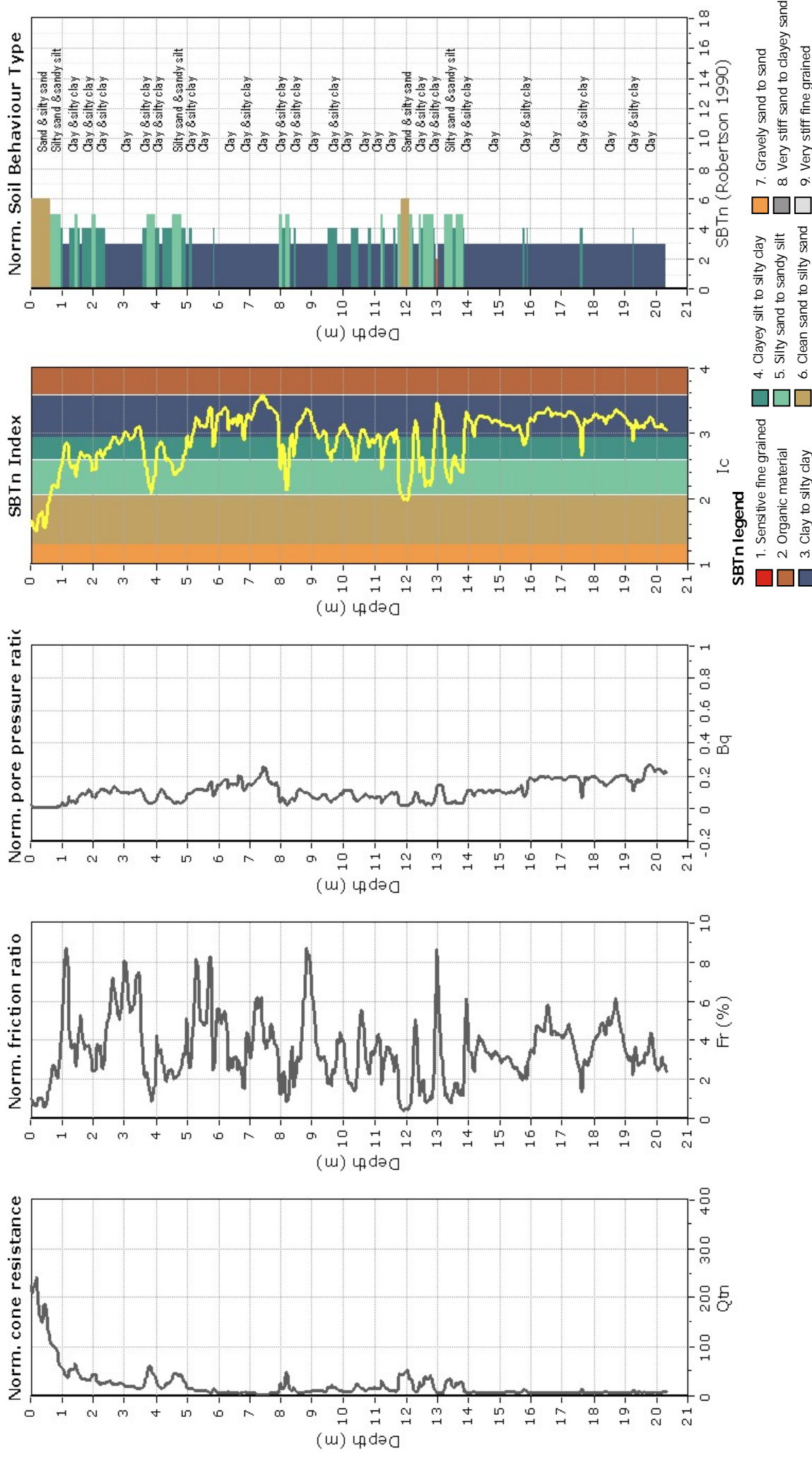
.....

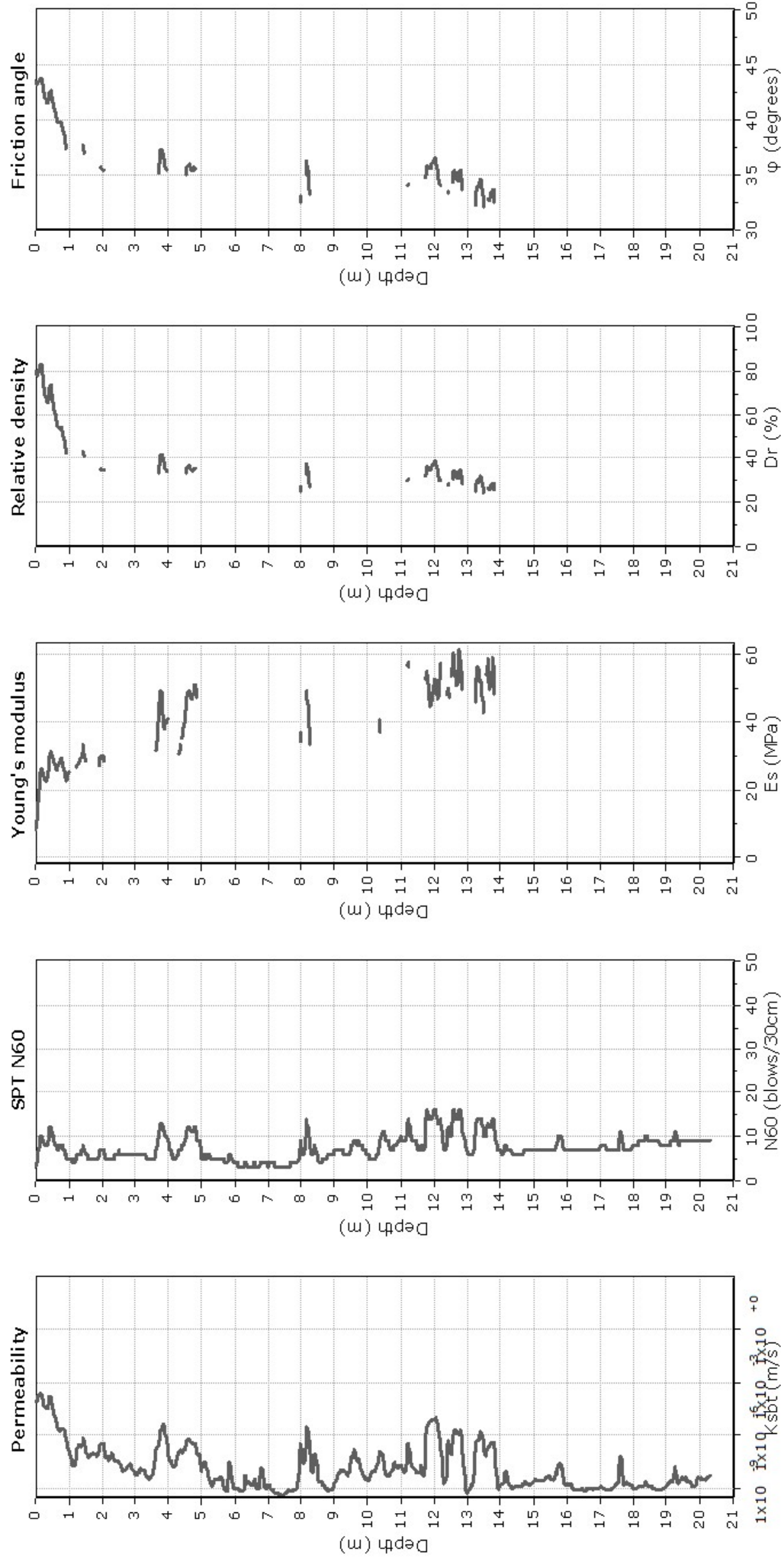


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw qc and fs values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



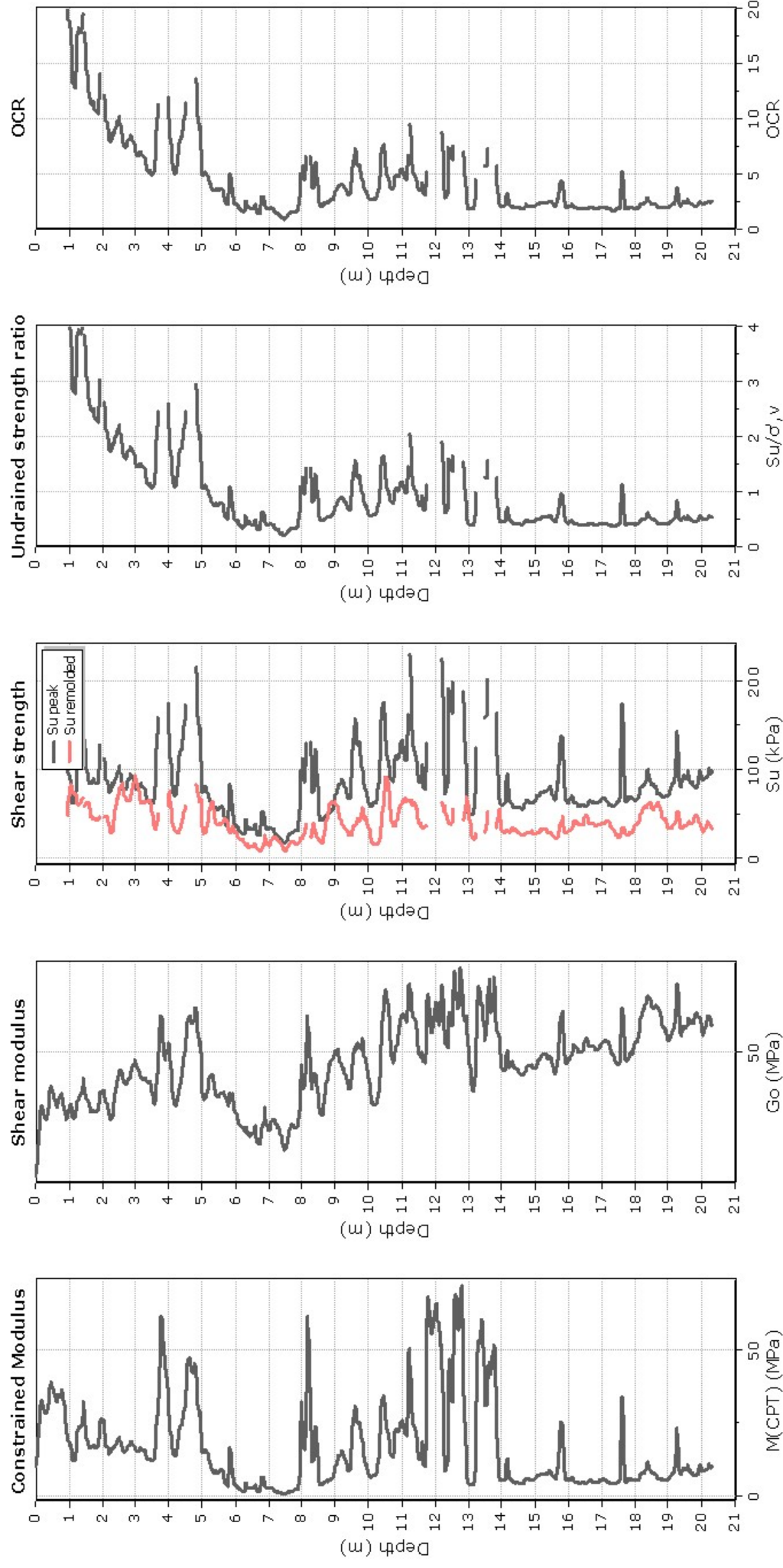






Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t
Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009) —●— User defined estimation data
Relative density constant, C_{or}: 350.0
Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable $\alpha/\rho/\eta$ using I_c and Q_{tr} (Robertson, 2009)

G_0 : Based on variable $\alpha/\rho/\eta$ using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

— User defined estimation data

— Flat Dilatometer Test data

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/m³) ::

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

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 (%) ::

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

:: State Parameter, ψ ::

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

:: Peak drained friction angle, ϕ (°) ::

$$\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$$

(applicable only to $SBT_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8$)

:: 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 $I_c \leq 2.20$
 $M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$

:: 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 $I_c > I_{c_cutoff}$)

:: Effective Stress Friction Angle, $\phi' < \phi_{sun} >$::

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

(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., 5th Edition, November 2012
- Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach, Can. Geotech. J. 46(11): 1337-1355 (2009)

.....

ALLEGATO B

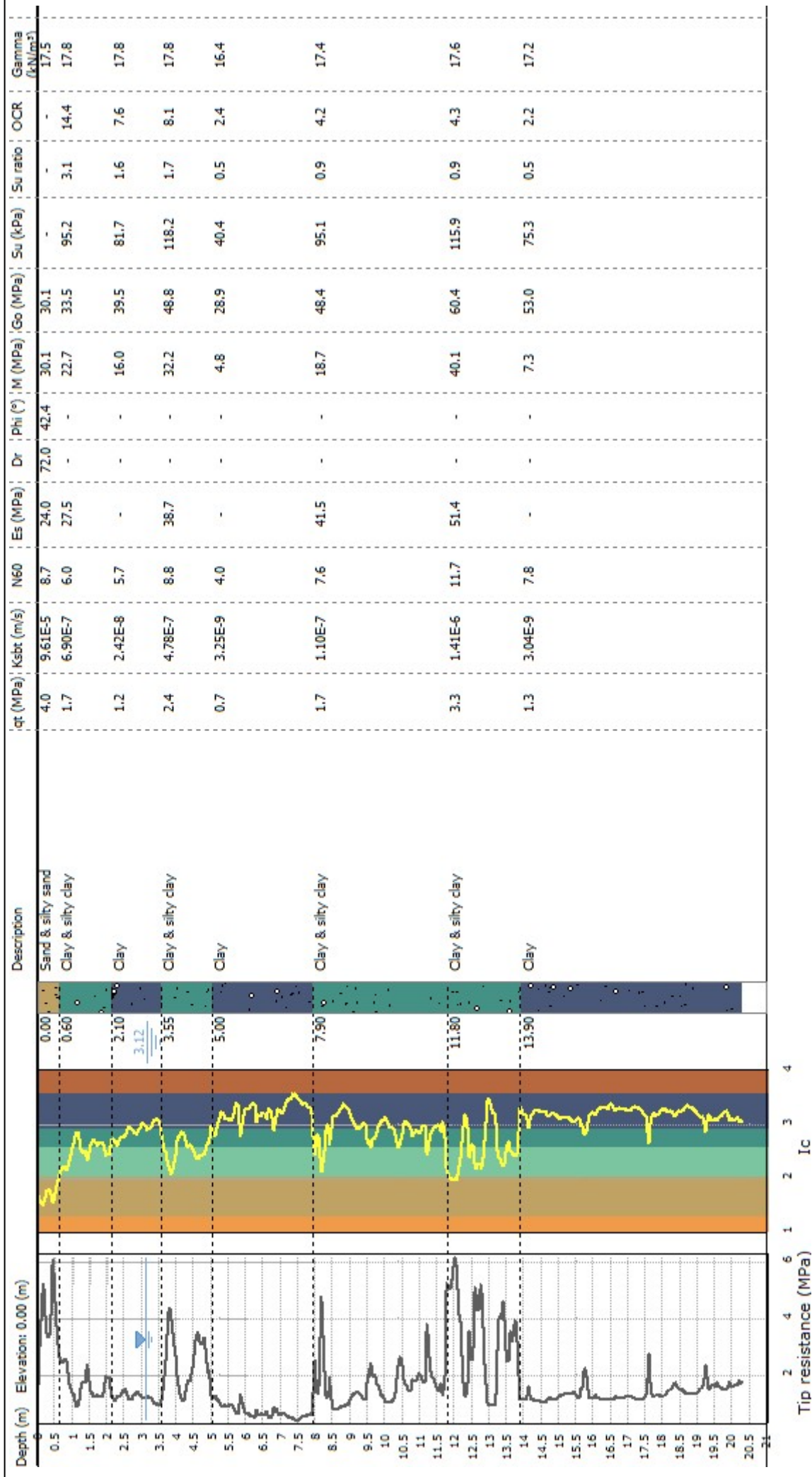
Elaborazioni geotecniche CPTU

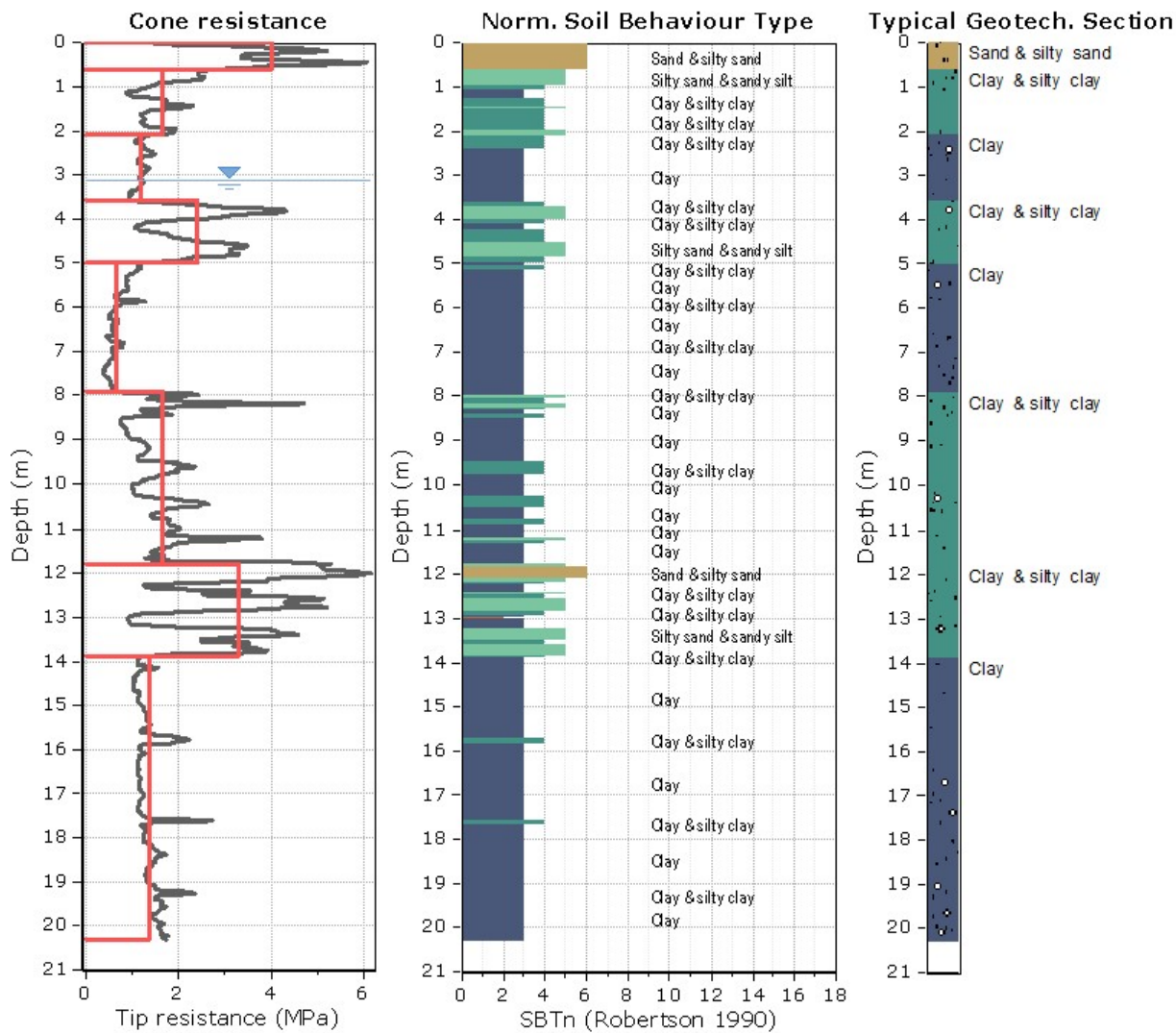
.....

Project: Studio geologico e sismico - Inserimento POC
Location: Bologna, Viale Europa - Lato Nord

CPT: CPTU1

Total depth: 20.30 m, Date: 15/06/2017





Tabular results

::: Layer No: 1 :::

Code: Unità A **Start depth:** 0.00 (m), **End depth:** 0.60 (m)

Description: Sand & silty sand

Basic results

Total cone resistance: 3.99 ± 1.10 MPa

Sleeve friction: 34.69 ± 8.27 kPa

SBT_n: 6

SBT_n description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: $9.61E-05 \pm 6.96E-05$ m/s

N₆₀: 8.70 ± 2.09 blows

E_s: 23.98 ± 5.61 MPa

Dr (%): 72.02 ± 7.15

(degrees): 42.40 ± 0.96 °

Unit weight: 17.54 ± 0.41 kN/m³

Constrained Mbd.: 30.05 ± 7.03 MPa

G_o: 30.05 ± 7.03 MPa

S_u: 0.00 ± 0.00 kPa

S_u ratio: 0.00 ± 0.00

O.C.R.: 0.00 ± 0.00

:: Layer No: 2 ::

Code: Unità B **Start depth:** 0.60 (m), **End depth:** 2.10 (m)**Description:** Clay & silty clay**Basic results**Total cone resistance: 1.66 ± 0.52 MPaSleeve friction: 57.07 ± 11.37 kPaSBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay**Estimation results**Permeability: $6.90E-07 \pm 1.25E-06$ m/sN60: 5.99 ± 1.18 blowsEs: 27.50 ± 2.23 MPaDr (%): 0.00 ± 0.00 (degrees): 0.00 ± 0.00 °Unit weight: 17.80 ± 0.23 kN/m³Constrained Mod.: 22.74 ± 6.90 MPaGo: 33.46 ± 2.95 MPaSu: 95.16 ± 18.90 kPaSu ratio: 3.12 ± 0.68 O.C.R.: 14.39 ± 3.13

:: Layer No: 3 ::

Code: Unità C **Start depth:** 2.10 (m), **End depth:** 3.55 (m)**Description:** Clay**Basic results**Total cone resistance: 1.19 ± 0.14 MPaSleeve friction: 63.31 ± 16.14 kPaSBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**Permeability: $2.42E-08 \pm 2.40E-08$ m/sN60: 5.67 ± 0.50 blowsEs: 0.00 ± 0.00 MPaDr (%): 0.00 ± 0.00 (degrees): 0.00 ± 0.00 °Unit weight: 17.78 ± 0.35 kN/m³Constrained Mod.: 16.02 ± 1.98 MPaGo: 39.53 ± 4.95 MPaSu: 81.73 ± 10.12 kPaSu ratio: 1.64 ± 0.32 O.C.R.: 7.57 ± 1.48

:: Layer No: 4 ::

Code: Unità D **Start depth:** 3.55 (m), **End depth:** 5.00 (m)**Description:** Clay & silty clay**Basic results**Total cone resistance: 2.38 ± 0.96 MPaSleeve friction: 53.07 ± 16.66 kPaSBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay**Estimation results**Permeability: $4.78E-07 \pm 8.55E-07$ m/sN60: 8.81 ± 2.51 blowsEs: 38.67 ± 6.32 MPaDr (%): 0.00 ± 0.00 (degrees): 0.00 ± 0.00 °Unit weight: 17.80 ± 0.50 kN/m³Constrained Mod.: 32.16 ± 13.23 MPaGo: 48.84 ± 9.88 MPaSu: 118.16 ± 37.83 kPaSu ratio: 1.74 ± 0.50 O.C.R.: 8.05 ± 2.29

:: Layer No: 5 ::

Code: Unità E **Start depth:** 5.00 (m), **End depth:** 7.90 (m)**Description:** Clay**Basic results**Total cone resistance: 0.68 ± 0.22 MPaSleeve friction: 24.87 ± 13.50 kPaSBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**Permeability: $3.25E-09 \pm 5.46E-09$ m/sN60: 4.01 ± 0.91 blowsEs: 0.00 ± 0.00 MPaDr (%): 0.00 ± 0.00 (degrees): 0.00 ± 0.00 °Unit weight: 16.36 ± 0.69 kN/m³Constrained Mod.: 4.78 ± 4.15 MPaGo: 28.94 ± 6.32 MPaSu: 40.36 ± 16.41 kPaSu ratio: 0.52 ± 0.24 O.C.R.: 2.38 ± 1.12

.: Layer No: 6 :.

Code: Unità F **Start depth:** 7.90 (m), **End depth:** 11.80 (m)**Description:** Clay & silty clay**Basic results**Total cone resistance: 1.66 ± 0.78 MPaSleeve friction: 42.17 ± 17.17 kPaSBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**Permeability: $1.10E-07 \pm 4.27E-07$ m/sN60: 7.61 ± 2.19 blowsEs: 41.50 ± 7.77 MPaDr (%): 0.00 ± 0.00 (degrees): 0.00 ± 0.00 °Unit weight: 17.35 ± 0.57 kN/m³Constrained Mbd.: 18.72 ± 12.26 MPaGo: 48.44 ± 10.30 MPaSu: 95.08 ± 34.18 kPaSu ratio: 0.91 ± 0.30 O.C.R.: 4.19 ± 1.40

.: Layer No: 7 :.

Code: Unità G **Start depth:** 11.80 (m), **End depth:** 13.90 (m)**Description:** Clay & silty clay**Basic results**Total cone resistance: 3.31 ± 1.52 MPaSleeve friction: 39.90 ± 11.89 kPaSBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay**Estimation results**Permeability: $1.41E-06 \pm 2.47E-06$ m/sN60: 11.67 ± 3.12 blowsEs: 51.39 ± 5.36 MPaDr (%): 0.00 ± 0.00 (degrees): 0.00 ± 0.00 °Unit weight: 17.58 ± 0.39 kN/m³Constrained Mbd.: 40.07 ± 20.94 MPaGo: 60.37 ± 8.66 MPaSu: 115.91 ± 57.58 kPaSu ratio: 0.92 ± 0.47 O.C.R.: 4.26 ± 2.17

.: Layer No: 8 :.

Code: Unità H **Start depth:** 13.90 (m), **End depth:** 20.30 (m)**Description:** Clay**Basic results**Total cone resistance: 1.35 ± 0.27 MPaSleeve friction: 37.16 ± 9.26 kPaSBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**Permeability: $3.04E-09 \pm 6.31E-09$ m/sN60: 7.78 ± 1.11 blowsEs: 0.00 ± 0.00 MPaDr (%): 0.00 ± 0.00 (degrees): 0.00 ± 0.00 °Unit weight: 17.22 ± 0.30 kN/m³Constrained Mbd.: 7.33 ± 4.01 MPaGo: 53.03 ± 6.77 MPaSu: 75.30 ± 17.96 kPaSu ratio: 0.47 ± 0.10 O.C.R.: 2.19 ± 0.48

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.60	9.61E-05 (± 6.96E-05)	8.7 (± 2.1)	24.0 (± 5.6)	72.0 (± 7.1)	42.4 (± 1.0)	30.1 (± 7.0)	30.1 (± 7.0)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	17.5 (± 0.4)
0.60												
0.60	1.50	6.90E-07 (± 1.25E-06)	6.0 (± 1.2)	27.5 (± 2.2)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	22.7 (± 6.9)	33.5 (± 3.0)	95.2 (± 18.9)	3.1 (± 0.7)	14.4 (± 3.1)	17.8 (± 0.2)
2.10												
2.10	1.45	2.42E-08 (± 2.40E-08)	5.7 (± 0.5)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	16.0 (± 2.0)	39.5 (± 5.0)	81.7 (± 10.1)	1.6 (± 0.3)	7.6 (± 1.5)	17.8 (± 0.4)
3.55												
3.55	1.45	4.78E-07 (± 8.55E-07)	8.8 (± 2.5)	38.7 (± 6.3)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	32.2 (± 13.2)	48.8 (± 9.9)	118.2 (± 37.8)	1.7 (± 0.5)	8.1 (± 2.3)	17.8 (± 0.5)
5.00												
5.00	2.90	3.25E-09 (± 5.46E-09)	4.0 (± 0.9)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	4.8 (± 4.1)	28.9 (± 6.3)	40.4 (± 16.4)	0.5 (± 0.2)	2.4 (± 1.1)	16.4 (± 0.7)
7.90												
7.90	3.90	1.10E-07 (± 4.27E-07)	7.6 (± 2.2)	41.5 (± 7.8)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	18.7 (± 12.3)	48.4 (± 10.3)	95.1 (± 34.2)	0.9 (± 0.3)	4.2 (± 1.4)	17.4 (± 0.6)
11.80												
11.80	2.10	1.41E-06 (± 2.47E-06)	11.7 (± 3.1)	51.4 (± 5.4)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	40.1 (± 20.9)	60.4 (± 8.7)	115.9 (± 57.6)	0.9 (± 0.5)	4.3 (± 2.2)	17.6 (± 0.4)
13.90												
13.90	6.40	3.04E-09 (± 6.31E-09)	7.8 (± 1.1)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	0.0 (± 0.0)	7.3 (± 4.0)	53.0 (± 6.8)	75.3 (± 18.0)	0.5 (± 0.1)	2.2 (± 0.5)	17.2 (± 0.3)
20.30												

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

.....

ALLEGATO C

Studio sismico

.....

Dott. Saul Beghelli

GEOLOGO

(Ordine dei Geologi R.E.R. n°1018)

P. IVA 00874901200

C.F. BGH SLA 75A02 A944D

COMUNE DI BOLOGNA

Analisi di risposta sismica locale in Viale Europa
nell'ambito della Manifestazione di interesse agli interventi
da comprendere nel POC carburanti

STUDIO SISMICO

Committente:

KUWAIT PETROLEUM ITALIA S.p.A.
Servizio costruzioni e manutenzioni

Redazione:

DOTT. BEGHELLI SAUL



Bologna, lì 19 giugno 2017

INDICE

1. PREMESSA	2
2. PROVA MASW	2
2.1 TEORIA ONDE DI SUPERFICIE	2
2.2 STRATIGRAFIA SISMICA	3
3. MISURA DI SISMICA PASSIVA CON TROMOGRAFO DIGITALE	4
3.1 SISMICA TROMOGRAFICA	4
3.2 TECNICA HVSR.....	4
3.3 STRATIGRAFIA SISMICA	4
4. CARATTERISTICHE STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	5
5. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI DA PROVA MASW	6
6. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI DA SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA.....	8
7. INTERPRETAZIONE PROVA MASW	10
8. INTERPRETAZIONE COMBINATA DELLE MISURE SISMICHE	11
9. MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO	12
9.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	14
9.1.1 Funzione di trasferimento.....	14
9.1.2 Spettro di risposta del sito.....	15
9.2 FATTORI DI AMPLIFICAZIONE	17

1. PREMESSA

Il presente studio ha come obiettivo la valutazione della risposta sismica di sito, attraverso una modellazione numerica della propagazione del moto sismico, finalizzata alla microzonazione sismica dell'area, seguendo un terzo livello di approfondimento. A tale scopo sono state realizzate un'analisi del microtremore sismico ambientale con tecnica passiva a stazione singola (Tr1) e una prova MASW (M1), mediante un tromografo digitale portatile TROMINO ENGY con cavo trigger. Le indagini avevano la finalità di caratterizzare il comparto dal punto di vista sismo-stratigrafico e di ricostruire il profilo di velocità delle onde S.

2. PROVA MASW

L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è un'affidabile ed accreditata metodologia sismica che consente di determinare il profilo di velocità delle onde di taglio S nel sottosuolo. Tale metodo consiste nell'analisi delle onde di superficie Rayleigh, registrate da una serie di geofoni posizionati a formare uno stendimento. Le usuali e consolidate tecniche di elaborazione delle onde sismiche utilizzano unicamente i tempi di primo arrivo delle onde sismiche di volume indagate (P e S), considerando come "disturbo" la restante parte del segnale caratterizzato dalla presenza delle onde di superficie (Rayleigh e Love). Nuovi studi hanno dimostrato la possibilità di elaborare un modello matematico dall'analisi ed interpretazione di tale "disturbo".

Inoltre, a differenza di tutte le altre tecniche di indagine sismica, i metodi basati sull'analisi delle onde di superficie di Rayleigh non risultano limitati dalle inversioni di velocità e, essendo la loro propagazione funzione innanzitutto delle onde S e solo in parte legata alla V_p e alla densità del mezzo, risultano un ottimo strumento per la caratterizzazione sismica del sito tramite la ricostruzione del profilo di V_s , come previsto dalla normativa vigente (D.M. 14 gennaio 2008).

2.1 TEORIA ONDE DI SUPERFICIE

Le onde di Rayleigh sono onde polarizzate su di un piano verticale (Fig. 1) generate in corrispondenza della superficie libera del mezzo dall'interazione delle onde di volume P e S. Il movimento delle particelle mobilitate da tali onde è di tipo ellittico con ampiezza dello spostamento che decresce con la distanza dalla superficie libera.

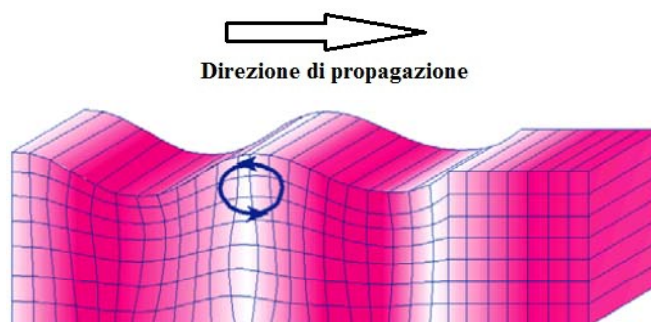


Fig. 1: Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh, caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento retrogrado delle particelle rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

Quando si applica una sollecitazione sismica in aria libera più del 65% dell'energia sismica prodotta è distribuita alle onde di Rayleigh, mentre per le onde P e S corrisponde rispettivamente al 7% e al 26%.

In un mezzo stratificato le onde di superficie sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diversa lunghezza d'onda di propagano con diverse velocità di fase (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. And Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. Le onde superficiali di Rayleigh, quando si propagano in un mezzo omogeneo, non presentano dispersione e la loro velocità è uguale a $0.92V_S$. In un mezzo disomogeneo, quale la Terra, la loro velocità varia in funzione della lunghezza d'onda tra i limiti 0 e $0.92 V_S$ (Fig. 2). La teoria della propagazione delle onde superficiali è ben conosciuta ed è descritta dettagliatamente da Ewing et al. (1957).

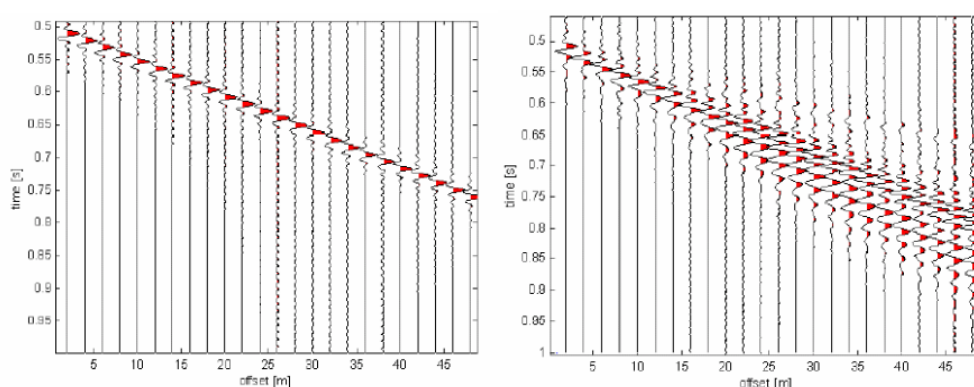


Fig. 2: Segnali sismici che evidenziano (in rosso) le onde di Rayleigh in un mezzo non stratificato (a sinistra) e in un mezzo stratificato (a destra). Risulta evidente il fenomeno della dispersione di tali onde sismiche.

Tramite l'analisi e l'elaborazione numerica del segnale è possibile costruire la curva di dispersione, ovvero la variazione della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza, dalla quale è possibile determinare il profilo di velocità delle onde S tramite il processo di inversione.

2.2 STRATIGRAFIA SISMICA

La tecnica MASW può essere applicata in campo geologico per fornire una prospezione del sottosuolo.

La definizione di un modello che consenta di descrivere il profilo sismico del sito, prevede la costruzione di una curva sintetica di dispersione che riesca a riprodurre la curva sperimentale.

Sono però presenti alcune limitazioni dovute a:

- dimensioni dello stendimento;
- tipo di energizzazione;
- limiti di conoscenze del mezzo geologico;
- limitazioni intrinseche della misura.

È fondamentale, ai fini di una corretta interpretazione, la determinazione della profondità di indagine massima raggiunta dalla misura. Per fare ciò si individua la frequenza minima che la curva di dispersione ha raggiunto e si applica la formula elaborata da Stokoe et al. (1994):

$$h_{\max} \approx 0,5\lambda_{\max}$$

dove:

- h_{\max} indica la massima profondità di indagine;
- λ_{\max} indica la massima lunghezza d'onda registrata (ricordando che $\lambda=v/f$ con v che corrisponde alla velocità e f è la frequenza dell'onda).

3. MISURA DI SISMICA PASSIVA CON TROMOGRAFO DIGITALE

3.1 SISMICA TROMOGRAFICA

La sismica tromografica è una tecnica passiva che studia le onde a bassa frequenza e di bassa entità del terreno (microtremori) tramite misure puntuali sul suolo.

Il rumore sismico ambientale è generato da:

- fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento);
- attività dinamica terrestre;
- attività antropica.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione ed elaborazione si dicono passivi in quanto le vibrazioni non risultano quindi localizzate e fornite ad hoc, come per le tecniche di sismica attiva.

Le onde sismiche, durante il loro tragitto dalla sorgente al sito di misura, subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di "guida d'onda", attenuazioni che dipendono dalla natura dei terreni attraversati. Questo significa che, mentre sono perse tutte le informazioni che riguardano la sorgente, l'onda conserva le informazioni relative alla struttura del terreno nelle vicinanze del punto di misura. Attraverso tecniche opportune è possibile recuperare i dati contenuti nel rumore sismico ambientale e ricostruire un modello puntuale del terreno.

3.2 TECNICA HVSR

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spazial Ratio), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970) e poi da Nakamura (1989), è quella maggiormente utilizzata. Essa consiste nello studio dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale, per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. È ormai ampiamente riconosciuto in letteratura che l'HVSR è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli. Inoltre si riconosce che le singole componenti del rumore ambientale possono registrare ampie variazioni in funzione dei disturbi naturali e antropici, mentre il rapporto delle componenti orizzontali con la componente verticale risulta stabile, conservando il picco della frequenza di risonanza fondamentale.

3.3 STRATIGRAFIA SISMICA

La tecnica HVSR può essere applicata in campo geologico per fornire una prospezione geologica del sottosuolo.

In un modello ideale di terreno costituito da due strati (1 e 2) con diversa densità (ρ_1 e ρ_2) e diverse velocità delle onde S (V_{s1} e V_{s2}) è possibile mettere in relazione la frequenza di risonanza dello strato superficiale con il suo

spessore e con la velocità delle onde S al suo interno. Tale relazione è espressa in maniera semplificata dalla seguente formula:

$$f_r = V_{s1}/4h$$

dove:

- f_r è la frequenza di risonanza dello strato 1;
- V_{s1} è la velocità delle onde S nello strato 1;
- h è lo spessore dello strato 1;

Questo metodo, nella sua forma estesa e completa, viene utilizzato per la ricostruzione di modelli multistrato complessi, in grado di fornire parametri fisici del terreno.

Come è possibile notare, all'interno dell'equazione sono presenti tre incognite. Dalla misura tomografica si ottiene unicamente il valore della frequenza di risonanza degli strati (f_r), per cui l'equazione risulta indeterminata. È necessario fornire un valore di riferimento (V_{s1} o h), detto "vincolo", che ne consenta la soluzione. Tale valore può giungere da altre indagini o da bibliografia.

4. CARATTERISTICHE STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Per le indagini è stato utilizzato un tomografo digitale portatile TROMINO, prodotto da Micromed S.p.A., nella versione Engineering, al quale è stato collegato un cavo trigger della lunghezza di 50 m, unito ad un geofono con puntale, con frequenza propria di 4,5 Hz.

Di seguito sono riportate le principali caratteristiche tecniche dello strumento, secondo le indicazioni fornite dalla ditta costruttrice.

SPECIFICHE TECNICHE	
Costruttore	Micromed S.P.A.
Apparato	TROMINO® sistema ultraportatile di acquisizione del rumore sismico
Classificazione	CISPR 11 - EN 55011; Gruppo1 ; Classe B.
Conformità agli standard	EN 55011; IEC 61000-4-2; EC 61000-4-4; , IEC 61000-4-3
Alimentazione	2 batterie alcaline x 1.5 VDC AA
Voltaggio interno	+3.3 V, +3.6 V per la sezione analogica
Consumi	75 mW (GPS disattivato), 450 mW (GPS attivo)
Durata delle batterie	80 h di misura continua con GPS disattivato
Numero di canali	3+1 analogici
Amplificatori	tutti canali con input differenziali
Rumore	< 0.5 μ V r.m.s. @128 Hz sampling
Impedenza dell'input	10 ⁶ Ohm
Range di frequenze	DC - 360 Hz

Frequenza di campionamento	16384 Hz per canale
Frequenze di sovracampionamento	32x, 64x, 128x
Conversione A/D	equivalente a 24 bit
Massimo input analogico	51.2 mV (781 nV/digit)
Display grafico	grafico, 128 x 64 pixel, retroilluminato
Tastiera	4 tasti a membrana
Orologio	interno, permanente con datario e allarme, può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
GPS	12 canali con time-marker (precisione 1 μ s), può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
Livella	a bolla d'aria, elevata precisione orizzontale, sensibilità 5' d'arco (0.083°)
Conessioni	porta USB, tipo B
Registrazione dati	memoria interna, standard 512 Mb, opzionale fino a 2 Gb
Dimensione e peso	10 x 14 x 7.7 (altezza) cm 1.1 kg contenitore di alluminio
Accoppiamento col terreno	su punte e cuscinetto reologico
Condizioni ambientali per l'uso	temperatura - 10 / +70°C umidità 0-90% senza condensa
Impermeabilità	indice di protezione IP = 65 (resistente alla polvere, resistente agli spruzzi)
Sensori	3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione autobloccaggio quando non in acquisizione
	1 geofono verticale con puntale con frequenza propria di 4,5 Hz
Cavo trigger	Cavo di lunghezza 50 metri, con avvolgitore

Tabella 1: Principali specifiche tecniche dello strumento di acquisizione.

Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati secondo le tre componenti spaziali (N-S, E-W e Up-Down), che consentono di acquisizione digitale in alta definizione delle vibrazioni del terreno (ampiezze d'onda inferiori a 10 μ m), nel campo delle frequenze 0 – 200 Hz. In seguito ad una registrazione di un determinato tempo t, tale segnale digitalizzato viene elaborato tramite un software dedicato, Grilla, il quale esegue un'elaborazione per ognuna delle componenti del moto e ne fornisce i grafici relativi.

5. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI DA PROVA MASW

L'abbinamento tra Tromino Engineering ed un geofono consente di effettuare stendimenti sismici di dimensioni massime pari a 50 m. La presenza di un unico geofono, detto starter in quanto registra i primi arrivi delle onde sismiche, impone il suo spostamento continuo secondo le posizioni dello schema prestabilito (Fig. 3). Lo stendimento aveva una lunghezza di 49 m con il primo geofono a distanza di 1,0 m dal Tromino mentre l'interdistanza tra le altre posizioni del geofono era di 3,0 metri; l'energizzazione, ottenuta tramite un colpo di mazza effettuato dall'operatore, è avvenuta a 3,0 m di distanza dallo starter lungo l'asse geofono-Tromino.

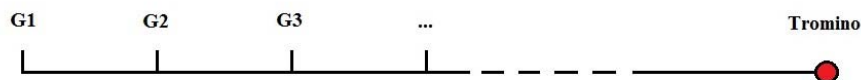


Fig. 3: Schema dello stendimento per la registrazione della prova MASW. G1, G2, G3, ... corrispondono alle posizioni nelle quali il geofono starter viene spostato ad ogni energizzazione del terreno. L'interdistanza tra le posizioni del geofono è di 3,0 metri.

Da tale stendimento viene elaborato un sismogramma definito "virtuale" in quanto non deriva dalla registrazione simultanea di più geofoni, ma i segnali di ogni energizzazione vengono composti in un unico sismogramma tramite software dedicati.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva dei principali parametri relativi all'analisi della misura.

M1	
Inizio registrazione	Data 15/06/17 Ore 11:04:47
Fine registrazione	Data 15/06/17 Ore 11:11:43
Lunghezza della traccia	6'48"
Frequenza di campionamento	1024 Hz
N° geofoni	17

Tabella 2: Descrizione tecnica della misura.

L'elaborazione del segnale registrato si compone dei seguenti passaggi:

1. picking dei primi arrivi sulla traccia di registrazione del geofono;
2. ricostruzione del sismogramma delle tracce registrate dal sismografo (Tromino) tramite software Grilla;
3. selezione per ogni traccia delle finestre temporali contenenti onde superficiali di Rayleigh;
4. calcolo della curva di dispersione sperimentale tramite software dedicato.

La curva di dispersione fornisce con una scala cromatica l'intensità della risonanza delle onde di Rayleigh alle varie frequenze (asse delle ascisse) e la relativa velocità delle onde (asse delle ordinate). A questo punto è possibile procedere con l'interpretazione della misura.

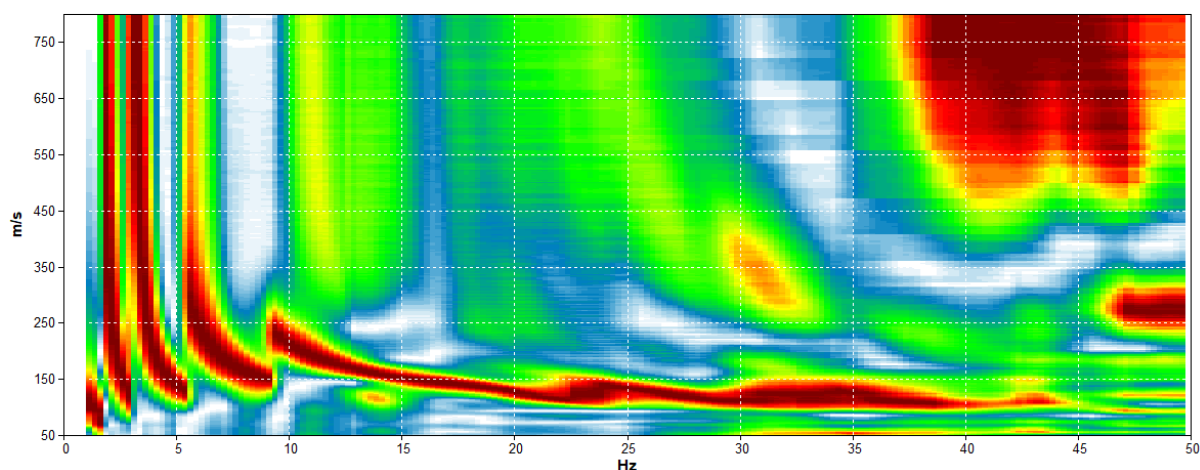


Fig. 4: Curva di dispersione del sito.

Il modo fondamentale del sito è visibile lungo tutto lo spettro, anche se con qualche interferenza dovuta ai modi superiori di vibrare visibili in particolare negli intervalli 28-22 Hz e a 14-9 Hz.

6. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI DA SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA

È stata effettuata una misura di sismica passiva ubicata in modo tale da risultare rappresentativa per l'area indagata. Lo strumento è stato posizionato al di sopra di una superficie resa idonea dall'operatore, al fine di permettere un valido accoppiamento strumento / terreno. La registrazione in particolare è stata effettuata in prossimità della prova CPTU1. Nella tabella seguente viene riportata la descrizione tecnica della misura effettuata.

Tr1	
Inizio registrazione	Data 15/06/17 Ore 10:37:48
Fine registrazione	Data 15/06/17 Ore 10:57:48
Lunghezza della traccia	20'00"
Frequenza di campionamento	128 Hz
Dimensione della finestra di suddivisione del tracciato	12 sec
Percentuale di traccia analizzata	73%
Lisciamento	10%

Tabella 3: Descrizione tecnica della misura.

La misura è stata elaborata in studio mediante il software dedicato Grilla fornito dalla Micromed.

L'elaborazione del segnale ha previsto i seguenti passaggi:

1. analisi delle tre componenti del segnale con suddivisione in finestre opportunamente dimensionate (Windows Size);
2. depurazione del segnale da rumori anomali (Detrend);
3. calcolo dello spettro di ampiezza per ciascuna finestra;

4. lisciamento dello spettro di ogni finestra (Smoothing);
5. Calcolo della trasformata di Fourier (FFT) per ciascuna finestra
6. calcolo del rapporto spettrale HVSR per ogni frequenza e per ogni finestra.

Osservando gli spettri delle singole componenti è possibile notare, dall'andamento uniforme delle tre linee (fig. 5), come la misura pur essendo stata eseguita correttamente, effettuando un buon accoppiamento tra strumento e terreno, mostra un elevato disturbo, identificabile dallo scostamento tra le componenti nel tratto a basse frequenze.

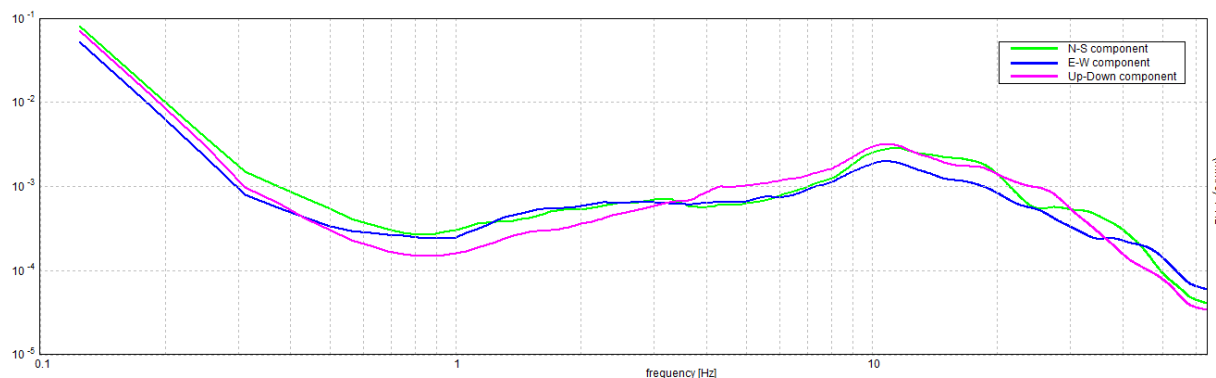


Fig. 5: Grafico delle componenti ortogonali della misura Tr1.

Per procedere con l'interpretazione della misura tomografica eseguita, è stata effettuata una scelta delle finestre da utilizzare per l'analisi, in quanto alcune di esse presentavano disturbi che interferivano e rendevano poco chiari i grafici risultanti. Le finestre escluse dall'analisi sono visibili come bande nere nel grafico "H/V TIME HISTORY".

Il grafico "DIRECTIONAL H/V" mostra con una scala cromatica l'intensità dei picchi alle diverse frequenze (ordinate), fornendo una distribuzione spaziale di 180° nell'intorno del punto di misura partendo dal nord (0°).

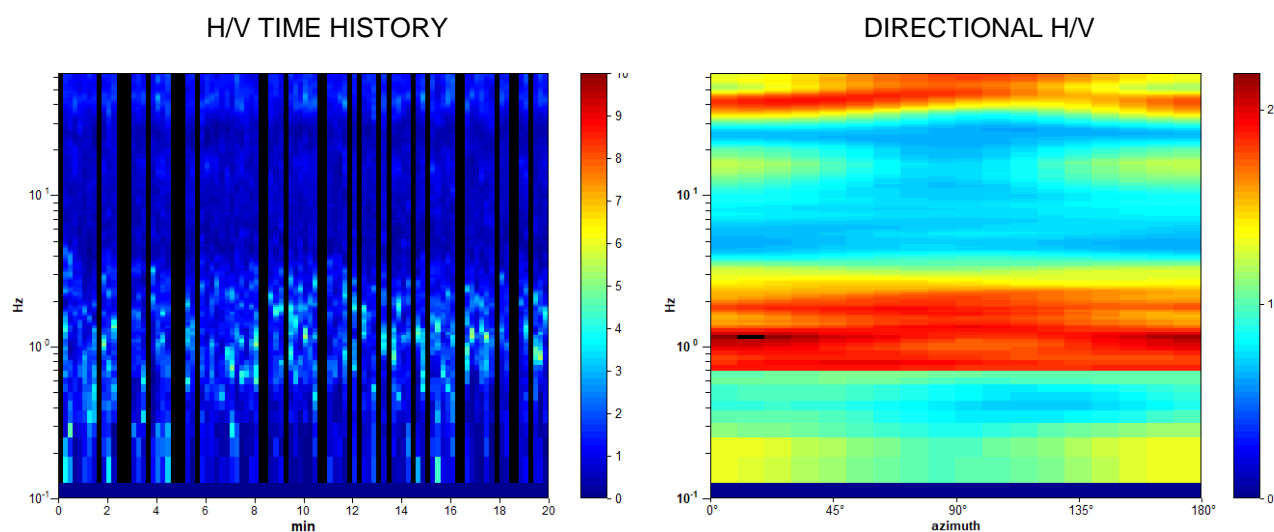


Fig. 6: Grafico della serie temporale H/V (sinistra) e grafico della direzionalità H/V (destra) relativi alla misura Tr1.

Di seguito si riporta il grafico HVSR derivante dall'elaborazione della misura.

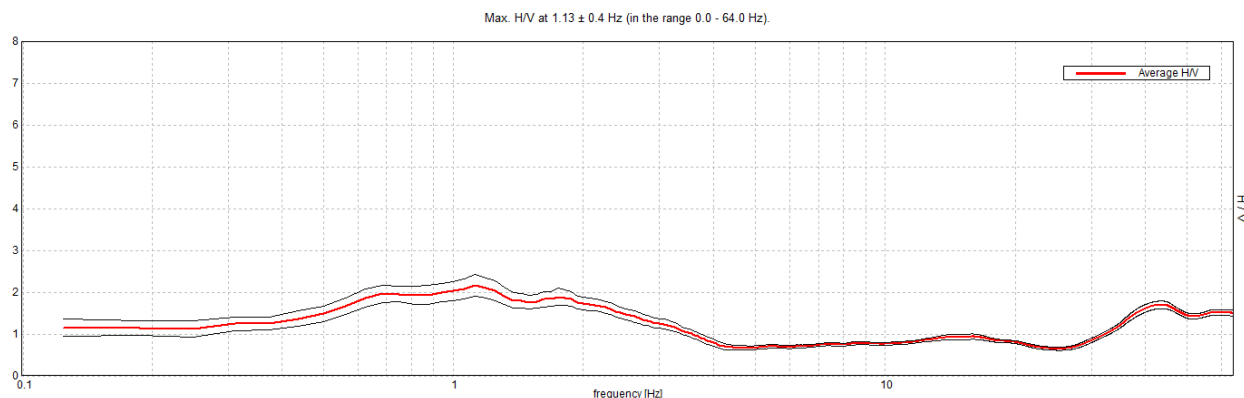


Fig. 7: Diagramma HVSR relativo alla misura Tr1.

7. INTERPRETAZIONE PROVA MASW

Il grafico risultante dalla misura consente lo studio e l'elaborazione dei dati relativi al primo modo di vibrare del terreno, individuato come la curva definita dai colori caldi con velocità e frequenza minore (Fig. 4 e 8). La curva di dispersione risulta visibile in tutto lo spettro con alcune interferenze dovute ai modi superiori.

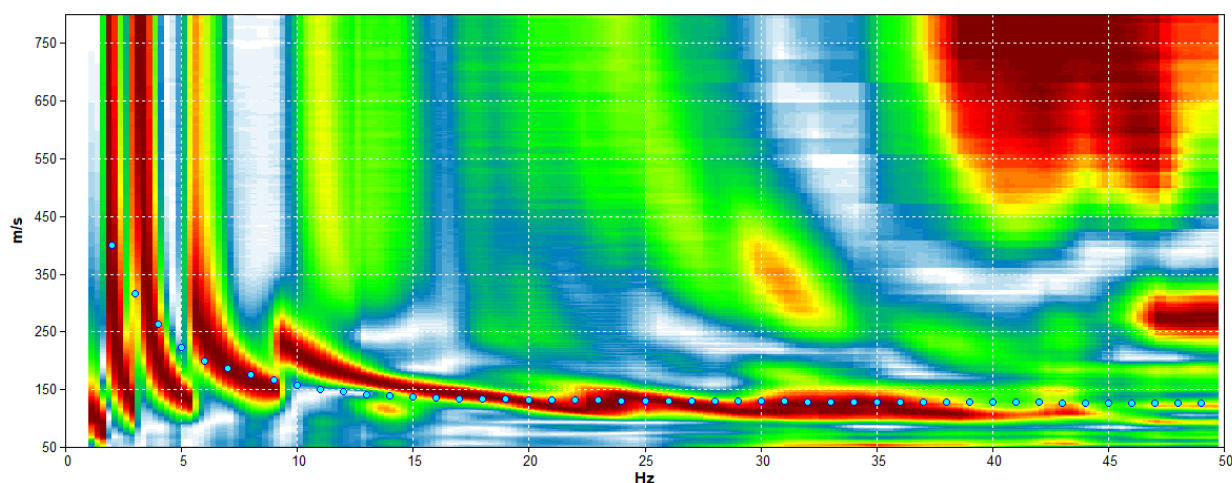


Fig. 8: Curva di dispersione del sito e fit per la costruzione del modello sintetico.

Dal grafico è possibile ricostruire la successione sismo-stratigrafica, individuando i cambi di pendenza della curva di dispersione del modo fondamentale.

In particolare si osserva come le Vs iniziali risultino inferiori a 150 m/s. A partire da circa 40 Hz (inizio della curva significativa), si nota come il tratto interessato mostri Vs comprese tra 135 e 160 m/s fino a circa 8 Hz, escludendo un'interferenza del segnale tra 9 e 14 Hz. Tale intervallo è stato interpretato come un sismostrato che si estende fino a -6,4 m con Vs di 145 m/s. A frequenze minori la curva risulta disturbata da una forte interferenza, ma si intuisce come le Vs aumentino ulteriormente.

Per una corretta interpretazione della misura si è proceduto in maniera combinata con la prova HVSR.

8. INTERPRETAZIONE COMBINATA DELLE MISURE SISMICHE

Per ovviare alla limitata profondità di indagine della prova MASW e ai disturbi presenti nella misura si è proceduto con l'interpretazione della registrazione tomografica effettuata nello stesso punto, utilizzando come vincolo la ricostruzione stratigrafica derivante dalle prove penetrometriche eseguite nel sito e dalle indagini geognostiche ricavate dal database regionale.

Ad alte frequenze della curva HVSR si osserva un picco interpretato nel modello come una superficie di discontinuità a -0,4 m. Procedendo verso le basse frequenze è stato considerato lo strato identificato dalla curva MASW, che tuttavia non produce un picco molto pronunciato a circa 6 Hz. L'aumento della Vs della curva MASW è stato abbinato al picco di risonanza riconosciuto nel grafico HVSR a partire da 3,2 Hz, spiegato mediante un passaggio sismostratigrafico a -21,4 m. Tale picco risulta ampio e il massimo di H/V è presente a 1,1, con valore di H/V pari a 2,1. L'interpretazione di tale marker nel modello è avvenuta tramite l'inserimento di ulteriori 3 superfici di risonanza poste rispettivamente a -58,4 m, a -133,4 m e a -273,4 m dal piano campagna. Al di sotto di tale frequenza non sono presenti altri effetti di risonanza ritenuti significativi.

L'elaborazione della misura, mediante ricostruzione della curva sintetica H/V, è riuscita a riprodurre con buona approssimazione la curva HVSR registrata, fornendo il profilo sismico del sito.

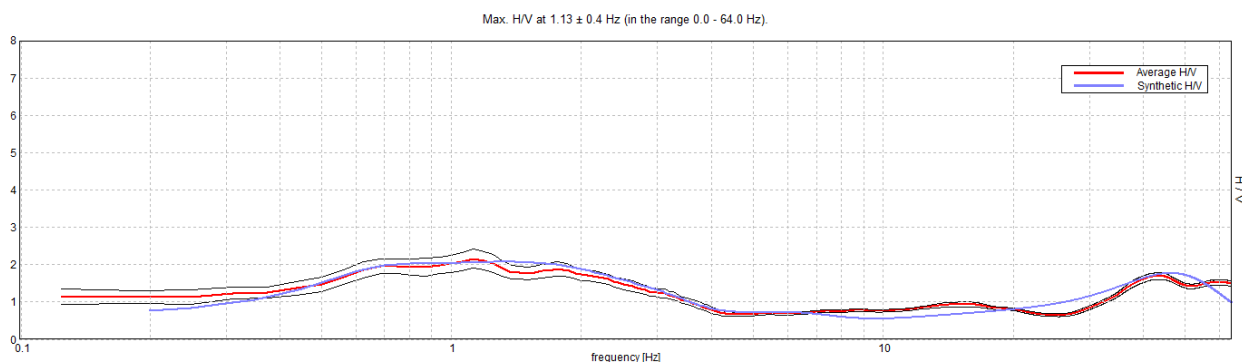
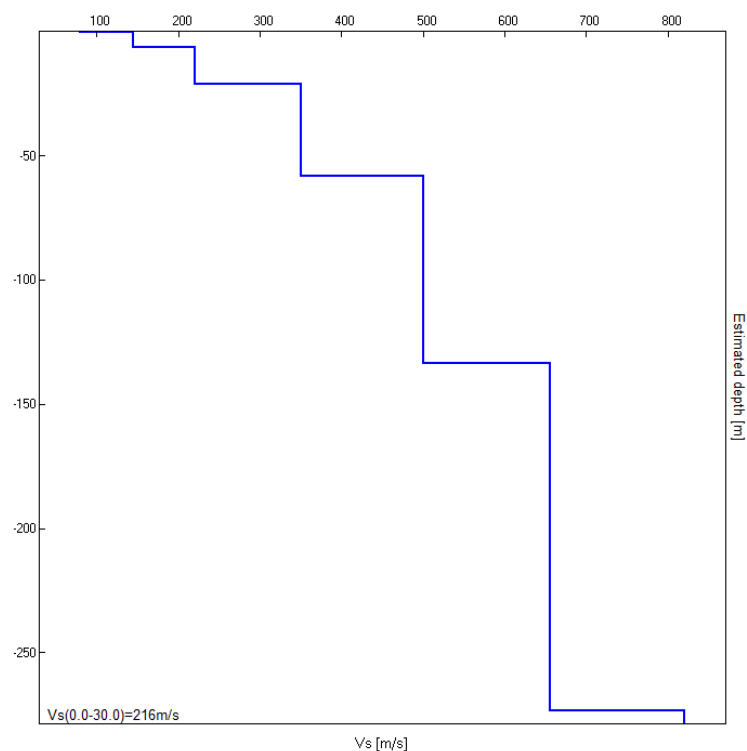


Fig. 9: Elaborazione della curva sintetica (blu) sulla curva HVSR (rosso) registrata.

Nella tabella e nel grafico seguenti vengono evidenziati gli strati sismici con le relative velocità delle onde S.

Strati sismici	Profondità [m]	Vs [m/s]
1	0.00 - 0.40	80
2	0.40 - 6.40	145
3	6.40 - 21.40	220
4	21.40 - 58.40	350
5	58.40 - 133.40	500
6	133.40 - 273.40	655
7	273.40 - inf.	820



9. MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO

Al fine di ottemperare a quanto richiesto dal Comune di Bologna per l'inserimento nel POC dell'area in esame, lo studio sismico ha previsto un terzo livello di approfondimento, eseguito attenendosi a quanto disposto dalla D.G.R. n. 2193 del 21/12/2015, approvata ad aggiornamento della D.A.L. n°112/2007.

L'analisi dei dati geognostici e geofisici a disposizione ha permesso di verificare come il comparto oggetto di studio sia caratterizzato da una situazione sismo-stratigrafica e da un comportamento sismico dei terreni che denota l'assenza di variazioni significative. Per questo motivo l'area è stata considerata dal punto di vista sismico omogenea e per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il profilo sismo-stratigrafico ottenuto dalle prove M1 e Tr1.

Lo studio è stato svolto utilizzando il software Strata che permette una modellazione numerica 1D della propagazione dell'onda sismica a partire da segnali simili di input. In particolare il software conduce un'analisi lineare equivalente di risposta del sito nel dominio delle frequenze, usando come input le sollecitazioni nel dominio del tempo (accelerogrammi).

La Regione Emilia Romagna per studi di risposta sismica locale, nell'ambito della microzonazione sismica con livello di approfondimento III, ha predisposto per ogni comune un set di tre accelerogrammi di riferimento. Tali accelerogrammi sono resi disponibili già scalati e definiti per uno spettro con vita nominale (V_n) pari a 50 anni e classe d'uso dell'opera II (con coefficiente d'uso del valore di 1,0).

Di seguito sono riportati i 3 accelerogrammi scalati di riferimento utilizzati per l'analisi numerica.

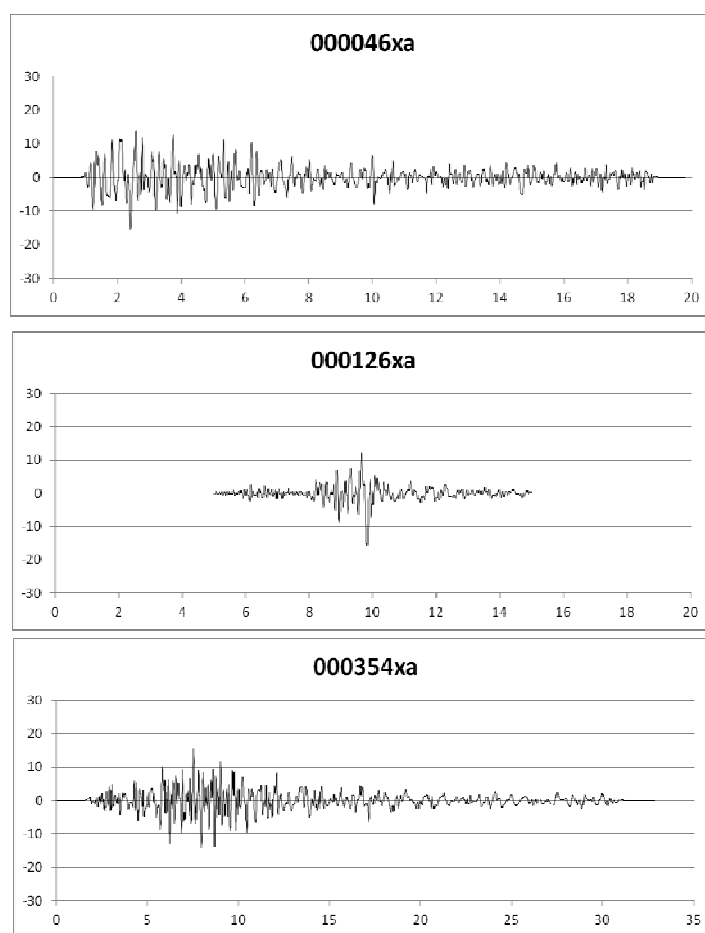


Fig. 10: Accelerogrammi scalati dei 3 sismi di riferimento.

Una volta definiti i segnali di input, già scalati al valore di a_g di riferimento per il sito (0,168 g), è stato inserito il modello fisico-meccanico e sismico del sottosuolo (1-D) fino alla profondità del bed-rock sismico. A tal fine, utilizzando i dati ottenuti dalle indagini compiute nel sito, è possibile definire nel programma le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali di riferimento per la ricostruzione del profilo del sito. In particolare sono associati a ciascuna litologia il

peso di volume del materiale e le curve di degrado (G/G_{max} in funzione dello sforzo di taglio [%]) e di smorzamento (Damping Ratio [%] in funzione dello sforzo di taglio [%]). I valori utilizzati per il sito derivano da apposite curve riportate in bibliografia (Idriss (1990) per argille e per sabbie, Rollins per le argille con ghiaia e argille limose). Al bedrock sismico (ultimo strato del profilo sismico) viene riferito un valore di smorzamento pari a 1,0%.

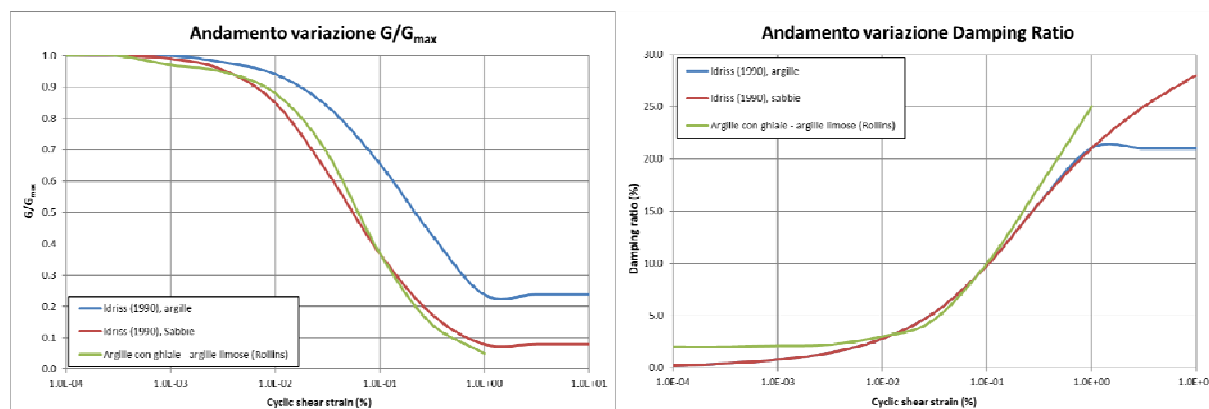


Fig. 11: Grafici delle curve di degrado e di smorzamento dei materiali presenti nel sito.

9.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE

I parametri che caratterizzano i materiali sono stati attribuiti agli strati definiti nel profilo sismico, così come ricavato dall'indagine geofisica. Di seguito viene riportato il modello di sottosuolo utilizzato per il sito.

Strati sismici	Profondità [m]	Vs [m/s]	Materiali	Peso di volume [kN/m ³]	Curva di degrado	Curva di smorzamento
1	0.00 - 0.40	80	Limi sabbiosi	18.00	Idriss (1990), sand	Idriss (1990), sand
2	0.40 - 6.40	145	Limi argillosi	18.50	Idriss (1990), clay	Idriss (1990), clay
3	6.40 - 21.40	220	Limi sabbiosi	18.00	Idriss (1990), sand	Idriss (1990), sand
4	21.40 - 58.40	350	Limi e argille	19.50	Idriss (1990), clay	Idriss (1990), clay
5	58.40 - 133.40	500	Alternanze di limi e sabbie	19.50	Idriss (1990), sand	Idriss (1990), sand
6	133.40 - 273.40	655	Quaternario marino	20.50	Rollins	Rollins
7	273.40 - inf.	820	Bedrock sismico	22.00	-	1,0%

Tabella 4: Modello sismo-stratigrafico del sito.

9.1.1 Funzione di trasferimento

Nella Figura 12 è riportata la funzione di trasferimento per ogni segnale ed il valore medio nel campo delle frequenze che corrisponde al rapporto tra lo spettro del moto sismico atteso in superficie e lo spettro della sollecitazione in corrispondenza del bedrock sismico.

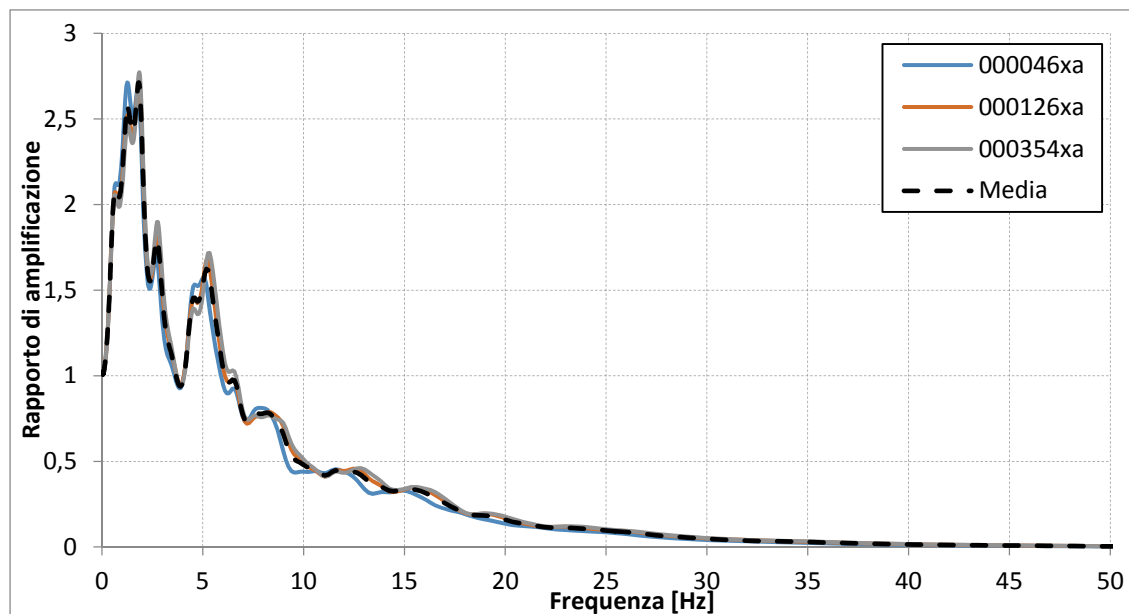


Fig. 12: Funzione di trasferimento (rapporto tra lo spettro del moto in superficie ed al bed-rock).

9.1.2 Spettro di risposta del sito

Nella figura 13 sono riportati gli spettri di risposta in accelerazione relativi ai 3 sismi, così come ottenuti dall'elaborazione numerica.

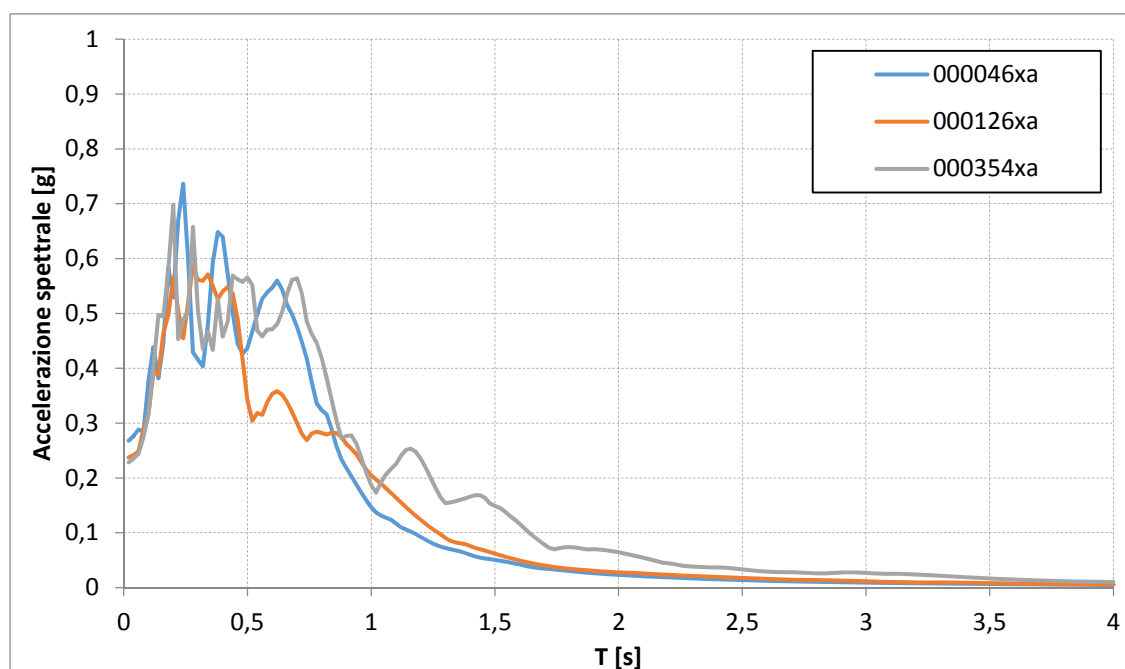


Fig. 13: Spettri di risposta calcolati a partire dai 3 sismi di riferimento.

Alla luce di quanto emerso dall'elaborazione numerica dei 3 sismi, si ritiene che la curva dei valori medi costituisca una buona rappresentazione della curva di risposta sismica locale attesa per il sito.

Nella Tabella 5 vengono riportate le coordinate numeriche dello spettro di risposta medio ottenuto.

T	Media	T	Media	T	Media	T	Media	T	Media
0.02	0.244123	0.82	0.323021	1.62	0.058982	2.42	0.021733	3.22	0.012197
0.04	0.25067	0.84	0.303579	1.64	0.055769	2.44	0.021352	3.24	0.012031
0.06	0.259578	0.86	0.280788	1.66	0.052918	2.46	0.020951	3.26	0.011871
0.08	0.282532	0.88	0.259403	1.68	0.050372	2.48	0.020543	3.28	0.01172
0.1	0.335512	0.9	0.250838	1.7	0.048015	2.5	0.020137	3.3	0.011579
0.12	0.410976	0.92	0.242461	1.72	0.045847	2.52	0.019731	3.32	0.011447
0.14	0.419379	0.94	0.228989	1.74	0.044384	2.54	0.01932	3.34	0.011317
0.16	0.467257	0.96	0.21134	1.76	0.043913	2.56	0.018901	3.36	0.01118
0.18	0.552244	0.98	0.193319	1.78	0.043326	2.58	0.018481	3.38	0.011029
0.2	0.593602	1	0.178025	1.8	0.04259	2.6	0.01808	3.4	0.010855
0.22	0.535512	1.02	0.167292	1.82	0.041743	2.62	0.017716	3.42	0.010656
0.24	0.546788	1.04	0.168677	1.84	0.040849	2.64	0.017399	3.44	0.010433
0.26	0.539389	1.06	0.168211	1.86	0.039896	2.66	0.017127	3.46	0.010195
0.28	0.549478	1.08	0.166732	1.88	0.039058	2.68	0.016887	3.48	0.009951
0.3	0.490438	1.1	0.1631	1.9	0.038432	2.7	0.016661	3.5	0.00971
0.32	0.461749	1.12	0.160339	1.92	0.037684	2.72	0.016432	3.52	0.00948
0.34	0.503376	1.14	0.157503	1.94	0.036862	2.74	0.016194	3.54	0.009265
0.36	0.521003	1.16	0.153315	1.96	0.036033	2.76	0.015958	3.56	0.009066
0.38	0.564244	1.18	0.14715	1.98	0.035281	2.78	0.01574	3.58	0.008885
0.4	0.540911	1.2	0.139513	2	0.034655	2.8	0.015562	3.6	0.008717
0.42	0.533856	1.22	0.130839	2.02	0.034112	2.82	0.015438	3.62	0.008562
0.44	0.535093	1.24	0.122061	2.04	0.033528	2.84	0.015367	3.64	0.008415
0.46	0.496505	1.26	0.114011	2.06	0.032792	2.86	0.015337	3.66	0.008272
0.48	0.46263	1.28	0.106425	2.08	0.031903	2.88	0.015319	3.68	0.008131
0.5	0.438656	1.3	0.100209	2.1	0.030948	2.9	0.015278	3.7	0.007988
0.52	0.427944	1.32	0.097586	2.12	0.030005	2.92	0.015182	3.72	0.007844
0.54	0.420713	1.34	0.096119	2.14	0.029076	2.94	0.015013	3.74	0.007698
0.56	0.42378	1.36	0.095018	2.16	0.028116	2.96	0.014775	3.76	0.007552
0.58	0.440938	1.38	0.093379	2.18	0.027232	2.98	0.014489	3.78	0.007459
0.6	0.449952	1.4	0.091092	2.2	0.026726	3	0.014184	3.8	0.007399
0.62	0.458477	1.42	0.08866	2.22	0.026172	3.02	0.013887	3.82	0.007335
0.64	0.458393	1.44	0.086358	2.24	0.025576	3.04	0.013619	3.84	0.007267
0.66	0.453799	1.46	0.083853	2.26	0.024927	3.06	0.01339	3.86	0.007198
0.68	0.447445	1.48	0.080409	2.28	0.024456	3.08	0.013202	3.88	0.007129
0.7	0.432028	1.5	0.077795	2.3	0.024066	3.1	0.013048	3.9	0.007062
0.72	0.407181	1.52	0.07511	2.32	0.023635	3.12	0.012916	3.92	0.006997
0.74	0.379315	1.54	0.072051	2.34	0.023183	3.14	0.012791	3.94	0.006936
0.76	0.36533	1.56	0.068758	2.36	0.022736	3.16	0.01266	3.96	0.00688
0.78	0.349444	1.58	0.065746	2.38	0.022415	3.18	0.012517	3.98	0.006828
0.8	0.33701	1.6	0.062413	2.4	0.022086	3.2	0.012361	4	0.006779

Tabella 5: Coordinate della curva dei valori medi degli spettri di risposta calcolati.

Nella Figura 14 si riporta lo spettro di risposta medio di riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), valido per entrambe le aree oggetto di richiesta di inserimento nel POC.

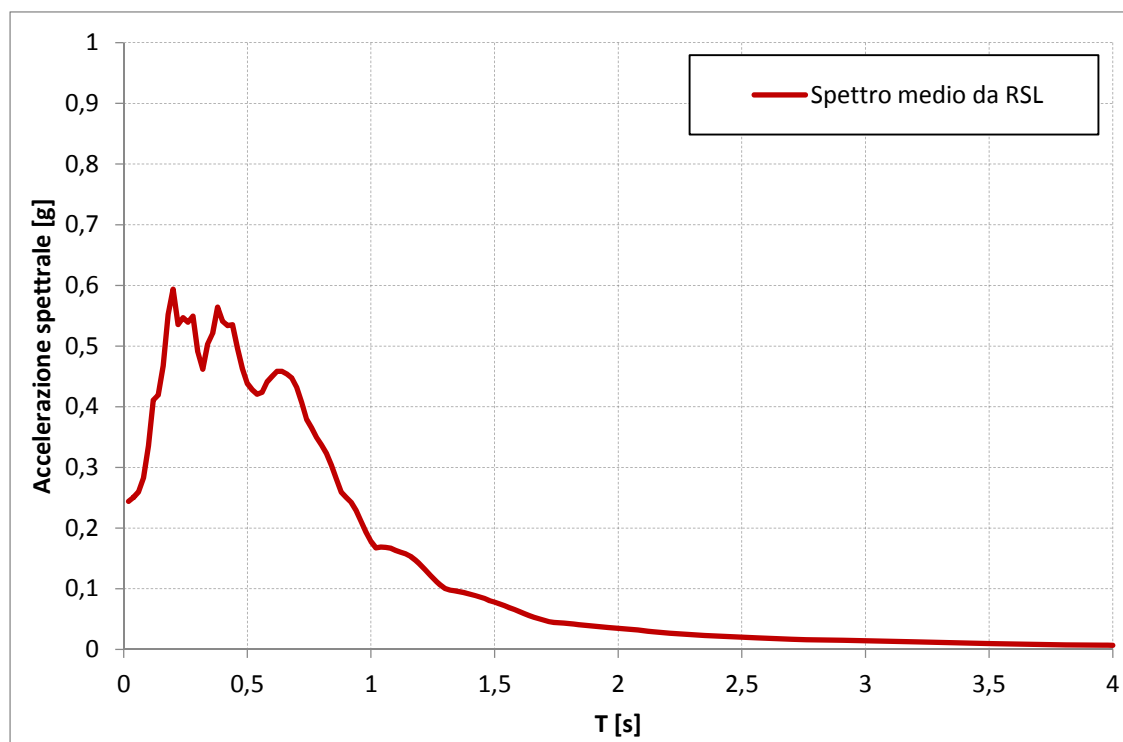


Fig. 14: Spettro di risposta medio calcolato.

9.2 FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

A completamento della caratterizzazione del sito in termini di pericolosità sismica, secondo quanto definito dalla normativa regionale in materia di microzonazione sismica (D.A.L. 112/2007, aggiornata con D.G.R. 2193/2015) di seguito si riportano i valori di PGA (Peak Ground Acceleration), di SI (Intensità di Housner) ed i fattori di amplificazione, ottenuti dall'elaborazione numerica.

In particolare nella seguente tabella vengono riportati i valori di accelerazioni massime (PGA) e del fattore SI, in intervalli prefissati di frequenze di primaria importanza per le strutture, per ognuno dei tre segnali sismici di input, così come ottenuti dall'analisi numerica ed il relativo valore medio. Si presentano anche i valori di PGA_0 e di SI_0 (tra 0,1-0,5, 0,5-1,0 s e 1,0-1,5 s) di riferimento, corrispondenti alla sollecitazione esercitata dai segnali sismici in corrispondenza al substrato sismico (privo di amplificazioni, assimilabile ad un sottosuolo di tipo A).

Il rapporto tra i valori in superficie ed i valori al bed-rock permette di ottenere i fattori di amplificazione (F.A.) per il sito in esame in termini di PGA/PGA_0 , SI/SI_0 (0,1 – 0,5 s), SI/SI_0 (0,5 – 1,0 s) e SI/SI_0 (1,0 – 1,5 s).

FATTORI DI AMPLIFICAZIONE					
Superficie		000046xa	000126xa	000354xa	media
	PGA	0.265518	0.236426	0.226657	0.242867
	SI ₀ (0,1-0,5 s)	11.05601	10.47663	11.20853	10.91372
	SI ₀ (0,5-1,0 s)	20.9062	17.36385	23.51497	20.59501
	SI ₀ (1,0-1,5 s)	8.340807	11.07215	19.18236	12.8651
Bedrock		000046xa	000126xa	000354xa	media
	PGA ₀	0.168	0.168	0.168	0.168
	SI ₀ (0,1-0,5 s)	6.946455	6.384144	7.070532	6.800377
	SI ₀ (0,5-1,0 s)	8.591532	7.411625	9.988826	8.663994
	SI ₀ (1,0-1,5 s)	3.572159	5.271305	9.443446	6.095637
F.A.		000046xa	000126xa	000354xa	media
	PGA/PGA ₀	1.580462	1.407296	1.34915	1.445636
	SI/SI ₀ (0,1-0,5 s)	1.591605	1.64104	1.585246	1.60487
	SI/SI ₀ (0,5-1,0 s)	2.43335	2.342785	2.354127	2.37708
	SI/SI ₀ (1,0-1,5 s)	2.334948	2.100456	2.031288	2.110543

Tabella 6: Valori di PGA, SI, PGA₀ e SI₀ ottenuti dall'elaborazione e rispettivi fattori di amplificazione.



Dott. Saul Beghelli – GEOLOGO

Bologna, 19 giugno 2017.

.....

ALLEGATO D

Verifica a liquefazione e cedimenti post-sismici da CPTU

.....

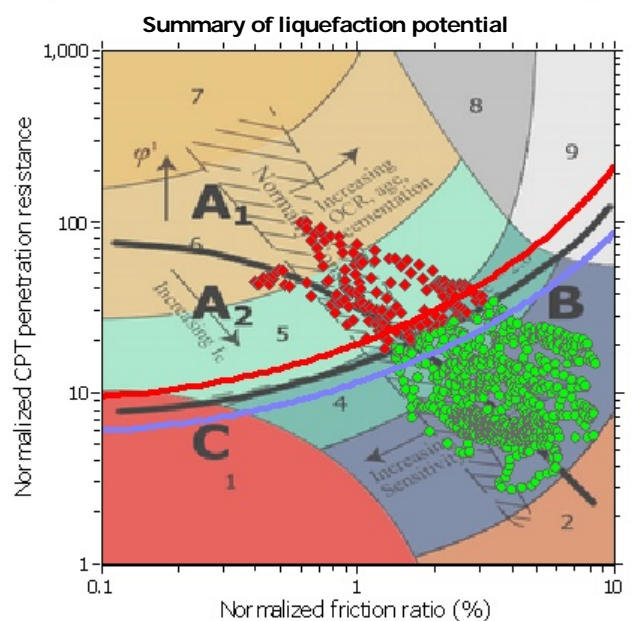
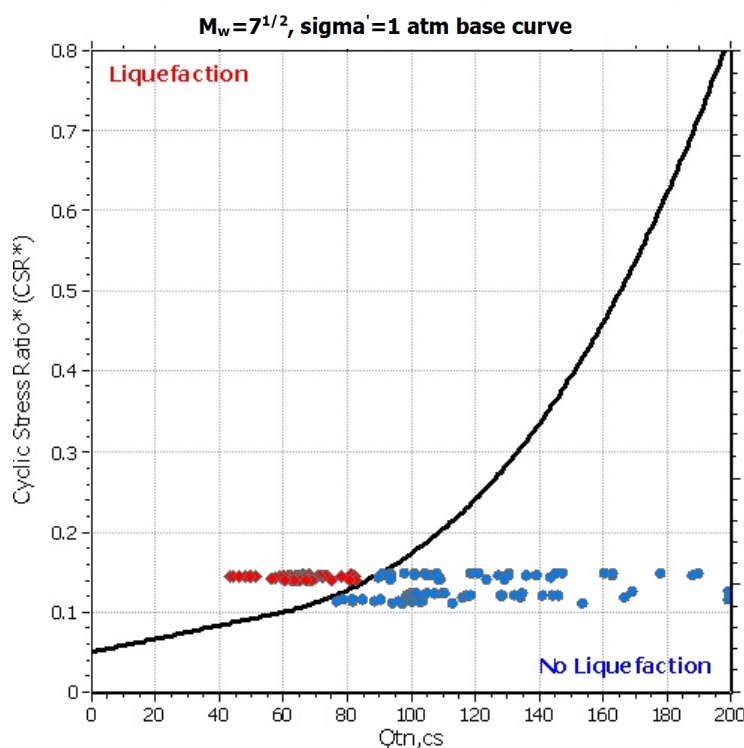
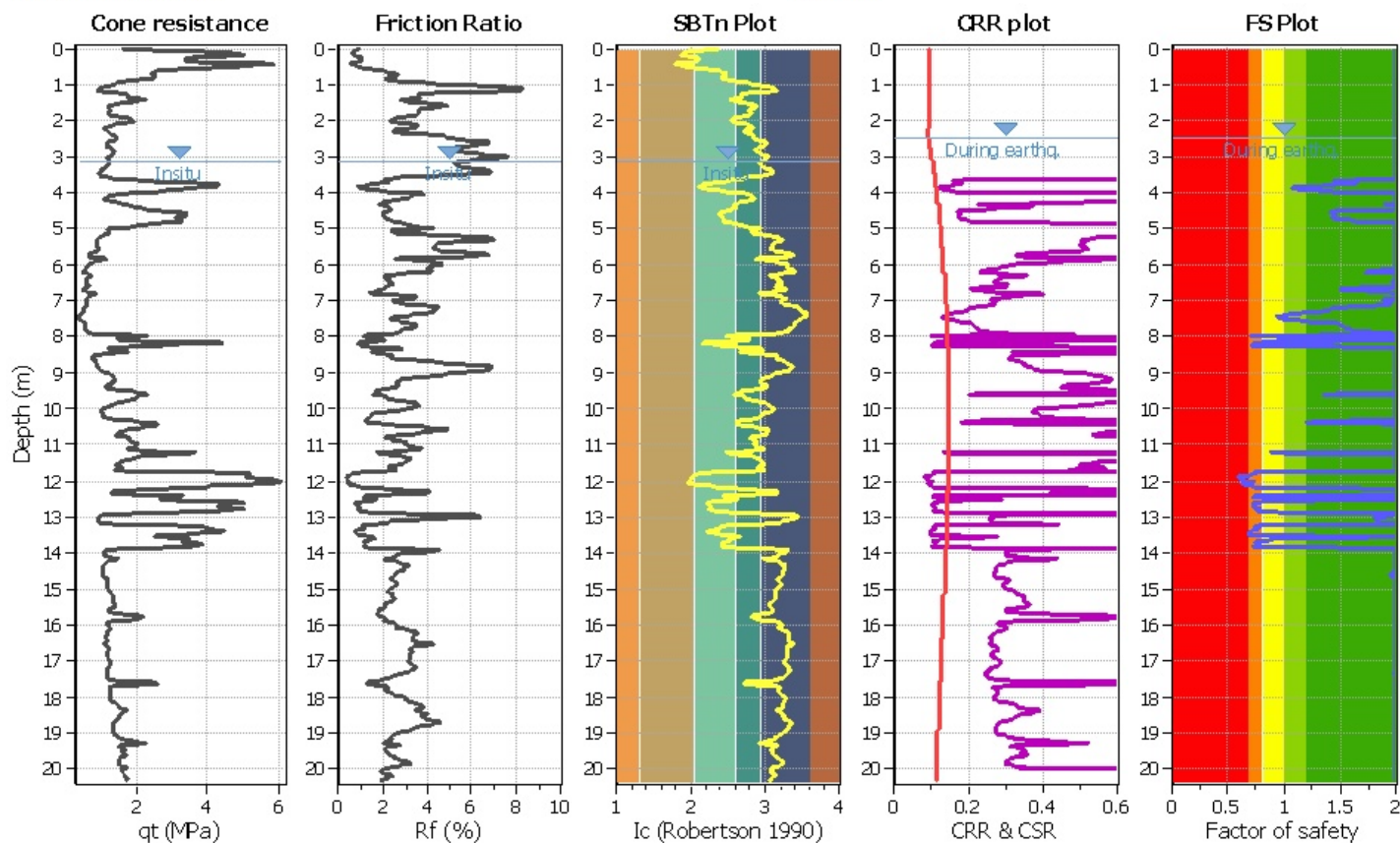
LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

Project title : Studio geologico e sismico - Inserimento POC Location : Bologna, Viale Europa - Lato Nord

CPT file : CPTU1

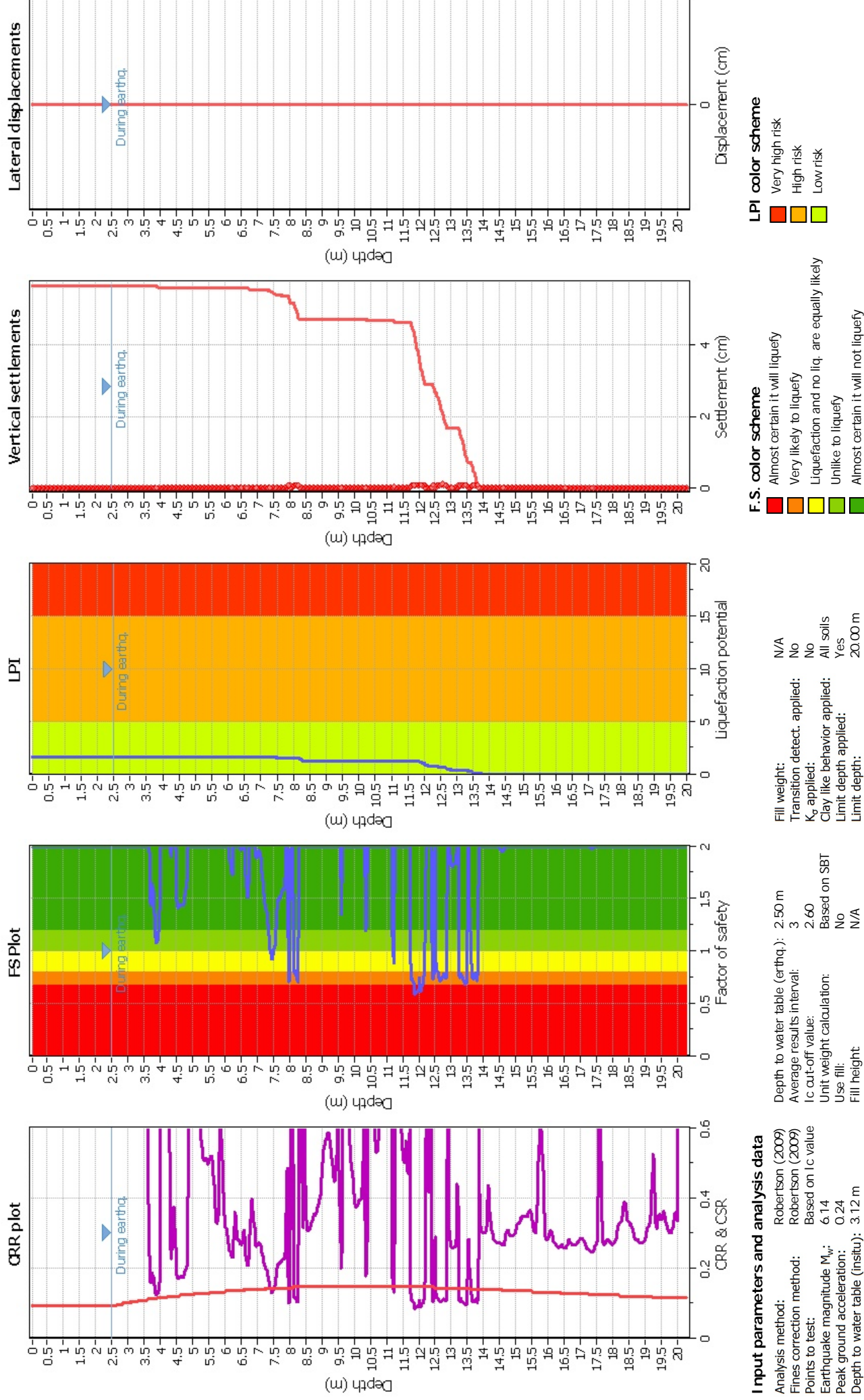
Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	3.12 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	2.50 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.24	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_g applied:	No	MSF method:	Method based



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: 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

Liquefaction analysis overall plot



Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)
Fines correction method:	Robertson (2009)
Points to test:	Based on I _c value
Earthquake magnitude M _w :	6.14
Peak ground acceleration:	0.24
Depth to water table (insitu):	3.12 m

Depth to water table (earthq.):	2.50 m
Average results interval:	3
I _c cut-off value:	2.60
Unit weight calculation:	Based on SBT
Use fill:	No
Fill height:	N/A
Fill weight:	N/A
Transition detect: applied:	No
K ₀ applied:	No
Clay like behavior applied:	All soils
Limit depth applied:	Yes
Limit depth:	20.00 m