

COMUNE DI MODENA

PR

Programma di Riqualificazione Urbana “COMPARTO NONANTOLANA”

TAV. 01

MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO

Adottato con Del. di C.C. n. del - -

Approvato con Del. di C.C. n. del - -

PROGRAMMA DI RIQUALIFICAZIONE URBANA
PIANO DI RECUPERO “COMPARTO NONANTOLANA”

MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO

- 01 -

COMUNE DI MODENA

SETTORE PIANIFICAZIONE E SOSTENIBILITA' URBANA

Dirigente di Settore: ing. Maria Sergio

Servizio Progetti Urbani Complessi e Politiche Abitative

Dirigente di Servizio: ing. Michele Tropea

Gruppo di lavoro:

progettazione arch. Giovanna Palazzi

aspetti ambientali ing. Filippo Bonazzi

elaborazioni grafiche add. prog. Anna Tavoni

con il contributo di arch. Andrea Reggianini

geom Luigi Maietta

dott.ssa Silvia Sitton

add. prog. Elena Alietti

Contributi interni

per l'elaborato **A)** Schema di Convenzione
Servizio Amministrativo: *dott. Marco Bisconti*

per l'elaborato **B)** Stralcio dello strumento urbanistico vigente
Servizio Urbanistica: arch. *Morena Croci*

per l'elaborato **I)** Relazione tecnica del progetto del verde
Unità Specialistica Servizi Pubblici Ambientali: *dott.ssa Marta Guidi*

per l'elaborato **J-K)** Schema degli impianti tecnici – aspetti idraulici
Unità Specialistica Servizi Pubblici Ambientali: *ing. Sara Toniolo*
Servizio Energia, Ambiente e Protezione Civile: *ing. Emanuela Boschi*

per l'elaborato **M)** Valutazione previsionale di clima acustico
Ufficio Impatto Ambientale: *dott.ssa Daniela Campolieti*

per l'elaborato **O)** Relazione geologica e analisi geotecnica del terreno
per l'elaborato **Q)** Rapporto preliminare per la verifica di assoggettabilità alla VAS
Unità Specialistica Servizi Pubblici Ambientali: *dott. geol. Giorgio Barelli*

per l'elaborato **R)** Verifica preventiva dell'interesse archeologico
Museo Civico Archeologico Etnologico: *dott.ssa Silvia Pellegrini*

per l'elaborato **S)** Relazione delle risorse energetiche dell'insediamento
Servizio Energia, Ambiente e Protezione Civile: *ing. Michele Bocelli,*

per gli aspetti relativi alla mobilità:
Ufficio Mobilità, Traffico e Urbanizzazioni: ing. Dario Di Vincenzo, ing. Mirko Pradelli

Contributi esterni

per l'elaborato **I)** Relazione tecnica del progetto del verde:
Agenzia Casa Emilia Romagna (ACER) Modena dott.ssa agronomo Rita Bega

per l'elaborato **J-K)** Schema degli impianti tecnici:
HERA Modena s.p.a: ing. Sandro Mattioli

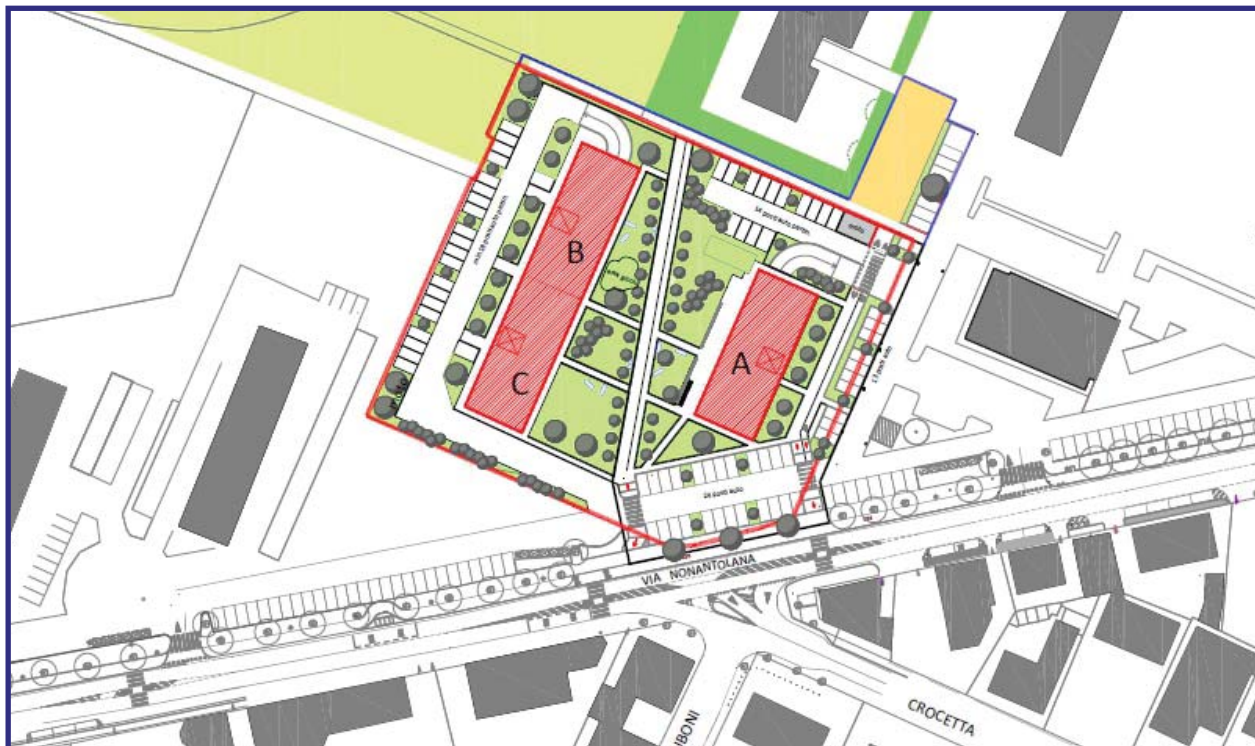
per l'elaborato **M)** Valutazione previsionale di clima acustico:
StudioA p.i. Maurizio Santunione

per l'elaborato **O)** Relazione geologica e analisi geotecnica del terreno:
Geo-Group srl

per gli aspetti relativi alla sicurezza:
Linee guida per criteri di sicurezza urbana nella progettazione
Lab[qus] arch. Umberto Nicolini

Comune di Modena

Provincia di Modena



OGGETTO:

Relazione sullo studio di **MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO** a supporto del progetto per la realizzazione di un piano particolareggiato – **COMPARTO NONANTOLANA "ZE 842 area 02"** – in via Nonantolana nel Comune di Modena (Mo)..



Dott. Geol. Pierluigi Dallari

Maggio 2020
Rif. 279/20

ASSOCIATO



GEO GROUP s.r.l.
Via C. Costa, 182 - 41123 MODENA
Tel. 059/3967169 Fax. 059/5960176
E-mail: info@geogroupmodena.it
P.IVA e C.F. 02981500362
www.geogroupmodena.it



**AZIENDA CON SISTEMA
DI GESTIONE QUALITÀ
CERTIFICATO DA DNV
= ISO 9001 =**

OGGETTO

Relazione sullo studio di *MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO* a supporto del progetto per la realizzazione di un piano particolareggiato – COMPARTO NONANTOLANA "ZE 842 area 02" – in via Nonantolana nel Comune di Modena (Mo).

Rif. n. 279/2020



UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnovo R. (MO)

SEDE LEGALE: via C.Costa,182 - 41123 Modena (MO)

tel. 059/3967169; 059/828367 - p. Iva e C.F.02981500362

Email: info@geogroupmodena.it Pec: geo.group@winpec.it Sito: www.geogroupmodena.it

INDICE DEL CONTENUTO

1	PREMESSE.....	3
2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	5
2.1	Elementi geologici generali	5
3	INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	8
3.1	Indagini Geotecniche	8
3.1.1	Prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTE/U.....	8
3.2	Caratteristiche litostratigrafiche del terreno	9
3.3	Modello geotecnico del sottosuolo	10
3.4	Indagini Geofisiche	12
3.4.1	Indagine sismica passiva a stazione singola (analisi HVSR)	12
3.4.2	Indagine sismica attiva con metodo MASW	13
4	CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO	15
4.1	Pericolosità sismica di base	15
4.2	Categoria di sottosuolo (§ 3.2.2 NTC2018).....	17
4.3	Azione sismica e risposta sismica del sito – Risposta sismica locale	18
4.4	<i>Stabilità nei confronti della liquefazione (§ A2.2. DGR 630/2019)</i>	31
4.5	Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica (§ B. DGR 630/2019).....	34
5	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	36

TAVOLE

Tav. n. 1: "Carta Topografica"
 Tav. n. 2: "Ripresa Satellitare"
 Tav. n. 3: "Ubicazione indagini"

scala 1: 10.000;
 scala 1: 5.000;
 scala 1: 5.000.

ALLEGATI

ALL. n. 1 Prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTu;
 ALL. n. 2 Indagini sismiche;
 ALL. n. 3 Verifica alla liquefazione.

1 PREMESSE

Nel mese di maggio 2020 è stato eseguito il presente studio di MICROZONAZIONE SISMICA DI III LIVELLO a supporto del progetto per la realizzazione di un piano particolareggiato – COMPARTO NONANTOLANA "ZE 842 area 02" in via Nonantolana nel Comune di Modena (Mo) (Fig.1.1).



Fig.1.1 - Ubicazione del sito in studio – Comune di Modena.

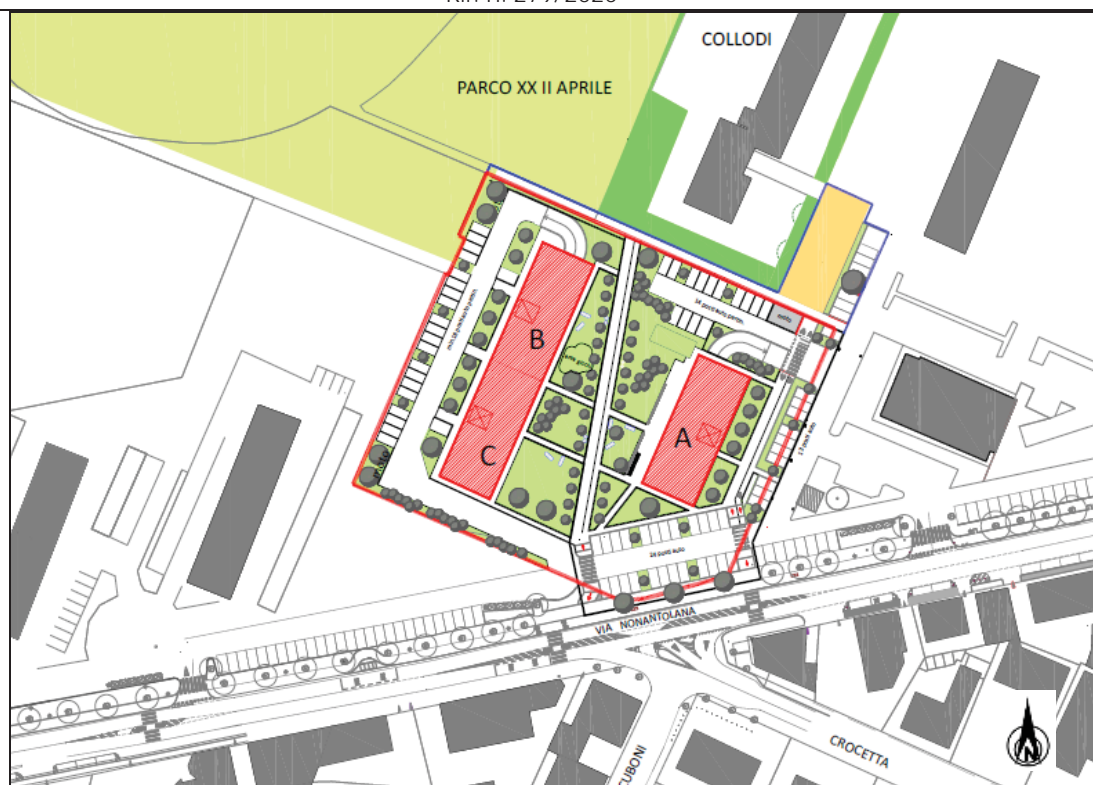


Fig.1.2 - Stralcio del programma di riqualificazione - comune d Modena

Per un completo inquadramento geografico dell'area si rimanda alla cartografia allegata alla presente relazione, in particolare alla "Carta topografica", alla scala 1: 5.000 (tav. n. 1) e alla "Ripresa satellitare" alla scala 1: 5.000 (tav. n. 2).

La presente relazione fa riferimento alle disposizioni normative contenute in:

- Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 – D.M. 17/01/2018
- DGR 630/2019.

2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

2.1 Elementi geologici generali

Dalla consultazione della Carta della litologia di superficie della Regione Emilia Romagna, si evidenzia come l'area in studio sia caratterizzata da limo sabbioso di piana alluvionale.

Al fine di definire un quadro generale dell'area, sono state consultate le seguenti cartografie:

- **Carta della litologia di superficie – Carta della Regione Emilia Romagna;**
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica – Comune di Modena.**

In particolare l'area in studio è caratterizzata dall' **Unità di Modena AES8a**, caratterizzato da depositi ghiaiosi passanti a sabbie e limi di terrazzo alluvionale. Limi prevalenti nelle fasce pedecollinari di interconoide. Unità definita dalla presenza di un suolo a bassissimo grado di alterazione, con profilo potente meno di 100 cm, calcareo, grigio-giallastro o bruno grigiastro. Nella pianura ricopre resti archeologici di età romana del VI secolo d.C.. Potenza massima di alcuni metri (< 10 m). *Post-VI secolo d.C. Litofacies: limosa* (Fig.2.1).


Di seguito si riportano gli stralci delle carte sopra elencate.




Ambienti deposiz. e litologie (10K)

Argilla - Piana alluvionale

Limo - Piana alluvionale

 Limo Sabbioso - Piana alluvionale

Coperture quaternarie (10K)

 AES8 - Subsistema di Ravenna


 AES8a - Unità di Modena

Fig.2.1 - Carta della litologia di superficie – Carta della Regione Emilia Romagna.



Zone di attenzione per instabilità

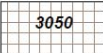
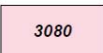

	3050	ZALQ1 – Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1
	3080	Cedimenti differenziali
	3070	Sovrapposizione di zone suscettibili di instabilità differenti

Fig.2.2 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica – Comune di Modena

3 INDAGINI GEOGNOSTICHE

3.1 Indagini Geotecniche

In relazione alla litologia presente nell'area e in base alla tipologia di intervento in progetto, sono state eseguite le seguenti indagini geognostiche:

- **n. 1 prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono CPTU, eseguita in data 21/05/2020;**

I risultati delle suddette indagini sono riportati nell'**allegato n. 1**, mentre l'ubicazione è illustrata nella **tav. n. 3**.

3.1.1 Prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTE/U

La prova è stata eseguita con un penetrometro Gouda dotato di punta elettrica e piezocono CPTE/U. Le caratteristiche tecniche dello strumento impiegato sono le seguenti:

Caratteristiche del Piezocono			
Canali di misura:		Dimensioni:	
Resistenza di punta (qc):	10; 50; 100 MPa	Angolo di apertura cono:	60°
Attrito laterale (fs):	0,5 MPa	Diametro:	36 mm
Pressione nei pori (U):	2,5 MPa	Sezione di spinta:	10 cm ²
Inclinazione:	0 - 40°	Superficie laterale:	150 cm ²
		Peso:	2,1 kg
		Lunghezza:	413 mm

La prova è stata elaborata mediante il software CPeT – IT v. 1.7.4.13 prodotto da GeoLogisMiki – Geotechnical Software. I report, in cui sono riportati su grafici i dati di resistenza e pressione interstiziale misurati ed illustrata l'interpretazione litostratigrafica e geotecnica della prova, sono riportati in **Allegato n.1**. La caratterizzazione litostratigrafica del terreno è stata effettuata in funzione delle carte proposte da Robertson, in cui il tipo di comportamento del terreno è definito da tre parametri: qt, resistenza alla punta corretta, Rf, Bq, nella prima carta (1986) e con i parametri normalizzati nella seconda (1990).

Correlazioni utilizzate per la stima dei parametri geotecnici

<p>:: Unit Weight, g (kN/m³) ::</p> $g = g_w \cdot \left(0.27 \cdot \log(R_f) + 0.36 \cdot \log\left(\frac{q_t}{p_a}\right) + 1.236 \right)$ <p>where g_w = water unit weight</p> <p>:: Permeability, k (m/s) ::</p> <p>$I_c < 3.27$ and $I_c > 1.00$ then $k = 10^{0.952-3.04 \cdot I_c}$</p> <p>$I_c \leq 4.00$ and $I_c > 3.27$ then $k = 10^{-4.52-1.37 \cdot I_c}$</p> <p>:: N_{60} (blows per 30 cm) ::</p> $N_{60} = \left(\frac{q_c}{p_a} \right) \cdot \frac{1}{10^{1.1268-0.2817 I_c}}$ $N_{1(60)} = Q_{tn} \cdot \frac{1}{10^{1.1268-0.2817 I_c}}$ <p>:: Young's Modulus, E_s (MPa) ::</p> $(q_t - \sigma_v) \cdot 0.015 \cdot 10^{0.55 I_c + 1.68}$ <p>(applicable only to $I_c < I_{c, \text{cstn}}$)</p> <p>:: Relative Density, D_r (%) ::</p> $100 \cdot \sqrt{\frac{Q_{tn}}{k_{DR}}} \quad (\text{applicable only to SBTs: 5, 6, 7 and 8 or } I_c < I_{c, \text{cstn}})$ <p>:: State Parameter, ψ ::</p> $\psi = 0.56 - 0.33 \cdot \log(Q_{tn, \text{cs}})$ <p>:: Peak drained friction angle, ϕ (°) ::</p> $\phi = 17.60 + 11 \cdot \log(Q_{tn})$ <p>(applicable only to SBTs: 5, 6, 7 and 8)</p> <p>:: 1-D constrained modulus, M (MPa) ::</p> <p>If $I_c > 2.20$</p> $\alpha = 14 \text{ for } Q_{tn} > 14$ $\alpha = Q_{tn} \text{ for } Q_{tn} \leq 14$ $M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$ <p>If $I_c \leq 2.20$</p> $M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 I_c + 1.68}$	<p>:: Small strain shear Modulus, G_0 (MPa) ::</p> $G_0 = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 I_c + 1.68}$ <p>:: Shear Wave Velocity, V_s (m/s) ::</p> $V_s = \left(\frac{G_0}{\rho} \right)^{0.50}$ <p>:: Undrained peak shear strength, S_u (kPa) ::</p> $N_{1t} = 10.50 + 7 \cdot \log(F_r) \text{ or user defined}$ $S_u = \frac{(q_t - \sigma_v)}{N_{1t}}$ <p>(applicable only to SBTs: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c, \text{cstn}}$)</p> <p>:: Remolded undrained shear strength, $S_u(\text{rem})$ (kPa) ::</p> $S_{u(\text{rem})} = f_s \quad (\text{applicable only to SBTs: 1, 2, 3, 4 and 9 or } I_c > I_{c, \text{cstn}})$ <p>:: Overconsolidation Ratio, OCR ::</p> $k_{OCR} = \left[\frac{Q_{tn}^{0.20}}{0.25 \cdot (10.50 + 7 \cdot \log(F_r))} \right]^{1.23} \text{ or user defined}$ $OCR = k_{OCR} \cdot Q_{tn}$ <p>(applicable only to SBTs: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c, \text{cstn}}$)</p> <p>:: In situ Stress Ratio, K_0 ::</p> $K_0 = 0.1 \cdot \left(\frac{q_t - \sigma_v}{\sigma_{vo}} \right)$ <p>(applicable only to SBTs: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c, \text{cstn}}$)</p> <p>:: Soil Sensitivity, S_t ::</p> $S_t = \frac{N_{1t}}{F_r}$ <p>(applicable only to SBTs: 1, 2, 3, 4 and 9 or $I_c > I_{c, \text{cstn}}$)</p> <p>:: Effective Stress Friction Angle, ϕ' (°) ::</p> $\phi' = 29.5^\circ \cdot B_q^{0.123} \cdot (0.256 + 0.336 \cdot B_q + \log Q_t)$ <p>(applicable for $0.10 < B_q < 1.00$)</p>
--	--

Tab.3.1 - Correlazioni utilizzate per la stima dei parametri geotecnici.**3.2 Caratteristiche litostratigrafiche del terreno**

- L'interpretazione congiunta dei risultati ottenuti dalla precedente campagna di indagini eseguite a novembre 2018 (Cpt + Sondaggio a carotaggio continuo) e dall'indagine CPTU eseguita in sito in data 21/05/2020, ha permesso di ricostruire la stratigrafia del sottosuolo del sito in studio. In generale si può osservare che l'area indagata risulta discretamente omogenea dal punto di vista litostratigrafico.

- Di seguito si riporta la stratigrafia ottenuta dall'elaborazione della prova penetrometrica CPTU (Fig.5.1).

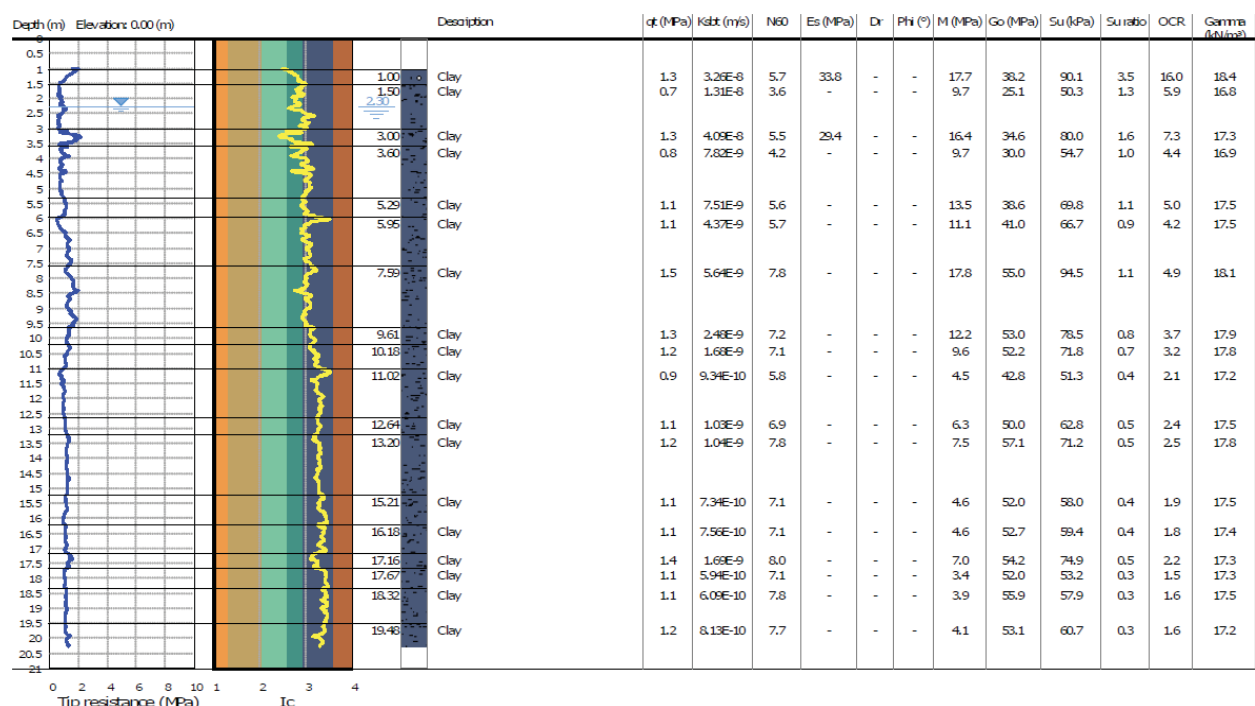


Fig. 3.1 – Stratigrafia ottenuta dall'elaborazione della prova CPTU

3.3 Modello geotecnico del sottosuolo

Il modello geotecnico è finalizzato a fornire tutti i dati geotecnici necessari l'intervento in oggetto. Sulla base dei dati emersi dall'elaborazione geotecnica e litostratigrafica dell'indagine geotecnica eseguita in sito e in relazione all'intervento in progetto, si può riassumere il seguente modello geotecnico schematico del terreno investigato:

Parametri di resistenza e deformabilità:

	Profondità	Falda	Litotipo	Parametri geotecnici	
1	0.0 – 1.60 m da p.c.		Argilla o argilla limosa mediamente consistente	γ	$1800 \text{ kg/m}^3 \approx 18.00 \text{ kN/m}^3$
				γ'	$2100 \text{ kg/m}^3 \approx 21.00 \text{ kN/m}^3$
				C_{uk}	$0.50 \text{ kg/cm}^2 \approx 50.0 \text{ kN/m}^2$
				C'_k	$0.05 \text{ kg/cm}^2 \approx 5.0 \text{ kN/m}^2$
				M_0	$45.0 \text{ kg/cm}^2 \approx 4500 \text{ kN/m}^2$
				ϕ_k	23°
				v	0.40
2	1.60 – 2.60 m da p.c.	-2.30 da p.c.	Argilla o argilla limosa poco consistente	Es	$70.0 \text{ kg/cm}^2 \approx 7000 \text{ kN/m}^2$
				γ	$1750 \text{ kg/m}^3 \approx 17.50 \text{ kN/m}^3$
				γ'	$2050 \text{ kg/m}^3 \approx 20.50 \text{ kN/m}^3$
				C_{uk}	$0.40 \text{ kg/cm}^2 \approx 40.0 \text{ kN/m}^2$
				C'_k	$0.04 \text{ kg/cm}^2 \approx 4.0 \text{ kN/m}^2$
				M_0	$35.0 \text{ kg/cm}^2 \approx 3500 \text{ kN/m}^2$
				ϕ_k	21°
				v	0.50

3	2.60 – 6.40 m da p.c.		Argilla o argilla limosa a media consistenza	Es	56.0 kg/cm ² ≈ 5600 kN/m ²
				γ	1800 kg/m ³ ≈ 18.00 kN/m ³
				γ'	2100 kg/m ³ ≈ 21.00 kN/m ³
				C_{uk}	0.50 kg/cm ² ≈ 50.0 kN/m ²
				C'_k	0.05 kg/cm ² ≈ 5.0 kN/m ²
				M₀	40.0 kg/cm ² ≈ 4000 kN/m ²
				φ_k	23°
				v	0.40
4	6.40 – 7.80 m da p.c.		Sabbia limosa poco addensata	Es	70.0 kg/cm ² ≈ 7000 kN/m ²
				γ	1800 kg/m ³ ≈ 18.00 kN/m ³
				γ'	2100 kg/m ³ ≈ 21.00 kN/m ³
				Dr	20%
				φ_k	28°
				v	0.50
				Es	70.0 kg/cm ² ≈ 7000 kN/m ²
				γ	1900 kg/m ³ ≈ 19.00 kN/m ³
5	7.80 – 11.20 m da p.c.		Argilla o argilla limosa consistente	γ'	2200 kg/m ³ ≈ 22.00 kN/m ³
				C_{uk}	0.80 kg/cm ² ≈ 80.0 kN/m ²
				C'_k	0.08 kg/cm ² ≈ 8.0 kN/m ²
				M₀	60.0 kg/cm ² ≈ 6000 kN/m ²
				φ_k	25°
				v	0.35
				Es	112.0 kg/cm ² ≈ 11200 kN/m ²
				γ	1850 kg/m ³ ≈ 18.50 kN/m ³
6	11.20 – 21.40 m da p.c.		Argilla o argilla limosa mediamente consistente	γ'	2150 kg/m ³ ≈ 21.50 kN/m ³
				C_{uk}	0.60 kg/cm ² ≈ 60.0 kN/m ²
				C'_k	0.06 kg/cm ² ≈ 6.0 kN/m ²
				M₀	50.0 kg/cm ² ≈ 5000 kN/m ²
				φ_k	23°
				v	0.40
				Es	84.0 kg/cm ² ≈ 8400 kN/m ²
				γ	1900 kg/m ³ ≈ 19.00 kN/m ³
7	21.40 – 22.80 m da p.c.		Argilla o argilla limosa consistente	γ'	2200 kg/m ³ ≈ 22.00 kN/m ³
				C_{uk}	0.90 kg/cm ² ≈ 90.0 kN/m ²
				C'_k	0.09 kg/cm ² ≈ 9.0 kN/m ²
				M₀	70.0 kg/cm ² ≈ 7000 kN/m ²
				φ_k	25°
				v	0.30
				Es	126.0 kg/cm ² ≈ 12600 kN/m ²
				γ	2000 kg/m ³ ≈ 20.00 kN/m ³
8	22.80 - 24.80 m da p.c.		Ghiaie sabbiose addensate	γ'	2300 kg/m ³ ≈ 23.00 kN/m ³
				Dr	80%
				φ_k	35°
				v	0.25
				Es	700.0 kg/cm ² ≈ 70000 kN/m ²
				γ	1900 kg/m ³ ≈ 19.00 kN/m ³
				γ'	2200 kg/m ³ ≈ 22.00 kN/m ³
				C_{uk}	1.00 kg/cm ² ≈ 100.0 kN/m ²
9	24.80 - 28.00 m da p.c.		Argilla o argilla limosa consistente	C'_k	0.10 kg/cm ² ≈ 10.0 kN/m ²
				M₀	70.0 kg/cm ² ≈ 7000 kN/m ²
				φ_k	25°
				v	0.30
				Es	140.0 kg/cm ² ≈ 14000 kN/m ²
				γ	2000 kg/m ³ ≈ 20.00 kN/m ³
				γ'	2300 kg/m ³ ≈ 23.00 kN/m ³
				Dr	80%
10	28.00 - 36.50 m da p.c.		Ghiaie sabbiose addensate	φ_k	35°
				v	0.25
				Es	700.0 kg/cm ² ≈ 70000 kN/m ²

11	36.50 - 39.00 m da p.c		Argilla o argilla limosa consistente	γ	1900 kg/m ³ ≈ 19.00 kN/m ³
				γ'	2200 kg/m ³ ≈ 22.00 kN/m ³
				C_{uk}	1.00 kg/cm ² ≈ 100.0 kN/m ²
				C'_k	0.10 kg/cm ² ≈ 10.0 kN/m ²
				M_0	70.0 kg/cm ² ≈ 7000 kN/m ²
				ϕ_k	25°
				ν	0.30
				E_s	140.0 kg/cm ² ≈ 14000 kN/m ²
Legenda					
γ	=	peso specifico terreno naturale			
γ'	=	peso specifico terreno saturo			
C_{uk}	=	coesione non drenata caratteristica			
C'_k	=	coesione efficace caratteristica (valore cautelativo)			
Dr	=	densità relativa			
M_0	=	modulo di deformazione edometrico			
E_s	=	modulo di deformazione elastico			
ϕ_k	=	angolo d'attrito caratteristico			

3.4 Indagini Geofisiche

Per la caratterizzazione sismica dell'area di studio, sono state eseguite le seguenti indagini geofisiche:

- **n. 1 indagine sismica passiva HVSR, eseguita in data 21/05/2020;**
- **n.1 indagine sismica attiva MASW e n.1 indagine sismica passiva HVSR, eseguite a novembre 2018.**

I risultati delle indagini sismiche sopra citate sono riportati integralmente nell'allegato n. 2.

3.4.1 Indagine sismica passiva a stazione singola (analisi HVSR)

Le misure sismiche passive a stazione singola sono state eseguite mediante un tromografo digitale dotato di tre canali velocimetrici, modello Tromino® prodotto da Moho srl (Marghera (VE), Italia). Per l'acquisizione è stata adottata una frequenza di campionamento di 128 Hz per una durata totale di 20 minuti.

Lo scopo dell'indagine è la misura della frequenza di risonanza del terreno, la quale è legata alla velocità delle onde di taglio V_s nel terreno dalla formula:

$$f = \frac{V_s}{4h}$$

dove h è lo spessore dello strato.

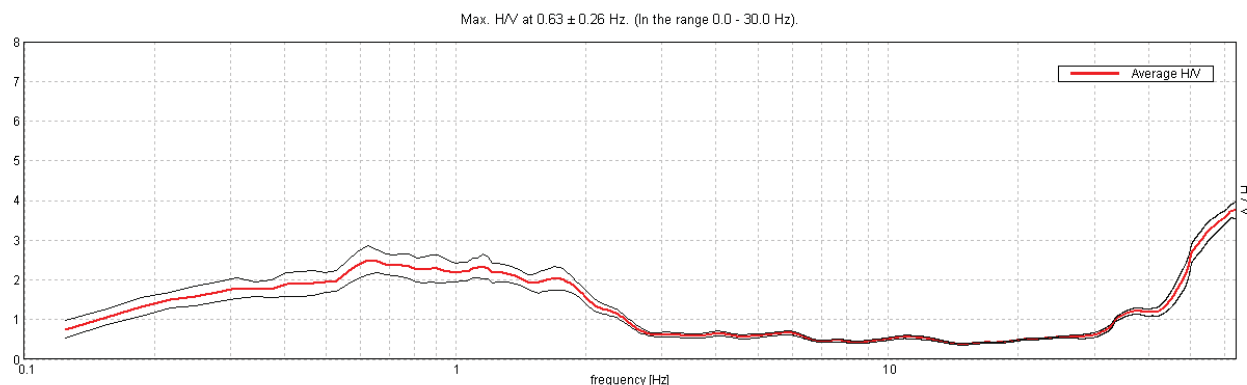


Fig.3.2 - Curve HVSR che identificano un picco a 0.63 Hz.

3.4.2 Indagine sismica attiva con metodo MASW

Per misurare le velocità delle onde di taglio si possono eseguire prospezioni sismiche mediante stendimenti superficiali, utilizzando geofoni verticali da 4,5 Hz ed acquisendo attivamente i segnali delle onde rifratte alla superficie mediante una sorgente artificialmente provocata. Questa tecnica, nota con la sigla **MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves), permette di ricostruire il profilo verticale delle Vs con procedimenti di modellazione diretta delle velocità di fase delle onde, rifratte alla superficie. Partendo dal sismogramma registrato mediante sorgente energizzante in asse con lo stendimento, viene eseguita un'analisi spettrale che ha consentito di elaborare un'immagine della distribuzione del segnale di velocità sismica in funzione delle diverse frequenze che lo compongono. Da tale elaborazione, tramite una fase di "picking" del segnale ad elevata intensità è stata ottenuta la **"curva di dispersione"**, dalla cui inversione è stato calcolato il **modello sismo-stratigrafico** espresso in termini di velocità delle onde di taglio (Vs). I dati sono stati registrati mediante un sismografo *Geode Geometrics* 24 bit con filtri disinseriti, velocità di campionamento (sample rate) di 0.25 millisecondi e lunghezza delle acquisizioni di 2 secondi. Si effettuano battute poste ad offset diversi (10 m e 15 m di distanza dal primo geofono) mediante grave da 8,0 kg di massa. Il calcolo del profilo delle velocità delle onde di Rayleigh, $V(fase)/freq.$, può essere convertito nel profilo Vs/profondità. Tale metodo non è univoco e quindi il modello che ne scaturisce è un modello teorico; per questo motivo è preferibile operare in presenza di dati di taratura (come nel caso specifico) onde ricavare il modello reale.

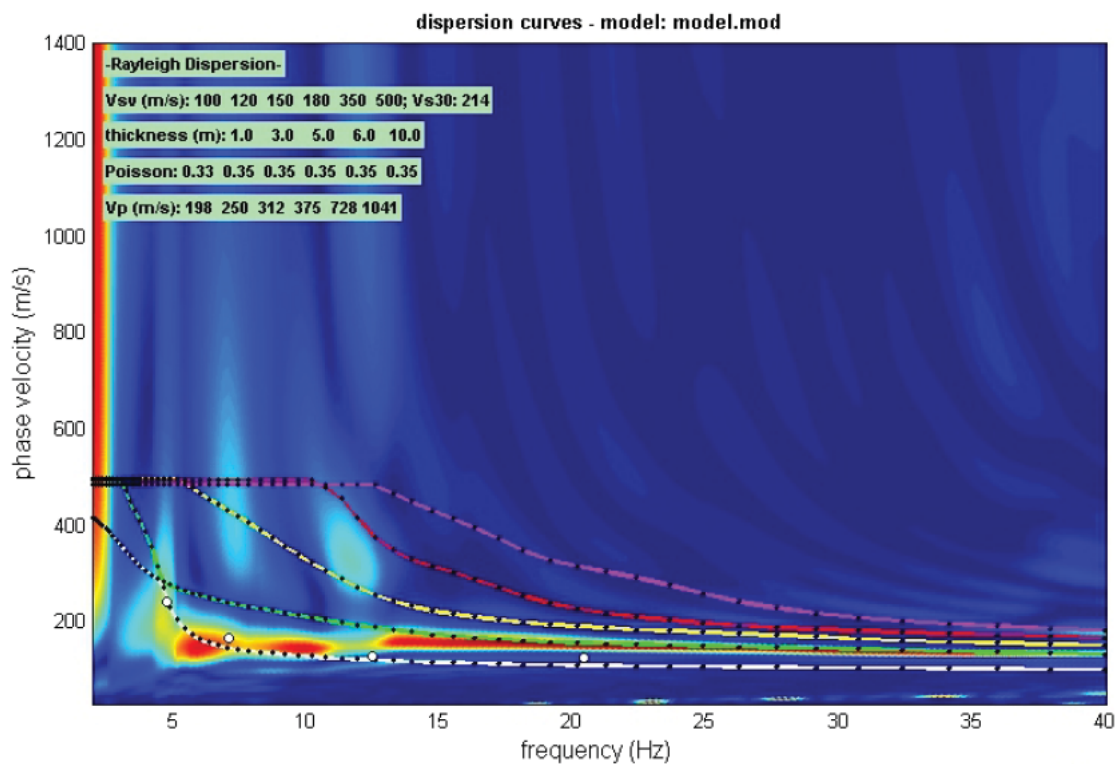


Fig.3.3 - Curva di dispersione MASW.

4 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO

4.1 Pericolosità sismica di base

Secondo la classificazione sismica del territorio nazionale proposta a partire dall'O.P.C.M. n. 3274/2003 e successive modifiche, il **Comune di Modena (MO)** risulta appartenente alla **classe di sismicità 3**.

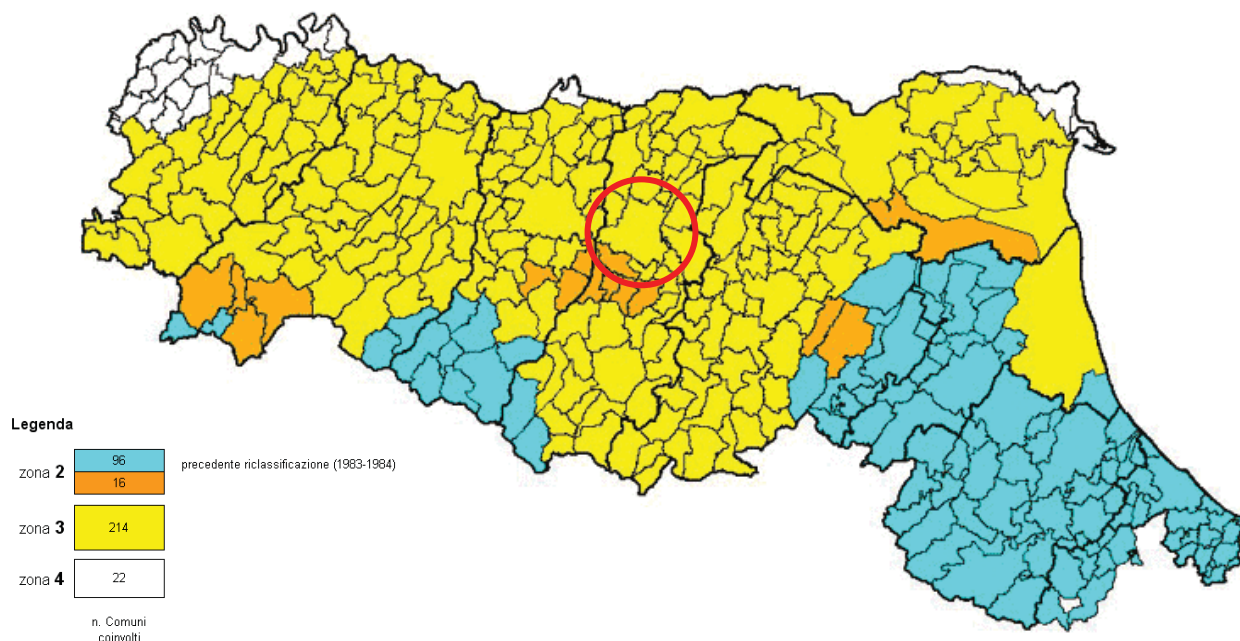


Figura 4.1.1 – Classificazione sismica vigente dei comuni della regione Emilia-Romagna, ed ubicazione del territorio comunale di Modena.

La suddivisione del territorio nazionale in zone a diversa classe di sismicità, caratterizzate da un valore di accelerazione di picco ed un corrispondente spettro di risposta elastico da utilizzare nella progettazione, risulta in realtà superata dall'entrata in vigore delle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (N.N.T.C.), che ha limitato l'importanza della classificazione sismica alla gestione della pianificazione ed al controllo del territorio da parte degli enti pubblici.

Sulla base dei contenuti del **DM 17/01/18** - Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" per ogni costruzione deve essere definita un'accelerazione di riferimento propria, in funzione delle coordinate geografiche dell'area e della vita nominale dell'opera. Per l'area in oggetto, identificata dalle seguenti coordinate geografiche (**Sistema di riferimento ED50**): **Latitudine: 44.654858°**, **Longitudine 10.941042°**, in relazione ad un periodo di riferimento T_R stimato di 475 anni, è stato definito un parametro di accelerazione massima attesa a_g pari a **$a_{g \text{ attesa}} = 0.163g$**

Stati limite



Classe Edificio

II. Affollamento normale. Assenza di funz. pubbliche e sociali...



Vita Nominale

50



Interpolazione

Media ponderata

CU = 1

Stato Limite	Tr [anni]	a_g [g]	Fo	T_c^* [s]
Operatività (SLO)	30	0.048	2.475	0.254
Danno (SLD)	50	0.060	2.507	0.269
Salvaguardia vita (SLV)	475	0.163	2.442	0.287
Prevenzione collasso (SLC)	975	0.214	2.444	0.291
Periodo di riferimento per l'azione sismica:	50			

F ig. 4.1.2 - Parametri sismici caratteristici della maglia di punti riportata in figura, in cui ricade l'area oggetto del presente studio (da www.geostru.com/us/parametri-sismici/)

4.2 Categoria di sottosuolo (§ 3.2.2 NTC2018)

Per determinare il parametro V_{30} e definire quindi la categoria di sottosuolo dell'area indagata (§ 3.2.2 NTC 2018) sono state eseguite in sito le indagini sismiche sopra descritte nel paragrafo precedente. Il valore di V_{30} si calcola attraverso la formula 3.2.1 delle NTC 2018:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_i \frac{h_i}{V_{si}}}$$

dove H è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Dall'elaborazione delle indagini sismiche MASW e HVSR si sono ottenuti i valori di $V_{s,30}$ e di frequenza naturale del terreno f_0 riportati nelle seguenti tabelle:

MASW	V_{s30}	212 m/s
-------------	-----------------------------	----------------

HVSR 21/05/2020	0.63 ± 0.26 HZ	RISPETTA I CRITERI SESAME
------------------------	--------------------------------------	----------------------------------

Pertanto, secondo la classificazione del sottosuolo imposta dal NTC 2018, si definisce il sottosuolo indagato come appartenente alla appartenente alla **categoria C**, corrispondente a

DEPOSITI DI TERRENI A GRANA GROSSA MEDIAMENTE ADDENSATI O TERRENI A GRANA FINA MEDIAMENTE CONSISTENTI CON PROFONDITÀ DEL SUBSTRATO SUPERIORI A 30 m, CARATTERIZZATI DA UN MIGLIORAMENTO DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE CON LA PROFONDITÀ E DA VALORI DI VELOCITÀ EQUIVALENTE COMPRESI TRA **180 m/s** E **360 m/s**.

4.3 Azione sismica e risposta sismica del sito – Risposta sismica locale

Per ottemperare ai riferimenti normativi citati l'analisi è stata svolta secondo quanto indicato al § 7.11.3 delle NTC 2018, attraverso analisi numerica monodimensionale in campo lineare equivalente. Per fare ciò è stato utilizzato come strumento di lavoro il software di calcolo STRATA (University of Texas - Austin).

Ai fini della restituzione degli spettri di accelerazione, relativi allo stato limite SLV, è stata svolta la verifica dell'amplificazione del sito mediante l'utilizzo di un modello simulato in campo lineare equivalente.

Utilizzando un modello lineare equivalente è possibile ottenere una soluzione di un modello non lineare, attraverso analisi lineari complete nelle quali al termine di ogni interazione vengono aggiornati i parametri di **rigidezza** e **smorzamento** che sono dipendenti dallo stato di deformazione del terreno. Attraverso un'iterazione di calcoli si raggiunge una convergenza prefissata a monte della fase di computazione.

Il software STRATA è in grado di valutare la risposta sismica di un deposito di terreno, considerando un profilo monodimensionale in cui si propagano linearmente le onde sismiche, in funzione dei parametri dinamici attribuiti al terreno. Il terreno viene schematizzato come un sistema di N strati orizzontali omogenei, isotropi e visco-elastici, sovrastanti un semispazio uniforme, attraversati da un treno di onde di taglio che incidono verticalmente le superfici. Ogni strato è descritto per mezzo dello spessore H , del modulo di taglio massimo G_{\max} o dalla corrispondente velocità massima V_{\max} , dal valore dello smorzamento D , dal peso dell'unità di volume γ e dalle curve di decadimento del modulo di rigidezza a taglio normalizzato ($G/G_0 - \gamma$) e le corrispondenti curve dello smorzamento ($D - \gamma$) con la deformazione di taglio γ . Il modello lineare visco-elastico fa riferimento al modello reologico di Kelvin-Voigt, costituito da una molla e uno smorzatore viscoso in parallelo. Tale modello è descritto quindi dalla rigidezza (**G**) e dallo smorzamento (**D**). L'onda monodimensionale viene descritta dall'equazione in cui lo spostamento provocato (u) è funzione della profondità (z) e del tempo (t):

$$u(z, t) = A \exp[i(\omega t + k^* z)] + B \exp[i(\omega t - k^* z)]$$

Nell'equazione appena presentata A e B rappresentano le corrispettive amplificazioni del tetto e della base dello strato considerato. Il fattore k^* risulta dipendente dal modulo di taglio (G), dal grado di smorzamento (D) e dalla densità del terreno (ρ). Le relazioni sono le seguenti:

$$k^* = \frac{\omega}{v_s^*}$$

$$v_s^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} \qquad G^* = G(1 - 2D^2 + i2D\sqrt{1 - D^2}) \simeq G(1 + i2D)$$

Dove G^* e v_s^* rappresentano il modulo di taglio e la velocità di taglio.

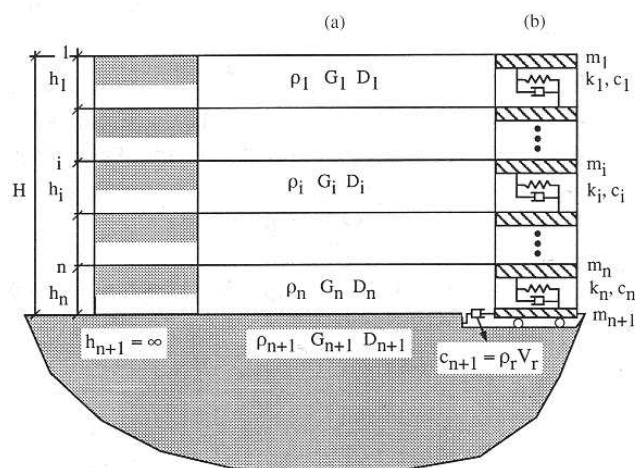


Fig.4.2 - Modello a strati continui adottato per la simulazione con il codice di calcolo STRATA.

MODELLO SIMULATO

Il modello simulato deriva dai dati ottenuti dalla prova geofisica che compone la campagna geognostica eseguita in sito. Tale profilo approssima il comportamento del sottosuolo, dal punto di vista sismico, in corrispondenza dell'area studiata. Il profilo considerato deriva dall'interpolazione dei dati provenienti dalle indagini geofisiche eseguite e i dati, di natura bibliografica, disponibili per il sito di riferimento.

Il profilo sismico del sottosuolo utilizzato per la modellazione della RSL deriva dall'elaborazione dell'indagine sismica passiva HVSR eseguita in sito, integrate con dati di bibliografia e indagini geognostiche precedentemente eseguite. Si illustra successivamente il modello utilizzato:

z (m)	Vs (m/s)	S (m)
0.0	90.0	1.00
1.00	130.0	7.00
8.00	180.0	10.00
18.00	200.0	12.00
30.00	220.0	18.00
48.00	300.0	50.00
98.00	350.0	75.0
173.00	500.0	17.10

Tab.4.2 – Modello ottenuto dall'elaborazione dell'indagine sismica HVSR.

Per descrivere il comportamento dinamico dei terreni costituenti il modello sono state considerate curve di decadimento dei moduli di rigidità e smorzamento, al variare della deformazione percentuale $\gamma(\%)$. Si riporta successivamente la curva di decadimento considerata per l'esecuzione del calcolo di risposta sismica locale:

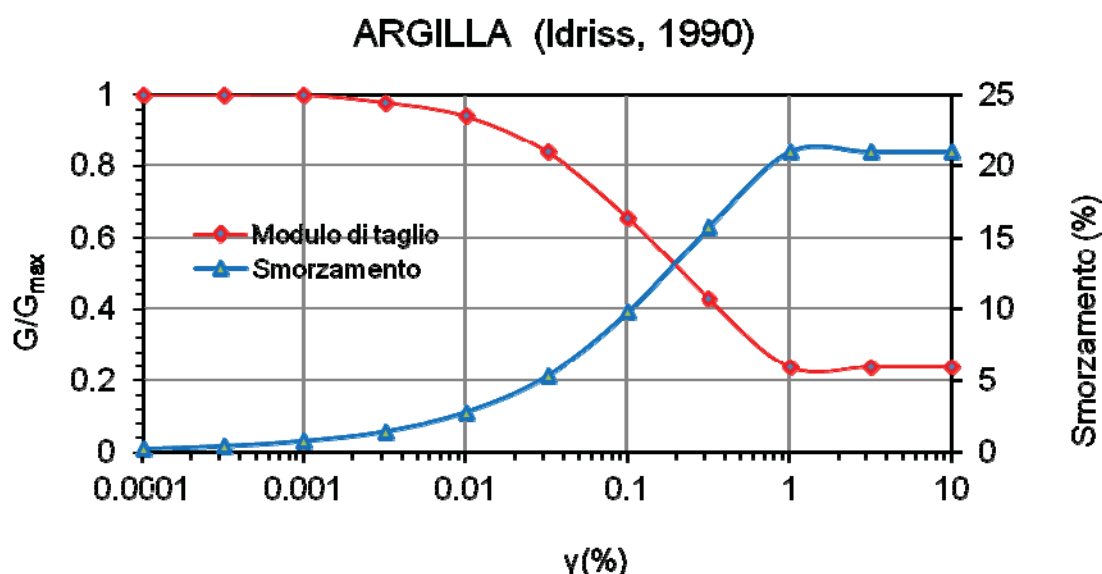


Fig.4.3 - Curva di decadimento dei moduli G/G_{max} e smorzamento D , utilizzati per descrivere il comportamento dei materiali coesivi che compongono il sottosuolo in oggetto.

In accordo con quanto esposto nella D.G.R. 630/19, l'analisi RSL in oggetto è stata svolta adottando come input sismico 3 accelerogrammi, corrispondenti allo stato limite SLV. I segnali di riferimento sono stati successivamente scalati per il valore di PGA_0 atteso al suolo rigido in corrispondenza dell'areale oggetto di analisi. Per fare ciò è stata considerata l'interpolazione spaziale dei valori di PGA_0 proposta da INGV per il territorio nazionale e resi disponibili per il territorio regionale sui punti di una griglia con passo 0.05 gradi.

Per il sito in oggetto tale valore è pari a **0.163g** considerando un valore di **$C_u = 1.00$** (Classe d'uso II) e **$V_n = 50$ anni** per ottenere un tempo di ritorno pari a 475 anni.

RISULTATI OTTENUTI

Sulla scorta delle verifiche svolte mediante software STRATA, in riferimento al modello considerato, è stato possibile definire, nel dominio delle frequenze, la funzione TF (Funzione di trasferimento) e rapporto spettrale di amplificazione associato. Per via grafica si inserisce successivamente la funzione di trasferimento TF ottenuta a seguito dell'analisi RSL in oggetto. Attraverso tale funzione è possibile definire il campo di frequenze entro il quale il sottosuolo, in corrispondenza del sito in oggetto, amplifica il segnale sismico, oltre che a quantificare l'amplificazione stessa.

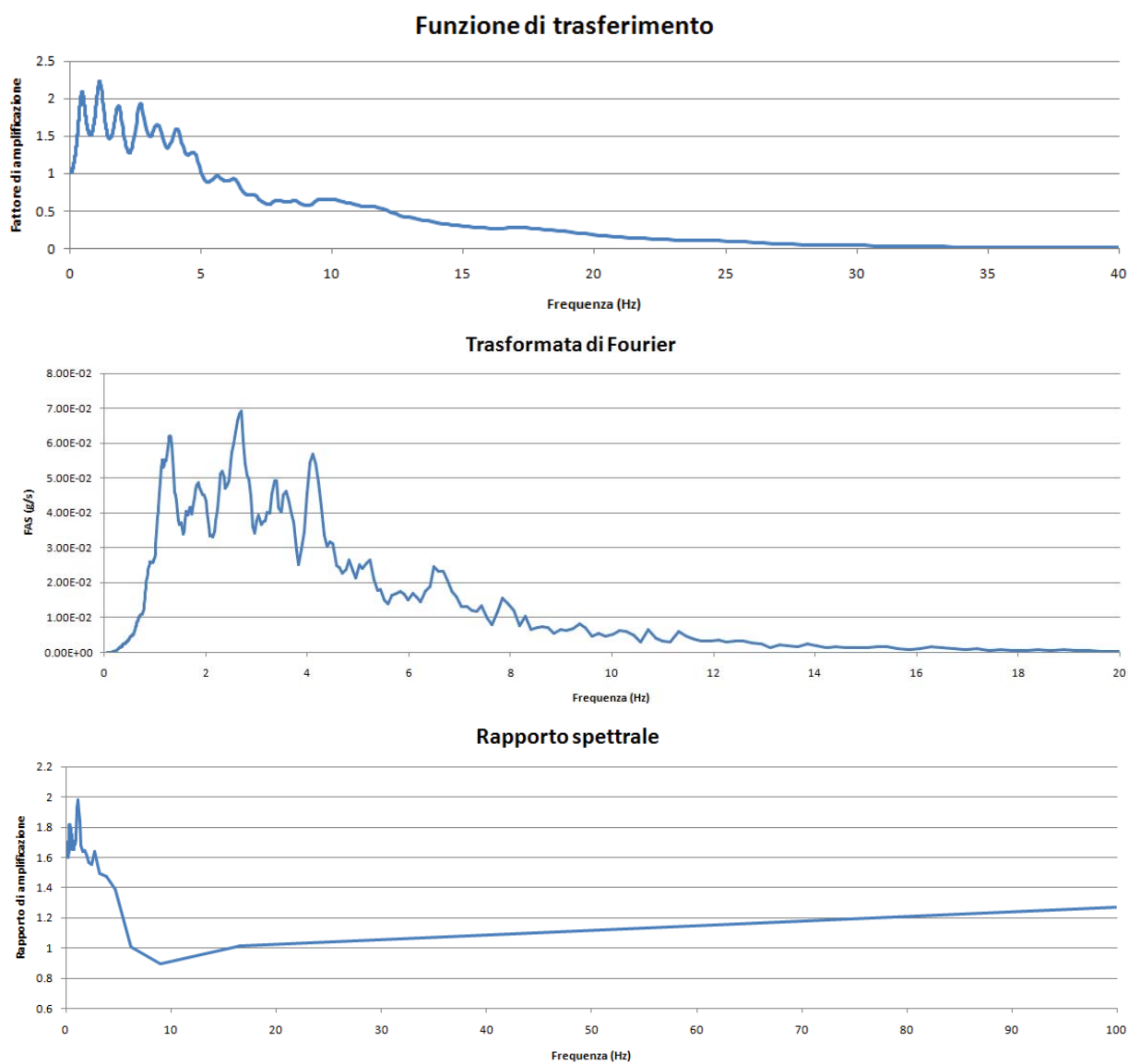
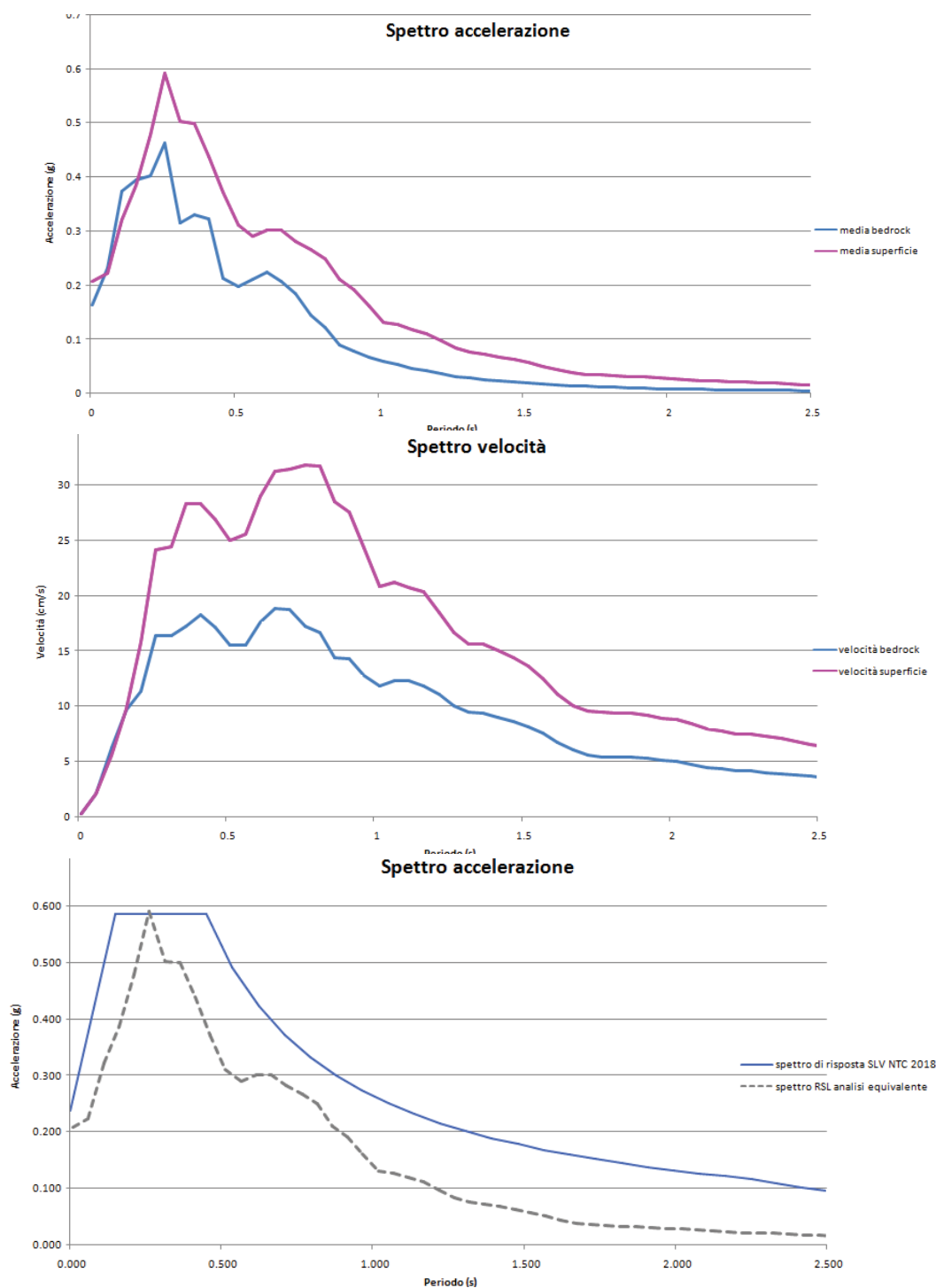


Fig.4.4 - Dall'alto: Funzione di Trasferimento, funzione FFT e rapporto spettrale di amplificazione.

Definiti i parametri che descrivono il comportamento del sottosuolo nel campo elastico lineare equivalente e descritti gli accelerogrammi su suolo rigido validi per il sito in oggetto, attraverso il software STRATA sono state definite le seguenti forme spettrali, in termini accelerazione e velocità alla superficie:



Periodo	PGA (median)	1.673333333333333	0.0383173897210342
0.01	0.20800870830493	1.72373737373737	0.0354486540372538
0.0604040404040404	0.223364278559881	1.774141414141414	0.034317872821737
0.110808080808081	0.321296683480725	1.824545454545454	0.0329406487694264
0.161212121212121	0.386221472682722	1.874949494949494	0.0319758988927828
0.211616161616162	0.478822626256167	1.925353535353535	0.030444134436575
0.262020202020202	0.591108041325493	1.975757575757578	0.0288868418976672
0.312424242424242	0.50183404196453	2.026161616161616	0.027804259208255
0.362828282828283	0.499270519184254	2.076565656565656	0.0260579464819274
0.413232323232323	0.438990671730809	2.126969696969697	0.0239030560669965
0.463636363636364	0.37133280583148	2.177373737373737	0.0227514286264427
0.514040404040404	0.311537007143656	2.227777777777778	0.021583211435665
0.564444444444444	0.290673404315151	2.278181818181818	0.0210200394365806
0.614848484848485	0.301513930206272	2.328585858585858	0.0201253033680742
0.665252525252525	0.301056583228331	2.378989898989899	0.0190838270268238
0.715656565656566	0.281577082150778	2.429393939393939	0.0179761755361505
0.766060606060606	0.266407861313594	2.479797979797979	0.0168495097441224
0.816464646464646	0.249180770896711	2.530202020202020	0.0159942163596313
0.866868686868687	0.210505548818131	2.580606060606060	0.015106657035448
0.917272727272727	0.192326444936986	2.631010101010101	0.0143321249718854
0.967676767676768	0.161102612931054	2.681414141414141	0.0138069984406721
1.01808080808081	0.131298136204229	2.731818181818181	0.0133572031965112
1.06848484848485	0.127191873137928	2.782222222222222	0.01294530113933
1.11888888888889	0.118705537191545	2.832626262626262	0.0127732230771049
1.16929292929293	0.111295039603033	2.883030303030303	0.012752152810431
1.21969696969697	0.0971765953312497	2.933434343434343	0.0124502030729462
1.27010101010101	0.0839608879092668	2.983838383838383	0.0117588302778711
1.32050505050505	0.0759410534665522	3.034242424242424	0.0110557209777641
1.37090909090909	0.0729066594270564	3.084646464646464	0.0105288280289938
1.42131313131313	0.0677925091114627	3.135050505050505	0.0102270373336327
1.47171717171717	0.0628020448505603	3.185454545454545	0.00998672942508319
1.52212121212121	0.0574141828212897	3.235858585858585	0.00969234767878658
1.57252525252525	0.0509436923515988	3.286262626262626	0.00941742126587023
1.62292929292929	0.0438810141060756	3.336666666666667	0.00920219608253025

Periodo	PGA (median)
3.38707070707071	0.00899429730128009
3.43747474747475	0.00859818572316153
3.48787878787879	0.0080625682772213
3.53828282828283	0.007526377517893
3.58868686868687	0.0071080657932298
3.63909090909091	0.00679372278033258
3.68949494949495	0.00652808213506871
3.73989898989899	0.00626517097898906
3.79030303030303	0.0059956830203786
3.84070707070707	0.00574661287946155
3.89111111111111	0.00559921898177873
3.94151515151515	0.00548346323479606
3.99191919191919	0.00539023285804268
4.04232323232323	0.00531121672303641
4.09272727272727	0.00521776458132171
4.14313131313131	0.00508216933646312
4.19353535353535	0.0049073334741197
4.24393939393939	0.00471897398249258
4.29434343434343	0.00453929647311624
4.34474747474748	0.0043785890227551
4.39515151515151	0.00423930984006619
4.44555555555556	0.00412004954717115
4.49595959595959	0.0040162910236727
4.54636363636364	0.00392054929773034
4.59676767676768	0.00382541764635052
4.64717171717172	0.00372811196772304
4.69757575757576	0.00363067262176554
4.74797979797979	0.00353646033563642
4.79838383838384	0.00344775767155424
4.84878787878788	0.00336559310398159
4.89919191919192	0.00328990421795114
4.94959595959596	0.0032197420992355
5	0.00315308114425462

Tab.4.5 – Valori di A_{max} ottenuti dallo studio di risposta sismica locale.

Come descritto nell'all. 2 della DGR 630/2019, la stima del fattore di amplificazione **FA** è stata calcolata considerando un tempo di ritorno $TR=475$ anni, con uno smorzamento $\zeta=5\%$, e relativi parametri rappresentativi dello scuotimento sismico, in particolare:

- accelerazione di picco orizzontale (PGA);
- intensità spettrale SA

$$SA = \int_{T_1}^{T_2} A(T, \zeta) dT$$

dove A è lo spettro di risposta in accelerazione, T è il periodo proprio e ζ è lo smorzamento; sono stati considerati quattro intervalli di periodo proprio T ottenendo quattro valori di intensità spettrale:

	T₁	T₂
SA1	0,1 s	0,5 s
SA2	0,4 s	0,8 s
SA3	0,7 s	1,1 s
SA4*	0,5 s	1,5 s

- intensità spettrale SI

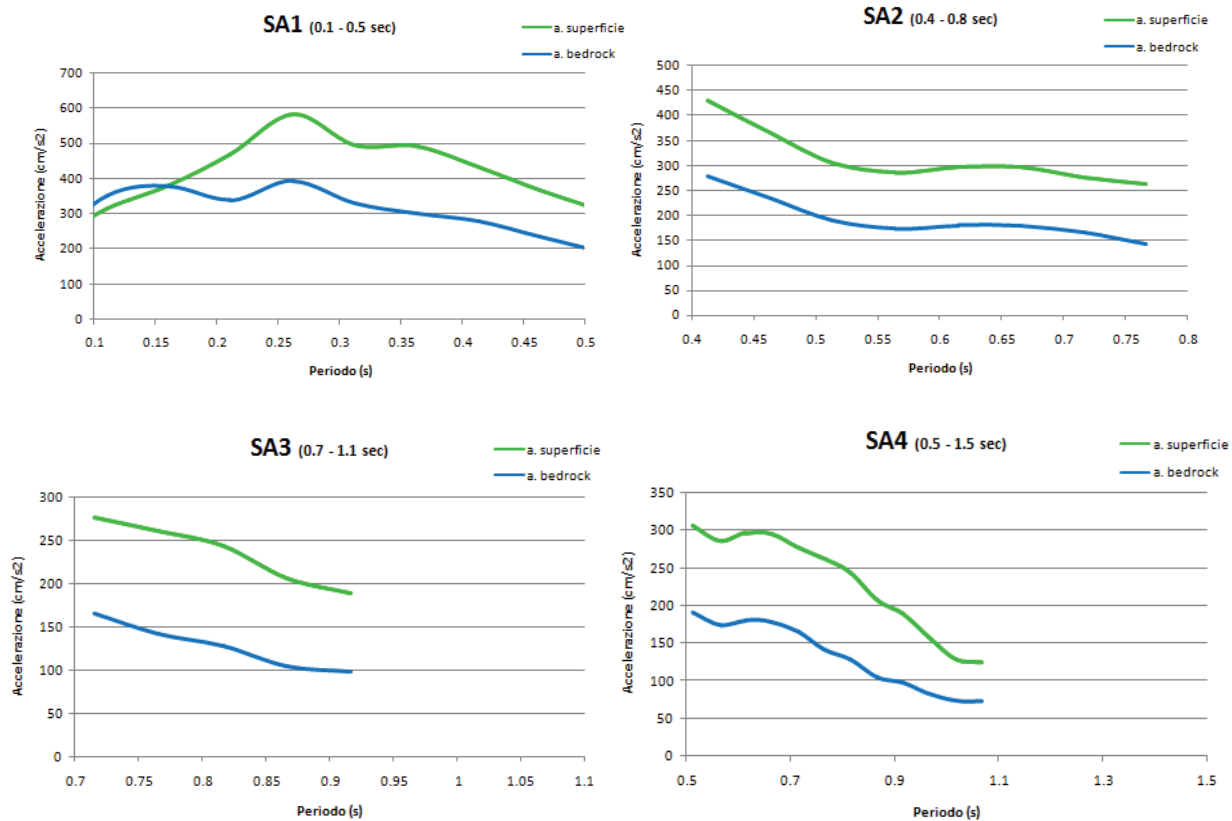
$$SI = \int_{T_1}^{T_2} V(T, \zeta) dT$$

dove V è lo spettro di risposta in velocità, T è il periodo proprio e ζ è lo smorzamento; sono stati considerati tre intervalli di periodo proprio T ottenendo tre valori di intensità

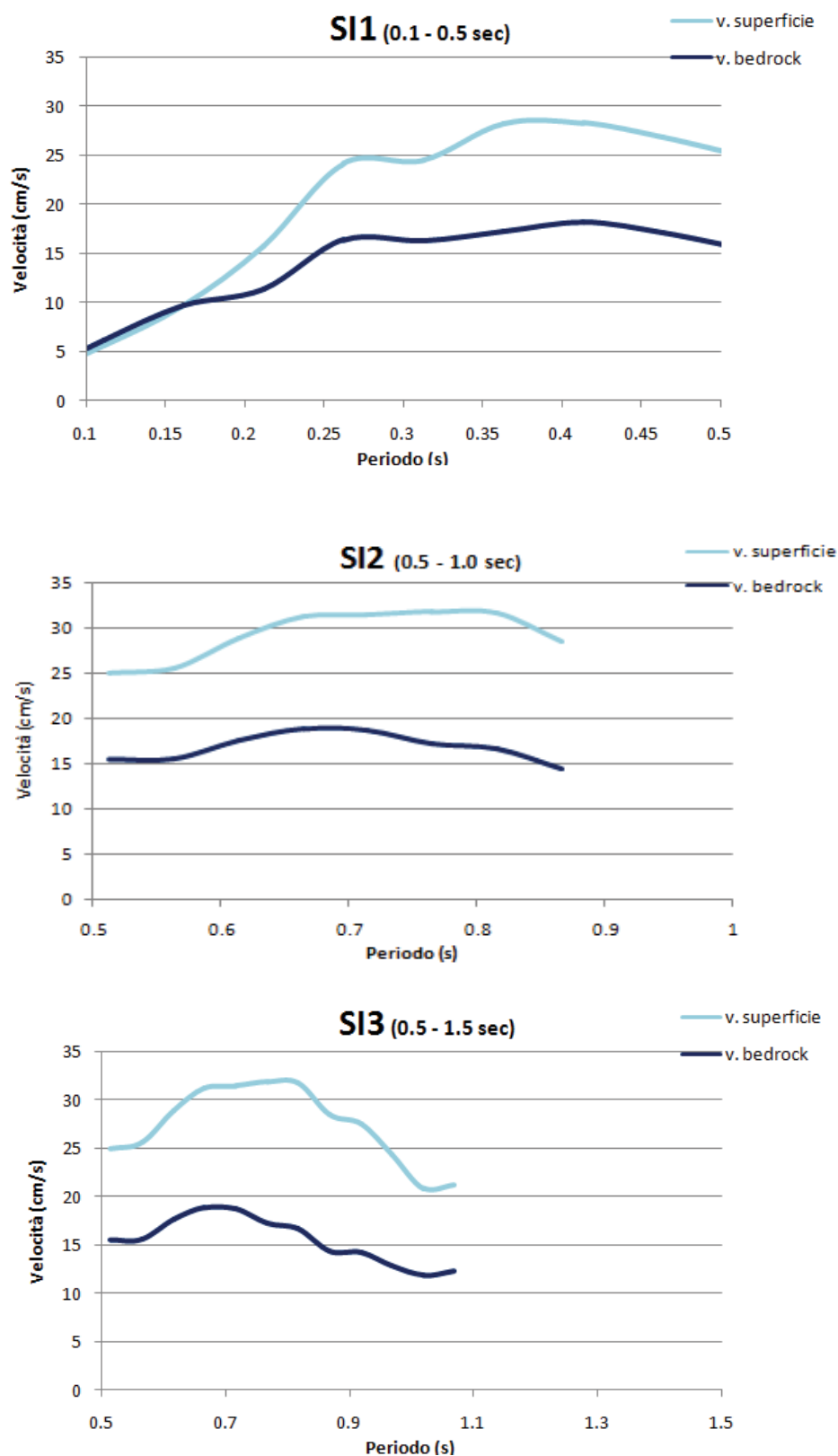
	T₁	T₂
SI1	0,1 s	0,5 s
SI2	0,5 s	1,0 s
SI3*	0,5 s	1,5 s

Di seguito si riportano i grafici degli spettri di risposta in accelerazione e velocità calcolati per l'area in studio.

SPETTRI DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE



SPETTRI DI RISPOSTA IN VELOCITÀ



Di seguito si riportano in tabella i FA:

Fattore di amplificazione	Periodo T (s)	FA
Fattore di Amplificazione SA1	$0.1s \leq T \leq 0.5s$	1.35
Fattore di Amplificazione SA2	$0.4s \leq T \leq 0.8s$	1.69
Fattore di Amplificazione SA3	$0.7s \leq T \leq 1.1s$	1.71
Fattore di Amplificazione SA4	$0.5s \leq T \leq 1.5s$	1.67

Tab.4.4 – Fattori di amplificazione SA1 –SA2 –SA3 – SA4.

Fattore di amplificazione	Periodo T (s)	FA
Fattore di Amplificazione SI1	$0.1s \leq T \leq 0.5s$	1.36
Fattore di Amplificazione SI2	$0.5s \leq T \leq 1.0s$	1.74
Fattore di Amplificazione SI3	$0.5s \leq T \leq 1.5s$	1.72

Tab.4.6 – Fattori di amplificazione SI1 –SI2 –SI3.

Infine si è calcolato il valore di H_{SM} , ovvero il parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto, dato dal prodotto del parametro Acceleration Spectrum Intensity (ASI_{UHS}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi $0.1 \leq T \leq 0.5$ s e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = \frac{ASI_{UHS}}{\Delta T} \times FA$$

I valori di $ASI_{UHS}/\Delta T$, calcolati per ogni punto della griglia INGV, sono riportati nel file all_4_coord.kmz disponibili nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, di seguito si riportano i valori della griglia INGV dell'area in studio.

La zona in studio presenta un valore di $ASI_{UHS}/\Delta T$ pari a **348**.



Fig.4.6 – Valori di ASI0105/ΔT per l'area in studio - griglia INGV.

Di seguito si riportano i valori di H_{SM} e H_{0408} , H_{0711} , H_{0515} ricavati, ovvero lo scuotimento in accelerazione (cm/s^2) atteso al sito per gli intervalli di periodi $0,4s \leq T \leq 0,8s$, $0,7s \leq T \leq 1,1s$ e $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

H_{SM}	Periodo T (s)
$H_{SM} = 471$	$0,1 s \leq T \leq 0,5s$
$H_{0408} = 588$	$0,4 s \leq T \leq 0,8s$
$H_{0711} = 598$	$0,7 s \leq T \leq 1,1s$
$H_{0515} = 581$	$0,5 s \leq T \leq 1,5s$

Tab.4.7 – Valori Hsm ottenuti per i diversi periodi.

Dai risultati sopra esposti dell'analisi di risposta sismica locale si ottiene un valore di accelerazione massima attesa al suolo del valore $PGA_{max} = A_{max} = 0.208g$ (per $T=0 s$).

4.4 Stabilità nei confronti della liquefazione (§ A2.2. DGR 630/2019)

In accordo con la normativa regionale DGR 630/19 si è proceduto alla verifica della liquefazione per la verticale di prova CPTU.

La valutazione del fenomeno della liquefazione viene svolta attraverso il calcolo del fattore di sicurezza di ciascun livello che compone il sottosuolo analizzato nei confronti del fenomeno stesso. Il fattore di sicurezza è derivato secondo la seguente formulazione:

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

Dove:

CRR è rappresentato dal rapporto di resistenza ciclica

MSF rappresenta il fattore di scala della magnitudo che è funzione della magnitudo stessa, della PGA e del valore di CRR

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

CSR è il rapporto di tensione ciclica, ovvero la tensione di taglio indotta dall'azione sismica, normalizzata rispetto alla tensione verticale efficace. Tale parametro è derivabile secondo la seguente formulazione:

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \cdot \frac{a_{maxs}}{g} \cdot \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \cdot r_d$$

I termini che compongono la seguente relazione sono rappresentati da a_{max}/g che descrive il valore dell'accelerazione orizzontale a $T = 0.00$ s, il rapporto della tensione litostatica totale ed efficace, e il coefficiente riduttivo r_d . Quest'ultimo, in accordo con la predetta normativa è stato stimato secondo la seguente formulazione:

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

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

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

dove M rappresenta il valore di magnitudo di riferimento per il sito in analisi.

Il valore **CRR** è stato ricavato attraverso la metodologia di calcolo proposta da **Boulanger&Idriss 2014**. Per le specifiche della procedura di calcolo adottata si faccia riferimento all'allegato **A2.2** della DGR 630/2019 della Regione Emilia Romagna. L'analisi di liquefazione è stata eseguita entro i -20.00 m rispetto al piano campagna come prescritto dalla normativa di riferimento.

Le verifiche sono state svolte considerando una magnitudo di riferimento $M = 6.14$ (derivante dalla zonazione sismogenetica) e una accelerazione massima al suolo $A_{max} = 0.208g$ (Risposta sismica locale).

A seguito dell'identificazione del fattore di sicurezza F_L è stato determinato l'indice potenziale di liquefazione IL (LPI) attraverso il quale è possibile definire l'esposizione del sito al rischio di liquefazione. Il potenziale di liquefazione LPI è stato determinato secondo la seguente formulazione:

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

Dove $F(z)$ viene determinato secondo le formulazioni proposte da Somnez (2003)

$$\begin{array}{ll} F(z) = 0 & \text{per } F_L \geq 1.2 \\ F(z) = 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18.427 \cdot F_L) & \text{per } 1.2 > F_L \geq 0.95 \\ F(z) = 1 - F_L & \text{per } F_L \leq 0.95 \end{array}$$

In base al valore di LPI ottenuto è possibile fornire un'indicazione del rischio di liquefazione. In considerazione delle linee guida emesse dalla Regione Emilia Romagna, a seguito degli eventi sismici di Maggio e Giugno 2012, si considera la classificazione di rischio definita da **Sonmez 2003**:

INDICE DI LIQUEFAZIONE	Rischio di liquefazione
LPI=0	Nulla
0<LPI≤2	Basso
2<LPI≤5	Moderato
5<LPI≤10	Alto
15>LPI	Molto alto

Si illustra successivamente il valore di LPI derivato dalla verticale di prova CPTu considerando un'accelerazione massima al suolo $A_{max} = 0.208g$ (calcolata secondo RSL), la soggiacenza **della falda freatica è stata considerata alla profondità $D_w = -2.30$ m (in data 21/05/2020)** e una magnitudo di riferimento pari a $M=6.14$.

A seguito della verifica, in riferimento alla verticale CPTu, è stato ottenuto il seguente valore di LPI:

INDAGINE	INDICE DI LIQUEFAZIONE	RISCHIO
CPTU	0.032	BASSO

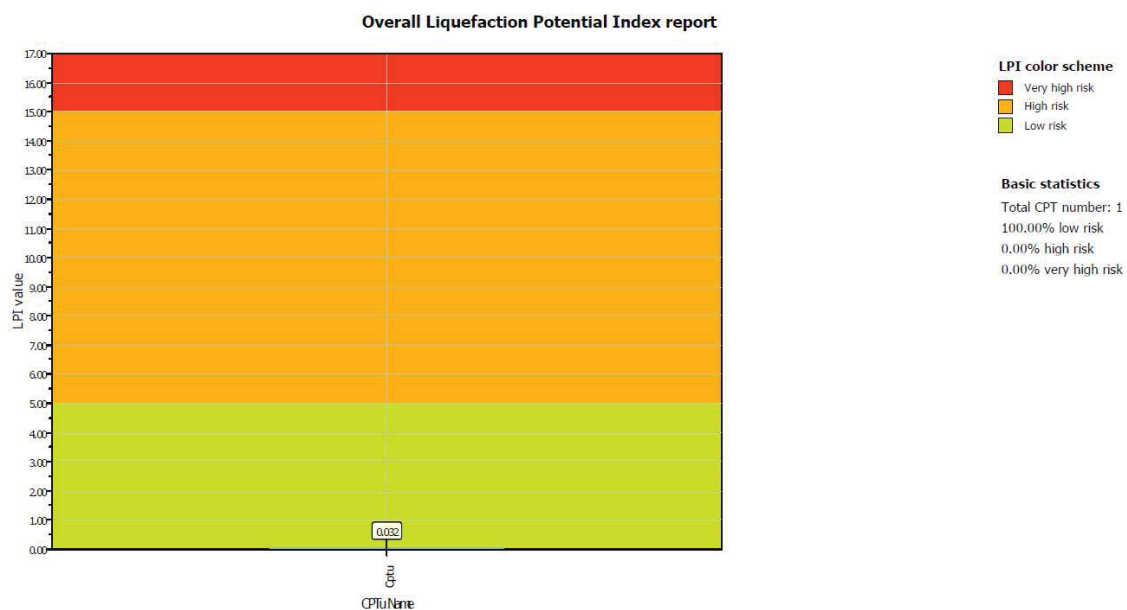


Fig.4.8 – Indice di liquefazione dalla prova CPTU.

4.5 Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica (§ B. DGR 630/2019)

Per cedimento si intende l'abbassamento del piano campagna, ovvero la sommatoria dei prodotti della deformazione verticale media per lo spessore di ciascuno degli strati deformati.

Il cedimento post sismico può essere dovuto a terreni granulari saturi, insaturi e a terreni coesivi soffici; tali cedimenti vengono stimati con la seguente equazione:

$$s = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{vi} \cdot \Delta z_i$$

ε_{vi} = deformazione volumetrica;

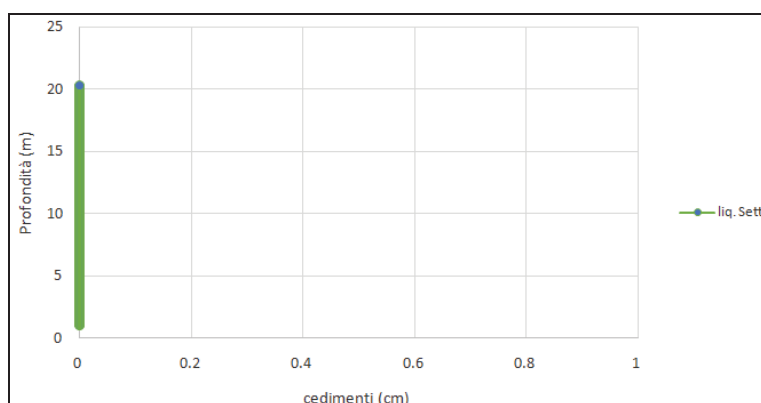
Δz_i = spessore dello strato i-esimo.

I cedimenti conseguenti a liquefazione di terreni granulari saturi hanno luogo immediatamente dopo il terremoto o comunque in un tempo non superiore a un giorno, i cedimenti per densificazione di terreni granulari insaturi avvengono durante lo scuotimento sismico, mentre i cedimenti per consolidazione di terreni coesivi soffici possono richiedere tempi anche molto lunghi in funzione delle condizioni stratigrafiche e geotecniche.

Il calcolo dei cedimenti post sismici in terreni incoerenti in condizioni sature e insature, eseguiti per la verticale CPTU ha evidenziato quanto segue:

CEDIMENTO IN TERRENI INCOERENTI SATURI – (Liq. Seattle)	0.00 cm
CEDIMENTO IN TERRENI INCOERENTI INSATURI – (Dry. Seattle)	0.0 cm

Si riportano di seguito i valori calcolati dei cedimenti post sismici in terreni incoerenti sia in saturi (Liq. settlement) che insaturi (Dry settlement) per la verticale eseguita.



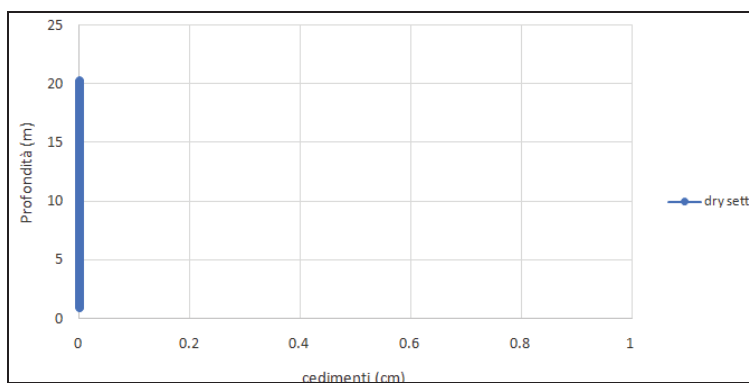


Fig.4.9 –Cedimenti post sismici in terreni incoerenti saturi (Liquef. Seattlement) e in terreni incoerenti insaturi (Dry seattlement) eseguiti per la prova CPTU.

La stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica nei terreni soffici ($V_s \leq 180$ m/s) non è stata eseguita, in quanto dal modello sismico adottato non evidenzia strati con velocità inferiori di 180 m/s, ad eccezione del primo strato di riporto.

5 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel mese di maggio 2020 è stato eseguito il presente elaborato al fine di verificare le condizioni di edificabilità e di pericolosità sismica dell'area.

Si fornisce per il terreno di fondazione indagato il modello geotecnico medio riportato nel § 3.3 della presente relazione.

La caratterizzazione sismica del sito è stata condotta sulla base di indagini geofisiche di tipo MASW e HVSR eseguita nel sito in studio (§ 4.2), tali prove, hanno permesso di determinare che la velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m di profondità $V_{s30} = 212 \text{ m/s}$. Sulla base delle NTC 2018, e tenendo conto dell'indagine sismica sopraccitata, si classifica il terreno di fondazione in oggetto come appartenente alla **categoria C**, corrispondente a: DEPOSITI DI TERRENI A GRANA GROSSA MEDIAMENTE ADDENSATI O TERRENI A GRANA FINA MEDIAMENTE CONSISTENTI CON PROFONDITÀ DEL SUBSTRATO SUPERIORI A 30 m, CARATTERIZZATI DA UN MIGLIORAMENTO DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE CON LA PROFONDITÀ E DA VALORI DI VELOCITÀ EQUIVALENTE COMPRESI TRA **180 m/s** E **360 m/s**.

Per la definizione dell'azione sismica del sito è stata eseguito uno studio di risposta sismica locale (§ 4.3). Dall'analisi così eseguita si sono ottenuti i seguenti risultati:

ag	RSL	
	F.A.	A_{max}
0.163g	1.28	0.208g

È stata eseguita la verifica della suscettibilità al fenomeno della liquefazione sulla base della prova penetrometrica CPTU eseguita in sito, considerando una accelerazione massima al suolo $A_{max} = 0.208g$ (calcolata dal terzo livello di risposta sismica locale DGR 630/2019), la soggiacenza della falda freatica alla profondità **Dw=-2.30 m da p.c.** (in data 21/05/2020), e una **magnitudo di riferimento** pari a **M=6.14**. Dall'analisi della suscettibilità nei confronti del fenomeno della liquefazione così eseguita si è ottenuto un valore di LPI corrispondente a un **rischio di liquefazione basso** (§ 4.4).

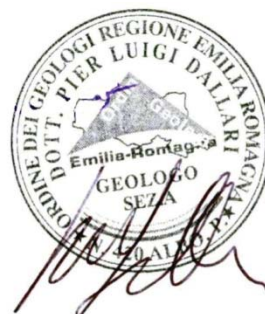
Sono stati inoltre calcolati i cedimenti indotti dall'azione sismica (§ 4.5).

In generale, dalla consultazione dei dati bibliografici, dalle cartografie e dalle caratteristiche geologico-stratigrafiche geotecniche e sismiche dell'area in studio, non si sono riscontrati elementi ostativi che possano compromettere l'intervento in progetto.

A disposizione per ulteriori chiarimenti, cogliamo l'occasione per porgere cordiali saluti.

Modena, 25 maggio 2020

Dott. Geol. Pier Luigi Dallari

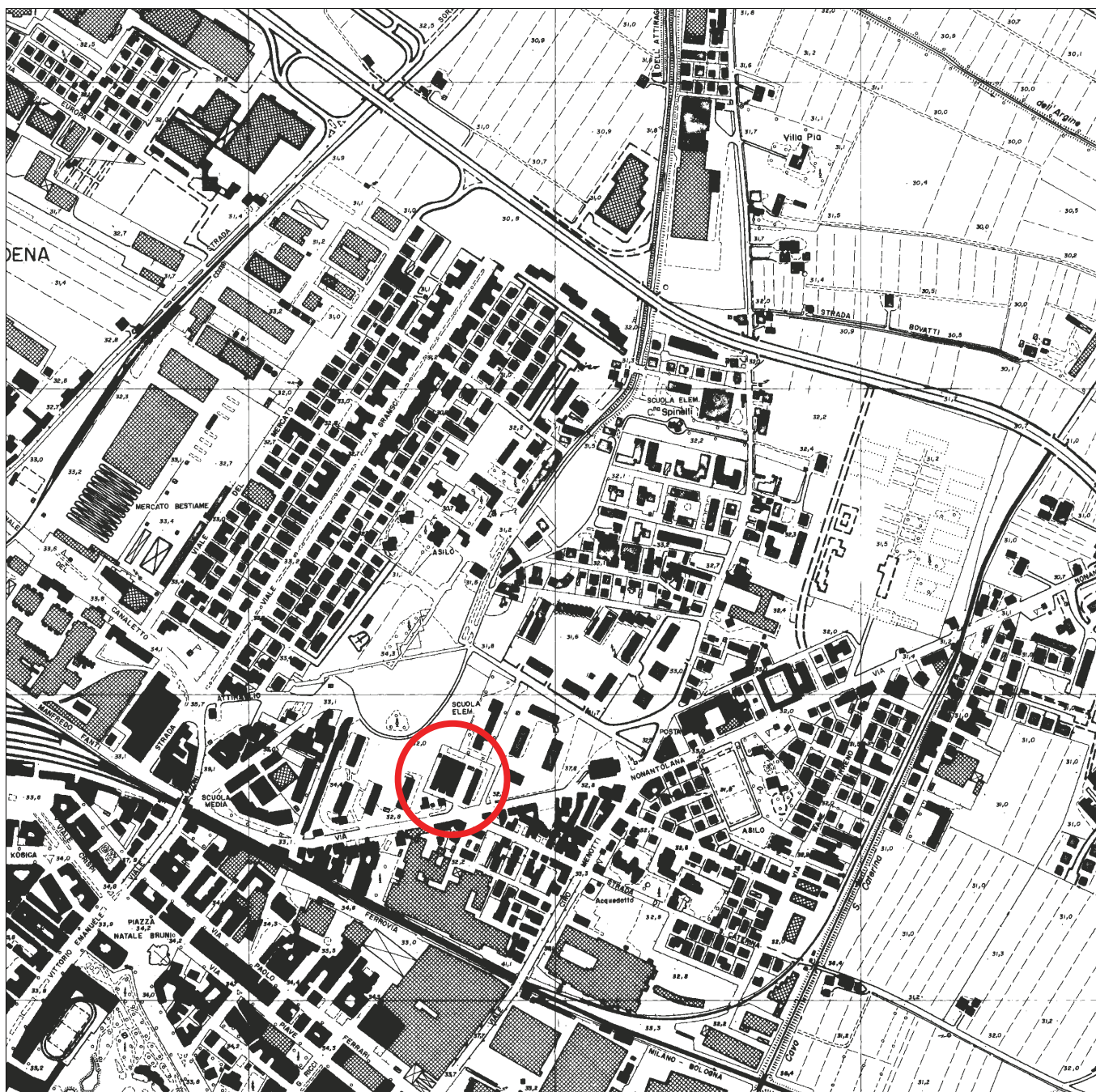


Tavole

GEO GROUP s.r.l.

Indagini geognostiche, geofisiche e consulenze geologiche e geotecniche
182, via C. Costa 41100 Modena - Tel. 059/3967169 - Fax. 059/5332019- E-mail: geo.group@libero.it

Sezione C.T.R. n. 201120 *Modena nord-est*



Tav. n. 1 “Carta topografica”

Scala 1: 10000



Area di interesse

GEO GROUP s.r.l.

Indagini geognostiche, geofisiche e consulenze geologiche e geotecniche
182, via C. Costa 41100 Modena - Tel. 059/3967169 - Fax. 059/5332019- E-mail: geo.group@libero.it



Tav. n. 2 “Ripresa fotografica generale dell’area di interesse”

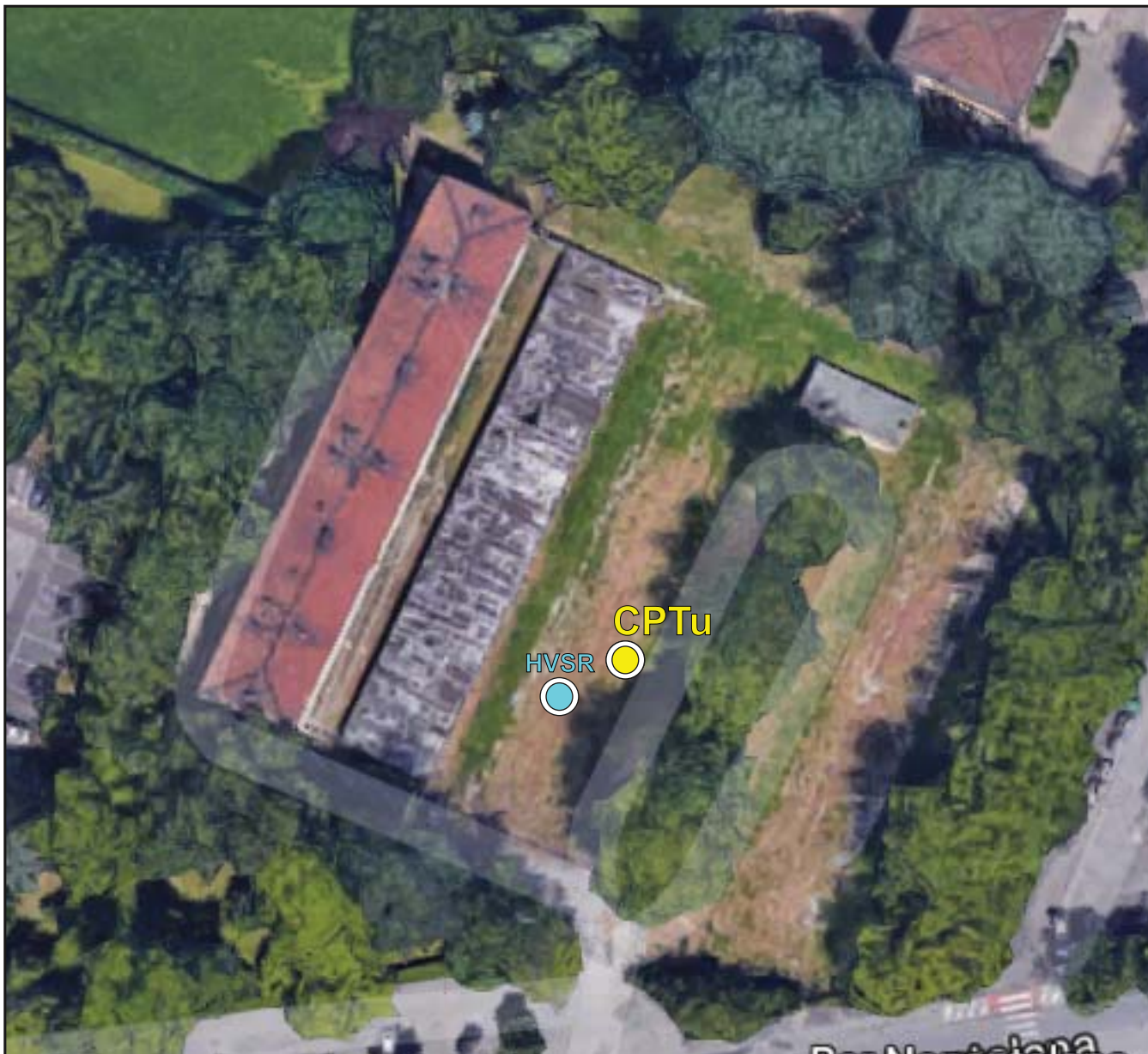
(tratta da “Google Earth”)
Scala grafica



Area oggetto di studio

GEO GROUP S.r.l.

Indagini geognostiche, geofisiche e consulenze geologiche e geotecniche
182, via C. Costa 41123 Modena - Tel. 059/3967169 - Fax. 059/5960176 - E-mail: info@geogroupmodena.it



Tav. n. 3 “Ubicazione indagini geognostiche”

(tratta da “Google Maps”)

Scala grafica



Legenda



Prova penetrometrica statica CPT



Indagine sismica HVSr

ALL.1

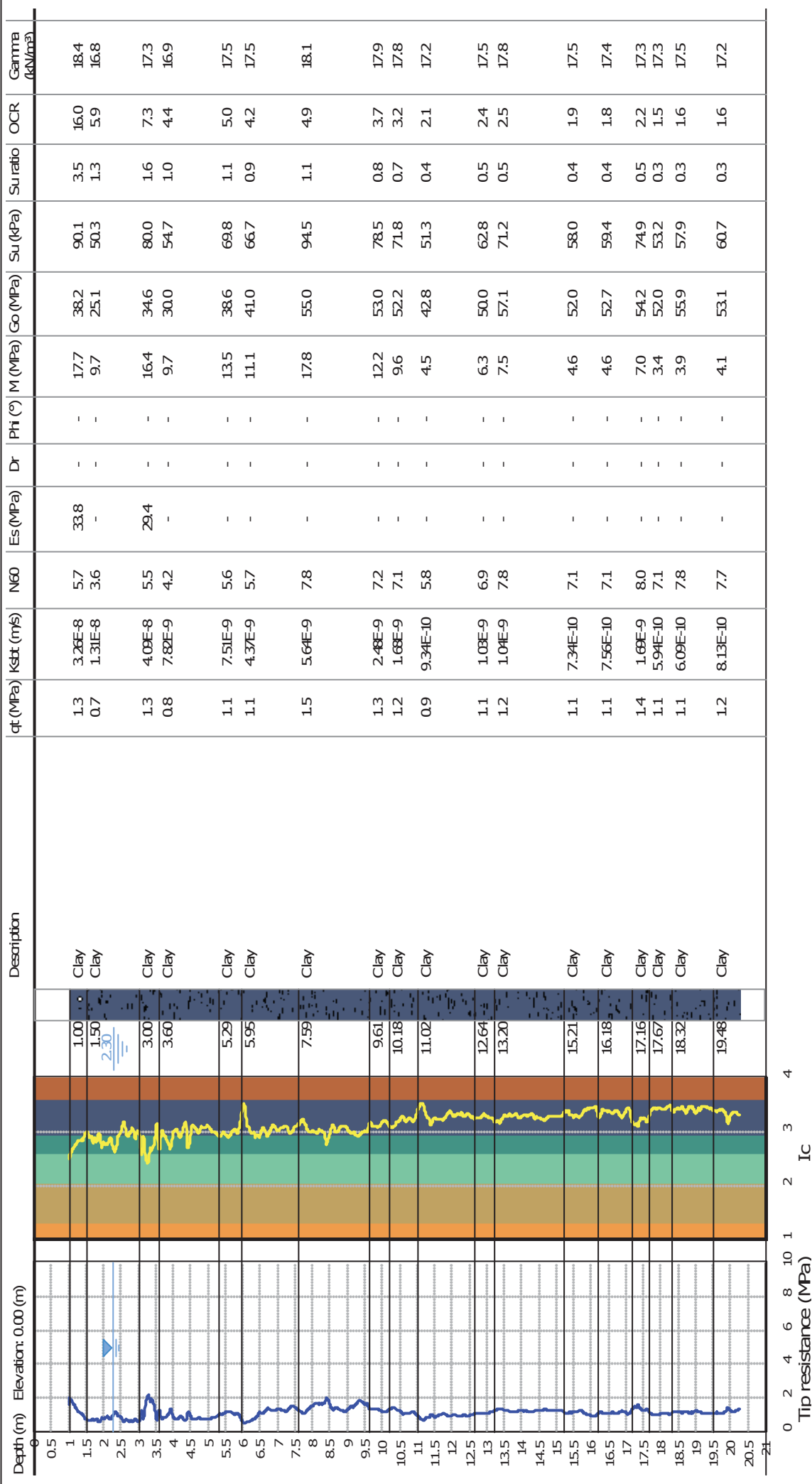
Prova penetrometrica statica CPTu

Project:

Location:

CPT: CPTU

Total depth: 20.28 m, Date: 21/05/2020

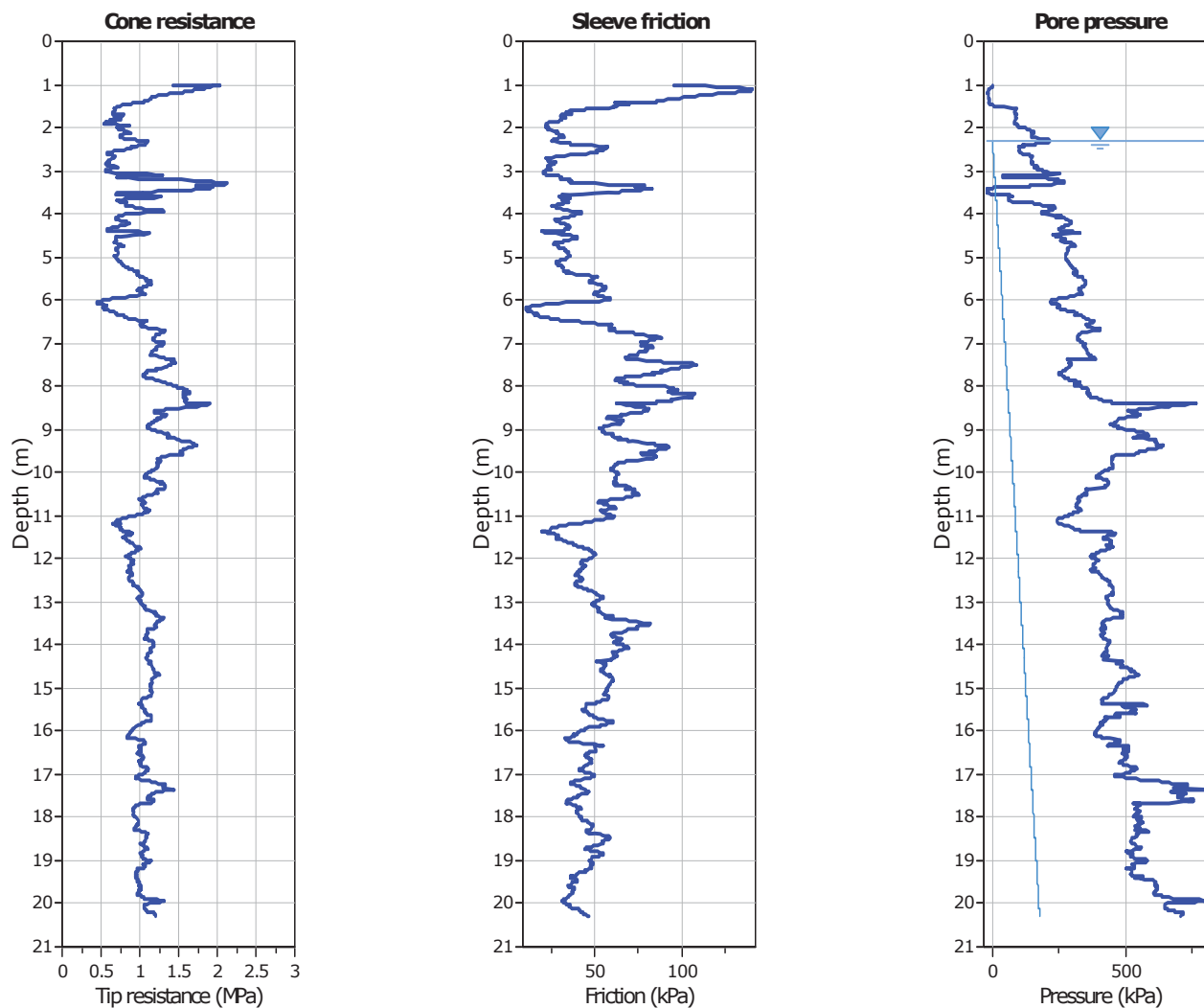


Project:

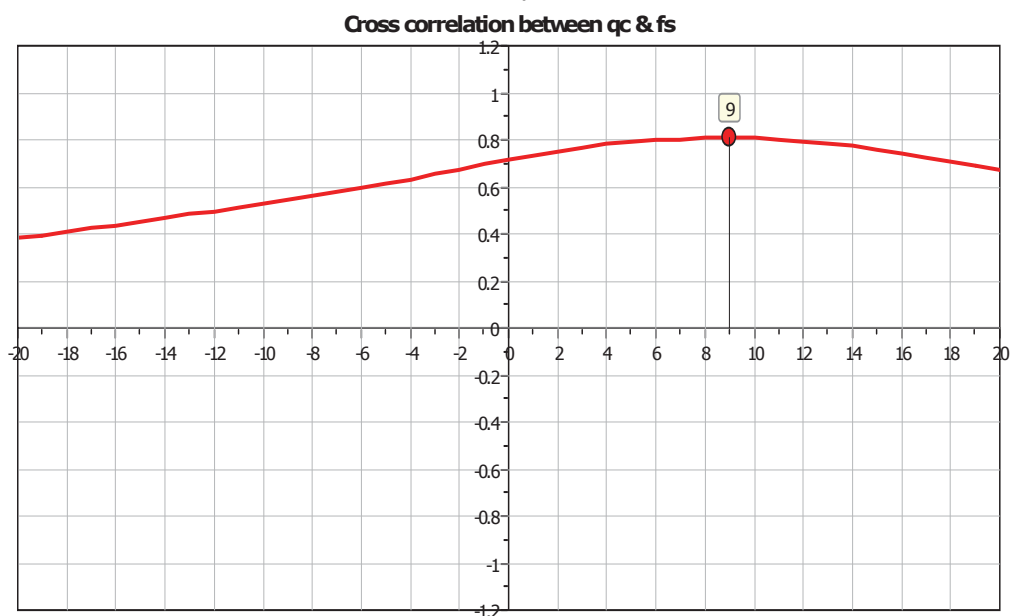
Location:

CPT: CPTU

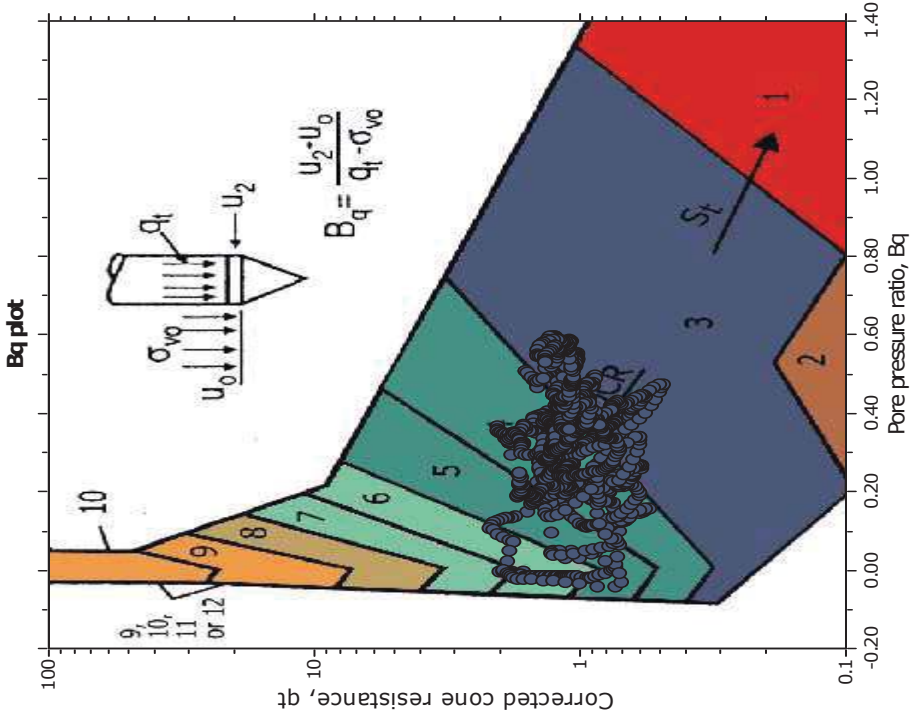
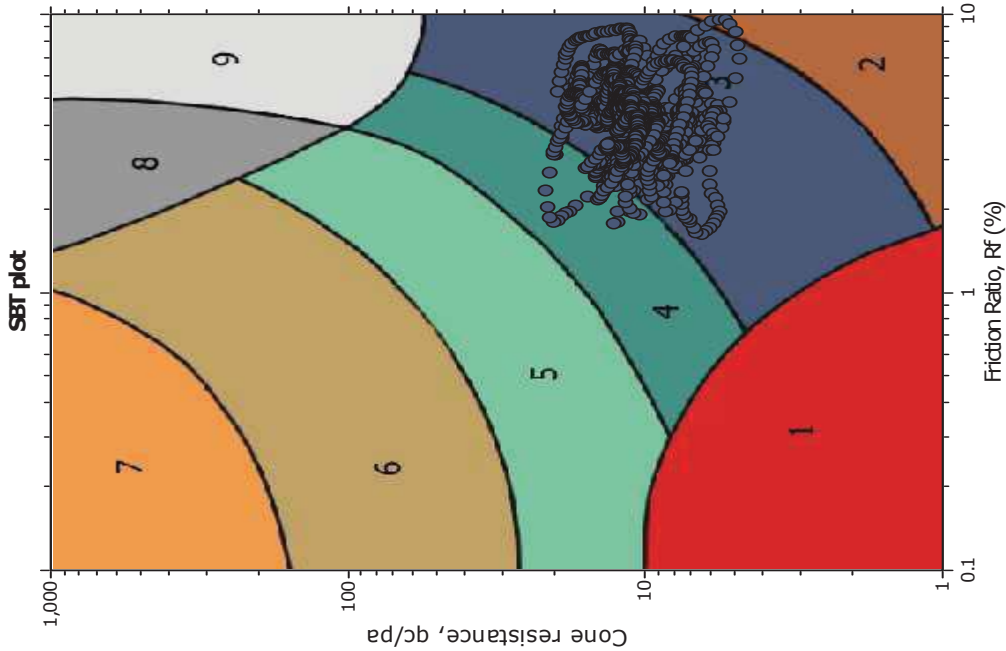
Total depth: 20.28 m, Date: 21/05/2020



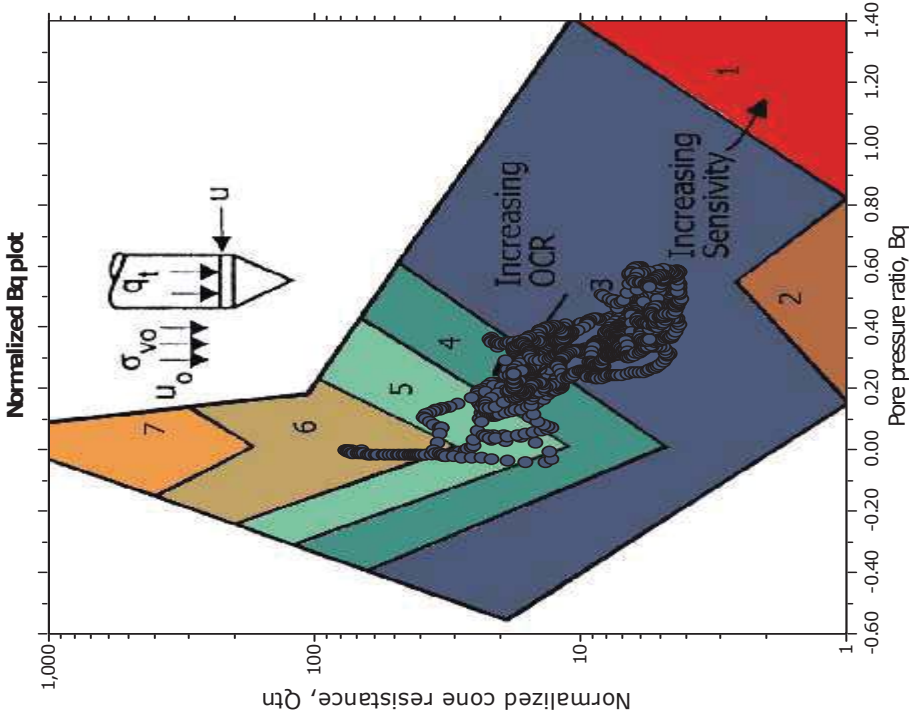
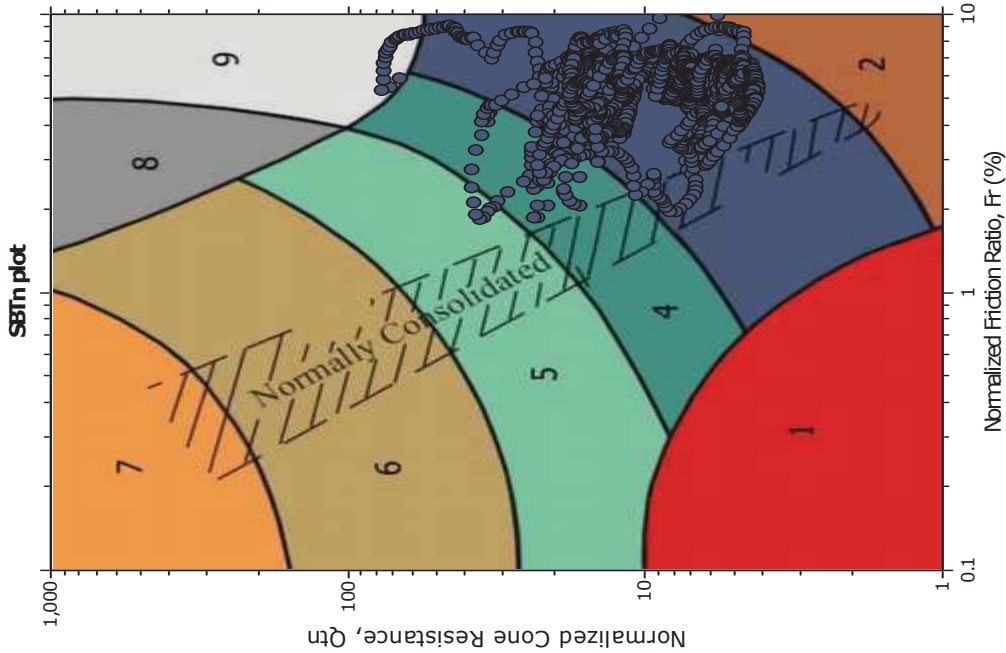
The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



SBT - Bq plots



SBT - Bq plots (normalized)

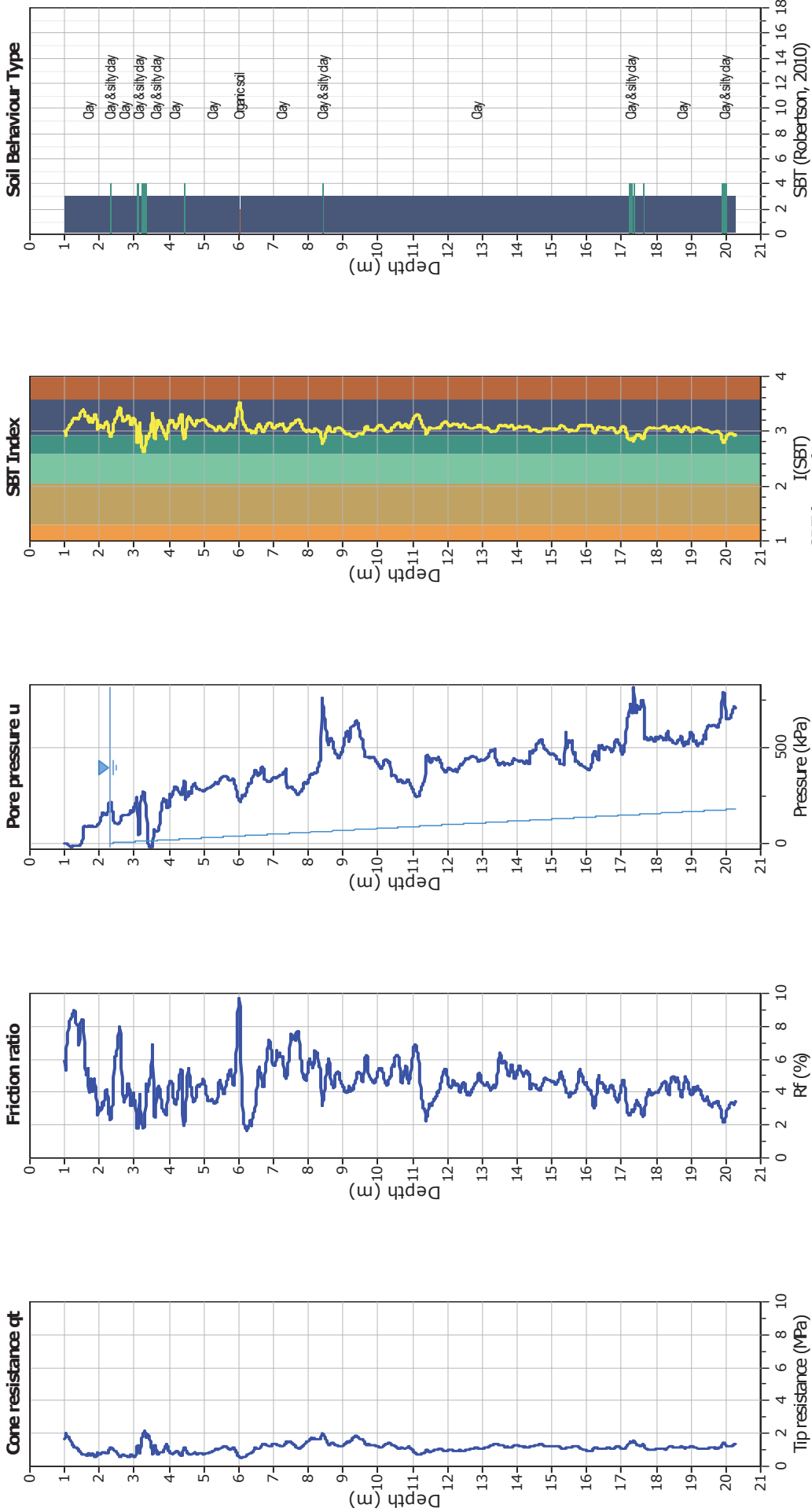


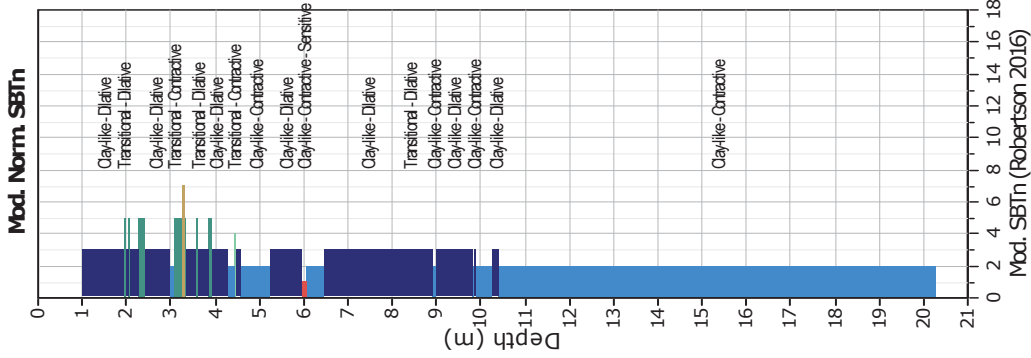
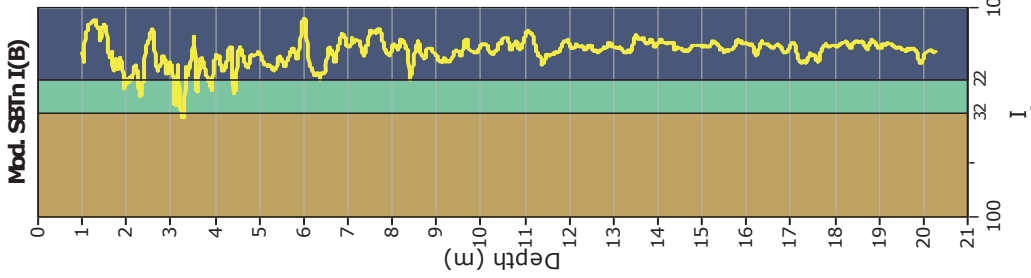
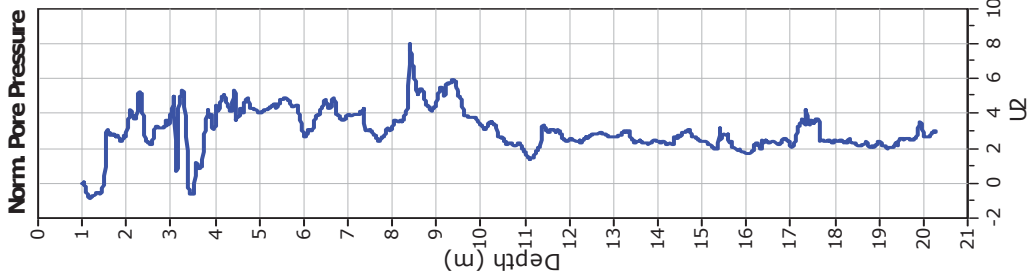
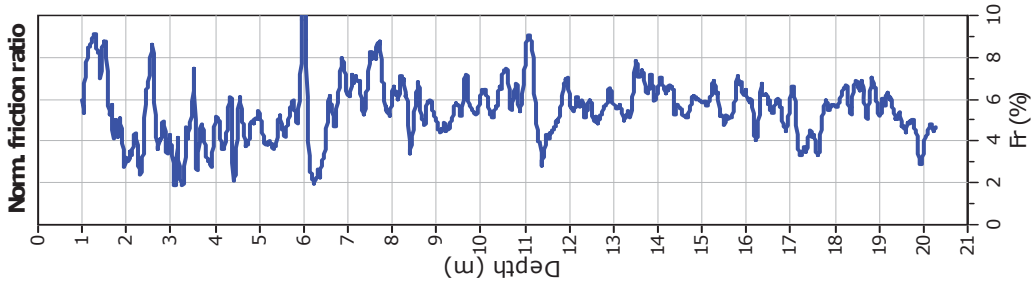
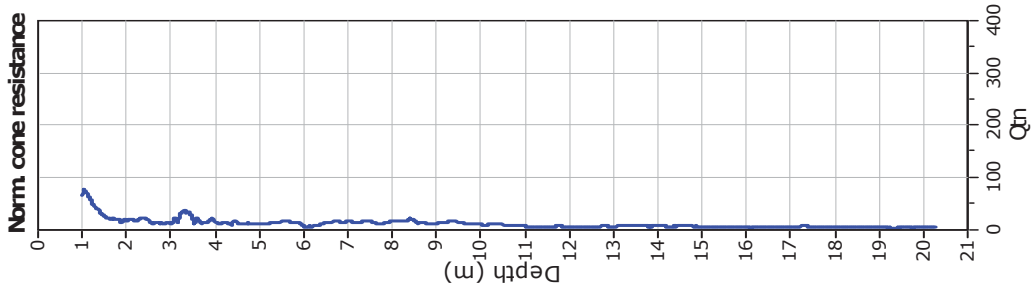
Project:

Location:

CPT: CPTU

Total depth: 20.28 m, Date: 21/05/2020

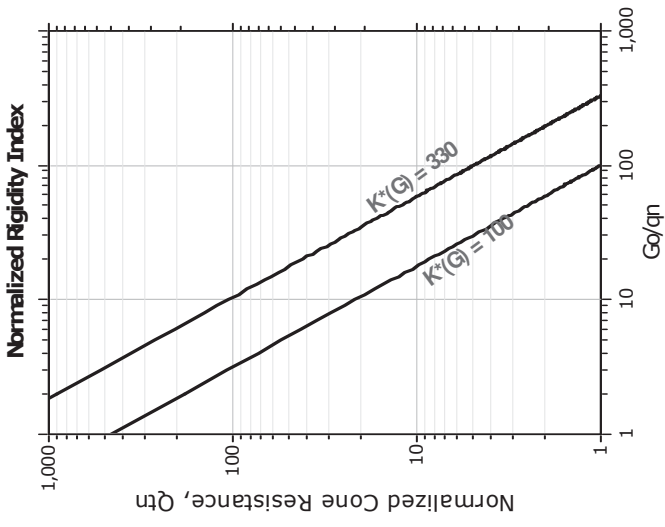
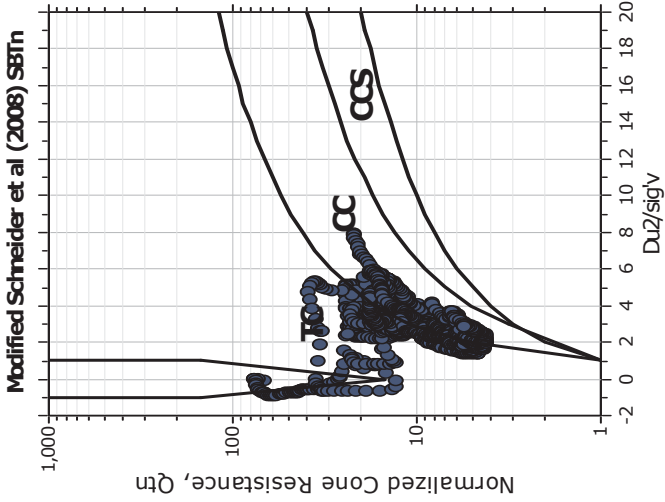
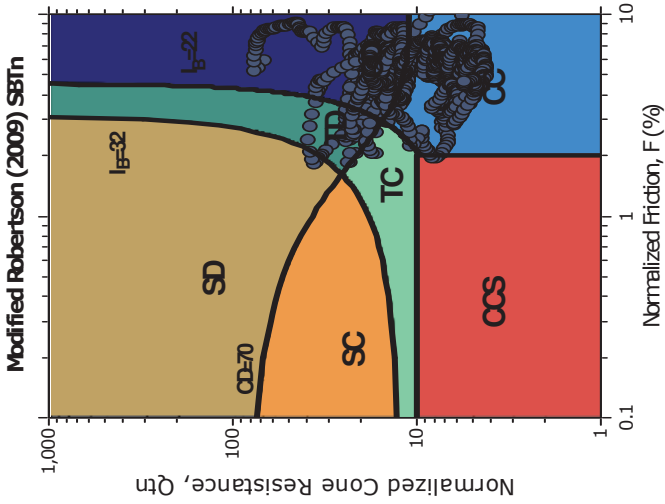




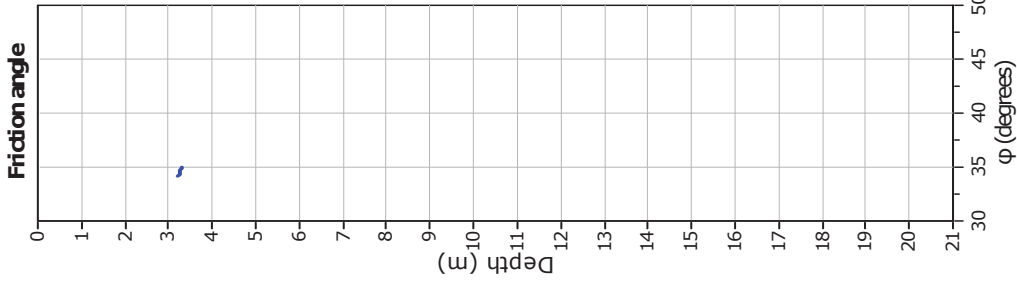
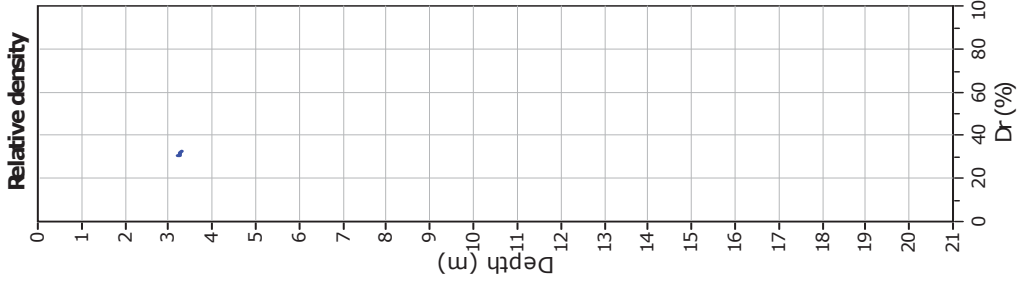
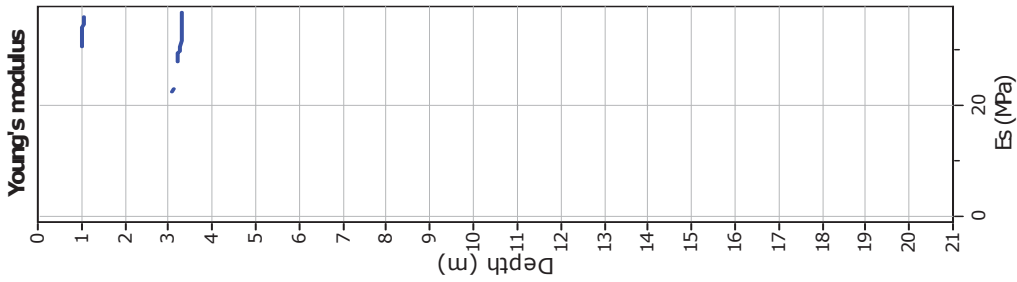
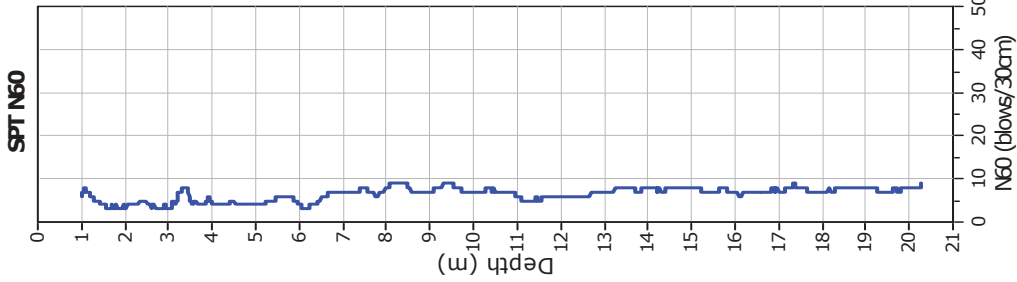
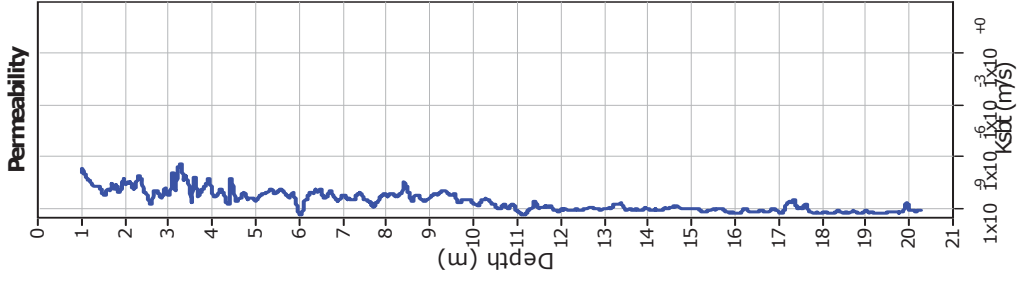
Mod. SBTn legend

- 1. CCS: ClayLike - Contractive, Sensitive
- 2. CC: Clay-like - Contractive
- 3. CD: Clay-Like: Dilative
- 4. TC: Transitional - Contractive
- 5. TD: Transitional - Dilative
- 6. SC: Sand-like - Contractive
- 7. SD: Sand-like - Dilative

Updated SBTn plots

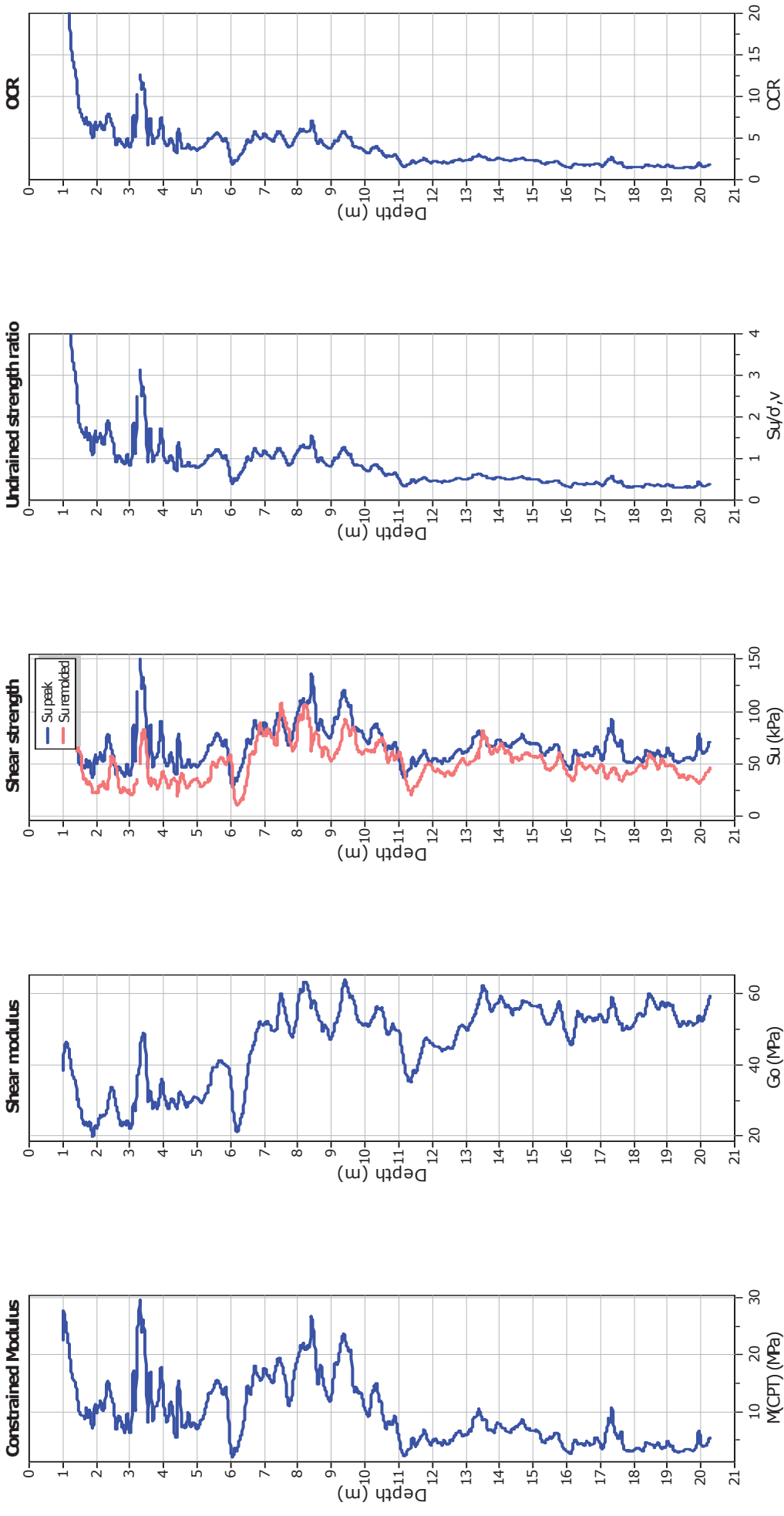


$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure
(e.g. age/cementation)



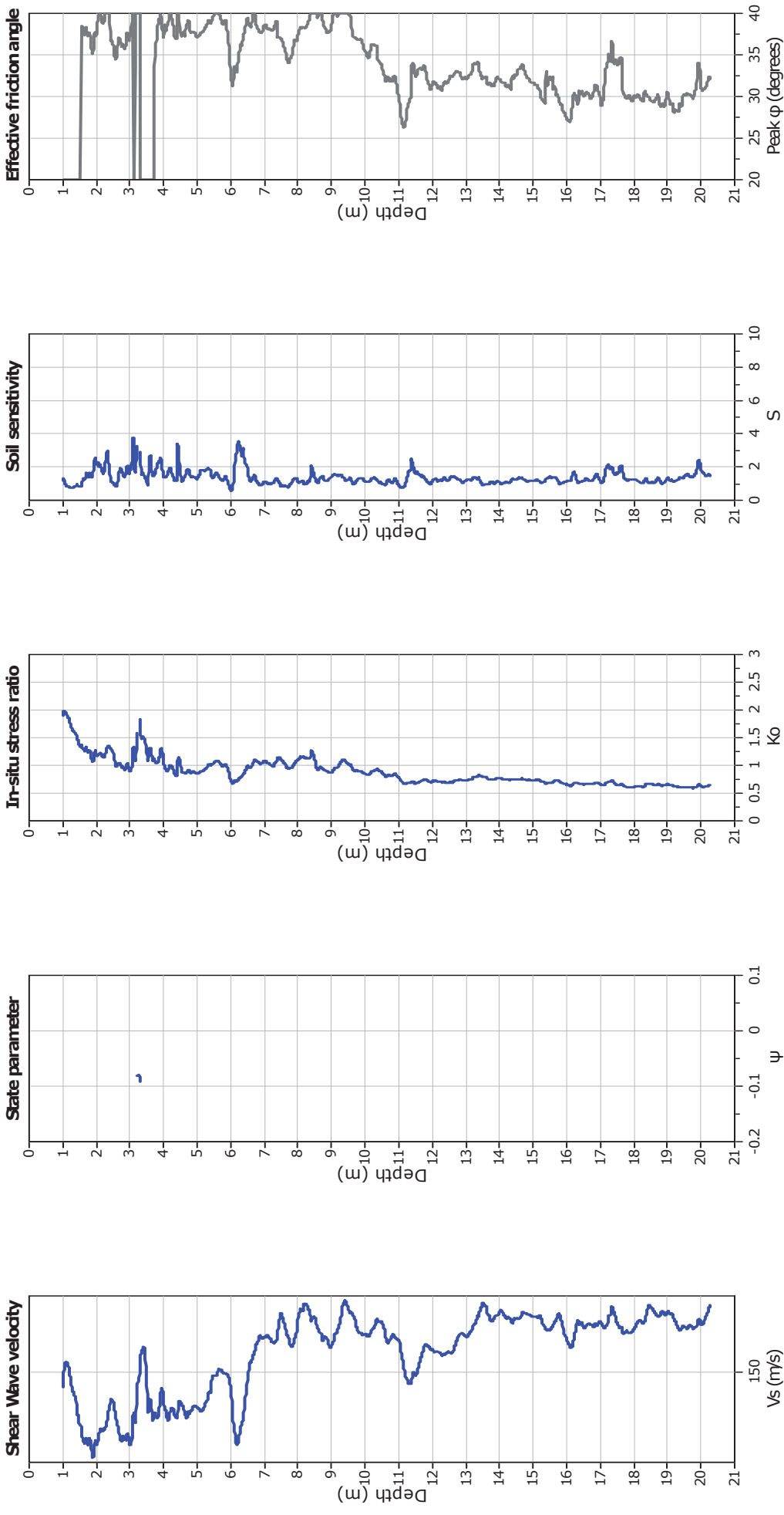
Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n
SPT N_{60} : Based on I_c and q_t
Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009) ● — User defined estimation data
Relative desnisty constant, C_{Dr} : 350.0
Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)



Calculation parameters

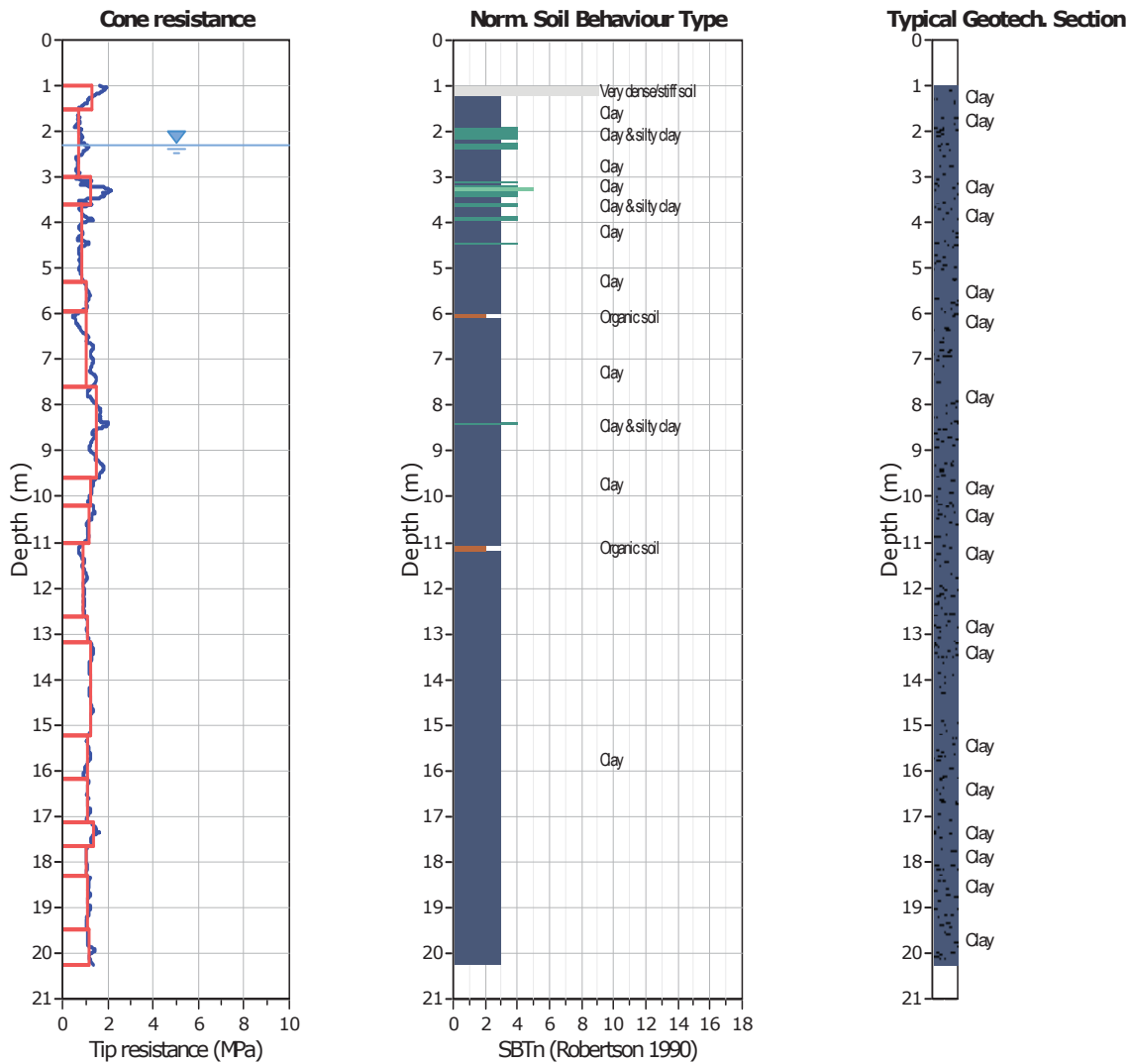
Constrained modulus: Based on variable $\alpha/\rho/\eta$ using I_c and Q_m (Robertson, 2009) OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33
 G_o : Based on variable $\alpha/\rho/\eta$ using I_c (Robertson, 2009) —●— User defined estimation data
Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14 —●— Flat Dilatometer Test data



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—●— User defined estimation data



Tabular results

::: Layer No: 1 :::

Code: Layer_1 **Start depth:** 1.00 (m), **End depth:** 1.50 (m)

Description: Clay

Basic results

Total cone resistance: 1.29 ± 0.38 MPa

Sleeve friction: 100.96 ± 26.09 kPa

SBT_n: 3

SBT_n description: Clay

Estimation results

Permeability: $3.26E-08 \pm 4.80E-08$ m/s

N₆₀: 5.66 ± 1.27 blows

Es: 33.80 ± 2.07 MPa

Dr (%): 0.00 ± 0.00

ϕ (degrees): 0.00 ± 0.00 °

Unit weight: 18.39 ± 0.41 kN/m³

Constrained Mod.: 17.66 ± 5.32 MPa

Go: 38.17 ± 5.91 MPa

Su: 90.09 ± 27.13 kPa

Su ratio: 3.46 ± 1.18

O.C.R.: 15.98 ± 5.44

::: Layer No: 2 :::**Code:** Layer_2 **Start depth:** 1.50 (m), **End depth:** 3.00 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 0.74 ±0.14 MPa

Sleeve friction: 31.60 ±11.37 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 1.31E-08 ±1.78E-08 m/s

N60: 3.59 ±0.69 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.85 ±0.37 kN/m³

Constrained Mod.: 9.67 ±2.17 MPa

Go: 25.11 ±3.36 MPa

Su: 50.25 ±10.22 kPa

Su ratio: 1.27 ±0.27

O.C.R.: 5.88 ±1.26

::: Layer No: 3 :::**Code:** Layer_3 **Start depth:** 3.00 (m), **End depth:** 3.60 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.25 ±0.51 MPa

Sleeve friction: 40.73 ±22.11 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 4.09E-08 ±1.11E-07 m/s

N60: 5.47 ±1.75 blows

Es: 29.44 ±6.05 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.34 ±0.65 kN/m³

Constrained Mod.: 16.41 ±7.29 MPa

Go: 34.59 ±8.87 MPa

Su: 79.96 ±33.92 kPa

Su ratio: 1.57 ±0.60

O.C.R.: 7.26 ±2.77

::: Layer No: 4 :::**Code:** Layer_4 **Start depth:** 3.60 (m), **End depth:** 5.29 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 0.84 ±0.15 MPa

Sleeve friction: 32.06 ±4.24 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 7.82E-09 ±1.43E-08 m/s

N60: 4.22 ±0.48 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.91 ±0.15 kN/m³

Constrained Mod.: 9.65 ±2.80 MPa

Go: 29.99 ±1.69 MPa

Su: 54.68 ±10.96 kPa

Su ratio: 0.96 ±0.21

O.C.R.: 4.44 ±0.98

::: Layer No: 5 :::**Code:** Layer_4 **Start depth:** 5.29 (m), **End depth:** 5.95 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.07 ±0.09 MPa

Sleeve friction: 47.91 ±7.38 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 7.51E-09 ±3.40E-09 m/s

N60: 5.62 ±0.48 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.47 ±0.20 kN/m³

Constrained Mod.: 13.46 ±1.66 MPa

Go: 38.56 ±2.61 MPa

Su: 69.78 ±6.35 kPa

Su ratio: 1.07 ±0.10

O.C.R.: 4.95 ±0.47

::: Layer No: 6 :::**Code:** Layer_5 **Start depth:** 5.95 (m), **End depth:** 7.59 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.06 ±0.31 MPa

Sleeve friction: 49.76 ±29.81 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 4.37E-09 ±3.31E-09 m/s

N60: 5.71 ±1.64 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.50 ±0.89 kN/m³

Constrained Mod.: 11.06 ±5.86 MPa

Go: 41.05 ±11.94 MPa

Su: 66.74 ±21.78 kPa

Su ratio: 0.91 ±0.26

O.C.R.: 4.20 ±1.21

::: Layer No: 7 :::**Code:** Layer_6 **Start depth:** 7.59 (m), **End depth:** 9.61 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.48 ±0.23 MPa

Sleeve friction: 74.73 ±14.59 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 5.64E-09 ±5.48E-09 m/s

N60: 7.79 ±0.95 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.10 ±0.25 kN/m³

Constrained Mod.: 17.81 ±3.94 MPa

Go: 55.03 ±5.16 MPa

Su: 94.54 ±16.45 kPa

Su ratio: 1.07 ±0.18

O.C.R.: 4.94 ±0.82

::: Layer No: 8 :::**Code:** Layer_7 **Start depth:** 9.61 (m), **End depth:** 10.18 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.27 ±0.08 MPa

Sleeve friction: 66.07 ±8.42 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.48E-09 ±7.17E-10 m/s

N60: 7.21 ±0.42 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.90 ±0.15 kN/m³

Constrained Mod.: 12.16 ±2.03 MPa

Go: 52.98 ±2.63 MPa

Su: 78.47 ±6.03 kPa

Su ratio: 0.79 ±0.07

O.C.R.: 3.65 ±0.33

::: Layer No: 9 :::**Code:** Layer_8 **Start depth:** 10.18 (m), **End depth:** 11.02 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.19 ±0.13 MPa

Sleeve friction: 62.56 ±6.95 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.68E-09 ±1.01E-09 m/s

N60: 7.11 ±0.51 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.81 ±0.15 kN/m³

Constrained Mod.: 9.62 ±2.85 MPa

Go: 52.16 ±2.73 MPa

Su: 71.75 ±9.60 kPa

Su ratio: 0.68 ±0.10

O.C.R.: 3.16 ±0.48

::: Layer No: 10 :::**Code:** Layer_9 **Start depth:** 11.02 (m), **End depth:** 12.64 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 0.93 ±0.09 MPa

Sleeve friction: 39.09 ±8.68 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 9.34E-10 ±4.35E-10 m/s

N60: 5.75 ±0.42 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.18 ±0.27 kN/m³

Constrained Mod.: 4.52 ±0.99 MPa

Go: 42.85 ±3.70 MPa

Su: 51.33 ±6.05 kPa

Su ratio: 0.45 ±0.05

O.C.R.: 2.08 ±0.22

::: Layer No: 11 :::**Code:** Layer_10 **Start depth:** 12.64 (m), **End depth:** 13.20 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.11 ±0.03 MPa

Sleeve friction: 49.78 ±3.68 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.03E-09 ±1.21E-10 m/s

N60: 6.92 ±0.26 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.52 ±0.09 kN/m³

Constrained Mod.: 6.32 ±0.44 MPa

Go: 50.05 ±1.60 MPa

Su: 62.83 ±2.36 kPa

Su ratio: 0.51 ±0.02

O.C.R.: 2.37 ±0.08

::: Layer No: 12 :::**Code:** Layer_11 **Start depth:** 13.20 (m), **End depth:** 15.21 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.25 ±0.05 MPa

Sleeve friction: 60.88 ±6.52 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.04E-09 ±3.10E-10 m/s

N60: 7.84 ±0.36 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.80 ±0.12 kN/m³

Constrained Mod.: 7.51 ±1.02 MPa

Go: 57.06 ±1.82 MPa

Su: 71.25 ±3.99 kPa

Su ratio: 0.54 ±0.04

O.C.R.: 2.48 ±0.19

::: Layer No: 13 :::**Code:** Layer_12 **Start depth:** 15.21 (m), **End depth:** 16.18 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.09 ±0.10 MPa

Sleeve friction: 47.36 ±7.15 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 7.34E-10 ±1.51E-10 m/s

N60: 7.09 ±0.54 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.46 ±0.20 kN/m³

Constrained Mod.: 4.57 ±1.17 MPa

Go: 52.01 ±3.45 MPa

Su: 58.00 ±7.25 kPa

Su ratio: 0.40 ±0.05

O.C.R.: 1.86 ±0.25

::: Layer No: 14 :::**Code:** Layer_13 **Start depth:** 16.18 (m), **End depth:** 17.16 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.12 ±0.05 MPa

Sleeve friction: 45.34 ±4.69 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 7.56E-10 ±1.47E-10 m/s

N60: 7.14 ±0.36 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.42 ±0.12 kN/m³

Constrained Mod.: 4.56 ±0.52 MPa

Go: 52.73 ±1.64 MPa

Su: 59.40 ±3.40 kPa

Su ratio: 0.39 ±0.02

O.C.R.: 1.81 ±0.10

::: Layer No: 15 :::**Code:** Layer_14 **Start depth:** 17.16 (m), **End depth:** 17.67 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.35 ±0.10 MPa

Sleeve friction: 39.52 ±4.25 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.69E-09 ±6.59E-10 m/s

N60: 8.03 ±0.34 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.33 ±0.14 kN/m³

Constrained Mod.: 6.98 ±1.44 MPa

Go: 54.20 ±2.54 MPa

Su: 74.85 ±7.34 kPa

Su ratio: 0.48 ±0.05

O.C.R.: 2.20 ±0.23

::: Layer No: 16 :::**Code:** Layer_15 **Start depth:** 17.67 (m), **End depth:** 18.32 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.06 ±0.03 MPa

Sleeve friction: 42.94 ±3.94 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 5.94E-10 ±7.32E-11 m/s

N60: 7.10 ±0.31 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.34 ±0.11 kN/m³

Constrained Mod.: 3.43 ±0.30 MPa

Go: 51.97 ±1.80 MPa

Su: 53.22 ±2.26 kPa

Su ratio: 0.33 ±0.01

O.C.R.: 1.52 ±0.06

::: Layer No: 17 :::**Code:** Layer_16 **Start depth:** 18.32 (m), **End depth:** 19.48 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.14 ±0.05 MPa

Sleeve friction: 47.95 ±5.91 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 6.09E-10 ±7.13E-11 m/s

N60: 7.80 ±0.39 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.49 ±0.15 kN/m³

Constrained Mod.: 3.89 ±0.59 MPa

Go: 55.95 ±2.55 MPa

Su: 57.88 ±4.08 kPa

Su ratio: 0.34 ±0.03

O.C.R.: 1.59 ±0.13

:: Layer No: 18 ::**Code:** Layer_17 **Start depth:** 19.48 (m), **End depth:** 20.28 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 1.20 ±0.10 MPa

Sleeve friction: 36.81 ±3.52 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 8.13E-10 ±3.87E-10 m/s

N60: 7.71 ±0.48 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.21 ±0.11 kN/m³

Constrained Mod.: 4.10 ±0.99 MPa

Go: 53.09 ±2.16 MPa

Su: 60.66 ±7.04 kPa

Su ratio: 0.34 ±0.04

O.C.R.: 1.59 ±0.18

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)
1.00	0.50	3.26E-08 (±4.80E-08)	5.7 (±1.3)	33.8 (±2.1)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	17.7 (±5.3)	38.2 (±5.9)	90.1 (±27.1)	3.5 (±1.2)	16.0 (±5.4)	18.4 (±0.4)
1.50												
1.50	1.50	1.31E-08 (±1.78E-08)	3.6 (±0.7)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	9.7 (±2.2)	25.1 (±3.4)	50.3 (±10.2)	1.3 (±0.3)	5.9 (±1.3)	16.8 (±0.4)
3.00												
3.00	0.60	4.09E-08 (±1.11E-07)	5.5 (±1.8)	29.4 (±6.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	16.4 (±7.3)	34.6 (±8.9)	80.0 (±33.9)	1.6 (±0.6)	7.3 (±2.8)	17.3 (±0.7)
3.60												
3.60	1.69	7.82E-09 (±1.43E-08)	4.2 (±0.5)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	9.7 (±2.8)	30.0 (±1.7)	54.7 (±11.0)	1.0 (±0.2)	4.4 (±1.0)	16.9 (±0.2)
5.29												
5.29	0.66	7.51E-09 (±3.40E-09)	5.6 (±0.5)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	13.5 (±1.7)	38.6 (±2.6)	69.8 (±6.4)	1.1 (±0.1)	5.0 (±0.5)	17.5 (±0.2)
5.95												
5.95	1.64	4.37E-09 (±3.31E-09)	5.7 (±1.6)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	11.1 (±5.9)	41.0 (±11.9)	66.7 (±21.8)	0.9 (±0.3)	4.2 (±1.2)	17.5 (±0.9)
7.59												
7.59	2.02	5.64E-09 (±5.48E-09)	7.8 (±0.9)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	17.8 (±3.9)	55.0 (±5.2)	94.5 (±16.4)	1.1 (±0.2)	4.9 (±0.8)	18.1 (±0.2)
9.61												
9.61	0.57	2.48E-09 (±7.17E-10)	7.2 (±0.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	12.2 (±2.0)	53.0 (±2.6)	78.5 (±6.0)	0.8 (±0.1)	3.7 (±0.3)	17.9 (±0.1)
10.18												
10.18	0.84	1.68E-09 (±1.01E-09)	7.1 (±0.5)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	9.6 (±2.8)	52.2 (±2.7)	71.8 (±9.6)	0.7 (±0.1)	3.2 (±0.5)	17.8 (±0.1)
11.02												
11.02	1.62	9.34E-10 (±4.35E-10)	5.8 (±0.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	4.5 (±1.0)	42.8 (±3.7)	51.3 (±6.1)	0.4 (±0.0)	2.1 (±0.2)	17.2 (±0.3)
12.64												
12.64	0.56	1.03E-09 (±1.21E-10)	6.9 (±0.3)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	6.3 (±0.4)	50.0 (±1.6)	62.8 (±2.4)	0.5 (±0.0)	2.4 (±0.1)	17.5 (±0.1)
13.20												

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)
13.20	2.01	1.04E-09 (±3.10E-10)	7.8 (±0.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	7.5 (±1.0)	57.1 (±1.8)	71.2 (±4.0)	0.5 (±0.0)	2.5 (±0.2)	17.8 (±0.1)
15.21												
15.21	0.97	7.34E-10 (±1.51E-10)	7.1 (±0.5)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	4.6 (±1.2)	52.0 (±3.5)	58.0 (±7.2)	0.4 (±0.1)	1.9 (±0.2)	17.5 (±0.2)
16.18												
16.18	0.98	7.56E-10 (±1.47E-10)	7.1 (±0.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	4.6 (±0.5)	52.7 (±1.6)	59.4 (±3.4)	0.4 (±0.0)	1.8 (±0.1)	17.4 (±0.1)
17.16												
17.16	0.51	1.69E-09 (±6.59E-10)	8.0 (±0.3)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	7.0 (±1.4)	54.2 (±2.5)	74.9 (±7.3)	0.5 (±0.0)	2.2 (±0.2)	17.3 (±0.1)
17.67												
17.67	0.65	5.94E-10 (±7.32E-11)	7.1 (±0.3)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	3.4 (±0.3)	52.0 (±1.8)	53.2 (±2.3)	0.3 (±0.0)	1.5 (±0.1)	17.3 (±0.1)
18.32												
18.32	1.16	6.09E-10 (±7.13E-11)	7.8 (±0.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	3.9 (±0.6)	55.9 (±2.5)	57.9 (±4.1)	0.3 (±0.0)	1.6 (±0.1)	17.5 (±0.2)
19.48												
19.48	0.80	8.13E-10 (±3.87E-10)	7.7 (±0.5)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	4.1 (±1.0)	53.1 (±2.2)	60.7 (±7.0)	0.3 (±0.0)	1.6 (±0.2)	17.2 (±0.1)
20.28												

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

ALL.2

Indagini sismiche

HVSR 21/05/2020

MODENA, VIA NONANTOLANA

Instrument: TE3-0303/01-17

Data format: 32 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 21/05/20 15:25:39 End recording: 21/05/20 15:45:39

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analyzed 75% trace (manual window selection)

Sampling rate: 128 Hz

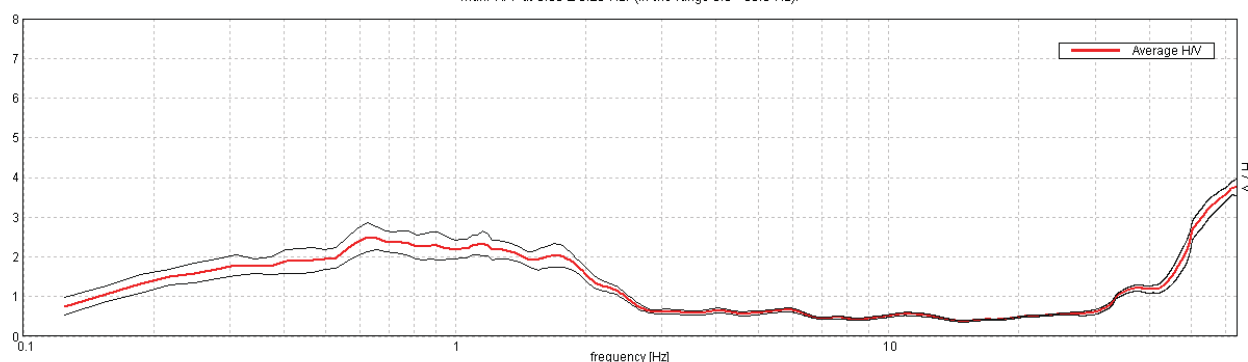
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

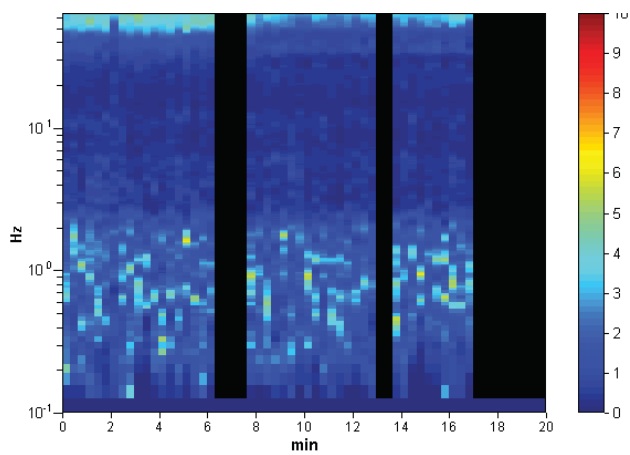
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

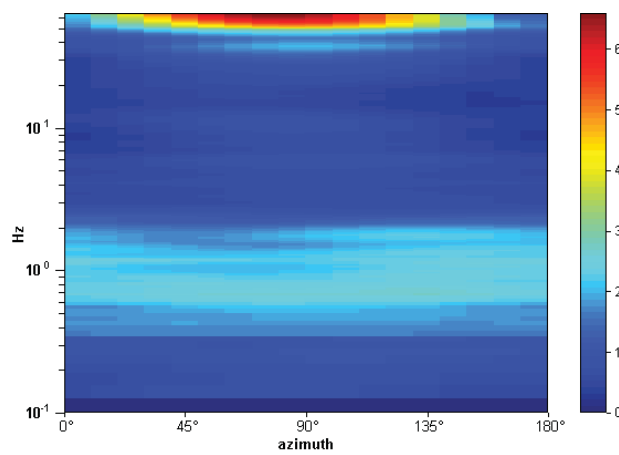
Max. H/V at 0.63 ± 0.26 Hz. (In the range 0.0 - 30.0 Hz).



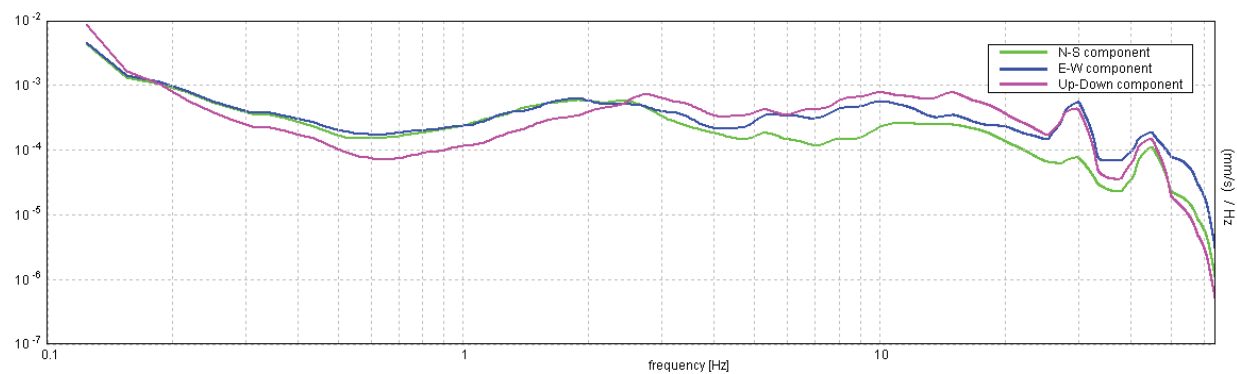
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 0.63 ± 0.26 Hz (in the range 0.0 - 30.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.63 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$562.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 31 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

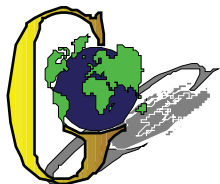
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.156 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	2.25 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.50 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.40825 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.25516 < 0.09375$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3551 < 2.0$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

MASW + HVSR NOVEMBRE 2018



GEO GROUP s.r.l.

Sede Legale: via C. Costa, 182 – 41123 Modena

Sede operativa: via per Modena, 12 – 41051 Castelnovo Rangone (MO)

Tel. 059-39.67.169 - Fax. 059-59.60.176

p.IVA e C.F. 02981500362 – www.geogroupmodena.it - e-mail: info@geogroupmodena.it

ANALISI SISMICA DI SITO SECONDO METODOLOGIA M.A.S.W.

Cantiere: Modena, Via Nonantolana

Operatori : Dott. Emanuele Paganelli e Dott. Alessandro Uguzzoni

Lavoro: Studio del terreno di fondazione

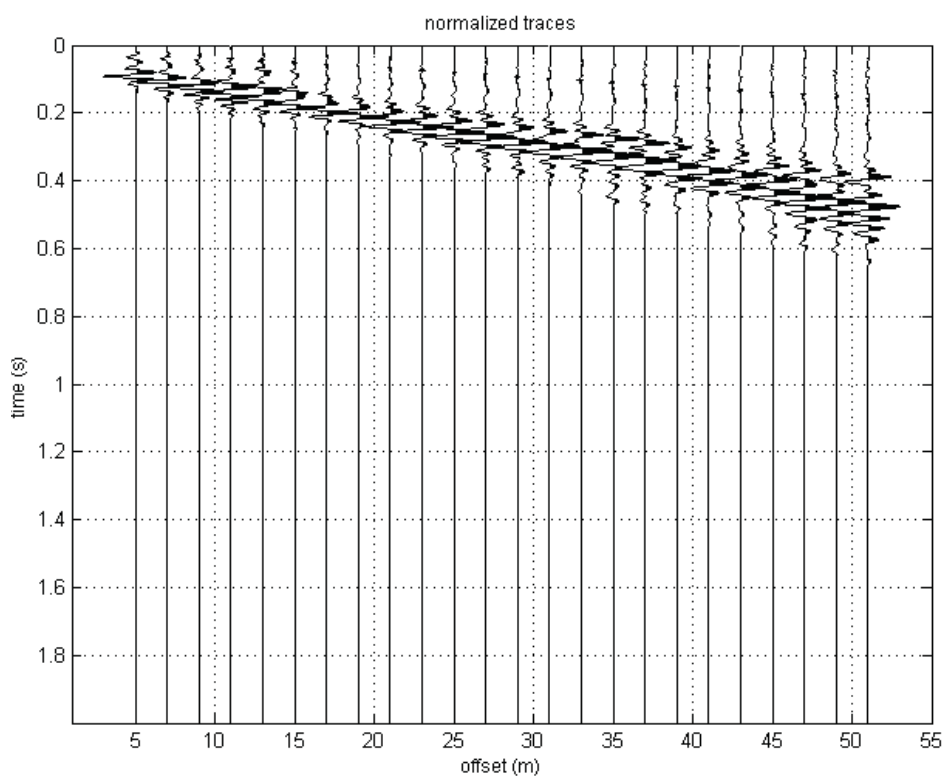
Data: 29/11/2018

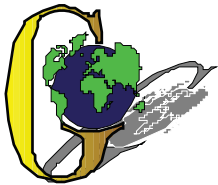
Responsabile: Dott. Geol. Pier Luigi Dallari

MASW
Rif. 691/18



UBICAZIONE DELLO STENDIMENTO SISMICO IMPIEGATO





GEO GROUP s.r.l.

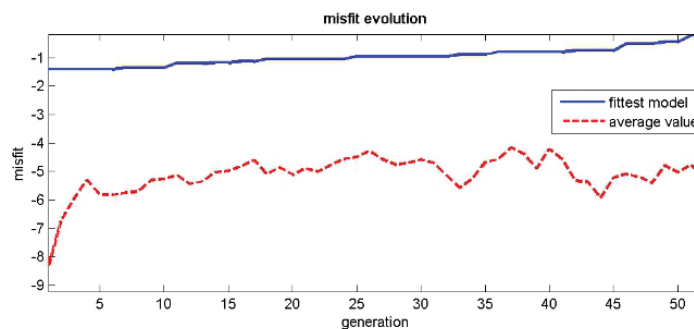
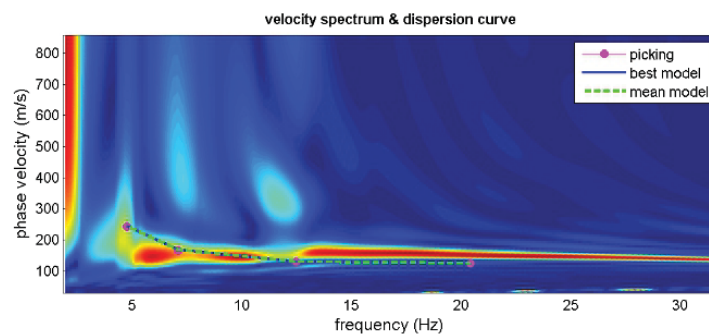
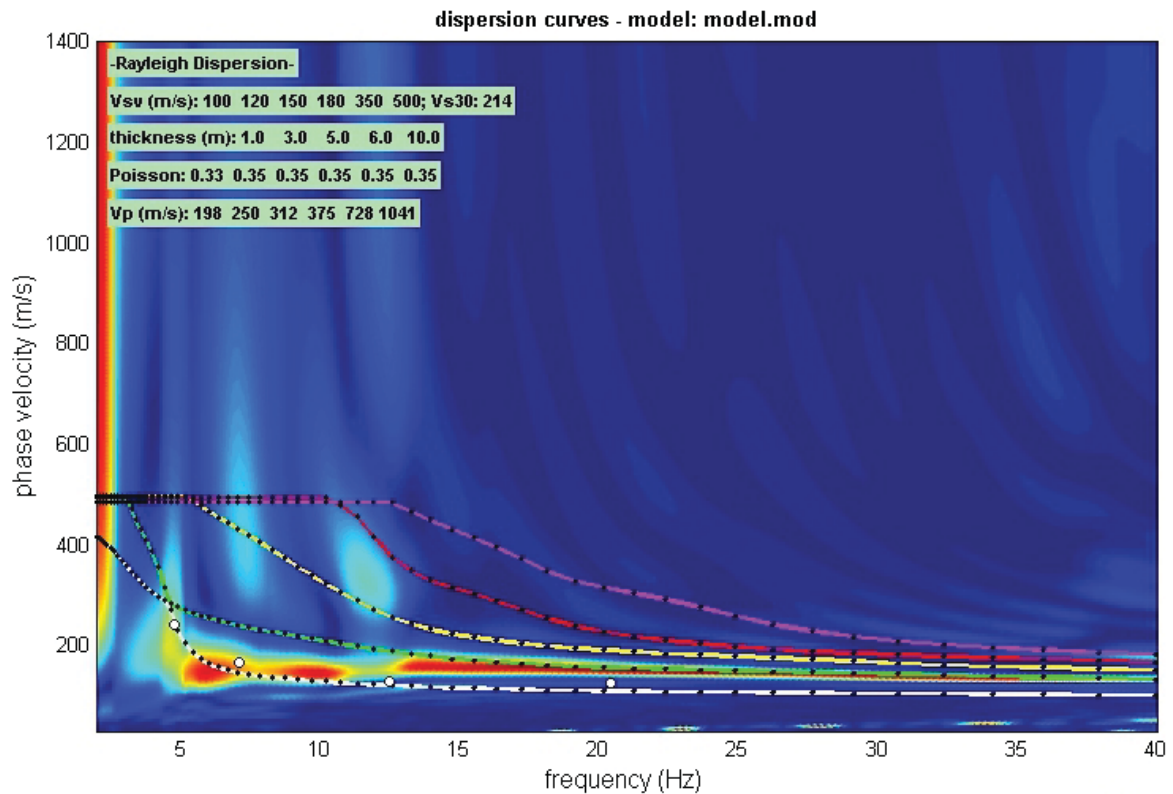
Sede Legale: via C. Costa, 182 – 41123 Modena

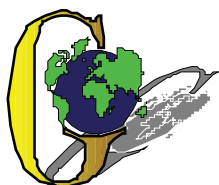
Sede operativa: via per Modena, 12 – 41051 Castelnovo Rangone (MO)

Tel. 059-39.67.169 - Fax. 059-59.60.176

p. IVA e C.F. 02981500362 – www.geogroupmodena.it - e-mail: info@geogroupmodena.it

SPETTRO RELATIVO ALLE VELOCITA' DI FASE, REGISTRATE NEL DOMINIO DELLE FREQUENZE





GEO GROUP s.r.l.

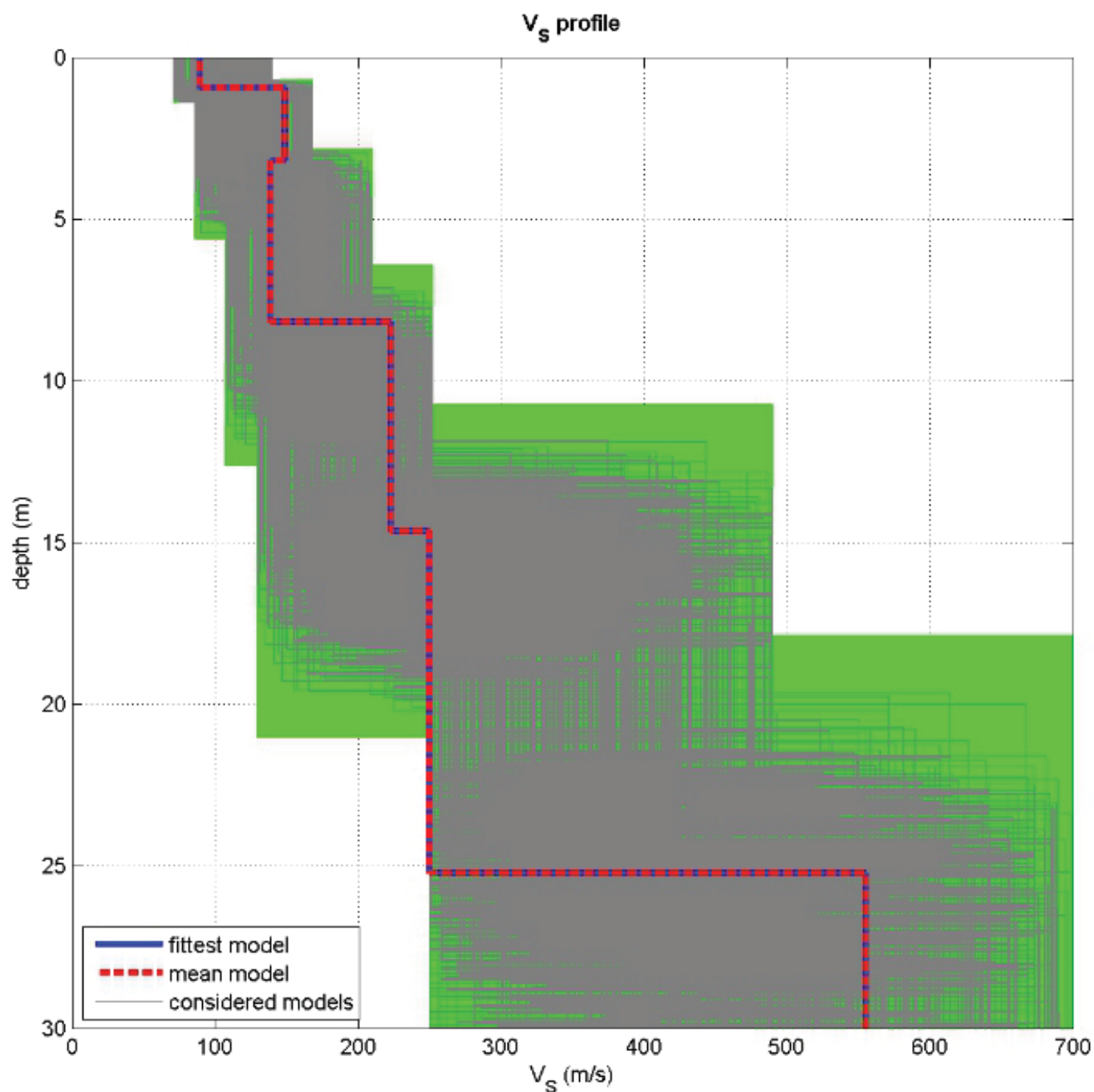
Sede Legale: via C. Costa, 182 – 41123 Modena

Sede operativa: via per Modena, 12 – 41051 Castelnovo Rangone (MO)

Tel. 059-39.67.169 - Fax. 059-59.60.176

p. IVA e C.F. 02981500362 – www.geogroupmodena.it - e-mail: info@geogroupmodena.it

MODELLO V_{s30} DERIVATO DALL'INDAGINE MASW ESEGUITA



dataset: 1545.dat

dispersion curve: pick.cdp

V_{s30} (best model): 212 m/s

V_{s30} (mean model): 212 m/s

BEST MODEL
 $V_{s30} = 212$ m/s

half-space

MODENA, VIA NONANTOLANA

Instrument: TE3-0303/01-17

Data format: 32 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 29/11/18 15:33:06 End recording: 29/11/18 15:53:06

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analysis performed on the entire trace.

Sampling rate: 128 Hz

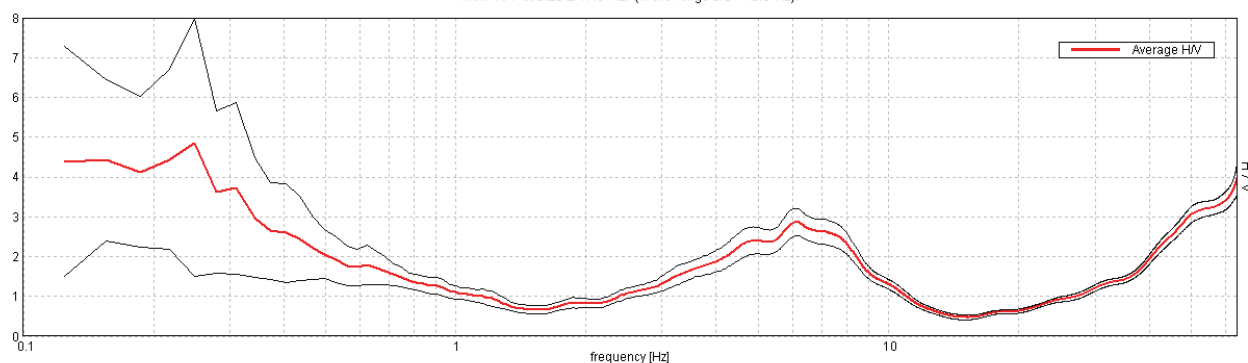
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

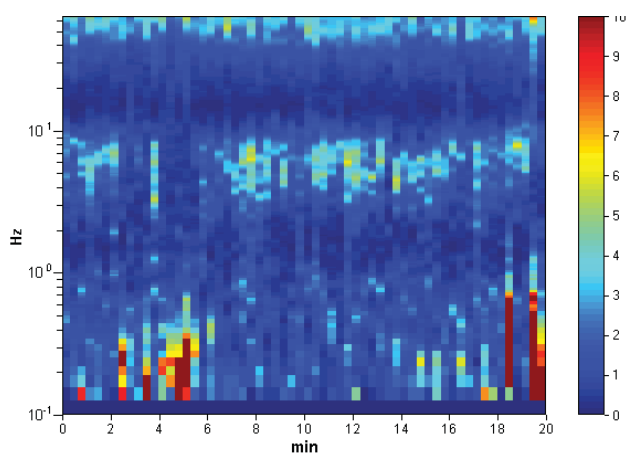
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

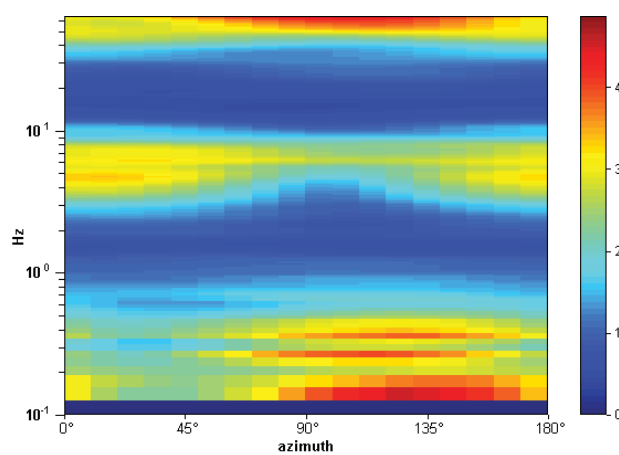
Max. H/V at 0.25 ± 1.49 Hz. (In the range 0.0 - 40.0 Hz).



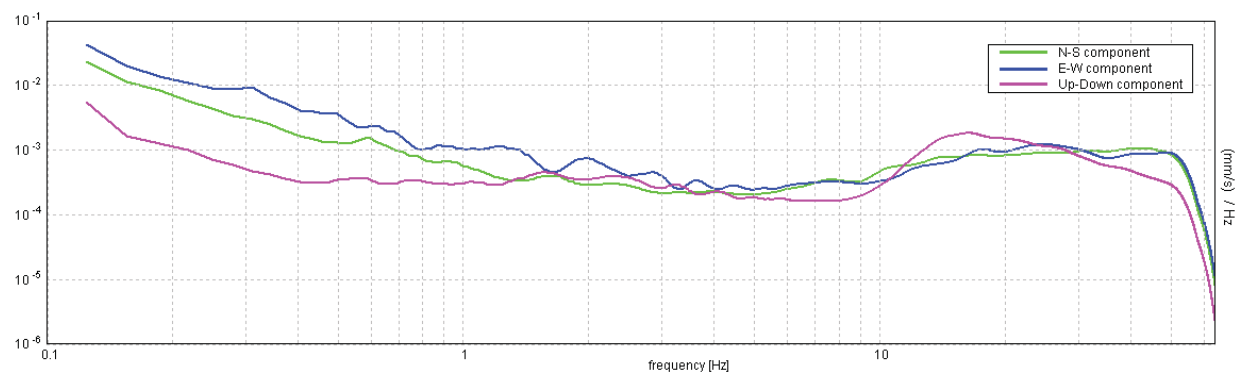
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the *Grilla* manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 0.25 ± 1.49 Hz (in the range 0.0 - 40.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.25 > 0.50$		NO
$n_c(f_0) > 200$	$300.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 1 out of 13 times		NO

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.094 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.469 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$4.85 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 5.9681 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$1.49203 < 0.05$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$3.3533 < 2.5$		NO

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

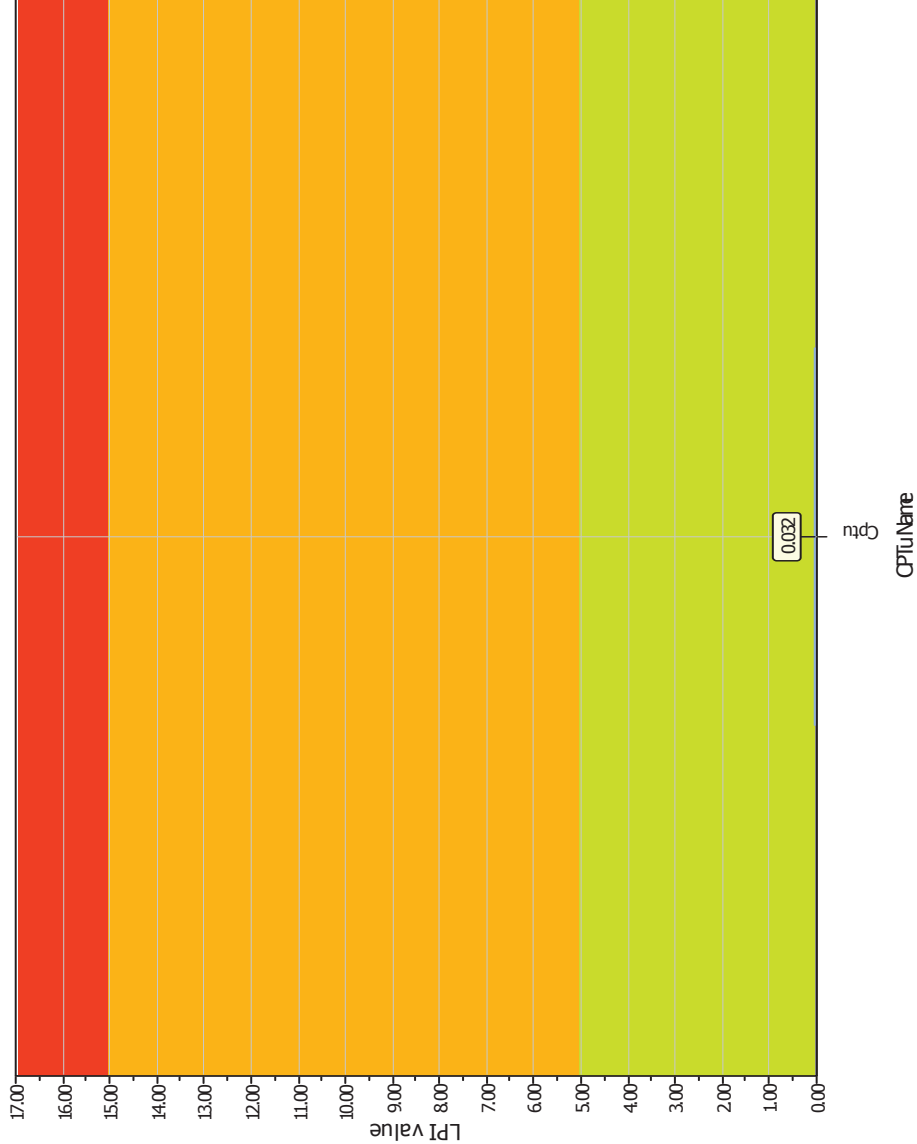
Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

ALL.3

Verifica alla liquefazione

Overall Liquefaction Potential Index report



LPI color scheme

Very high risk
High risk
Low risk

Basic statistics

Total CPT number: 1

100.00% low risk

0.00% high risk

0.00% very high risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

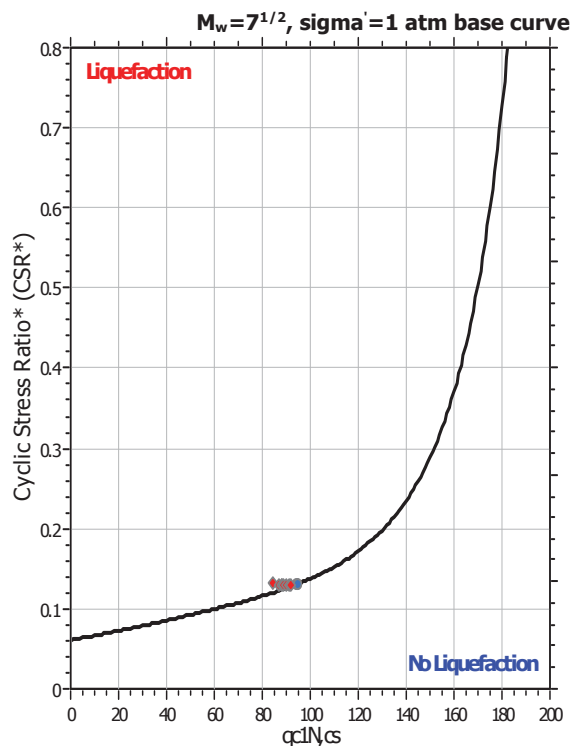
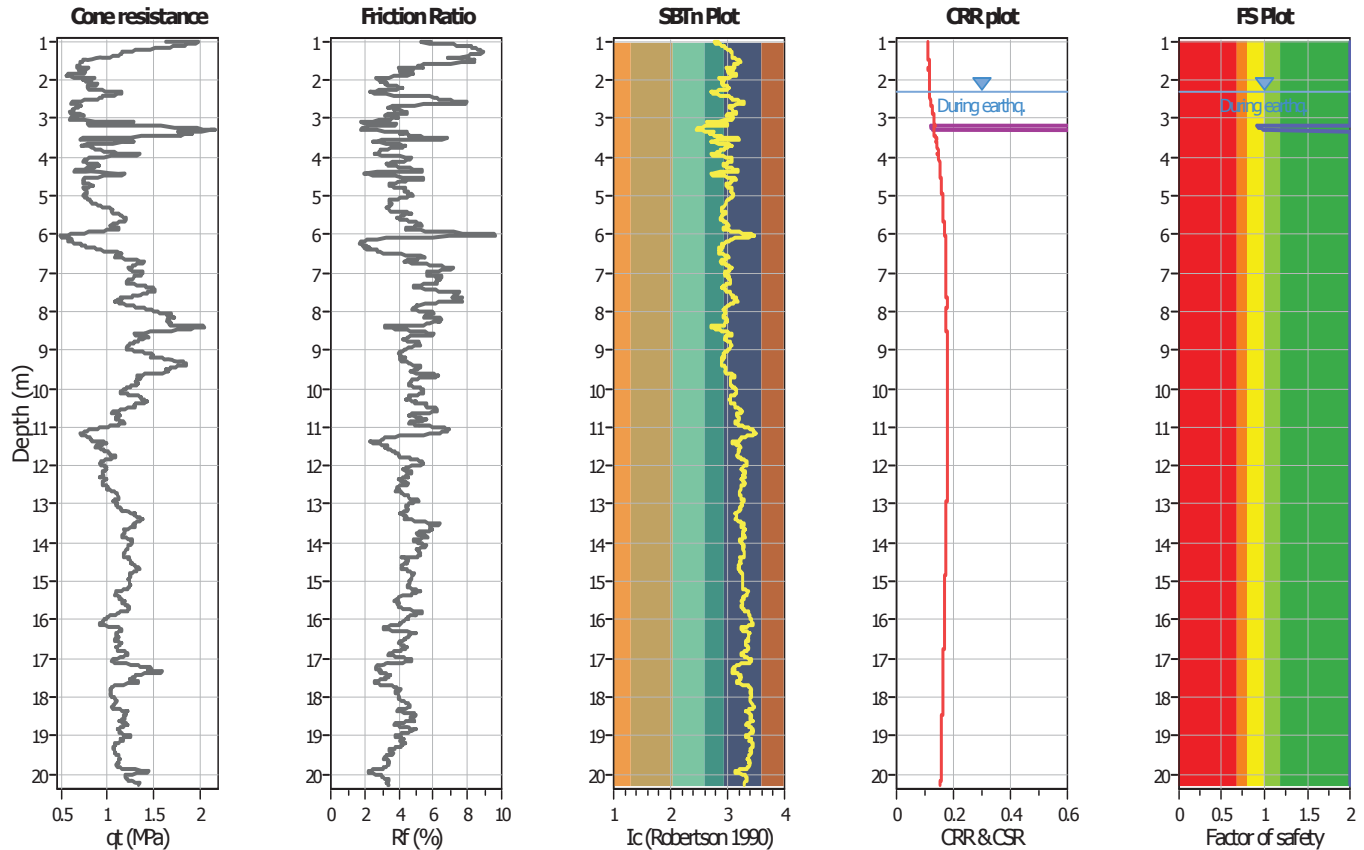
Project title : Studio del terreno di fondazione

Location : Modena, via Nonantolana

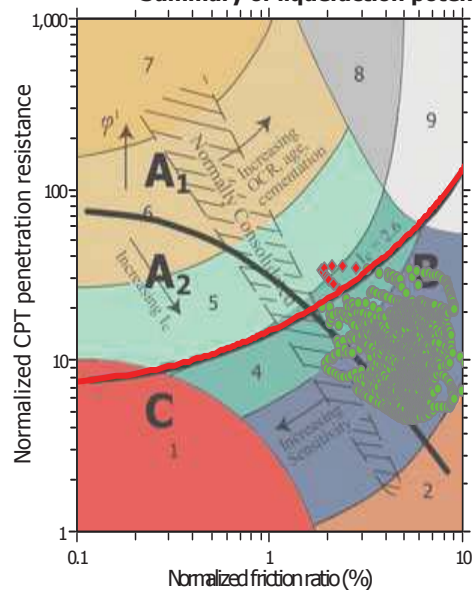
CPT file : Cptu

Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	Sands only
Fines correction method:	B&I (2014)	G.W.T. (earthq.):	2.30 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	20.00 m
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method
Peak ground acceleration:	0.21	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_g applied:	Yes		

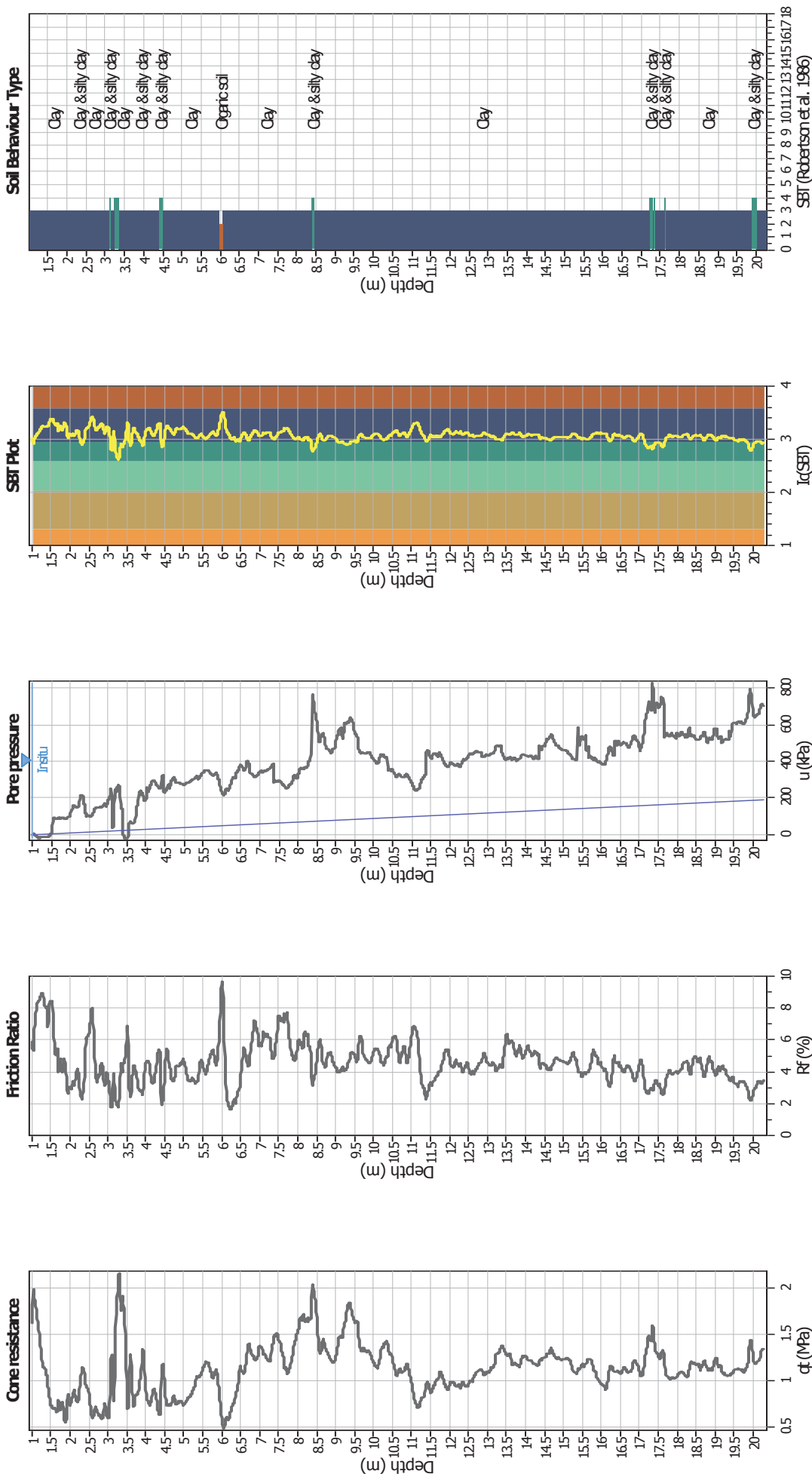


Summary of liquefaction potential



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

CPT basic interpretation plots



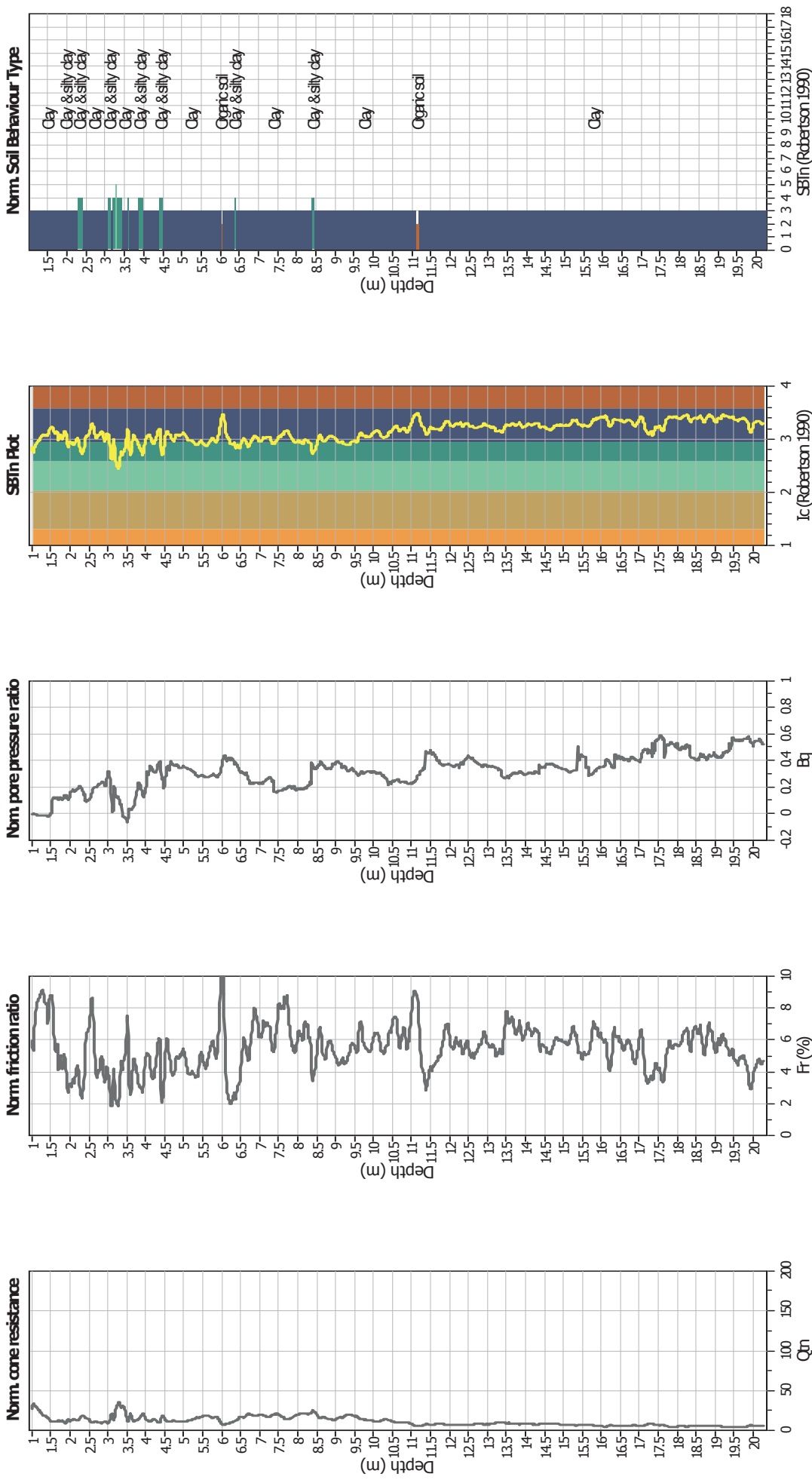
Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.30 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on I_c value	I_c cut-off value:	2.60	K_p 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:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

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

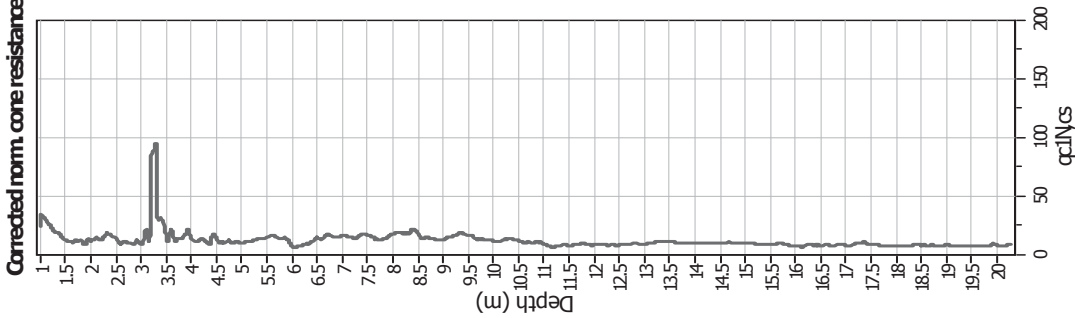
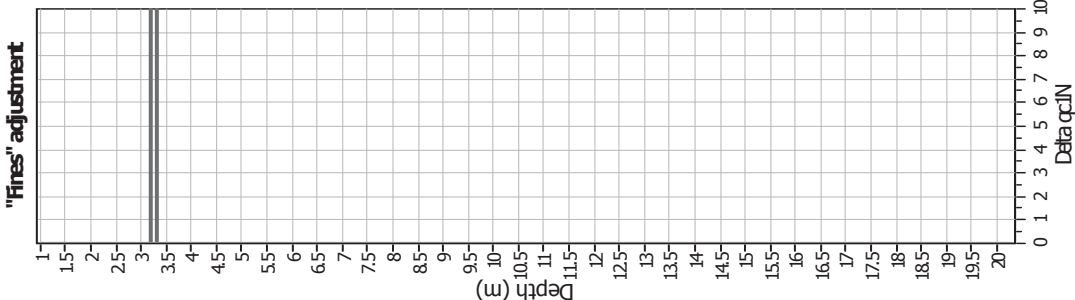
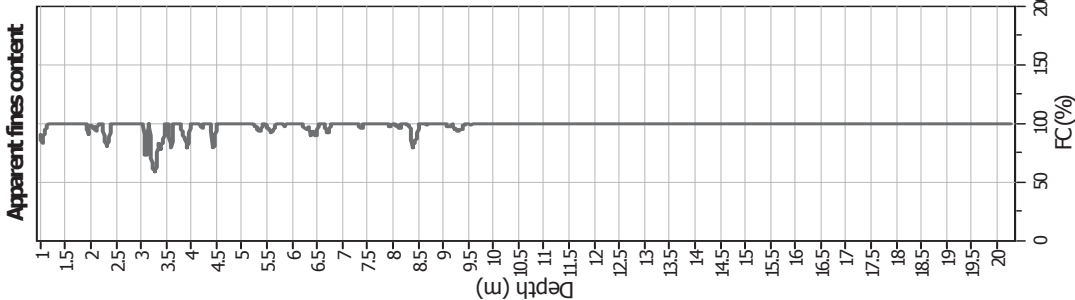
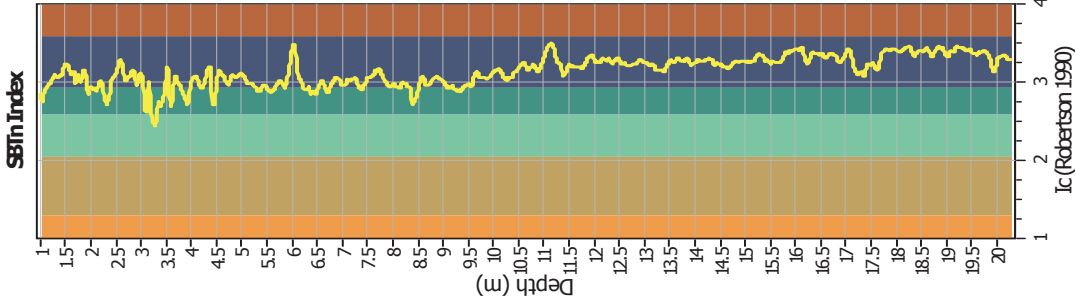
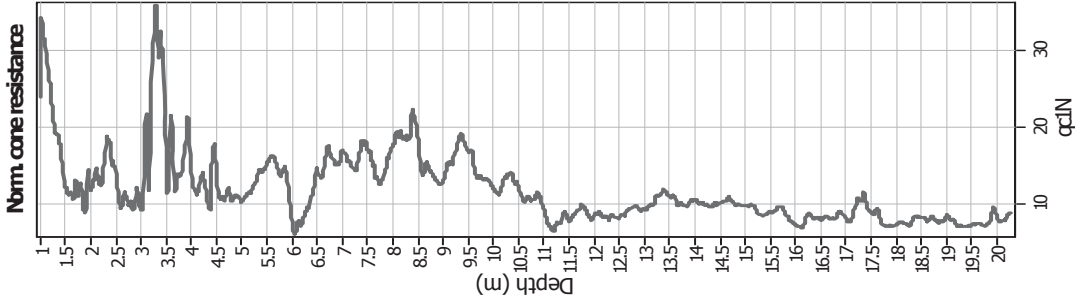
CPT basic interpretation plots (normalized)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.30 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _u 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:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

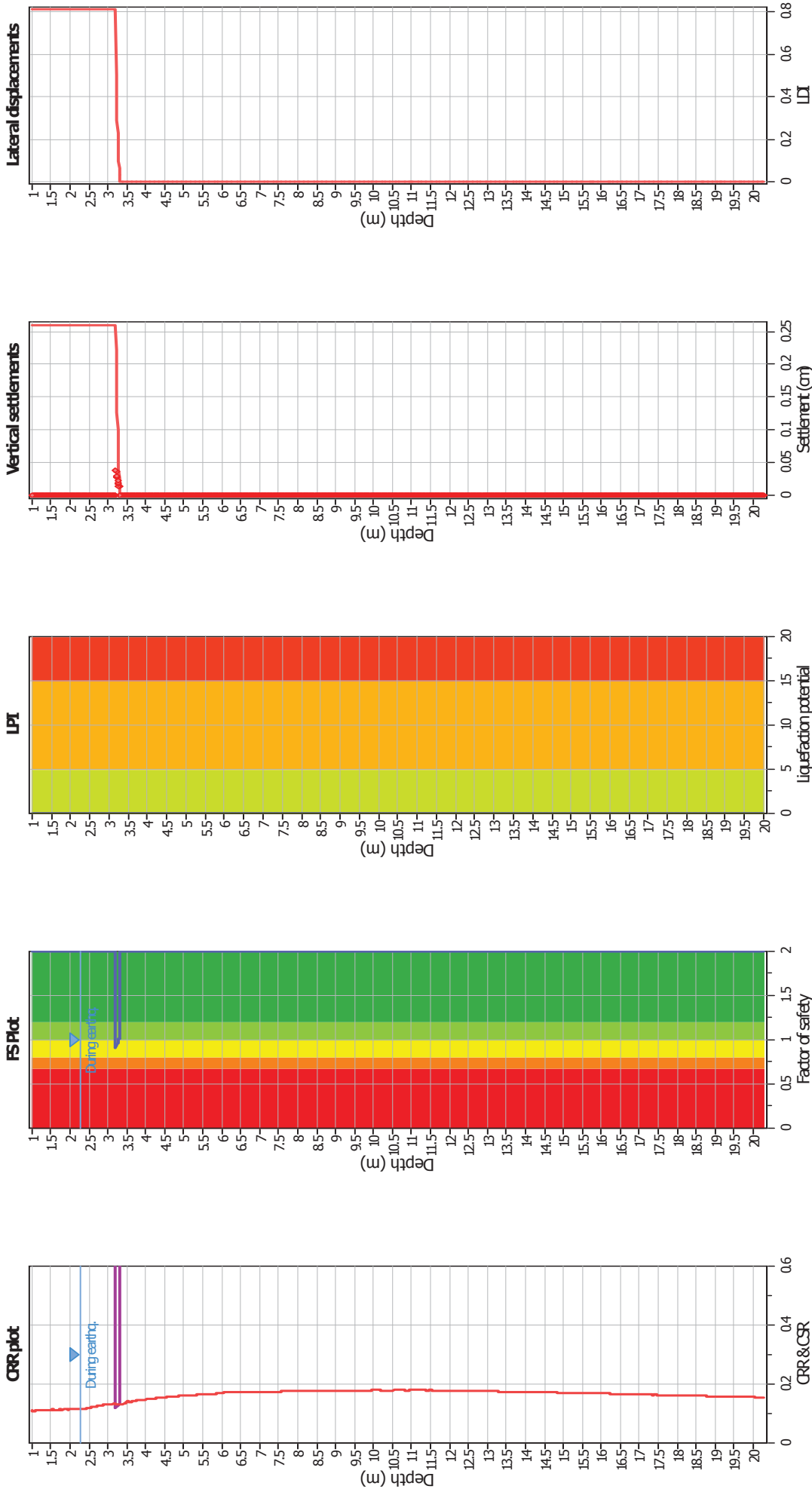
Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.30 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _u 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:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	2.30 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _u 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:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

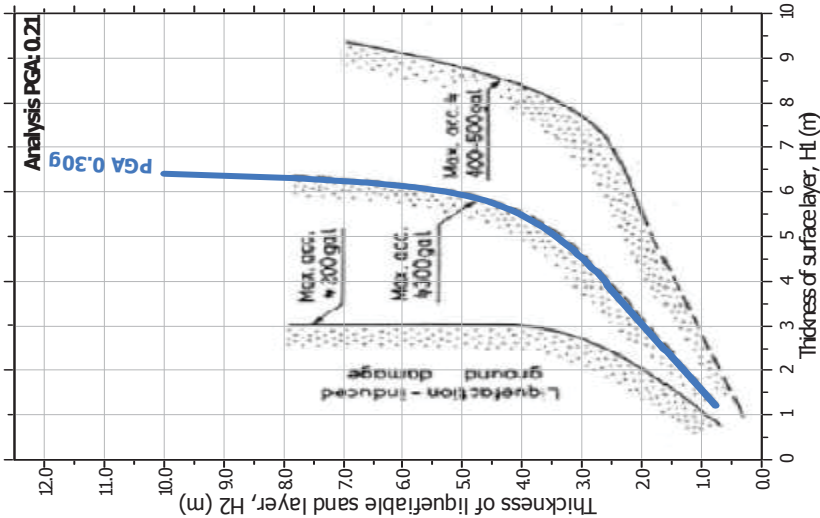
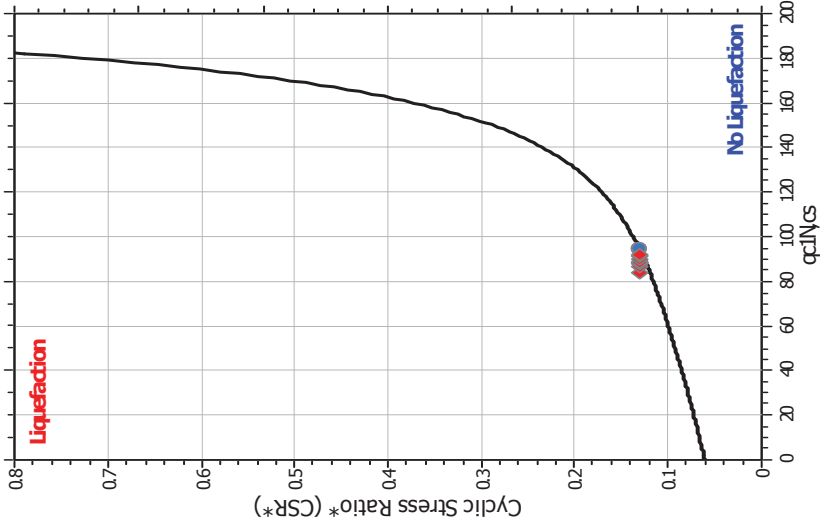
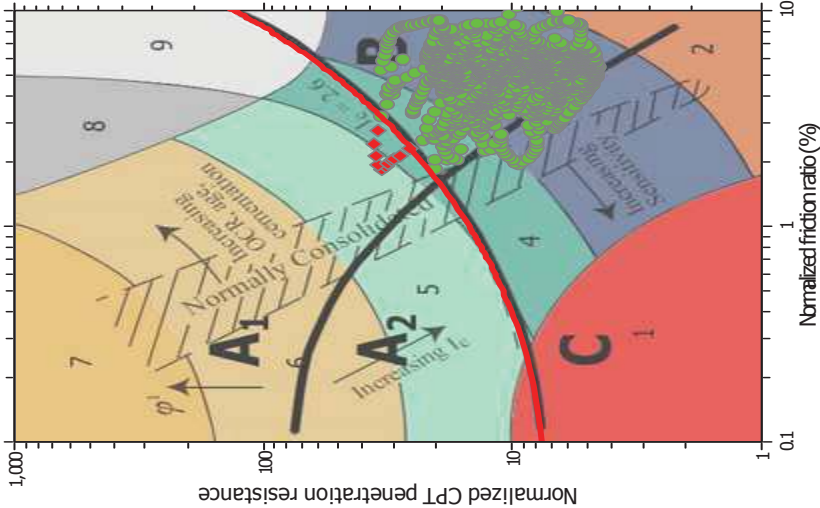
F.S. color scheme

Almost certain it will liquefy	Very likely to liquefy	Liquefaction and no liq. are equally likely	Unlike to liquefy	Almost certain it will not liquefy
Very high risk	High risk	Low risk		

LPT color scheme

Very high risk	High risk	Low risk

Liquefaction analysis summary plots



Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	2.30 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	3	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K _u 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:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m