# COMUNE DI SALA BOLOGNESE

(PROVINCIA DI BOLOGNA)

## Proposta di Variante al POC con Valenza di PUA relativo ai terreni ubicati nel Comune di Sala Bolognese località PADULLE denominato "Comparto GLI OLMI"

PROGETTISTA

***Arch. Sergio Brancolini***

PROGETTISTI SPECIALISTICI

***Relazione Energetica Ambientale***
***Arch. Flavio Quintavalli***

***Relazione Geologica e Geotecnica;***
***Dott. Geol. Pierluigi Dallari***

***Rilievi Topografici e Catasto;***
***Geom. Antonio Fina***

***Rete illuminazioone e telefonica;***
***P.I. Fabio Caretti***

***Rete gas acqua fognature;***
***Dott. Agr. Dario Nania***

***Relazione Acustica;***
***Dott. Geol. Pierluigi Dallari***

***Relazione Archeologica;***
***Dott. Riccardo Vanzina***

***Relazione paesaggistica e vegetazionale***
***Dott. Agr. Dario Nania***

PROPRIETA'

***Sig.ra Marina Frabetti***

***Sig.ra Diva Frabetti***

***Sig.ra Ivanna Grandi***

***Sig.ra Anna Frabetti***

***Sig.ra Marisa Frabetti***


**Oggetto:** **PROGETTO**

## RELAZIONE GEOLOGICA - GEOTECNICA

**Data:** **Novembre 2021**

# Tav. 11

**Disegno:** **Relazione**

# COMUNE DI SALA BOLOGNESE

## PROVINCIA DI BOLOGNA

### RELAZIONE GEOLOGICA

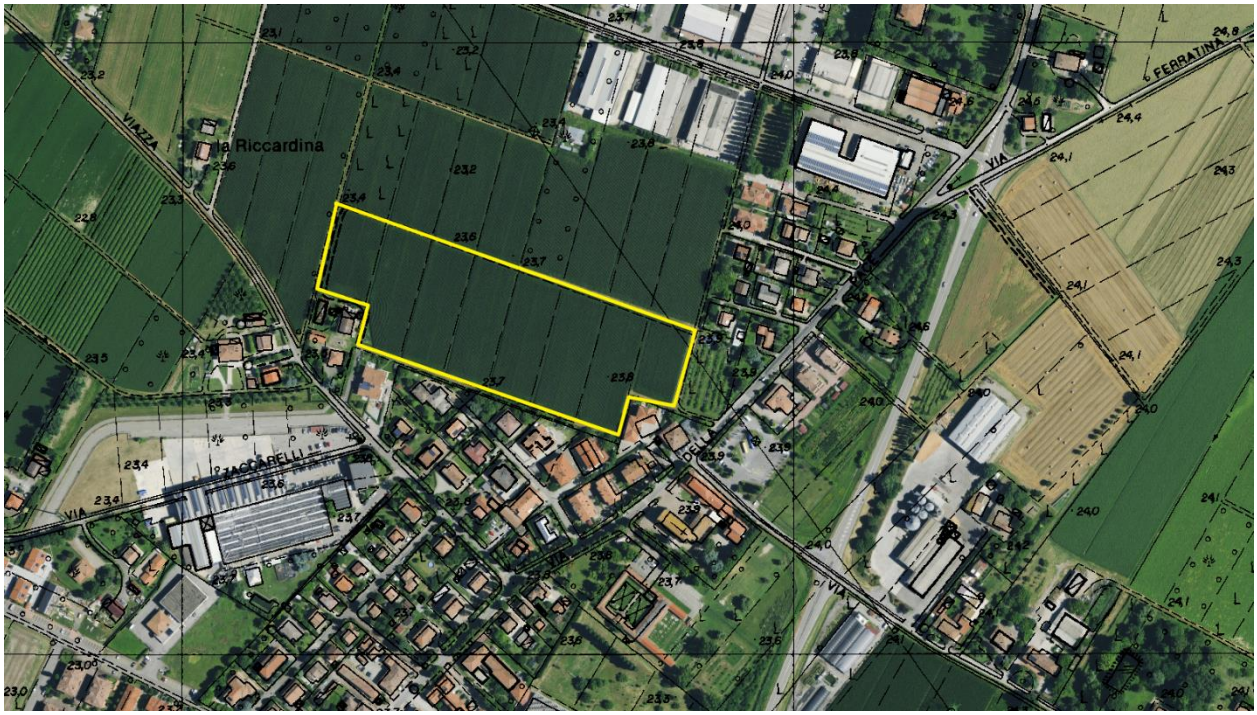
inerente alla caratterizzazione e modellazione geologica del sito (6.2.1 NTC 2018);

### RELAZIONE GEOTECNICA

Relativa alle indagini, alla caratterizzazione e alla modellazione geotecnica a supporto della progettazione strutturale (6.2.2. NTC 2018) nonché relativa alla verifica delle opere di fondazione (6.4.NTC 2018);

### RELAZIONE SULLA MODELLAZIONE SISMICA

Relativa alla caratterizzazione geofisica del volume significativo di terreno (3.2.2 NTC 2018), valutazione dell'azione sismica di riferimento (3.2.3. NTC 2018), Risposta sismica locale e verifica della stabilità nei confronti della liquefazione (DGR 476/2021).




### OGGETTO

**Caratterizzazione geologica geotecnica e sismica del "comparto GLI OLMI"**

Loc. Padulle

Comune di Sala Bolognese (BO)

**Dicembre 2021**

**Rif. 1169/2021**

ORDINE DEI GEOLOGI REGIONE EMILIA ROMAGNA
DOTT. PIER LUIGI DALLARI
Emilia-Romagna
GEOLOGO
SEZ. A

**Dott. Geol. Pier Luigi Dallari**


GEO GROUP
GEOLOGIA E AMBIENTE

**GEO GROUP s.r.l.**
*UFFICI: via Per Modena, 12 – 41051 Castelnuovo 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*

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

# RELAZIONE TECNICA

## RELAZIONE GEOLOGICA

inerente alla caratterizzazione e modellazione geologica del sito (6.2.1 NTC 2018)

## RELAZIONE GEOTECNICA

Relativa alle indagini, alla caratterizzazione e alla modellazione geotecnica a supporto della progettazione strutturale (6.2.2. NTC 2018) nonché relativa alla verifica delle opere di fondazione (6.4.NTC 2018)

## ANALISI PERICOLOSITÁ SISMICA LOCALE

Relativa alla caratterizzazione geofisica del volume significativo di terreno (3.2.2 NTC 2018), valutazione dell'azione sismica di riferimento (3.2.3. NTC 2018), Risposta sismica locale e verifica della stabilità nei confronti della liquefazione (DGR 476/2021)

## OGGETTO

**Caratterizzazione geologica geotecnica e sismica del "comparto GLI OLMI"**

Loc. Padulle

Comune di Sala Bolognese (BO)

**Rif. n. 1169/2021**

*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*



*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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 ..... 4
2.1 Inquadramento geografico ..... 4
2.2 Elementi geologici e geomorfologici ..... 5
2.3 Inquadramento sismico ..... 5
3 INDAGINI GEOGNOSTICHE ..... 7
3.1 Indagini Geotecniche ..... 7
3.1.1 Prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTE/U ..... 7
3.1.2 Prove penetrometriche statiche con punta meccanica CPT ..... 11
3.2 Indagini Geofisiche ..... 12
3.2.1 Indagine sismica passiva a stazione singola (analisi HVSR) ..... 12
3.2.2 Indagine sismica attiva con metodo MASW ..... 12
4 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO ..... 14
4.1 Pericolosità sismica di base ..... 14
4.2 Categoria di sottosuolo (§ 3.2.2 NTC2018) ..... 16
4.3 Azione sismica e risposta sismica del sito – Risposta sismica locale ..... 17
5 MODELLAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA DEL SITO ..... 27
5.1 Modello geotecnico del sottosuolo ..... 27
5.3 Stabilità nei confronti della liquefazione (§ A2.2. DGR 476/2021) ..... 28
5.4 Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica (§ B. DGR 476/2021) ..... 31
6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE ..... 32

# TAVOLE

**Tav. n. 1:** "Carta Topografica" scala 1: 5.000;
**Tav. n. 2:** "Ripresa Satellitare" scala 1: 5.000;
**Tav. n. 3:** "Ubicazione indagini" scala 1: 2.000.

# ALLEGATI

**ALL. n. 1** Prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTE;
**ALL. n. 2** Prove penetrometriche statiche con punta meccanica CPT;
**ALL. n. 3** Indagini sismiche;
**ALL. n. 4** Verifica alla liquefazione.



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

# 1 PREMESSE

Nei mesi di novembre e dicembre 2021 è stato eseguito il presente studio geologico, geotecnico e sismico inerente alla caratterizzazione geologica geotecnica e sismica a del "comparto GLI OLMI", in località Padulle – Comune di Sala Bolognese (BO) (Fig.1.1).

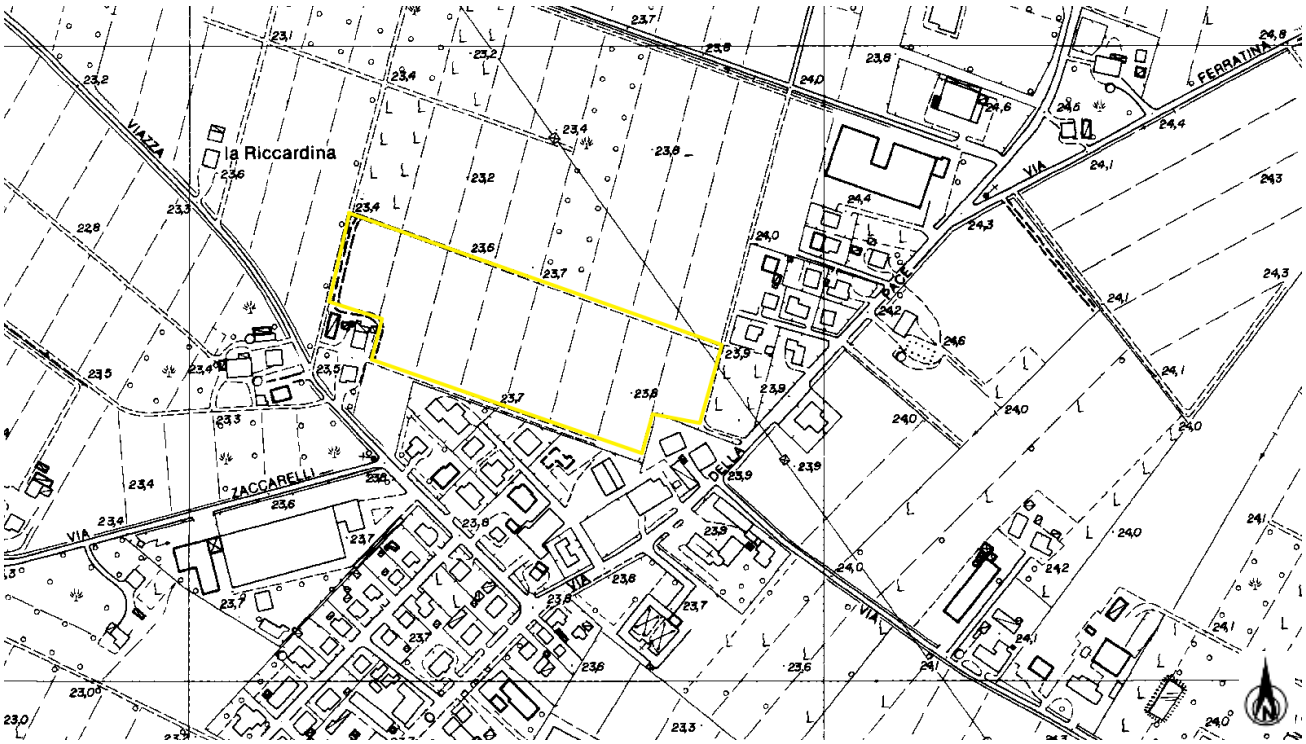



***Fig.1.1 - Ubicazione del sito in studio.***

La presente relazione fa riferimento alle disposizioni normative contenute in:

- Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 – D.M. 17/01/2018;
- DGR 476/2021.



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

# 2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

## 2.1 Inquadramento geografico

L'area in esame è collocata in ambiente di pianura, a nord est del comune di Sala Bolognese (BO) (Fig.2.1). Le coordinate specifiche dell'area sono le seguenti:

| SITO IN ESAME | |
|---|---|
| COORDINATE GEOGRAFICHE | |
| LATITUDINE | LONGITUDINE |
| 44.634221 | 11.279261 |

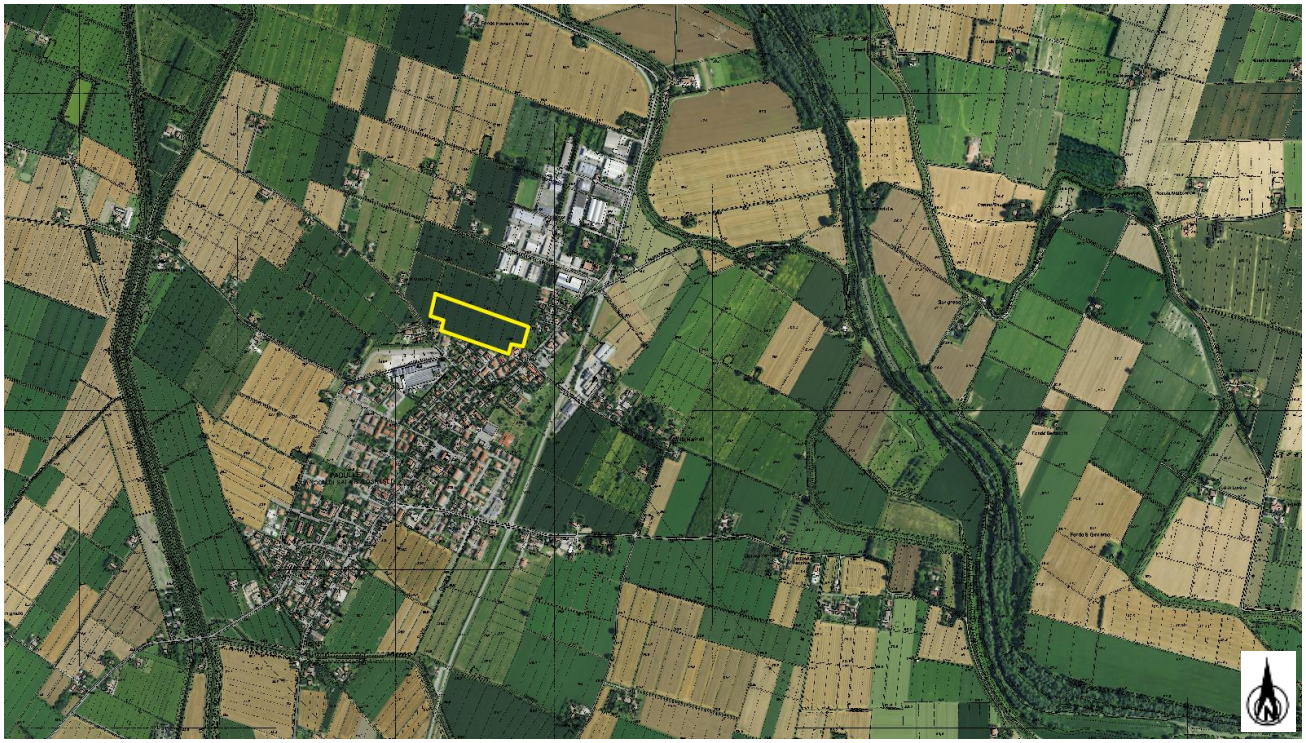


***Fig.2.1 - Ubicazione del sito in studio.***

Per un completo inquadramento geografico dell'area si rimanda dalla 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).

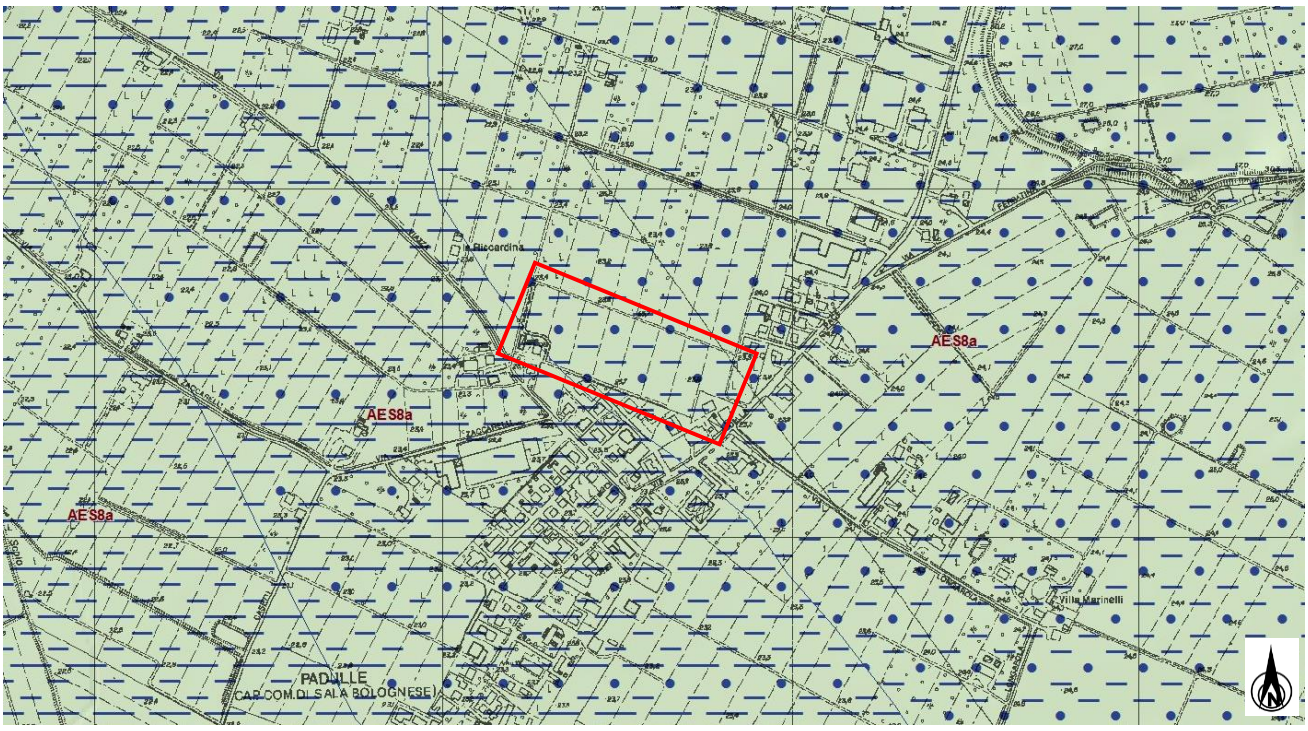


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo R. (MO)
SEDE LEGALE: via C. Costa,182 - 41123 Modena (MO)
tel. 059/3967169; 059/828367 - p. Iva e C.F.02981500362
Email: info@geogroupmodena.it Pec: geo.group@winpec.it Sito: www.geogroupmodena.it

## 2.2 Elementi geologici e geomorfologici

Dalla consultazione della carta delle coperture, si evidenzia come l'area in studio sia caratterizzata da limo sabbioso tipico di un ambiente alluvionale di piana inondabile.

In particolare l'area in studio è caratterizzata dall'**Unità di Modena – AES8a**, caratterizzata da depositi ghiaiosi e fini. Unità definita dalla presenza di un suolo a bassissimo grado di alterazione, con profilo potente meno di 100 cm, calcareo e grigio-giallastro. Corrisponde al primo ordine dei terrazzi nelle zone intravallive. Nella pianura ricopre resti archeologici di età romana del VI secolo d.C.. Potenza massima di alcuni metri (< 10 m). (Fig. 2.2).




**Ambienti deposiz. e litologie (10K)**

Limo Argilloso - Piana alluvionale

Limo Argilloso Sabbioso - Piana alluvionale

Limo Sabbioso - Piana alluvionale

**Coperture quaternarie (10K)**

AES8a - Unità di Modena

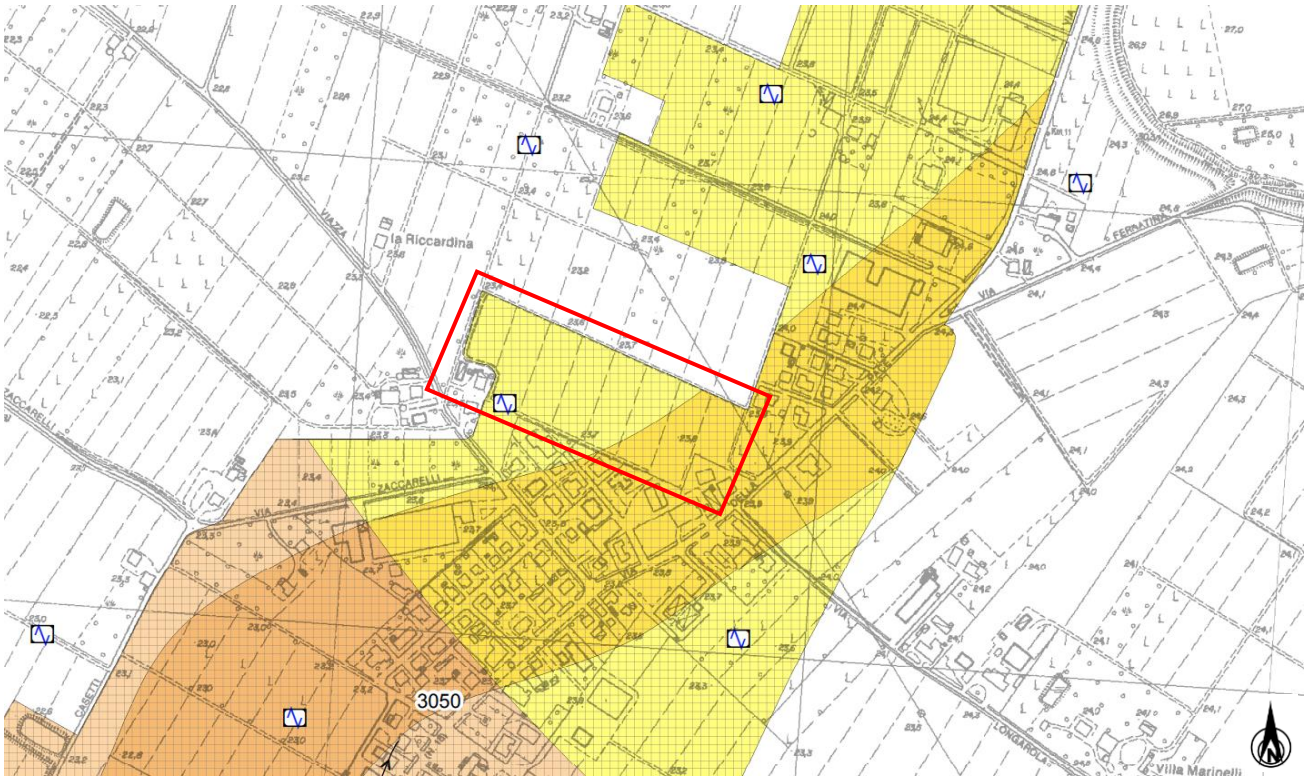
***Fig.2.2 – Estratto della carta di litologia di superficie.***



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

## 2.3 Inquadramento sismico

A supporto dell'analisi sismica e della valutazione della stabilità del sito, successivamente descritta nei paragrafi seguenti, per quel che concerne i fenomeni co-sismici è stata preliminarmente consultata la cartografia relativa allo studio di Microzonazione Sismica del Comune di Sala Bolognese (BO), ed in particolare dalla "*Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica*", un cui estratto è riportato in figura (Fig. 2.3), si nota come l'area in studio ricade in zona suscettibile di instabilità per liquefazione, pertanto al fine di derivare la pericolosità sismica locale, risulta necessario eseguire la risposta sismica locale al terzo livello di approfondimento, successivamente illustrato al paragrafo §4.3.




**Zone suscettibili di amplificazioni locali**

- **2001** – Argille e argille limose consolidate poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e di torbe. Seguono limi inorganici con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità che nella parte superiore possono presentare intercalazioni plurimetriche di sabbie e sabbie fini limose. Alla base sabbie ghiaiose talvolta limose.
- **2002** – Limi con livelli sabbiosi anche metrici poco addensati, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e di torbe. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità. Alla base sabbie pulite e sabbie limose.
- **2003** – Limi con livelli sabbiosi anche metrici poco addensati, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e di torbe. Seguono limi inorganici con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità con diffuse intercalazioni plurimetriche di sabbie e sabbie fini limose. Alla base sabbie ghiaiose talvolta limose.
- **2004** – Sabbie e sabbie limose poco addensate poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e di torbe. Seguono limi inorganici con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità che nella parte superiore mostrano intercalazioni plurimetriche di sabbie e sabbie fini limose. Alla base sabbie ghiaiose talvolta limose.
- **2005** – Argille e argille limose consolidate poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e di torbe. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità, che si estendendo fino alla base della successione indagata.
- **2006** – Limi con orizzonti sabbiosi poco addensati, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e di torbe. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità, che si estendendo fino alla base della successione indagata.
- **2007** – Sabbie e sabbie limose poco addensate poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e di torbe. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità, che si estendendo fino alla base della successione indagata.
- **2008** – Argille e argille limose consolidate poggiano su argille organiche plastiche, con intercalazioni limose, e di torbe. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità. Alla base sabbie ghiaiose talvolta limose.

**Zone di attenzione per instabilità**

- **3050** – $ZA_{LQ1}$ – Zona di attenzione per liquefazione di tipo 1

***Fig.2.3 – Estratto della "Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica" – Microzonazione Sismica del Comune di Sala Bolognese (BO).***


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

# 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. 2 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU;***
- ***n.1 prove penetrometrica statica con punta meccanica CPT.***

I risultati delle suddette indagini sono riportati nell'**allegato n. 1-2**, mentre l'ubicazione è illustrata nella **tav. n. 3.**

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

Le prove sono state eseguite 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 cm² |
| Inclinazione: | 0 - 40° | Superficie laterale: | 150 cm² |
| | | Peso: | 2,1 kg |
| | | Lunghezza: | 413 mm |

Le prove sono state elaborate 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).


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

***Correlazioni utilizzate per la stima dei parametri geotecnici***

**:: 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) ::**

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

$I_c \leq 4.00$ and $I_c > 3.27$ 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, Es (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 (%) ::**

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

**:: State Parameter, ψ ::**

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

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

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

(applicable only to $SBT_n$: 5, 6, 7 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, Go (MPa) ::**

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

**:: Shear Wave Velocity, Vs (m/s) ::**

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

**:: Undrained peak shear strength, Su (kPa) ::**

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

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

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

**:: Remolded undrained shear strength, Su(rem) (kPa) ::**

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

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

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

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

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

**:: In situ Stress Ratio, Ko ::**

$$K_O = 0.1 \cdot \left(\frac{q_t - \sigma_v}{\sigma'_{vo}}\right)$$

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

**:: Effective Stress Friction Angle, φ' (°) ::**

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

(applicable for $0.10 < B_q < 1.00$)

***Tab.3.1 - Correlazioni utilizzate per la stima dei parametri geotecnici.***

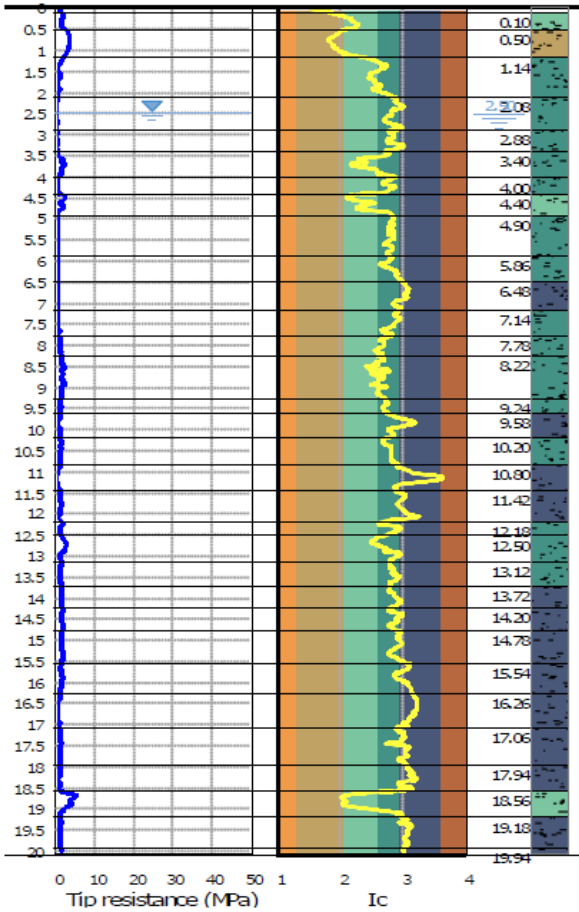
Di seguito si riportano le stratigrafie delle prove eseguite (Fig. 3.1 – 3.2).



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE** **CPT: CPTU1**

**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE** Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021

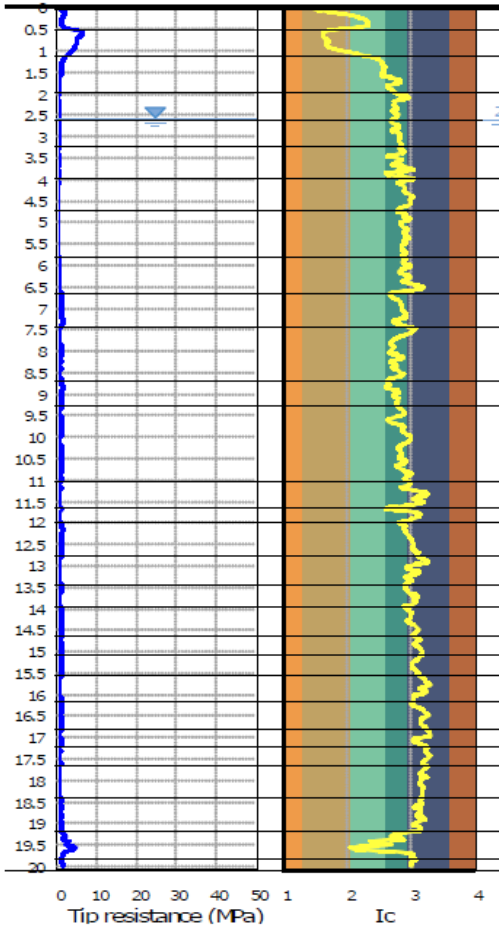



| Depth (m) | Description | qt (MPa) | Kslbt (m/s) | N60 | Es (MPa) | Dr | Phi (°) | M (MPa) | Go (MPa) | Su (kPa) | Su ratio | OCR | Gamma (kN/m³) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.10 | Silty sand & sandy silt | 1.9 | 2.72E-6 | 5.5 | 20.2 | 63.8 | 41.3 | 24.1 | 25.3 | - | - | - | 17.8 |
| 0.50 | Sand & silty sand | 3.3 | 9.38E-6 | 8.6 | 28.4 | 55.5 | 40.0 | 35.3 | 35.6 | - | - | - | 17.8 |
| 1.14 | Clay & silty clay | 1.1 | 1.22E-7 | 4.4 | 20.7 | - | - | 15.0 | 25.5 | 73.5 | 2.2 | 10.1 | 16.9 |
| 2.08 | Clay & silty clay | 0.6 | 1.70E-8 | 2.6 | - | - | - | 6.1 | 17.7 | 37.1 | 0.9 | 4.0 | 15.6 |
| 2.88 | Clay & silty clay | 0.6 | 1.85E-8 | 3.0 | - | - | - | 7.2 | 19.7 | 41.9 | 0.9 | 4.1 | 15.8 |
| 3.40 | Clay & silty clay | 1.4 | 1.87E-7 | 5.4 | 26.3 | - | - | 19.3 | 30.4 | 75.3 | 1.4 | 6.5 | 16.7 |
| 4.00 | Clay & silty clay | 0.8 | 3.55E-8 | 3.6 | - | - | - | 9.8 | 22.7 | 52.0 | 0.9 | 4.4 | 15.9 |
| 4.40 | Silty sand & sandy silt | 1.5 | 4.79E-7 | 5.2 | 22.8 | 27.9 | 33.4 | 19.0 | 26.6 | - | - | - | 15.9 |
| 4.90 | Clay & silty clay | 0.7 | 2.59E-8 | 3.1 | - | - | - | 6.3 | 19.6 | 44.4 | 0.7 | 3.3 | 15.3 |
| 5.86 | Clay & silty clay | 0.9 | 2.16E-8 | 3.8 | - | - | - | 8.7 | 24.6 | 54.0 | 0.8 | 3.8 | 16.0 |
| 6.48 | Clay | 0.8 | 6.37E-9 | 4.0 | - | - | - | 6.0 | 26.1 | 45.8 | 0.7 | 3.1 | 16.2 |
| 7.14 | Clay & silty clay | 0.9 | 1.85E-8 | 4.4 | - | - | - | 9.2 | 27.5 | 58.6 | 0.8 | 3.7 | 16.1 |
| 7.78 | Clay & silty clay | 1.3 | 6.86E-8 | 5.3 | 25.2 | - | - | 15.4 | 30.0 | 80.1 | 1.0 | 4.7 | 16.2 |
| 8.22 | Clay & silty clay | 1.8 | 1.01E-7 | 7.4 | 34.5 | - | - | 23.8 | 41.9 | 118.0 | 1.4 | 6.5 | 17.1 |
| 9.24 | Clay & silty clay | 1.4 | 4.82E-8 | 6.1 | - | - | - | 17.8 | 36.0 | 91.2 | 1.0 | 4.8 | 16.6 |
| 9.58 | Clay | 1.2 | 1.28E-8 | 5.7 | - | - | - | 11.2 | 36.0 | 71.8 | 0.8 | 3.7 | 16.7 |
| 10.20 | Clay & silty clay | 1.4 | 2.96E-8 | 6.4 | - | - | - | 16.2 | 38.1 | 88.4 | 0.9 | 4.3 | 16.8 |
| 10.80 | Clay | 0.8 | 3.06E-9 | 4.3 | - | - | - | 3.3 | 27.5 | 40.3 | 0.4 | 1.9 | 15.9 |
| 11.42 | Clay | 1.3 | 6.89E-9 | 6.7 | - | - | - | 12.0 | 44.5 | 79.3 | 0.8 | 3.6 | 17.3 |
| 12.18 | Clay & silty clay | 1.4 | 2.51E-8 | 6.2 | 34.8 | - | - | 12.4 | 36.9 | 83.2 | 0.8 | 3.6 | 16.4 |
| 12.50 | Clay & silty clay | 2.0 | 4.82E-8 | 8.6 | 39.7 | - | - | 22.6 | 49.5 | 121.4 | 1.1 | 5.1 | 17.3 |
| 13.12 | Clay & silty clay | 1.4 | 2.06E-8 | 6.7 | - | - | - | 12.6 | 39.4 | 85.5 | 0.8 | 3.5 | 16.6 |
| 13.72 | Clay | 1.7 | 1.63E-8 | 8.1 | - | - | - | 18.7 | 50.9 | 106.0 | 0.9 | 4.2 | 17.4 |
| 14.20 | Clay | 1.9 | 1.71E-8 | 9.2 | - | - | - | 21.7 | 56.0 | 117.7 | 1.0 | 4.5 | 17.6 |
| 14.78 | Clay | 1.8 | 1.22E-8 | 8.8 | - | - | - | 18.8 | 56.2 | 111.1 | 0.9 | 4.0 | 17.6 |
| 15.54 | Clay | 1.6 | 5.09E-9 | 8.4 | - | - | - | 13.3 | 56.4 | 95.2 | 0.7 | 3.3 | 17.6 |
| 16.26 | Clay | 1.0 | 2.19E-9 | 5.7 | - | - | - | 3.8 | 35.9 | 52.0 | 0.4 | 1.7 | 16.2 |
| 17.06 | Clay | 1.2 | 7.09E-9 | 6.3 | - | - | - | 6.3 | 37.8 | 67.8 | 0.5 | 2.2 | 16.1 |
| 17.94 | Clay | 1.1 | 3.67E-9 | 6.2 | - | - | - | 4.6 | 37.0 | 58.8 | 0.4 | 1.8 | 16.1 |
| 18.56 | Silty sand & sandy silt | 2.8 | 4.27E-7 | 9.6 | 38.2 | 26.5 | 32.9 | 26.7 | 45.3 | - | - | - | 15.9 |
| 19.18 | Clay | 1.3 | 4.47E-9 | 6.7 | - | - | - | 5.6 | 40.7 | 67.0 | 0.4 | 2.0 | 16.3 |
| 19.94 | Clay | 1.5 | 6.12E-9 | 8.0 | - | - | - | 9.0 | 49.0 | 85.4 | 0.5 | 2.5 | 16.8 |

***Fig.3.1 – Stratigrafia CPTU1.***

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE** **CPT: CPTU2**

**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE** Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021




| Depth (m) | Description | qt (MPa) | Ksbt (m/s) | N60 | Es (MPa) | Dr | Phi (°) | M (MPa) | Go (MPa) | Su (kPa) | Su ratio | OCR | Gamma (kN/m³) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.02 | Silty sand & sandy silt | 1.6 | 4.14E-6 | 4.5 | 15.2 | 64.8 | 41.4 | 18.6 | 20.1 | - | - | - | 17.3 |
| 0.48 | Sand & silty sand | 4.6 | 3.31E-5 | 10.9 | 31.6 | 61.8 | 41.0 | 39.5 | 39.7 | - | - | - | 17.8 |
| 1.10 | Clay & silty day | 1.1 | 1.01E-7 | 4.4 | 24.5 | - | - | 15.4 | 27.2 | 75.8 | 2.3 | 10.8 | 17.2 |
| 1.98 | Clay & silty day | 0.7 | 2.98E-8 | 3.0 | - | - | - | 8.6 | 19.2 | 44.6 | 1.1 | 4.9 | 15.9 |
| 2.62 | Clay & silty day | 0.7 | 2.78E-8 | 3.1 | - | - | - | 9.0 | 20.9 | 47.9 | 1.0 | 4.6 | 15.9 |
| 3.22 | Clay & silty day | 0.7 | 2.34E-8 | 3.0 | - | - | - | 6.7 | 19.1 | 42.5 | 0.8 | 3.8 | 15.5 |
| 3.96 | Clay & silty day | 0.5 | 1.11E-8 | 2.4 | - | - | - | 3.5 | 16.1 | 31.2 | 0.6 | 2.6 | 14.9 |
| 4.72 | Clay & silty day | 0.6 | 1.40E-8 | 3.0 | - | - | - | 4.0 | 17.1 | 34.7 | 0.6 | 2.7 | 15.0 |
| 5.82 | Clay | 0.8 | 1.01E-8 | 3.8 | - | - | - | 6.9 | 25.0 | 47.8 | 0.7 | 3.4 | 16.1 |
| 6.64 | Clay | 1.4 | 2.31E-8 | 6.4 | - | - | - | 17.7 | 40.7 | 90.2 | 1.3 | 5.9 | 17.4 |
| 7.42 | Clay & silty day | 1.0 | 2.66E-8 | 4.7 | - | - | - | 10.2 | 28.0 | 63.7 | 0.8 | 3.8 | 16.1 |
| 8.68 | Clay & silty day | 1.3 | 4.21E-8 | 5.8 | - | - | - | 15.5 | 33.7 | 83.4 | 1.0 | 4.6 | 16.5 |
| 9.26 | Clay & silty day | 1.2 | 1.68E-8 | 5.5 | - | - | - | 10.7 | 33.6 | 70.4 | 0.8 | 3.6 | 16.5 |
| 11.00 | Clay | 0.9 | 4.90E-9 | 4.4 | - | - | - | 4.5 | 28.3 | 47.4 | 0.5 | 2.2 | 15.9 |
| 11.62 | Clay | 1.0 | 9.73E-9 | 5.1 | - | - | - | 6.6 | 30.9 | 58.5 | 0.6 | 2.7 | 16.0 |
| 11.98 | Clay | 1.3 | 7.31E-9 | 6.8 | - | - | - | 12.4 | 45.4 | 81.7 | 0.8 | 3.6 | 17.3 |
| 12.76 | Clay | 0.9 | 4.41E-9 | 5.0 | - | - | - | 4.7 | 31.4 | 51.6 | 0.5 | 2.2 | 16.0 |
| 13.42 | Clay | 1.0 | 6.58E-9 | 5.1 | - | - | - | 5.5 | 31.9 | 56.4 | 0.5 | 2.3 | 16.0 |
| 13.92 | Clay | 1.2 | 6.18E-9 | 6.0 | - | - | - | 7.3 | 37.8 | 66.1 | 0.6 | 2.6 | 16.5 |
| 14.62 | Clay | 1.1 | 2.87E-9 | 6.0 | - | - | - | 5.8 | 39.5 | 60.0 | 0.5 | 2.3 | 16.7 |
| 15.06 | Clay | 1.2 | 3.68E-9 | 6.6 | - | - | - | 7.6 | 43.7 | 69.5 | 0.6 | 2.6 | 16.9 |
| 15.56 | Clay | 1.0 | 2.00E-9 | 5.5 | - | - | - | 3.9 | 35.5 | 50.4 | 0.4 | 1.8 | 16.3 |
| 16.14 | Clay | 1.2 | 2.20E-9 | 6.8 | - | - | - | 6.3 | 45.0 | 65.2 | 0.5 | 2.3 | 17.0 |
| 16.78 | Clay | 1.0 | 1.68E-9 | 6.2 | - | - | - | 4.3 | 39.9 | 54.8 | 0.4 | 1.9 | 16.6 |
| 17.18 | Clay | 1.0 | 1.25E-9 | 6.0 | - | - | - | 3.8 | 40.0 | 52.2 | 0.4 | 1.7 | 16.6 |
| 17.64 | Clay | 1.0 | 1.82E-9 | 5.9 | - | - | - | 3.4 | 35.5 | 49.7 | 0.3 | 1.6 | 16.1 |
| 18.38 | Clay | 1.1 | 2.70E-9 | 6.1 | - | - | - | 4.2 | 37.3 | 56.1 | 0.4 | 1.7 | 16.1 |
| 19.18 | Clay & silty day | 2.3 | 6.60E-8 | 9.4 | - | - | - | 21.0 | 51.1 | 105.8 | 0.7 | 3.2 | 16.8 |
| 19.80 | Clay | 1.4 | 5.68E-9 | 7.6 | - | - | - | 8.0 | 46.3 | 79.6 | 0.5 | 2.4 | 16.7 |

***Fig.3.2 – Stratigrafia CPTU2.***



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

### 3.1.2 Prove penetrometriche statiche con punta meccanica CPT

Nell'**Allegato n. 2** sono riportati i grafici e le tabelle riguardanti la prova eseguita, corredata dall'elaborazione geotecnica e litostratigrafica. La prova è stata eseguita con un penetrometro Pagani dotato di punta Begemann. Le caratteristiche tecniche dello strumento impiegato sono le seguenti:

| | | |
|---|---|---|
| **Spinta** | S | 200 kN |
| **Punta conica meccanica** | | |
| Diametro | Φ | 35.7 mm |
| Area punta | A | 10 $cm^2$ |
| Angolo di apertura | α | 60° |
| **Manicotto laterale di attrito** | | |
| Diametro | Φ | 35.7 mm |
| Altezza | h | 133 mm |
| Area | A | 150 $cm^2$ |
| **Velocità di avanzamento costante** | V | 2 cm/sec |
| **Intervallo di misura** | | 20 cm |

La prova è stata elaborata mediante un software che restituisce l'interpretazione litologica dei terreni indagati effettuata sulla base del rapporto qc/fs (Begemann, 1965; A.G.I. 1977) e la stima dei parametri geotecnici in condizioni non drenate tramite correlazioni.

***Correlazioni utilizzate per la stima dei parametri geotecnici***

Coesione non drenata (terreni coesivi) *Cu*
RACCOMANDAZIONI AGI 1977 – RICCERI ET AL. 1974 – MARSLAND ET AL. 1974/1979
Modulo di deformazione non drenato *Eu*
DUNCAN-BUCHIGANI 1976
Modulo edometrico *Mo*
SANGLERAT 1972 – MITCHELL/GARDNER 1975 – RICCERI ET AL. 1974 – HOLDEN 1973)
Peso unità di volume *γsat (saturo sotto falda) – γ (umido sopra falda)*
IN BASE ALLA NATURA LITOLOGICA TERZAGHI-PECK 1967 – BOWELS 1982
Velocità delle onde di taglio *Vs*
YOSHIDAMOTONORI 1988


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

## 3.2 Indagini Geofisiche

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

- ***n. 1 indagine sismica passive HVSR;***
- ***n.1 indagine sismica attive MASW.***

I risultati delle indagini sismiche sopra citate sono riportati integralmente nell'**allegato n. 3**.

### 3.2.1 Indagine sismica passiva a stazione singola (*analisi HVSR*)

La misura sismica passiva a stazione singola è stata eseguita 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 (Fig.3.4).
Lo scopo dell'indagine è la misura della frequenza di risonanza del terreno, la quale è legata alla velocità delle onde di taglio Vs nel terreno dalla formula:

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

dove *h* è lo spessore dello strato.

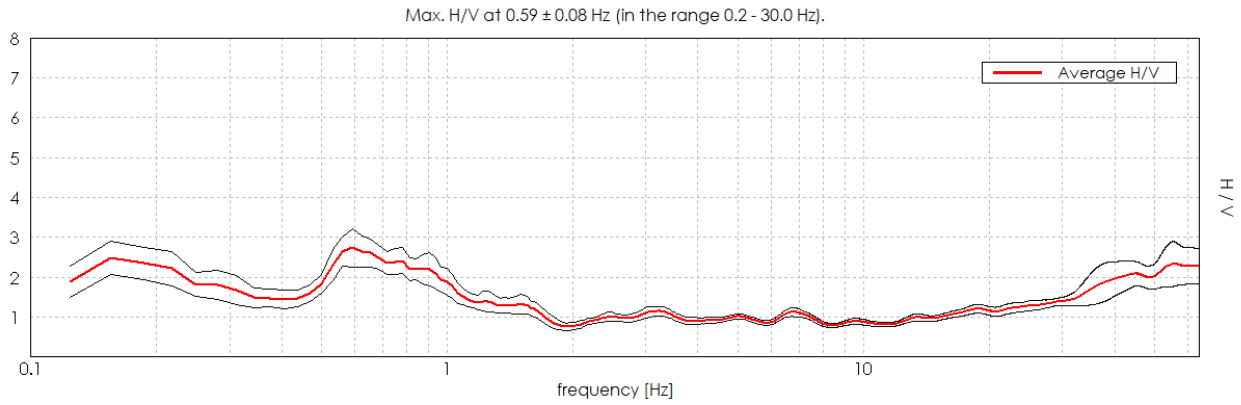



***Fig.3.4 - Curva HVSR che identifica un picco rispettivamente a 0.59 Hz.***

### 3.2.2 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


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

"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) (Fig. 3.5). 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.

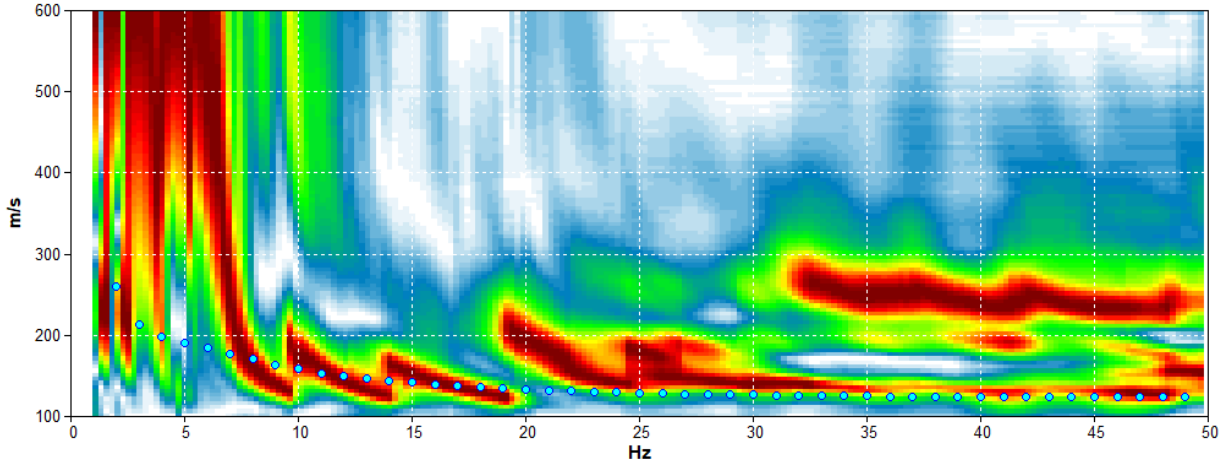



***Fig.3.5 - Curva di dispersione MASW.***



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

# 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 Sala Bolognese (BO)** risulta appartenente alla **classe di sismicità 3**.

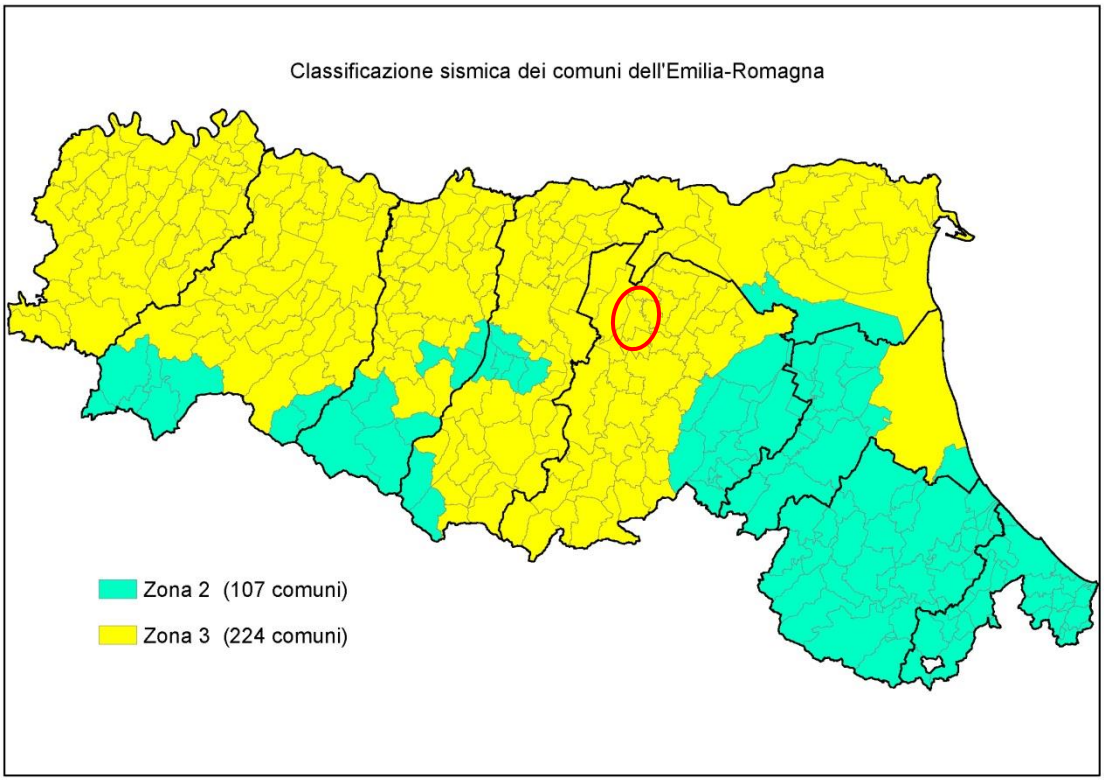



***Fig.4.1 - Classificazione sismica e dei comuni della regione Emilia-Romagna a partire dall'O.P.C.M. n. 3274/2003 e successive modifiche (aggiornamento luglio 2018) e ubicazione del territorio comunale di Sala Bolognese (BO).***

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 del D.M. 14/01/2008. Sulla base dei contenuti delle NNTC 2008 e delle successive NTC 2018, 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 ciascuna area in oggetto, in relazione a un periodo di riferimento $\mathbf{T_R}$ stimato di 475 anni, è stato definito un parametro di accelerazione massima attesa $\mathbf{a_g}$ definita in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido e con superficie topografica orizzontale. L'accelerazione $\mathbf{a_g}$ rappresenta uno dei parametri principali che definisce la **pericolosità sismica di base**, insieme ai parametri $\mathbf{F_0}$ e **Tc*** dello spettro di risposta elastico, desumibili nelle tabelle riportate sotto.


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

## 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 | $Tc^*$ [s] |
|---|---|---|---|---|
| Operatività (SLO) | 30 | 0.048 | 2.476 | 0.256 |
| Danno (SLD) | 50 | 0.059 | 2.517 | 0.272 |
| Salvaguardia vita (SLV) | 475 | 0.161 | 2.558 | 0.276 |
| Prevenzione collasso (SLC) | 975 | 0.212 | 2.519 | 0.282 |
| Periodo di riferimento per l'azione sismica: | 50 | | | |

***Tab.4.1 - Tabella riassuntiva dei parametri sismici del sito in esame secondo NTC18.***



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

## 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:

$$V_{S,Eq} = \frac{H}{\sum_i \frac{hi}{Vsi}}$$

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** | **$V_{S30}$** | **192 m/s** |

| | | |
|---|---|---|
| HVSR | **0.59 ± 0.08 HZ** | NON 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.** |


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

## 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 ($G / G_0$ -γ ) e le corrispondenti curve dello smorzamento ( *D* -γ ) 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:

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

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

Dove G* e $v^*_s$ rappresentano il modulo di taglio e la velocità di taglio.


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

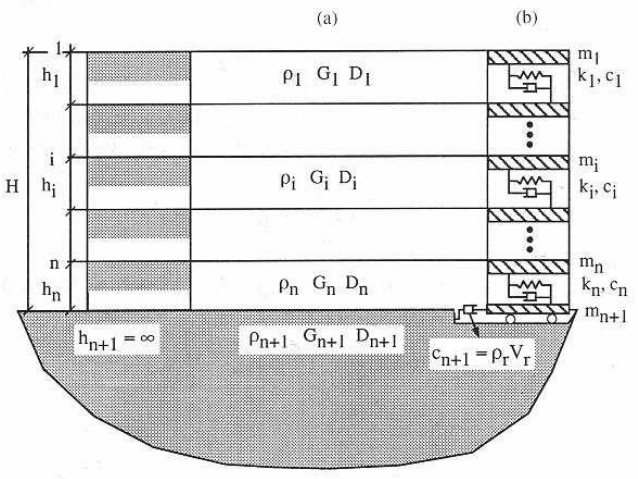



***Fig.4.2 - Modello a strati continui adottato per la simulazione con il codice di calcolo STRATA.***



GEO GROUP
GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

**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 congiunta delle indagini HVSR e MASW eseguite in sito, integrate con dati di bibliografia. Si illustra successivamente il modello utilizzato:

| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] | Poisson ratio |
|---|---|---|---|
| 3.00 | 3.00 | 130 | 0.45 |
| 8.00 | 5.00 | 160 | 0.45 |
| 18.00 | 10.00 | 210 | 0.44 |
| 33.00 | 15.00 | 220 | 0.44 |
| 53.00 | 20.00 | 250 | 0.43 |
| 93.00 | 40.00 | 350 | 0.43 |
| 153.00 | 60.00 | 410 | 0.43 |
| inf. | inf. | 520 | 0.42 |

***Tab.4.2 – Modello ottenuto dall'elaborazione delle indagini sismiche congiunte MASW e HVSR.***

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

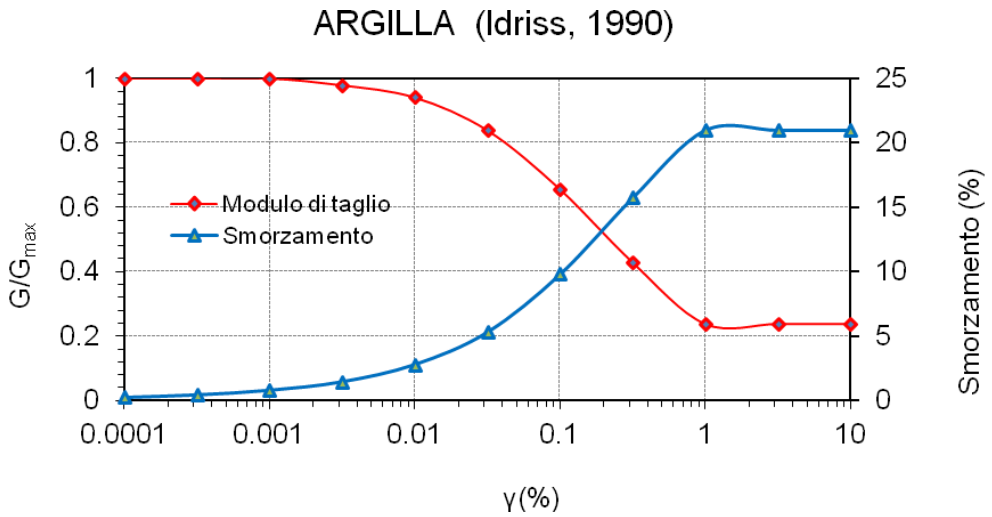



***Fig.4.3 - Curva di decadimento dei moduli G/Gmax e smorzamento D, utilizzati per descrivere il comportamento dei materiali coesivi che compongono il sottosuolo in oggetto.***

In accordo con quanto esposto nella D.G.R. 476/21, l'analisi RSL in oggetto è stata svolta adottando come input sismico 7 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

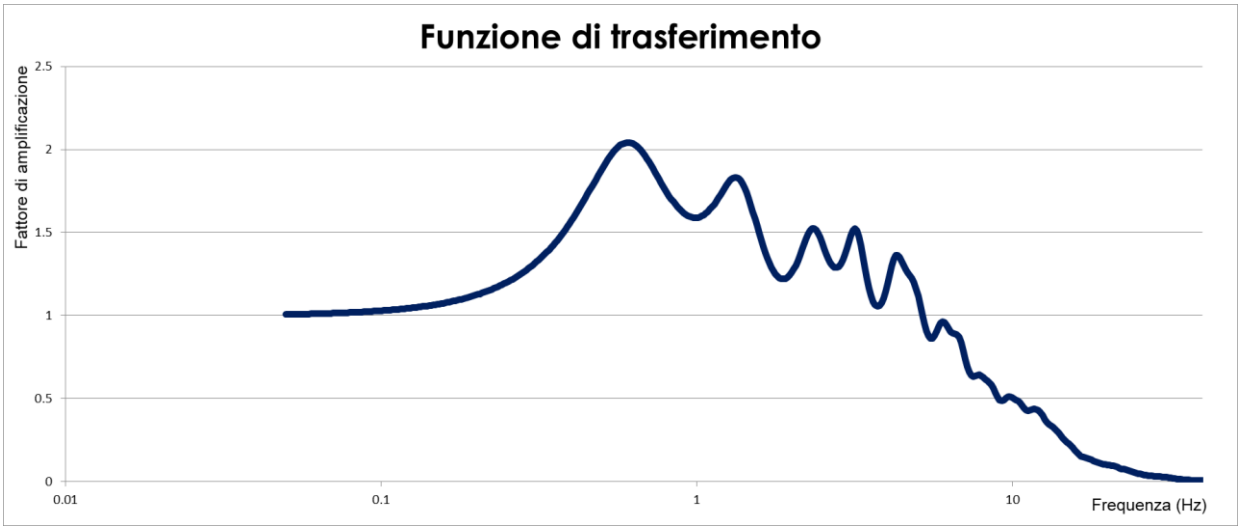

GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo R. (MO)
SEDE LEGALE: via C. Costa,182 - 41123 Modena (MO)
tel. 059/3967169; 059/828367 - p. Iva e C.F.02981500362
Email: info@geogroupmodena.it Pec: geo.group@winpec.it Sito: www.geogroupmodena.it

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 **0.161g** considerando un valore di **Cu = 1.00** (Classe d'uso II) e **Vn = 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.



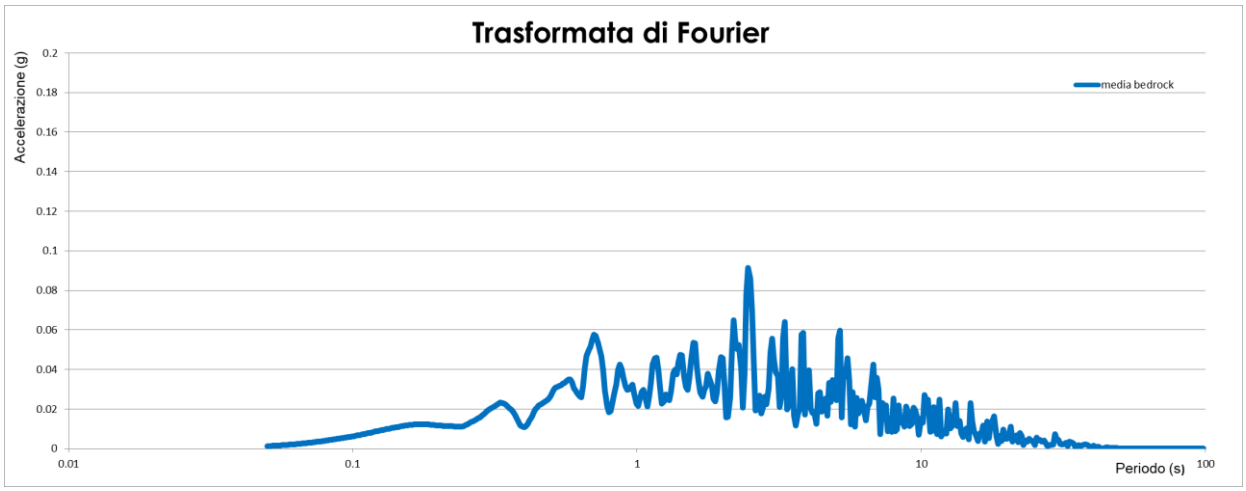




***Fig.4.4 - Dall'alto: Funzione di Trasferimento e funzione FFT.***



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

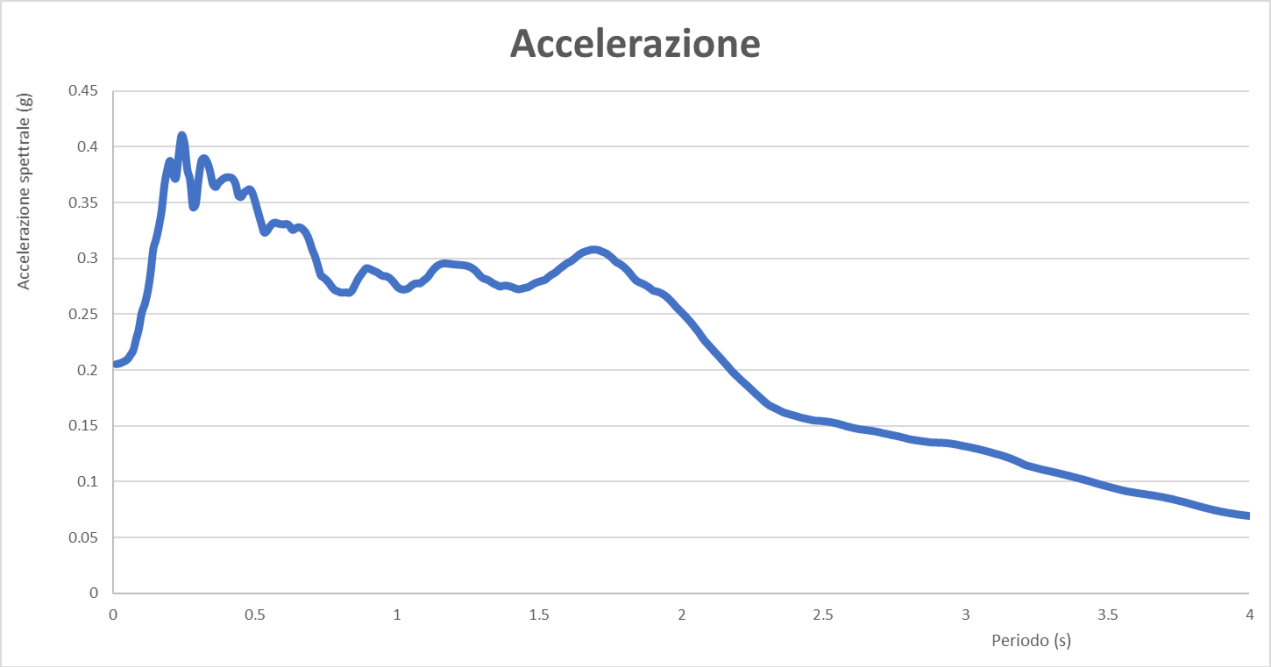



***Fig.4.5 - Spettro accelerazione RSL***

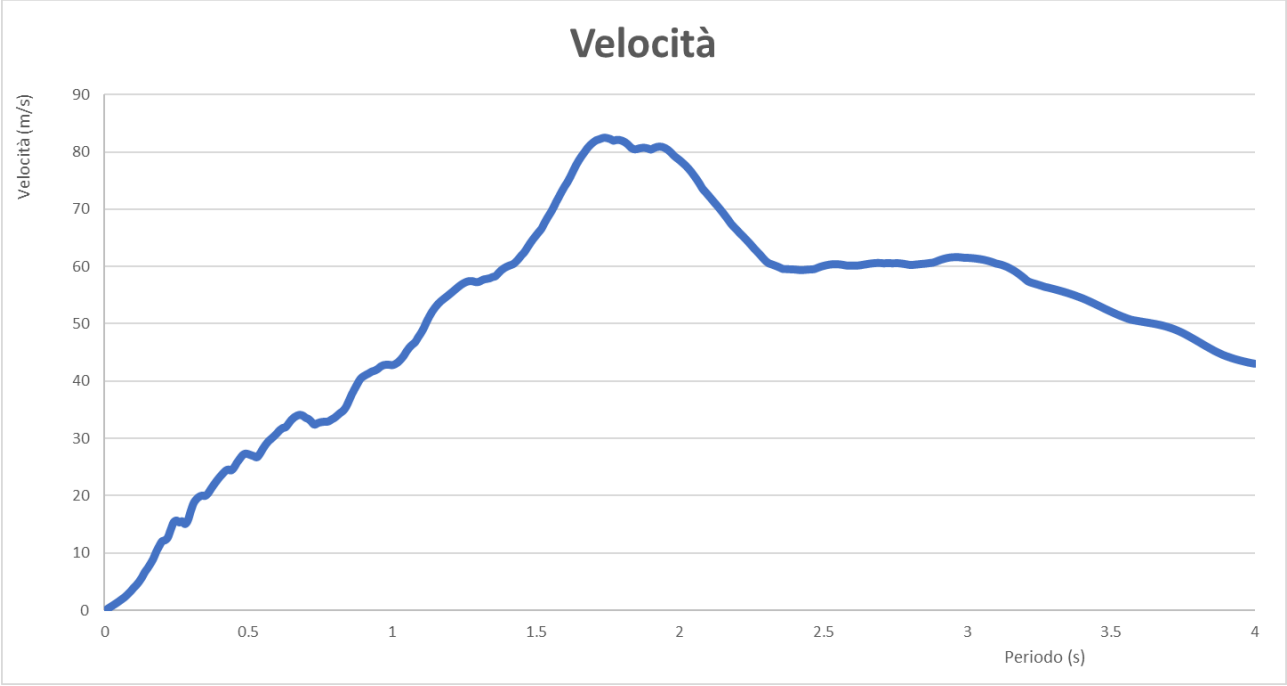



***Fig.4.6 - Spettro velocità RSL***



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

# SPETTRO DI RSL – SLV – 475 anni

| T [s] | Ag |
|---|---|
| **0.00** | **0.205185** |
| 0.01 | 0.205655 |
| 0.02 | 0.206551 |
| 0.03 | 0.20787 |
| 0.04 | 0.209592 |
| 0.05 | 0.213493 |
| 0.06 | 0.217516 |
| 0.07 | 0.227568 |
| 0.08 | 0.237081 |
| 0.09 | 0.251396 |
| 0.1 | 0.25867 |
| 0.11 | 0.269123 |
| 0.12 | 0.285495 |
| 0.13 | 0.307639 |
| 0.14 | 0.316896 |
| 0.15 | 0.328457 |
| 0.16 | 0.342964 |
| 0.17 | 0.366382 |
| 0.18 | 0.379703 |
| 0.19 | 0.387377 |
| 0.2 | 0.375146 |
| 0.21 | 0.371889 |
| 0.22 | 0.392869 |
| 0.23 | 0.410415 |
| 0.24 | 0.403342 |
| 0.25 | 0.379915 |
| 0.26 | 0.370394 |
| 0.27 | 0.346026 |
| 0.28 | 0.348629 |
| 0.29 | 0.371468 |
| 0.3 | 0.387683 |
| 0.31 | 0.389881 |
| 0.32 | 0.386238 |
| 0.33 | 0.378368 |
| 0.34 | 0.36668 |
| 0.35 | 0.364035 |
| 0.36 | 0.367646 |
| 0.37 | 0.369985 |
| 0.38 | 0.371961 |
| 0.39 | 0.372841 |
| 0.4 | 0.372622 |
| 0.41 | 0.371478 |
| 0.42 | 0.366836 |
| 0.43 | 0.356351 |
| 0.44 | 0.355044 |
| 0.45 | 0.359007 |
| 0.46 | 0.360735 |
| 0.47 | 0.361938 |
| 0.48 | 0.358319 |
| 0.49 | 0.349945 |
| 0.5 | 0.340748 |
| 0.51 | 0.33214 |
| 0.52 | 0.323418 |
| 0.53 | 0.324271 |
| 0.54 | 0.328234 |
| 0.55 | 0.331071 |
| 0.56 | 0.332183 |
| 0.57 | 0.331217 |
| 0.58 | 0.33066 |
| 0.59 | 0.33046 |
| 0.6 | 0.33088 |
| 0.61 | 0.329284 |
| 0.62 | 0.32558 |
| 0.63 | 0.3266 |
| 0.64 | 0.327971 |
| 0.65 | 0.327425 |
| 0.66 | 0.325309 |
| 0.67 | 0.321786 |
| 0.68 | 0.315797 |
| 0.69 | 0.307869 |
| 0.7 | 0.301515 |
| 0.71 | 0.293115 |
| 0.72 | 0.284805 |
| 0.73 | 0.28296 |
| 0.74 | 0.280672 |
| 0.75 | 0.277668 |
| 0.76 | 0.274065 |
| 0.77 | 0.27142 |
| 0.78 | 0.270502 |
| 0.79 | 0.269365 |
| 0.8 | 0.269402 |
| 0.81 | 0.269558 |
| 0.82 | 0.269117 |
| 0.83 | 0.271033 |
| 0.84 | 0.275893 |
| 0.85 | 0.281001 |
| 0.86 | 0.284862 |
| 0.87 | 0.288365 |
| 0.88 | 0.291052 |
| 0.89 | 0.29076 |
| 0.9 | 0.289674 |
| 0.91 | 0.288405 |
| 0.92 | 0.287324 |
| 0.93 | 0.285361 |
| 0.94 | 0.284161 |
| 0.95 | 0.284039 |
| 0.96 | 0.282782 |
| 0.97 | 0.280509 |
| 0.98 | 0.277537 |
| 0.99 | 0.274359 |
| 1 | 0.272589 |
| 1.01 | 0.271956 |
| 1.02 | 0.272287 |
| 1.03 | 0.273469 |
| 1.04 | 0.275779 |
| 1.05 | 0.277242 |
| 1.06 | 0.277725 |
| 1.07 | 0.277614 |
| 1.08 | 0.279776 |
| 1.09 | 0.281681 |
| 1.1 | 0.284224 |
| 1.11 | 0.288057 |
| 1.12 | 0.29101 |
| 1.13 | 0.293281 |
| 1.14 | 0.294661 |
| 1.15 | 0.295421 |
| 1.16 | 0.295544 |
| 1.17 | 0.295248 |
| 1.18 | 0.294888 |
| 1.19 | 0.294593 |
| 1.2 | 0.294355 |
| 1.21 | 0.294194 |
| 1.22 | 0.293969 |
| 1.23 | 0.293609 |
| 1.24 | 0.292853 |
| 1.25 | 0.291676 |
| 1.26 | 0.289988 |
| 1.27 | 0.287615 |
| 1.28 | 0.28462 |
| 1.29 | 0.282469 |
| 1.3 | 0.281444 |
| 1.31 | 0.280413 |
| 1.32 | 0.278743 |
| 1.33 | 0.277161 |
| 1.34 | 0.276142 |
| 1.35 | 0.274764 |
| 1.36 | 0.275355 |
| 1.37 | 0.275619 |
| 1.38 | 0.275339 |
| 1.39 | 0.274615 |
| 1.4 | 0.27365 |
| 1.41 | 0.272513 |
| 1.42 | 0.272376 |
| 1.43 | 0.272906 |
| 1.44 | 0.273702 |
| 1.45 | 0.274234 |
| 1.46 | 0.275712 |
| 1.47 | 0.277208 |
| 1.48 | 0.278363 |
| 1.49 | 0.279187 |
| 1.5 | 0.280001 |
| 1.51 | 0.280834 |
| 1.52 | 0.282983 |
| 1.53 | 0.284869 |
| 1.54 | 0.2864 |
| 1.55 | 0.288126 |
| 1.56 | 0.290482 |
| 1.57 | 0.292399 |
| 1.58 | 0.294434 |
| 1.59 | 0.29607 |
| 1.6 | 0.297302 |
| 1.61 | 0.299161 |
| 1.62 | 0.301431 |
| 1.63 | 0.303451 |
| 1.64 | 0.304985 |
| 1.65 | 0.306122 |
| 1.66 | 0.306886 |
| 1.67 | 0.307678 |
| 1.68 | 0.307934 |
| 1.69 | 0.307793 |
| 1.7 | 0.307253 |
| 1.71 | 0.306098 |
| 1.72 | 0.305052 |
| 1.73 | 0.303662 |
| 1.74 | 0.301558 |
| 1.75 | 0.299311 |
| 1.76 | 0.296638 |
| 1.77 | 0.295429 |
| 1.78 | 0.293782 |
| 1.79 | 0.291646 |
| 1.8 | 0.289146 |
| 1.81 | 0.286234 |
| 1.82 | 0.282836 |
| 1.83 | 0.280254 |
| 1.84 | 0.278649 |
| 1.85 | 0.27766 |
| 1.86 | 0.276443 |
| 1.87 | 0.27499 |
| 1.88 | 0.273154 |
| 1.89 | 0.271126 |
| 1.9 | 0.270485 |
| 1.91 | 0.269738 |
| 1.92 | 0.268588 |
| 1.93 | 0.267031 |
| 1.94 | 0.264985 |
| 1.95 | 0.262538 |
| 1.96 | 0.259803 |
| 1.97 | 0.256774 |
| 1.98 | 0.254159 |
| 1.99 | 0.251641 |
| 2 | 0.249019 |



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

Come descritto nell'all. 2 della DGR 476/2021, la stima del fattore di amplificazione **FA** è stata calcolata considerando un tempo di ritorno TR=475 anni, con uno smorzamento ζ=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:

| | $T_1$ | $T_2$ |
|---|---|---|
| **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

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

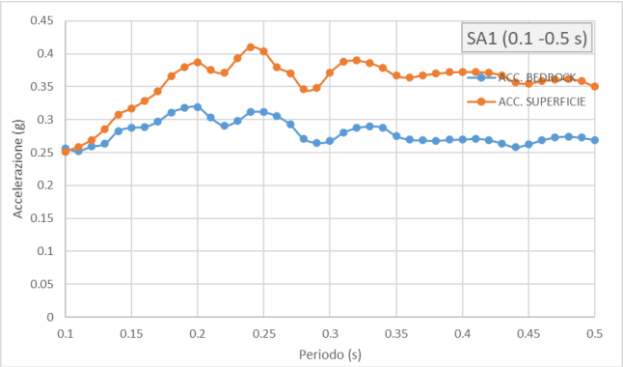
dove V è lo spettro di risposta in velocità, T è il periodo proprio e ζ è lo smorzamento3; sono stati considerati tre intervalli di periodo proprio T ottenendo tre valori di intensità

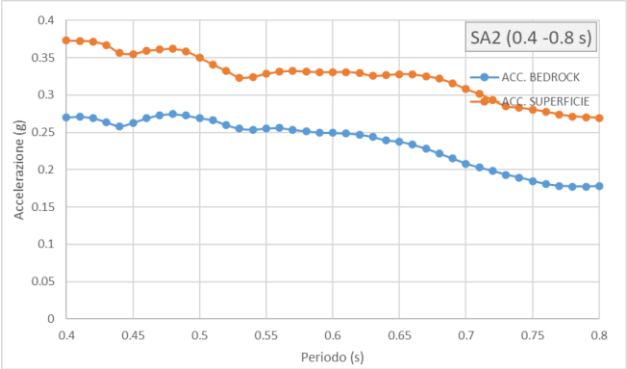
| | $T_1$ | $T_2$ |
|---|---|---|
| **SI1** | 0,1 s | 0,5 s |
| **SI2** | 0,5 s | 1,0 s |
| **SI3*** | 0,5 s | 1,5 s |

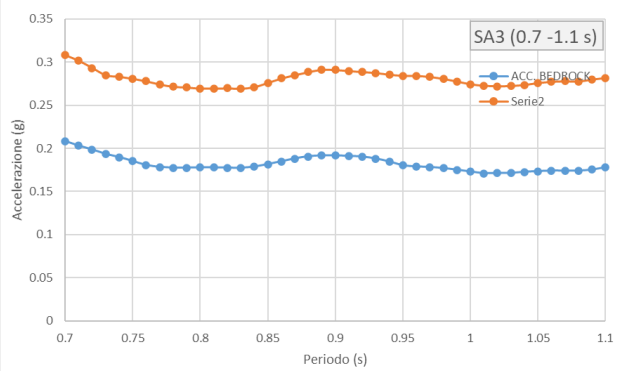
Di seguito si riportano i grafici degli spettri di risposta in accelerazione e velocità calcolati per l'area in studio.

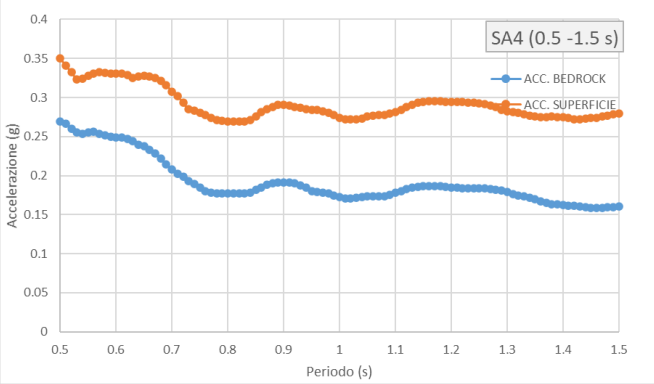

GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo R. (MO)
SEDE LEGALE: via C. Costa,182 - 41123 Modena (MO)
tel. 059/3967169; 059/828367 - p. Iva e C.F.02981500362
Email: info@geogroupmodena.it Pec: geo.group@winpec.it Sito: www.geogroupmodena.it

## SPETTRI DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE

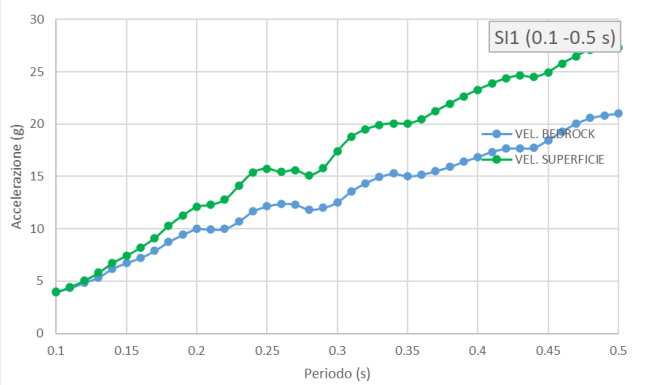


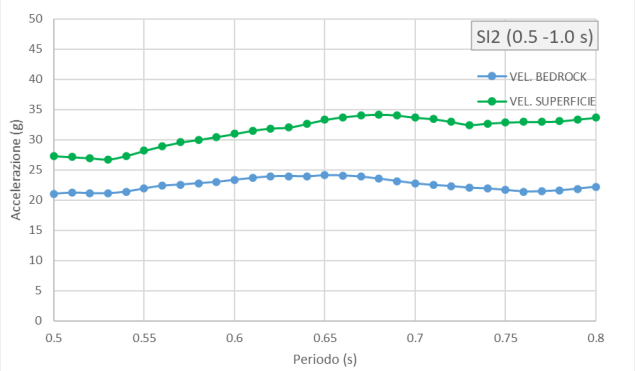



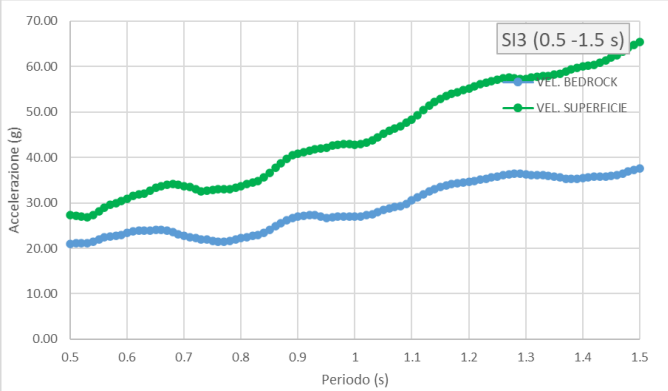




## SPETTRI DI RISPOSTA IN VELOCITÁ






GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

Di seguito si riportano in tabella i FA:

| Fattore di amplificazione | Periodo T (s) | FA |
|---|---|---|
| Fattore di Amplificazione SA1 | *0.1s≤T≤0.5s* | *1.27* |
| Fattore di Amplificazione SA2 | *0.4s≤T≤0.8s* | *1.39* |
| Fattore di Amplificazione SA3 | *0.7s≤T≤1.1s* | *1.54* |
| Fattore di Amplificazione SA4 | *0.5s≤T≤1.5s* | *1.54* |

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

| Fattore di amplificazione | Periodo T (s) | FA |
|---|---|---|
| Fattore di Amplificazione SI1 | *0.1s≤T≤0.5s* | *1.27* |
| Fattore di Amplificazione SI2 | *0.5s≤T≤1.0s* | *1.49* |
| Fattore di Amplificazione SI3 | *0.5s≤T≤1.5s* | *1.54* |

***Tab.4.5 – Fattori di amplificazione SI1 –SI2 –SI3.***

Infine si è calcolato il valore di $\mathbf{H_{SM}}$, 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≤ T ≤ 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 ASIUHS/ΔT, 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 **$ASIU_{HS}/\Delta T$** pari a **354.**



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

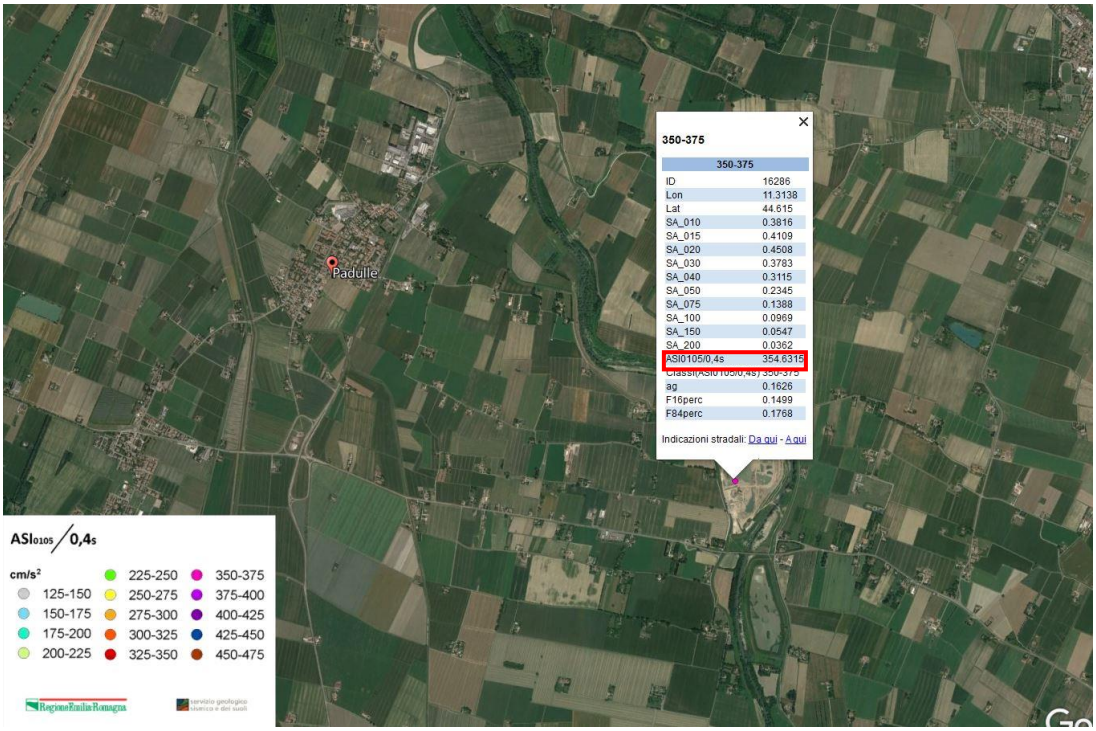



***Fig.4.7 – Valori di ASIUHS/ΔT per l'area in studio - griglia INGV.***

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≤T≤0,8s, 0,7s≤T≤1,1s e 0,5s≤T≤1,5s.

| $H_{SM}$ | Periodo T (s) |
|---|---|
| $H_{SM}$ = 450 | 0,1 s ≤T ≤ 0,5s |
| $H_{0408}$= 491 | 0,4 s ≤ T ≤ 0,8s |
| $H_{0711}$= 546 | 0,7 s ≤ T ≤ 1,1s |
| $H_{0515}$= 544 | 0,5 s ≤ T≤ 1,5s |

***Tab.4.6 – 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 **$PGA_{max}$=$A_{max}$=0.205g** (per T=0 s).



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

# 5 MODELLAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA DEL SITO

## 5.1 Modello geotecnico del sottosuolo

Sulla base dei dati emersi dall'elaborazione geotecnica e litostratigrafica delle indagini geotecniche eseguite in sito e in relazione all'intervento in progetto, si possono riassumere i seguenti modelli geotecnici schematici del terreno investigato:

### Parametri di resistenza e deformabilità:

**CPTU1**

| Modello geotecnico medio | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Profondità | Deposito | $\gamma_{NAT}$ /$\gamma_{SAT}$ | c' | Cu | Dr | φ' | Es | M | Dw |
| A | 0.0 -2.08 | Argilla limosa sovraconsolidata con livelli limosi sabbiosi | 18.5/21.5 | 7.3 | 73.0 | / | 24 | 10220 | 6000 | |
| B | 2.08 – 3.40 | Argilla limosa a scarsa consistenza | 18.0/21.0 | 4.0 | 40.0 | / | 21 | 5600 | 3500 | -2.5 |
| C | 3.40 – 7.78 | Argilla limosa a media consistenza | 18.0/21.0 | 5.3 | 53.0 | / | 22 | 7420 | 4500 | |
| D | 7.78 – 16.26 | Argilla limosa a elevata consistenza | 18.0/21.0 | 8.0 | 80.0 | / | 25 | 11200 | 6000 | |
| E | 16.26 – 19.94 | Argilla limosa a media consistenza | 18.0/21.0 | 6.0 | 60.0 | / | 23 | 8400 | 5000 | |
| F | 19.94 – 20.0 | Argilla limosa a elevata consistenza | 18.0/21.0 | 8.0 | 80.0 | / | 25 | 11200 | 6000 | |
| | M da p.c. | Descrizione litologica | Peso di volume naturale e saturo (kN/m3) | Coesione efficace (kN/m2) | Coesione non drenata (kN/m²) | Densità relativa (%) | Angolo d'attrito efficace di picco (°) | Modulo di Young (kN/m²) | Modulo edometrico (kN/m²) | Soggiacenza (m da p.c.) |

**CPTU2**

| Modello geotecnico medio | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Profondità | Deposito | $\gamma_{NAT}$ /$\gamma_{SAT}$ | c' | Cu | Dr | φ' | Es | M | Dw |
| A | 0.0 -1.98 | Argilla limosa sovraconsolidata con livelli limosi sabbiosi | 18.5/21.5 | 7.5 | 75.0 | / | 24 | 10500 | 6000 | |
| B | 1.98 – 6.64 | Argilla limosa a scarsa consistenza | 18.0/21.0 | 4.0 | 40.0 | / | 21 | 5600 | 3500 | -2.6 |
| C | 6.64 – 11.0 | Argilla limosa a elevata consistenza | 18.0/21.0 | 7.5 | 75.0 | / | 24 | 10500 | 6000 | |
| D | 11.00 – 19.18 | Argilla limosa a media consistenza | 18.0/21.0 | 5.5 | 55.0 | / | 23 | 7700 | 4800 | |
| E | 19.18 – 20.0 | Argilla limosa a elevata consistenza | 18.0/21.0 | 8.0 | 80.0 | / | 25 | 11200 | 6000 | |
| | M da p.c. | Descrizione litologica | Peso di volume naturale e saturo (kN/m3) | Coesione efficace (kN/m2) | Coesione non drenata (kN/m²) | Densità relativa (%) | Angolo d'attrito efficace di picco (°) | Modulo di Young (kN/m²) | Modulo edometrico (kN/m²) | Soggiacenza (m da p.c.) |

**Dato che il primo strato di terreno presenta una forte tendenza alla sovraconsolidazione, si ritiene ragionevole impostare le verifiche geotecniche sul secondo strato.**


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

## 5.3 Stabilità nei confronti della liquefazione (§ A2.2. DGR 476/2021)

In accordo con la normativa regionale DGR 476/21 si è proceduto alla verifica della liquefazione per le verticali di prova CPTU1 – CPTU2.

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:

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

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

**$K_\sigma$** 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:

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

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:

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

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

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

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 476/2021 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.


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

Le verifiche sono state svolte considerando una magnitudo di riferimento **M = 6.14** (derivante dalla zonazione sismogenetica) e una accelerazione massima al suolo **$A_{max}$ = 0.205g** (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:

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

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

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

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 | Nullo |
| 0<LPI≤2 | Basso |
| 2<LPI≤5 | Moderato |
| 5<LPI≤10 | Alto |
| 15>LPI | Molto alto |

Si illustra successivamente il valore di LPI derivato dalle verticali di prova, considerando un'accelerazione massima al suolo Amax= **0.205g** (calcolata secondo RSL – terzo livello di approfondimento), la soggiacenza **della falda freatica è stata ipotizzata in condizioni sismiche alla profondità Dw= -1.00 m** e una magnitudo di riferimento pari a M=**6.14**.

A seguito delle verifiche, in riferimento alle verticali, sono stati ottenuti i seguenti valori di LPI:

| INDAGINE | INDICE DI LIQUEFAZIONE | RISCHIO |
|---|---|---|
| CPTU1 | 1.103 | BASSO |
| CPTU2 | 0 | NULLO |


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

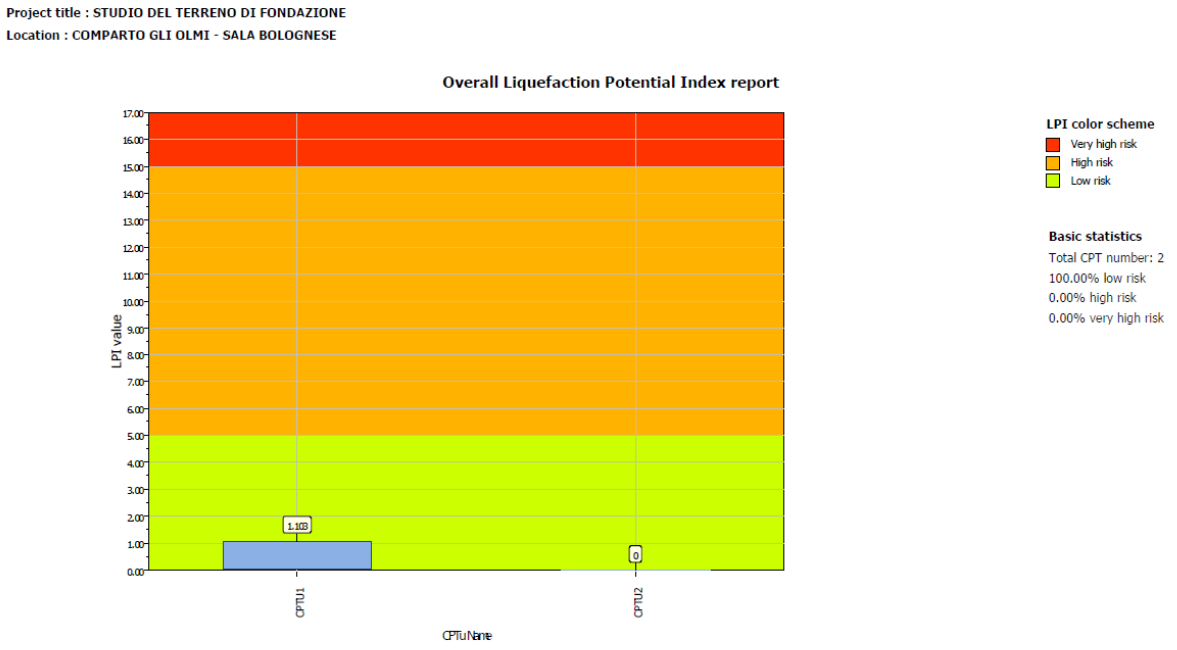



***Fig.5.2 – Indice di liquefazione dalle prove CPTU.***



GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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*

## 5.4 Stima dei cedimenti indotti dall'azione sismica (§ B. DGR 476/2021)

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:

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

$\varepsilon_{vi}$ = deformazione volumetrica;

$\Delta z_i$ = 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.

Si riportano di seguito i valori dei cedimenti post sismici in terreni incoerenti sia in saturi (Liq. seattlement) che insaturi (Dry settlement) per le verticali eseguite.

| CPTU | Dry Seattle (cm) | Liq Seattle (cm) |
|---|---|---|
| CPTU1 | 0 | 2.87 |
| CPTU2 | 0 | 0 |


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

# 6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nei mesi di novembre e dicembre 2021 è stato eseguito il presente elaborato al fine di verificare le condizioni di edificabilità e di pericolosità sismica dell'area.

La caratterizzazione sismica del sito è stata condotta sulla base di indagini geofisiche di tipo MASW e HVSR eseguite 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 **$Vs_{30}$ = 192 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:

| | RSL | |
|---|---|---|
| **ag** | **F.A.** | **$A_{max}$** |
| 0.161g | 1.27 | 0.205g |

Sulla base dei dati emersi dall'elaborazione delle indagini geotecniche eseguite (§ 3.1), si evidenzia nei primi metri la presenza di terreno con scadenti proprietà geotecniche. **Pertanto in relazione ai modesti parametri geotecnici del sottosuolo emersi dall' elaborazione delle indagini da noi eseguite, in fase esecutiva, dovranno essere realizzate ulteriori indagini specifiche per ogni singolo fabbricato corredate di relazioni geotecniche esecutive, al fine di poter valutare sulla base dei carichi trasmessi al terreno, il tipo di fondazioni da realizzare.**

È stata eseguita la verifica della suscettibilità al fenomeno della liquefazione sulla base delle prove penetrometriche CPTU eseguite in sito, considerando una accelerazione massima al suolo **$A_{max}$ = 0.205g** (calcolata dal terzo livello di risposta sismica locale DGR 476/2021), la soggiacenza della falda freatica è stata ipotizzata in condizioni sismiche alla profondità **Dw=-1.00 m da p.c,** e una **magnitudo di riferimento** pari a **M=6.14.** Dall'analisi della suscettibilità nei confronti del fenomeno della liquefazione così eseguita sono ottenuti i seguenti valori di LPI (§ 5.3):

| INDAGINE | INDICE DI LIQUEFAZIONE | RISCHIO |
|---|---|---|
| CPTU1 | 1.103 | BASSO |
| CPTU2 | 0 | NULLO |

Sono stati inoltre calcolati i cedimenti indotti dall'azione sismica (§ 5.4).


GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo 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

| CPTU | Dry Seattle (cm) | Liq Seattle (cm) |
|---|---|---|
| CPTU1 | 0 | 2.87 |
| CPTU2 | 0 | 0 |

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

Modena, 3 dicembre 2021

**Dott. Geol. Pier Luigi Dallari**



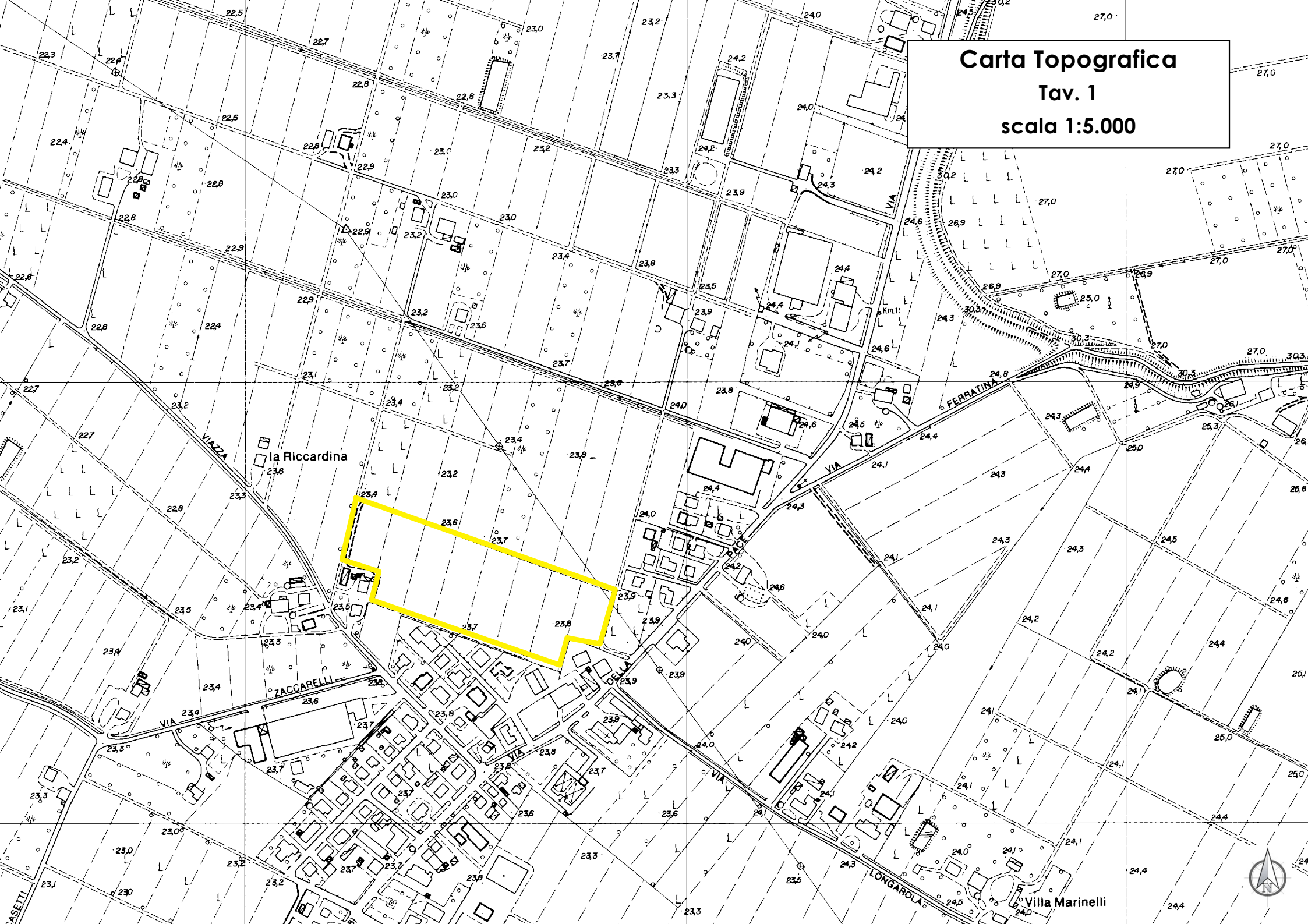
GEO GROUP GEOLOGIA E AMBIENTE
*UFFICI: via Per Modena, 12 - 41051 Castelnuovo R. (MO)*
*SEDE LEGALE: via C. Costa,182 - 41123 Modena (MO)*
*tel. 059/3967169; 059/828367 - p. Iva e C.F.02981500362*
*Email: info@geogroupmodena.it Pec: geo.group@winpec.it Sito: www.geogroupmodena.it*

# TAVOLE

# Carta Topografica

## Tav. 1

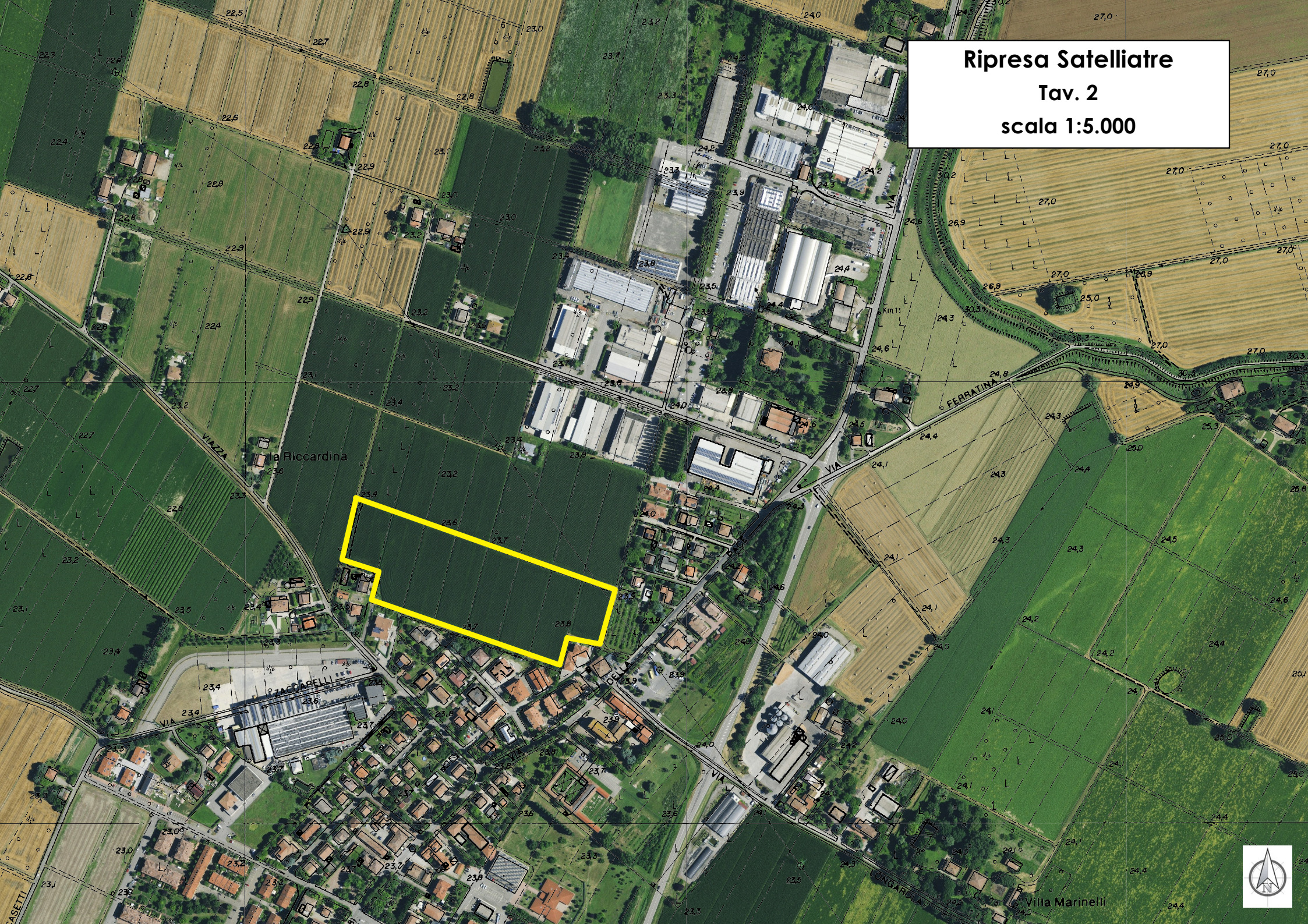
## scala 1:5.000



# Ripresa Satelliatre

## Tav. 2

## scala 1:5.000



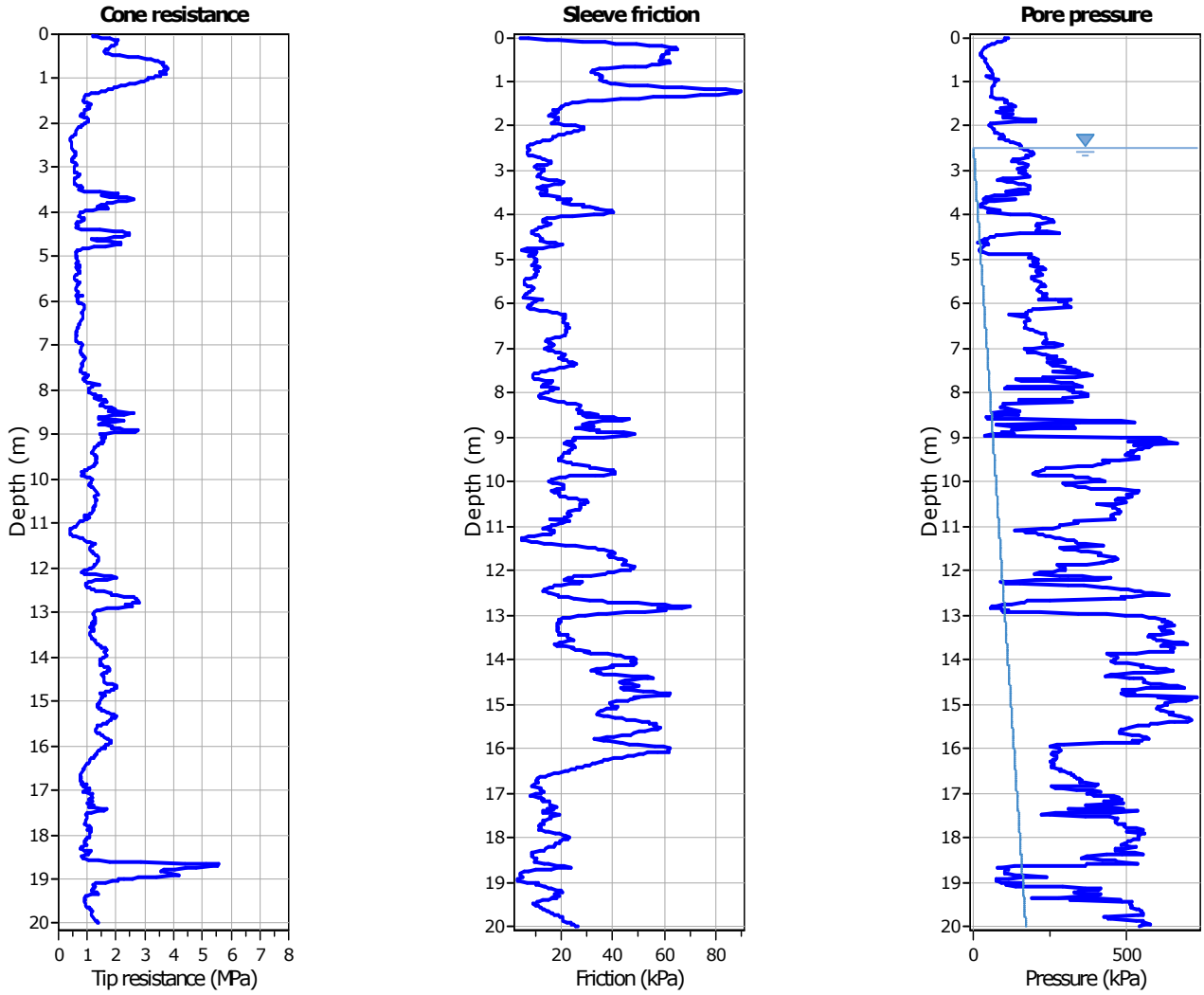
Ubicazione Indagini
Tav. 3
scala 1:2.000
la Riccardina
HVSR
CPTU1
MASW
CPT
CPTU2
ZACCARELLI
DELLA

# ALLEGATO 1

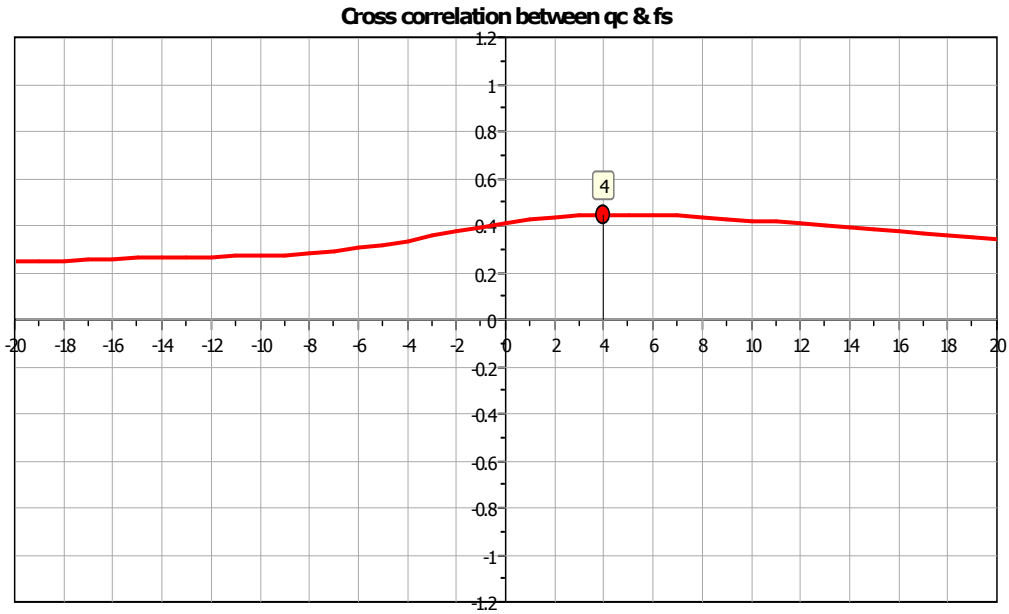
## PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CPTE/U

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE** **CPT: CPTU1**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE** Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021




The plot below presents the cross correlation coeficient 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 sucessive CPT measurements).

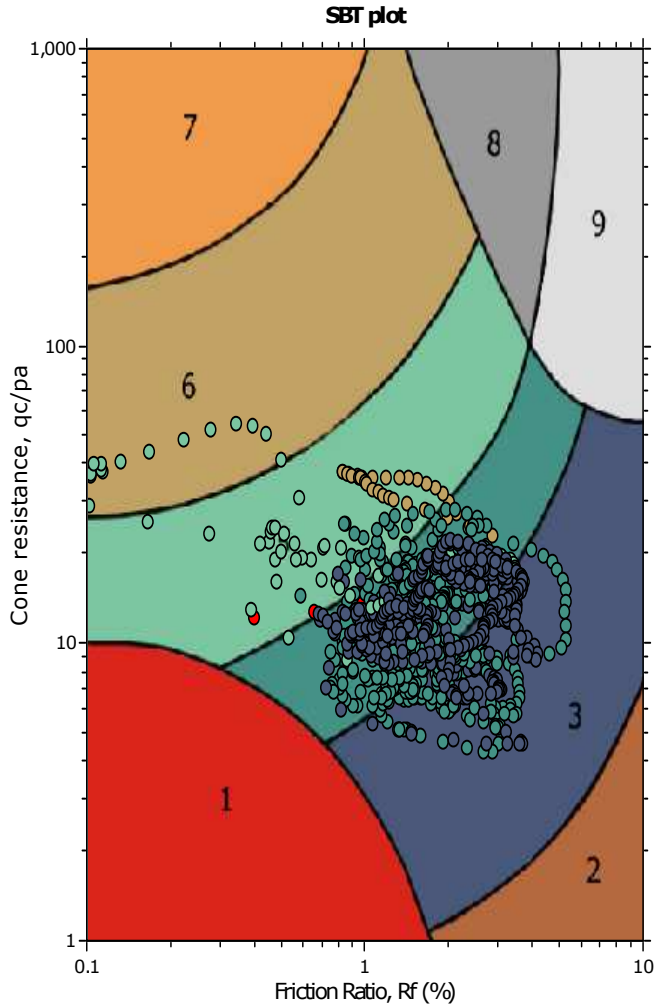


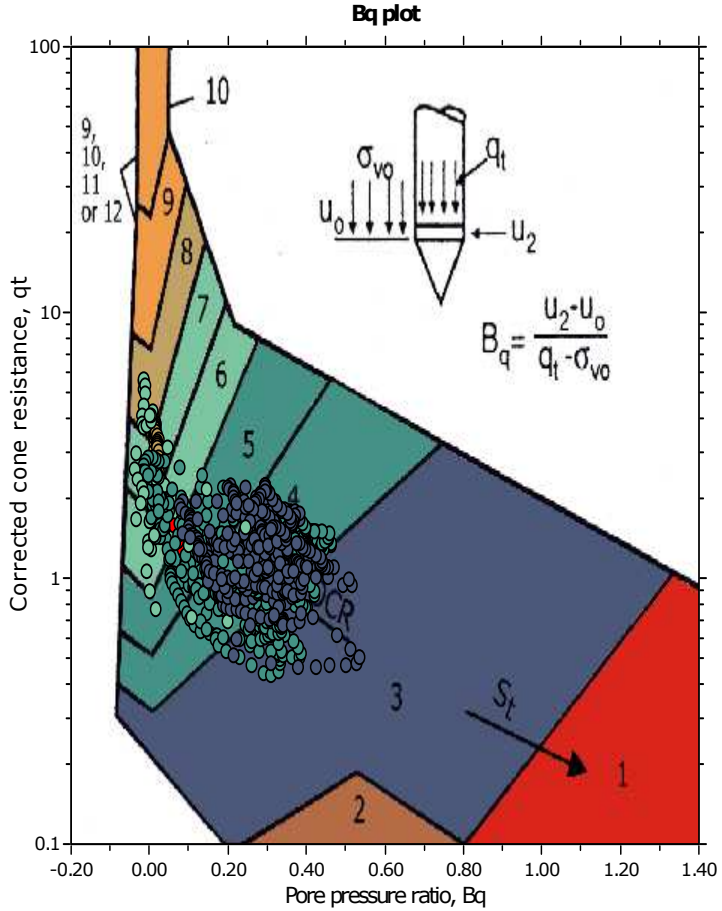
**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU1**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021

## SBT - Bq plots




**SBT legend**

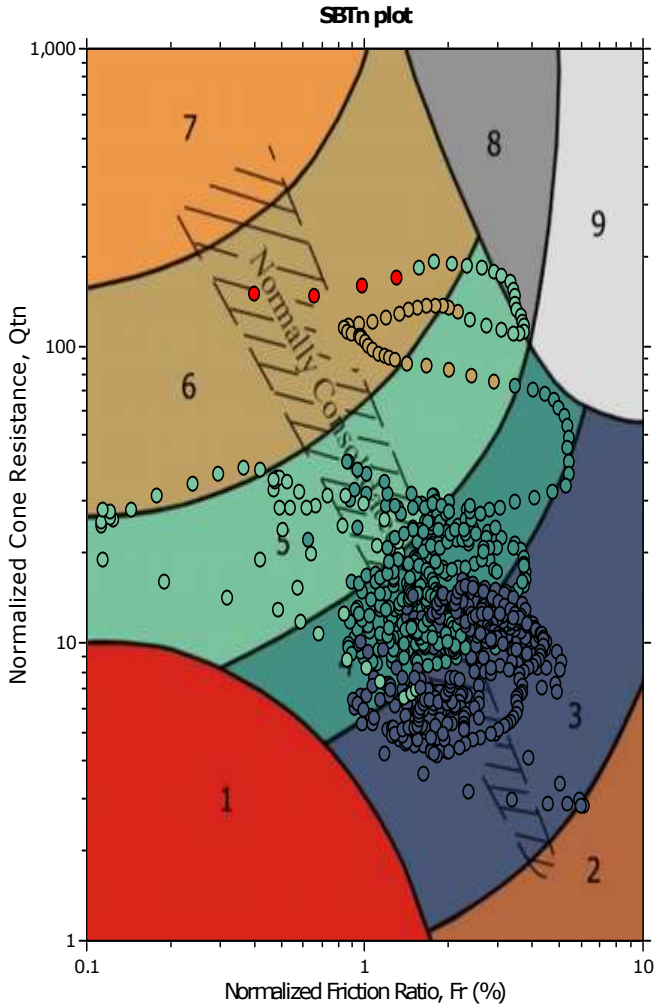
1. Sensitive fine grained
2. Organic material
3. Clay to silty clay
4. Clayey silt to silty clay
5. Silty sand to sandy silt
6. Clean sand to silty sand
7. Gravely sand to sand
8. Very stiff sand to clayey sand
9. Very stiff fine grained

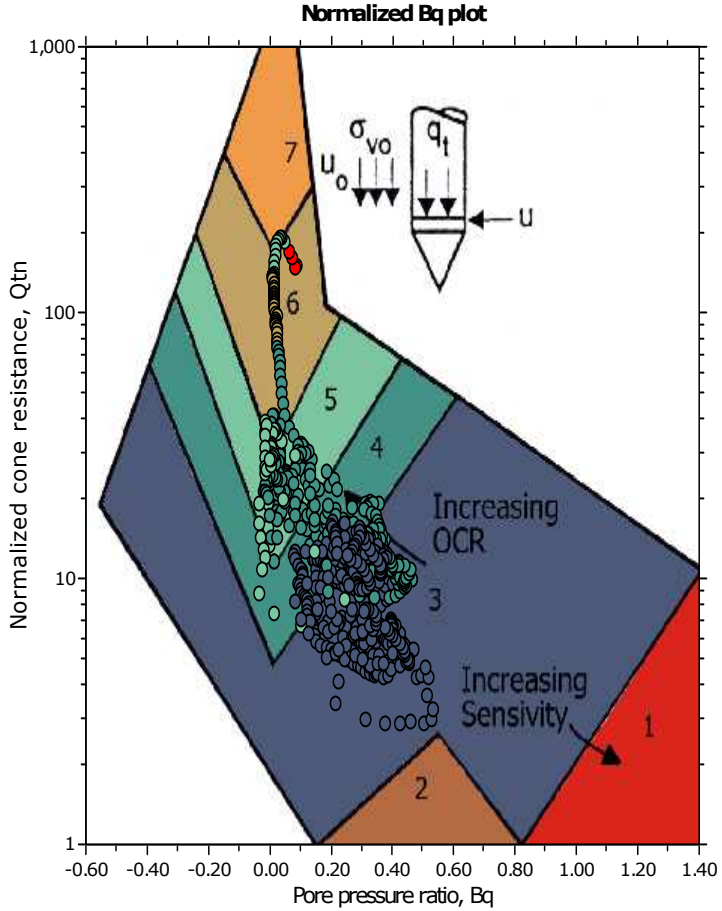
**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU1**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021

## SBT - Bq plots (normalized)



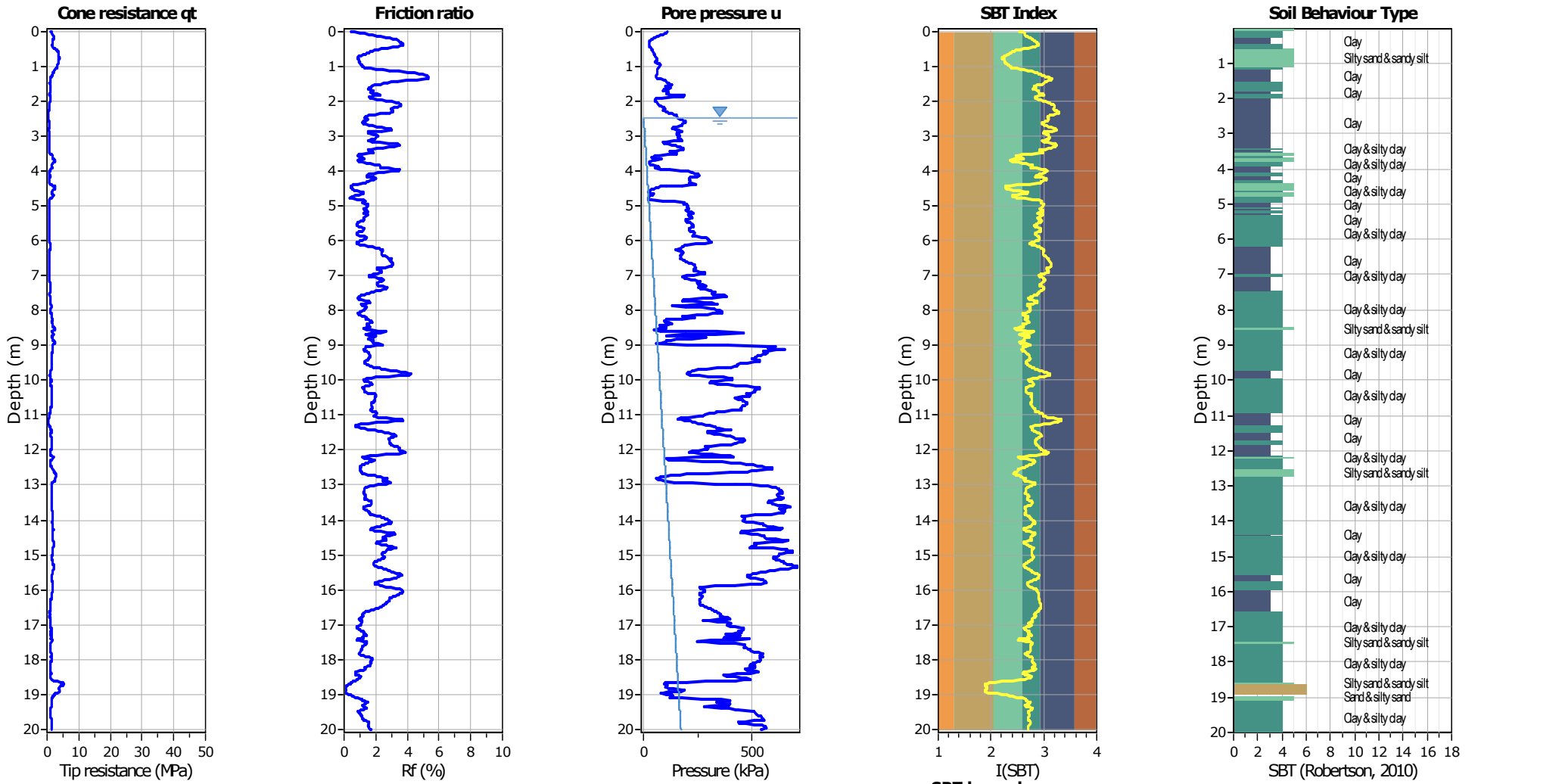

**SBTn legend**

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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU1**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021



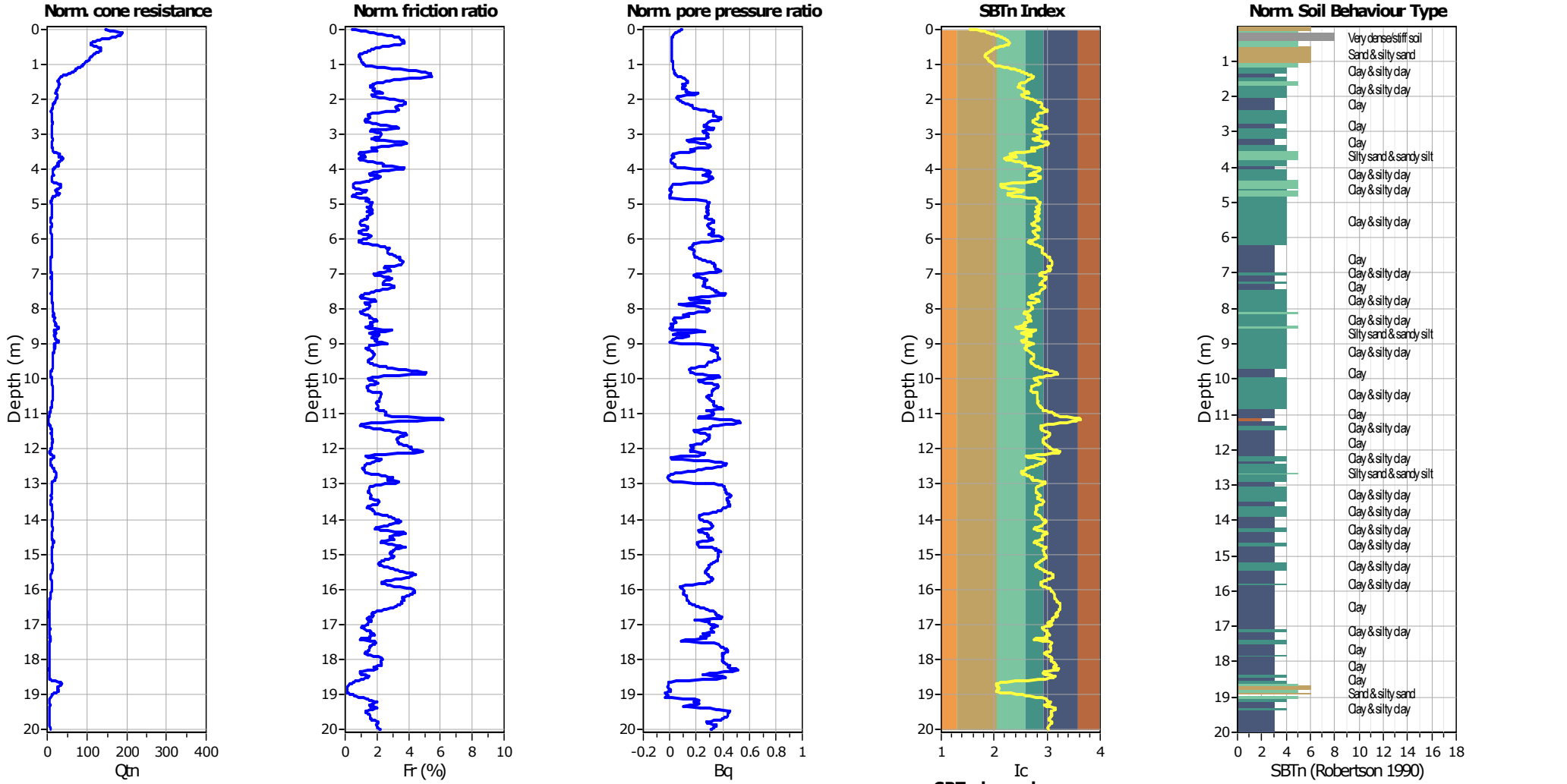

**SBT legend**

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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU1**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021



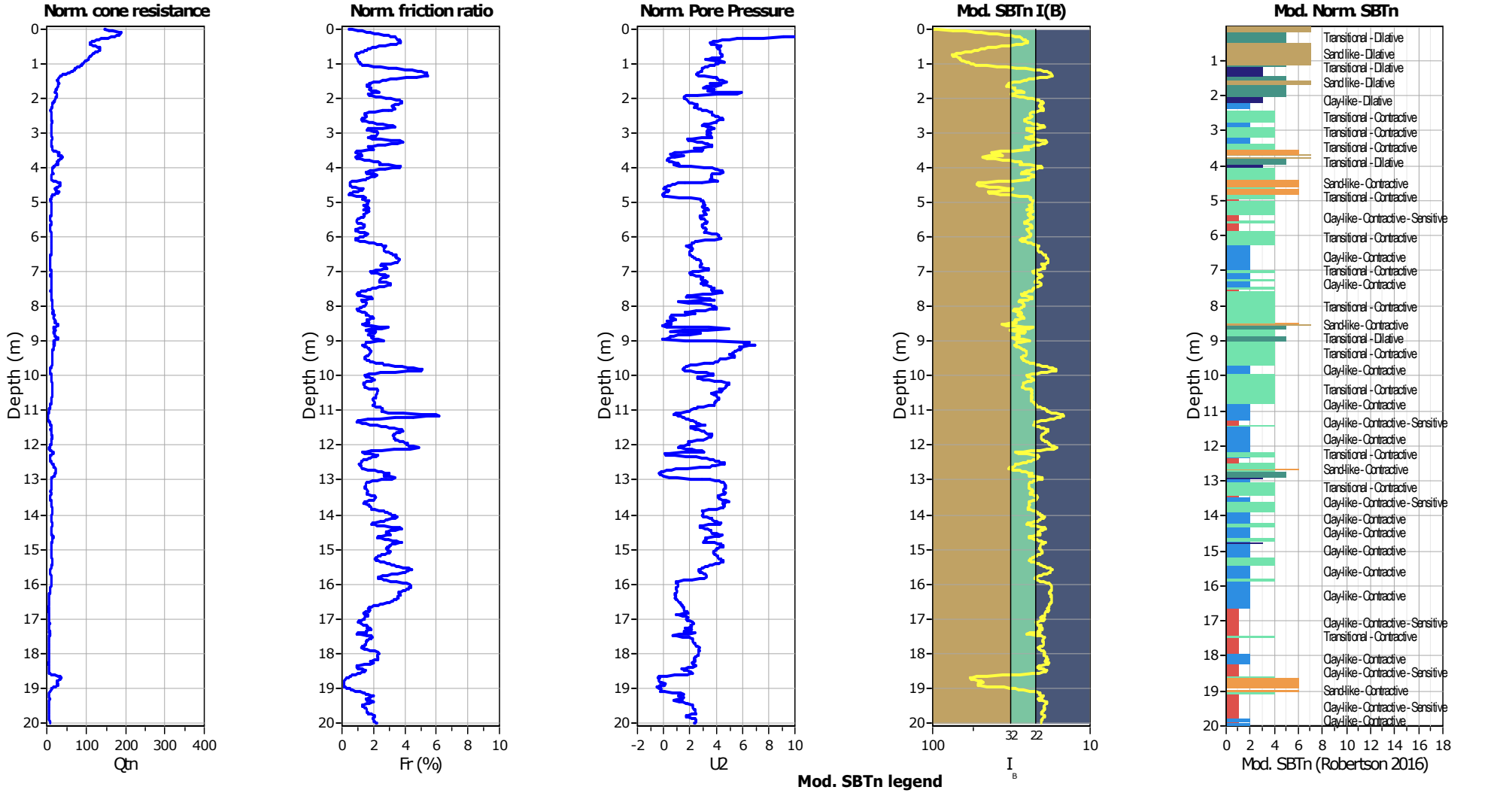

**SBTn legend**

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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU1**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021




**Mod. SBTn legend**

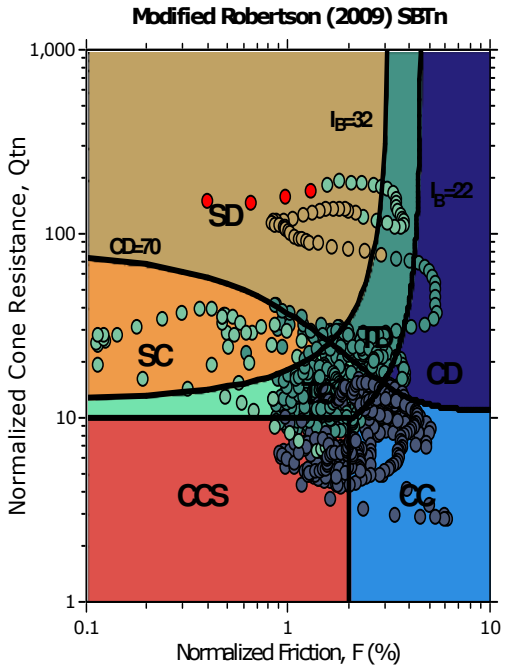
1. CCS: ClayLike - Contractive, Sensitive
2. CC: Clay-like - Contractive
3. CD: Clay-Like: Dilative
4. TC: Transitional - Contractive
5. TD: Transitional - Dilative
6. SC: Sand-like - Contractive
7. SD: Sand-like - Dilative

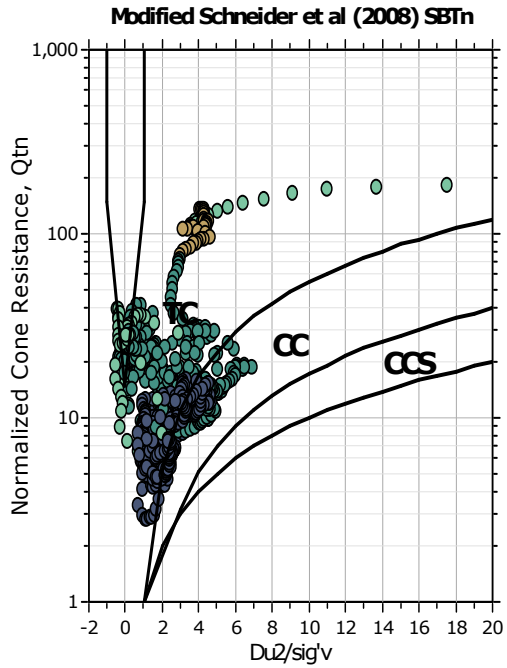
**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

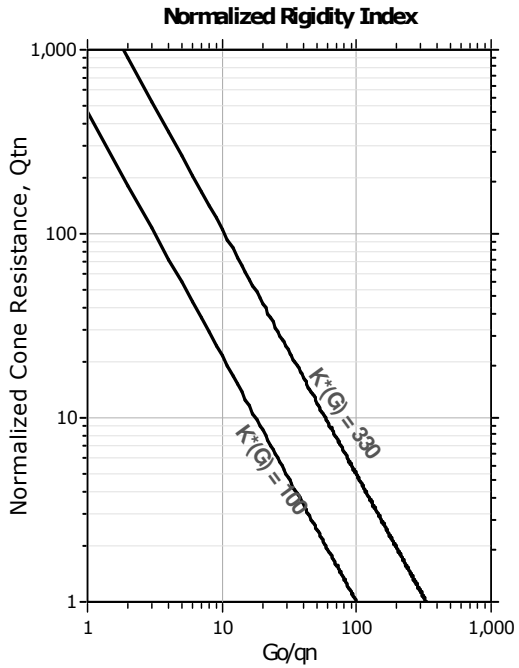
**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU1**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021

## Updated SBTn plots



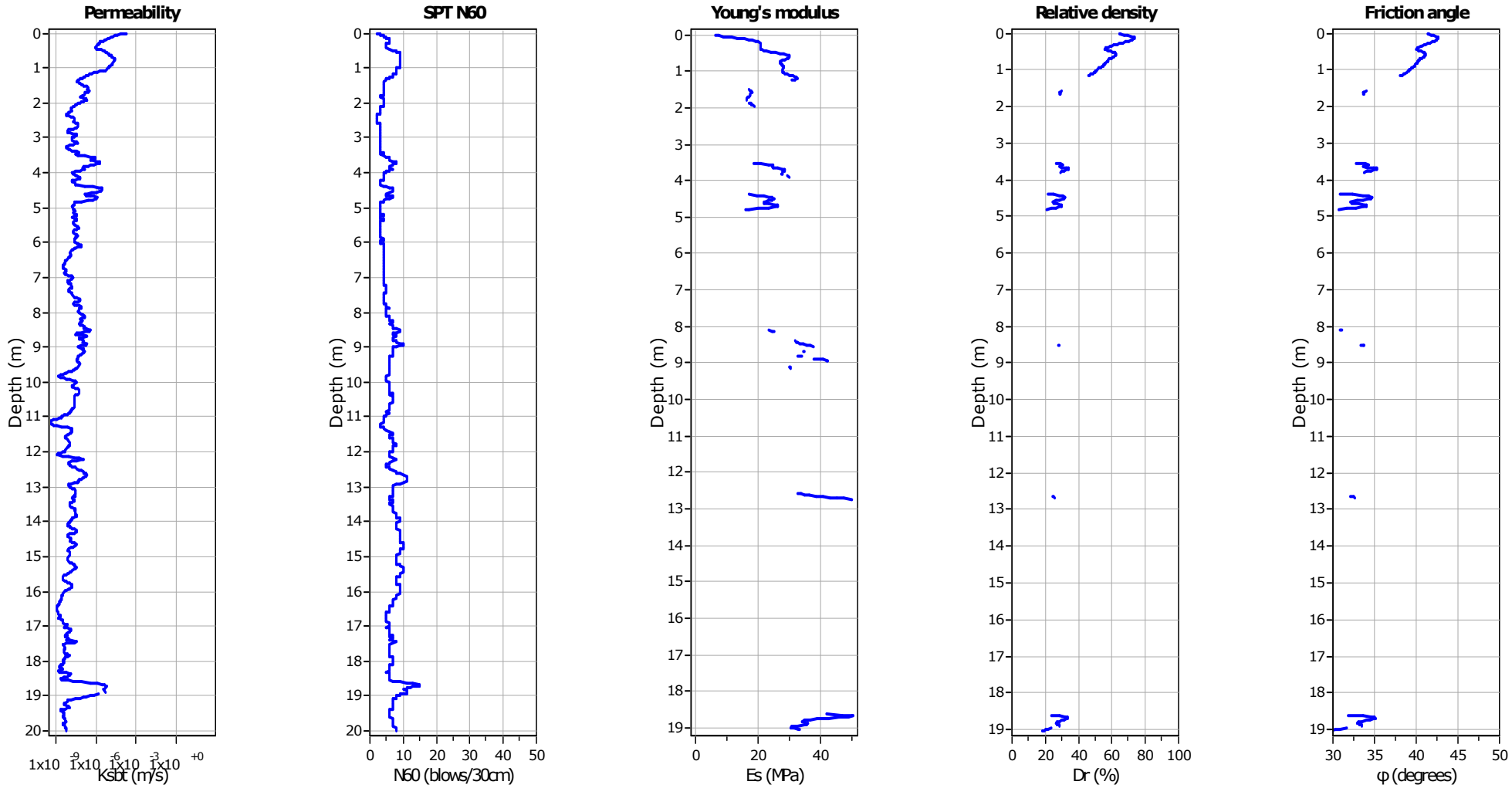

CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
CC: Clay-like - Contractive
CD: Clay-like - Dilative
TC: Transitional - Contractive
TD: Transitional - Dilative
SC: Sand-like - Contractive
SD: Sand-like - Dilative

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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU1**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021



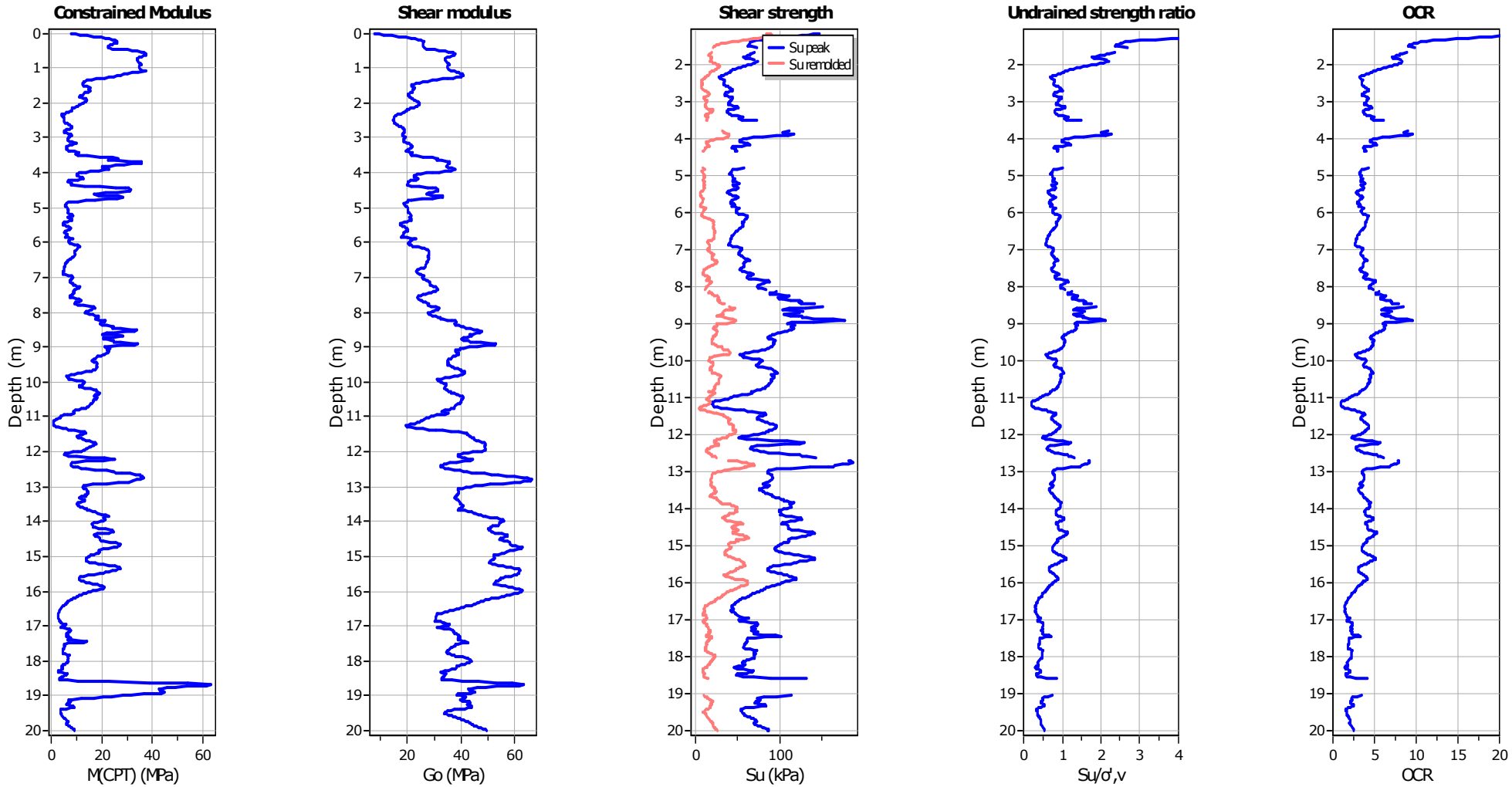

**Calculation parameters**

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)
Relative desnisty constant, $C_{Dr}$: 350.0
Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)
User defined estimation data

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU1**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021



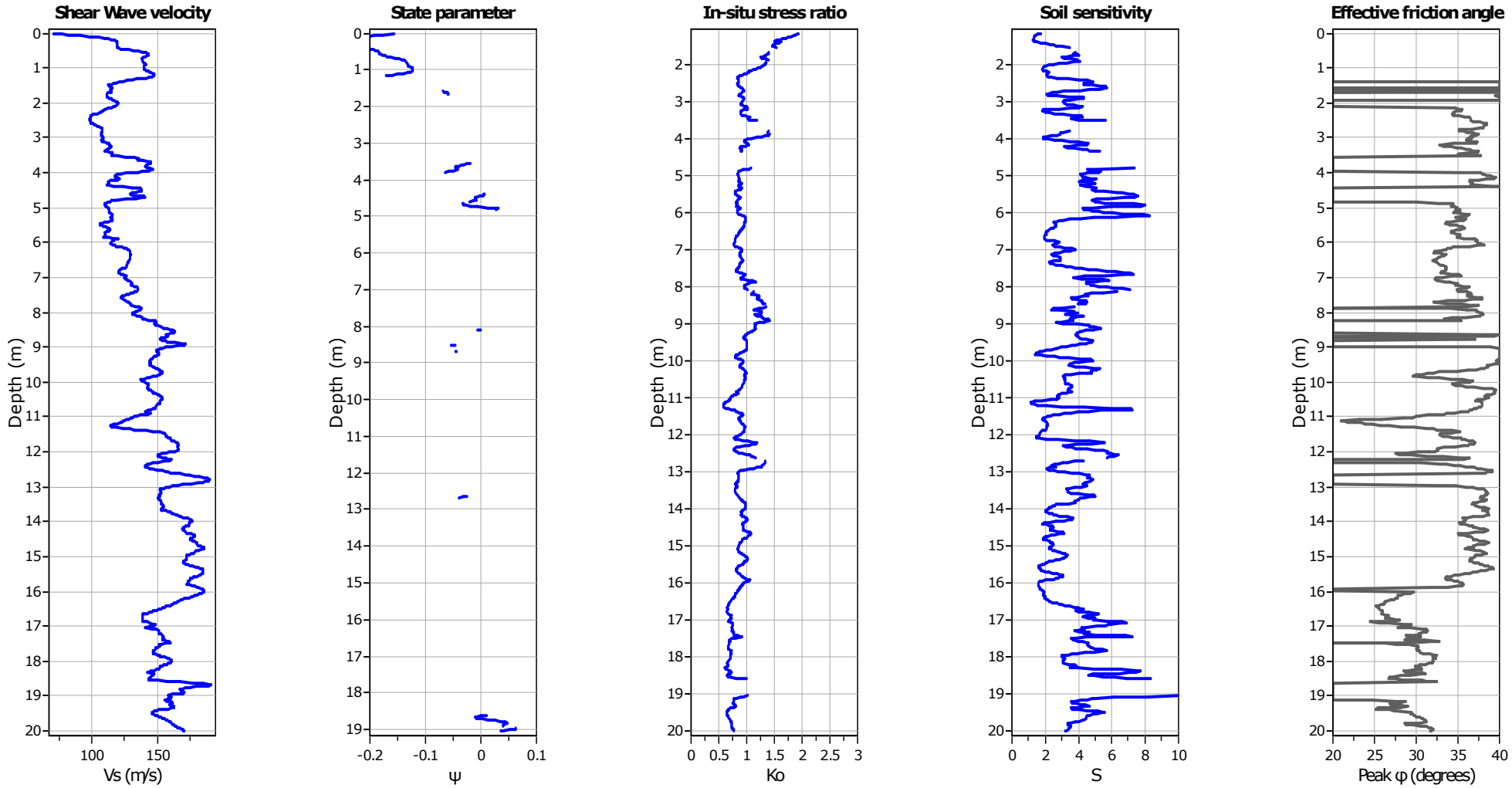

**Calculation parameters**

Constrained modulus: Based on variable *alpha* using $I_c$ and $Q_{tn}$ (Robertson, 2009)
Go: Based on variable *alpha* 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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU1**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021



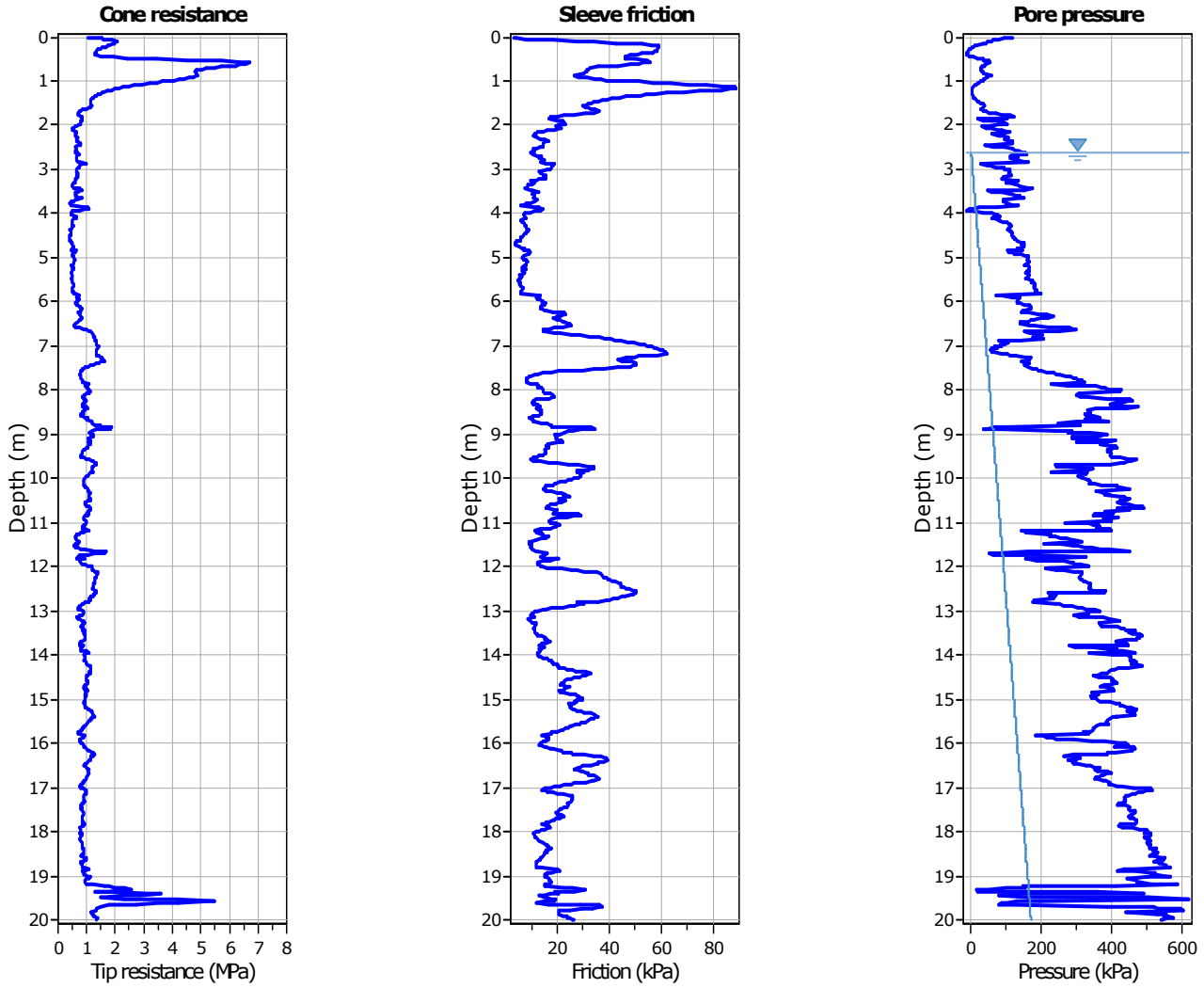

**Calculation parameters**

Soil Sensitivity factor, $N_S$: 7.00

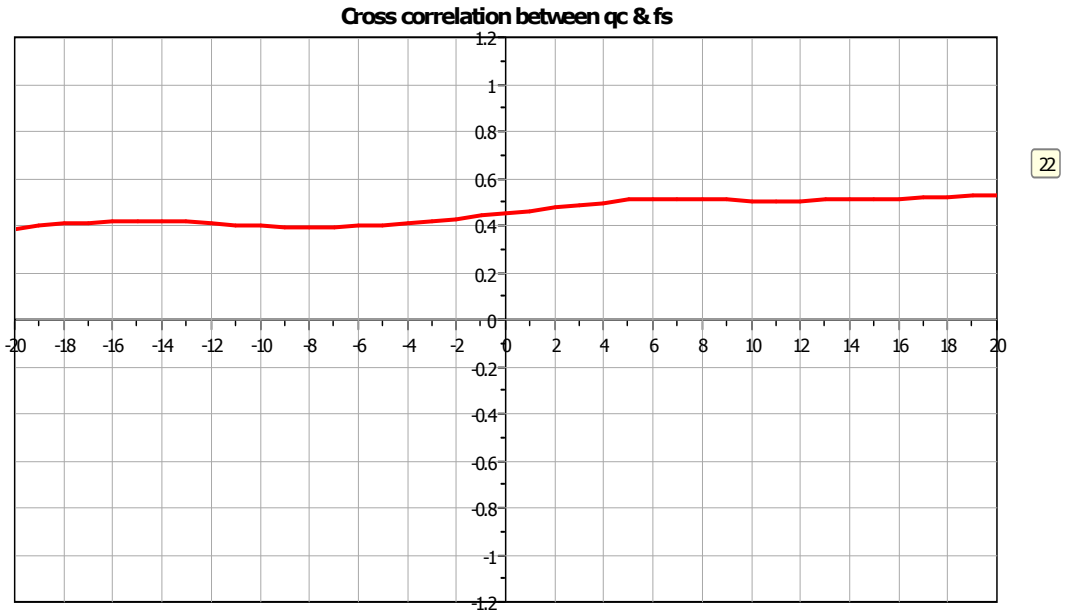
User defined estimation data

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE** **CPT: CPTU2**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE** Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021




The plot below presents the cross correlation coeficient 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 sucessive CPT measurements).

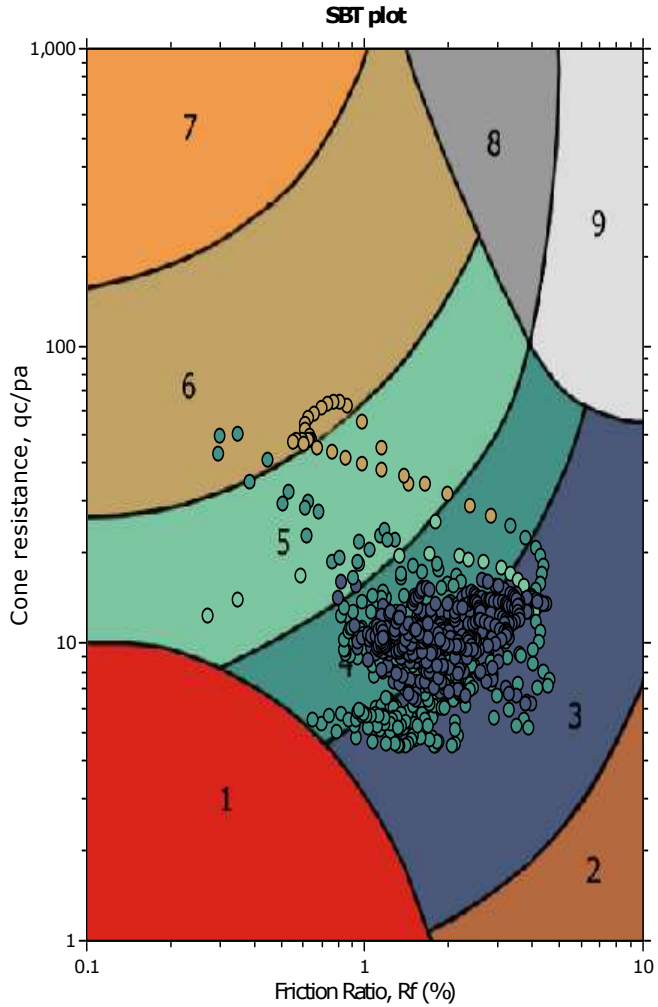


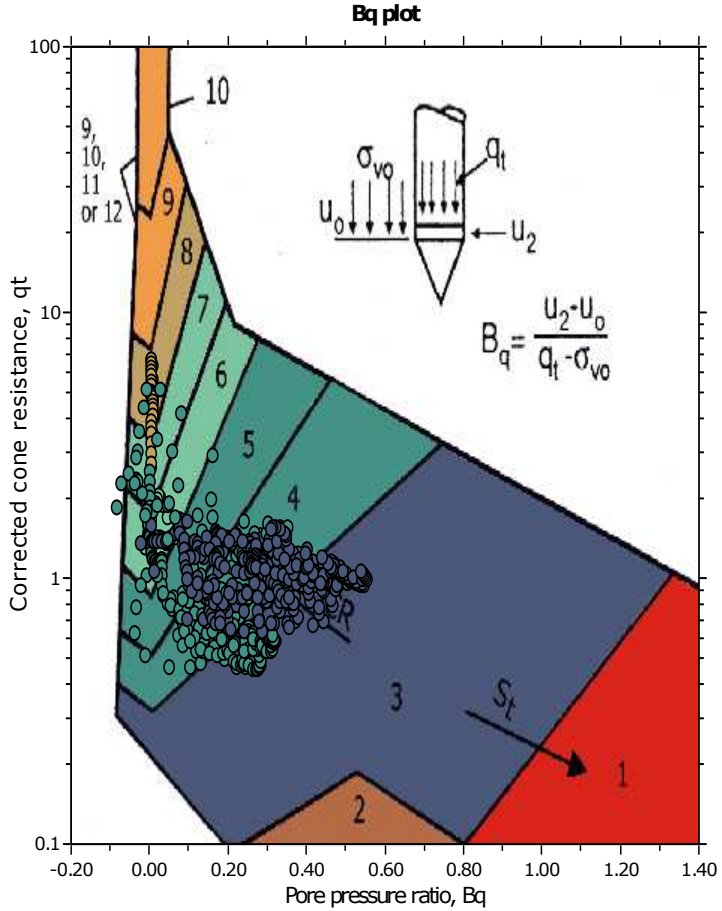
**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU2**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021

## SBT - Bq plots




**SBT legend**

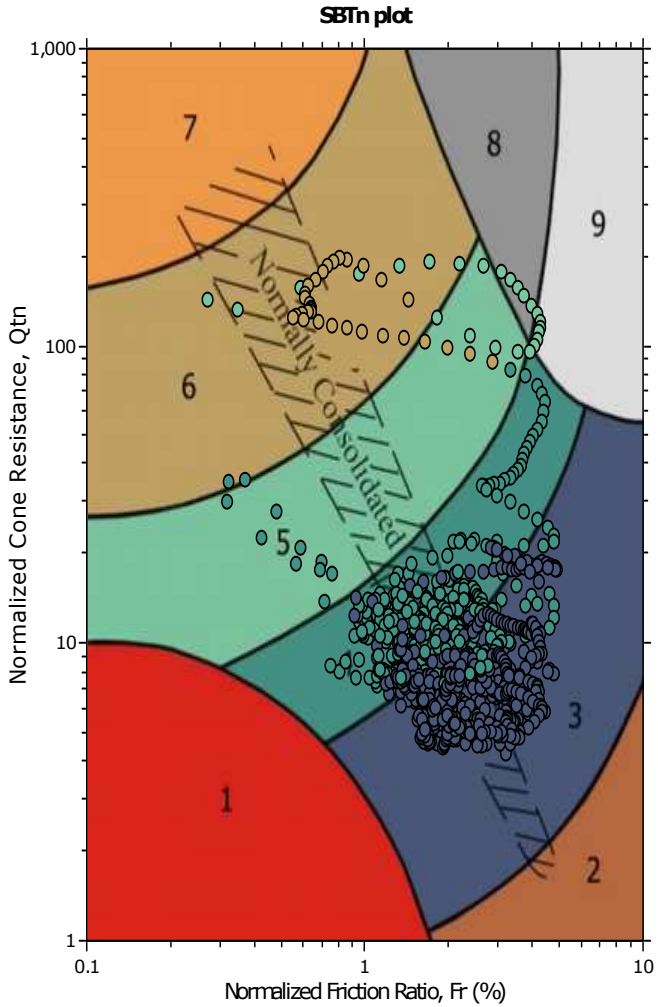
1. Sensitive fine grained
2. Organic material
3. Clay to silty clay
4. Clayey silt to silty clay
5. Silty sand to sandy silt
6. Clean sand to silty sand
7. Gravely sand to sand
8. Very stiff sand to clayey sand
9. Very stiff fine grained

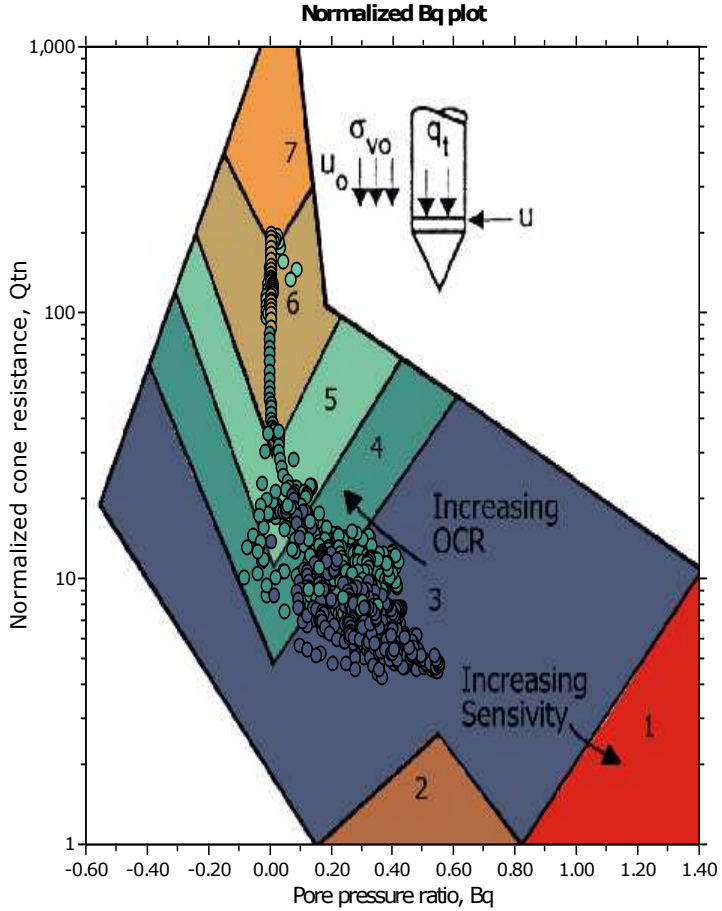
**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU2**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021

## SBT - Bq plots (normalized)



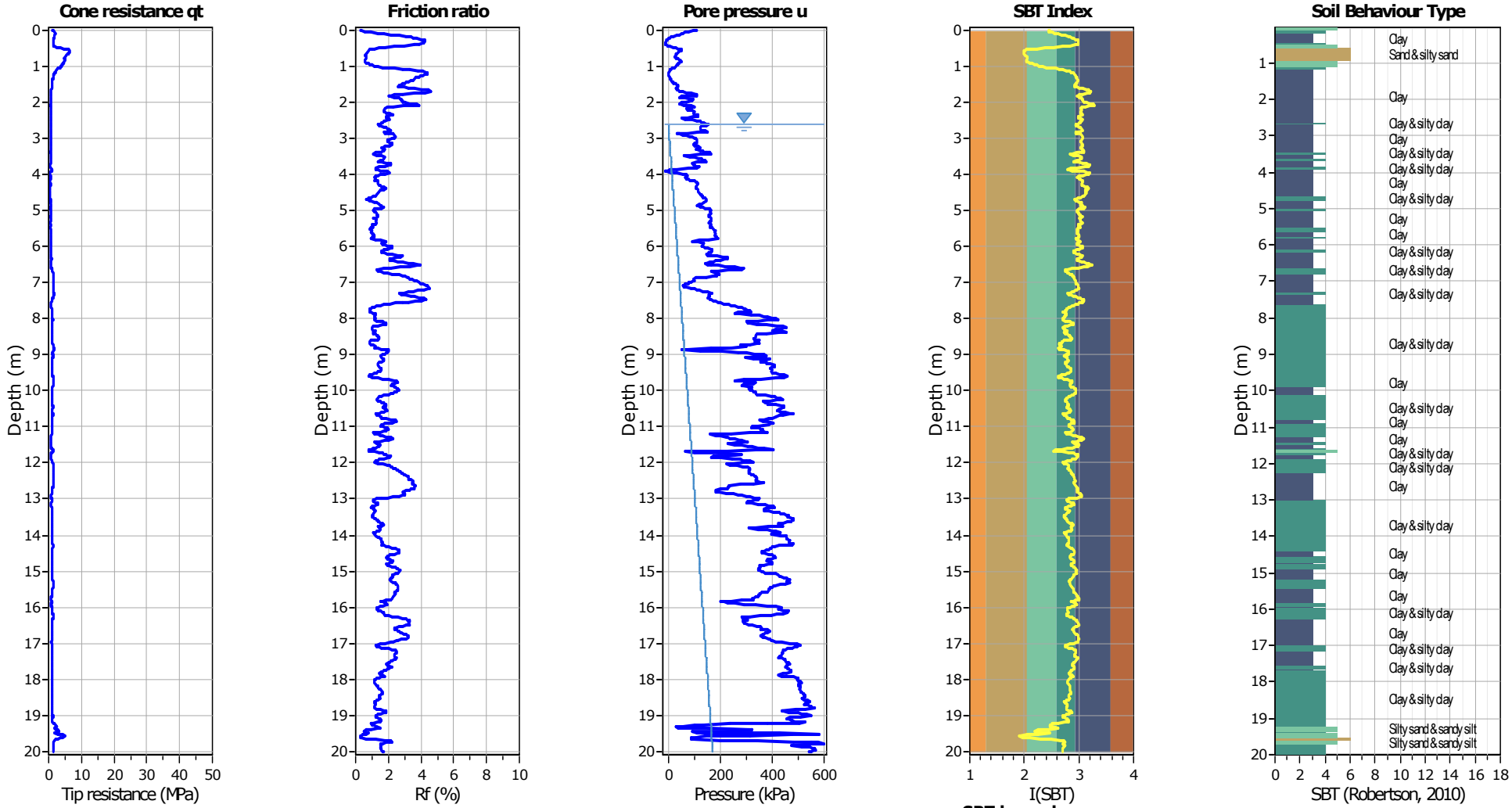

**SBTn legend**

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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU2**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021



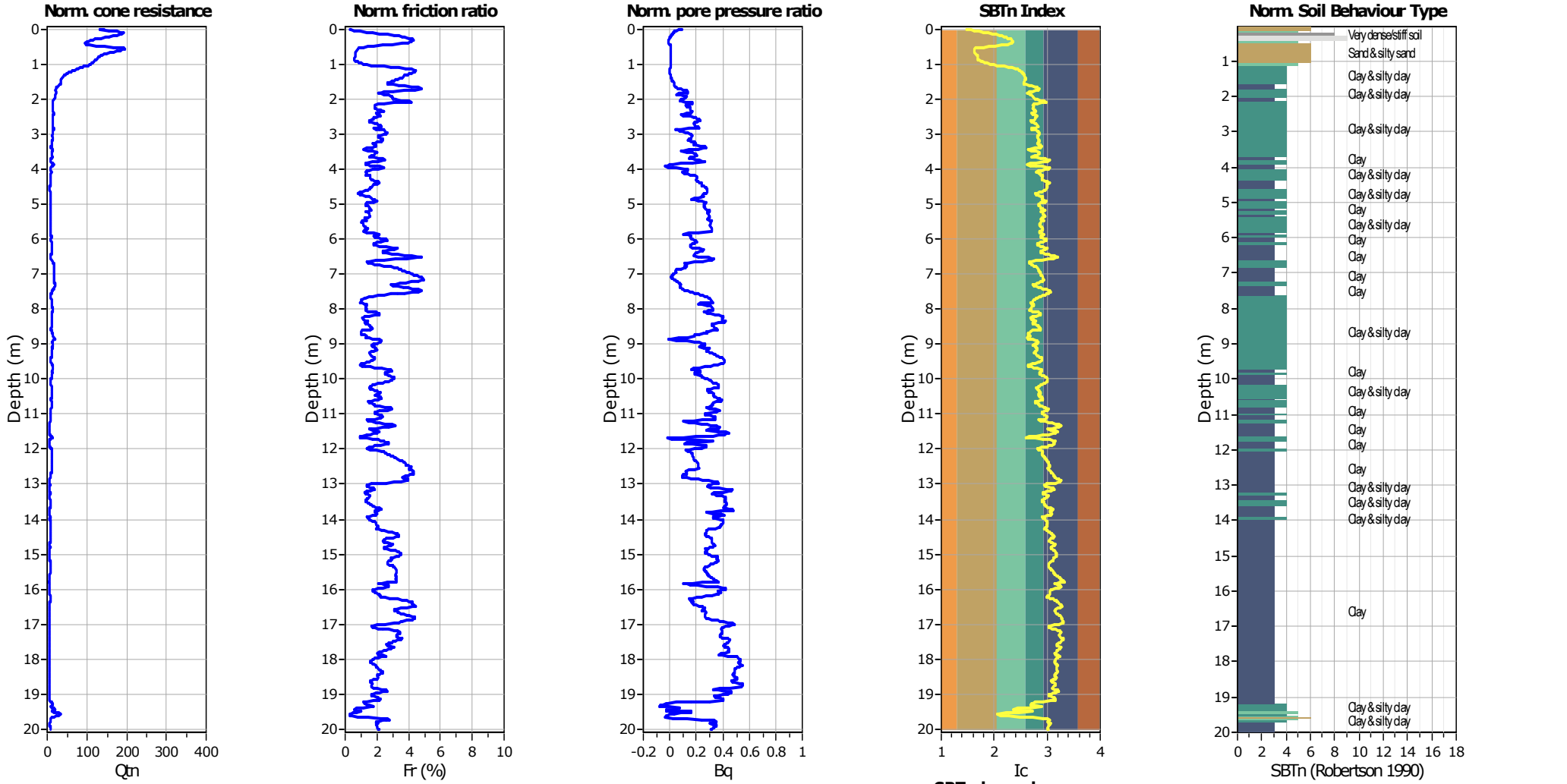

**SBT legend**

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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU2**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021



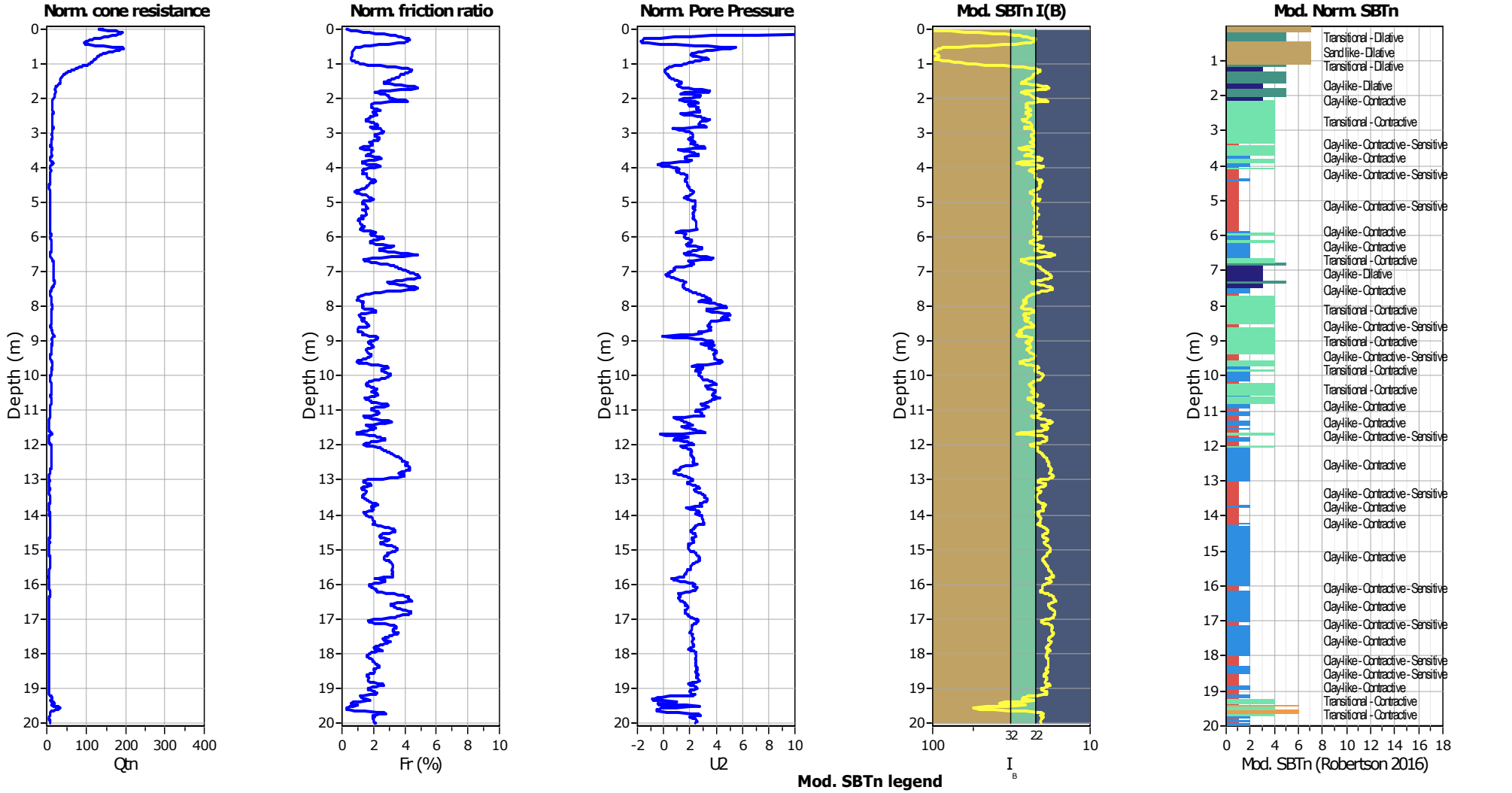

**SBTn legend**

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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU2**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021




**Mod. SBTn legend**

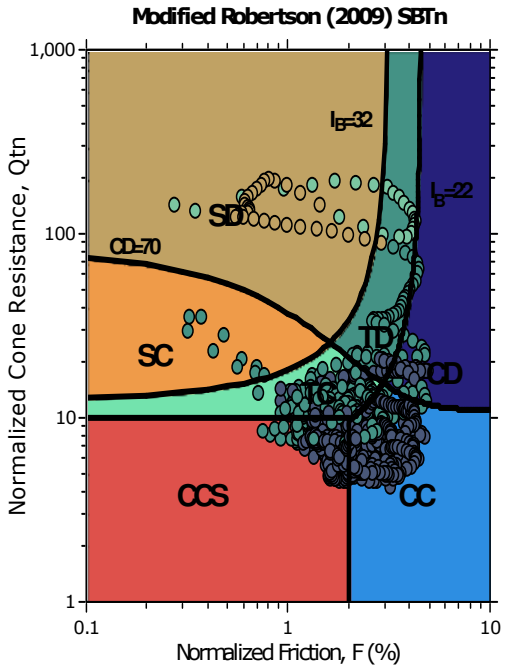
1. CCS: ClayLike - Contractive, Sensitive
2. CC: Clay-like - Contractive
3. CD: Clay-Like: Dilative
4. TC: Transitional - Contractive
5. TD: Transitional - Dilative
6. SC: Sand-like - Contractive
7. SD: Sand-like - Dilative

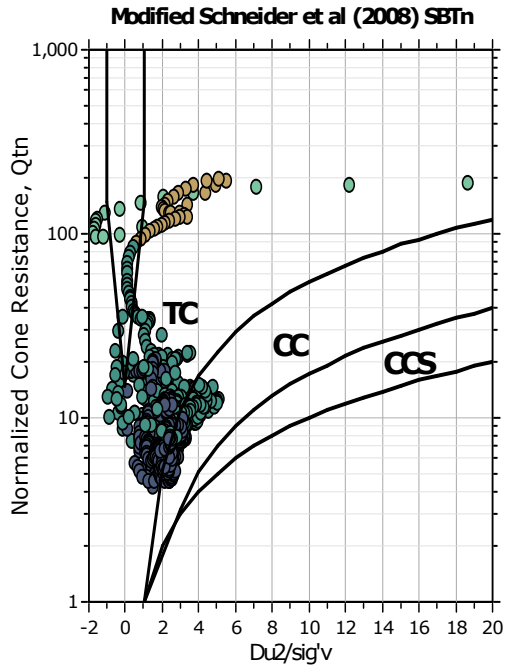
**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

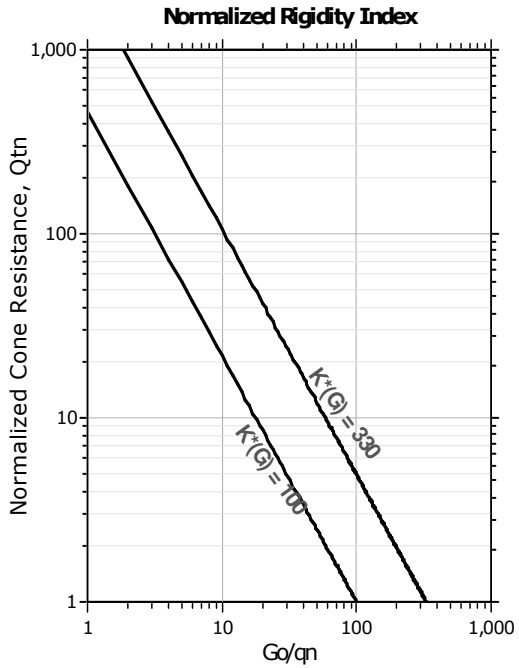
**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU2**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021

## Updated SBTn plots



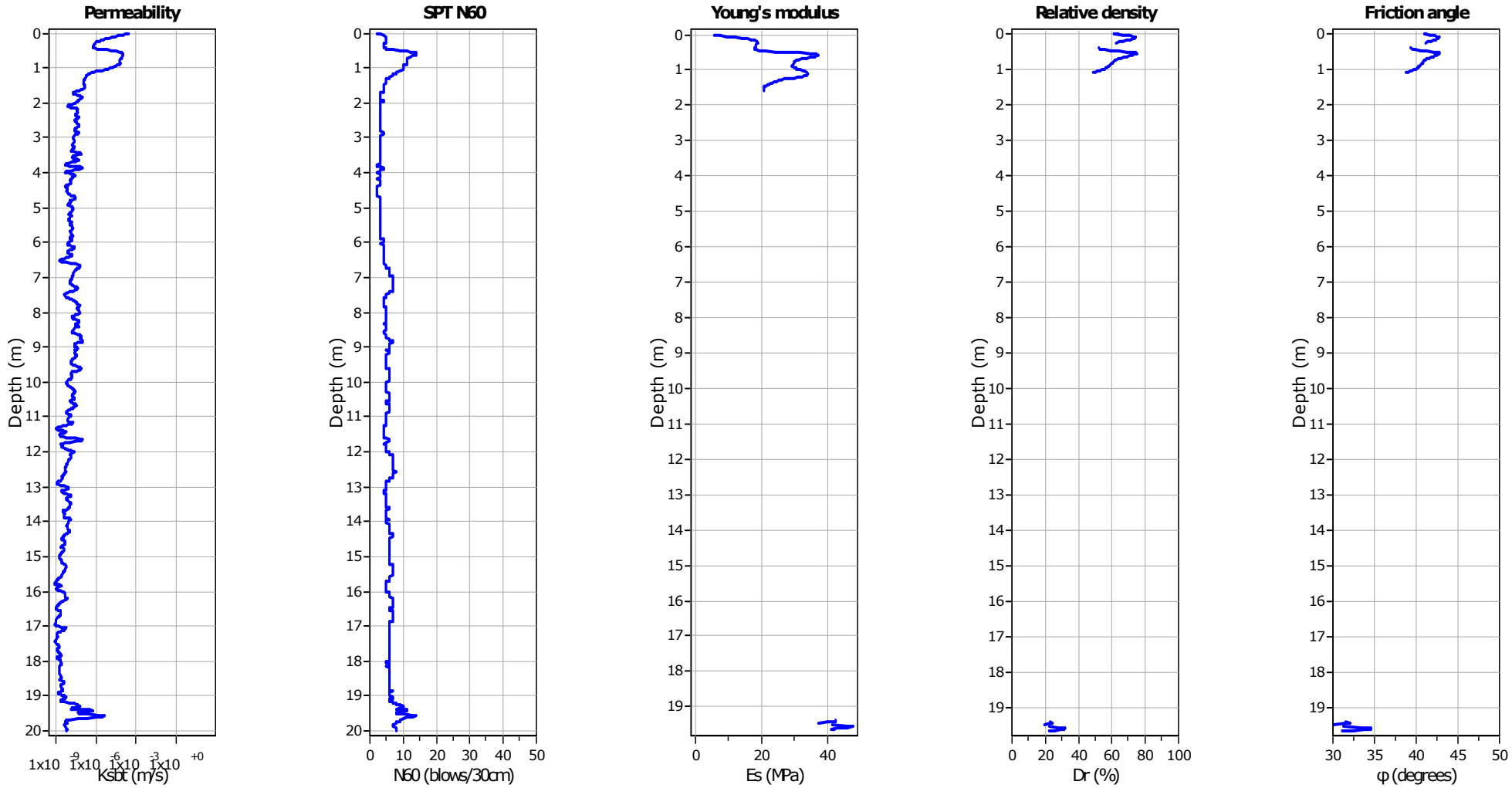

CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
CC: Clay-like - Contractive
CD: Clay-like - Dilative
TC: Transitional - Contractive
TD: Transitional - Dilative
SC: Sand-like - Contractive
SD: Sand-like - Dilative

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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU2**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021



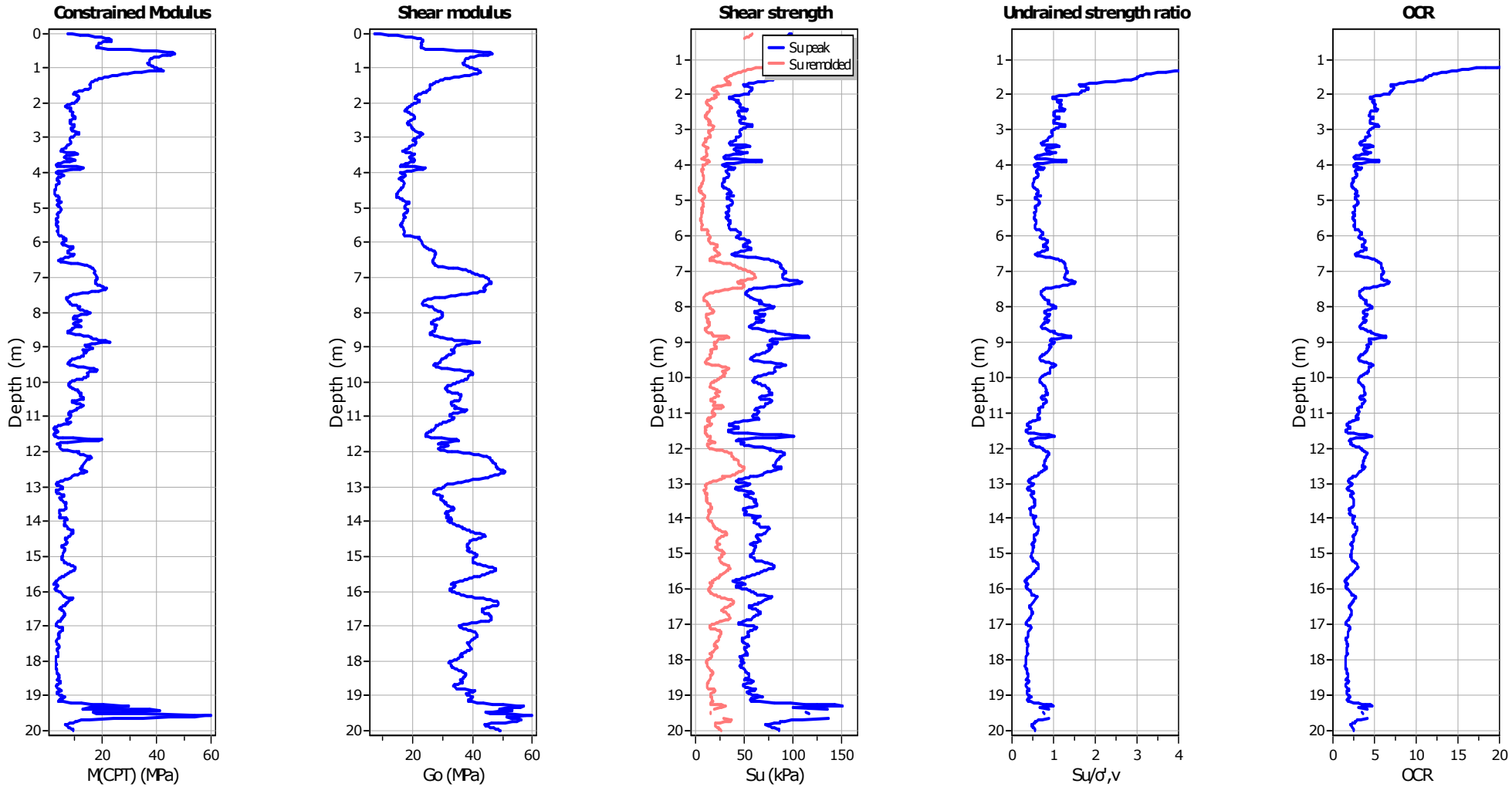

**Calculation parameters**

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)
Relative desnisty constant, $C_{Dr}$: 350.0
Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)
User defined estimation data

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU2**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021



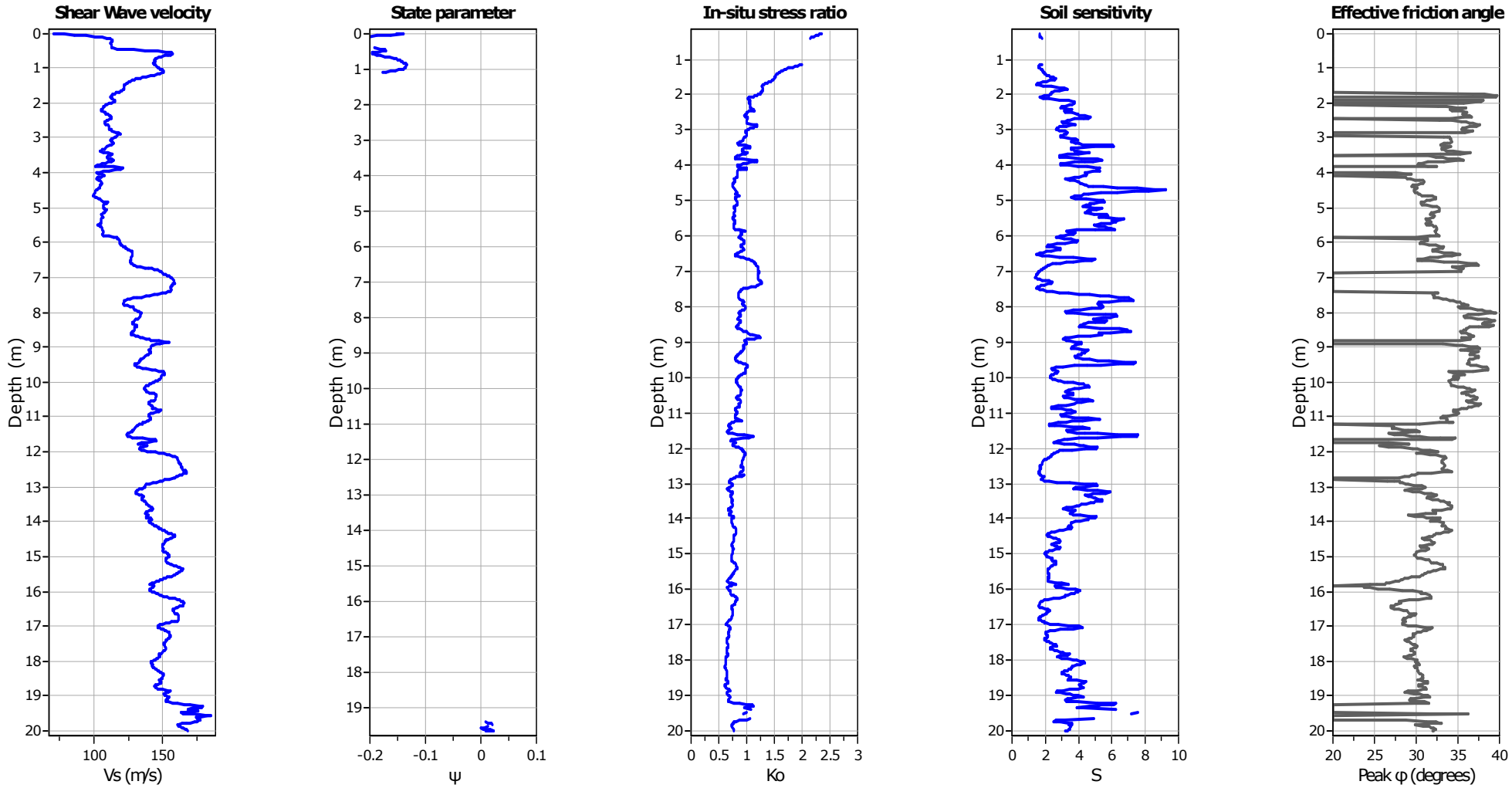

**Calculation parameters**

Constrained modulus: Based on variable *alpha* using $I_c$ and $Q_{tn}$ (Robertson, 2009)
Go: Based on variable *alpha* 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

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

**Project:** **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE**
**Location:** **COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

**CPT: CPTU2**
Total depth: 20.00 m, Date: 30/11/2021




**Calculation parameters**

Soil Sensitivity factor, $N_S$: 7.00

User defined estimation data

# ALLEGATO 2

## PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CPT

**GEO GROUP SRL**
Sede legale: via C. Costa n. 182 - 41123 Modena
tel. 059/3967169

# LEGENDA VALORI DI RESISTENZA
# FATTORI DI CONVERSIONE

**Strumento utilizzato:**
**TG63-200Stat - Pagani - Piacenza**

Caratteristiche:

- punta conica meccanica Ø 35.7 mm, area punta Ap = 10 cm²

- punta conica meccanica angolo di apertura: $\alpha$ = 60°

- manicotto laterale di attrito tipo 'Begemann' ( Ø = 35.7 mm - h = 133 mm - Am = 150 cm²)

- velocità di avanzamento costante V = 2 cm/sec (± 0,5 cm / sec )

- spinta max nominale dello strumento Smax variabile a seconda del tipo

- costante di trasformazione CT = SPINTA (Kg) / LETTURA DI CAMPAGNA
  (dato tecnico legato alle caratteristiche del penetrometro utilizzato, fornito dal costruttore)

fase 1 - resistenza alla punta: qc ( MPa ) = ( L1 ) x CT /10

fase 2 - resistenza laterale locale: fs ( kPa ) = [( L2 ) - ( L1)] x CT / 150

fase 3 - resistenza totale : Rt ( kPa) = ( Lt ) x CT

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

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

N.B. : nonostante la distanza intercorrente ( 20 cm circa ) fra il centro del manicotto laterale e la punta conica del penetrometro , la resistenza laterale locale fs viene computata alla stessa quota della punta .

CONVERSIONI
1 kN (kiloNewton) = 1000 N $\approx$ 100 kg = 0,1 t
1 MN (megaNewton) = 1.000 kN = 1.000.000 N $\approx$ 100 t
1 kPa (kiloPascal) = 1 kN/m² = 0,001 MN/m² = 0,001 MPa $\approx$ 0,1 t/m² = 0,01 kg/cm²
1 MPa (megaPascal) = 1 MN/m² = 1.000 kN/m² = 1000 kPa $\approx$ 100 t/m² = 10 kg/cm²
1 kg/cm² = 10 t/m² $\approx$ 100 kN/m² = 100 kPa = 0,1 MN/m² = 0,1 MPa
1 t = 1000 kg $\approx$ 10 kN

**GEO GROUP SRL**
Sede legale: via C. Costa n. 182 - 41123 Modena
tel. 059/3967169

# LEGENDA VALUTAZIONI LITOLOGICHE CORRELAZIONI GENERALI

**Valutazioni in base al rapporto: F = (qc / fs)**
**Begemann 1965 - Raccomandazioni A.G.I. 1977**
Valide in via approssimata per terreni immersi in falda :

| | F = qc / fs | NATURA LITOLOGICA | PROPRIETA' |
|---|---|---|---|
| | F ≤ 1470 kPa | TORBE ED ARGILLE ORGANICHE | COESIVE |
| 1470 kPa < | F ≤ 2940 kPa | LIMI ED ARGILLE | COESIVE |
| 2940 kPa < | F ≤ 5880 kPa | LIMI SABBIOSI E SABBIE LIMOSE | GRANULARI |
| | F > 5880 kPa | SABBIE E SABBIE CON GHIAIA | GRANULARI |

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

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

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

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

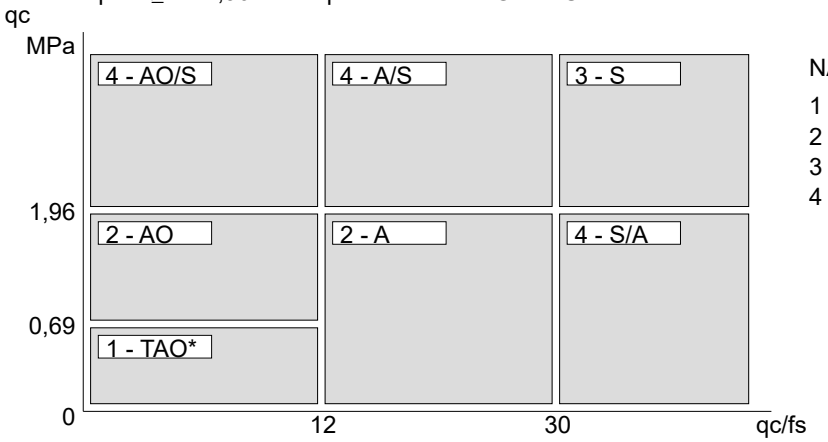
**GEO GROUP SRL**
Sede legale: via C. Costa n. 182 - 41123 Modena
tel. 059/3967169

# LEGENDA PARAMETRI GEOTECNICI
# SPECIFICHE TECNICHE

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

qc ≤ 1,96 MPa : possibili terreni COESIVI — anche se ( qc / fs) > 30

qc ≥ 1,96 MPa : possibili terreni GRANULARI — anche se ( qc / fs) < 30




NATURA LITOLOGICA
1 - COESIVA (TORBOSA) ALTA COMPRIM.
2 - COESIVA IN GENERE
3 - GRANULARE
4 - COESIVA / GRANULARE

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

$\gamma'$ = peso dell' unità di volume (efficace) del terreno immerso in falda [ correlaz.: $\gamma'$ - qc - natura ]
( Terzaghi & Peck 1967 - Bowles 1982 )

$\sigma$'vo = tensione verticale geostatica (efficace) del terreno ( valutata in base ai valori di $\gamma'$)

Cu = coesione non drenata (terreni coesivi ) [ correlazioni : Cu - qc ]

OCR = grado di sovra consolidazione (terreni coesivi ) [ correlazioni : OCR - Cu - $\sigma$ 'vo]
( Ladd et al. 1972 / 1974 / 1977 - Lancellotta 1983)

Eu = modulo di deformazione non drenato (terreni coesivi) [ correl. : Eu - Cu - OCR - Ip Ip= ind.plast.]
Eu50 - Eu25 corrispondono rispettivamente ad un grado di mobilitazione dello sforzo deviatorico pari al 50-25% (Duncan & Buchigani 1976 )

E' = modulo di deformazione drenato (terreni granulari) [ correlazioni : E' - qc ]
E'50 - E'25 corrispondono rispettivamente ad un grado di mobilitazione dello sforzo deviatorico pari al 50-25% (coeff. di sicurezza F = 2 - 4 rispettivamente )
Schmertmann 1970 / 1978 - Jamiolkowski ed altri 1983 )

Mo = modulo di deformazione edometrico (terreni coesivi e granulari) [ correl. : Mo - qc - natura]
Sanglerat 1972 - Mitchell & Gardner 1975 - Ricceri et al. 1974 - Holden 1973 )

Dr = densità relativa (terreni granulari N. C. - normalmente consolidati)
[ correlazioni : Dr - Rp - $\sigma$ 'vo (Schmertmann 1976 )]

Ø' = angolo di attrito interno efficace (terreni granulari N.C. ) [ correl. : Ø' - Dr - qc $\sigma$ 'vo )
ØCa - Caquot (1948) — ØKo - Koppejan (1948)
ØDB - De Beer (1965) — ØSc - Schmertmann (1978)
ØDM - Durgunoglu & Mitchell (1975) (sabbie N.C.) — ØMe - Meyerhof (1956 / 1976) (sabbie limose)

F.L. = fattore di liquefazione (F.L.1 = Sabbie Pulite, F.L.2 = Sabbie Limose)

Vs = velocità di propagazione delle onde sismiche ( Iyisan 1996 )

**GEO GROUP SRL**
Sede legale: via C. Costa n. 182 - 41123 Modena
tel. 059/3967169

# PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA
# LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI

| CPT | 1 |
|---|---|
| Riferimento | 107-2021 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Committente | **STUDIO TECNICO** | U.M.: | **MPa** | Data esec. | 30/11/2021 |
| Cantiere | **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE** | Pagina | 1/17 | | |
| Località | **SALA BOLOGNESE - COMPARTO GLI OLMI** | Elaborato | | Falda | -2,50 m |

| H m | L1 - | L2 - | Lt - | qc MPa | fs kPa | F - | Rf % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,20 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | | |
| 0,40 | 25,00 | 30,00 | | 2,45 | 33,00 | 76 | 1,3 |
| 0,60 | 10,00 | 15,00 | | 0,98 | 33,00 | 30 | 3,3 |
| 0,80 | 14,00 | 25,00 | | 1,37 | 73,00 | 19 | 5,2 |
| **1,00** | 20,00 | 25,00 | | 1,96 | 33,00 | 61 | 1,7 |
| 1,20 | 12,00 | 23,00 | | 1,18 | 73,00 | 16 | 6,1 |
| 1,40 | 10,00 | 20,00 | | 0,98 | 67,00 | 15 | 6,7 |
| 1,60 | 8,00 | 15,00 | | 0,78 | 47,00 | 17 | 5,9 |
| 1,80 | 8,00 | 12,00 | | 0,78 | 27,00 | 30 | 3,4 |
| **2,00** | 10,00 | 15,00 | | 0,98 | 33,00 | 30 | 3,3 |
| 2,20 | 10,00 | 17,00 | | 0,98 | 47,00 | 21 | 4,7 |
| 2,40 | 8,00 | 16,00 | | 0,78 | 53,00 | 15 | 6,6 |
| 2,60 | 10,00 | 16,00 | | 0,98 | 40,00 | 25 | 4,0 |
| 2,80 | 10,00 | 18,00 | | 0,98 | 53,00 | 19 | 5,3 |
| **3,00** | 11,00 | 17,00 | | 1,08 | 40,00 | 28 | 3,6 |
| 3,20 | 7,00 | 12,00 | | 0,69 | 33,00 | 21 | 4,7 |
| 3,40 | 8,00 | 15,00 | | 0,78 | 47,00 | 17 | 5,9 |
| 3,60 | 7,00 | 13,00 | | 0,69 | 40,00 | 18 | 5,7 |
| 3,80 | 7,00 | 12,00 | | 0,69 | 33,00 | 21 | 4,7 |
| **4,00** | 5,00 | 10,00 | | 0,49 | 33,00 | 15 | 6,6 |
| 4,20 | 5,00 | 10,00 | | 0,49 | 33,00 | 15 | 6,6 |
| 4,40 | 6,00 | 11,00 | | 0,59 | 33,00 | 18 | 5,5 |
| 4,60 | 10,00 | 18,00 | | 0,98 | 53,00 | 19 | 5,3 |
| 4,80 | 6,00 | 12,00 | | 0,59 | 40,00 | 15 | 6,7 |
| **5,00** | 6,00 | 11,00 | | 0,59 | 33,00 | 18 | 5,5 |
| 5,20 | 10,00 | 20,00 | | 0,98 | 67,00 | 15 | 6,7 |
| 5,40 | 6,00 | 12,00 | | 0,59 | 40,00 | 15 | 6,7 |
| 5,60 | 10,00 | 16,00 | | 0,98 | 40,00 | 25 | 4,0 |
| 5,80 | 13,00 | 21,00 | | 1,27 | 53,00 | 25 | 4,1 |
| **6,00** | 13,00 | 25,00 | | 1,27 | 80,00 | 16 | 6,2 |
| 6,20 | 15,00 | 27,00 | | 1,47 | 80,00 | 19 | 5,3 |
| 6,40 | 25,00 | 38,00 | | 2,45 | 87,00 | 29 | 3,5 |
| 6,60 | 25,00 | 44,00 | | 2,45 | 127,00 | 20 | 5,1 |
| 6,80 | 18,00 | 29,00 | | 1,76 | 73,00 | 25 | 4,1 |
| **7,00** | 15,00 | 23,00 | | 1,47 | 53,00 | 28 | 3,5 |
| 7,20 | 14,00 | 24,00 | | 1,37 | 67,00 | 21 | 4,8 |
| 7,40 | 20,00 | 30,00 | | 1,96 | 67,00 | 30 | 3,4 |
| 7,60 | 17,00 | 28,00 | | 1,67 | 73,00 | 23 | 4,3 |
| 7,80 | 16,00 | 27,00 | | 1,57 | 73,00 | 22 | 4,6 |
| **8,00** | 20,00 | 26,00 | | 1,96 | 40,00 | 50 | 2,0 |
| 8,20 | 18,00 | 29,00 | | 1,76 | 73,00 | 25 | 4,1 |
| 8,40 | 17,00 | 26,00 | | 1,67 | 60,00 | 28 | 3,5 |
| 8,60 | 16,00 | 27,00 | | 1,57 | 73,00 | 22 | 4,6 |
| 8,80 | 20,00 | 65,00 | | 1,96 | 300,00 | 7 | 15,0 |
| **9,00** | 20,00 | 30,00 | | 1,96 | 67,00 | 30 | 3,4 |
| 9,20 | 13,00 | 21,00 | | 1,27 | 53,00 | 25 | 4,1 |
| 9,40 | 12,00 | 20,00 | | 1,18 | 53,00 | 23 | 4,4 |
| 9,60 | 11,00 | 18,00 | | 1,08 | 47,00 | 23 | 4,3 |
| 9,80 | 15,00 | 20,00 | | 1,47 | 33,00 | 45 | 2,2 |
| **10,00** | 20,00 | 35,00 | | 1,96 | 100,00 | 20 | 5,0 |
| 10,20 | 15,00 | 25,00 | | 1,47 | 67,00 | 22 | 4,5 |
| 10,40 | 15,00 | 28,00 | | 1,47 | 87,00 | 17 | 5,8 |
| 10,60 | 20,00 | 30,00 | | 1,96 | 67,00 | 30 | 3,4 |
| 10,80 | 13,00 | 22,00 | | 1,27 | 60,00 | 22 | 4,6 |
| **11,00** | 15,00 | 19,00 | | 1,47 | 27,00 | 56 | 1,8 |
| 11,20 | 15,00 | 30,00 | | 1,47 | 100,00 | 15 | 6,7 |
| 11,40 | 16,00 | 24,00 | | 1,57 | 53,00 | 30 | 3,3 |
| 11,60 | 12,00 | 25,00 | | 1,18 | 87,00 | 14 | 7,3 |
| 11,80 | 15,00 | 23,00 | | 1,47 | 53,00 | 28 | 3,5 |
| **12,00** | 22,00 | 35,00 | | 2,16 | 87,00 | 25 | 4,0 |
| 12,20 | 23,00 | 40,00 | | 2,25 | 113,00 | 20 | 4,9 |
| 12,40 | 18,00 | 35,00 | | 1,76 | 113,00 | 16 | 6,3 |
| 12,60 | 11,00 | 25,00 | | 1,08 | 93,00 | 12 | 8,5 |
| 12,80 | 10,00 | 15,00 | | 0,98 | 33,00 | 30 | 3,3 |
| **13,00** | 8,00 | 15,00 | | 0,78 | 47,00 | 17 | 5,9 |
| 13,20 | 12,00 | 23,00 | | 1,18 | 73,00 | 16 | 6,1 |
| 13,40 | 13,00 | 25,00 | | 1,27 | 80,00 | 16 | 6,2 |
| 13,60 | 12,00 | 20,00 | | 1,18 | 53,00 | 23 | 4,4 |
| 13,80 | 18,00 | 26,00 | | 1,76 | 53,00 | 34 | 2,9 |
| **14,00** | 18,00 | 27,00 | | 1,76 | 60,00 | 30 | 3,3 |
| 14,20 | 18,00 | 25,00 | | 1,76 | 47,00 | 38 | 2,6 |
| 14,40 | 16,00 | 21,00 | | 1,57 | 33,00 | 48 | 2,1 |
| 14,60 | 17,00 | 29,00 | | 1,67 | 80,00 | 21 | 4,7 |
| 14,80 | 18,00 | 25,00 | | 1,76 | 47,00 | 38 | 2,6 |
| **15,00** | 16,00 | 24,00 | | 1,57 | 53,00 | 30 | 3,3 |

| H m | L1 - | L2 - | Lt - | qc MPa | fs kPa | F - | Rf % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

H = profondità
L1 = prima lettura (punta)
L2 = seconda lettura (punta + laterale)
Lt = terza lettura (totale)
CT =10,00 costante di trasformazione

qc = resistenza punta
fs = resistenza laterale alla stessa quota di qc
F = rapporto Begemann (qc / fs)
Rf = rapporto Schmertmann (fs /qc)*100

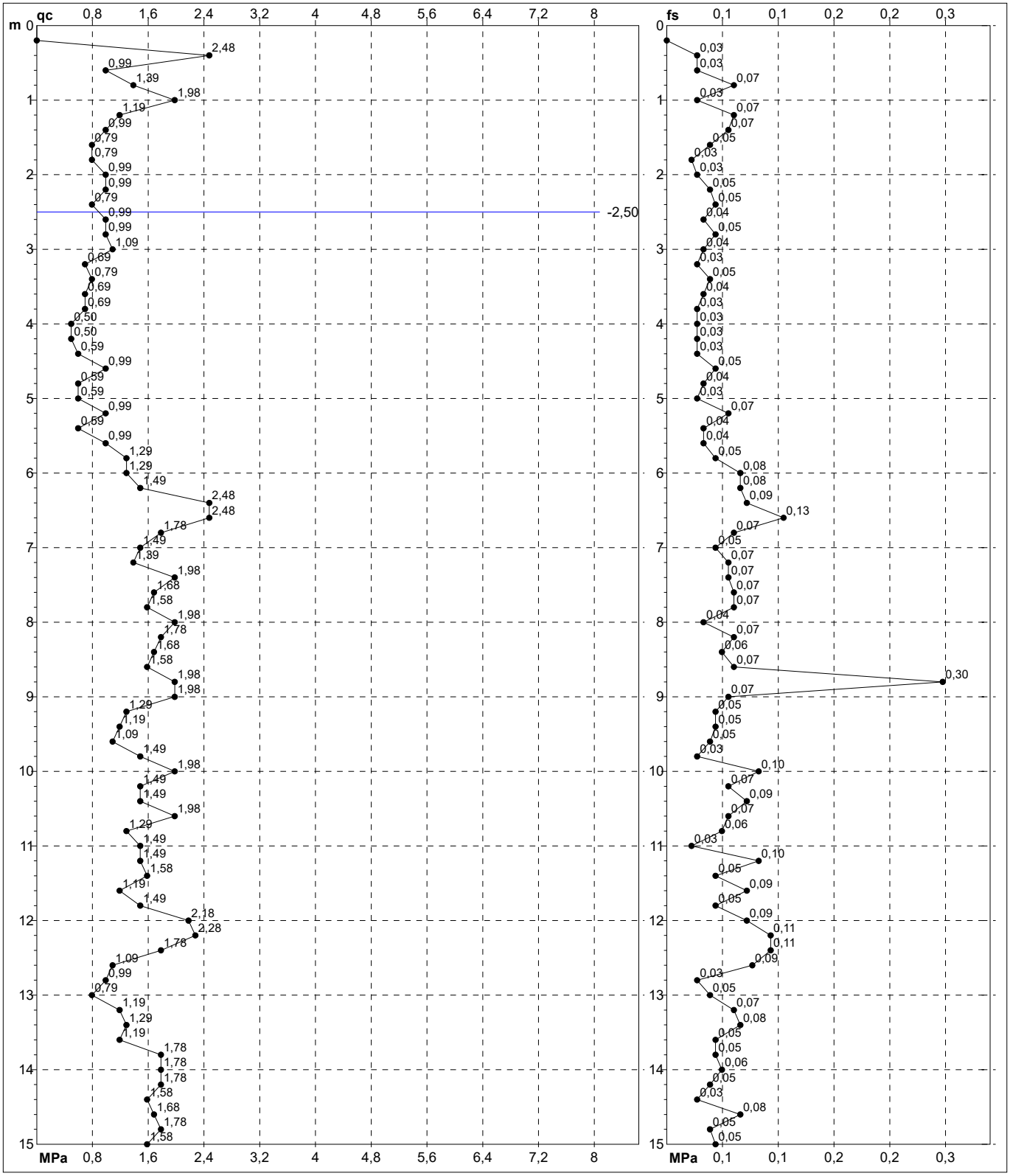

info@geogroupmodena.it
Software by dott. Geol. Diego Merlin +39 0425-840820

**GEO GROUP SRL**
Sede legale: via C. Costa n. 182 - 41123 Modena
tel. 059/3967169

# PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA
# DIGRAMMI DI RESISTENZA E LITOLOGIA

| CPT | 1 |
|---|---|
| Riferimento | 107-2021 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Committente | STUDIO TECNICO | U.M.: | MPa | Data esec. | 30/11/2021 |
| Cantiere | STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE | Scala: | 1:75 | | |
| Località | SALA BOLOGNESE - COMPARTO GLI OLMI | Pagina | 2/17 | Quota inizio: | |
| | | Elaborato | | Falda | -2,50 m |




| | | | |
|---|---|---|---|
| | | Penetrometro: TG63-200Stat | preforo m |
| | | Responsabile: | Corr.astine: kN/ml |
| | | Assistente: | Cod. tip: |

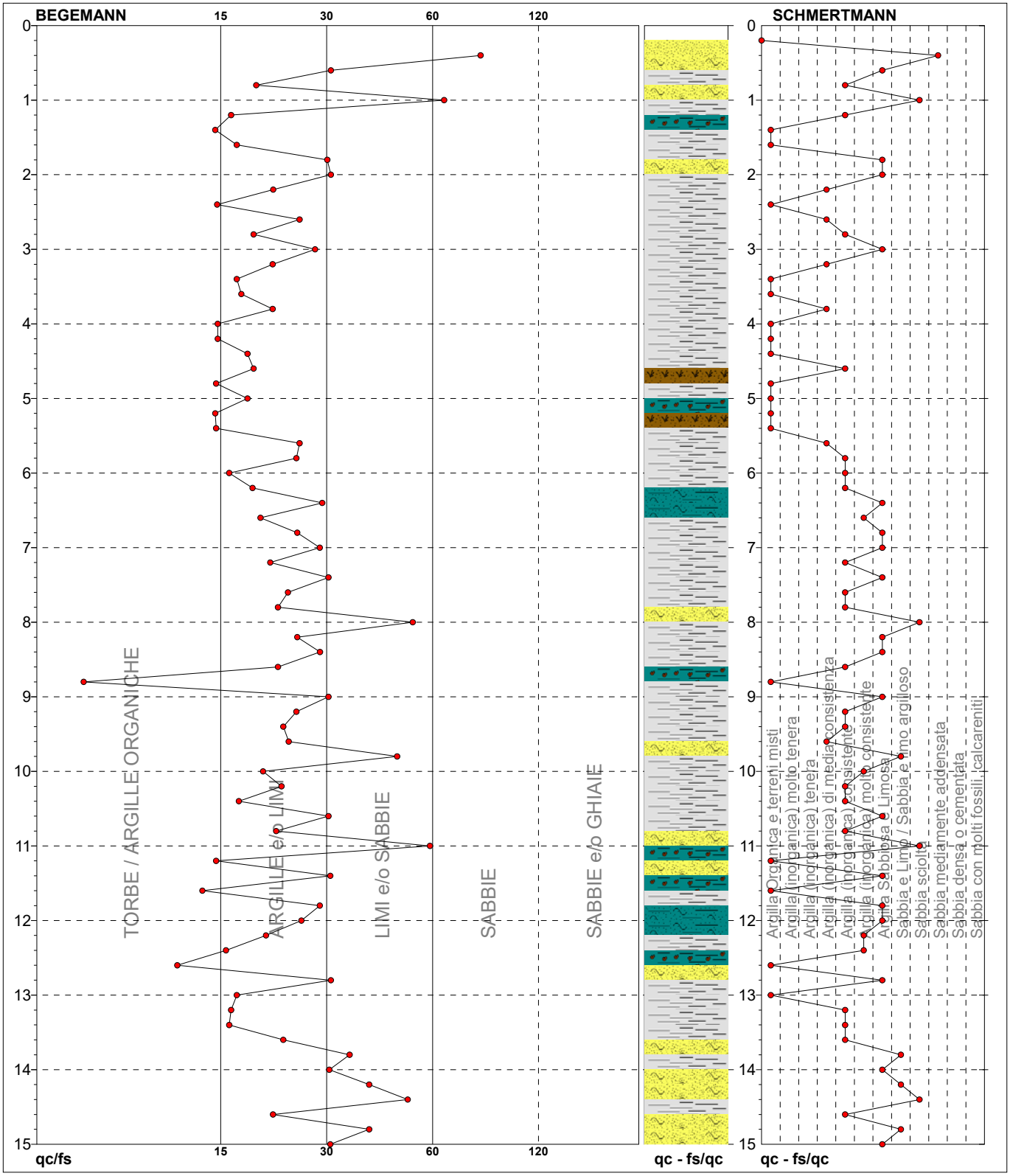
FON111

**GEO GROUP SRL**
Sede legale: via C. Costa n. 182 - 41123 Modena
tel. 059/3967169

# PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA
# DIAGRAMMI LITOLOGIA

| CPT | 1 |
|---|---|
| Riferimento | 107-2021 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Committente | **STUDIO TECNICO** | U.M.: | **MPa** | Data esec. | 30/11/2021 |
| Cantiere | **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE** | Scala: | 1:75 | | |
| Località | **SALA BOLOGNESE - COMPARTO GLI OLMI** | Pagina | 3/17 | | |
| | | Elaborato | | Falda | -2,50 m |




| | | | |
|---|---|---|---|
| TORBE / ARGILLE OR | 9 punti, | 12,00% | |
| ARGILLE e/o LIMI | 52 punti, | 69,33% | |
| LIMI e/o SABBIE | 12 punti, | 16,00% | |
| SABBIE | 2 punti, | 2,67% | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Argilla Organica e terreni misti | 17 punti, | 22,67% | Argilla Sabbiosa e Limosa | 18 punti, | 24,00% |
| Argilla (inorganica) di media consistenza | 6 punti, | 8,00% | Sabbia e Limo / Sabbia e limo argilloso | 4 punti, | 5,33% |
| Argilla (inorganica) consistente | 20 punti, | 26,67% | Sabbia sciolta | 4 punti, | 5,33% |
| Argilla (inorganica) molto consistente | 4 punti, | 5,33% | Sabbia mediamente addensata | 1 punti, | 1,33% |


info@geogroupmodena.it
Software by dott. Geol. Diego Merlin +39 0425-840820

**GEO GROUP SRL**
Sede legale: via C. Costa n. 182 - 41123 Modena
tel. 059/3967169

# PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA
# PARAMETRI GEOTECNICI

| CPT | 1 |
|---|---|
| Riferimento | 107-2021 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Committente | **STUDIO TECNICO** | U.M.: | **MPa** | Data esec. | 30/11/2021 |
| Cantiere | **STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE** | Pagina | 4/17 | | |
| Località | **SALA BOLOGNESE - COMPARTO GLI OLMI** | Elaborato | | Falda | -2,50 m |

| | | | | | | | NATURA COESIVA | | | | | NATURA GRANULARE | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H | qc | qc/fs | zone | γ' | σ'vo | Vs | Cu | OCR | Eu50 | Eu25 | Mo | Dr | Sc | Ca | Ko | DB | DM | Me | E'50 | E'25 | Mo | FL1 | FL2 |
| m | U.M. | | | t/m³ | kPa | m/s | kPa | % | U.M. | U.M. | U.M. | % | (°) | (°) | (°) | (°) | (°) | (°) | U.M. | U.M. | U.M. | | |
| 0,20 | -- | -- | ? ? ? | 1,85 | 3,6 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 0,40 | 2,45 | 75,76 | 3 | 1,85 | 7,3 | 186 | -- | -- | -- | -- | -- | 88 | 42 | 39 | 36 | 34 | 42 | 28 | 4,1 | 6,1 | 7,4 | -- | -- |
| 0,60 | 0,98 | 30,30 | 4 | 1,85 | 10,9 | 132 | 49,0 | 41,2 | 8,3 | 12,5 | 3,9 | 46 | 37 | 32 | 29 | 27 | 36 | 26 | 1,6 | 2,5 | 2,9 | -- | -- |
| 0,80 | 1,37 | 19,18 | 2 | 1,85 | 14,5 | 150 | 62,4 | 38,9 | 10,6 | 15,9 | 4,7 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **1,00** | 1,96 | 60,61 | 4 | 1,85 | 18,1 | 171 | 78,4 | 39,2 | 13,3 | 20,0 | 5,9 | 58 | 38 | 33 | 30 | 28 | 37 | 27 | 3,3 | 4,9 | 5,9 | -- | -- |
| 1,20 | 1,18 | 16,44 | 2 | 1,85 | 21,8 | 141 | 56,0 | 20,5 | 9,5 | 14,3 | 4,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 1,40 | 0,98 | 14,93 | 2 | 1,85 | 25,4 | 132 | 49,0 | 14,3 | 8,3 | 12,5 | 3,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 1,60 | 0,78 | 17,02 | 2 | 1,85 | 29,0 | 121 | 39,2 | 9,1 | 6,9 | 10,3 | 3,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 1,80 | 0,78 | 29,63 | 2 | 1,85 | 32,6 | 121 | 39,2 | 7,9 | 7,9 | 11,8 | 3,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **2,00** | 0,98 | 30,30 | 4 | 1,85 | 36,3 | 132 | 49,0 | 9,1 | 8,6 | 12,9 | 3,9 | 17 | 33 | 26 | 23 | 22 | 30 | 26 | 1,6 | 2,5 | 2,9 | -- | -- |
| 2,20 | 0,98 | 21,28 | 2 | 1,85 | 39,9 | 132 | 49,0 | 8,1 | 9,5 | 14,3 | 3,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2,40 | 0,78 | 15,09 | 2 | 1,85 | 43,5 | 121 | 39,2 | 5,5 | 11,8 | 17,7 | 3,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2,60 | 0,98 | 25,00 | 2 | 0,90 | 45,3 | 132 | 49,0 | 6,9 | 11,4 | 17,1 | 3,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 2,80 | 0,98 | 18,87 | 2 | 0,90 | 47,0 | 132 | 49,0 | 6,6 | 12,1 | 18,1 | 3,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **3,00** | 1,08 | 27,50 | 2 | 0,91 | 48,8 | 137 | 52,6 | 6,9 | 12,3 | 18,5 | 4,2 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 3,20 | 0,69 | 21,21 | 2 | 0,84 | 50,5 | 115 | 34,3 | 3,9 | 14,2 | 21,3 | 3,2 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 3,40 | 0,78 | 17,02 | 2 | 0,86 | 52,2 | 121 | 39,2 | 4,4 | 14,6 | 21,8 | 3,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 3,60 | 0,69 | 17,50 | 2 | 0,84 | 53,8 | 115 | 34,3 | 3,6 | 15,2 | 22,8 | 3,2 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 3,80 | 0,69 | 21,21 | 2 | 0,84 | 55,4 | 115 | 34,3 | 3,4 | 15,6 | 23,4 | 3,2 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **4,00** | 0,49 | 15,15 | 2 | 0,80 | 57,0 | 101 | 24,5 | 2,2 | 13,5 | 20,2 | 2,5 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 4,20 | 0,49 | 15,15 | 2 | 0,80 | 58,6 | 101 | 24,5 | 2,1 | 13,6 | 20,4 | 2,5 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 4,40 | 0,59 | 18,18 | 2 | 0,82 | 60,2 | 109 | 29,4 | 2,6 | 15,5 | 23,2 | 2,8 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 4,60 | 0,98 | 18,87 | 2 | 0,90 | 62,0 | 132 | 49,0 | 4,7 | 17,2 | 25,8 | 3,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 4,80 | 0,59 | 15,00 | 1 | 0,46 | 62,9 | 109 | 29,4 | 2,4 | 3,3 | 5,0 | 0,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **5,00** | 0,59 | 18,18 | 2 | 0,82 | 64,5 | 109 | 29,4 | 2,4 | 15,9 | 23,8 | 2,8 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 5,20 | 0,98 | 14,93 | 2 | 0,90 | 66,2 | 132 | 49,0 | 4,3 | 18,5 | 27,7 | 3,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 5,40 | 0,59 | 15,00 | 1 | 0,46 | 67,1 | 109 | 29,4 | 2,2 | 3,4 | 5,1 | 0,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 5,60 | 0,98 | 25,00 | 2 | 0,90 | 68,9 | 132 | 49,0 | 4,1 | 19,2 | 28,8 | 3,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 5,80 | 1,27 | 24,53 | 2 | 0,93 | 70,7 | 145 | 59,3 | 5,0 | 19,5 | 29,2 | 4,6 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **6,00** | 1,27 | 16,25 | 2 | 0,93 | 72,5 | 145 | 59,3 | 4,9 | 20,1 | 30,1 | 4,6 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 6,20 | 1,47 | 18,75 | 2 | 0,95 | 74,4 | 154 | 65,3 | 5,3 | 20,3 | 30,4 | 4,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 6,40 | 2,45 | 28,74 | 4 | 0,94 | 76,3 | 186 | 89,1 | 7,6 | 18,6 | 27,8 | 7,4 | 30 | 35 | 27 | 24 | 22 | 31 | 28 | 4,1 | 6,1 | 7,4 | -- | -- |
| 6,60 | 2,45 | 19,69 | 4 | 0,94 | 78,1 | 186 | 89,1 | 7,4 | 19,2 | 28,8 | 7,4 | 30 | 35 | 27 | 24 | 22 | 31 | 28 | 4,1 | 6,1 | 7,4 | -- | -- |
| 6,80 | 1,76 | 24,66 | 2 | 0,98 | 80,0 | 164 | 73,5 | 5,6 | 21,5 | 32,3 | 5,5 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **7,00** | 1,47 | 28,30 | 2 | 0,95 | 81,9 | 154 | 65,3 | 4,7 | 22,8 | 34,1 | 4,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 7,20 | 1,37 | 20,90 | 2 | 0,94 | 83,7 | 150 | 62,4 | 4,3 | 23,4 | 35,1 | 4,7 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 7,40 | 1,96 | 29,85 | 4 | 0,93 | 85,5 | 171 | 78,4 | 5,6 | 23,0 | 34,6 | 5,9 | 20 | 34 | 25 | 22 | 21 | 29 | 27 | 3,3 | 4,9 | 5,9 | -- | -- |
| 7,60 | 1,67 | 23,29 | 2 | 0,97 | 87,4 | 161 | 70,9 | 4,8 | 24,2 | 36,4 | 5,3 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 7,80 | 1,57 | 21,92 | 2 | 0,96 | 89,3 | 157 | 68,2 | 4,5 | 24,9 | 37,4 | 5,1 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **8,00** | 1,96 | 50,00 | 4 | 0,93 | 91,1 | 171 | 78,4 | 5,2 | 25,0 | 37,5 | 5,9 | 18 | 33 | 25 | 22 | 21 | 28 | 27 | 3,3 | 4,9 | 5,9 | -- | -- |
| 8,20 | 1,76 | 24,66 | 2 | 0,98 | 93,1 | 164 | 73,5 | 4,7 | 25,9 | 38,8 | 5,5 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 8,40 | 1,67 | 28,33 | 2 | 0,97 | 95,0 | 161 | 70,9 | 4,4 | 26,5 | 39,8 | 5,3 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 8,60 | 1,57 | 21,92 | 2 | 0,96 | 96,8 | 157 | 68,2 | 4,0 | 27,0 | 40,5 | 5,1 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 8,80 | 1,96 | 6,67 | 4 | 0,93 | 98,7 | 171 | 78,4 | 4,7 | 27,4 | 41,1 | 5,9 | 17 | 33 | 25 | 21 | 20 | 28 | 27 | 3,3 | 4,9 | 5,9 | -- | -- |
| **9,00** | 1,96 | 29,85 | 4 | 0,93 | 100,5 | 171 | 78,4 | 4,6 | 28,0 | 42,0 | 5,9 | 16 | 33 | 25 | 21 | 20 | 28 | 27 | 3,3 | 4,9 | 5,9 | -- | -- |
| 9,20 | 1,27 | 24,53 | 2 | 0,93 | 102,3 | 145 | 59,3 | 3,2 | 28,4 | 42,6 | 4,6 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 9,40 | 1,18 | 22,64 | 2 | 0,92 | 104,1 | 141 | 56,0 | 2,9 | 28,1 | 42,1 | 4,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 9,60 | 1,08 | 23,40 | 2 | 0,91 | 105,9 | 137 | 52,6 | 2,6 | 27,4 | 41,2 | 4,2 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 9,80 | 1,47 | 45,45 | 4 | 0,89 | 107,6 | 154 | 65,3 | 3,4 | 30,2 | 45,3 | 4,9 | 5 | 32 | 23 | 19 | 18 | 26 | 27 | 2,5 | 3,7 | 4,4 | -- | -- |
| **10,00** | 1,96 | 20,00 | 4 | 0,93 | 109,4 | 171 | 78,4 | 4,1 | 30,6 | 45,8 | 5,9 | 14 | 33 | 24 | 21 | 20 | 27 | 27 | 3,3 | 4,9 | 5,9 | -- | -- |
| 10,20 | 1,47 | 22,39 | 2 | 0,95 | 111,3 | 154 | 65,3 | 3,2 | 31,0 | 46,5 | 4,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 10,40 | 1,47 | 17,24 | 2 | 0,95 | 113,2 | 154 | 65,3 | 3,2 | 31,4 | 47,1 | 4,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 10,60 | 1,96 | 29,85 | 4 | 0,93 | 115,0 | 171 | 78,4 | 3,9 | 32,3 | 48,4 | 5,9 | 13 | 33 | 24 | 21 | 19 | 27 | 27 | 3,3 | 4,9 | 5,9 | -- | -- |
| 10,80 | 1,27 | 21,67 | 2 | 0,93 | 116,8 | 145 | 59,3 | 2,7 | 30,6 | 46,0 | 4,6 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **11,00** | 1,47 | 55,56 | 4 | 0,89 | 118,6 | 154 | 65,3 | 3,0 | 32,3 | 48,5 | 4,9 | 2 | 32 | 22 | 19 | 18 | 25 | 27 | 2,5 | 3,7 | 4,4 | -- | -- |
| 11,20 | 1,47 | 15,00 | 2 | 0,95 | 120,4 | 154 | 65,3 | 2,9 | 32,6 | 48,9 | 4,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 11,40 | 1,57 | 30,19 | 4 | 0,90 | 122,2 | 157 | 68,2 | 3,0 | 33,5 | 50,2 | 5,1 | 4 | 32 | 22 | 19 | 18 | 26 | 27 | 2,6 | 3,9 | 4,7 | -- | -- |
| 11,60 | 1,18 | 13,79 | 2 | 0,92 | 124,0 | 141 | 56,0 | 2,3 | 30,3 | 45,5 | 4,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 11,80 | 1,47 | 28,30 | 2 | 0,95 | 125,9 | 154 | 65,3 | 2,8 | 33,4 | 50,1 | 4,9 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| **12,00** | 2,16 | 25,29 | 4 | 0,93 | 127,7 | 177 | 82,9 | 3,7 | 36,0 | 54,1 | 6,5 | 13 | 33 | 24 | 20 | 19 | 27 | 28 | 3,6 | 5,4 | 6,5 | -- | -- |
| 12,20 | 2,25 | 20,35 | 4 | 0,94 | 129,5 | 180 | 85,1 | 3,7 | 36,5 | 54,8 | 6,8 | 15 | 33 | 24 | 21 | 19 | 27 | 28 | 3,8 | 5,6 | 6,8 | -- | -- |
| 12,40 | 1,76 | 15,93 | 2 | 0,98 | 131,4 | 164 | 73,5 | 3,0 | 36,0 | 54,1 | 5,5 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 12,60 | 1,08 | 11,83 | 2 | 0,91 | 133,2 | 137 | 52,6 | 2,0 | 29,5 | 44,3 | 4,2 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 12,80 | 0,98 | 30,30 | 4 | 0,86 | 134,9 | 132 | 49,0 | 1,8 | 28,0 | 42,0 | 3,9 | -- | 31 | 20 | 16 | 15 | 25 | 26 | 1,6 | 2,5 | 2,9 | -- | -- |
| **13,00** | 0,78 | 17,02 | 2 | 0,86 | 136,6 | 121 | 39,2 | 1,3 | 23,1 | 34,7 | 3,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 13,20 | 1,18 | 16,44 | 2 | 0,92 | 138,4 | 141 | 56,0 | 2,0 | 31,3 | 46,9 | 4,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 13,40 | 1,27 | 16,25 | 2 | 0,93 | 140,2 | 145 | 59,3 | 2,1 | 32,7 | 49,1 | 4,6 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 13,60 | 1,18 | 22,64 | 2 | 0,92 | 142,0 | 141 | 56,0 | 2,0 | 31,5 | 47,2 | 4,4 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 13,80 | 1,76 | 33,96 | 4 | 0,91 | 143,8 | 164 | 73,5 | 2,7 | 37,9 | 56,8 | 5,5 | 4 | 32 | 22 | 19 | 18 | 25 | 27 | 2,9 | 4,4 | 5,3 | -- | -- |
| **14,00** | 1,76 | 30,00 | 4 | 0,91 | 145,6 | 164 | 73,5 | 2,7 | 38,1 | 57,1 | 5,5 | 3 | 32 | 22 | 19 | 18 | 25 | 27 | 2,9 | 4,4 | 5,3 | -- | -- |
| 14,20 | 1,76 | 38,30 | 4 | 0,91 | 147,4 | 164 | 73,5 | 2,6 | 38,3 | 57,4 | 5,5 | 3 | 32 | 22 | 19 | 18 | 25 | 27 | 2,9 | 4,4 | 5,3 | -- | -- |
| 14,40 | 1,57 | 48,48 | 4 | 0,90 | 149,2 | 157 | 68,2 | 2,4 | 36,8 | 55,1 | 5,1 | -- | 31 | 21 | 18 | 17 | 25 | 27 | 2,6 | 3,9 | 4,7 | -- | -- |
| 14,60 | 1,67 | 21,25 | 2 | 0,97 | 151,1 | 161 | 70,9 | 2,4 | 37,9 | 56,8 | 5,3 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 14,80 | 1,76 | 38,30 | 4 | 0,91 | 152,9 | 164 | 73,5 | 2,5 | 38,9 | 58,3 | 5,5 | 2 | 32 | 22 | 19 | 18 | 25 | 27 | 2,9 | 4,4 | 5,3 | -- | -- |
| **15,00** | 1,57 | 30,19 | 4 | 0,90 | 154,6 | 157 | 68,2 | 2,3 | 37,2 | 55,8 | 5,1 | -- | 31 | 21 | 18 | 17 | 25 | 27 | 2,6 | 3,9 | 4,7 | -- | -- |



info@geogroupmodena.it

Software by dott. Geol. Diego Merlin +39 0425-840820

# ALLEGATO 3

## INDAGINI SISMICHE

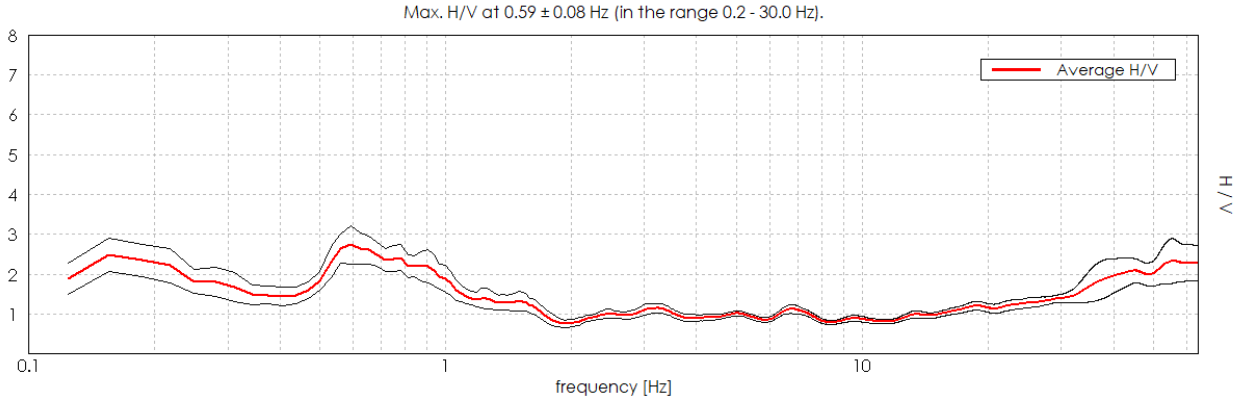
TROMINO
www.moho.world

## PADULLE, SALA BOLOGNESE – COMPARTO GLI OLMI

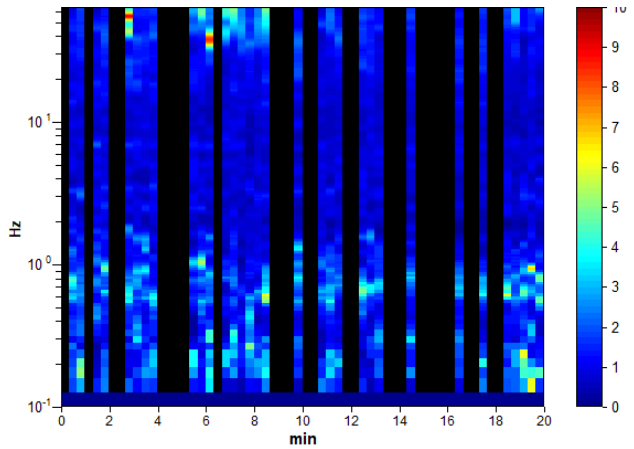
Instrument: TZB-0123/01-20
Data format: 32 bit
Full scale [mV]: 179
Start recording: 26/11/2021 11:24:14 End recording: 26/11/2021 11:44:14
Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analyzed 53% trace (manual window selection)
Sampling rate: 128 Hz
Window size: 20 s
Smoothing type: Triangular window
Smoothing: 10%

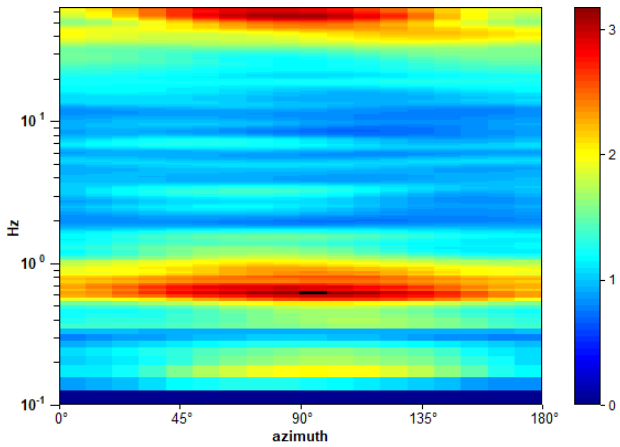
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



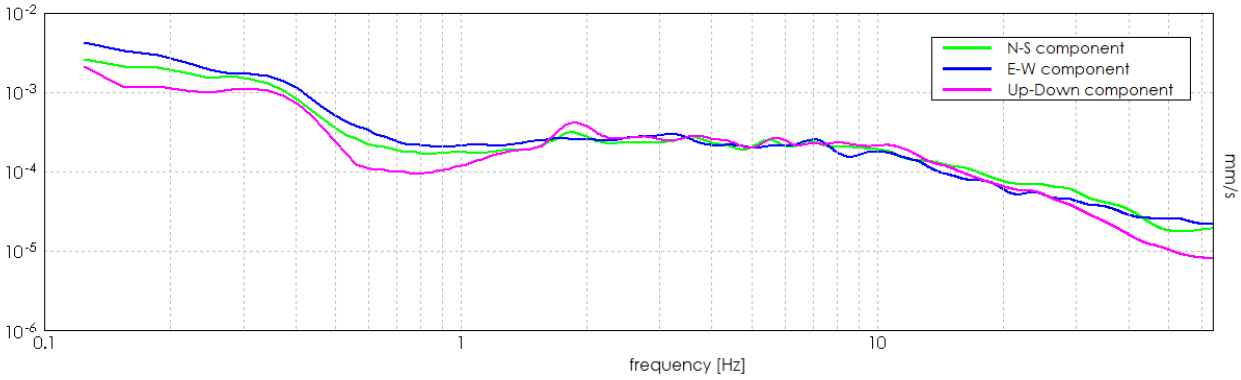

H/V TIME HISTORY



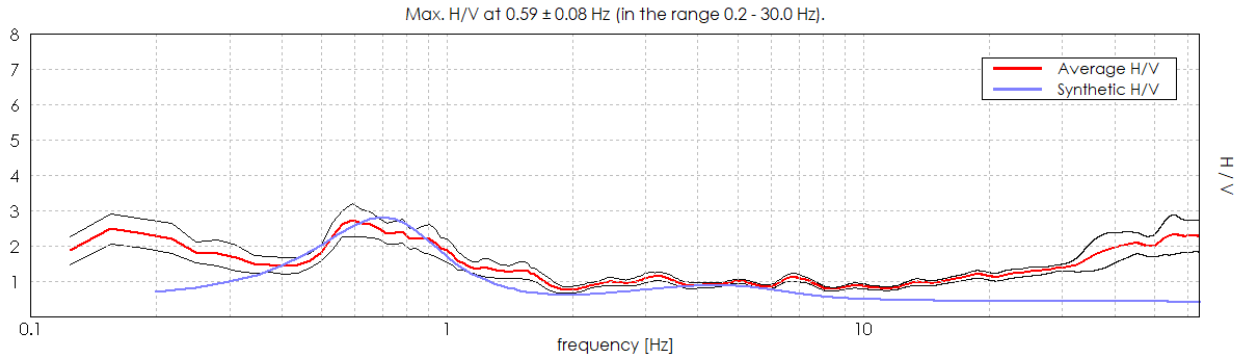

DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

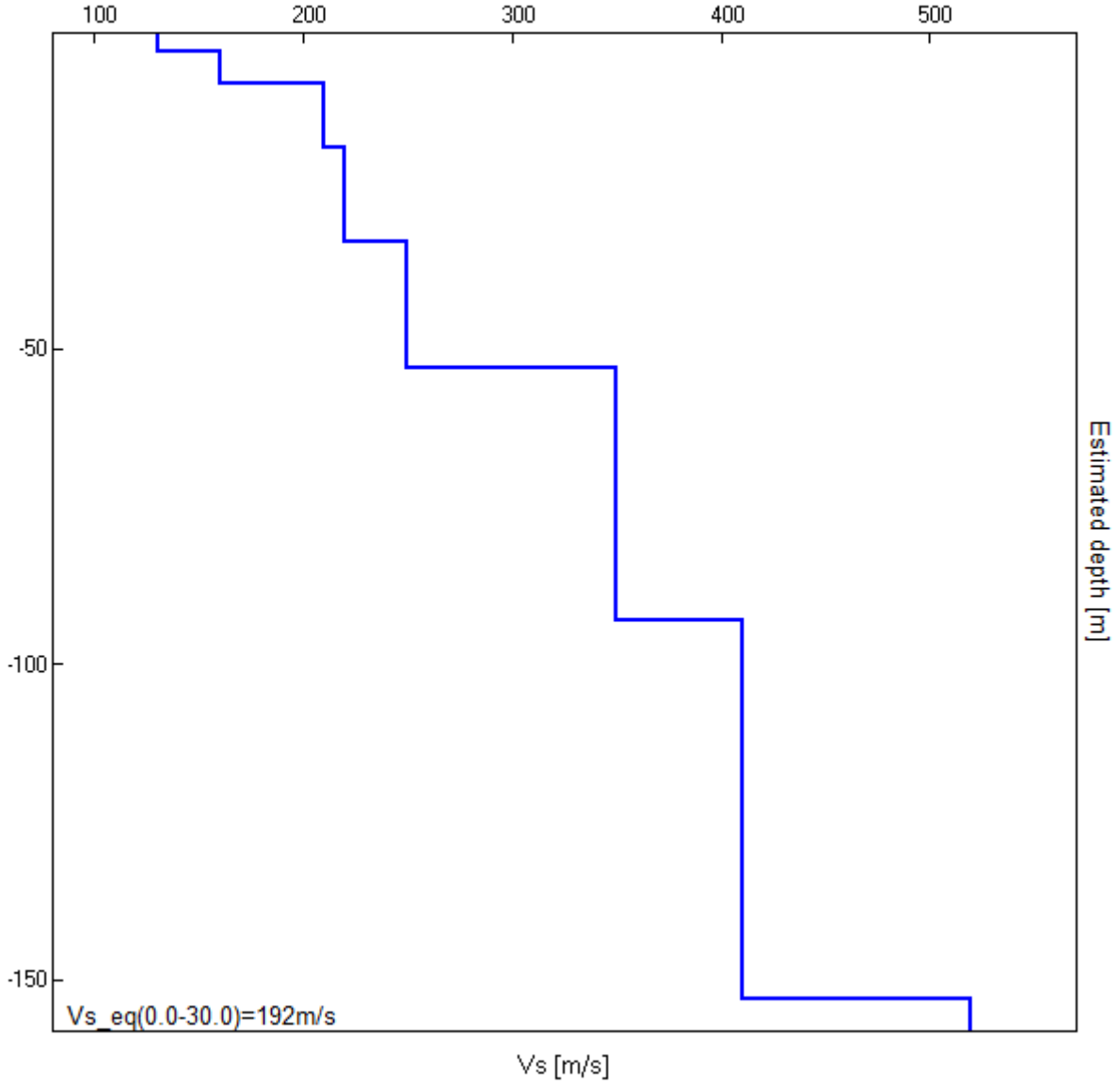



EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V




| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] | Poisson ratio |
|---|---|---|---|
| 3.00 | 3.00 | 130 | 0.45 |
| 8.00 | 5.00 | 160 | 0.45 |
| 18.00 | 10.00 | 210 | 0.44 |
| 33.00 | 15.00 | 220 | 0.44 |
| 53.00 | 20.00 | 250 | 0.43 |
| 93.00 | 40.00 | 350 | 0.43 |
| 153.00 | 60.00 | 410 | 0.43 |
| inf. | inf. | 520 | 0.42 |

**Vs_eq (0.0-30.0) = 192 m/s**


100
200
300
400
500
-50
-100
-150
Estimated depth [m]
Vs_eq(0.0-30.0)=192m/s
Vs [m/s]

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

**Max. H/V at 0.59 ± 0.08 Hz (in the range 0.2 - 30.0 Hz).**

| **Criteria for a reliable H/V curve** [All 3 should be fulfilled] | | | |
|---|---|---|---|
| **$f_0 > 10 / L_w$** | 0.59 > 0.50 | OK | |
| **$n_c(f_0) > 200$** | 380.0 > 200 | OK | |
| **$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5$Hz**<br>**$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5$Hz** | Exceeded 0 out of 30 times | OK | |
| **Criteria for a clear H/V peak** [At least 5 out of 6 should be fulfilled] | | | |
| **Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$ \| $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$** | | | NO |
| **Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$ \| $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$** | 1.313 Hz | OK | |
| **$A_0 > 2$** | 2.74 > 2 | OK | |
| **$f_{peak}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$** | \|0.13956\| < 0.05 | | NO |
| **$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$** | 0.08286 < 0.08906 | OK | |
| **$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$** | 0.4709 < 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 |
| $\sigma_f$ | 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 |
| $\sigma_{logH/V}(f)$ | 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 $\sigma_f$ 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 $\sigma_{logH/V}(f_0)$ | 0.48 | 0.40 | 0.30 | 0.25 | 0.20 |

TROMINO®
www.moho.world

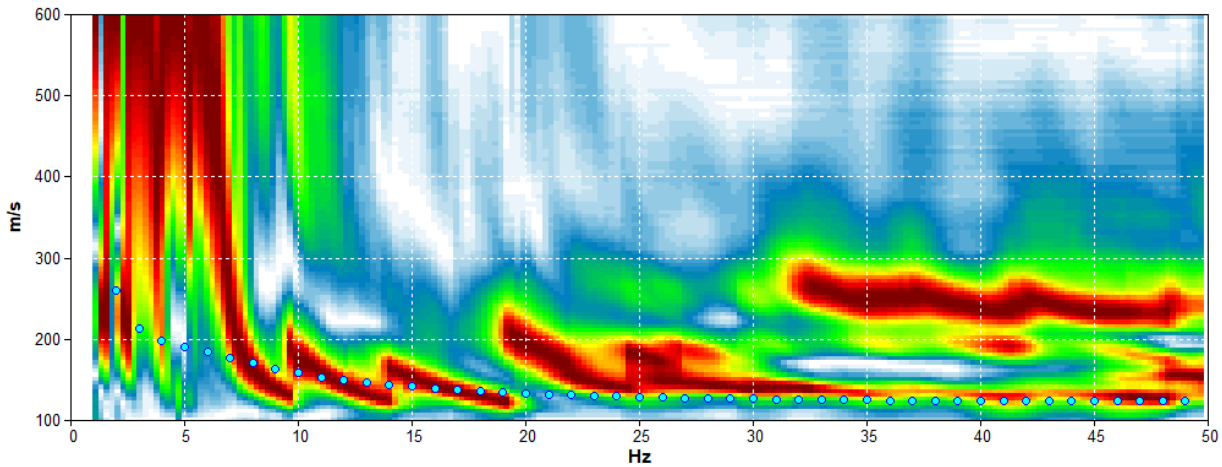
## PADULLE, SALA BOLOGNESE – COMPARTO GLI OLMI

Start recording: 26/11/2021 11:24:14 End recording: 26/11/2021 11:44:14
Trace length: 0h20'00". Analyzed 53% trace (manual window selection)
Sampling rate: 128 Hz

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

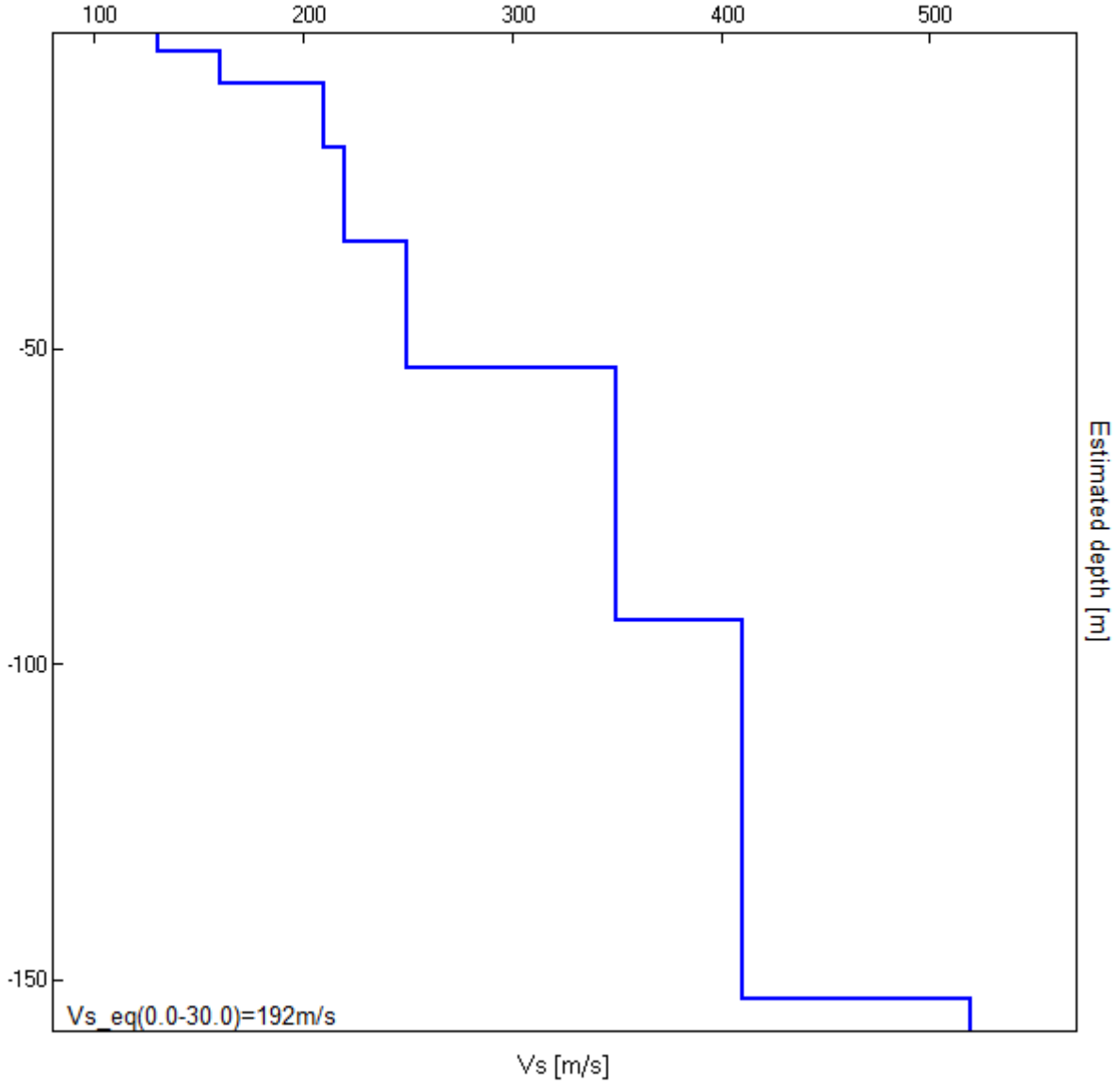
Array geometry (x): 0.0 2.0 4.0 6.0 8.0 10.0 12.0 14.0 16.0 18.0 20.0 22.0 24.0 26.0 28.0 30.0 32.0 34.0 36.0 m.

MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE




| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] | Poisson ratio |
|---|---|---|---|
| 3.00 | 3.00 | 130 | 0.45 |
| 8.00 | 5.00 | 160 | 0.45 |
| 18.00 | 10.00 | 210 | 0.44 |
| 33.00 | 15.00 | 220 | 0.44 |
| 53.00 | 20.00 | 250 | 0.43 |
| 93.00 | 40.00 | 350 | 0.43 |
| 153.00 | 60.00 | 410 | 0.43 |
| inf. | inf. | 520 | 0.42 |

**Vs_eq (0.0-30.0) = 192 m/s**


100
200
300
400
500
-50
-100
-150
Estimated depth [m]
Vs_eq(0.0-30.0)=192m/s
Vs [m/s]

# ALLEGATO 4

## VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

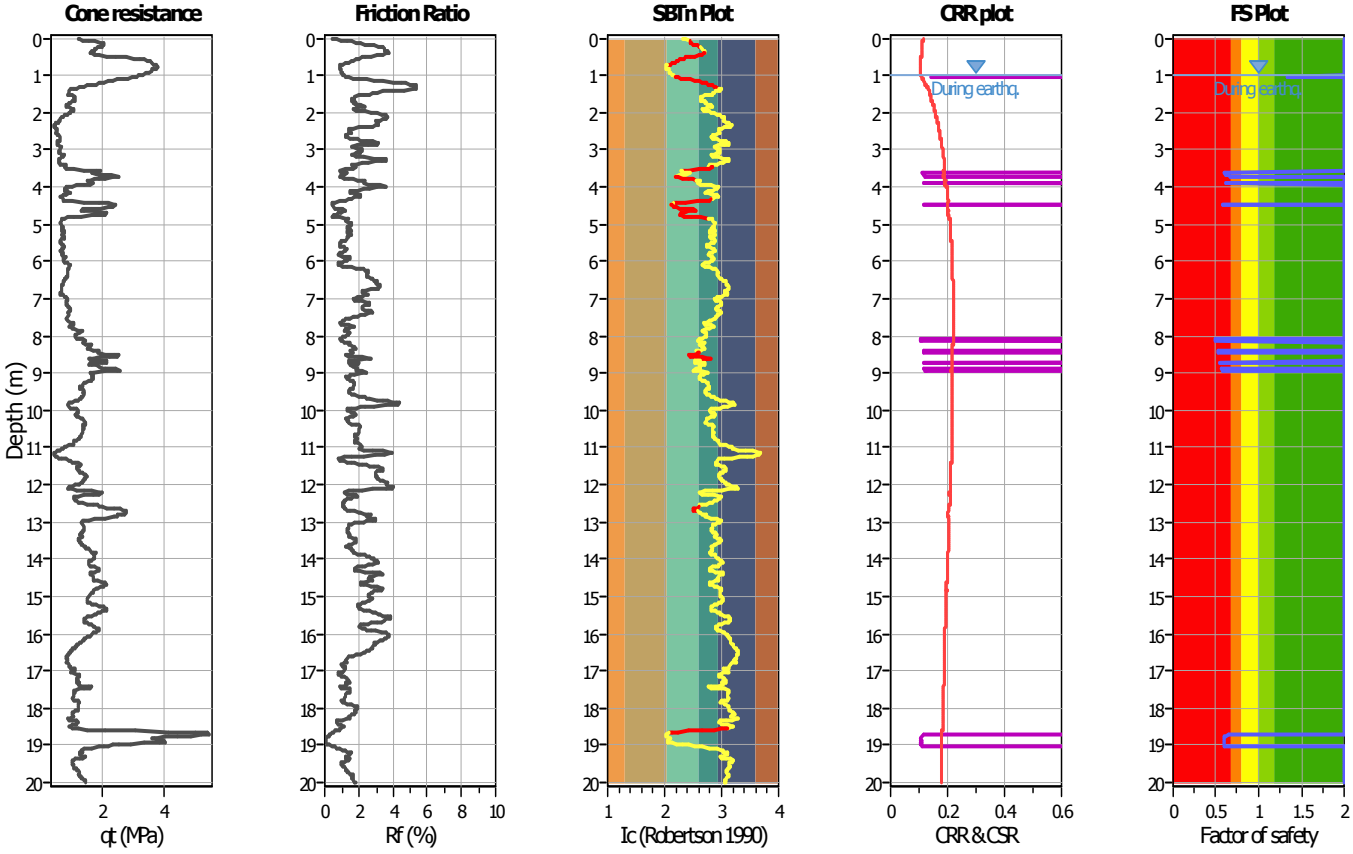
# LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

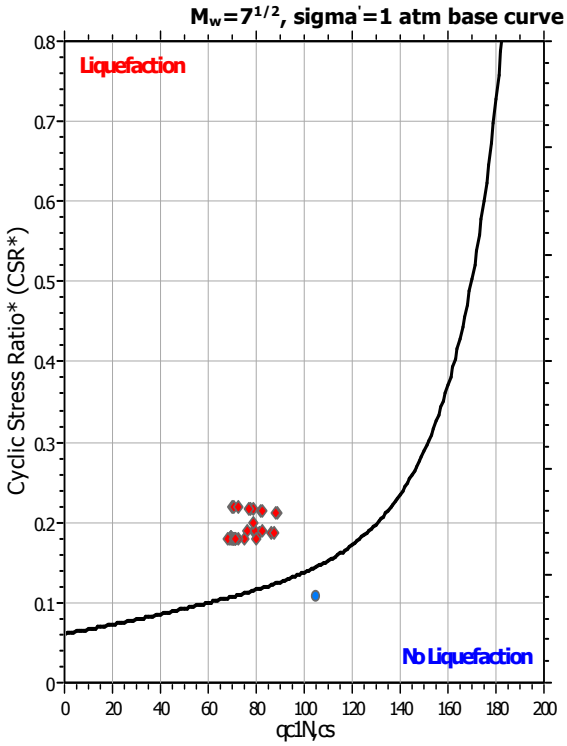
**Project title : STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE** **Location : COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

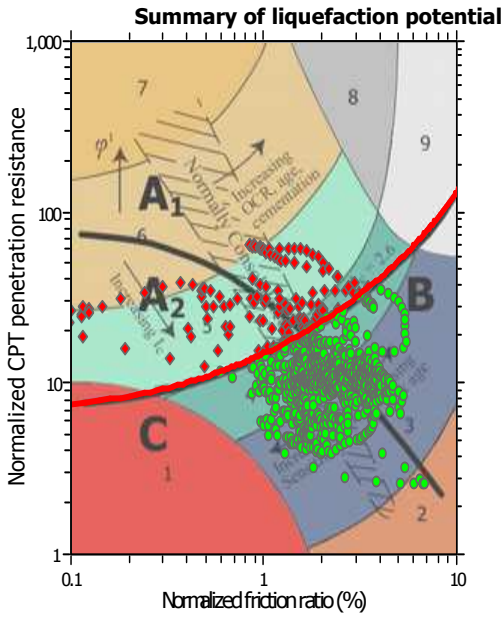
**CPT file : CPTU1**

## Input parameters and analysis data

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Analysis method: | B&I (2014) | G.W.T. (in-situ): | 2.50 m | Use fill: | No | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Fines correction method: | B&I (2014) | G.W.T. (earthq.): | 1.00 m | Fill height: | N/A | Limit depth applied: | No |
| Points to test: | Based on Ic value | Average results interval: | 3 | Fill weight: | N/A | Limit depth: | N/A |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Ic cut-off value: | 2.60 | Trans. detect. applied: | Yes | MSF method: | Method |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Unit weight calculation: | Based on SBT | $K_\sigma$ applied: | Yes | | |

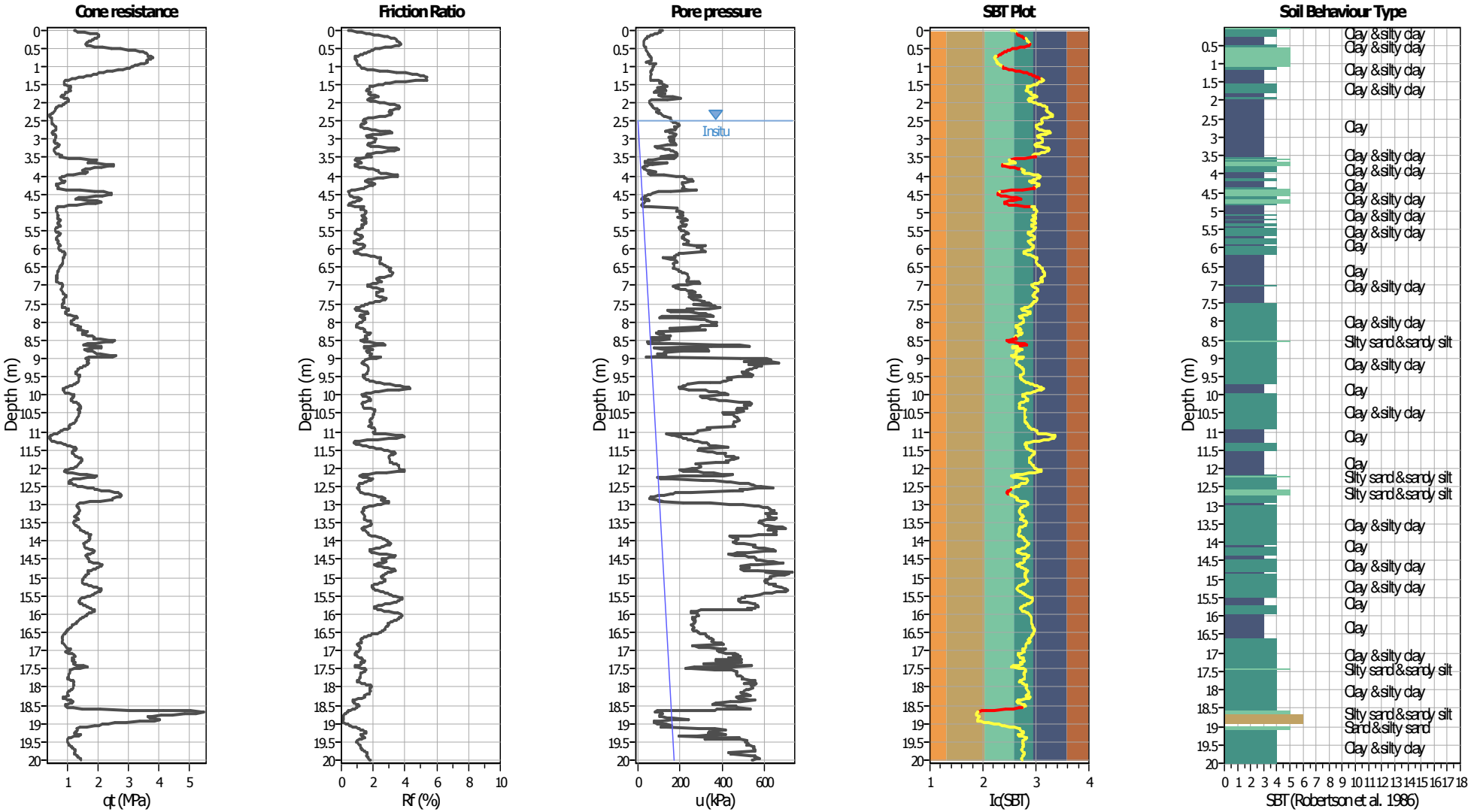



Zone $A_1$: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone $A_2$: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

# CPT basic interpretation plots



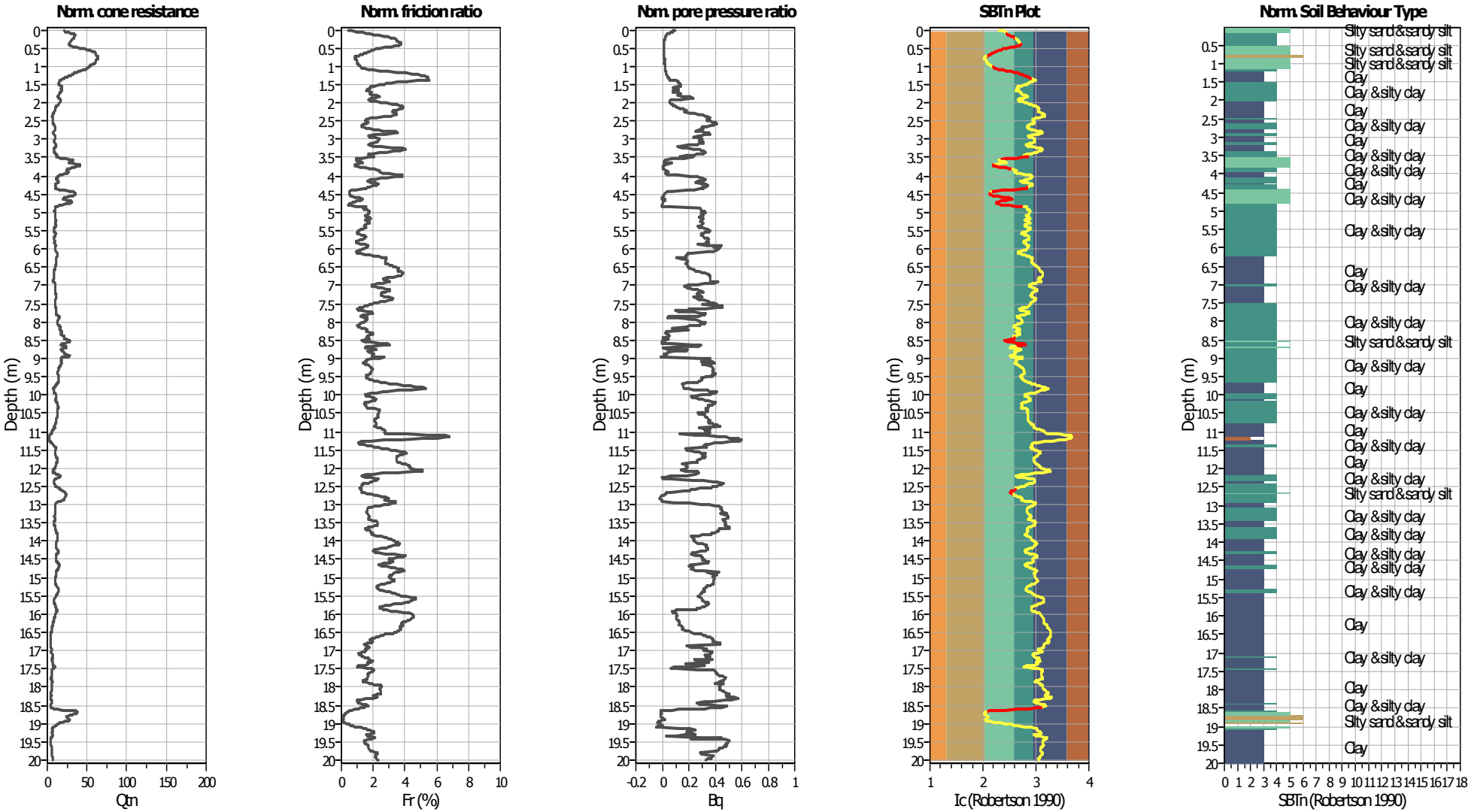

## Input parameters and analysis data

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Analysis method: | B&I (2014) | Depth to GWT (erthq.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.50 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |

**SBT legend**

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

# CPT basic interpretation plots (normalized)



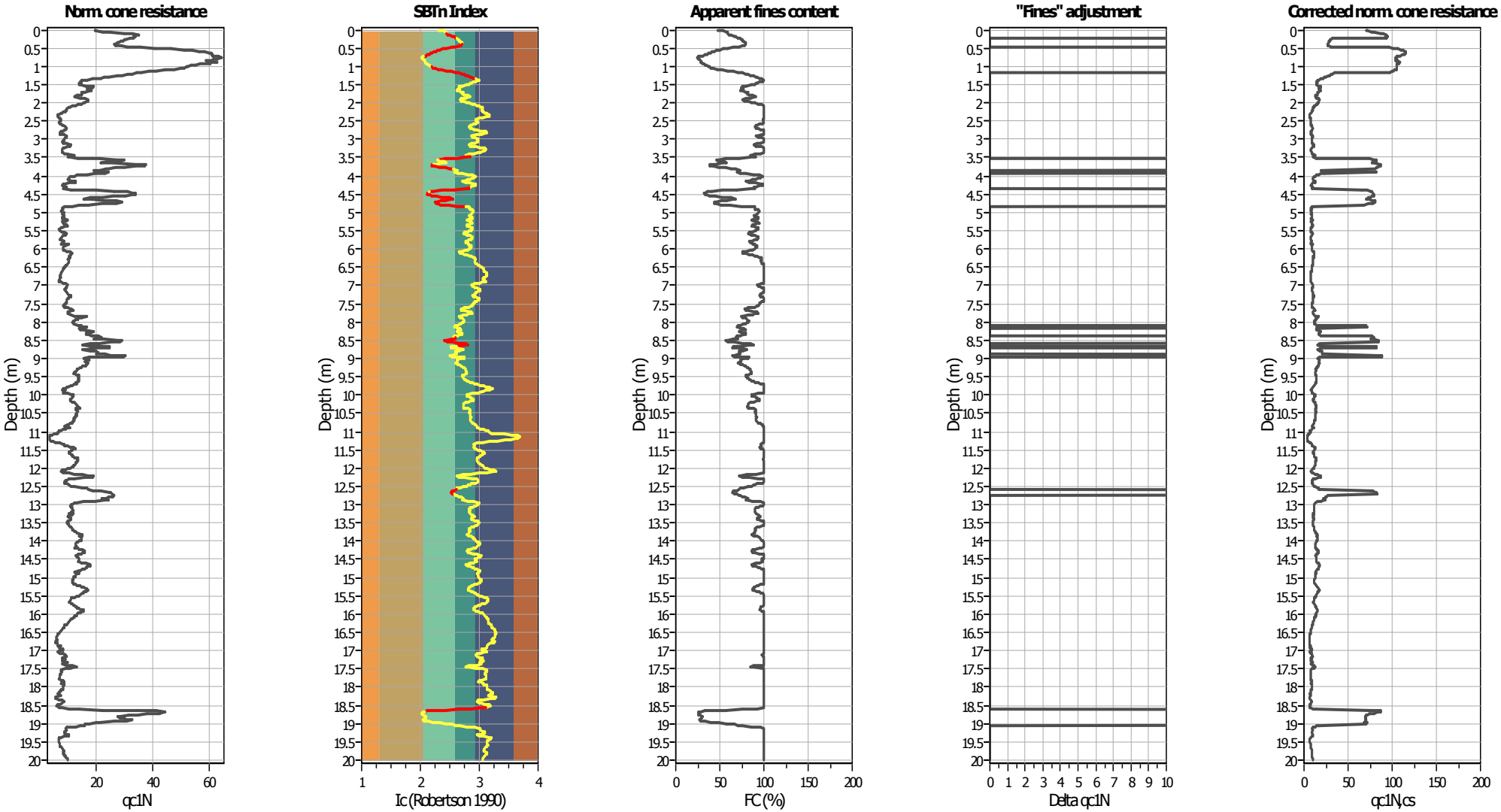

## Input parameters and analysis data

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Analysis method: | B&I (2014) | Depth to GWT (erthq.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.50 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |

**SBTn legend**

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

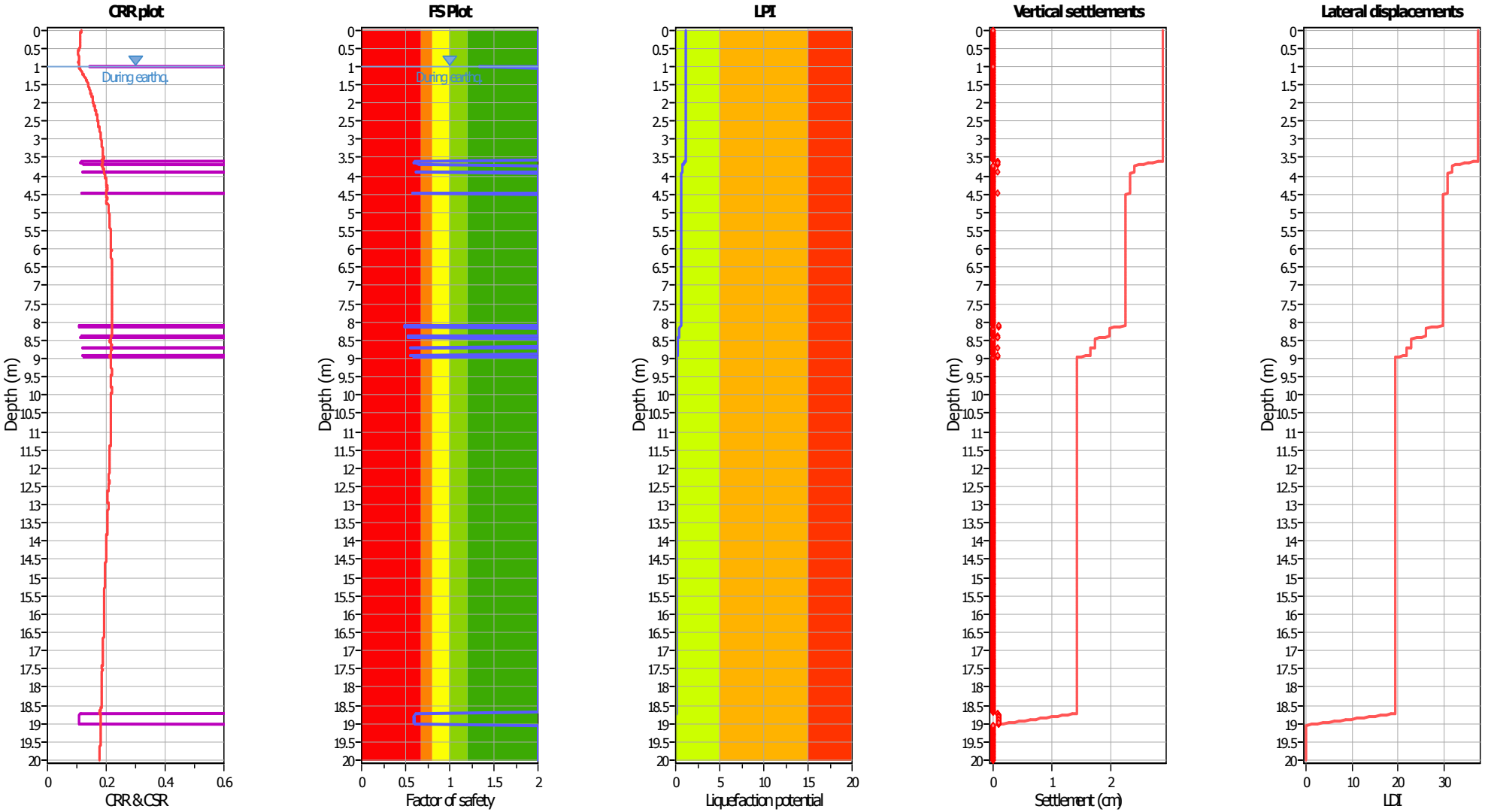
# Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)




## Input parameters and analysis data

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Analysis method: | B&I (2014) | Depth to GWT (erthq.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.50 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |

# Liquefaction analysis overall plots




## Input parameters and analysis data

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Analysis method: | B&I (2014) | Depth to GWT (erthq.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.50 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |

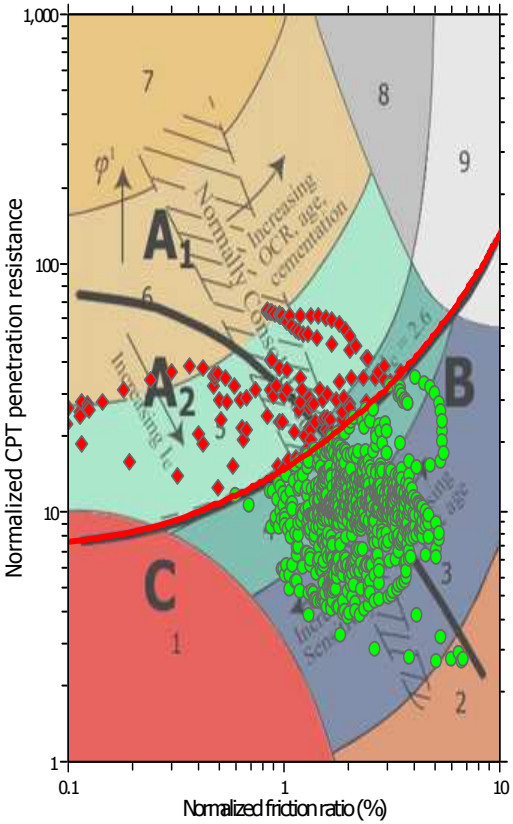
**F.S. color scheme**

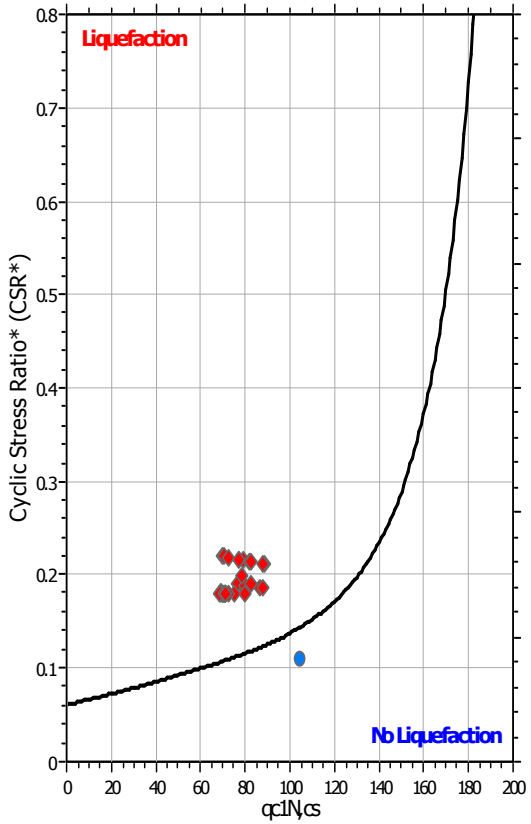
- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

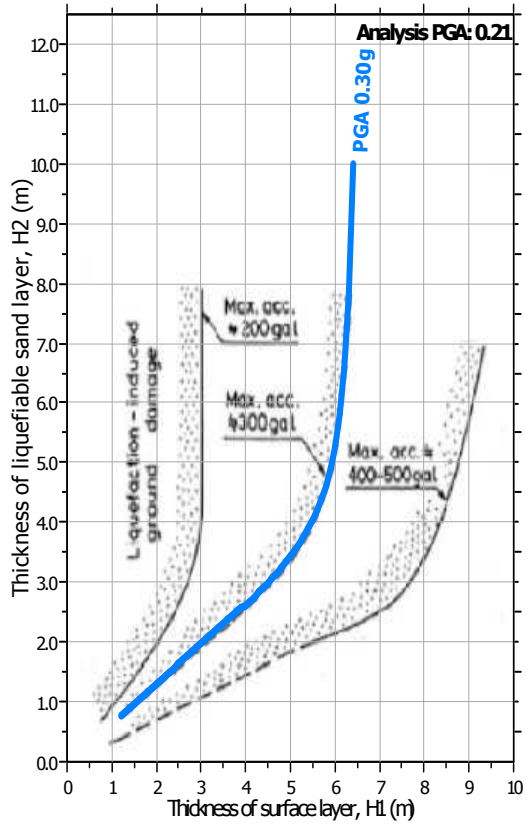
**LPI color scheme**

- 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.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.50 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |

**Geo Group S.r.l.**
v. per Modena, 12- Castelnuovo Rangone (MO)
059 3967169
info@geogroupmodena.it

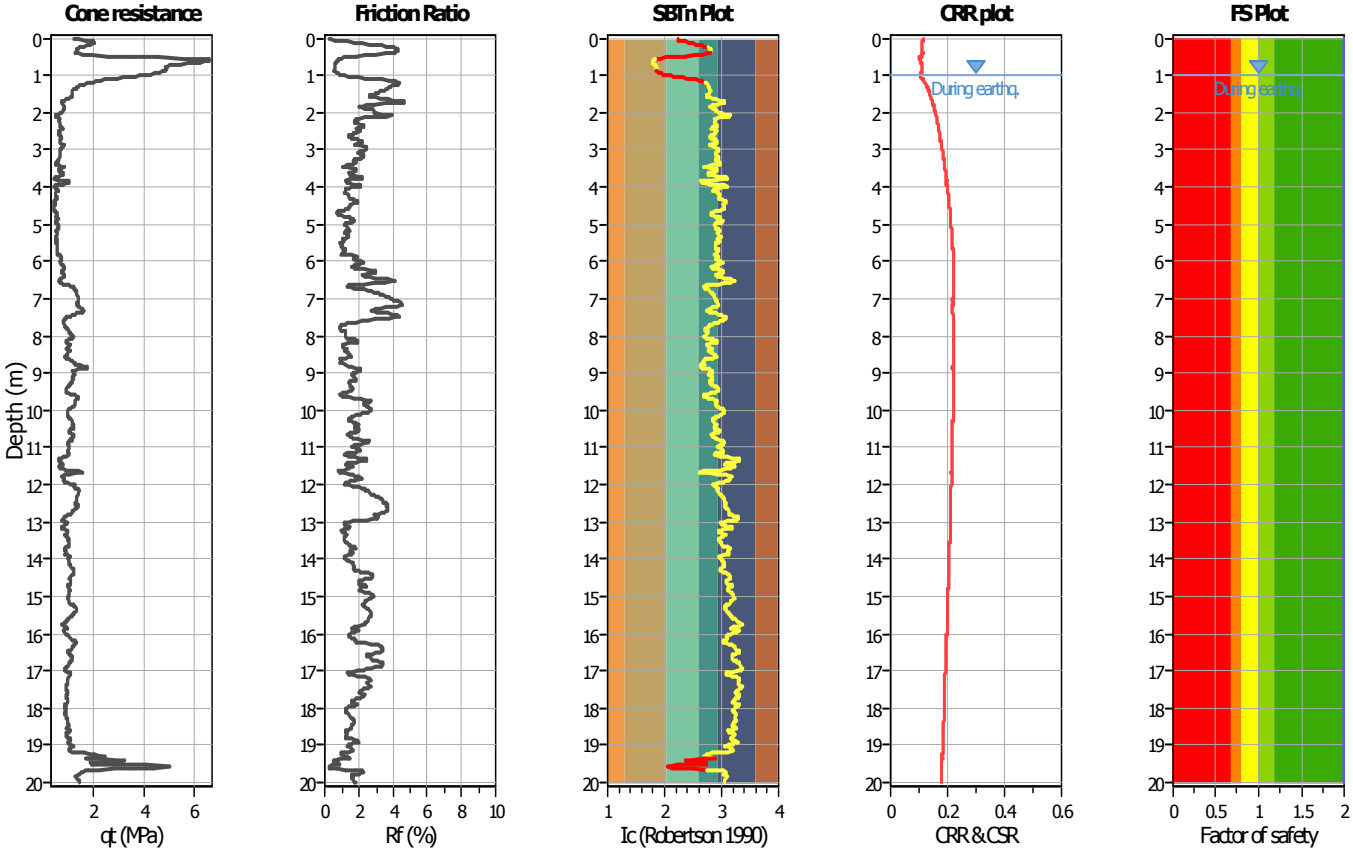
# LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

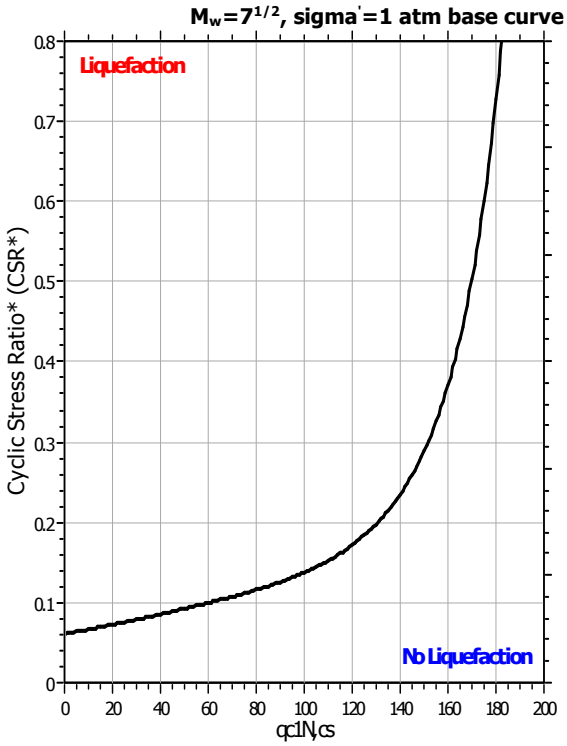
**Project title : STUDIO DEL TERRENO DI FONDAZIONE** **Location : COMPARTO GLI OLMI - SALA BOLOGNESE**

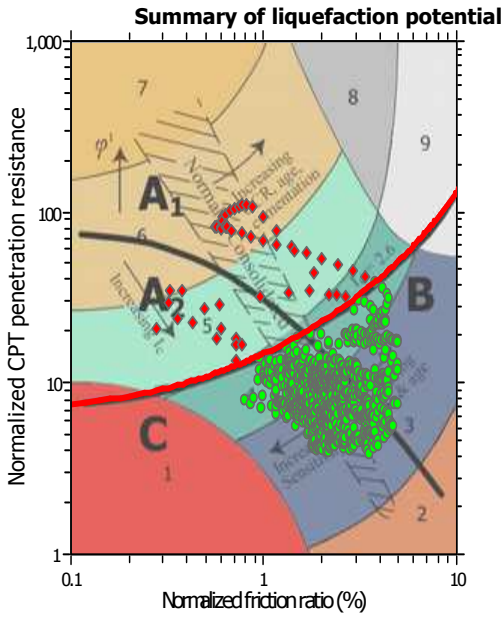
**CPT file : CPTU2**

## Input parameters and analysis data

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

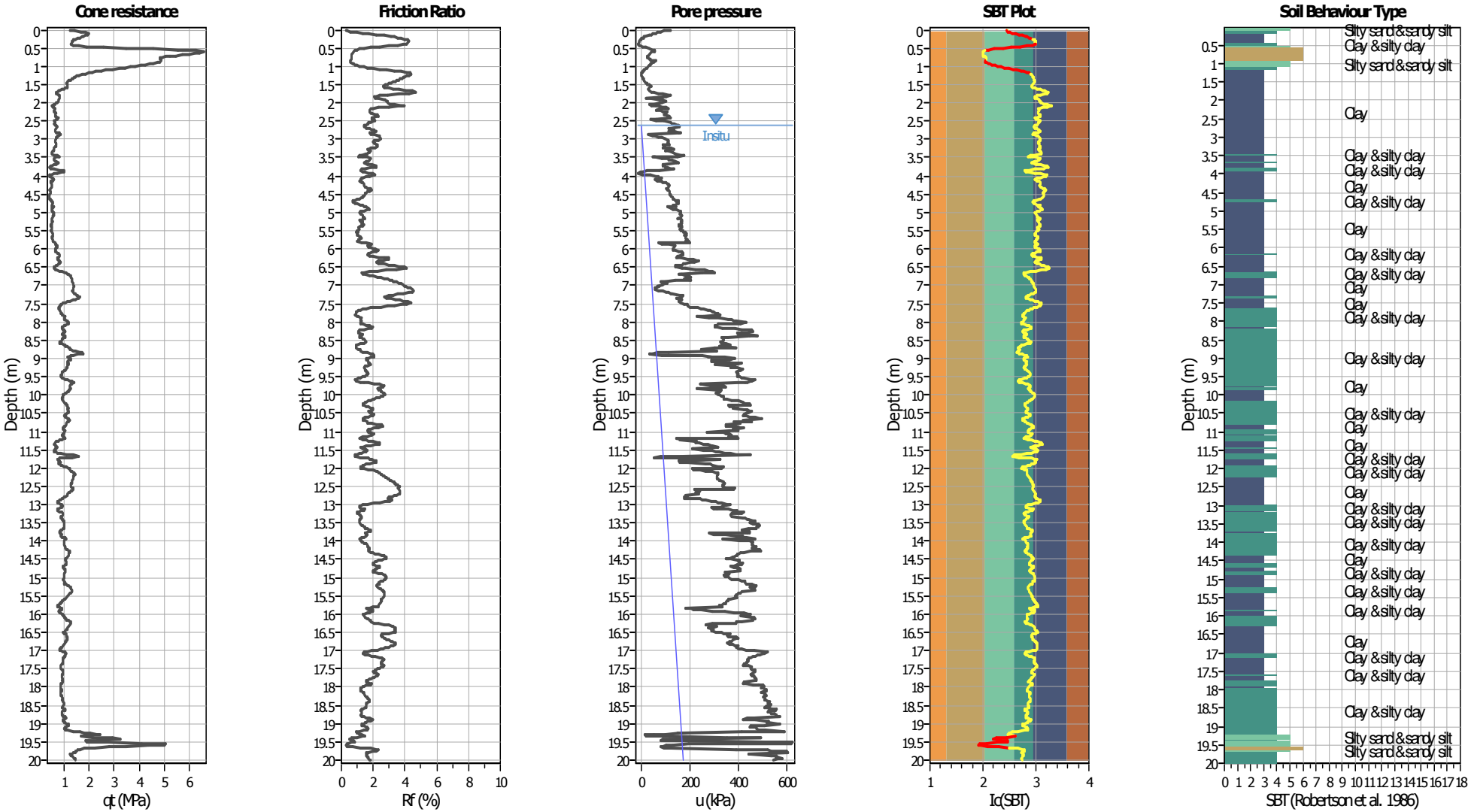



Zone $A_1$: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
Zone $A_2$: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

# CPT basic interpretation plots



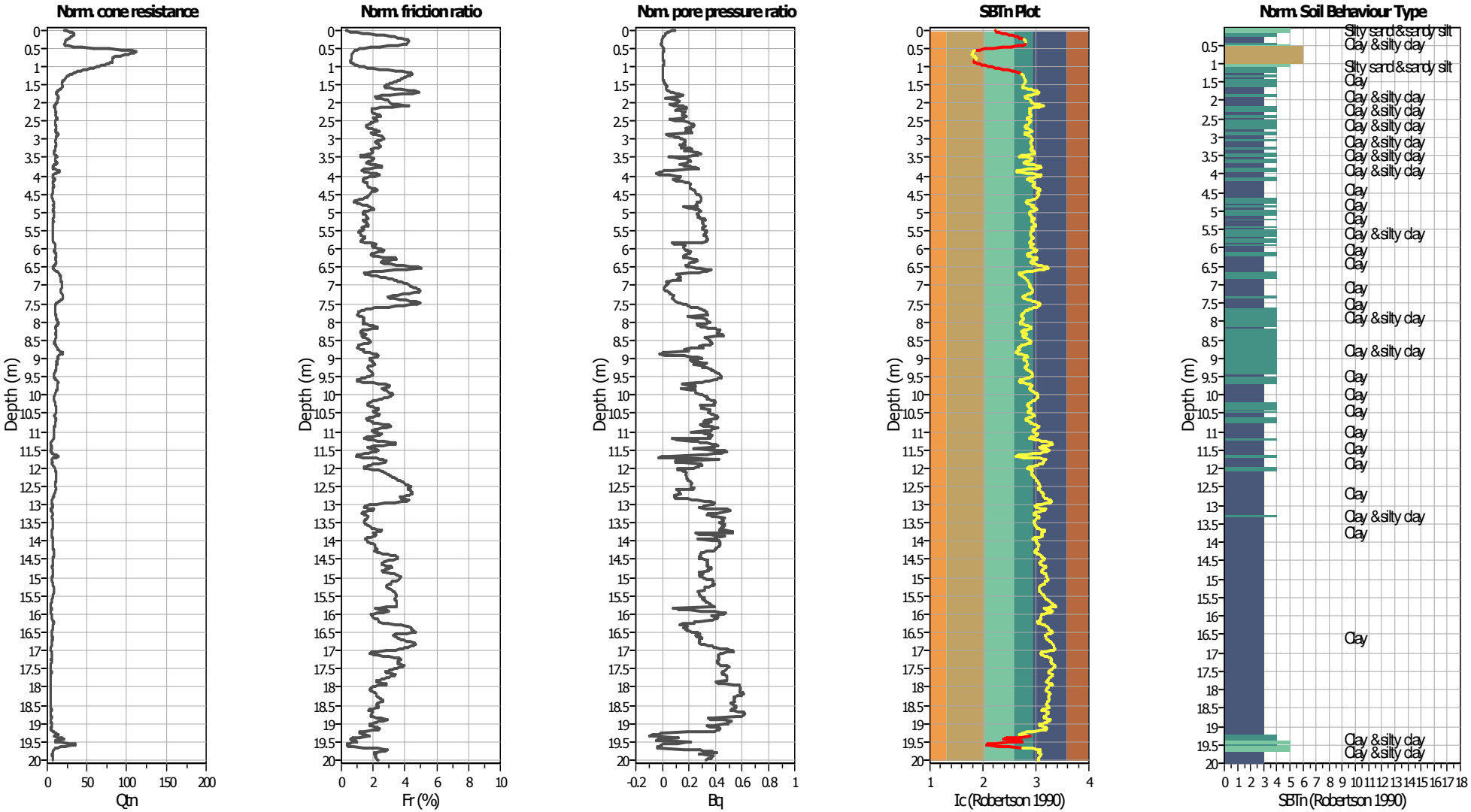

## Input parameters and analysis data

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Analysis method: | B&I (2014) | Depth to GWT (erthq.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.60 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |

**SBT legend**

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

# CPT basic interpretation plots (normalized)



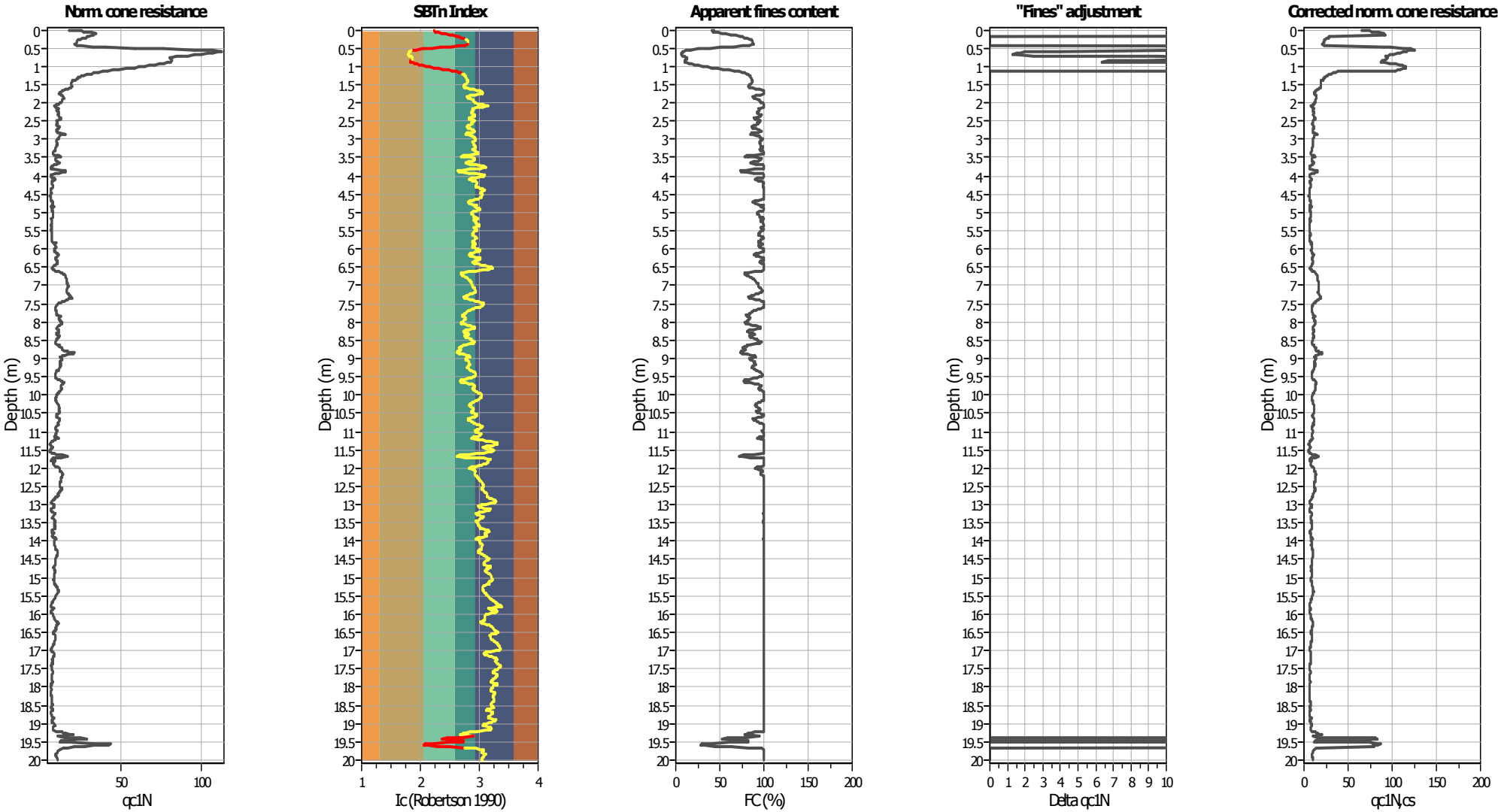

## Input parameters and analysis data

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Analysis method: | B&I (2014) | Depth to GWT (erthq.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.60 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |

**SBTn legend**

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

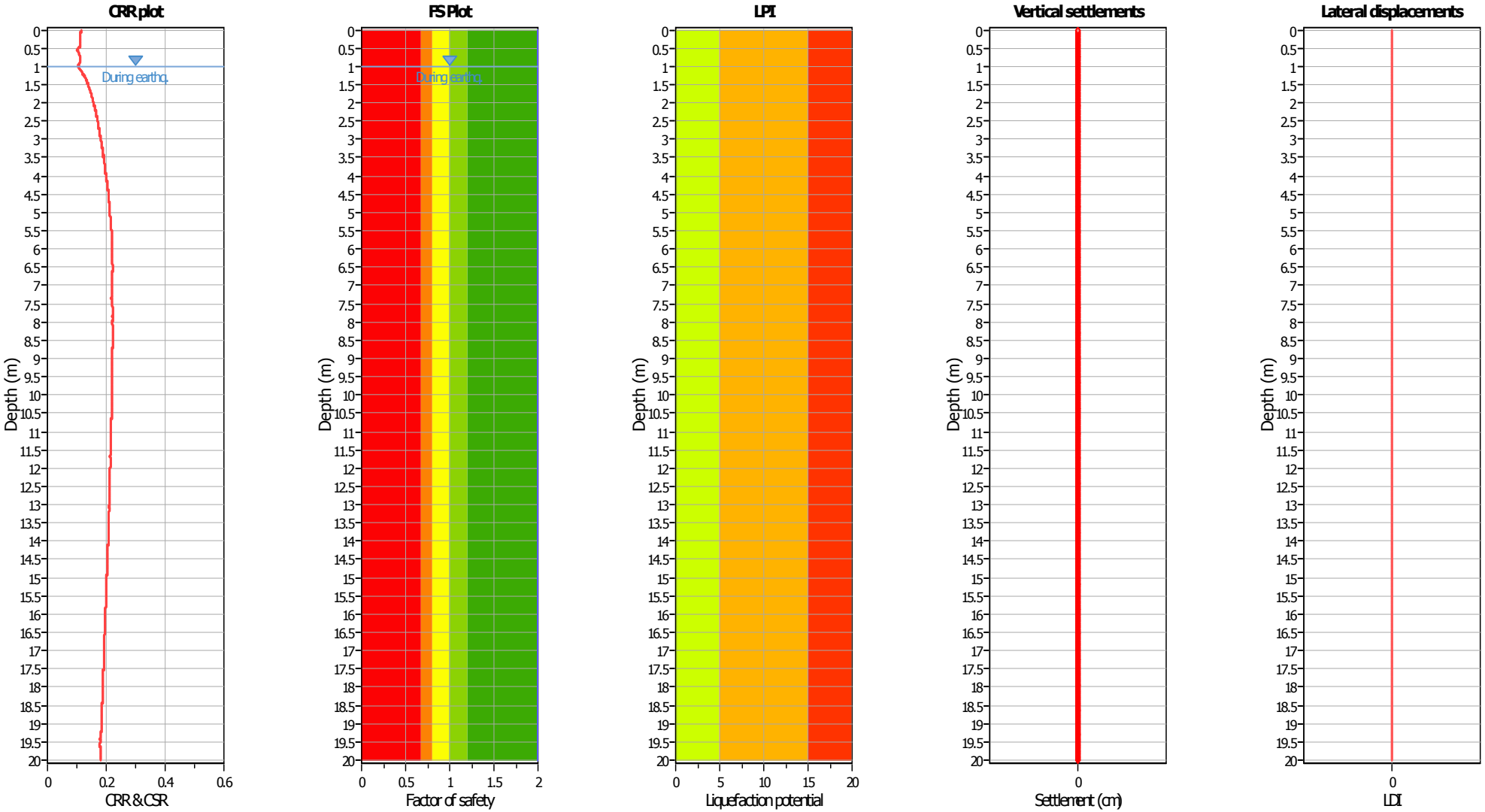
# Liquefaction analysis overall plots (intermediate results)




## Input parameters and analysis data

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Analysis method: | B&I (2014) | Depth to GWT (erthq.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.60 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |

# Liquefaction analysis overall plots




## Input parameters and analysis data

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Analysis method: | B&I (2014) | Depth to GWT (erthq.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.60 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |

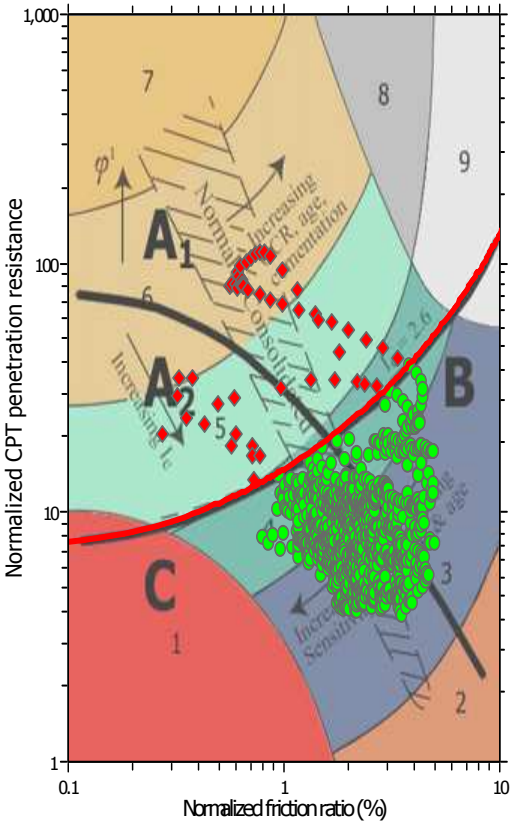
**F.S. color scheme**

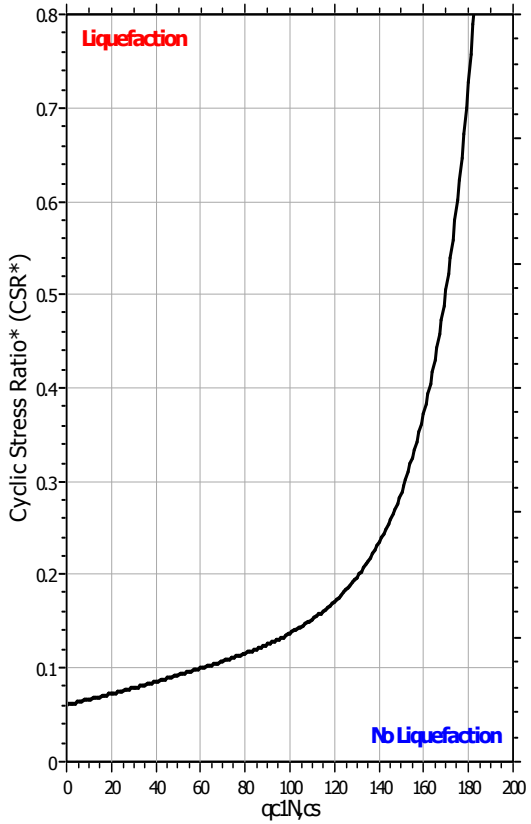
- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

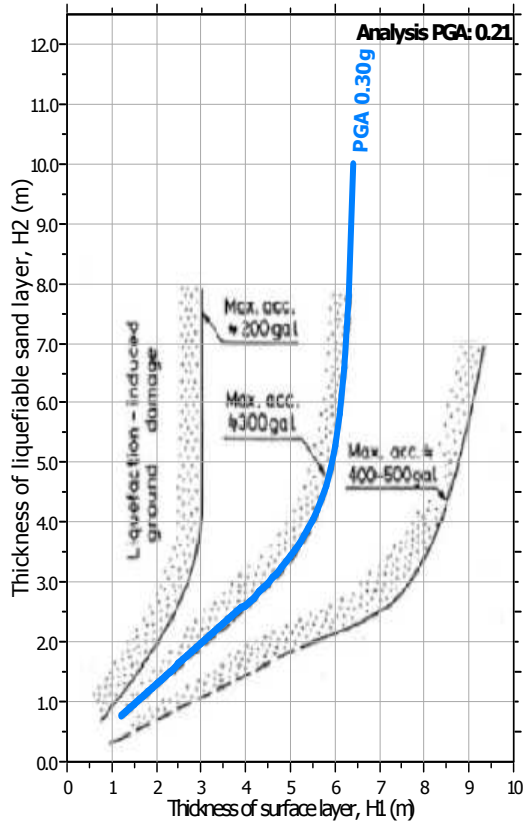
**LPI color scheme**

- 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.): | 1.00 m | Fill weight: | N/A |
| Fines correction method: | B&I (2014) | Average results interval: | 3 | Transition detect. applied: | Yes |
| Points to test: | Based on Ic value | Ic cut-off value: | 2.60 | $K_\sigma$ applied: | Yes |
| Earthquake magnitude $M_w$: | 6.14 | Unit weight calculation: | Based on SBT | Clay like behavior applied: | Sands only |
| Peak ground acceleration: | 0.21 | Use fill: | No | Limit depth applied: | No |
| Depth to water table (insitu): | 2.60 m | Fill height: | N/A | Limit depth: | N/A |