



**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN CAPANNONE
SITO IN VIA CADUTI DI USTICA**

14 Aprile 2023

Committente:

Ing. Mauro Perini

Redazione:

Dott. Geol. Alberto Caprara

Ordine dei Geologi R.E.R n°1341



Sommario

1	PREMESSA	1
1.1	INQUADRAMENTO PRELIMINARE	1
1.2	RIFERIMENTI ALLA NORMATIVA VIGENTE	1
2	INQUADRAMENTO DELL'AREA	2
2.1	CONTESTO GEOGRAFICO	2
2.2	RIFERIMENTO ALLA CARTOGRAFIA ESISTENTE	3
3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	4
3.1	GEOMORFOLOGIA, GEOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA	4
3.2	IDROLOGIA ED IDROGEOLOGIA	4
3.3	CONTESTO TETTONICO, QUADRO MACROSISMICO, PERICOLOSITÀ SISMICA:	5
4	MODELLO GEOLOGICO	7
4.1	INDAGINI GEOGNOSTICHE E UBICAZIONE	7
4.2	RISULTATO DELLE ANALISI	9
4.2.1	<i>Sondaggio a carotaggio continuo (Allegato A)</i>	9
4.2.2	<i>Prove di laboratorio geotecnico (Allegato B)</i>	9
4.2.3	<i>Prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU (Allegato C)</i>	10
4.3	MODELLO E PARAMETRI	13
5	MODELLO SISMICO	14
5.1	INDAGINI SISMICHE	14
5.1.1	<i>Interpretazione sismo-stratigrafica</i>	15
5.2	CONDIZIONI TOPOGRAFICHE (TAB. 3.2.III – CATEGORIE TOPOGRAFICHE – NTC2018)	15
5.3	VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	16
5.4	RISPOSTA SISMICA LOCALE (TAB. 3.2.II – CATEGORIE DI SOTTOSUOLO – NTC2018)	16
5.4.1	<i>Definizione dello Spettro di Risposta</i>	16
6	CONCLUSIONI	18

Allegati:

Allegato A: Sondaggio a carotaggio continuo

Allegato B: Analisi di laboratorio geotecnico

Allegato C: Report CPTU

Allegato D: Report indagini geofisiche

1 PREMESSA

1.1 INQUADRAMENTO PRELIMINARE

- **Tipo di elaborato:** Relazione Geologica e Sismica.
- **Committenza:** Ing. Mauro Perini
- **Ubicazione:** Via Caduti di Ustica – Calderara di Reno (BO)
- **Progetto o fine dell'elaborato:** progetto per la realizzazione di un nuovo capannone industriale.
- **Tecnici progettisti:** Ing. Mauro Perini
- Lo studio dell'area e l'elaborazione delle lavorazioni di progetto sono stati articolati nelle seguenti fasi:
 - Consultazione della cartografia tematica relativa all'area (carta topografica, carta geologica, carta dei suoli, documenti di piano comunali e regionali).
 - Esecuzione di una campagna di **indagini geognostiche** integrative:
 - **n° 1 sondaggio a carotaggio continuo;**
 - **n° 1 prelievo campione indisturbato e analisi di laboratorio geotecnico;**
 - **n° 8 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU);**
 - **n° 1 indagine sismica passiva multicanale (REMI);**
 - **n° 1 indagine sismica passiva a stazione singola (HVSr).**
 - Raccolta ed elaborazione dei dati.
 - Ricostruzione del modello geologico di sito e stesura del presente elaborato.

1.2 RIFERIMENTI ALLA NORMATIVA VIGENTE

I presenti elaborati sono stati redatti rispettando le disposizioni della normativa vigente. In particolare si fa riferimento alle seguenti disposizioni:

- D.P.R. n. 328 del 05 giugno 2001: "Modifiche ed integrazioni della disciplina dei requisiti per l'ammissione all'esame di Stato e delle relative prove per l'esercizio di talune professioni, nonché della disciplina dei relativi ordinamenti" – Suppl. Ordinario n. 212 alla G.U. n. 190 del 17-08-2001 (Artt. 40-44).
- O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".
- Norme tecniche per le costruzioni: Decreto 14/01/2008 del Ministero delle infrastrutture (GU n.29 del 04/02/2008).
- Circolare Cons. Sup. LL.PP. n. 617/2009: Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- Aggiornamento delle NTC: Decreto del 17/01/2018 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (G.U. n° 42 del 20/02/2018).
- Circolare Cons. Sup. LL.PP.: supplemento ordinario n. 5 alla G.U. – serie generale n. 35 del 11 febbraio 2019.

2 INQUADRAMENTO DELL'AREA

2.1 CONTESTO GEOGRAFICO

- Coordinate punto centrale area d'intervento:

SISTEMA CARTOGRAFICO	
ED50 (Hayford – Greenwich)	44.552998,11.268275
ITRF2000 (WGS84 – Greenwich “GPS”)	44.552060,11.267279

Tabella 1: coordinate geografiche del sito in oggetto.

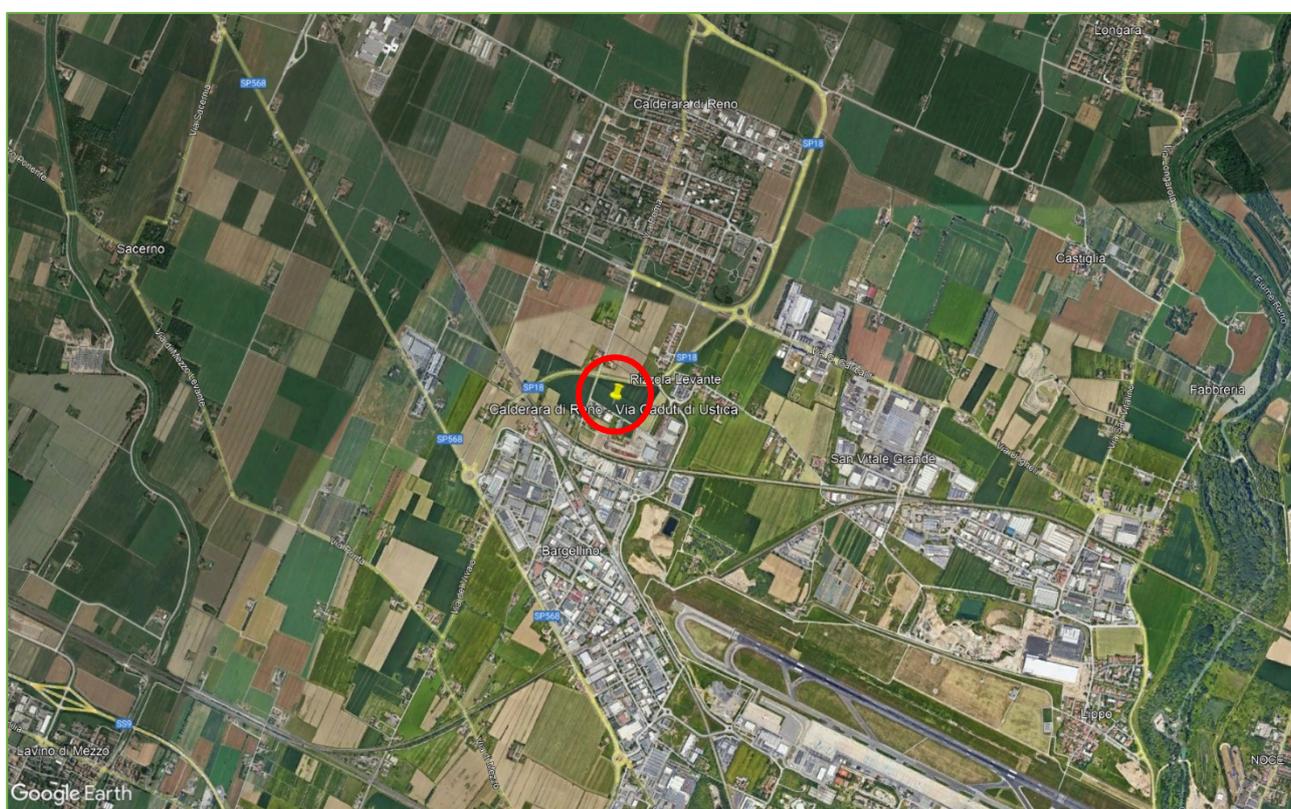


Figura 1: Inquadramento su foto satellitare da Google Earth.

2.2 RIFERIMENTO ALLA CARTOGRAFIA ESISTENTE

- Identificazione della zona sulla cartografia tecnica regionale:
 - Tavoleta 25.000: **220-NE** – Bologna Nord-Ovest;
 - Sezione 10.000: **220040** – Calderara di Reno;
 - Elemento 5.000: **220043** – Calderara di Reno.

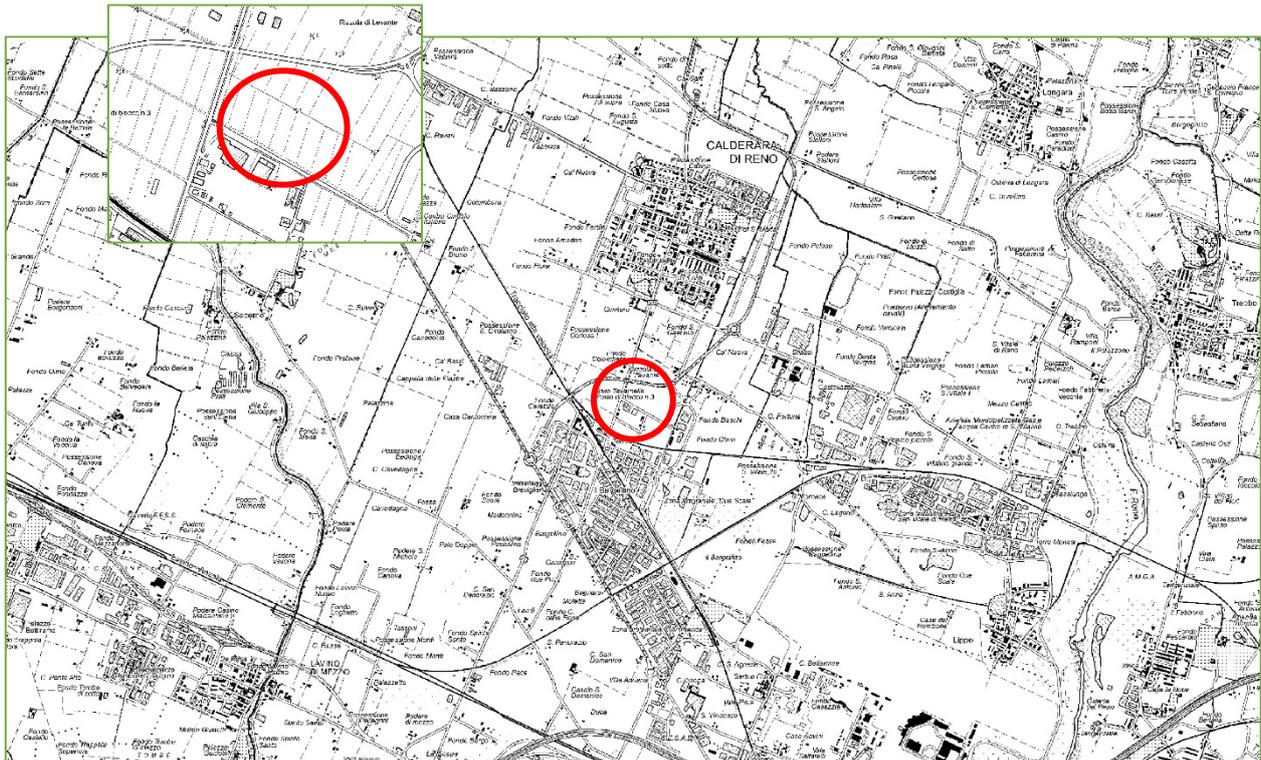


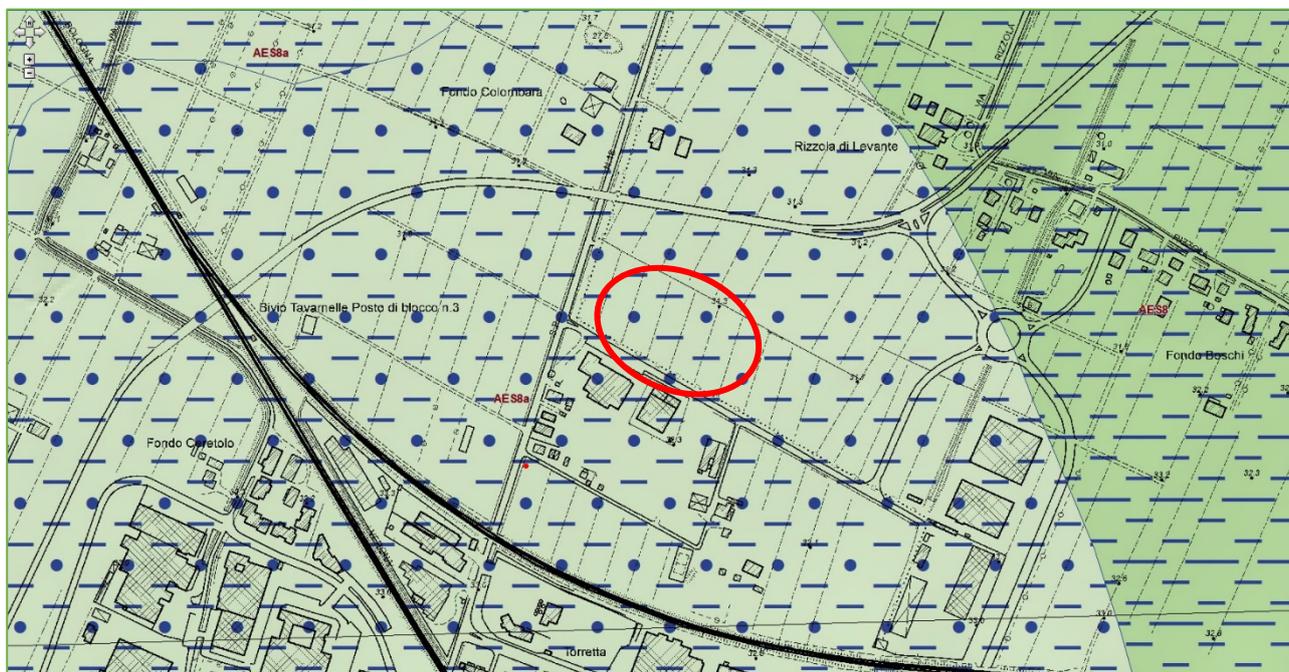
Figura 2: stralcio della CTR. Cerchiata in rosso l'area di studio.

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO



3.1 GEOMORFOLOGIA, GEOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA

- Quota altimetrica: 34 m s.l.m.
- Contesto geomorfologico: pianura bolognese, facies di piana alluvionale e inondabile, di canale e argine.
- Forme riconoscibili: contesto pianeggiante con modesta pendenza verso Nord-Est. Area agricola e area di espansione antropica recente con strade e capannoni. Non si individuano forme di superficie naturali riconducibili a fenomeni deposizionali passati. I canali attivi sono di origine antropica e sono per lo più a servizio dell'area urbana e delle coltivazioni, per la regimazione delle acque superficiali e di scolo.
- Contesto deposizionale: pianura bolognese, facies di piana inondabile, di canale e argine.
- Sedimentologia: limo sabbioso di piana alluvionale.



4

Figura 3: Stralcio della Carta geologica alla scala 1:10.000 della Regione Emilia Romagna.

- Litologia superficiale: limo sabbioso – piana alluvionale
- Unità geologica: AES8a – Unità di Modena. Nei settori intravallivi ghiaie prevalenti organizzate in 2 ordini di terrazzi alluvionali. Negli sbocchi vallivi e nella piana alluvionale ghiaie, sabbie, limi ed argille. Limite superiore sempre affiorante dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro privo di reperti archeologici romani, o più antichi, non rimaneggiati. Limite inferiore dato da una superficie di erosione fluviale nelle aree intra Spessore massimo in pianura 7 metri, nel sottosuolo circa 10m. (Età post-romana (IV-VI sec. d.C. - Attuale; datazione archeologica).

3.2 IDROLOGIA ED IDROGEOLOGIA

- Descrizione del deflusso idrologico: lo scolo delle acque meteoriche è a carico della rete di fossi e canali a servizio dell'area urbana e più distante delle colture agricole.

- Descrizione del deflusso idrogeologico: condizionato dalla successione stratigrafica presente nel sottosuolo, concentrata per lo più nei terreni grossolani interconnessi.

3.3 CONTESTO TETTONICO, QUADRO MACROSISMICO, PERICOLOSITÀ SISMICA:

- Stralcio della Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna:

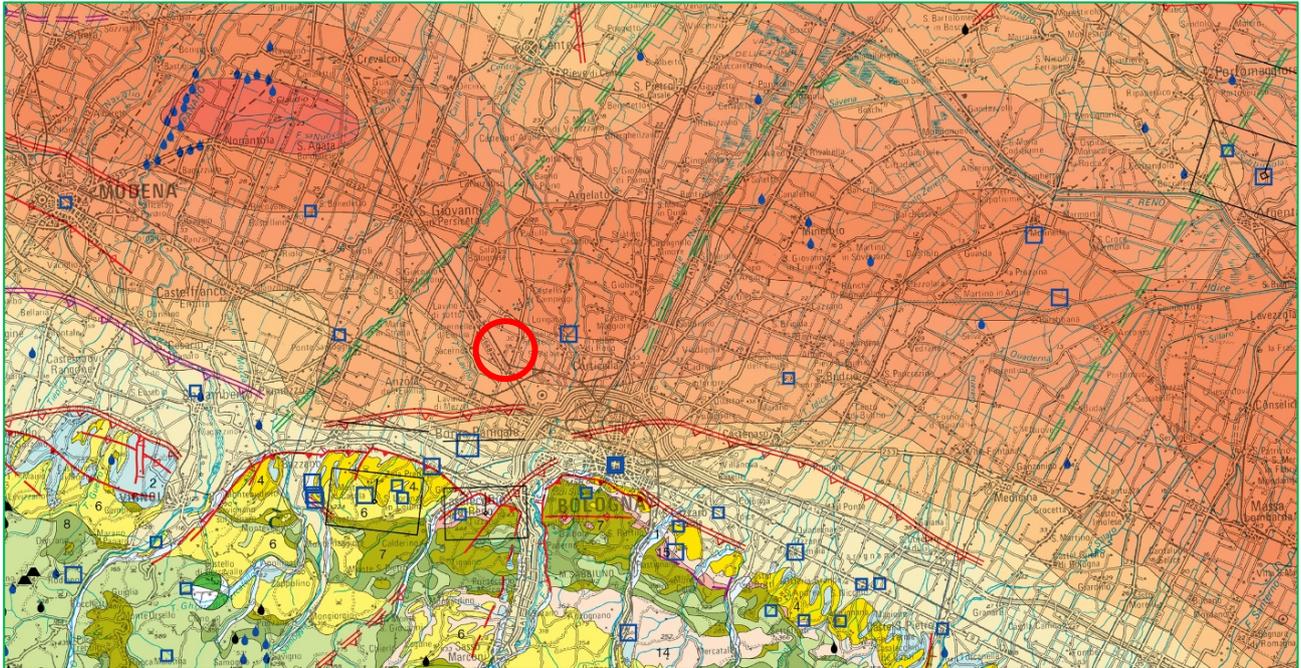


Figura 4: ritaglio della Carta Sismotettonica regionale Emilia-Romagna (v. 2017).

Campitura e descrizione: -200 - -250 m s.l.m. isobate della base del Sistema Emiliano Romagnaolo Superiore (SERS; 0,45 Ma-presente) riferite al livello del mare

- Catalogo DISS v. 3.3.0, Database of Individual Seismogenic Sources, redatto a cura dell'I.N.G.V.

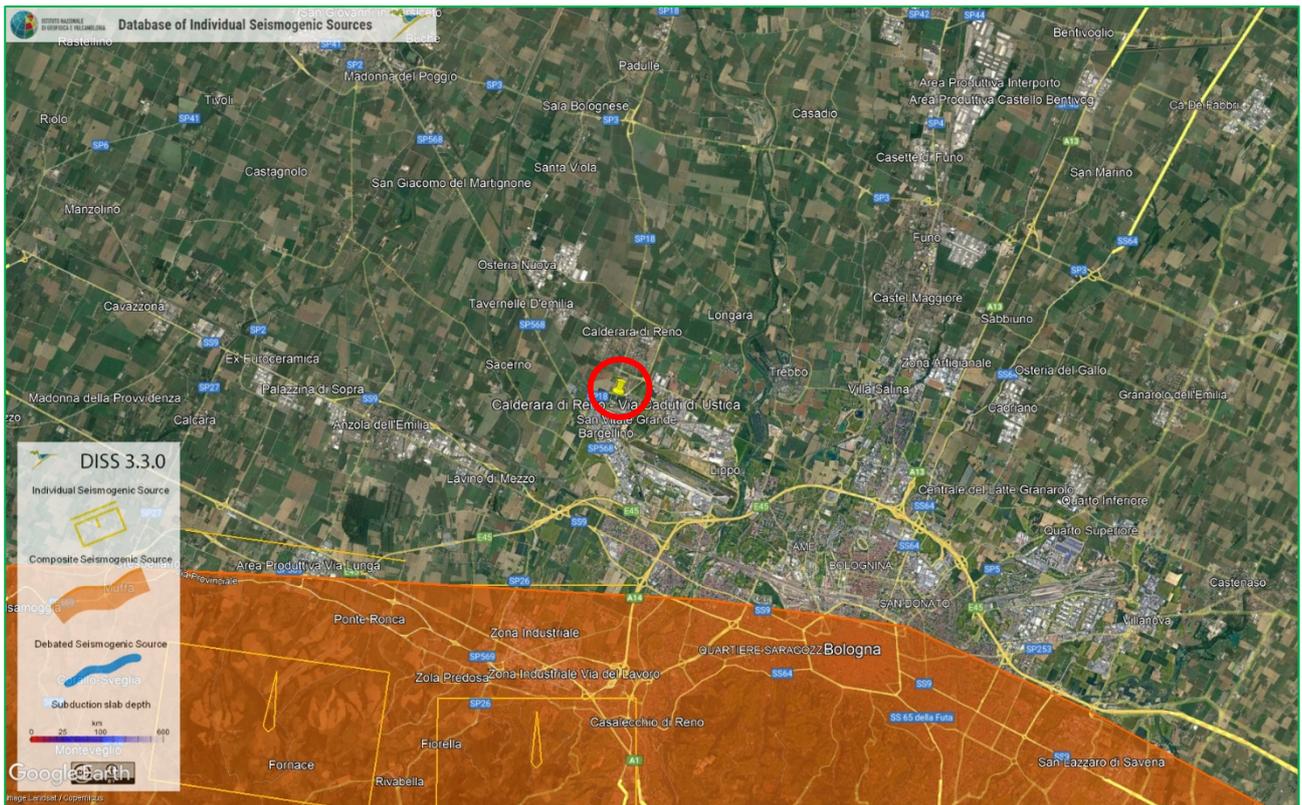


Figura 5: estratto del DISS 3.3.0, database delle sorgenti sismogenetiche a cura di INGV.

Strutture influenti e caratteristiche: ITCS047: a Sud, Sorgente sismogenetica composta Castelvetro di Modena – Castel San Pietro Terme (massima magnitudo attesa = 6.8 Mw);

4 MODELLO GEOLOGICO



4.1 INDAGINI GEOGNOSTICHE E UBICAZIONE

- Data esecuzione campagna indagini: 07/02/2023
- Tipologia indagini:
 - n° 1 sondaggio a carotaggio continuo (Allegato A).
 - n° 1 prelievo di campione per analisi di laboratorio geotecnico (Allegato B).
 - n° 8 prove penetrometriche statiche con piezocono CPTU (Allegato C).

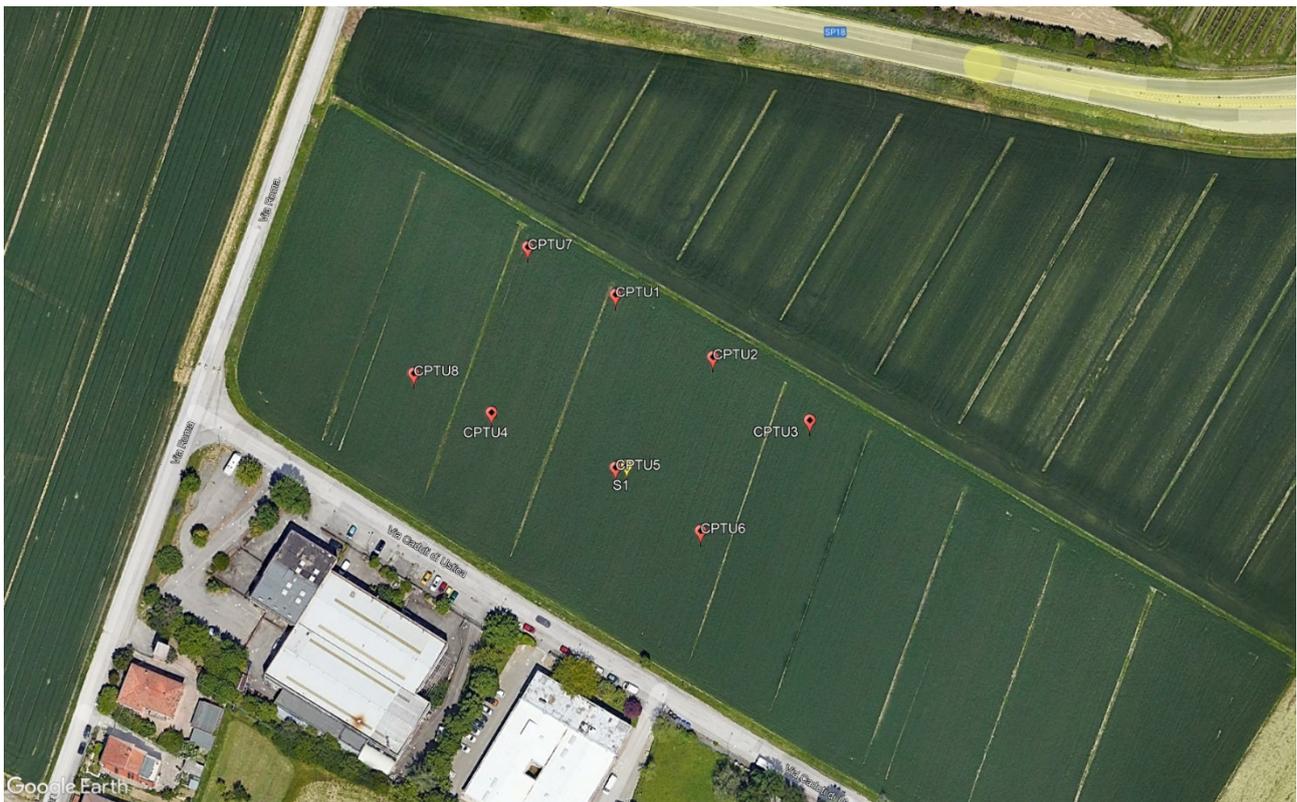


Figura 6: Ubicazione indagini.



Figura 7: posizionamento dell'indagine S1.



Figura 8: posizionamento delle indagini CPTU1 e CPTU2.



Figura 9: posizionamento delle indagini CPTU3 e CPTU4.



Figura 10: posizionamento delle indagini CPTU5 e CPTU6.



Figura 11: posizionamento delle indagini CPTU7 e CPTU8.

4.2 RISULTATO DELLE ANALISI

Di seguito si presentano i risultati ottenuti dalla nuova campagna indagini, che hanno contribuito a costituire il modello geologico del sito in esame.

4.2.1 SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO (ALLEGATO A)

Di seguito si riporta la suddivisione litostratigrafica ottenuta a partire dai risultati delle indagini.

SONDAGGIO S1		
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]
1	Argilla limosa compatta di colore marrone, con presenza di calcinelli	0.0 – 3.4
2	Alternanze di limi sabbiosi di spessore decimetrico e livelli sabbioso limosi di spessore centimetrico, di colore variabile da marrone a grigio chiaro	3.4 – 5.5
3	Limi sabbiosi e sabbie fini di colore nocciola e grigio	5.5 – 6.1
4	Sabbie omogenee grigie, con livelli di sabbie limose compatte, di colore grigio e grigio scuro, con livelli organici di colore scuro	6.1 – 8.1
5	Ghiaie e ghiaie sabbiose, con ciottoli fino a decimetrici, arrotondati di origine alluvionale	8.1 – 11.9
6	Argille limose compatte, moderatamente plastiche e umide	11.9 – 13.4
7	Limi sabbiosi che sfumano in sabbie limose e sabbie poco addensate	13.4 – 14.5
8	Argille e argille limose, di colore grigio, con livelli molto scuri di sostanza organica	14.5 – 19.1
9	Ghiaie sabbiose, con ciottoli fino a decimetrici	19.1 – 20.0
Livello di falda		- 9.0 m

Tabella 2: riassunto tabellare della successione stratigrafica.

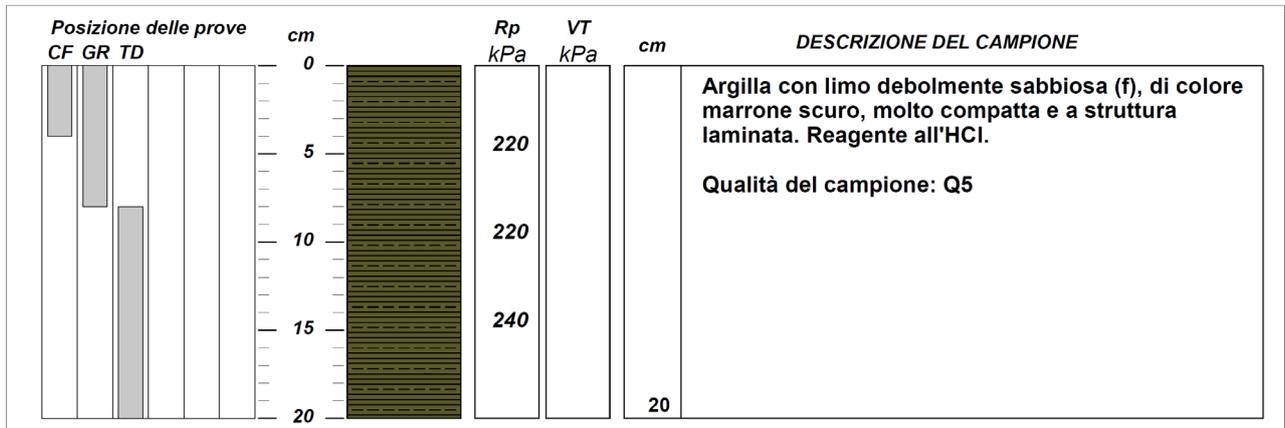
4.2.2 PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO (ALLEGATO B)

Di seguito si riporta la descrizione dei campioni e delle indagini eseguite su ciascuno di essi.

PROVE di laboratorio geotecnico				
Sondaggio	N° prova	Intervallo di profondità [m]	Tipo di materiale	Tipologia di prova
S1	S1-C1	4.7 – 4.9	Terra	Curva granulometrica, taglio diretto CD

Tabella 3: riepilogo delle indagini di laboratorio eseguite sui campioni.

- Posizione di prelievo: in corrispondenza della prova S1
- Profondità campione: -4.70 – -4.90 m



CARATTERISTICHE FISICHE

Peso specifico	2,73
----------------	------

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	0,6	%
Sabbia	5,3	%
Limo	57,6	%
Argilla	36,5	%

CLASSIFICAZIONE

CNR-UNI 10006/00	A4	I.G. = 8
------------------	----	----------

TAGLIO DIRETTO

Coesione:	37,7	kPa
Angolo di attrito interno:	16,9	°

FOTOGRAFIA

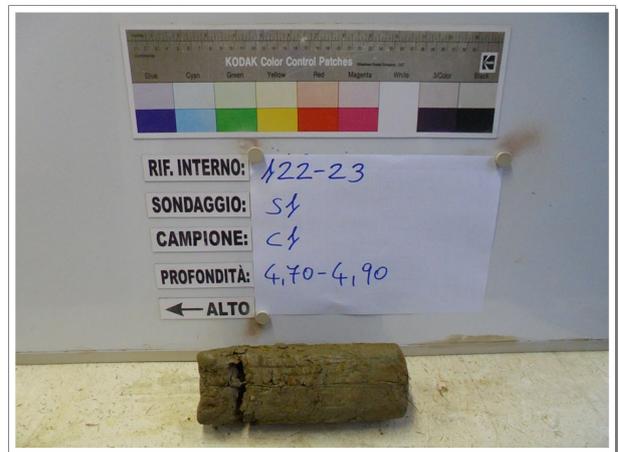


Figura 12: Report delle analisi sul campione.

4.2.3 PROVE PENETROMETRICHE STATICHE CON PUNTA ELETTRICA E PIEZOCONO CPTU (ALLEGATO C)

Di seguito si riporta la suddivisione litostratigrafica ottenuta a partire dai risultati delle indagini.

PROVA CPTU1				
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	Qt medio [MPa]	Fs medio [kPa]
A	Limi argillosi compatti e sovraconsolidati per essiccamento. Terreno agricolo	0.00 – 1.38	0.72 ±0.29	55.11 ±22.72
B	Limi sabbiosi e sabbie moderatamente consistenti	1.38 – 4.50	3.50 ±0.89	202.28 ±41.54
C	Argille limose e limi argillosi poco consistenti	4.50 – 7.24	0.97 ±0.39	40.52 ±25.76
D	Sabbie limose e sabbie moderatamente addensate	7.24 – 8.12	3.21 ±1.74	36.46 ±16.00
E	Sabbie e ghiaie addensate	8.12 – 8.16	11.56 ±5.72	58.39 ±1.73
Livello di falda		Non presente nel foro		

Tabella 4: successione stratigrafica individuata nella prova CPTU1

PROVA CPTU2				
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	Qt medio [MPa]	Fs medio [kPa]
A	Limi argillosi compatti e sovraconsolidati per essiccamento. Terreno agricolo	0.00 – 1.26	0.77 ±0.29	65.92 ±26.78
B	Limi sabbiosi e sabbie moderatamente consistenti	1.26 – 4.42	3.08 ±0.62	195.40 ±44.37
C	Argille limose e limi argillosi poco consistenti	4.42 – 7.58	1.16 ±0.42	47.88 ±28.34
D	Sabbie limose e sabbie moderatamente addensate	7.58 – 9.20	2.91 ±1.20	33.21 ±16.80
E	Sabbie e ghiaie addensate	9.20 – 9.34	12.28 ±3.27	29.68 ±15.05
Livello di falda		Non presente nel foro		

PROVA CPTU3				
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	Qt medio [MPa]	Fs medio [kPa]
A	Limi argillosi compatti e sovraconsolidati per essiccamento. Terreno agricolo	0.00 – 1.30	0.70 ±0.27	60.25 ±26.46
B	Limi sabbiosi e sabbie moderatamente consistenti	1.30 – 4.58	2.82 ±0.81	173.46 ±40.97
C	Argille limose e limi argillosi poco consistenti	4.58 – 8.10	1.26 ±0.64	48.75 ±32.93
D	Sabbie limose e sabbie moderatamente addensate	8.10 – 8.34	2.47 ±0.40	36.87 ±4.91
E	Sabbie e ghiaie addensate	8.34 – 8.46	7.00 ±3.97	37.29 ±7.61
Livello di falda		Non presente nel foro		

PROVA CPTU4				
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	Qt medio [MPa]	Fs medio [kPa]
A	Limi argillosi compatti e sovraconsolidati per essiccamento. Terreno agricolo	0.00 – 1.26	0.83 ±0.36	65.00 ±37.04
B	Limi sabbiosi e sabbie moderatamente consistenti	1.26 – 4.76	2.75 ±0.79	163.64 ±49.59
C	Argille limose e limi argillosi poco consistenti	4.76 – 7.48	1.20 ±0.48	43.63 ±24.58
D	Sabbie limose e sabbie moderatamente addensate	7.48 – 8.60	3.95 ±1.17	34.08 ±12.25
E	Sabbie e ghiaie addensate	8.60 – 8.64	6.66 ±1.61	20.62 ±0.88
Livello di falda		Non presente nel foro		

Tabella 5: Successione stratigrafica individuata nella prove CPTU2-3-4

PROVA CPTU5				
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	Qt medio [MPa]	Fs medio [kPa]
A	Limi argillosi compatti e sovraconsolidati per essiccamento. Terreno agricolo	0.00 – 1.32	0.79 ±0.37	64.14 ±31.37
B	Limi sabbiosi e sabbie moderatamente consistenti	1.32 – 4.50	3.06 ±0.86	198.70 ±60.51
C	Argille limose e limi argillosi poco consistenti	4.50 – 7.26	1.49 ±0.67	60.11 ±34.93
D	Sabbie limose e sabbie moderatamente addensate	7.26 – 8.10	1.81 ±0.58	44.65 ±13.78
E	Sabbie e ghiaie addensate	8.10 – 8.26	6.12 ±3.36	46.00 ±2.45
Livello di falda		Non presente nel foro		

PROVA CPTU6				
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	Qt medio [MPa]	Fs medio [kPa]
A	Limi argillosi compatti e sovraconsolidati per essiccamento. Terreno agricolo	0.00 – 1.28	0.77 ±0.25	67.93 ±28.74
B	Limi sabbiosi e sabbie moderatamente consistenti	1.28 – 4.92	2.80 ±0.73	179.02 ±52.35
C	Argille limose e limi argillosi poco consistenti	4.92 – 7.94	1.04 ±0.54	34.67 ±14.37
D	Sabbie limose e sabbie moderatamente addensate	7.94 – 8.40	3.58 ±0.85	30.24 ±3.91
E	Sabbie e ghiaie addensate	8.40 – 8.48	7.99 ±1.60	38.10 ±4.42
Livello di falda		Non presente nel foro		

PROVA CPTU7				
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	Qt medio [MPa]	Fs medio [kPa]
A	Limi argillosi compatti e sovraconsolidati per essiccamento. Terreno agricolo	0.00 – 1.22	0.65 ±0.22	52.59 ±23.75
B	Limi sabbiosi e sabbie moderatamente consistenti	1.22 – 4.84	2.76 ±0.97	170.56 ±73.81
C	Argille limose e limi argillosi poco consistenti	4.84 – 7.04	0.80 ±0.19	31.74 ±9.89
D	Sabbie limose e sabbie moderatamente addensate	7.04 – 8.88	3.07 ±1.26	34.83 ±19.26
E	Sabbie e ghiaie addensate	8.88 – 8.92	3.64 ±1.88	106.98 ±0.71
Livello di falda		Non presente nel foro		

Tabella 6: Successione stratigrafica individuata nella prove CPTU5-6-7

PROVA CPTU8				
Unità	Descrizione stratigrafica	Intervallo di profondità [m]	Qt medio [MPa]	Fs medio [kPa]
A	Limi argillosi compatti e sovraconsolidati per essiccamento. Terreno agricolo	0.00 – 1.28	0.74 ±0.30	50.46 ±28.09
B	Limi sabbiosi e sabbie moderatamente consistenti	1.28 – 5.20	2.87 ±0.85	167.79 ±48.27
C	Argille limose e limi argillosi poco consistenti	5.20 – 7.34	1.07 ±0.44	41.36 ±16.86
D	Sabbie limose e sabbie moderatamente addensate	7.34 – 8.48	4.58 ±1.28	28.26 ±12.97
E	Sabbie e ghiaie addensate	8.48 – 8.66	9.64 ±3.37	29.86 ±15.12
Livello di falda		Non presente nel foro		

Tabella 7: Successione stratigrafica individuata nella prove CPTU8

4.3 MODELLO E PARAMETRI

UNITÀ	DESCRIZIONE STRATIGRAFICA	COMPORTEMENTO GEOTECNICO
A	Limi argillosi compatti e sovraconsolidati per essiccamento. Terreno agricolo	Coesivo
B	Limi sabbiosi e sabbie moderatamente consistenti	Incoerente
C	Argille limose e limi argillosi poco consistenti	Coesivo
D	Sabbie limose e sabbie moderatamente addensate	Incoerente
E	Sabbie e ghiaie addensate	Incoerente
Livello di falda più superficiale		-9,00 m circa

Tabella 8: modello geologico e litostratigrafico del sito.

INDICAZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO						
Unità litotecniche	γ_n [KN/m ³]	γ_{sat} [KN/m ³]	cu [KPa]	c' [KPa]	M0 [MPa]	ϕ' [°]
A	18,00	19,00	35 – 50	-	6 – 9	22 – 25
B	18,00	19,00	-	0 – 3	25 – 35	25 – 29
C	18,00	19,50	40 - 60	15 -25	5 – 8	21 – 24
D	18,00	19,00	-	0 – 3	20 – 35	31 – 36
E	18,00	19,50	-	-	40 – 70	37 – 41

Tabella 9: modello geologico e litostratigrafico del sito.

- Parametri indicativi ricavati da correlazioni empiriche.
- **La definizione dei parametri caratteristici è a carico del progettista geotecnico.**
- γ_n = peso di volume del terreno naturale [t/m³];
- γ_{sat} = peso di volume del terreno saturo [t/m³];
- **Cu** = coesione non drenata [KPa];
- **M₀** = Modulo edometrico [MPa]
- ϕ' = angolo d'attrito interno [°].

5 MODELLO SISMICO

5.1 INDAGINI SISMICHE

- Data esecuzione campagna indagini: 13/02/2023.
- Tipologia indagini:
 - 1 misura di sismica passiva con stendimento, con tecnica **Re.Mi**. (Allegato B).
 - 1 misura di sismica passiva a stazione singola, con tecnica **HVSR**. (Allegato B).

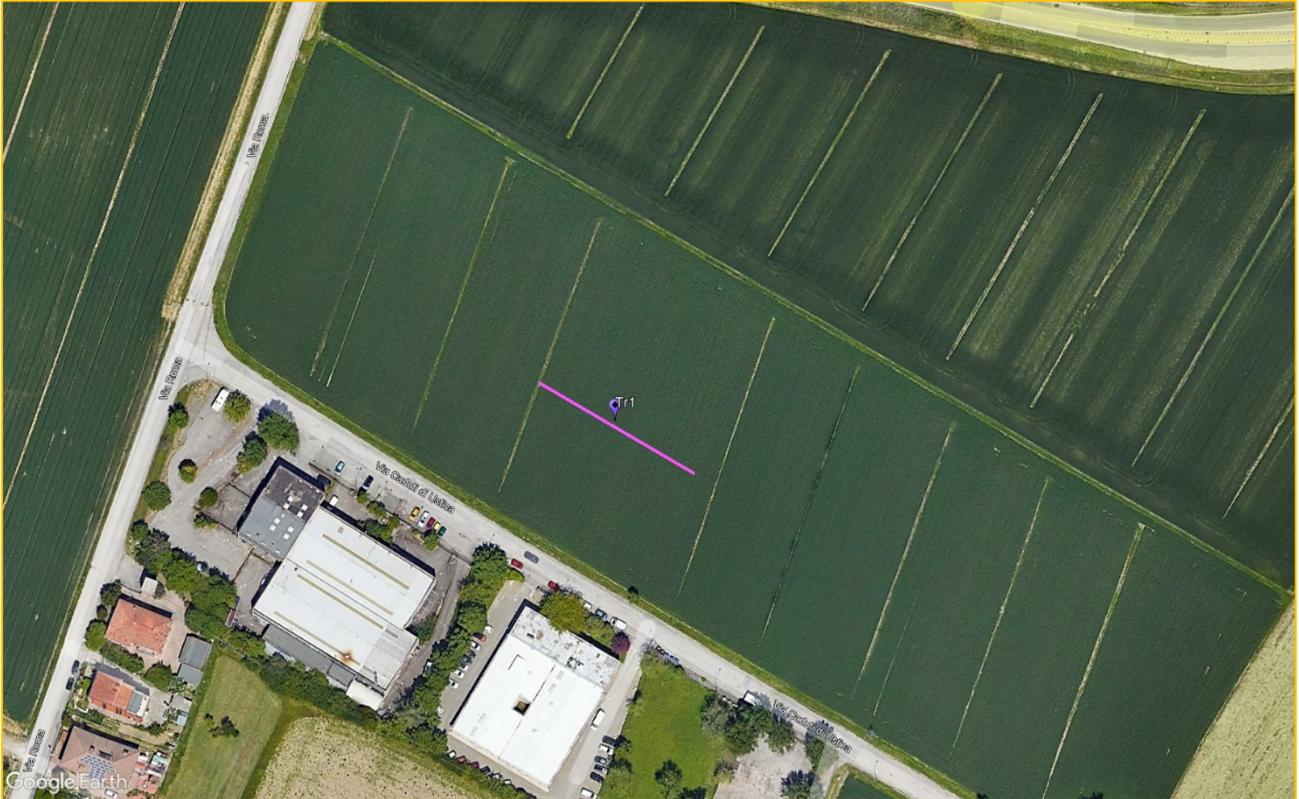


Figura 13: Ubicazione indagini geognostiche.

5.1.1 INTERPRETAZIONE SISMO-STRATIGRAFICA

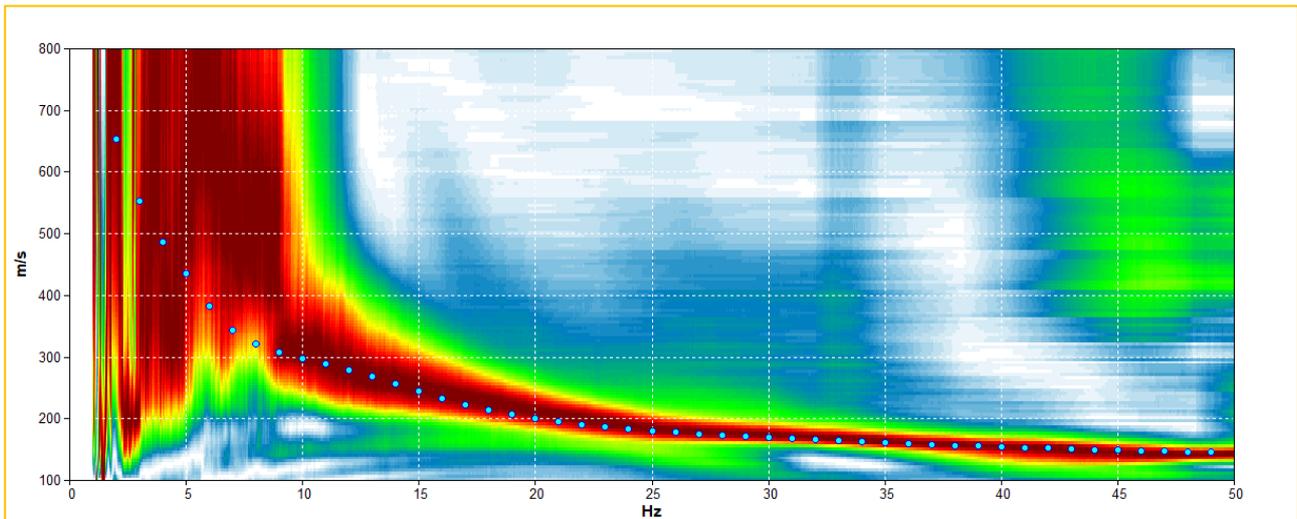


Figura 14: curva di dispersione con interpretazione.

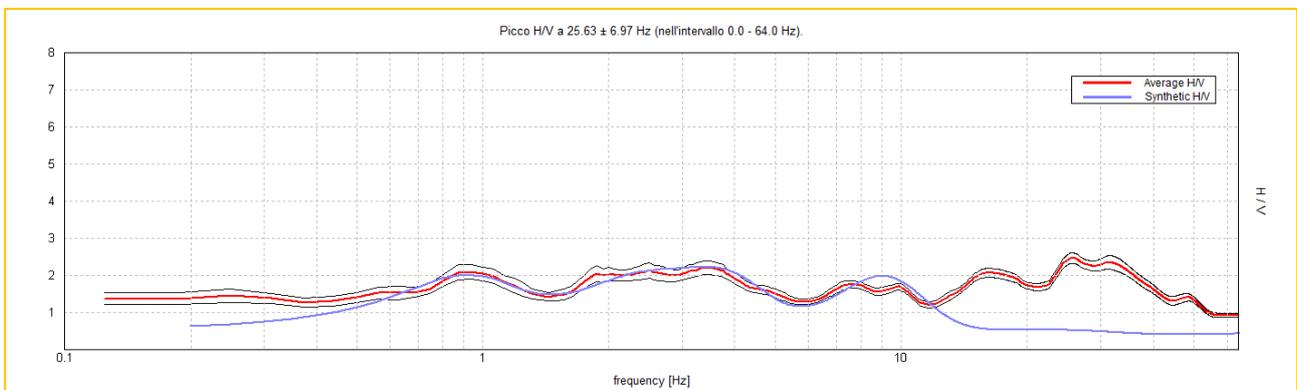


Figura 15: Grafico della curva H/V della misura HVSR.

Sismostrato	Profondità dello strato [m]	Spessore dello strato [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1	1.50	1.50	140	0.48
2	4.50	3.00	190	0.47
3	8.00	3.50	270	0.46
4	26.00	18.00	340	0.44
5	80.00	54.00	550	0.41
6	215.00	135.00	740	0.37
7	inf.	inf.	1080	0.32

Tabella 10: Profilo sismostratigrafico del modello sismico.

5.2 CONDIZIONI TOPOGRAFICHE (TAB. 3.2.III – CATEGORIE TOPOGRAFICHE – NTC2018)

- Sulla base degli assetti descritti e delle pendenze, la classe a cui ascrivere il sito in esame risulta essere: **T1**.
- “**T1** – superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media <15°”.
- Valore massimo del coefficiente di amplificazione stratigrafica **St = 1,0**.

5.3 VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

- Condizioni predisponenti si riferiscono alle resistenze disponibili nel terreno e sono:
 - Profondità media stagionale del livello di falda < 5 m ✗
 - Profondità dello strato liquefacibile < 15 m ✓
 - Densità relativa dello strato $D_r < 60\%$ ✓
 - Diametro medio dei granuli $0,02\text{ mm} < D_{50} < 2,00\text{ mm}$ ✗
 - Frazione dei fini (<0,005 mm) < 15 % ✗

Le condizioni scatenanti influiscono sulle pressioni interstiziali e sono:

- Magnitudo > 5,5 ✓
- PGA > 0,15 g ✓
- Durata della sollecitazione > 15-20 s ✓

Viste le condizioni rilevate sul posto dalle indagini geognostiche e geofisiche eseguite, vengono a mancare le condizioni predisponenti per il fenomeno della liquefazione. In particolare l'assenza della falda freatica impedisce la possibilità che si verifichino fenomeni di liquefazione dei terreni superficiali.

5.4 RISPOSTA SISMICA LOCALE (TAB. 3.2.II – CATEGORIE DI SOTTOSUOLO – NTC2018)

- Substrato sismico entro i 30 m dal p.c.: no.
- Valutazione delle velocità medie delle onde S nei primi 30 m al di sotto del piano campagna: **301 m/s**.
- $V_{Seq(0-30)} = 301\text{ m/s}$, rientra nella categoria di suolo di fondazione “**C** - 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.”

5.4.1 DEFINIZIONE DELLO SPETTRO DI RISPOSTA

- L'elaborazione dei parametri di input, permette la restituzione dello spettro di risposta orizzontale del sito all'interno del foglio di calcolo “Spettri di Risposta v.1.0.3”, redatto a cura del C.S.LL.PP.

PARAMETRO	VALORE
Vita nominale della costruzione - V_N	50 [ANNI]
Coefficiente d'uso della costruzione - c_u	1
Periodo di riferimento per la costruzione - V_R	50 [ANNI]
Periodo di ritorno per la definizione dell'azione sismica - T_R	SLU/SLV - $P_{VR} = 10\% \Rightarrow 475$ [ANNI]
Categoria di sottosuolo	C
Categoria topografica	T1

Tabella 11: parametri di input per la definizione dello spettro di risposta.

PARAMETRI INDIPENDENTI							
Stato limite	a_g [g]	F_0	T_C [s]	S_s	C_c	S_T	q
SLV	0.165	2.420	0.296	1.460	1.569	1.000	1.000
PARAMETRI DIPENDENTI							
S	η	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]			
1.460	1.000	0.155	0.464	2.260			

Tabella 12: Parametri sismici di riferimento per la progettazione dell'opera.

PUNTI DELLO SPETTRO DI RISPOSTA					
T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]	T [s]	Se [g]
0.000	0.241	1.576	0.172	2.840	0.076
0.155	0.583	1.662	0.163	2.923	0.072
0.464	0.583	1.747	0.155	3.006	0.068
0.550	0.493	1.833	0.148	3.089	0.064
0.635	0.426	1.918	0.141	3.172	0.061
0.721	0.376	2.004	0.135	3.254	0.058
0.806	0.336	2.089	0.130	3.337	0.055
0.892	0.304	2.175	0.125	3.420	0.052
0.978	0.277	2.260	0.120	3.503	0.050
1.063	0.255	2.343	0.112	3.586	0.048
1.149	0.236	2.426	0.104	3.669	0.046
1.234	0.220	2.509	0.097	3.751	0.044
1.320	0.205	2.592	0.091	3.834	0.042
1.405	0.193	2.675	0.086	3.917	0.040
1.491	0.182	2.757	0.081	4.000	0.038

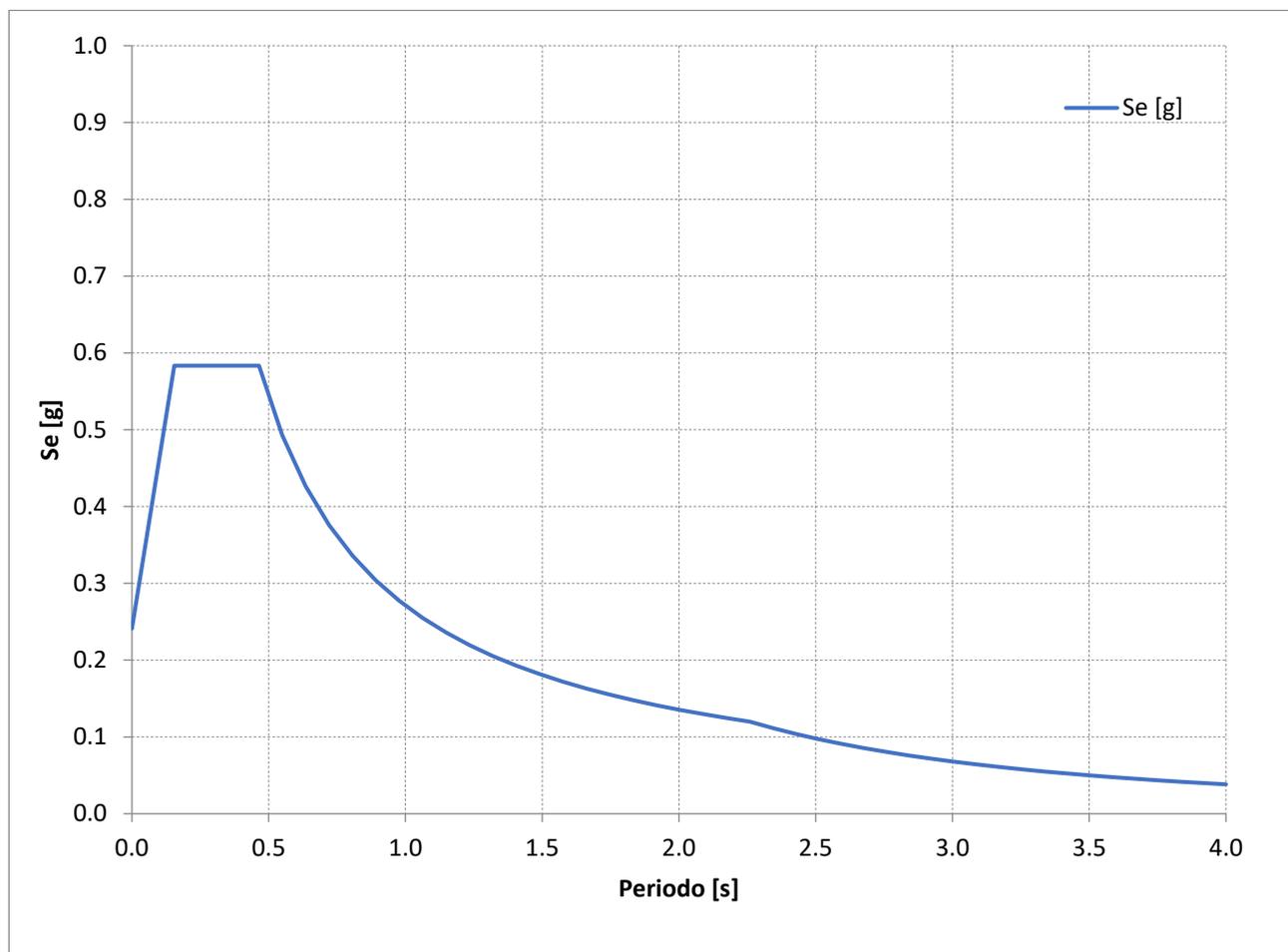


Figura 16: Grafico e tabella dei punti dello spettro di risposta calcolato da approccio semplificato.

6 CONCLUSIONI

Geomorfologia e stabilità

Contesto di alta pianura bolognese, pianeggiante, al limite tra l'area agricola e l'area artigianale di Calderara di Reno. Le lavorazioni agricole e urbane hanno alterato le forme deposizionali naturali non rendendole più visibili. L'area risulta stabile.

Circolazione idrica superficiale e sotterranea

Circolazione idrologica condizionata dalla rete di canali a servizio delle coltivazioni. Circolazione idrogeologica caratterizzata dalla successione stratigrafica presente nel terreno costituita da alternanze di materiali fini e grossolani. La circolazione avviene per lo più nei terreni grossolani. Falda freatica individuata a circa -9,0 m dal piano campagna all'interno di un consistente livello ghiaioso.

Modello geologico

La successione stratigrafica è caratterizzata da un livello superficiale di materiale poco consistente di limi argillosi e argille limose sovraconsolidate per essiccamento stagionale, fino a circa 3,0-3,5 m. oltre si individua un livello di limi sabbiosi e sabbie fini di medio addensamento, con alternanze di livelli di limi argillosi poco consistenti, fino a circa 4,5-5,0 m di profondità. Oltre sono presenti limi argillosi e argille limose poco consistenti, umidi e plastici, fino a -8,0 m circa. Le prove terminano in corrispondenza della successione di un'unità di sabbie di medio addensamento di spessore di circa 1 m che passano velocemente a ghiaie e ghiaie sabbiose ben addensate, con ciottoli anche decimetrici.

La successione individuata con il sondaggio poi permette di riconoscere come siano presenti ulteriori alternanze di livelli metrici di limi argillosi poco consistenti e livelli di sabbie e ghiaie ben addensate. All'interno del foro del sondaggio è stata individuata la falda a -9,0 m.

Modello sismico

Area soggetta ad amplificazioni modeste per stratigrafia (successione sismostratigrafica). Approccio semplificato, categoria di sottosuolo C e categoria topografica T1.

Valsamoggia, 14 Aprile 2023



Dott. Geol. Alberto Caprara

ALLEGATO A

REPORT DI PROVA SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO

Rif.:

Data: 44964

Committente: Studio di ingegneria Mauro Perini

Ora: /

Località: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

Profondità del sondaggio: 20.00 m

Quota iniziale s.l.m.: m

Profondità falda dal p.c.: 9.00 m

Perforazione: rotazione

Diametro del foro: 120 mm

Colonna stratigrafica Profondità (m)	Falda (m)	Spessori (m)	Campioni (sigla)	SPT		Descrizione litologica
				prof. (m)	(Colpi/ft)	
0						Argilla limosa compatta di colore marrone, con presenza di calcinelli soprattutto tra 2,7 e 3,4 m (Suolo areato)
1						
2						
3		3.40				
4						alternanze di limi sabbiosi di spessore dm e livelli sabbioso limosi di spessore cm di colore variabile da marrone a grigio chiaro
5		2.10	S1-C1			
6		0.60				Limi sabbiosi e sabbie fini di colore grigio Sabbie grigie con livelli sabbioso limosi di colore grigio e grigio scuro, addensate e con livelli organici
7						
8		2.00				
9						Ghiaia e ghiaia sabbiosa con ciottoli fino a decimetrici e arrotondati (alluvionale)
10						
11						
12		3.80				
13		1.50				Argille e argille limose grigie compatte, moderat plastiche
14		1.10				Limi sabbiosi che sfumano in sabbie e sabbie limose, grigie e poco addensate
15						Argille e argille limose di colore grigio, con livelli ricchi in sostanza organica
16						
17						
18						
19		4.60				
20		0.90				Ghiaie sabbiose con ciottoli dm
21						



Figura 1: foto cassetta catalogatrice da 0,0 m a -5,0 m



Figura 2: foto cassetta catalogatrice da -5,0 m a -10,0 m



Figura 3: foto cassetta catalogatrice da -10,0 m a -15,0 m



Figura 4: foto cassetta catalogatrice da -15,0 m a -20,0 m

ALLEGATO B

REPORT PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO

COMMITTENTE: **Benella**

RIFERIMENTO: **Località Calderara (BO)**

SONDAGGIO: **S1**

CAMPIONE: **C1**

PROFONDITA': **m 4,70 - 4,90**

MODULO RIASSUNTIVO

CARATTERISTICHE FISICHE

Peso specifico **2,73**

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	0,6	%
Sabbia	5,3	%
Limo	57,6	%
Argilla	36,5	%

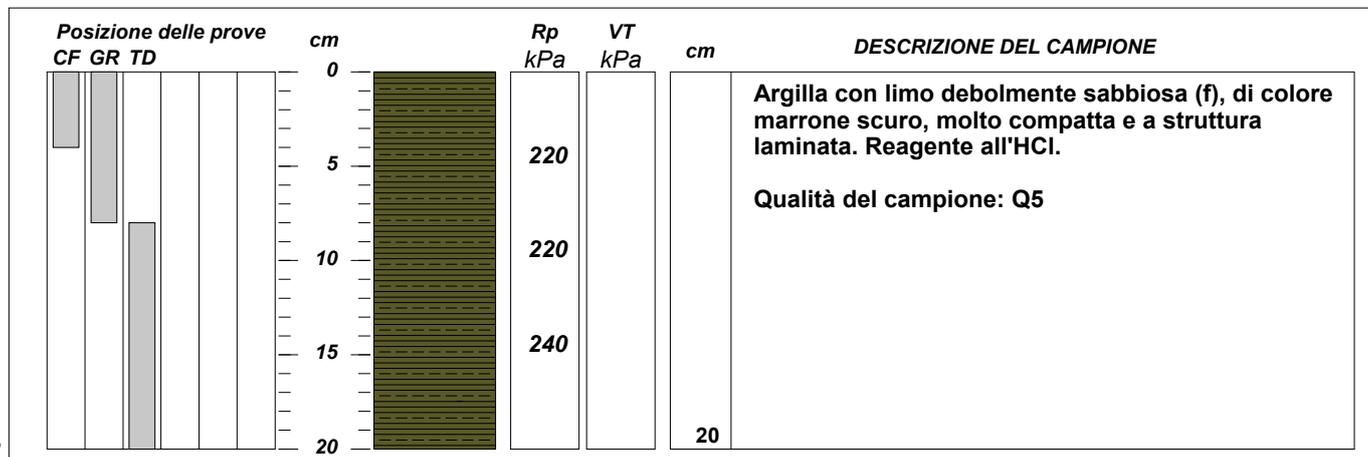
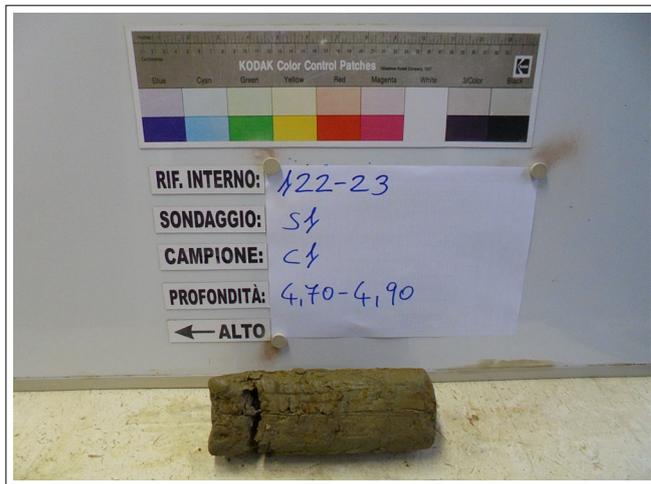
CLASSIFICAZIONE

CNR-UNI 10006/00 **A4 I.G. = 8**

TAGLIO DIRETTO

Coesione: **37,7 kPa**
Angolo di attrito interno: **16,9 °**

FOTOGRAFIA



122-23

CERTIFICATO DI PROVA N°: 01114 Pagina 1/1

VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 43 del 10/02/23

DATA DI EMISSIONE: 02/03/23

Inizio analisi: 15/02/23

Apertura campione: 13/03/23

Fine analisi: 16/02/23

COMMITTENTE: Benella

RIFERIMENTO: Località Calderara (BO)

SONDAGGIO: S1

CAMPIONE: C1

PROFONDITA': m 4,70 - 4,90

PESO SPECIFICO DEI GRANULI

Modalità di prova: Norma ASTM D854

γ_s = Peso specifico dei granuli (media delle due misure) = 2,73

γ_{sc} = Peso specifico dei granuli corretto a 20° = 2,73

Metodo: A B

Capacità del picnometro: 100 ml

Temperatura di prova: 20,2 °C

Dimensione massima delle particelle: 8,00 mm

Disaerazione eseguita per bollitura e sotto vuoto

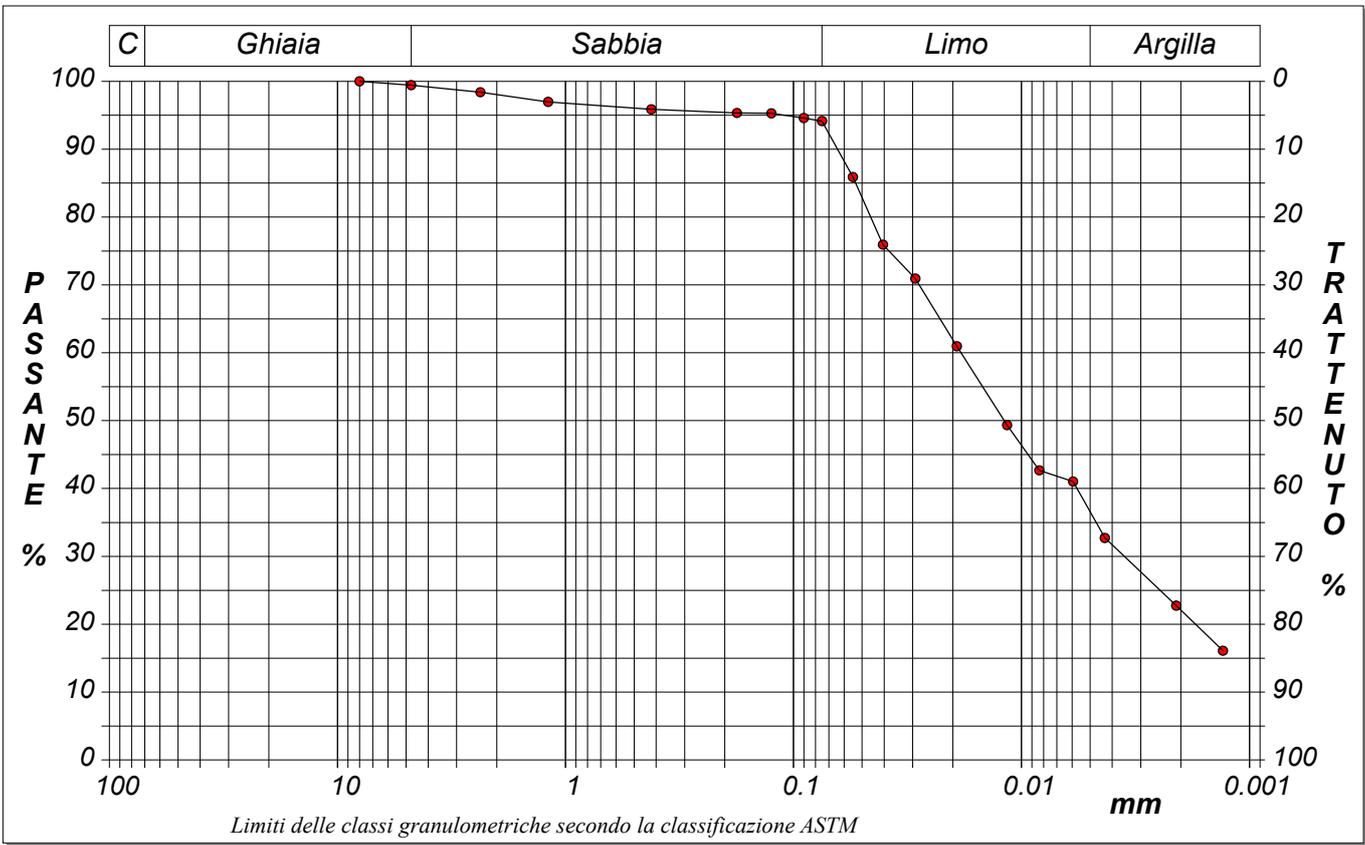
CERTIFICATO DI PROVA N°: 01115	Pagina 1/1	DATA DI EMISSIONE: 02/03/23	Inizio analisi: 13/02/23
VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 43 del 10/02/23		Apertura campione: 13/03/23	Fine analisi: 20/02/23

COMMITTENTE: Benella		
RIFERIMENTO: Località Calderara (BO)		
SONDAGGIO: S1	CAMPIONE: C1	PROFONDITA': m 4,70 - 4,90

ANALISI GRANULOMETRICA

Modalità di prova: Norma UNI CEN ISO/TS 17892-4 - ASTM 422-63

Ghiaia 0,6 %	Passante setaccio 10 (2 mm) 98,1 %	D10 --- mm
Sabbia 5,3 %	Passante setaccio 40 (0.42 mm) 95,9 %	D30 0,00354 mm
Limo 57,6 %	Passante setaccio 200 (0.075 mm) 94,1 %	D50 0,01190 mm
Argilla 36,5 %		D60 0,01842 mm
Coefficiente di uniformità ---	Coefficiente di curvatura ---	D90 0,06409 mm



Diametro mm	Passante %								
8,0000	100,00	0,1770	95,34	0,0405	75,92	0,0059	41,02		
4,7500	99,43	0,1250	95,28	0,0292	70,94	0,0043	32,71		
2,3600	98,40	0,0900	94,58	0,0192	60,97	0,0021	22,74		
1,1900	96,97	0,0750	94,14	0,0116	49,33	0,0013	16,09		
0,4200	95,87	0,0548	85,90	0,0084	42,68				

LO SPERIMENTATORE
 Geom. DI LUCCHI Antonio

IL DIRETTORE DEL LABORATORIO
 dott. Geol. CARBONE Raffaele

CERTIFICATO DI PROVA N°: 01116 Pagina 1/4

VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 43 del 10/02/23

DATA DI EMISSIONE: 02/03/23

Inizio analisi: 22/02/23

Apertura campione: 13/03/23

Fine analisi: 01/03/23

COMMITTENTE: Benella

RIFERIMENTO: Località Calderara (BO)

SONDAGGIO: S1

CAMPIONE: C1

PROFONDITA': m 4,70 - 4,90

PROVA DI TAGLIO DIRETTO

Modalità di prova: Norma ASTM D3080-04

Provino n°:	1	2	3
Condizione del provino:	Indisturbato	Indisturbato	Indisturbato
Tempo di consolidazione (ore):	24	24	24
Pressione verticale (kPa):	100,0	200,0	300,0
Umidità iniziale e umidità finale (%):	24,5 27,6	24,6 24,9	24,6 23,7
Peso di volume (kN/m³):	18,6	18,6	18,6
Tipo di prova: Consolidata - lenta	Velocità di deformazione: 0,004 mm / min		

DIAGRAMMA
Tensione
Deformazione orizzontale

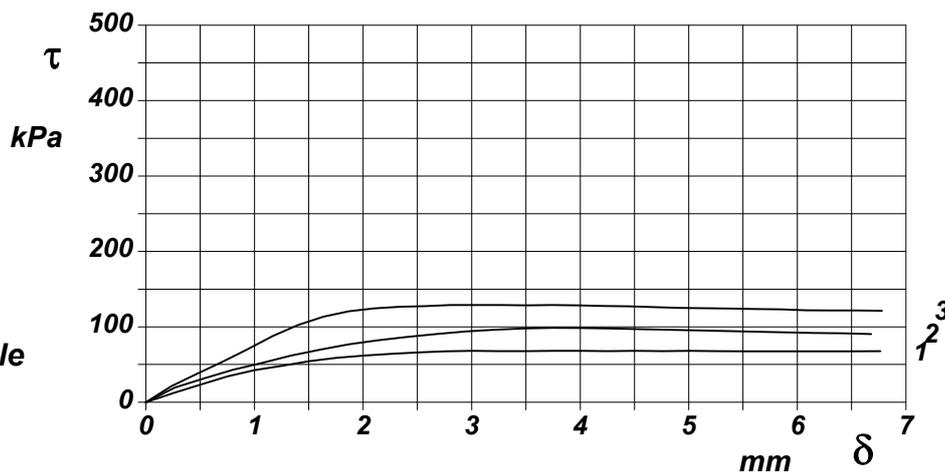
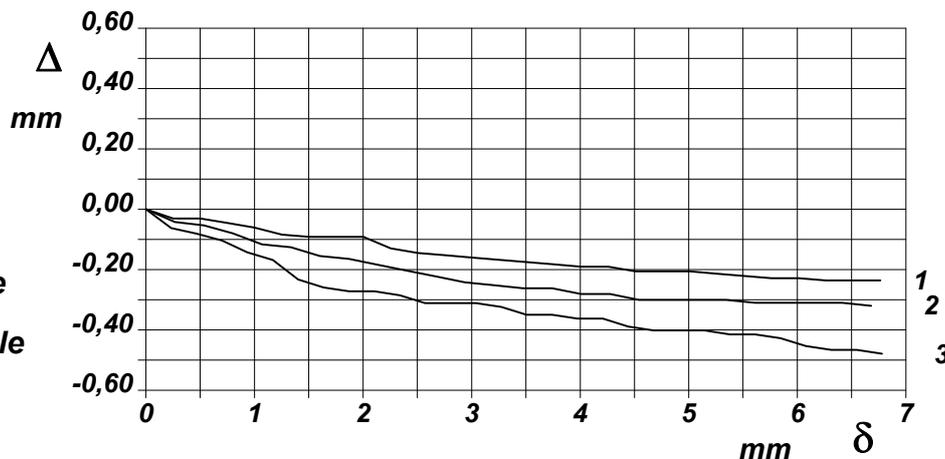


DIAGRAMMA
Deformazione verticale
Deformazione orizzontale



CERTIFICATO DI PROVA N°: 01116	Pagina 2/4	DATA DI EMISSIONE: 02/03/23	Inizio analisi: 22/02/23
VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 43 del 10/02/23		Apertura campione: 13/03/23	Fine analisi: 01/03/23

COMMITTENTE: Benella

RIFERIMENTO: Località Calderara (BO)

SONDAGGIO: S1 **CAMPIONE:** C1 **PROFONDITA': m** 4,70 - 4,90

PROVA DI TAGLIO DIRETTO

Modalità di prova: Norma ASTM D3080-04

Provino 1			Provino 2			Provino 3		
Spostam. mm	Tensione kPa	Deform. vert. mm	Spostam. mm	Tensione kPa	Deform. vert. mm	Spostam. mm	Tensione kPa	Deform. vert. mm
0,251	12,0	-0,03	0,267	19,3	-0,04	0,234	21,1	-0,06
0,501	23,3	-0,03	0,534	31,5	-0,05	0,468	37,4	-0,08
0,752	34,2	-0,05	0,802	43,0	-0,08	0,701	53,3	-0,10
1,002	42,5	-0,06	1,069	51,9	-0,12	0,935	70,0	-0,14
1,253	48,3	-0,08	1,336	61,7	-0,13	1,169	87,8	-0,17
1,503	54,4	-0,09	1,603	69,7	-0,16	1,403	102,5	-0,23
1,754	58,9	-0,09	1,870	76,9	-0,16	1,637	113,3	-0,26
2,004	61,9	-0,09	2,138	82,2	-0,18	1,870	120,6	-0,27
2,255	64,2	-0,13	2,405	86,7	-0,20	2,104	124,4	-0,27
2,505	66,1	-0,14	2,672	90,3	-0,22	2,338	126,7	-0,28
2,756	67,5	-0,15	2,939	93,9	-0,24	2,572	127,5	-0,31
3,006	68,1	-0,16	3,206	96,1	-0,25	2,806	128,9	-0,31
3,257	67,8	-0,17	3,474	97,8	-0,26	3,039	128,9	-0,31
3,507	67,8	-0,18	3,741	98,6	-0,26	3,273	128,9	-0,32
3,758	68,1	-0,18	4,008	98,3	-0,28	3,507	128,6	-0,35
4,008	68,1	-0,19	4,275	97,8	-0,28	3,741	128,9	-0,35
4,259	67,8	-0,19	4,542	96,9	-0,30	3,975	128,3	-0,36
4,509	68,1	-0,21	4,810	96,1	-0,30	4,208	127,8	-0,36
4,760	67,8	-0,21	5,077	95,3	-0,30	4,442	127,2	-0,39
5,010	68,1	-0,21	5,344	94,4	-0,30	4,676	126,1	-0,40
5,261	67,8	-0,21	5,611	93,6	-0,31	4,910	125,0	-0,40
5,511	67,5	-0,22	5,878	92,8	-0,31	5,144	124,7	-0,40
5,762	67,5	-0,23	6,146	91,9	-0,31	5,377	124,2	-0,41
6,012	67,5	-0,23	6,413	91,4	-0,31	5,611	123,6	-0,41
6,263	67,5	-0,24	6,680	90,6	-0,32	5,845	123,1	-0,43
6,513	67,5	-0,24				6,079	121,9	-0,45
6,764	67,8	-0,24				6,313	121,7	-0,47
						6,546	121,7	-0,47
						6,780	121,4	-0,48

122-23
SGEO - Laboratorio 7.0 - 2022

LO SPERIMENTATORE
Geom. DI LUCCHIO Antonio

IL DIRETTORE DEL LABORATORIO
don. CARBONE Raffaele

CERTIFICATO DI PROVA N°: 01116 Pagina 3/4

VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 43 del 10/02/23

DATA DI EMISSIONE: 02/03/23

Inizio analisi: 22/02/23

Apertura campione: 13/03/23

Fine analisi: 01/03/23

COMMITTENTE: Benella

RIFERIMENTO: Località Calderara (BO)

SONDAGGIO: S1

CAMPIONE: C1

PROFONDITA': m 4,70 - 4,90

PROVA DI TAGLIO DIRETTO - FASE DI CONSOLIDAZIONE

Modalità di prova: Norma ASTM D3080-04

Diagramma TEMPO - CEDIMENTO

PROVINO 1	
Pressione (kPa)	100
Altezza iniziale (cm)	2,000
Altezza finale (cm)	1,957
Sezione (cm ²):	36,00
T ₁₀₀ (min)	4,9
Df (mm)	3
Vs (mm/min)	0,061

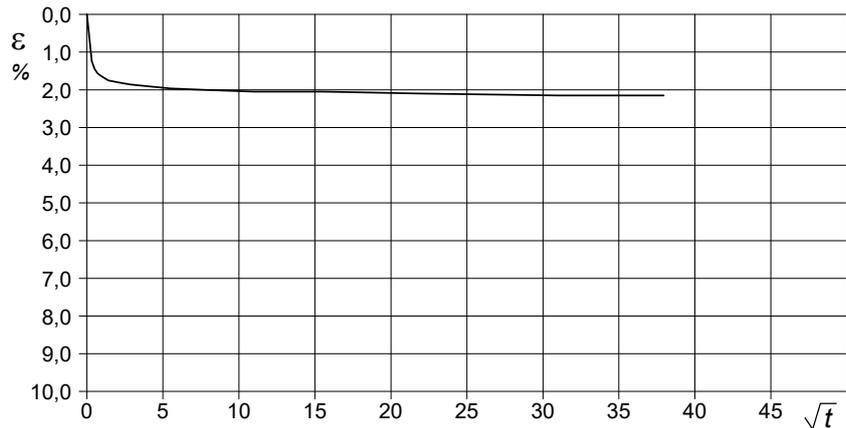


Diagramma TEMPO - CEDIMENTO

PROVINO 2	
Pressione (kPa)	200
Altezza iniziale (cm)	2,000
Altezza finale (cm)	1,876
Sezione (cm ²):	36,00
T ₁₀₀ (min)	6,0
Df (mm)	4
Vs (mm/min)	0,067

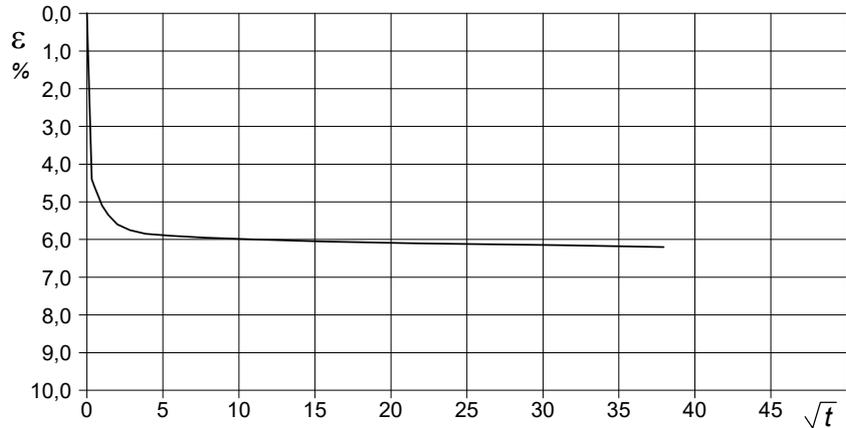
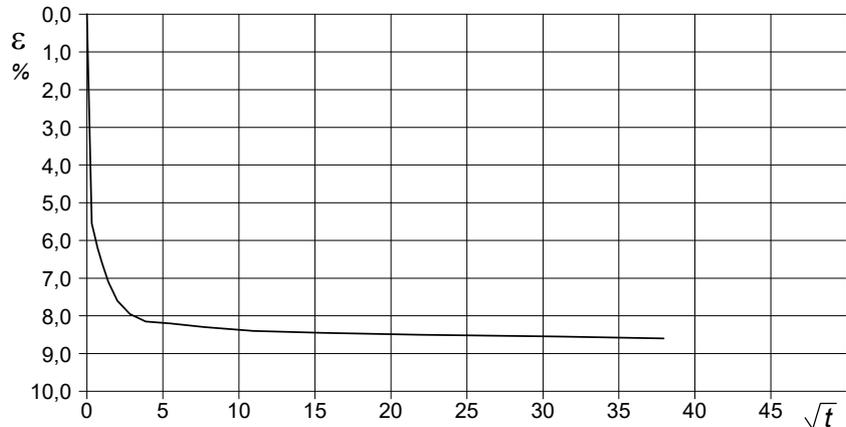


Diagramma TEMPO - CEDIMENTO

PROVINO 3	
Pressione (kPa)	300
Altezza iniziale (cm)	2,000
Altezza finale (cm)	1,828
Sezione (cm ²):	36,00
T ₁₀₀ (min)	8,0
Df (mm)	3
Vs (mm/min)	0,038



Vs = Velocità stimata di prova Df = Deformazione a rottura stimata

tf = 10 x T₁₀₀

Vs = Df / tf

CERTIFICATO DI PROVA N°: 01116 **Pagina 4/4**
VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 43 del 10/02/23

DATA DI EMISSIONE: 02/03/23 **Inizio analisi: 22/02/23**
Apertura campione: 13/03/23 **Fine analisi: 01/03/23**

COMMITTENTE: Benella
RIFERIMENTO: Località Calderara (BO)
SONDAGGIO: S1 **CAMPIONE: C1** **PROFONDITA': m 4,70 - 4,90**

PROVA DI TAGLIO DIRETTO - FASE DI CONSOLIDAZIONE

Modalità di prova: Norma ASTM D3080-04

Provino 1			Provino 2			Provino 3		
Tempo	Cedim.	Cedim.	Tempo	Cedim.	Cedim.	Tempo	Cedim.	Cedim.
minuti	mm/100	%	minuti	mm/100	%	minuti	mm/100	%
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	24,80	1,24	0,10	88,00	4,40	0,10	111,00	5,55
0,25	28,88	1,44	0,25	92,00	4,60	0,25	117,00	5,85
0,50	31,32	1,57	0,50	96,00	4,80	0,50	124,00	6,20
1,00	33,00	1,65	1,00	102,00	5,10	1,00	132,00	6,60
2,00	35,00	1,75	2,00	107,00	5,35	2,00	142,00	7,10
4,00	36,00	1,80	4,00	112,00	5,60	4,00	152,00	7,60
8,00	37,22	1,86	8,00	115,00	5,75	8,00	159,00	7,95
15,00	38,00	1,90	15,00	117,00	5,85	15,00	163,00	8,15
30,00	39,34	1,97	30,00	118,00	5,90	30,00	164,00	8,20
60,00	40,00	2,00	60,00	119,00	5,95	60,00	166,00	8,30
120,00	41,00	2,05	120,00	120,00	6,00	120,00	168,00	8,40
240,00	41,00	2,05	240,00	121,00	6,05	240,00	169,00	8,45
480,00	42,00	2,10	480,00	122,00	6,10	480,00	170,00	8,50
960,00	43,00	2,15	960,00	123,00	6,15	960,00	171,00	8,55
1440,00	43,00	2,15	1440,00	124,00	6,20	1440,00	172,00	8,60

122-23

LO SPERIMENTATORE
 Geom. DI LUCCHIO Antonio

IL DIRETTORE DEL LABORATORIO
 dott. Geom. CARBONE Raffaele

ALLEGATO C

METODO E REPORT DI PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PIEZOCONO (CPTU)

Penetrometro utilizzato: "Pagani TG-63 – 200 KN"

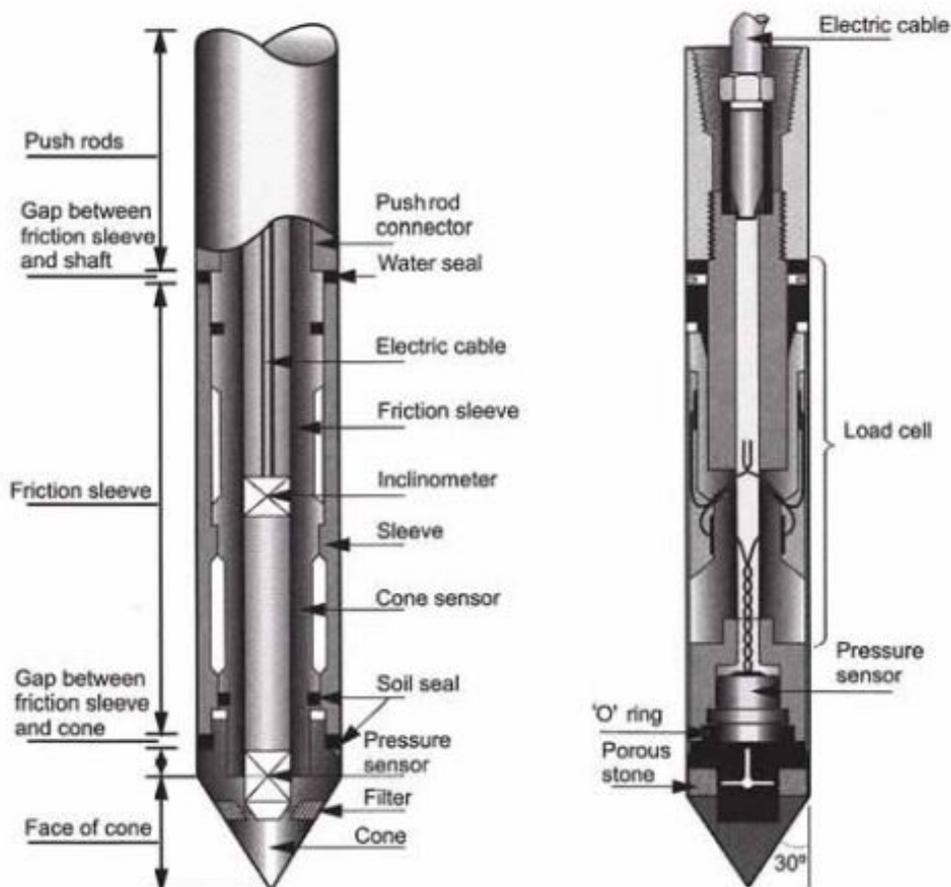
1. PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PIEZOCONO

Le prove penetrometriche statiche con piezocono sono un'indagine geognostica ampiamente riconosciuta e utilizzata a livello scientifico e tecnico. La letteratura a riguardo di questa indagine è molto sviluppata e recente, con correlazioni empiriche sviluppate a partire dai dati ottenuti in campagna, soprattutto da *Robertson*.

1.1. METODOLOGIA DI INDAGINE

La prova CPTU differisce dalla prova penetrometrica statica meccanica per la tipologia di punta; infatti si tratta di una punta cilindrica senza svasature di tipo elettrico, che registra i dati del terreno e li trasmette ad una centralina (la punta e la centralina sono collegate tramite un cavo che passa attraverso la batteria di aste) infissa nel terreno alla velocità costante di 2 cm/s.

I dati che vengono raccolti sono: resistenza di punta, attrito laterale, pressione neutra (ovvero la pressione dell'acqua). A differenza della punta meccanica, nella prova elettrica non vengono effettuate letture ogni 20 cm, ma si raccolgono in continuo durante l'avanzamento della punta (vedi immagine seguente).



Tratto da F. Schnaid, 2009

Figura 1: punta per indagini CPTU.

La misura della pressione dell'acqua in corso di avanzamento è possibile attraverso la presenza di un setto poroso (indicata come '*porous stone*' nella figura precedente) collegato ad un trasduttore di pressione. La punta può essere dotata di inclinometro che permette di riconoscere durante la prova il valore di deviazione dalla verticale (fattore che determina errori nel valore di resistenza locale misurato e può determinare l'invalidità della prova oltre certi limiti).

Di seguito sono riportati i diagrammi e i valori in forma grafica delle resistenze registrate per ogni indagine. Si riporta anche una classificazione litologica secondo le correlazioni empiriche proposte da *Robertson* (2009,2012), in cui vengono riportati i singoli valori registrati nella prova prima su un grafico litologico basato sull'indice di comportamento SBT (*Soil Behaviour Type*), mentre il secondo riporta i valori su base della normalizzazione verso la pressione neutra dell'acqua (u_0). Infine un confronto tra le classiche "resistenza di punta" e "frizione laterale" contro la "resistenza alla punta corretta q_t " e l'indice di comportamento litologico normalizzato "*SBT_n Index*".

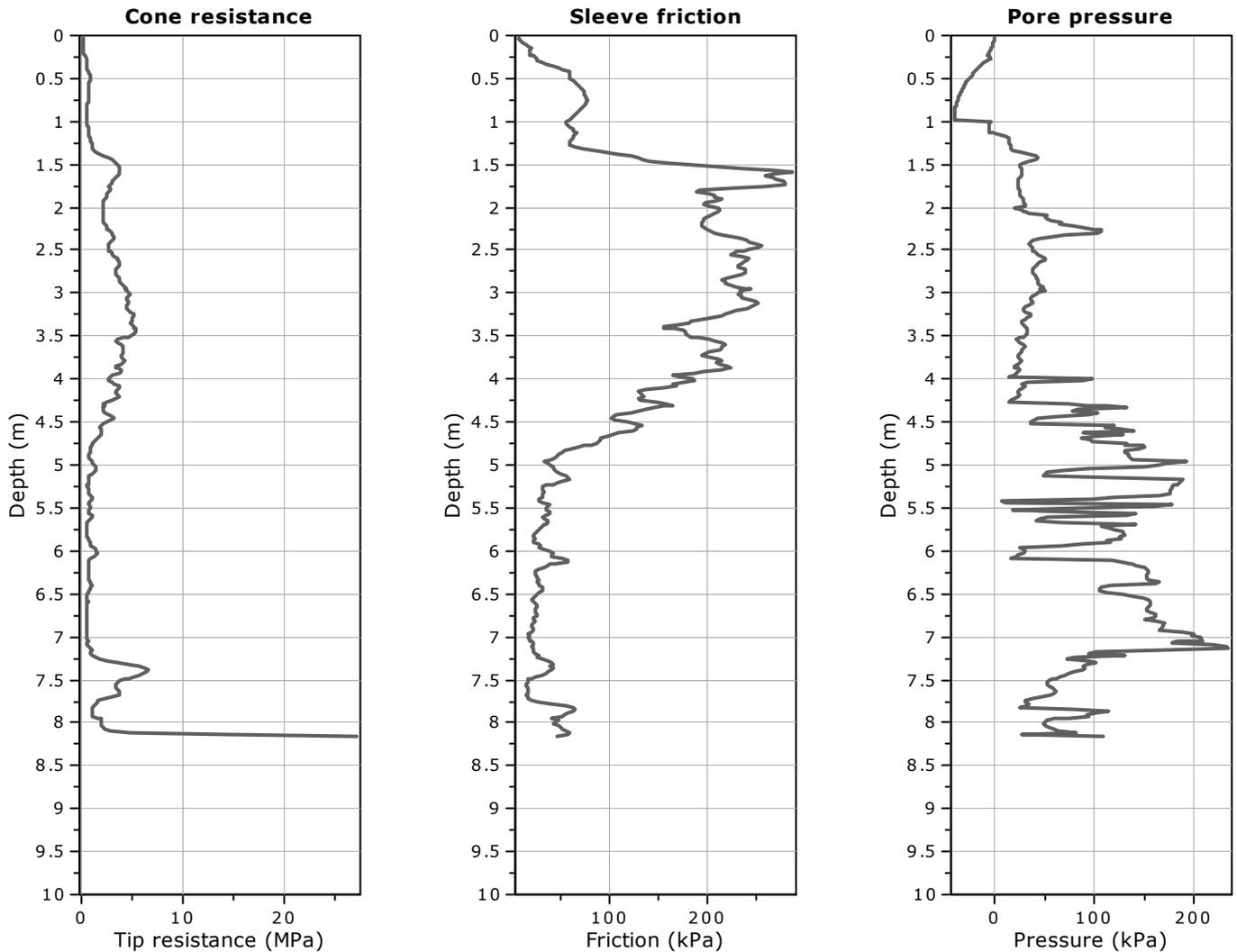
Project: Nuovo Capannone Benelli

Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)



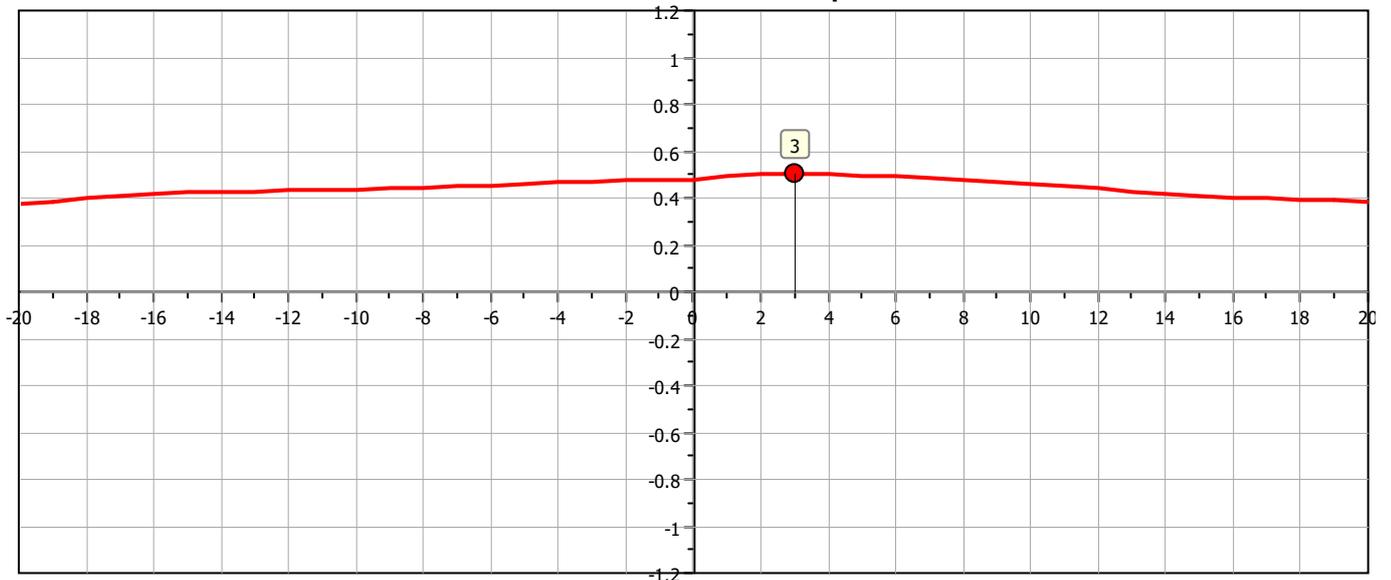
Project: Nuovo Capannone Benelli
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

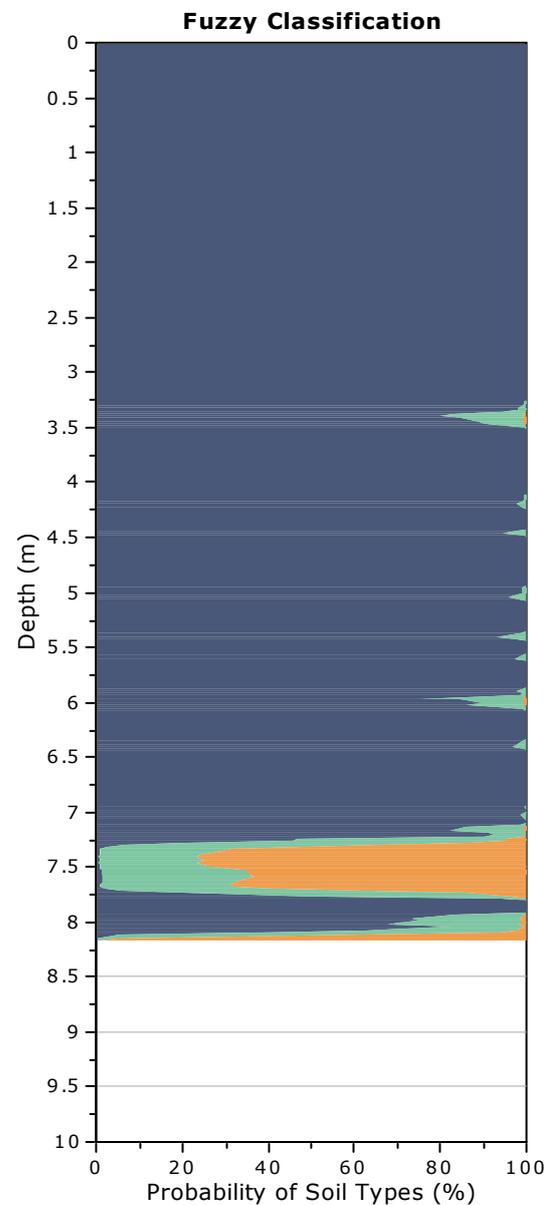
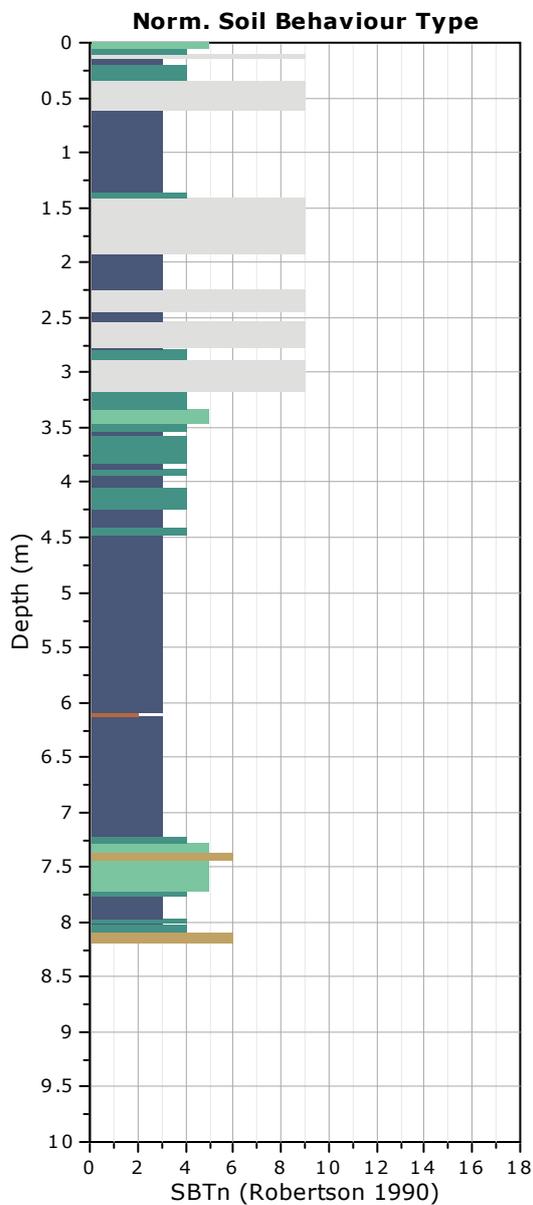
Total depth: 8.16 m, Date: 07/02/2023
Coords: lat 44.5524356° lon 11.2672584°



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

Cross correlation between q_c & f_s





Fuzzy classification legend

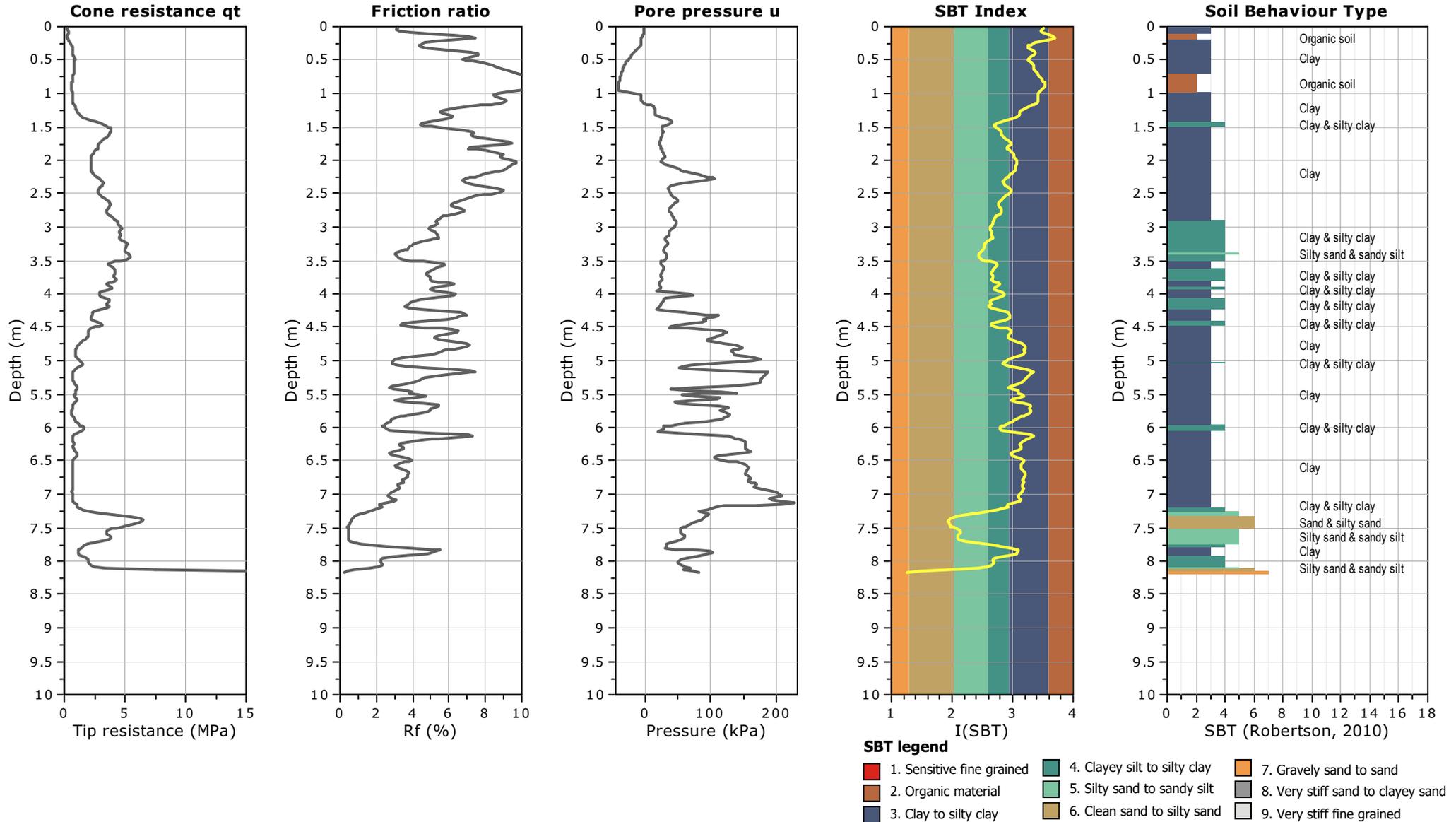
- Highly probable clayey soil
- Highly probable mixture soil
- Highly probable sandy soil

Project: Nuovo Capannone Benelli

Total depth: 8.16 m, Date: 07/02/2023

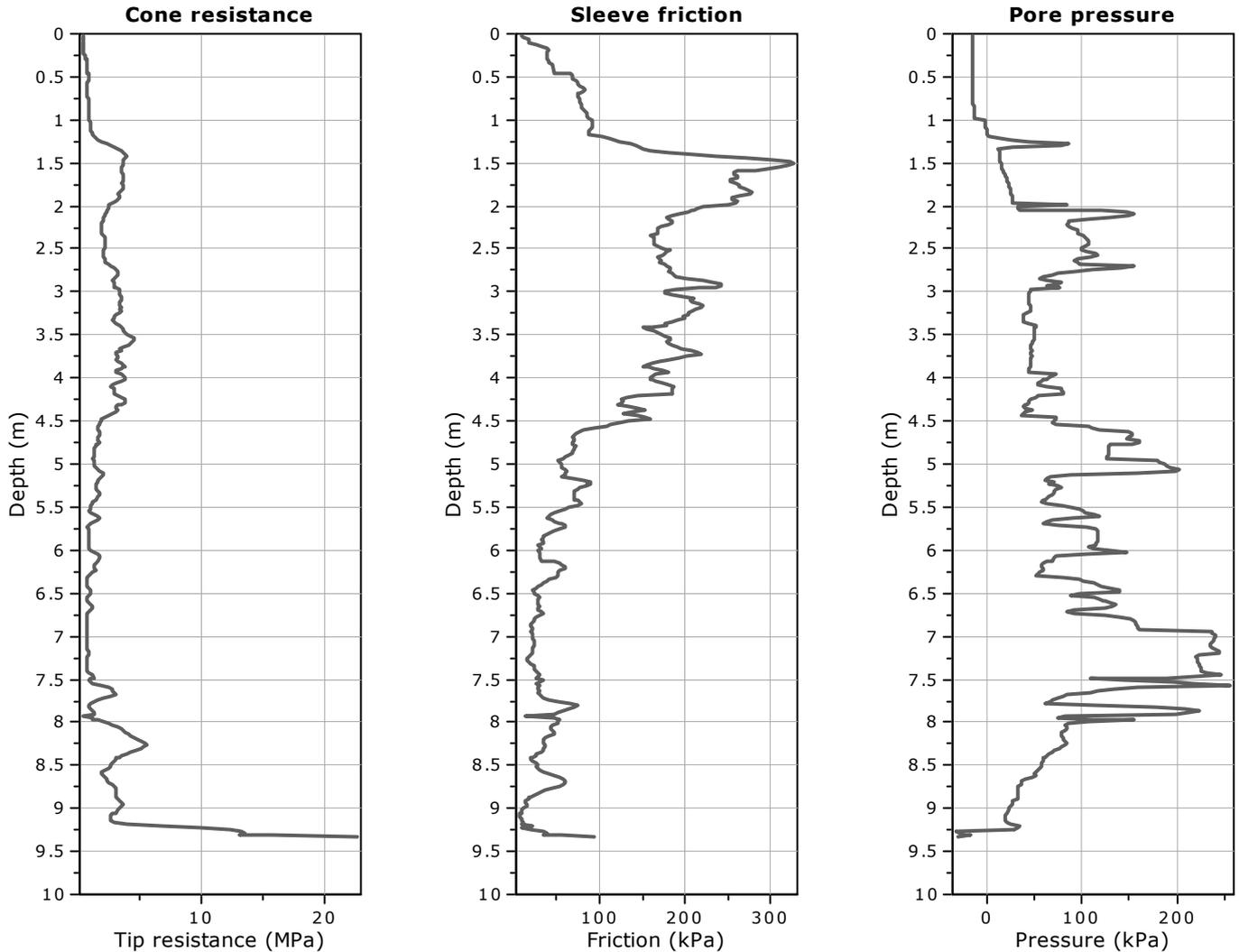
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

Coords: lat 44.5524356° lon 11.2672584°



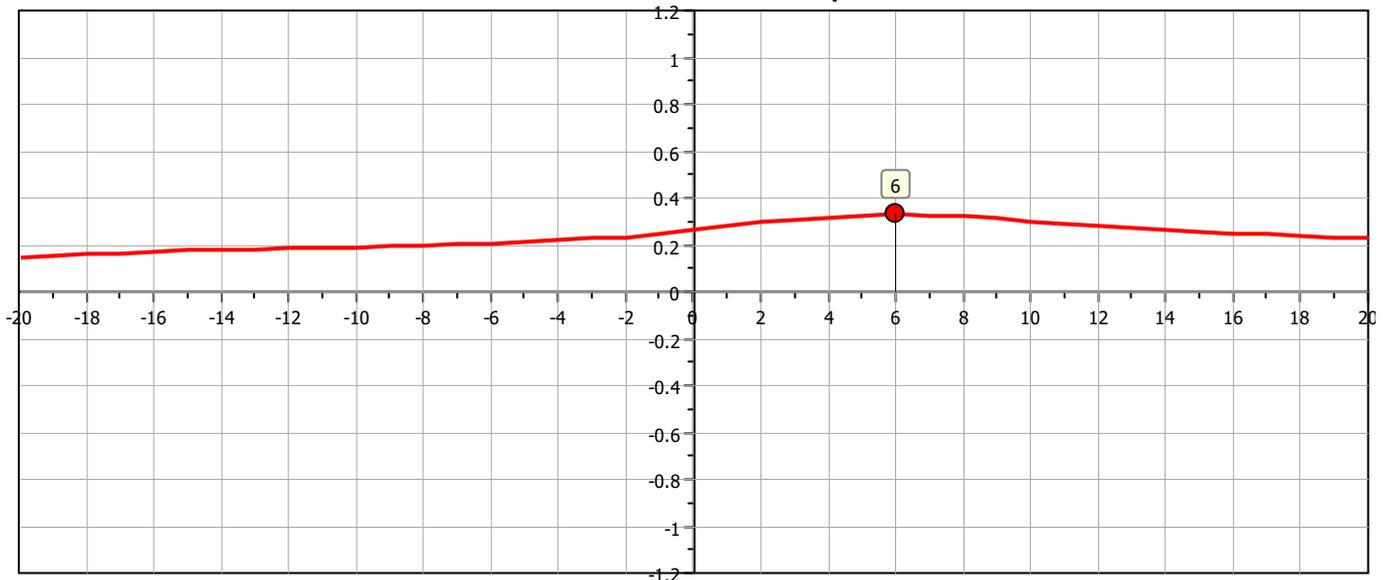
Project: Nuovo Capannone Benelli
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

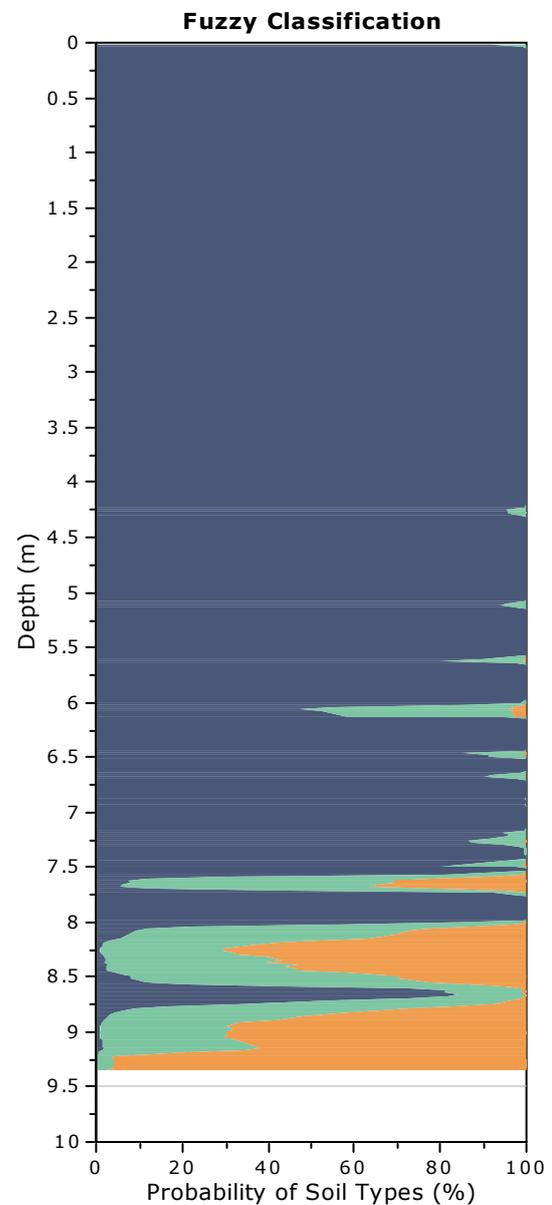
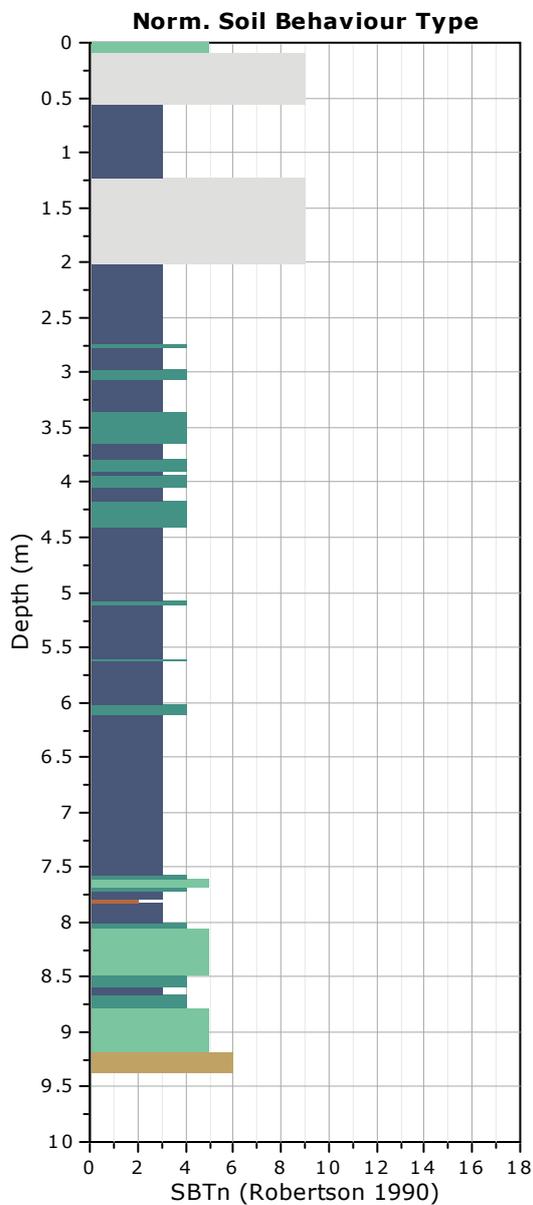
Total depth: 9.34 m, Date: 07/02/2023
Coords: lat 44.552298° lon 11.2676447°



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

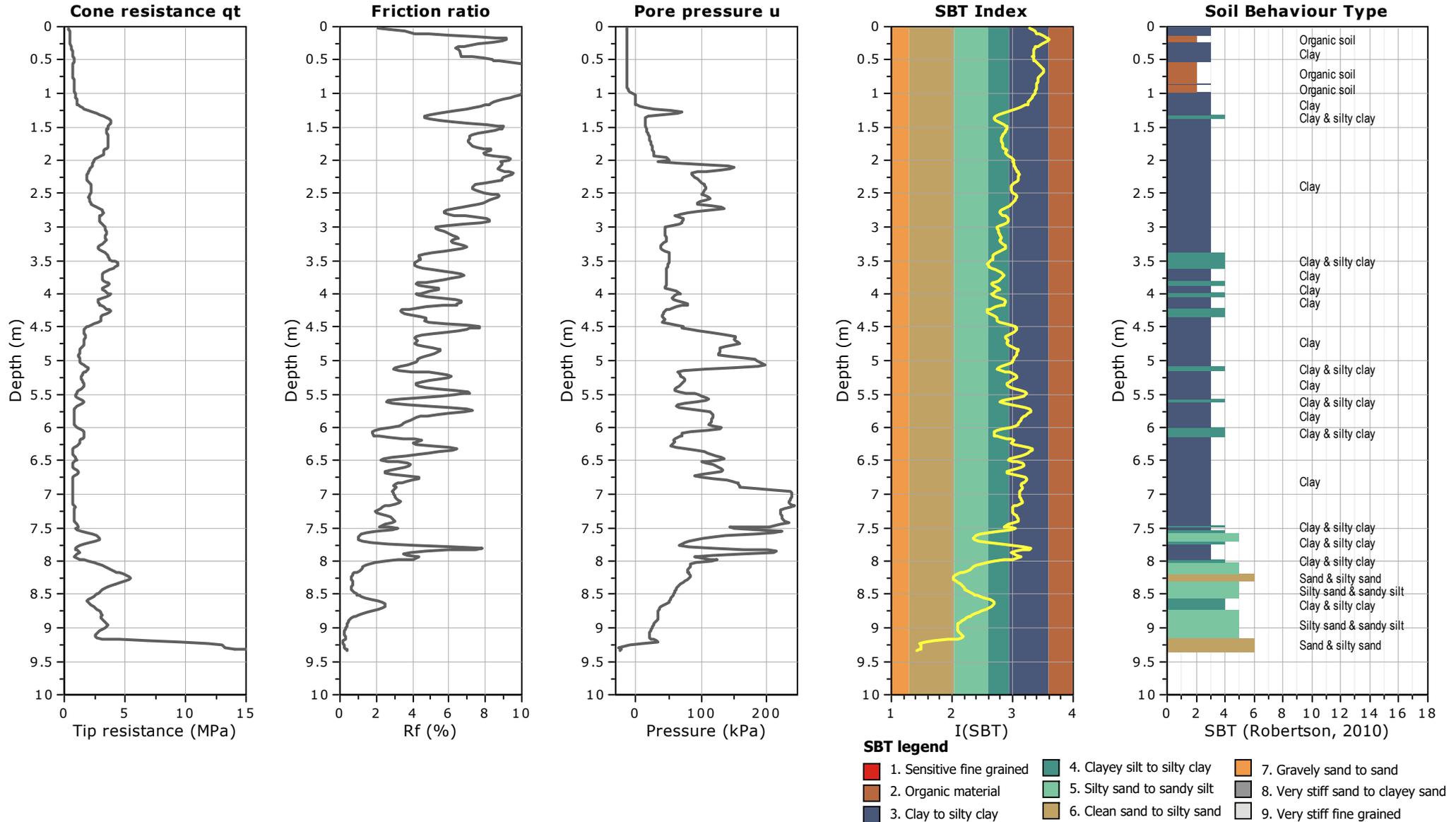
Cross correlation between q_c & f_s





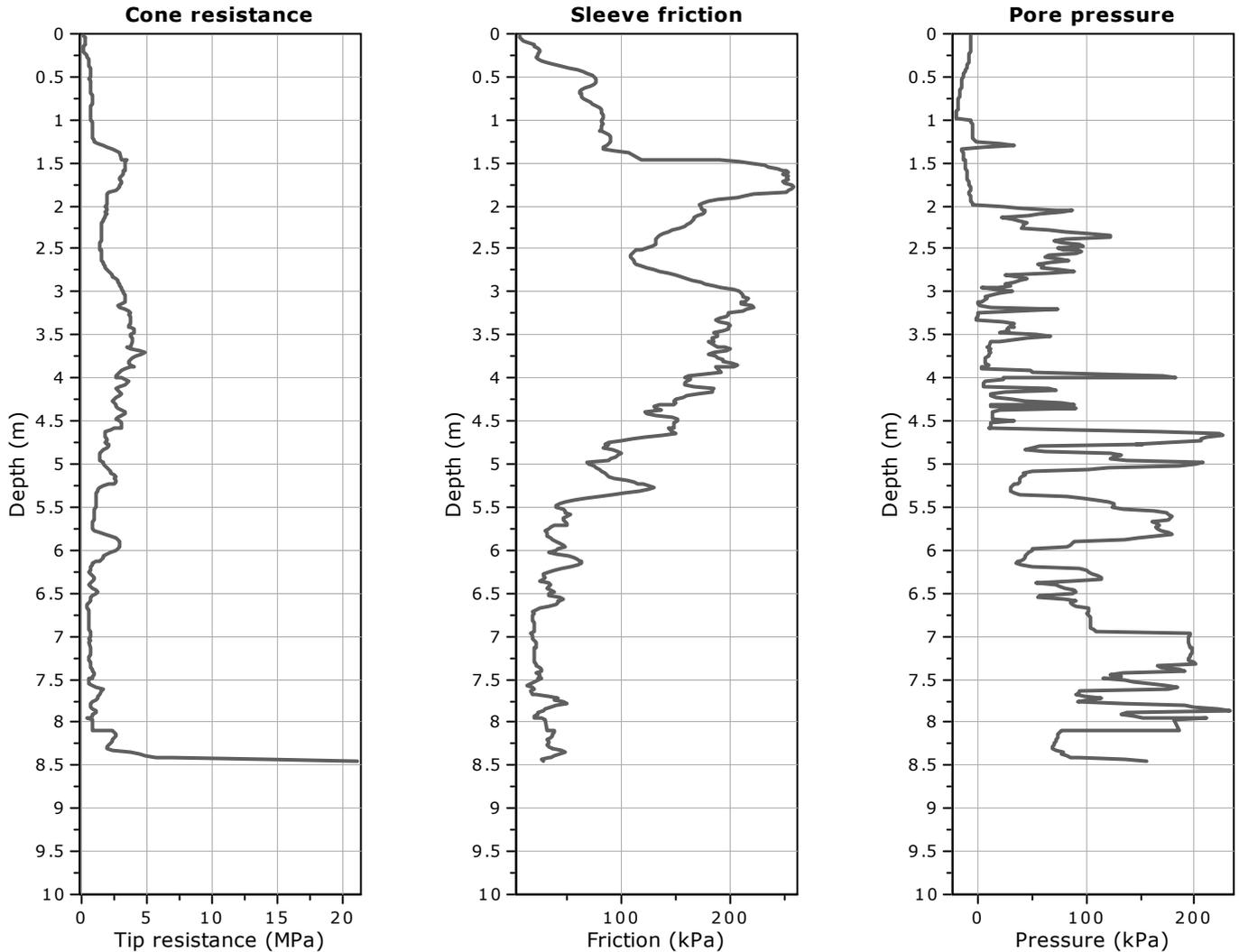
Fuzzy classification legend

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



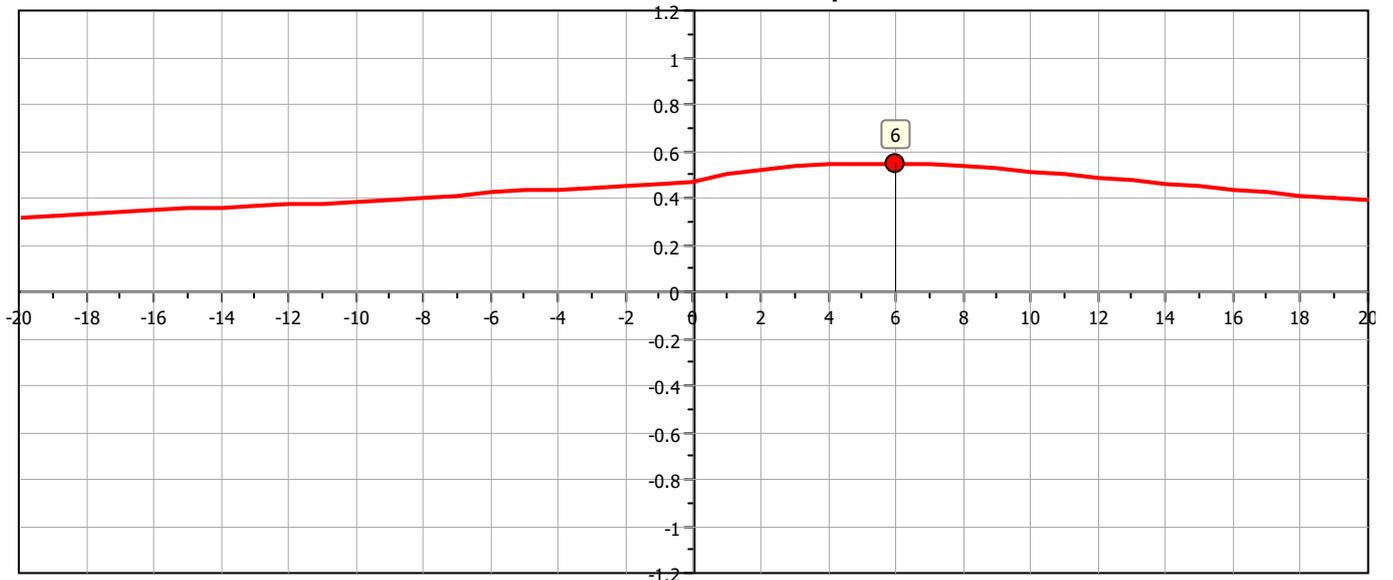
Project: Nuovo Capannone Benelli
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

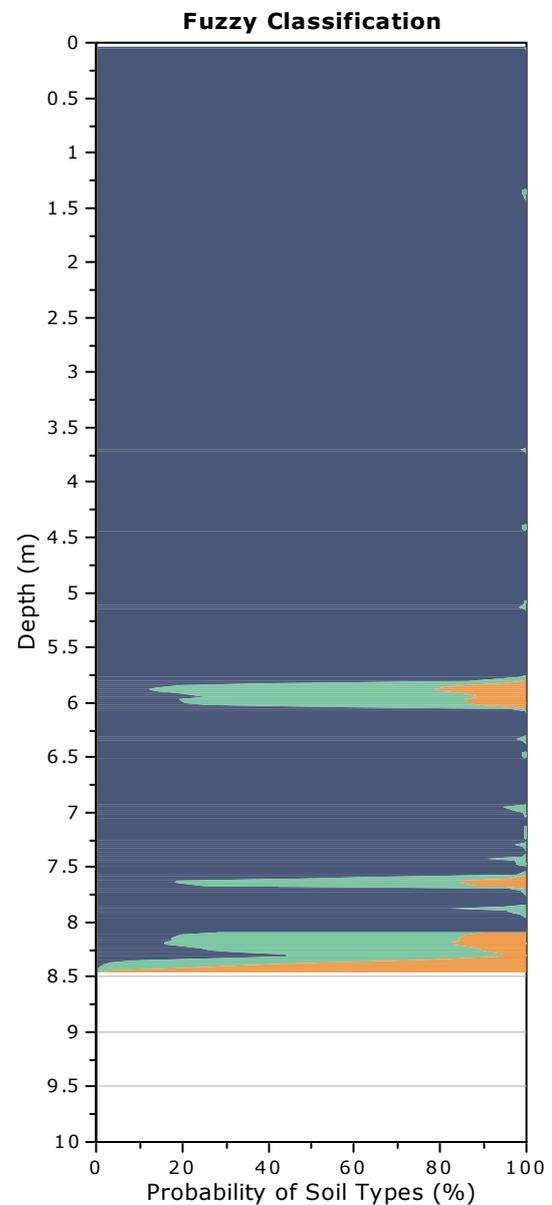
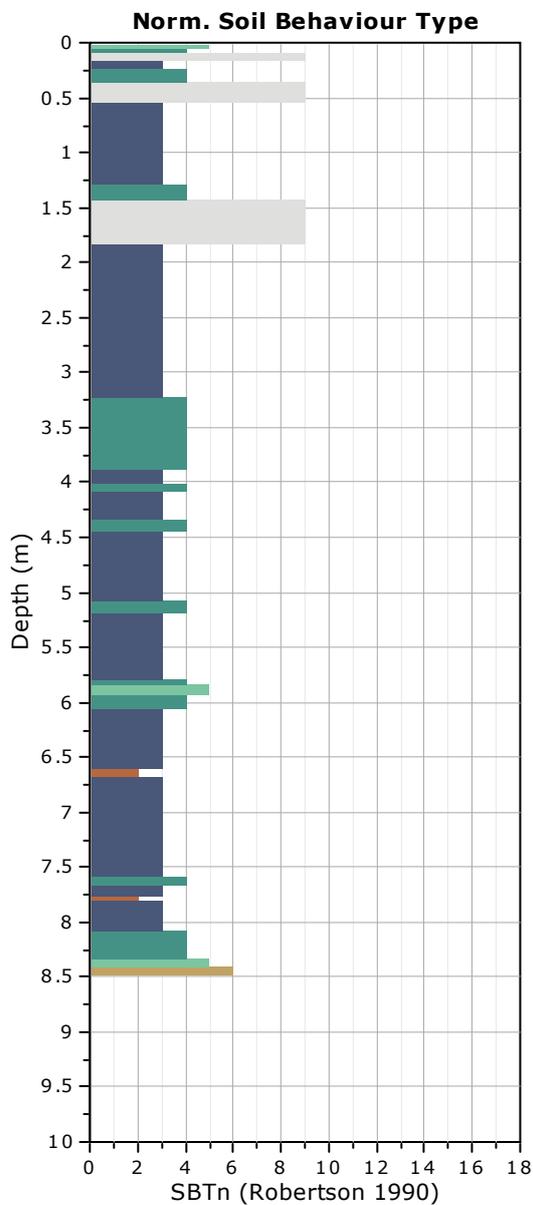
Total depth: 8.46 m, Date: 07/02/2023
Coords: lat 44.552168° lon 11.2679719°



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

Cross correlation between q_c & f_s





Fuzzy classification legend

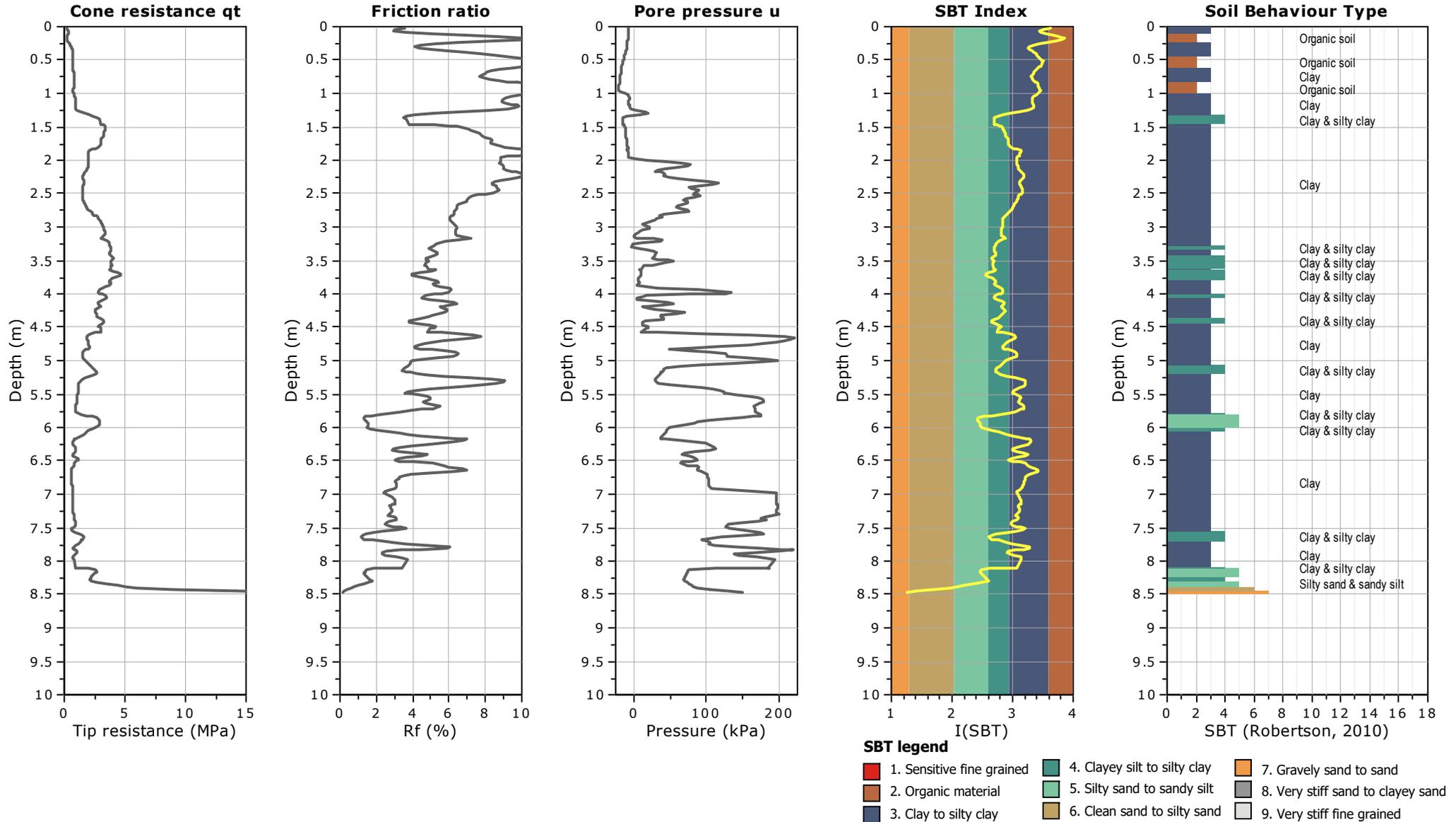
- Highly probable clayey soil
- Highly probable mixture soil
- Highly probable sandy soil

Project: Nuovo Capannone Benelli

Total depth: 8.46 m, Date: 07/02/2023

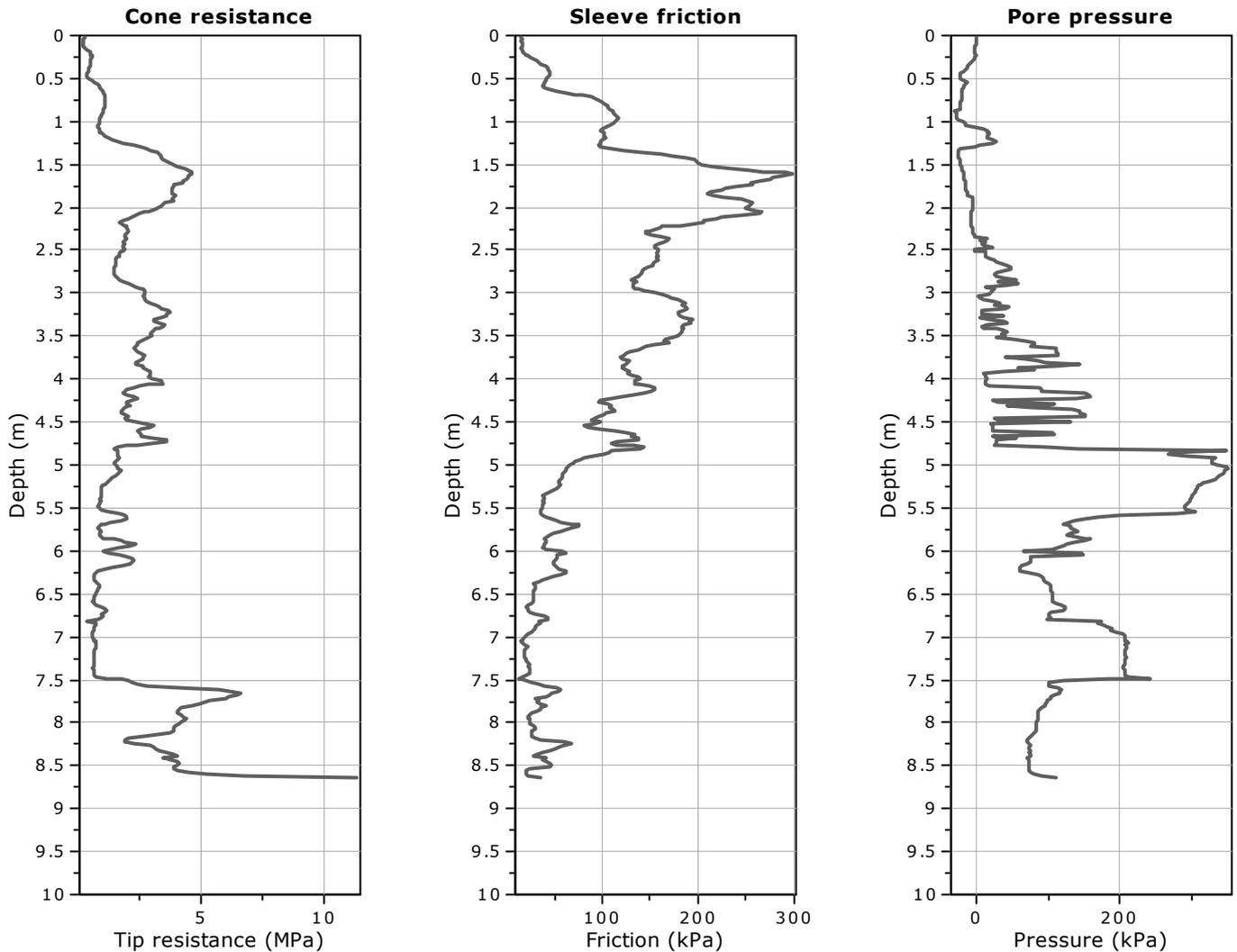
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

Coords: lat 44.552168° lon 11.2679719°



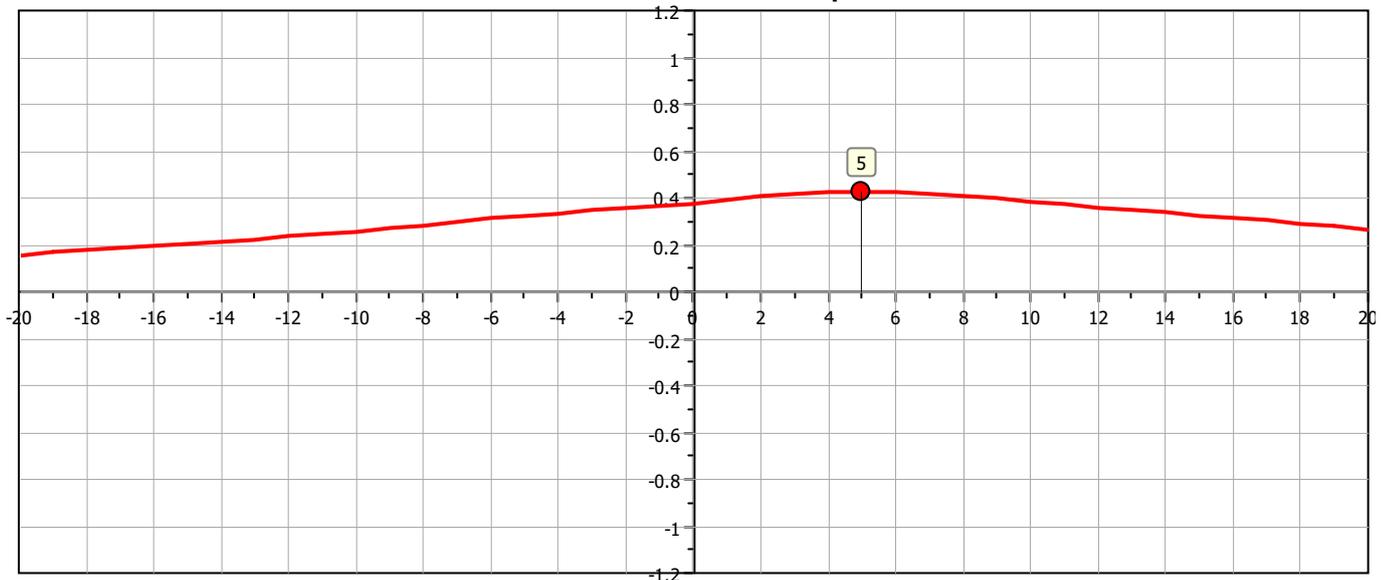
Project: Nuovo Capannone Benelli
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

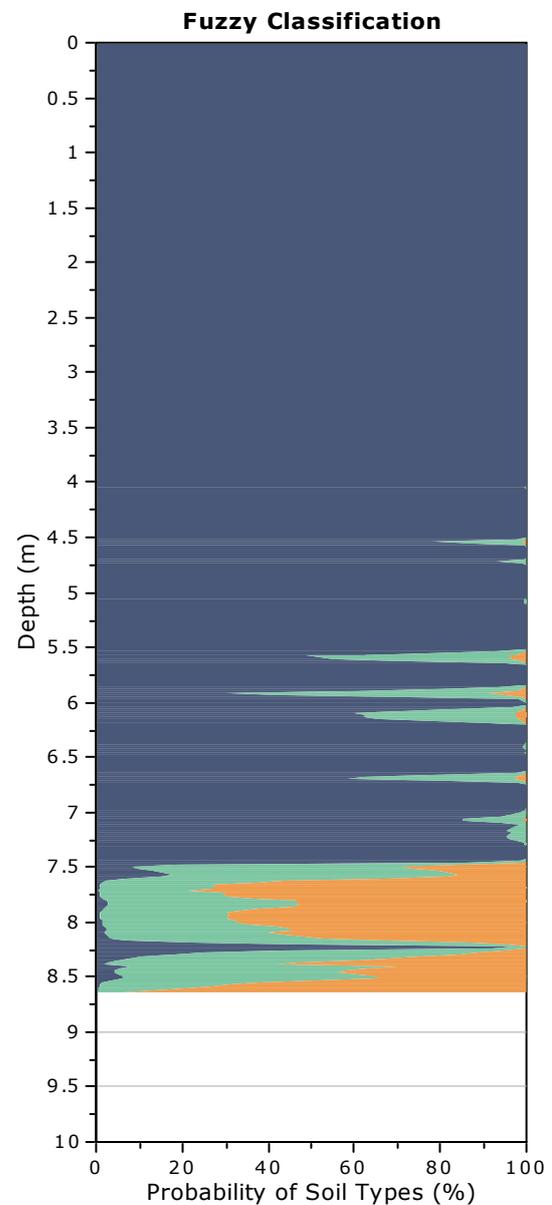
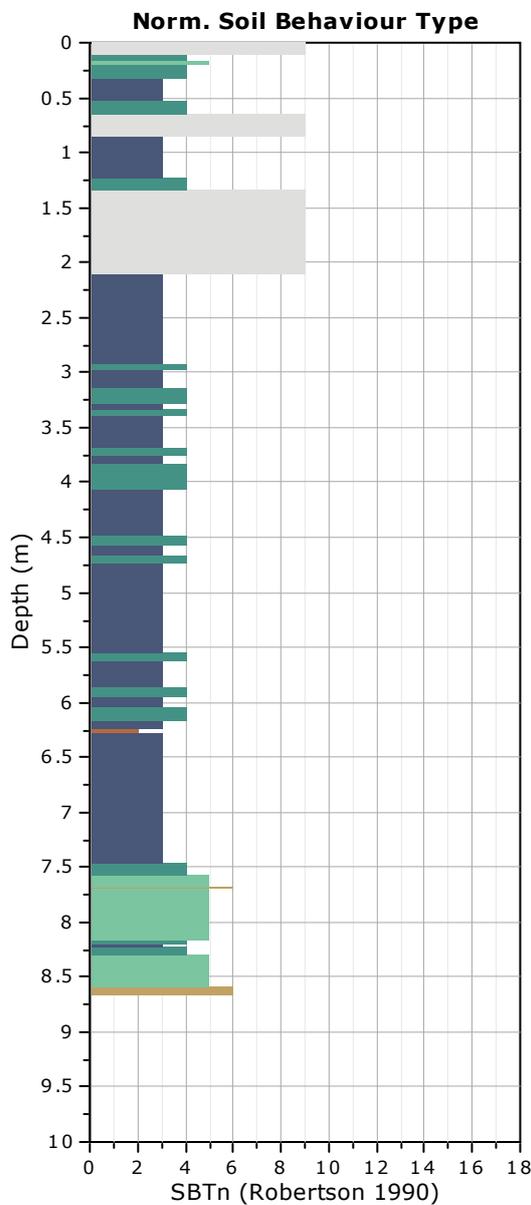
Total depth: 8.64 m, Date: 07/02/2023
Coords: lat 44.552189° lon 11.2667783°



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

Cross correlation between q_c & f_s





Fuzzy classification legend

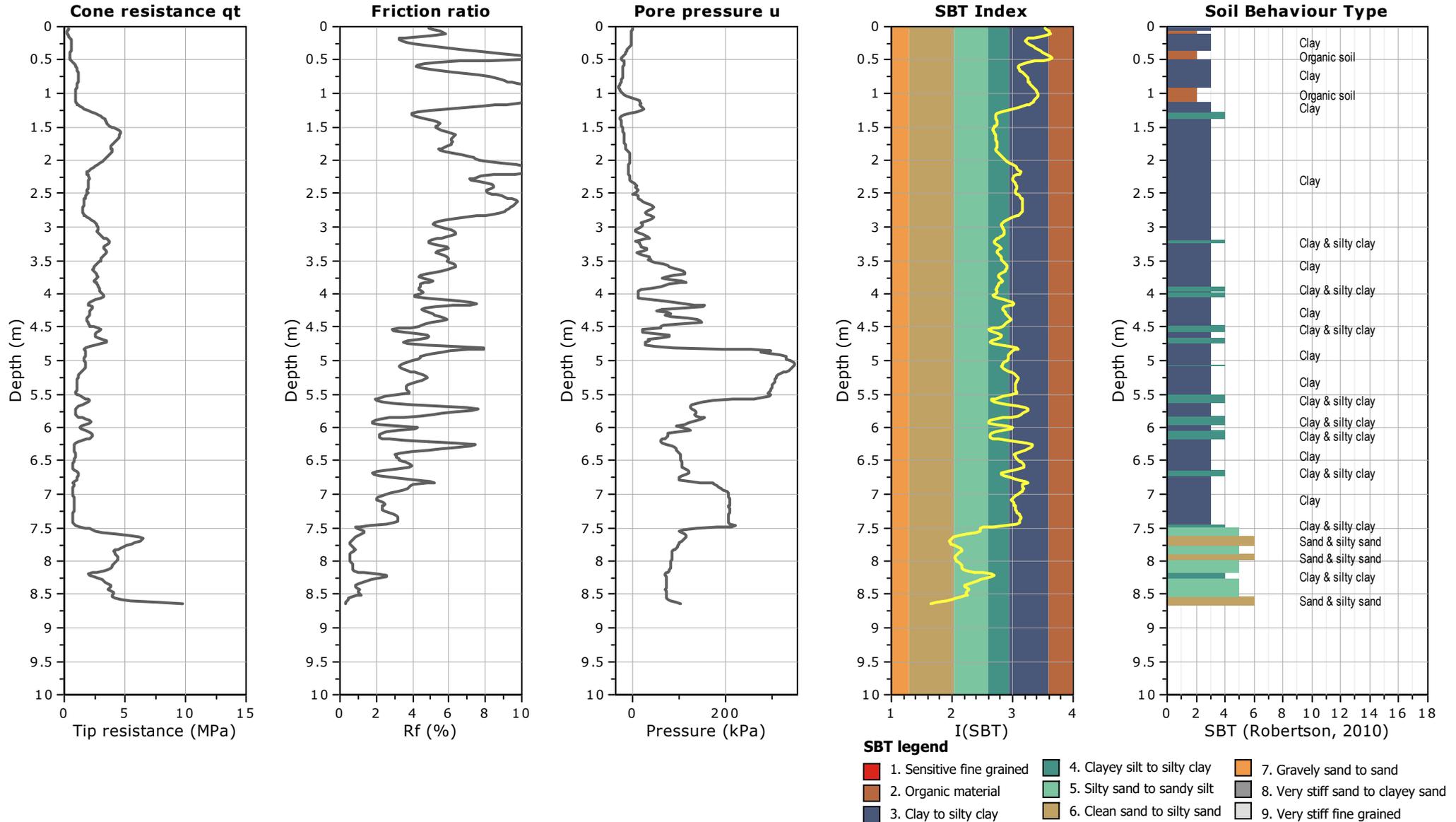
- Highly probable clayey soil
- Highly probable mixture soil
- Highly probable sandy soil

Project: Nuovo Capannone Benelli

Total depth: 8.64 m, Date: 07/02/2023

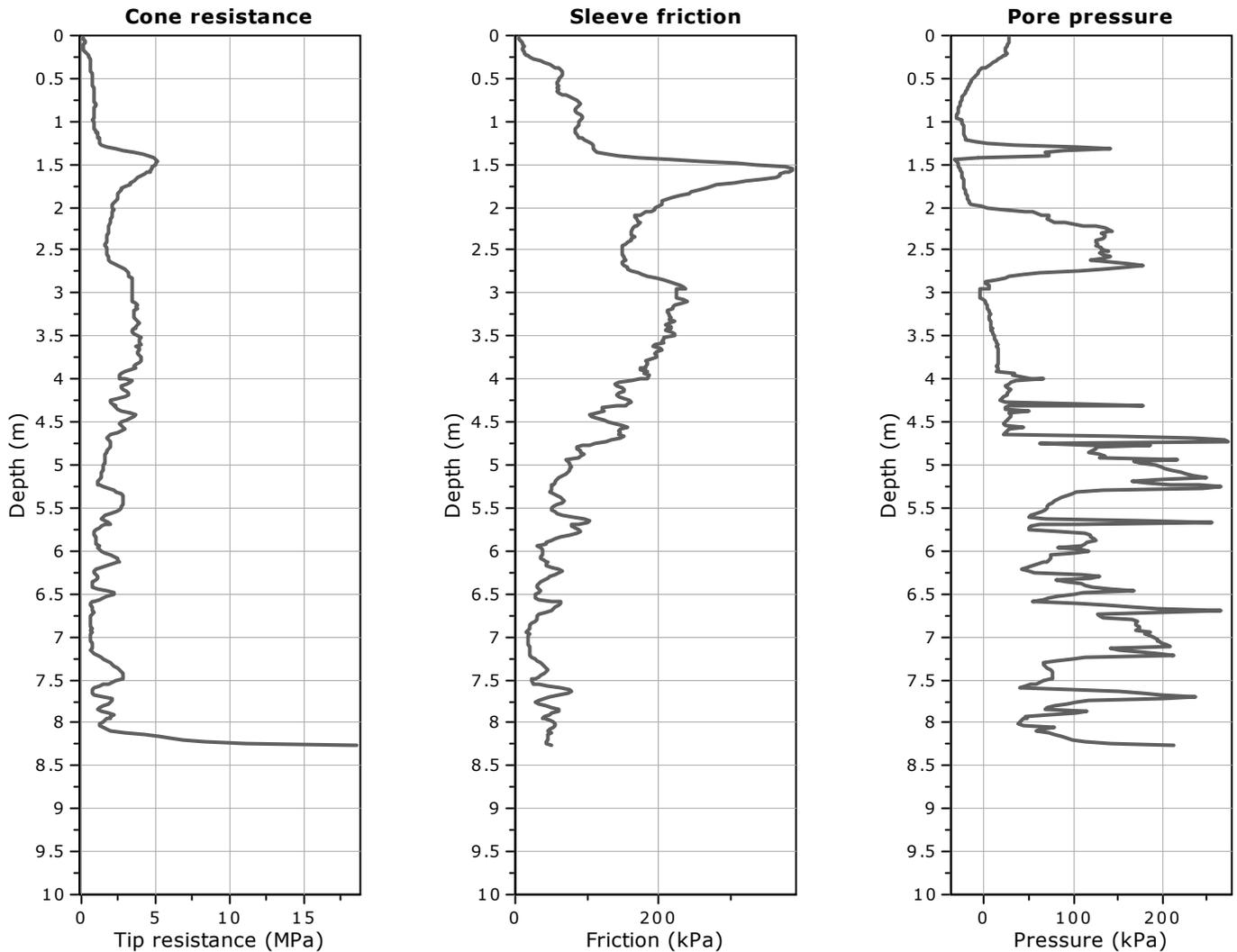
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

Coords: lat 44.552189° lon 11.2667783°



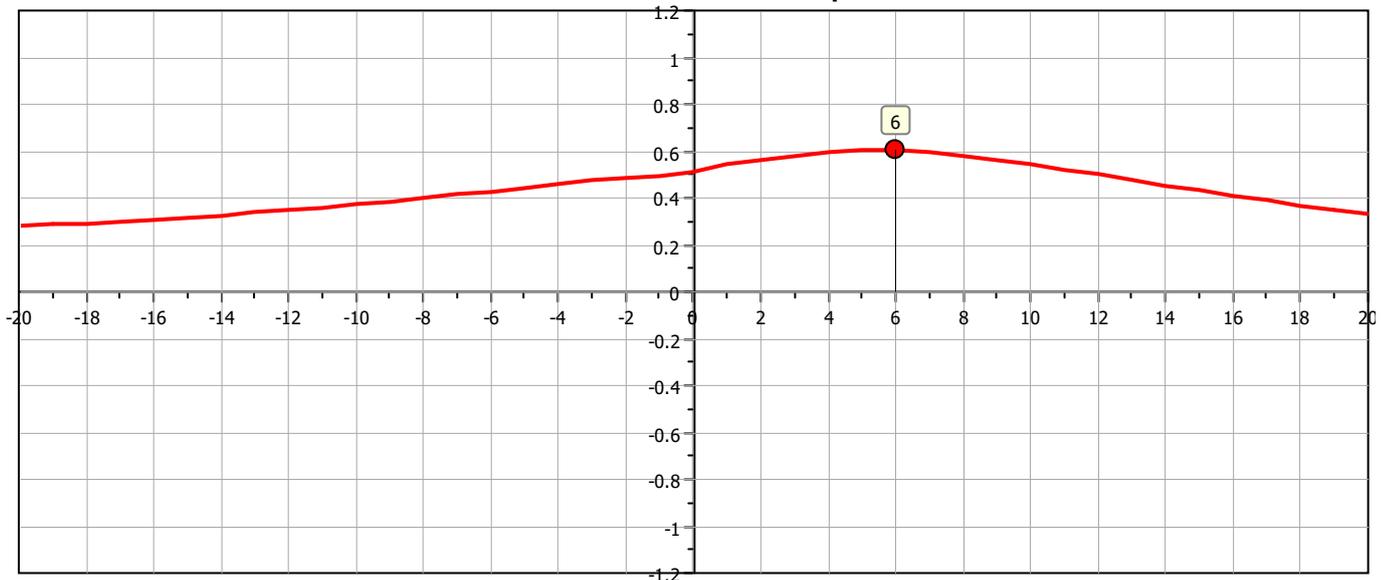
Project: Nuovo Capannone Benelli
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

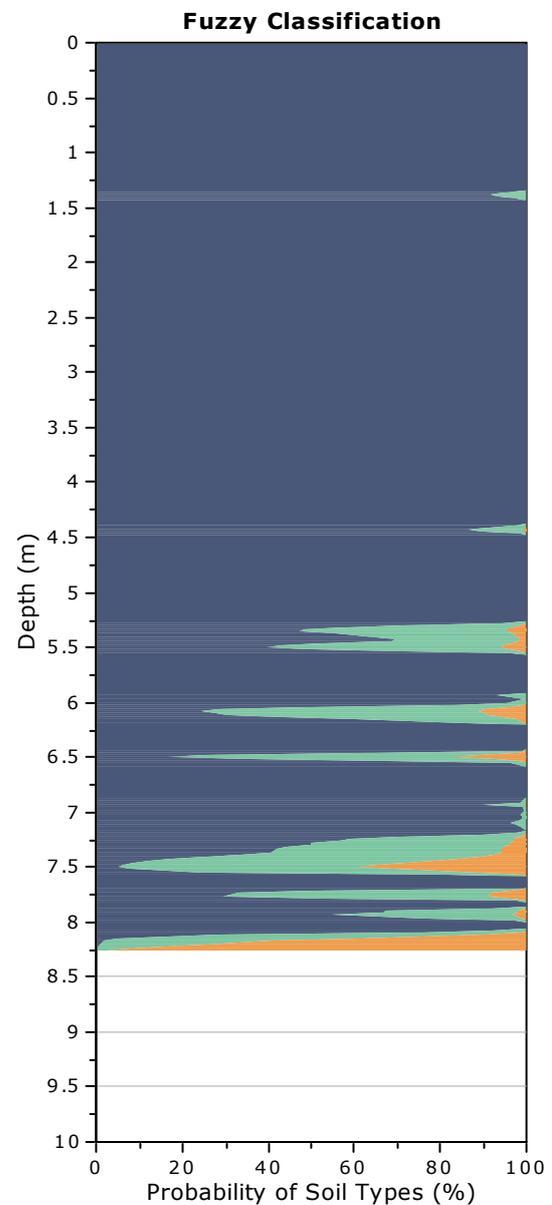
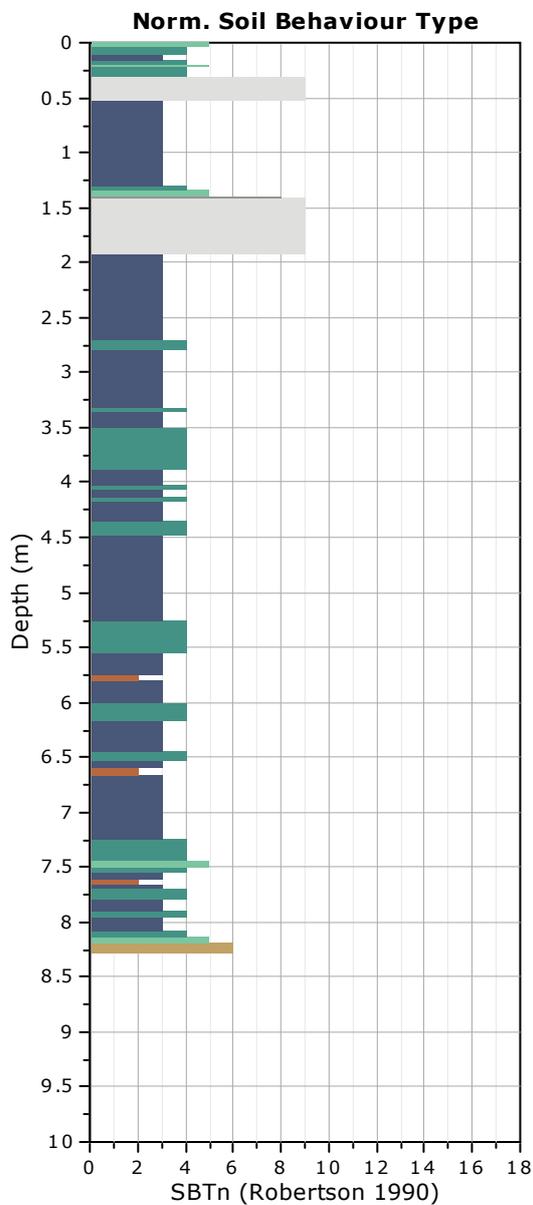
Total depth: 8.26 m, Date: 07/02/2023
Coords: lat 44.5520533° lon 11.2672048°



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

Cross correlation between q_c & f_s





Fuzzy classification legend

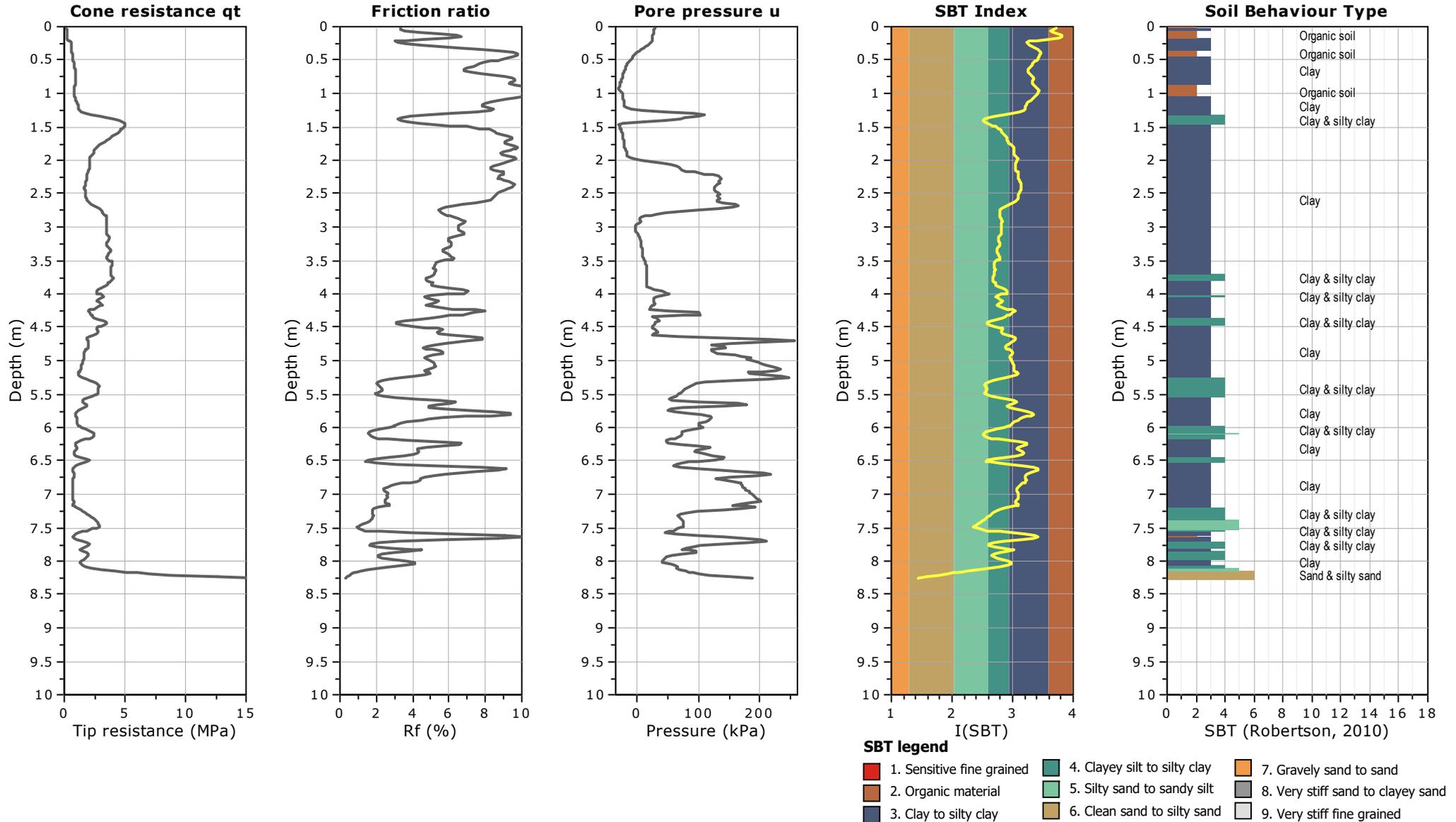
- Highly probable clayey soil
- Highly probable mixture soil
- Highly probable sandy soil

Project: Nuovo Capannone Benelli

Total depth: 8.26 m, Date: 07/02/2023

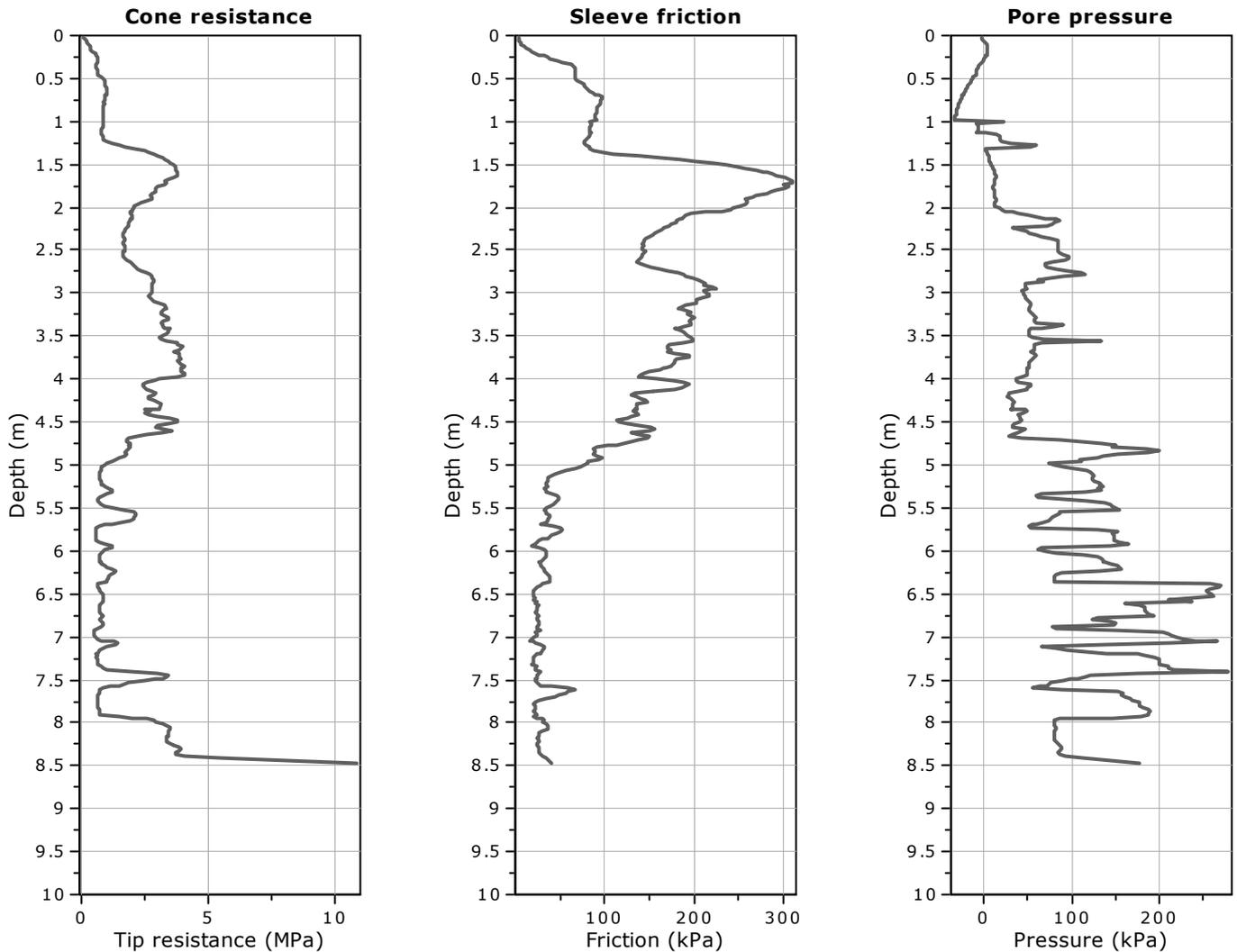
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

Coords: lat 44.5520533° lon 11.2672048°



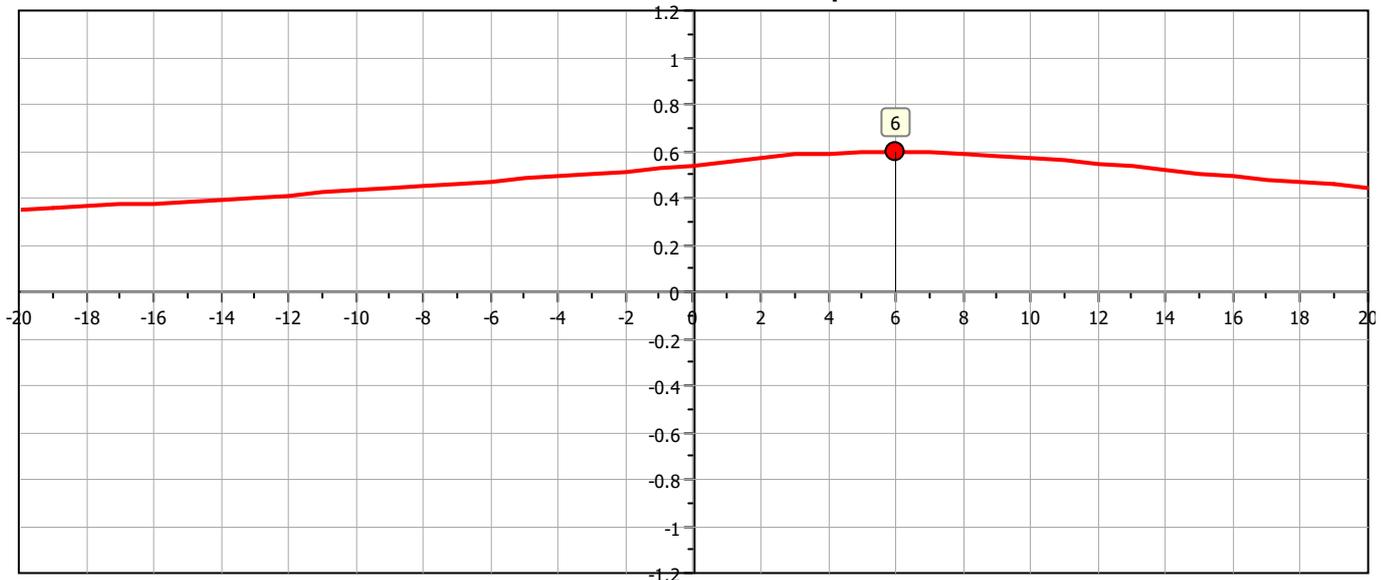
Project: Nuovo Capannone Benelli
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

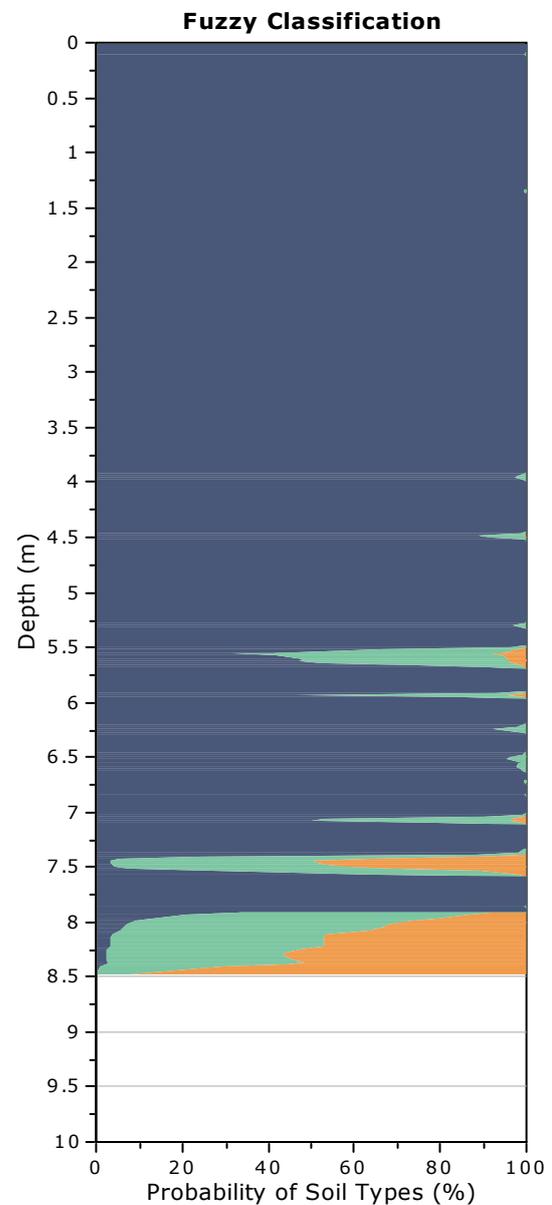
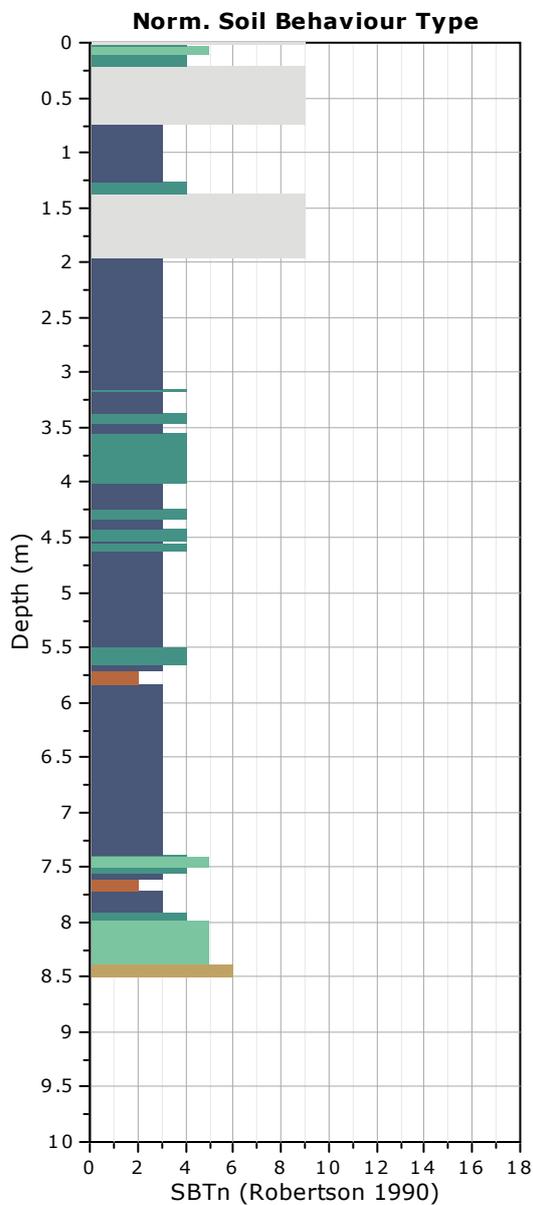
Total depth: 8.48 m, Date: 07/02/2023
Coords: lat 44.5519195° lon 11.2676205°



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

Cross correlation between q_c & f_s





Fuzzy classification legend

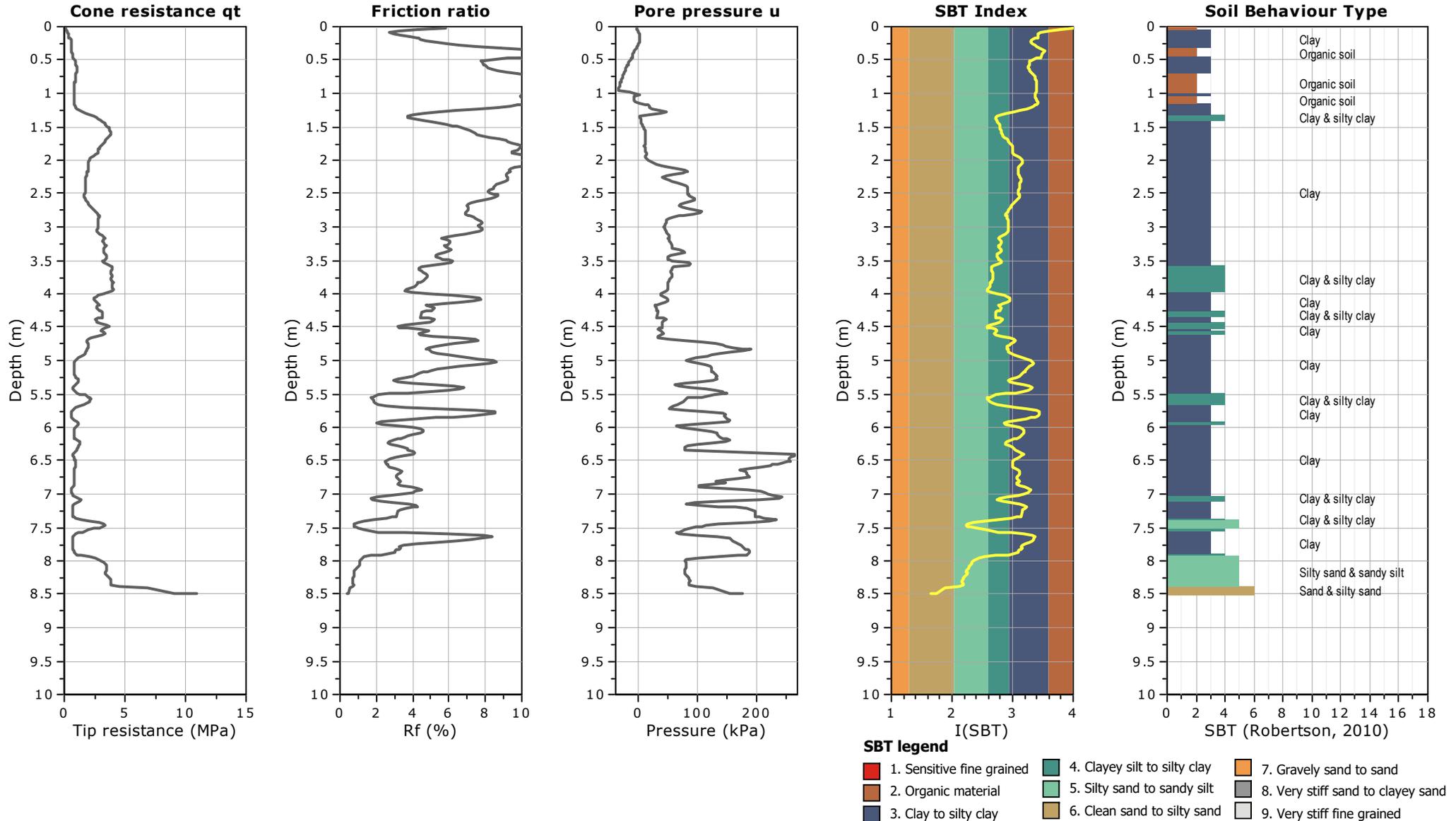
- Highly probable clayey soil
- Highly probable mixture soil
- Highly probable sandy soil

Project: Nuovo Capannone Benelli

Total depth: 8.48 m, Date: 07/02/2023

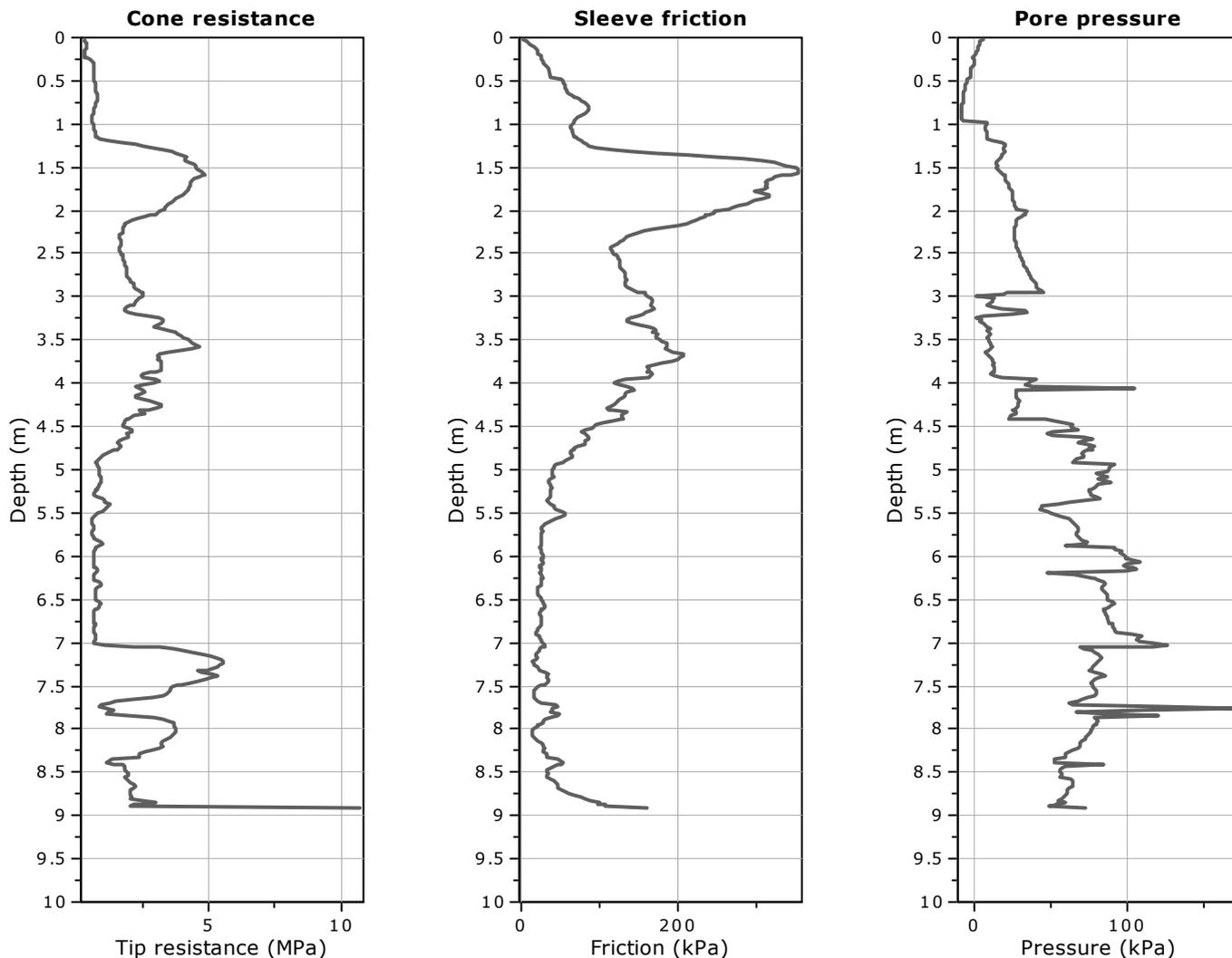
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

Coords: lat 44.5519195° lon 11.2676205°



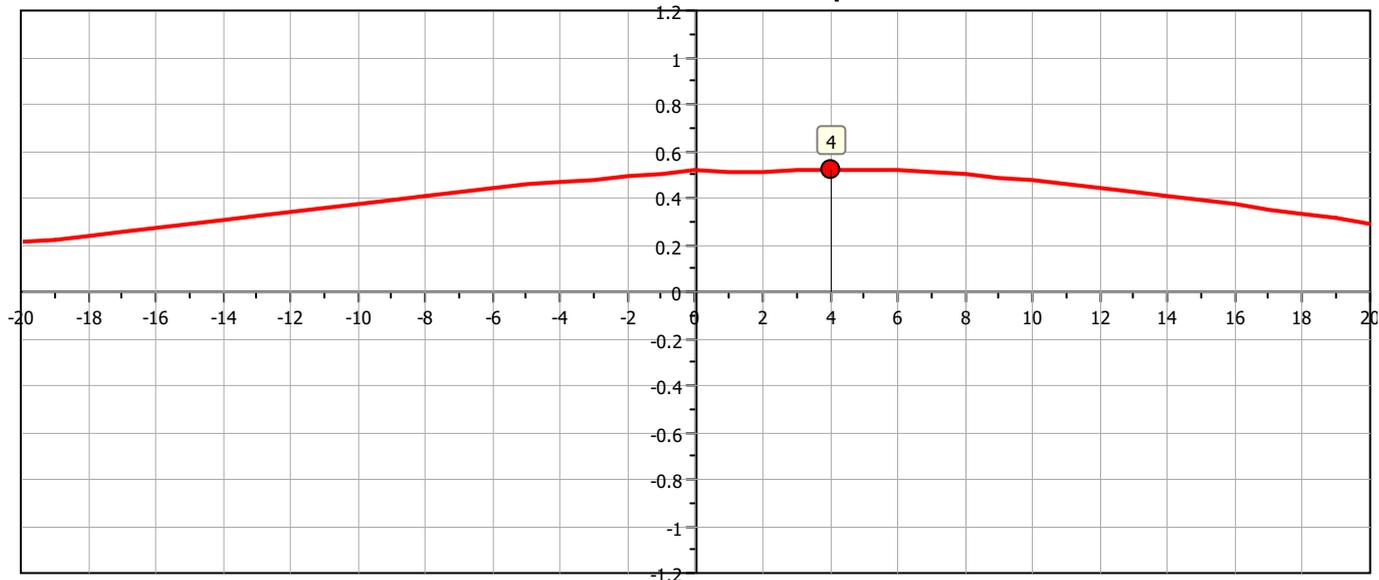
Project: Nuovo Capannone Benelli
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

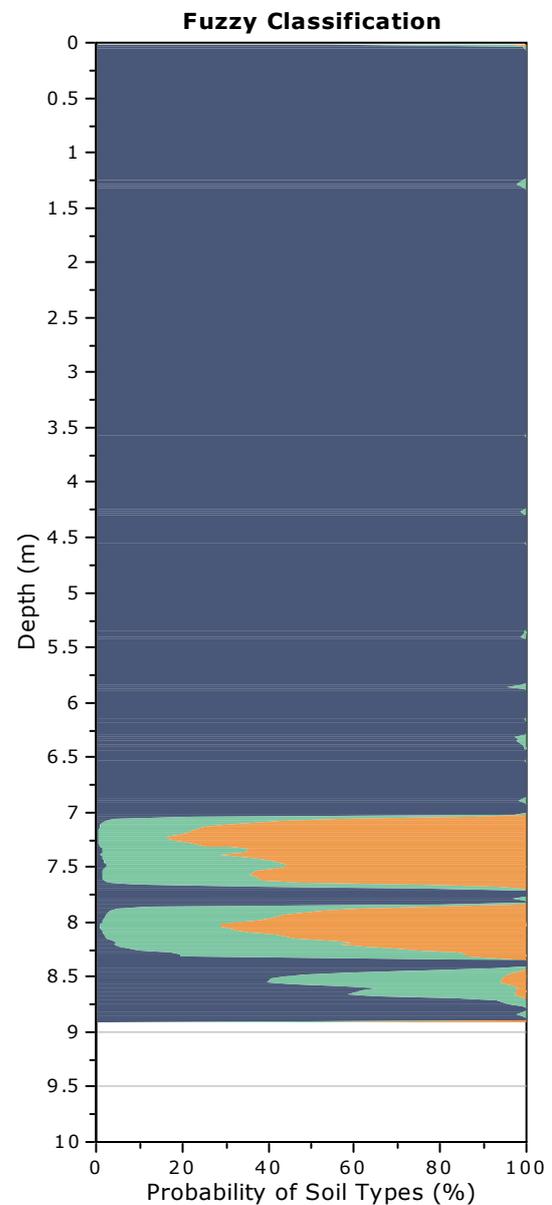
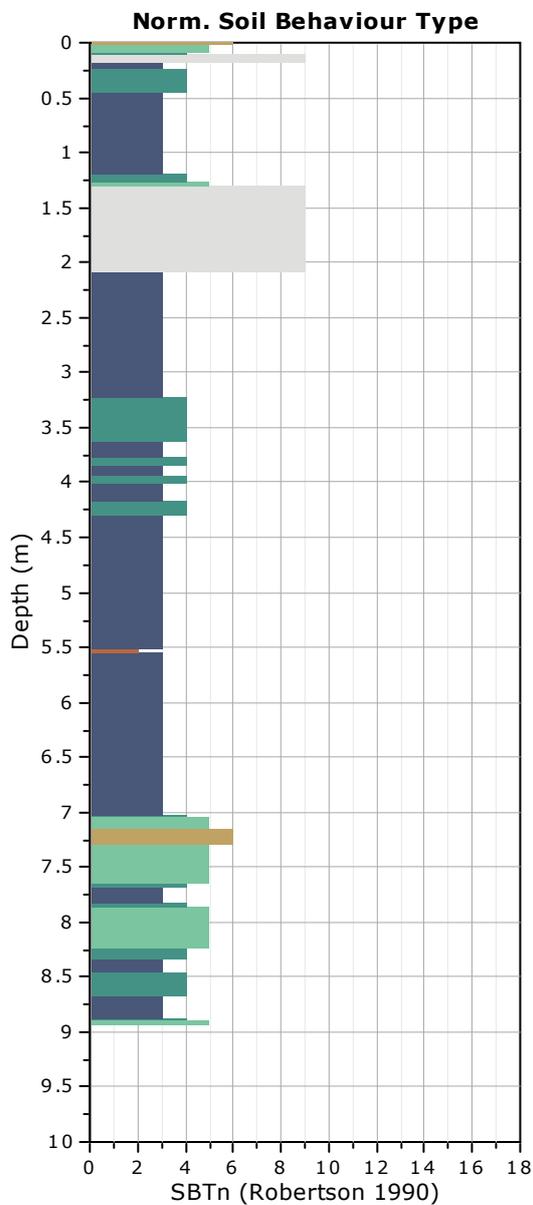
Total depth: 8.92 m, Date: 07/02/2023
Coords: lat 44.5525636° lon 11.266891°



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

Cross correlation between q_c & f_s





Fuzzy classification legend

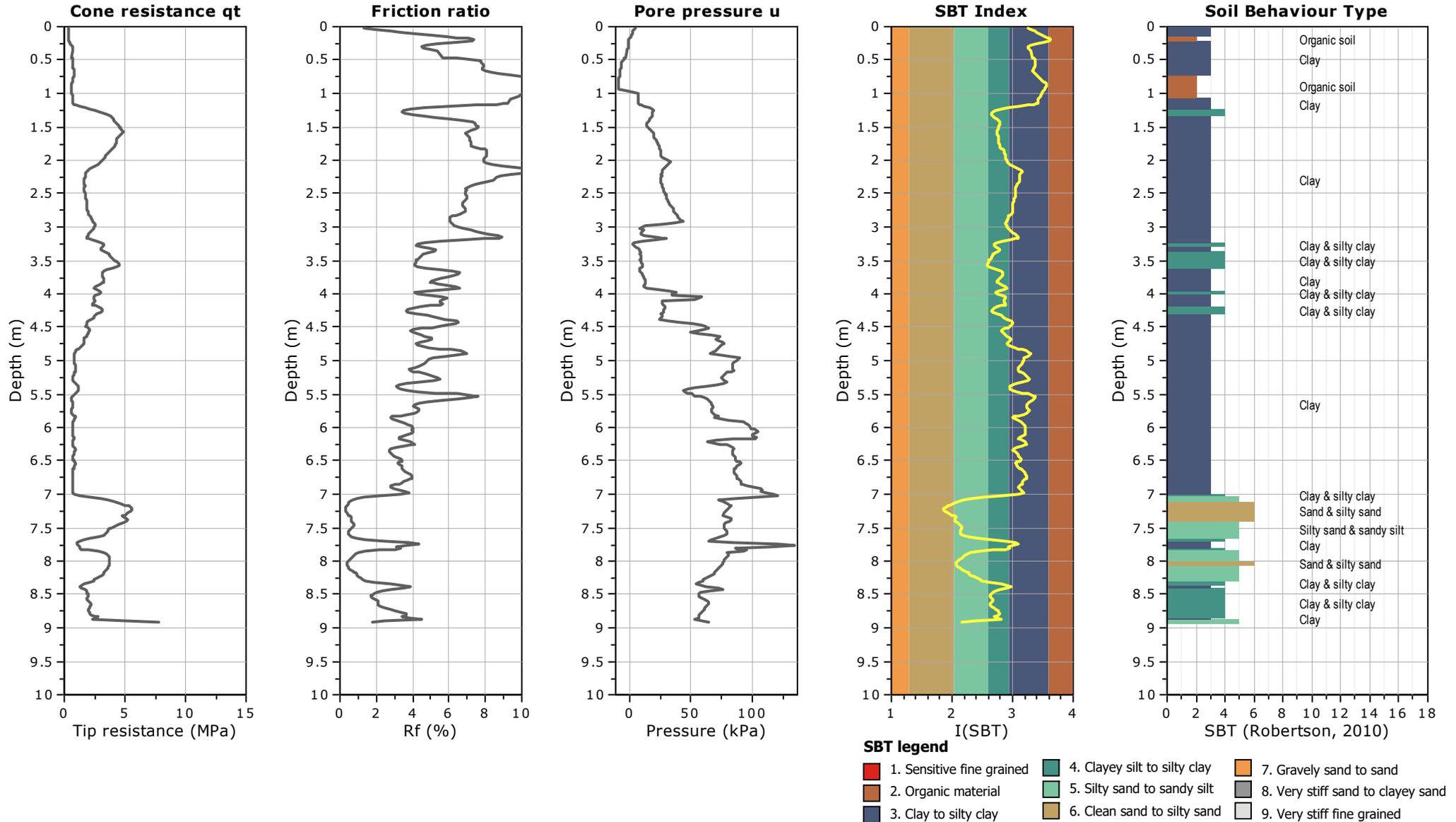
- Highly probable clayey soil
- Highly probable mixture soil
- Highly probable sandy soil

Project: Nuovo Capannone Benelli

Total depth: 8.92 m, Date: 07/02/2023

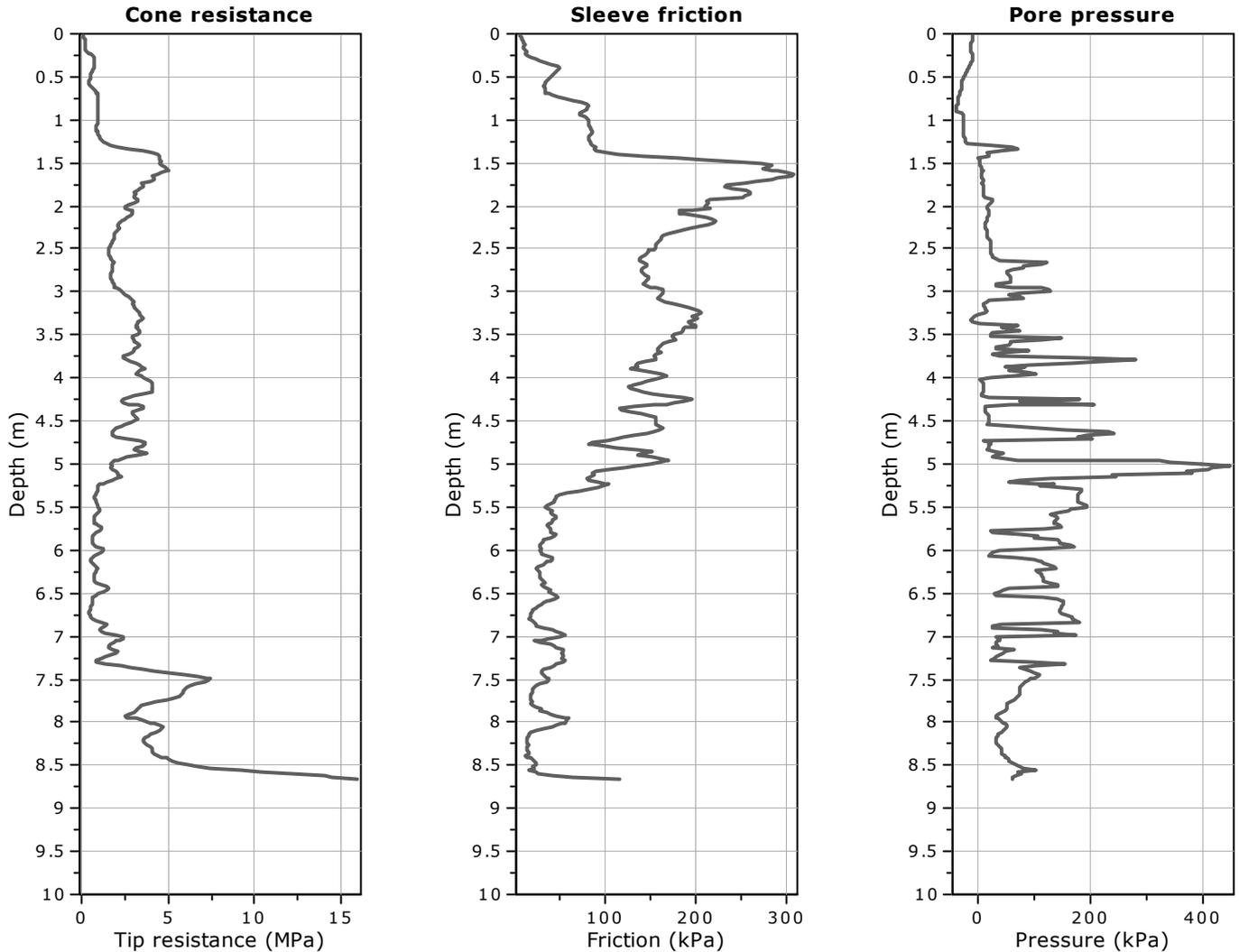
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

Coords: lat 44.5525636° lon 11.266891°



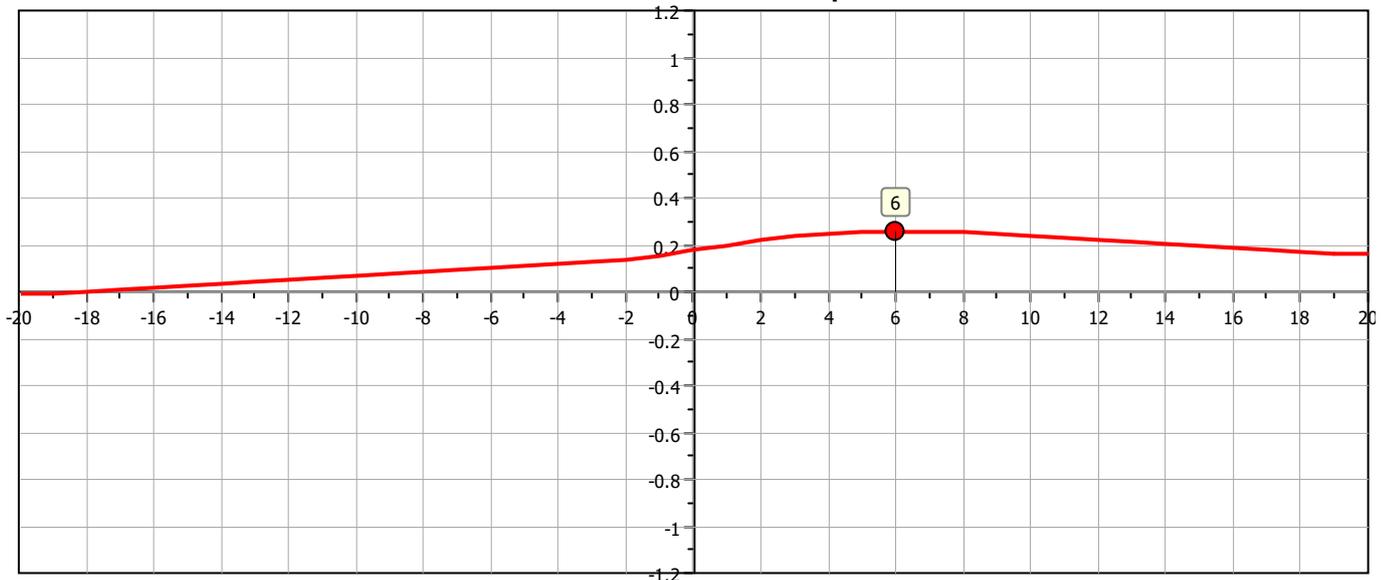
Project: Nuovo Capannone Benelli
Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

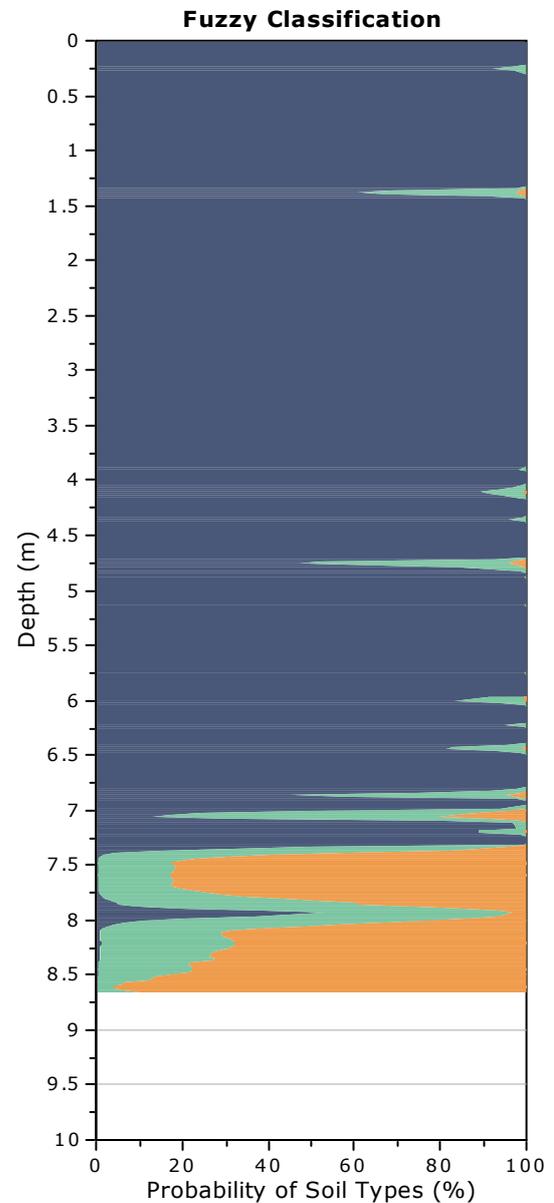
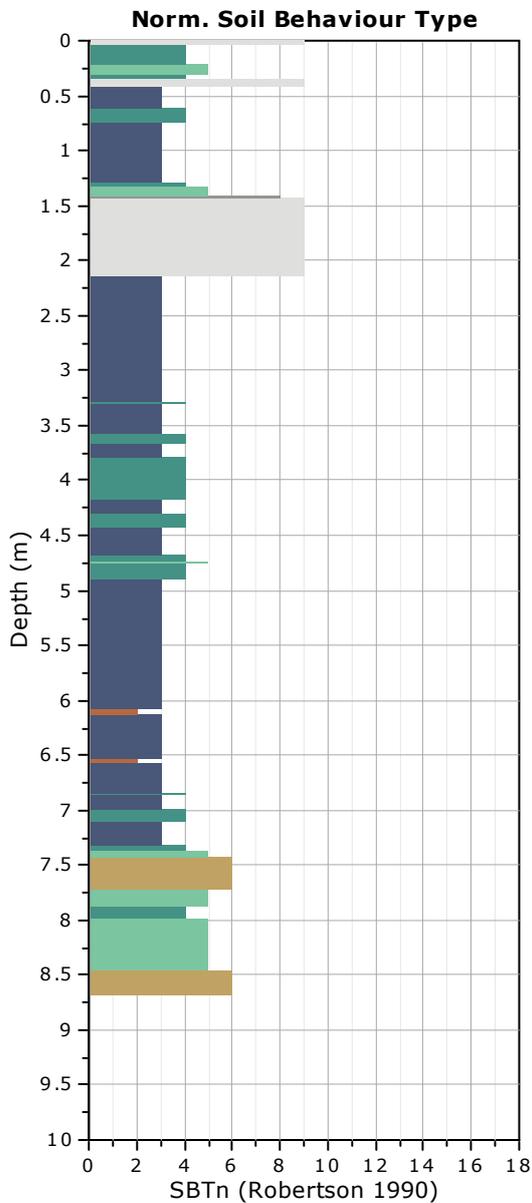
Total depth: 8.66 m, Date: 07/02/2023
Coords: lat 44.5523343° lon 11.2664538°



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

Cross correlation between q_c & f_s





Fuzzy classification legend

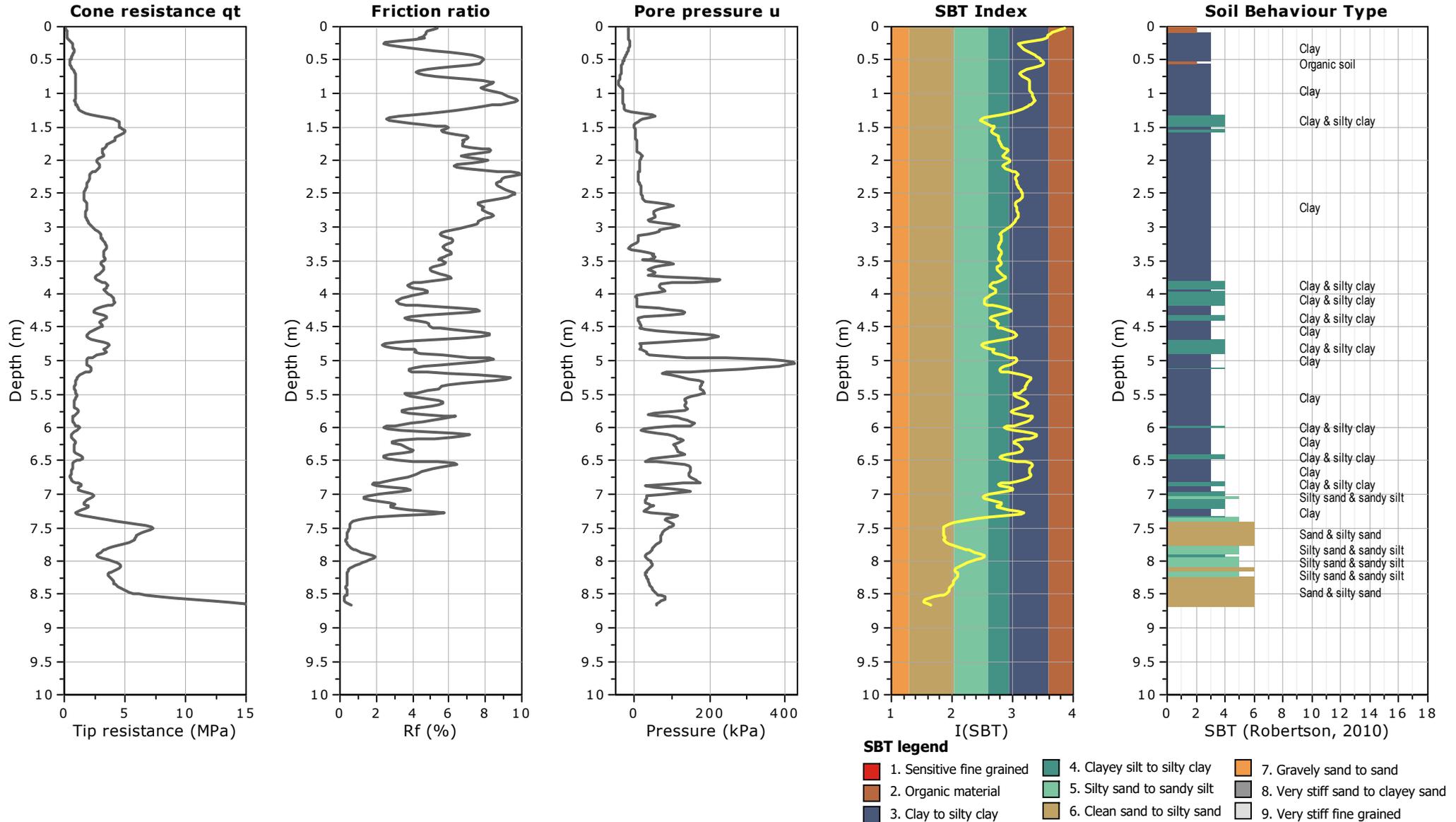
- Highly probable clayey soil
- Highly probable mixture soil
- Highly probable sandy soil

Project: Nuovo Capannone Benelli

Total depth: 8.66 m, Date: 07/02/2023

Location: Via Caduti di Ustica - Calderara di Reno (BO)

Coords: lat 44.5523343° lon 11.2664538°



ALLEGATO D

RELAZIONE SULLE INDAGINI SISMICHE (Re.Mi e HVSR)

Strumento utilizzato per Re.Mi: Moho “SoilSpy” – sismografo digitale

Strumento utilizzato per HVSR: Moho “Tromino” – tromografo digitale

1 LE ONDE SISMICHE DI SUPERFICIE

Le onde sismiche di superficie sono generate in caso di eventi sismici e si generano da fenomeni di rifrazione, riflessione, fenomeni di guida d'onda e dispersione. Sono definite 'onde di superficie' in quanto si propagano prevalentemente lungo l'interfaccia tra due materiali a differenti velocità di propagazione delle onde sismiche (interfaccia terra-aria). In particolare la loro **ampiezza decade in modo esponenziale con la profondità**, interessando quindi solo un limitato spessore superficiale, la cui profondità dipende dalla lunghezza d'onda considerata.

La distinzione riconosciuta in quest'ambito è tra due differenti tipologie: onde di Rayleigh, onde di Love, che prendono il nome dagli scienziati che le hanno teorizzate. Queste si distinguono sulla base del tipo di movimento che imprimono alla particella del mezzo in cui si propagano.

Osservando un accelerogramma è possibile notare come le onde di superficie mostrino un'ampiezza nettamente maggiore rispetto alle onde di volume (Onde P ed S). Le tecniche classiche di elaborazione dei segnali sismici considerano come "disturbo" la porzione di sismogramma in cui sono presenti le onde di superficie, mentre le nuove metodologie di analisi del segnale permettono di analizzare ed interpretare questa parte di 'disturbo' tramite un modello matematico.

1.1 INDAGINE SISMICA NEL SITO IN ESAME

Nel sito in esame sono state utilizzate in abbinata due indagini sismiche per lo studio delle onde di superficie che si sono ampiamente affermate in ambito scientifico e professionale negli ultimi anni. In particolare è stata impiegata la **tecnica passiva Re.Mi** e la **tecnica passiva HVSR**. Di seguito saranno brevemente descritte le due tipologie di indagine, facendo riferimento a cenni delle rispettive teorie sismiche ed alle metodologie inerenti alle acquisizioni.

1.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

1.2.1 Misura HVSR

Lo strumento utilizzato è un tromografo digitale portatile TROMINO, prodotto da Micromed S.p.A., nella versione *Engineering*. Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati secondo le tre componenti spaziali (N-S, E-W e Up-Down), che consentono di acquisizione digitale in alta definizione delle vibrazioni del terreno (ampiezze d'onda inferiori a 10 µm), nel campo delle frequenze 0 – 200 Hz. In seguito ad una registrazione, il segnale digitalizzato viene gestito tramite un software dedicato (**Grilla**), il quale esegue un'elaborazione per ognuna delle componenti del moto e ne fornisce i relativi grafici.

1.2.2 Indagine multicanale

Per la realizzazione della misura di **sismica passiva di tipo Re.Mi** è stato utilizzato lo stendimento "*SoilSpy*" dotato di 25 canali in cui il segnale è digitalizzato in corrispondenza dei singoli geofoni anziché alla fine dell'*array*, consentendo un utilizzo ed una messa in campo dello stendimento più semplici, incrementando la qualità del dato raccolto (sono ridotti al massimo i problemi di interferenze nel segnale elettrico). A ciascun canale può essere collegato un geofono (verticale o orizzontale) con frequenza propria di 4,5 Hz, ancorato al suolo tramite un puntale o una placca per i terreni sconnessi o rigidi. I segnali vengono registrati direttamente su pc tramite il *software* dedicato **Rosina**, che permette di intervenire per la correzione e verifica delle singole tracce. Gli accelerogrammi registrati vengono poi elaborati con

Grilla, che permette l’inversione della curva di dispersione abbinando la misura HVSR al modello. In particolare le misure sono state abbinare nel seguente modo:

- Re.Mi.1 + Tr1

2 REFRACTION MICROTREMOR (RE.MI.)

Il metodo Re.Mi. è un metodo sismico che studia le onde di superficie utilizzando il rumore ambientale come sorgente. Tale tecnica permette di ottenere una inversione del modello fisico del terreno fino a ricostruire un profilo sismico delle onde di taglio (S) del sito. Tale metodo consiste nell’analisi delle onde di superficie *Rayleigh*, registrate da una serie di geofoni posizionati a formare uno stendimento. A differenza di tutte le altre tecniche di indagine sismica, i metodi basati sull’analisi delle onde di superficie di *Rayleigh* non risultano limitati dalle inversioni di velocità; infatti la loro propagazione è funzione innanzitutto delle onde S e solo in parte legata alla Vp ed alla densità del mezzo, risultando così un ottimo strumento per la caratterizzazione sismica del sito tramite la ricostruzione del profilo di Vs, come previsto dalla vigente normativa (NTC’18).

L’utilizzo della tecnica Re.Mi. risulta un ottimo compromesso negli ambienti urbani caratterizzati da intenso rumore sismico, che per le altre tecniche sismiche classiche risulta un disturbo tale da poter compromettere la buona riuscita della prova.

2.1 METODOLOGIA DI MISURA

Lo strumento *SoilSpy*, costituito da un cavo dotato di 25 moduli a cui collegare altrettanti geofoni, permette di realizzare stendimenti sismici tradizionali di una lunghezza massima di 125 m (25 x 5 m di interdistanza), con ogni configurazione spaziale possibile.

In particolare nel sito si è predisposto uno stendimento dotato di 8 geofoni con interdistanza di 3 m (totale lunghezza stendimento = 24 m). Il software di acquisizione dei dati (**Rosina**) permette di realizzare una registrazione della lunghezza desiderata, inseguito interpretata con il software proprietario Grilla.

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

Re.Mi.1	
Inizio registrazione	13/02/23 12:28:28
Fine registrazione	13/02/23 12:33:28
Lunghezza della traccia	5’00”
Frequenza di campionamento	1024 Hz
Lunghezza stendimento	36 m
N° geofoni	13

Tabella 1: descrizione tecnica della misura.

Di seguito sono riportati i segnali sismici registrati.

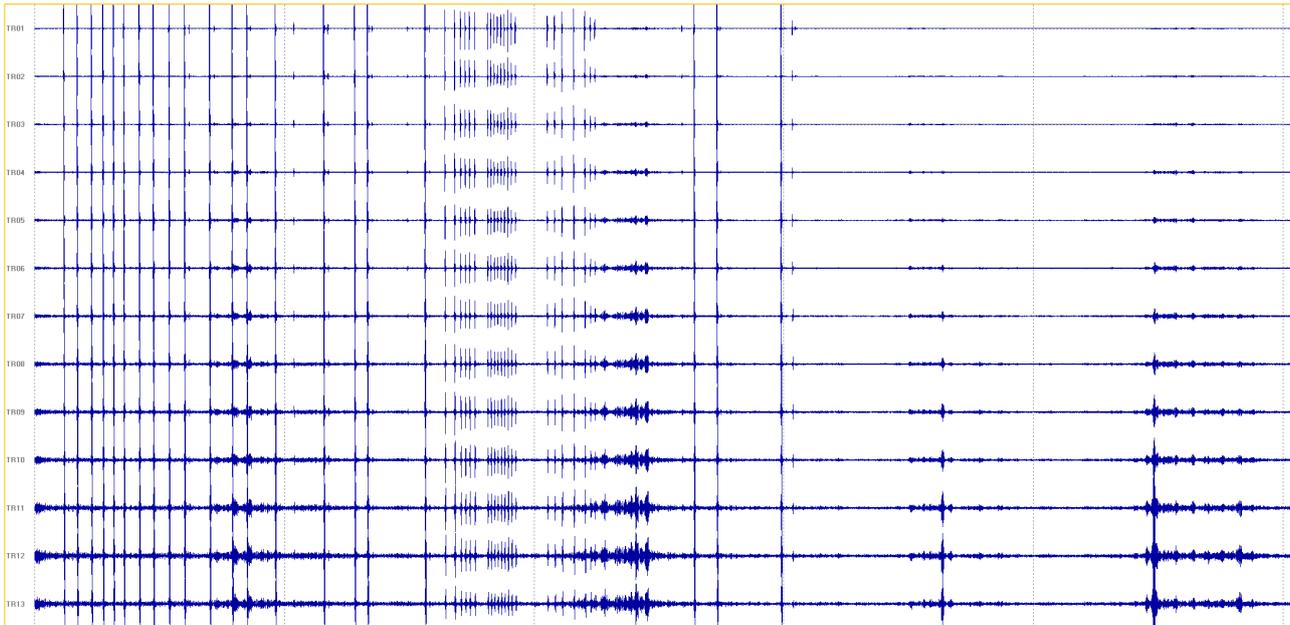


Figura 1: registrazione delle tracce dei geofoni.

La curva di dispersione fornisce, per mezzo di una scala cromatica, l'intensità dell'energia delle onde di Rayleigh alle varie frequenze (f – asse delle ascisse) e la relativa velocità delle onde (asse delle ordinate).

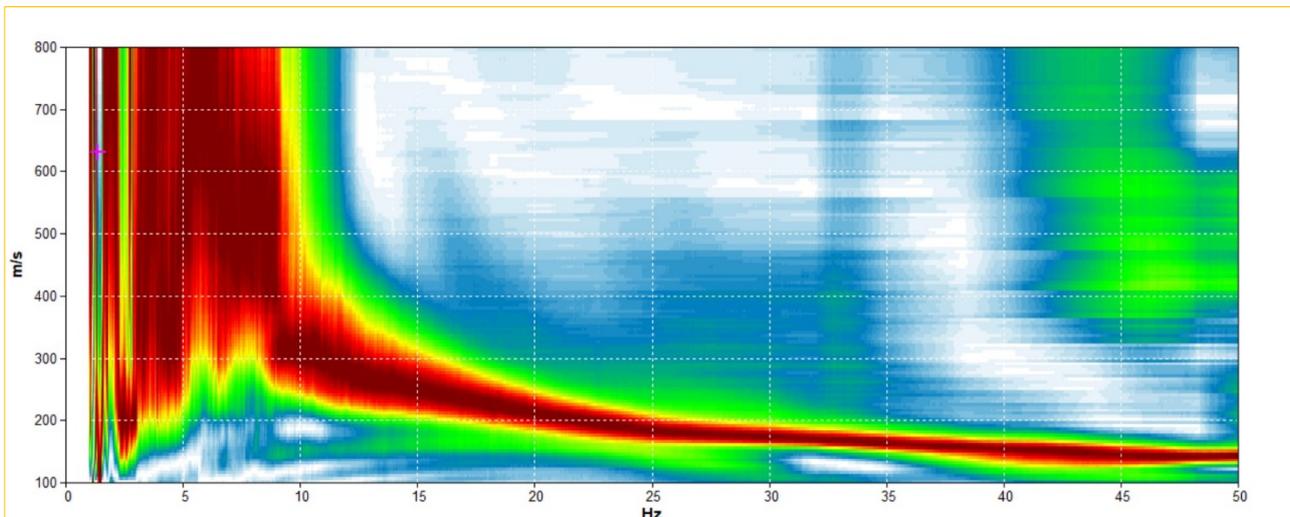


Figura 2: curva di dispersione del sito.

3 HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr)

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

Le vibrazioni sismiche ambientali (microtremore) sono onde sismiche di bassa energia con ampiezze dell'ordine di 10^{-4} ÷ 10^{-2} mm (Okada, 2003). L'origine del rumore sismico è riconducibile ad esempio alle perturbazioni atmosferiche sugli oceani che si propagano come onde superficiali sui continenti, mentre le sorgenti dei microtremori sono le attività antropiche e si propagano come onde superficiali di Rayleigh. I metodi che si basano sull'acquisizione e l'elaborazione

di tale “rumore” si dicono ‘passivi’ in quanto le vibrazioni non risultano quindi localizzate e fornite *ad hoc*, come per le tecniche di simica attiva (con le apposite energizzazioni).

3.1 METODOLOGIA DI MISURA – Tr1

È stata effettuata inoltre una misura di sismica passiva; lo strumento è stato posizionato al di sopra di una superficie resa idonea dall’operatore, al fine di permettere il perfetto accoppiamento tra lo strumento ed il terreno.

Tr1	
Inizio registrazione	13/02/23 12:56:25
Fine registrazione	13/02/23 13:16:25
Lunghezza della traccia	20'00"
Frequenza di campionamento	128 Hz
Dimensione della finestra di suddivisione del tracciato	12 sec
Percentuale di traccia analizzata	87%
Lisciamento	10%

Tabella 2: descrizione tecnica della misura.

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

L’elaborazione del segnale ha previsto i seguenti passaggi:

- analisi delle tre componenti del segnale con suddivisione in finestre opportunamente dimensionate (*Windows Size*);
- depurazione del segnale da rumori anomali (*Detrend*);
- calcolo dello spettro di ampiezza per ciascuna finestra;
- lisciamento dello spettro di ogni finestra (*Smoothing*);
- calcolo della trasformata di *Fourier* (FFT) per ciascuna finestra;
- calcolo del rapporto spettrale HVSR per ogni frequenza e per ogni finestra.

Per procedere con l’interpretazione della misura tomografica eseguita, è stata effettuata una selezione delle finestre da utilizzare per l’analisi (serie temporale H/V), in quanto alcune di esse presentavano disturbi che interferivano e rendevano poco chiari i risultati grafici.

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

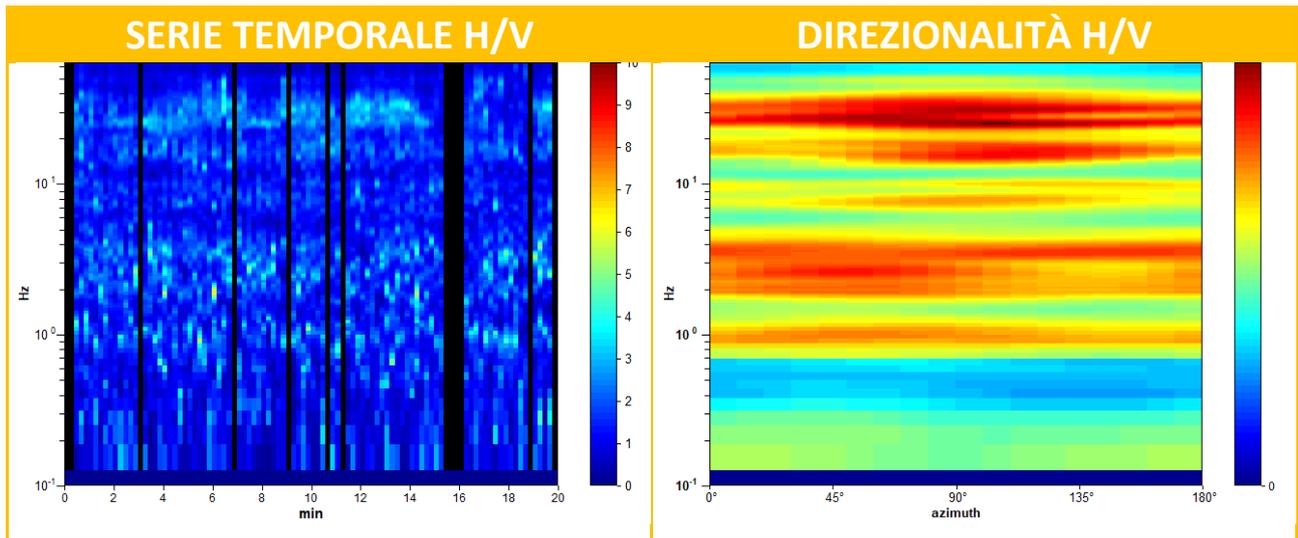


Figura 3: Grafico della serie temporale H/V (sinistra) e grafico della direzionalità H/V (destra) relativi alla misura Tr1.

Osservando gli spettri delle singole componenti è possibile notare, dall'andamento uniforme delle tre linee (fig. 3), come la misura sia stata eseguita correttamente, effettuando un buon accoppiamento tra strumento e terreno.

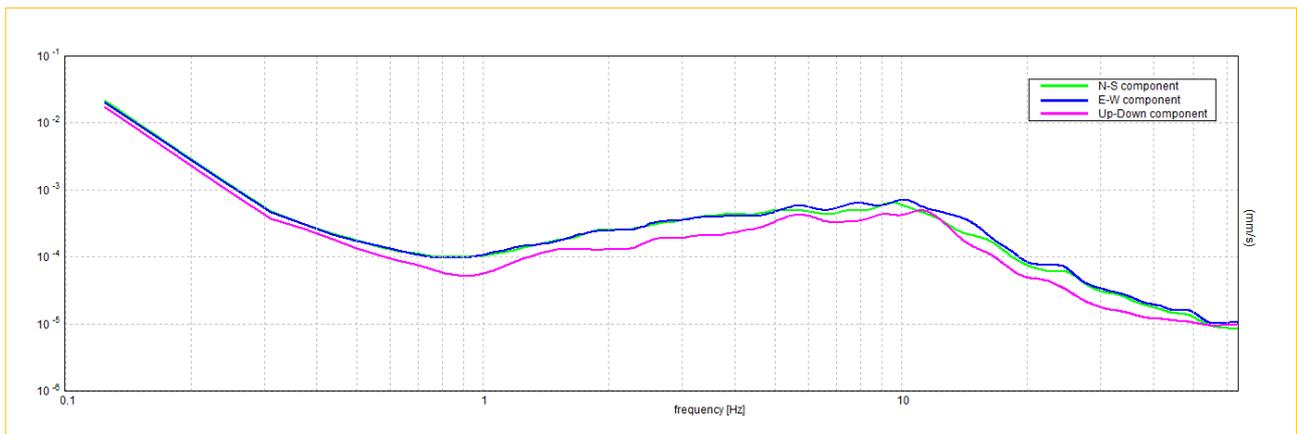


Figura 4: Grafico delle componenti ortogonali della misura Tr1.

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

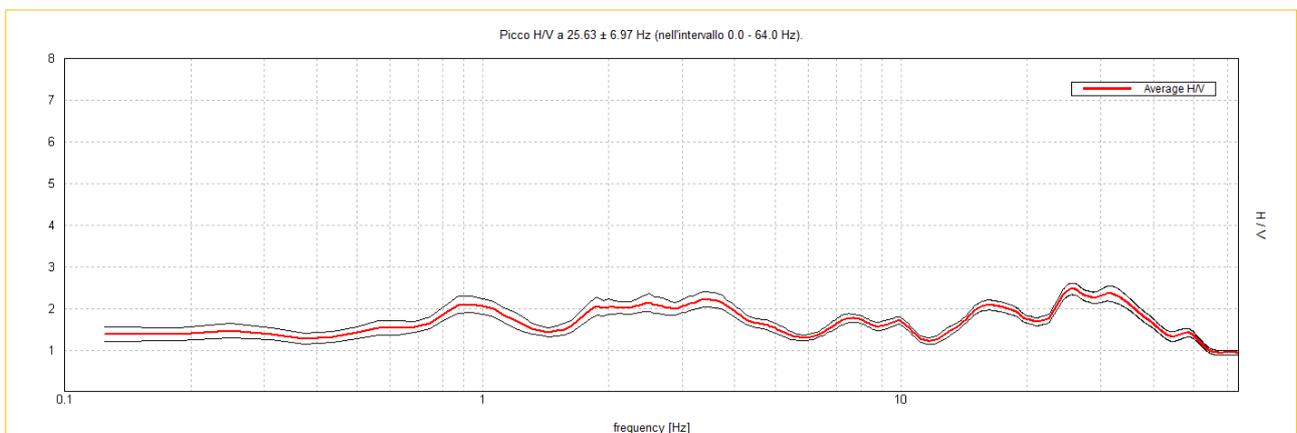


Figura 5: Diagramma HVSR relativo alla misura Tr1.

4 INTERPRETAZIONE COMBINATA DELLE MISURE SISMICHE

4.1 RE.MI 1 E TR1

Il *software* utilizzato per l'analisi delle tracce permette l'elaborazione sincrona dei due tipi di misura. È possibile quindi ricostruire il profilo sismico delle onde S utilizzando i dati di entrambe le indagini.

L'**interpretazione** della curva di dispersione consiste nell'ottenere una **curva sintetica** di dispersione che riesca a riprodurre al meglio quella registrata, facendo attenzione ad osservare i cambi di pendenza. Il grafico H/V si elabora generando una **curva sintetica** in grado di riprodurre al meglio la curva reale ed in particolare i punti di massimo locale significativi della misura registrata.

Di seguito si riportano i grafici della curva di dispersione ottenuta dalla tecnica Re.Mi. e la curva H/V ottenuta dall'analisi della registrazione dei microtremori, ai quali è applicata la curva sintetica corrispondente al profilo sismico ottenuto dall'interpretazione delle tracce. Inoltre si riporta il profilo sismico in forma tabellare e grafica ottenuto dall'interpretazione combinata delle due indagini.

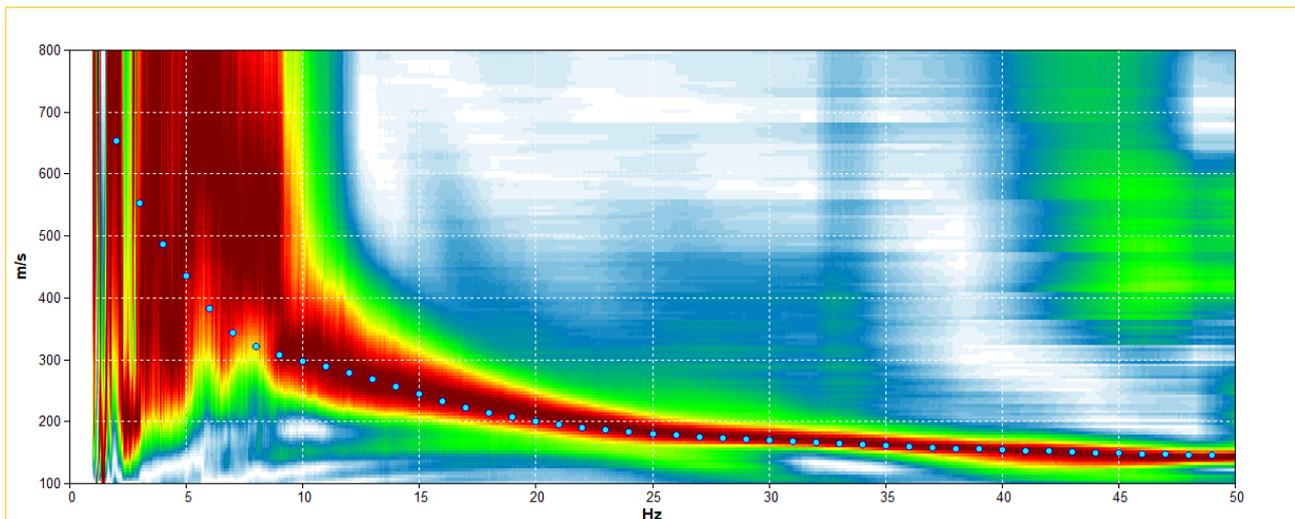


Figura 6: Grafico della curva di dispersione con sovrapposta la curva generata dal profilo sismico.

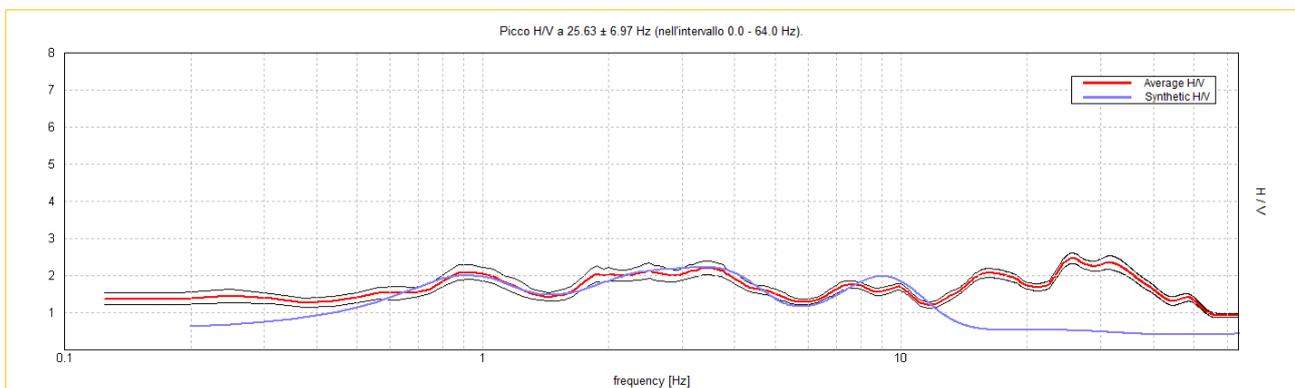


Figura 7: Grafico della curva H/V con sovrapposta la curva generata dal profilo sismico.

Sismostrato	Profondità dello strato [m]	Spessore dello strato [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
1	1.50	1.50	140	0.48
2	4.50	3.00	190	0.47
3	8.00	3.50	270	0.46
4	26.00	18.00	340	0.44
5	80.00	54.00	550	0.41
6	215.00	135.00	740	0.37
7	inf.	inf.	1080	0.32

Tabella 3: profilo sismostratigrafico del modello sismico.

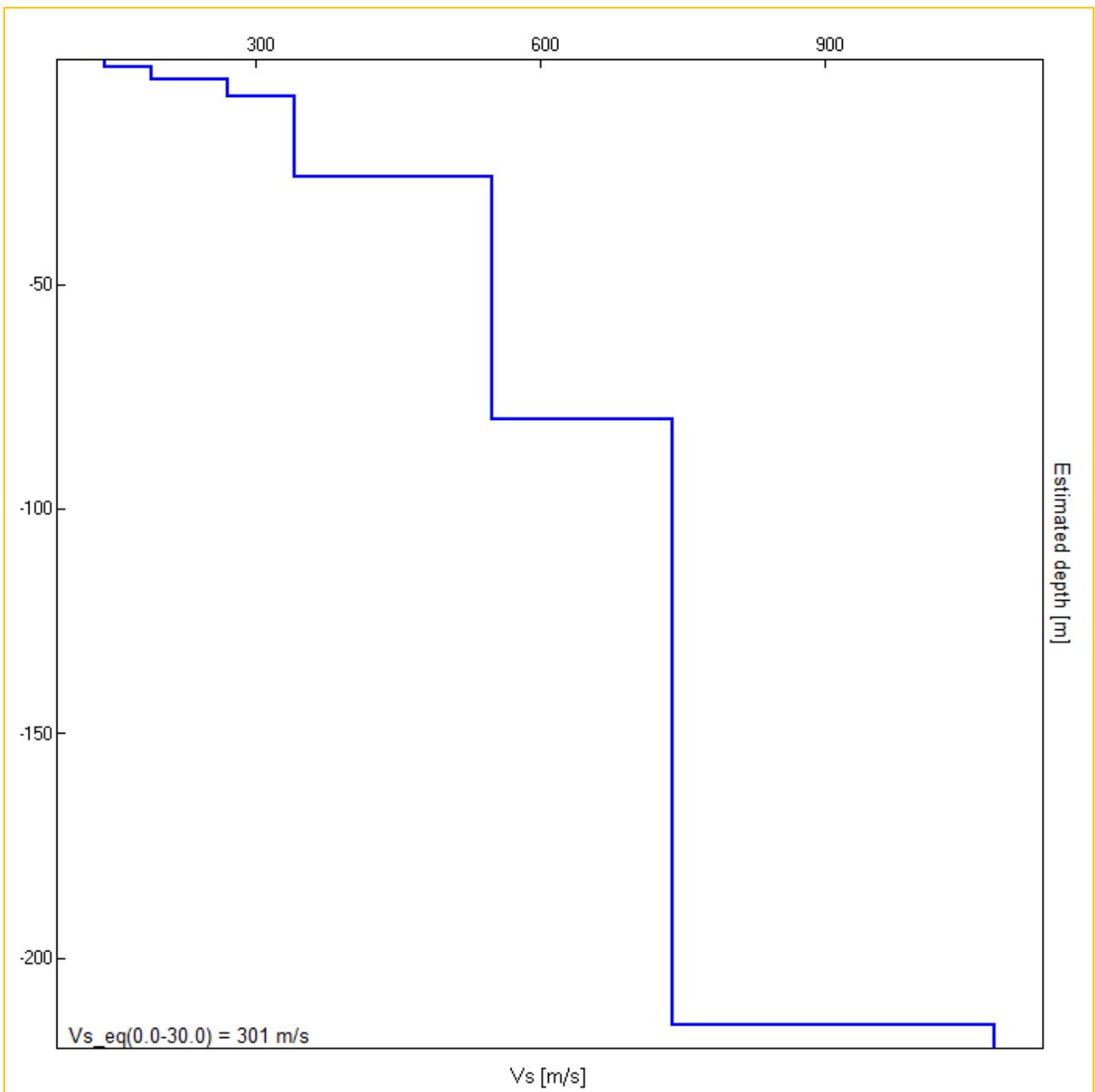


Figura 8: profilo sismostratigrafico del modello sismico.