



COMUNE DI CASTELVERDE

Piazza municipio, 23

26022 - Castelveverde (CR)

P.IVA 00299440198



Finanziato
dall'Unione Europea
NextGenerationEU

FUTURA LA SCUOLA
PER L'ITALIA DI DOMANI



Next Generation EU Missione 4 C1 "Istruzione e ricerca"
Investimento 3.3 - Piano di messa in sicurezza e
riqualificazione delle scuole
LAVORI DI ADEGUAMENTO SISMICO DELLA SCUOLA
DELL'INFANZIA "IL GIRASOLE" DI SAN MARTINO IN
BELISETO IN COMUNE DI CASTELVERDE
CUP: E95J19000290009

PARTE GENERALE

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

COD: **PE.01.04**

SCALA:

REV.	DESCRIZIONE	REDATTO		VERIFICATO	
0	EMISSIONE	MARIOTTI	03/2023		

CODIFICA DOCUMENTO:

GEO.PDF

Questo documento non potrà essere copiato, riprodotto o altrimenti pubblicato in tutto o in parte senza il consenso scritto di Ing. Fabio Scaroni

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO IL GEOLOGO

IL PROGETTISTA :

Ing. PAOLO ORLANDI

Dott. Geol Roberto Mariotti Ing. FABIO SCARONI

Corso Garibaldi, 95

26100 Cremona

tel/fax: 0372-23266

drmariotti.roberto@libero.it

Via G.A. Poli, 100

25018 Montichiari (BS)

Tel 030-9651824

mail: scaronicimarosti@yahoo.it



COMMESSA: 480/2023

PROGETTO ESECUTIVO

REGIONE LOMBARDIA

PROVINCIA DI CREMONA

COMUNE DI CASTELVERDE

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE DEGLI INTERVENTI DI ADEGUAMENTO
SISMICO DELL'IMMOBILE OSPITANTE LA SCUOLA DELL'INFANZIA "IL GIRASOLE"
SITA IN LOCALITÀ SAN MARTINO IN BELISETO IN COMUNE DI CASTELVERDE (CR)



Committente:	Data:
<p>Spett.le</p> <p>UNIONE DI COMUNI LOMBARDA "TERRA DI CASCINE"</p> <p>Piazza Municipio, 23 26022 Castelveverde (CR)</p>	<p>Aprile 2022</p>
Il tecnico:	
<p><i>Dott. Roberto Mariotti</i> <i>Geologo Specialista</i></p> <p>Corso Garibaldi, 95 – 26100 Cremona (CR) tel/fax: 0372-23266 tel: 335-6958159 e-mail: drmariotti.roberto@libero.it pec: mariottiroberto@epap.sicurezza postale.it</p>	A circular professional stamp for Roberto Mariotti, a geologist specialist. The stamp includes his name, title, and professional registration details (Albo n. 1545 AP, Sezione A). There is a signature over the stamp.

E

UNIONE DEI COMUNI LOMBARDA TERRA DI CASCINE

Protocollo N.0002868/2022 del 30/04/2022

SOMMARIO

1 – PREMESSA.....	1
2 – RIFERIMENTI NORMATIVI.....	3
3 – INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO.....	4
4 – INQUADRAMENTO IDROGRAFICO ED IDROGEOLOGICO.....	4
5 – VINCOLI GEOLOGICI E FATTIBILITÀ GEOLOGICA	5
6 – MODELLAZIONE SISMICA.....	6
6.1 – Inquadramento sismico e pericolosità sismica.....	6
6.2 – Pericolosità sismica locale.....	6
6.3 – Valutazione degli effetti di amplificazione secondo d.g.r. 2616/2011.....	13
6.4 – Verifica della pericolosità sismica del sito di costruzione.....	16
6.5 – Verifica della liquefazione dei terreni di fondazione.....	18
7 – CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA.....	21
8 – CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	23

Allegati nel testo

- All. 1 – Inquadramento geologico e geomorfologico – scala 1: 10.000
- All. 2 – Inquadramento idrografico ed idrogeologico – scala 1: 10.000
- All. 3 – Ubicazione indagini
- All. 4 – Indagine sismica con metodo congiunto MASW-ESAC – Rapporto tecnico
- All. 5 – Risultati grafici e tabulati indagini sismiche HVSR
- All. 6 – Approfondimento sismico di 2° livello
- All. 7 – Verifica della liquefazione dei terreni in condizioni sismiche
- All. 8 – Diagrammi, tabulati ed elaborazioni delle indagini penetrometriche
- All. 9 – Documentazione fotografica

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

1 – PREMESSA

La presente relazione geologica e sismica è stata redatta, dietro incarico della Committenza, a supporto della progettazione degli interventi di adeguamento sismico dell'immobile ospitante la Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" sita in località San Martino in Beliseto in Comune di Castelveverde (CR), censito al catasto al Fg. 5 Mapp. 211.

L'edificio in oggetto è una costruzione alla quale, secondo la suddivisione riportata nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018), può essere assegnata la classe d'uso **Classe III**, alla quale appartengono costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi.

L'opera in esame è di **tipo 2** (costruzioni con livelli di prestazioni ordinari), a cui corrisponde una vita nominale minima $V_N = 50$ anni.

L'area oggetto di intervento, all'interno dello studio geologico di supporto al Piano di Governo del Territorio (P.G.T.) del Comune di Castelveverde (CR), è stata assegnata alla **classe di fattibilità geologica 2** (fattibilità con modeste limitazioni).

Per le aree ricadenti in tale classe e per qualsiasi intervento che interessi i suoli di fondazione, le "Norme Geologiche di Attuazione" del P.G.T. e le NTC2018 dispongono obbligatoriamente l'esecuzione di approfondimenti geologici, geotecnici, idrogeologici e sismici, da eseguire con indagini geognostiche in sito e con relazione geologica, geotecnica, idrogeologica e sismica, che puntualmente stabiliscano la soggiacenza e la massima escursione della falda, la natura e le caratteristiche geotecniche dei terreni.

Verificate e valutate le prescrizioni riportate nel P.G.T. comunale e nelle vigenti NTC2018, al fine di caratterizzare dal punto di vista litostratigrafico, idrogeologico e geologico-tecnico i terreni di fondazione dell'edificio in esame sono state realizzate n. 2 prove penetrometriche statiche CPTu con punta elettrica e piezocono di elevata qualità ed affidabilità, spinte sino alla profondità di circa m. 10,00 da p.c., in grado di fornire adeguate informazioni finalizzate alla progettazione degli interventi.

Attraverso la caratterizzazione litostratigrafica, idrogeologica e geologico-tecnica dei terreni di fondazione è stato definito il modello geologico di riferimento del sito di intervento, propedeutico alla definizione del modello geotecnico del sottosuolo ed alle verifiche geotecniche di sicurezza.

In ottemperanza alla normativa sono stati inoltre analizzati i principali aspetti geologici, geomorfologici, idrografici, idrogeologici, vincolistici e sismici del territorio, al fine di individuare eventuali elementi di vulnerabilità e pericolosità.

In riferimento alla caratterizzazione sismica dell'area è stata verificata la pericolosità sismica del sito in esame relativamente sia agli effetti di amplificazione del segnale sismico, attraverso l'esecuzione di indagini sismiche su terreno (n. 2 prove MASW, n. 1 prova ESAC, n. 3 prove HVSR), sia agli effetti di instabilità (liquefazione) cui sono potenzialmente soggetti i terreni di fondazione in condizioni sismiche.

2 – RIFERIMENTI NORMATIVI

Si fornisce di seguito l'elenco della normativa di riferimento consultata per la realizzazione della presente relazione.

- **D.M. 17 gennaio 2018 (NTC2018)** “*Norme Tecniche per le Costruzioni*”.
- **O.P.C.M. 20 marzo 2003 n. 3274** “*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*”, e succ. modifiche e integrazioni.
- **O.P.C.M. 28 aprile 2006 n. 3519** “*Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*”.
- **D.G.R. 11 luglio 2014 n. X/2129** “*Aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia (l.r. 1/2000, art. 3, c. 108, lett. d)*”.
- **D.G.R. 10 ottobre 2014 n. X/2489** “*Differimento del termine di entrata in vigore della nuova classificazione sismica del territorio approvata con d.g.r. 11 luglio 2014 n. 2129*”.
- **D.G.R. 8 ottobre 2015 n. X/4144** “*Ulteriore differimento del termine di entrata in vigore della nuova classificazione sismica del territorio approvata con d.g.r. 11 luglio 2014 n. 2129*”.
- **L.R. 12 ottobre 2015 n. 33** “*Disposizioni in materia di opere o di costruzioni e relativa vigilanza in zone sismiche*”.
- **D.G.R. 30 marzo 2016 n. X/5001** “*Approvazione delle linee di indirizzo e coordinamento per l'esercizio delle funzioni trasferite ai comuni in materia sismica (artt. 3, comma 1, e 13, comma 1, della l.r. 33/2015)*”
- **Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile** “*Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica*”.
- **L.R. 11 marzo 2005 n. 12** “*Legge per il governo del territorio*”.
- **D.G.R. 30 novembre 2011 n. 9/2616** “*Aggiornamento dei criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell'art. 57, comma 1, della L.R. 11 marzo 2005 n. 12*”.
- **Regolamento Regionale 23 novembre 2017 n. 7** “*Regolamento recante criteri e metodi per il rispetto del principio dell'invarianza idraulica ed idrologica ai sensi dell'articolo 58bis della legge regionale 11 marzo 2005, n. 12 (Legge per il governo del territorio)*”.
- **Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (P.T.C.P.)** – approvato con delibera di C.P. n. 95 del 9 luglio 2003.
- **Variante del P.T.C.P. di adeguamento alla l.r. 12/05** – approvata con delibera di C.P. n. 66 del 8 aprile 2009.
- **Piano di Governo del Territorio (P.G.T.) del Comune di Castelveverde e succ. Var.** – approvato dal Consiglio Comunale con deliberazione n. 71 del 11 dicembre 2009.

3 – INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

Gli aspetti geologici e geomorfologici principali del contesto territoriale in esame sono stati analizzati sulla base delle informazioni derivanti dalla cartografia geologica ufficiale (Fig. 61 “Cremona” della Carta Geologica d’Italia alla scala 1:100.000) e dalle relative note illustrative (Petrucci & Tagliavini, 1969).

Come rappresentato nella cartografia di All. 1, l’area di intervento è caratterizzata dai depositi alluvionali di origine continentale appartenenti alla formazione geologica pleistocenica denominata “*Fluviale Würm (f^W)*”, costituita da terreni prevalentemente limoso sabbiosi e sabbioso limosi, con presenza di un suolo superficiale che rappresenta lo strato coltivato.

Tali depositi alluvionali definiscono il cosiddetto “*Livello Fondamentale della Pianura (L.F.P.)*”, ripiano terrazzato che si sviluppa per la maggior parte della pianura cremonese a quote superiori rispetto alle valli fluviali attuali e passate, testimonianza dell’ultima grande fase di colmamento detritico postglaciale della pianura.

Sono rappresentate in cartografia tracce di antichi corsi d’acqua (paleoalvei), completamente rimaneggiati dall’intervento antropico.

L’area in esame, che si sviluppa su un terreno pianeggiante, non è soggetta a rischio geologico e geomorfologico.

4 – INQUADRAMENTO IDROGRAFICO ED IDROGEOLOGICO

Come rappresentato nella cartografia di All. 2 il contesto territoriale in esame è caratterizzato dalla presenza di corsi d’acqua che si sviluppano in direzione prevalentemente N-S ed O-E, con funzione promiscua di irrigazione e di colto.

Si sottolinea che l’area in esame non rientra nelle zone soggette a pericolosità idraulica ed a rischio idraulico, così come rappresentate nelle mappe di pericolosità e nelle mappe di rischio del “*Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA)*”, predisposto dalla Regione Lombardia in attuazione della Direttiva 2007/60/CE “*Direttiva Alluvioni*” e del d.lgs. 49/2010 ed approvato dal Comitato Istituzionale dell’Autorità di Bacino del fiume Po, aggiornamento ed integrazione del quadro conoscitivo rappresentato negli Elaborati del P.A.I., all’interno delle quali sono contenute rispettivamente la delimitazione/classificazione delle aree allagabili e la classificazione del grado di rischio al quale sono soggetti gli elementi esposti.

* * *

L'assetto idrostratigrafico del sottosuolo del territorio analizzato è quello tipico della pianura alluvionale, caratterizzato da depositi continentali Quaternari che definiscono acquiferi permeabili multistrato a spessore variabile, costituiti in prevalenza da sabbie grossolane e ghiaie poligeniche di elevata permeabilità, alternati a livelli argillosi impermeabili a sviluppo lenticolare o continuo, che si estendono per uno spessore complessivo di alcune centinaia di metri al di sopra dei fronti di avanzamento sepolti del Sistema Sudalpino ed Appenninico; tali caratteristiche sono tipiche delle unità idrogeologiche appartenenti alla “*Serie idrogeologica della medio-bassa pianura*” della provincia cremonese, ciascuna delle quali raggruppa i terreni che presentano proprietà idrogeologiche omogenee.

Per valutare la direzione di flusso della falda freatica che circola nell'acquifero superficiale sono state riprodotte in All. 2, aggiornate con dati di soggiacenza del livello piezometrico della falda disponibili presso lo scrivente, le curve isofreatiche rappresentate nella “*Carta idrogeologica*” dello studio geologico a supporto del P.G.T. comunale, con equidistanza pari a m. 1,00.

Dall'analisi dell'andamento delle curve isofreatiche, che rappresentano la quota assoluta del livello piezometrico della falda superficiale, si evince un andamento del flusso delle acque sotterranee in direzione NNO-SSE, attratte dal sistema drenante del fiume Po, con il quale sono in contatto idraulico.

Gli interventi in progetto non influenzeranno in alcun modo le risorse idriche estratte a scopi idropotabili dagli acquiferi intermedi e profondi.

5 – VINCOLI GEOLOGICI E FATTIBILITÀ GEOLOGICA

Per verificare la presenza di vincoli geologici all'interno dell'ambito in esame sono stati consultati i piani di programmazione e pianificazione comunale, provinciale, regionale e sovraregionale.

Dall'analisi di tale documentazione e della relativa cartografia allegata emerge che in prossimità dell'edificio in oggetto è presente un pozzo pubblico per approvvigionamento idropotabile (zona di tutela assoluta e di rispetto: 10 m), che tuttavia non impedisce/limita la realizzazione degli interventi in progetto.

* * *

In riferimento alla fattibilità geologica, l'area in oggetto all'interno dello studio geologico a supporto del P.G.T. comunale è stata inserita in **Classe di Fattibilità Geologica 2** (fattibilità con modeste limitazioni), che comprende i terreni del Livello Fondamentale della Pianura caratterizzati da soggiacenza della falda superiore a 2,00 m, da vulnerabilità variabile da medio-bassa a medio-alta e da caratteristiche geotecniche generalmente buone.

L'area di intervento è stata inoltre inserita all'interno dello scenario sismico **PSLZ4a**, che caratterizza le zone con terreni potenzialmente soggetti a fenomeni di amplificazione del segnale sismico di base.

6 – MODELLAZIONE SISMICA

6.1 – INQUADRAMENTO SISMICO E PERICOLOSITÀ SISMICA

Il territorio comunale di Castelveverde (CR), in seguito all'O.P.C.M. 20 marzo 2003 n. 3274 ed alla d.g.r. 14964/03 della Regione Lombardia, è stato classificato in Zona Sismica 4.

Successivamente, l'O.P.C.M. 3519/2006 ha stabilito che la nuova suddivisione in zone sismiche da parte della Regione Lombardia deve avere come riferimento una nuova mappa di pericolosità sismica, allegata all'O.P.C.M., nella quale vengono espressi i valori di accelerazione sismica di picco orizzontale del suolo (a_g) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, risultato di valutazioni relative alla **pericolosità sismica** che hanno avuto come riferimento la **zonazione sismogenetica ZS9**, realizzata per tutto il territorio nazionale dall'I.N.G.V. (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Gruppo di lavoro MPS 2004).

In accordo con le disposizioni normative nazionali e coerentemente con la mappa di pericolosità sismica, la Giunta Regionale ha approvato, con d.g.r. 11 luglio 2014 n. X/2129, l'aggiornamento delle zone sismiche in Regione Lombardia, entrato ufficialmente in vigore dal **10 aprile 2016**.

Pertanto a seguito di tale aggiornamento in territorio comunale, riclassificato in **Zona Sismica 3**, dovrà essere adottato un regime normativo più restrittivo e maggiormente attento alla componente sismica sia a livello di pianificazione che di progettazione degli interventi.

6.2 – PERICOLOSITÀ SISMICA LOCALE

Allo stato attuale il concetto di zonazione sismica è stato totalmente superato, sostituito da un approccio di tipo quantitativo-probabilistico ed interpolatorio-deterministico che ha portato alla definizione ed alla realizzazione, come riportato in precedenza, di un reticolo di riferimento su tutto

il territorio nazionale, risultato di valutazioni relative alla pericolosità sismica che hanno avuto come riferimento la zonazione sismogenetica ZS9.

Per la definizione dell'azione sismica di progetto di un sito specifico, è necessario valutare l'influenza delle condizioni geologiche e geomorfologiche della zona (condizioni locali) sulla pericolosità sismica di base, valutando sia gli **effetti di amplificazione** che può subire il moto sismico di riferimento che gli **effetti di instabilità** cui sono sottoposti i terreni di fondazione se sottoposti ad una sollecitazione sismica.

Come riportato in precedenza, la pericolosità sismica di base, che presenta una discreta variabilità anche all'interno di uno stesso territorio, è definita attraverso il valore dell'accelerazione sismica orizzontale massima del suolo a_g su suolo rigido orizzontale in condizioni di campo libero (free field, assenza di manufatti) nonché in termini di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, ed è funzione dei parametri sismici (a_g , F_0 , T_c^*) che per ciascuna delle probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R (espresso in anni) definiscono le forme spettrali dell'azione sismica di progetto.

L'amplificazione dell'azione sismica di base è legata alle condizioni topografiche e stratigrafiche di uno specifico sito, in relazione ai potenziali effetti di riflessione multipla, risonanza e doppia risonanza delle onde sismiche, che tendono ad amplificare localmente le azioni sismiche trasmesse dal terreno (effetti di sito).

Si rende pertanto necessaria la valutazione della **“risposta sismica locale”** del sito di intervento, al fine di determinare l'azione sismica di progetto, a seguito delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza subite dall'azione sismica di base trasmettendosi dal substrato rigido sino alla superficie topografica.

Nel caso in esame, essendo l'area di intervento pianeggiante, non devono essere considerati gli effetti di amplificazione topografica; l'area di progetto appartiene difatti alla **categoria topografica T1**, alla quale corrisponde un coefficiente topografico $S_T=1,0$ (assenza di amplificazione topografica), come riportato nelle NTC18 (Tab. 3.2.V).

La risposta sismica locale del sito di costruzione è pertanto legata esclusivamente agli effetti di amplificazione stratigrafica del segnale sismico di riferimento.

Come previsto nelle NTC18 (par. 3.2.2), la valutazione dell'amplificazione stratigrafica necessaria alla definizione dell'azione sismica di progetto, in alternativa a specifiche analisi di risposta sismica locale, può essere effettuata con riferimento alle **categorie di sottosuolo** (approccio semplificato), la cui individuazione si basa sui valori della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s .

Per depositi con profondità del substrato (formazione costituita da roccia o terreno molto rigido caratterizzata da $V_s \geq 800$ m/s) superiore a 30 m dal piano di imposta delle fondazioni superficiali o dalla testa dei pali la velocità equivalente $V_{s,eq}$ delle onde di taglio è definita dal parametro V_{s30} .

Ai fini della determinazione del valore della V_{s30} , necessario per la definizione della categoria di sottosuolo dell'area in esame, è stata realizzata per conto dello scrivente dal Dott. Geol. Alberto Lepori un'indagine sismica condotta con metodo “**ESAC**” (Extended Spatial Autocorrelation), tecnica “passiva” basata sulla registrazione del rumore sismico indotto da attività antropiche, e con metodo “**MASW**” (Multichannel Analysis of Surface Waves), tecnica “attiva” basata sulla misura delle onde superficiali (onde di Rayleigh).

Con il metodo ESAC l'acquisizione dei dati per la determinazione della V_{s30} è stata svolta tramite la registrazione del “noise” (rumore) ambientale utilizzando geofoni da 4.5 Hz ed un acquisitore digitale multicanale a 24 canali con dinamica a 24bit, attraverso il quale è stato acquisito un profilo sismico costituito da uno stendimento con geometria ad L costituito da 24 geofoni equispaziati di 5 m e sono stati raccolti 10 records di lunghezza di 60 sec l'uno con campionamento ogni 1.0 ms.

Con il metodo MASW l'acquisizione dei dati è stata svolta utilizzando il tratto di stendimento sismico della prova ESAC compreso tra i geofoni 1 e 10 ed il tratto di stendimento sismico compreso tra i geofoni 10 e 24; la lunghezza delle registrazioni è stata di 1 sec, con passo di campionamento di 0.250ms. L'energizzazione, realizzata a distanza di 5 m sia dal geofono 1 che dal geofono 10, è stata ottenuta con una massa battente di 10 Kg.

La traccia dello stendimento sismico è rappresentata in All. 3, mentre il **rapporto tecnico** delle indagini sismiche realizzate viene riportato in All. 4.

I dati sismici acquisiti ed elaborati hanno consentito di determinare il profilo di velocità delle onde “S” del sito fino oltre 30 m di profondità e valori di V_{s30} che variano in funzione della quota del piano di imposta delle strutture di fondazione dell'edificio in oggetto secondo la tabella di seguito riportata.

<i>Quota piano di fondazione</i>	<i>Intervallo dal p.c.</i>	<i>VS_{eq}</i>	<i>Categoria di sottosuolo</i>
0 m	0/-30 m	229 m/sec	C
-1 m	-1/-31 m	235 m/sec	C
-2 m	-2/-32 m	240 m/sec	C
-3 m	-3/-33 m	245 m/sec	C
-4 m	-4/-34 m	250 m/sec	C
-5 m	-5/-35 m	255 m/sec	C

Analizzando la tabella si registra un progressivo aumento del valore di **VS₃₀** con la profondità del piano di imposta delle strutture di fondazione; in ogni caso, confrontando il valore di **VS₃₀** ottenuto con i corrispondenti intervalli di valori associati alle categorie di sottosuolo riportate nella Tabella 3.2.II del Cap. 3.2.2 delle NTC2018, è possibile assegnare i terreni di fondazione dell'area in esame alla **CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C**, alla quale appartengono 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.

* * *

Al fine di valutare la **frequenza di vibrazione fondamentale** dei terreni dell'ambito di intervento sono state realizzate **n. 3 prove H/V – metodo dei rapporti spettrali a stazione singola HVSR** (metodo Nakamura), localizzate come rappresentato in All. 3.

Tale metodo si basa sulla misura del **microtremore naturale** del suolo, il quale agendo da oscillatore naturale permette, tramite adeguata strumentazione, la misura diretta delle frequenze di vibrazione dei terreni e dei manufatti.

La tecnica utilizzata, proposta da Nakamura per lo studio delle amplificazioni di sito assume che i microtremori consistano principalmente di **onde di Rayleigh** che si propagano in un singolo strato soffice su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Tale tecnica permette di separare i termini di sorgente-percorso e di sito tramite i rapporti tra le componenti del moto, senza utilizzare alcun sito di riferimento.

Le ipotesi su cui si basa la tecnica di Nakamura sono le seguenti:

- *i microtremori sono generati da sorgenti superficiali e non da sorgenti profonde i cui contributi sono trascurabili;*
- *le sorgenti dei microtremori in superficie non influenzano i microtremori alla base dello strato considerato;*
- *la componente verticale del moto non risente di effetti di amplificazione locale;*
- *il picco visibile nei rapporti H/V (rapporto tra l'ampiezza spettrale della componente orizzontale e l'ampiezza spettrale della componente verticale) è indipendente dalle caratteristiche della sorgente del rumore ed è invece fortemente dipendente dalle condizioni stratigrafico-litologiche del terreno. Tale picco è inoltre ben correlato con la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno soggetto alla propagazione di onde S verticali e con il picco fondamentale delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh.*

Le principali applicazioni delle prove H/V si possono così sintetizzare:

- ✓ Misura delle frequenze di risonanza dei suoli;
- ✓ Effetti di sito e microzonazione sismica (curve H/V, metodo di Nakamura);
- ✓ Stratigrafia sismica passiva;
- ✓ Vs30 da fit vincolato della curva H/V;
- ✓ Segnalazione dei possibili fenomeni di doppia risonanza suolo-struttura.

Di particolare importanza è la frequenza di vibrazione del sito, caratterizzata dal maggiore rapporto di ampiezze **H/V**, nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico (frequenze generalmente inferiori a 15 Hz), denominata frequenza fondamentale di vibrazione **f₀**.

E' possibile poi determinare la profondità degli strati sismici mediante la misura diretta delle frequenze di vibrazione, associata alla misura delle velocità delle onde S tramite la relazione:

$$f_0 = V_s / 4H$$

dove V_s è la velocità media delle onde di taglio e H è la profondità della discontinuità sismo-stratigrafica.

Le prove HVSR sono state effettuate mediante tromografo digitale **“TROMINO ENGY”** (Micromed S.r.l), che racchiude al suo interno 3 terne (due di velocimetri ed una di accelerometri) di sensori ortogonali tra loro con possibilità di campionamento nell'intervallo di frequenze compreso tra 0,1 e 256 Hz; sono state acquisite n. 3 registrazioni di lunghezza pari a 20 minuti con campionamento a 128 Hz orientando la componente y dello strumento secondo il nord geografico.

Per l'elaborazione dei dati sismici è stato utilizzato il software “**GRILLA**” (Micromed S.r.l), che consente di effettuare:

- Analisi spettrale completa delle tracce e calcolo delle curve H/V per la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo.
- Procedure di pulizia delle tracce nel dominio del tempo e delle frequenze.
- Test sulla significatività dei picchi secondo le linee guida europee (Criteri Sesame).
- Determinazione delle frequenze dei modi di vibrare delle strutture con rimozione dell'effetto di sottosuolo.
- Creazione di un report automatico con tabelle e illustrazioni.

Il risultato dell'elaborazione è rappresentato da una “*curva di ellitticità*” che rappresenta il **rapporto spettrale H/V** tra il segnale delle componenti orizzontali ed il segnale della componente verticale; l'analisi dell'andamento dello spettro medio e delle corrispondenti curve di confidenza (deviazione standard) nell'intervallo di frequenze di interesse permette di individuare in modo diretto la frequenza di risonanza f_0 del sito indagato, corrispondente nel grafico al picco massimo del rapporto H/V cui è associato il massimo valore di amplificazione stratigrafica dovuta ad un contrasto di impedenza sismica (prodotto tra densità e velocità dell'onda sismica nel mezzo) tra strati (unità sismiche) differenti.

In All. 5 sono riportati i grafici ed i tabulati delle n. 3 indagini sismiche HVSR realizzate, rappresentati da: parametri e risultati della registrazione, grafico dello spettro medio del rapporto spettrale H/V e delle relative curve di confidenza, serie temporale del rapporto spettrale H/V risultante dalla pulizia del segnale nel dominio delle frequenze, grafico di direzionalità del rapporto spettrale H/V, grafico degli spettri delle singole componenti del moto (V, NS, EW) e verifica dei **criteri SESAME**.

Le linee guida del progetto di ricerca europeo SESAME (2004) stabiliscono una serie di criteri (essenzialmente di tipo statistico) per la valutazione della significatività dei risultati dell'indagine sismica HVSR realizzata e del grafico del rapporto spettrale H/V ottenuto.

I primi 3 criteri riguardano l'affidabilità statistica della curva H/V ottenuta e la correttezza delle finestre temporali scelte per l'elaborazione.

I restanti 6 criteri riguardano la chiarezza del picco massimo del rapporto H/V, sia rispetto alle frequenze circostanti che alla sua stabilità nei rapporti H/V delle singole finestre.

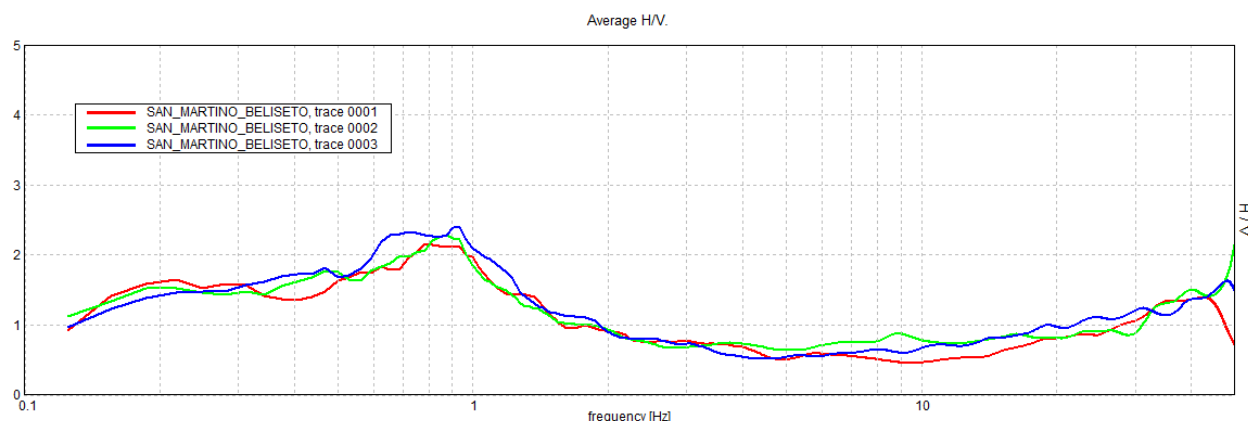
Come riportato nei report allegati, in ogni caso sono stati rispettati tutti i 3 criteri relativi all'affidabilità statistica della curva H/V, di conseguenza le indagini sismiche realizzate sono state eseguite in modo corretto e significativo dal punto di vista geofisico.

I criteri relativi alla chiarezza del picco H/V non sono stati invece soddisfatti completamente; questo è dovuto in ambito di pianura alluvionale all'assenza di contatti stratigrafici netti tra litotipi con caratteristiche meccaniche differenti, come accade ad esempio al passaggio tra substrato roccioso e depositi alluvionali di copertura.

Nel caso in esame, i picchi del rapporto H/V individuati sono legati perlopiù ad un passaggio graduale tra depositi alluvionali sciolti con differente grado di addensamento, che genera amplificazioni in un intervallo di frequenze più largo e con valori del rapporto spettrale H/V generalmente inferiori a 2.

Si ritiene opportuno sottolineare che il non superamento di questi criteri non significa che non ci sono contrasti di impedenza sismici significativi (risonanze stratigrafiche) nel sito in esame ma solo che non ci sono picchi H/V singoli ben definiti, per le motivazioni sopra esposte.

Si riportano di seguito su un unico grafico i rapporti spettrali H/V ottenuti dalle n. 3 indagini sismiche HVSR realizzate (riportati in modo più completo in All. 5), che dimostra la sostanziale uniformità sismo-stratigrafica del sito in esame.



Si riassumono nella seguente tabella i valori delle frequenze di risonanza f_0 del sito ed i valori di ampiezza dei picchi del rapporto spettrale H/V alle corrispondenti frequenze f_0 individuati mediante le indagini sismiche HVSR realizzate.

Indagine sismica HVSr	Frequenza di risonanza f_0 \pm deviazione standard [Hz]	Ampiezza del picco del rapporto spettrale H/V
HVSr_1	$0,78 \pm 0,08$	2,16
HVSr_2	$0,88 \pm 0,10$	2,28
HVSr_3	$0,94 \pm 0,19$	2,39

Analizzando i risultati delle prove HVSr, nel rispetto dei criteri SESAME, emerge che la frequenza fondamentale (di risonanza) del sito presenta un valore pari a $f_0=0,78 \div 0,94$ Hz +/- una deviazione standard che rappresenta il “range” di oscillazione della stima della frequenza di vibrazione.

Tale amplificazione sismica massima, alla quale corrisponde un valore del rapporto $H/V=2,16 \div 2,39$ ed un periodo di oscillazione pari a $T=1,06 \div 1,28$ s, è associata ad un contrasto di impedenza sismica profondo.

6.3 VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI AMPLIFICAZIONE SECONDO D.G.R. 2616/2011

Al fine di verificare la correttezza dell’attribuzione della categoria di sottosuolo C all’area in esame si ritiene opportuno applicare in fase di progettazione il 2° livello di approfondimento, secondo le indicazioni della d.g.r. n. 9/2616/2011, relativo allo scenario sismico **PSLZ4a** (che caratterizza le zone con terreni potenzialmente soggetti a fenomeni di amplificazione del segnale sismico di base).

Si sottolinea che il 2° livello di approfondimento è già stato applicato nell’ambito dello studio geologico di supporto al P.G.T. comunale (fase di pianificazione), tuttavia poiché è stato limitato solamente ad alcune zone del territorio comunale si ritiene doveroso applicarlo all’area di intervento, al fine di verificare se sussistono le condizioni per l’applicazione del 3° livello di approfondimento.

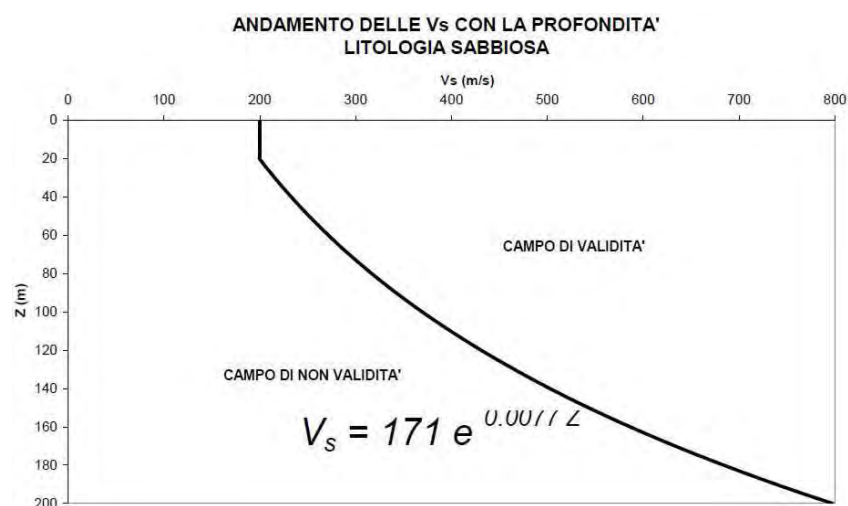
La metodologia utilizzata permette di valutare la pericolosità sismica locale (PSL) e gli effetti prodotti dalle condizioni locali di una determinata area attraverso una procedura organizzata in una struttura modulare, basata su n. 3 livelli di approfondimento con grado di dettaglio in ordine crescente.

L'applicazione del 2° livello di approfondimento permette di individuare le aree **PSL Z4a** nelle quali la normativa nazionale risulta insufficiente a salvaguardare dagli effetti di amplificazione sismica locale, ovvero se il F_a calcolato risulta superiore al F_a di soglia, fornito dal Politecnico di Milano, relativo al territorio comunale, riferito agli intervalli di periodo tra **0,1÷0,5s** e **0,5÷1,5s** delle tipologie edilizie presenti più frequentemente nel territorio regionale ed in funzione della categoria di sottosuolo di riferimento.

La procedura relativa agli effetti litologici consiste brevemente in:

- Individuazione della litologia prevalente nell'area in esame, sulla base dei risultati derivanti da indagini geognostiche e stratigrafie di pozzi disponibili.
- Definizione della distribuzione delle V_s (velocità delle onde di taglio) con la profondità fino a valori di $V_s \geq 800$ m/s e della categoria di sottosuolo di riferimento, sulla base delle indagini sismiche realizzate.
- Scelta della scheda litologica di valutazione di riferimento, riportata in All. 5 della d.g.r. 2616/2011.
- Determinazione algebrica del F_a relativo ai due intervalli di periodo citati.
- Confronto tra il F_a calcolato (FAC) ed il F_a di soglia (FAS) relativo al territorio comunale.
- Considerazioni conclusive.

Sulla base delle informazioni derivanti dalle indagini geognostiche e dalle stratigrafie di pozzi disponibili, nonché dei risultati delle indagini sismiche realizzate, è possibile individuare come litotipi dominanti i depositi sabbioso limosi la cui granulometria rientra in quelle previste nella scheda litologica di valutazione denominata “*scheda litologia sabbiosa*”; il profilo di velocità delle onde secondarie V_s ottenuto con le indagini MASW-ESAC rientra nel campo di validità della scheda litologica adottata, come di seguito riportato.



All'interno della scheda di valutazione scelta, come rappresentato in All. 6, sono state utilizzate le curve 2 (colore verde) e le corrispondenti formule algebriche, adottando il valore del periodo proprio di oscillazione del sito, desunto dal rapporto spettrale ottenuto con le indagini HVSr, pari a **T=1,06s**.

Per il Comune di Castelveverde (CR) i valori di F_a di soglia sono riportati nella banca dati **soglie_lomb.xls**, all'interno della quale essi presentano, per le diverse categorie di sottosuolo ed in funzione dell'intervallo di periodo T della struttura, i seguenti valori:

Valori di soglia del fattore di amplificazione F_a per l'intervallo di periodo 0,1 – 0,5 s				
Comune	Categoria di suolo tipo B	Categoria di suolo tipo C	Categoria di suolo tipo D	Categoria di suolo tipo E
Castelveverde	1,4	1,8	2,1	1,9

Valori di soglia del fattore di amplificazione F_a per l'intervallo di periodo 0,5 – 1,5 s				
Comune	Categoria di suolo tipo B	Categoria di suolo tipo C	Categoria di suolo tipo D	Categoria di suolo tipo E
Castelveverde	1,7	2,4	4,0	3,0

Considerando un periodo proprio della struttura ricadente nell'intervallo **0,1-0,5s**, relativo alla curva n. 2 ed al periodo del terreno T misurato (1,06s), si evince che:

$$F_{a\ 0,1-0,5\ s} = 1,00$$

Considerando un periodo proprio della struttura ricadente nell'intervallo **0,5-1,5s**, relativo alla curva n. 2 ed al periodo del terreno T misurato (1,06s), si evince che:

$$F_{a\ 0,5-1,5\ s} = 1,69$$

Considerando i valori di soglia di F_a riferiti alla categoria di sottosuolo **C**, ovvero:

- $F_{a\ (soglia)\ 0,1-0,5\ s} = 1,8$
- $F_{a\ (soglia)\ 0,5-1,5\ s} = 2,4$

ed i corrispondenti valori calcolati di F_a (arrotondati alla prima cifra decimale), ovvero:

- $F_{a\ (calc)\ 0,1-0,5\ s} = 1,0$
- $F_{a\ (calc)\ 0,5-1,5\ s} = 1,7$

considerando la variabilità $\pm 0,1$ che tiene in conto la variabilità del valore di F_a ottenuto, si evince che:

$$F_{a \text{ (calc) } 0,1-0,5 \text{ s}} = 1,0 \pm 0,1 \leq F_{a \text{ (soglia) } 0,1-0,5 \text{ s}} = 1,8$$

$$F_{a \text{ (calc) } 0,5-1,5 \text{ s}} = 1,7 \pm 0,1 \leq F_{a \text{ (soglia) } 0,5-1,5 \text{ s}} = 2,4$$

In entrambi i casi i valori di F_a di soglia proposti dalla normativa sono superiori ai corrispondenti valori di F_a calcolati, pertanto la normativa è da considerarsi sufficiente a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito; in fase di progettazione edilizia è quindi corretto l'utilizzo dello spettro previsto dalla normativa vigente per la categoria di sottosuolo C.

6.4 – VERIFICA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DEL SITO DI COSTRUZIONE

In base alle considerazioni espresse in precedenza relativamente alla pericolosità sismica di base ed alla pericolosità sismica locale, è possibile effettuare una stima della pericolosità sismica del sito in esame attraverso la determinazione dei coefficienti sismici corrispondenti a ciascuno degli stati limite nei confronti dei quali devono essere effettuate le verifiche di sicurezza.

Inserendo all'interno del software “*Geostru PS Parametri sismici v.1.4*” la localizzazione del sito (sistema di riferimento UTM-ED50), i dati prestazionali indicativi dell'opera in esame (tipo di costruzione, vita nominale V_N , classe d'uso), la tipologia di fondazione, la categoria di sottosuolo e la categoria topografica, sono stati ottenuti i parametri sismici ed i coefficienti sismici riportati nei tabulati che seguono.

SITO IN ESAME (coordinate UTM-ED50)	
LATITUDINE	45,2155
LONGITUDINE	9,9866
TIPO DI COSTRUZIONE	2
VITA NOMINALE (V_N)	50 [anni]
CLASSE D'USO	III
VITA DI RIFERIMENTO (V_R)	75 [anni]

Considerando la “*risposta sismica locale*” del sito di intervento, ovvero i parametri ed i coefficienti sismici derivanti dalla categoria topografica T1 ($S_T=1,00$) e dalla categoria di sottosuolo C ($S_S=1,50$) dell'area in esame, per ogni stato limite considerato si ottiene il valore dell'accelerazione sismica orizzontale massima del suolo a_{max} attesa al sito di progetto.

S.L. Stato limite		PV_R Probabilità di superamento	T_R Tempo ritorno [anni]	a_g [g]	S (S_s · S_t) [–]	a_{max} (a_g · S) [m/s²]
S.L.E.	S.L.O.	81 %	45	0,037	1,500	0,544
	S.L.D.	63 %	75	0,046	1,500	0,677
S.L.U.	S.L.V.	10 %	712	0,098	1,500	1,442
	S.L.C.	5 %	1462	0,124	1,500	1,825

S.L. Stato limite		PV_R Probabilità di superamento	T_R Tempo ritorno [anni]	a_g [g]	F_o [–]	T_c* [s]
S.L.E.	S.L.O.	81 %	45	0,037	2,564	0,221
	S.L.D.	63 %	75	0,046	2,538	0,251
S.L.U.	S.L.V.	10 %	712	0,098	2,564	0,302
	S.L.C.	5 %	1462	0,124	2,556	0,313

S.L. Stato limite		S_s	C_c	S_t	k_h	k_v	β
S.L.E.	S.L.O.	1,500	1,730	1,000	0,011	0,006	0,200
	S.L.D.	1,500	1,660	1,000	0,014	0,007	0,200
S.L.U.	S.L.V.	1,500	1,560	1,000	0,029	0,015	0,200
	S.L.C.	1,500	1,540	1,000	0,045	0,022	0,240

Dove:

Tipo di costruzione	Rappresenta la tipologia dell'opera in progetto (N.T.C. – Tab. 2.4.I)
Vita nominale V_N	Rappresenta il n° di anni nel quale la struttura deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata (N.T.C. – Tab. 2.4.I)
Classe d'uso	Rappresenta l'uso a cui è destinata l'opera, con riferimento alle conseguenze di operatività o di un eventuale collasso in presenza di azioni sismiche (N.T.C.– Par. 2.4.2)
Categoria di sottosuolo	Categoria a cui associare i terreni di fondazione, necessaria per la definizione dell'azione sismica di progetto (N.T.C. – Tab. 3.2.II)
Categoria topografica	Categoria a cui appartiene l'area di intervento, necessaria per la definizione dell'azione sismica di progetto (N.T.C. – Tab. 3.2.III)
Coefficiente d'uso	Coefficiente che varia in funzione della classe d'uso (N.T.C. – Tab. 2.4.II)
Periodo di riferimento V_R	In relazione al quale vengono valutate le azioni sismiche sulle costruzioni; è il prodotto tra la vita nominale V _N ed il coefficiente d'uso C _u ⇒ V _R = V _N ·C _u (N.T.C. – Par. 2.4.3)

S.L.E.	Stato limite di esercizio
S.L.O.	Stato limite di operatività
S.L.D.	Stato limite di danno
S.L.U.	Stato limite ultimo
S.L.V.	Stato limite di salvaguardia della vita
S.L.C.	Stato limite di prevenzione del collasso
Probabilità di superamento PV_R	Associata agli stati limite, rappresenta la probabilità di superamento di ognuno di essi nel periodo di riferimento V_R della costruzione
T_R	Periodo di ritorno dell'azione sismica
a_g	Accelerazione sismica orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido orizzontale
F_0	Valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
T_c^*	Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale
S_s	Coefficiente di amplificazione stratigrafica che tiene conto della categoria di sottosuolo (N.T.C. – Tab. 3.2.IV)
S_t	Coefficiente di amplificazione topografica che tiene conto delle condizioni topografiche (N.T.C. – Tab. 3.2.V)
S	Coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione $S = S_s \cdot S_t$
C_c	Coefficiente funzione della categoria di sottosuolo (N.T.C. – Tab. 3.2.IV), utilizzato per la determinazione del periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro T_c
K_h	Coefficiente sismico orizzontale ($K_h = \beta \cdot a_{max}/g$)
K_v	Coefficiente sismico verticale ($K_v = K_h/2$)
a_{max}	Accelerazione sismica massima attesa al sito di progetto, prodotto tra il coefficiente S , l'accelerazione sismica massima a_g attesa su sito di riferimento rigido e l'accelerazione di gravità ($9,8 \text{ m/s}^2$)
β	Coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito a_{max} , funzione della categoria di sottosuolo (N.T.C. – Tab. 7.11.I)

6.5 – VERIFICA DELLA LIQUEFAZIONE DEI TERRENI DI FONDAZIONE

In riferimento agli **effetti di instabilità** cui sono sottoposti i terreni di fondazione se sottoposti ad una sollecitazione sismica, come da indicazioni delle NTC2018 è stata valutata la stabilità del sito di costruzione nei confronti della **liquefazione**, fenomeno associato alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, in seguito ad un significativo aumento istantaneo della pressione interstiziale dell'acqua presente nei

vuoti intergranulari, che determina una fluidificazione del materiale con conseguenti potenziali effetti di instabilità nei confronti delle strutture di fondazione e delle strutture in elevazione.

Per condurre a liquefazione un terreno suscettibile al fenomeno è necessaria non solo l'occorrenza di un **forte sisma**, sia in termini di magnitudo che durata, ma anche di particolari condizioni litostratigrafiche, idrogeologiche e geomeccaniche dei terreni di fondazione.

Per la definizione della magnitudo di progetto (M_w) del sisma atteso si ritiene opportuno utilizzare in via cautelativa il valore della magnitudo massima attesa nella zona sismogenetica più prossima all'area di intervento, ovvero la **ZS911** "Tortona-Bobbio", alla quale è associato un valore di **$M_w=6,14$** , come da tabella 2.8-1 degli ICMS di seguito riportata.

Tabella 2.8-1 – Valori di M_{wmax} per le zone sismogenetiche di ZS9 (estratto da Gruppo di lavoro, 2004)

Nome ZS	Numero ZS	M_{wmax}
Colli Albani, Etna	922, 936	5.45
Ischia-Vesuvio	928	5.91
Altre zone	901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 916, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934	6.14
Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza Sanremo	918, 919, 910	6.37
Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana-Mugello, Calabria Jonica	905, 906, 915, 930	6.60
Molise-Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto	924, 925, 931	6.83
Appennino Abruzzese, Sannio – Irpinia-Basilicata	923, 927	7.06
Calabria tirrenica, Iblei	929, 935	7.29

Tra i vari metodi di verifica alla liquefazione riportati in letteratura, nel presente studio è stato utilizzato il metodo semplificato di Robertson (1998), basato sul calcolo di un fattore di sicurezza **F_s** dato dal rapporto tra la resistenza al taglio mobilitante R caratteristica del materiale (**CRR** – Cyclic Resistance Ratio), ossia il suo stato di deformazione critica, e lo sforzo di taglio T indotto dall'azione sismica (**CSR** – Cyclic Stress Ratio):

$$F_s = \frac{CRR}{CSR} * MSF$$

dove MSF è un fattore di scala funzione della magnitudo dei terremoti attesi.

Si considera come valore discriminante $F_s=1,00$, tale per cui un terreno risulterà suscettibile al fenomeno della liquefazione nel caso in cui: **$F_s \leq 1,00$ materiale liquefacibile**

Per la definizione del sisma di progetto, oltre alla magnitudo di riferimento (M_w) del sisma di progetto ($M_w=6,14$), si è reso necessario determinare il valore dell'accelerazione sismica orizzontale massima (a_{max}) attesa in superficie nel sito in esame.

Il valore di a_{max} utilizzato nell'elaborazione effettuata, in riferimento alle tabelle riportate nel paragrafo precedente, è quello relativo allo stato limite SLV, ossia:

$$a_{max} = 1,442 \text{ m/s}^2$$

che, espressa come frazione dell'accelerazione di gravità g , risulta pari a:

$$a_{max} = ag \cdot S = 0,098g \cdot 1,500 = 0,147 \text{ g (m/s}^2\text{)}$$

Mediante l'adozione di un programma dedicato (LiqIT – Geologismiki) sono stati elaborati i dati della prova penetrometrica statica CPTu-01 ottenendo i risultati grafici riportati in All. 7.

E' stato calcolato inoltre il valore del potenziale di liquefazione (**PL**) o indice di liquefazione (**IL**), definito dalla relazione di Iwasaki et al. (1978):

$$PL = \sum_{i=1}^n F(z)W(z)dz$$

dove:

n	numero degli intervalli di calcolo di F_s lungo la verticale
z	profondità di calcolo (max 20 m)
$F(z)$	$F(z) = 0$ per $F_s > 1$; $F(z) = 1 - F_s$ per $F_s \leq 1$
$W(z)$	$W(z) = 10 - 0,5z$
dz	spessore dell'intervallo di calcolo

Il valore ottenuto, pari a **IL=0,66**, in base alle classi di rischio riportate nella seguente legenda permette di definire un rischio di liquefazione non probabile.

Overall potential I_L : 0.66

$I_L = 0.00$ - No liquefaction
 I_L between 0.00 and 5.00 - Liquefaction not probable
 I_L between 5.00 and 15.00 - Liquefaction probable
 $I_L > 15.00$ - Liquefaction certain

7 – CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA

Al fine di caratterizzare dal punto di vista litostratigrafico, idrogeologico e geologico-tecnico i terreni di fondazione dell'area di intervento sono state realizzate per conto dello scrivente dal Dott. Geol. Marco Barbieri n. 2 prove penetrometriche statiche CPTu con punta elettrica e piezocono, localizzate come rappresentato in All. 3.

La prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono consiste nell'infiggere verticalmente a pressione nel terreno, tramite un martinetto idraulico, una punta conica standardizzata prolungabile con l'aggiunta di successive aste, misurando ogni **1,00 cm** lo sforzo necessario per la penetrazione della punta e per l'adesione terreno-acciaio del manicotto laterale posto sopra la punta; i risultati ottenuti vengono utilizzati, attraverso varie correlazioni semiempiriche di letteratura, per stimare con elevata precisione ed affidabilità le caratteristiche litologiche e le proprietà geotecniche dei terreni indagati.

La punta, munita di setto poroso e relativo trasduttore (piezocono), permette inoltre la misura continua della pressione dei pori u.

Le prove penetrometriche statiche CPTu sono state realizzate utilizzando un penetrometro statico-dinamico da 10 tonnellate tipo "Pagani TG63/100" con le seguenti caratteristiche principali:

- | | |
|--|---------------------|
| ▪ Area di base della punta (Ap): | 10 cm ² |
| ▪ Area della superficie laterale (Al): | 150 cm ² |
| ▪ Angolo di apertura del cono (Ac): | 60° |
| ▪ Velocità di infissione (V): | 2 cm/s |
| ▪ Intervallo di misurazione (I): | 1,00 cm |

Si riportano in All. 8 i grafici e le elaborazioni delle indagini penetrometriche realizzate, ottenuti mediante l'utilizzo di un programma dedicato (CPeT-IT – Geologismiki).

* * *

In base ai risultati delle indagini penetrometriche realizzate, utilizzando le formule tratte dalla letteratura geotecnica (riportate in calce a ciascun report), sono stati determinati i principali parametri geotecnici rappresentativi dei livelli litologici individuati, suddivisi in **Unità Geotecniche** a comportamento geomeccanico omogeneo.

Si sottolinea che i valori medi dei parametri geotecnici riportati nelle successive tabelle derivano dall'analisi statistica di migliaia di dati, tenendo conto dell'incertezza nelle misure e modificando opportunamente in via cautelativa i valori di alcuni parametri, a parere dello scrivente sopravvalutati nelle formule utilizzate, sulla base dell'esperienza e del contesto locale.

MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO										
ANALISI STATISTICA: PROVE CPTu-01, CPTu-02										
Unità Geotecnica Litologia stimata	Profondità da p.c. [m]		φ'_m [°]	Su_m [kPa]	OCR_m	Dr_m [%]	Es_m [MPa]	M_m [MPa]	G_{0m} [MPa]	γ_{tm} [kN/m ³]
	da	a								
A limi argillosi limi sabbiosi sabbie limose	0,00	3,20÷3,35	29	77	12	41	23	33	28	17
B argille argille limose limi sabbiosi	3,20÷3,35	6,60÷6,80	27	70	6	21	16	22	24	16
C sabbie limose sabbie	6,60÷6,80	9,87	33	0	0	52	56	117	70	18

Dove:

φ'_m	Valore medio dell'angolo di attrito interno (terreni incoerenti)
Su_m	Valore medio della coesione non drenata (terreni coesivi)
OCR_m	Valore medio del grado di sovraconsolidazione (terreni coesivi)
Dr_m	Valore medio della densità relativa (terreni incoerenti)
Es_m	Valore medio del modulo di Young
M_m	Valore medio del modulo confinato (monodimensionale)
G_{0m}	Valore medio del modulo di taglio (piccole deformazioni)
γ_{tm}	Valore medio del peso dell'unità di volume

La soggiacenza della falda freatica è stata rilevata alla profondità di circa **m. 2,20** da p.c., valore soggetto ad oscillazioni stagionali.

8 – CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Dietro incarico della Committenza è stata redatta la presente **relazione geologica e sismica** a supporto della progettazione degli interventi di adeguamento sismico dell'immobile ospitante la Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" sita in località San Martino in Beliseto in Comune di Castelveverde (CR).

L'analisi dei principali aspetti geologici, geomorfologici, idrografici, idraulici, idrogeologici, vincolistici e di fattibilità geologica dell'area in esame ha permesso di escludere la presenza di elementi di pericolosità e/o tutela connessi alle tematiche analizzate.

L'analisi degli aspetti sismici ha fornito un inquadramento sismico del territorio comunale, approfondendo gli aspetti relativi alla pericolosità sismica del sito di intervento, ovvero gli effetti di amplificazione stratigrafica, mediante la realizzazione di indagini sismiche MASW, ESAC e HVSR, e gli effetti di instabilità (liquefazione dei terreni); in particolare, in riferimento allo scenario sismico **PSLZ4a**, si ritiene corretto l'utilizzo in fase di progettazione edilizia dello spettro previsto per la categoria di sottosuolo C.

Sulla base dei risultati derivanti da n. 2 prove penetrometriche statiche CPTu con punta elettrica e piezocono è stato definito il modello geologico di riferimento del sito, caratterizzato da n. 3 Unità Geotecniche a comportamento geomeccanico omogeneo.

Cremona, 28 aprile 2022

Il tecnico

Dott. Geol. Roberto Mariotti



UNIONE DI COMUNI LOMBARDA
"TERRA DI CASCINE"

Piazza Municipio, 23
26022 Castelveverde (CR)

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

a supporto della progettazione degli interventi di adeguamento
sismico dell'immobile ospitante la Scuola dell'Infanzia "Il Girasole"
sita in località San Martino in Beliseto in Comune di Castelveverde (CR)

INQUADRAMENTO GEOLOGICO
E GEOMORFOLOGICO

All. 1

scala 1:10.000

Aprile 2022

Il tecnico: *Dott. Geol. Roberto Mariotti*



UNIONE DI COMUNI LOMBARDA
"TERRA DI CASCINE"

Piazza Municipio, 23
26022 Castelveverde (CR)

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

a supporto della progettazione degli interventi di adeguamento
sismico dell'immobile ospitante la Scuola dell'Infanzia "Il Girasole"
sita in località San Martino in Beliseto in Comune di Castelveverde (CR)

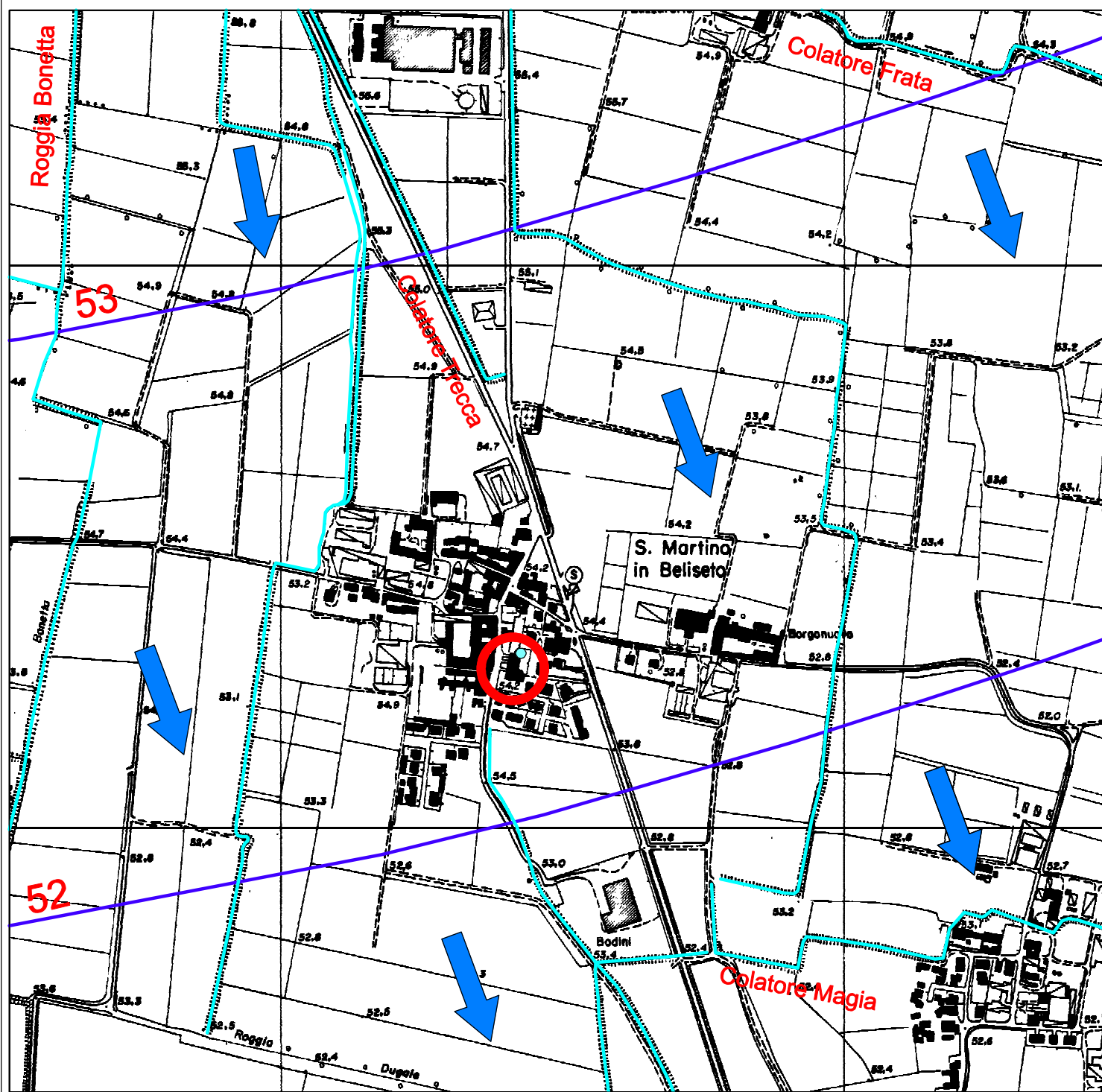
INQUADRAMENTO IDROGRAFICO
ED IDROGEOLOGICO

All. 2

scala 1:10.000

Aprile 2022

Il tecnico: *Dott. Geol. Roberto Mariotti*



UNIONE DI COMUNI LOMBARDA
"TERRA DI CASCINE"

Piazza Municipio, 23
26022 Castelveverde (CR)

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

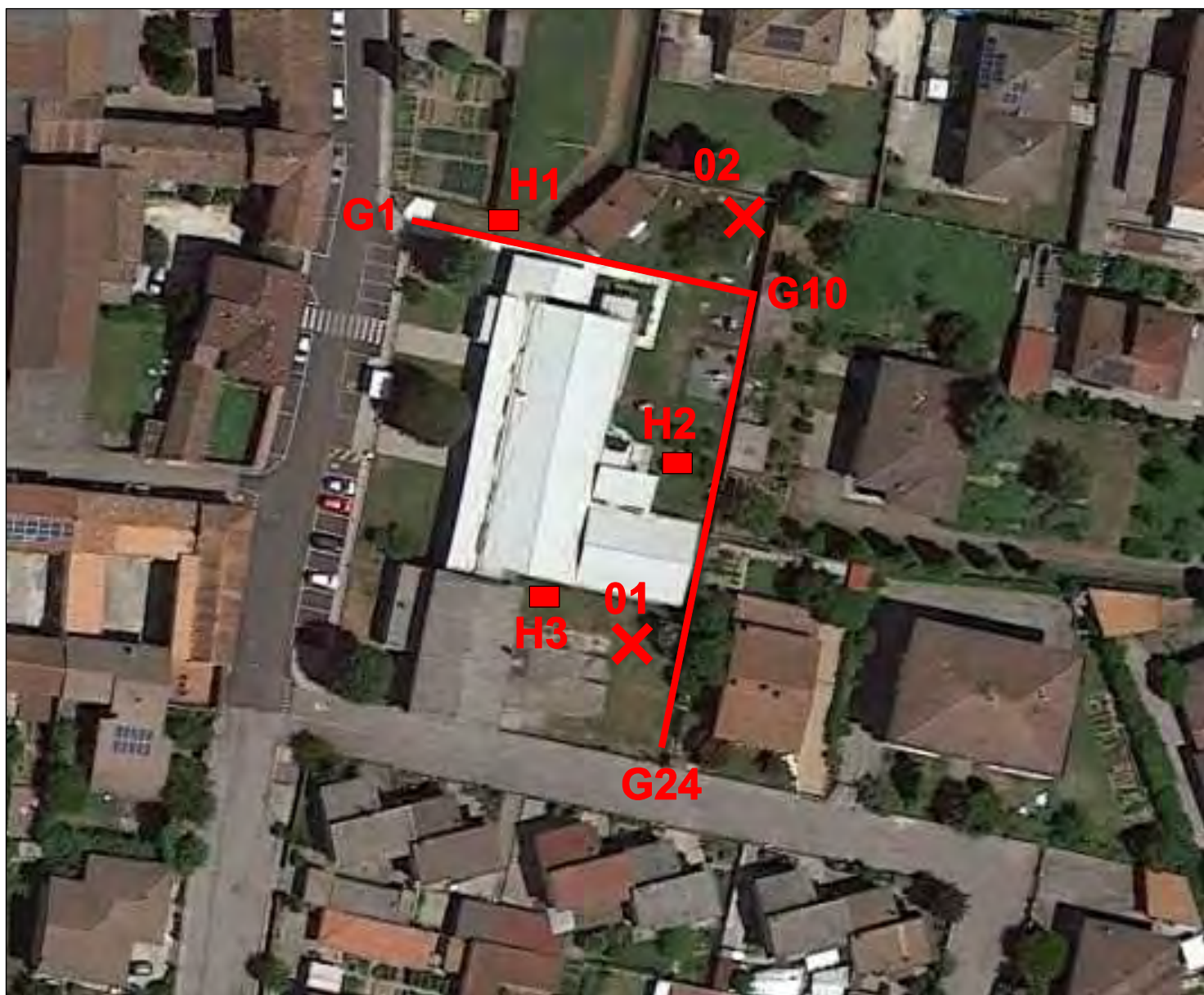
a supporto della progettazione degli interventi di adeguamento
sismico dell'immobile ospitante la Scuola dell'Infanzia "Il Girasole"
sita in località San Martino in Beliseto in Comune di Castelveverde (CR)

UBICAZIONE INDAGINI

All. 3

Aprile 2022

Il tecnico: *Dott. Geol. Roberto Mariotti*



G1

Prova penetrometrica statica elettrica con piezocono CPTu



Stendimento sismico con geofoni per indagini MASW - ESAC



Indagine sismica HVSR



Dott. Roberto Mariotti – *Geologo Specialista*
Corso Garibaldi, 95 – 26100 Cremona (CR)
e-mail: drmariotti.roberto@libero.it

tel/fax: 0372-23266
cell: 335-6958159
pec: mariottiroberto@epap.sicurezzapostale.it

ALLEGATO 4

INDAGINE SISMICA CON METODO CONGIUNTO MASW-ESAC

RAPPORTO TECNICO

SOMMARIO

1	PREMESSA INDAGINE SISMICA	2
2	PROVE PER LA DETERMINAZIONE DELLA V_s _eq.....	2
2.1	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	3
2.2	PROVA ATTIVA "MASW"	3
2.2.1	Cenni metodologici.....	3
2.2.2	Modalità esecutive della prova "Masw"	5
2.2.3	Elaborazione dei dati	5
2.3	PROVA PASSIVA "ESAC"	6
2.3.1	Cenni metodologici.....	6
2.3.2	Modalità di intervento.....	7
2.3.3	Elaborazione dei dati	8
3	ANALISI DEI RISULTATI.....	9
3.1	CLASSIFICAZIONE DEL SOTTOSUOLO DI FONDAZIONE.....	10



1 PREMESSA INDAGINE SISMICA

Il rapporto illustra e commenta l'indagine geofisica eseguita nell'area della Scuola dell'infanzia "Il Girasole" a San Martino in Beliseto, nel comune di Castelveverde (CR).

L'indagine sismica è stata finalizzata sia alla determinazione della categoria del sottosuolo di fondazione, ai sensi del testo unitario "Norme tecniche per le costruzioni" (NTC 2018-2019), che alla valutazione della frequenza di vibrazione fondamentale del sito.

In totale sono stati realizzati: 1 stendimento sismico (Masw-Esac) e 3 prove HVSR (Microtremori tipo Nakamura).

2 PROVE PER LA DETERMINAZIONE DELLA $V_{s_{eq}}$

L'indagine è stata condotta con due metodologie sismiche che possono essere considerate complementari:

- **ESAC (Extended Spatial Autocorrelation);**
- **MASW - (Multichannel Analysis of Surface Waves).**

La metodologia **ESAC** è una tecnica "passiva" in quanto si basa sulla registrazione del rumore sismico indotto dalle attività antropiche (traffico, fabbriche ecc.). I pregi ed i limiti principali di questa tecnica si possono così sintetizzare:

Pregi

- ✓ adatta in ambienti fortemente antropizzati;
- ✓ elevate profondità di indagine, anche in presenza di terreni con bassa velocità delle onde di taglio (V_s), per la capacità di campionare basse frequenze.

Limiti

- ✓ non adatta in ambienti poco "rumorosi";
- ✓ possibilità di sovrastimare (solo per la tecnica ReMi) i valori di V_s in presenza di rumore fortemente direzionale non ortogonale allo stendimento sismico.

Viceversa, la metodologia **MASW** è una tecnica "attiva" in quanto si basa sulla registrazione del segnale sismico indotto da una massa battente. I pregi ed i limiti principali di questa tecnica si possono così sintetizzare:

Pregi

- ✓ adatta in ambienti "non rumorosi";
- ✓ buona capacità di definizione dei valori di V_s , soprattutto per quanto riguarda gli orizzonti più superficiali (primi 20-30m).

Limiti

- ✓ poco adatta in ambienti fortemente antropizzati e rumorosi;
- ✓ limitate profondità di indagine, in presenza di terreni con bassa velocità delle onde di taglio (V_s).

Difficilmente, prima di realizzare l'indagine, è possibile valutare quale tecnica può fornire i risultati migliori. Sicuramente l'utilizzo "combinato" delle tecniche passive ed attive consente sia di stimare in modo più preciso i valori di V_s degli orizzonti più superficiali (Masw), che di ottenere una maggiore profondità d'indagine (Esac).

2.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Il "Geode" è un sismografo modulare a 24 bit che rappresenta l'ultima frontiera dei sistemi di registrazione sismica combinando il meglio dei tradizionali sismografi Geometrics con la flessibilità di un sistema ripartito in unità distinte. Geode è un sismografo ad elevata dinamica 144 dB di range dinamico totale – 105 dB istantanei a 2 msec di campionamento). Grazie all'ampia banda d'ingresso 1.75 Hz – 20 kHz, con velocità di campionamento da 0.02 msec a 16 msec), esso è perfettamente idoneo per un'ampia gamma di applicazioni: sismica a rifrazione, sismica a riflessione (anche ad altissima risoluzione), monitoraggio di vibrazioni, applicazioni sismologiche, downhole e VSP. In acquisizione sono disponibili tutte le funzioni di filtri, pre-amplificazione, line-test e instrument-test, tipiche dei sistemi di registrazioni evoluti.



Figura 1: Sismografo "Geode" collegato al pc

- L'attrezzatura utilizzata è composta da:
- Sismografo modulare Geode 3-1000+ canali,
- Massa battente da 10 Kg,
- Piastra di battuta in alluminio 15x15x2,5cm,
- Batteria ricaricabile 12 V,
- Cavo per sismica a rifrazione stranded, 130 mt con 24 takeouts SPT-21 a 5 metri di intervallo e due code da 7.5 mt l'una terminate con connettore Bendix 61S,
- Geofoni GS20DX, 4.5 Hz verticali, 395 Ohm con puntale da 3" e 1,5 mt di cavo terminato con mueller clip singola MC-20-SP,
- Computer portatile ACER.

2.2 PROVA ATTIVA "MASW"

2.2.1 Cenni metodologici

Il metodo **MASW** (multichannel analysis of surface waves), è una tecnica di indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi e ciò limita i costi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che

viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi.

Le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate lungo uno stendimento lineare di sensori.

Il metodo consente generalmente, di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente, nel range di frequenze compreso tra 5 Hz e 70 Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 20 - 30 m, in funzione della rigidità del suolo. L'elaborazione dei dati con il metodo MASW prevede tre fasi di lavoro:

1. *la prima fase prevede il calcolo dello spettro di velocità di fase apparente relativo ai sismogrammi registrati,*
2. *la seconda fase consiste nell'estrapolare dallo spettro di velocità, la curva di dispersione sperimentale,*
3. *la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , modificando opportunamente lo spessore h , le velocità delle onde di taglio V_s e di compressione V_p (o in maniera alternativa alle velocità V_p è possibile assegnare il coefficiente di Poisson ν), la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la curva di dispersione sperimentale e la curva di dispersione teorica corrispondente al modello di suolo assegnato.*

Il modello di suolo e quindi il profilo di velocità delle onde di taglio verticali possono essere individuati con procedura manuale o con procedura automatica o con una combinazione delle due. Generalmente si assegnano il numero di strati del modello, il coefficiente di Poisson, la densità di massa e si variano lo spessore h e la velocità V_s degli strati.

Nella procedura manuale l'utente assegna per tentativi diversi valori delle velocità V_s e degli spessori h , cercando di avvicinare la curva di dispersione numerica alla curva di dispersione sperimentale. Nella procedura automatica la ricerca del profilo di velocità ottimale è affidata ad un algoritmo di ricerca globale o locale che cerca di minimizzare l'errore tra la curva sperimentale e la curva numerica. In genere quando l'errore relativo, tra curva sperimentale e curva numerica è compresa tra il 5% e il 10% si ha un soddisfacente accordo tra le due curve e il profilo di velocità delle onde di taglio V_s e quindi il tipo di suolo sismico conseguente rappresentano una soluzione valida da un punto di vista ingegneristico.

2.2.2 Modalità esecutive della prova "Masw"

In una prima fase sono state estratte 2 prove **Masw**, considerando i tratti di stendimento compresi fra i geofoni 1-10 e 10-24. Nella seconda fase di elaborazione (Masw- Esac) si è utilizzata la prova relativa ai geofoni 1-10 che ha fornito uno spettro di velocità di fase leggermente più definito.

La spaziatura dei geofoni utilizzata è di 5 m, con la lunghezza delle registrazioni di 1 sec e passo di campionamento di 0.250 ms. L'energizzazione, realizzata a distanza di 5 metri sia dal geofono 1 che dal geofono 10, è stata ottenuta con una massa battente di 10 Kg.

2.2.3 Elaborazione dei dati

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati è il "winMASW" Academy della EliaSoft. In una prima fase è stato calcolato lo spettro velocità di fase-frequenza del sito. In una seconda fase, dopo aver ricostruito il modello di velocità che meglio corrisponde allo spettro sperimentale, si è proceduto all' "inversione" dell'intero spettro (approccio full velocity spectrum), che ha consentito di determinare il profilo Vs del sito. L'approccio full velocity spectrum ha il vantaggio di non dover prima individuare sullo spettro di velocità le curve di dispersione modali (scelta soggettiva).

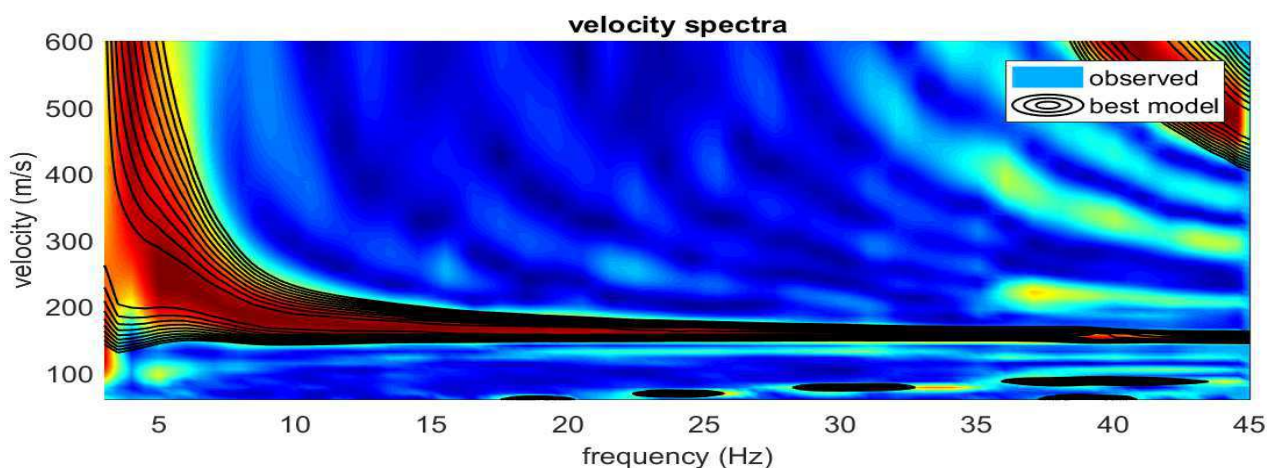


Figura 2a: Spettro velocità di fase prova Masw – Tratto geofoni 1-10

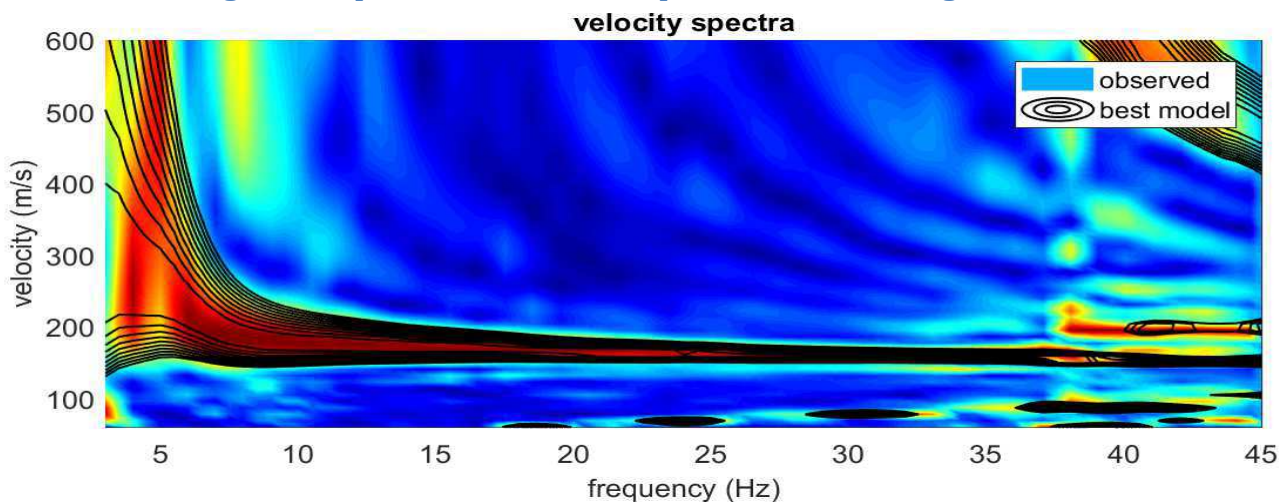


Figura 2b: Spettro velocità di fase prova Masw – Tratto geofoni 10-24

2.3 PROVA PASSIVA “ESAC”

2.3.1 *Cenni metodologici*

Si tratta sostanzialmente di metodi di sismica passiva che derivano dalla generalizzazione del metodo ReMi e forniscono informazioni sui livelli più profondi in quanto sensibili alle basse frequenze. Nella prova ESAC (Extended Spatial Autocorrelation) i geofoni possono essere disposti secondo una geometria (array) bidimensionale qualsiasi.

Il metodo d'indagine Esac (Aki 1959) si basa sul principio secondo il quale la funzione di correlazione media fra le registrazioni di un rumore isotropo effettuate su sensori verticali distribuiti nelle diverse direzioni a parità di distanza r da un sensore centrale, ha una forma nota (funzione di Bessel di ordine 0). La forma di questa funzione di Bessel ad una data frequenza ed una data distanza r è controllata dal valore della velocità di fase. Si tratta di un metodo robusto che rischia di fornire risultati errati in presenza di una sorgente dominante e quando la misura è effettuata con stendimenti lineari. Nelle indagini eseguite sono state utilizzate delle configurazioni geometriche 2D e spaziature costanti tra i sensori. Il risultato del metodo Esac è una curva di dispersione effettiva che rappresenta una combinazione delle diverse curve modali “pesate” in base al loro specifico contenuto energetico del sito, il vantaggio, soprattutto in presenza di inversioni di velocità o di forti contrasti di impedenza sismica, è di non dover identificare i vari modi di vibrazione.

Con questa tecnica, il disturbo, il “noise” ambientale diventa il segnale utilizzato per la caratterizzazione sismica. Sono i microtrempi (rumore di fondo generato dal traffico stradale, ferroviario e comunque il rumore presente costantemente in ambito urbanizzato) a costituire la sorgente di energia utile allo scopo.

Numerose sperimentazioni hanno consentito di appurare che le registrazioni del rumore di fondo ambientale, possono essere utilizzate, con opportune procedure di acquisizione e elaborazione, per stimare la velocità delle onde di taglio (V_s) fino a profondità che possono essere superiori a 100m.

2.3.2 Modalità di intervento

È stato acquisito uno stendimento sismico con geometria a L, costituito da 24 geofoni equispaziati di 5 m.

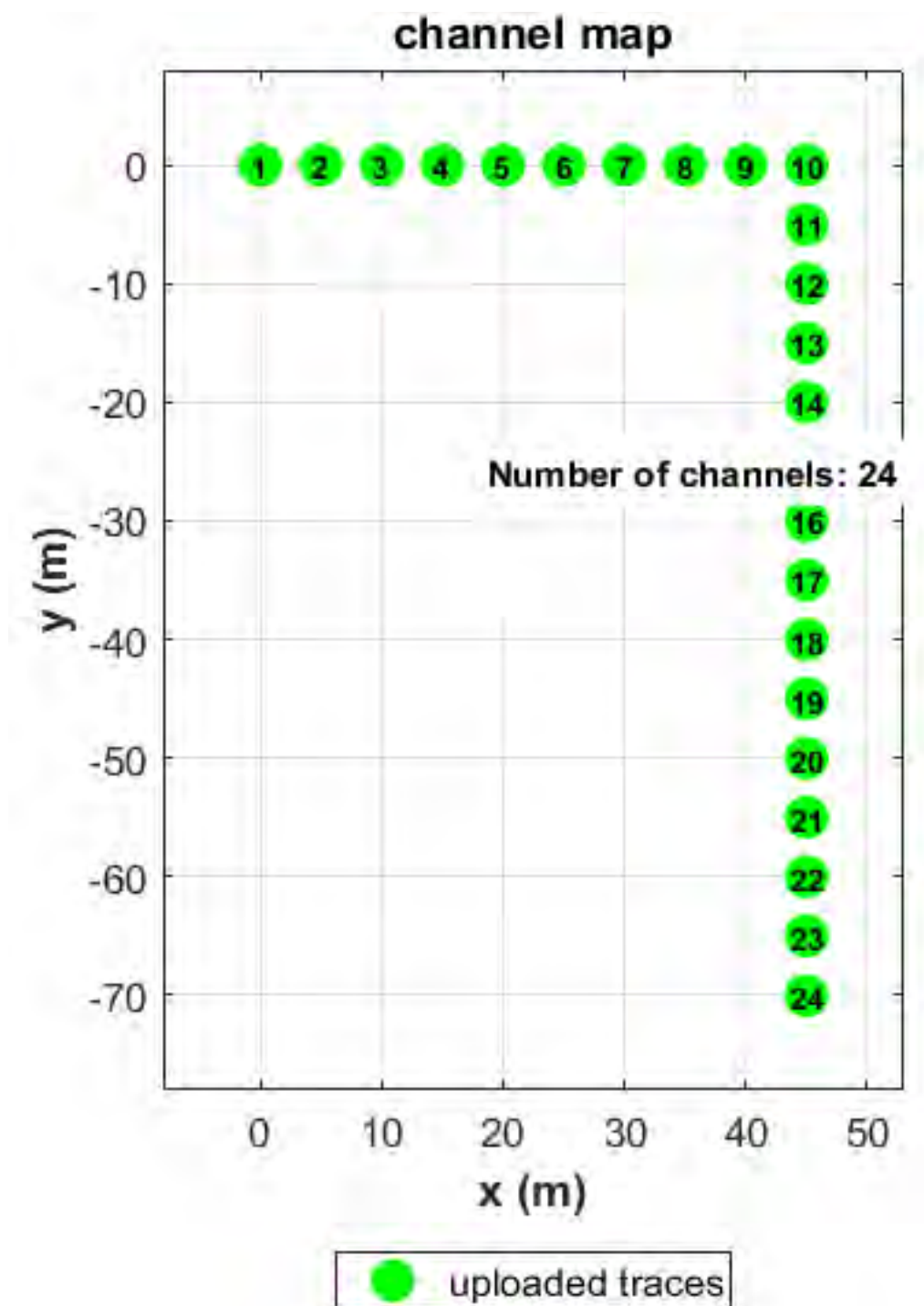


Fig. 3: Geometria dello stendimento sismico Esac

Per la prova “passiva” (Esac) sono stati raccolti, 10 records di lunghezza di 60 sec l’uno, con campionamento ogni 1.0 ms.

2.3.3 Elaborazione dei dati

Il software di elaborazione utilizzato è il winMASW Academy prodotto dalla Eliosoft.

Anche in questo caso è stato calcolato lo spettro velocità di fase-frequenza relativo alle acquisizioni passive, che ha consentito di definire con maggior dettaglio le basse frequenze.

In seguito, sono stati “combinati” gli spettri derivati dalla prova “Masw” e da quella “Esac” in modo da ottenere uno spettro di velocità “congiunto”.

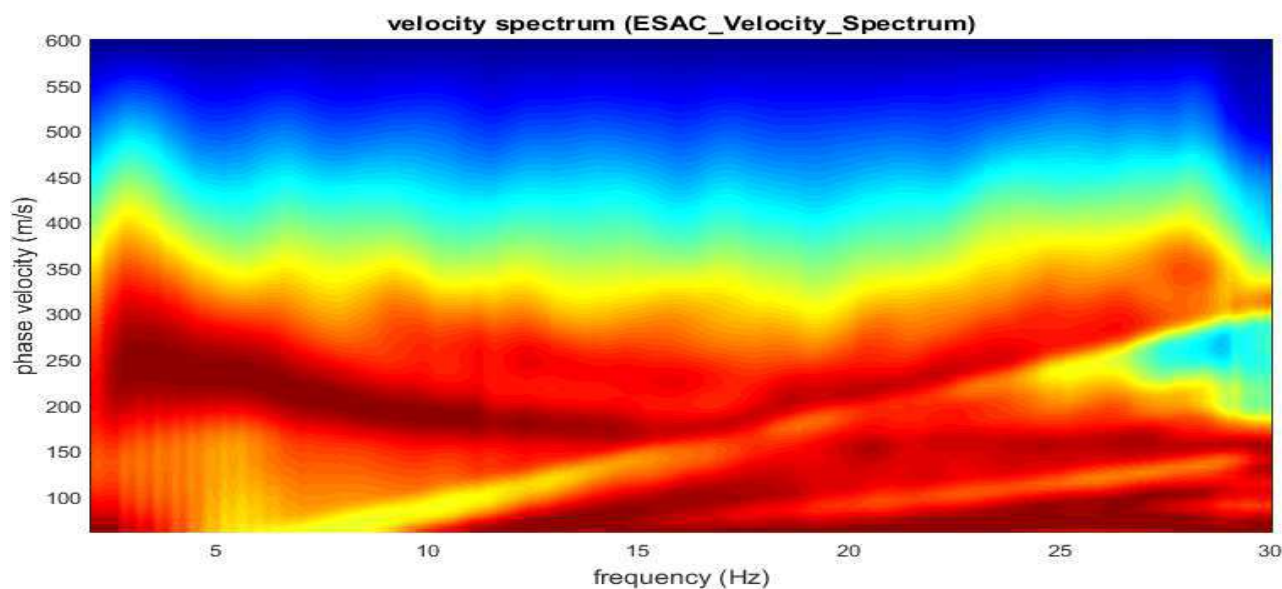


Fig. 4: Analisi spettrale della prova “Esac”

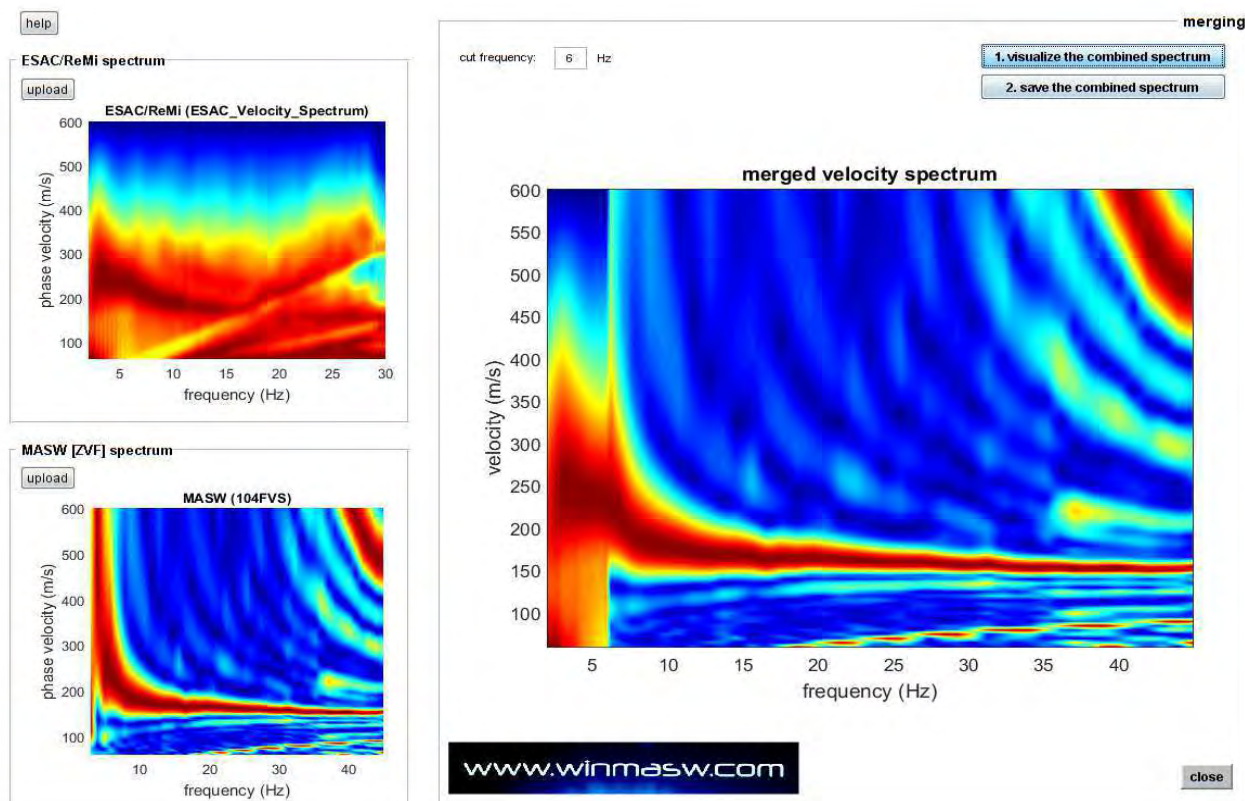


Figura 5: “Combinazione” degli spettri di velocità derivati dalle prove attive e passive

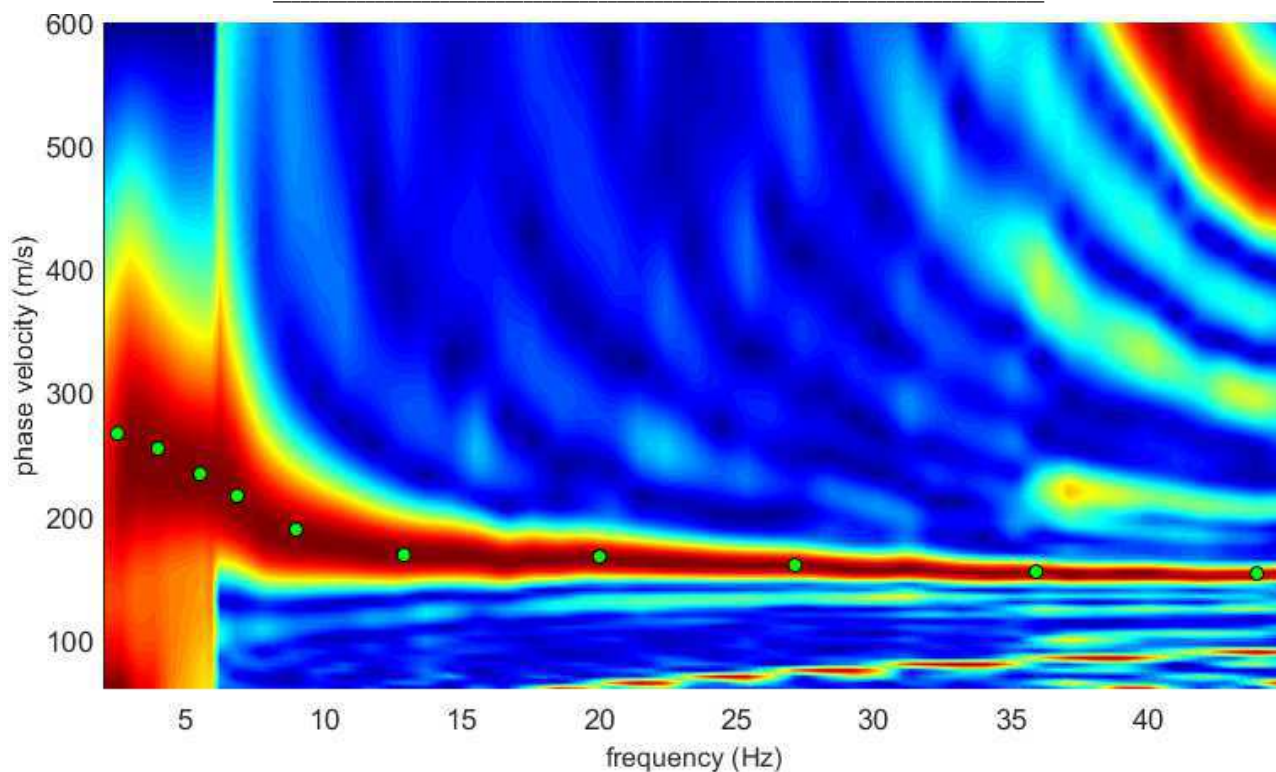


Figura 6: Curva di dispersione derivata dallo spettro di velocità combinato

Infine, è stata estrapolata la curva di dispersione (effettiva) congiunta Masw-Esac che ha consentito di ricavare il profilo di velocità Vs del sito.

3 ANALISI DEI RISULTATI

I dati sismici acquisiti ed elaborati hanno consentito di determinare il profilo di velocità delle onde “S” del sito.

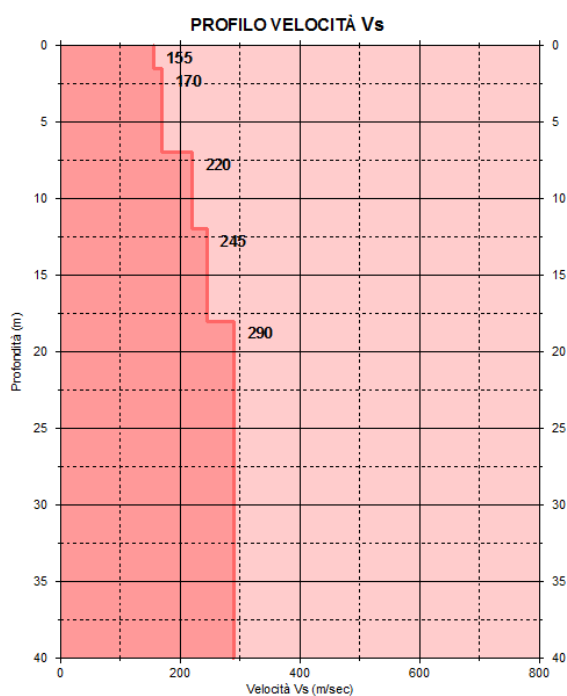


Fig. 7 Profilo velocità

Esaminando i risultati della prova si possono fare le seguenti considerazioni:

- ✓ Lo spessore del materiale con $V_s = 155$ m/s è di 1.5 metri;
- ✓ Fra 1.5 e 7 metri le velocità aumentano leggermente portandosi sui 170 m/s;
- ✓ Fra 7 e 18 metri le velocità aumentano più nettamente portandosi sui 220-245 m/s;
- ✓ Oltre i 18 metri, si ha un ulteriore incremento, con valori che raggiungono i 290 m/s.

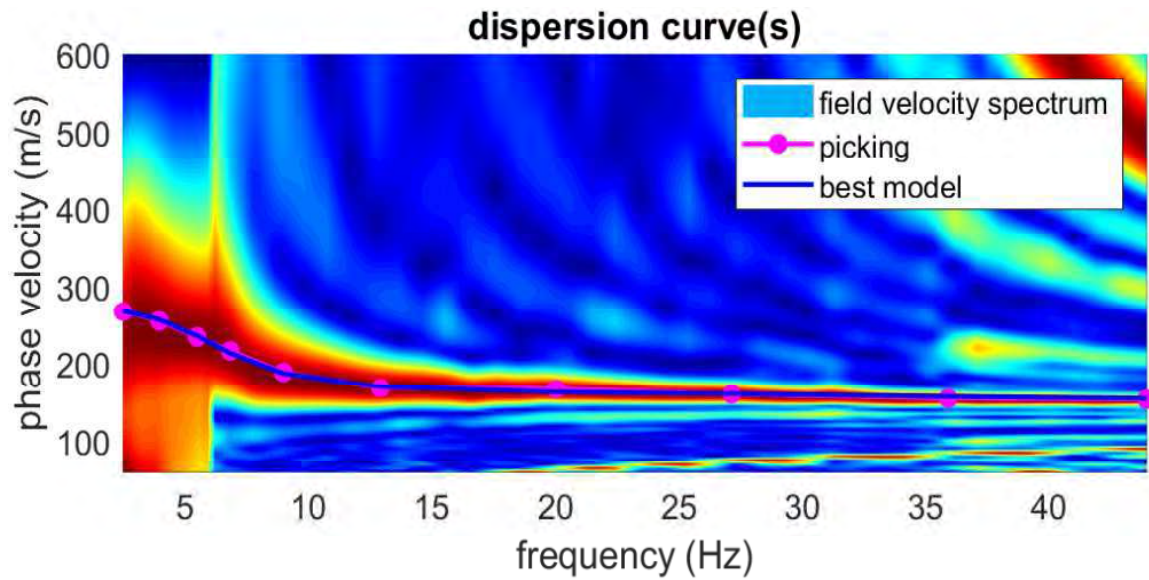
3.1 CLASSIFICAZIONE DEL SOTTOSUOLO DI FONDAZIONE

Poiché la norma stabilisce che la classificazione deve riguardare i terreni al di sotto delle fondazioni, in funzione del piano di posa delle fondazioni stesse, la V_{s_eq} varia secondo la seguente tabella:

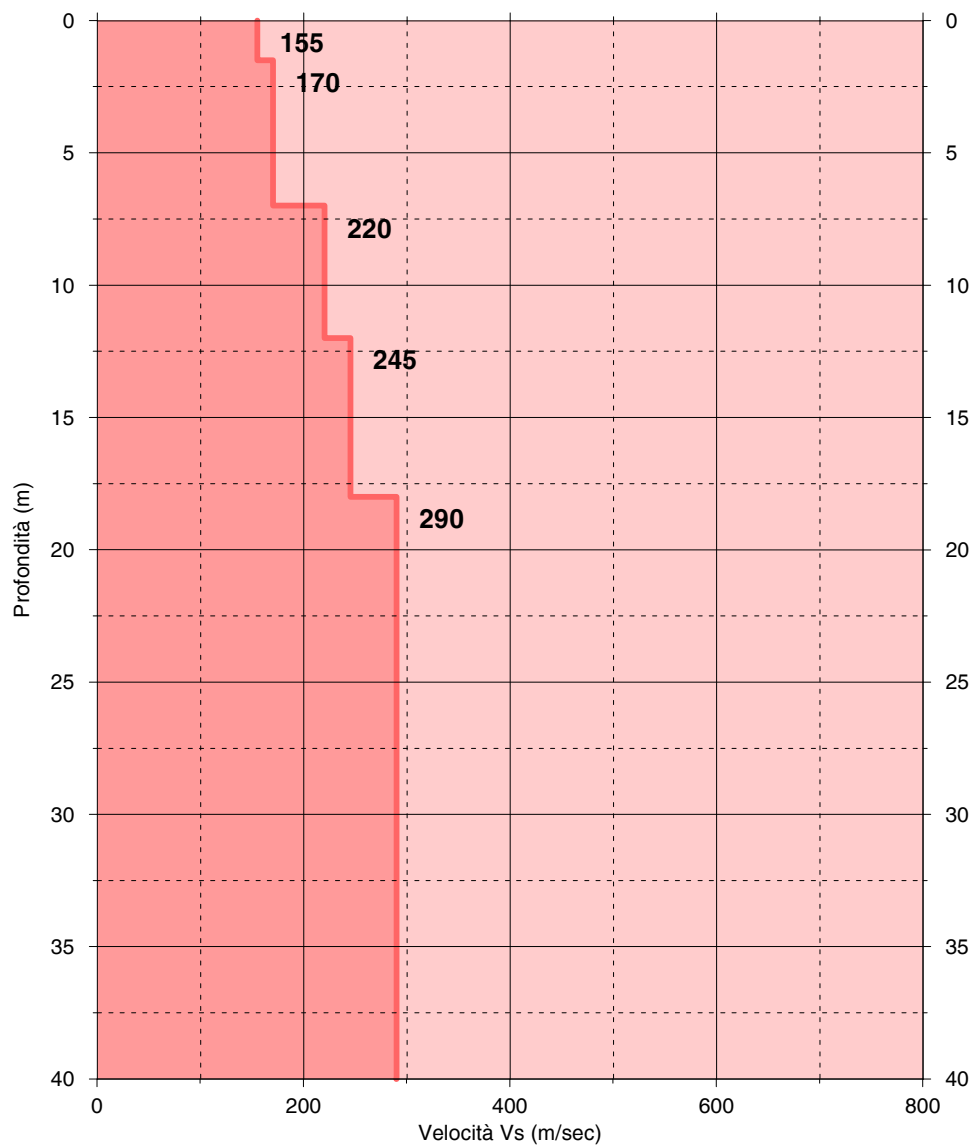
<i>Quota piano di fondazione</i>	<i>Intervallo dal p.c.</i>	<i>V_{s_eq}</i>	<i>Categoria di sottosuolo</i>
0 m	0/-30 m	229 m/sec	C
-1 m	-1/-31 m	235 m/sec	C
-2 m	-2/-32 m	240 m/sec	C
-3 m	-3/-33 m	245 m/sec	C
-4 m	-4/-34 m	250 m/sec	C
-5 m	-5/-35 m	255 m/sec	C

Tabella 1

Spettro velocità di fase - curva dispersione



PROFILO VELOCITÀ Vs



Vs_eq (0-30 m) = 229 m/s

Sottosuolo di fondazione tipo "C"

Dott. Roberto Mariotti – Geologo Specialista
Corso Garibaldi, 95 – 26100 Cremona (CR)
e-mail: drmariotti.roberto@libero.it

tel/fax: 0372-23266
cell: 335-6958159
pec: mariottiroberto@epap.sicurezzapostale.it

ALLEGATO 5

RISULTATI GRAFICI E TABULATI INDAGINI SISMICHE HVSR

Scuola dell'infanzia "Il Girasole"- San Martino in Beliseto, Castelveverde (CR) – Prova HVSR_1

Strumento: TEP-0122/01-10

Formato dati: 16 byte

Inizio registrazione: 09/04/00 20:49:47 Fine registrazione: 09/04/00 21:09:47

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h20'00".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

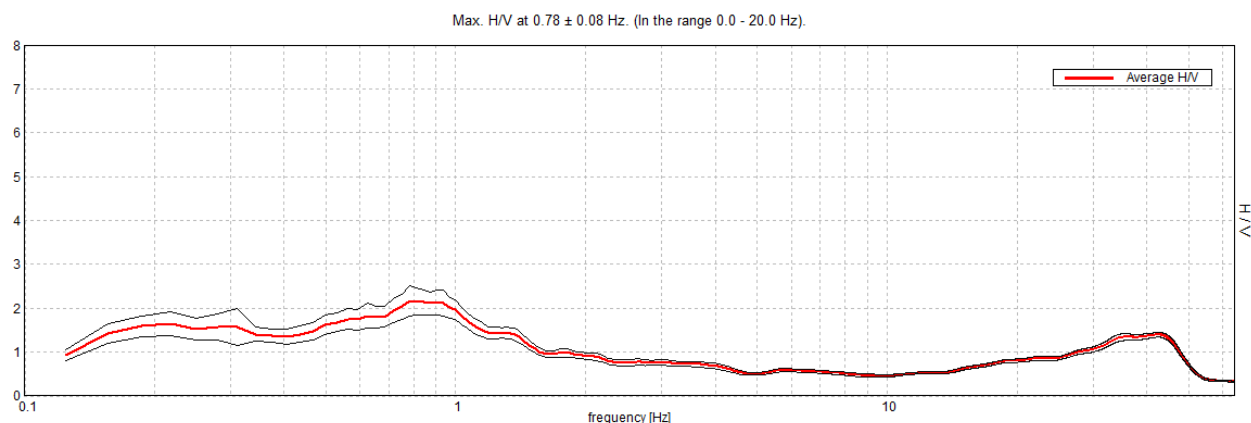
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

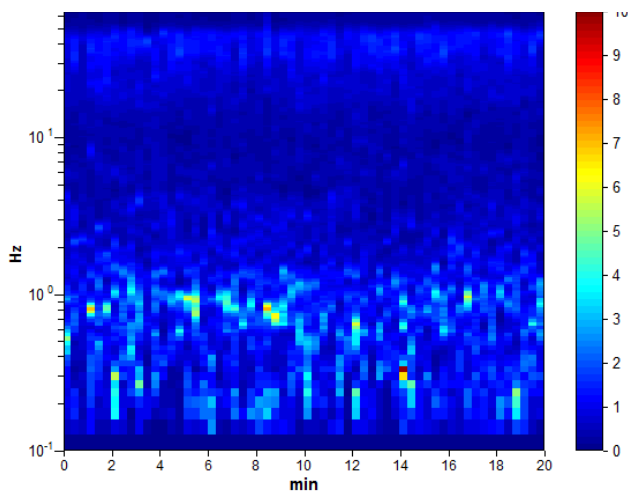
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

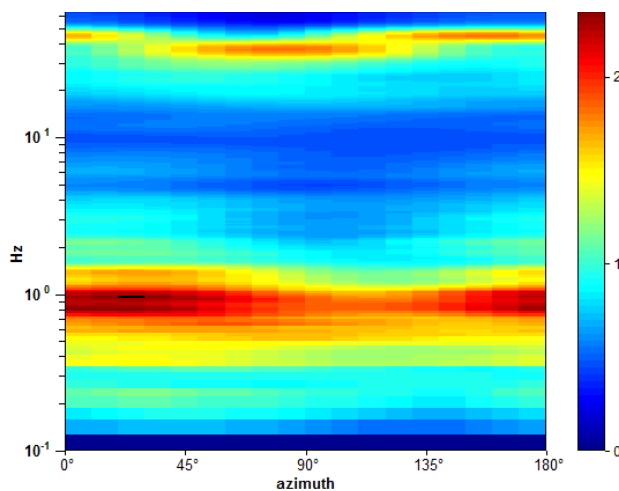
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



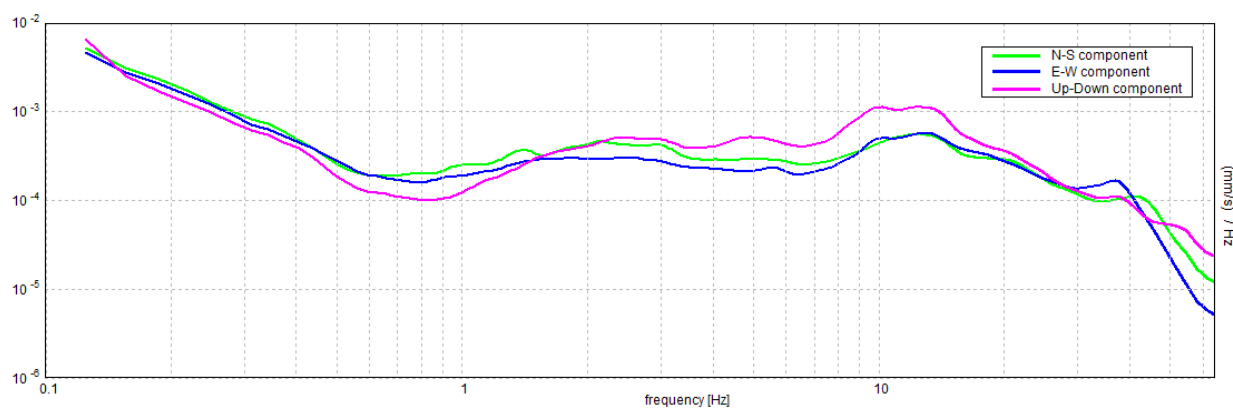
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di Grilla prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.78 ± 0.08 Hz (nell'intervallo 0.0 - 20.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.78 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$937.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 38	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.531 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.16 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.10482 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.08189 < 0.11719$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3501 < 2.0$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

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

Scuola dell'infanzia "Il Girasole"- San Martino in Beliseto, Castelveverde (CR) – Prova HVSR_2

Strumento: TEP-0122/01-10

Formato dati: 16 byte

Inizio registrazione: 09/04/00 21:18:10 Fine registrazione: 09/04/00 21:38:10

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 98% tracciato (selezione manuale)

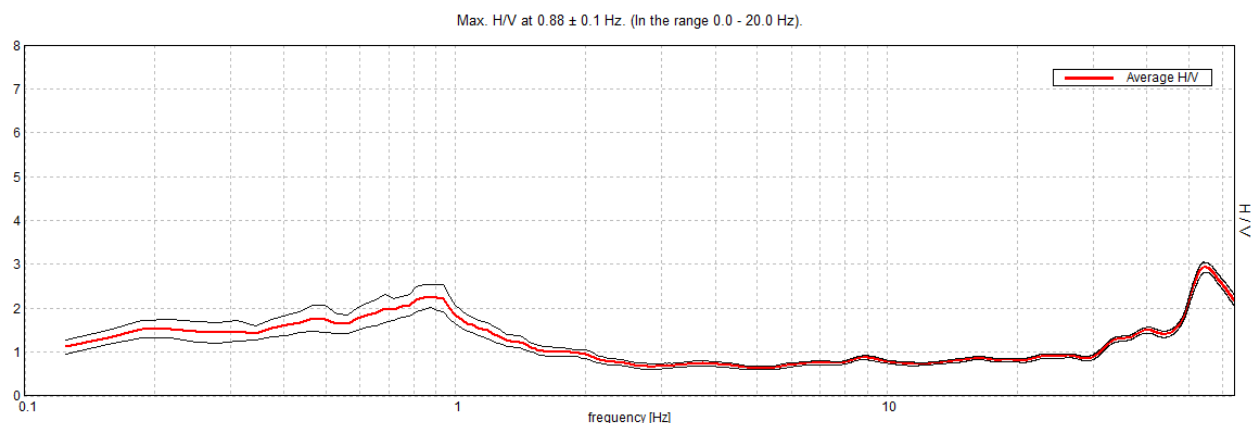
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

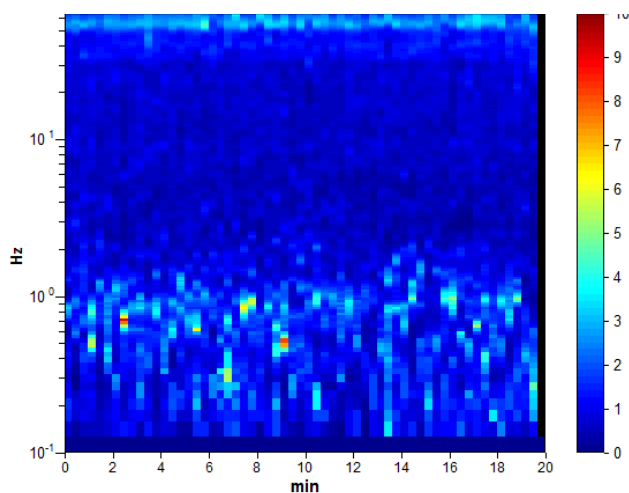
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

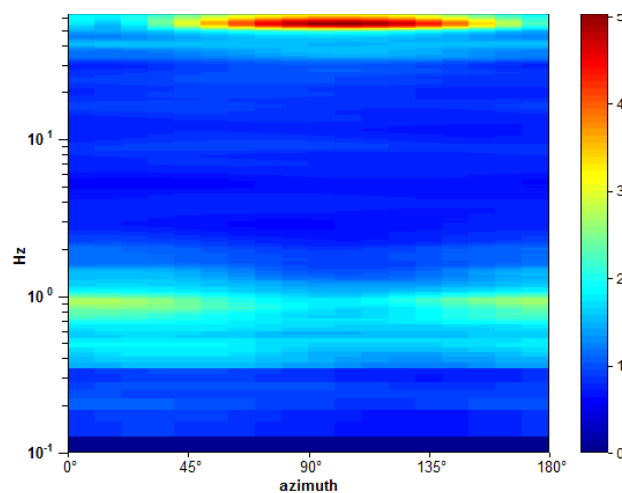
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



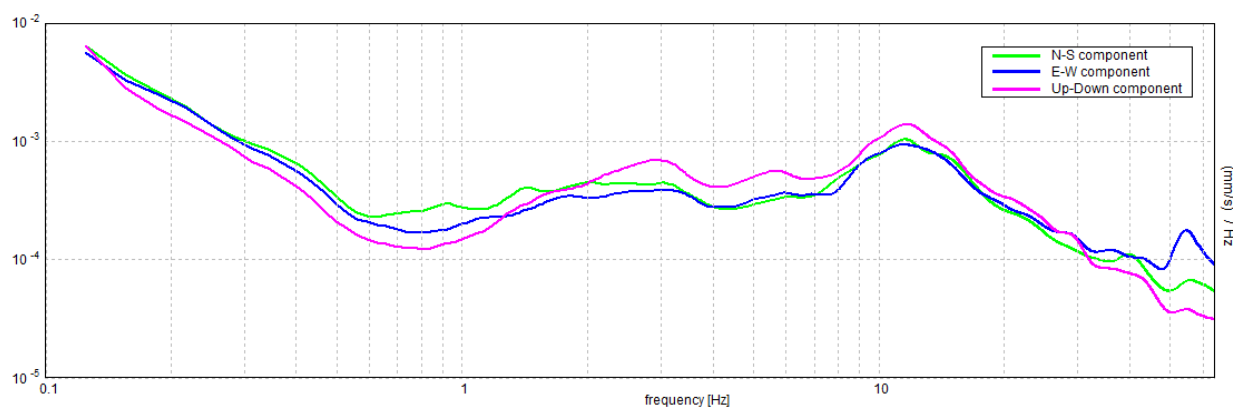
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di Grilla prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.88 ± 0.1 Hz (nell'intervallo 0.0 - 20.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.88 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1032.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 43	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.5 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.28 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.11512 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.10073 < 0.13125$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2705 < 2.0$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

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

Scuola dell'infanzia "Il Girasole"- San Martino in Beliseto, Castelveverde (CR) – Prova HVSR_3

Strumento: TEP-0122/01-10

Formato dati: 16 byte

Inizio registrazione: 09/04/00 21:39:21 Fine registrazione: 09/04/00 21:58:47

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Durata registrazione: 0h19'24". Analizzato 97% tracciato (selezione manuale)

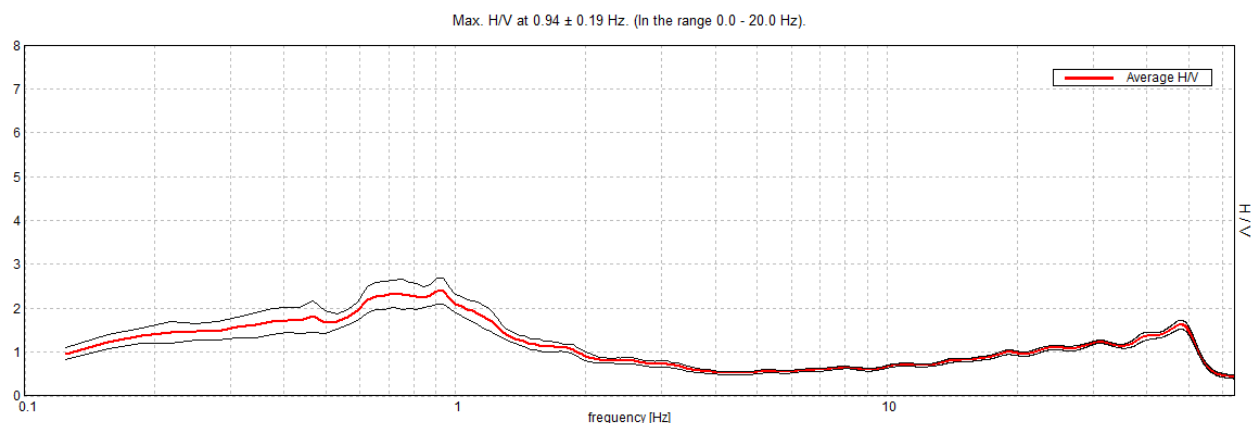
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 18 s

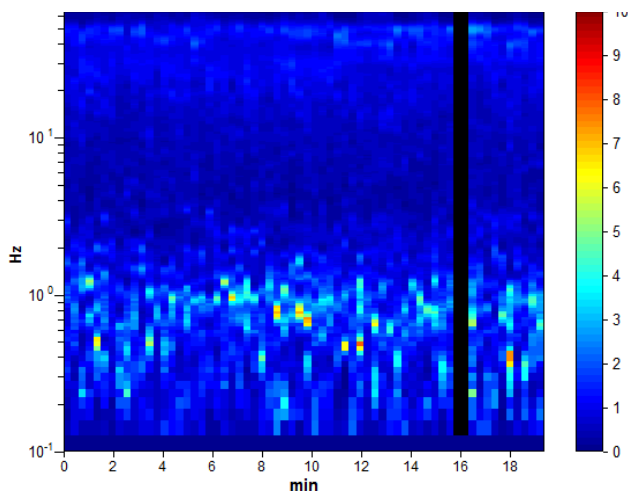
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

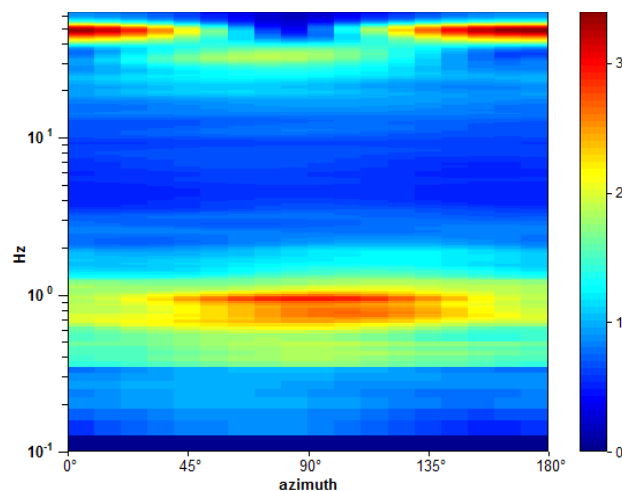
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



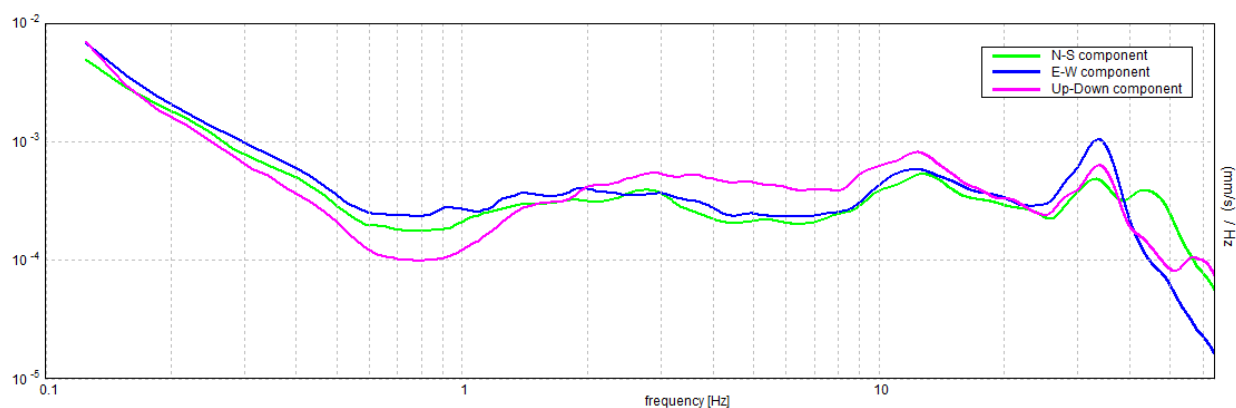
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di Grilla prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.94 ± 0.19 Hz (nell'intervallo 0.0 - 20.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.94 > 0.56$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1046.3 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 46	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.5 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.39 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.20223 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.18959 < 0.14063$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3068 < 2.0$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

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

Dott. Roberto Mariotti – Geologo Specialista
Corso Garibaldi, 95 – 26100 Cremona (CR)
e-mail: drmariotti.roberto@libero.it

tel/fax: 0372-23266
cell: 335-6958159
pec: mariottiroberto@epap.sicurezzapostale.it

ALLEGATO 6

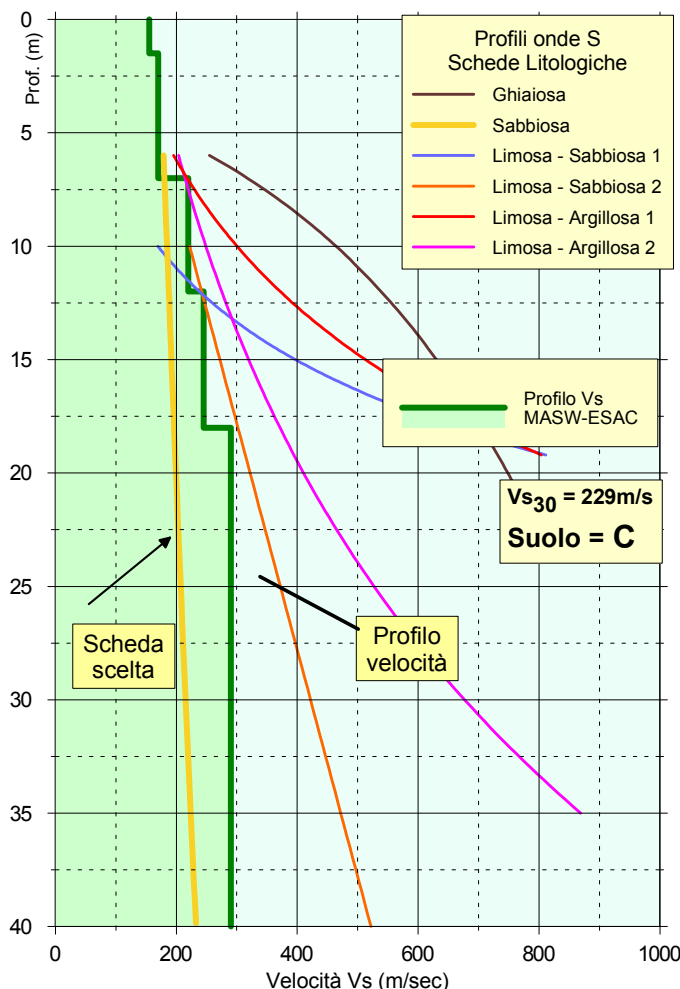
APPROFONDIMENTO SISMICO DI 2° LIVELLO

CASTELVERDE (CR) - Scuola dell'Infanzia "Il Girasole"

Approfondimento sismico di 2° Livello

SCHEDA LITOLOGIA SABBIOSA

CONFRONTO TRA VELOCITÀ V_s DEL SITO E PROFILI VELOCITÀ SCHEDE LITOLOGICHE



SCHEDA DI VALUTAZIONE PER LA SCELTA DELLA CURVA DI AMPLIFICAZIONE
(In funzione della profondità e velocità V_s dello strato superficiale)

		Profondità primo strato (m)																	
		1-3	4	5-12	13	14	15	16	17	18	20	25	30	40	50	60	70	90	110
Velocità primo strato (m/s)	200	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	250	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	300	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	350	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	400	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	450	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	500	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	600	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	700	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

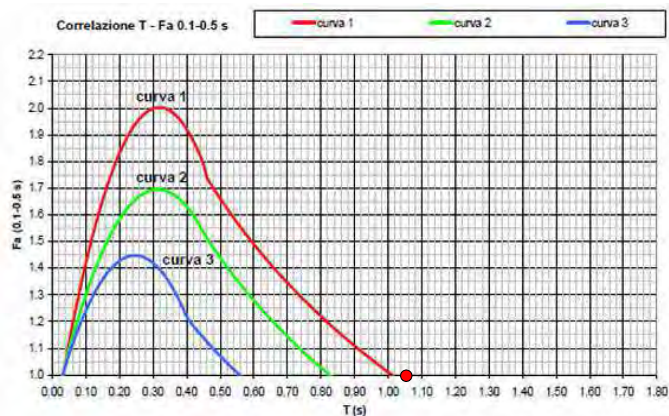
Correlazione T- Fa periodo 0.1-0.5 s

Curva	Tratto polinomiale	Tratto logaritmico	Tratto rettilineo
1	$0.03 \leq T \leq 0.50$	$0.50 < T \leq 1.00$	$T > 1.00$
2	$Fa_{0.1-0.5} = -12.21 T^2 + 7.79 T + 0.76$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.01 - 0.94 \ln T$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.00$
3	$0.03 \leq T \leq 0.45$	$0.45 < T \leq 0.80$	$T > 0.80$
	$Fa_{0.1-0.5} = -8.65 T^2 + 5.44 T + 0.84$	$Fa_{0.1-0.5} = 0.83 - 0.88 \ln T$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.00$
	$0.03 \leq T \leq 0.40$	$0.50 < T \leq 0.55$	$T > 0.55$
	$Fa_{0.1-0.5} = -9.68 T^2 + 4.77 T + 0.86$	$Fa_{0.1-0.5} = 0.62 - 0.65 \ln T$	$Fa_{0.1-0.5} = 1.00$

Correlazione T- Fa periodo 0.5-1.5 s

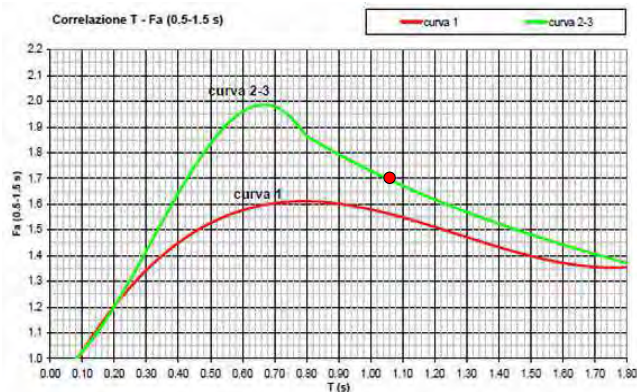
Curva	
1	$0.08 \leq T \leq 1.80$
2	$Fa_{0.5-1.5} = 0.57 T^2 - 2.18 T^2 + 2.38 T + 0.81$
3	$0.08 \leq T < 0.80$
	$Fa_{0.5-1.5} = -6.11 T^3 + 5.79 T^2 + 0.44 T + 0.93$
	$0.80 \leq T \leq 1.80$
	$Fa_{0.5-1.5} = 1.73 - 0.61 \ln T$

Correlazione T- Fa periodo 0.1 - 0.5 s



F.A. Valore calcolato: 1.0 < Valore soglia: 1.8

Correlazione T- Fa periodo 0.5 - 1.5 s



F.A. Valore calcolato: 1.7 < Valore soglia: 2.4

Dott. Roberto Mariotti – *Geologo Specialista*
Corso Garibaldi, 95 – 26100 Cremona (CR)
e-mail: drmariotti.roberto@libero.it

tel/fax: 0372-23266
cell: 335-6958159
pec: mariottiroberto@epap.sicurezzapostale.it

ALLEGATO 7

VERIFICA DELLA LIQUEFAZIONE DEI TERRENI IN CONDIZIONI SISMICHE

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

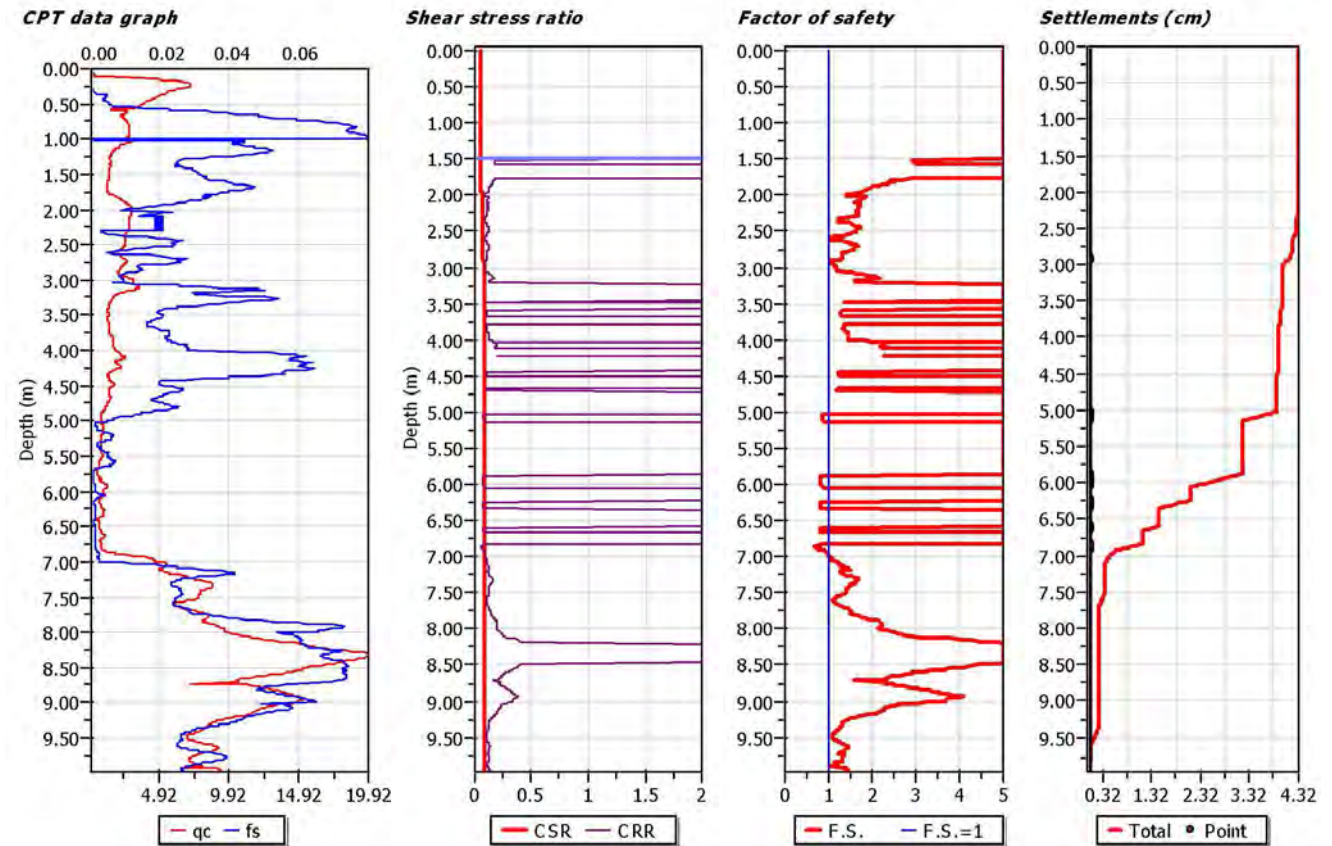
Project title : Scuola Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelveide (CR)

Project subtitle : CPTU-01

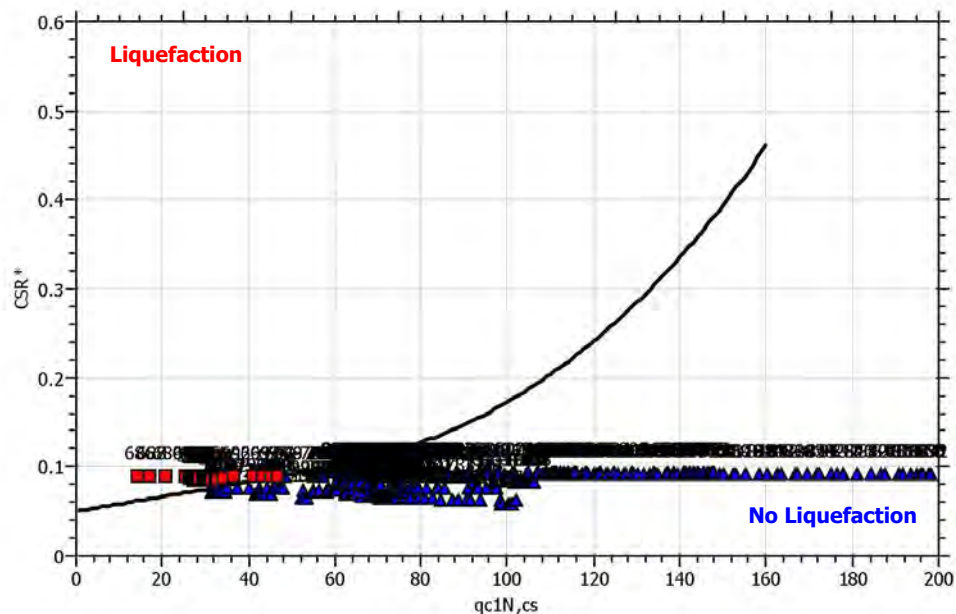
Input parameters and analysis data

In-situ data type: Cone Penetration Test
Analysis type: Deterministic
Analysis method: Robertson (1998)
Fines correction method: Robertson (1998)

Depth to water table: 1.50 m
Earthquake magnitude M_w : 6.14
Peak ground acceleration: 0.15 g
User defined F.S.: 1.00



$M_w=7^{1/2}$, $\sigma_w=1$ atm base curve



Dott. Roberto Mariotti – *Geologo Specialista*
Corso Garibaldi, 95 – 26100 Cremona (CR)
e-mail: drmariotti.roberto@libero.it

tel/fax: 0372-23266
cell: 335-6958159
pec: mariottiroberto@epap.sicurezzapostale.it

ALLEGATO 8

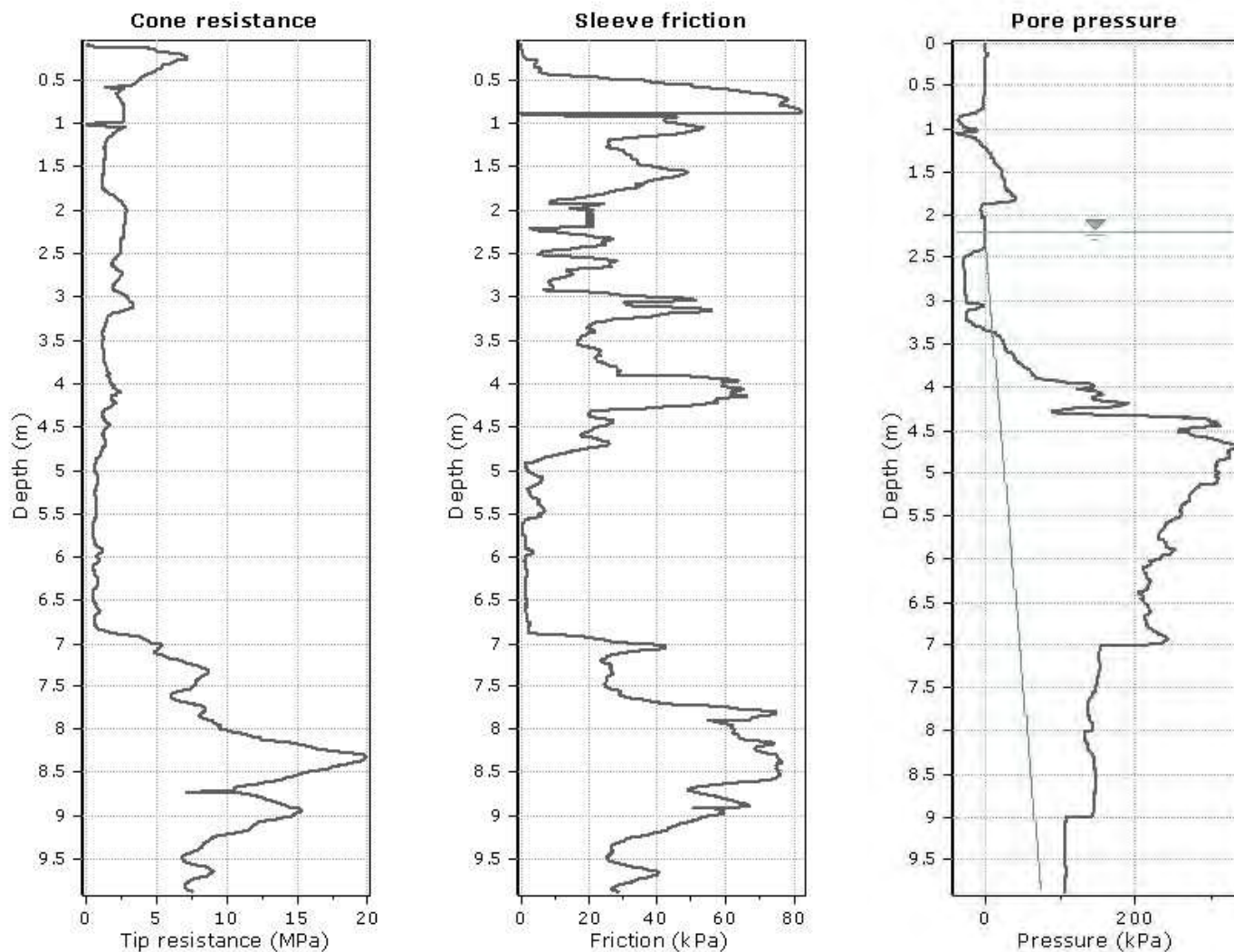
DIAGRAMMI, TABULATI ED ELABORAZIONI DELLE INDAGINI PENETROMETRICHE

Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

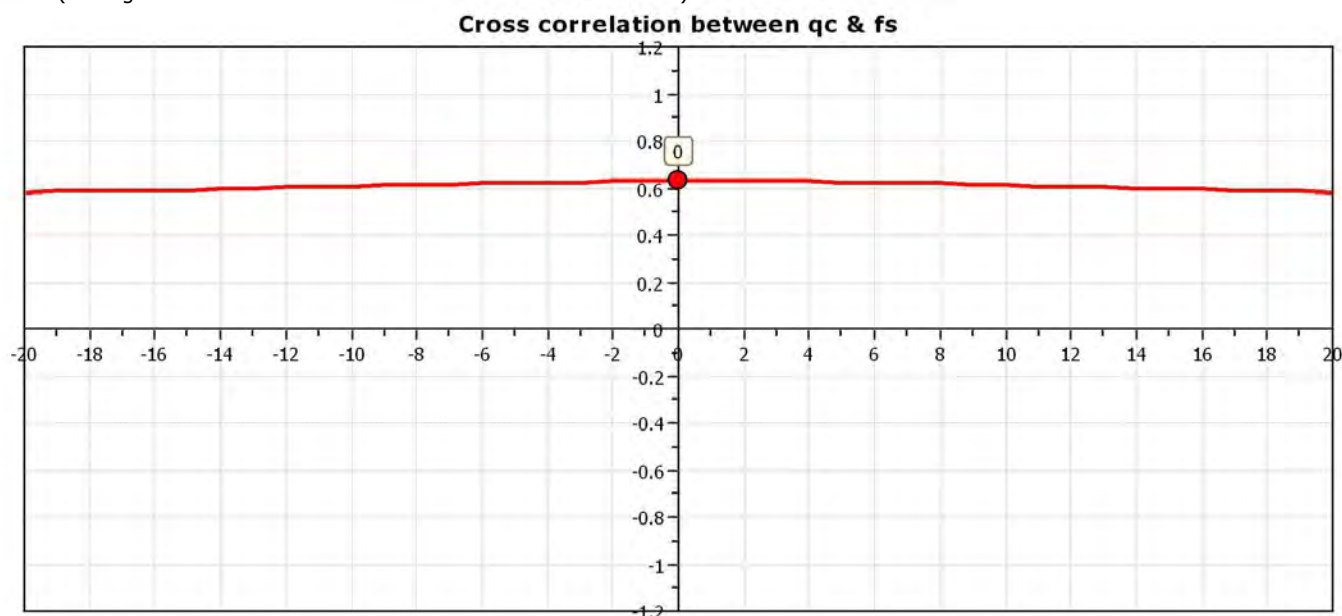
Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelveide (CR)

Cone Operator: Barbieri



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).



Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

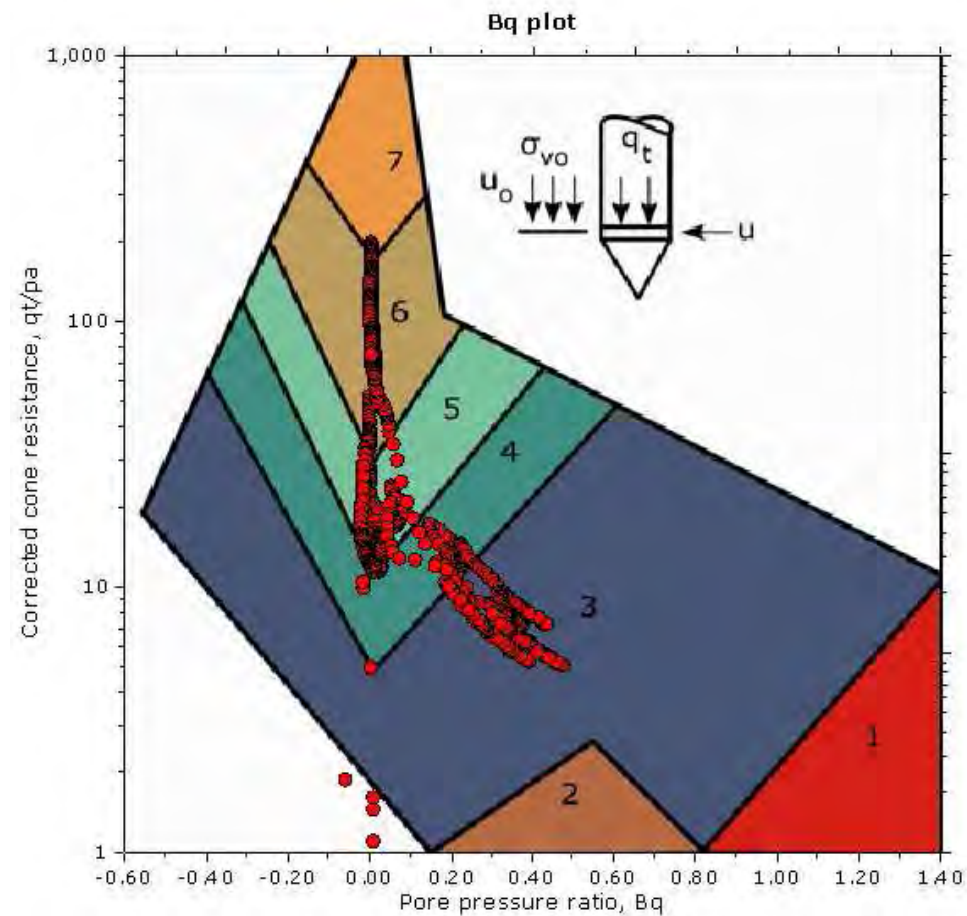
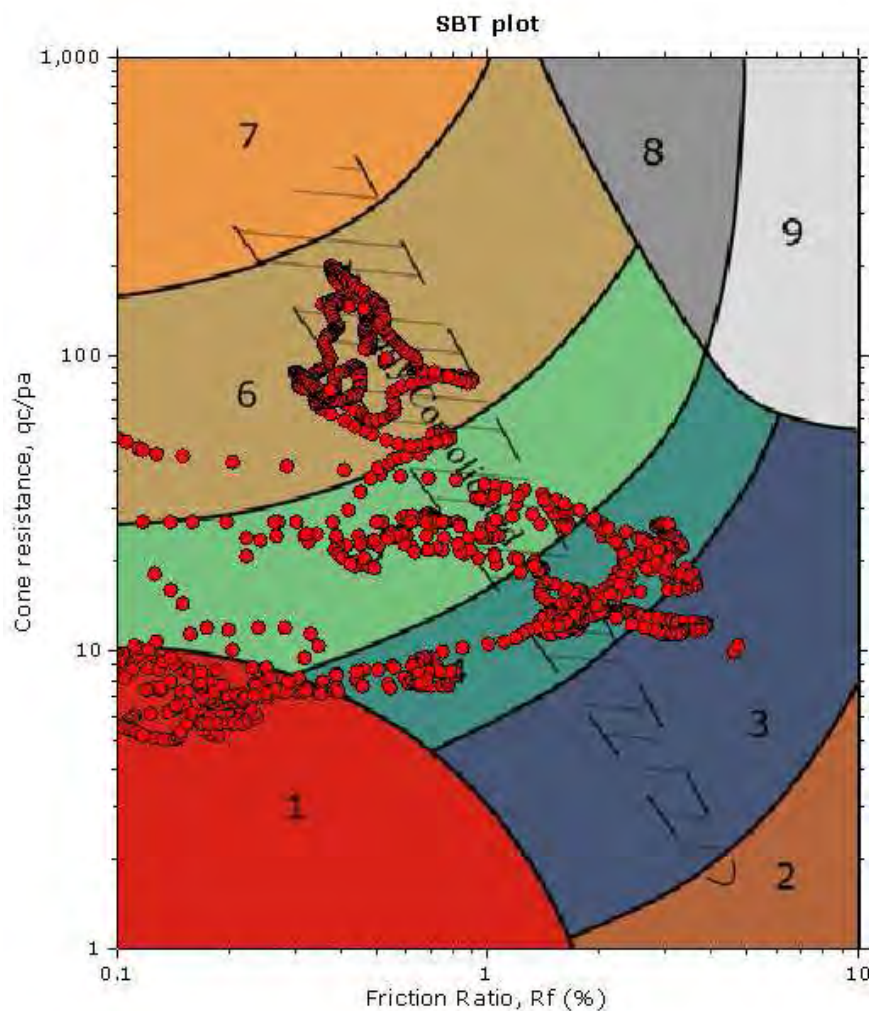
Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castellarve (CR)

CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri

SBT - Bq plots



SBT legend

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

Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

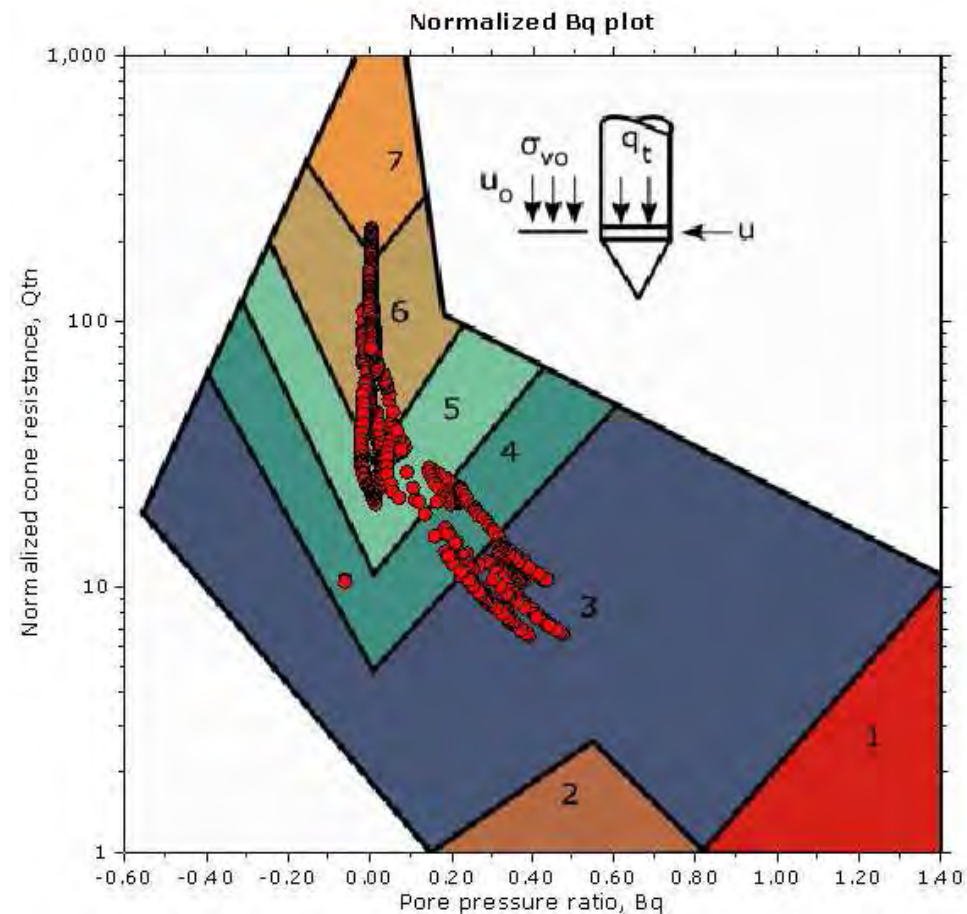
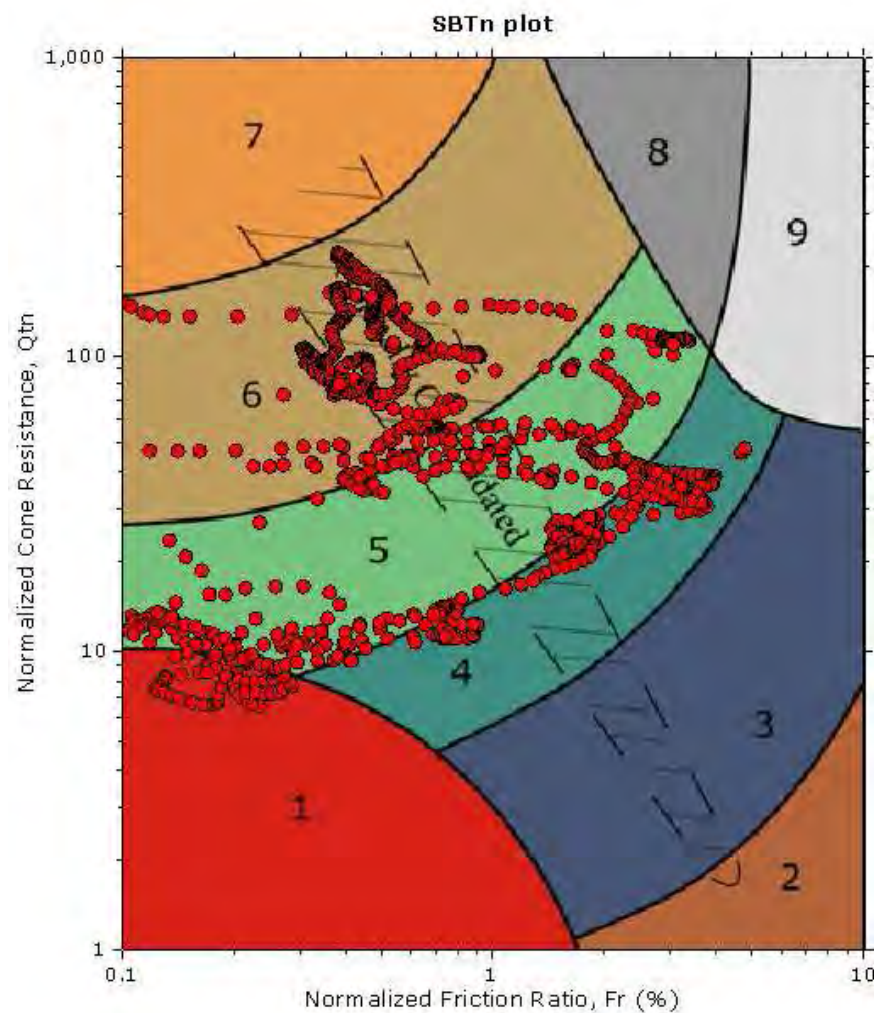
Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelverde (CR)

CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri

SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

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

Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

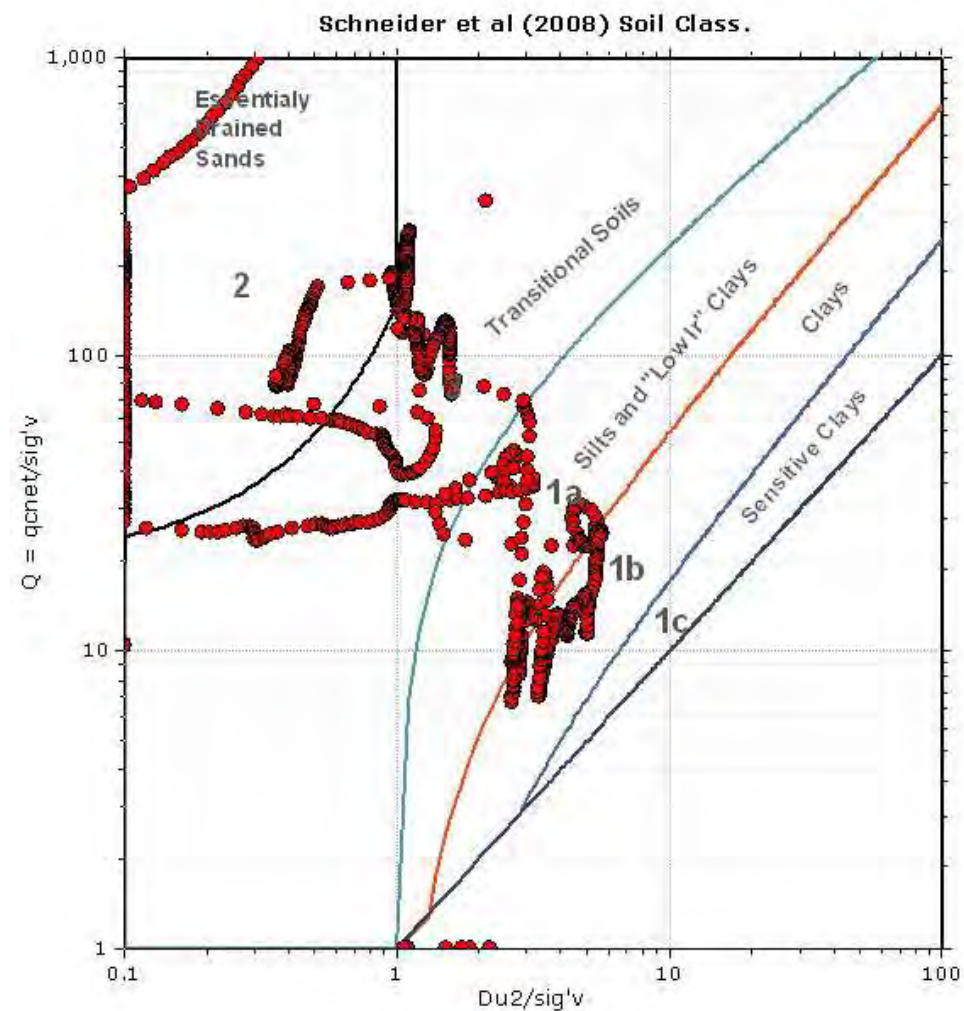
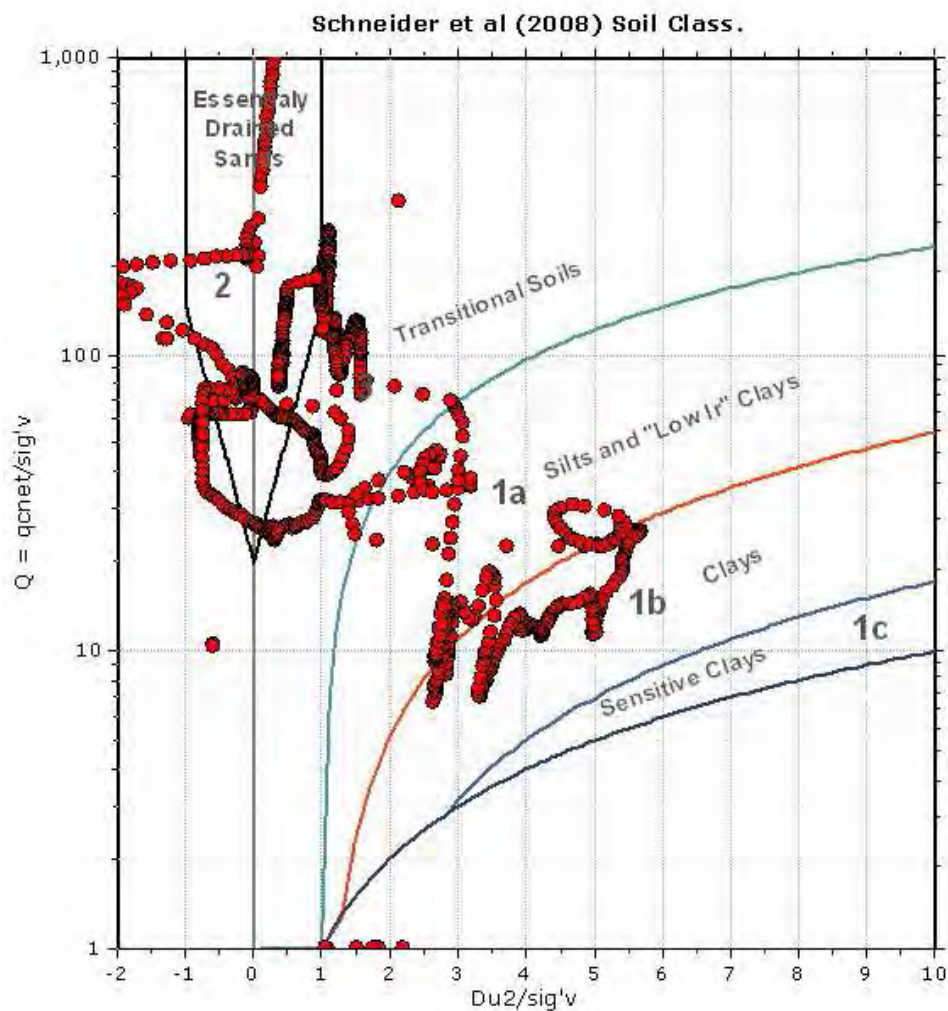
Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelserve (CR)

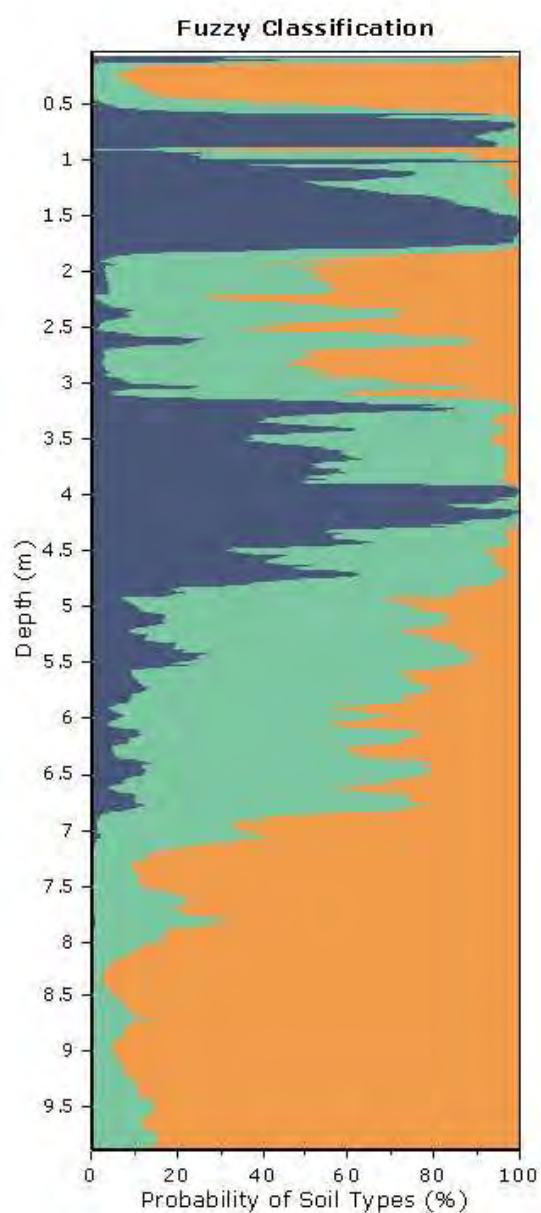
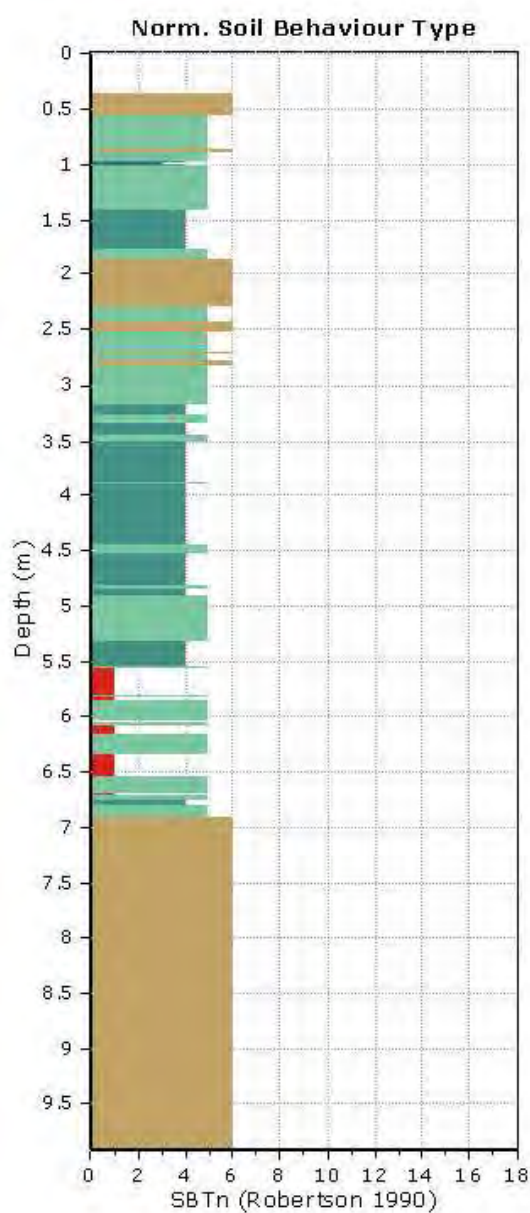
CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri

Bq plots (Schneider)





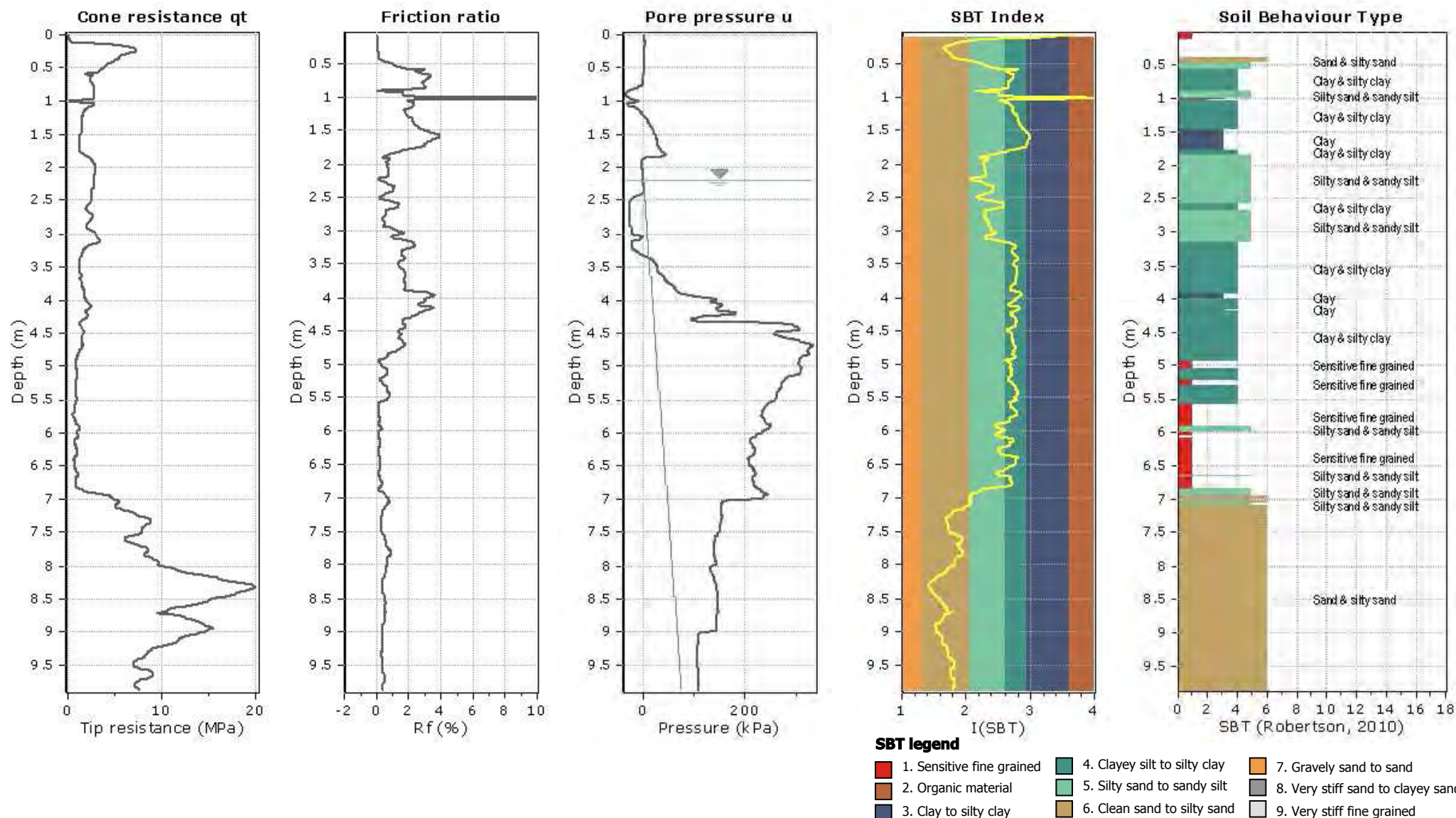
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castellarve (CR)

CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



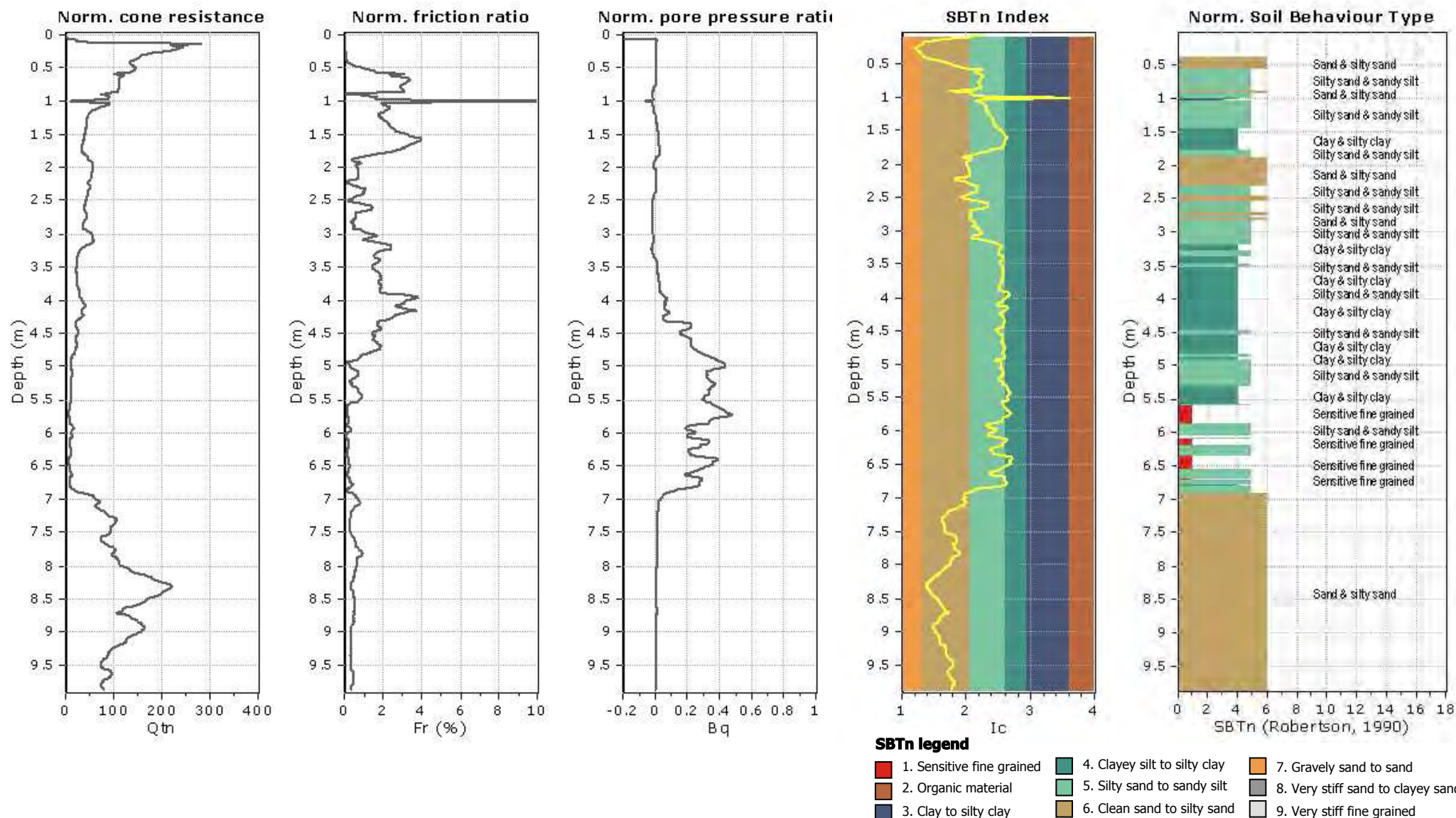
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelverde (CR)

CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



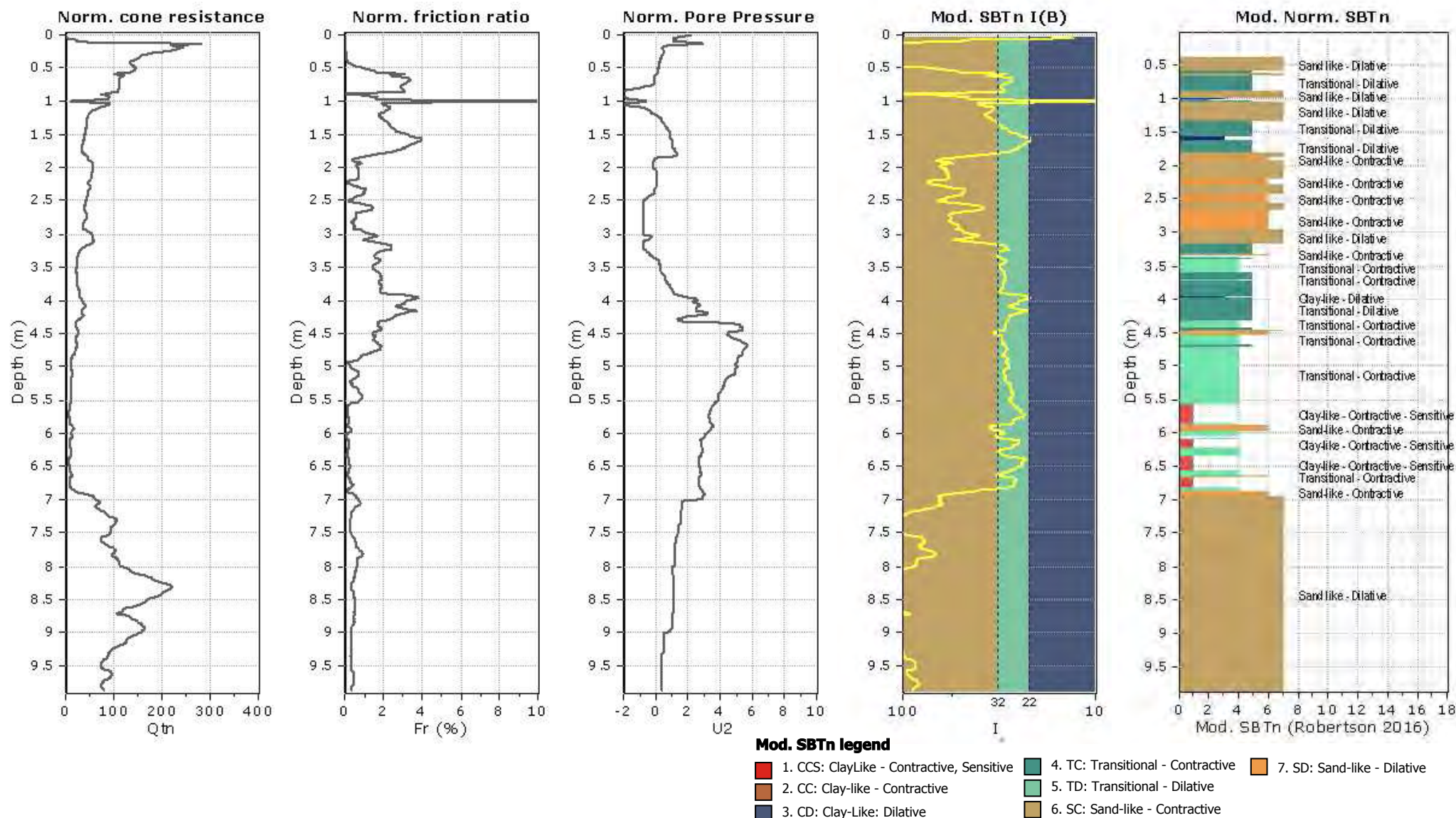
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelserve (CR)

CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

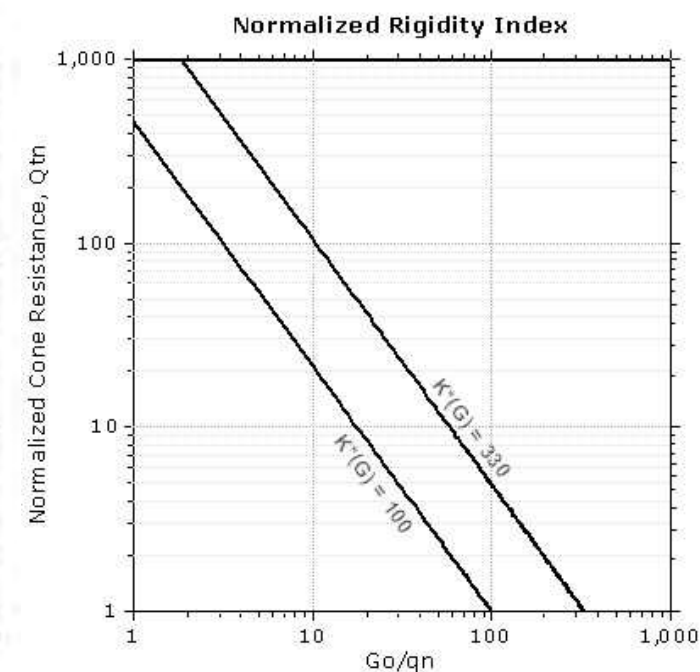
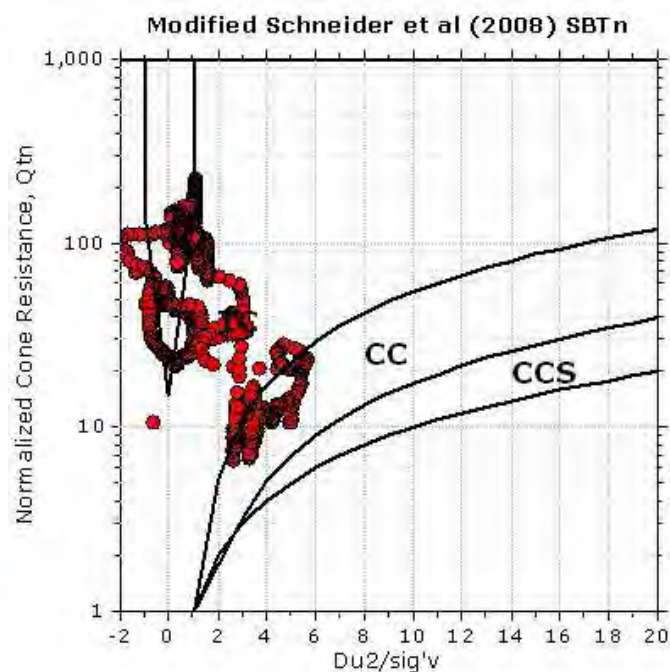
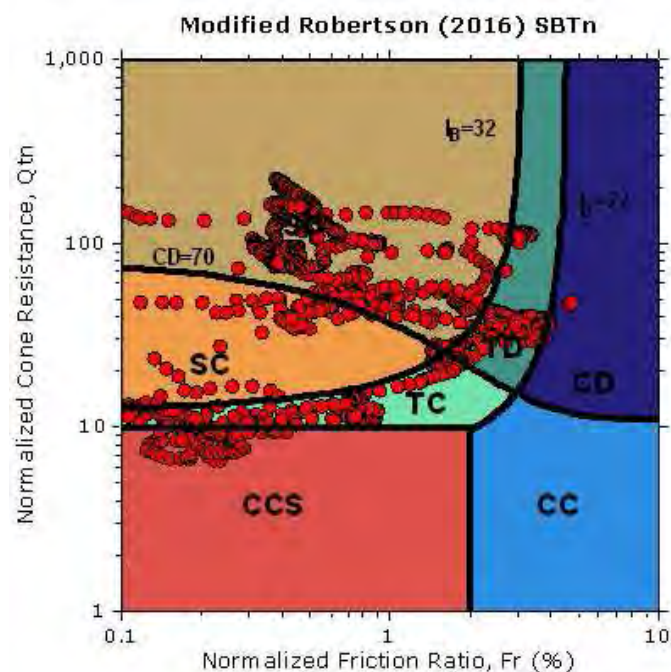
Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castellarve (CR)

CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri

Updated SBTn plots



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

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

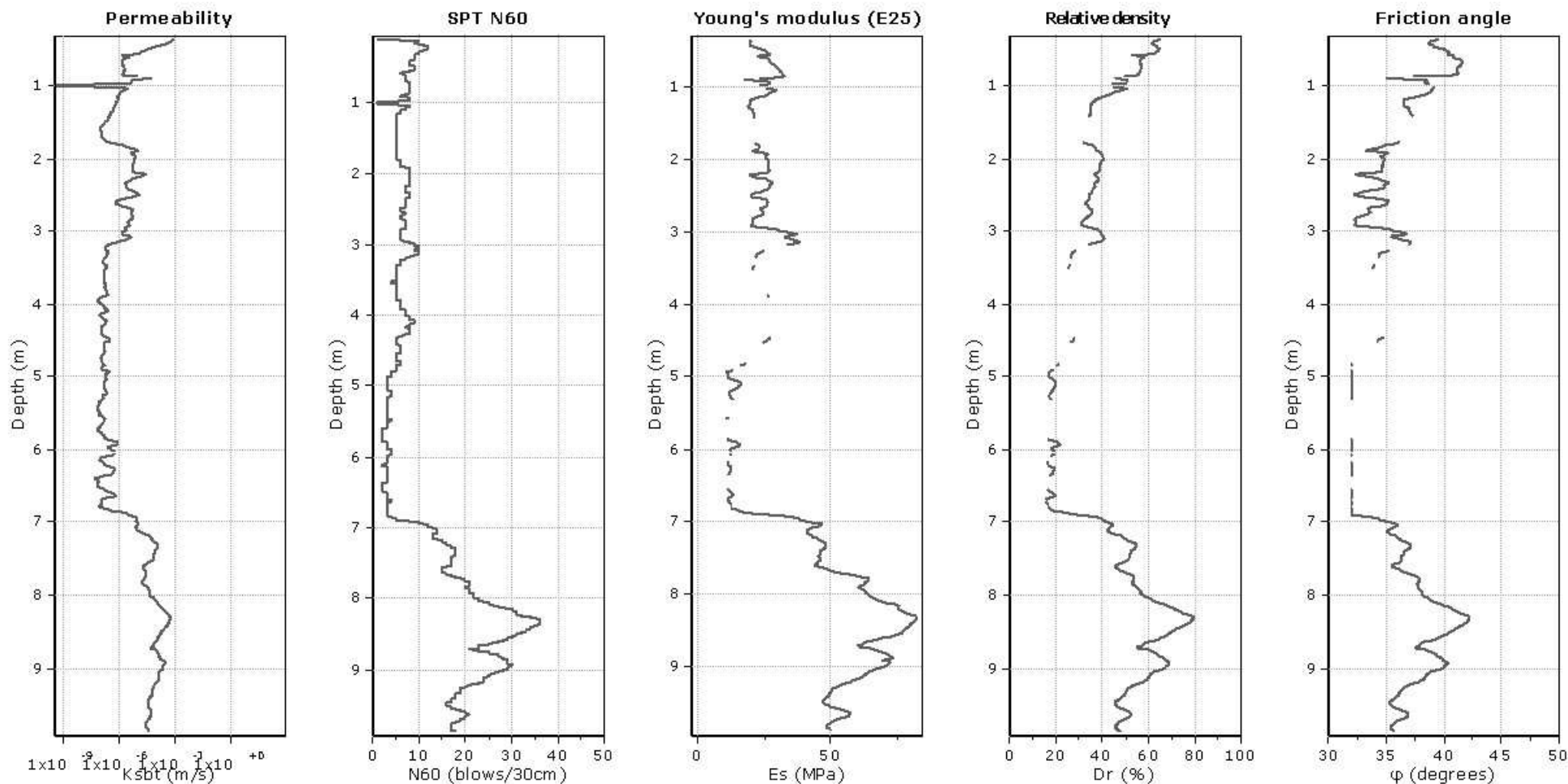
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castellarde (CR)

CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



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 density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● User defined estimation data

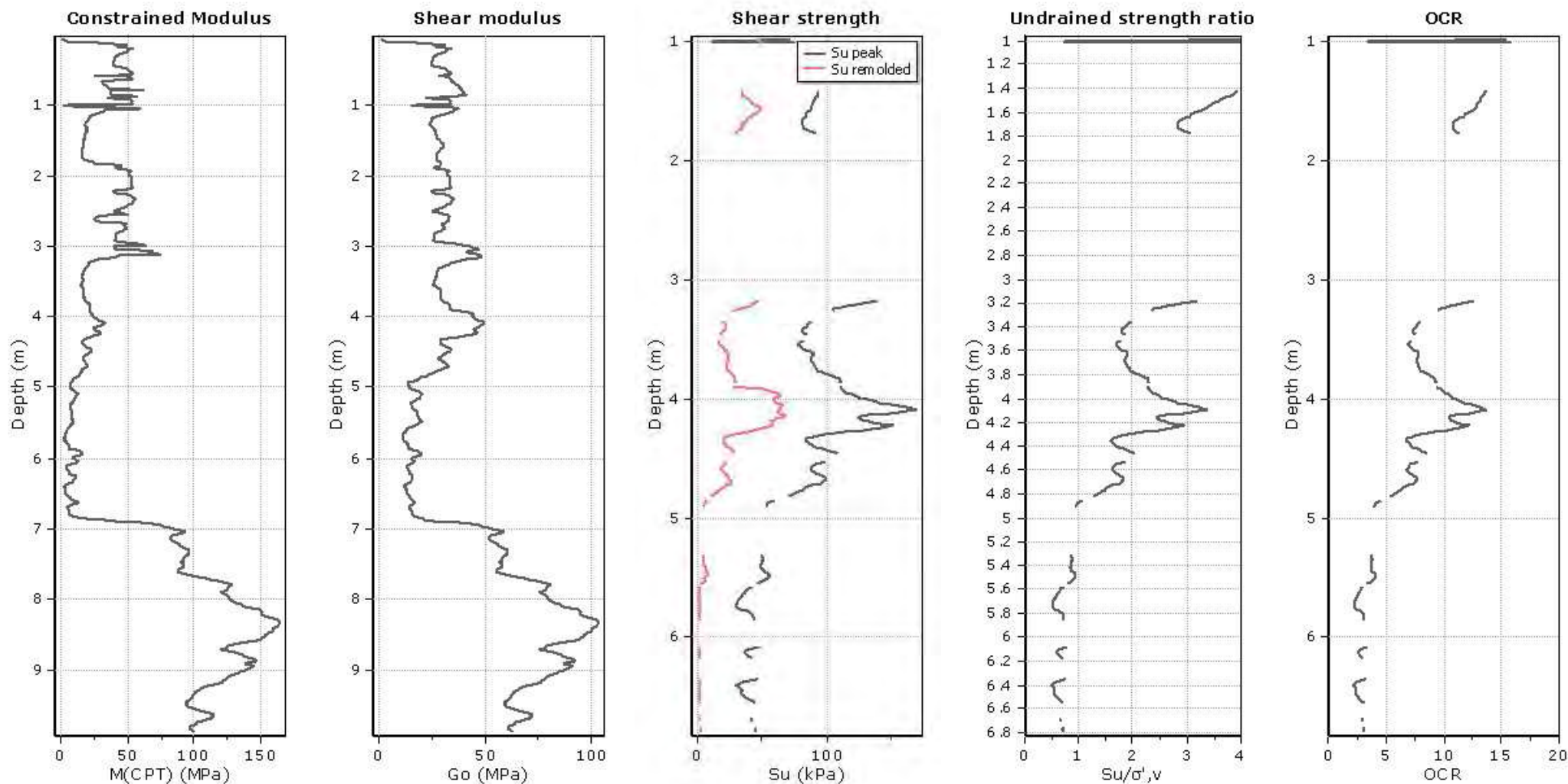
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelverde (CR)

CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{cn} (Robertson, 2009)

Go: Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

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

OCR factor for clays, N_{kz} : 0.33

—●— User defined estimation data

—●— Flat Dilatometer Test data

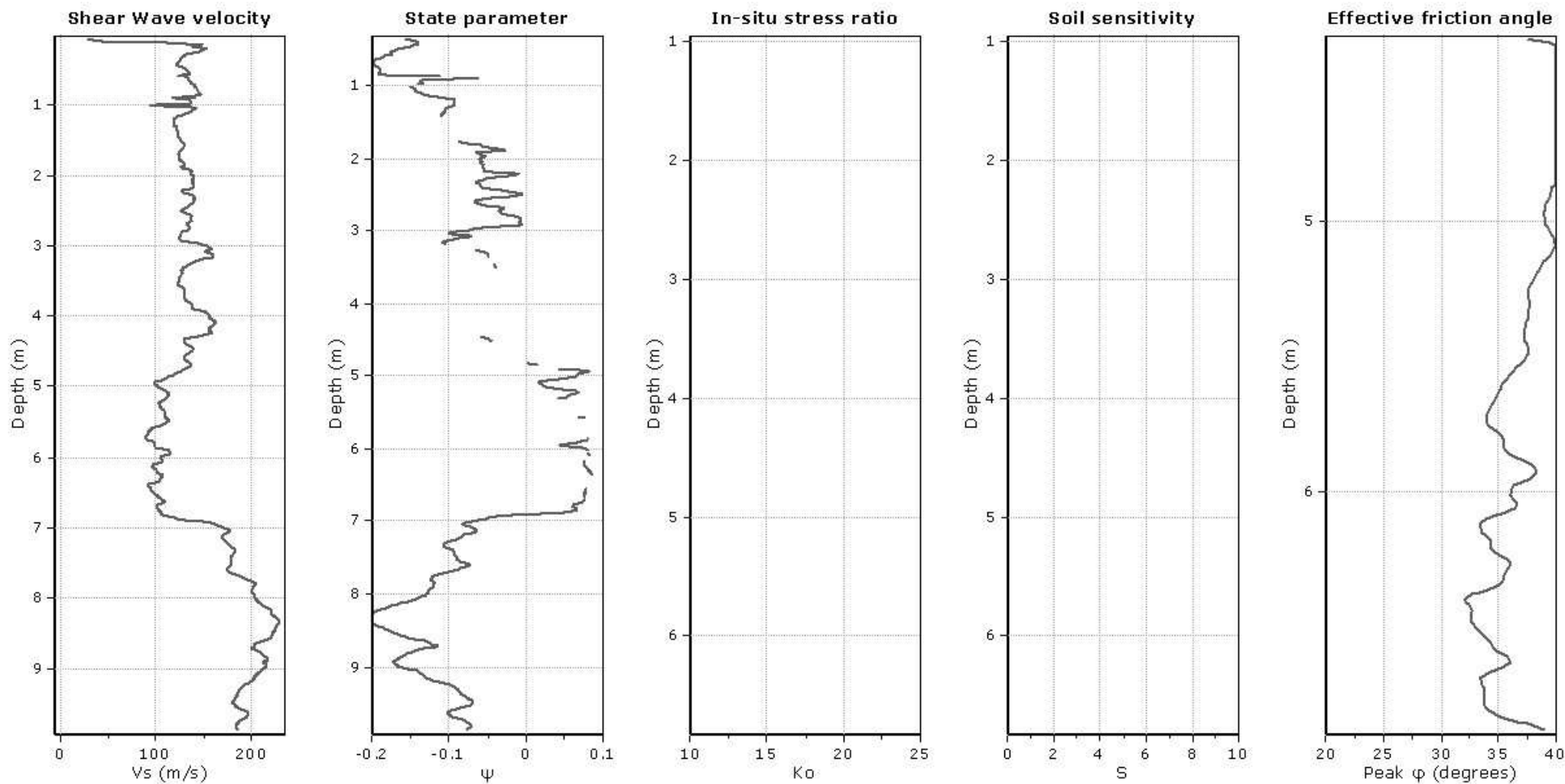
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castilverde (CR)

CPT: CPTU-01

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 350.00

—●— User defined estimation data

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

:: Unit Weight, g (kN/m³) ::

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

where g_w = water unit weight

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

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

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

:: N_{sPT} (blows per 30 cm) ::

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

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

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

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

(applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$)

:: Relative Density, D_r (%) ::

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

:: State Parameter, ψ ::

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

:: Drained Friction Angle, ϕ (°) ::

$$\text{(applicable only to SBT}_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \text{ or } I_c < I_{c_cutoff})$$

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

$$\text{If } I_c > 2.20$$

$$a = 14 \text{ for } Q_{tn} > 14$$

$$a = Q_{tn} \text{ for } Q_{tn} \leq 14$$

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

$$\text{If } I_c \geq 2.20$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

:: Overconsolidation Ratio, OCR ::

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

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

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

:: In situ Stress Ratio, K_0 ::

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

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

:: Peak Friction Angle, ϕ' (°) ::

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

(applicable for $0.10 < B_q < 1.00$)

References

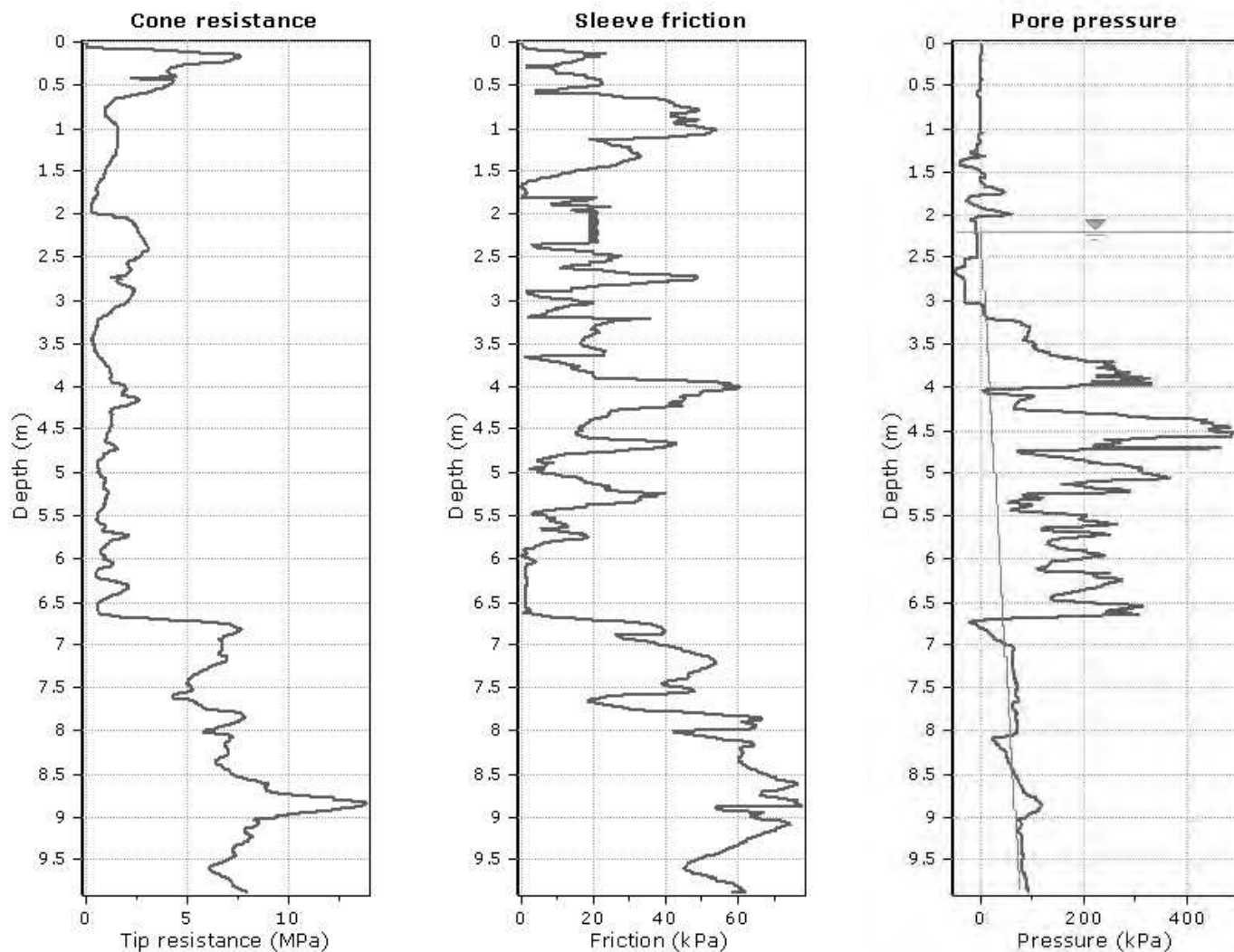
- Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 5th Edition, November 2012
- Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337–1355 (2009)

Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

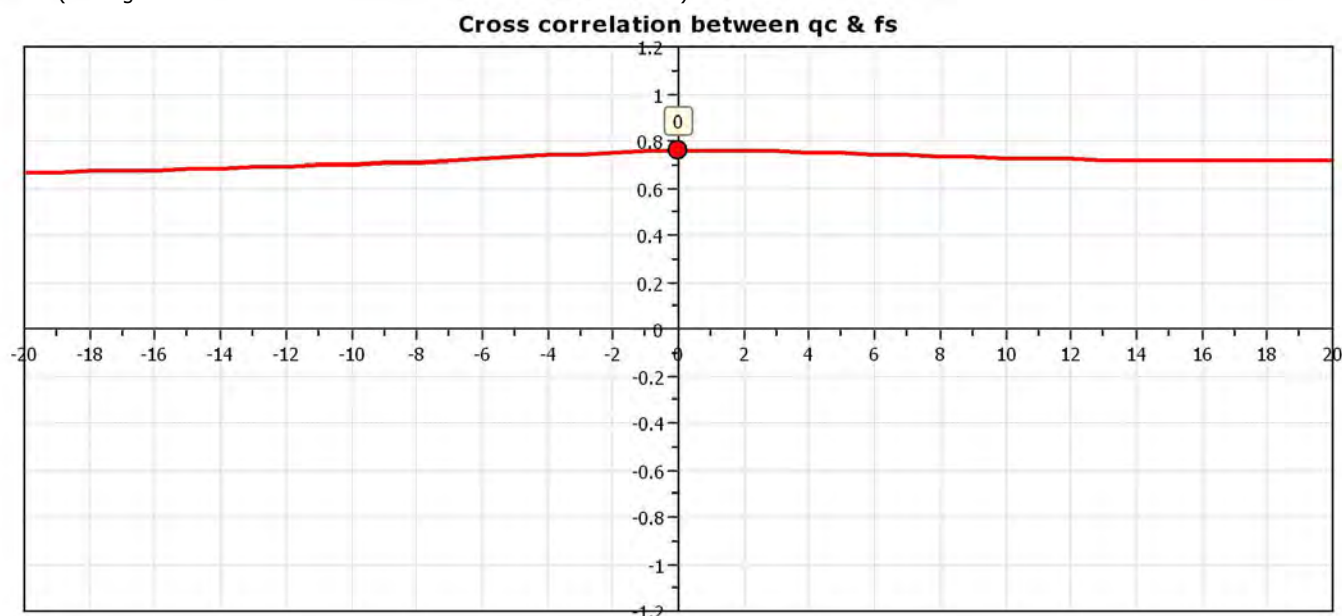
Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelveverde (CR)

Cone Operator: Barbieri



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).



Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

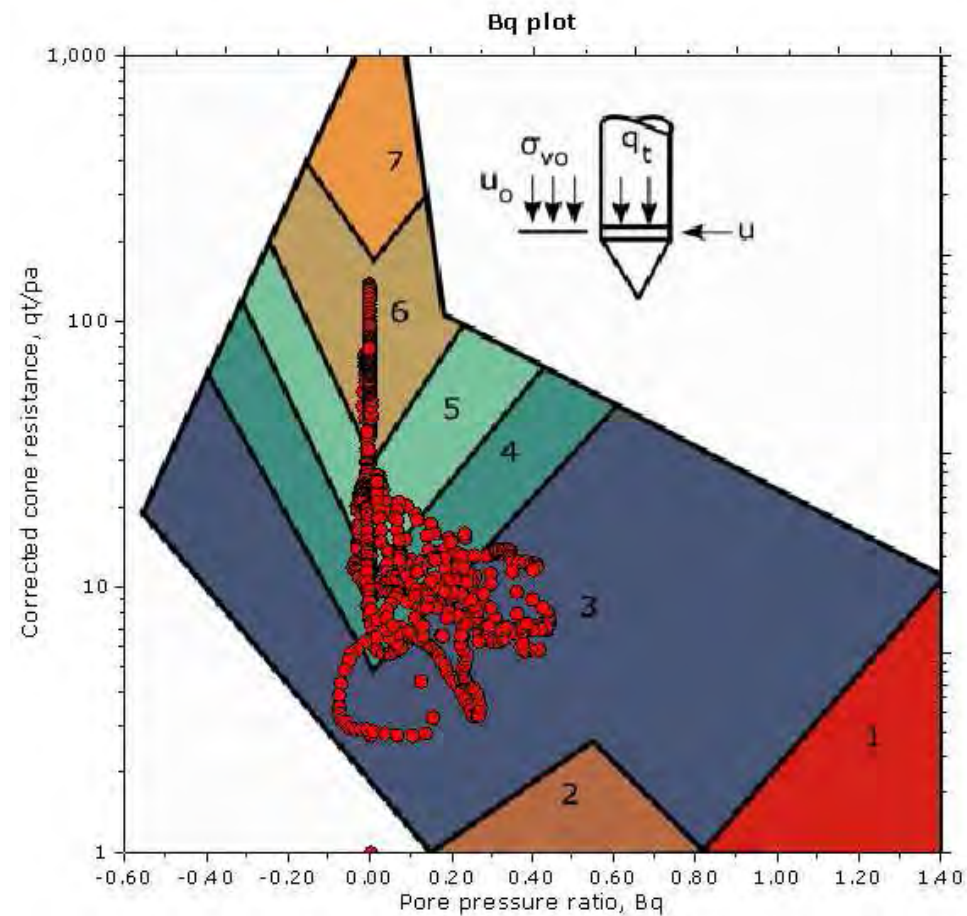
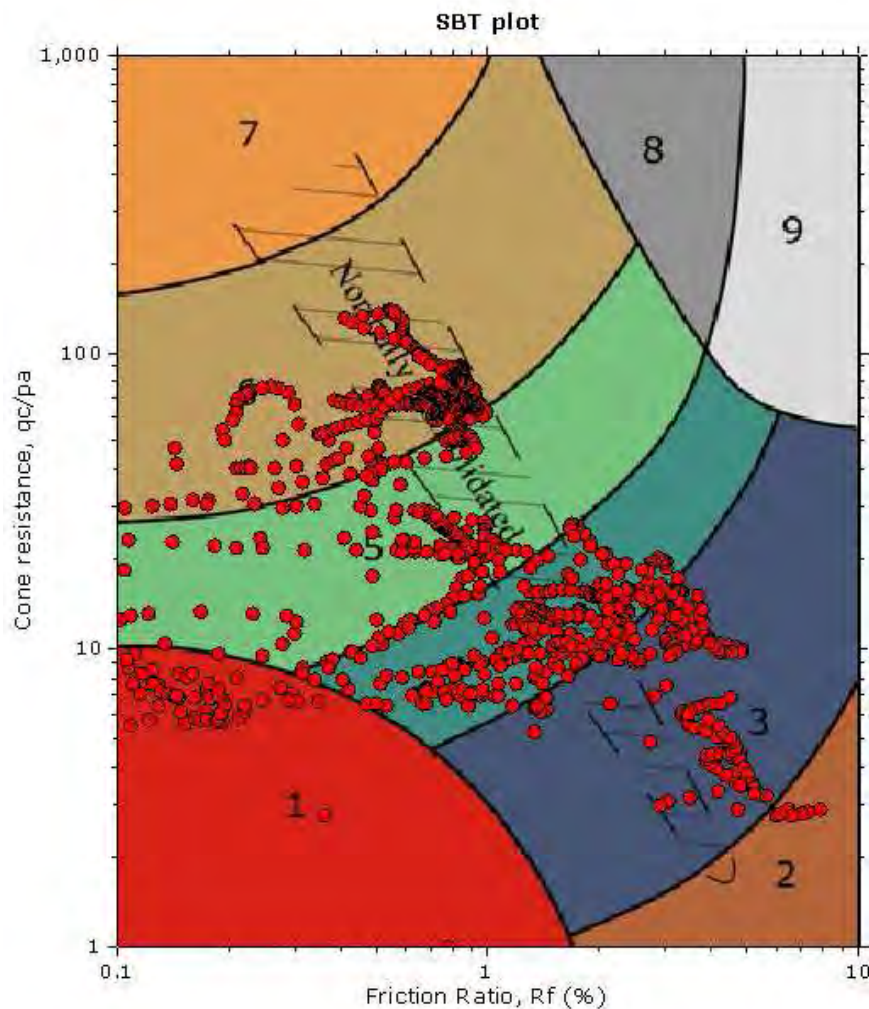
Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castellarve (CR)

CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri

SBT - Bq plots



SBT legend

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

Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

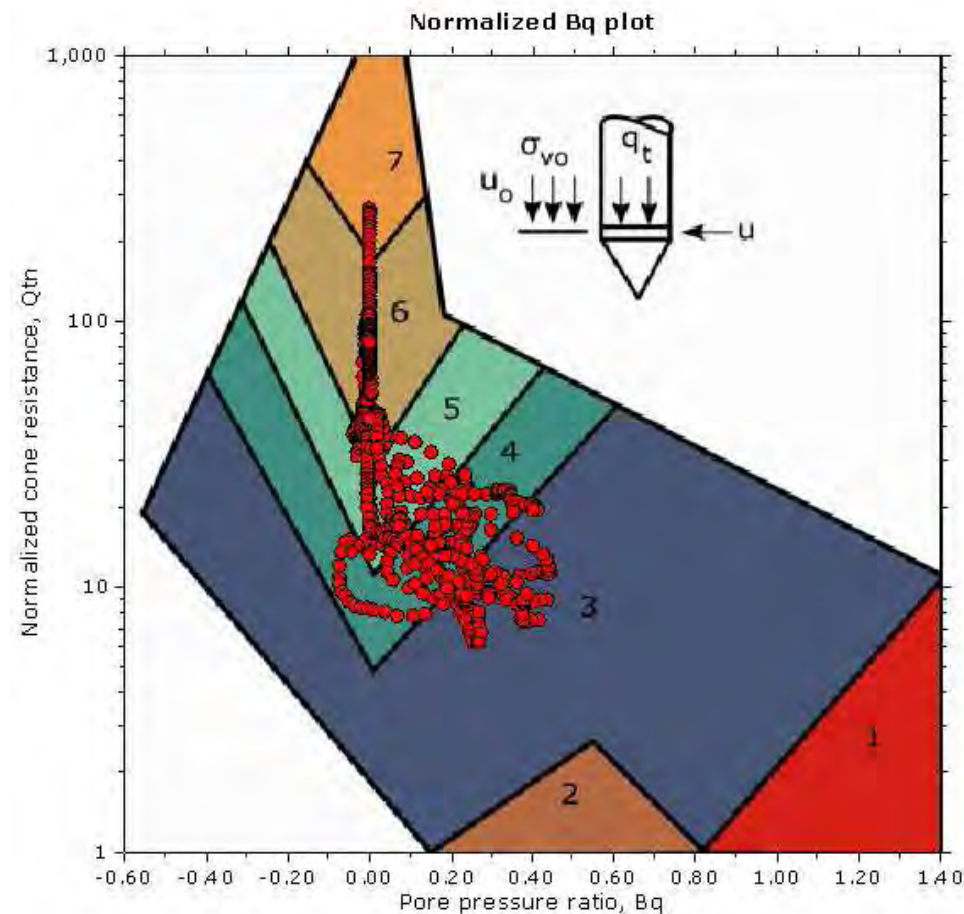
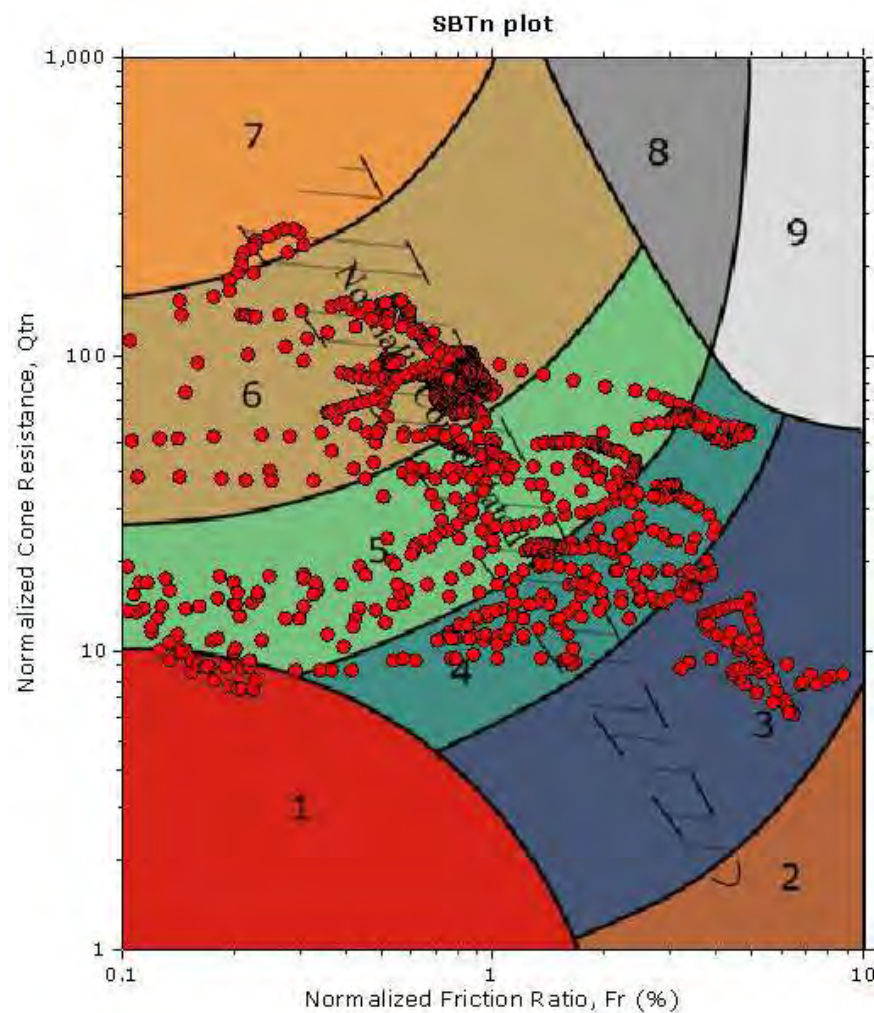
Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelverde (CR)

CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri

SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

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

Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

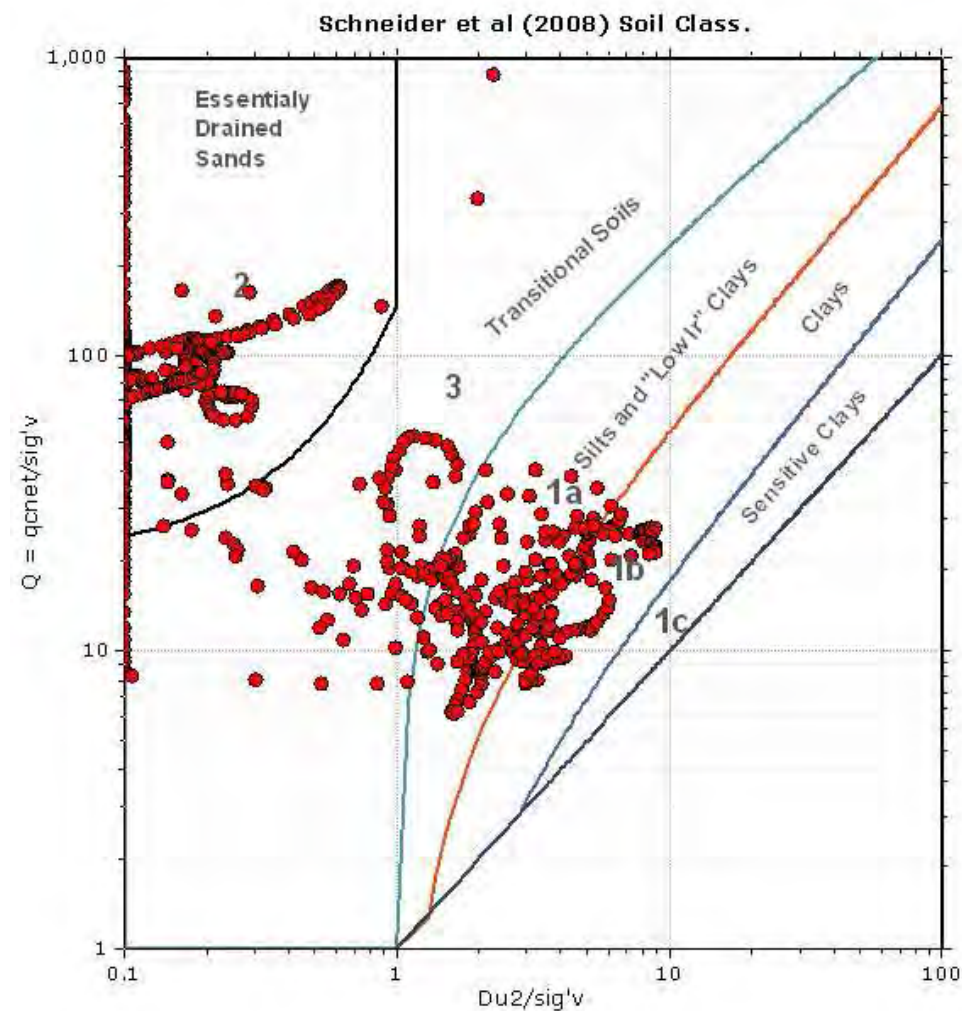
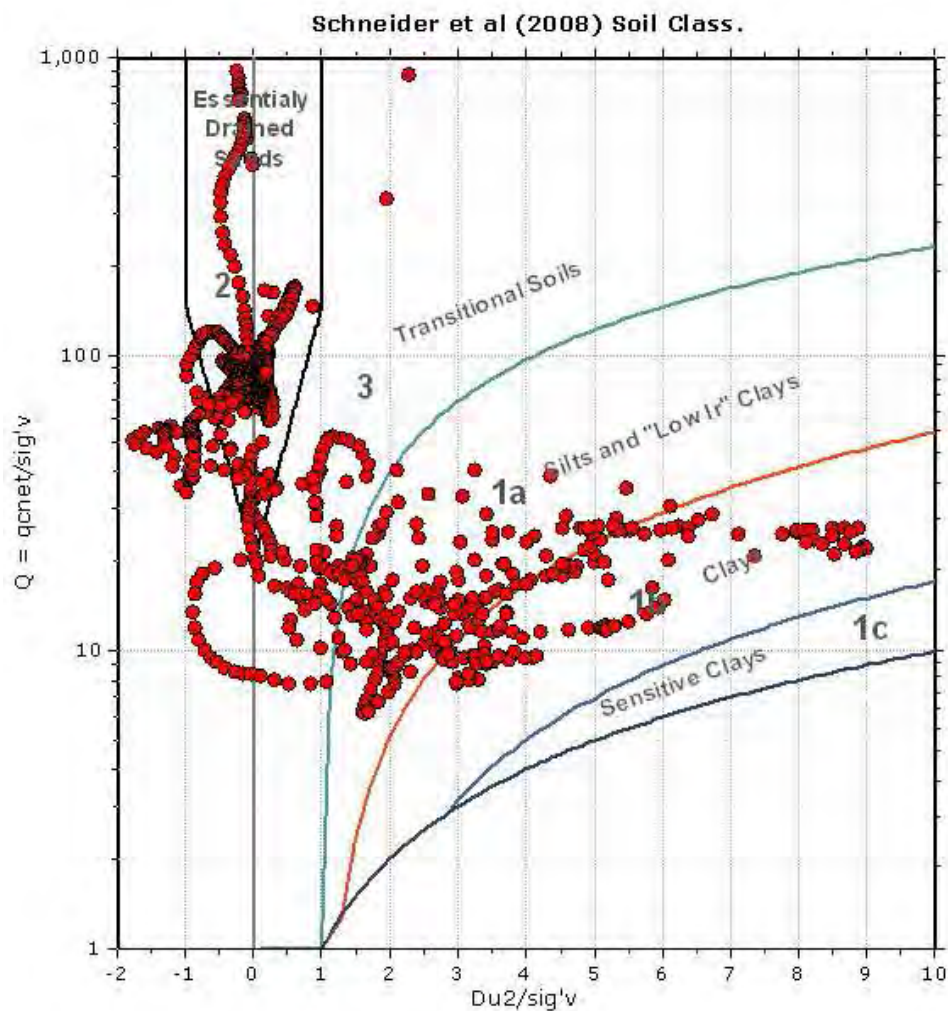
Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelserve (CR)

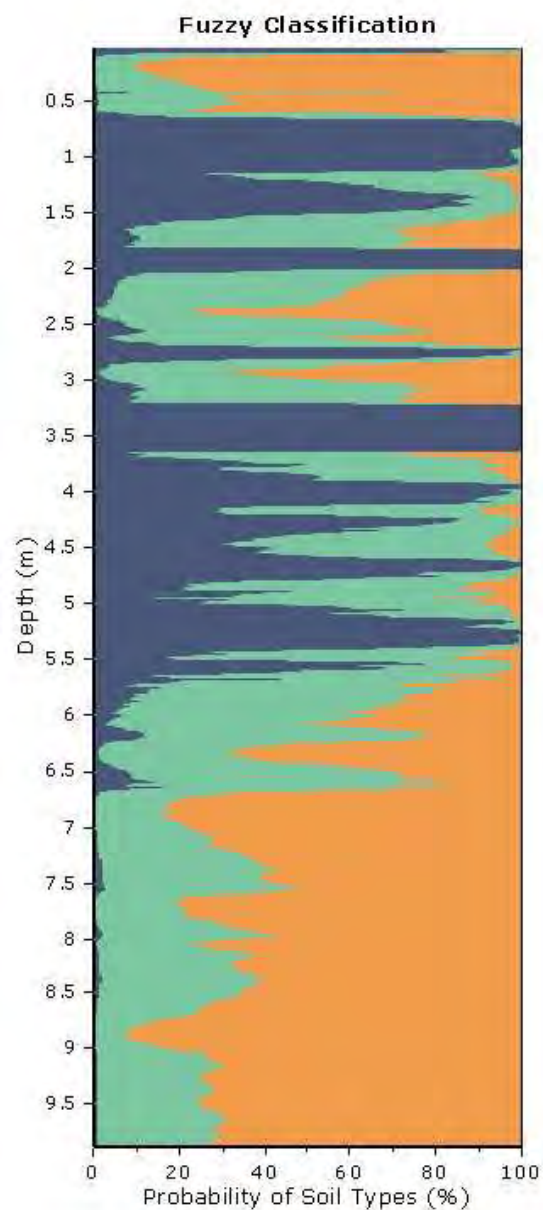
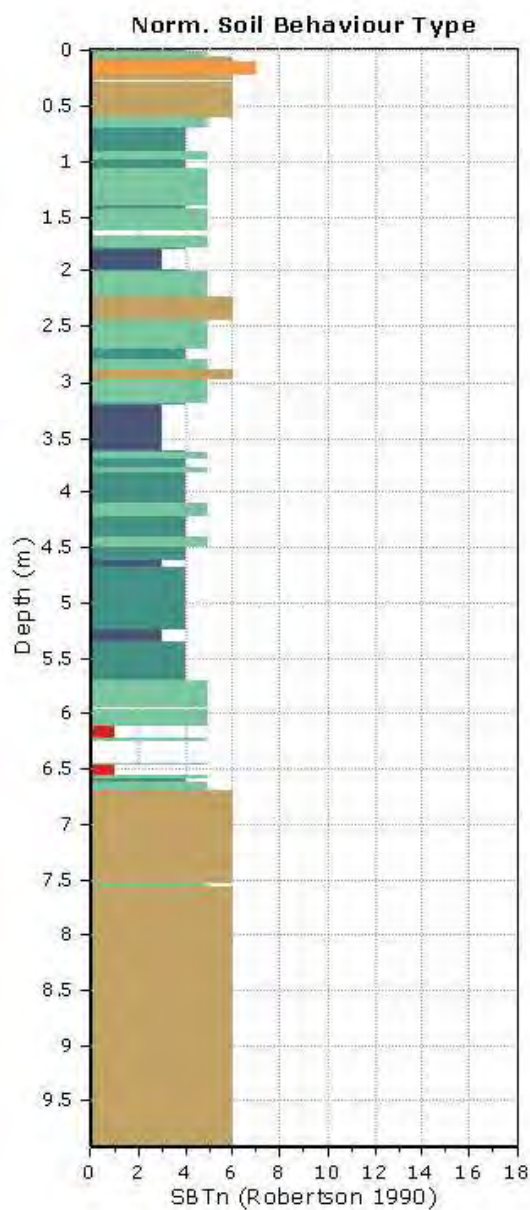
CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri

Bq plots (Schneider)





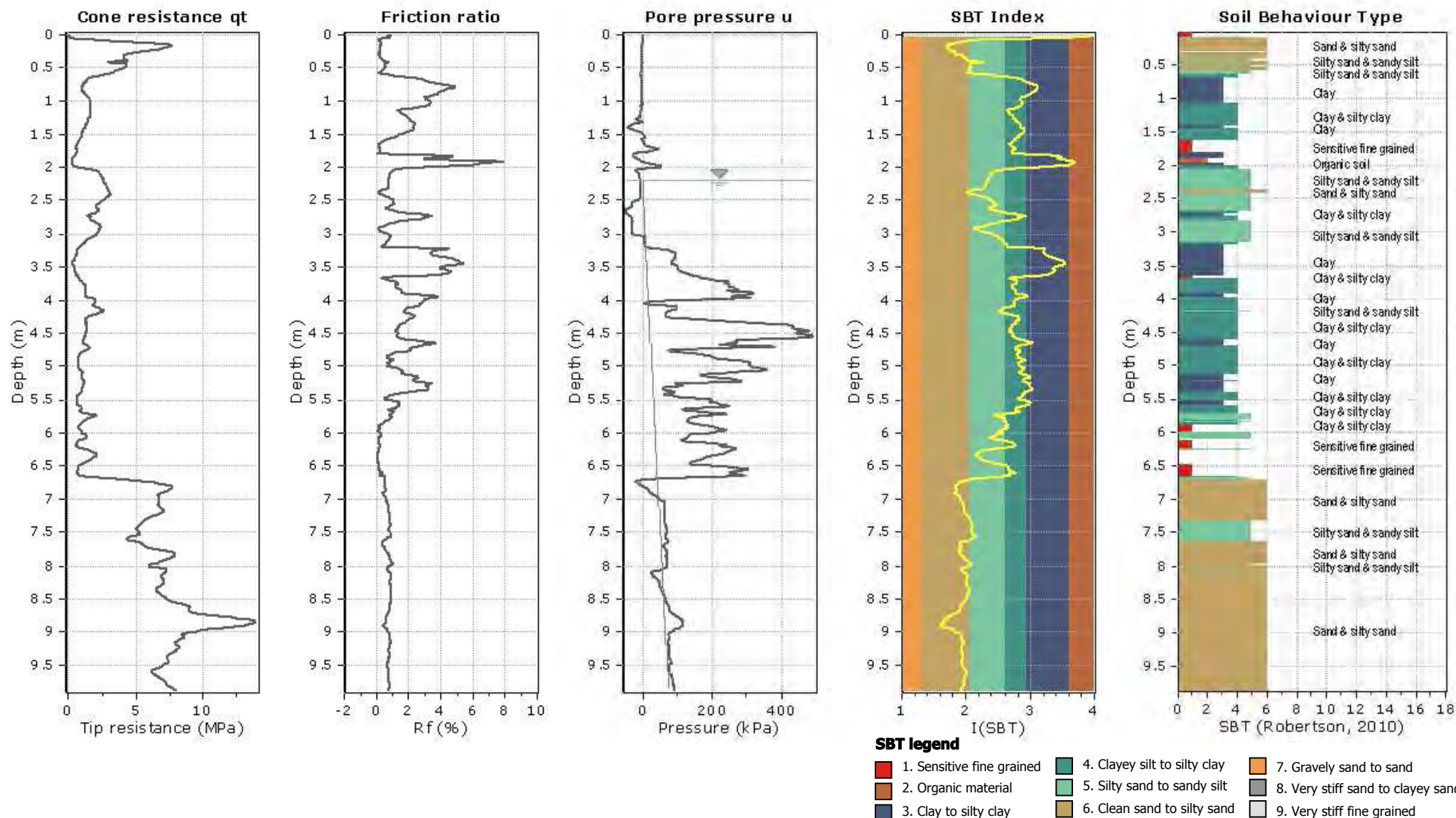
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelverde (CR)

CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



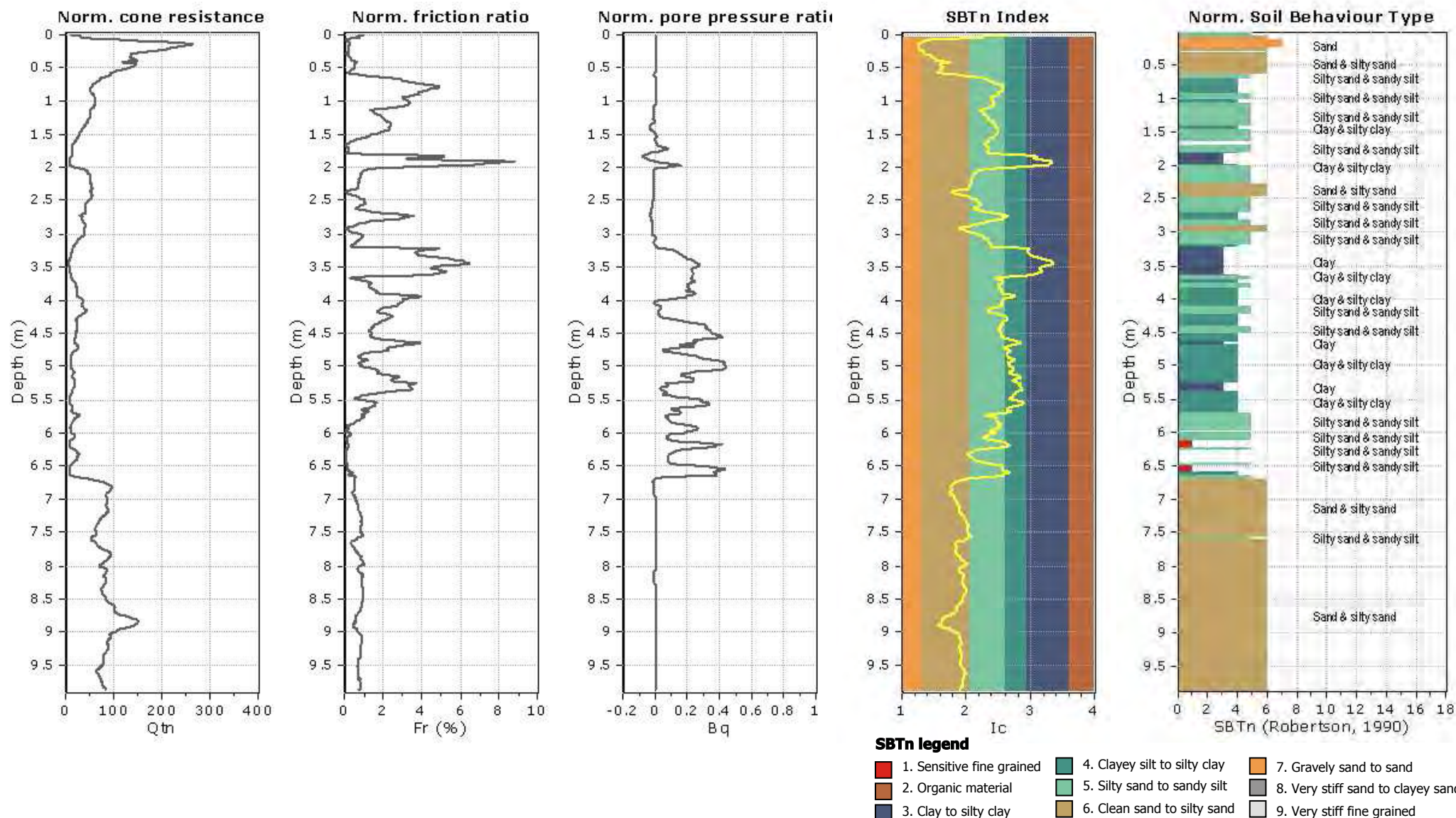
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelverde (CR)

CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



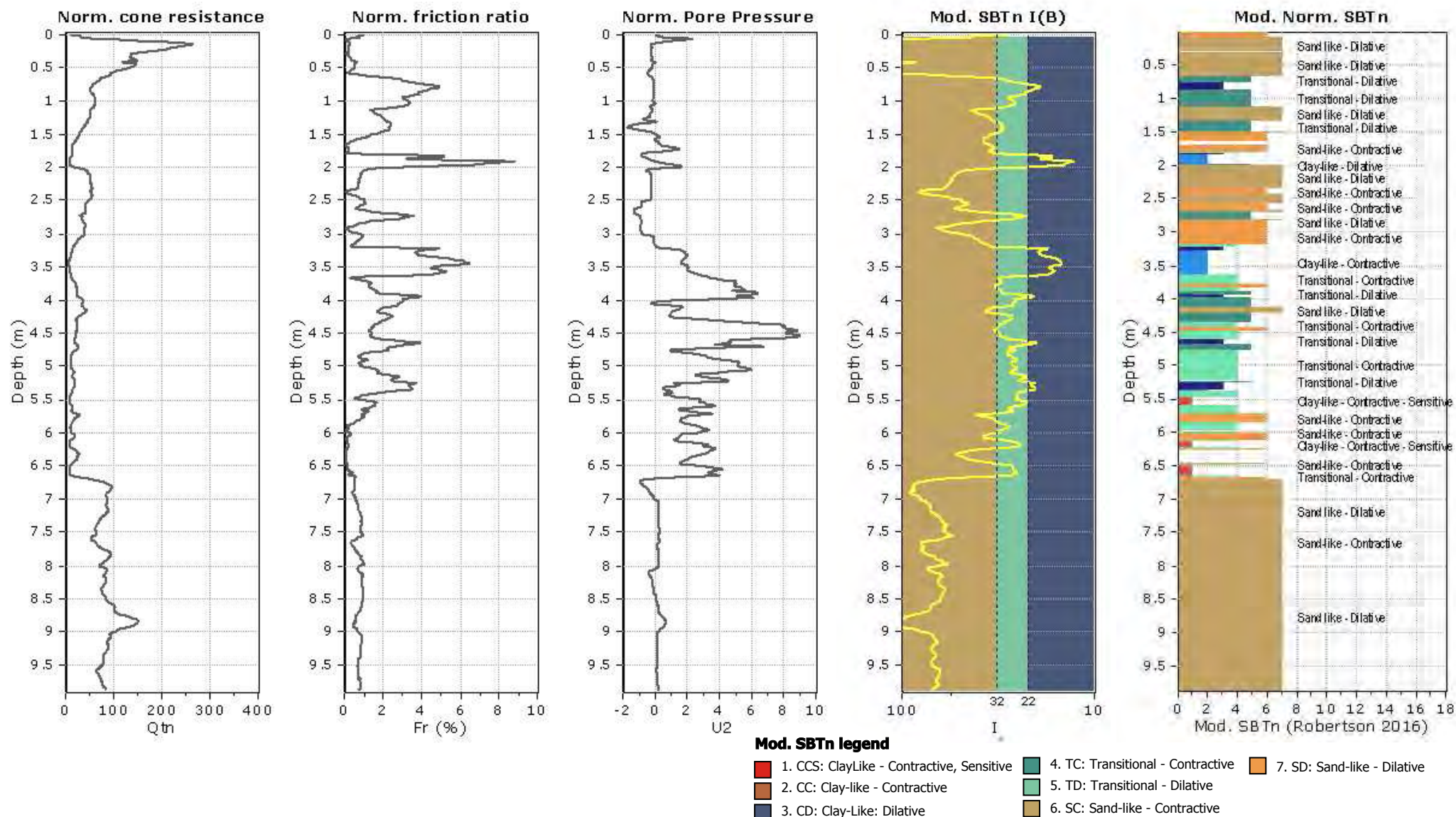
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelverde (CR)

CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

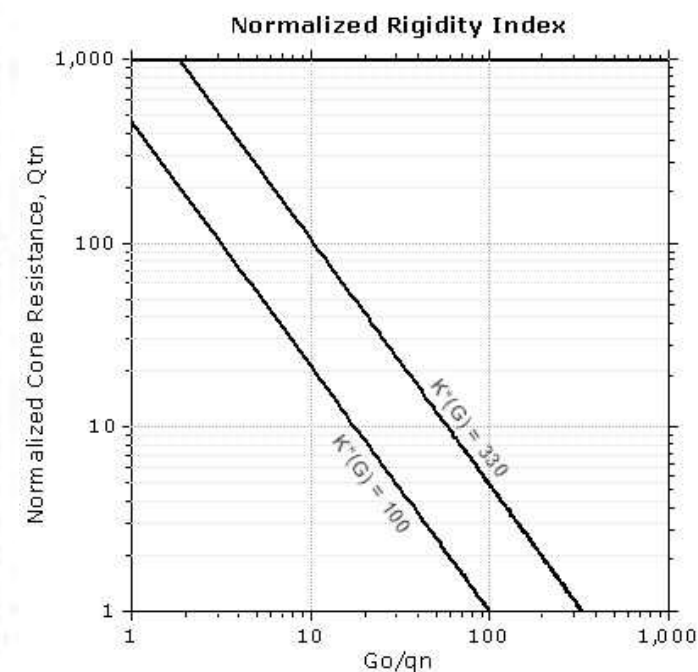
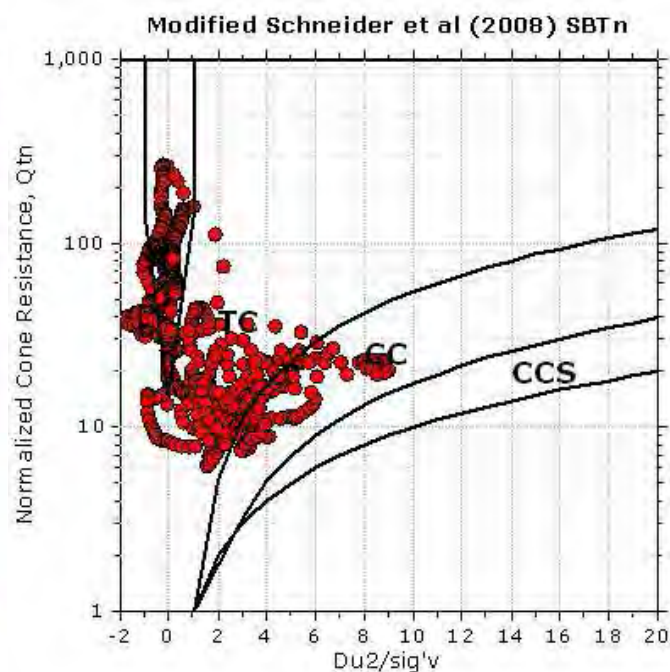
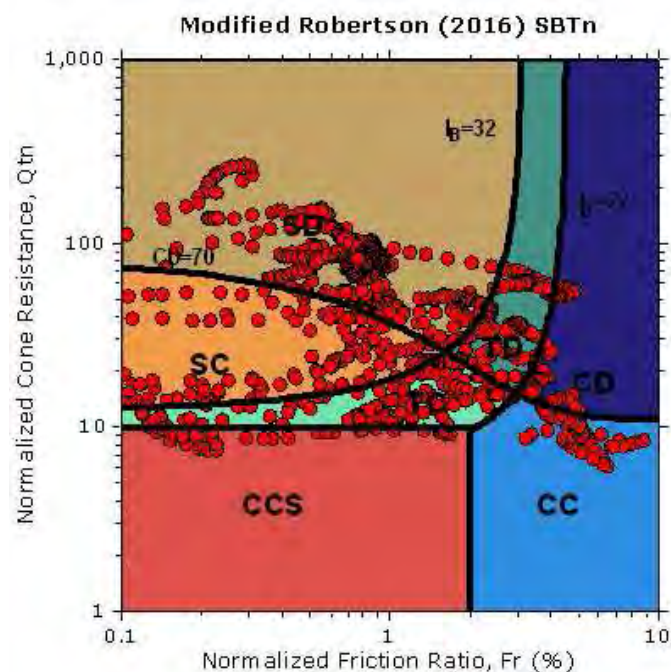
Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castellarve (CR)

CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri

Updated SBTn plots



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

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

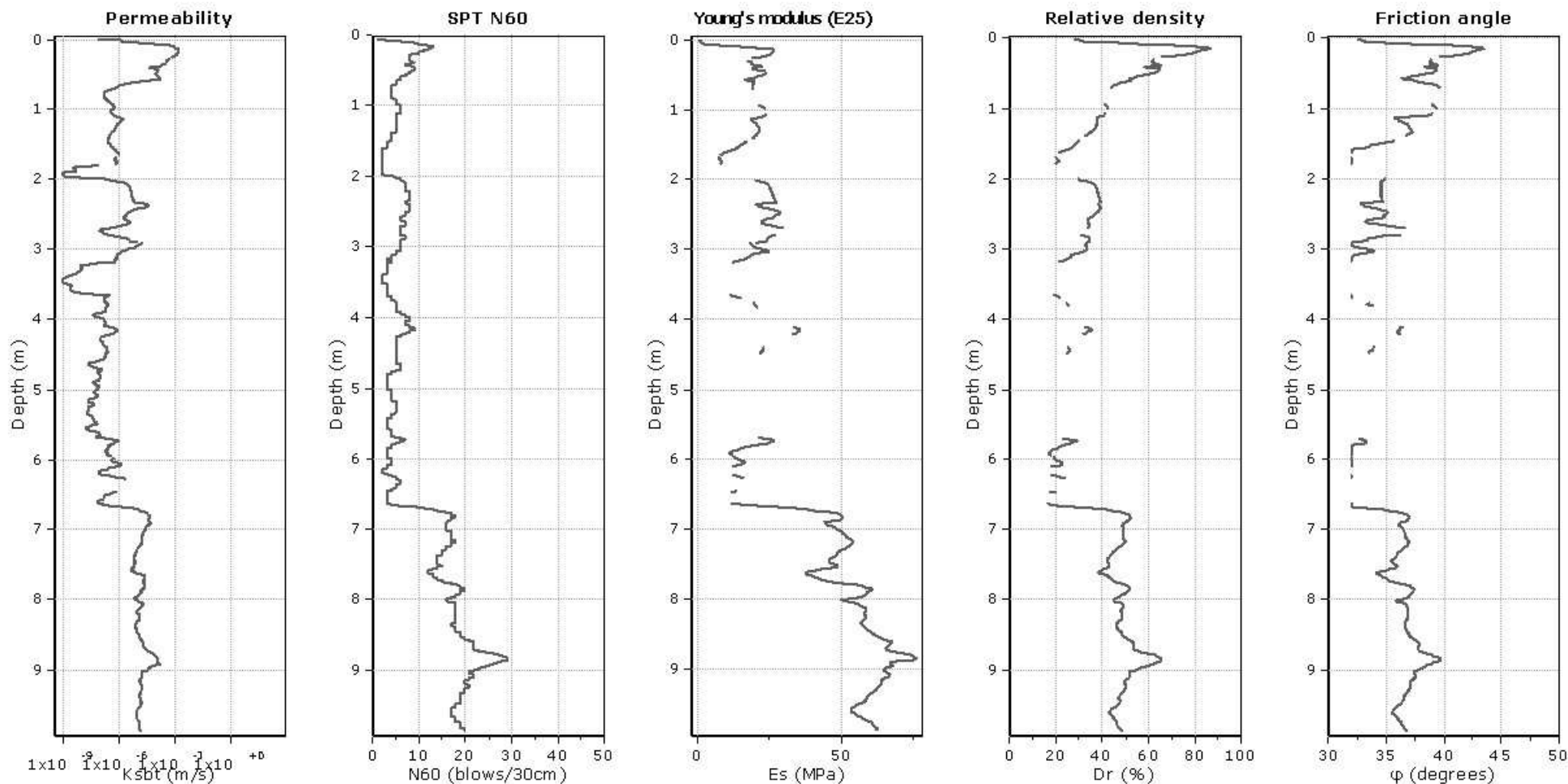
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castellarve (CR)

CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



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 density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● User defined estimation data

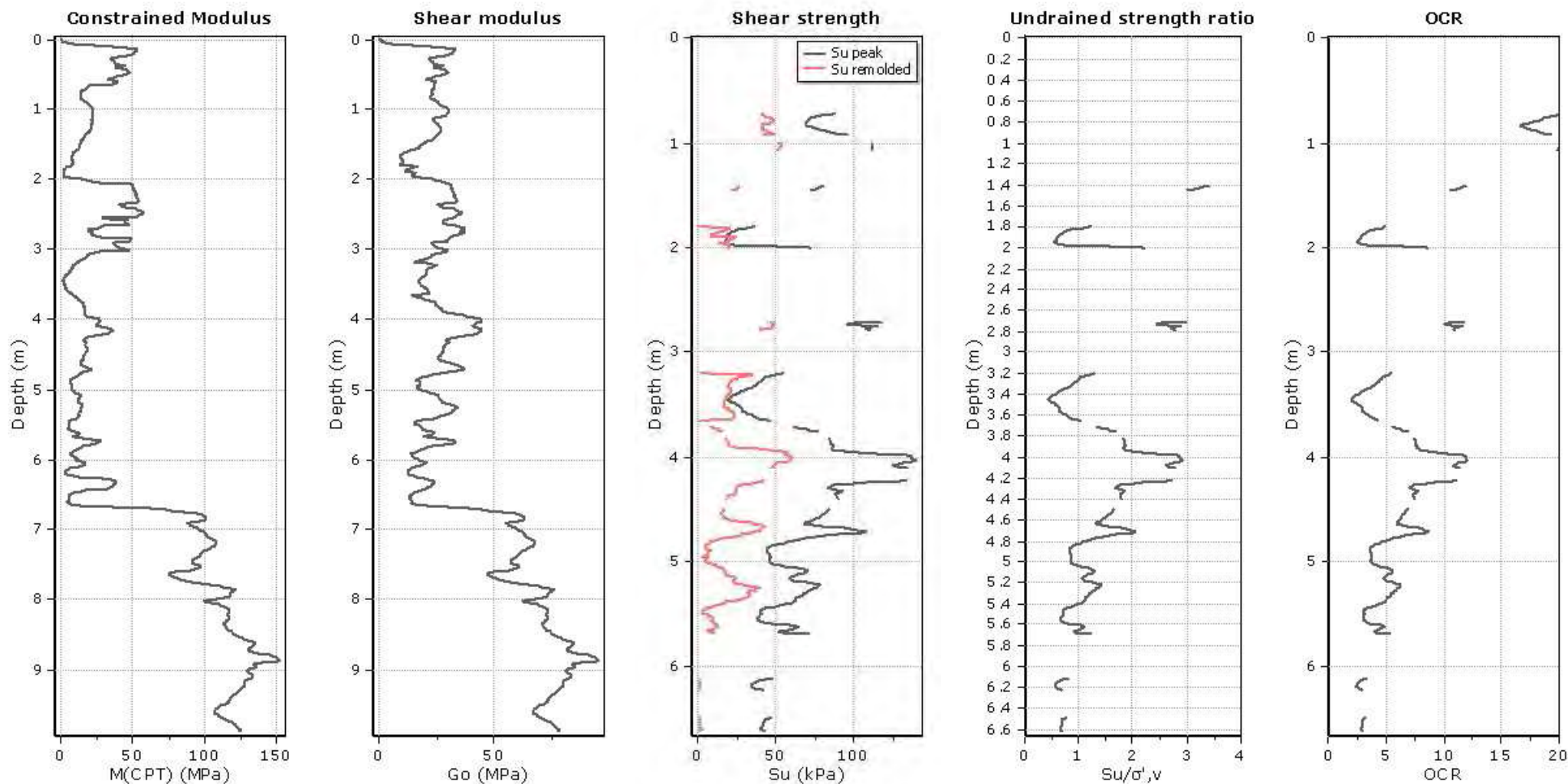
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelverde (CR)

CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_{cn} (Robertson, 2009)

Go: Based on variable α using I_c (Robertson, 2009)

Undrained shear strength cone factor for clays, N_k : 14

OCR factor for clays, N_k : 0.33

—●— User defined estimation data

—●— Flat Dilatometer Test data

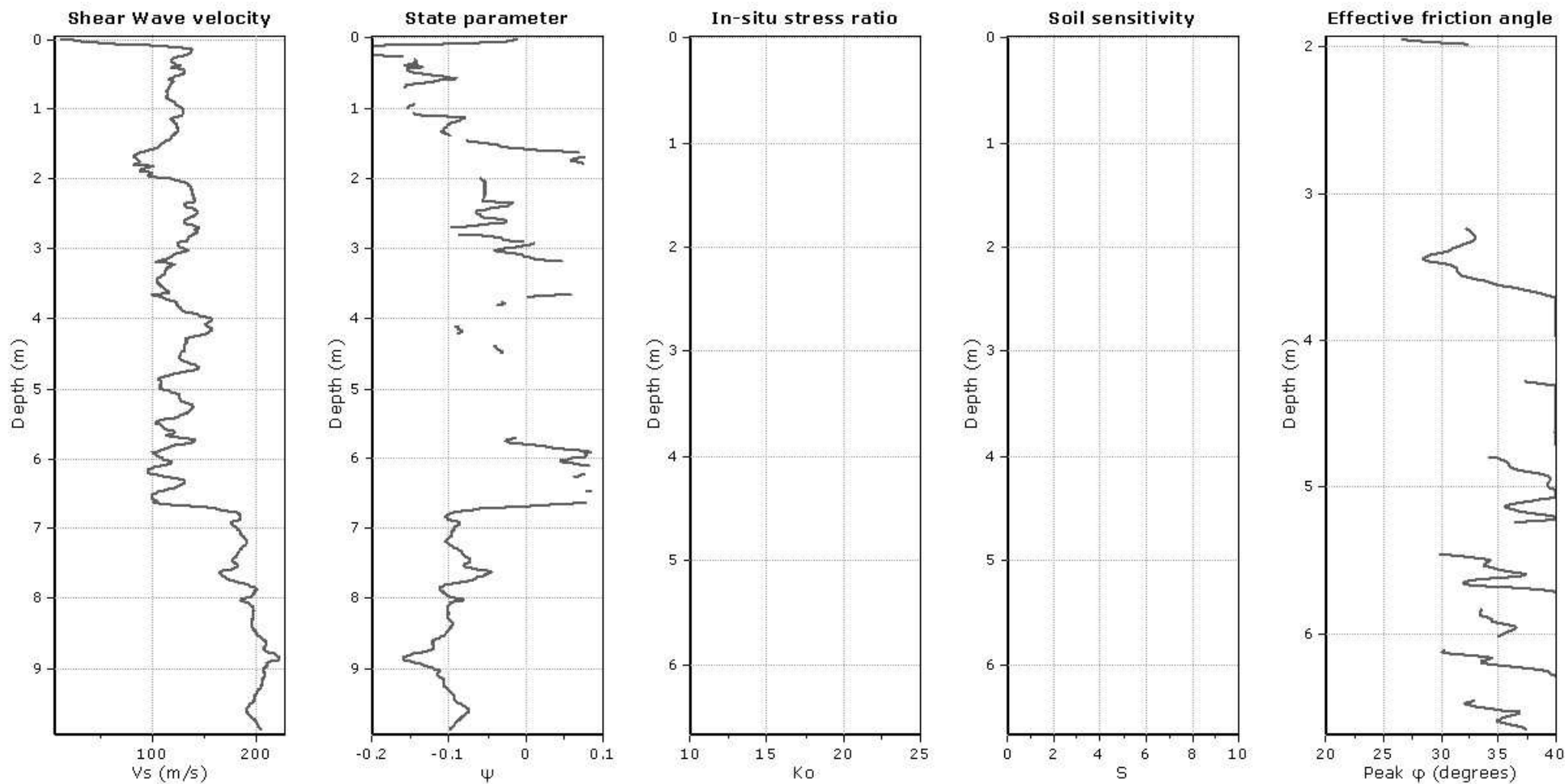
Project: COMUNE DI CASTELVERDE - Dott. Geol. Roberto Mariotti

Location: Scuola dell'Infanzia "Il Girasole" - San Martino in Beliseto, Castelverde (CR)

CPT: CPTU-02

Total depth: 9.87 m, Date: 12/04/2022

Cone Operator: Barbieri



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 350.00

—●— User defined estimation data

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

:: Unit Weight, g (kN/m³) ::

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

where g_w = water unit weight

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

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

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

:: N_{sPT} (blows per 30 cm) ::

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

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

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

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

(applicable only to $I_c < I_{c_cutoff}$)

:: Relative Density, D_r (%) ::

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

:: State Parameter, ψ ::

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

:: Drained Friction Angle, ϕ (°) ::

$$\text{(applicable only to SBT}_n: 5, 6, 7 \text{ and } 8 \text{ or } I_c < I_{c_cutoff})$$

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

$$\text{If } I_c > 2.20$$

$$a = 14 \text{ for } Q_{tn} > 14$$

$$a = Q_{tn} \text{ for } Q_{tn} \leq 14$$

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

$$\text{If } I_c \geq 2.20$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

:: Overconsolidation Ratio, OCR ::

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

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

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

:: In situ Stress Ratio, K_0 ::

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

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

:: Peak Friction Angle, ϕ' (°) ::

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

(applicable for $0.10 < B_q < 1.00$)

References

- Robertson, P.K., Cabal K.L., Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Gregg Drilling & Testing, Inc., 5th Edition, November 2012
- Robertson, P.K., Interpretation of Cone Penetration Tests - a unified approach., Can. Geotech. J. 46(11): 1337–1355 (2009)

Dott. Roberto Mariotti – Geologo Specialista
Corso Garibaldi, 95 – 26100 Cremona (CR)
e-mail: drmariotti.roberto@libero.it

tel/fax: 0372-23266
cell: 335-6958159
pec: mariottiroberto@epap.sicurezzapostale.it

ALLEGATO 9

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



Fig. 1 - Esecuzione della prova penetrometrica statica elettrica CPTu-01 (12/04/2022)



Fig. 2 - Esecuzione della prova penetrometrica statica elettrica CPTu-02 (12/04/2022)



Fig. 3 - Stendimento sismico per esecuzione della prova MASW-ESAC (12/04/2022) - Ripresa da geofono G10 a G1

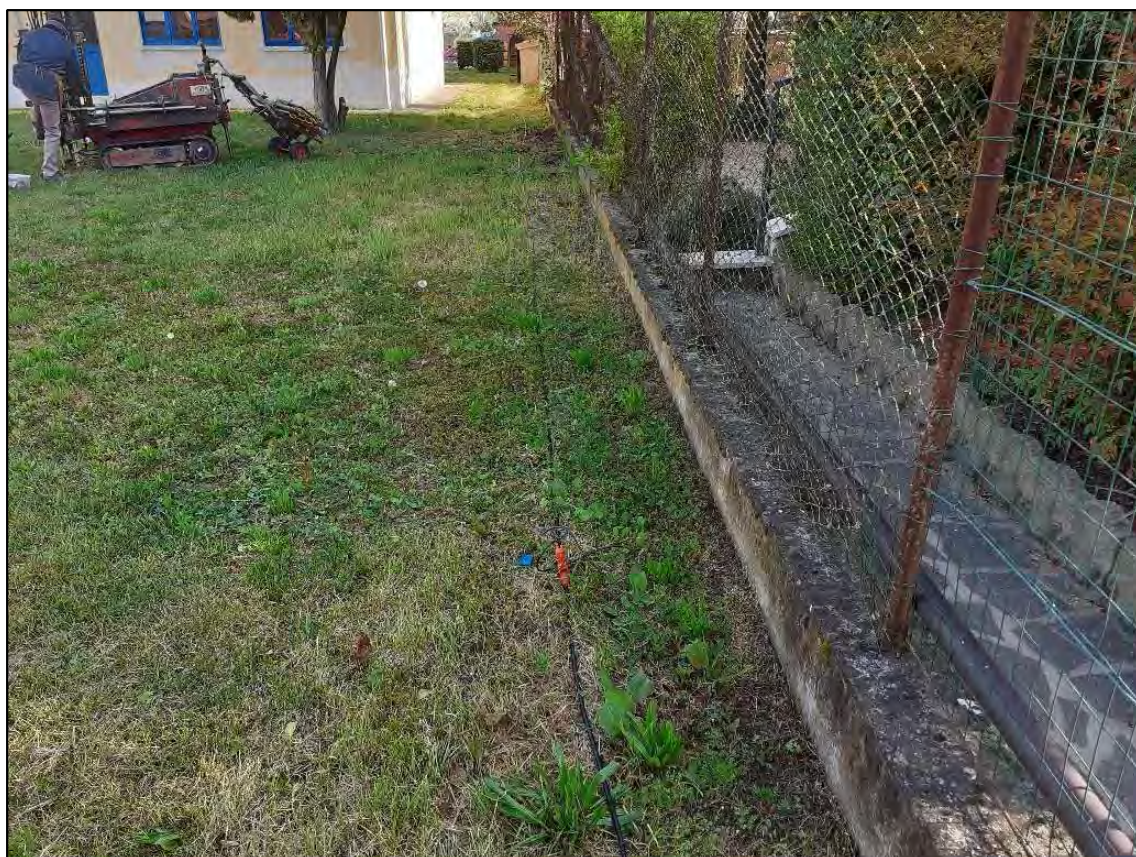


Fig. 4 - Stendimento sismico per esecuzione della prova MASW-ESAC (12/04/2022) - Ripresa da geofono G24 a G10



Fig. 5 - Esecuzione della prova MASW (12/04/2022)



Fig. 6 - Esecuzione della prova MASW (12/04/2022)



Fig. 7 - Esecuzione dell'indagine sismica con stazione singola HVSR_1 (12/04/2022)



Fig. 8 - Esecuzione dell'indagine sismica con stazione singola HVSR_2 (12/04/2022)



Fig. 9 - Esecuzione dell'indagine sismica con stazione singola HVSR_3 (12/04/2022)