

COMUNE DI PRATO

Richiesta di Variante Urbanistica Semplificata al Piano Operativo Comunale ai sensi degli artt. 30 e 32 della L.R.T. 65/2014 per il trasferimento di capacità edificatoria a mutamento della destinazione urbanistica verso la destinazione commerciale relativamente a due aree poste nel Comune di Prato, una lungo via Lunga di Cafaggio e l'altra lungo via Firenze, angolo via Bresci, e la ricollocazione di spazi e servizi pubblici

PROPONENTE

NIGRO & C. COSTRUZIONI S.r.l.

Via Valentini, 38 - 59100 Prato (PO)
P.IVA 02015800978

| | | | |
|--------------------------|---------------------------------------|--|--|
| PROGETTISTI - CONSULENTI | PROJECT MANAGEMENT | EDISISTEM S.r.l. | |
| | PROGETTAZIONE URBANISTICA | ARCH. GIOVANNI VALENTINI ARCH. MARCO VALENTINI ARCH. RACHELE BELLI | |
| | STUDIO IDRAULICO | A4 INGEGNERIA ING. DAVID MALOSSÌ | |
| | ACUSTICA | ING. MASSIMO DE MASI | |
| | VALUTAZIONE AMBIENTALE STRATEGICA | SINERGIA S.r.l.s GEOL. LUCA GARDONE GEOL. EMANUELE MONTINI | |
| | STUDIO DEL TRAFFICO E DELLA MOBILITA' | TAGES Soc. Coop. | |
| | RELAZIONE GEOLOGICA | DOTT. SALVATORE FRONTERA | |

| | |
|--|---------------|
| ELABORATO | SCALA :- |
| RELAZIONE DI FATTIBILITA' GEOLOGICA AREA DI VIA FIRENZE | GEO 01 |

| REVISIONE | DESCRIZIONE | DATA |
|-----------|---------------|-------------|
| - | Presentazione | Aprile 2023 |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 1. | PREMESSA | 3 |
| 2. | NORMATIVA DI RIFERIMENTO | 4 |
| 3. | INQUADRAMENTO GEOLOGICO | 5 |
| 4. | FATTIBILITA' DELL'INTERVENTO NELLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE | 7 |
| 4.1. | <i>Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA)</i> | 7 |
| 4.2. | <i>Piano Operativo e Piano Strutturale del Comune di Prato</i> | 7 |
| 4.2.1. | <i>Pericolosità geomorfologica (tavola Af.7)</i> | 7 |
| 4.2.2. | <i>Pericolosità sismica (tavola Af.8)</i> | 10 |
| 4.2.3. | <i>Pericolosità idraulica (tavola Af.9)</i> | 10 |
| 5. | CARATTERIZZAZIONE SISMICA | 13 |
| 5.1. | <i>Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento</i> | 13 |
| 5.2. | <i>Stati limite, probabilità di superamento e periodo di ritorno</i> | 14 |
| 5.3. | <i>Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche</i> | 15 |
| 5.4. | <i>Pericolosità sismica di base</i> | 16 |
| 6. | DESCRIZIONE DELLE INDAGINI E LORO METODOLOGIA | 20 |
| 6.1. | <i>Prova penetrometrica statica (C.P.T.)</i> | 20 |
| 6.1.1. | <i>Profilo stratigrafico</i> | 20 |
| 6.1.2. | <i>Resistenza al taglio</i> | 21 |
| 6.1.3. | <i>Parametri di deformabilità</i> | 21 |
| 6.2. | <i>Metodologia MASW ATTIVA (Multichannel Analysis of Surface Waves)</i> | 21 |
| 6.2.1. | <i>Introduzione generale</i> | 21 |
| 6.2.2. | <i>Onde superficiali di Rayleigh (onde R)</i> | 22 |
| 6.2.3. | <i>Tecnica MASW ATTIVA : procedura e strumentazione utilizzata</i> | 23 |
| 6.3. | <i>Tecnica HVSR</i> | 23 |
| 7. | ANALISI DEI RISULTATI | 25 |
| 7.1. | <i>Prove penetrometriche statiche</i> | 25 |
| 7.2. | <i>Indagine sismica e Categorie di suolo di fondazione del sito in esame</i> | 26 |
| 7.3. | <i>Pericolosità sismica di base</i> | 27 |
| 7.4. | <i>Modello geotecnico</i> | 28 |
| 8. | CONCLUSIONI | 29 |

1. PREMESSA

Su incarico della società Nigro&C Costuzioni è stato condotto uno studio di fattibilità geologica, idraulica e sismica, eseguita ai sensi del D.P.G.R. n.5/R del 30/01/2020, finalizzata alla Richiesta di Variante Urbanistica Semplificata al Piano Operativo Comunale ai sensi degli artt. 30 e 32 della L.R.T. 65/2014 per la realizzazione di una media struttura di vendita alimentare in un'area del Comune di Prato, loc.tà La Querce, posta tra Via Amerigo Bresci e Via Firenze e la ricollocazione di spazi e servizi pubblici. L'esatta ubicazione dell'area di studio è indicata in allegato 1 e 2 dove si riporta, rispettivamente, uno stralcio della Carta Tecnica Regionale e dell'Ortofoto satellitare dell'area in esame a scala 1:5.000.

Per verificare preliminarmente le caratteristiche geologiche del sottosuolo della zona in cui si inserisce l'area in oggetto ci si è avvalsi di conoscenze dirette dello scrivente sui materiali che costituiscono l'area e di informazioni reperibili dalla letteratura specializzata.

Il presente studio è stato redatto ai sensi della normativa vigente in materia D.P.G.R. n.5/R del 30 Gennaio 2020 "Regolamento di attuazione dell'articolo 104 della legge regionale 10 novembre 2014, n. 65 (Norme per il governo del territorio) contenente disposizioni in materia di indagini geologiche, idrauliche e sismiche", fornendo specifiche indicazioni progettuali da attuare per il superamento delle problematiche eventualmente riscontrate.

Per quanto riguarda la valutazione della pericolosità idraulica sia farà riferimento sia alle perimetrazioni derivanti dallo studio idraulico di supporto al P.O., redatto in data Ottobre 2018, che a quelle del Piano Gestione Rischio Alluvioni (PGRA) del Distretto Idrografico dell'Appennino Settentrionale.

Per verificare preliminarmente le caratteristiche geologiche del sottosuolo della zona in cui si inserisce l'area in oggetto ci si è avvalsi di conoscenze dirette dello scrivente sui materiali che costituiscono l'area e di informazioni reperibili dalla letteratura specializzata, inoltre, è stata eseguita una propedeutica campagna geognostica, la cui ubicazione è riportata in ALLEGATO 3, articolata secondo i seguenti punti:

- esecuzione di n. 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono;
- esecuzione di n° 1 profilo sismico con la tecnica MASW;
- esecuzione di n° 1 profilo HVSR;

Il presente lavoro presenta i risultati relativamente ai seguenti argomenti:

- analisi e descrizione della situazione geolitologica e morfologica generale;
- analisi e verifica della fattibilità geologica in funzione degli strumenti di pianificazione territoriale;
- descrizione delle modalità con le quali sono state condotte le indagini;
- determinazione della natura litologica e delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni del sottosuolo investigato.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La stesura della seguente relazione è stata eseguita in ottemperanza alle disposizioni contenute nelle normative di riferimento elencate di seguito:

- “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazioni”. D.M. 11 Marzo 1988;
- Istruzioni relative alle “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”. Circ. Min. LL.PP. n° 30483, 24 Settembre 1988;
- AGI: raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, Giugno 1977;
- ISO 31-11: Quantities and units, Mathematical signs and symbols for use in the physical sciences and technology, 1992;
- UNI ISO 2955: Rappresentazione delle unità SI e di altre unità usate nei sistemi con insiemi limitati di caratteri, 1987;
- “Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”. D.M. 16 gennaio 1996, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale il 5 febbraio 1996, N. 29.
- “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (O.P.C.M.) n° 3274 del 20/03/2003.
- “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”. D.M. 14 gennaio 2008 (pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008, Supplemento ordinario n. 30).
- CIRCOLARE 2 febbraio 2009, n. 617 Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008. (GU n. 47 del 26-2-2009 - Suppl. Ordinario n.27).
Decreto del Presidente della Giunta Regionale 9 Luglio 2009, n.36/R Regolamento di attuazione dell'art.117, commi 1 e 2 della L.R. 3 Gennaio 2005 n.1. Disciplina sulle modalità di svolgimento delle attività di vigilanza e verifica delle opere e delle costruzioni in zone soggette a rischio sismico.
- Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni approvato con Decreto Ministeriale del 17.01.2018 pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20.02.2018, Supplemento Ordinario n.8;

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area in esame è collocata nella porzione centrale del bacino fluvio-lacustre di Firenze-Prato-Pistoia, depressione tettonica post-orogena a direzione appenninica limitata da faglie distensive e formatasi in seguito ai movimenti distensivi che interessarono l'intera regione Toscana a partire dall'area Tirrenica. In conseguenza della formazione dell'area depressionaria si è inizialmente instaurato un ambiente di deposizione lacustre dal quale si è passati, a partire dal Villafranchiano inferiore (Pliocene sup.), ad una fase di deposizione alluvionale. In questo periodo allo sbocco nel paleolago dei principali immissari è avvenuta la sedimentazione dei materiali grossolani derivati dall'intensa erosione ad opera dei corsi d'acqua provenienti da aree in forte sollevamento tettonico, sedimentazione che ha portato alla formazione di un sistema di conoidi alluvionali (nel caso i fiumi Bisenzio a NE, Ombrone a ONO e Paleo-Ema a SE).

Le facies di centro lago, formate principalmente da potenti accumuli di argille e limi compatti di colore turchino-giallastre, talora inglobanti livelli di lignite e torba, rappresentano depositi di lenta decantazione. Le facies marginali, coeve ed interdigitate con quelle centro-lacustri, sono in gran parte costituite da depositi di materiali grossolani, quali ghiaie e sabbie. Questi depositi, legati ad ambienti di alta energia, presentano in genere spessore decrescente a partire dalle zone prossimali verso quelle distali delle conoidi a cui appartengono e rappresentano importanti corpi acquiferi del sottosuolo nel quale sono presenti. In conseguenza del graduale riempimento del lago, nel Quaternario (Olocene) si sono impostati nel bacino di Firenze-Prato-Pistoia ambienti sedimentari di tipo fluviale e palustre che hanno determinato la formazione di un livello superficiale continuo di argille e limi argillosi con componente sabbiosa variabile che presenta spessore minimo, circa 1 metro, in corrispondenza delle zone più marginali, mentre in quelle centrali può raggiungere lo spessore massimo di circa 10 m. Lo spessore complessivo della successione fluvio-lacustre assume i valori massimi in corrispondenza dell'area di Campi Bisenzio dove raggiunge circa 600 metri. Di questi solo la porzione più superficiale di poche decine di metri è imputabile alla deposizione fluviale e palustre.

I dati bibliografici evidenziano che nell'area in studio il sottosuolo è costituito da depositi alluvionali recenti composti da p.c. fino a circa 5 m di profondità e da circa 10 a circa 15 m di profondità da una miscela di limi e argille, in proporzioni variabili tra loro, con frazioni sabbiose, mentre da circa 5 a ca. 10 m di profondità sono presenti ghiaie da matrice-sostenute a clastosostenute con livelli sabbioso-limosi.

Dal punto di vista idrogeologico l'area di studio è collocata in una porzione centro meridionale occidentale della conoide alluvionale del Fiume Bisenzio; l'idrogeologia risulta in stretta dipendenza della granulometria presentata dai terreni stessi. Dalla letteratura, ("La falda idrica della conoide di Prato" di Landini, Pranzini e Venturucci, 1990), si evidenzia l'esistenza nel sottosuolo pratese di un sistema acquifero costituito da una serie di livelli permeabili (ghiaie con matrice sabbiosa e/o limosa) intercalati a intervalli acquiclude o acquitardi (limi ed argille). In generale i depositi di ghiaie e ciottolami contenuti nel corpo principale della conoide, presenti a partire da una profondità compresa fra 2 e 10 m dal p.c. fino a circa 60 m, profondità che diminuisce procedendo verso i margini della conoide, sono sede della prima falda (libera) della conoide. I livelli fini limoso-argillosi all'interno di questi presentano estensione e spessori ridotti nella zona apicale e centrale della conoide, anche se localmente è possibile individuare spessori fino a un paio di metri, mentre aumentano verso le aree marginali. In ogni caso non raggiungono mai per estensione e spessore una continuità tale da impedire la circolazione idrica fra i livelli più permeabili di ghiaie. Tale falda, pertanto, può essere considerata un acquifero monostrato. Il corpo acquifero principale presenta un limite inferiore mal definibile. Infatti con buona approssimazione si può affermare che la geometria del corpo sedimentario della conoide si allarga a partire dall'apice e si rastrema nella parti distali, anche se, all'interno dell'alternanza di livelli ghiaiosi e livelli limo-argillosi, è possibile individuare il passaggio graduale ai materiali più fini in una superficie non meglio definibile che risale verso il p.c. procedendo verso le parti periferiche. Al di sotto del corpo acquifero principale sono presenti, soprattutto nella

zona apicale e centrale della conoide del Fiume Bisenzio, altri livelli permeabili intercomunicanti attraverso pochi contatti geologici che si fanno sempre più radi allontanandosi dall'apice della conoide. Questi intervalli ospitano falde localmente confinate ma con possibilità di scambi idrici laddove i livelli più fini presentano caratteristiche di bassa permeabilità ma non nulla (acquitardi). Tali scambi possono avvenire sia tra loro, sia con la falda libera superficiale sovrastante, sia nella zona più a monte, sia in quella più centrale. Per quanto riguarda i limiti naturali dell'acquifero il solo presente è quello posto a Nord e Nord-Est dove lo spessore tende ad annullarsi contro le rocce del substrato che costituiscono le pendici dei rilievi bordieri del bacino. Tali formazioni rocciose presentano quasi tutte un grado di permeabilità basso, (formazioni del Complesso Ofiolitico), ad eccezione della Formazione di Monte Morello che, pertanto, consente scambi idrici fra tali rocce e le ghiaie della conoide, laddove questi vengono in contatto. Nelle altre direzioni i depositi grossolani della conoide vengono a contatto con quelli depositi dai corsi d'acqua prossimi al Bisenzio, quali il Torrente Agna ad Ovest, il Torrente Ombrone a Sud, l'Arno a Sud-Est, e il Torrente Marina ad Est. I depositi alluvionali di questi corsi d'acqua si trovano tutti a piccola profondità (25-30 m). Tale situazione geologica evidenzia che l'acquifero è aperto agli scambi con quelli contigui e la superficie piezometrica risulta attualmente conformata in maniera tale che questi scambi avvengano in un unico verso, e cioè verso la falda di Prato.

Nell'area oggetto di studio sono presenti superficialmente depositi misti prevalentemente fini (argilloso-limosi) con locali frazioni più grossolane che possono aumentarne la permeabilità. Complessivamente questi terreni presentano una permeabilità primaria medio-bassa, mentre quando a prevalere è la frazione grossolana la permeabilità primaria assume valori fino a medio-alti. Per quanto riguarda i livelli ghiaioso-sabbiosi sottostanti ai depositi superficiali risultano avere una permeabilità primaria da media a alta, conferendo all'unità le caratteristiche di un acquifero sfruttabile. Le oscillazioni del livello idrico nel sottosuolo sono quindi riferite alle oscillazioni del livello della prima falda libera presente nel sottosuolo pratese contenuta nel corpo permeabile più superficiale della conoide del Fiume Bisenzio.

4. FATTIBILITA' DELL'INTERVENTO NELLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

4.1. Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA)

Il Piano di gestione del rischio di alluvioni (di seguito denominato PGRA delle Units of management (U.O.M.) Arno, Toscana Nord dell'Autorità Distrettuale dell'Appennino Settentrionale), così come approvato, ai sensi degli articoli 65 e 66 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 con d.p.c.m. 1 dicembre 2022, e pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 31 del 7.02.2023. di cui si riporta uno stralcio nella successiva figura 1, perimetra l'area di intervento come Area a Pericolosità da Alluvione Elevata (P3) per la quale la realizzazione di nuove edificazioni da subordinare al rispetto delle condizioni di gestione del rischio le previsioni di interventi di ristrutturazione urbanistica.



Figura 1 – Estratto PGRA – il cerchio individua l'area d'intervento

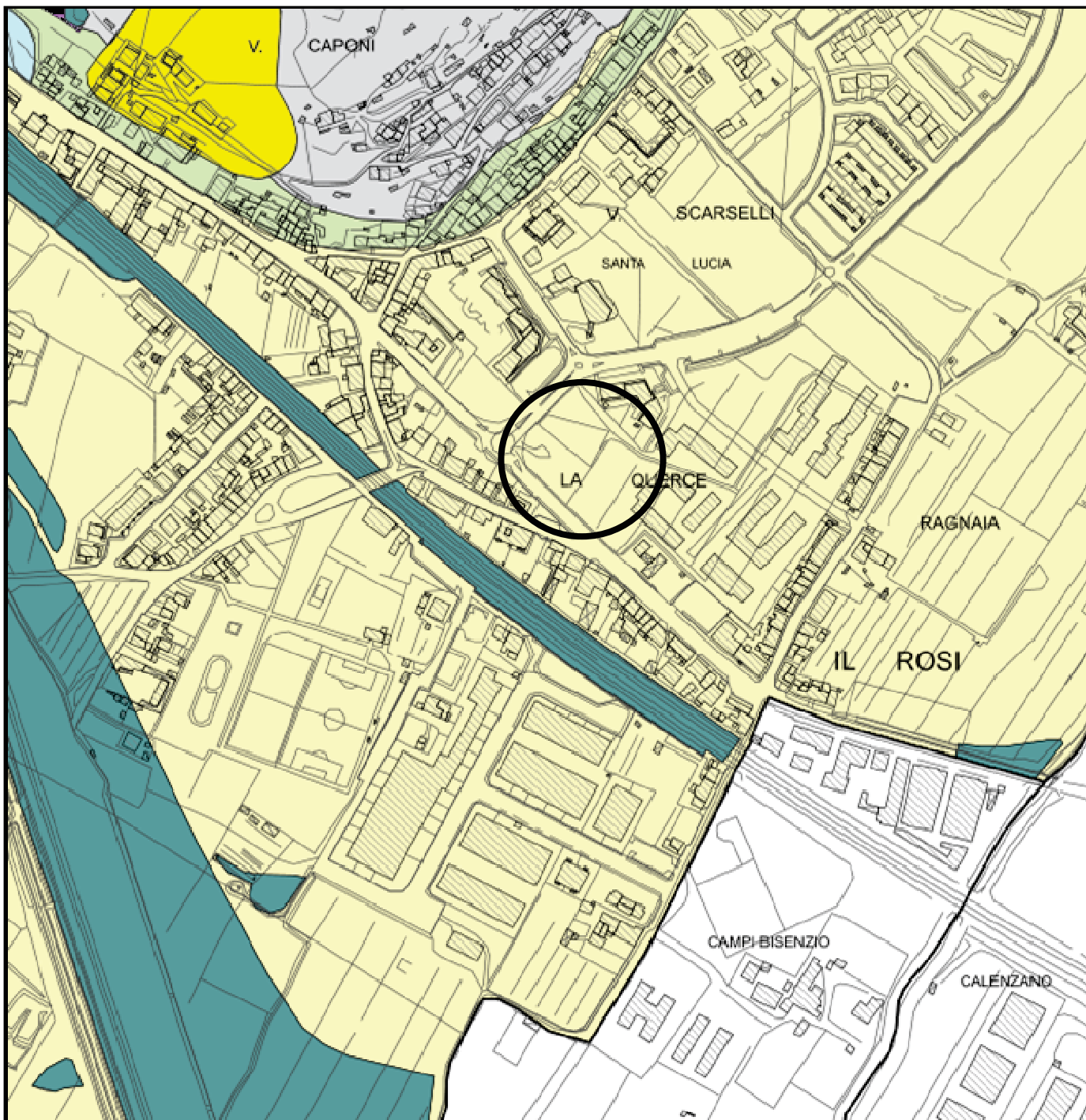
4.2. Piano Operativo e Piano Strutturale del Comune di Prato

4.2.1. Pericolosità geomorfologica (tavola Af.7)

Nella successiva figura 2 si riporta un estratto della carta della pericolosità geomorfologica di supporto al P.S.. In questo elaborato si può verificare che all'area oggetto dell'intervento è attribuita una classe di pericolosità geomorfologica media (G.2) ed è definita come area interessata da una bassa propensione al dissesto.

Conseguentemente alla definizione della pericolosità geomorfologica considerando che si tratta di una nuova edificazione ricadente in una zona posta a pericolosità G.2, si può attribuire una fattibilità con normali vincoli (Fig.2) (vedi Tabella 1 seguente).

Questa classificazione (Fig.2) indica situazioni di fattibilità con normali vincoli attuabili in seguito all'effettuazione, a livello esecutivo, dei normali studi geologico – tecnici previsti dalla normativa vigente in materia, in particolare il D.P.G.R. n. 36/R/09 e il D.M. 17 gennaio 2018 (NTC 2018), finalizzati anche alla verifica del non aggravio dei processi geomorfologici eventualmente presenti nell'area di intervento.



Pericolosità geomorfologica media (G.2)




-  Area interessata da movimenti franosi inattivi e stabilizzati
-  Area interessata da bassa propensione al dissesto in relazione alla pendenza del versante ed alla litologia
-  Corpo detritico su versante con pendenza inferiore al 25%

Figura 2 – Estratto Tavola Af.7 Carta della pericolosità geomorfologica

| Tipi di intervento | Pericolosità | | | | | | | | | | |
|---|--------------|------|------|------------|------|------|------|----------|------|------|------|
| | Geologica* | | | Idraulica* | | | | Sismica* | | | |
| | G.2 | G.3 | G.4 | I.1 | I.2 | I.3 | I.4 | S.1 | S.2 | S.3 | S.4 |
| MO Manutenzione Ordinaria MS Manutenzione Straordinaria RRC Restauro e Risanamento Conservativo RIC Ristrutturazione edilizia Conservativa, compreso il recupero dei sottotetti a fini abitativi ai sensi della L.R. n. 5/2010 DSR e IP.1 Demolizione Senza Ricostruzione (di porzioni di edificio e di pertinenze) | Fg.1 | Fg.1 | Fg.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fs.1 | Fs.1 | Fs.1 | Fs.1 |
| MS Manutenzione Straordinaria RRC Restauro e Risanamento Conservativo RIC Ristrutturazione edilizia Conservativa <i>che comporti, in tutti e tre i casi, aumento di carico urbanistico</i> | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| MS Manutenzione Straordinaria RRC Restauro e Risanamento Conservativo RIC Ristrutturazione edilizia Conservativa <i>che comporti, in tutti e tre i casi, un sovraccarico sulle fondazioni esistenti superiore al 10%</i> | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| RF E RFN Ristrutturazione edilizia Ricostruttiva | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| SE Sostituzione Edilizia | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| RU Ristrutturazione Urbanistica | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| NE, IP.2 e IP.3 Nuova Edificazione anche di pertinenze RCD Ricostruzione di edifici o parti di essi | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| AV.1 Addizioni Volumetriche su edifici esistenti ad un solo piano di tipologia residenziale tramite sopraelevazione non eccedente un ulteriore livello, e comunque senza modifica della sagoma a terra e nel rispetto delle altezze in gronda | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| AV.2 Addizioni Volumetriche fuori sagoma del manufatto preesistente | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| Aree destinate ad ampliamenti e/o miglioramenti di sedi stradali esistenti e/o realizzazione di nuovi brevi tratti di viabilità di ingresso/accesso, nuova viabilità forestale e antincendio | Fg.1 | Fg.2 | Fg.3 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fs.1 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 |
| Nuova viabilità*, sottopassi*, piazze, nuovi parcheggi* e/o ampliamenti e/o adeguamenti di strade e parcheggi esistenti* | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| Percorsi pedonali, ciclabili* e ippovie | Fg.2 | Fg.3 | Fg.3 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.3 |
| Parchi e giardini pubblici | Fg.2 | Fg.3 | Fg.3 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.1 | Fs.1 | Fs.1 |
| Nuovi annessi, garage, box auto, piscine nelle aree rurali | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| Box cavalli, stalle, serre, depositi all'aperto (escusi locali di servizio), manufatti precari | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| Reti tecnologiche interrate (acquedotti, fognature, elettrodotti, gasdotti) | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| Impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili*, impianti di telecomunicazioni, impianti per il trattamento della risorsa idrica* e per la depurazione*, elettrodotti* | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| Invasi arginati di cui al punto 5 dell'art. 1 della L.R. n. 64/2009 | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.2 | Fs.3 | Fs.4 |
| Giardini, orti e coltivazioni a carattere amatoriale, compresa installazione di manufatti agricoli reversibili | Fg.1 | Fg.1 | Fg.2 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fi.1 | Fs.1 | Fs.1 | Fs.1 | Fs.1 |
| Coltivazioni specializzate con movimenti di terra e sistemazioni idraulico-agrarie | Fg.2 | Fg.3 | Fg.4 | Fi.1 | Fi.2 | Fi.3 | Fi.4 | Fs.1 | Fs.1 | Fs.1 | Fs.1 |

* carte della pericolosità del Piano Strutturale (Af.7; Af.8; Af.9) - ° realizzabili alle condizioni di cui all'art. 13 della L.R. n. 41/2018

Tabella 1 – indicatore di fattibilità

4.2.2. Pericolosità sismica (tavola Af.8)

Nella successiva figura 3 si riporta un estratto della carta della pericolosità sismica locale di supporto al P.S.. In questo elaborato si può verificare che all'area oggetto dell'intervento è attribuita una classe di pericolosità sismica elevata (S.3).

Conseguentemente alla definizione della pericolosità sismica locale considerando che si tratta di una nuova edificazione ricadente in una zona posta a pericolosità S.2, si può attribuire una fattibilità condizionata (Fs.3) (vedi precedente Tabella 1).

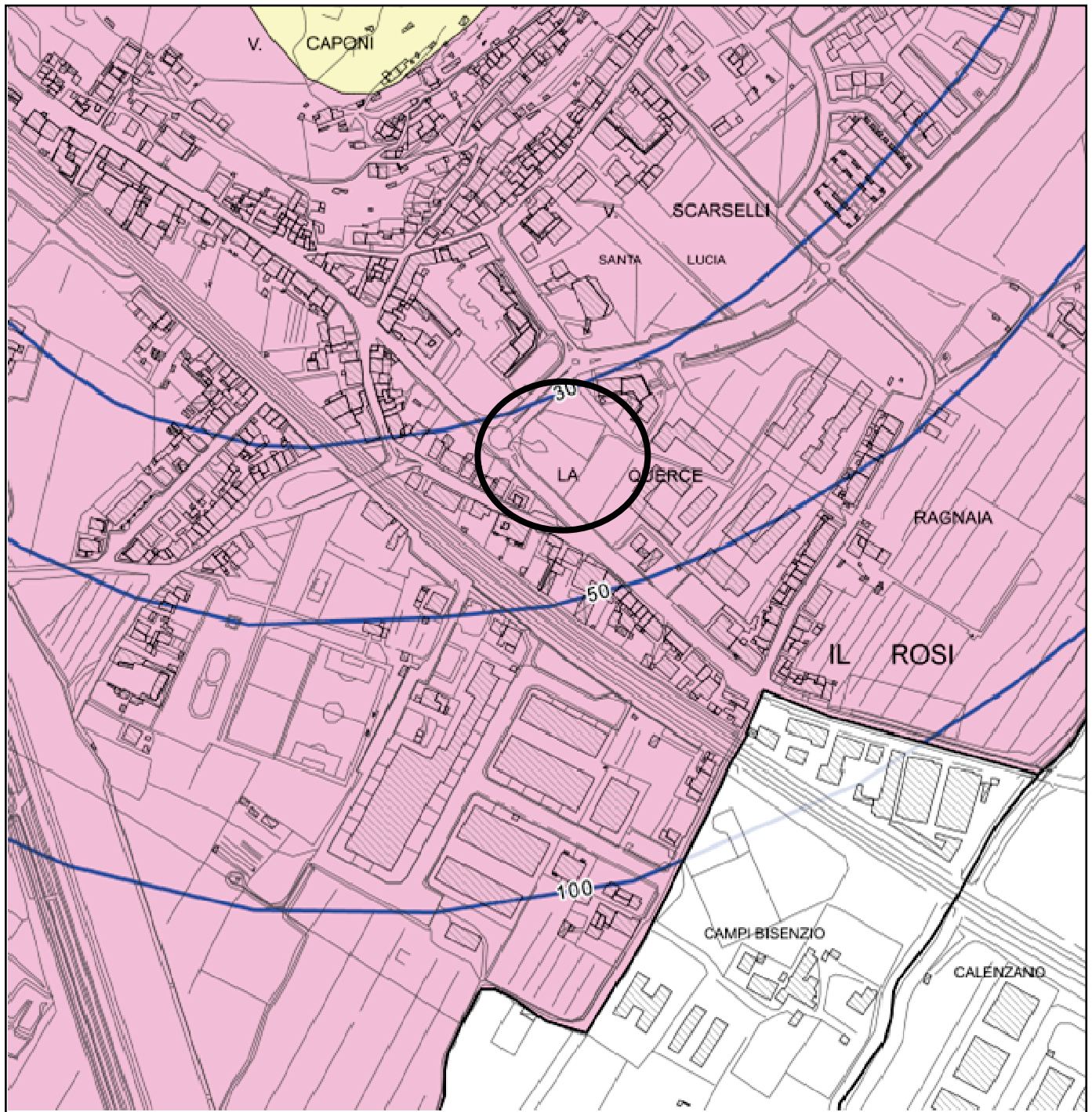
Questa classificazione (Fs.3) indica situazioni attuabili in seguito all'effettuazione, in sede di predisposizione di piano attuativo o di predisposizione del progetto edilizio, delle indagini geofisiche e geotecniche per le verifiche di sicurezza e per la corretta definizione dell'azione sismica, indicate per le aree caratterizzate da pericolosità sismica S.3 al punto 3.5 delle Direttive allegate al D.P.G.R. n. 53/R/11 e che saranno eseguite in fase di predisposizione del progetto edilizio.

4.2.3. Pericolosità idraulica (tavola Af.9)

Nella successiva figura 4 si riporta un estratto della carta della pericolosità idraulica di supporto al P.S.. In questo elaborato si può verificare che all'area oggetto dell'intervento è attribuita una classe di pericolosità per alluvioni frequenti, molto elevata (I.4) da alluvione elevata (P3).

Conseguentemente alla definizione della pericolosità idraulica considerando che si tratta di una nuova edificazione ricadente in una zona posta a pericolosità I.4, si può attribuire una fattibilità limitata (Fi.4) (vedi precedente Tabella 1).

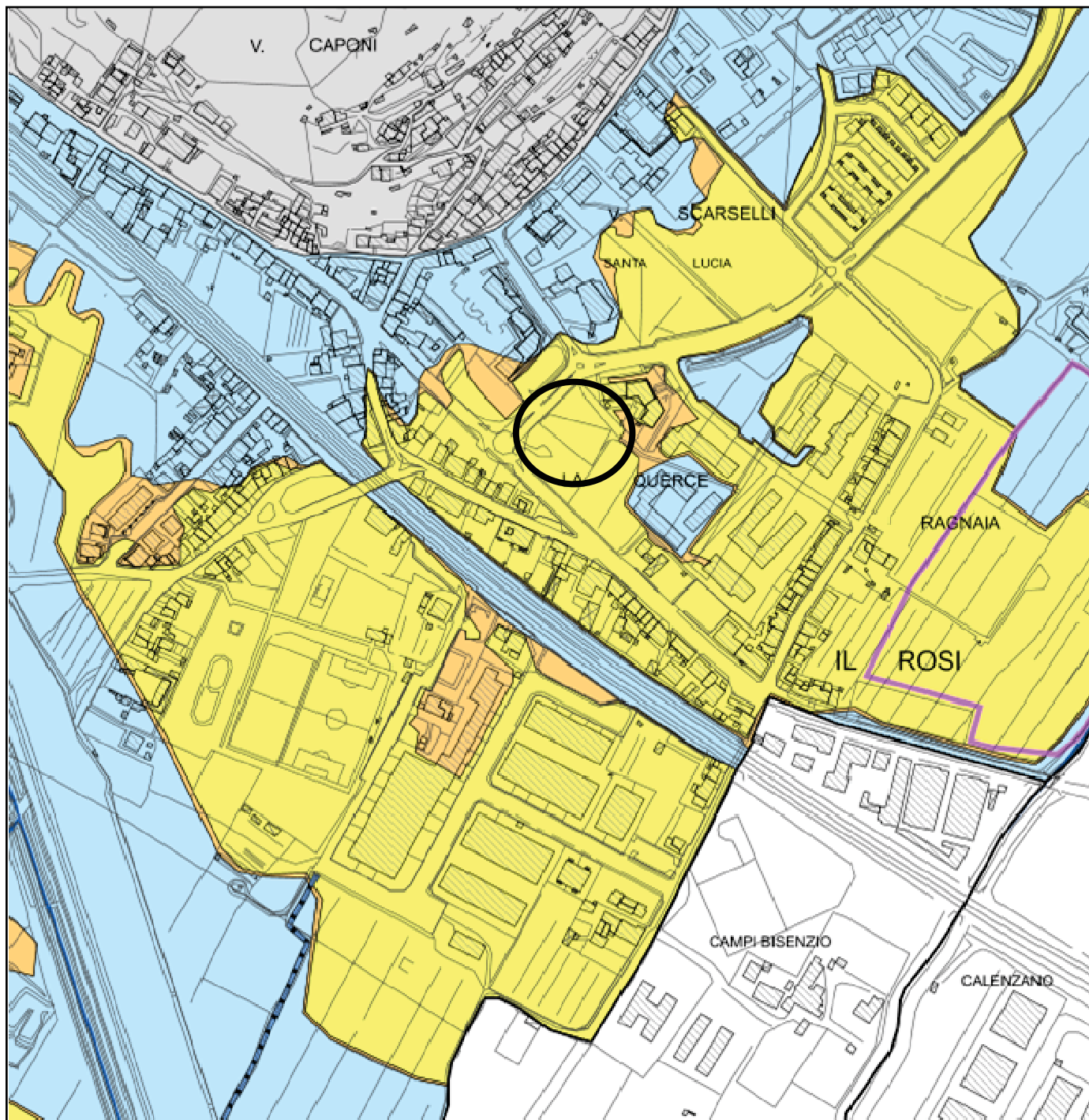
Questa classificazione (Fi.4) indica situazioni di fattibilità limitata, per tali previsioni gli interventi di nuova costruzione, disciplinati dagli art. 10, 11 della L.R. n. 41/2018 ad eccezione degli interventi edilizi fuori dal territorio urbanizzato disciplinati dall'art. 16, sono subordinati alla realizzazione di almeno una delle opere idrauliche di cui al comma a) e b) del punto 1 dell'art.8 della suddetta legge ed alle opere idrauliche di cui al comma c), nel caso in cui la zona di intervento sia già caratterizzata da una magnitudo idraulica moderata, alle condizioni di cui ai punti 4, 5, 7, 8 del dall'art. 13 delle Norme Tecniche di Attuazione del Piano Operativo del Comune di Prato. Per maggiori dettagli tecnici si rimanda allo Studio Idraulico allegato alla richiesta di variante.



Pericolosità sismica locale

- S.4 Molto elevata
- S.3 Elevata
- S.2 Media
- S.1 Bassa
- Area non interessata dallo studio di Microzonazione Sismica
- Isobate del substrato roccioso

Figura 3 – Estratto Tavola Af.8 Carta della pericolosità sismica locale



Pericolosità idraulica

- Pericolosità idraulica bassa I.1
- Pericolosità media (I.2), da alluvione bassa (P1)
- Pericolosità per alluvioni frequenti, elevata (I.3), da alluvione media (P2)
- Pericolosità per alluvioni frequenti, molto elevata (I.4), da alluvione elevata (P3)

Figura 4 – Estratto Tavola Af.9 Carta della pericolosità idraulica

5. CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Per valutare se un'opera strutturale è sicura bisogna far riferimento a degli *stati limite*, che possono verificarsi durante un determinato *periodo di riferimento* della stessa opera. Quindi per poter stimare l'azione sismica che dovrà essere utilizzata nelle verifiche agli stati limite o nella progettazione, bisognerà stabilire:

- in primo luogo la *vita nominale* dell'opera, che congiuntamente alla *classe d'uso*, permette di determinare il *periodo di riferimento*;
- una volta definito il periodo di riferimento e i diversi stati limite da considerare, dopo aver definito le relative *probabilità di superamento* è possibile stabilire il *periodo di ritorno* associato a ciascun stato limite;
- a questo punto è possibile definire la **pericolosità sismica di base** per il sito interessato alla realizzazione dell'opera, facendo riferimento agli studi condotti sul territorio nazionale dal Gruppo di Lavoro 2004 nell'ambito della convenzione-progetto S1 DPC-INGV 2004-2006 e i cui risultati sono stati promulgati mediante l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) 3519/2006.

5.1. Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento

Nel **DM 17 gennaio 2018** - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» il periodo di riferimento, che non può essere inferiore a 35 anni, è dato dalla seguente relazione:

$$V_R = V_N \cdot C_U \quad (2.1)$$

dove:

V_R = periodo di riferimento

V_N = vita nominale

C_U = coefficiente d'uso

La vita nominale di un'opera strutturale V_N , secondo la normativa sismica, è definita come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata e viene definita attraverso tre diversi valori, a seconda dell'importanza dell'opera e perciò delle esigenze di durabilità. I valori minimi di V_N da adottare per i diversi tipi di costruzione sono riportati nella Tab. 2. Tali valori possono essere anche impiegati per definire le azioni dipendenti dal tempo.

| TIPI DI COSTRUZIONI | | Valori minimi di V_N (anni) |
|---------------------|--|-------------------------------|
| 1 | Costruzioni temporanee e provvisorie | 10 |
| 2 | Costruzioni con livelli di prestazioni | 50 |
| 3 | Costruzioni con livelli di prestazioni elevati | 100 |

Tab. 2 – Valori minimi della Vita nominale V_N di progetto per i diversi tipi di costruzioni

Nel caso specifico $V_N = 50$ anni.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Le norme prevedono quattro classi d'uso a ciascuna delle quali è associato un valore del coefficiente d'uso:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli. $C_U = 0.7$;

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali,

reti viarie non ricadenti in Classe d'uso *III* o in Classe d'uso *IV*, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti. $C_U = 1.0$;

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso *IV*. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso. $C_U = 1.5$;

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica. $C_U = 2.0$;

Nel caso in esame viene presa in considerazione la **classe d'uso II** a cui è associato il coefficiente d'uso **$C_U = 1,0$** .

Ricavati i valori di V_N e C_U , è possibile calcolare il periodo di riferimento V_R , che qui vale:

$$V_R = 50 * 1,0 = 50 \text{ anni.}$$

5.2. Stati limite, probabilità di superamento e periodo di ritorno

Le NTC 2018 prendono in considerazione 4 possibili *stati limite* (SL) individuati facendo riferimento alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti: due sono *stati limite di esercizio* (SLE) e due sono *stati limite ultimi* (SLU). Uno stato limite è una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per la quale è stata progettata.

Più in particolare le opere e le varie tipologie strutturali devono essere dotate di capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio (sicurezza nei confronti di SLE) e di capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e di dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone o comportare la perdita di beni, oppure provocare gravi danni ambientali e sociali, oppure mettere fuori servizio l'opera (sicurezza nei confronti di SLU).

Gli stati limite di esercizio sono:

- **Stato Limite di Operatività** (SLO): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- **Stato Limite di Danno** (SLD): a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi sono:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita** (SLV): a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso** (SLC): a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la

costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Ad ogni stato limite è associata una *probabilità di superamento* P_{VR} (Tabella 3), ovvero la probabilità che, nel periodo di riferimento V_R , si verifichi almeno un evento sismico ($n \geq 1$) di a_g prefissata (a_g = accelerazione orizzontale massima del suolo) avente frequenza media annua di ricorrenza $\lambda = 1/T_R$ (T_R = periodo di ritorno).

| | | |
|--|-----|-----------------------------------|
| Stato limite di esercizio: operatività | SLO | $P_{VR} = 81\%$ |
| Stato limite di esercizio: danno | SLD | $P_{VR} = 63\%$ |
| Stati limite ultimo: salvaguardia della vita | SLV | $P_{VR} = 10\%$ |
| Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso | SLC | $P_{VR} = 5\%$ |

Tabella 3 - Stati limite e rispettive probabilità di superamento, nel periodo di riferimento V_R

Fissati V_R e P_{VR} associata ad ogni stato limite, è possibile calcolare il periodo di ritorno dell'azione sismica T_R , espresso in anni, mediante l'espressione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} \quad (3.1)$$

Tale relazione tra P_{VR} (probabilità) e T_R (statistica) risulta biunivoca poiché utilizza la distribuzione discreta Poissoniana.

| | | |
|--|-----|--------------------------------|
| Stato limite di esercizio: operatività | SLO | $T_R = 45$ |
| Stato limite di esercizio: danno | SLD | $T_R = 75$ |
| Stati limite ultimo: salvaguardia della vita | SLV | $T_R = 712$ |
| Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso | SLC | $T_R = 1462$ |

Tabella 4 - Stati limite e rispettivi tempi di ritorno, nel periodo di riferimento V_R

5.3. *Categorie di sottosuolo e condizioni topografiche*

Le norme prevedono che per la definizione dell'azione sismica si possa far riferimento ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento.

Vengono pertanto definite le seguenti categorie di sottosuolo:

- **A – Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi** caratterizzati da valori di V_{S30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiali di spessore massimo pari a 3 m.
- **B – Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s;
- **C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti**, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
- **D - Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente 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 100 e 180 m/s.

- E – **Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D** con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo (parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso) la classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, V_{Seq} (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S30} = H / \sum h_i / V_i$$

con:

- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- V_i velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da VS non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione. Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio V è definita dal para- Seq metro VS,30, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Per quanto riguarda la valutazione delle condizioni topografiche, essa può essere operata per configurazioni superficiali semplici, che non necessitano di specifiche analisi di risposta sismica locale, tramite la classificazione contenuta nella seguente tabella:

| categoria | caratteristiche della sup. topografica |
|------------------|---|
| T1 | Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i < 15^\circ$ |
| T2 | Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$ |
| T3 | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ < i < 30^\circ$ |
| T4 | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$ |

Tabella 5 – categorie topografiche.

Le suesposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

5.4. Pericolosità sismica di base

La pericolosità sismica di base, cioè le caratteristiche del moto sismico atteso al sito di interesse, nelle NTC 2018, per una determinata probabilità di superamento, si può ritenere definita quando vengono designati un'accelerazione orizzontale massima (a_g) ed il corrispondente spettro di risposta elastico in accelerazione, riferiti ad un suolo rigido e ad una superficie topografica orizzontale.

Per poter definire la pericolosità sismica di base le NTC 2018 si rifanno ad una procedura basata sui risultati disponibili anche sul sito web dell'INGV <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>, nella sezione "Mappe interattive della pericolosità sismica".

Secondo le NTC 2018 le forme spettrali sono definite per 9 differenti periodi di ritorno T_R (30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2475 anni) a partire dai valori dei seguenti parametri riferiti a terreno rigido orizzontale, cioè valutati in condizioni ideali di sito:

a_g = accelerazione orizzontale massima;

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.

I tre parametri si ricavano per il 50° percentile ed attribuendo a:

a_g , il valore previsto dalla pericolosità sismica S1

F_0 e T_C^* i valori ottenuti imponendo che le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC18 scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica S1 (il minimo è ottenuto ai minimi quadrati, su valori normalizzati).

I valori di questi parametri vengono forniti in tabella, contenuta nell'**Allegato B** (a cui le NTC 2018 fanno riferimento), per i 10751 punti di un reticolo di riferimento in cui è suddiviso il territorio nazionale, identificati dalle coordinate geografiche longitudine e latitudine.

Qualora la pericolosità sismica del sito sul reticolo di riferimento non consideri il periodo di ritorno T_R corrispondente alla V_R e P_{VR} fissate, il valore del generico parametro p ad esso corrispondente potrà essere ricavato per interpolazione (Figura 5), a partire dai dati relativi ai tempi di ritorno previsti nella pericolosità di base, utilizzando la seguente espressione:

$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \cdot \left[\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)\right]^{-1} \quad (4.1)$$

nella quale p è il valore del parametro di interesse (a_g , F_0 , T_C^*) corrispondente al periodo di ritorno T_R desiderato, mentre $p_1, 2$ è il valore di tale parametro corrispondente al periodo di ritorno $T_{R1, 2}$.

Per un qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri p possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando l'espressione:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}} \quad (4.2)$$

nella quale p è il valore del parametro di interesse (a_g , F_0 , T_C^*) corrispondente al punto considerato, p_i è il valore di tale parametro nell' i -esimo vertice della maglia elementare contenente il punto in esame e d_i è la distanza del punto in esame dall' i -esimo vertice della suddetta maglia.

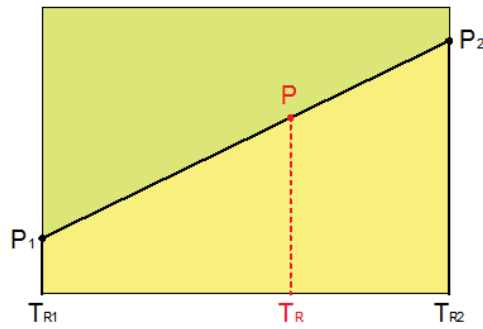


Figura 5 - Interpolazione dei periodi di ritorno, per ottenere i parametri di pericolosità sismica.

La procedura per interpolare le coordinate geografiche è schematizzata nella Figura 6

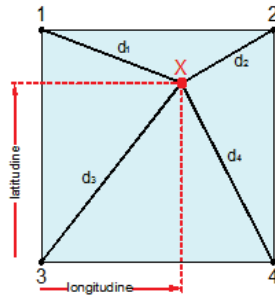


Figura 6 - Interpolazione delle coordinate geografiche, per ottenere i parametri di pericolosità sismica.

Pertanto per poter procedere all'interpolazione delle coordinate geografiche, in accordo alla procedura delle norme, bisogna calcolare le distanze che intercorrono tra i 4 punti del reticolo e il punto di interesse. Questo calcolo può essere eseguito approssimativamente utilizzando le formule della trigonometria sferica, che danno la distanza geodetica tra due punti, di cui siano note le coordinate geografiche. Utilizzando quindi il teorema di Eulero, la distanza d tra due punti, di cui siano note latitudine e longitudine, espresse però in radianti, si ottiene dall'espressione seguente:

$$d = R \cdot \arccos[\sin(\text{lat}\beta) \cdot \sin(\text{lat}\alpha) + \cos(\text{lat}\beta) \cdot \cos(\text{lat}\alpha) \cdot \cos(\text{lon}\alpha - \text{lon}\beta)] \quad (4.3)$$

dove $R = 6371$ è il raggio medio terrestre in km, mentre $\text{lat}\alpha$, $\text{lon}\alpha$, $\text{lat}\beta$ e $\text{lon}\beta$ sono la latitudine e la longitudine, espresse in radianti, di due punti A e B di cui si vuole calcolare la distanza.

La formula di interpolazione sopra proposta, semplice da usare, presenta però l'inconveniente di condurre a valori di pericolosità lievemente diversi per punti affacciati ma appartenenti a maglie contigue. La modestia delle differenze (scostamenti in termini di PGA dell'ordine di $\pm 0,01g$ ossia della precisione dei dati) a fronte della semplicità d'uso, rende tale stato di cose assolutamente accettabile.

Qualora si vogliano rappresentazioni continue della funzione interpolata, si dovrà ricorrere a metodi di interpolazione più complessi, ad esempio i polinomi di Lagrange.

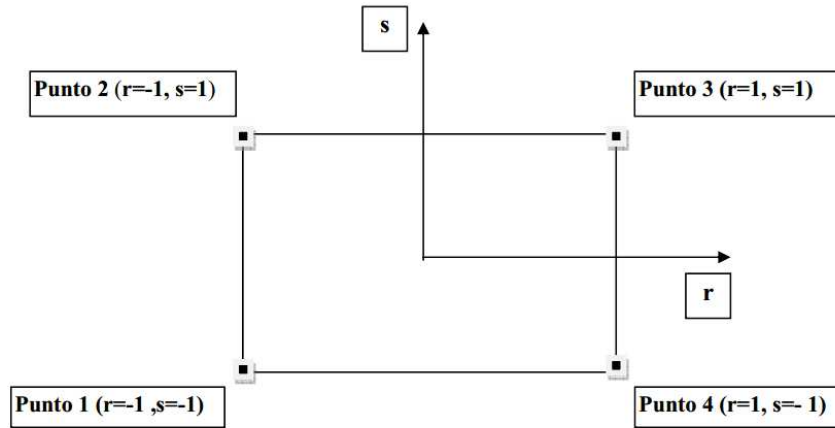


Figura 7 - Applicazione dell'interpolazione bilineare.

Definiti i 4 vertici di una generica maglia i polinomi di Lagrange sono così determinati:

$$h_1 = (1-r) \cdot (1-s)/4 \quad (4.4)$$

$$h_2 = (1-r) \cdot (1+s)/4 \quad (4.5)$$

$$h_3 = (1+r) \cdot (1+s)/4 \quad (4.6)$$

$$h_4 = (1+r) \cdot (1-s)/4 \quad (4.7)$$

Tra le coordinate x, y di un punto generico e le coordinate r, s dello stesso punto valgono le seguenti relazioni:

$$4x = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot x_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot x_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot x_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot x_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot x_4] \quad (4.8)$$

$$4y = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot y_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot y_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot y_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot y_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot y_4] \quad (4.9)$$

La soluzione del sistema di equazioni non lineari è ottenuta iterativamente e, tramite i valori di r ed s , si determinano i parametri a_g, F_0, T_C^* dall'equazione:

$$4p = \sum_{i=1}^4 h_i \cdot p_i = [(1-r) \cdot (1-s) \cdot p_1 + (1-r) \cdot (1+s) \cdot p_2 + (1+r) \cdot (1+s) \cdot p_3 + (1+r) \cdot (1-s) \cdot p_4] \quad (4.10)$$

Dove p rappresenta il parametro cercato.

6. DESCRIZIONE DELLE INDAGINI E LORO METODOLOGIA

6.1. Prova penetrometrica statica (C.P.T.)

Le prove penetrometriche sono state eseguite utilizzando un penetrometro statico da 200 kN PAGANI TG63-200 munito di punta tipo Begemann con manicotto per la misura dell'attrito laterale locale (*Friction Jacket Cone*). Ogni 20 cm di penetrazione dell'intera batteria di aste, il sistema di spinta, consente di spingere alternativamente nel terreno la punta e il manicotto, con una velocità di avanzamento di 20 mm/s, compiendo quindi una misura della resistenza di punta ed una misura dell'attrito laterale locale.

I risultati delle prove sono illustrati nei diagrammi allegati, in cui sono riportati, in funzione della profondità, i valori della resistenza alla punta q_c (kg/cm^2) e la resistenza laterale f_s (kg/cm^2). L'analisi dei risultati delle prove penetrometriche è stata eseguita impiegando le metodologie di valutazione illustrate nel prossimo paragrafo.

6.1.1. Profilo stratigrafico

In letteratura geotecnica è possibile reperire numerose indicazioni riguardo a come riconoscere le varie litologie del sottosuolo indagato utilizzando i valori letti durante le prove penetrometriche statiche.

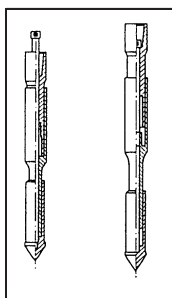


Figura 8 - Punta tipo Begemann

E' comunemente riconosciuto che quella fornita da Schmertmannⁱ sia l'interpretazione più attendibile e di più facile applicazione.

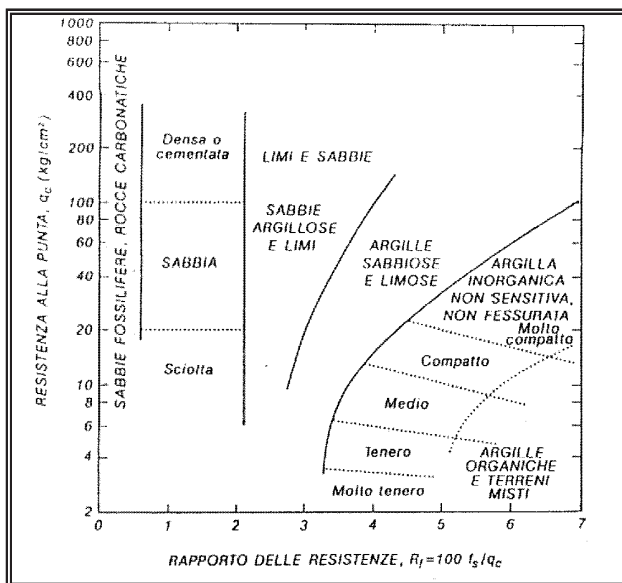


Figura 9 - Grafico per l'interpretazione stratigrafica proposto da Schmertmann

Essa si basa sulla correlazione tra la resistenza alla penetrazione della punta q_c (in ordinata e in scala logaritmica) e il rapporto tra quest'ultima e la misura della resistenza laterale espresso in percentuale.

6.1.2. Resistenza al taglio

I metodi di interpretazione delle prove penetrometriche in relazione alla resistenza al taglio fanno riferimento a correlazioni di tipo sperimentale o a soluzioni teoriche differenti nel caso si tratti di terreni incoerenti o di terreni coerenti.

Nel primo caso, ponendo il valore della coesione $c' = 0$, l'angolo di attrito interno del terreno è determinato sulla base della formula di Caquot ⁱⁱ riportata di seguito:

$$\phi = \arctan \frac{\log_{10} \left(\frac{q_c}{\sigma} \right)}{3.04}$$

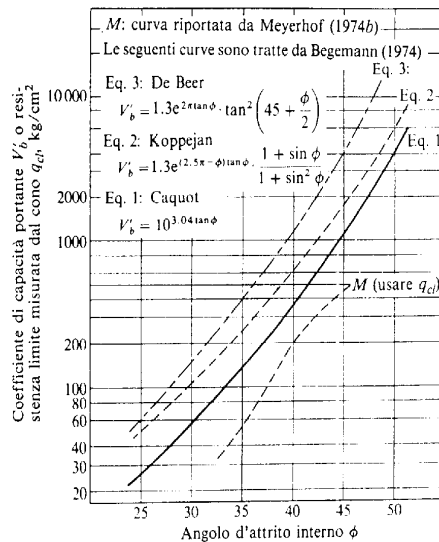


Figura 10 - Grafico per il calcolo dell'angolo di attrito

Quest'ultima, esplicitata nella figura 7, è secondo Bowles ⁱⁱⁱ la più attendibile tra quelle rinvenibili in letteratura.

Nel secondo caso (terreni prevalentemente coesivi con $R_f \cong 3 \div 4$) la resistenza al taglio in termini di tensioni totali (c_u) si può valutare secondo il metodo proposta da Marsland (1974) e Marsland & Powell (1979).

6.1.3. Parametri di deformabilità

Le resistenze (q_c) misurate alla punta del penetrometro danno una misura delle caratteristiche del terreno solo a grandi deformazioni ed è perciò altamente improbabile ottenere indicazioni che possano essere sicuramente indicative del comportamento del terreno nella fase che precede la sua rottura. Tuttavia da numerosi studi noti in letteratura e da correlazioni sperimentali con prove di laboratorio, una valutazione del modulo elastico E in condizioni edometriche può essere eseguita con sufficiente approssimazione tramite le relazioni di Sanglerat e Schmertmann.

6.2. Metodologia MASW ATTIVA (Multichannel Analysis of Surface Waves)

6.2.1. Introduzione generale

La tecnica MASW venne introdotta per la prima volta nell'ambito della comunità geofisica e geotecnica agli inizi del 1999. La Multichannel Analysis of Surface Waves è un metodo sismico mediante il quale è possibile costruire un profilo di velocità delle onde di taglio (V_s) in relazione alla profondità (V_s versus profondità), attraverso l'analisi delle onde superficiali tipo Rayleigh (onde R). Tale tecnica permette quindi di ottemperare a quanto previsto dalla nuova normativa che prevede che per la definizione dell'azione sismica si possa far riferimento ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento.

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo (parte di sottosuolo influenzata, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che influenza il manufatto stesso) la classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, V_{S30} (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S30} = H / \sum h_i / V_i$$

con:

- h_i spessore dell' i -esimo strato;
- V_i velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da VS non inferiore a 800 m/s.

6.2.2. Onde superficiali di Rayleigh (onde R)

Esistono diversi tipi di onde superficiali, oltre alle già citate onde di Rayleigh (P+Sv), si conoscono le onde di Love (Sh) e le onde di Lamb. Le onde di Rayleigh rappresentano la componente principale delle onde superficiali e sono generate dall'interazione tra onde di compressione (o di volume) P e onde di taglio verticali Sv ogniqualvolta si è in presenza di una superficie libera in un mezzo omogeneo ed isotropo. Le onde R si propagano alla superficie libera (vedi Fig. 1) con un moto ellittico retrogrado (moto antiorario) che si inverte alla profondità di $\lambda/2\pi$ (dove λ è la lunghezza d'onda). L'ampiezza di tale spostamento decresce secondo una legge esponenziale, pertanto diviene rapidamente trascurabile con la profondità.

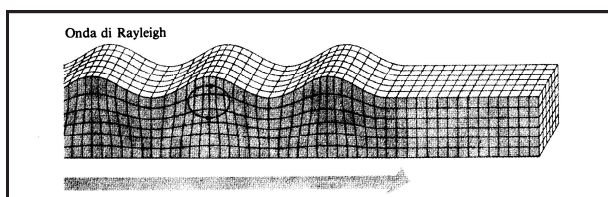


Figura 11 - Modalità di propagazione delle onde R

L'utilizzo delle onde superficiali di tipo Rayleigh per la costruzione di un profilo di velocità delle onde di taglio V_s è giustificato da una serie di fattori:

- ❑ La percentuale di energia convertita in onde R è nettamente predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione di onde P (7%) e onde S (26%);
- ❑ il metodo d'analisi basato sulle onde R non è limitato, al contrario del metodo basato sulla rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità;
- ❑ buona risoluzione, a differenza della tecnica a riflessione;
- ❑ la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_p (velocità delle onde di compressione P) e dalla densità del mezzo, è funzione innanzitutto della V_s che rappresenta appunto il parametro fondamentale per la caratterizzazione geotecnica di un sito;
- ❑ la tecnica in questione è inoltre particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti ed ambienti rumorosi.

Tenuto conto dei fattori sopraelencati, l'elemento fondamentale che permette l'impiego di tecniche basate sulle onde superficiali, in questo caso la tecnica MASW e le onde Rayleigh, è una caratteristica chiamata dispersione. La dispersione è una proprietà delle onde superficiali che consiste nella deformazione di un treno d'onde dovuta alla variazione di velocità di propagazione al variare della frequenza. Per le onde R questa variazione si manifesta solo

all'interno di un mezzo stratificato. In altre parole, ipotizzando una variazione di densità del terreno in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale si propaga con una differente velocità (velocità di fase), e quindi con una diversa lunghezza d'onda; questa proprietà si chiama appunto dispersione.

La velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda λ (e quindi per una certa frequenza ν) è influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino ad una profondità di $\lambda/2$ (anche se recenti studi hanno posto questo limite a $\lambda/2.5$). Inoltre, la velocità delle onde R (V_r) è pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio (V_s).

Secondo quanto detto appare chiaro come la costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio V_s , ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh, sia una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

6.2.3. Tecnica MASW ATTIVA : procedura e strumentazione utilizzata

La procedura MASW si può sintetizzare in tre stadi successivi e distinti:

- ❑ Acquisizione delle onde superficiali (ground roll);
- ❑ Costruzione della curva di dispersione : grafico velocità di fase V_r – frequenza λ ;
- ❑ Inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale della V_s .

La prima fase viene effettuata direttamente in campagna generando un treno di onde superficiali mediante l'utilizzo di una sorgente sismica attiva, generalmente una mazza battente, e uno stendimento lineare di geofoni ricevitori (vedi figura seguente). L'indagine svolta nel presente lavoro è stata condotta utilizzando la strumentazione: Sismografo a 24 canali - modello Geode della Geometrics.

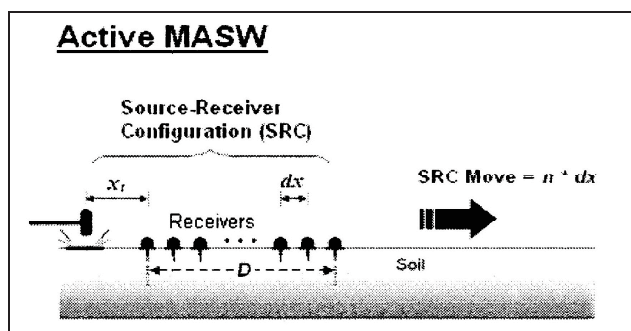


Figura 12 - MASW ATTIVA : stendimento lineare e sorgente attiva

I dati acquisiti in campagna vengono quindi elaborati utilizzando il software "winMASW 2018 PRO della ELIOSOFT". In particolare si procede alla lettura dei dati acquisiti (common-shot gather) e al calcolo dello spettro di velocità, ovvero il grafico velocità di fase V_r versus frequenza λ . Sulla scorta di quest'ultimo è possibile costruire la curva di dispersione. Tale procedimento avviene mediante il cosiddetto Picking, cioè la selezione dei punti che, nell'interpretazione dell'utente, appartengono ad un certo modo di propagazione dell'onda superficiale di Rayleigh. L'identificazione ed il Picking della curva di dispersione sono un'operazione di importanza cruciale.

L'ultimo passo da affrontare è l'inversione della curva di dispersione precedentemente costruita. Questa operazione viene effettuata grazie all'utilizzo di una potente tecnica di ottimizzazione basata su algoritmi genetici. Il risultato finale è quello di ottenere il profilo verticale della velocità delle onde di taglio V_s .

6.3. Tecnica HVSr

La tecnica HVSr permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo V_{s30} attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore ambientale lungo tre direzioni ortogonali tra loro (x,y,z) con una singola stazione. Tale registrazione deve essere effettuata, secondo le indicazioni del progetto SESAME, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il rapporto spettrale H/V medio, la cui frequenza di picco (frequenza in cui è localizzato il massimo valore assunto dal rapporto medio stesso) rappresenta la deducibile stima della frequenza naturale di vibrazione del sito.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30.

7. ANALISI DEI RISULTATI

7.1. Prove penetrometriche statiche

CPT 1

| From depth To depth (m) | Thickness (m) | Permeability (m/s) | SPT _{N60} (blows/30cm) | E _v (MPa) | D _v | Friction angle | Constrained modulus, M (MPa) | Shear modulus, G _v (MPa) | Undrained strength, S _u (kPa) | Undrained strength ratio | OCR | Unit weight (kN/m ³) |
|-------------------------|---------------|--------------------|---------------------------------|----------------------|----------------|----------------|------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|---------|----------------------------------|
| 0.00 | 2.70 | 5.74E-06 | 6.6 | 31.5 | 0.0 | 0.0 | 22.8 | 37.5 | 113.4 | 4.7 | 21.9 | 18.2 |
| 2.70 | | (±2.70E-05) | (±1.2) | (±5.9) | (±0.0) | (±0.0) | (±7.4) | (±6.6) | (±33.0) | (±3.7) | (±17.0) | (±0.6) |
| 2.70 | 1.00 | 3.20E-05 | 32.6 | 111.5 | 76.3 | 42.8 | 124.0 | 140.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 20.3 |
| 3.70 | | (±6.40E-05) | (±15.4) | (±40.5) | (±18.3) | (±2.7) | (±58.4) | (±53.7) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±1.2) |
| 3.70 | 1.70 | 4.41E-08 | 10.9 | 45.2 | 0.0 | 0.0 | 33.1 | 71.4 | 169.1 | 2.5 | 11.5 | 18.9 |
| 5.40 | | (±3.19E-08) | (±3.4) | (±26.9) | (±0.0) | (±0.0) | (±12.6) | (±20.0) | (±63.4) | (±0.9) | (±4.0) | (±0.8) |
| 5.40 | 2.10 | 4.52E-06 | 20.3 | 83.8 | 50.2 | 38.8 | 81.8 | 95.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 19.2 |
| 7.50 | | (±8.37E-06) | (±8.7) | (±22.1) | (±9.0) | (±1.7) | (±39.5) | (±31.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.9) |
| 7.50 | 0.15 | 2.18E-04 | 48.0 | 120.6 | 83.7 | 43.9 | 151.2 | 151.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 20.2 |
| 7.65 | | (±1.25E-04) | (±6.1) | (±11.3) | (±7.2) | (±0.8) | (±14.2) | (±14.2) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.2) |

CPT 2

| From depth To depth (m) | Thickness (m) | Permeability (m/s) | SPT _{N60} (blows/30cm) | E _v (MPa) | D _v | Friction angle | Constrained modulus, M (MPa) | Shear modulus, G _v (MPa) | Undrained strength, S _u (kPa) | Undrained strength ratio | OCR | Unit weight (kN/m ³) |
|-------------------------|---------------|--------------------|---------------------------------|----------------------|----------------|----------------|------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|--------|----------------------------------|
| 0.00 | 6.10 | 1.79E-06 | 9.9 | 34.9 | 0.0 | 0.0 | 31.8 | 62.6 | 163.8 | 3.8 | 17.4 | 18.9 |
| 6.10 | | (±1.21E-05) | (±2.7) | (±8.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±8.7) | (±18.7) | (±41.6) | (±2.1) | (±9.9) | (±0.6) |
| 6.10 | 2.00 | 4.77E-05 | 23.6 | 78.4 | 54.4 | 39.5 | 89.3 | 93.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.9 |
| 8.10 | | (±1.45E-04) | (±8.8) | (±17.9) | (±11.4) | (±2.1) | (±32.4) | (±27.1) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.9) |
| 8.10 | 0.40 | 4.19E-07 | 3.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.8 | 20.8 | 15.7 | 0.2 | 0.7 | 15.2 |
| 8.50 | | (±1.89E-06) | (±1.4) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±8.5) | (±5.3) | (±6.6) | (±0.1) | (±0.3) | (±0.4) |
| 8.50 | 0.40 | 2.90E-05 | 17.9 | 61.4 | 48.5 | 38.5 | 63.9 | 69.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 17.8 |
| 8.90 | | (±2.71E-05) | (±7.3) | (±13.6) | (±7.9) | (±1.6) | (±30.4) | (±20.4) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±1.1) |
| 8.90 | 0.60 | 1.16E-09 | 4.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.5 | 31.8 | 36.8 | 0.3 | 1.6 | 16.3 |
| 9.50 | | (±6.31E-10) | (±0.4) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.4) | (±6.4) | (±3.5) | (±0.0) | (±0.2) | (±0.7) |
| 9.50 | 1.00 | 4.00E-05 | 25.7 | 81.1 | 55.0 | 39.8 | 93.6 | 95.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.7 |
| 10.50 | | (±4.16E-05) | (±8.5) | (±17.9) | (±7.2) | (±1.2) | (±33.6) | (±28.3) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±1.0) |
| 10.50 | 0.20 | 4.07E-04 | 32.7 | 82.0 | 64.7 | 41.2 | 102.7 | 102.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.9 |
| 10.70 | | (±4.82E-04) | (±8.4) | (±11.5) | (±14.0) | (±2.2) | (±14.4) | (±14.4) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.4) |

CPT 3

| From depth To depth (m) | Thickness (m) | Permeability (m/s) | SPT _{N60} (blows/30cm) | E _v (MPa) | D _v | Friction angle | Constrained modulus, M (MPa) | Shear modulus, G _v (MPa) | Undrained strength, S _u (kPa) | Undrained strength ratio | OCR | Unit weight (kN/m ³) |
|-------------------------|---------------|--------------------|---------------------------------|----------------------|----------------|----------------|------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|--------|----------------------------------|
| 0.00 | 5.10 | 2.35E-06 | 9.0 | 27.8 | 0.0 | 0.0 | 28.9 | 56.4 | 150.2 | 3.7 | 17.1 | 18.8 |
| 5.10 | | (±1.72E-05) | (±2.5) | (±9.1) | (±0.0) | (±0.0) | (±7.3) | (±17.8) | (±35.1) | (±1.6) | (±7.6) | (±0.7) |
| 5.10 | 7.90 | 4.58E-05 | 21.7 | 80.6 | 54.5 | 39.5 | 76.6 | 90.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.7 |
| 13.00 | | (±9.27E-05) | (±10.8) | (±24.6) | (±11.6) | (±2.2) | (±45.0) | (±36.6) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±1.1) |
| 13.00 | 0.17 | 2.51E-05 | 37.4 | 115.4 | 57.9 | 40.3 | 144.6 | 144.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 19.9 |
| 13.17 | | (±3.52E-05) | (±4.3) | (±9.6) | (±6.0) | (±0.9) | (±12.0) | (±12.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.2) |

I dati soprariportati illustrano, in maniera riassuntiva, le caratteristiche geotecniche dei vari di livelli di terreno individuati. Per gli strati francamente coesivi viene indicato il solo valore della coesione non drenata, per quelli incoerenti il solo valore dell'angolo di attrito interno di picco mentre, per quelli con caratteristiche intermedie o con sottili e ripetute intercalazioni di materiali coerenti ed incoerenti vengono calcolati i valori sia dell'angolo che della coesione. In allegato sono riportati tutti i parametri desumibili dall'analisi dei dati.

La natura litologica del terreno è stata desunta indirettamente, sulla base dell'interpretazione stratigrafica di Schmertmann (1978). Come riportato nello schema grafico in allegato, i litotipi che caratterizzano l'area d'indagine sono sostanzialmente rappresentati da terreni argillosi, argillo-limosi, limosi-argillosi e sabbie limoso-argillose.

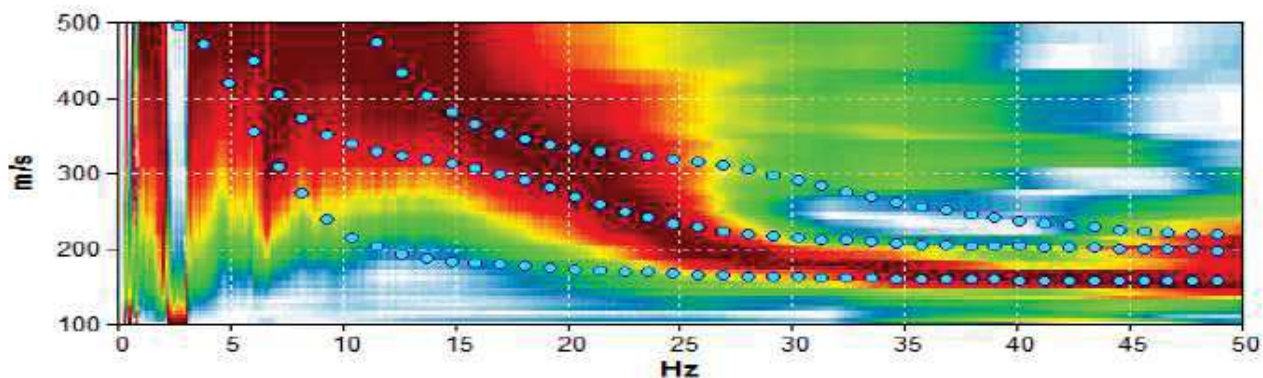
Al termine delle prove, i fori sono stati indagati con un freatimetro elettrico da campagna che ha rilevato la presenza di una falda superficiale posta alla profondità di 2,50 m dall'attuale piano campagna.

7.2. Indagine sismica e Categorie di suolo di fondazione del sito in esame

Come esposto in precedenza, le indagini sismiche eseguite hanno permesso sia di ricostruire il profilo verticale di velocità delle onde S nel sito in esame, sia di individuare la presenza di contrasti di impedenza-rigidezza nel sottosuolo medesimo. Il profilo sismico (MASW, REMI) e la relativa elaborazione ha permesso di ricostruire il modello delle velocità delle onde di taglio fino ad una profondità di circa 18-20 m dal piano campagna.

L'estensione in profondità è stata eseguita utilizzando l'analisi congiunta con le acquisizioni HVSr. La Vs30 [m/s] relativa alla quota del piano campagna è risultata pari a 306m/s

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalle indagini.

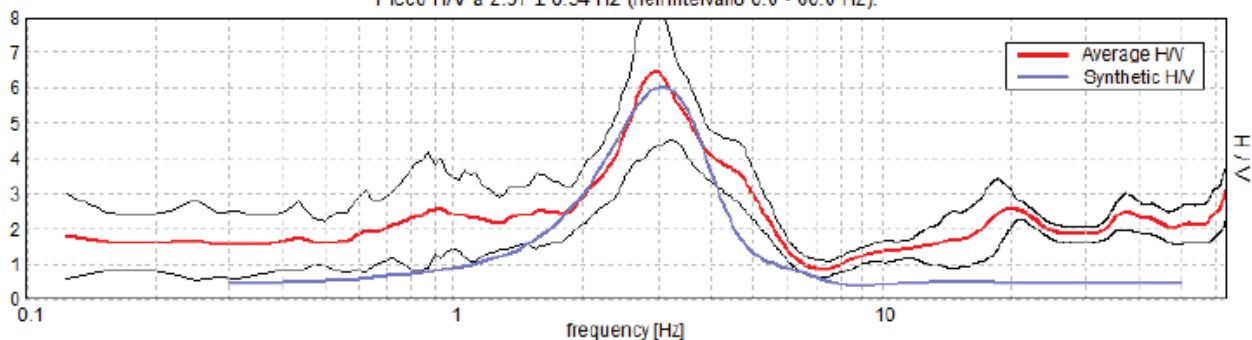


Sono stati individuati n. 5 sismostrati per come di seguito riportato:

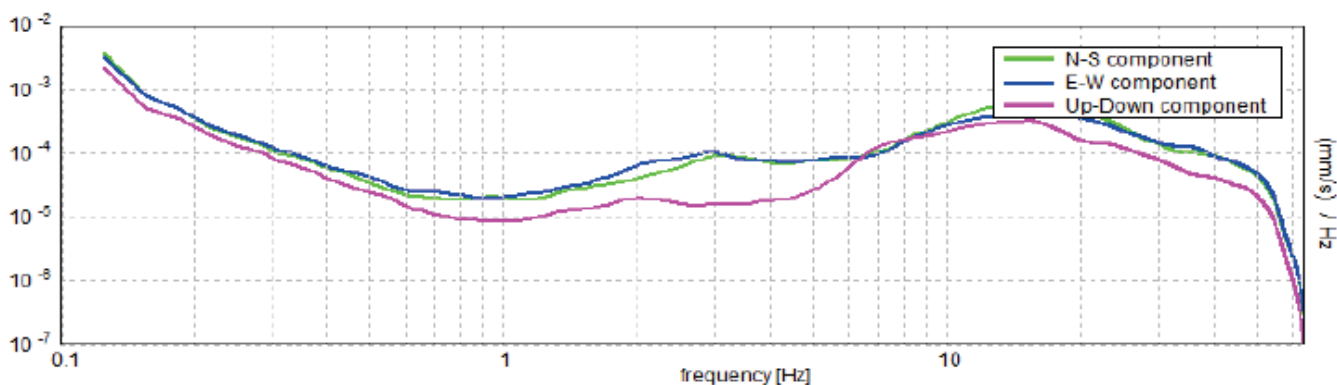
| Strato | Velocità (m/s) | Profondità (m) | Spessore (m) |
|--------|----------------|----------------|--------------|
| 1 | 165 | 3.00 | 3.00 |
| 2 | 200 | 10.00 | 7.00 |
| 3 | 350 | 30.00 | 20.00 |
| 4 | 540 | 60.00 | 30.00 |
| 5 | 560 | - | - |

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

Picco H/V a 2.97 ± 0.54 Hz (nell'intervallo 0.0 - 60.0 Hz).



SINGLE COMPONENT SPECTRA



La velocità V_{seq} risulta pari a 372 m/s e colloca il sottosuolo in classe C.

C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 metri, 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.

7.3. Pericolosità sismica di base

Le coordinate geografiche espresse in questo file sono in ED50

Sito in esame. latitudine: 43,861906 [°] longitudine: 11,140378 [°]

Classe d'uso: II. Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Vita nominale: 50 [anni]

Tipo di interpolazione: Media ponderata

Siti di riferimento.

| | ID | Latitudine (°) | Longitudine (°) | Distanza (m) |
|--------|-------|----------------|-----------------|--------------|
| Sito 1 | 19613 | 43,8612 | 11,1327 | 618,030 |
| Sito 2 | 19614 | 43,8626 | 11,2020 | 4937,763 |
| Sito 3 | 19392 | 43,9126 | 11,2001 | 7393,680 |
| Sito 4 | 19391 | 43,9112 | 11,1308 | 5535,284 |

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 50anni

Coefficiente c_u : 1

| | Probabilità di superamento: | Tr (anni) | ag (g) | Fo | Tc* (s) |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------|--------|-------|---------|
| Operatività (SLO) | 81 | 30 | 0.050 | 2.529 | 0.251 |
| Danno (SLD) | 63 | 50 | 0.060 | 2.561 | 0.268 |
| Salvaguardia della vita (SLV) | 10 | 475 | 0.138 | 2.451 | 0.302 |
| Prevenzione dal collasso (SLC) | 5 | 975 | 0.179 | 2.397 | 0.312 |

| | ag (g) | Fo | Tc* (s) | Ss | Cc | St | kh | kv | Amax | Beta |
|-----|-----------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SLO | 0.050 | 2.529 | 0.251 | 1.500 | 1.660 | 1.000 | 0.015 | 0.007 | 0.729 | 0.200 |
| SLD | 0.060 | 2.561 | 0.268 | 1.500 | 1.620 | 1.000 | 0.018 | 0.009 | 0.881 | 0.200 |
| SLV | 0.138 | 2.451 | 0.302 | 1.500 | 1.560 | 1.000 | 0.050 | 0.025 | 2.035 | 0.240 |
| SLC | 0.179 | 2.397 | 0.312 | 1.440 | 1.540 | 1.000 | 0.062 | 0.031 | 2.553 | 0.240 |

7.4. **Modello geotecnico**

In base alle indagini geognostiche eseguite è possibile definire il modello geologico del sottosuolo in esame:

| Litologia | profondità | |
|---|------------|------------|
| | da (m) | a (m) |
| Orizzonte A - Argille | 0.00 | 5.10/6.10 |
| Orizzonte B – Limo-sabbioso/sabbia-limosa | 5.10/6.10 | 7.65/13.15 |
| Orizzonti C e C1 - Sabbie limose e ghiaie | 7.65/13.15 | |

In base ai dati ricavati dalle analisi di laboratorio geotecnico e dall'elaborazione delle prove penetrometriche statiche, possono essere ipotizzati i seguenti parametri geotecnici:

| Litologia | profondità | | γ (kN/m ³) | c' (kPa) | ϕ (°) | Cu (kPa) |
|---|------------|------------|----------------------------------|-------------|---------------|-------------|
| | da (m) | a (m) | | | | |
| Orizzonte A - Argille | 0.00 | 5.10/6.10 | 18.5 | - | 24.00 | 50 |
| Orizzonte B – Limo-sabbioso/sabbia-limosa | 5.10/6.10 | 7.65/13.15 | 19.00 | - | 28.00 | - |
| Orizzonti C e C1 - Sabbie limose e ghiaie | 7.65/13.15 | | 20.00 | - | 30.00 | - |

Il sottosuolo è caratterizzato dalla presenza di acqua sotterranea il cui livello, rispetto all'attuale piano campagna, è posto ad una profondità di – 2.50 m, che in base alla conformazione stratigrafia del sottosuolo si può ipotizzare come afferente ad una falda superficiale che si sviluppa nei depositi alluvionali.

8. CONCLUSIONI

Su incarico della società Nigro&C Costuzioni è stato condotto uno studio di fattibilità geologica, idraulica e sismica, eseguita ai sensi del D.P.G.R. n.5/R del 30/01/2020, finalizzata alla Richiesta di Variante Urbanistica Semplificata al Piano Operativo Comunale ai sensi degli artt. 30 e 32 della L.R.T. 65/2014 per la realizzazione di una media struttura di vendita alimentare in un'area del Comune di Prato, loc.tà La Querce, posta tra Via Amerigo Bresci e Via Firenze e la ricollocazione di spazi e servizi pubblici da cui non sono emerse particolari criticità per la realizzazione degli interventi in progetto.

A supporto della progettazione esecutiva, dovrà essere eseguita un'attenta verifica delle caratteristiche geomeccaniche del substrato di fondazione, come, del resto, stabiliscono già le nuove norme tecniche per le costruzioni. Le nuove indagini geognostiche da svolgere in sede esecutiva ad integrazione di quelle già realizzate, in riferimento al D.P.G.R.n.36/R/09 che classifica l'intervento in classe 4 di indagine, dovranno consistere in un numero sufficiente di sondaggi geognostici, prove in situ e prelievo di campioni necessari per la caratterizzazione geomeccanica dei terreni di fondazione, oltre ad una indagine geofisica in foro finalizzata a verificare le qualità geofisiche del sito in esame e validare lo scenario di pericolosità definito dalle indagini geofisiche già realizzate.

Marzo, 2023

Il Geologo

Dott. Geol. Salvatore Frontera



ALLEGATI

Allegato 1: Estratto CTR – scala 1:5.000

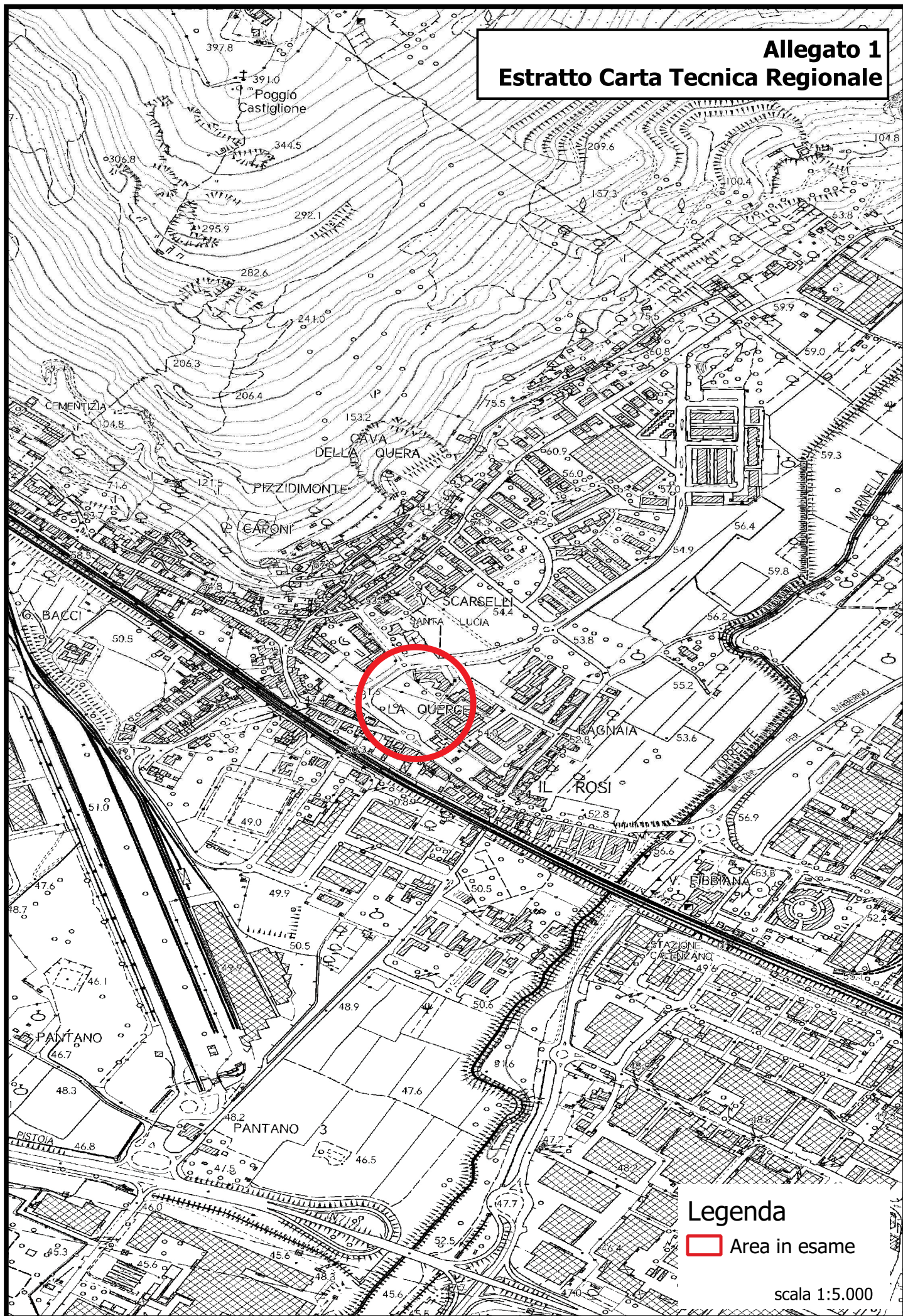
Allegato 2: Estratto Ortofoto – scala 1:5.000

Allegato 3 : Planimetria con ubicazione indagini – scala 1:1.000

Allegato 4: Estratto Carta Geologica – scala 1:5.000

Allegato 5: Indagine sismica e CPT

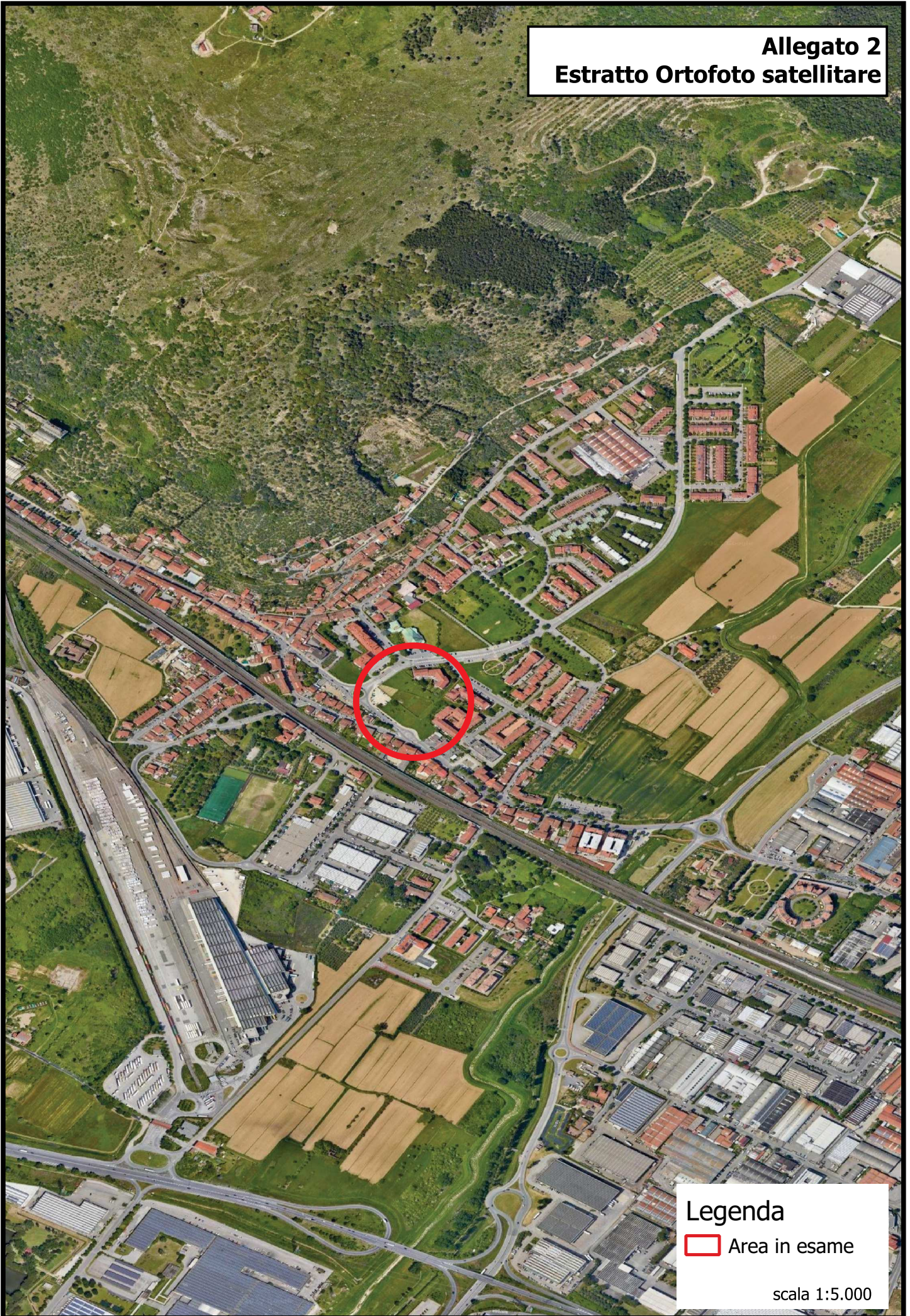
Allegato 1
Estratto Carta Tecnica Regionale




Legenda
□ Area in esame

scala 1:5.000

Allegato 2
Estratto Ortofoto satellitare



Legenda

 Area in esame

scala 1:5.000

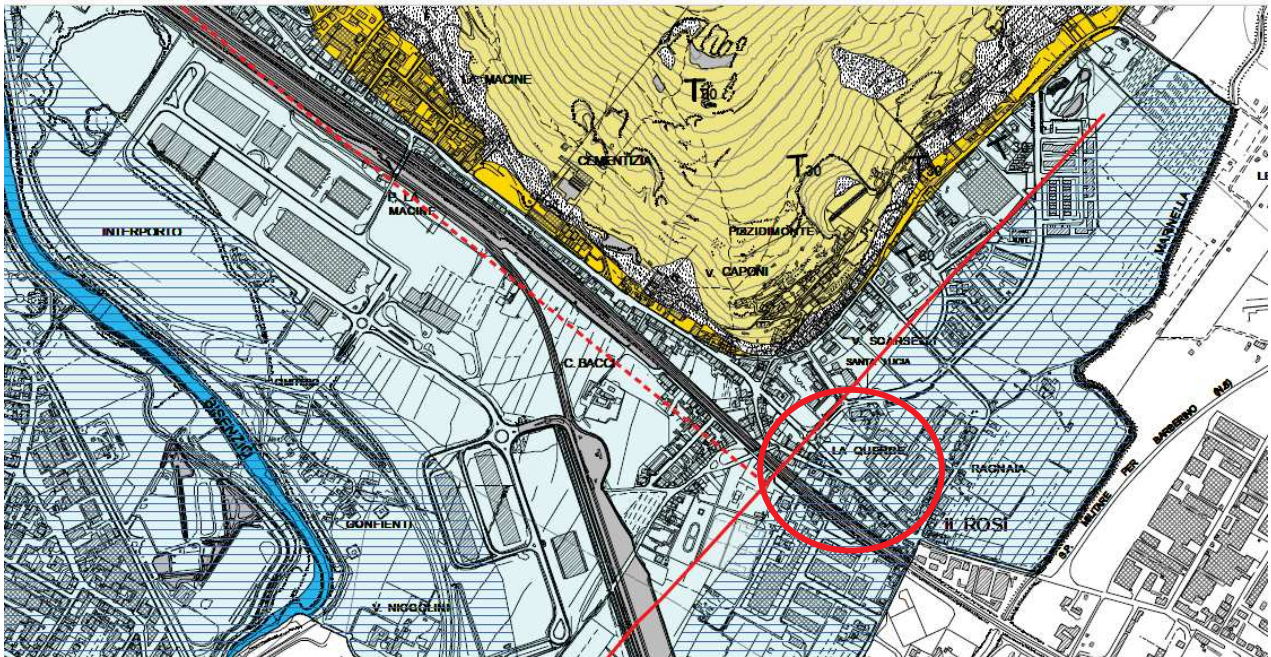
Allegato 3 Planimetria ubicazione indagini



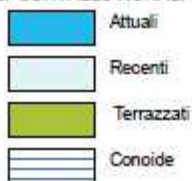
Legenda

- ▲ HVSR
- ▬▬▬ Stendimento sismico
- ◆ CPT

scala 1:500



DEPOSITI ALLUVIONALI

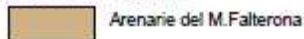


DEPOSITI DI ACCUMULO



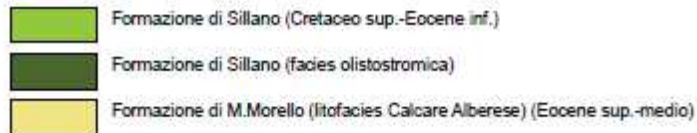
UNITA' TETTONICHE TOSCANE

Unità Cervarola Falterona

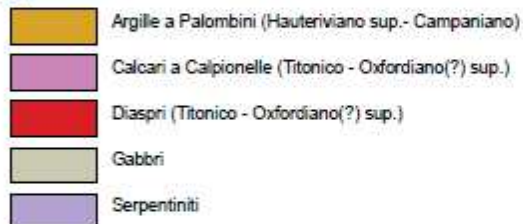


UNITA' TETTONICHE LIGURI

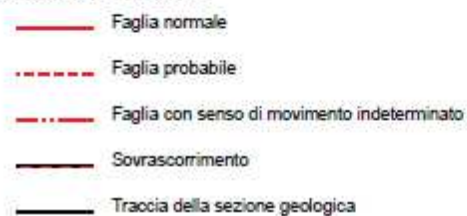
Unità tettonica Morello




Ofioli



LINEAZIONI TETTONICHE



 Area in esame



Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

R1_23_006B_REV00

pag. 1 di 13



INDAGINI GEOTECNICHE E GEOFISICHE ESEGUITE A PRATO IN LOCALITA' LA QUERCIA



Committente:





Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

R1_23_006B_REV00

pag. 2 di 13

SOMMARIO

| | | |
|------|---|----|
| 1. | IDENTIFICAZIONE DOCUMENTO | 3 |
| 2. | NORMATIVA DI RIFERIMENTO | 4 |
| 3. | PREMESSE | 5 |
| 4. | PROVE PENETROMETRICHE STATICHE | 7 |
| 5. | INDAGINI GEOFISICHE | 10 |
| 5.1. | PROFILO SISMICO IN ARRAY CON TECNICA MASW | 10 |
| 5.2. | PROFILO SISMICO IN ARRAY CON TECNICA REMI | 10 |
| 5.3. | RISULTATI E ANALISI DEI DATI OTTENUTI | 11 |



Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

R1_23_006B_REV00

pag. 3 di 13

1. identificazione documento

Identificazione.

Il presente lavoro viene identificato per mezzo del seguente codice R1_23_006b

Redazione del documento.

Il presente documento è stato redatto dal Dott. Geol. Rocco Carbonella in data 18/02/2023

Composizione del documento.

Il presente documento è formato da n° 13 pagine e n° 44 pagine allegate





Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

R1_23_006B_REV00

pag. 4 di 13

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- UNI EN ISO 22476-12:2009
- UNI EN ISO 22476-2:2012
- UNI EN ISO 22476-1:2012
- RACCOMANDAZIONI AGI 1994
- Eurocodice 7.2 (2002)
- Progettazione geotecnica – Parte II :Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002).UNI
- Eurocodice 7.3 (2002)
- Progettazione geotecnica – Parte II :Progettazione assistita con prove in sito (2002).UNI
- Eurocodice 8 (1998)
- Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture
- Parte 5:Fondazioni,strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003)
- Eurocodice 7.1 (1997)
- Progettazione geotecnica – Parte I :Regole Generali .-UNI





Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

R1_23_006B_REV00

pag. 5 di 13

3. Premesse

Su incarico della committenza, in data 16/02/2023, sono state eseguite le seguenti geotecniche:

- N° 3 prove penetrometriche statiche a punta elettrica e piezocono
- Profilo sismico masw
- Lettura a stazione singola HVSR

Nelle figura seguente è indicata l'area in esame.



Figura 1 – Ubicazione dei luoghi



Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

R1_23_006B_REV00

pag. 6 di 13

Nella figura seguente è riportata l'ubicazione schematica delle indagini eseguite

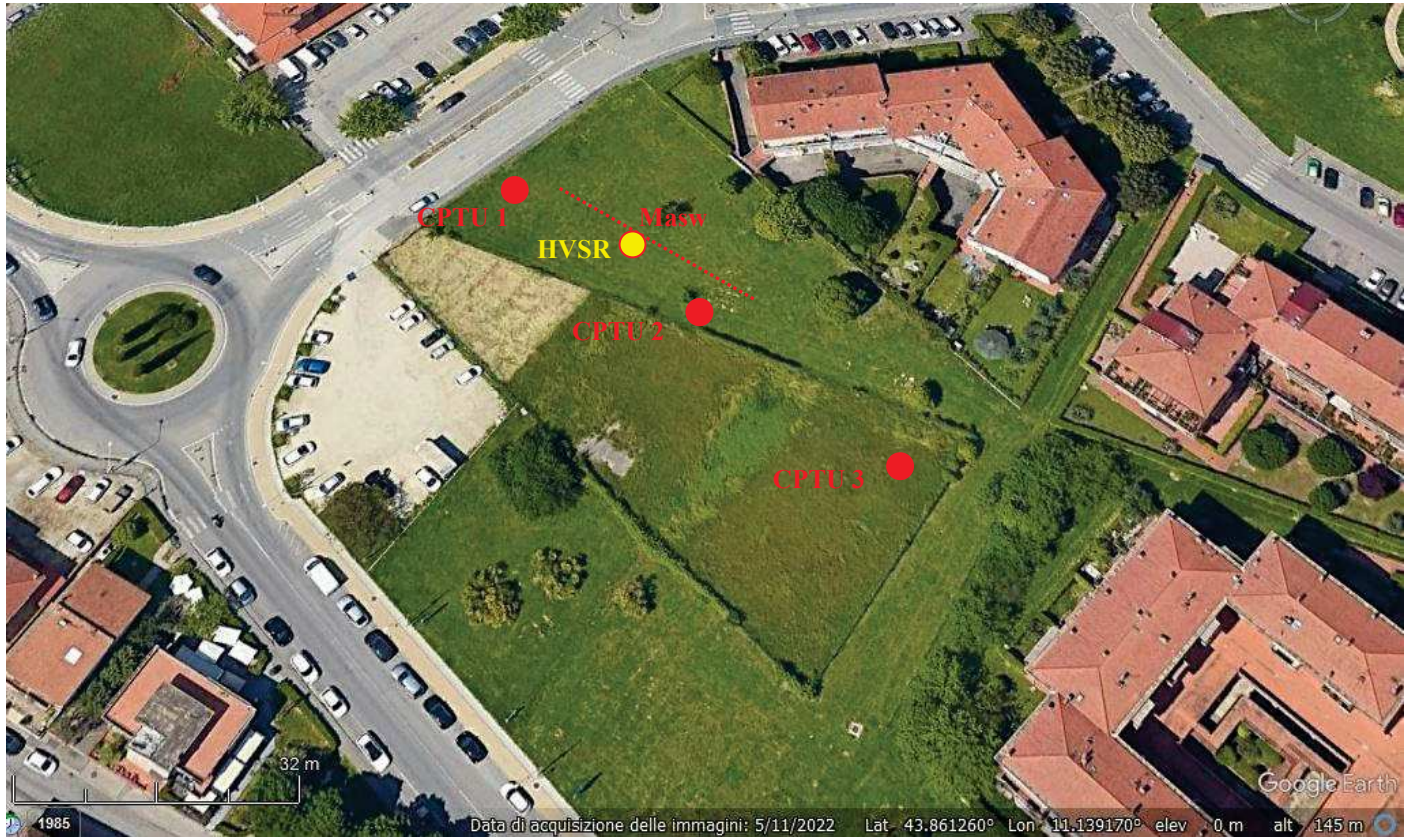


Figura 2 – Ubicazione schematica delle indagini



Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

R1_23_006B_REV00

pag. 7 di 13

4. PROVE PENETROMETRICHE STATICHE

Come accennato nelle premesse, nel sito in esame, sono state eseguite tre prove penetrometriche statiche di cui due con punta elettrica e piezocono e l'altra con punta Begemann . In particolare sono state realizzate le seguenti attività:

- trasporto attrezzature
- n° 3 piazzamenti sulle verticali d'indagini
- prove penetrometriche statiche per un totale di circa 32 m di perforazione

Le attività sono state eseguite mediante l'impiego di un penetrometro statico da 200 kN PAGANI TG63-200. La prova penetrometrica statica CPTU consiste essenzialmente nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta meccanica di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante (2 cm/sec). Durante l'infissione vengono misurate le seguenti grandezze:

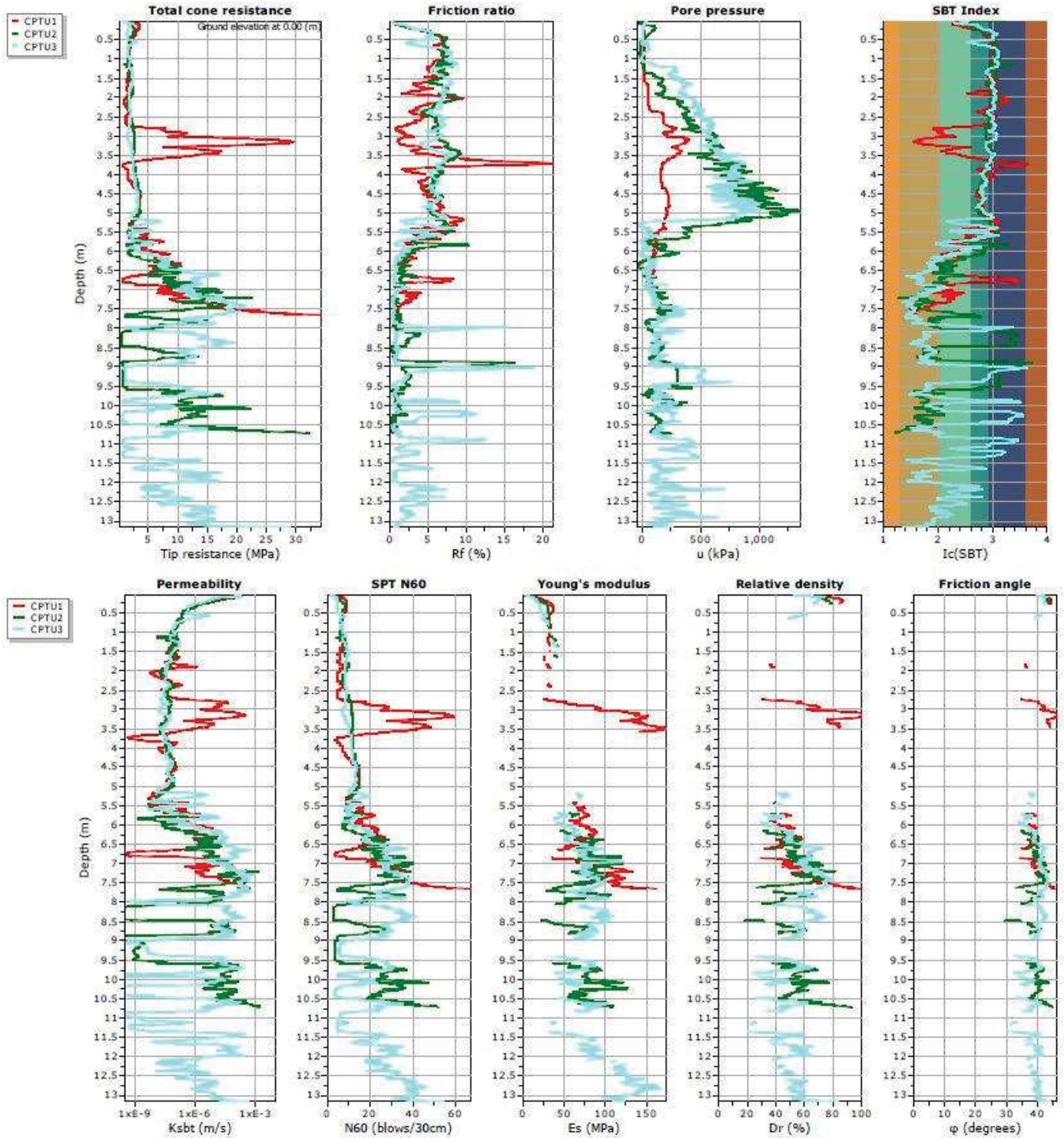
- Q_c (resistenza di punta)
- F_s (attrito laterale)
- U (pressione interstiziale)

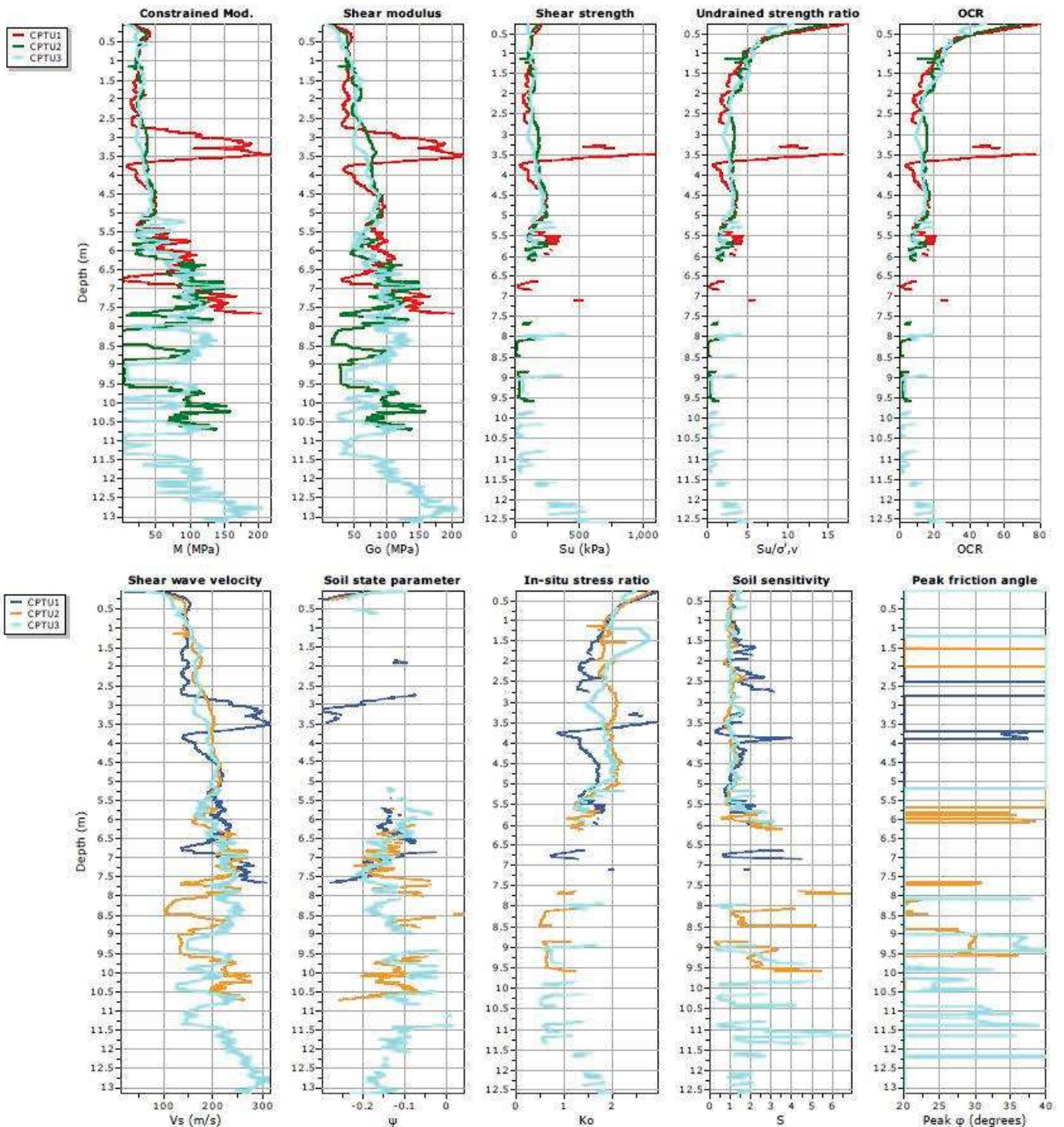


Figura 3 – Documentazione fotografica



Di seguito le prove eseguite ed alcuni parametri geotecnici desunti dalle stesse:





Al termine delle prove i fori sono stati indagati con un freatometro che ha evidenziato la presenza di acqua ad una profondità di circa 2.5 m dal piano campagna.





Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

R1_23_006B_REV00

pag. 10 di 13

5. INDAGINI GEOFISICHE

Nel presente capitolo, dopo una breve descrizione della tipologia d'indagine, verranno presentati i risultati ottenuti.

Per determinare gli effetti di sito e la risposta sismica locale sono state realizzate le seguenti indagini:

- N° 1 profili sismici in array con tecnica MASW e REMI eseguito con sismografo digitale a 24 bit- Soil Spy Rosina
- N. 1 misure a stazione singola mediante tromografo digitale modello Tromino con tecnica HVSR.

Si illustrano di seguito in modo sintetico le metodologie d'indagine utilizzate.

5.1. PROFILO SISMICO IN ARRAY CON TECNICA MASW

Il metodo MASW è classificabile come tecnica di indagine sismica simile alla sismica a rifrazione e alla sismica a riflessione, perché il principio alla base della prova sperimentale in sito è analogo e consiste nel misurare le onde superficiali sul suolo. La Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) è un metodo d'indagine mediante il quale è possibile costruire un profilo di velocità delle onde di taglio (V_s) in relazione alla profondità, sulla base della misura delle onde superficiali. Il contributo predominante di quest'ultime è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano ad una velocità correlata alla rigidità del terreno interessato dalla propagazione. Nei terreni stratificati, le onde di Rayleigh sono dispersive e si propagano con diverse velocità di fase e di gruppo. La natura dispersiva è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza (lunghezza d'onda corta) si propagano negli strati superficiali, mentre onde a bassa frequenza si propagano in strati profondi. La ricerca del profilo di velocità delle onde di taglio V_s con il metodo MASW consiste nel modificare il profilo di velocità V_s finché non sia raggiunto un buon accordo tra la curva di dispersione (o velocità di fase) apparente, misurata in sito, e la curva di dispersione (o velocità di fase) apparente simulata numericamente.



Figura 4. Sismografo multicanale utilizzato per l'indagine geofisica

5.2. PROFILO SISMICO IN ARRAY CON TECNICA REMI

Il metodo HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) proposto da Nogoshi e Igarashi (1970) e successivamente modificato da Nakamura (1989), si basa sull'analisi del rapporto spettrale tra le componenti orizzontale (H) e verticale (V) del rumore sismico registrato in un sito. Il rumore sismico è presente ovunque ed è generato sia da fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) che dall'attività antropica. Il rumore sismico è indicato spesso come microtremore poiché è caratterizzato da oscillazioni molto deboli (dell'ordine dei $\mu\text{m/s}$). I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma soprattutto da onde superficiali, la cui velocità è comunque prossima a quella delle onde S (Mulargia et al., 2007). La tecnica di misura del rumore sismico richiede tempi di registrazione pari a 15-20 minuti e necessita di sensori tridirezionali da sismologia



Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

R1_23_006B_REV00

pag. 11 di 13

con messa in bolla, digitalizzatore 24 bit con elevata dinamica, elevato guadagno ed elevata frequenza di campionamento nativo, con minimizzazione del rumore elettro/meccanico. L'acquisizione è stata eseguita utilizzando un tromografo digitale, "TROMINO" (Micromed S.p.A.) dotato di 3 canali velocimetrici (N-S, E-W, Up-Down) ad alto guadagno per l'acquisizione del microtremore sismico ambientale (fino a ~1.5 mm/s); il sistema opera nell'intervallo di frequenze 0.1–1024 Hz. È stata acquisita una misura di rumore sismico per un tempo di registrazione in genere compreso tra 10 e 20 minuti. La misura è stata poi ripetuta per controllo. L'elaborazione dei dati di rumore sismico acquisiti è avvenuta mediante software Grilla (Micromed S.p.A.).



Figura 5. Tromografo utilizzato per l'indagine geofisica HVSR.

5.3. RISULTATI E ANALISI DEI DATI OTTENUTI

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalle indagini:

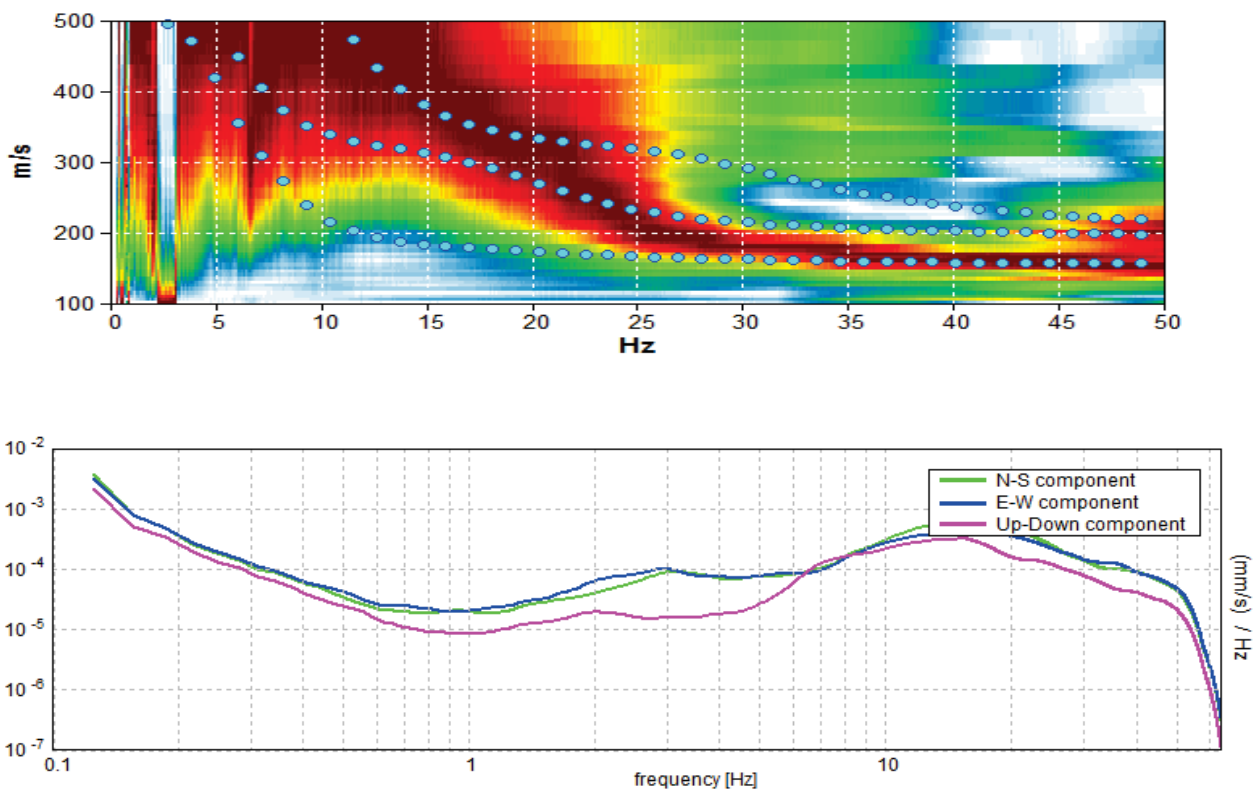
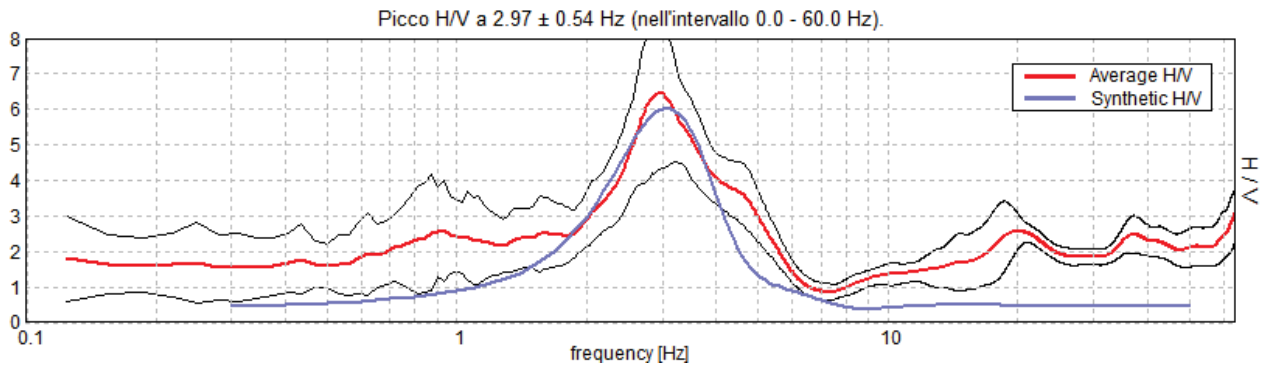


Figura 6 – Spettro dell'indagine MASW e REMI E traccia del profilo HVSR acquisito





Sulla base dei dati ricavati dalle sopraccitate indagini di campagna è stato redatto il seguente modello del profilo verticale di velocità delle onde di taglio S:



| Depth at the bottom of the | Thickness [m] | Vs [m/s] |
|----------------------------|---------------|----------|
| 3.00 | 3.00 | 165 |
| 10.00 | 7.00 | 200 |
| 30.00 | 20.00 | 350 |
| 60.00 | 30.00 | 540 |
| inf. | inf. | 560 |

$V_s(0.0-30.0)=272\text{m/s}$



Figura 7 - Documentazione fotografica



Dott. Rocco Carbonella
Via Toscana 119, 40141 Bologna
CLL 393 8376620
mail: rocco.carbonella@fastwebnet.it

FORM: RDR_DQ_01

COD. DOC.

RDR_19_RIN_REV01

REPORT INDAGINI

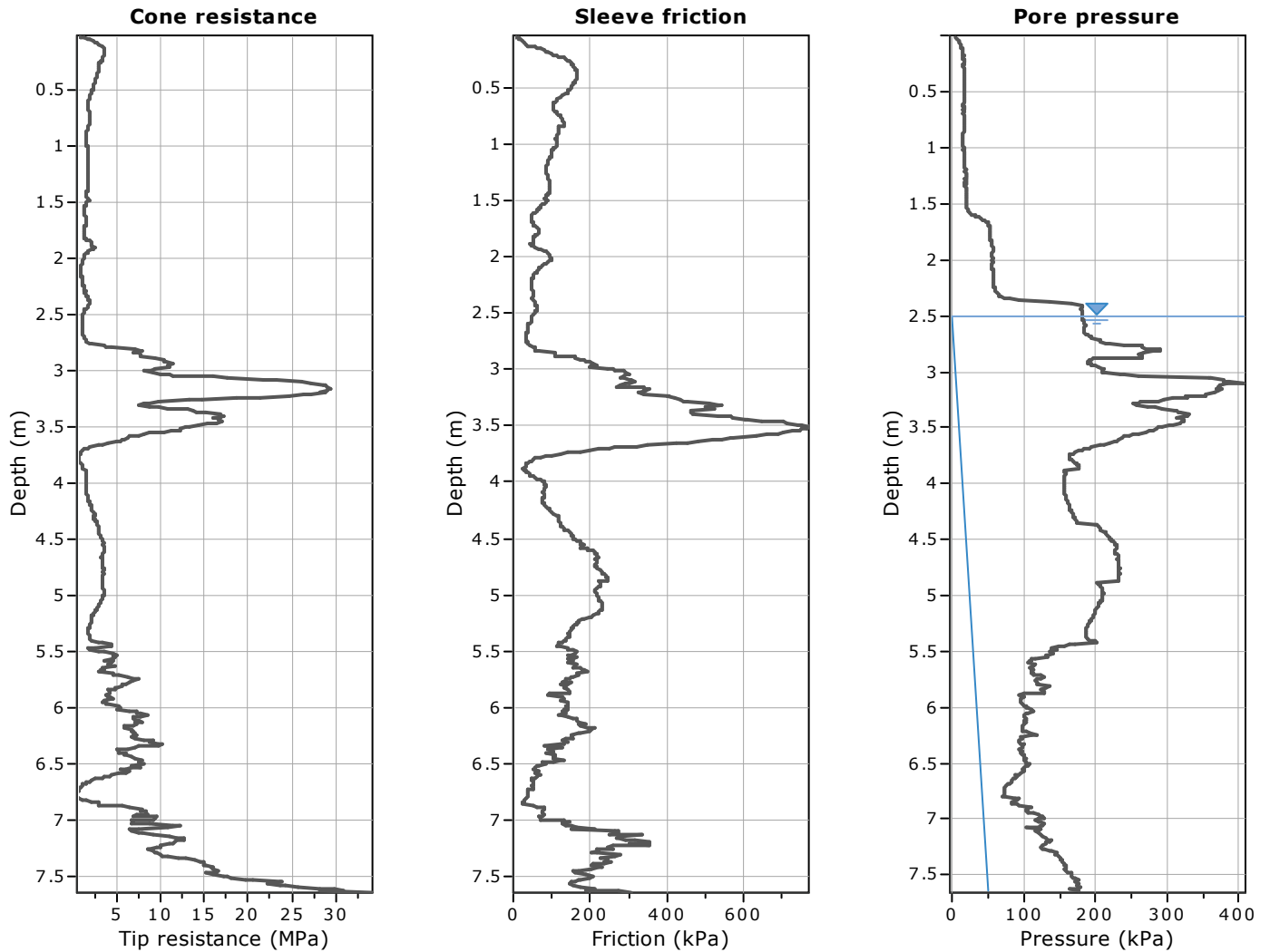
R1_23_006B_REV00

pag. 13 di 13

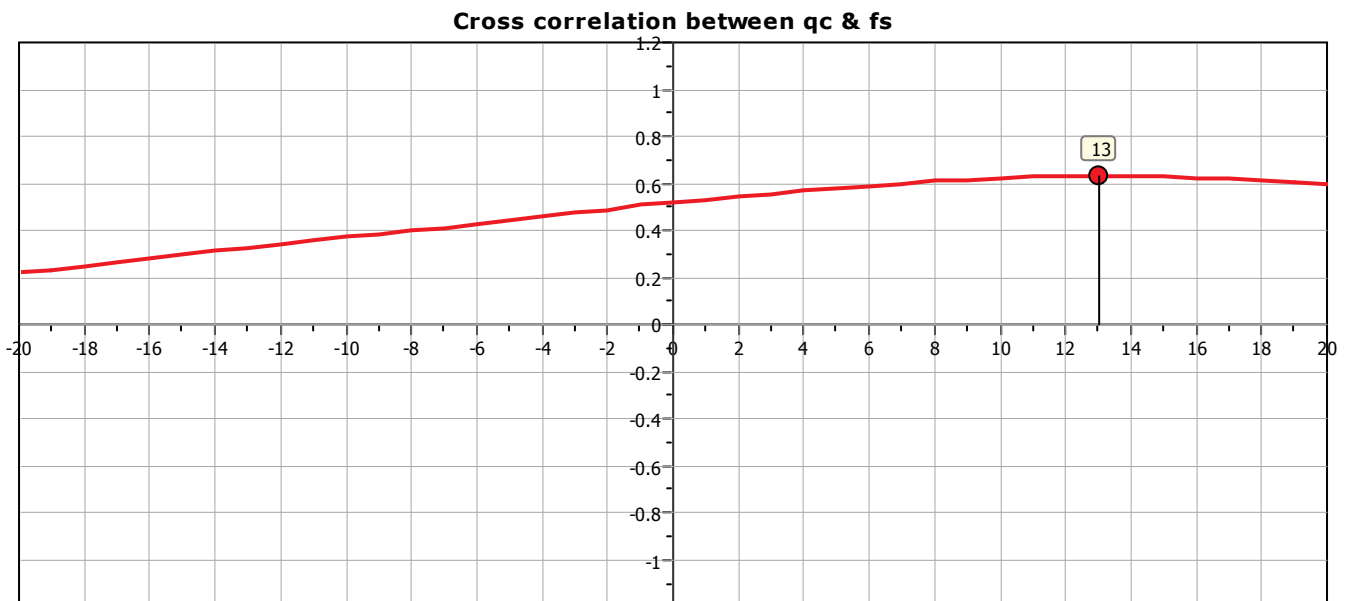
ALLEGATI

- Report prove penetrometriche statiche a punta elettrica (n° pagine 44)



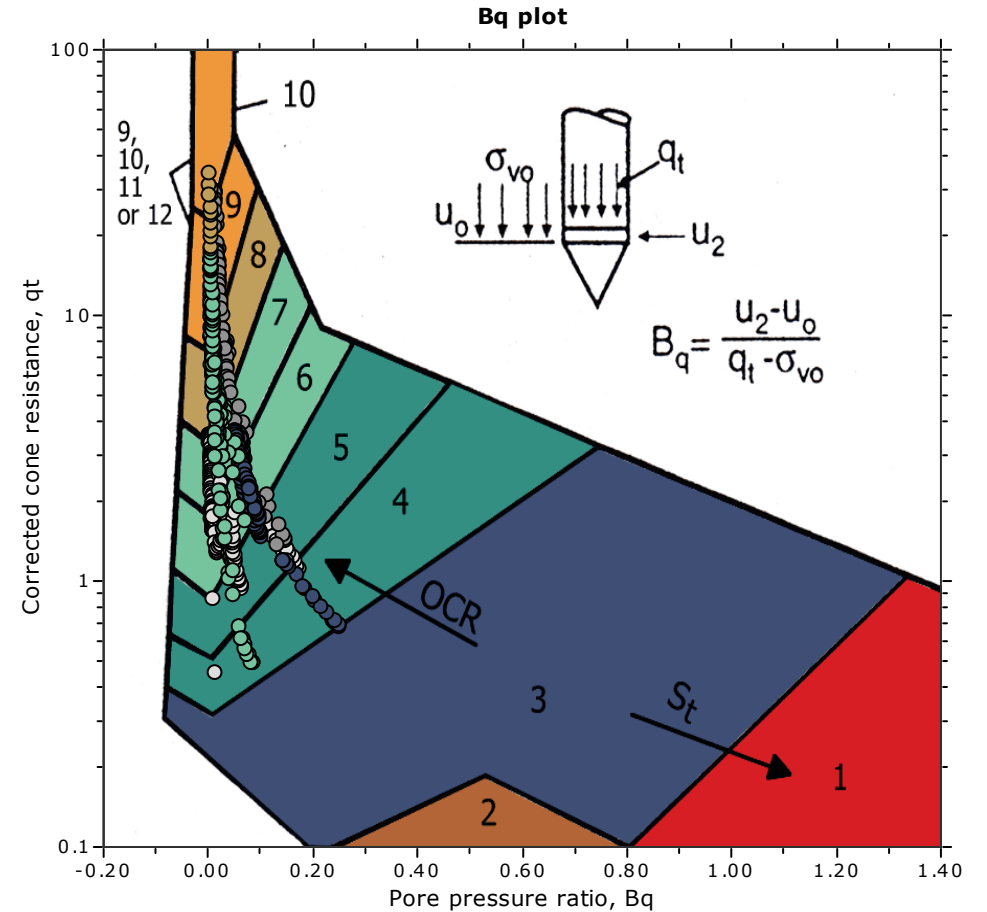
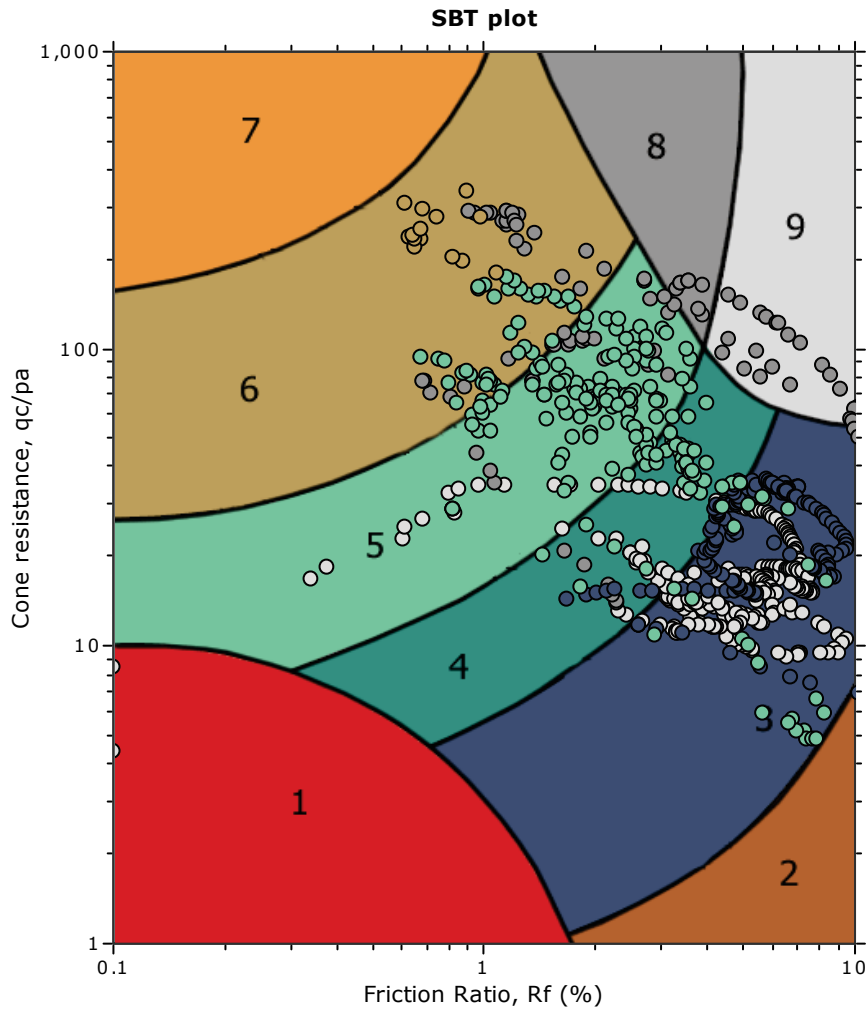


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).





SBT - Bq plots

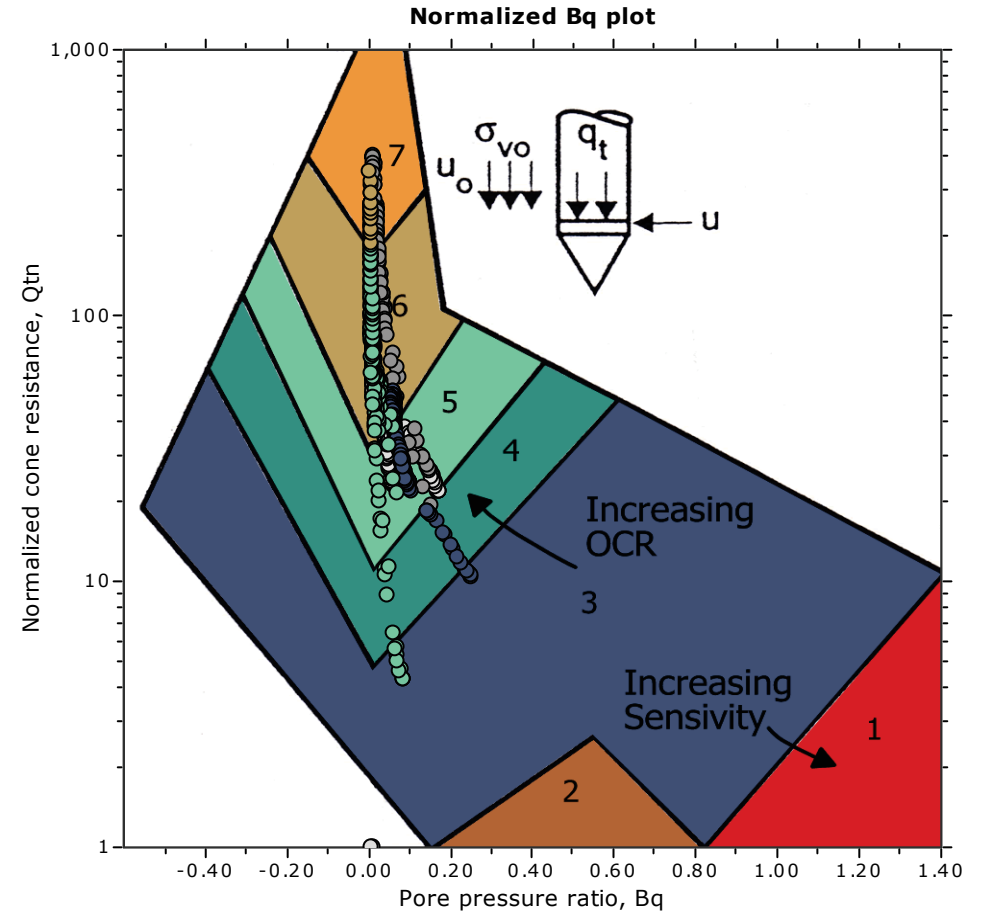
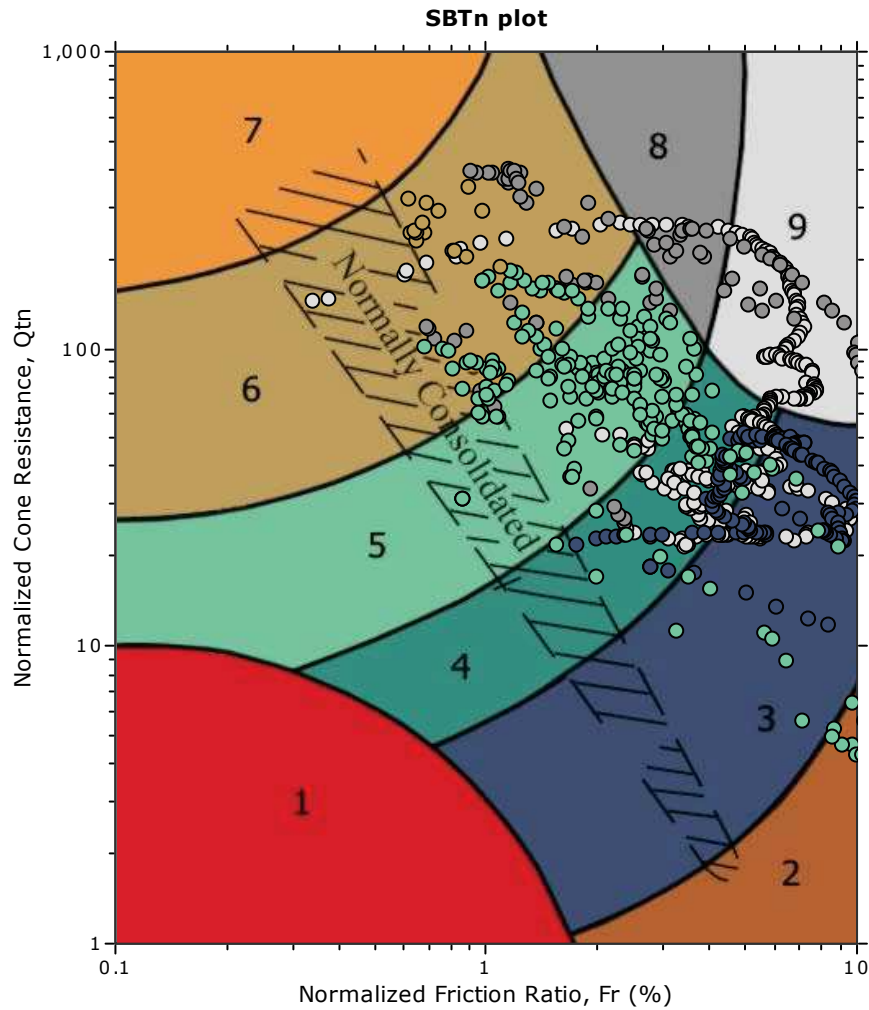


SBT legend

- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 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 |



SBT - Bq plots (normalized)

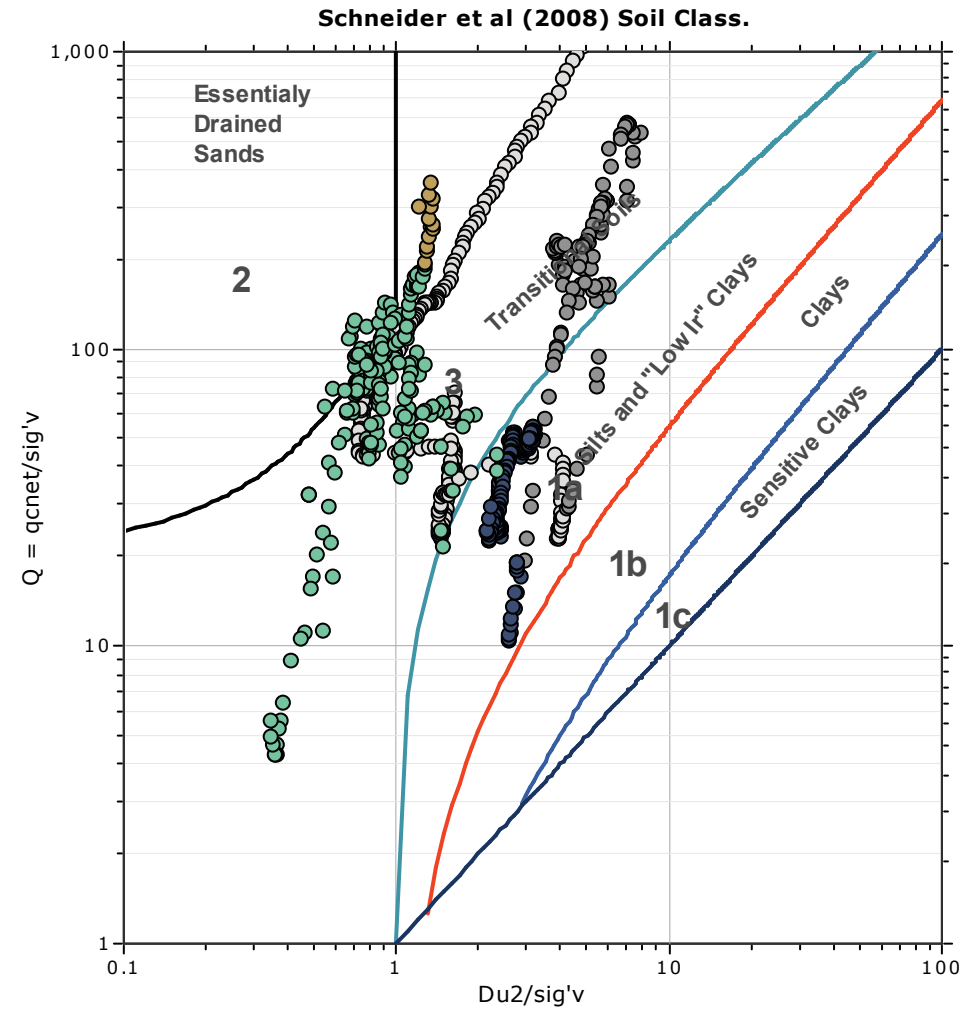
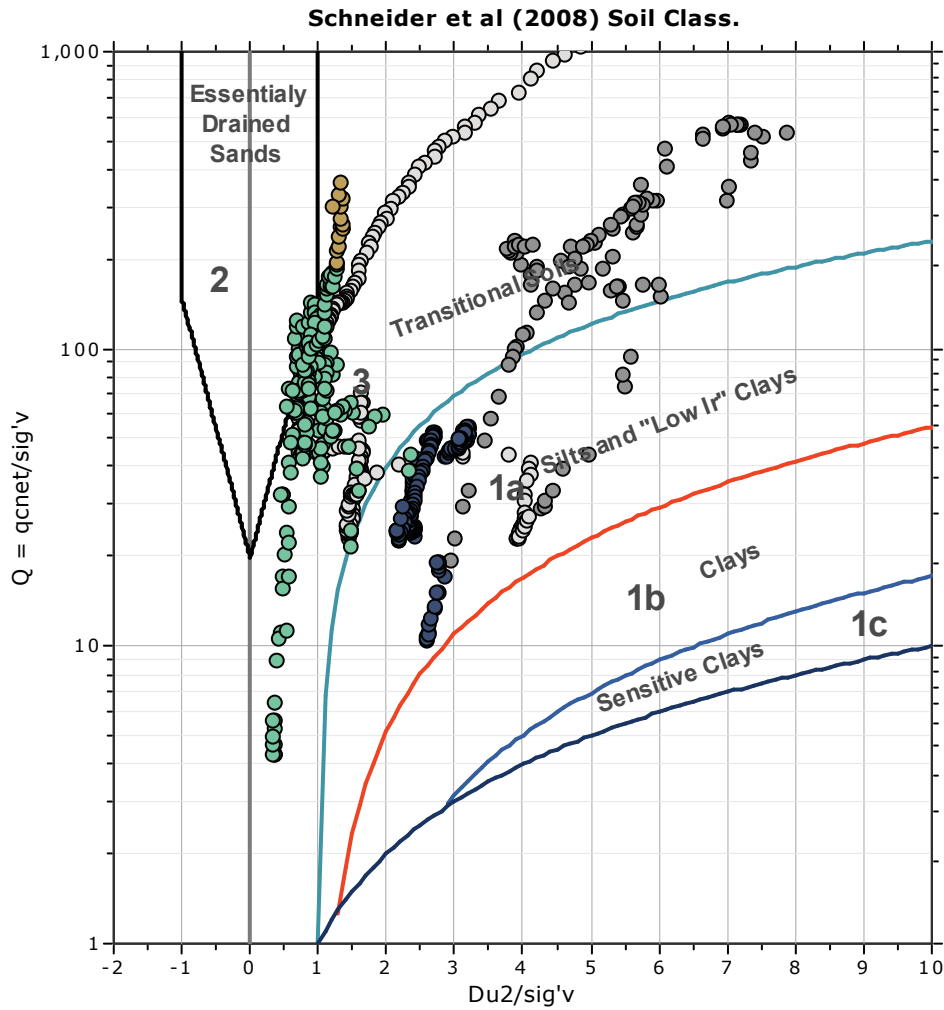


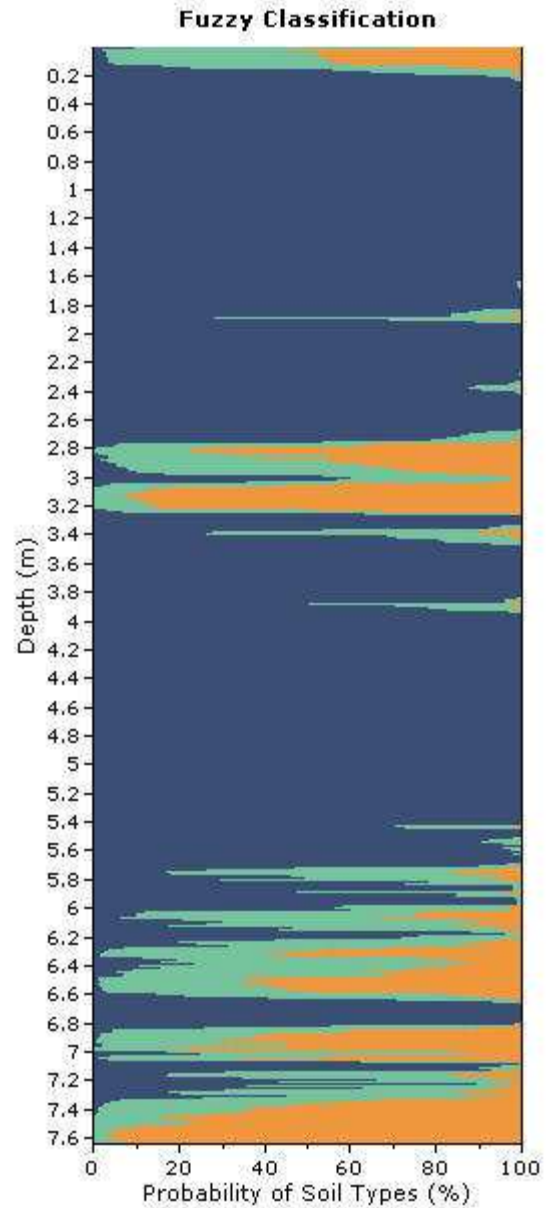
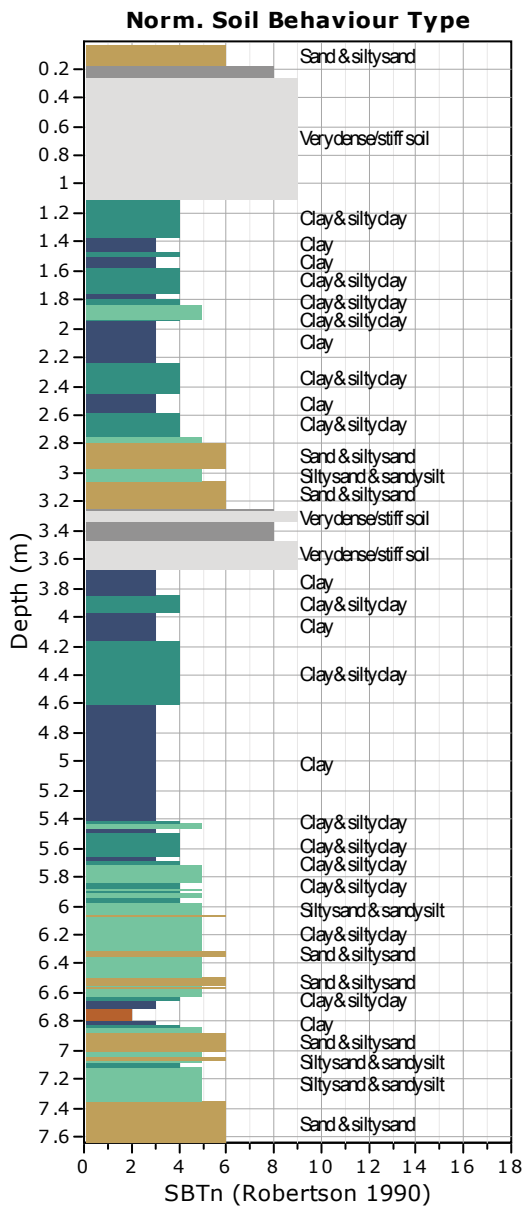
SBTn legend

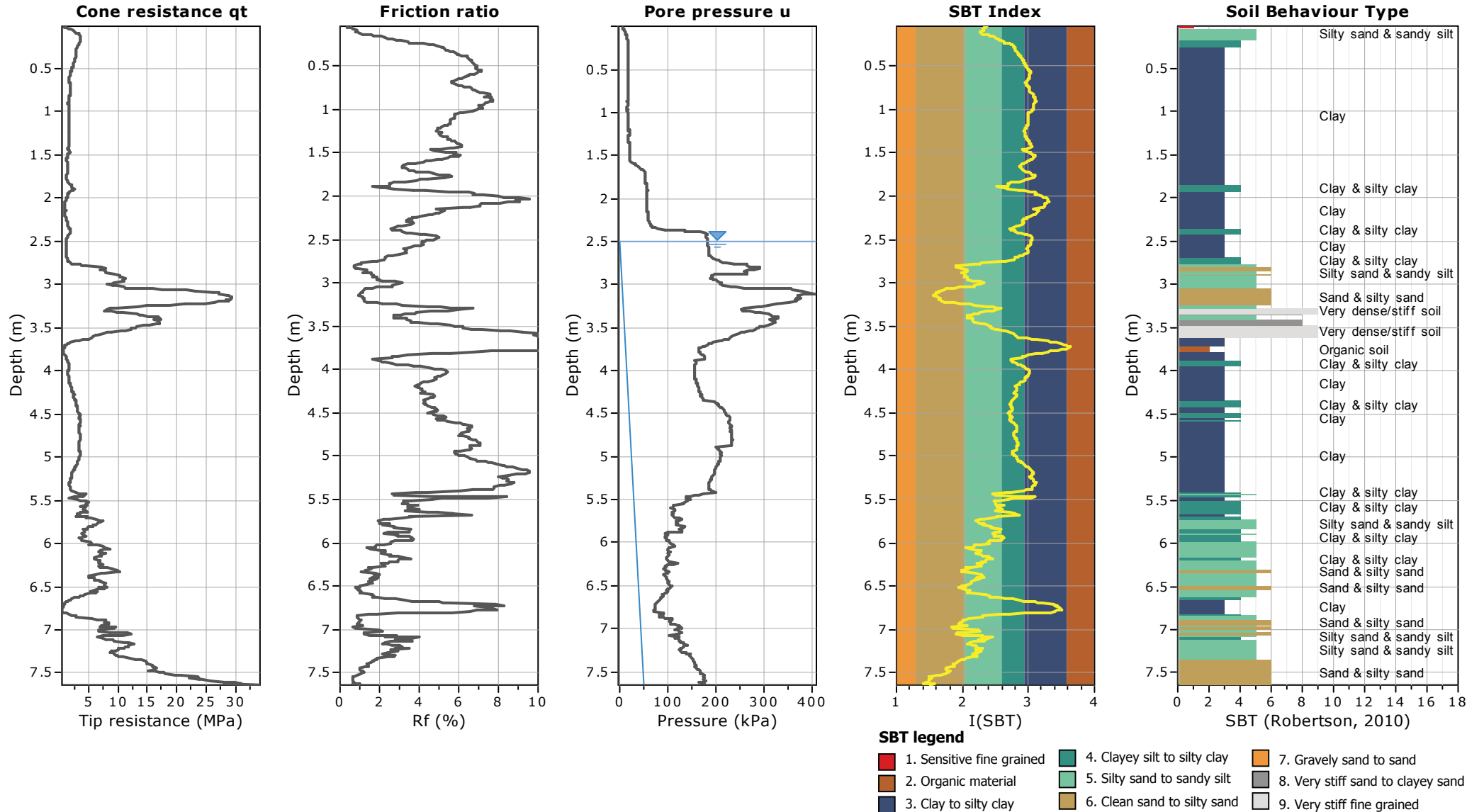
- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained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

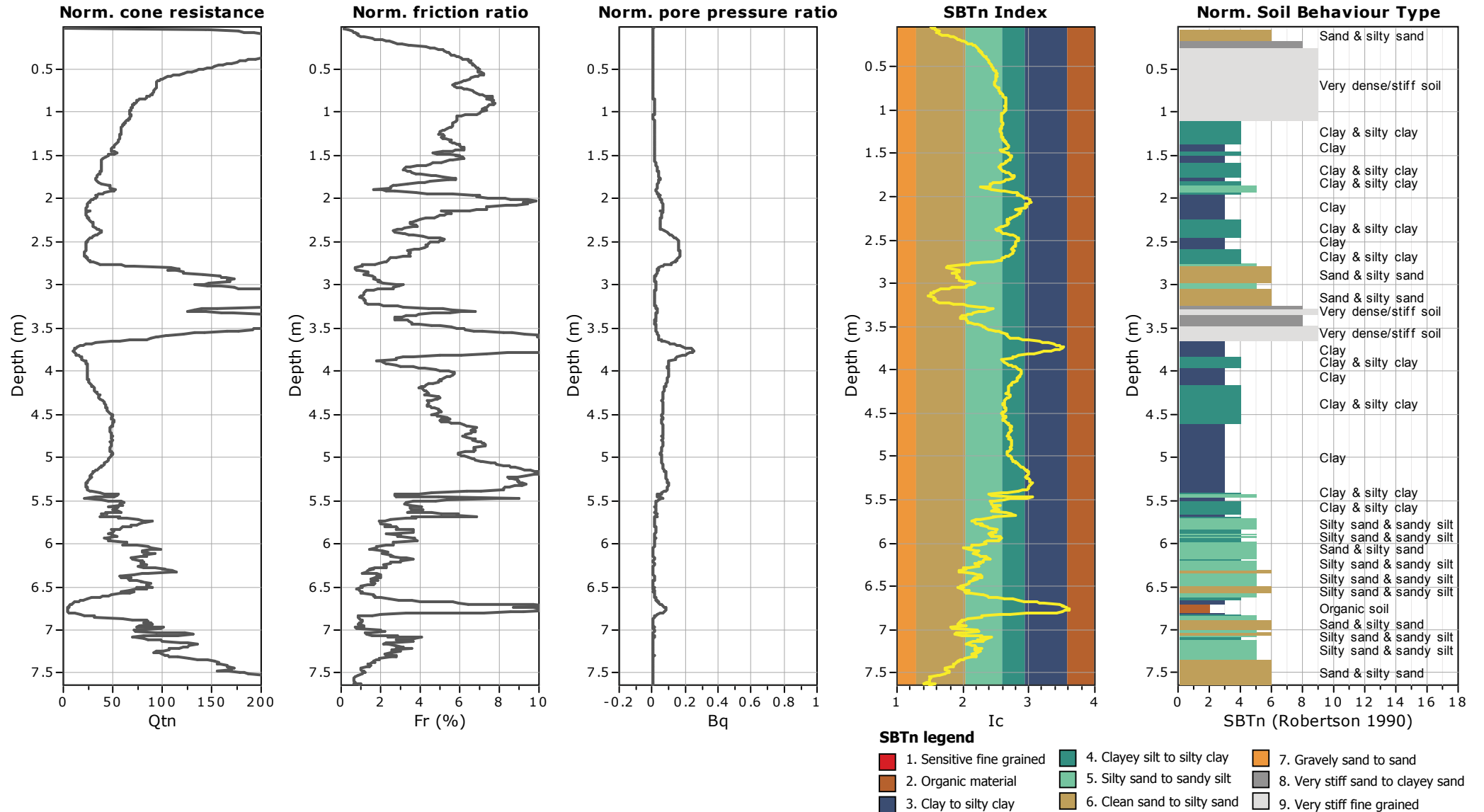


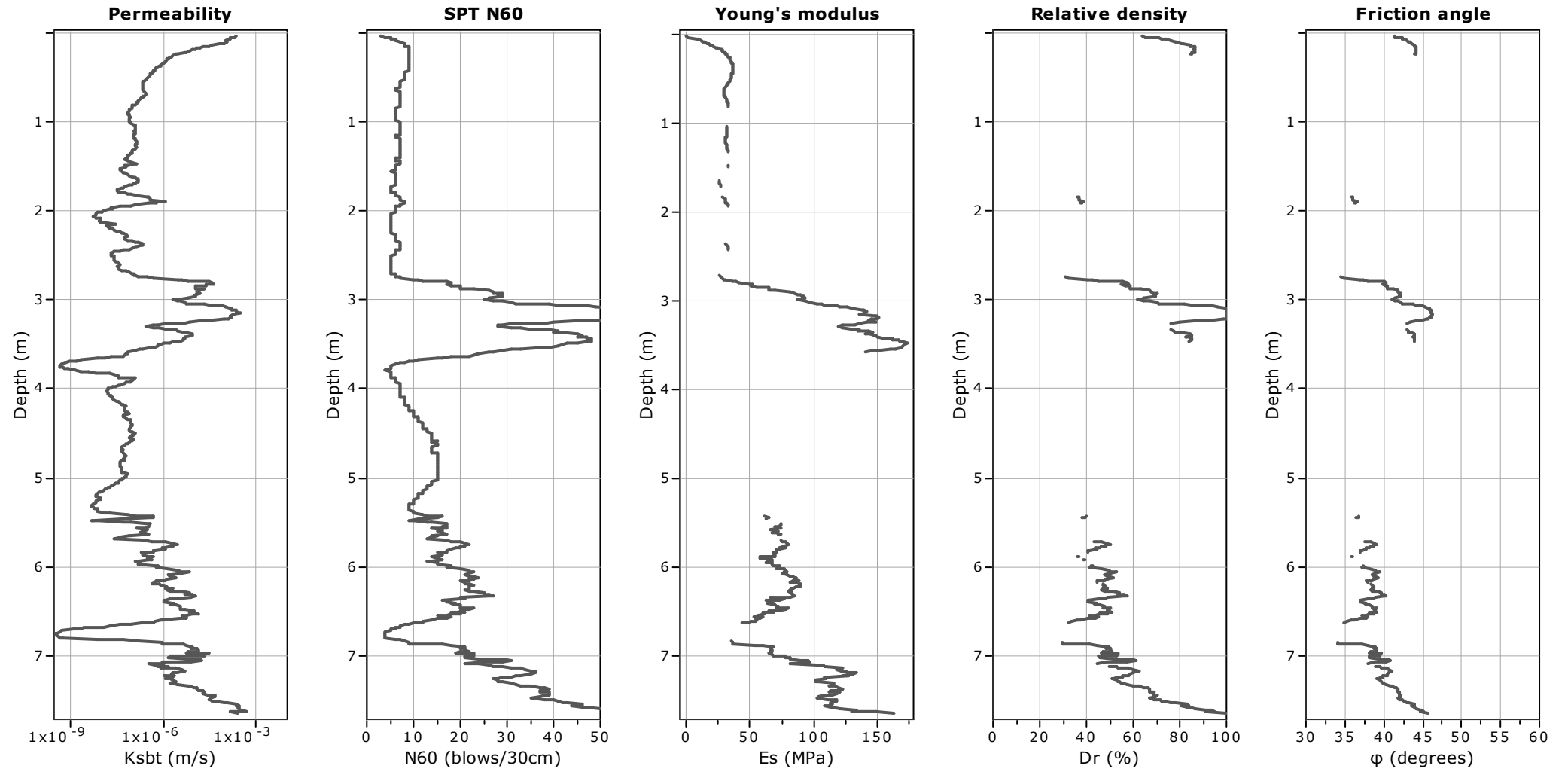
Bq plots (Schneider)











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

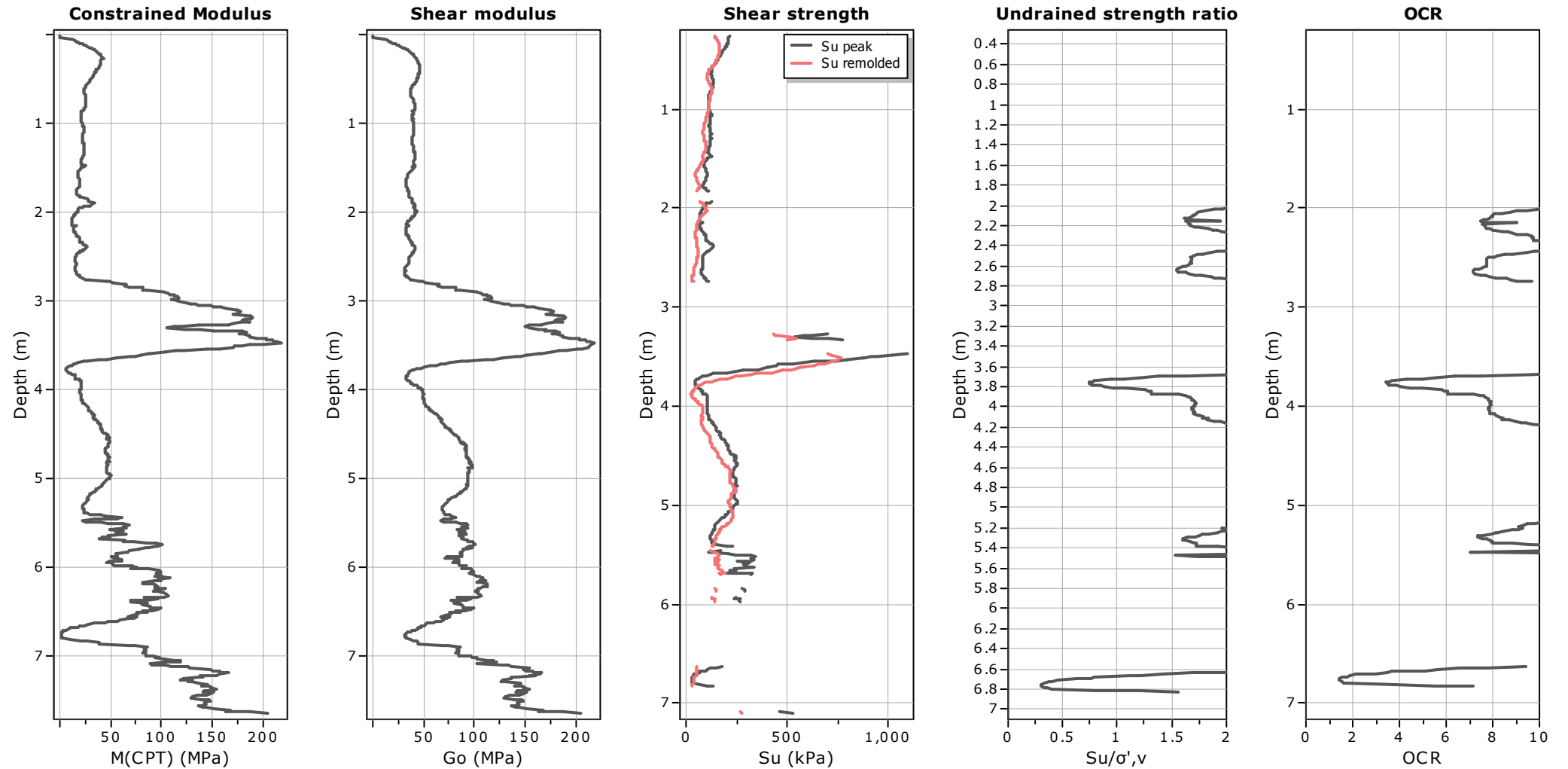
Phi: Based on Kulhavy & Mayne (1990)

○ User defined estimation data



Project: 23_006C

Location: Prato - La Querce



Calculation parameters

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

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

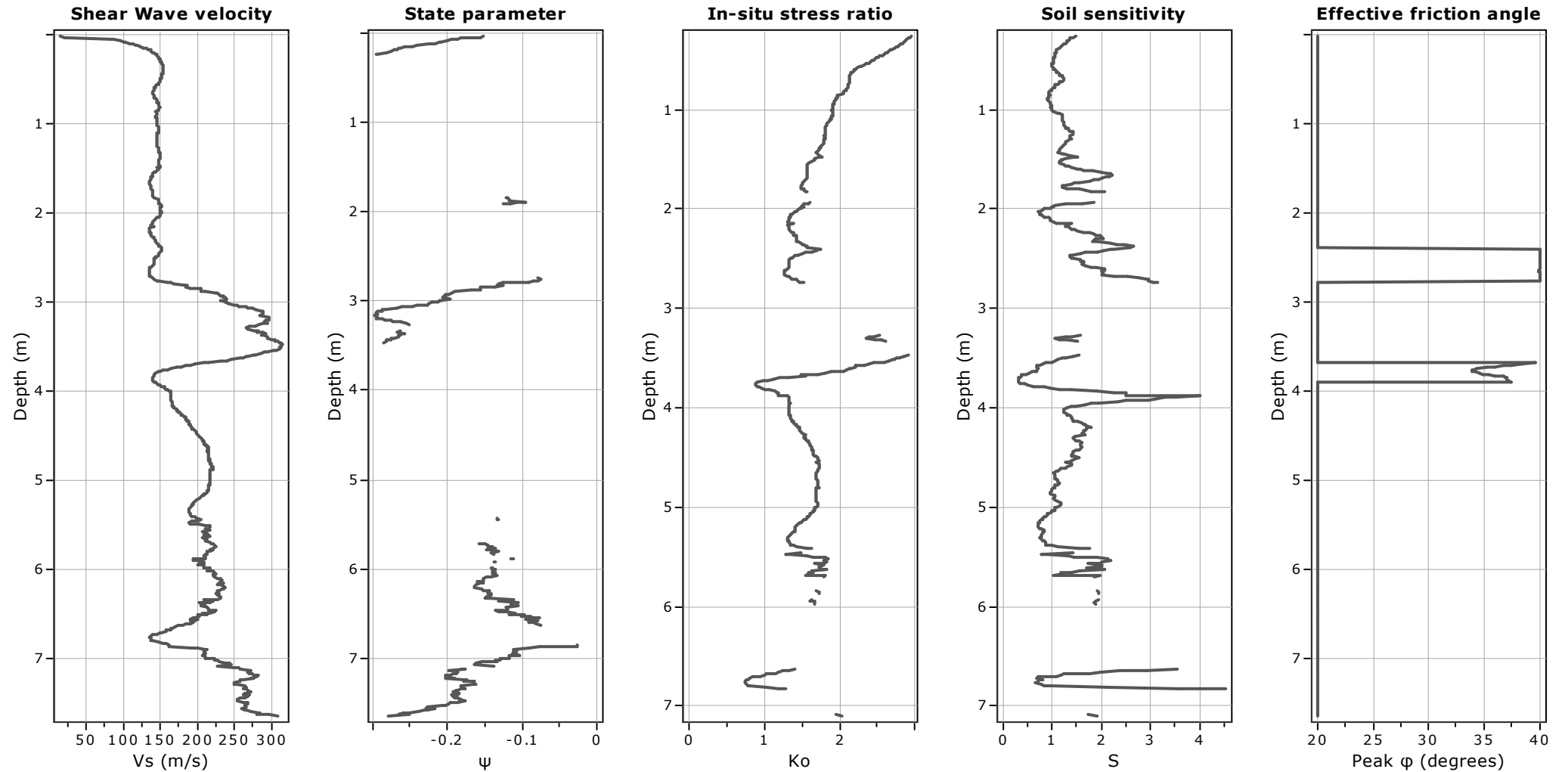
○ User defined estimation data

○ Flat Dilatometer Test data



Project: 23_006C

Location: Prato - La Querce



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—○— User defined estimation data



Dott. Rocco Carbonella

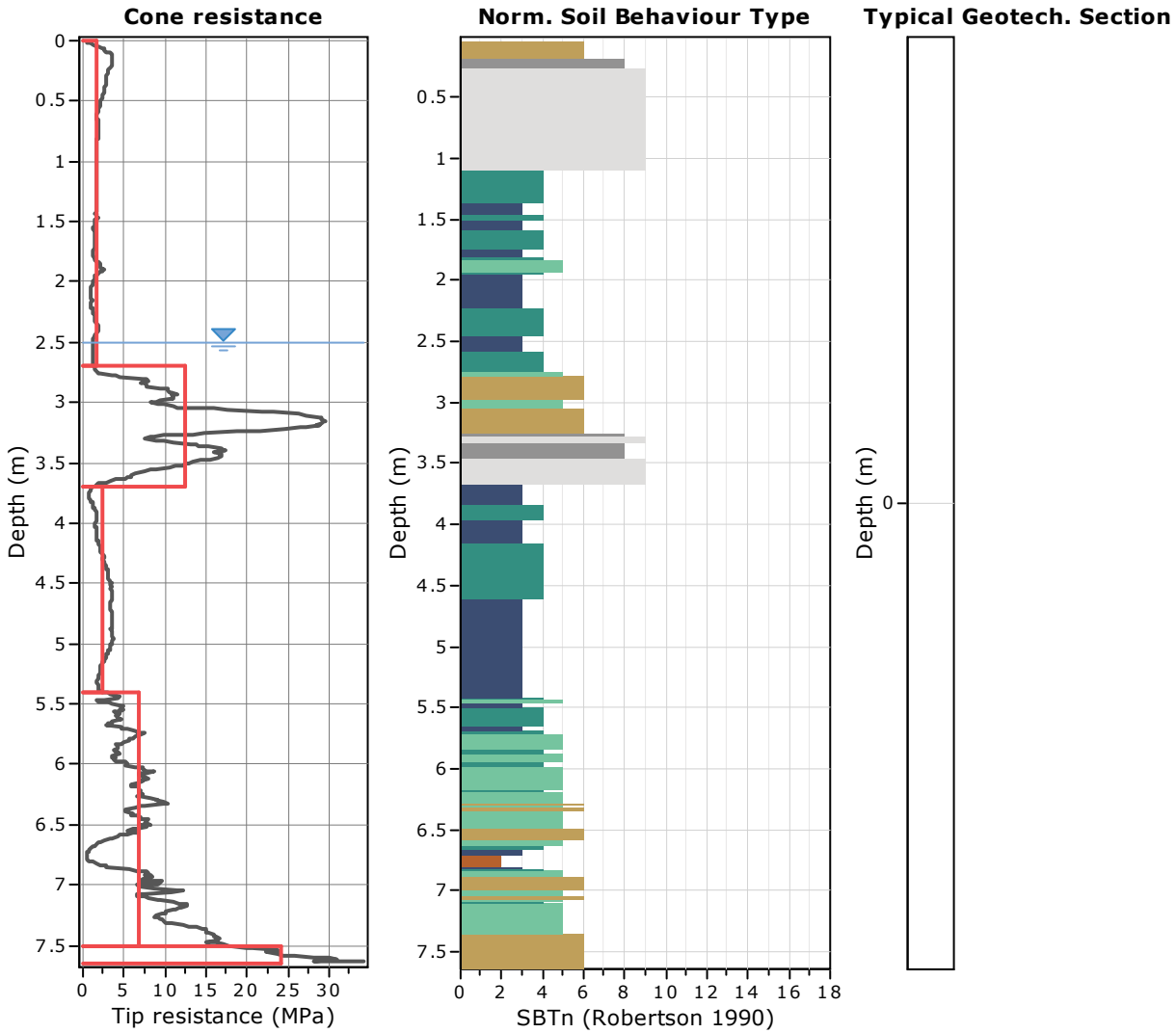
Bologna Via Toscana 119
rocco.carbonella@fastwebnet.it
<http://www.roccocarbonella.it>

Project: 23_006C

Location: Prato - La Querce

CPT: CPTU1

Total depth: 7.64 m, Date: 17/02/2023
Surface Elevation: 0.00 m
Coords: X:0.00, Y:0.00
Cone Type: Pagani
Cone Operator: Carbonella - Lioce



Tabular results

| | | |
|--|--|-----------------------------------|
| ::: Layer No: 1 ::: | | |
| Code: litotipo A Start depth: 0.00 (m), End depth: 2.70 (m) | | |
| Description: limi argillosi | | |
| Basic results | Estimation results | |
| Total cone resistance: 1.75 ±0.62 MPa | Permeability: 5.74E-06 ±2.70E-05 m/s | Constrained Mod.: 22.78 ±7.44 MPa |
| Sleeve friction: 84.67 ±38.31 kPa | N60: 6.56 ±1.22 blows | Go: 37.53 ±6.55 MPa |
| SBT _n : 9 | Es: 31.47 ±5.91 MPa | Su: 113.37 ±32.96 kPa |
| SBTn description: Very dense/stiff soil | Dr (%): 0.00 ±0.00 | Su ratio: 4.73 ±3.69 |
| | ö (degrees): 0.00 ±0.00 ° | O.C.R.: 21.86 ±17.04 |
| | Unit weight: 18.18 ±0.64 kN/m ³ | |

::: Layer No: 2 :::**Code:** S **Start depth:** 2.70 (m), **End depth:** 3.70 (m)**Description:** Sabbie**Basic results**

Total cone resistance: 12.34 ±8.00 MPa

Sleeve friction: 358.18 ±214.54 kPa

SBT_n: 8

SBTn description: Very dense/stiff soil

Estimation results

Permeability: 3.20E-05 ±6.40E-05 m/s

N60: 32.58 ±15.43 blows

Es: 111.48 ±40.51 MPa

Dr (%): 76.34 ±18.27

ö (degrees): 42.78 ±2.69 °

Unit weight: 20.28 ±1.24 kN/m³

Constrained Mod.: 124.00 ±58.42 MPa

Go: 140.67 ±53.71 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 3 :::**Code:** litotipo A **Start depth:** 3.70 (m), **End depth:** 5.40 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 2.45 ±0.89 MPa

Sleeve friction: 150.69 ±65.99 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 4.41E-08 ±3.19E-08 m/s

N60: 10.88 ±3.42 blows

Es: 45.21 ±26.89 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

ö (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.92 ±0.78 kN/m³

Constrained Mod.: 33.06 ±12.59 MPa

Go: 71.41 ±19.98 MPa

Su: 169.09 ±63.41 kPa

Su ratio: 2.49 ±0.86

O.C.R.: 11.52 ±4.00

::: Layer No: 4 :::**Code:** litotipo B **Start depth:** 5.40 (m), **End depth:** 7.50 (m)**Description:** Silty sand & sandy silt**Basic results**

Total cone resistance: 6.74 ±3.82 MPa

Sleeve friction: 142.57 ±70.77 kPa

SBT_n: 5

SBTn description: Silty sand & sandy silt

Estimation results

Permeability: 4.52E-06 ±8.37E-06 m/s

N60: 20.30 ±8.71 blows

Es: 83.82 ±22.13 MPa

Dr (%): 50.21 ±9.04

ö (degrees): 38.85 ±1.72 °

Unit weight: 19.18 ±0.89 kN/m³

Constrained Mod.: 81.84 ±39.46 MPa

Go: 95.26 ±31.00 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 5 :::**Code:** litotipo C **Start depth:** 7.50 (m), **End depth:** 7.65 (m)**Description:** ghiaie**Basic results**

Total cone resistance: 24.07 ±4.19 MPa

Sleeve friction: 183.31 ±34.56 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 2.18E-04 ±1.25E-04 m/s

N60: 48.00 ±6.11 blows

Es: 120.64 ±11.30 MPa

Dr (%): 83.75 ±7.21

ö (degrees): 43.86 ±0.83 °

Unit weight: 20.18 ±0.23 kN/m³

Constrained Mod.: 151.20 ±14.16 MPa

Go: 151.20 ±14.16 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00



Dott. Rocco Carbonella
Bologna Via Toscana 119
rocco.carbonella@fastwebnet.it
<http://www.roccocarbonella.it>

CPT: CPTU1

Total depth: 7.64 m, Date: 17/02/2023
Surface Elevation: 0.00 m
Coords: X:0.00, Y:0.00
Cone Type: Pagani
Cone Operator: Carbonella - Lioce

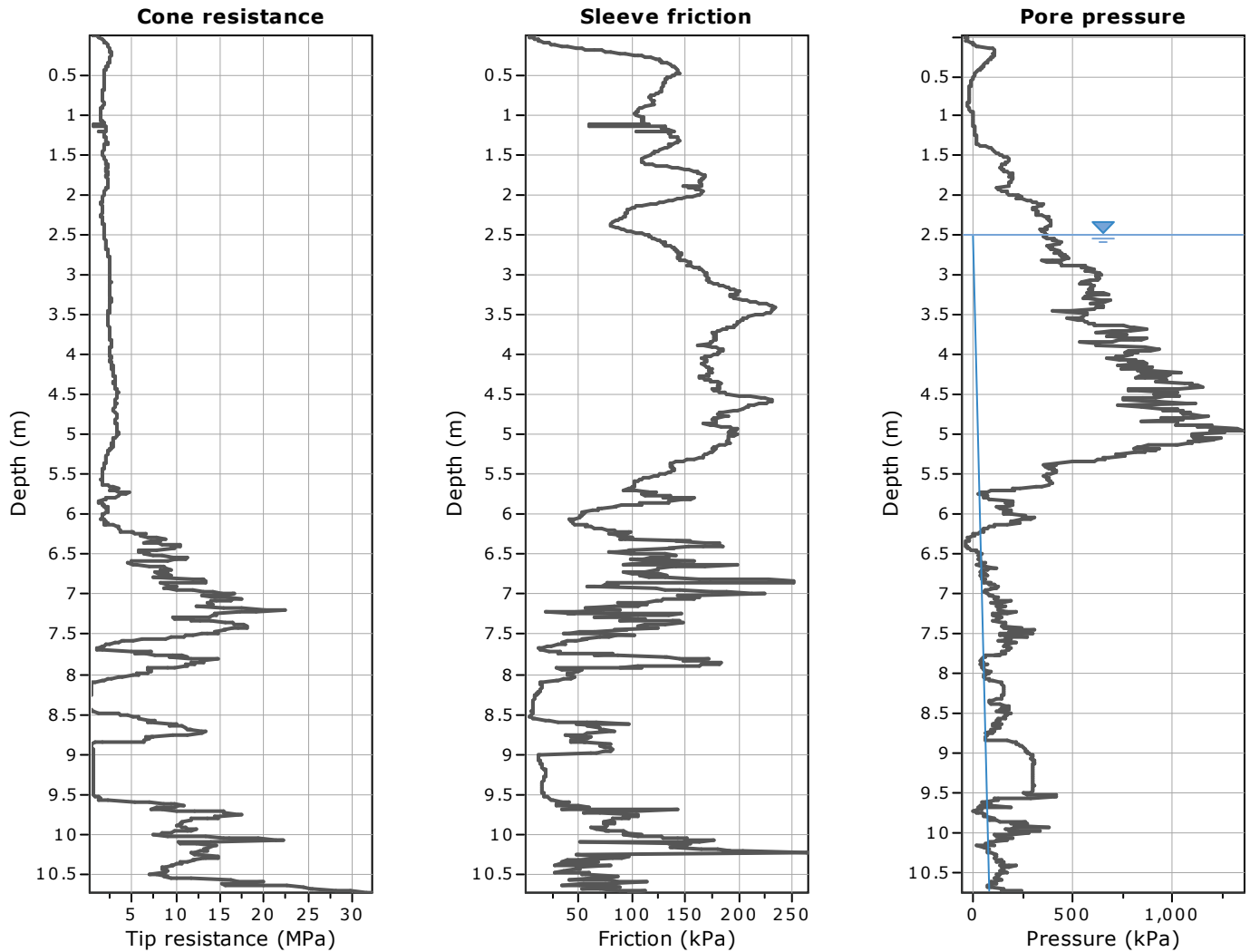
Project: 23_006C

Location: Prato - La Querce

Summary table of mean values

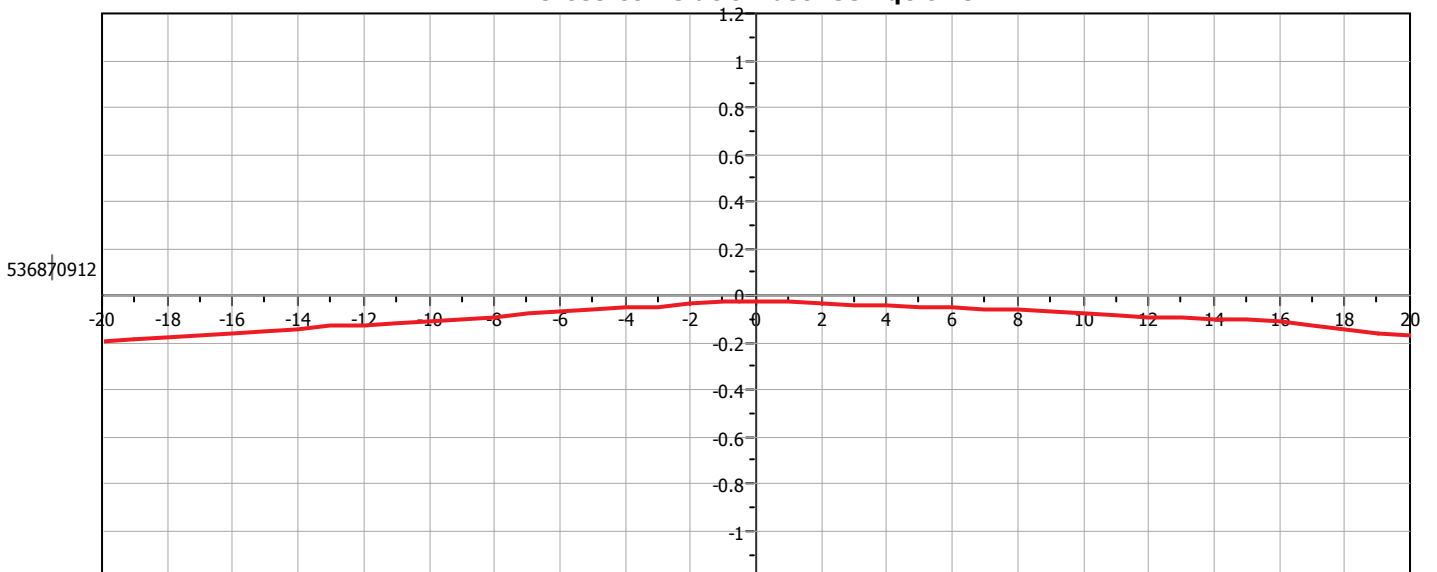
| From depth To depth (m) | Thickness (m) | Permeability (m/s) | SPT _{N60} (blows/30cm) | E _s (MPa) | D _r | Friction angle | Constrained modulus, M (MPa) | Shear modulus, G _o (MPa) | Undrained strength, S _u (kPa) | Undrained strength ratio | OCR | Unit weight (kN/m ³) |
|-------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------|-------------------|------------------------------------|---|--|--------------------------------|---------|-------------------------------------|
| 0.00 | 2.70 | 5.74E-06 | 6.6 | 31.5 | 0.0 | 0.0 | 22.8 | 37.5 | 113.4 | 4.7 | 21.9 | 18.2 |
| 2.70 | | (±2.70E-05) | (±1.2) | (±5.9) | (±0.0) | (±0.0) | (±7.4) | (±6.6) | (±33.0) | (±3.7) | (±17.0) | (±0.6) |
| 2.70 | 1.00 | 3.20E-05 | 32.6 | 111.5 | 76.3 | 42.8 | 124.0 | 140.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 20.3 |
| 3.70 | | (±6.40E-05) | (±15.4) | (±40.5) | (±18.3) | (±2.7) | (±58.4) | (±53.7) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±1.2) |
| 3.70 | 1.70 | 4.41E-08 | 10.9 | 45.2 | 0.0 | 0.0 | 33.1 | 71.4 | 169.1 | 2.5 | 11.5 | 18.9 |
| 5.40 | | (±3.19E-08) | (±3.4) | (±26.9) | (±0.0) | (±0.0) | (±12.6) | (±20.0) | (±63.4) | (±0.9) | (±4.0) | (±0.8) |
| 5.40 | 2.10 | 4.52E-06 | 20.3 | 83.8 | 50.2 | 38.8 | 81.8 | 95.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 19.2 |
| 7.50 | | (±8.37E-06) | (±8.7) | (±22.1) | (±9.0) | (±1.7) | (±39.5) | (±31.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.9) |
| 7.50 | 0.15 | 2.18E-04 | 48.0 | 120.6 | 83.7 | 43.9 | 151.2 | 151.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 20.2 |
| 7.65 | | (±1.25E-04) | (±6.1) | (±11.3) | (±7.2) | (±0.8) | (±14.2) | (±14.2) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.2) |

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



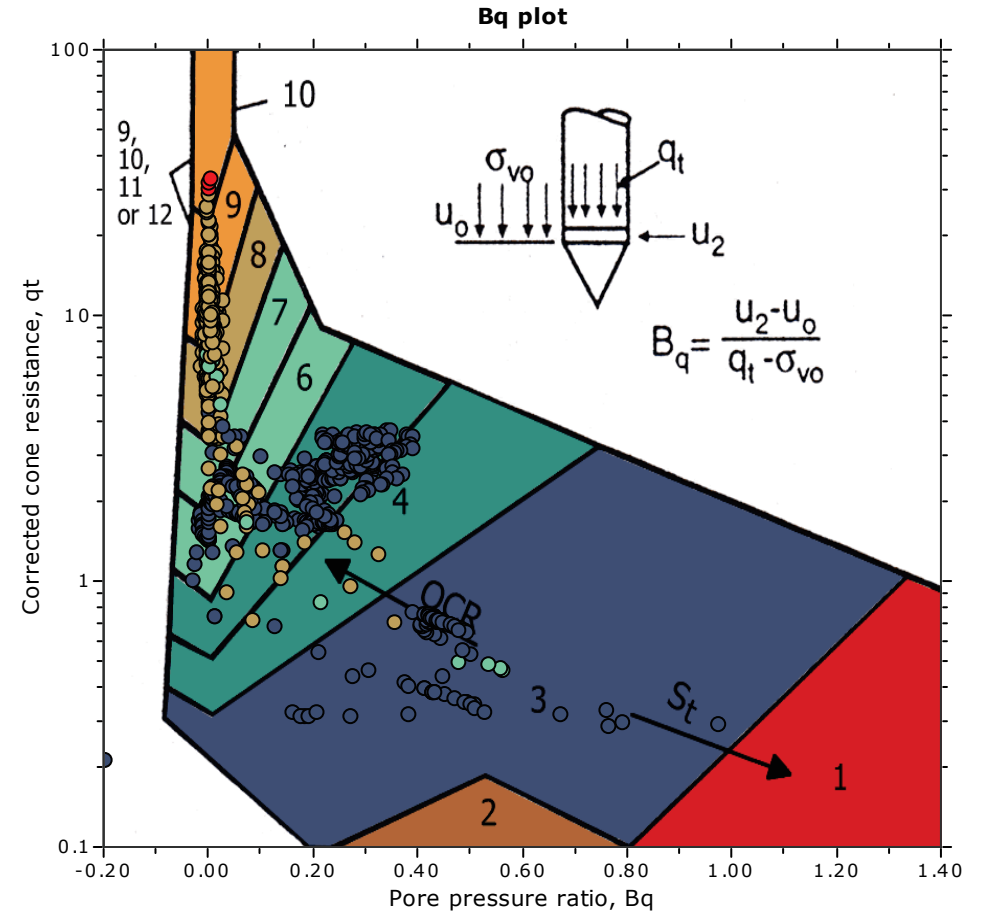
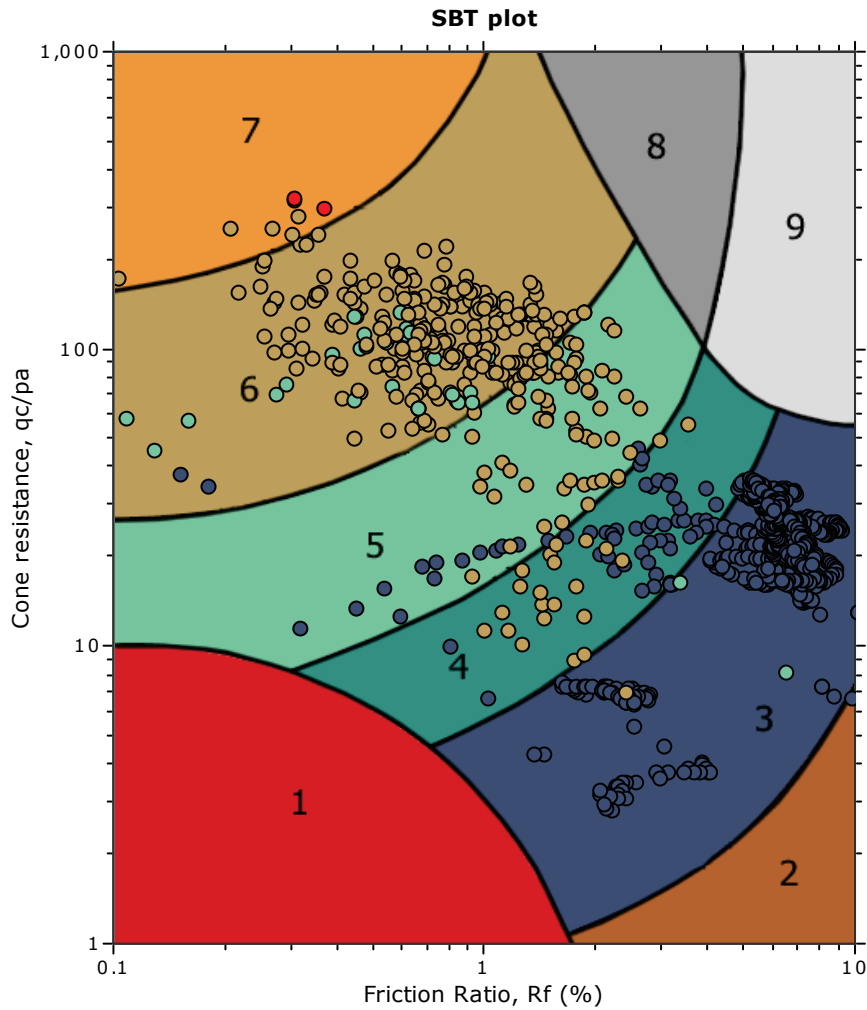
The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s





SBT - Bq plots

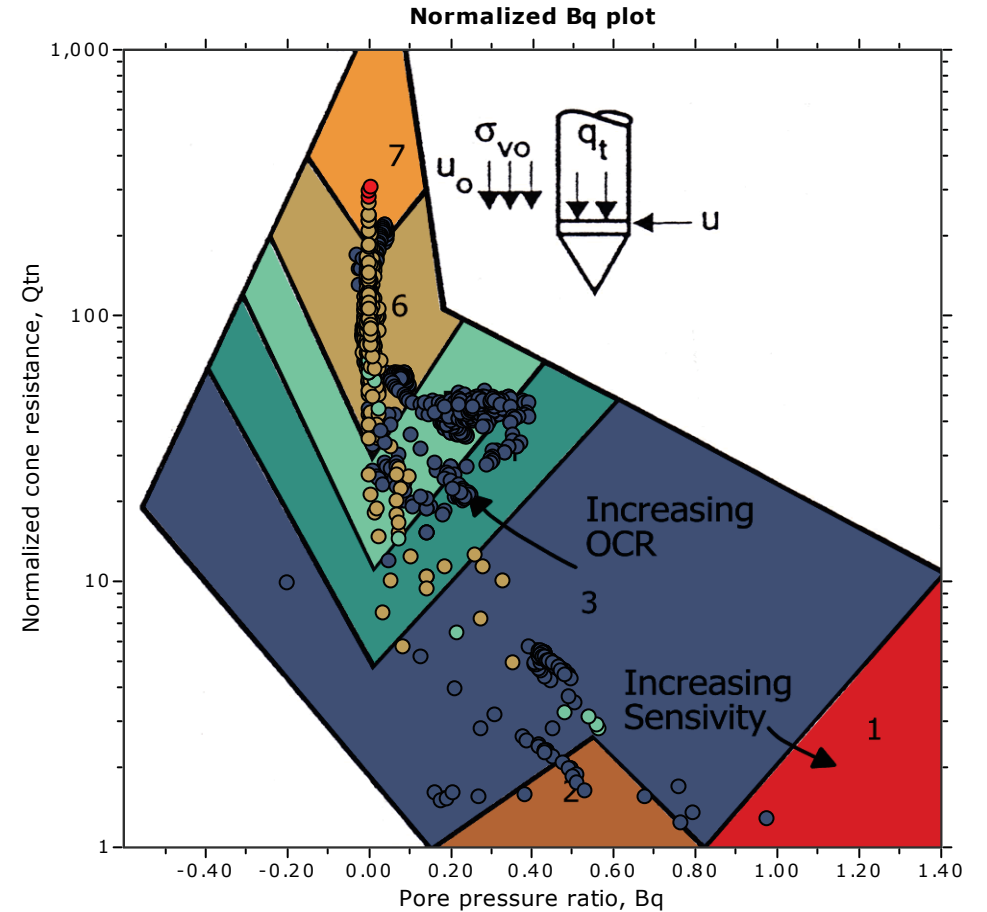
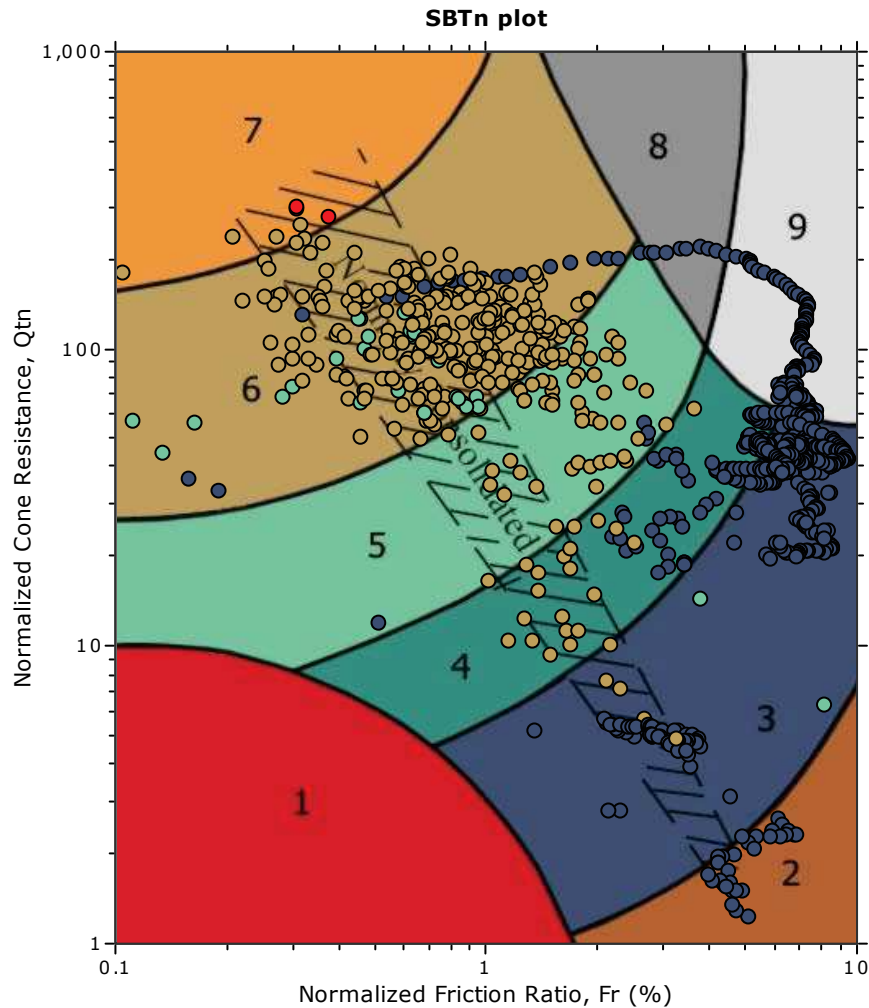


SBT legend

- | | | |
|---|---|---|
| ■ 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 |



SBT - Bq plots (normalized)

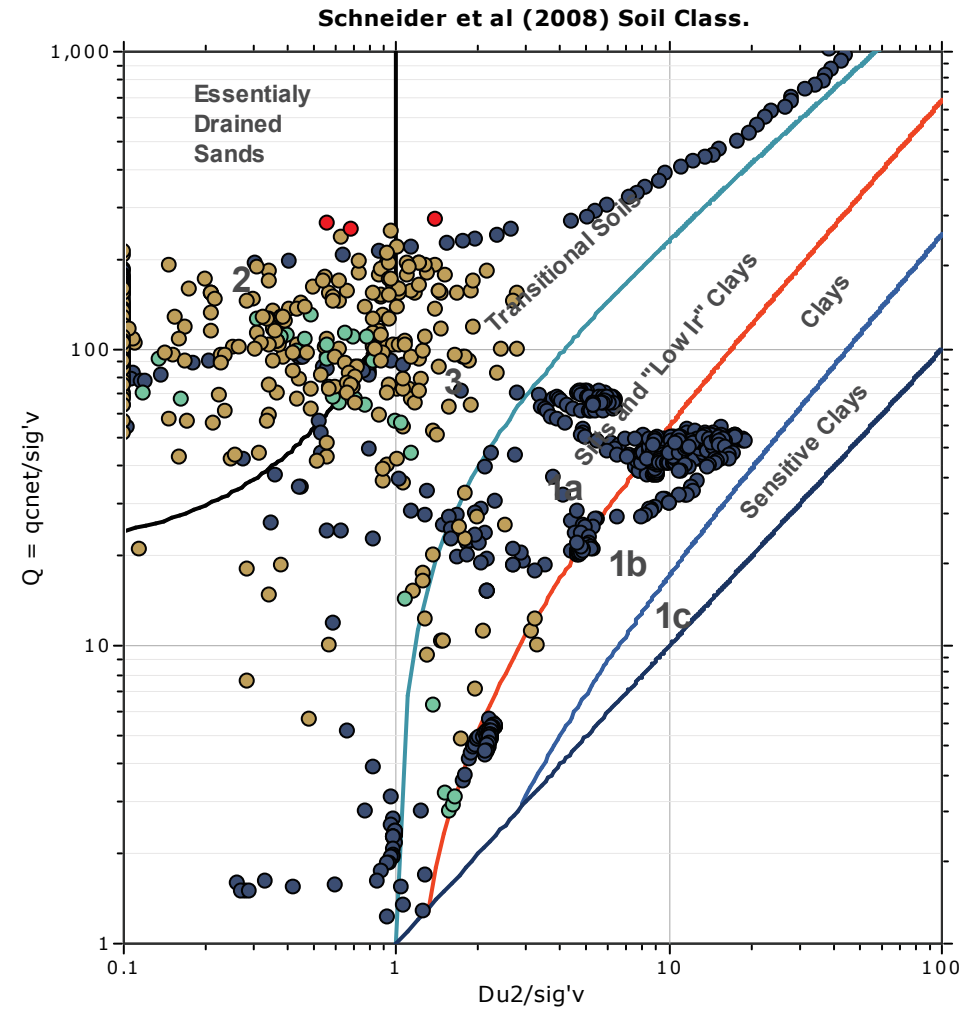
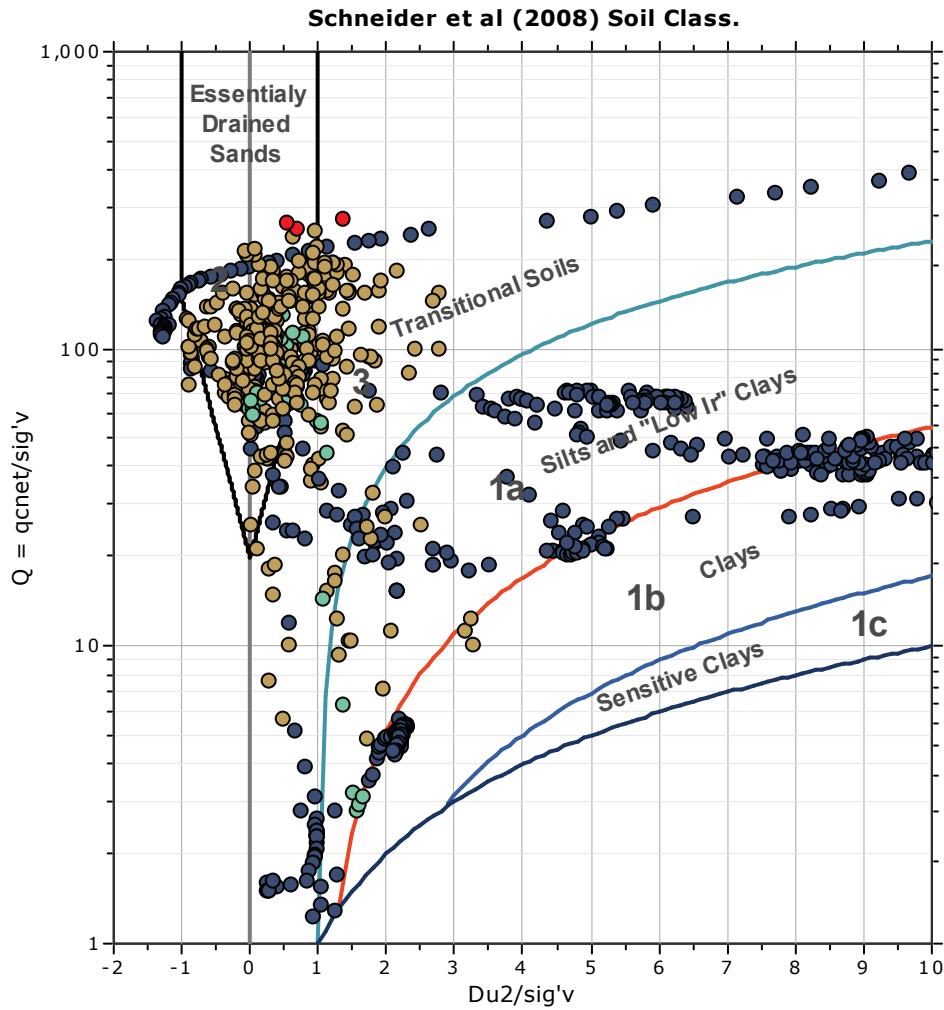


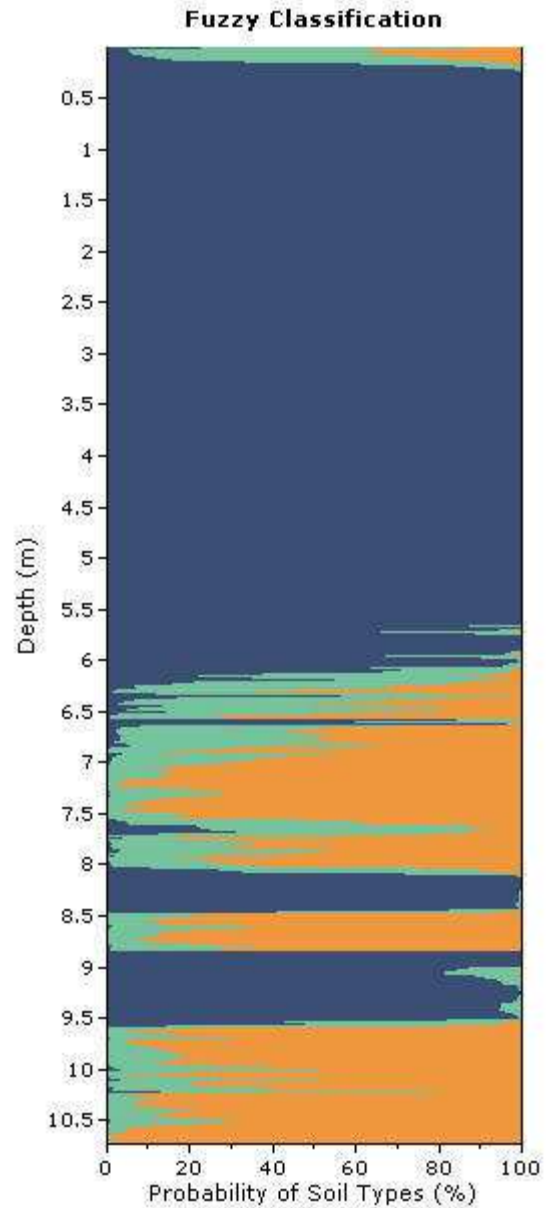
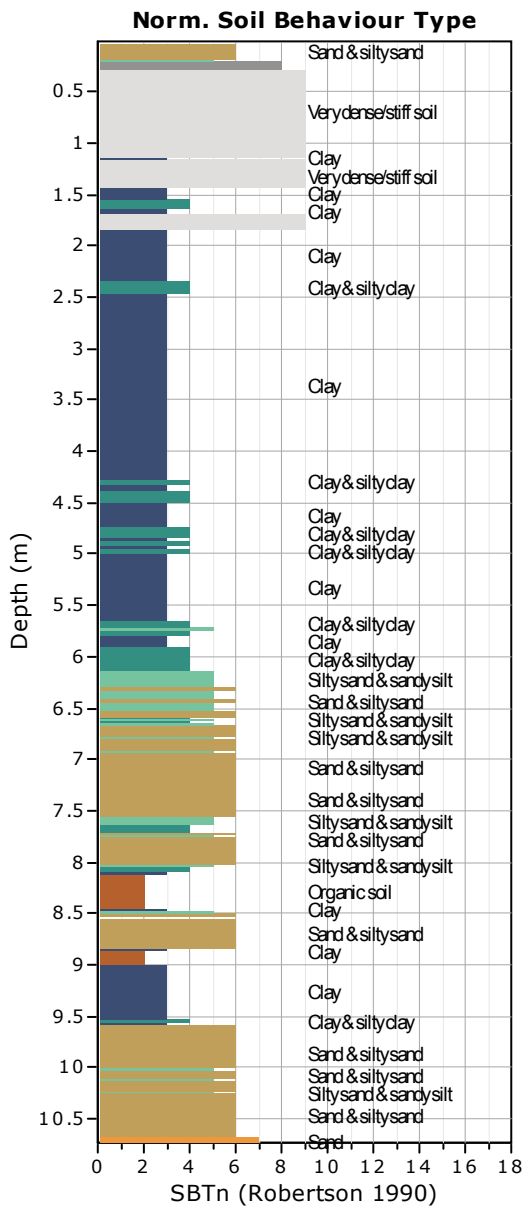
SBTn legend

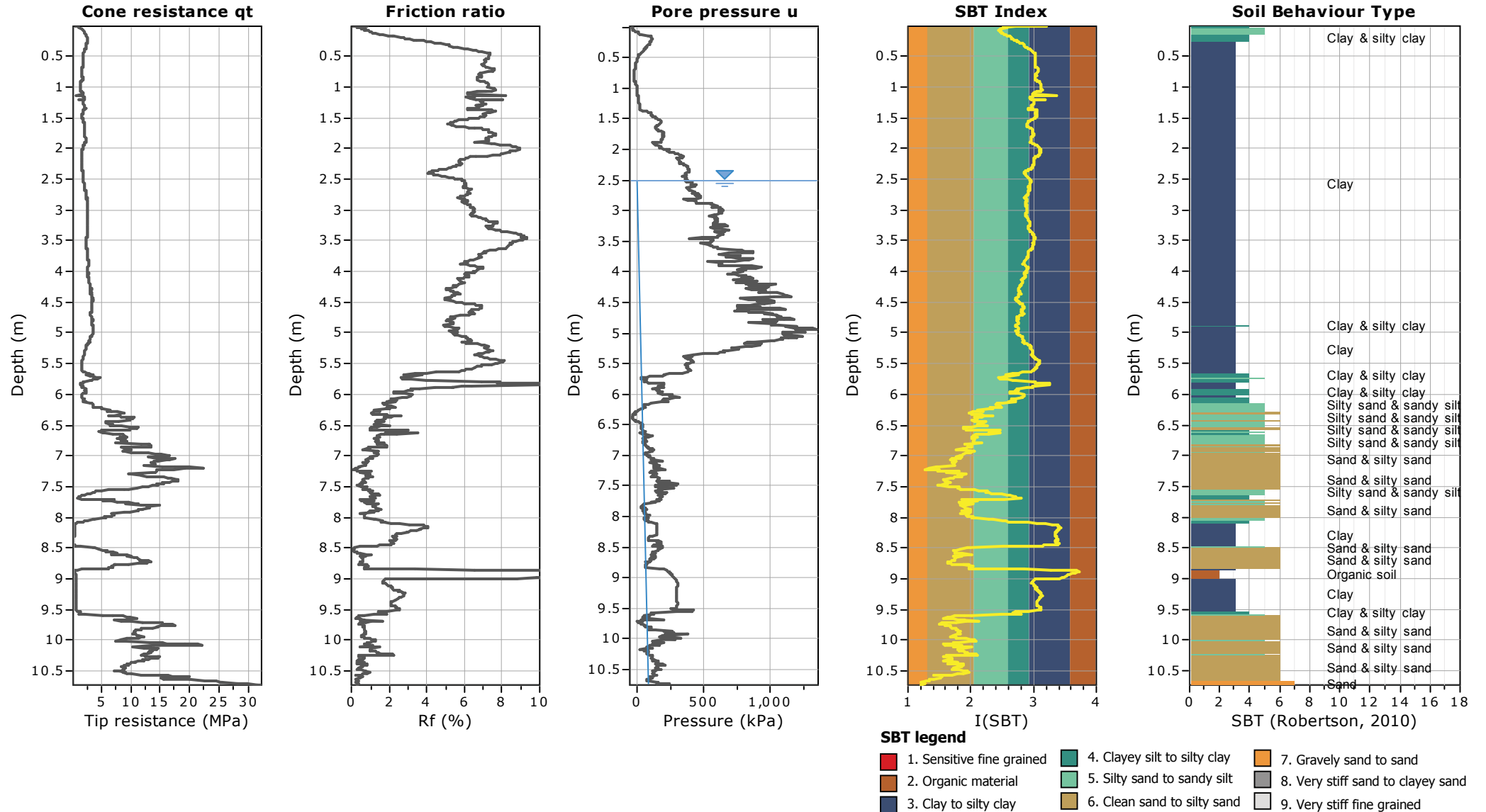
- | | | |
|---|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained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



Bq plots (Schneider)







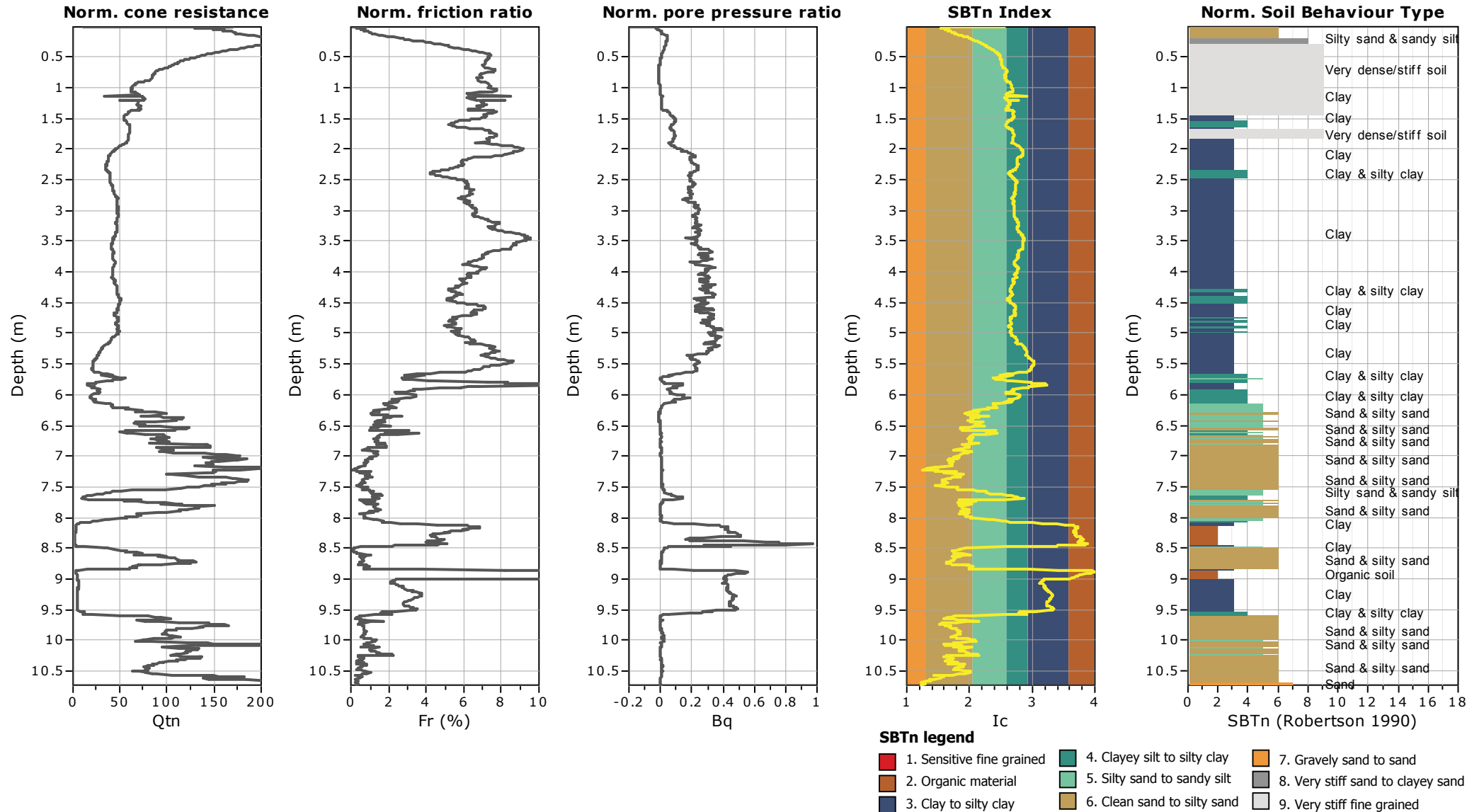


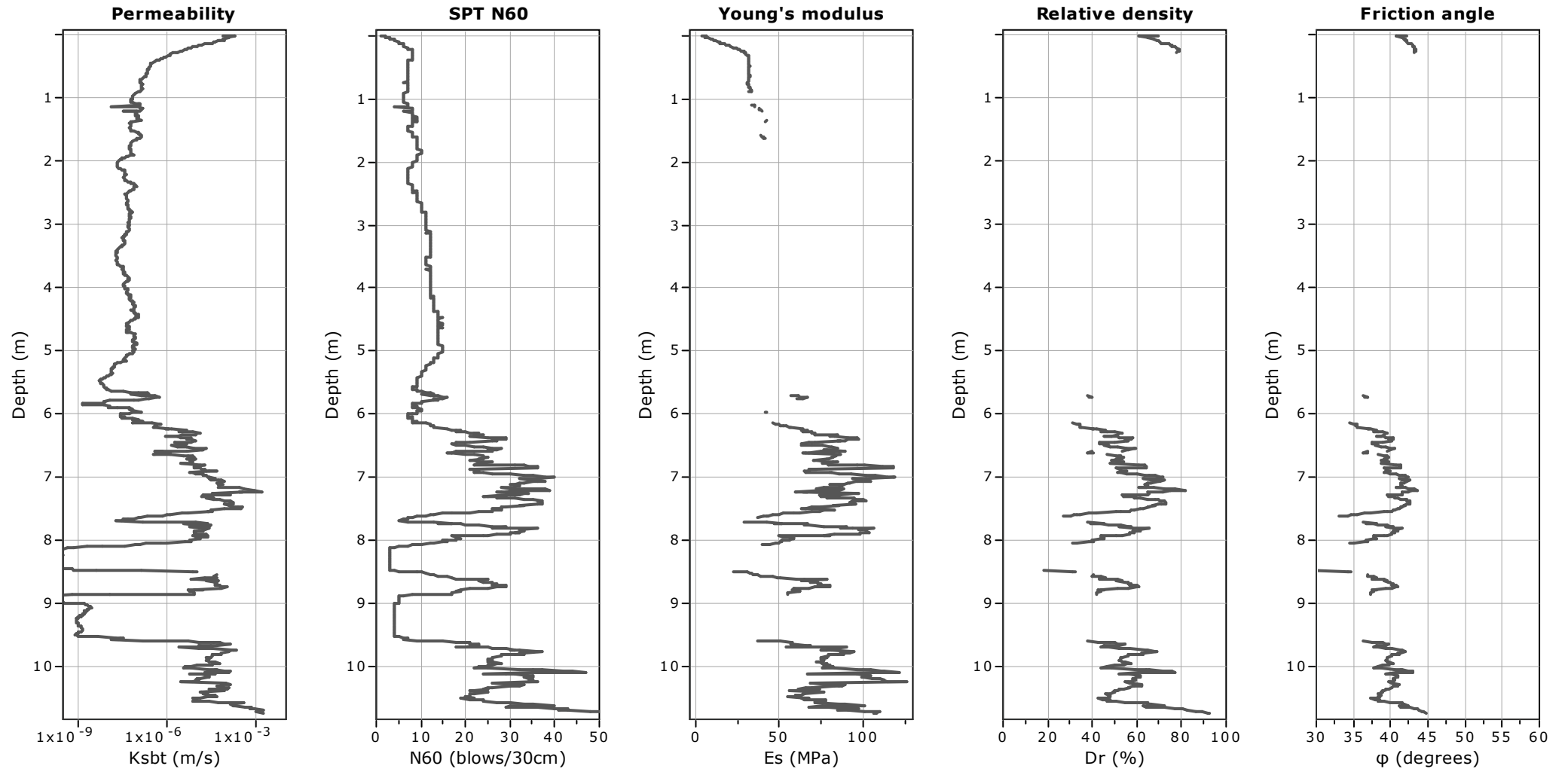
Dott. Rocco Carbonella
 Bologna Via Toscana 119
 rocco.carbonella@fastwebnet.it
 http://www.roccocarbonella.it

CPT: CPTU2

Total depth: 10.73 m, Date: 17/02/2023
 Surface Elevation: 0.00 m
 Coords: X:0.00, Y:0.00
 Cone Type: Pagani
 Cone Operator: Carbonella - Lioce

Project: 23_006C
Location: Prato - La Querce





Calculation parameters

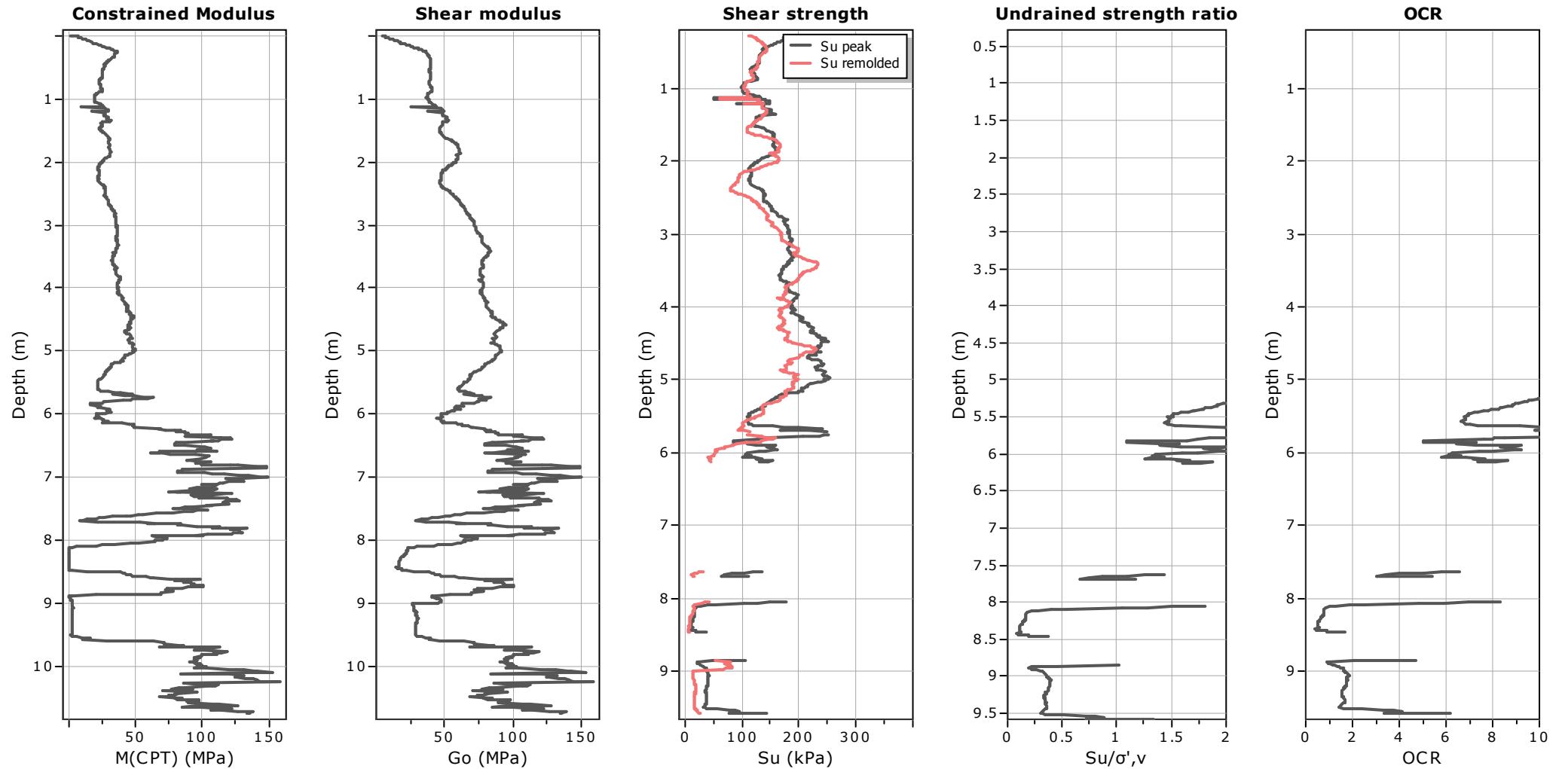
Permeability: Based on SBT_n
 SPT N₆₀: Based on I_c and q_t
 Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr}: 350.0
 Phi: Based on Kulhavy & Mayne (1990)
 ○ User defined estimation data



Project: 23_006C

Location: Prato - La Querce



Calculation parameters

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

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

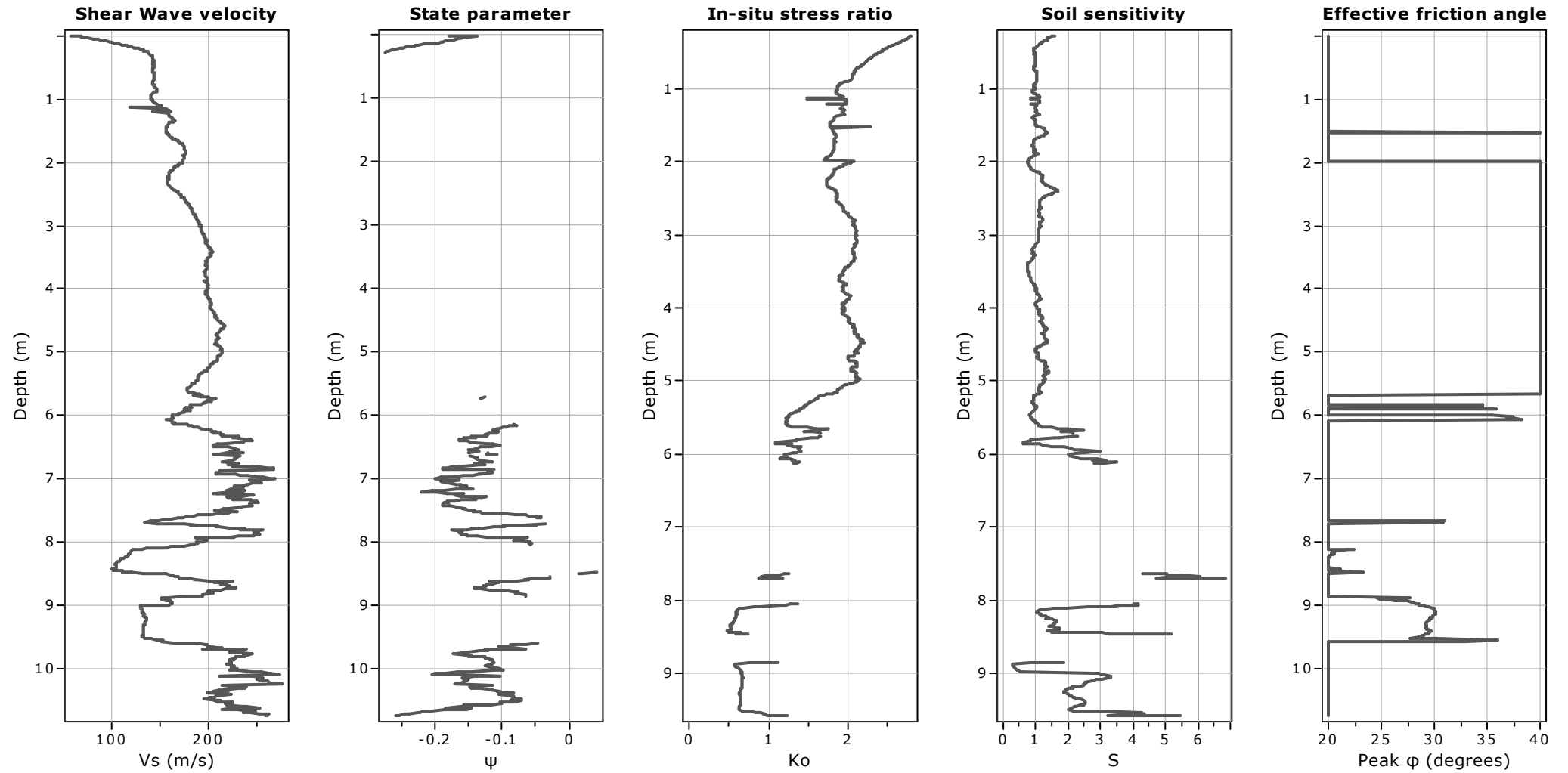
○ User defined estimation data

○ Flat Dilatometer Test data



Project: 23_006C

Location: Prato - La Querce



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—○— User defined estimation data



Dott. Rocco Carbonella

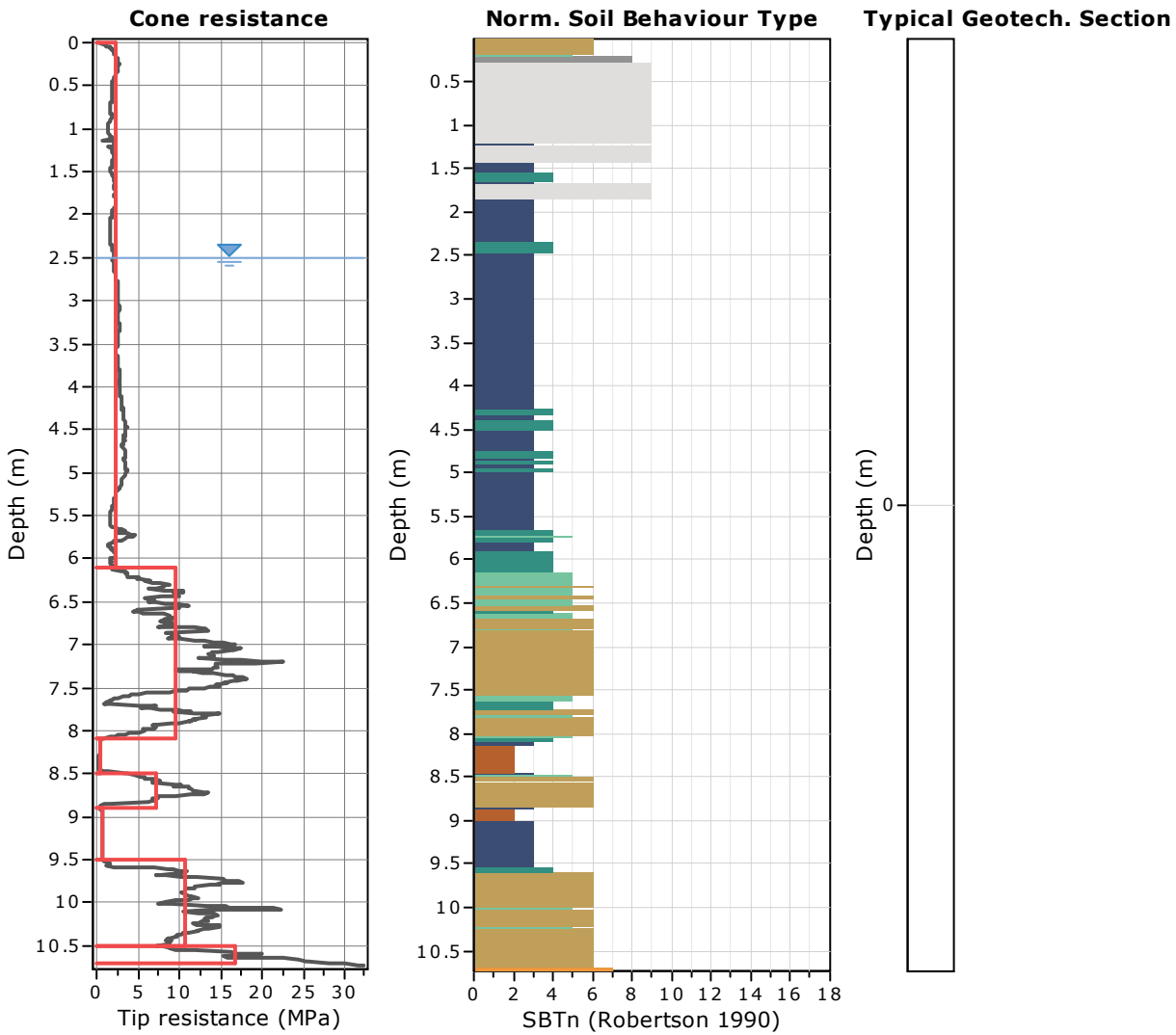
Bologna Via Toscana 119
rocco.carbonella@fastwebnet.it
<http://www.roccocarbonella.it>

Project: 23_006C

Location: Prato - La Querce

CPT: CPTU2

Total depth: 10.73 m, Date: 17/02/2023
Surface Elevation: 0.00 m
Coords: X:0.00, Y:0.00
Cone Type: Pagani
Cone Operator: Carbonella - Lioce



Tabular results

| | | |
|--|--|-----------------------------------|
| ::: Layer No: 1 ::: | | |
| Code: litotipo A Start depth: 0.00 (m), End depth: 6.10 (m) | | |
| Description: Clay | | |
| Basic results | Estimation results | |
| Total cone resistance: 2.35 ±0.62 MPa | Permeability: 1.79E-06 ±1.21E-05 m/s | Constrained Mod.: 31.78 ±8.73 MPa |
| Sleeve friction: 144.08 ±45.27 kPa | N60: 9.91 ±2.72 blows | Go: 62.58 ±18.73 MPa |
| SBT _n : 3 | Es: 34.87 ±7.98 MPa | Su: 163.85 ±41.59 kPa |
| SBT _n description: Clay | Dr (%): 0.00 ±0.00 | Su ratio: 3.77 ±2.14 |
| | ö (degrees): 0.00 ±0.00 ° | O.C.R.: 17.43 ±9.88 |
| | Unit weight: 18.93 ±0.64 kN/m ³ | |

::: Layer No: 2 :::**Code:** litotipo B **Start depth:** 6.10 (m), **End depth:** 8.10 (m)**Description:** Sand & silty sand**Basic results**

Total cone resistance: 9.43 ±4.69 MPa

Sleeve friction: 101.07 ±52.34 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 4.77E-05 ±1.45E-04 m/s

N60: 23.62 ±8.85 blows

Es: 78.36 ±17.92 MPa

Dr (%): 54.45 ±11.42

ö (degrees): 39.55 ±2.15 °

Unit weight: 18.89 ±0.94 kN/m³

Constrained Mod.: 89.32 ±32.39 MPa

Go: 93.08 ±27.09 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 3 :::**Code:** T **Start depth:** 8.10 (m), **End depth:** 8.50 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 0.56 ±0.73 MPa

Sleeve friction: 9.68 ±3.60 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 4.19E-07 ±1.89E-06 m/s

N60: 3.44 ±1.45 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

ö (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 15.20 ±0.44 kN/m³

Constrained Mod.: 2.83 ±8.50 MPa

Go: 20.78 ±5.28 MPa

Su: 15.74 ±6.63 kPa

Su ratio: 0.16 ±0.07

O.C.R.: 0.73 ±0.31

::: Layer No: 4 :::**Code:** litotipo B **Start depth:** 8.50 (m), **End depth:** 8.90 (m)**Description:** Silty sand & sandy silt**Basic results**

Total cone resistance: 7.28 ±3.76 MPa

Sleeve friction: 49.79 ±25.55 kPa

SBT_n: 5

SBTn description: Silty sand & sandy silt

Estimation results

Permeability: 2.90E-05 ±2.71E-05 m/s

N60: 17.88 ±7.30 blows

Es: 61.43 ±13.56 MPa

Dr (%): 48.51 ±7.90

ö (degrees): 38.55 ±1.59 °

Unit weight: 17.82 ±1.13 kN/m³

Constrained Mod.: 63.94 ±30.43 MPa

Go: 69.77 ±20.42 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 5 :::**Code:** T **Start depth:** 8.90 (m), **End depth:** 9.50 (m)**Description:** Clay**Basic results**

Total cone resistance: 0.69 ±0.05 MPa

Sleeve friction: 25.38 ±22.30 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 1.16E-09 ±6.31E-10 m/s

N60: 4.16 ±0.37 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

ö (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.30 ±0.67 kN/m³

Constrained Mod.: 2.53 ±0.45 MPa

Go: 31.81 ±6.41 MPa

Su: 36.81 ±3.53 kPa

Su ratio: 0.35 ±0.03

O.C.R.: 1.61 ±0.15

:: Layer No: 6 ::**Code:** litotipo B **Start depth:** 9.50 (m), **End depth:** 10.50 (m)**Description:** Sand & silty sand**Basic results**

Total cone resistance: 10.78 ±4.17 MPa

Sleeve friction: 83.98 ±52.28 kPa

SBT_n: 6SBT_n description: Sand & silty sand**Estimation results**

Permeability: 4.00E-05 ±4.16E-05 m/s

N60: 25.74 ±8.52 blows

Es: 81.09 ±17.91 MPa

Dr (%): 54.99 ±7.25

ö (degrees): 39.79 ±1.25 °

Unit weight: 18.71 ±0.96 kN/m³

Constrained Mod.: 93.60 ±33.60 MPa

Go: 95.87 ±28.35 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

:: Layer No: 7 ::**Code:** litotipo C **Start depth:** 10.50 (m), **End depth:** 10.70 (m)**Description:** ghiaia**Basic results**

Total cone resistance: 16.74 ±6.62 MPa

Sleeve friction: 69.73 ±19.05 kPa

SBT_n: 6SBT_n description: Sand & silty sand**Estimation results**

Permeability: 4.07E-04 ±4.82E-04 m/s

N60: 32.71 ±8.41 blows

Es: 81.97 ±11.46 MPa

Dr (%): 64.74 ±14.00

ö (degrees): 41.20 ±2.16 °

Unit weight: 18.87 ±0.40 kN/m³

Constrained Mod.: 102.73 ±14.37 MPa

Go: 102.73 ±14.37 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00



Dott. Rocco Carbonella
 Bologna Via Toscana 119
 rocco.carbonella@fastwebnet.it
 http://www.roccocarbonella.it

CPT: CPTU2

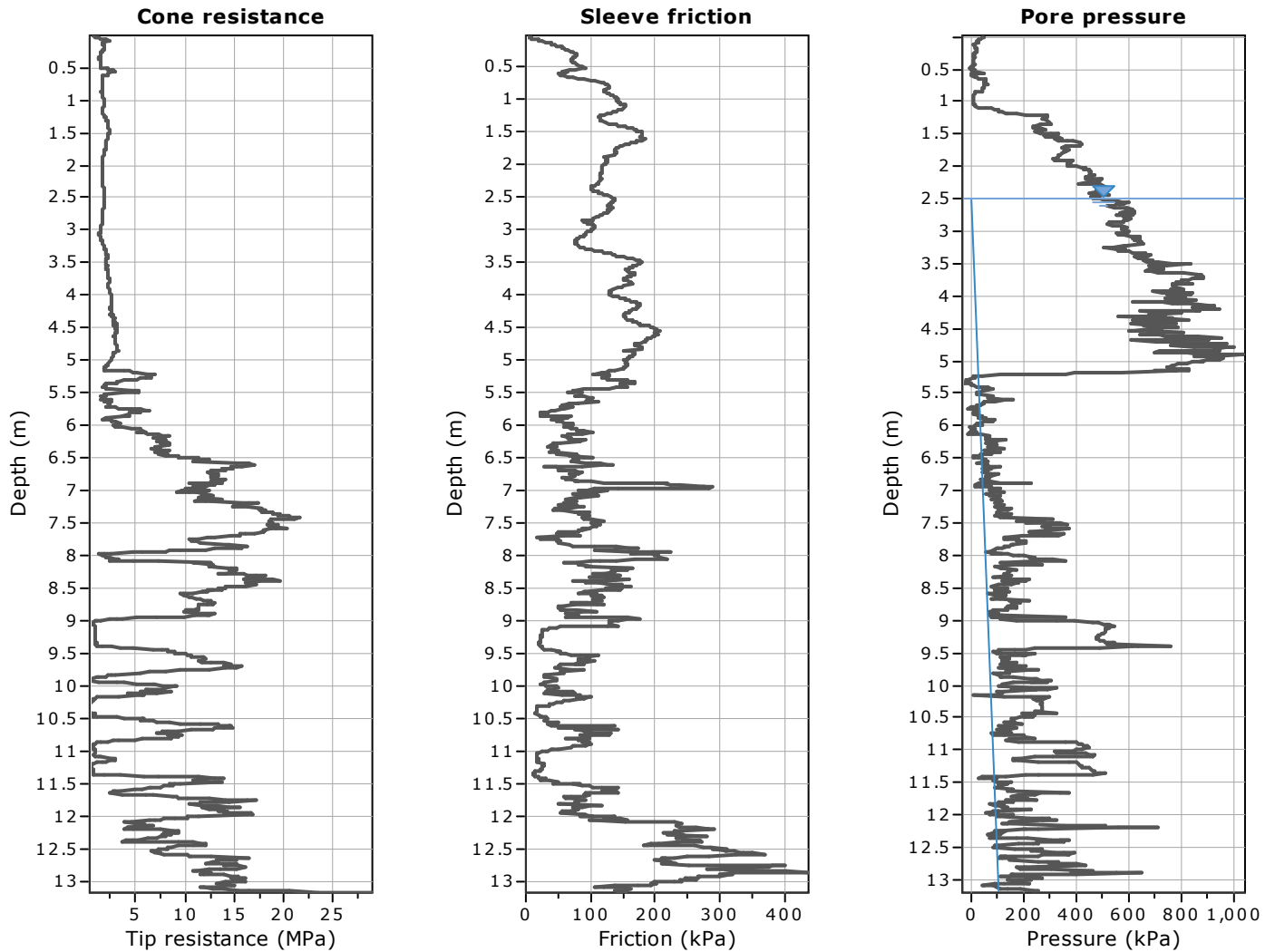
Total depth: 10.73 m, Date: 17/02/2023
 Surface Elevation: 0.00 m
 Coords: X:0.00, Y:0.00
 Cone Type: Pagani
 Cone Operator: Carbonella - Lioce

Project: 23_006C
Location: Prato - La Querce

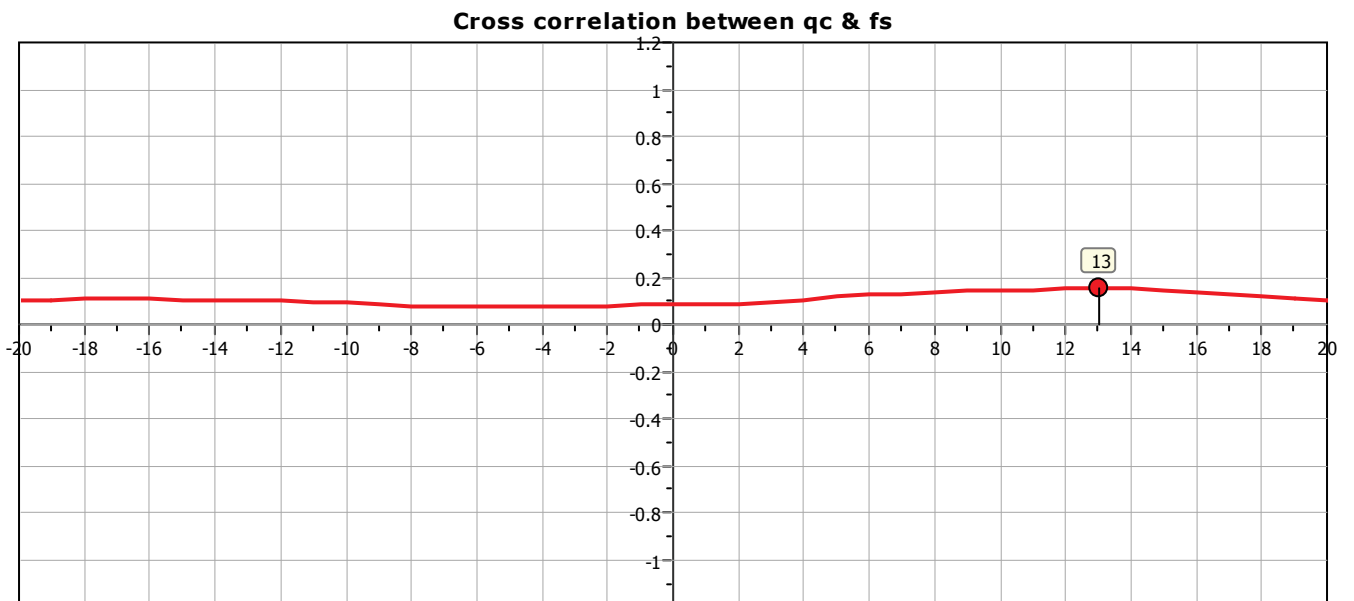
Summary table of mean values

| From depth To depth (m) | Thickness (m) | Permeability (m/s) | SPT _{N60} (blows/30cm) | E _s (MPa) | D _r | Friction angle | Constrained modulus, M (MPa) | Shear modulus, G ₀ (MPa) | Undrained strength, S _u (kPa) | Undrained strength ratio | OCR | Unit weight (kN/m ³) |
|-------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------|-------------------|------------------------------------|---|--|--------------------------------|--------|-------------------------------------|
| 0.00 | 6.10 | 1.79E-06 | 9.9 | 34.9 | 0.0 | 0.0 | 31.8 | 62.6 | 163.8 | 3.8 | 17.4 | 18.9 |
| 6.10 | | (±1.21E-05) | (±2.7) | (±8.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±8.7) | (±18.7) | (±41.6) | (±2.1) | (±9.9) | (±0.6) |
| 6.10 | 2.00 | 4.77E-05 | 23.6 | 78.4 | 54.4 | 39.5 | 89.3 | 93.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.9 |
| 8.10 | | (±1.45E-04) | (±8.8) | (±17.9) | (±11.4) | (±2.1) | (±32.4) | (±27.1) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.9) |
| 8.10 | 0.40 | 4.19E-07 | 3.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.8 | 20.8 | 15.7 | 0.2 | 0.7 | 15.2 |
| 8.50 | | (±1.89E-06) | (±1.4) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±8.5) | (±5.3) | (±6.6) | (±0.1) | (±0.3) | (±0.4) |
| 8.50 | 0.40 | 2.90E-05 | 17.9 | 61.4 | 48.5 | 38.5 | 63.9 | 69.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 17.8 |
| 8.90 | | (±2.71E-05) | (±7.3) | (±13.6) | (±7.9) | (±1.6) | (±30.4) | (±20.4) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±1.1) |
| 8.90 | 0.60 | 1.16E-09 | 4.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.5 | 31.8 | 36.8 | 0.3 | 1.6 | 16.3 |
| 9.50 | | (±6.31E-10) | (±0.4) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.4) | (±6.4) | (±3.5) | (±0.0) | (±0.2) | (±0.7) |
| 9.50 | 1.00 | 4.00E-05 | 25.7 | 81.1 | 55.0 | 39.8 | 93.6 | 95.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.7 |
| 10.50 | | (±4.16E-05) | (±8.5) | (±17.9) | (±7.2) | (±1.2) | (±33.6) | (±28.3) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±1.0) |
| 10.50 | 0.20 | 4.07E-04 | 32.7 | 82.0 | 64.7 | 41.2 | 102.7 | 102.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.9 |
| 10.70 | | (±4.82E-04) | (±8.4) | (±11.5) | (±14.0) | (±2.2) | (±14.4) | (±14.4) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.4) |

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

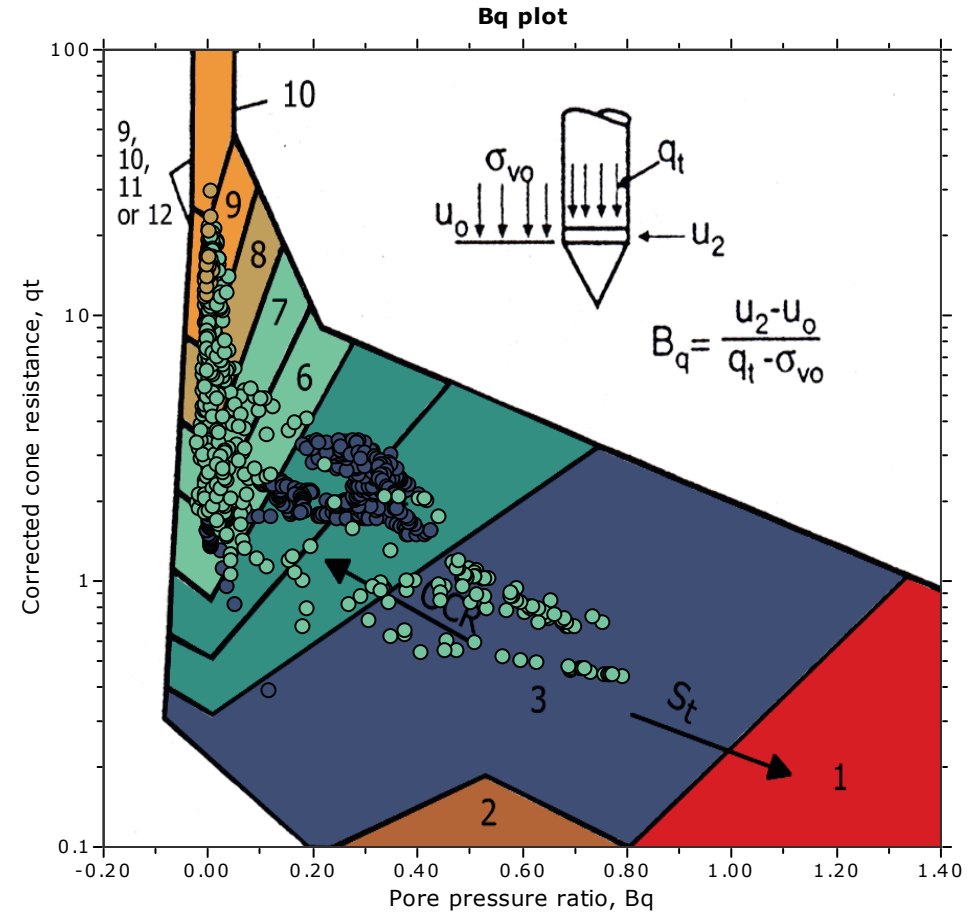
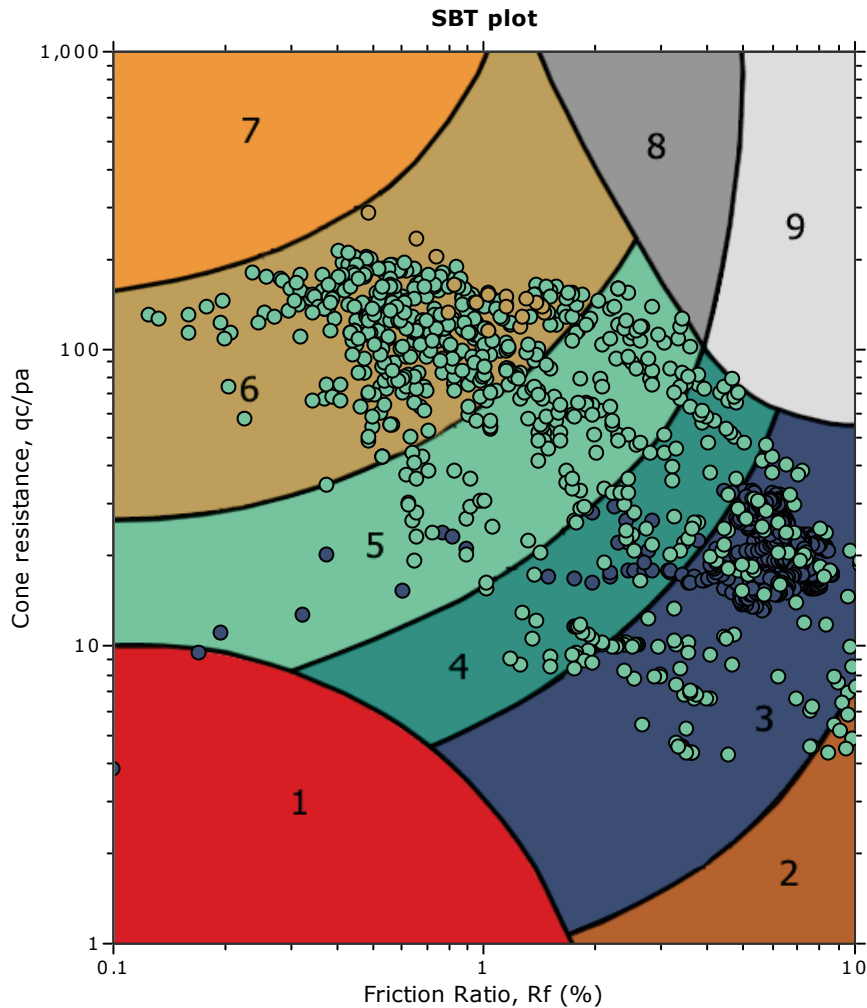


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).





SBT - Bq plots

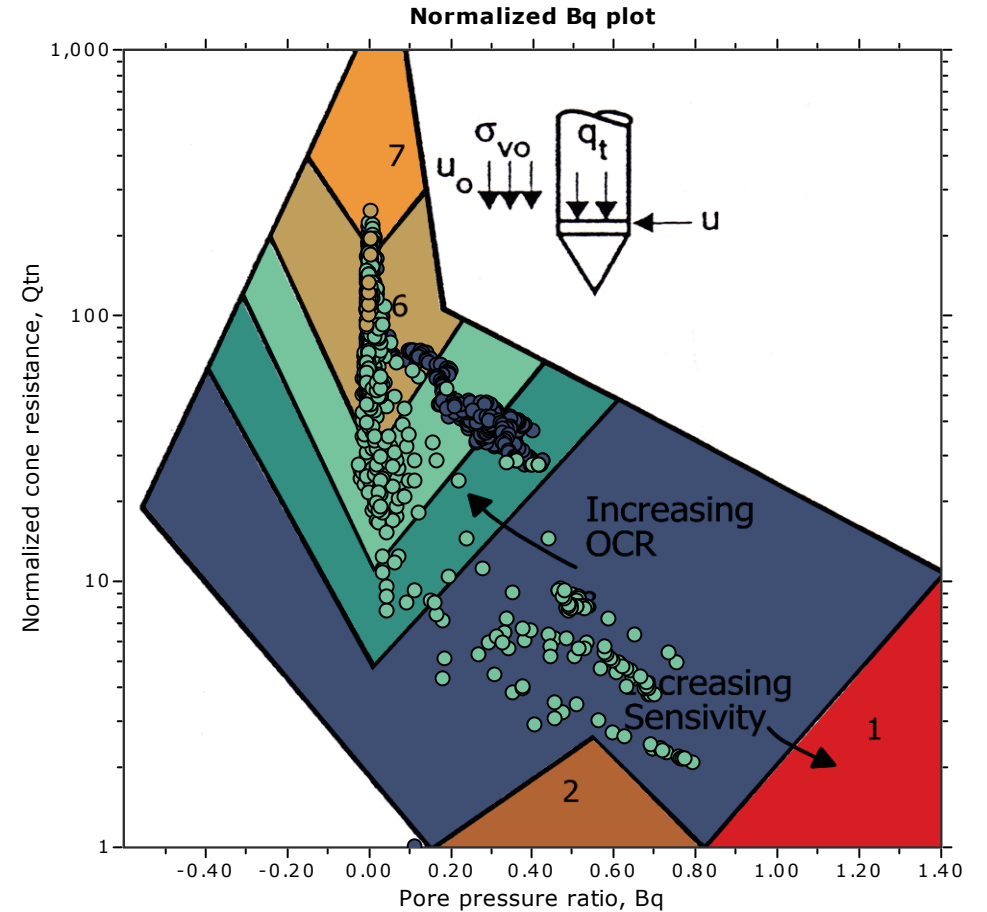
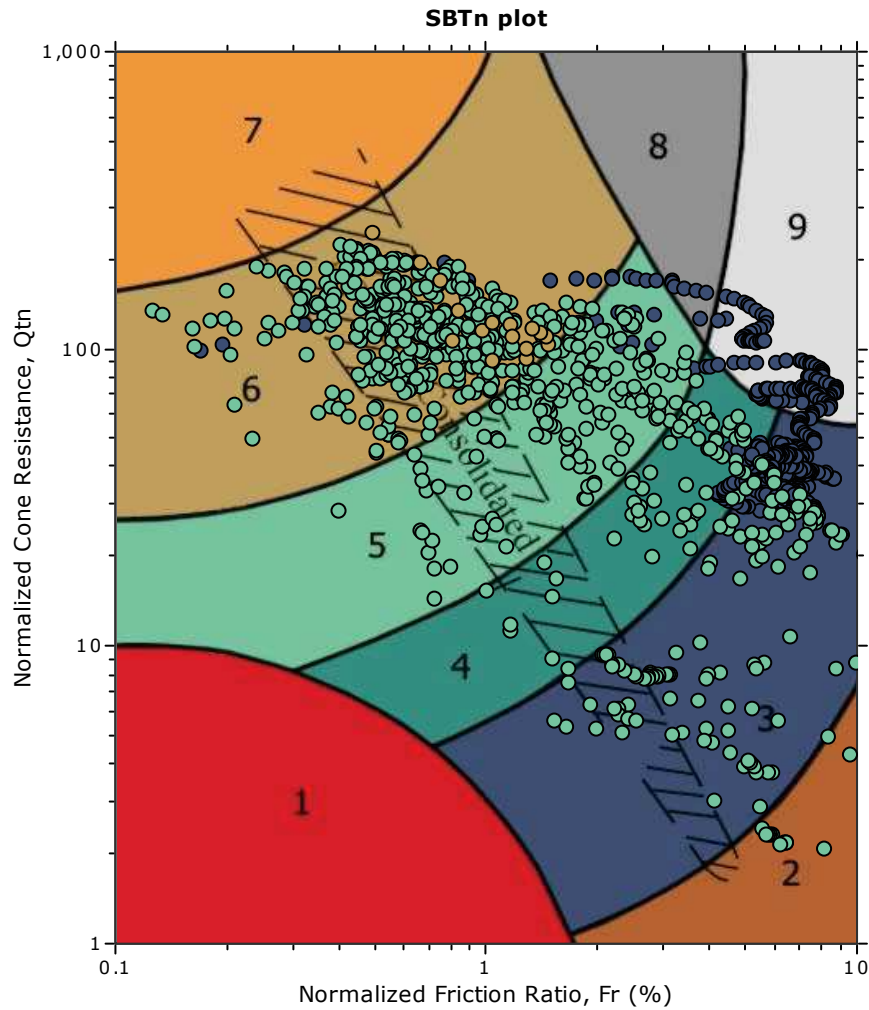


SBT legend

- | | | |
|--|---|---|
| ■ 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 |



SBT - Bq plots (normalized)

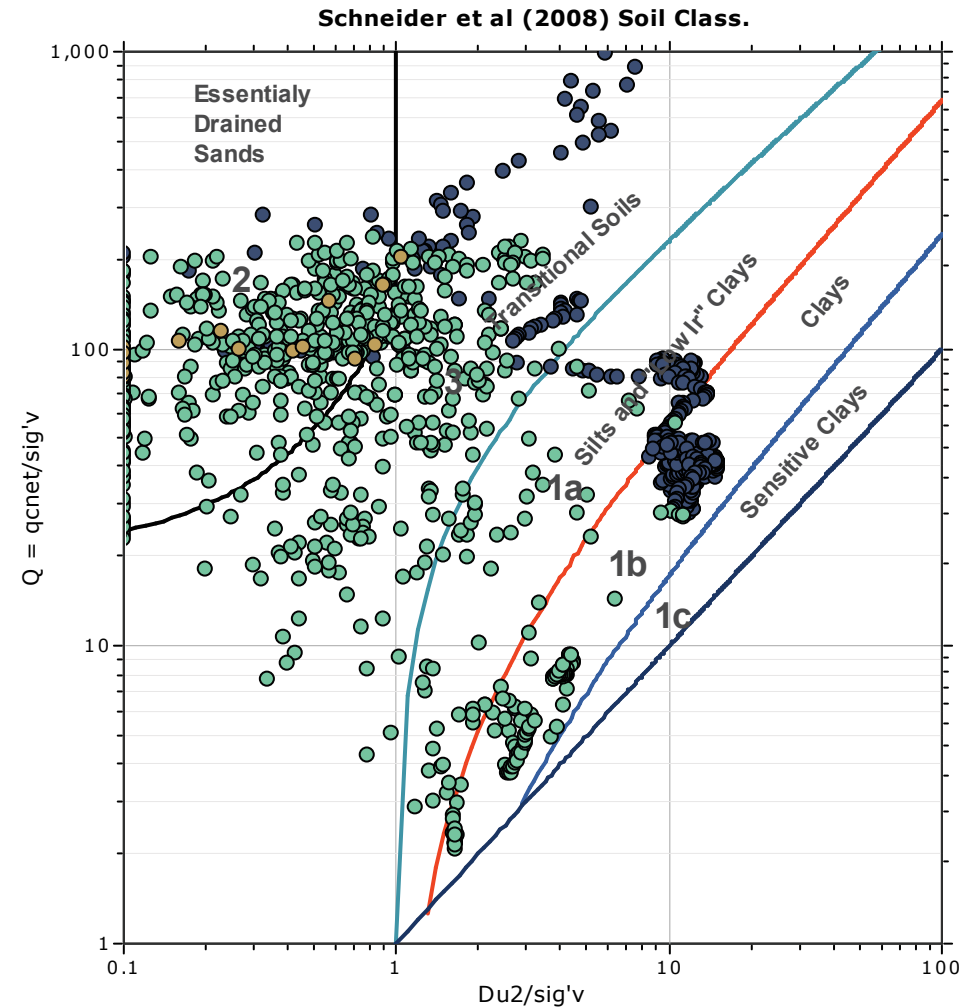
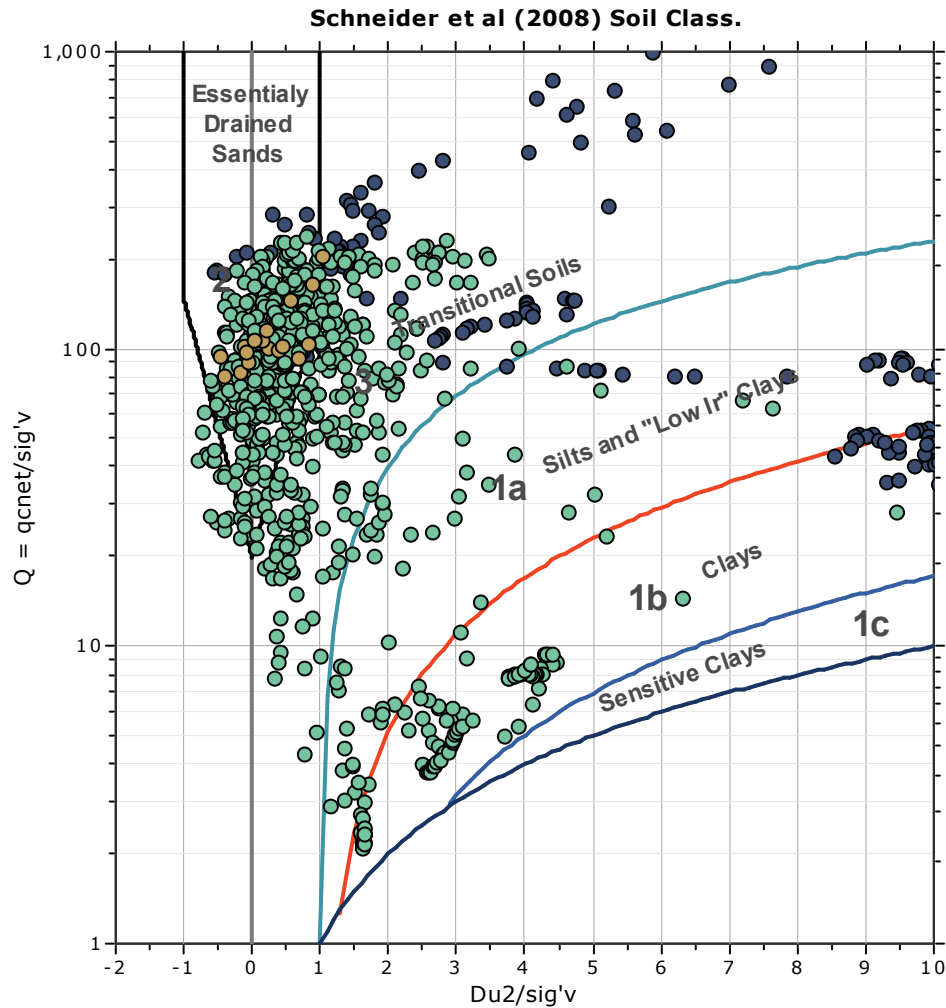


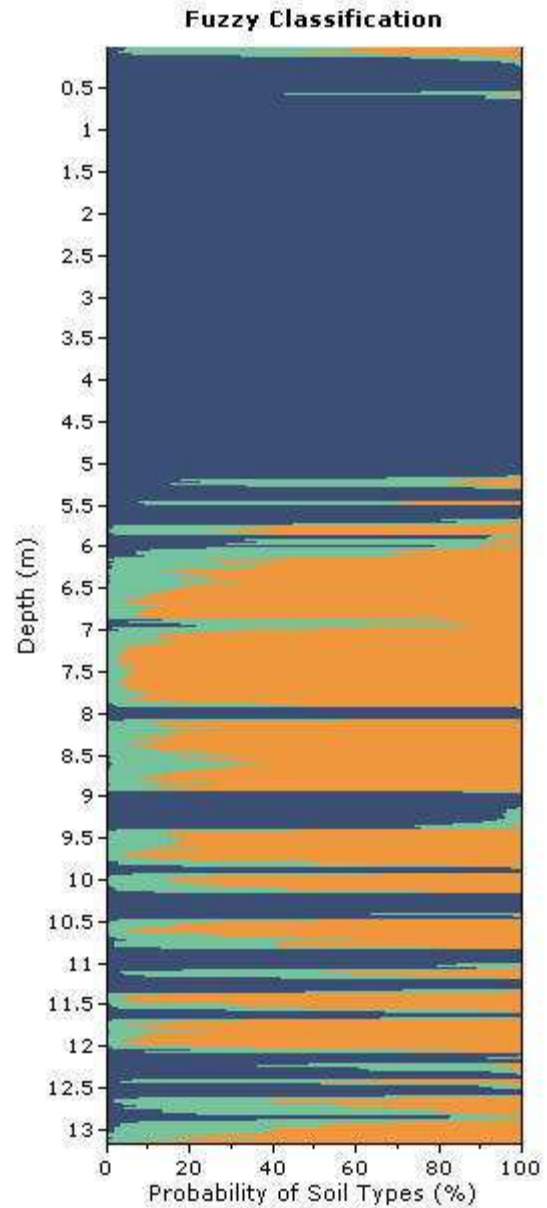
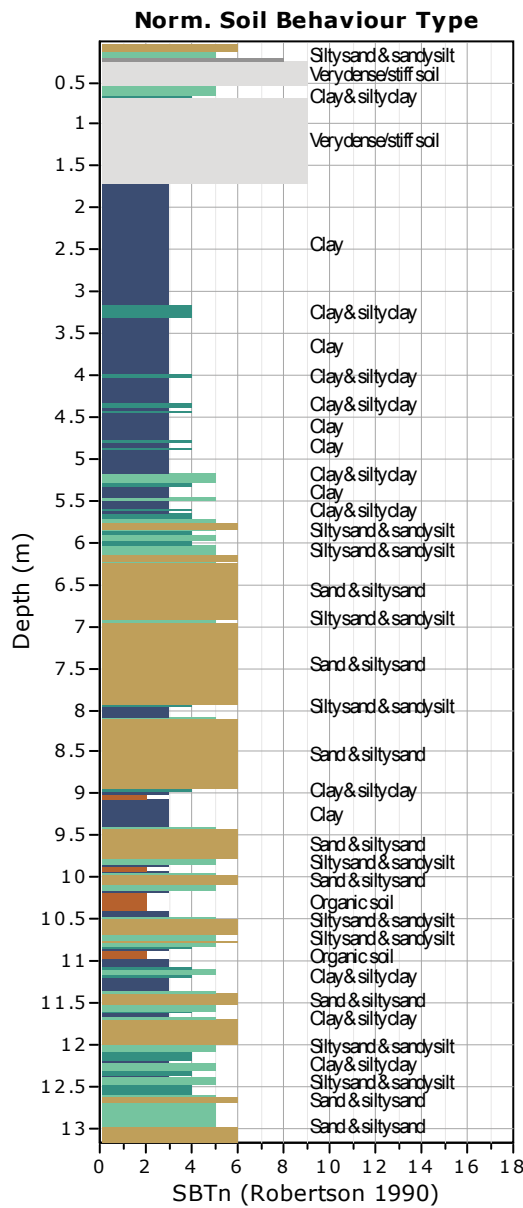
SBTn legend

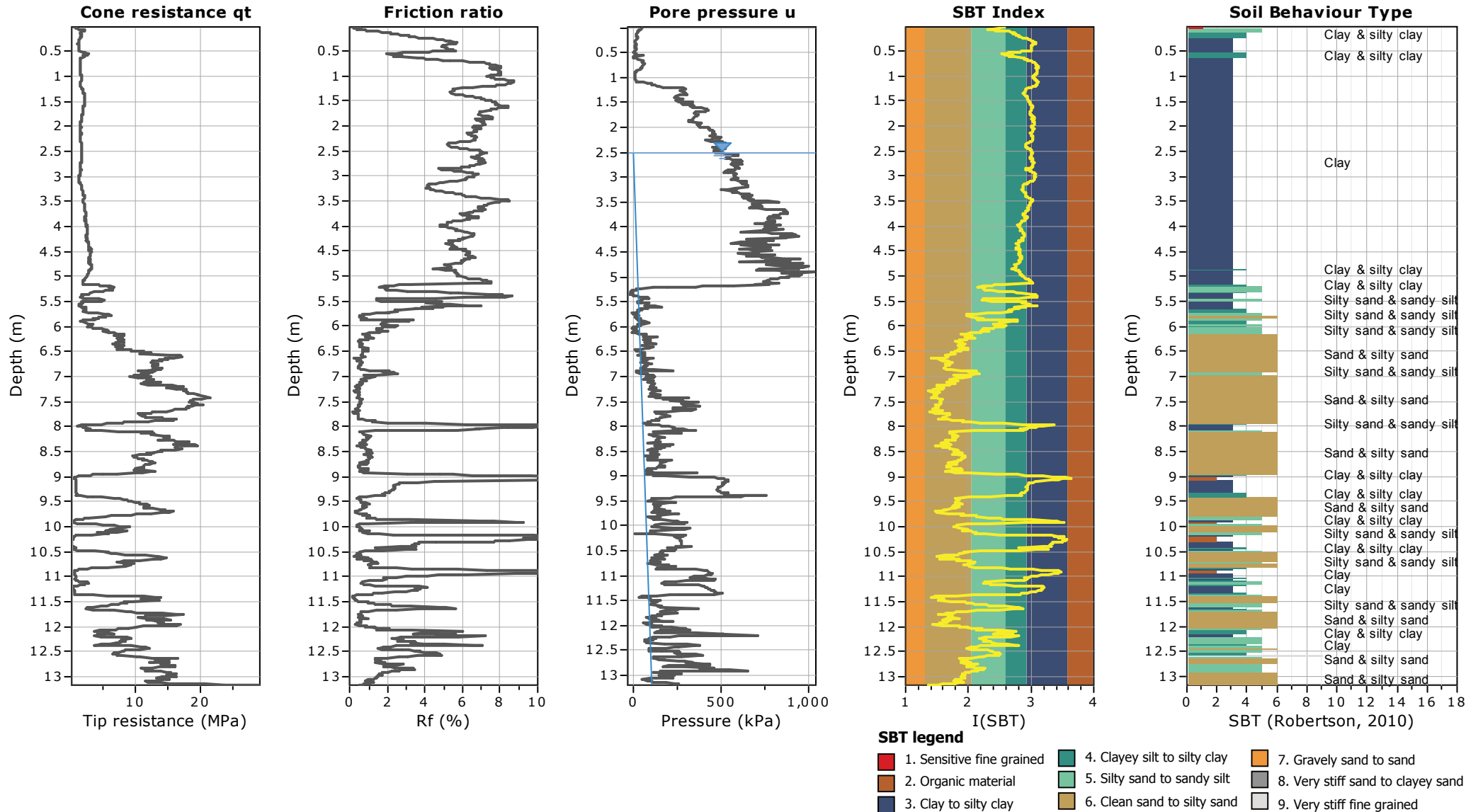
- | | | |
|---|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained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

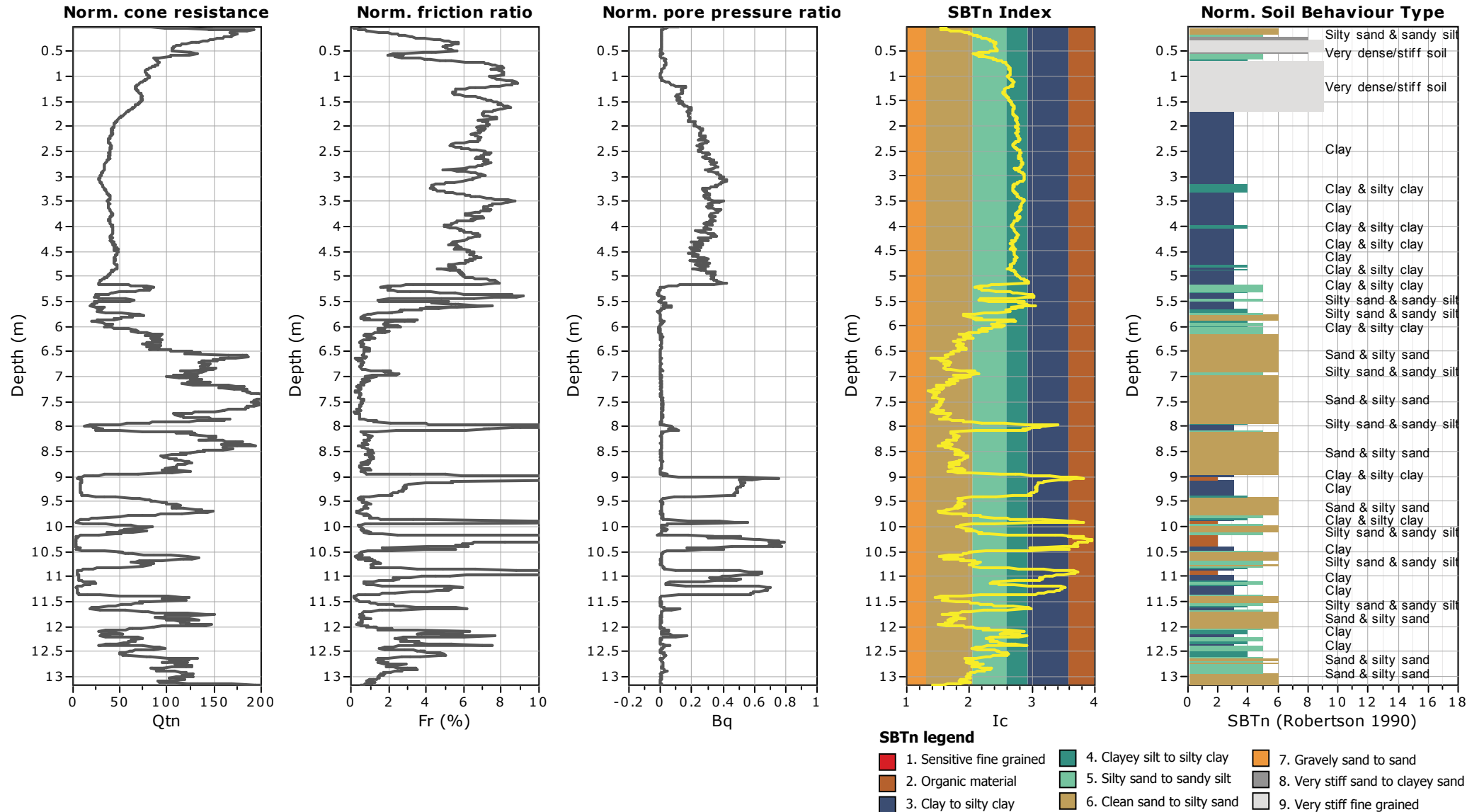


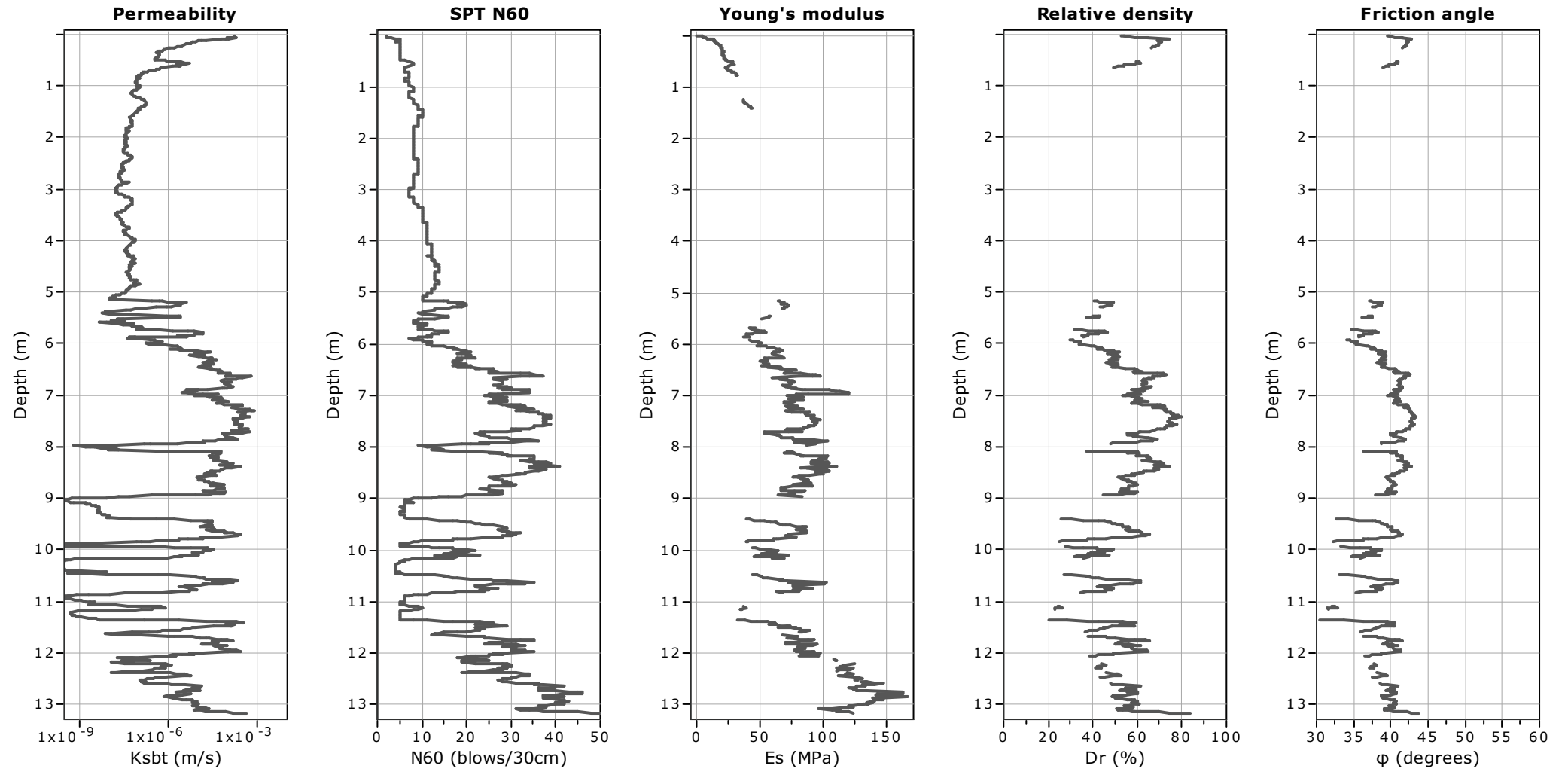
Bq plots (Schneider)







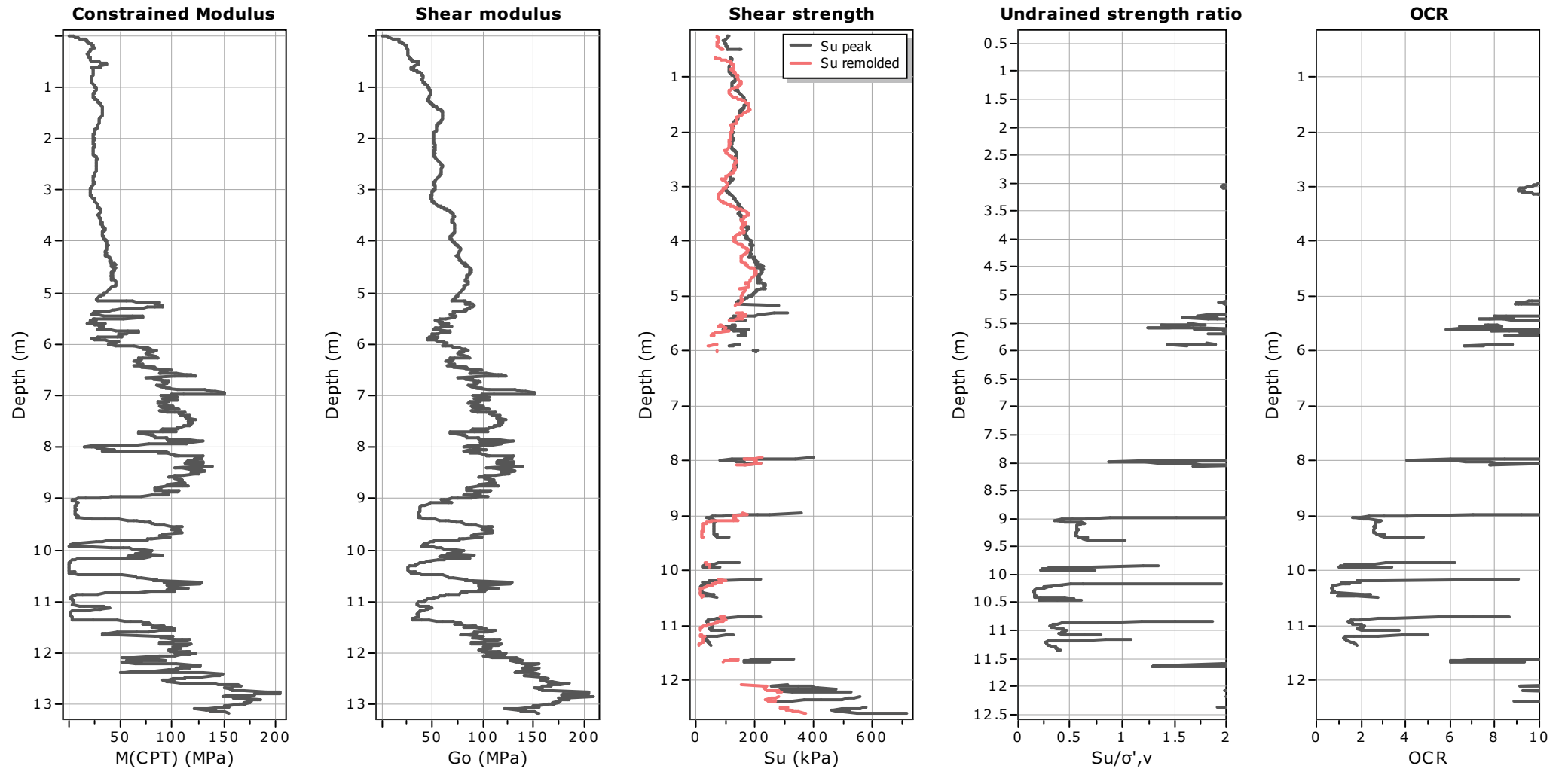




Calculation parameters

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)

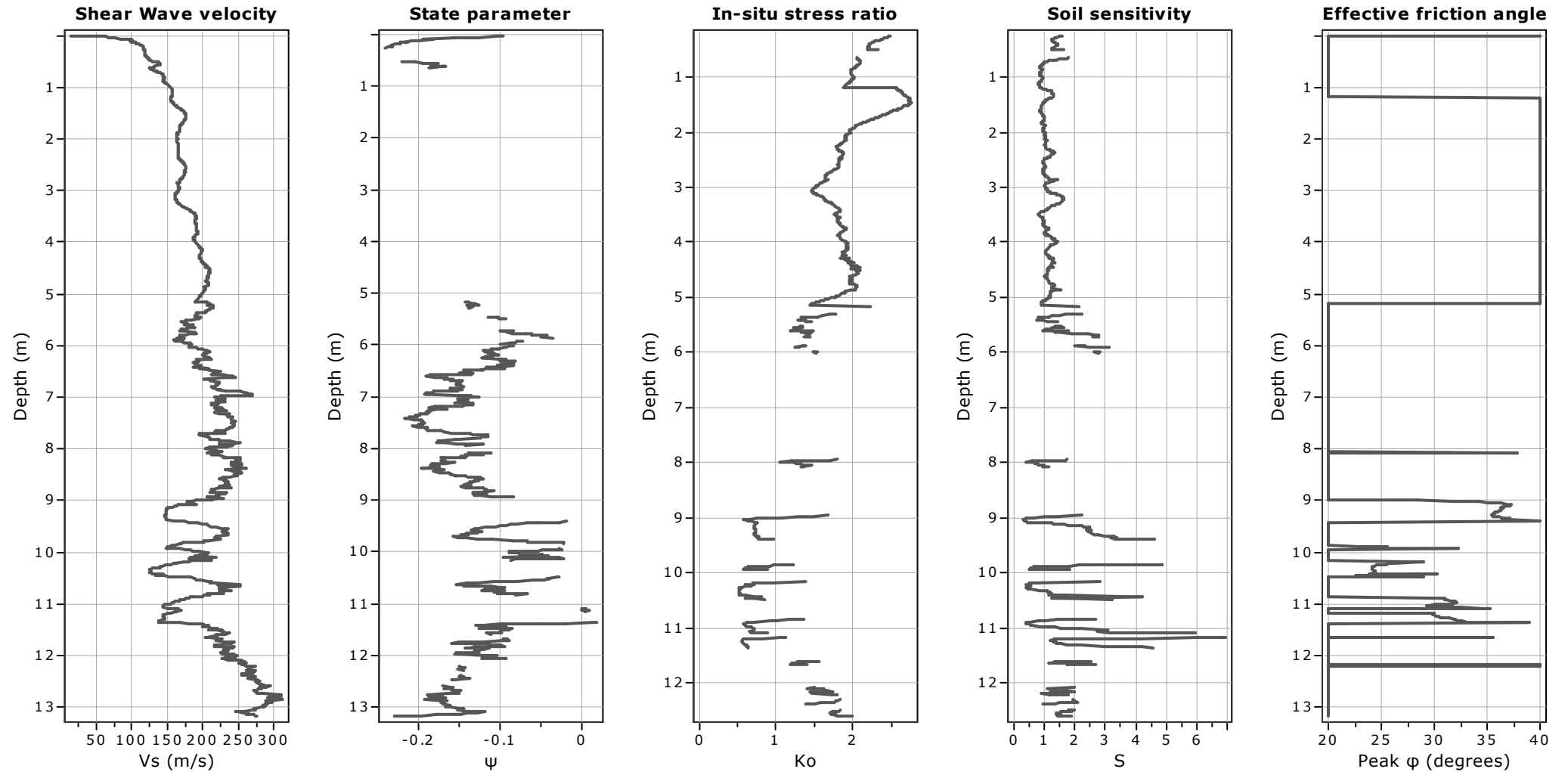
Relative density constant, C_{Dr} : 350.0
 Phi: Based on Kulhavy & Mayne (1990)
 ○ User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_{in} (Robertson, 2009)
 Go: Based on variable *alpha* using I_c (Robertson, 2009)
 Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33
 ○ User defined estimation data
 ○ Flat Dilatometer Test data



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—○— User defined estimation data



Dott. Rocco Carbonella

Bologna Via Toscana 119
rocco.carbonella@fastwebnet.it
<http://www.roccocarbonella.it>

Project: 23_006C

Location: Prato - La Querce

CPT: CPTU3

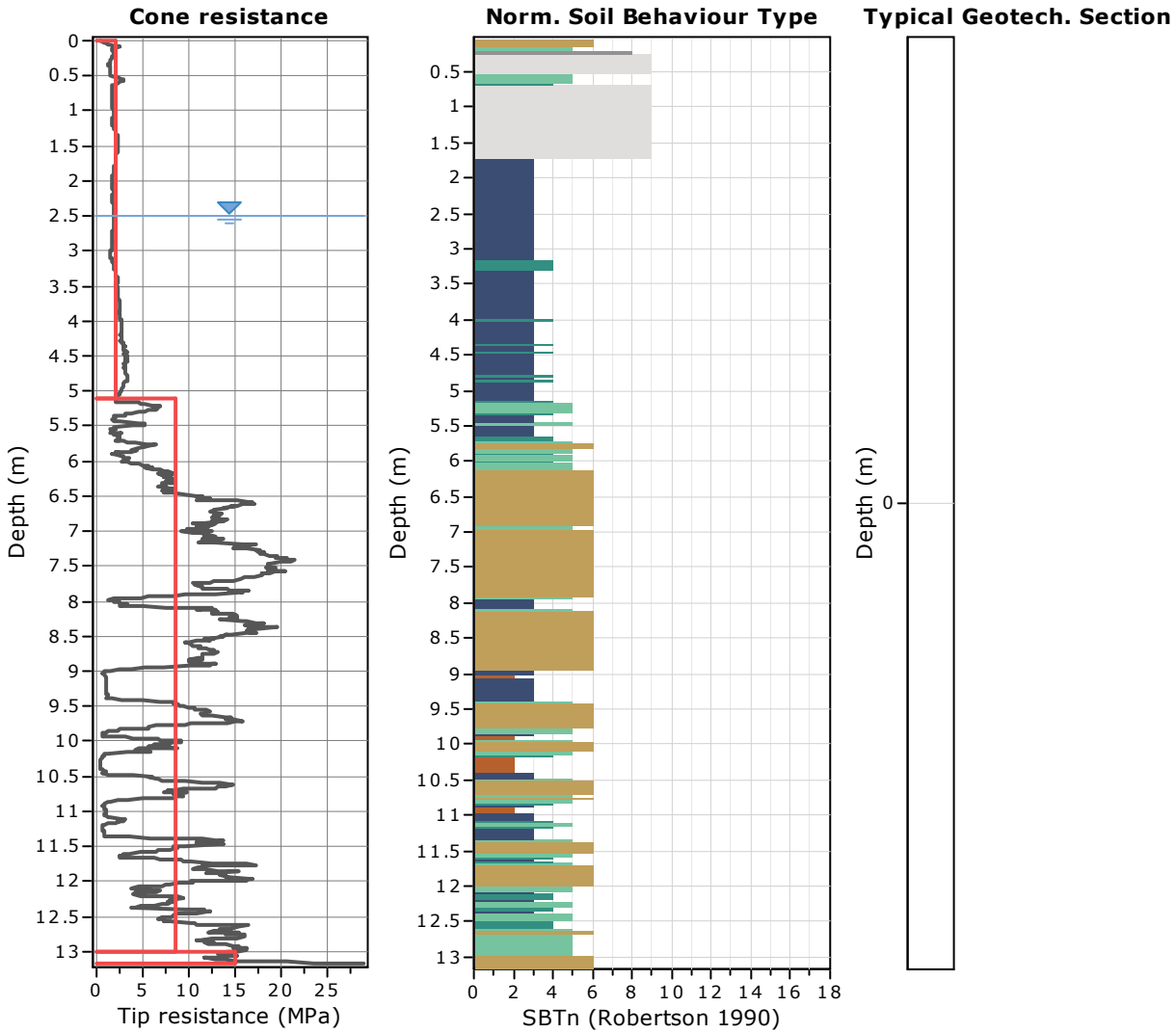
Total depth: 13.17 m, Date: 17/02/2023

Surface Elevation: 0.00 m

Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: Pagani

Cone Operator: Carbonella - Lioce



Tabular results

| | | |
|--|--|-----------------------------------|
| ::: Layer No: 1 ::: | | |
| Code: litotipo A Start depth: 0.00 (m), End depth: 5.10 (m) | | |
| Description: Clay | | |
| Basic results | | |
| Total cone resistance: 2.13 ±0.52 MPa | Estimation results | Constrained Mod.: 28.87 ±7.35 MPa |
| Sleeve friction: 129.24 ±40.44 kPa | Permeability: 2.35E-06 ±1.72E-05 m/s | Go: 56.36 ±17.81 MPa |
| SBT _n : 3 | N60: 8.99 ±2.48 blows | Su: 150.20 ±35.08 kPa |
| SBT _n description: Clay | Es: 27.81 ±9.07 MPa | Su ratio: 3.71 ±1.65 |
| | Dr (%): 0.00 ±0.00 | O.C.R.: 17.12 ±7.61 |
| | ö (degrees): 0.00 ±0.00 ° | |
| | Unit weight: 18.77 ±0.66 kN/m ³ | |

:: Layer No: 2 ::**Code:** litotipo b **Start depth:** 5.10 (m), **End depth:** 13.00 (m)**Description:** Silty sand & sandy silt**Basic results**

Total cone resistance: 8.45 ±5.57 MPa

Sleeve friction: 102.02 ±77.34 kPa

SBT_n: 5SBT_n description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 4.58E-05 ±9.27E-05 m/s

N60: 21.73 ±10.82 blows

Es: 80.55 ±24.61 MPa

Dr (%): 54.45 ±11.63

ö (degrees): 39.53 ±2.24 °

Unit weight: 18.67 ±1.11 kN/m³

Constrained Mod.: 76.65 ±45.02 MPa

Go: 90.74 ±36.62 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

:: Layer No: 3 ::**Code:** litotipo c **Start depth:** 13.00 (m), **End depth:** 13.17 (m)**Description:** Sand & silty sand**Basic results**

Total cone resistance: 15.00 ±2.98 MPa

Sleeve friction: 166.90 ±32.31 kPa

SBT_n: 6SBT_n description: Sand & silty sand**Estimation results**

Permeability: 2.51E-05 ±3.52E-05 m/s

N60: 37.35 ±4.33 blows

Es: 115.39 ±9.61 MPa

Dr (%): 57.93 ±5.96

ö (degrees): 40.33 ±0.92 °

Unit weight: 19.89 ±0.24 kN/m³

Constrained Mod.: 144.62 ±12.04 MPa

Go: 144.62 ±12.04 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00



Dott. Rocco Carbonella
Bologna Via Toscana 119
rocco.carbonella@fastwebnet.it
<http://www.roccocarbonella.it>

CPT: CPTU3

Total depth: 13.17 m, Date: 17/02/2023

Surface Elevation: 0.00 m

Coords: X:0.00, Y:0.00

Cone Type: Pagani

Cone Operator: Carbonella - Lioce

Project: 23_006C

Location: Prato - La Querce

Summary table of mean values

| From depth To depth (m) | Thickness (m) | Permeability (m/s) | SPT _{N60} (blows/30cm) | E _s (MPa) | D _r | Friction angle | Constrained modulus, M (MPa) | Shear modulus, G ₀ (MPa) | Undrained strength, S _u (kPa) | Undrained strength ratio | OCR | Unit weight (kN/m ³) |
|-------------------------------|------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------|-------------------|------------------------------------|---|--|--------------------------------|--------|-------------------------------------|
| 0.00 | 5.10 | 2.35E-06 | 9.0 | 27.8 | 0.0 | 0.0 | 28.9 | 56.4 | 150.2 | 3.7 | 17.1 | 18.8 |
| 5.10 | | (±1.72E-05) | (±2.5) | (±9.1) | (±0.0) | (±0.0) | (±7.3) | (±17.8) | (±35.1) | (±1.6) | (±7.6) | (±0.7) |
| 5.10 | 7.90 | 4.58E-05 | 21.7 | 80.6 | 54.5 | 39.5 | 76.6 | 90.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 18.7 |
| 13.00 | | (±9.27E-05) | (±10.8) | (±24.6) | (±11.6) | (±2.2) | (±45.0) | (±36.6) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±1.1) |
| 13.00 | 0.17 | 2.51E-05 | 37.4 | 115.4 | 57.9 | 40.3 | 144.6 | 144.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 19.9 |
| 13.17 | | (±3.52E-05) | (±4.3) | (±9.6) | (±6.0) | (±0.9) | (±12.0) | (±12.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.0) | (±0.2) |

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

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

:: Unit Weight, g (kN/m³) ::

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

where g_w = water unit weight

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

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

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

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

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

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

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

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

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

:: Relative Density, Dr (%) ::

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

:: State Parameter, ψ ::

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

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

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

(applicable only to SBT_n: 5, 6, 7 and 8)

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

If $I_c > 2.20$

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

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

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

If $I_c \leq 2.20$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

:: Overconsolidation Ratio, OCR ::

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

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

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

:: In situ Stress Ratio, K_0 ::

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

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

:: Soil Sensitivity, S_t ::

$$S_t = \frac{N_s}{F_r}$$

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

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

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

(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)

Firmato da:

FRONTERA SALVATORE

codice fiscale FRNSVT75D19I468I

num.serie: 390031

emesso da: InfoCamere Qualified Electronic Signature CA

valido dal 03/05/2021 al 03/05/2024