



# COMUNE DI CASTEL MAGGIORE (BO)

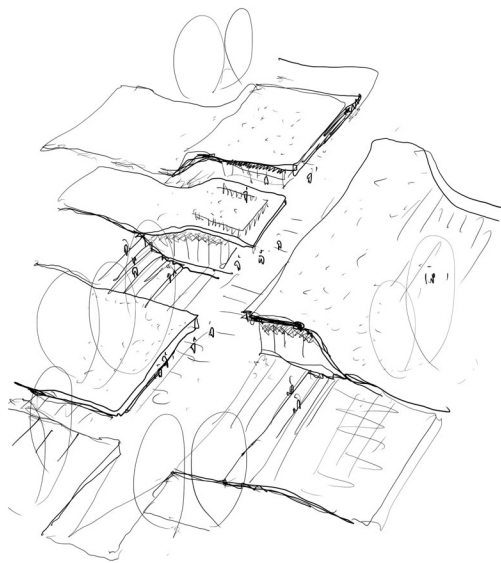
3° Settore LL.PP. e Ambiente

## BIBLIOTECA E STRUTTURA POLIVALENTE CIG 775286281C – CUP G77H16000690004

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:

**Geom. Lucia CAMPANA**

Via Matteotti 10 - 40013\_Castel Maggiore (BO)  
mail: [lavori.pubblici@comune.castel-maggiore.bo.it](mailto:lavori.pubblici@comune.castel-maggiore.bo.it)  
pec: [comune.castelmaggiore@cert.provincia.bo.it](mailto:comune.castelmaggiore@cert.provincia.bo.it)  
T +39 0516386751



**S.B.ARCH. Studio Bargone Architetti Associati** 

15, via DEL COLLE DI MEZZO  
I\_00143 Roma (RM)  
T +39 06 51981103, F +39 0742 357775  
email: [info@studiobargone.it](mailto:info@studiobargone.it)  
pec: [federico.bargone@archiworldpec.it](mailto:federico.bargone@archiworldpec.it)

Arch. **Federico BARGONE**

Arch. **Francesco BARTOLUCCI**

Arch. **Enrico AULETTA**

Ing. **Luigi LUCCIOLI**

Per. Ind. **Giorgio DEMOFONTI**

Ing. **Stefano ROSMANI**

OGGETTO:  
PROGETTO DEFINITIVO/ESECUTIVO

DATA  
Febbraio 2020

**Allegato b1**

Relazione GEOLOGICA, IDROLOGICA,  
IDRAULICA E GEOTECNICA (fornita da  
Amm.ne Comunale)

NOTE:

REV:

**Provincia di Bologna  
Comune di Castel Maggiore**

**REALIZZAZIONE EDIFICIO  
PER BIBLIOTECA E  
STRUTTURA POLIVALENTE**



**Dott. Geol. Alessandro Ghinoi**  
**Via Cortina d'Ampezzo, 17 – 41125**  
**Modena**  
**Tel. 340-4912843**  
**e-mail: ghinoialessandro@gmail.com**

**DICEMBRE 2019**





Dott. Geol. Alessandro Ghinoi  
Via Cortina d'Ampezzo, 17 – 41125 Modena  
Tel: 340-4912843  
e-mail: ghinoialessandro@gmail.com

Modena, 20/12/2019

## **RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA**

---

### **INDICE CONTENUTI**

Premessa.....	2
1. Inquadramento geografico-fisico .....	3
2. Inquadramento geologico, geomorfologico ed idrogeologico .....	5
3. Indagini geognostiche e modello geologico-geotecnico.....	13
4. Indagine sismica e microzonazione sismica comunale .....	22
5. Analisi di risposta sismica locale .....	27
6. Effetti di sito.....	33
7. Sintesi dell'analisi dei dati raccolti e conclusioni .....	39

### **ALLEGATI**



## **PREMESSA**

Nella presente relazione vengono trattati gli aspetti geologici e sismici inerenti il progetto di realizzazione di un edificio da destinarsi a biblioteca comunale ed a struttura polivalente all'interno di un'area verde destinata a servizi in Castel Maggiore (BO). L'area è ubicata tra Via Bondanello, a sud, Via Ilaria Alpi, ad est, e Via Mazzacurati, ad ovest. Lo studio è stato condotto nel rispetto delle normative vigenti in materia, DM 11.03.1988, con riferimento specifico agli aspetti sismici come da DM 17.01.2018.

Per l'adempimento delle specifiche normative, è stato effettuato un sopralluogo sull'area in data 16/07/2019 al fine di verificarne l'idoneità geologica e geomorfologica.

Per la caratterizzazione litostratigrafia e geotecnica dei terreni di sottofondazione, in data 17/07/2019 sono state eseguite 3 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu), spinte fino alla profondità di 20 m, in corrispondenza del terreno naturale su cui verrà realizzata la nuova struttura.

Per la classificazione sismica del terreno di sottofondazione è stata eseguita un'indagine a sismica attiva MASW nell'area in progetto e sono stati tenuti in considerazione, per confronto, anche i risultati di un'indagine penetrometrica con cono sismico (SCPT) eseguita in prossimità dell'area nel 2007 e reperibile nello studio di microzonazione sismica per l'Unione Reno-Galliera del 2013. La MASW di nuova esecuzione ha permesso di interpretare il profilo della velocità delle onde di taglio "S" con la profondità, mentre la prova d'archivio SCPT ha consentito di determinare i profili, con la profondità, sia delle velocità delle onde "P" che delle onde "S"; entrambe le prove geofisiche hanno permesso di calcolare il parametro di normativa  $V_{s30}$ , funzionale alla definizione della categoria di suolo di fondazione come da NTC18, nonché di ricostruire la sismostratigrafia locale, utile all'analisi di risposta sismica locale eseguita in questa sede al fine di ricavare gli spettri di risposta in superficie per gli stati limite SLO, SLD e SLV.

E' stata infine eseguita una verifica del potenziale di liquefazione in corrispondenza delle 3 verticali penetrometriche eseguite per questo studio.

La relazione si articola nel seguente modo:

- Inquadramento geografico - fisico
- Inquadramento geologico, geomorfologico ed idrogeologico
- Indagini geognostiche eseguite nell'area di studio
- Indagini sismiche eseguite nell'area di studio
- Analisi di risposta sismica locale
- Effetti di sito (liquefazione e cedimenti post-sismici)
- Sintesi dell'analisi dei dati raccolti e conclusioni

## **ALLEGATI**

## 1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO-FISICO

L'area esaminata, sulla quale verrà realizzato il nuovo edificio da destinare a nuova biblioteca comunale ed a struttura polivalente, è ubicata nel settore nord-orientale del Capoluogo, nell'area verde compresa tra le vie Bondanello, a sud, Ilaria Alpi, ad est, e Mazzacurati, ad ovest. Dal punto di vista topografico si trova in corrispondenza di un'ampia area pianeggiante, di passaggio tra la media e l'alta pianura, sub-orizzontale, con una debolissima pendenza verso ovest, e con quote che, in corrispondenza dell'area, sono prossime a 29 m s.l.m.

L'area si pone all'incirca lungo la linea spartiacque tra il bacino del Riolo-Canale Botte, ad ovest, ed il bacino del Canale Navile, che scorre in direzione SSO-NNE circa 1,5 km ad est. Lo spartiacque è un dosso fluviale su cui sorge Castel Maggiore, e su cui si allineano sia la SP4 che la linea ferroviaria Bologna-Padova. Un bacino di scolo secondario è quello dello Scolo Fossa Bondanello, che scorre con direzione S-N circa 700 m ad ovest.

Il clima è caratterizzato, nel periodo 1991-2015, da precipitazioni totali annue, in media, di 752 mm e temperature medie annue di  $14,3^{\circ}\text{C}^1$ , pari, rispettivamente, ad una variazione di +17 mm e  $+1,0^{\circ}\text{C}$  rispetto al periodo 1961-1990.

Nella cartografia regionale, l'area è compresa nella Tavola alla scala 1:25.000 nr. 221NO denominata "Bologna Nord-Est" (Figura 1), nella Sezione alla scala 1:10.000 nr. 221010 denominata "Castel Maggiore" e nell'Elemento alla scala 1:5.000 nr. 221014 denominato "Castel Maggiore" (Figura 2).

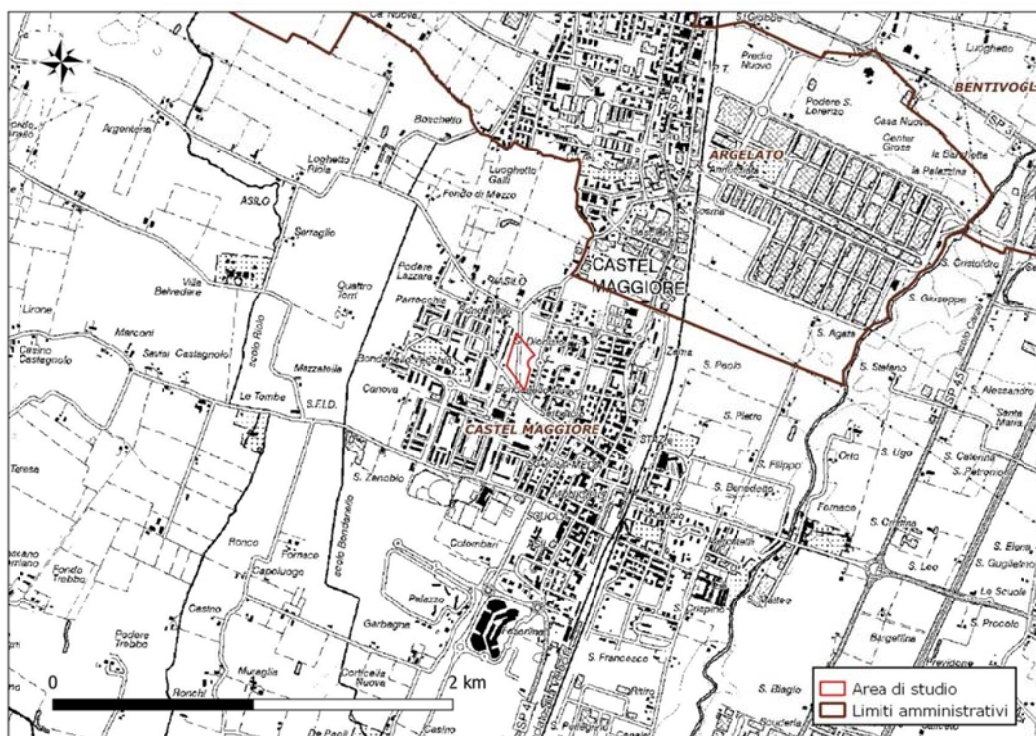


Figura 1 - Inquadramento geografico su C.T.R. con dettaglio topografico a scala 1:25.000 – Tavola nr. 221NO denominata "Bologna Nord-Est".

<sup>1</sup> Atlante Idroclimatico dell'Emilia-Romagna - <https://goo.gl/qseb7X>

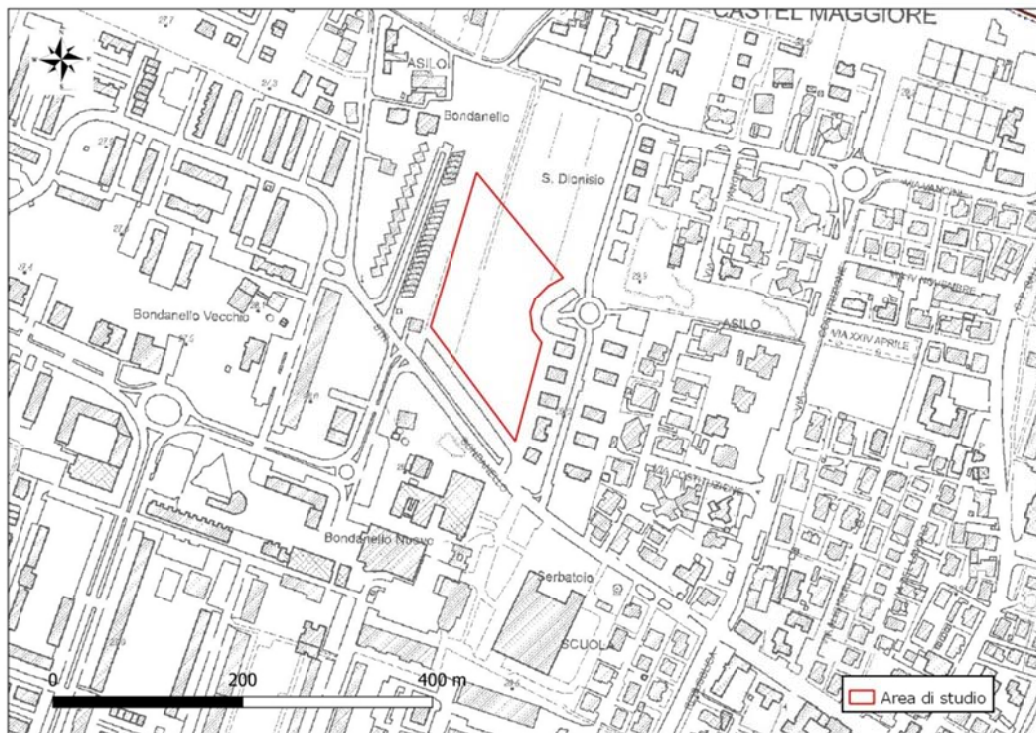


Figura 2 - Ubicazione dell'area d'indagine su C.T.R. con dettaglio topografico a scala 1:5.000 – scala di visualizzazione: 1:5.000; Elemento nr. 221014 denominato "Castel Maggiore".



Figura 3 - Ubicazione dell'area d'indagine su ortofoto satellitare (fonte: Google Satellite, versione WMS, visione: 27/03/2019).



## **2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO ED IDROGEOLOGICO**

Per la caratterizzazione geologica, litologica e stratigrafica del sito in esame si è fatto riferimento ai dati rappresentati nel Foglio 221 "Bologna", della Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000 ed ai dati della carta geologica a scala 1:25.000 del QC del PSC dell'Unione Reno-Galliera.

L'evoluzione geologica dell'area in studio va necessariamente inquadrata in un contesto regionale: essa ricade nella parte centro-meridionale della Pianura Padana; la formazione della pianura bolognese, nella quale è situato il territorio in esame, è legata all'evoluzione tettonico-sedimentaria del Bacino Padano, che costituisce, dal punto di vista geologico, un grande bacino subsidente plio-quadernario di tipo sedimentario, che comincia a delinearsi sin dall'inizio del triassico (225 milioni di anni fa) e viene interessato da subsidenza differenziata sia nel tempo che nello spazio, in diversi periodi (Mesozoico, ma soprattutto Pliocene e Quaternario), con movimenti verticali controllati dai caratteri strutturali profondi.

Il colmamento del bacino, nel suo comparto meridionale, si è realizzato principalmente in seguito all'attività sedimentaria dei corsi d'acqua appenninici: procedendo dal basso verso l'alto si rinvennero dapprima sedimenti di origine marina, successivamente sedimenti transizionali (lagunari e costieri) ed infine depositi di origine francamente continentale, che costituiscono le alluvioni quaternarie.

Osservando la distribuzione dei depositi quaternari, sulla base delle loro differenti caratteristiche sedimentologiche, morfologiche e tessiturali è possibile suddividere la pianura bolognese in tre fasce (alta, media e bassa), procedendo da sud verso nord.

Dal punto di vista geologico, l'area in esame ricade nella media pianura bolognese, in un settore deposizionalmente influenzato dalle alluvioni del Fiume Reno e del torrente Savena.

Come si può vedere dalla carta geologica del Foglio 221 "Bologna" (Figura 4), l'area è caratterizzata, in superficie, dalla presenza di sabbie e limi di canale e rotta fluviali, ascrivibili al Subsistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>).

Il Subsistema affiora estesamente occupando tutta la superficie della pianura, sin allo sbocco delle valli appenniniche nell'alta pianura, sotto forma di rari sedimenti ghiaiosi, affioranti limitatamente agli sbocchi vallivi dei corsi d'acqua principali, e, più estesamente, sedimenti sabbiosi, limosi e argillosi di canale, argine, rotta fluviale e piana inondabile. Nel sottosuolo bolognese della pianura, AES<sub>8</sub> presenta uno spessore massimo di 28 m, con limite inferiore erosivo sui depositi alluvionali e marini sottostanti.

In particolare, la sezione di Figura 4 mostra uno spessore di AES<sub>8</sub> pari a circa 20 m in corrispondenza dell'area di studio, direttamente in contatto con AES<sub>7</sub> (Subsistema di Villa Verrucchio) che qui è costituito da una prevalenza di ghiaie e sabbie di terrazzo e conoidi alluvionali.

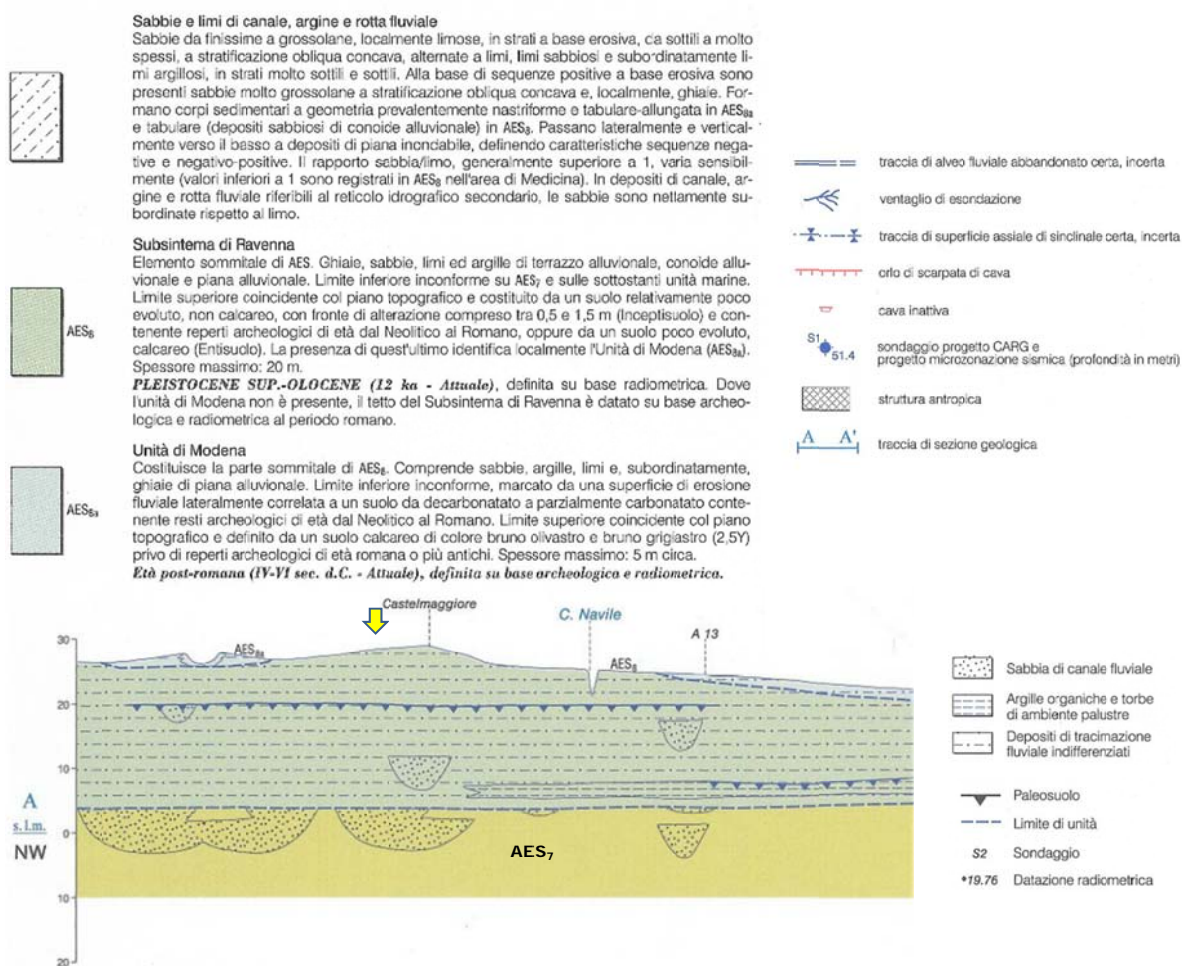
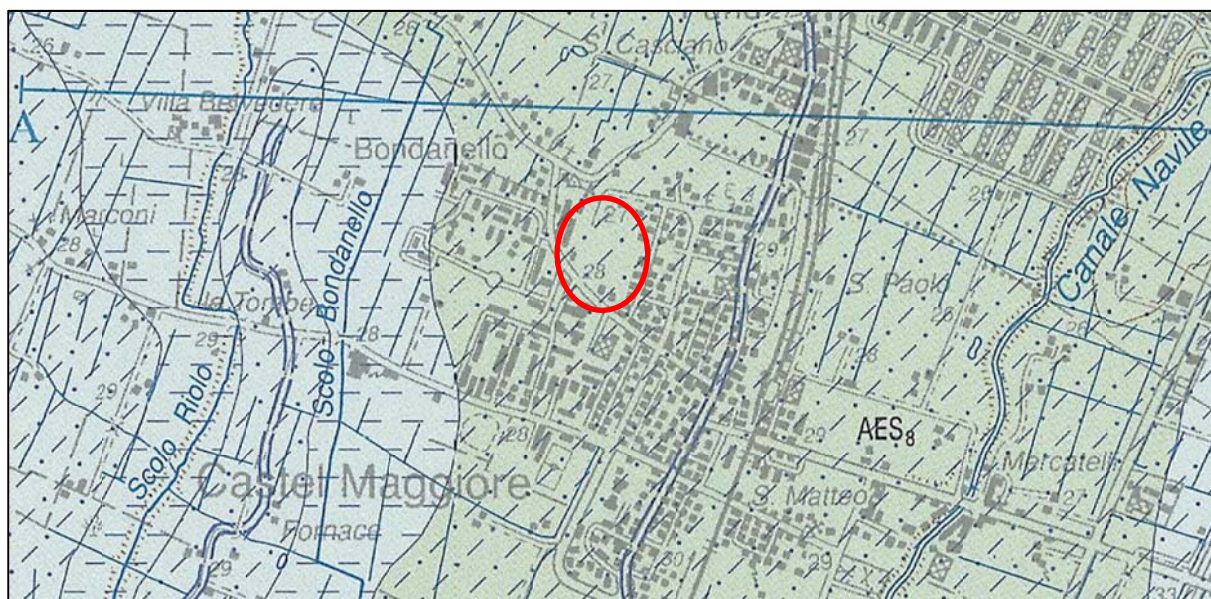


Figura 4 – Sopra: estratto del Foglio 221 “Bologna” della Carta Geologica d’Italia a scala 1:50.000 a cura di APAT – Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi tecnici; l’ellisse rossa individua l’area d’indagine. Sotto: tratto della sezione A-A’ del Foglio 221: la freccia gialla indica l’area di studio.



Oltre lo spessore più superficiale, la sezione geologica evidenzia la presenza, per l'intero spessore di AES<sub>8</sub>, di depositi di tracimazione fluviale indifferenziati, con un paleosuolo a circa 7 m di profondità dal p.d.c. e lenti sparse di sabbie di canale fluviale.

Anche la cartografia di QC/PSC dell'Unione Reno-Galliera di fatto conferma tale quadro litologico superficiale locale (Figura 5), indicando la presenza di sabbie di piana alluvionale.

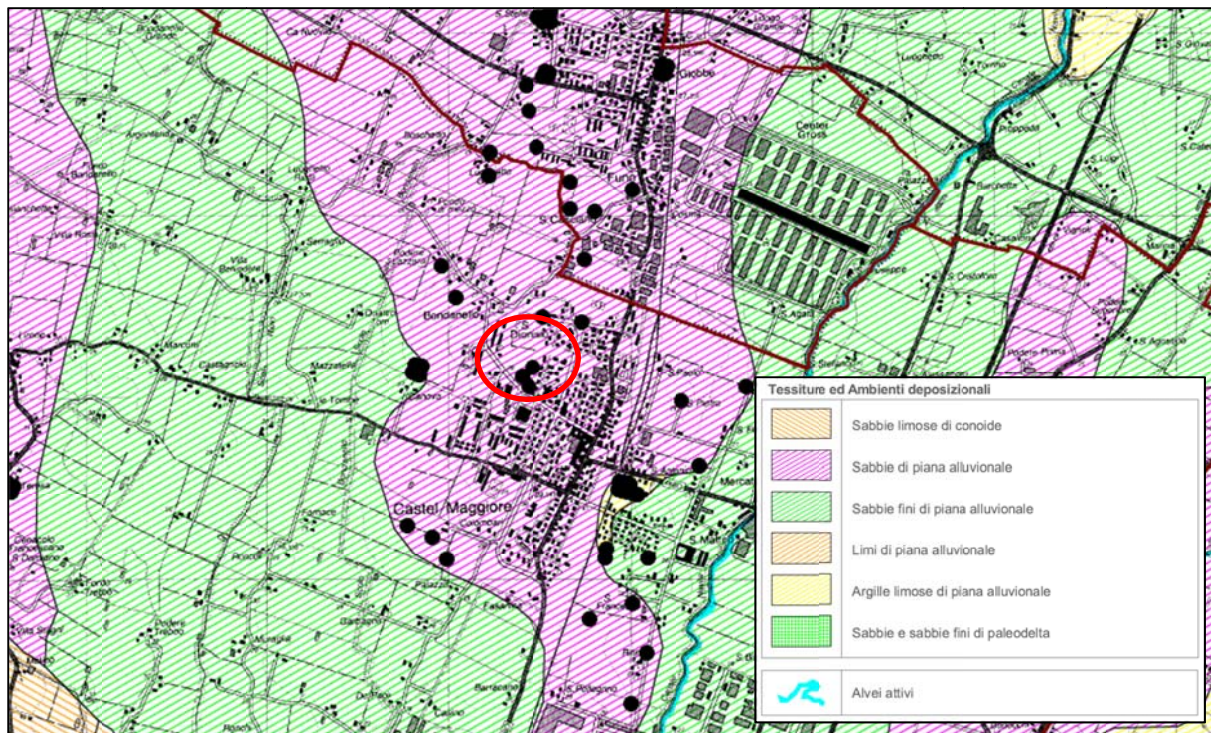


Figura 5 – Estratto Tav. AC.1.1a "Carta litologico-morfologica" – QC del PSC Unione Reno-Galliera. Il cerchio rosso individua l'area di studio.

Dall'Archivio prove geognostiche e geofisiche di riferimento, dell'Aggiornamento 2013 al PSC relativamente alla Pericolosità e microzonazione sismica, all'interno dell'area in esame viene individuata una verticale penetrometrica con cono sismico (sigla: 1\_csm/psc/CPTU1 – vedasi Allegato 1a di questa relazione), spinta fino a 30 m, da cui è possibile ricavare la sequenza stratigrafica locale (almeno per il settore nord-occidentale dell'area in esame): con sabbie presenti nel primo metro più superficiale, a conferma delle interpretazioni litologiche delle cartografie sopra esposte, e negli ultimi 3 m (da 27 a 30 m); tra i due livelli sabbiosi sono presenti terreni fini (argille e limi).

Un vicino pozzo per acqua, reperito dall'archivio delle indagini geognostiche della Regione Emilia-Romagna (Allegato 1b), identifica terreni fini da piano campagna fino a 18 m, seguiti da un primo livello sabbioso tra 18 e 20 m e da altri terreni fini fino a 27 m; da qui a 31 m, in coerenza con quanto restituito dalla CPTU d'archivio, sono presenti terreni sabbiosi, acquiferi; un terzo livello sabbioso è presente tra 57 e 58,5 m ed un quarto tra 64 e 70 m, intercalati a terreni fini limo-argillosi.

Da un punto di vista geomorfologico, la cartografia esaminata (Figura 4) evidenzia la presenza di forme legate alla paleo-dinamica fluviale, rappresentate da tracce di alvei fluviali abbandonati che, verso nord (oltre la porzione di Foglio 221 rappresentata in (Figura 4), terminano con ventagli d'esondazione. La stessa area di studio pare essere collocata su di un dosso fluviale, evidenziato dal profilo geologico passante per Castel Maggiore di Figura 4, di direzione SSO-NNE coincidente sia con quella degli alvei abbandonati che con quella dei corsi d'acqua attuali.

A scala minore, Figura 6 mostra l'area di studio, identificata dal cerchio rosso, posizionata in corrispondenza di un paleoalveo attribuito al Reno, delimitato ad est e a ovest da terreni sabbiosi, anche grossolani.

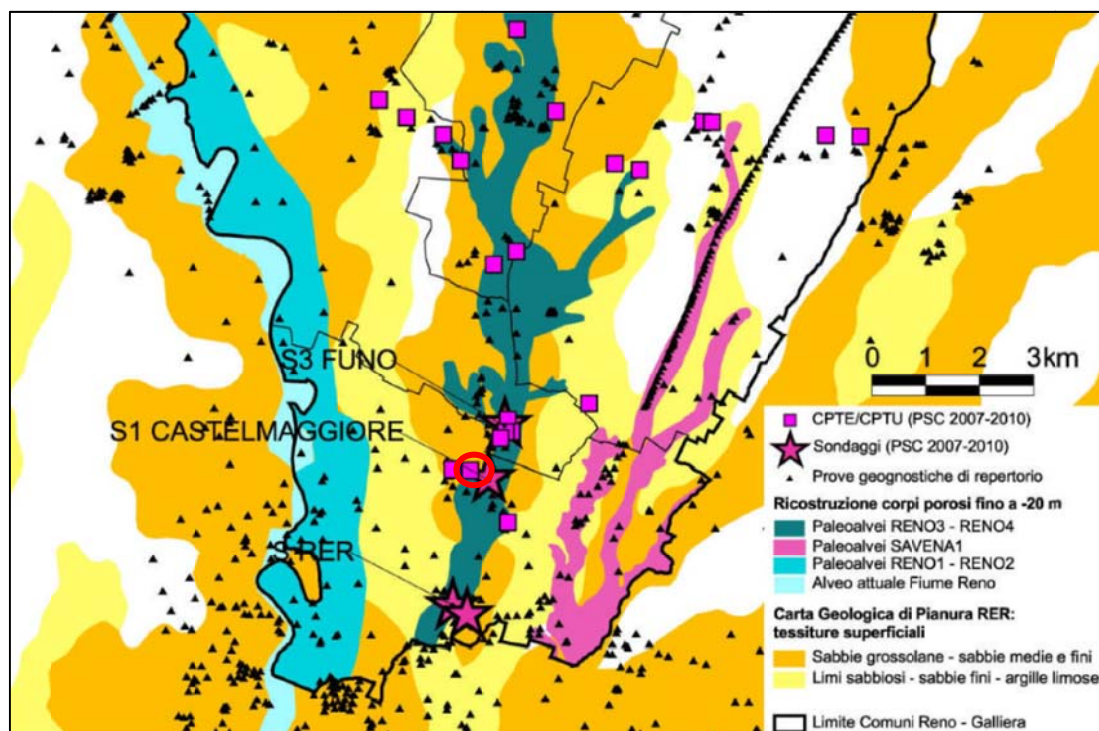


Figura 6 – Ricostruzione di sintesi dei corpi porosi fino a 20 metri di profondità (PSC Comune di Castel Maggiore). Il cerchio rosso identifica l'area di studio.

Per quanto riguarda l'idrografia superficiale, l'ambito ricade all'interno del bacino idrografico del Canale Navile, che scorre circa 1,5 km ad est rispetto all'area in esame (Figura 7). Il Canale Navile raccoglie tra l'altro le acque provenienti dall'area urbana nord di Bologna fino a Castel Maggiore, con un bacino imbrifero che si sviluppa nei territori dei comuni di Bologna, Castel Maggiore, Bentivoglio, Argelato e Casalecchio di Reno. Il suo bacino è dominato da superfici piatte monotone deprimenti verso NE, sulle quali gli elementi morfologici naturali sono riconducibili a dossi di pianura ed alle incisioni degli stessi corsi d'acqua, a cui si contrappongono i rilevati artificiali legati ad infrastrutture viarie.

Il bacino imbrifero del Navile, di circa 58 km<sup>2</sup>, è stato oggetto, negli ultimi 50 anni, di rilevanti urbanizzazioni. Tale fatto si è tradotto in un forte aumento delle portate di piena nei corsi d'acqua a causa del notevole incremento del coefficiente di deflusso e della riduzione del volume specifico d'invaso dovuta anche all'adozione, nei terreni ad uso agricolo, di nuovi sistemi di drenaggio come ad esempio il drenaggio tubolare sotterraneo.



Il regime delle portate del Navile è il risultato di una somma di diverse componenti. Quella che ha maggiore rilevanza sulle portate medie è il Canale di Reno, il quale, derivato dall'omonimo fiume mediante un manufatto inserito nella chiusa di Casalecchio, è in grado di trasportare fino a 10 m<sup>3</sup>/s. Gli altri apporti derivano dal bacino diretto, nelle sue componenti collinare ed urbana. Il bacino collinare ha un regime estremamente torrentizio, fortemente condizionato dalle precipitazioni e recapita le proprie acque nei canali Aposa e Moline, i quali unitisi confluiscono nelle acque provenienti dal Canale di Reno, dando vita al vero e proprio Canale Navile presso la "Bova", vicino alla stazione ferroviaria di Bologna. Il bacino urbano, invece, contribuisce in massima parte tramite gli scaricatori di piena della rete fognaria, quindi ogni volta che si verifica una precipitazione sufficiente a mettere in funzione tali dispositivi.

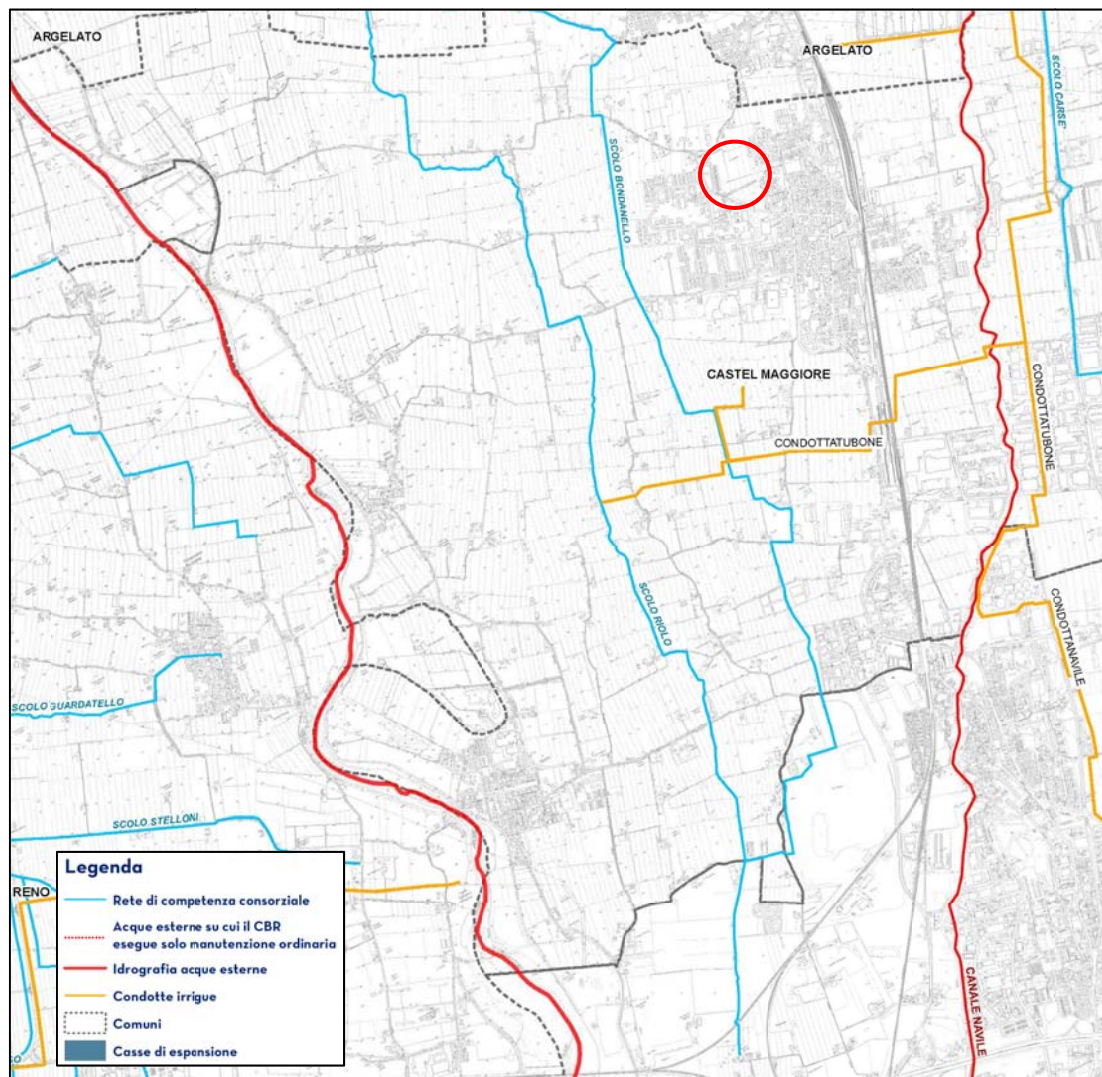


Figura 7 – Idrografia superficiale. Il cerchio rosso identifica l'area di studio.

Il fiume Reno, il corso d'acqua principale di riferimento per l'area, scorre invece in posizione più distante, circa 3 Km ad ovest dell'abitato di Castel Maggiore. L'idrografia secondaria è rappresentata da canali artificiali ad uso scolante, irriguo e promiscuo atti al drenaggio delle acque di circolazione superficiale verso i corsi d'acqua principali, la cui gestione è in carico al consorzio di Bonifica



Renana; per l'area in esame, in destra Reno, i corsi d'acqua d'interesse sono lo Scolo Bondanello e lo Scolo Riolo, il primo lambisce ad ovest il capoluogo, a circa 700 m dal comparto, mentre il secondo, scorre a circa 1 Km dal comparto d'indagine, sempre ad ovest.

Lo scolo Riolo ha origine nei pressi della tangenziale, a sud-ovest dell'area in esame; dopo un lungo tragitto nella pianura bolognese s'immette nel Canale Emiliano Romagnolo all'altezza di S. Pietro in Casale.

I due vettori vengono utilizzati per l'irrigazione di parte del territorio in destra Reno, nell'area irrigua prossima a Castel Maggiore; le funzionalità irrigue degli scoli Riolo e Bondanello sono attualmente garantite in parte da alimentazione proveniente dal fiume Reno attraverso la Canaletta della Ghisiliera ed in parte da derivazione dal CER.

Si segnalano situazioni di criticità per lo scolo Riolo, sul quale è attivo il monitoraggio ambientale su una stazione posta a valle dell'area in esame in comune di Argelato, dove si segnalava al 2014 uno stato ecologico scarso, con diversi problemi legati alla qualità delle acque.

L'ambito, che si sviluppa all'interno di un'area urbanizzata, non risulta interessato dal tracciato di corsi d'acqua, né da relative perimetrazioni delle aree di tutela; non si segnala nell'area nemmeno la presenza di scoli o canali del reticolo di bonifica ed il corso d'acqua della rete consortile più prossimo, è appunto lo scolo Bondanello.

Con riferimento alla "Mappa di Pericolosità delle Aree Potenzialmente interessate da alluvioni" (Figura 8) ed in particolare al reticolo naturale principale e secondario, l'ambito in esame ricade nelle aree interessate da pericolosità idraulica P2 – Alluvioni poco frequenti, connessa all'esondabilità combinata dei corsi d'acqua maggiori della zona.

Relativamente al Reticolo secondario di pianura, la pericolosità assegnata all'area in esame è la P2, associata alla possibilità di esondazione dei numerosi canali e fossi di scolo che solcano il territorio della pianura bolognese. Si fa notare la presenza di zone a pericolosità P3 solo lungo due fasce a nord dell'area in esame, presumibilmente dovute all'esondazione di fossi stradali a lato di via Agucchi-via Bondanello, e lungo un'ampia fascia sul lato occidentale dello Scolo Riolo.

Entro tali aree valgono le prescrizioni di cui all'art. 12 delle NTA della Variante alle Norme del "Piano Stralcio per il sistema idraulico Navile – Savena Abbandonato" ed in particolare, ai sensi del comma 1:

*"Nelle aree potenzialmente interessate da alluvioni frequenti (P3) o poco frequenti (P2), le amministrazioni comunali ..... omissis ..... dovranno:*

- a. .... omissis .....*
- b. assicurare la congruenza dei propri strumenti urbanistici con il quadro della pericolosità d'inondazione caratterizzante le aree facenti parte del proprio territorio, valutando la sostenibilità delle previsioni relativamente al rischio idraulico, facendo riferimento alle possibili alternative localizzative e all'adozione di misure di riduzione della vulnerabilità dei beni e delle persone esposte.*
- c. consentire, prevedere e/o promuovere, anche mediante meccanismi incentivanti, la realizzazione di interventi finalizzati alla riduzione della vulnerabilità alle inondazioni di edifici e infrastrutture.*

Inoltre, ai sensi del comma 3 del medesimo articolo, per le aree soggette al "fenomeno di inondazione generato dal reticolo di bonifica, oltre a quanto stabilito nel presente piano, si applica la Direttiva per la sicurezza idraulica nei

sistemi idrografici di pianura nel bacino del Reno approvata con Delibera C.I. n° 1/3 del 23/04/2008 e modificata con Delibera C.I. n° 1/2 del 25/02/2009".

Le norme della Variante PSAI nelle aree potenzialmente interessate da alluvioni frequenti (P2), richiedono pertanto che, nell'esecuzione degli interventi edilizi ed infrastrutture, vengano applicate misure di riduzione della vulnerabilità, in ottemperanza al principio di precauzione.

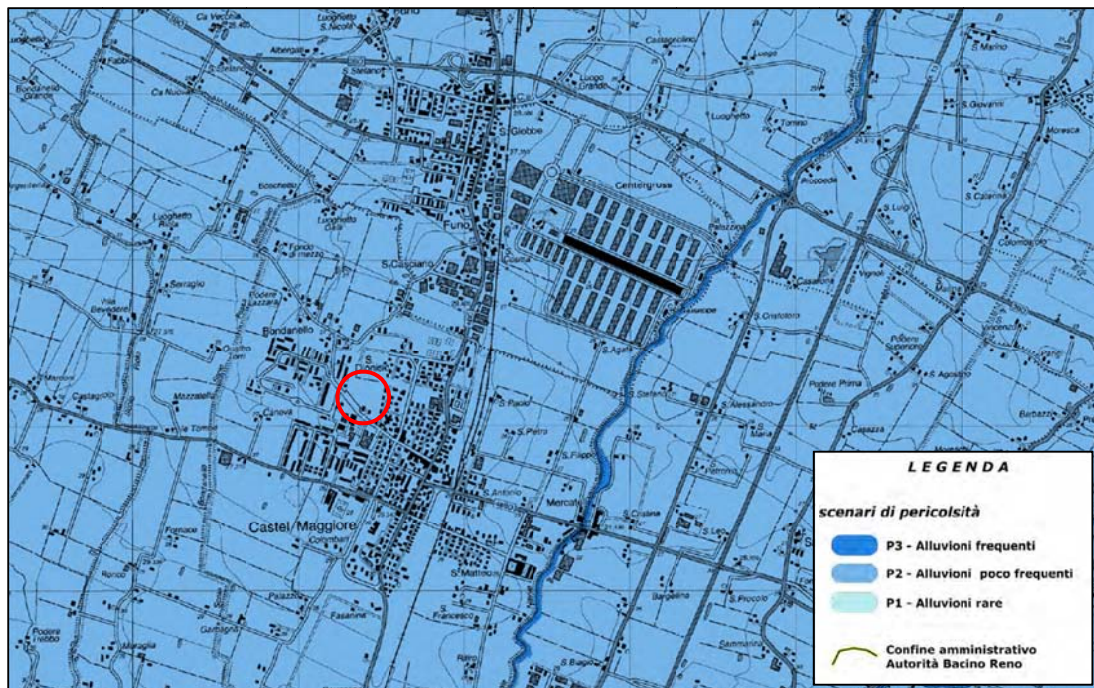


Figura 8 - Estratto Tav. MP6 – Variante di coordinamento PSAI – Mappa di pericolosità delle aree potenzialmente interessate da alluvioni - (Scala orig. 1: 25.000). Il cerchio rosso individua l'area di studio.

Per quanto riguarda l'idrogeologia, nell'immagine di Figura 9, estratta dal PSC dell'Associazione Terre di Pianura, si evidenziano i pozzi presenti sul territorio comunale di Castel Maggiore. La carta piezometrica mostra una isofreatica di 24 m s.l.m. in prossimità dell'area d'indagine, corrispondente ad una soggiacenza di circa 5 m dal p.d.c. ed uno spartiacque sotterraneo praticamente corrispondente con l'asse del paleoalveo su cui sorge gran parte del Capoluogo.

In corrispondenza delle 3 prove penetrometriche (CPTu) eseguite all'interno dell'area di progetto per questo studio, la superficie della falda freatica è stata misurata alla profondità di circa **3,1-3,4 m** dal p.c.

In occasione dell'esecuzione delle 2 prove penetrometriche (CPTu) pregresse nel marzo 2019, ubicate pochi metri a nord e a sud rispetto a quelle eseguite per questo studio, la superficie della falda freatica è stata misurata alla profondità di circa **1,6 m** dal p.c.



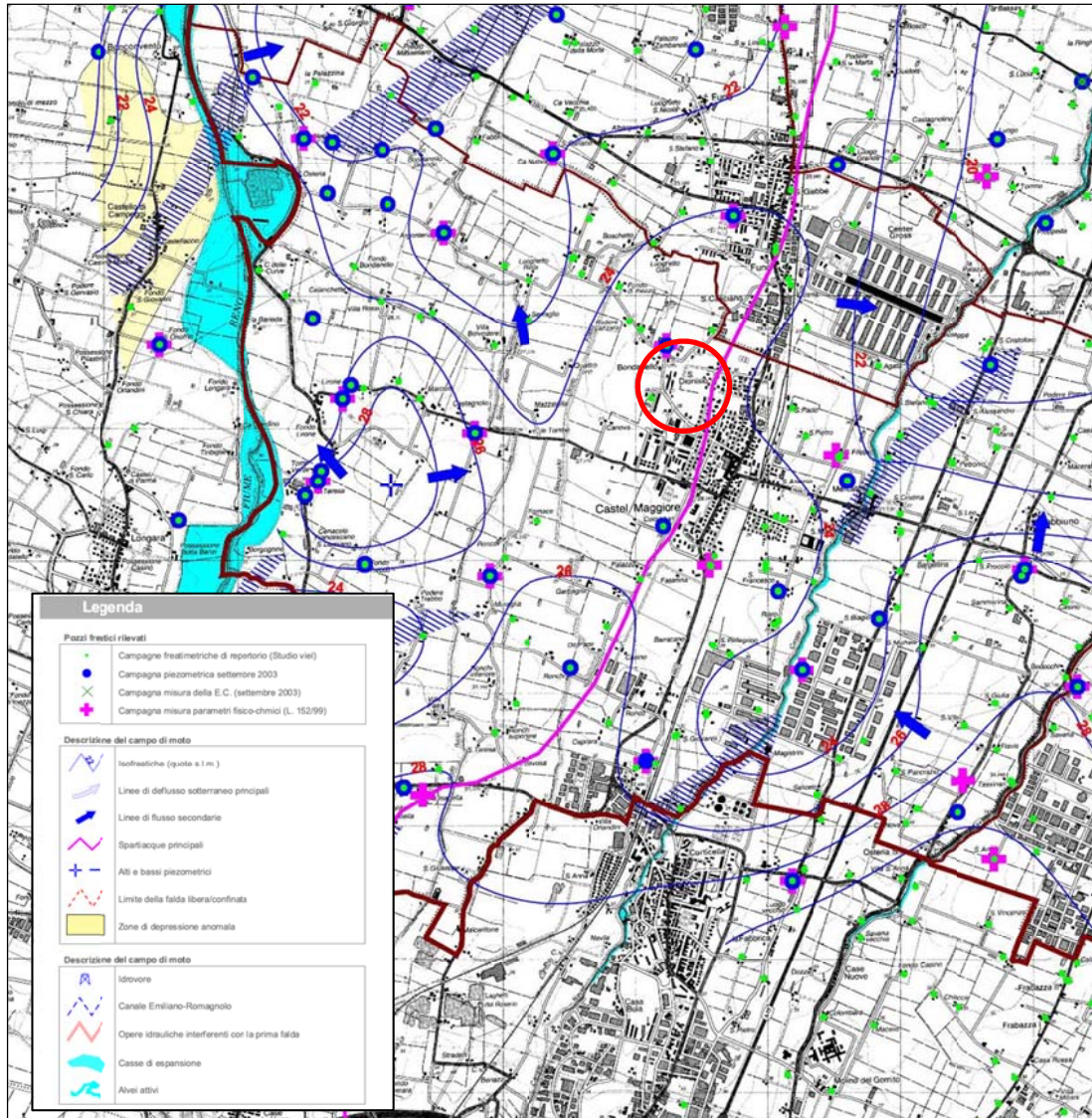


Figura 9 – Ubicazione pozzi e piezometria (estratto Tav. AC.1.2a – Carta Idrogeologica - PSC Unione Reno Galliera Terre di Pianura). Il cerchio rosso identifica l'area d'indagine.

### 3. INDAGINI GEOGNOSTICHE E MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO

In data 17/07/2019 è stata eseguita una campagna geognostica nell'area in oggetto al fine di analizzare le caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche dei terreni che saranno interessati dall'intervento in progetto. La campagna ha visto l'esecuzione di 3 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu). Le ubicazioni delle prove eseguite sono mostrate nella planimetria riportata in Figura 10, mentre i diagrammi penetrometrici, insieme ai tabulati di campagna, sono riportati in Allegato 2, unitamente ai profili dei principali parametri geotecnici stimati. Nella stessa figura vengono identificate anche l'ubicazione delle prove d'archivio: le 2 CPTu eseguite in data 25/03/2019 insieme ad 1 SCPT e 2 sismiche passive HVSr identificate dallo studio di microzonazione sismica comunale, a cui si rimanda nell'Allegato 1a.



Figura 10 – Ubicazione delle 3 indagini penetrometriche CPTu e dell'indagine geofisica MASW di nuova esecuzione e delle indagini d'archivio: 2 CPTu (cerchiate in azzurro), 1 SCPT e 2 HVSr.

Le 3 prove penetrometriche di nuova esecuzione, così come quelle eseguite nel marzo 2019, hanno raggiunto la profondità di circa 20 m dal piano di campagna e sono state eseguite utilizzando un penetrometro statico Gouda 100kN, con le seguenti caratteristiche tecniche:

Rif. Norme	ASTM D3441-86
Diametro Punta conica meccanica	35,7
Angolo di apertura punta	60
Area punta	10
Superficie manicotto	150
Passo letture (cm)	20
Costante di trasformazione Ct	20



Le caratteristiche del piezocono (G1-CPL2IN) sono riportate a seguire:

Area di punta	10.00 cm <sup>2</sup>
Diametro	35.70 mm
Area netta (AN)	6.60 cm <sup>2</sup>
Superficie manicotto	150.00 cm <sup>2</sup>
Lunghezza manicotto	133.70 mm
Area superiore manicotto (F sup.)	2.22 cm <sup>2</sup>
Area inferiore manicotto (F inf.)	3.31 cm <sup>2</sup>
Lunghezza totale piezocono	600.00 mm
Peso complessivo	3.00 Kg
Lunghezza raccordo punta – aste	250.00 mm
Passo letture	2 cm

In occasione dell'esecuzione delle 2 penetrometrie del marzo 2019, fino a -4,42 m, nella CPTu1, si è verificata una rapida desaturazione del piezocono che ha portato ad avere valori negativi della pressione dei pori; la stessa situazione si è ripresentata nella CPTu2, con desaturazione fino a -4,9 m. Se questo non incide sulla rappresentazione dei livelli incoerenti, maggiori incertezze possono determinarsi nella rappresentazione dei livelli argillosi e limo-argillosi.

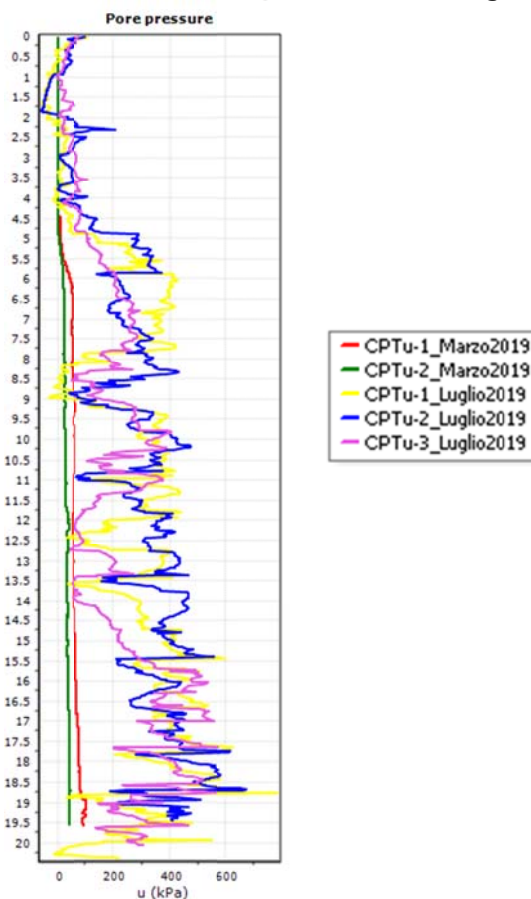


Figura 11 – Confronto tra i profili di pressione interstiziale ottenuti dalle penetrometrie eseguite nel marzo 2019 e quelle eseguite nel luglio 2019.

Differenti condizioni di pressione interstiziali si sono riscontrate in occasione dell'esecuzione delle 3 penetrometrie del luglio 2019, in cui non si è manifestata alcuna desaturazione iniziale, che si riflette in valori della pressione interstiziale molto superiori rispetto a quelli del marzo 2019 (Figura 11).

*Progetto di realizzazione di un edificio da destinare a nuova biblioteca comunale e struttura polivalente, in Comune di Castel Maggiore (BO)*

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

Per facilitare il confronto tra tutte le 5 CPTu eseguite all'interno dell'area nel 2019 e mettere in evidenza eventuali variazioni litologiche e geotecniche, verranno a seguire riportate le tabelle riassuntive della discretizzazione litologica-geotecnica del terreno, procedendo lungo l'allineamento da NO a SE, ovvero: CPTu-2-Marzo2019, CPTu-1-Luglio2019, CPTu-2-Luglio2019, CPTu-3-Luglio2019, CPTu-1-Marzo2019.

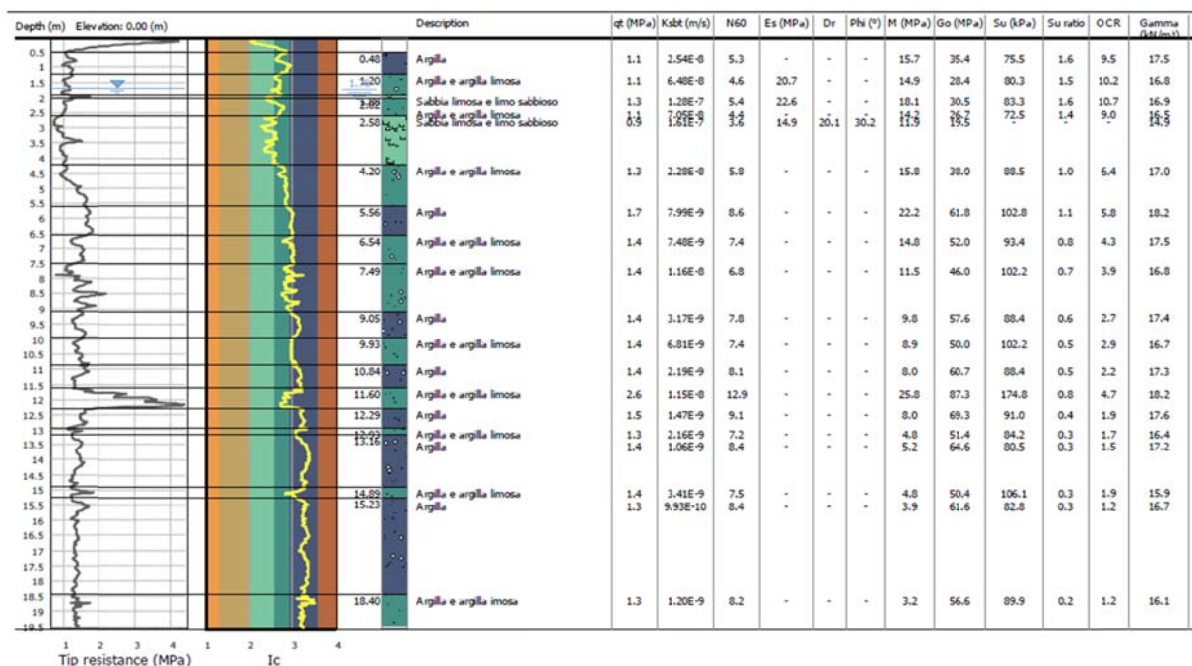


Tabella 1 – Caratterizzazione stratigrafico-geotecnica dello spessore di terreno indagato dalla CPTu2-Marzo2019.

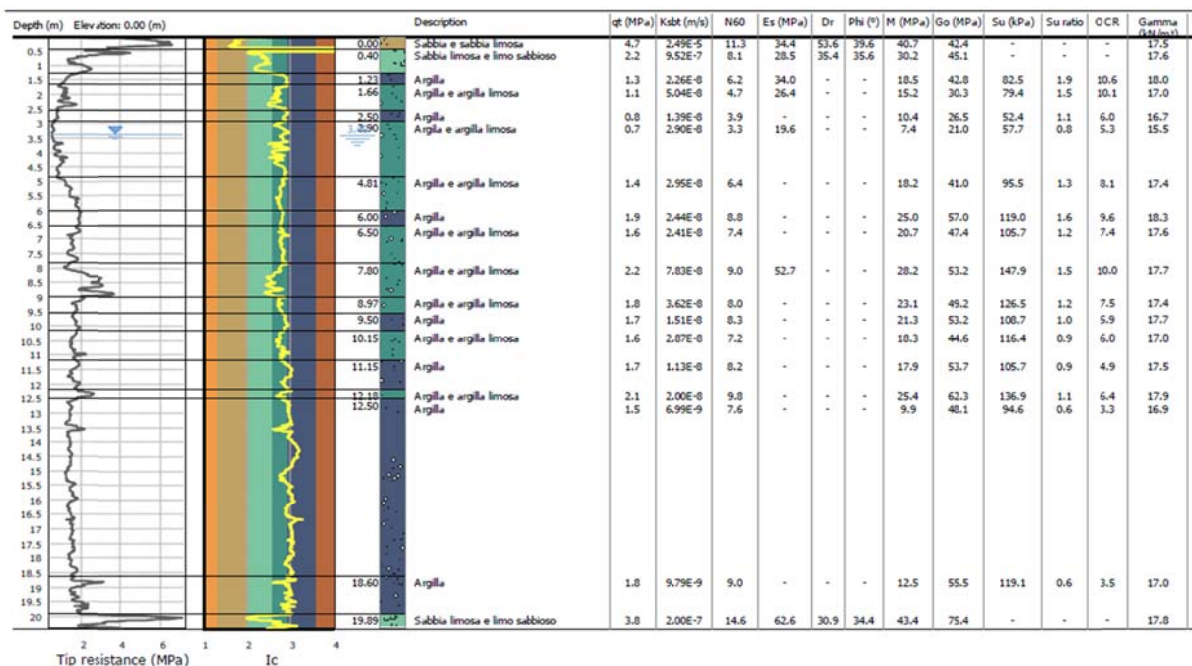


Tabella 2 - Caratterizzazione stratigrafico-geotecnica dello spessore di terreno indagato dalla CPTu1-Luglio2019.

Progetto di realizzazione di un edificio da destinare a nuova biblioteca comunale e struttura polivalente, in Comune di Castel Maggiore (BO)

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

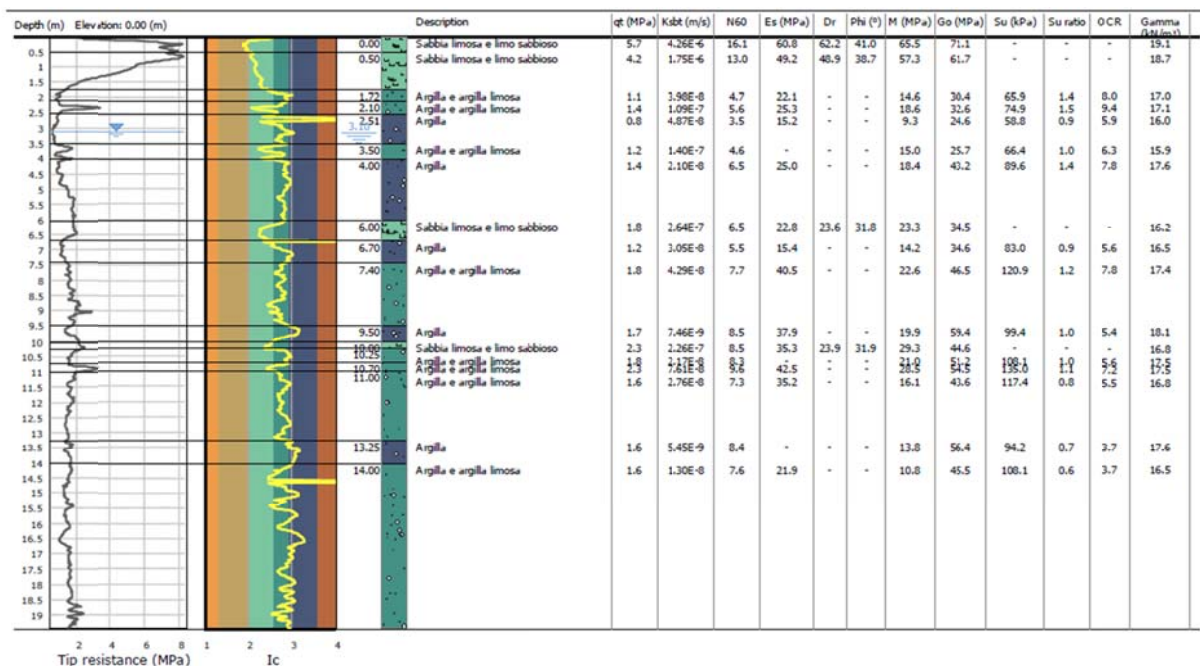


Figura 12 - Caratterizzazione stratigrafico-geotecnica dello spessore di terreno indagato dalla CPTu2-Luglio2019.

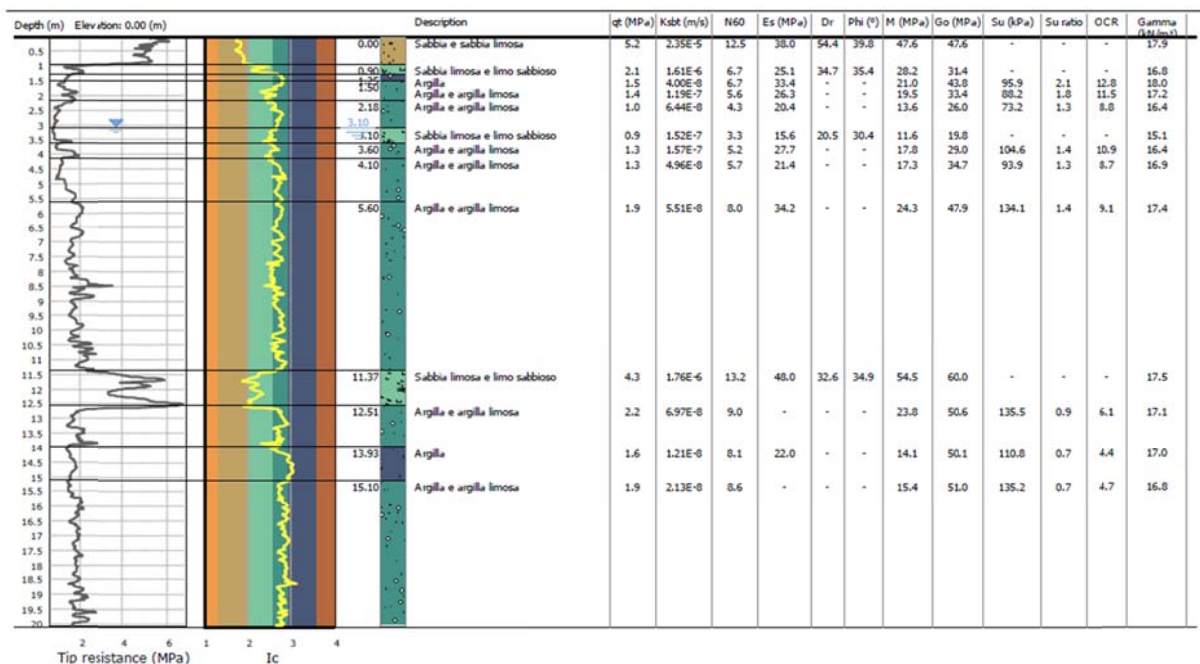


Figura 13 - Caratterizzazione stratigrafico-geotecnica dello spessore di terreno indagato dalla CPTu3-Luglio2019.



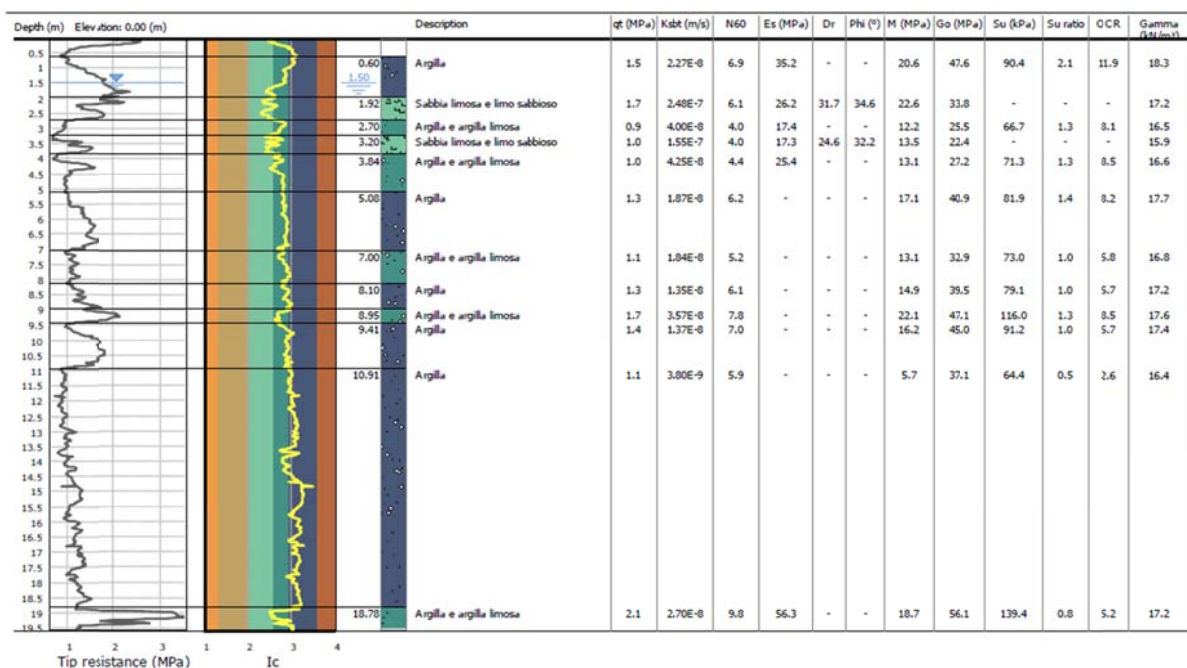


Figura 14 - Caratterizzazione stratigrafico-geotecnica dello spessore di terreno indagato dalla CPTu1-Marzo2019.

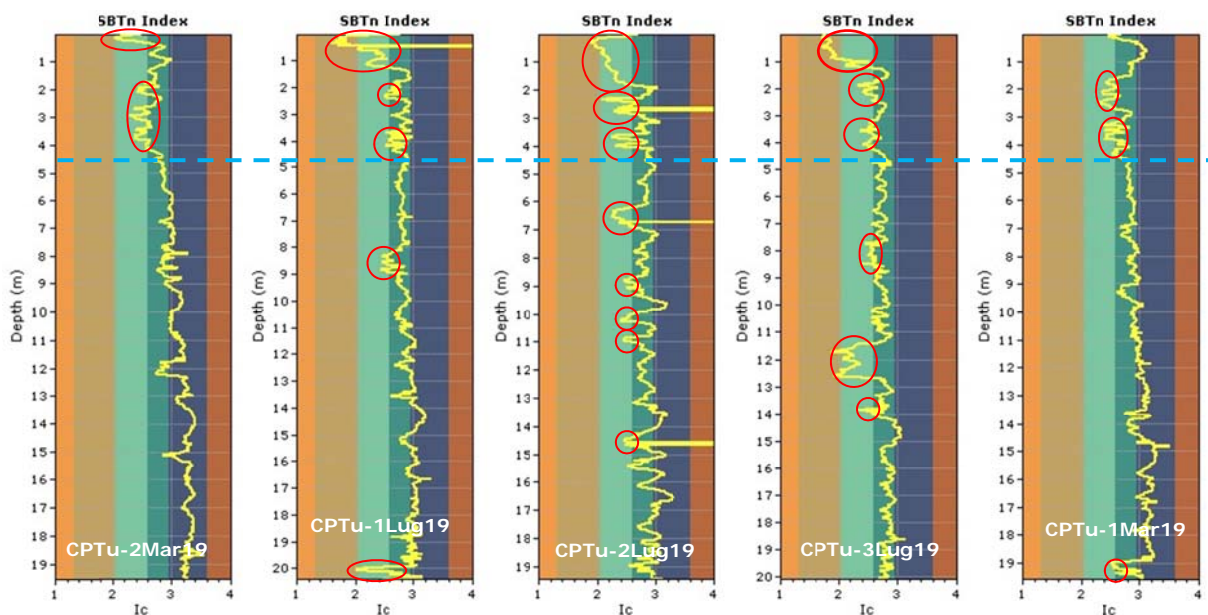


Figura 15 – Confronto tra i profili litologici interpretati attraverso l'Indice di Comportamento normalizzato alla pressione litostatica di Robertson (2009) in corrispondenza delle 5 CPTu eseguite nell'area di studio nel 2019: da sinistra a destra viene seguito l'allineamento geografico NO-SE delle prove visibile in Figura 10. **Legenda:** i cerchi/ellissi rossi indicano gli spessori dove sono prevalenti i terreni incoerenti; la linea tratteggiata azzurra serve ad indicare una evidente separazione litologica tra i primi 4 metri più superficiali, dove dominano i terreni incoerenti, e i restanti metri, dove dominano i terreni argillosi e limo-argillosi.

#### 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        |



Come si può vedere dalle tabelle precedenti e da Figura 15, l'indice di comportamento litologico di Robertson (2009) mostra una comune dominanza di alternanze tra livelli argillosi e limo-argillosi, con una percentuale maggiore della frazione limosa lungo le CPTu eseguite nel luglio 2019. I 4,5 metri più superficiali sono caratterizzati dalla prevalenza di miscele sabbiose (sabbie limose e limi sabbiosi) e sabbie, con spessori cumulati maggiori in corrispondenza delle 3 CPTu eseguite nel luglio 2019. Si può inoltre notare come le 3 CPTu eseguite nel luglio 2019 evidenzino la presenza di altri spessori incoerenti oltre i primi 4,5 m superficiali, con maggior frequenza lungo la CPTu-2Lug2019 e con uno spessore continuo di circa 1 m nella CPTu-3Lug2019, tra 11,5 e 12,5 m.

Spazialmente, le prove eseguite indicano una concentrazione di livelli incoerenti nella zona indagata dalle CPTu-2 e CPTu-3 (Lug19), che va a ridursi rapidamente sia verso NO (CPTu-1Lug19 e CPTu-2Mar19) che verso SE (CPTu-1Mar19).

In generale, dal punto di vista della resistenza geomeccanica (Figura 16), i valori di coesione non drenata raggiungono i minimi relativi nella CPTu-1Mar19, variabili da 65 a 140 kPa, coi valori relativamente più alti laddove le argille sono frammiste a limi e quelli relativamente più bassi nelle argille "pure". In tutte le altre CPTu i valori di coesione non drenata risultano generalmente superiori rispetto a quelli della CPTu-1Mar19, in media pari a circa 100 kPa.

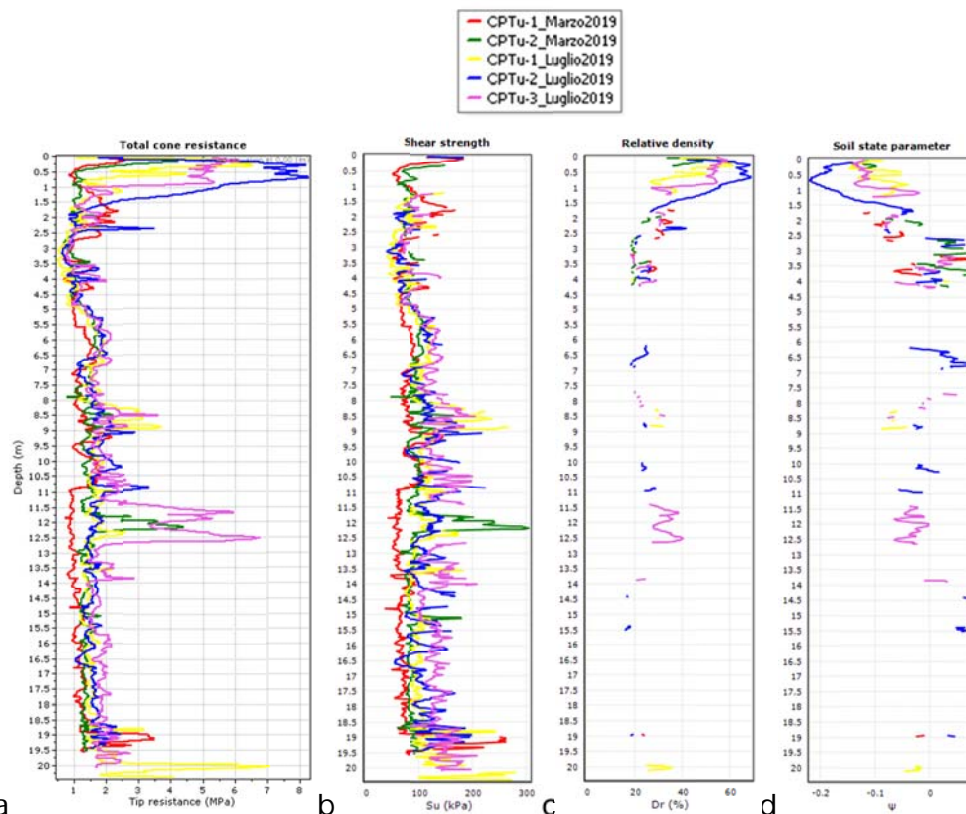


Figura 16 – Confronto dei profili di resistenza alla punta (a), coesione non drenata (b), densità relativa (c) e parametro di stato per le sabbie (d) ricavati in corrispondenza delle cinque CPTu eseguite nell'area di studio.

Relativamente ai livelli sabbiosi e a quelli con miscele sabbiose, la densità relativa ed il parametro di stato per le sabbie mettono in evidenza uno stato di

addensamento piuttosto scarso già a partire da 0,5/1 m dal p.d.c., fino a divenire sabbie sciolte tra 2,5 e 4 m e nei seguenti livelli sparsi tra 6 m e 20 m.

La bassa resistenza geomeccanica riscontrata nei primi 5 m superficiali (dovuta più ai livelli sabbiosi che a quelli argillosi) trova riscontro con quanto riportato per l'area nella Relazione Geologica a corredo del QC/PSC Reno Galliera – Terre di Pianura, redatta da G. Viel e S. Sangiorgi (2004): l'area è infatti identificata, dal punto di vista geotecnico, come Zona B, ovvero:

*Zone caratterizzate da terreni di qualità scadente ( $r_p < 1.000$  kPa) nel primo intervallo (fino a - 5 m dal p.c.), e da terreni di qualità da normale ( $1.000 < r_p < 1.500$  kPa) a discreta ( $> 1.500$  kPa) nel secondo strato. Sono zone edificabili con normali tecniche costruttive, per insediamenti di modesto impegno; le caratteristiche meccaniche dei terreni benché complessivamente migliori della classe "A" richiedono comunque cautela ed analisi geognostiche dettagliate. Per edifici di un certo impegno (pressioni di esercizio  $> 12$  t/ml) possono rivelarsi necessarie fondazioni che trasferiscano i carichi statici al secondo intervallo di qualità migliore. I comparti interessati da questa zona di edificabilità possono presentare limitazioni, all'impiego di fondazioni superficiali, legate all'entità della pressione di esercizio e dei cedimenti assoluti e differenziali.*

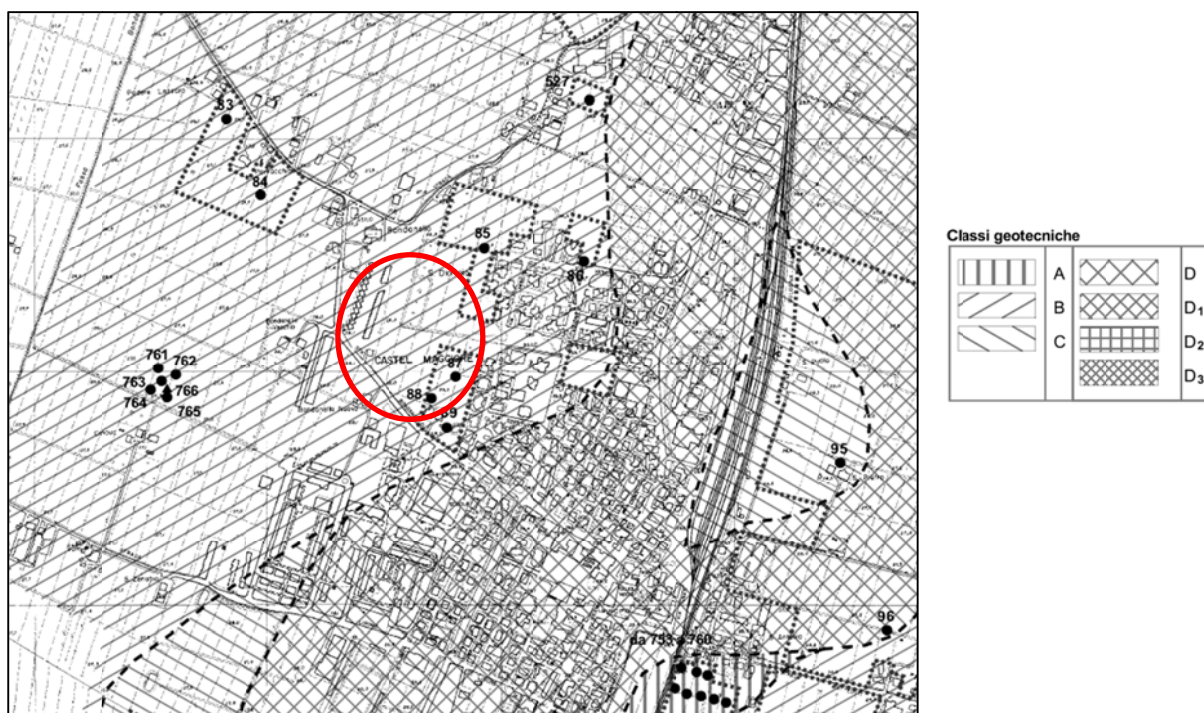


Figura 17 - Stralcio della Tav. QC.6/t6b "Resistenza meccanica dei terreni" del QC del PSC di Terre d'Acqua. Cerchio rosso: area d'indagine.

Nelle seguenti tabelle si riportano i valori caratteristici dei principali parametri geotecnici.



*Progetto di realizzazione di un edificio da destinare a nuova biblioteca comunale e struttura polivalente, in Comune di Castel Maggiore (BO)*

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

Prof. <i>m</i>	Litologia dominante	Litologia secondaria	Gamma med. <i>KN/m<sup>3</sup></i>	Gamma crt. <i>KN/m<sup>3</sup></i>	Cu med. <i>kPa</i>	Cu crt. <i>kPa</i>	fi' med. <i>°</i>	fi' crt. <i>°</i>	tan-fi' med. <i>...</i>	tan-fi' crt. <i>...</i>
0.02-0.38	Sabbie, da pulite a limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	17.65	17.42			39.88	37.7	0.61	0.6
0.38-1.22	Da sabbie limose a limi sabbiosi		17.64	17.37			35.64	35.2	0.56	0.6
1.22-1.64	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	18.07	18	87.58	46.59				
1.64-2.48	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	17	16.94	83.24	51				
2.48-2.88	Da argille ad argille limose		16.73	16.66	53.05	49.21				
2.88-4.79	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	15.47	15.45	59.47	40.02				
4.79-5.97	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	17.4	17.35	97.67	68.81				
5.97-6.48	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	18.27	18.21	118.92	118.1				
6.48-7.78	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	17.6	17.57	106.14	105.3				
7.78-8.95	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	17.69	17.62	157.37	72.1	34	33.8	0.54	0.5
8.95-9.48	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	17.43	17.32	127.21	123.81				
9.48-10.12	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.69	17.64	108.32	106.5				
10.12-11.13	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	16.97	16.9	116.8	115.29				
11.13-12.16	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.54	17.49	106.55	85.33				
12.16-12.47	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	17.98	17.81	141.14	91.58				
12.47-18.59	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	16.87	16.87	95.39	90.06				
18.58-19.87	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.03	16.99	122.68	78.99				
19.87-20.26	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	17.82	17.67	208.63	99.22	34.5	33.9	0.54	0.5

Tabella 3 – Valori caratteristici dei principali parametri geotecnici in corrispondenza del terreno indagato dalla **CPTu-1 del luglio 2019**. **Legenda** – Gamma: peso di volume del terreno; Cu: coesione non drenata; fi': angolo d'attrito interno di picco; tan-fi': tangente dell'angolo d'attrito interno di picco; med.: valore medio; **crt.:** valore caratteristico.

Prof. <i>m</i>	Litologia dominante	Litologia secondaria	Gamma med. <i>KN/m<sup>3</sup></i>	Gamma crt. <i>KN/m<sup>3</sup></i>	Cu med. <i>kPa</i>	Cu crt. <i>kPa</i>	fi' med. <i>°</i>	fi' crt. <i>°</i>	tan-fi' med. <i>...</i>	tan-fi' crt. <i>...</i>
0.02-0.48	Sabbie, da pulite a limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	19.09	18.95			41	38.8	0.62	0.6
0.48-1.7	Da sabbie limose a limi sabbiosi		18.79	18.68			38.93	35.5	0.6	0.6
1.7-2.08	Da argille ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	16.99	16.77	67.99	45.11	33.2	32.9	0.53	0.5
2.08-2.48	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	17.15	17.08	74.93	52.51	36.17	35.6	0.56	0.6
2.48-3.48	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	16.04	13.08	59.98	40.01	30.75	30.5	0.49	0.5
3.48-3.98	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Da limi argillosi ad argille limose	15.94	15.83	67.48	43.35	32.08	31.6	0.51	0.5
3.98-5.97	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.61	17.59	91.78	65.21				
5.97-6.67	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Da argille ad argille limose	16.31	15.99	120.1	114.63	31.87	31.6	0.51	0.5
6.67-7.37	Da argille ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	16.39	16.03	83.71	61.57	29.62	29.2	0.48	0.5
7.37-9.48	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	17.35	17.34	122.49	97.5				
9.48-9.98	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	18.15	18.09	97.52	54.54				
9.98-10.22	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Da limi argillosi ad argille limose	16.89	16.8	173.4	168.9	32	32	0.51	0.5
10.22-10.68	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.47	17.28	109.61	79.86				
10.68-10.97	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Da argille ad argille limose	17.63	17.54	137.81	49.48	33.4	33.1	0.53	0.5
10.97-13.22	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	16.76	16.75	118.69	98.72				
13.22-13.97	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.6	17.52	94.72	74.43				
13.97-19.37	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	16.47	16.47	112.29	94.98				

Tabella 4 - Valori caratteristici dei principali parametri geotecnici in corrispondenza del terreno indagato dalla **CPTu-2 del luglio 2019**. **Legenda** – Gamma: peso di volume del terreno; Cu: coesione non drenata; fi': angolo d'attrito interno di picco; tan-fi': tangente dell'angolo d'attrito interno di picco; med.: valore medio; **crt.:** valore caratteristico.

Prof. <i>m</i>	Litologia dominante	Litologia secondaria	Gamma med. <i>KN/m<sup>3</sup></i>	Gamma crt. <i>KN/m<sup>3</sup></i>	Cu med. <i>kPa</i>	Cu crt. <i>kPa</i>	fi' med. <i>°</i>	fi' crt. <i>°</i>	tan-fi' med. <i>...</i>	tan-fi' crt. <i>...</i>
0.02-0.88	Sabbie, da pulite a limose		17.89	17.82			39.9	39.3	0.61	0.6
0.88-1.22	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Sabbie, da pulite a limose	16.69	16.38			35.5	34.7	0.55	0.5
1.22-1.48	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	18.05	17.95	98.85	76.35				
1.48-2.16	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	17.2	17.11	89.02	66.7	34.5	34.3	0.54	0.5
2.16-3.08	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	16.48	16.4	73.91	57.21	34	34	0.54	0.5
3.08-3.58	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Da limi argillosi ad argille limose	15	14.79	71.31	67.27	30.26	29.9	0.49	0.5
3.58-4.08	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	16.36	16.08	107.9	58.31	32.25	31.4	0.51	0.5
4.08-5.58	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	16.92	16.88	95.1	70.97				
5.58-11.35	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	17.43	17.43	135.44	125.23				
11.35-12.48	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Sabbie, da pulite a limose	17.44	17.38			34.81	34.7	0.55	0.5
12.48-13.91	Da limi argillosi ad argille limose	Sabbie, da pulite a limose	17.1	17.07	137.15	104.9	35	33.8	0.55	0.5
13.91-15.07	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.02	16.91	112.49	82.42				
15.07-19.96	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	16.8	16.8	136.28	126.53				

Tabella 5 - Valori caratteristici dei principali parametri geotecnici in corrispondenza del terreno indagato dalla **CPTu-3 del luglio 2019**. **Legenda** – Gamma: peso di volume del terreno; Cu: coesione non drenata; fi': angolo d'attrito interno di picco; tan-fi': tangente dell'angolo d'attrito interno di picco; med.: valore medio; **crt.:** valore caratteristico.

Progetto di realizzazione di un edificio da destinare a nuova biblioteca comunale e struttura polivalente, in Comune di Castel Maggiore (BO)

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

Prof. m	Litologia dominante	Litologia secondaria	Gamma med. KN/m <sup>3</sup>	Gamma crt. KN/m <sup>3</sup>	Cu med. kPa	Cu crt. kPa	fi' med. °	fi' crt. °	tan-fi' med. ...	tan-fi' crt. ...
0.04-1.92	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	18.31	18.3	96.83	52.01				
1.92-2.7	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Da limi argillosi ad argille limose	17.17	17.06	112.7	79.9	34.75	34.5	0.55	0.5
2.7-3.2	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	16.52	16.35	65.99	56.68				
3.2-3.84	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Da limi argillosi ad argille limose	15.92	15.66	72.85	45.61	32.33	31.6	0.51	0.5
3.84-5.08	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	16.62	16.57	73.26	48.75				
5.08-7.0	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.68	17.66	82.81	70.7				
7.0-8.1	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	16.78	16.72	73.24	72.51				
8.1-8.95	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.25	17.15	79.61	78.25				
8.95-9.41	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	17.55	17.42	121.91	82.82				
9.41-10.91	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.42	17.37	92.3	73.48				
10.91-18.78	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	16.44	16.44	65.05	62.53				
18.78-19.44	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	17.34	17.2	165.99	43.39				

Tabella 6 - Valori caratteristici dei principali parametri geotecnici in corrispondenza del terreno indagato dalla **CPTu-1 del marzo 2019**. **Legenda** – Gamma: peso di volume del terreno; Cu: coesione non drenata; fi': angolo d'attrito interno di picco; tan-fi': tangente dell'angolo d'attrito interno di picco; med.: valore medio; **crt.**: valore caratteristico.

Prof. m	Litologia dominante	Litologia secondaria	Gamma med. KN/m <sup>3</sup>	Gamma crt. KN/m <sup>3</sup>	Cu med. kPa	Cu crt. kPa	fi' med. °	fi' crt. °	tan-fi' med. ...	tan-fi' crt. ...
0.46-1.18	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.47	17.39	75.73	60.6				
1.18-1.86	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	16.76	16.68	81	79.03	33	33	0.52	0.5
1.86-2.0	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	17.06	16.94	76.85	69.09	34	34	0.54	0.5
2.0-2.56	Da limi argillosi ad argille limose	Da sabbie limose a limi sabbiosi	16.56	16.41	72.75	71.51	32.62	32.4	0.52	0.5
2.56-4.18	Da sabbie limose a limi sabbiosi	Da limi argillosi ad argille limose	14.94	14.9	84.49	67.08	30.24	30.1	0.49	0.5
4.18-5.54	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	16.97	16.91	88.77	72.5				
5.54-6.52	Da argille ad argille limose		18.23	18.2	102.79	102.31				
6.52-7.47	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	17.48	17.4	93.61	92.86				
7.47-9.03	Da limi argillosi ad argille limose	Da argille ad argille limose	16.74	16.7	104.46	76.5				
9.03-9.91	Da argille ad argille limose		17.41	17.35	88.17	72.68				
9.91-10.82	Da argille ad argille limose		16.65	16.59	102.13	101.25				
10.82-11.58	Da argille ad argille limose		17.32	17.24	88.92	86.9				
11.58-12.27	Da argille ad argille limose	Da limi argillosi ad argille limose	18.2	18.07	191.4	69.68				
12.27-12.91	Da argille ad argille limose		17.62	17.52	90.92	89.14				
12.91-13.14	Da argille ad argille limose		16.48	16.3	85.09	56.04				
13.14-14.87	Da argille ad argille limose		17.21	17.18	80.7	80.47				
14.87-15.21	Da argille ad argille limose	Terreni fini, sensitivi	16	15.71	110.38	49.51				
15.21-18.39	Da argille ad argille limose	Terreni fini, sensitivi	16.69	16.69	82.95	82.93				
18.38-19.43	Da argille ad argille limose	Terreni fini, sensitivi	16.08	16.02	90.31	72.42				

Tabella 7 - Valori caratteristici dei principali parametri geotecnici in corrispondenza del terreno indagato dalla **CPTu-2 del marzo 2019**. **Legenda** – Gamma: peso di volume del terreno; Cu: coesione non drenata; fi': angolo d'attrito interno di picco; tan-fi': tangente dell'angolo d'attrito interno di picco; med.: valore medio; **crt.**: valore caratteristico.



#### 4. INDAGINE SISMICA E MICROZONAZIONE SISMICA COMUNALE

Per la classificazione sismica dei terreni, sono stati utilizzati i dati ricavati da una prova penetrometrica con cono sismico (SCPT) d'archivio (Allegato 1a), identificata in Figura 18 (vedasi anche Figura 10) con il codice 1\_csm/psc/SCP1. L'indagine ha permesso di misurare direttamente la velocità delle onde P ed S lungo i 30 m indagati, con passo di campionamento pari ad 1 m (Figura 19).

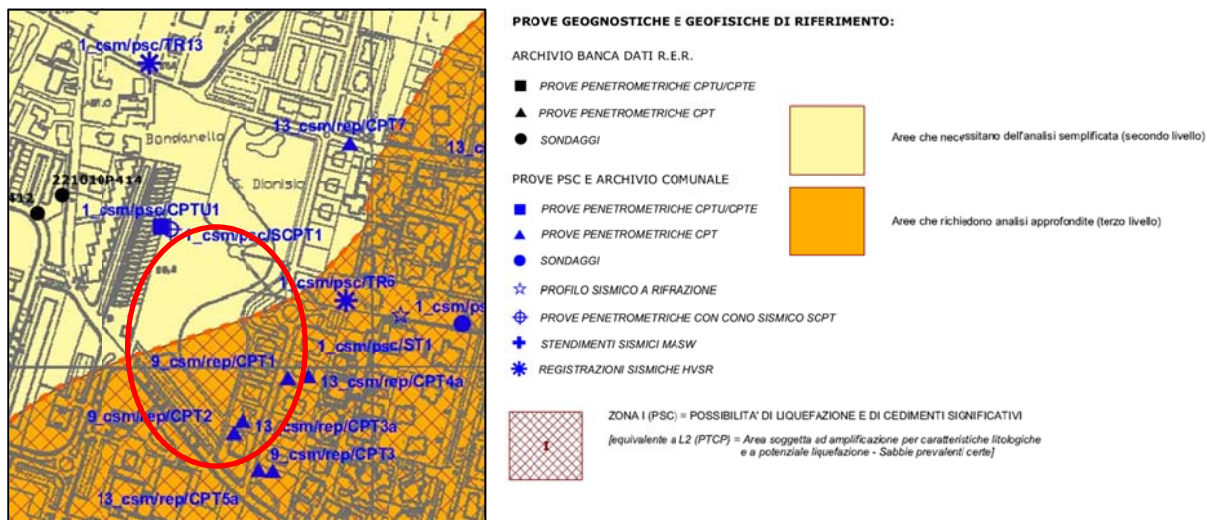


Figura 18 – Stralcio della Tavola 1 “Pericolosità sismica: tavola comunale delle aree suscettibili di effetti locali”, Piano Strutturale Comunale – aggiornamento ottobre 2013. L’ellisse rossa individua l’area di studio.

L'indagine ha inoltre permesso di ricavare il parametro di Normativa  $V_{s30}$ , risultato pari a **207 m/s**, che, grazie anche all'aumento progressivo della rigidità del terreno con la profondità, permette di inserire il terreno stesso all'interno della classe **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*.

Come si può notare dal profilo delle Vs di Figura 19, appare evidente un contrasto di impedenza intorno ai 5 m, che conferma la presenza dello spessore superficiale caratterizzato da basse resistenze geomeccaniche, evidenziato dalle indagini geognostiche, sia quelle eseguite per questo studio che quelle d'archivio. Oltre i 5 m, il profilo di Vs assume un andamento sub-verticale, denotando una omogeneità generale del terreno dal punto di vista della rigidità, fino a 28 m. Da 28 a 30 m la rigidità cresce nuovamente spingendosi sui valori massimi di 300 m/s.

Le due indagini a sismica passiva (HVSr) d'archivio, identificate con i codici 1\_csm/psc/TR6 e 1\_csm/psc/TR13 in Figura 18 e Figura 10, vedono un picco dei rapporti H/V intorno a circa **0,84±0,04 Hz**, con ampiezza del rapporto da 2,5 a 3 (Figura 20).

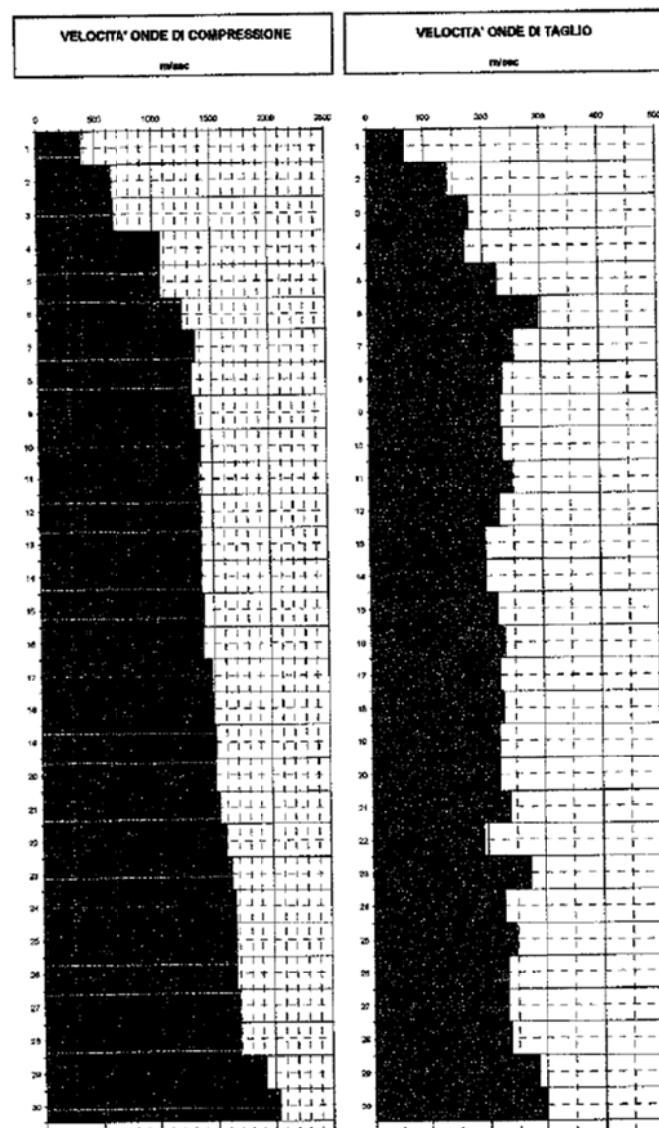


Figura 19 - Profilo di Vs con la profondità, ricavato dal cono sismico (SCPT) d'archivio.

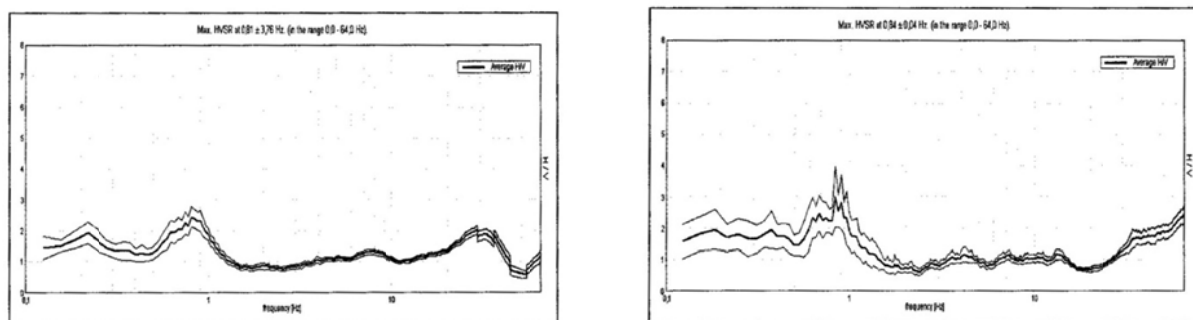


Figura 20 – Curve dei rapporti H/V ricavate da due indagini a sismica passiva (HVSr) d'archivio: a sinistra l'indagine identificata con il codice 1\_csm/psc/TR6 in Figura 18; a destra l'indagine identificata con il codice 1\_csm/psc/TR13 in Figura 18.

In data 17/07/2019 è stata eseguita un'indagine a sismica attiva di tipo MASW parallela ed adiacente all'allineamento delle complessive 5 CPTu eseguite nell'area (Figura 10), al fine di ottenere un profilo di Vs con la profondità

rappresentativo dell'area che sarà interessata dal progetto edilizio. Il profilo interpretato dall'analisi MASW (Figura 22 e Allegato 3) viene quindi confrontato con quello ricavato con misure dirette dalla SCPT (Figura 19).

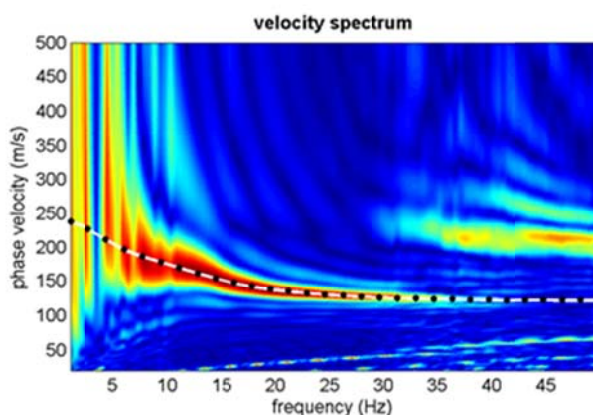


Figura 21 – Spettro di frequenza dall'indagine MASW.

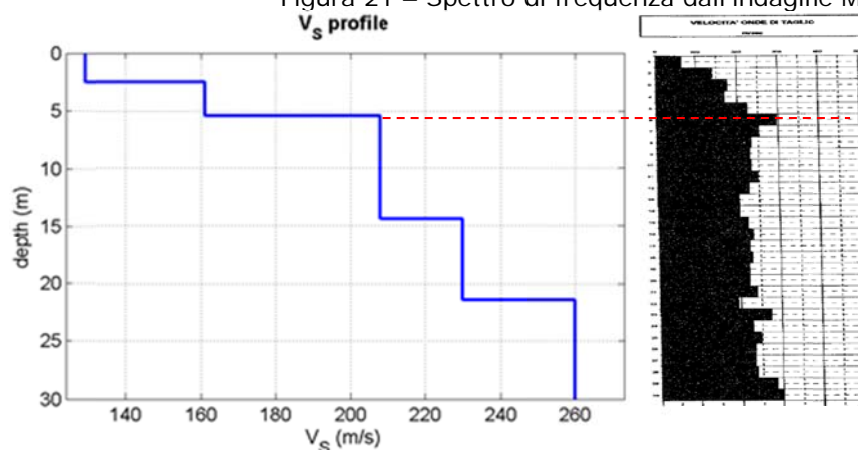


Figura 22 – Sinistra: profilo di velocità delle onde "S" interpretato con processo d'inversione dai dati dell'indagine MASW. Destra: profilo di velocità delle onde "S" da prova SCPT di Figura 19.

Profondità da p.c. (m)	Spessore (m)	Velocità onde S (m/sec)
2.5	2.5	129
5.4	2.9	161
14.4	9.0	208
21.4	7.0	230
30.0	8.6	260

Tabella 8 – Spessori dei singoli sismostrati omogenei e relativo valore di velocità delle onde "S" da interpretazione dei dati dell'indagine MASW con processo d'inversione.

Il confronto tra il profilo di Vs ricavato dalla MASW e quello ricavato dalla vicina SCPT pone in evidenza il comune contrasto d'impedenza alla profondità di circa 5 m ed un simile andamento fino a 30 m, in entrambe piuttosto lineare, con valori massimi che si avvicinano ai 300 m/s.

E' quindi lecito assumere che il profilo di Vs individuato in modo diretto dalla SCPT possa essere rappresentativo anche della stratigrafia dell'area indagata per

questo studio, potendone quindi utilizzare i valori per la successiva analisi di risposta sismica locale.

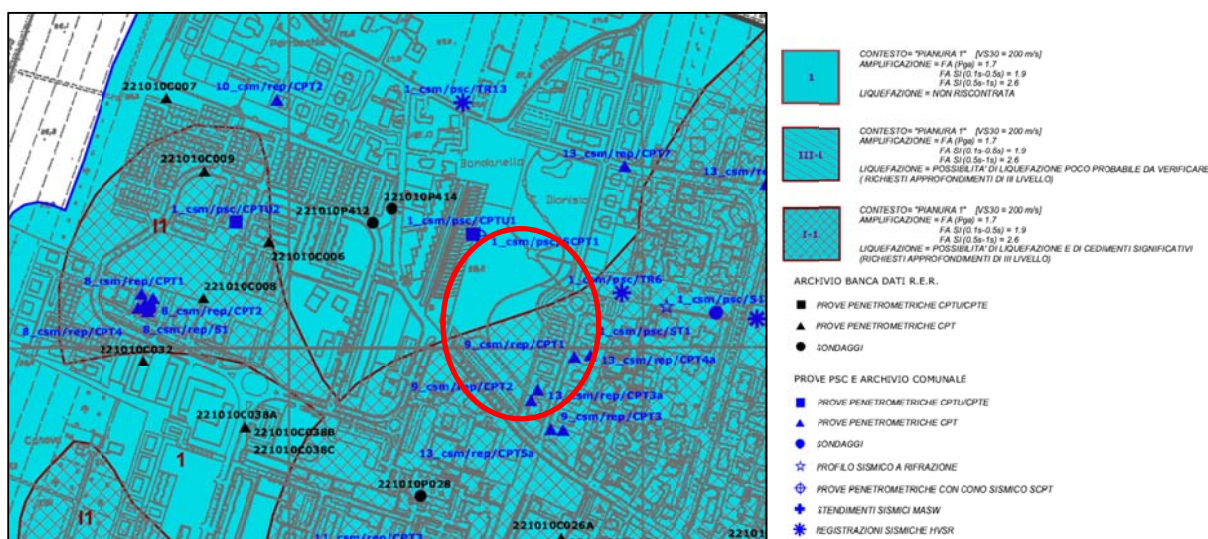


Figura 23 – Stralcio della Tavola 2 “Microzonazione sismica semplificata (DAL 112/2007)”, Piano Strutturale Comunale – aggiornamento ottobre 2013. L’ellisse rossa identifica l’area di studio.

Come si può vedere da Figura 23, la microzonazione sismica di Castel Maggiore, eseguita seguendo i criteri della DAL RER 112/2007, ha assegnato all’intera area in esame la seguente terna di fattori di amplificazione:

$$FA (Pga) = 1,7$$

$$FA SI (0.1s-0.5s) = 1,9$$

$$FA SI (0.5s-1s) = 2,6$$

valutando, inoltre, il settore centro-meridionale della stessa come suscettibile di **liquefazione e cedimenti significativi** in caso di evento sismico, da cui la necessità di ricorrere ad approfondimenti di III livello per la microzonazione sismica.

La microzonazione sismica comunale non individua con precisione la profondità del bedrock sismico, ma si limita ad inserire l’intero territorio comunale nell’ambito “Pianura 1” della DAL 112/2007, che ipotizza un bedrock sismico poco profondo, minore di 100 m dal piano campagna.

In realtà, utilizzando la formula di Mascandola et al. (2019)<sup>2</sup>:

$$h = 98f_r^{-1.17}$$

dove  $f_r$  è la frequenza di risonanza del suolo identificata dalle indagini HVSR (circa 0,84 Hz) e  $h$  la profondità calcolata della superficie responsabile di tale frequenza, la profondità locale del bedrock sismico dovrebbe attestarsi sui **110 m** dal piano campagna.

<sup>2</sup> Mascandola, C., Massa, M., Barani, S., Albarello, D., Lovati, S., Martelli, L., Poggi, V., 2019. Mapping the Seismic Bedrock of the Po Plain (Italy) through Ambient-Vibration Monitoring. Bull. Seismol. Soc. Am. 109, 164–177.



Tale ordine di grandezza per la profondità locale del bedrock sismico sembra essere confermato dai risultati ottenuti sempre da Mascandola et al. (2019) (Figura 24). Come si può vedere in Figura 24, l'area di studio ricade all'interno di una zona in cui la profondità del bedrock sismico è stimata tra 100 e 150 m.

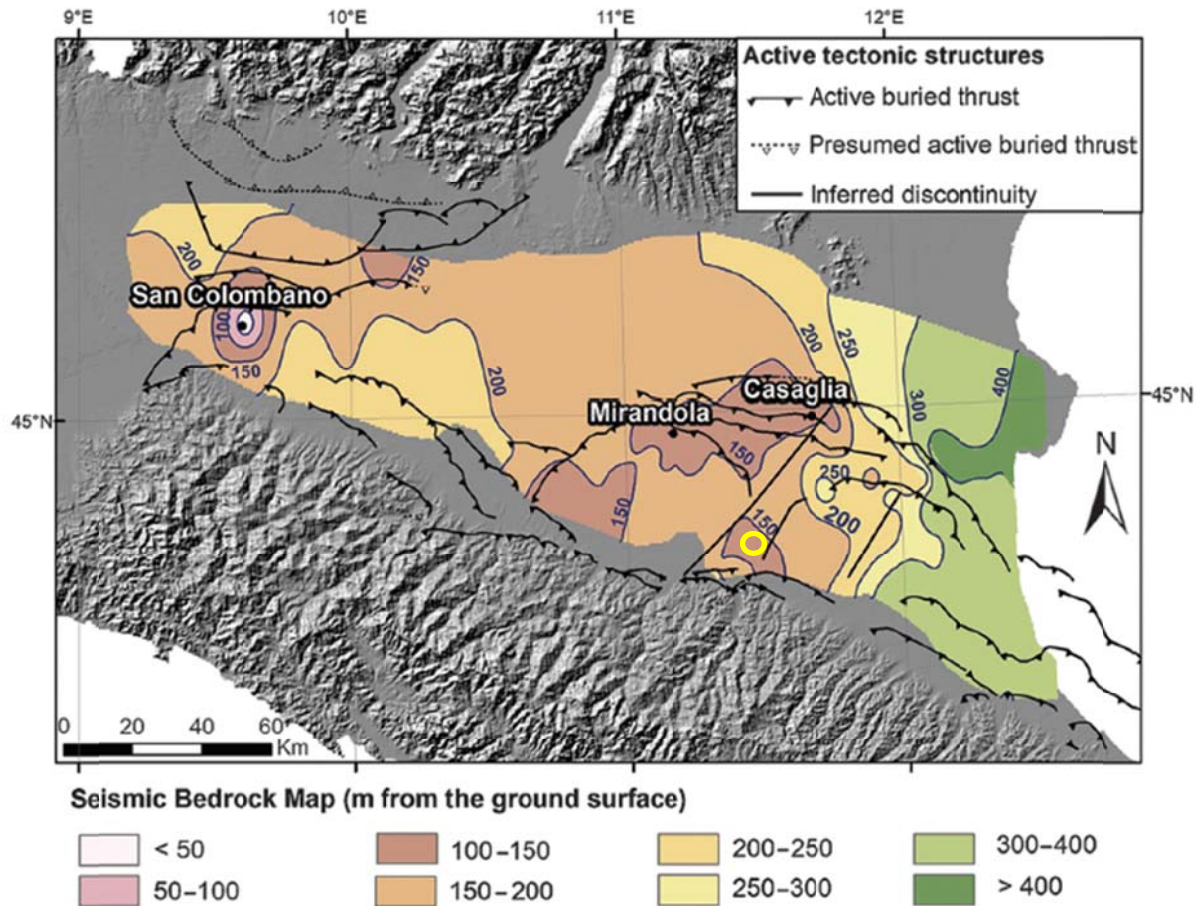


Figura 24 – Mappa della profondità del bedrock sismico in metri dal piano campagna. Fonte: Mascandola et al. (2019). Il cerchio giallo individua l'area di studio.

## 5. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

La possibilità che si possano verificare fenomeni di liquefazione e cedimenti importanti in caso di evento sismico, i cui presupposti sono stati confermati dall'analisi delle prove penetrometriche eseguite per questo studio, determina la necessità di eseguire un'analisi di risposta sismica locale per la valutazione della PGA al suolo e dello spettro di risposta in accelerazione in superficie. La stessa analisi permette anche di ricavare il profilo di CSR (Cyclic Stress Ratio / rapporto di sforzo ciclico), necessario per il calcolo dell'Indice di Potenziale Liquefazione in corrispondenza delle CPTu eseguite.

La valutazione del coefficiente di amplificazione litostratigrafico è stata condotta attraverso un'analisi di risposta sismica locale monodimensionale, lineare equivalente, nel dominio delle frequenze, utilizzando il codice di calcolo "STRATA"<sup>3</sup>, includendo l'effetto delle possibili incertezze sui dati di base e valutando:

- lo spettro di risposta elastico (al 5% di smorzamento),
- i parametri dello spettro semplificato previsto dalla normativa che meglio si adatti allo spettro di risposta ottenuto dall'analisi numerica.

Un importante vantaggio legato a questo codice di calcolo è la possibilità che esso offre di gestire le significative incertezze presenti nei dati di modellazione (moto di riferimento, profilo di Vs, curve di smorzamento e riduzione del modulo di taglio) permettendo di fornire stime adeguatamente conservative degli spettri di scuotimento attesi.

L'analisi è stata condotta per i quattro stati limite: **SLO**, **SLD**, **SLV** e **SLC**, relativamente alla classe d'uso III ed alla vita nominale di 50 anni.

Il moto di riferimento prescelto, per ognuna delle quattro analisi, è costituito dalle componenti orizzontali di 7 accelerogrammi naturali selezionati tramite il codice di calcolo Rexel v. 3.5<sup>4</sup> e scalati alle rispettive PGA di riferimento:

Stato limite	PGA <sub>ref.</sub>
SLO	0,059g
SLD	0,074g
SLV	0,194g
SLC	0,252g

Il profilo stratigrafico è stato inserito, fino a -20 m, in base alla stratigrafia interpretata dai sondaggi penetrometrici CPTu eseguiti nell'area. Oltre tale profondità, fino a -110 m (profondità ipotizzata del bedrock sismico), la stratigrafia è stata assunta uguale a quella del pozzo per acqua prossimo all'area (fino a -70 m) e quindi a quella della sezione geologica T08 in corrispondenza della sua intersezione con la sezione L07 (Figura 25 e Figura 26).

---

3 Kottke, A.R. & Rathje, E.M. (2008) – Technical Manual for Strata. PEER Report 2008, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 81 p.

<sup>4</sup> [http://www.reluis.it/index.php?option=com\\_content&view=article&id=118&Itemid=105&lang=it](http://www.reluis.it/index.php?option=com_content&view=article&id=118&Itemid=105&lang=it)

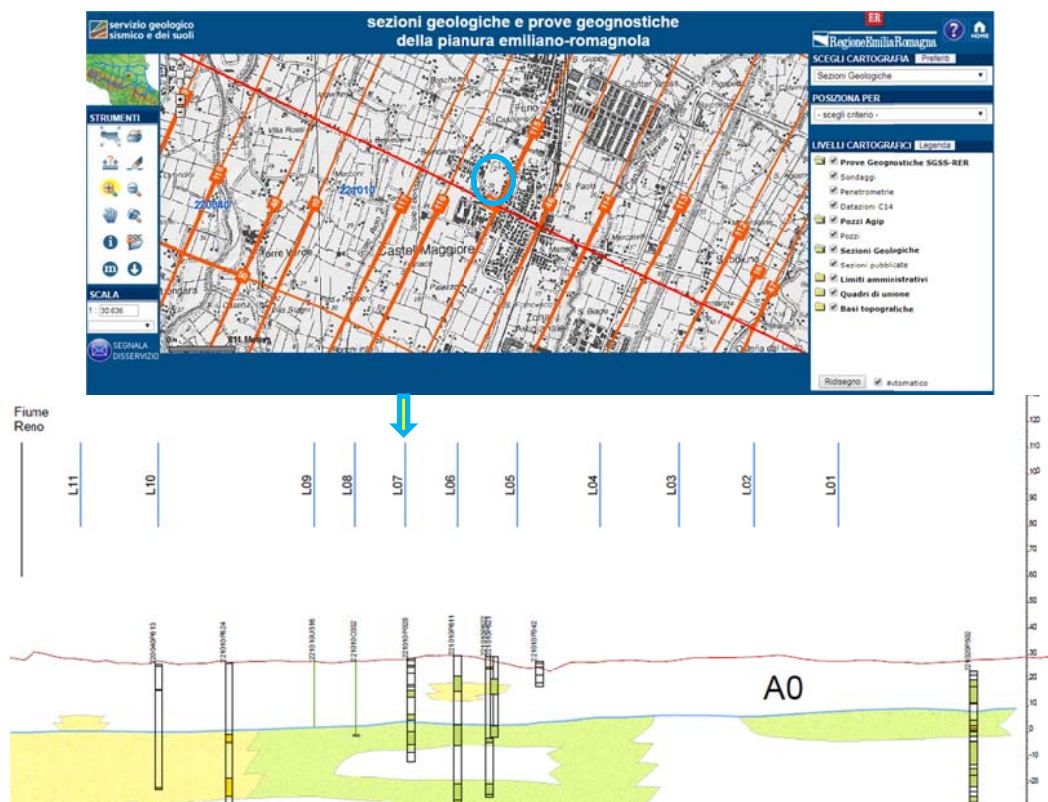


Figura 25 – Sezione T08 del database delle sezioni geologiche e prove geognostiche della pianura emiliano-romagnola della Regione Emilia-Romagna. Il cerchio azzurro individua l'area di studio. Il tracciato della sezione T08 è evidenziato in rosso nella carta sopra. La freccia indica il punto in cui la sezione T08 interseca la sezione L07, che in carta è identificata col numero 115.

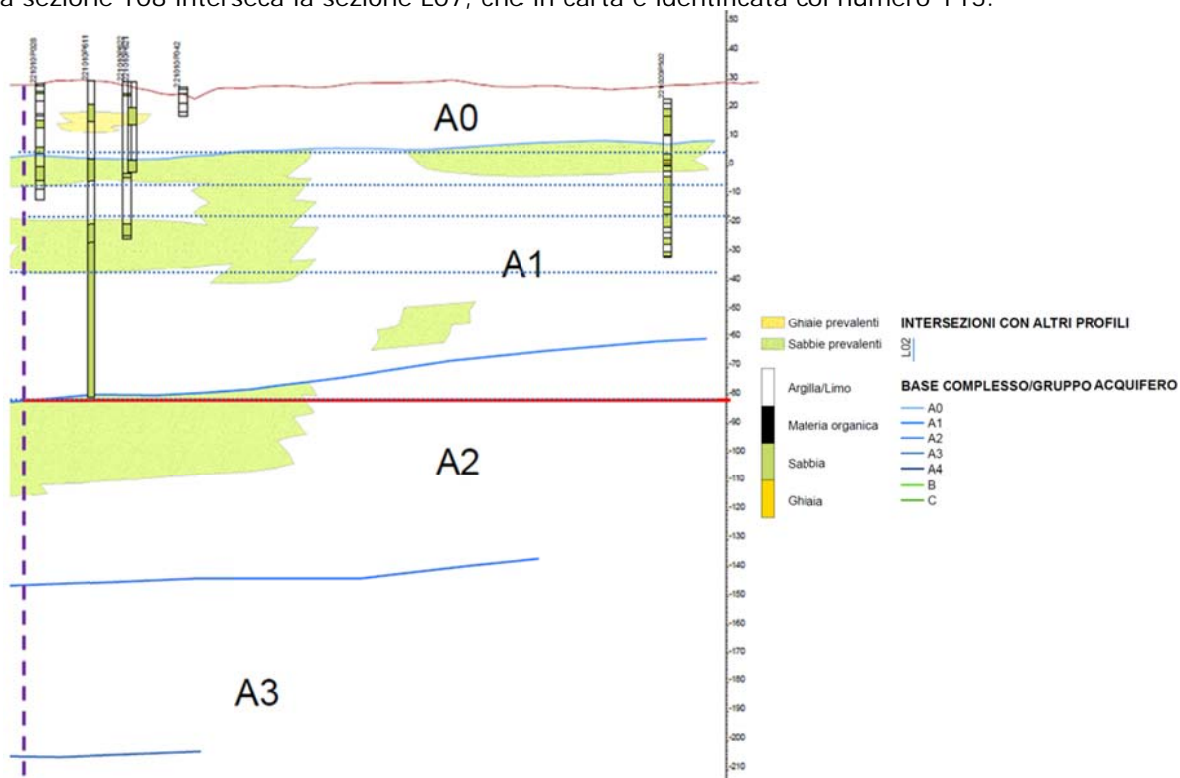


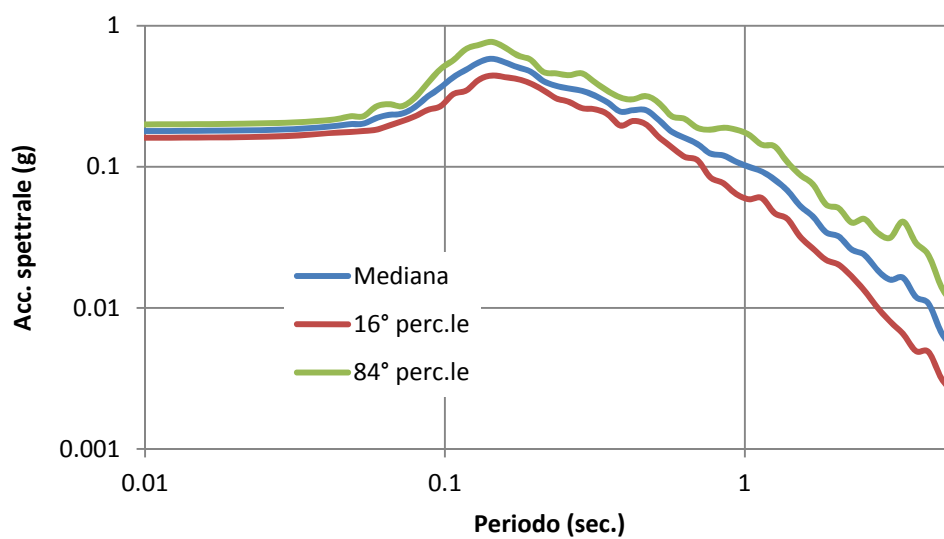
Figura 26 – Stralcio della sezione T08 prossima all'area di studio. La linea rossa individua la profondità ipotizzata del bedrock sismico; la linea tratteggiata viola rappresenta la verticale in

corrispondenza dell'area di studio; le linee tratteggiate azzurre marcano la profondità dei passaggi litologici in corrispondenza della linea tratteggiata viola.

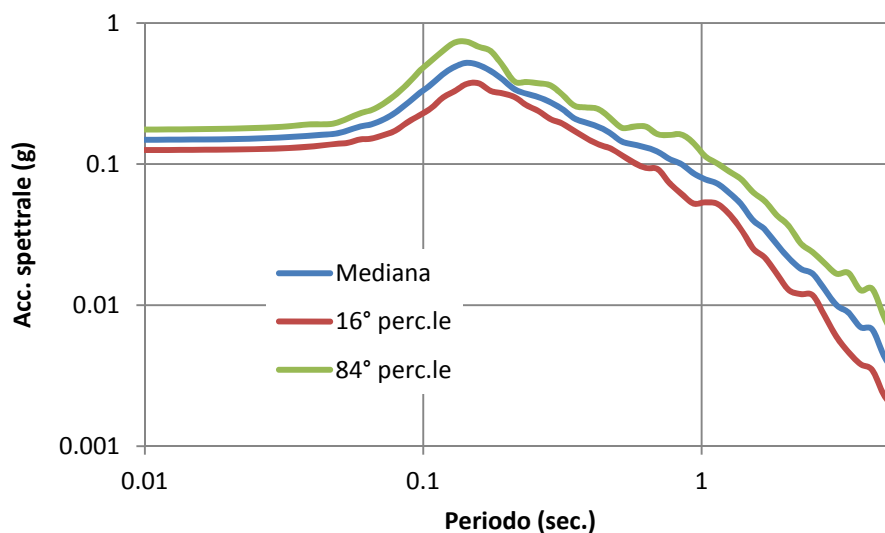
Per quanto riguarda le curve di smorzamento e di riduzione del modulo di taglio, sono state utilizzate curve fornite dallo stesso programma di calcolo per le sabbie e le argille. Sono state effettuate 100 simulazioni per ciascun accelerogramma, consentendo variazioni nel profilo di velocità.

La distribuzione degli spettri di risposta in superficie è riportata in Figura 27, per ogni analisi relativa ai diversi stati limite.

Si è deciso di adottare lo spettro di risposta corrispondente al 50° percentile della popolazione di spettri restituita dall'analisi, ovvero la mediana. I risultati sono sintetizzati nella Figura 28.



(SLD)



(SLO)

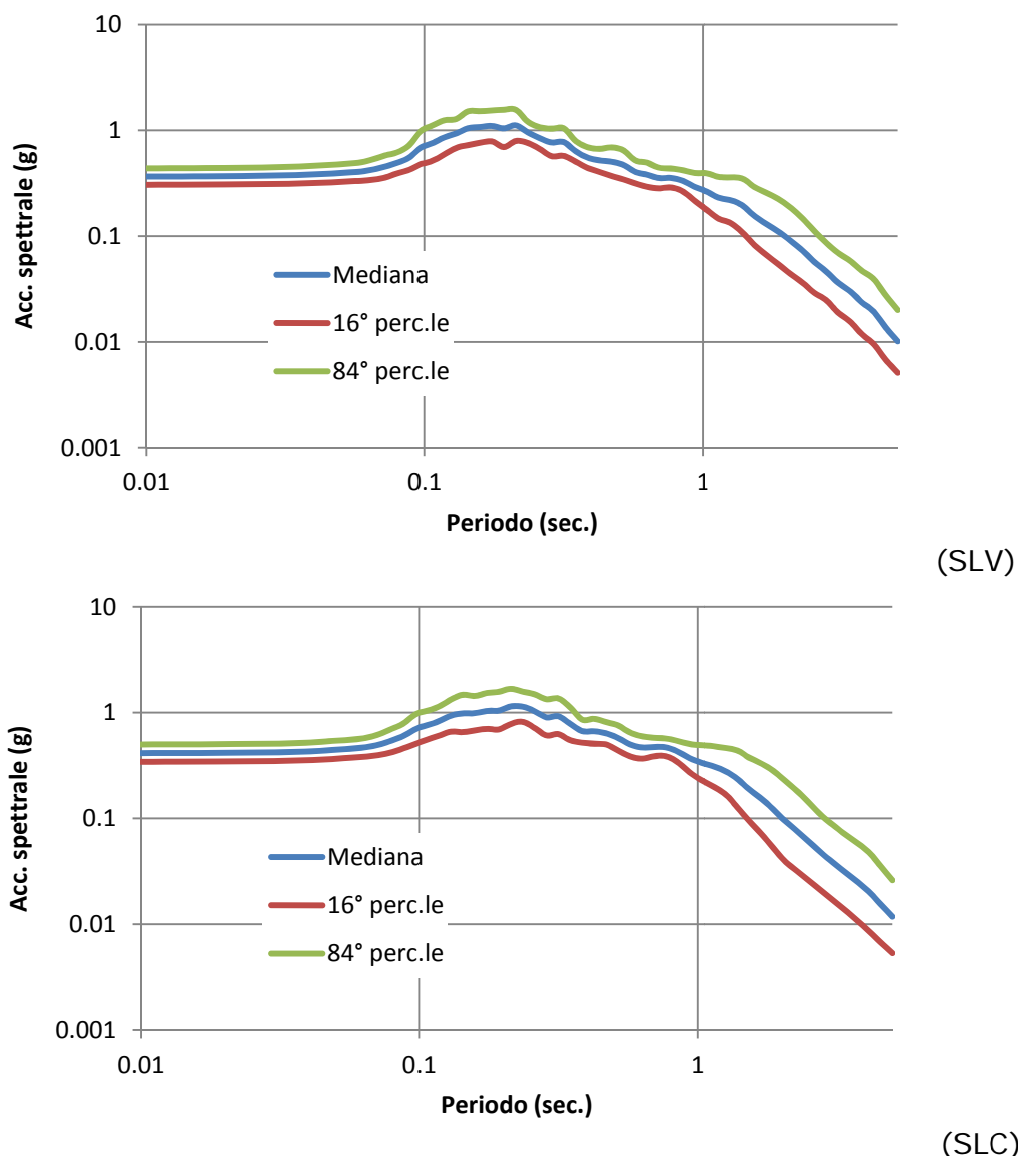
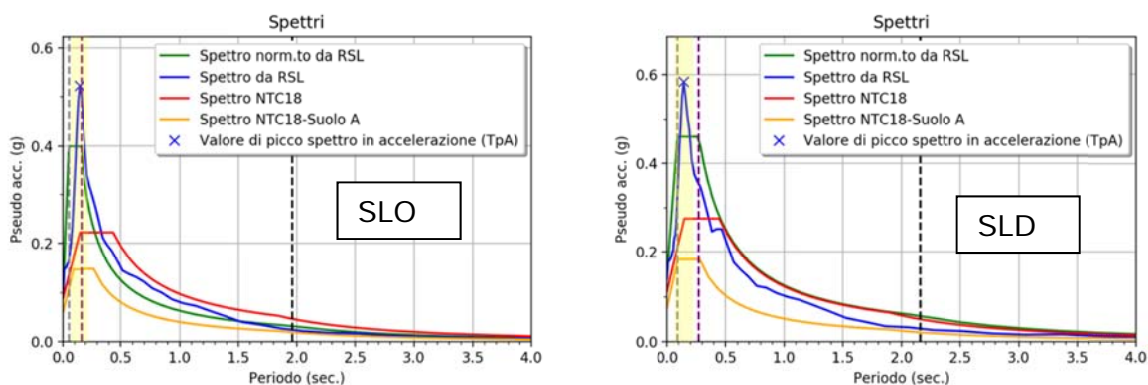


Figura 27 - Popolazione degli spettri di risposta visco-elastici (5% di smorzamento) alla superficie di campagna per il sito, ricavato dall'analisi di risposta sismica locale per i 4 stati limite: SLD, SLO, SLV e SLC. La linea blu continua indica la mediana (50° percentile) della distribuzione mentre i due andamenti tratteggiati corrispondono rispettivamente al 16° (-1 $\sigma$ ) e all'84° (+1 $\sigma$ ) percentile della distribuzione.





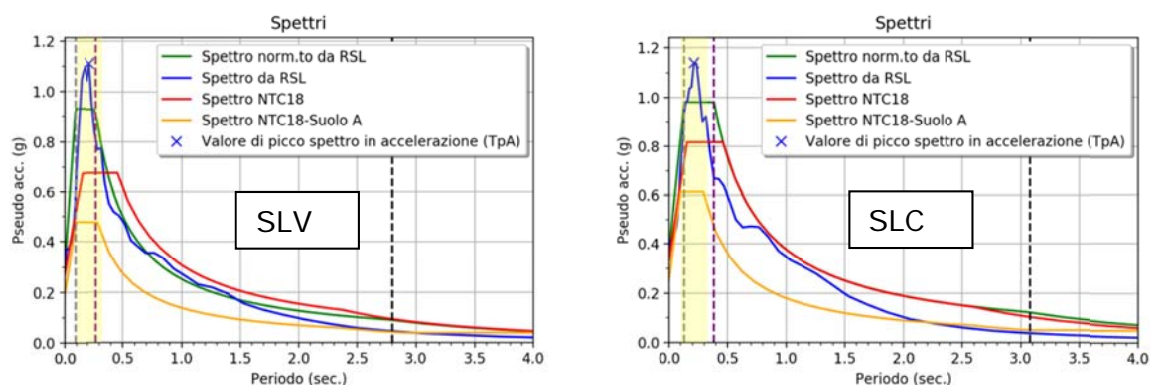


Figura 28 - Curva blu: spettro di risposta visco-elastico (5% di smorzamento, 50° percentile della popolazione) relativo al sito in esame, alla **superficie topografica attuale** (in verde: normalizzato); spettro di risposta normalizzato da approccio semplificato di Normativa per suolo C (in rosso); spettro di risposta normalizzato da approccio semplificato di Normativa per suolo A (in arancione).

Come si vede in Figura 28, in tutti gli stati limite considerati la risposta sismica locale indica una maggiore amplificazione rispetto agli spettri del metodo semplificato di Normativa, specialmente nei brevi periodi. Si nota un unico picco ove l'accelerazione è massima intorno ai 0,14-0,21 secondi, mentre il plateau ad accelerazione costante è su 0,4g per SLO, 0,46g per SLD, 0,93g per SLV e 0,98g per SLC.

I dati numerici degli spettri di risposta da RSL, normalizzati, sono riportati in Allegato 4.

Infine, l'analisi di risposta sismica locale effettuata per questo studio ha permesso di ricostruire il profilo del CSR (Rapporto di Sforzo Ciclico – Cyclic Stress Ratio) con la profondità. Il rapporto esprime lo stato di sforzo indotto dal sisma nel terreno e costituisce un parametro molto importante per il calcolo dell'Indice di Potenziale Liquefazione (IPL) poiché quantifica lo sforzo indotto dal sisma nel terreno.

A seguire si fornisce il profilo di CSR nelle sue coordinate numeriche fino alla profondità di 20 m, ottenuto per lo stato limite SLV.

Profondità dal p.d.c. (m)	CSR
0.3048	0.40733714
0.6096	0.414295405
0.9144	0.405334426
1.2192	0.390840327
1.524	0.376385754
1.8288	0.390483369
2.1336	0.411832282
2.4384	0.427673394
2.7432	0.436673984
3.048	0.444429786
3.3528	0.449237421

3.6576	0.451352364
3.9624	0.450827617
4.2672	0.450514565
4.572	0.449506194
4.8768	0.447956912
5.1816	0.44656157
5.4864	0.445322275
5.7912	0.444239744
6.096	0.443065477
6.4008	0.441468606
6.7056	0.439965852
7.0104	0.438554262
7.3152	0.437230539
7.62	0.435770717
7.9248	0.434041317
8.2296	0.432374127
8.5344	0.430450446
8.8392	0.426148296
9.144	0.421994675
9.4488	0.420861562
9.7536	0.420521251
10.0584	0.420309464
10.3632	0.419062233
10.668	0.416867312
10.9728	0.414701078
11.2776	0.412562502
11.5824	0.410450555
11.8872	0.408364209
12.192	0.40583185
12.4968	0.403091232
12.8016	0.400370423
13.1064	0.397668911
13.4112	0.394986175
13.716	0.392305838
14.0208	0.389360407
14.3256	0.386438564
14.6304	0.383386715
14.9352	0.380330247
15.24	0.377298922
15.5448	0.374277366
15.8496	0.371192465
16.1544	0.368133367
16.4592	0.365100188

16.764	0.362064415
17.0688	0.35902045
17.3736	0.356004892
17.6784	0.353020793
17.9832	0.350059952
18.288	0.347122584
18.5928	0.344208906
18.8976	0.341318528
19.2024	0.338437925
19.5072	0.33556531
19.812	0.332710128

## 6. EFFETTI DI SITO

Data la presenza di alcuni livelli con miscele sabbiose scarsamente addensate nei primi 20 m dal piano campagna, come evidenziato dalle indagini penetrometriche eseguite per questo studio e come ipotizzato dalla microzonazione sismica comunale (almeno per il settore centro-meridionale dell'area), si è eseguita una verifica di suscettività a liquefazione in caso di evento sismico su tutte le 3 verticali penetrometriche eseguite per questo studio e sulle 2 verticali penetrometriche d'archivio.

Oltre alle condizioni per così dire "statiche" necessarie allo sviluppo del fenomeno della liquefazione, ovvero la presenza di strati potenzialmente liquefacibili immersi in falda (come nel presente caso), l'attivazione del fenomeno necessita anche del contributo dinamico offerto dal sisma, ovvero l'intensità e la durata dello scuotimento. In letteratura sono state definite diverse metodologie per individuare, per ogni area, la soglia oltre la quale il fenomeno può attivarsi, recentemente richiamate, quali proposte operative, nell'Appendice 1 del documento "*Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione (LQ)*" redatto dalla Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (ver. 1, 2017).

Nelle linee guida si sottolinea come "[...] La  $M_w$  (magnitudo momento), nell'ambito degli studi di liquefazione, è una grandezza legata al processo fisico del terremoto (durata) e al numero di cicli di carico e scarico dei depositi investiti dalla onde sismiche. Quindi è preferibile scegliere una magnitudo di riferimento molto vicina all'area in studio [...]".

Vengono quindi elencati i metodi "classici" di calcolo della  $M_w$  ai fini della suscettività a liquefazione, evidenziandone vantaggi e criticità:

- Massima magnitudo dal catalogo DBMI11,
- Criteri del cut-off magnitudo-distanza
- Massima magnitudo delle zone sismogenetiche e disaggregazione (ICMS, 2008)

Viene poi proposta una metodologia originale per il calcolo della magnitudo per la verifica delle condizioni per la liquefazione, dal contributo originale del Prof. Dario



Albarello (Università di Siena), in grado di superare, almeno in parte, alcune delle maggiori criticità dei metodi classici sopra elencati, basata sull'uso diretto delle osservazioni macrosismiche relative ai terremoti che in passato hanno interessato il sito di studio (storia sismica di sito).

I risultati della metodologia proposta presentano i seguenti aspetti fondamentali che superano le criticità espresse precedentemente:

- Identificano una magnitudo soglia legata alla distanza tra l'epicentro di un evento sismico realmente accaduto e il sito in studio;
- Mantengono un legame diretto con le osservazioni effettivamente utilizzate per la loro determinazione, consentendo al contempo la corretta gestione delle incertezze inerenti questi dati che risulta coerente con il carattere discreto ed ordinale delle informazioni macrosismiche considerate per l'analisi;
- Legano strettamente i valori della  $M_w$  e della PGA (che sono i parametri che permetteranno di effettuare calcoli sul fattore di sicurezza o l'indice di liquefazione con i metodi semplificati) che devono riferirsi, per rispettare la natura fisica del problema, allo stesso evento sismico.

Per la definizione di un dato territorio comunale come potenzialmente soggetto a liquefazione (in termini di condizioni scatenanti ed al netto della possibile presenza di fattori predisponenti), il metodo propone due condizioni che costituiscono, **se verificate entrambe**, la condizione per la quale il sito in esame può essere considerato potenzialmente soggetto a liquefazione dinamica:

1. Un valore di  $I_{ref}$  (intensità di riferimento al sito) almeno pari a VII MCS; questa scelta è data dalla considerazione che nelle numerose leggi di conversione  $I\_MCS\_PGA$ , il grado VII MCS corrisponde a circa 0,1g; inoltre, si vede che solo dal VII grado della scala EMS98 sono presenti effetti di liquefazione fra quelli osservati nell'ambiente naturale in occasione di eventi con questa intensità;
2. La presenza nella lista degli eventi che contribuiscono a  $I_{ref}$  di almeno un evento con  $M_w$  e distanza  $R(km)$  compatibile con la relazione di Galli (2000):

$$M_w = 2.75 + 2.0 * \log_{10} R$$

Nell'Allegato 1 del documento della Commissione sono riportate le mappe del territorio nazionale e la lista dei Comuni per i quali sono verificate le soglie 1 e 2 precedentemente definite e sussiste, dunque, la condizione di suscettibilità alla liquefazione rispetto alla  $M_w$  e alla distanza epicentrale dell'evento sismico.

Per il territorio comunale di Castel Maggiore entrambe le condizioni sono verificate e viene fornito un valore di magnitudo di riferimento per la liquefazione pari a **5,35**.

Per la PGA al tempo  $T=0$  è stato scelto il valore restituito dall'analisi di risposta sismica locale effettuata per questo sito per lo stato limite SLV, ovvero pari a **0,3g**.

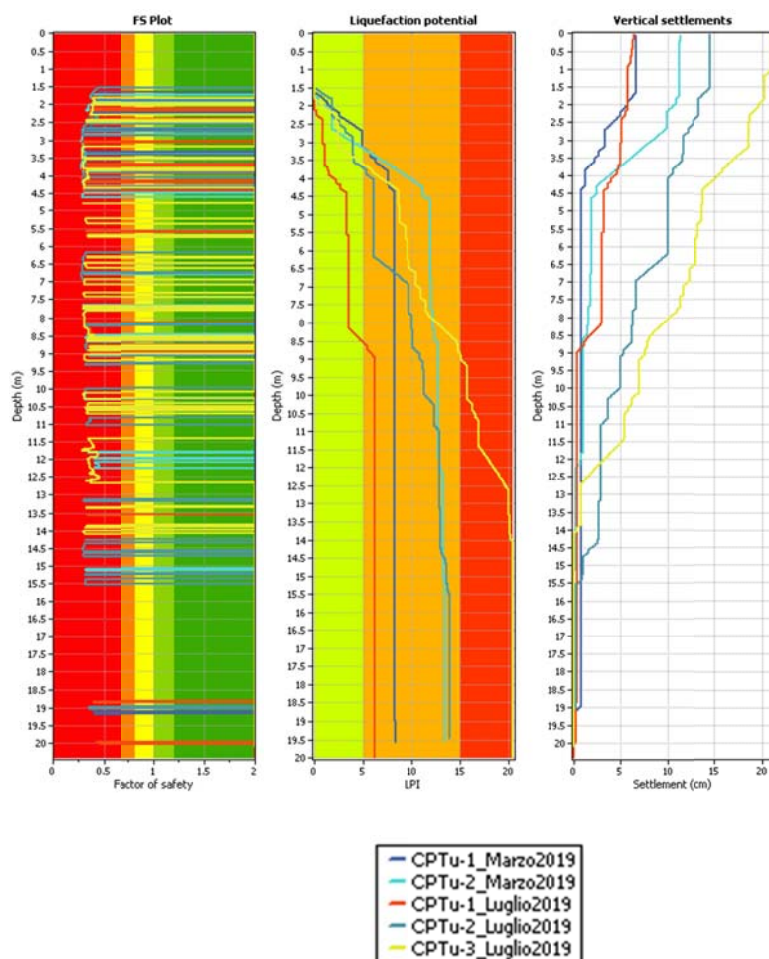
Si è proceduto ad un'analisi di suscettibilità alla liquefazione in corrispondenza delle 5 verticali penetrometriche con piezocono (CPTu), utilizzando l'algoritmo di calcolo sviluppato da Boulanger & Idriss (2014)<sup>5</sup>, facendo variare il coefficiente

---

<sup>5</sup> Boulanger, R.W., Idriss, I.M., 2014. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Davis, California.

che "governa" il contenuto percentuale in fini del terreno, " $C_{FC}$ ", tra -0.29 e +0.29, ovvero nell'intervallo di  $\pm$ deviazione standard del suo valore medio, che risulta essere pari a 0. Nel caso risultassero grandi differenze nel valore dell'IPL (Indice di Potenziale Liquefazione) facendo variare il " $C_{FC}$ ", si renderebbe utile eseguire analisi granulometriche su campioni di terreno per misurarne direttamente il contenuto in fini e, quindi, ricalcolare l'IPL con tale valore.

In Figura 29 si riportano i risultati in formato grafico delle analisi di IPL eseguite lungo le 5 verticali penetrometriche. Il **livello della falda è stato scelto pari a -1,5 m dal p.d.c.**, ovvero pari al suo valore rilevato in occasione dell'esecuzione delle 2 CPTu eseguite nel marzo 2019. Per tutti i dettagli del calcolo dell'IPL e dei cedimenti post-sismici si rimanda all'Allegato 5.



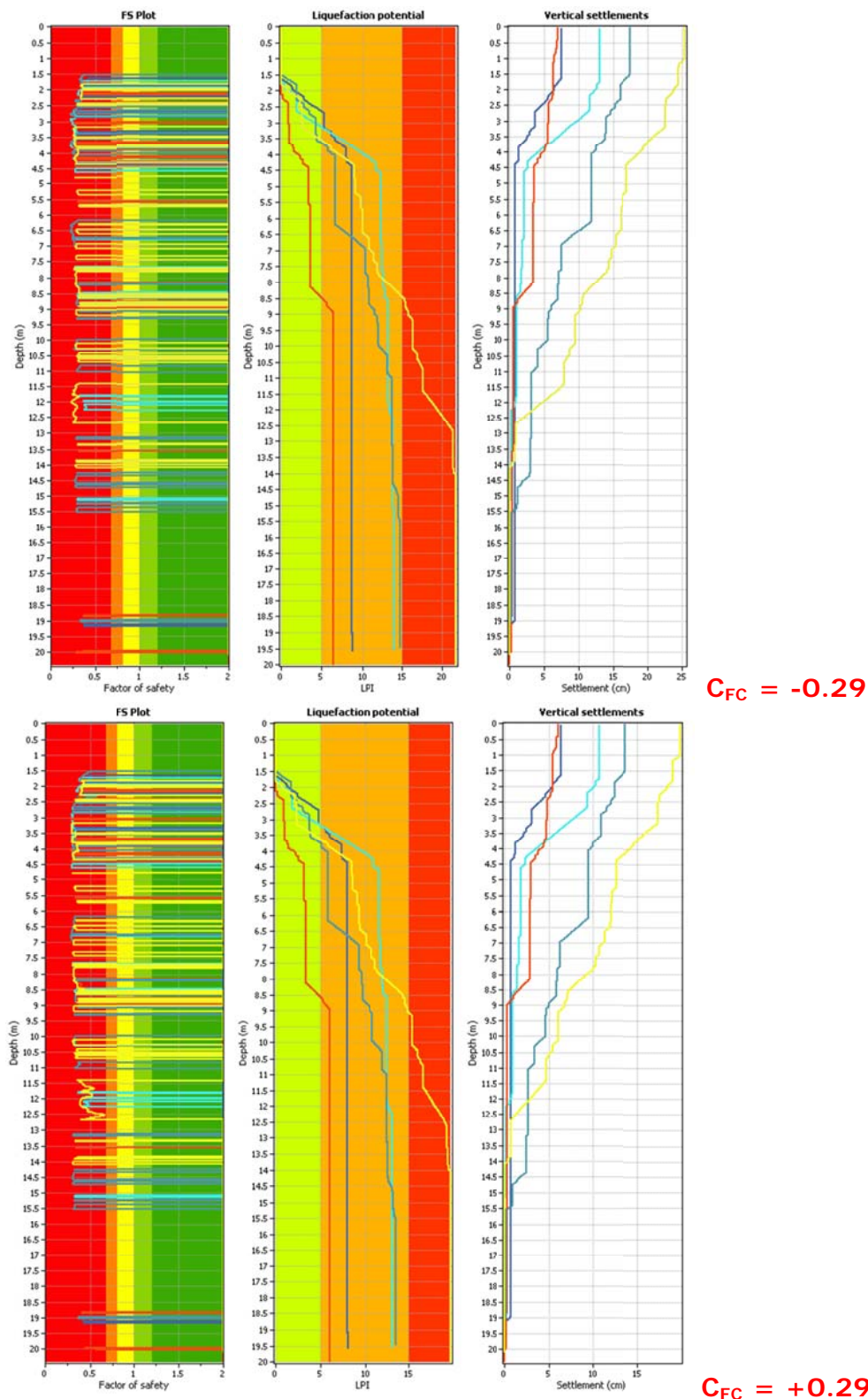


Figura 29 – Risultati delle verifiche a liquefazione eseguite lungo le 5 verticali penetrometriche realizzate all'interno dell'area di studio, eseguite facendo variare il coefficiente  $C_{FC}$  all'interno del suo campo di variabilità statistica.

I risultati dell'analisi mostrano innanzitutto una leggera differenza negli IPL all'interno del campo di variazione statistica del coefficiente  $C_{FC}$  di Boulanger &



Idriss (2014), facendo pertanto ritenere non necessaria una valutazione diretta del contenuto in fini dei terreni attraverso analisi di laboratorio.

Nel dettaglio, i valori più elevati dell'IPL si hanno in corrispondenza delle CPTu 2 e 3 del luglio 2019, pari, rispettivamente, a 14 e 20 che, in base alla classificazione di Sonmez (2003)<sup>6</sup>, sono indicativi di una pericolosità alla liquefazione rispettivamente "alta" e "molto alta". IPL pari a 13 e 8 si hanno in corrispondenza, rispettivamente, delle CPTu-2 e CPTu-1 del marzo 2019, indicativi di pericolosità "alta". IPL pari a 6 si ha in corrispondenza della CPTu-1 del luglio 2019, indicativo di pericolosità "alta".

Se si considerano i grafici di Figura 29, si vede come il maggior contributo alla liquefazione è dato principalmente dagli strati incoerenti ed a basso addensamento presenti nei primi 4/5 m dal p.d.c. Per questo si è cercato di quantificare quanto l'abbassamento della falda possa influire sull'IPL. Le tabelle inserite in Figura 30 mostrano il risultato di tale analisi. Si vede come già abbassando la falda alla profondità del luglio 2019, ovvero a circa -3,2 m, gli indici si abbassino notevolmente andando da 12 a 3 nelle CPTu del luglio 2019 e da 5,5 a 1,9 nelle CPTu del marzo 2019.

Se si abbassa ulteriormente la falda a -4 m, ovvero oltrepassando lo spessore più ricco di strati incoerenti a basso addensamento, allora l'IPL si abbassa ulteriormente andando da 6 a 1,7 nelle CPTu del luglio 2019 e da 1,3 a 0 nelle CPTu del marzo 2019.

L'analisi ha dimostrato come l'abbassamento della falda sotto i 4 m possa ridurre notevolmente l'IPL, che comunque si mantiene su livelli di pericolosità "alta" nelle CPTu-3 e 2 del luglio 2019, indicando come questa particolare zona sia la più suscettibile a manifestare fenomeni di liquefazione in occasione di eventi sismici.

Anche se l'abbassamento della falda risulta efficace, come metodo attivo risulta di difficile applicazione, prevedendo la realizzazione, intorno all'edificio, di un sistema di pozzi dotati di pompe in grado di garantire costantemente l'abbassamento della falda sotto il livello soglia prima definito.

Una seconda opzione percorribile, per contrastare possibili cedimenti strutturali in occasione di eventi sismici che determinino lo sviluppo della liquefazione nei livelli incoerenti meno addensati, è rappresentato dall'esecuzione di fondazioni profonde. E' un metodo passivo, che permette di trasferire i carichi dell'edificio su quei livelli del terreno meno suscettibili di liquefazione, oltrepassando gli spessori incoerenti meno addensati, e che non risente degli effetti dovuti alle variazioni stagionali del livello di falda.

---

<sup>6</sup> Sonmez, H. (2003). Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey). Environmental Geology, 44(7), 862–871.

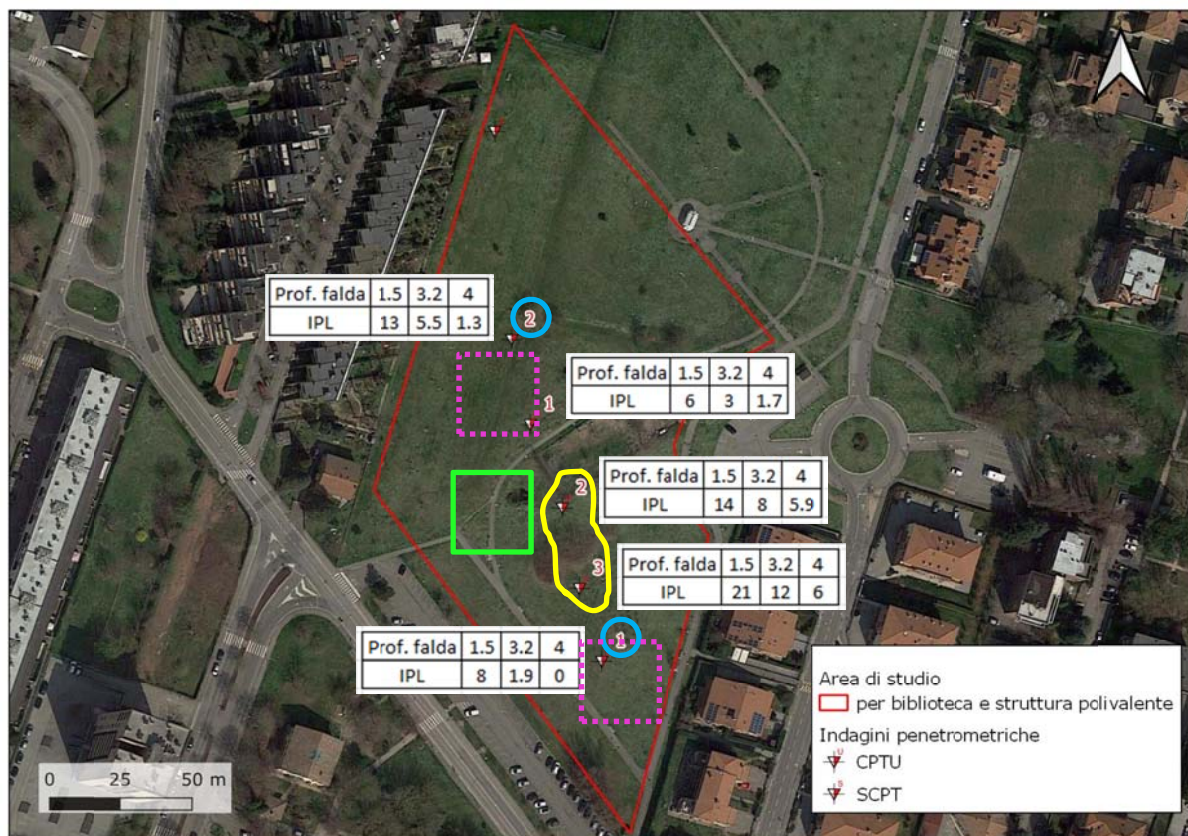


Figura 30 – Panoramica dei risultati dell'analisi di suscettività a liquefazione per l'area di studio. I cerchi azzurri identificano le CPTu eseguite nel marzo 2019. I valori di CSR e di PGA derivano dall'analisi di risposta per lo stato limite SLV. Le analisi di suscettività sono state ripetute facendo variare la profondità della falda: -1,5 m; -3,2 m; -4 m rispetto al piano campagna. Il riquadro verde indica orientativamente la posizione prescelta dai progettisti per le nuove strutture. Il poligono giallo indica l'area maggiormente suscettibile a liquefazione in occasione di eventi sismici. I riquadri fucsia tratteggiati indicano le zone ove minore potrebbe essere la suscettività a liquefazione rispetto alla zona prescelta dai progettisti, in base alle risultanze del presente studio.



Figura 31 – Rendering del progetto che mostra l'inserimento delle nuove strutture (cerchio verde) in corrispondenza, all'incirca, del riquadro verde di Figura 30.

## 7. SINTESI DELL'ANALISI DEI DATI RACCOLTI E CONCLUSIONI

Dall'analisi integrata dei dati scientifici disponibili in bibliografia, delle osservazioni di campagna effettuate durante il sopralluogo e dei dati acquisiti ed elaborati grazie ai sondaggi geognostici eseguiti, è stato possibile caratterizzare il terreno in esame dai punti di vista litostratigrafico, geotecnico e sismico e dare un giudizio sulla fattibilità dell'intervento in progetto. Giudizio che è risultato essere positivo e che ha permesso di dichiarare la **fattibilità della realizzazione della nuova biblioteca comunale e della struttura polivalente di Castel Maggiore**, tenendo conto delle criticità evidenziate dalle analisi eseguite per questo studio, relative alla suscettività a liquefazione in occasione di eventi sismici.

Dallo studio eseguito emerge come l'area si collochi in una zona a debolissima inclinazione topografica, che permette uno sviluppo urbanistico senza particolari problemi, con presenza di una sequenza piuttosto uniforme di terreni fini, argillosi e argilloso-limosi, lungo tutti i 20 m esplorati, con livelli di miscele sabbiose in particolare presenti nei primi 4/5 m dal p.d.c.

Dal punto di vista geotecnico, i valori di coesione non drenata raggiungono i minimi relativi nel settore più meridionale dell'area indagata, variabili da 65 a 140 kPa, coi valori relativamente più alti laddove le argille sono frammiste a limi e quelli relativamente più bassi nelle argille "pure". In tutte le altre CPTu i valori di coesione non drenata risultano generalmente superiori rispetto a quelli del limite meridionale, in media pari a circa 100 kPa.

Relativamente ai livelli sabbiosi o con miscele sabbiose, la densità relativa ed il parametro di stato per le sabbie mettono in evidenza uno stato di addensamento piuttosto scarso già a partire da 0,5/1 m dal p.d.c., fino a divenire sabbie sciolte tra 2,5 e 4 m e nei seguenti livelli sparsi, tra 6 m e 20 m.

La soggiacenza dell'acquifero principale, sulla scorta dei dati piezometrici elaborati per il QC del PSC dell'Associazione Terre di Pianura, dovrebbe attestarsi a circa 5 m dal p.d.c.; in occasione dell'esecuzione delle prove penetrometriche del marzo 2019 il livello di falda è stato rilevato a circa -1,6 m dal p.d.c., mentre in occasione dell'esecuzione delle prove penetrometriche del luglio 2019, il livello di falda è stato rilevato a circa -3,2 m dal p.d.c.

Per la caratterizzazione sismica del terreno sono stati utilizzati i dati ricavati da un'indagine penetrometrica con cono sismico realizzata in passato nel settore nord dell'area di studio.

L'indagine ha permesso di ricavare in modo diretto il profilo di velocità delle onde di taglio "S" con la profondità, da cui è stato ricavato il parametro di Normativa  $V_{s30}$ , risultato pari a **207 m/s**, che, grazie anche all'aumento progressivo della rigidità del terreno con la profondità, permette di inserire il terreno stesso all'interno della classe **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*.



In data 17/07/2019 è stata eseguita un'indagine a sismica attiva di tipo MASW parallela ed adiacente all'allineamento delle complessive 5 CPTu eseguite nell'area, al fine di ottenere un profilo di Vs con la profondità rappresentativo dell'area che sarà interessata dal progetto edilizio. Dal confronto tra il profilo interpretato dall'analisi MASW e quello ricavato con misura diretta dalla SCPT è emerso come questi siano del tutto simili, pertanto si è scelto di utilizzare le misure dirette di Vs da SCPT per le seguenti analisi di risposta sismica locale e liquefazione.

L'esame di due indagini a sismica passiva d'archivio, eseguite in prossimità dell'area di studio, ha permesso di identificare per l'area una frequenza di vibrazione fondamentale del terreno pari a circa **0,84 Hz**.

La possibilità che si possano verificare fenomeni di liquefazione e cedimenti importanti in caso di evento sismico, i cui presupposti sono stati confermati dall'analisi delle prove penetrometriche eseguite per questo studio, ha determinato la necessità di eseguire un'analisi di risposta sismica locale per la valutazione della PGA al suolo e degli spettri in accelerazione in superficie per i 4 stati limite: SLO, SLD, SLV e SLC.

I risultati dell'analisi, in termini di sola PGA al suolo, sono:

- SLO: 0,09g
- SLD: 0,14g
- SLV: 0,3g
- SLC: 0,37g

Si è infine eseguita una verifica di suscettività a liquefazione in caso di evento sismico su tutte le 5 verticali penetrometriche realizzate all'interno dell'area.

La verifica, eseguita con falda a -1,5 m utilizzando il profilo di CSR ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale e l'algoritmo di calcolo di Boulanger & Idriss (2014), ha evidenziato Indici di Potenziale Liquefazione pari a:

- CPTu-1 marzo 2019: 8
- CPTu-2 marzo 2019: 13
- CPTu-1 luglio 2019: 6
- CPTu-2 luglio 2019: 14
- CPTu-3 luglio 2019: 20

e cedimenti post-sismici pari a:

- CPTu-1 marzo 2019: 7 cm
- CPTu-2 marzo 2019: 11 cm
- CPTu-1 luglio 2019: 6 cm
- CPTu-2 luglio 2019: 14 cm
- CPTu-3 luglio 2019: 21 cm

Anche nel caso in cui la falda possa essere abbassata a 4 m, l'IPL si mantiene su livelli di pericolosità comunque "alta" nelle CPTu-3 e 2 del luglio 2019, indicando come questa particolare zona sia la più suscettibile a manifestare fenomeni di liquefazione in occasione di eventi sismici.

**I risultati ottenuti in questo studio consentono di giudicare positiva la fattibilità del progetto, al contempo suggerendo di traslare l'area di sedime delle nuove strutture alcuni metri a nord o a SE rispetto alla posizione di progetto, come indicato dai riquadri fucsia in Figura 30 della presente relazione.**

Le aree suggerite non sono comunque completamente esenti da condizioni che possono favorire la liquefazione, ma in relazione alla posizione di progetto mostrano caratteristiche relativamente più favorevoli alla stabilità in caso di eventi sismici.

Rimane infatti caratteristica comune a tutta l'area indagata la presenza di uno spessore superficiale di circa 4/5 m, caratterizzato da una maggior frequenza di livelli incoerenti poco addensati, immerso in falda, che contribuisce in maniera consistente alla predisposizione verso fenomeni di liquefazione in occasione di eventi sismici.

Se il mantenimento della falda a profondità superiori ai 4 m può essere ottenuto con pozzi drenanti circostanti l'area che verrà scelta per l'intervento, la possibilità di fondare gli edifici su pali che s'innestino nei livelli meno soggetti a liquefazione sembra preferibile, poiché in grado di garantire nel tempo condizioni di sicurezza verso l'instabilità al di là delle variazioni stagionali del livello di falda.

Modena, 20/12/2019

Il Tecnico incaricato

Dott. Geol. Alessandro Ghinoi



## **Allegato 1a**

### **Indagini geognostiche**

**Archivio dati geognostici**

**PSC comunale**

**(1 SCPT e 2 HVSR)**

Città di  
**CASTEL MAGGIORE**



# PSC

## ELABORATO IN FORMA ASSOCIATA

### PIANO STRUTTURALE COMUNALE

AGGIORNAMENTO OTTOBRE 2013

PERICOLOSITA E MICROZONAZIONE SISMICA  
(DAL 112/2007)

Archivio prove geognostiche  
e geofisiche di riferimento

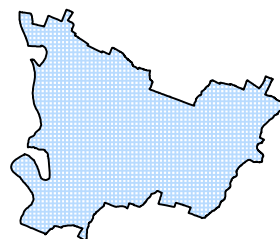
Sindaco  
Marco Monesi

Segretario comunale  
Dott.ssa Monica Tardella

Responsabile Ufficio Pianificazione Territoriale  
Arch. Piero Vignali

Elaborazione  
Studio Sangiorgi: Dott. Geol. Samuel Sangiorgi  
Dott. Geol. Venusia Ferrari

PRIMA APPROVAZIONE  
adozione                      delib. C.C n.12 del 11.02.2009  
approvazione                delib. C.C n.04 del 27.01.2010





## **VARIANTI**

**Variante in materia di riduzione del rischio sismico – Co-pianificazione ai sensi dell'art. 21 della L.R. 20/2000 con variante al PTCP.**

Approvazione Accordo di Pianificazione:

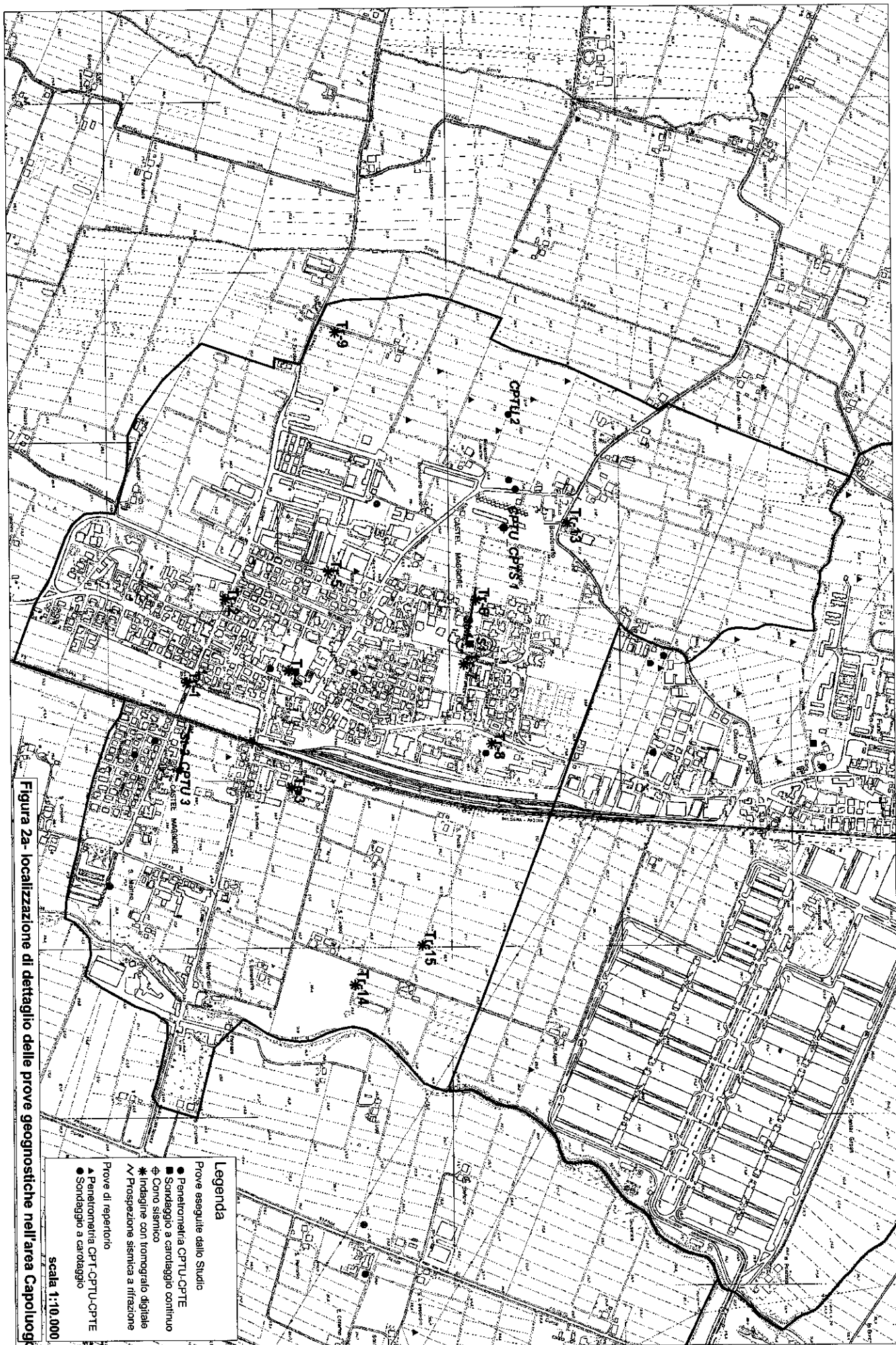
delibera Cons. Prov. n. 1 del 07/01/2013

Adozione:

delibera Cons. Prov. n. 4 del 14/01/2013

Approvazione:

delibera Cons. Prov. n. 57 del 28/10/2013



Comune  
Via  
Localita'  
Committente  
Data

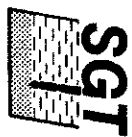
castel maggiore  
bordanello  
castel maggiore  
studio Viel  
08-ott-07

Falda

3.4 m

Sigla della Punta  
Azzeramento  
Ultimo taratura guadagno  
Ultimo taratura per deriva termica

Tecnopenta 240104  
Inizio prova  
18-set-2007  
16-dic-2004



Società di  
Geologia  
Territoriale

S.G.T. sas  
di Van Zutphen Albert & C.  
Via Matteotti 50  
48012 Bagnacavallo (RA)  
www.geos5.com

# CPTU

1

Profondità  
Attrito Laterale corretto FT (MPa)  
Attrito Laterale Fs (MPa)

Resistenza alla Punta corretta QT (MPa)  
Resistenza alla Punta Qc (MPa)

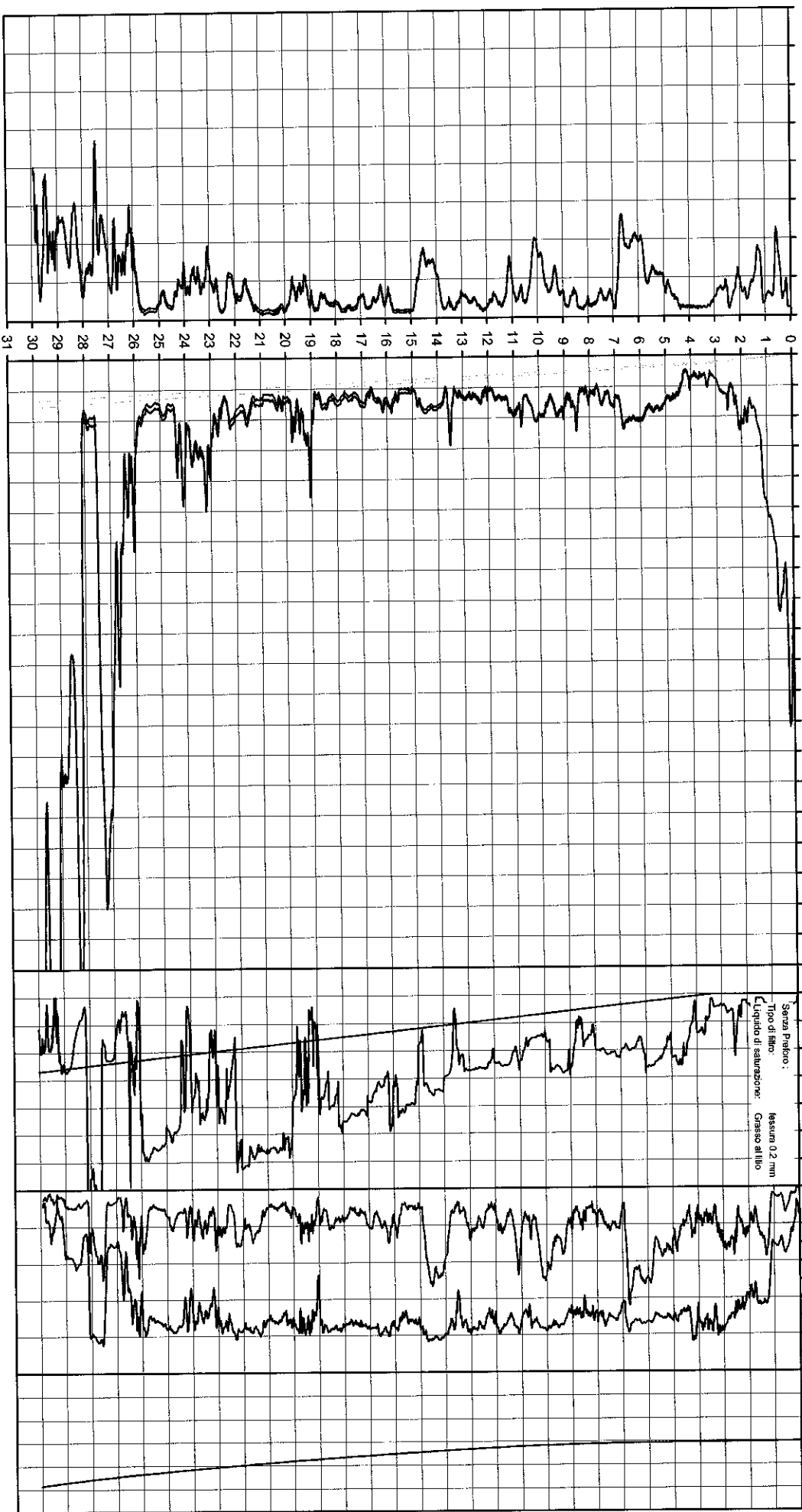
Pressione Interstiziale  
Penetrometrica (MPa)

Indice di Comportamento Ic  
1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5

Pressione Idrostatica (MPa)

FT/QT (%)

Deviazione (m)



# 1\_csm/psc/SCPTU1

COMMITTENTE	STUDIO VIEL
CONO SISMICO	CPTU n° 1
Località	CASTEL MAGGIORE (BO)
Data acquisizione	8/10/2007

Codice lavoro 616



Profondità	Vp	Vs	v	γ	E <sub>din</sub>	G <sub>din</sub>	K <sub>din</sub>
m/sec.	m/sec.			T/m²	Kg/cm²	Kg/cm²	Kg/cm²

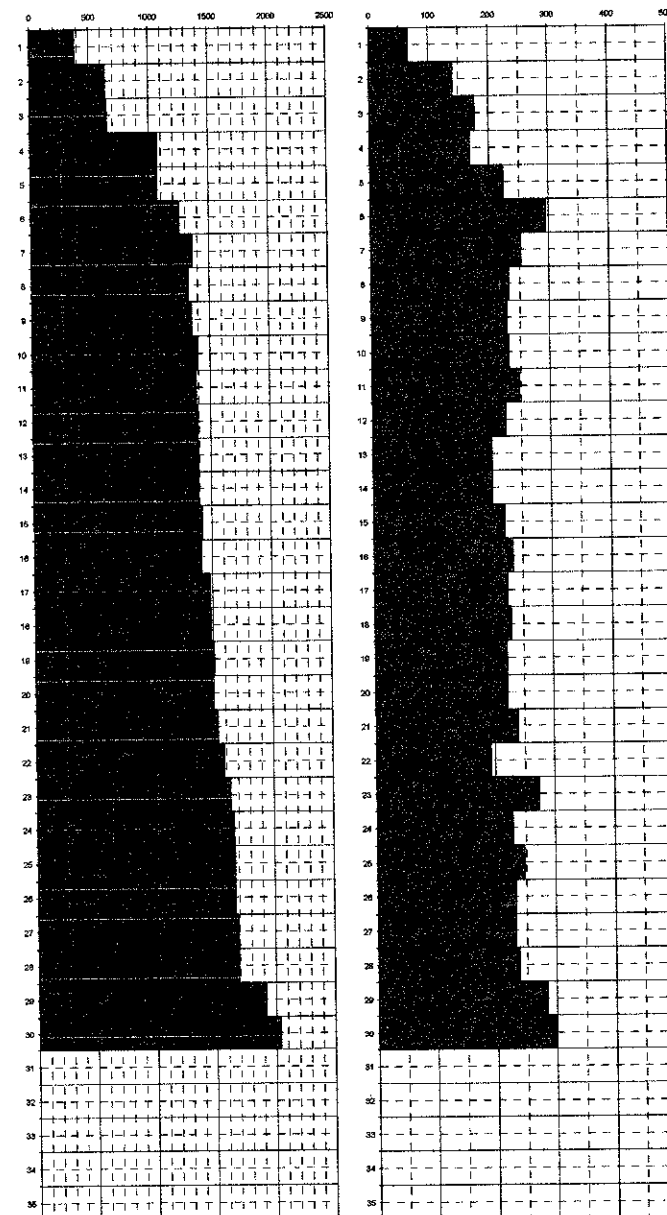
0							
1	377	66	0.48	1.57	205	69	2183
2	838	141	0.47	1.74	1033	350	6748
3	646	177	0.46	1.74	1625	557	6669
4	1070	169	0.49	1.92	1655	556	21645
5	1065	224	0.48	1.92	2896	980	20870
6	1245	296	0.47	1.98	5175	1780	28868
7	1359	253	0.48	2.01	3877	1308	36073
8	1319	231	0.48	2.00	3238	1091	33960
9	1348	229	0.49	2.01	3184	1072	35731
10	1395	231	0.49	2.02	3249	1093	38573
11	1381	248	0.48	2.01	3737	1280	37491
12	1385	225	0.49	2.02	3084	1037	38064
13	1389	199	0.49	2.02	2436	818	38573
14	1392	201	0.49	2.02	2468	829	38730
15	1414	220	0.49	2.02	2967	997	39004
16	1406	233	0.49	2.02	3333	1121	39215
17	1481	225	0.49	2.04	3127	1051	44219
18	1482	229	0.49	2.04	3255	1094	44249
19	1505	222	0.49	2.05	3062	1028	45945
20	1484	222	0.49	2.04	3057	1027	44478
21	1530	239	0.49	2.05	3561	1197	47456
22	1580	193	0.49	2.07	2350	787	51531
23	1632	274	0.49	2.08	4725	1590	54361
24	1680	229	0.49	2.09	3324	1115	57122
25	1661	247	0.49	2.09	3863	1297	56920
26	1661	233	0.49	2.09	3427	1150	57153
27	1690	231	0.49	2.09	3408	1143	59395
28	1690	237	0.49	2.09	3581	1202	59347
29	1918	284	0.49	2.14	5259	1766	78049
30	2036	299	0.49	2.17	5871	1972	88986
31							
32							
33							
34							
35							

VELOCITA' ONDE DI COMPRESSIONE

m/sec

VELOCITA' ONDE DI TAGLIO

m/sec



## Legenda parametri dinamici

Tp	Tempi onde di compressione	millisecondi	γ	Peso di volume	T/m²
Ts	Tempi onde di taglio	millisecondi	E <sub>din</sub>	Modulo di Elasticità dinamico	Kg/cm²
Vp	Velocità onde di compressione	m/sec	G <sub>din</sub>	Modulo di Taglio dinamico	Kg/cm²
Vs	Velocità onde di taglio	m/sec	K <sub>din</sub>	Modulo di Compressibilità dinamico	Kg/cm²
v	Coefficiente di Poisson	-			

## CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI (NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI P.C.M. n° 3341 del 14/09/2005)

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}}$$

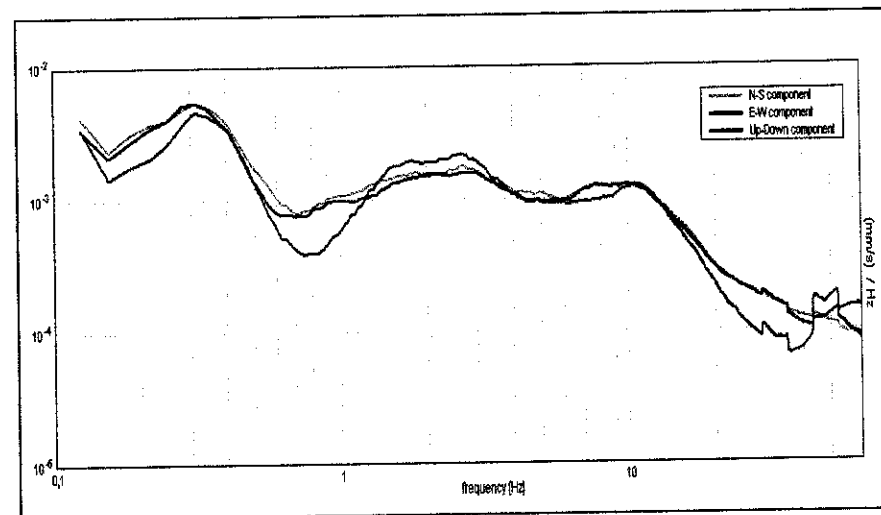
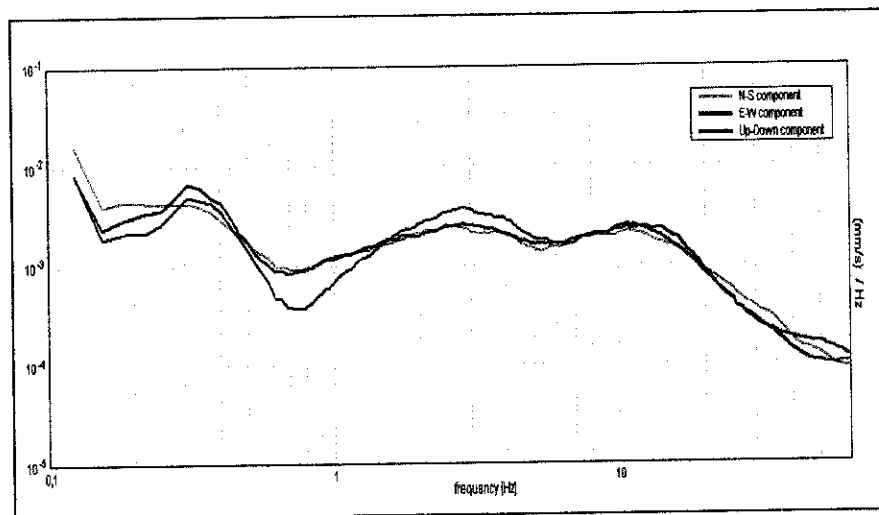
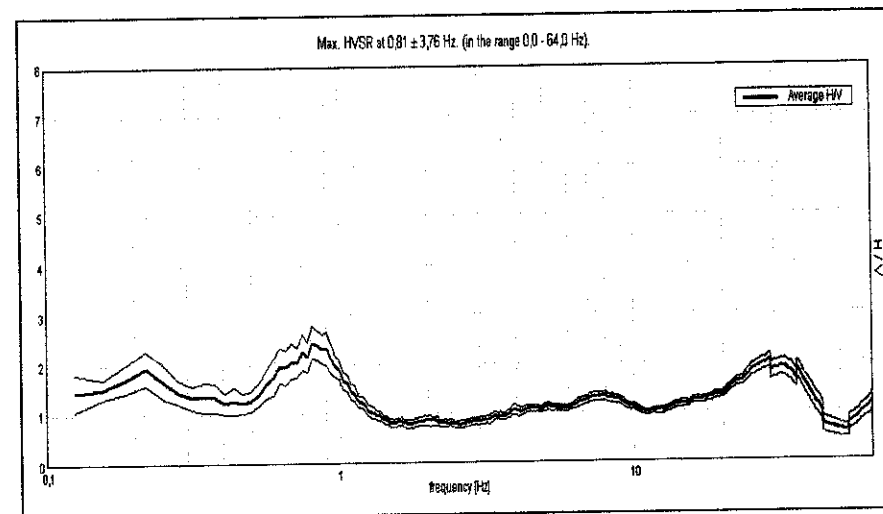
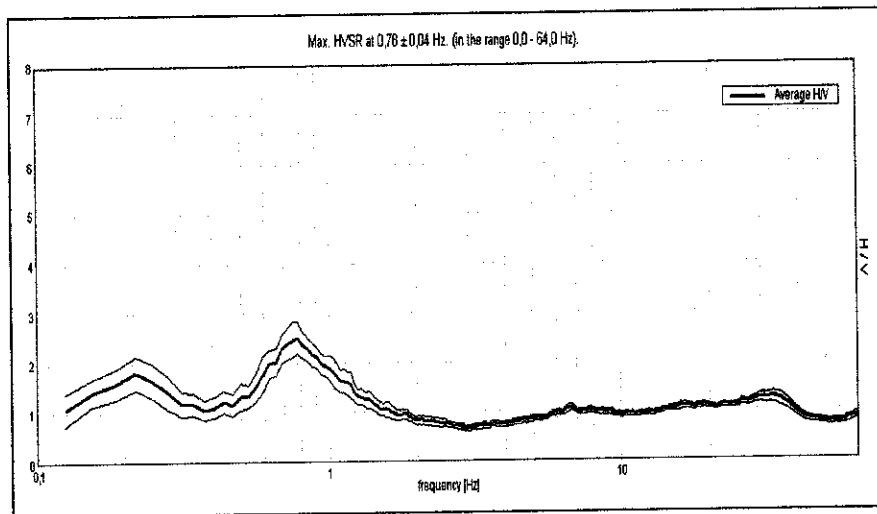
$$V_{s30} = 207 \text{ m/sec}$$

$$G_0 = 860 \text{ Kg/cm}^2$$

CATEGORIA SUOLO = C

Fig 4



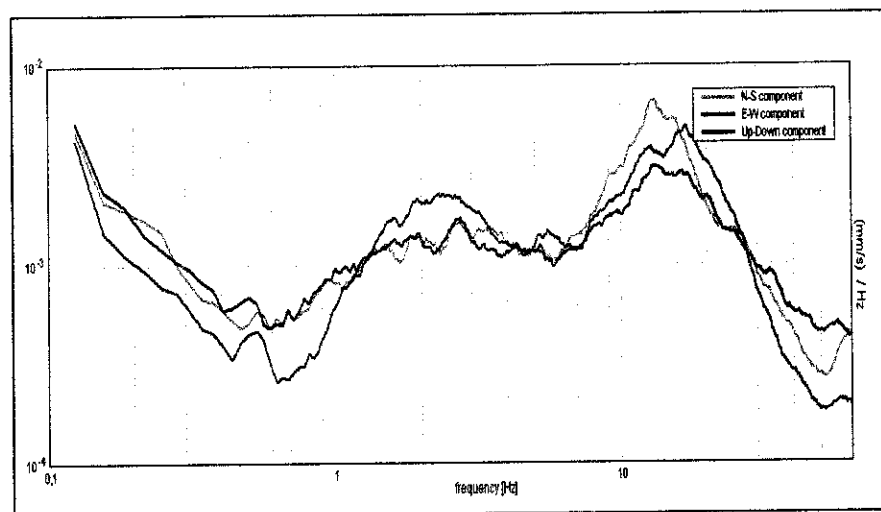
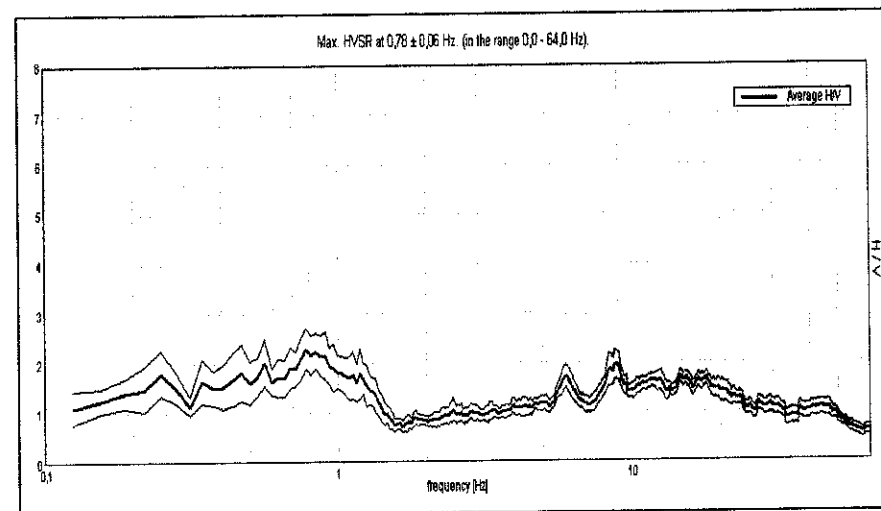
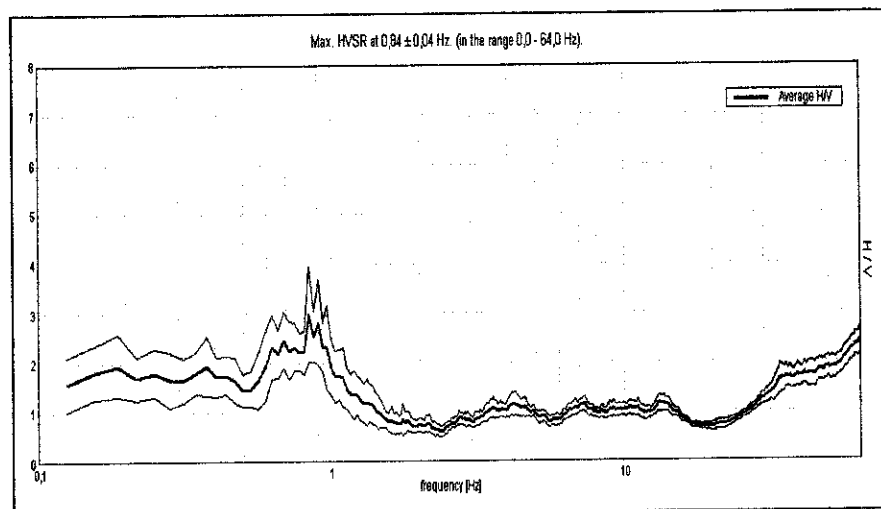


**Castel Maggiore-Istituto Keynes – Tr 5**

1\_csm/psc/TR5

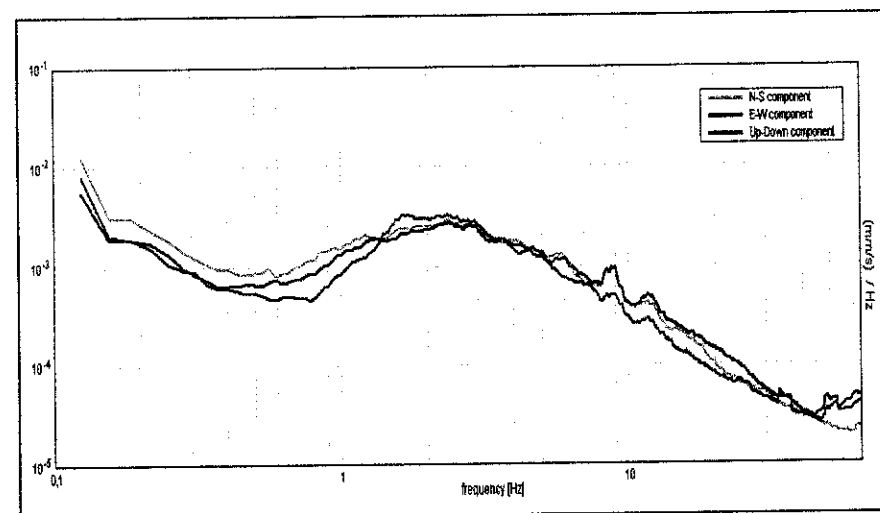
**Castel Maggiore-Parco Montezemolo- Tr 6**

1\_csm/psc/TR6



**Castel Maggiore -Via Bondanello-Tr 13**

1\_csm/psc/TR13



**Castel Maggiore-Via san Pierino-Tr 14**

1\_csm/psc/TR14

## **Allegato 1b**

### **Indagini geognostiche**

**Archivio dati geognostici**

**Regione Emilia-Romagna**

**(stratigrafia pozzo per acqua)**

Ditta EDILCOOP - CREVALCOREresidente a CREVALCORE in Via Guisa n.24-Perforazione  
approfondim. pozzo ad uso IRRIGUO-GIARDINO in Comune di CASTEL MAGGIOREFrazione -- località -- F. i Mapp. N° 11-Data di ultimazione lavori: 26.4.1977-Ditta perforatrice: CAVICCHI ENZO - Via Larga, 53 - Renazzo (Fe)

-Caratteristiche del pozzo:

avanzopozzo (si o no) NO  
Ø interno tubi mm. 150-profondità mt. 70

-Caratteristiche del gruppo

motore pompa:

livello statico mt. 14tipo della pompa UTA-prevalenza della pompa mt. 56tipo del motore UTA-potenza in HP. 7,5-Portata: lt/sec. 8ha. are ca. ca.-Fabbisogno (civile, industriale,  
~~zootecnico~~):lt/sec. 6

## STRATIGRAFIA REALE DEL TERRENO

Indicare la natura dei terreni  
e le FALDE ACQUIFERE ATTRAVERSA  
TE, specificando se il tubo è  
fenestrato in corrispondenza- da mt. 00 a mt. 18  
terra- da mt. 18 a mt. 20

SABBIA-FALDA

-da mt. 20 a mt. 27

TERRA

-da mt. 27 a mt. 31

SABBIA-ARGILLA-ACQUA

-da mt. 31 a mt. 57

ARGILLA

-da mt. 57 a mt. 58,5

SABBIA-GHIAIETTO-ACQUA

-da mt. 58,5 a mt. 64

TERRA

-da mt. 64 a mt. 70

SABBIA-GHIAIETTO-ACQUA

TUBO FESSURATO

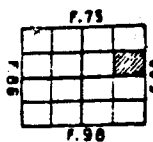
La Ditta sottoscritta afferma, sotto la propria responsabilità, che  
la presente dichiarazione è completa e veritiera.

Firma

EDILCOOP  
Soc. Coop. a.r.l.







Castel Maggiore

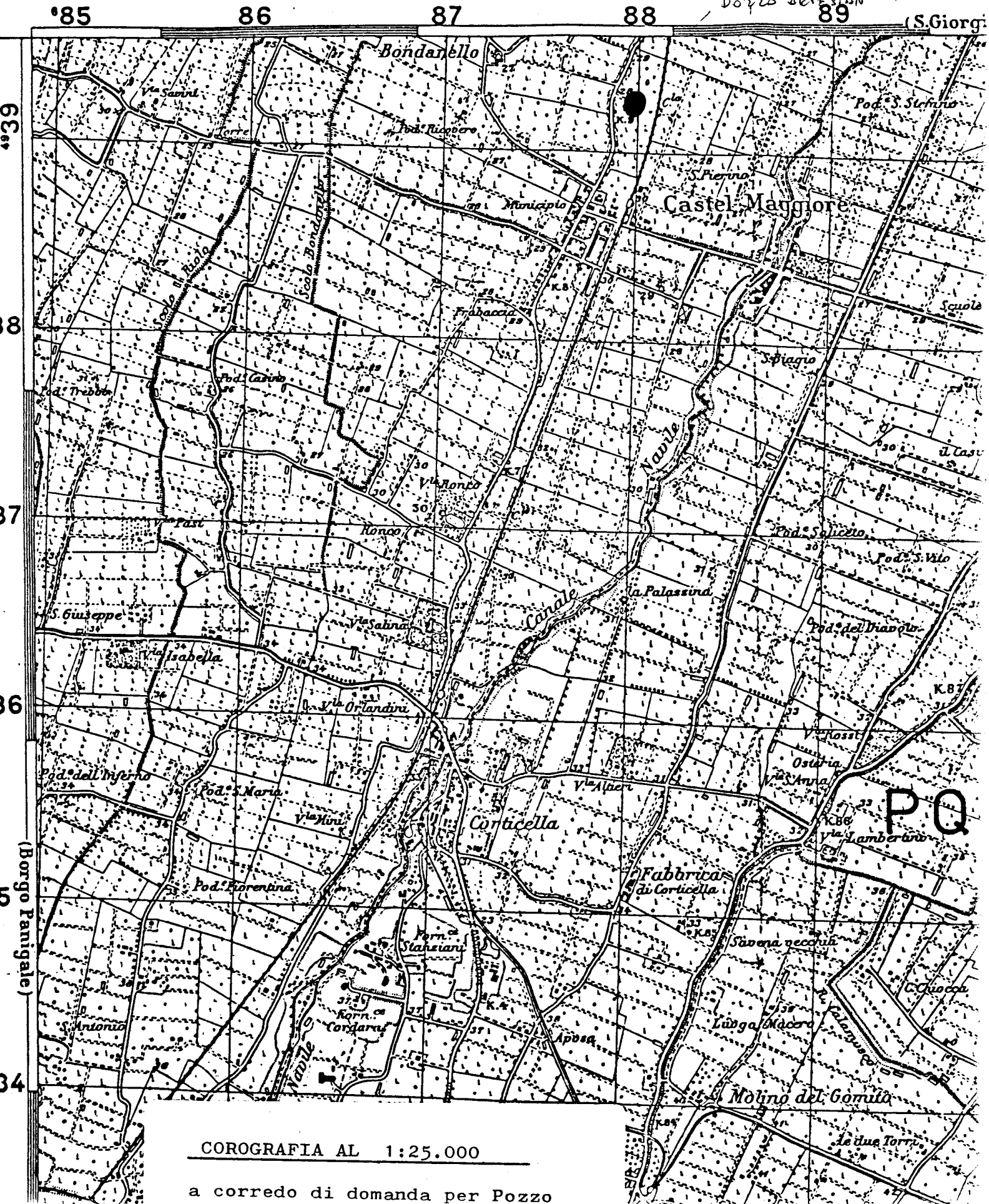
F° 87 della Carta d'Italia

CASTEL M

Longitudine Ovest dal mer

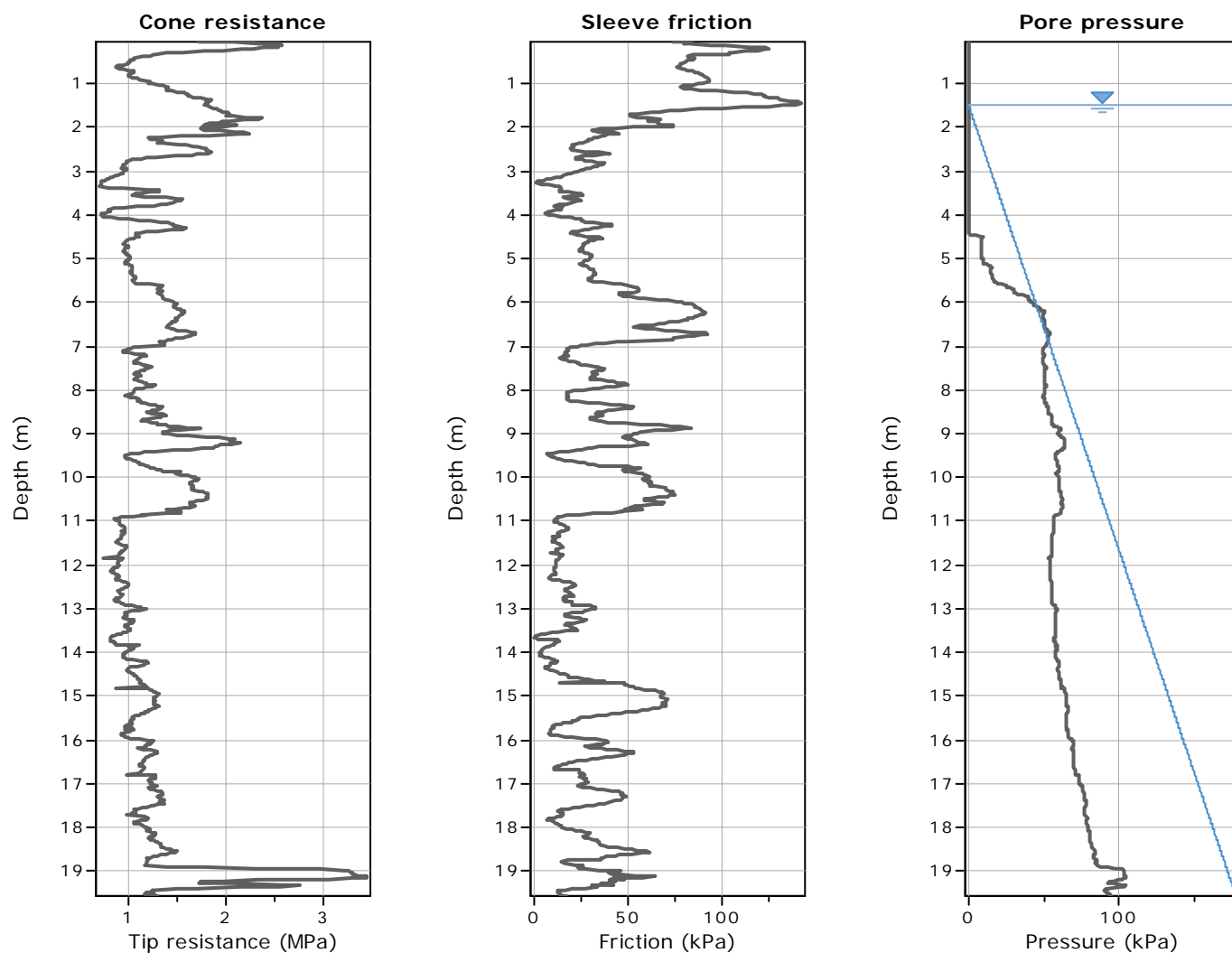
DOZZO SESTIAN

(S. Giorgi

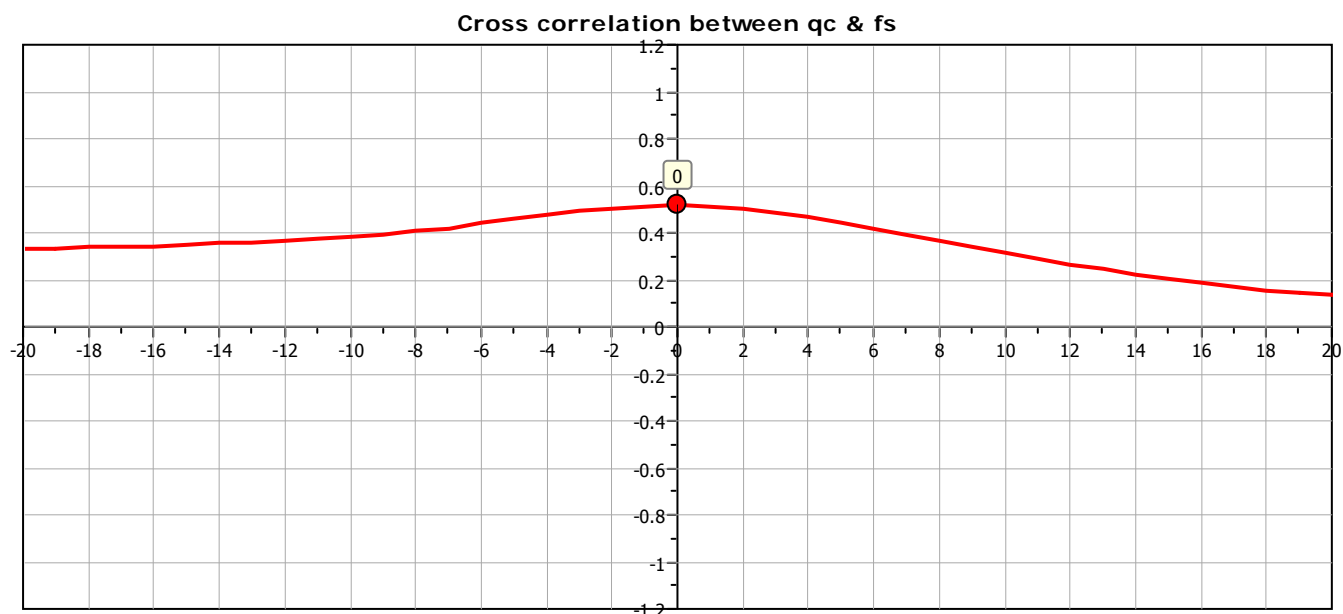


## **Allegato 2**

### **Elaborazione indagini geognostiche eseguite per questo studio (3 CPTu – nuova esecuzione) (2 CPTu - archivio)**

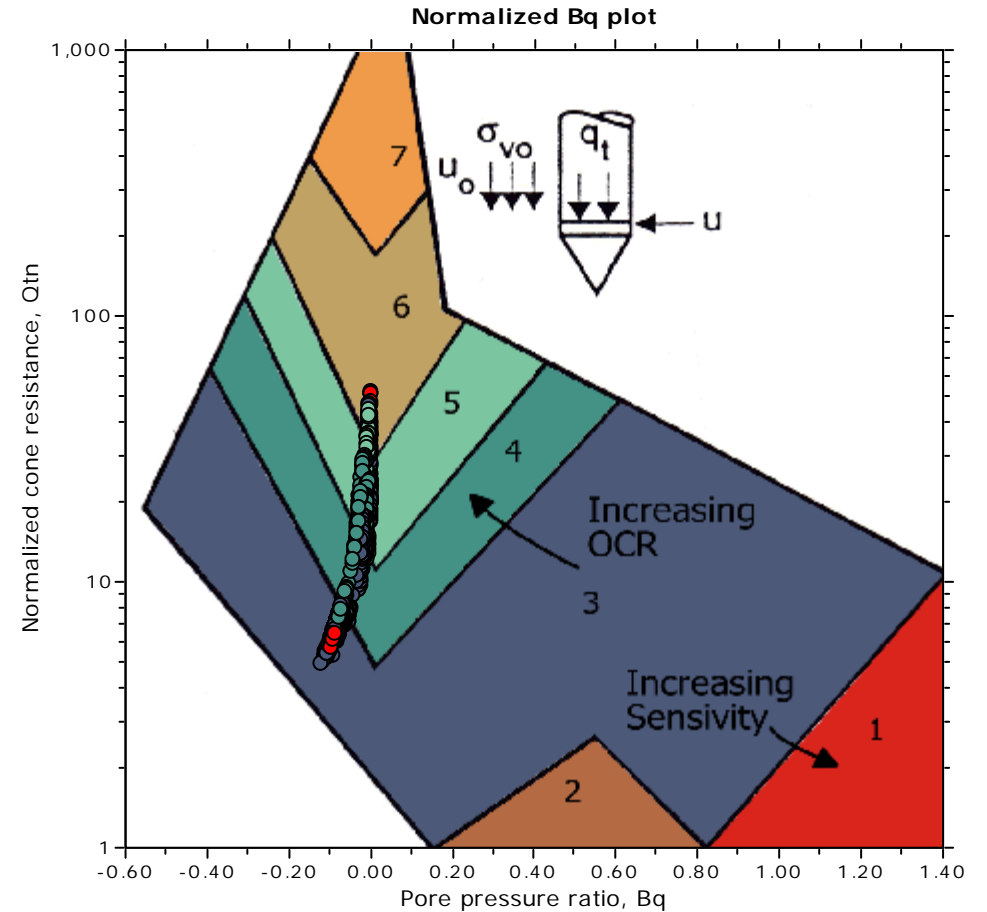
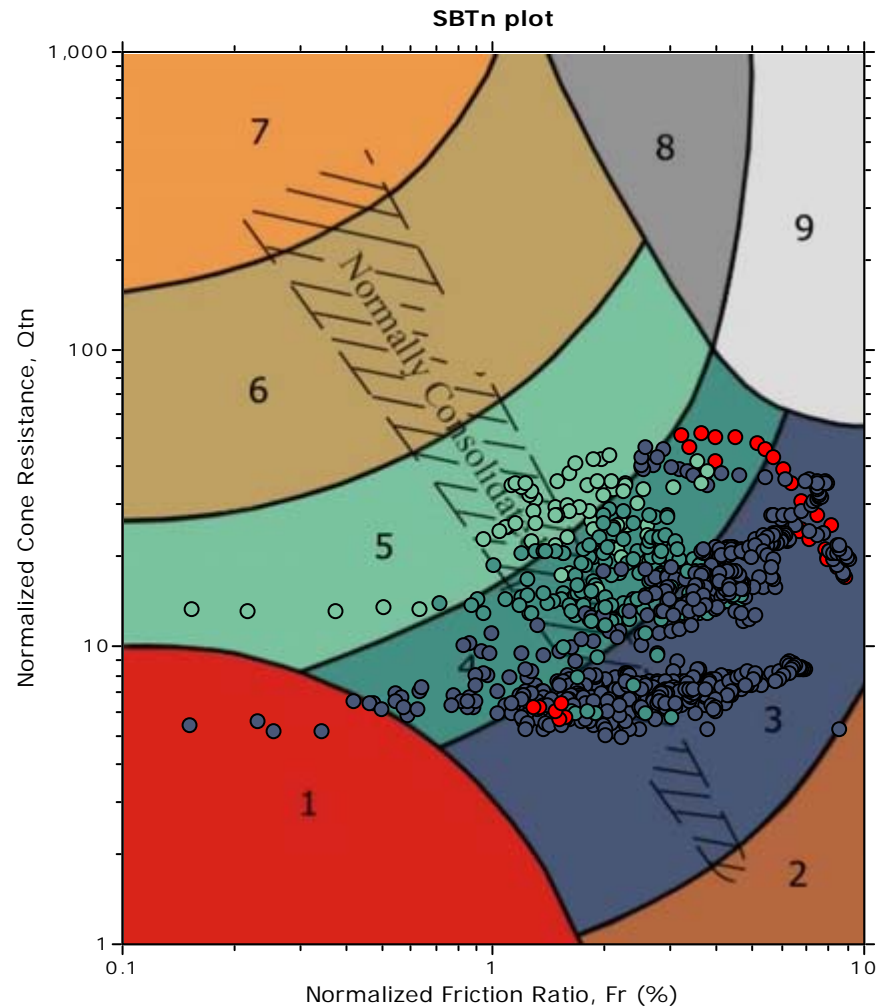


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw  $q_c$  and  $f_s$  values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



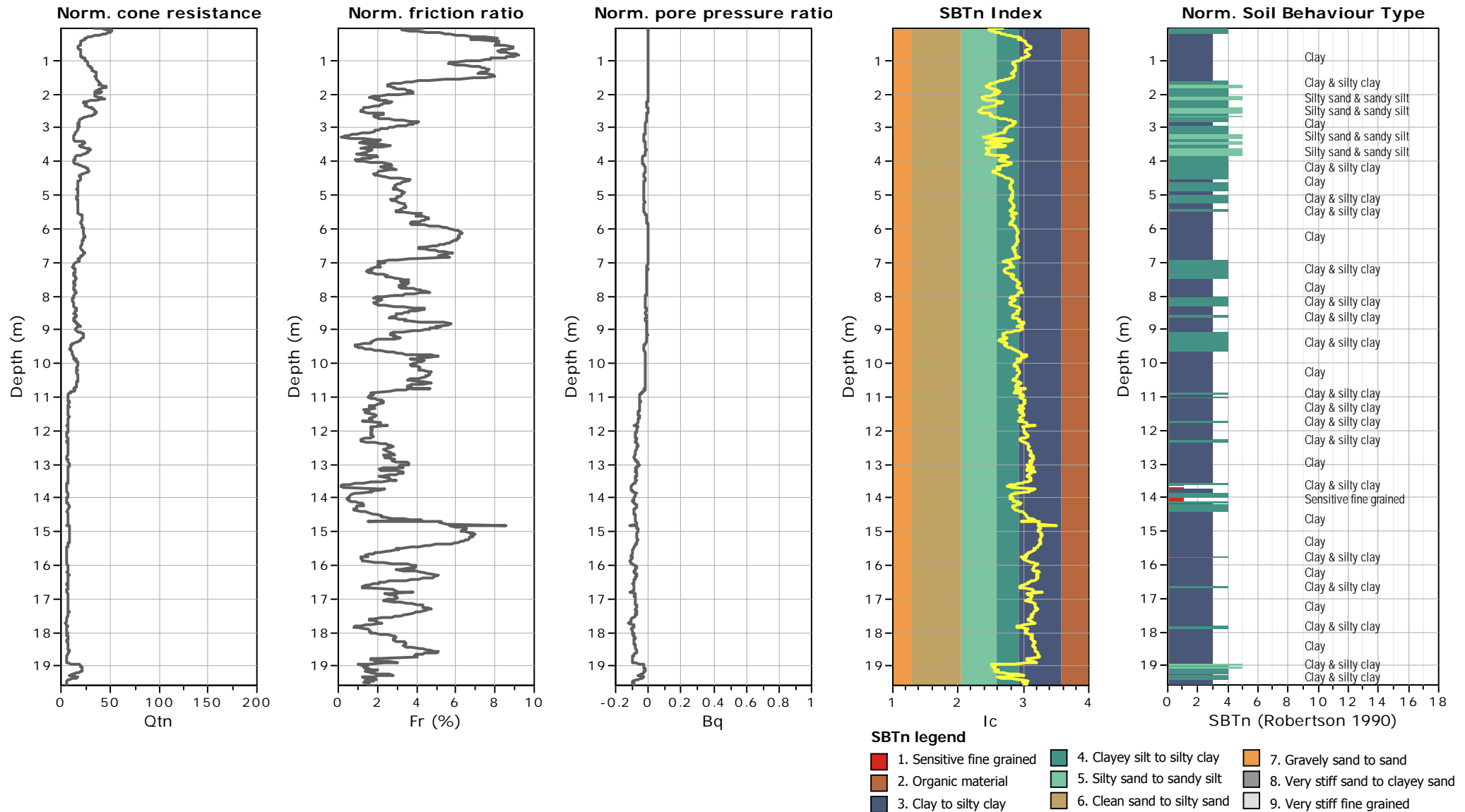


# SBT - Bq plots (normalized)



## SBTn legend

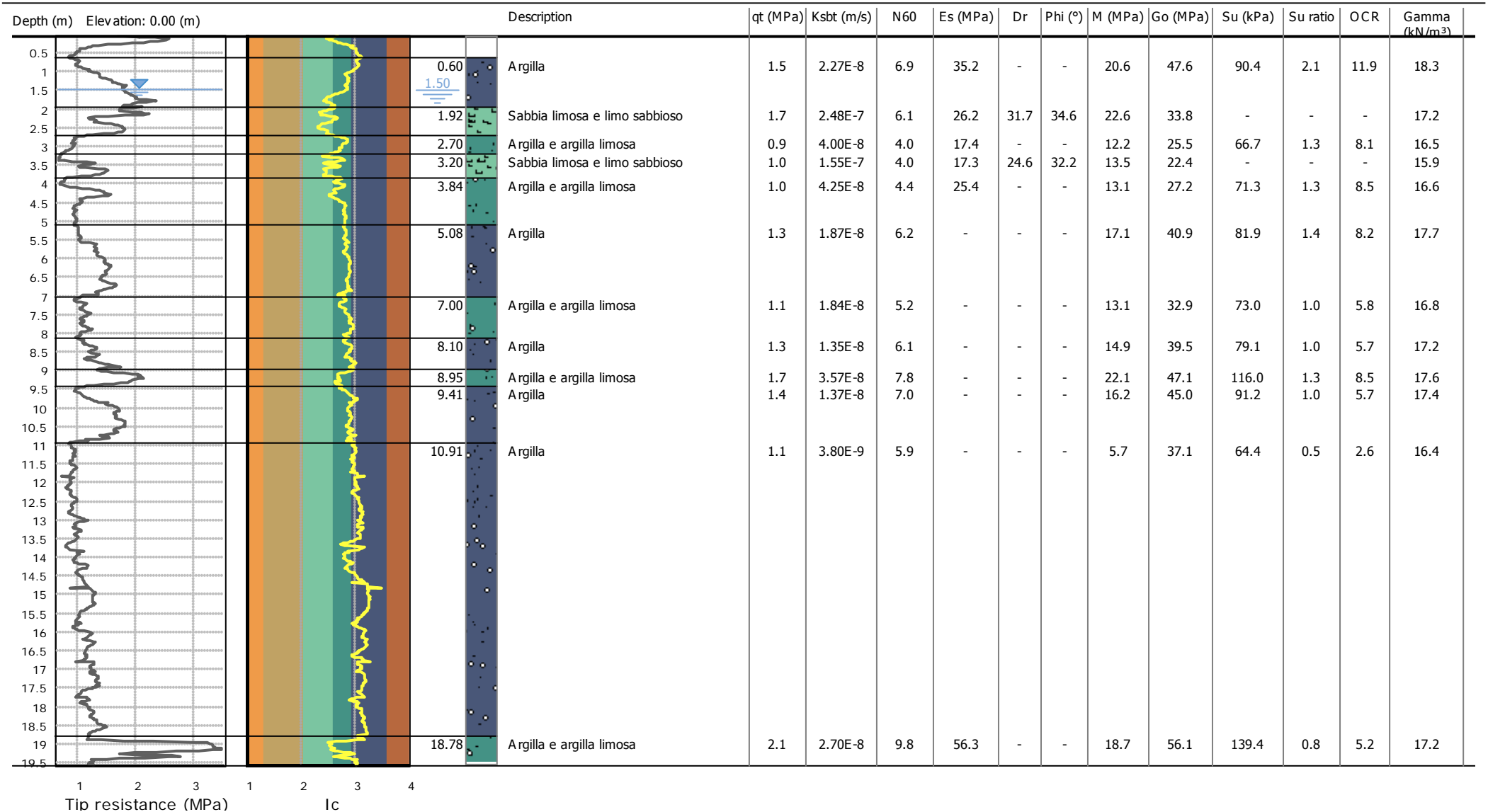
- |                           |                              |                                   |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand           |
| 2. Organic 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        |

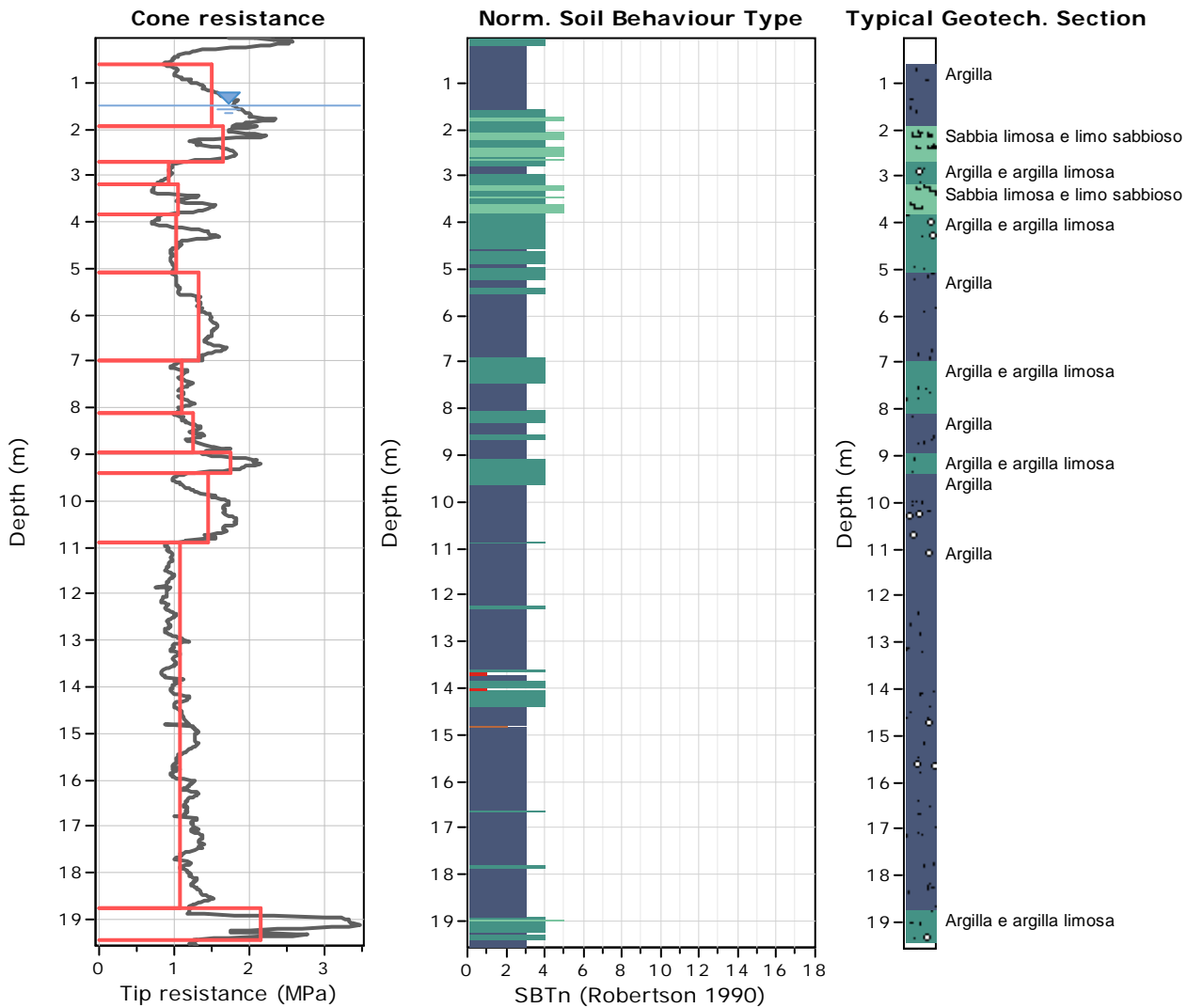


Project: Biblioteca e centro polifunzionale  
Location: Castel Maggiore (BO)

CPT: CPTu-1\_Marzo2019

Total depth: 19.57 m





### Tabular results

::: Layer No: 1 :::

**Code:** 1      **Start depth:** 0.60 (m), **End depth:** 1.92 (m)

**Description:** Argilla

#### Basic results

Total cone resistance:  $1.50 \pm 0.42$  MPa

Sleeve friction:  $88.15 \pm 25.92$  kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBT<sub>n</sub> description: Clay

#### Estimation results

Permeability:  $2.27E-08 \pm 1.01E-07$  m/s

N<sub>60</sub>:  $6.88 \pm 1.19$  blows

Es:  $35.16 \pm 1.48$  MPa

Dr (%):  $0.00 \pm 0.00$

$\phi$  (degrees):  $0.00 \pm 0.00$  °

Unit weight:  $18.29 \pm 0.33$  kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.:  $20.64 \pm 5.74$  MPa

Go:  $47.64 \pm 6.01$  MPa

Su:  $90.41 \pm 31.46$  kPa

Su ratio:  $2.07 \pm 0.56$

O.C.R.:  $11.86 \pm 5.31$



**::: Layer No: 2 :::****Code: 2**      **Start depth: 1.92 (m), End depth: 2.70 (m)****Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 1.65 ±0.29 MPa

Sleeve friction: 32.31 ±14.46 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 2.48E-07 ±2.50E-07 m/s

N60: 6.10 ±0.99 blows

Es: 26.17 ±3.05 MPa

Dr (%): 31.74 ±1.91

φ (degrees): 34.62 ±0.57 °

Unit weight: 17.18 ±0.45 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 22.56 ±4.06 MPa

Go: 33.77 ±5.36 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**::: Layer No: 3 :::****Code: 3**      **Start depth: 2.70 (m), End depth: 3.20 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 0.93 ±0.10 MPa

Sleeve friction: 20.84 ±9.62 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 4.00E-08 ±3.50E-08 m/s

N60: 3.99 ±0.60 blows

Es: 17.36 ±5.67 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.45 ±0.64 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 12.24 ±1.41 MPa

Go: 25.49 ±4.24 MPa

Su: 66.67 ±7.07 kPa

Su ratio: 1.26 ±0.14

O.C.R.: 8.10 ±1.10

**::: Layer No: 4 :::****Code: 4**      **Start depth: 3.20 (m), End depth: 3.84 (m)****Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 1.05 ±0.30 MPa

Sleeve friction: 11.83 ±7.76 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 1.55E-07 ±1.54E-07 m/s

N60: 4.03 ±1.01 blows

Es: 17.30 ±5.15 MPa

Dr (%): 24.62 ±3.91

φ (degrees): 32.16 ±1.58 °

Unit weight: 15.89 ±0.92 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 13.52 ±4.40 MPa

Go: 22.40 ±5.26 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**::: Layer No: 5 :::****Code: 5**      **Start depth: 3.84 (m), End depth: 5.08 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.02 ±0.22 MPa

Sleeve friction: 23.29 ±8.40 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 4.25E-08 ±4.29E-08 m/s

N60: 4.40 ±0.92 blows

Es: 25.42 ±1.63 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.62 ±0.56 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 13.12 ±3.22 MPa

Go: 27.17 ±4.52 MPa

Su: 71.28 ±17.08 kPa

Su ratio: 1.31 ±0.30

O.C.R.: 8.48 ±2.58

**:: Layer No: 6 ::****Code: 6**      **Start depth: 5.08 (m), End depth: 7.00 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.33 ±0.21 MPa

Sleeve friction: 53.00 ±23.30 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.87E-08 ±7.77E-09 m/s

N60: 6.23 ±1.08 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.66 ±0.56 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 17.12 ±2.83 MPa

Go: 40.93 ±8.36 MPa

Su: 81.88 ±10.27 kPa

Su ratio: 1.44 ±0.18

O.C.R.: 8.23 ±0.82

**:: Layer No: 7 ::****Code: 7**      **Start depth: 7.00 (m), End depth: 8.10 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.11 ±0.07 MPa

Sleeve friction: 25.83 ±10.00 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 1.84E-08 ±1.30E-08 m/s

N60: 5.21 ±0.50 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.77 ±0.43 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 13.10 ±1.53 MPa

Go: 32.86 ±4.32 MPa

Su: 72.98 ±6.05 kPa

Su ratio: 0.97 ±0.07

O.C.R.: 5.76 ±0.66

**:: Layer No: 8 ::****Code: 8**      **Start depth: 8.10 (m), End depth: 8.95 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.26 ±0.17 MPa

Sleeve friction: 36.86 ±19.94 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.35E-08 ±6.55E-09 m/s

N60: 6.13 ±1.02 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.23 ±0.60 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 14.92 ±2.98 MPa

Go: 39.54 ±8.01 MPa

Su: 79.07 ±7.52 kPa

Su ratio: 1.02 ±0.13

O.C.R.: 5.72 ±0.59

**:: Layer No: 9 ::****Code: 9**      **Start depth: 8.95 (m), End depth: 9.41 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.74 ±0.29 MPa

Sleeve friction: 44.99 ±13.12 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 3.57E-08 ±2.82E-08 m/s

N60: 7.77 ±1.01 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.58 ±0.42 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 22.10 ±4.19 MPa

Go: 47.12 ±5.55 MPa

Su: 116.04 ±24.37 kPa

Su ratio: 1.34 ±0.24

O.C.R.: 8.46 ±2.09

## :: Layer No: 10 ::

Code: 10 Start depth: 9.41 (m), End depth: 10.91 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.45 ±0.28 MPa

Sleeve friction: 40.53 ±22.38 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay

## Estimation results

Permeability: 1.37E-08 ±9.72E-09 m/s

N60: 6.98 ±1.46 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.39 ±0.85 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 16.24 ±5.35 MPa

Go: 45.02 ±10.74 MPa

Su: 91.17 ±14.01 kPa

Su ratio: 1.00 ±0.20

O.C.R.: 5.71 ±0.99

## :: Layer No: 11 ::

Code: 11 Start depth: 10.91 (m), End depth: 18.78 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.08 ±0.16 MPa

Sleeve friction: 19.31 ±17.66 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay

## Estimation results

Permeability: 3.80E-09 ±5.60E-09 m/s

N60: 5.92 ±1.21 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.43 ±0.86 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 5.75 ±1.48 MPa

Go: 37.15 ±10.29 MPa

Su: 64.37 ±9.89 kPa

Su ratio: 0.49 ±0.06

O.C.R.: 2.58 ±0.54

## :: Layer No: 12 ::

Code: 12 Start depth: 18.78 (m), End depth: 19.44 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

## Basic results

Total cone resistance: 2.15 ±0.88 MPa

Sleeve friction: 31.41 ±12.96 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

## Estimation results

Permeability: 2.70E-08 ±7.78E-08 m/s

N60: 9.82 ±2.53 blows

Es: 56.27 ±2.63 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.25 ±0.60 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 18.71 ±16.40 MPa

Go: 56.09 ±12.08 MPa

Su: 139.36 ±76.67 kPa

Su ratio: 0.82 ±0.44

O.C.R.: 5.21 ±3.92

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
0.60	1.32	2.27E-08	6.9	35.2	0.0	0.0	20.6	47.6	90.4	2.1	11.9	18.3
1.92		(±1.01E-07)	(±1.2)	(±1.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.7)	(±6.0)	(±31.5)	(±0.6)	(±5.3)	(±0.3)
1.92	0.78	2.48E-07	6.1	26.2	31.7	34.6	22.6	33.8	0.0	0.0	0.0	17.2
2.70		(±2.50E-07)	(±1.0)	(±3.0)	(±1.9)	(±0.6)	(±4.1)	(±5.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
2.70	0.50	4.00E-08	4.0	17.4	0.0	0.0	12.2	25.5	66.7	1.3	8.1	16.5
3.20		(±3.50E-08)	(±0.6)	(±5.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.4)	(±4.2)	(±7.1)	(±0.1)	(±1.1)	(±0.6)
3.20	0.64	1.55E-07	4.0	17.3	24.6	32.2	13.5	22.4	0.0	0.0	0.0	15.9
3.84		(±1.54E-07)	(±1.0)	(±5.2)	(±3.9)	(±1.6)	(±4.4)	(±5.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.9)
3.84	1.24	4.25E-08	4.4	25.4	0.0	0.0	13.1	27.2	71.3	1.3	8.5	16.6
5.08		(±4.29E-08)	(±0.9)	(±1.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.2)	(±4.5)	(±17.1)	(±0.3)	(±2.6)	(±0.6)
5.08	1.92	1.87E-08	6.2	0.0	0.0	0.0	17.1	40.9	81.9	1.4	8.2	17.7
7.00		(±7.77E-09)	(±1.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.8)	(±8.4)	(±10.3)	(±0.2)	(±0.8)	(±0.6)
7.00	1.10	1.84E-08	5.2	0.0	0.0	0.0	13.1	32.9	73.0	1.0	5.8	16.8
8.10		(±1.30E-08)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.5)	(±4.3)	(±6.1)	(±0.1)	(±0.7)	(±0.4)
8.10	0.85	1.35E-08	6.1	0.0	0.0	0.0	14.9	39.5	79.1	1.0	5.7	17.2
8.95		(±6.55E-09)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.0)	(±8.0)	(±7.5)	(±0.1)	(±0.6)	(±0.6)
8.95	0.46	3.57E-08	7.8	0.0	0.0	0.0	22.1	47.1	116.0	1.3	8.5	17.6
9.41		(±2.82E-08)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.2)	(±5.5)	(±24.4)	(±0.2)	(±2.1)	(±0.4)
9.41	1.50	1.37E-08	7.0	0.0	0.0	0.0	16.2	45.0	91.2	1.0	5.7	17.4
10.91		(±9.72E-09)	(±1.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.4)	(±10.7)	(±14.0)	(±0.2)	(±1.0)	(±0.8)
10.91	7.87	3.80E-09	5.9	0.0	0.0	0.0	5.7	37.1	64.4	0.5	2.6	16.4
18.78		(±5.60E-09)	(±1.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.5)	(±10.3)	(±9.9)	(±0.1)	(±0.5)	(±0.9)



**Dott. Geol. Alessandro Ghinoi**

Via Cortina d'Ampezzo, 17

41125 Modena

ghinoialessandro@gmail.com

**Project: Biblioteca e centro polifunzionale**

**Location: Castel Maggiore (BO)**

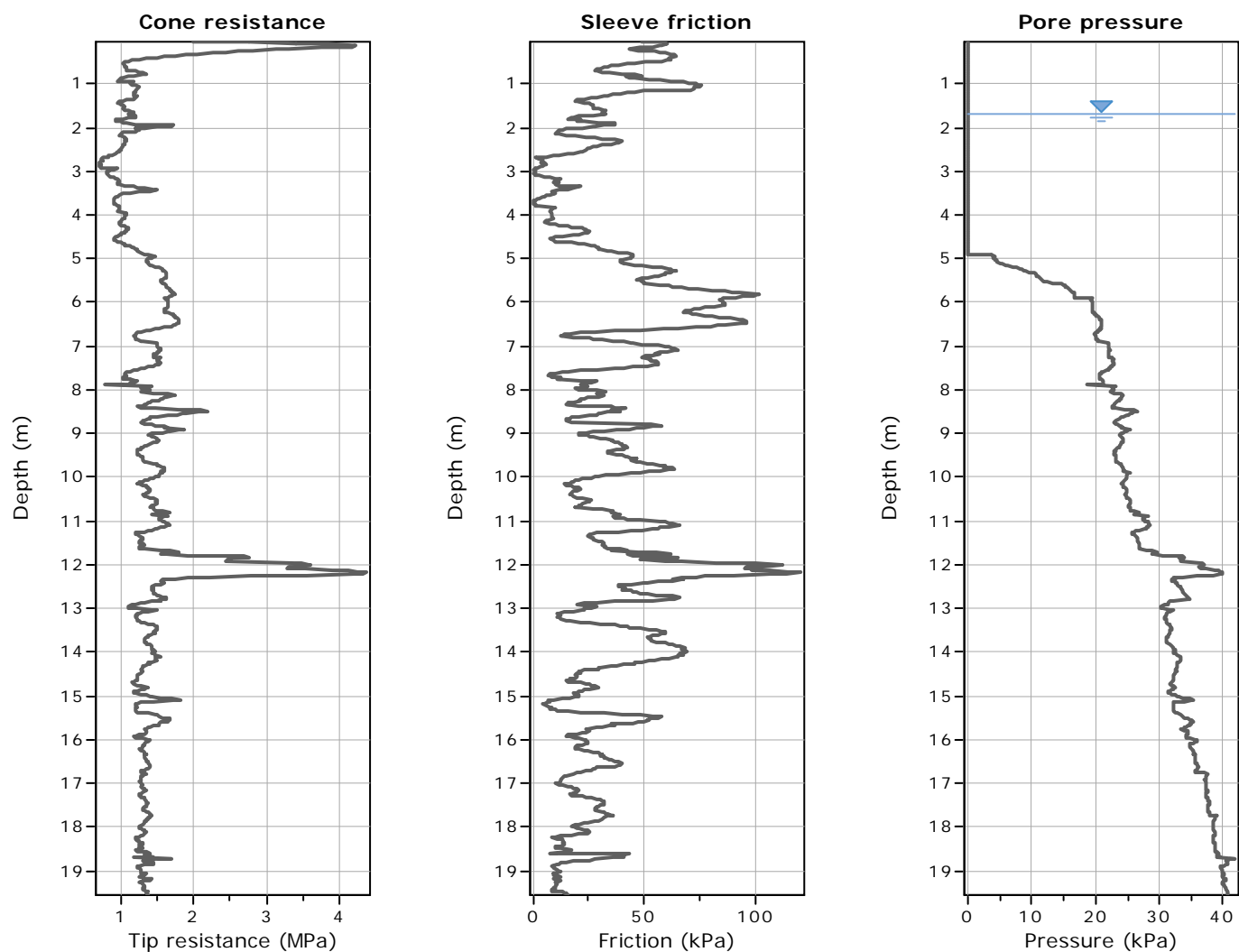
**CPT: CPTu-1\_Marzo2019**

Total depth: 19.57 m, Date: 26/03/2019

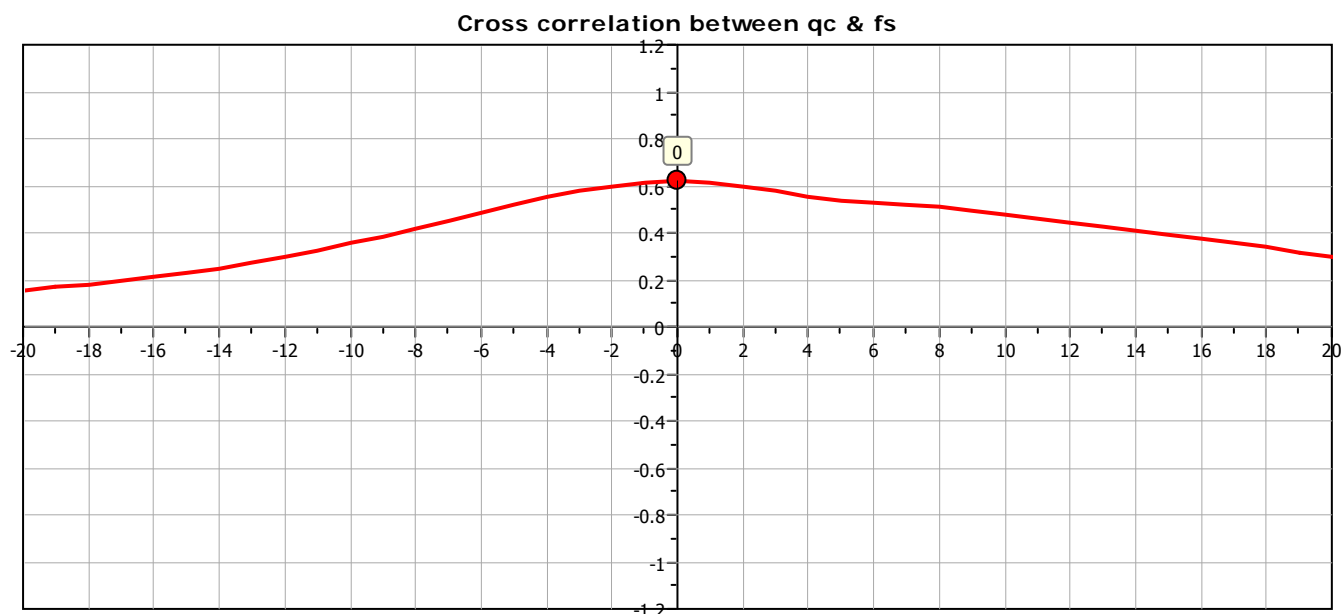
**Summary table of mean values**

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
18.78	0.66	2.70E-08	9.8	56.3	0.0	0.0	18.7	56.1	139.4	0.8	5.2	17.2
19.44		(±7.78E-08)	(±2.5)	(±2.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±16.4)	(±12.1)	(±76.7)	(±0.4)	(±3.9)	(±0.6)

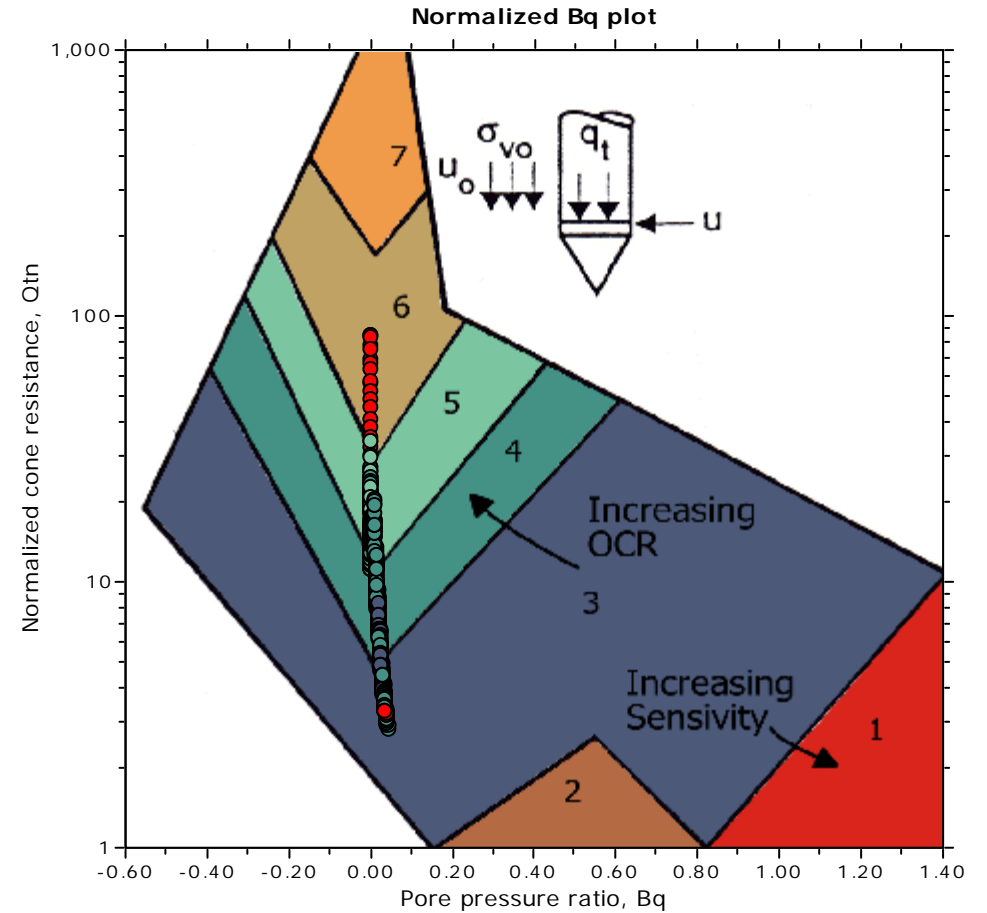
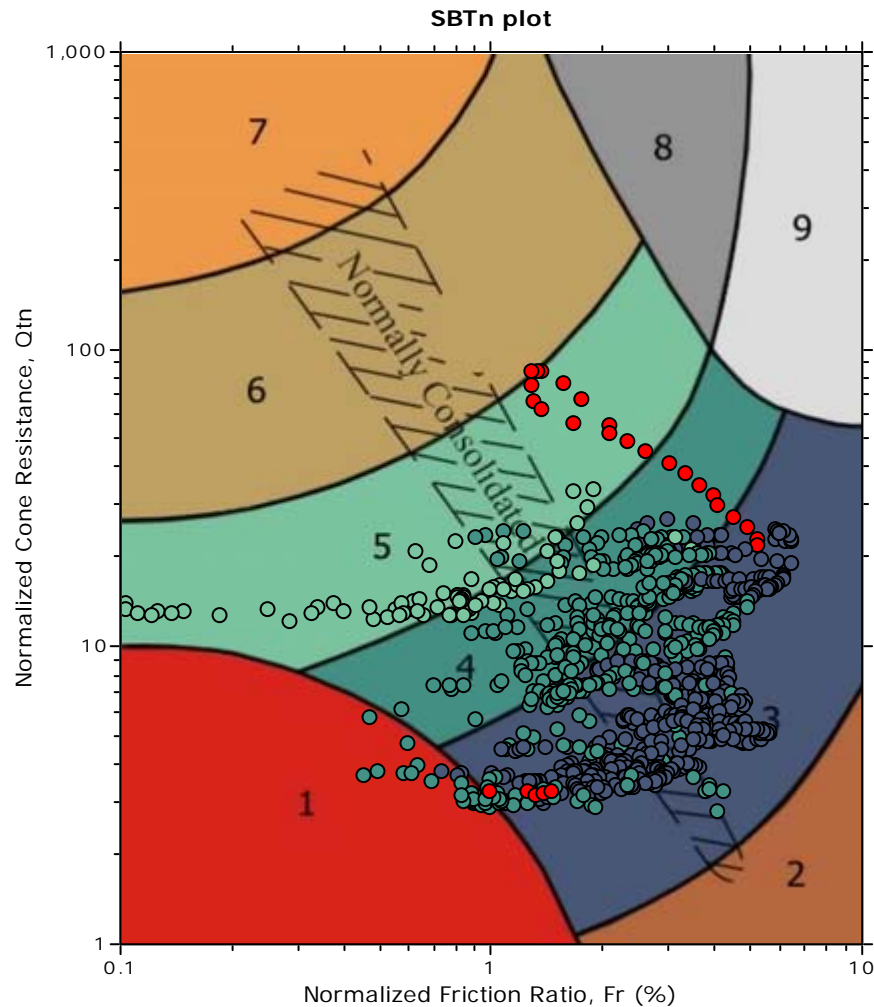
Depth values presented in this table are measured from free ground surface



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).

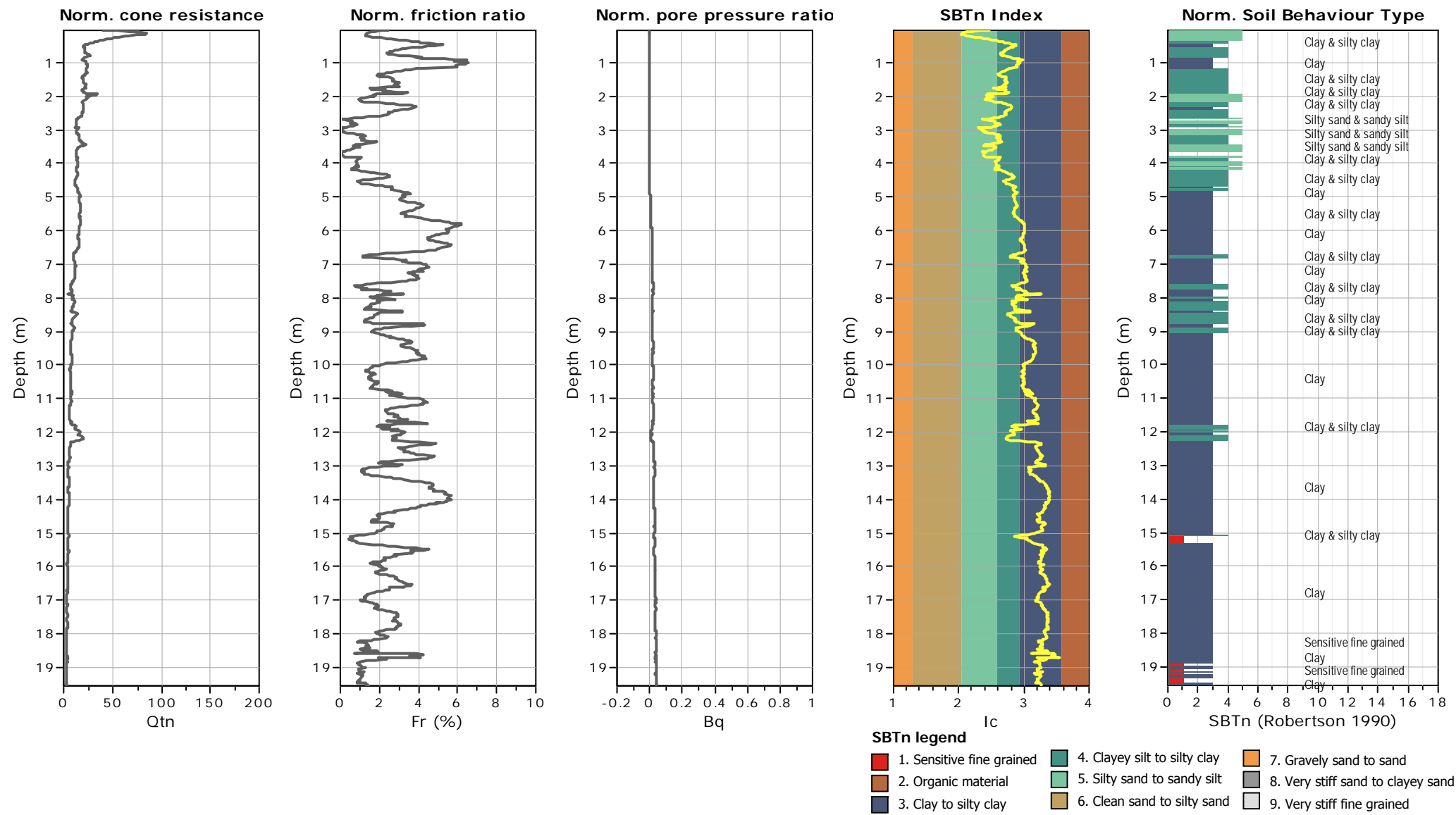


# SBT - Bq plots (normalized)



## 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        |



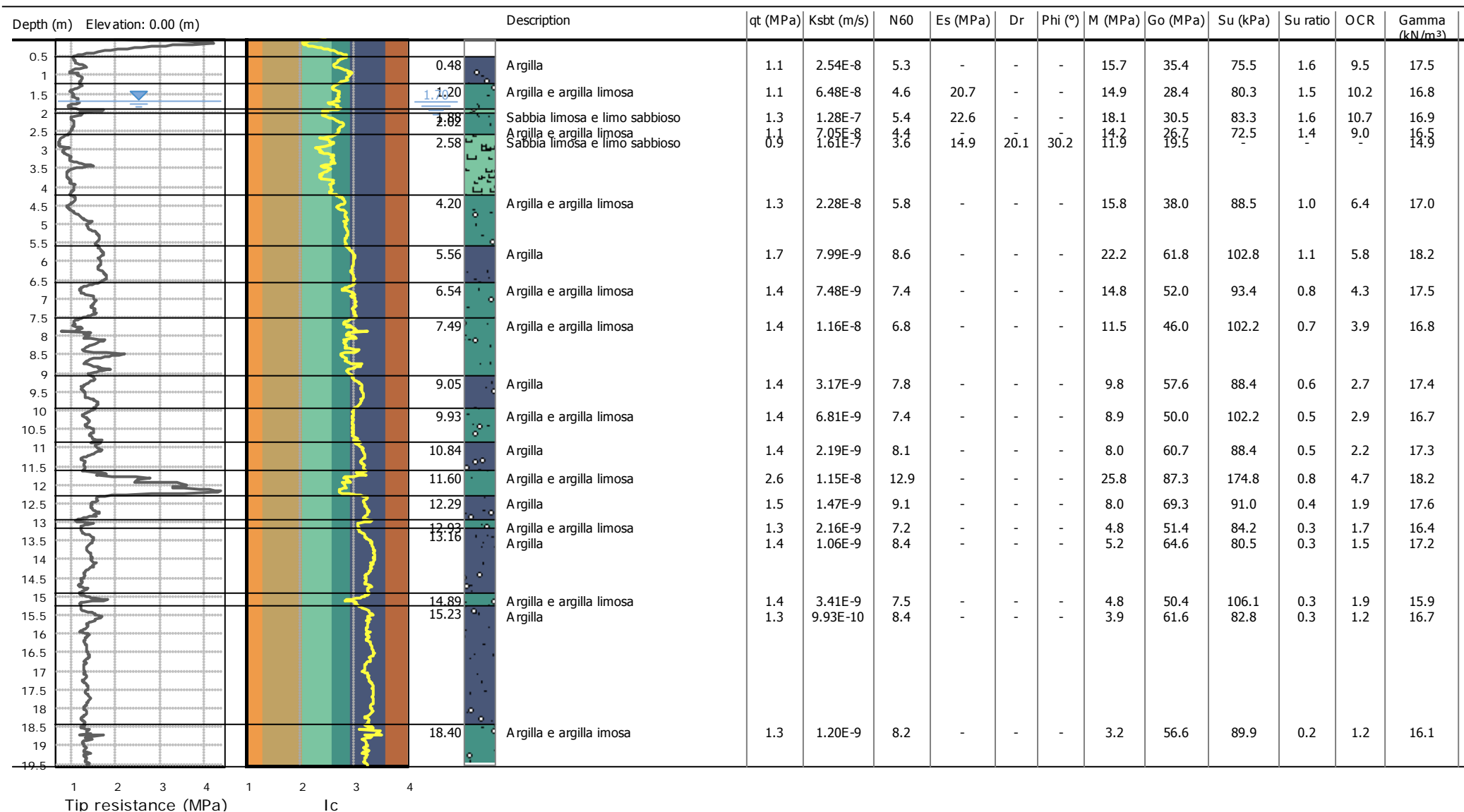


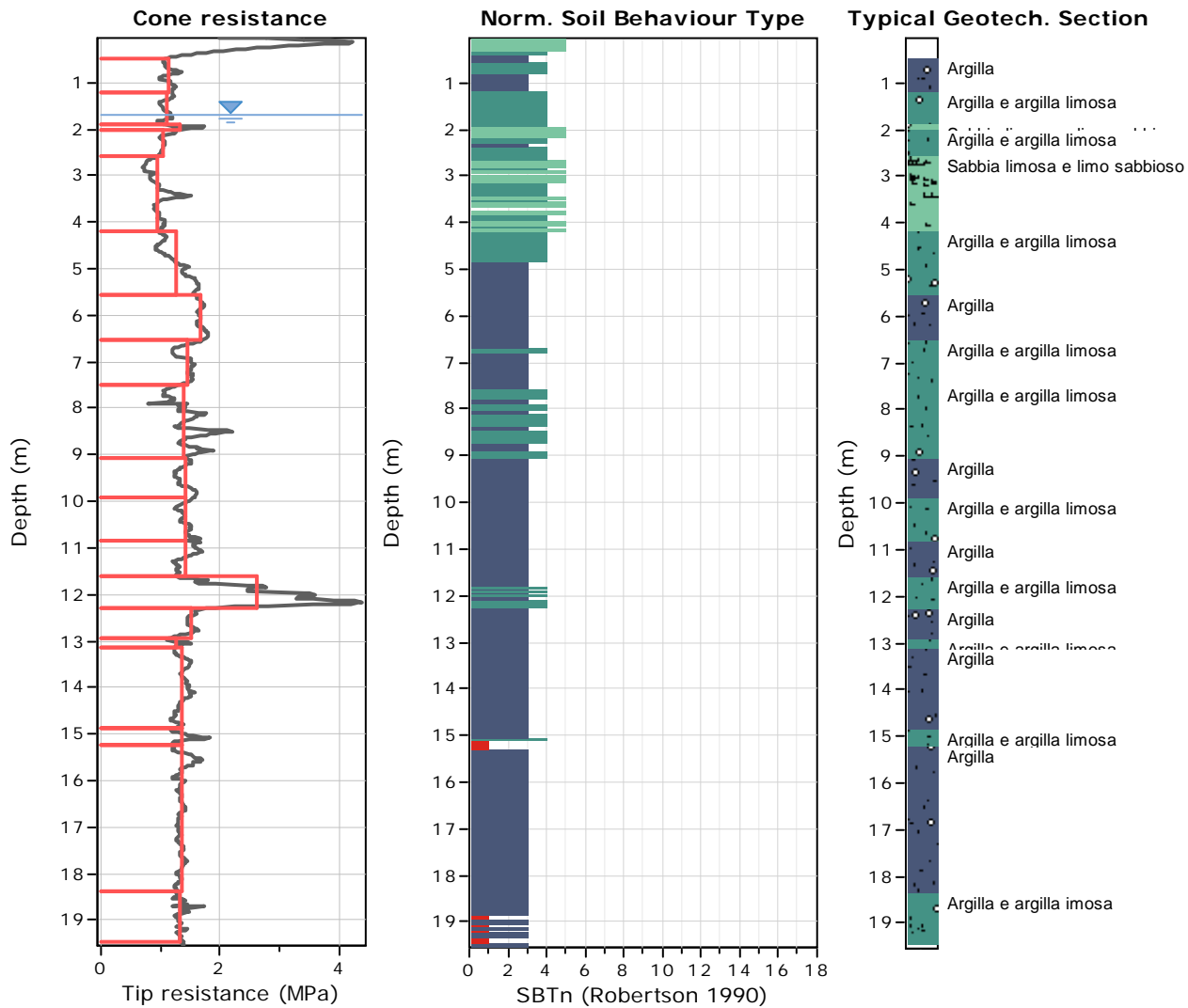
Project: Biblioteca e centro polifunzionale

Location: Castel Maggiore (BO)

CPT: CPTu-2\_Marzo2019

Total depth: 19.55 m





### Tabular results

#### ::: Layer No: 1 :::

**Code:** 1      **Start depth:** 0.48 (m), **End depth:** 1.20 (m)

**Description:** Argilla

#### Basic results

Total cone resistance:  $1.13 \pm 0.10$  MPa

Sleeve friction:  $47.07 \pm 16.54$  kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBT<sub>n</sub> description: Clay

#### Estimation results

Permeability:  $2.54E-08 \pm 2.54E-08$  m/s

N<sub>60</sub>:  $5.30 \pm 0.48$  blows

Es:  $0.00 \pm 0.00$  MPa

Dr (%):  $0.00 \pm 0.00$

$\phi$  (degrees):  $0.00 \pm 0.00$  °

Unit weight:  $17.47 \pm 0.39$  kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.:  $15.68 \pm 1.34$  MPa

Go:  $35.45 \pm 4.49$  MPa

Su:  $75.51 \pm 8.96$  kPa

Su ratio:  $1.60 \pm 0.14$

O.C.R.:  $9.47 \pm 1.42$

**::: Layer No: 2 :::****Code: 2**      **Start depth: 1.20 (m), End depth: 1.88 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.09 ±0.09 MPa

Sleeve friction: 25.84 ±6.37 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 6.48E-08 ±3.61E-08 m/s

N60: 4.57 ±0.50 blows

Es: 20.67 ±1.44 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.76 ±0.29 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 14.90 ±1.25 MPa

Go: 28.45 ±2.58 MPa

Su: 80.28 ±7.17 kPa

Su ratio: 1.52 ±0.13

O.C.R.: 10.22 ±1.15

**::: Layer No: 3 :::****Code: 3**      **Start depth: 1.88 (m), End depth: 2.02 (m)****Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 1.32 ±0.27 MPa

Sleeve friction: 27.83 ±6.77 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 1.28E-07 ±1.44E-07 m/s

N60: 5.35 ±0.52 blows

Es: 22.57 ±22.57 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.92 ±0.30 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 18.06 ±3.75 MPa

Go: 30.48 ±2.76 MPa

Su: 83.29 ±15.59 kPa

Su ratio: 1.61 ±0.18

O.C.R.: 10.71 ±2.56

**::: Layer No: 4 :::****Code: 4**      **Start depth: 2.02 (m), End depth: 2.58 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.05 ±0.08 MPa

Sleeve friction: 21.72 ±9.77 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 7.05E-08 ±1.27E-07 m/s

N60: 4.39 ±0.50 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.55 ±0.50 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 14.20 ±1.21 MPa

Go: 26.71 ±3.59 MPa

Su: 72.50 ±2.83 kPa

Su ratio: 1.40 ±0.06

O.C.R.: 9.00 ±0.44

**::: Layer No: 5 :::****Code: 5**      **Start depth: 2.58 (m), End depth: 4.20 (m)****Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 0.94 ±0.16 MPa

Sleeve friction: 4.32 ±5.42 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 1.61E-07 ±1.51E-07 m/s

N60: 3.59 ±0.64 blows

Es: 14.90 ±3.27 MPa

Dr (%): 20.09 ±1.57

φ (degrees): 30.24 ±0.69 °

Unit weight: 14.94 ±0.85 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 11.92 ±2.48 MPa

Go: 19.55 ±4.26 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**::: Layer No: 6 :::****Code: 6**      **Start depth: 4.20 (m), End depth: 5.56 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.26 ±0.25 MPa

Sleeve friction: 30.14 ±18.13 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 2.28E-08 ±1.46E-08 m/s

N60: 5.82 ±1.35 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.99 ±0.79 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 15.82 ±4.05 MPa

Go: 37.98 ±9.94 MPa

Su: 88.49 ±11.34 kPa

Su ratio: 1.05 ±0.14

O.C.R.: 6.40 ±0.53

**::: Layer No: 7 :::****Code: 7**      **Start depth: 5.56 (m), End depth: 6.54 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.68 ±0.06 MPa

Sleeve friction: 80.06 ±12.49 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 7.99E-09 ±3.12E-09 m/s

N60: 8.56 ±0.57 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.23 ±0.20 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 22.18 ±0.85 MPa

Go: 61.84 ±4.60 MPa

Su: 102.77 ±3.49 kPa

Su ratio: 1.13 ±0.05

O.C.R.: 5.83 ±0.40

**::: Layer No: 8 :::****Code: 8**      **Start depth: 6.54 (m), End depth: 7.49 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.44 ±0.14 MPa

Sleeve friction: 43.94 ±17.35 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 7.48E-09 ±5.83E-09 m/s

N60: 7.39 ±0.97 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.48 ±0.58 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 14.78 ±2.90 MPa

Go: 52.04 ±8.31 MPa

Su: 93.38 ±4.74 kPa

Su ratio: 0.80 ±0.08

O.C.R.: 4.25 ±0.36

**::: Layer No: 9 :::****Code: 9**      **Start depth: 7.49 (m), End depth: 9.05 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.40 ±0.27 MPa

Sleeve friction: 23.53 ±11.83 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 1.16E-08 ±8.63E-09 m/s

N60: 6.83 ±1.20 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.75 ±0.59 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 11.48 ±4.94 MPa

Go: 46.02 ±8.15 MPa

Su: 102.16 ±21.20 kPa

Su ratio: 0.65 ±0.12

O.C.R.: 3.87 ±0.92

**:: Layer No: 10 ::****Code: 10**      **Start depth: 9.05 (m), End depth: 9.93 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.41 ±0.13 MPa

Sleeve friction: 41.09 ±10.26 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 3.17E-09 ±2.41E-09 m/s

N60: 7.84 ±0.72 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.39 ±0.30 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 9.76 ±1.88 MPa

Go: 57.55 ±5.72 MPa

Su: 88.44 ±10.23 kPa

Su ratio: 0.56 ±0.05

O.C.R.: 2.71 ±0.43

**:: Layer No: 11 ::****Code: 11**      **Start depth: 9.93 (m), End depth: 10.84 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.42 ±0.10 MPa

Sleeve friction: 21.81 ±6.37 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 6.81E-09 ±1.13E-09 m/s

N60: 7.36 ±0.65 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.67 ±0.32 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 8.88 ±1.29 MPa

Go: 50.04 ±4.76 MPa

Su: 102.19 ±4.74 kPa

Su ratio: 0.51 ±0.04

O.C.R.: 2.89 ±0.15

**:: Layer No: 12 ::****Code: 12**      **Start depth: 10.84 (m), End depth: 11.60 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.42 ±0.16 MPa

Sleeve friction: 38.12 ±13.27 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.19E-09 ±9.86E-10 m/s

N60: 8.10 ±0.95 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.31 ±0.40 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 8.01 ±2.31 MPa

Go: 60.68 ±7.20 MPa

Su: 88.39 ±9.71 kPa

Su ratio: 0.47 ±0.07

O.C.R.: 2.19 ±0.36

**:: Layer No: 13 ::****Code: 13**      **Start depth: 11.60 (m), End depth: 12.29 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 2.61 ±1.00 MPa

Sleeve friction: 67.79 ±29.22 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.15E-08 ±1.53E-08 m/s

N60: 12.87 ±3.59 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.21 ±0.62 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 25.82 ±18.77 MPa

Go: 87.25 ±20.14 MPa

Su: 174.85 ±73.96 kPa

Su ratio: 0.85 ±0.34

O.C.R.: 4.73 ±2.46



## :: Layer No: 14 ::

Code: 14 Start depth: 12.29 (m), End depth: 12.93 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.52 ±0.19 MPa

Sleeve friction: 46.79 ±14.50 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

## Estimation results

Permeability: 1.47E-09 ±6.85E-10 m/s

N60: 9.12 ±1.00 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.57 ±0.43 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 7.99 ±2.74 MPa

Go: 69.31 ±8.36 MPa

Su: 91.01 ±11.32 kPa

Su ratio: 0.44 ±0.07

O.C.R.: 1.95 ±0.35

## :: Layer No: 15 ::

Code: 15 Start depth: 12.93 (m), End depth: 13.16 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

## Basic results

Total cone resistance: 1.25 ±0.13 MPa

Sleeve friction: 18.68 ±6.24 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

## Estimation results

Permeability: 2.16E-09 ±1.43E-09 m/s

N60: 7.24 ±0.45 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.44 ±0.39 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 4.81 ±1.27 MPa

Go: 51.43 ±4.23 MPa

Su: 84.15 ±15.17 kPa

Su ratio: 0.33 ±0.04

O.C.R.: 1.69 ±0.37

## :: Layer No: 16 ::

Code: 16 Start depth: 13.16 (m), End depth: 14.89 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.36 ±0.10 MPa

Sleeve friction: 34.79 ±19.99 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

## Estimation results

Permeability: 1.06E-09 ±7.17E-10 m/s

N60: 8.43 ±1.03 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.19 ±0.67 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 5.24 ±1.10 MPa

Go: 64.60 ±11.09 MPa

Su: 80.52 ±5.59 kPa

Su ratio: 0.34 ±0.04

O.C.R.: 1.46 ±0.18

## :: Layer No: 17 ::

Code: 17 Start depth: 14.89 (m), End depth: 15.23 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

## Basic results

Total cone resistance: 1.36 ±0.21 MPa

Sleeve friction: 11.34 ±6.92 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

## Estimation results

Permeability: 3.41E-09 ±5.80E-09 m/s

N60: 7.45 ±0.86 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 15.90 ±0.69 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 4.77 ±1.99 MPa

Go: 50.37 ±6.46 MPa

Su: 106.07 ±32.56 kPa

Su ratio: 0.31 ±0.06

O.C.R.: 1.88 ±0.74

## :: Layer No: 18 ::

Code: 18      Start depth: 15.23 (m), End depth: 18.40 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.34 ±0.09 MPa

Sleeve friction: 22.67 ±10.79 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

## Estimation results

Permeability: 9.93E-10 ±4.90E-10 m/s

N60: 8.40 ±0.72 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.69 ±0.53 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 3.92 ±0.91 MPa

Go: 61.56 ±7.88 MPa

Su: 82.77 ±5.97 kPa

Su ratio: 0.27 ±0.03

O.C.R.: 1.21 ±0.17

## :: Layer No: 19 ::

Code: 19      Start depth: 18.40 (m), End depth: 19.45 (m)

Description: Argilla e argilla imosa

## Basic results

Total cone resistance: 1.33 ±0.08 MPa

Sleeve friction: 13.22 ±9.99 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

## Estimation results

Permeability: 1.20E-09 ±5.20E-10 m/s

N60: 8.18 ±0.56 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.07 ±0.56 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 3.19 ±0.58 MPa

Go: 56.62 ±7.55 MPa

Su: 89.88 ±11.67 kPa

Su ratio: 0.23 ±0.02

O.C.R.: 1.16 ±0.18

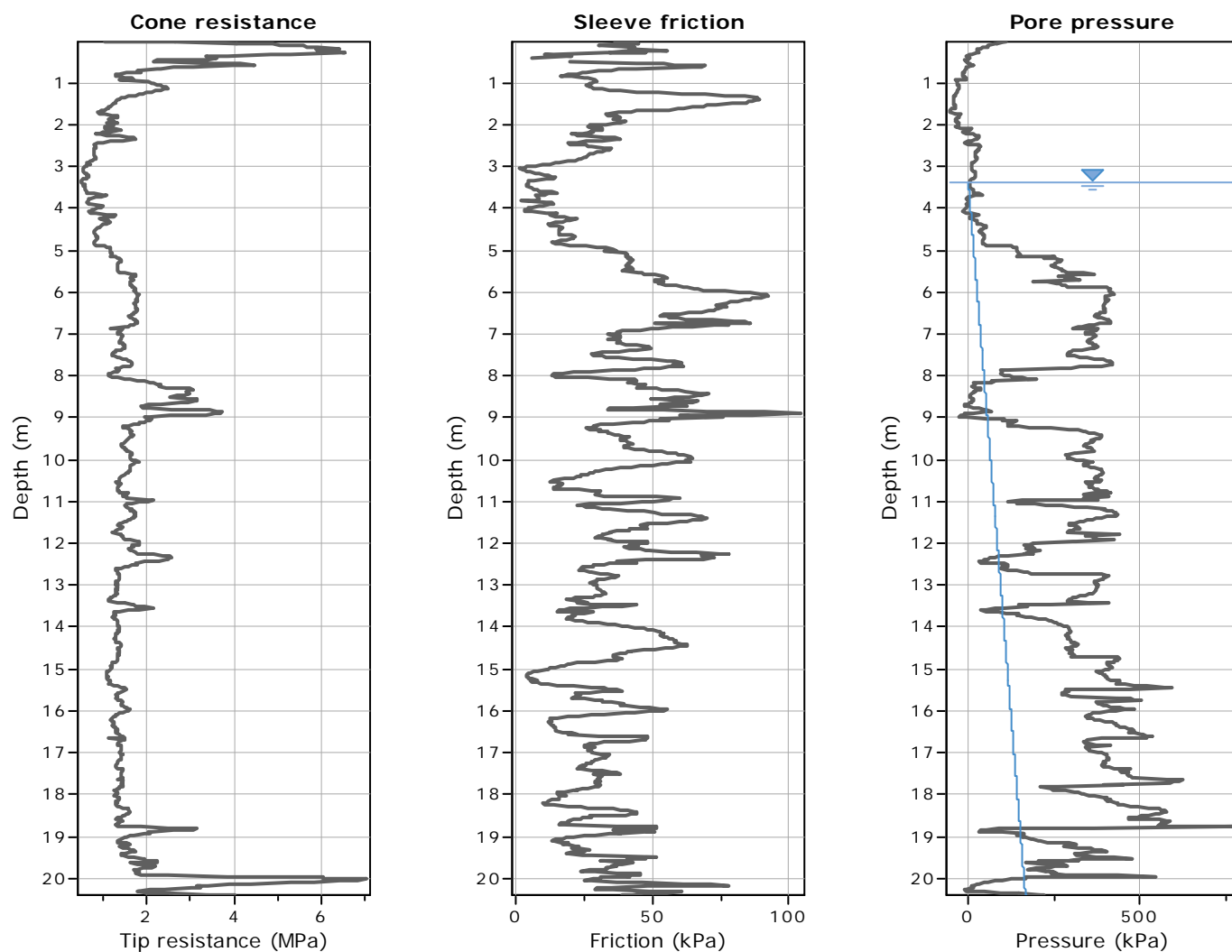
Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
0.48	0.72	2.54E-08	5.3	0.0	0.0	0.0	15.7	35.4	75.5	1.6	9.5	17.5
1.20		(±2.54E-08)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.3)	(±4.5)	(±9.0)	(±0.1)	(±1.4)	(±0.4)
1.20	0.68	6.48E-08	4.6	20.7	0.0	0.0	14.9	28.4	80.3	1.5	10.2	16.8
1.88		(±3.61E-08)	(±0.5)	(±1.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.3)	(±2.6)	(±7.2)	(±0.1)	(±1.1)	(±0.3)
1.88	0.14	1.28E-07	5.4	22.6	0.0	0.0	18.1	30.5	83.3	1.6	10.7	16.9
2.02		(±1.44E-07)	(±0.5)	(±22.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.8)	(±2.8)	(±15.6)	(±0.2)	(±2.6)	(±0.3)
2.02	0.56	7.05E-08	4.4	0.0	0.0	0.0	14.2	26.7	72.5	1.4	9.0	16.5
2.58		(±1.27E-07)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.2)	(±3.6)	(±2.8)	(±0.1)	(±0.4)	(±0.5)
2.58	1.62	1.61E-07	3.6	14.9	20.1	30.2	11.9	19.5	0.0	0.0	0.0	14.9
4.20		(±1.51E-07)	(±0.6)	(±3.3)	(±1.6)	(±0.7)	(±2.5)	(±4.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.9)
4.20	1.36	2.28E-08	5.8	0.0	0.0	0.0	15.8	38.0	88.5	1.0	6.4	17.0
5.56		(±1.46E-08)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.1)	(±9.9)	(±11.3)	(±0.1)	(±0.5)	(±0.8)
5.56	0.98	7.99E-09	8.6	0.0	0.0	0.0	22.2	61.8	102.8	1.1	5.8	18.2
6.54		(±3.12E-09)	(±0.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.9)	(±4.6)	(±3.5)	(±0.1)	(±0.4)	(±0.2)
6.54	0.95	7.48E-09	7.4	0.0	0.0	0.0	14.8	52.0	93.4	0.8	4.3	17.5
7.49		(±5.83E-09)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.9)	(±8.3)	(±4.7)	(±0.1)	(±0.4)	(±0.6)
7.49	1.56	1.16E-08	6.8	0.0	0.0	0.0	11.5	46.0	102.2	0.7	3.9	16.8
9.05		(±8.63E-09)	(±1.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.9)	(±8.2)	(±21.2)	(±0.1)	(±0.9)	(±0.6)
9.05	0.88	3.17E-09	7.8	0.0	0.0	0.0	9.8	57.6	88.4	0.6	2.7	17.4
9.93		(±2.41E-09)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.9)	(±5.7)	(±10.2)	(±0.1)	(±0.4)	(±0.3)
9.93	0.91	6.81E-09	7.4	0.0	0.0	0.0	8.9	50.0	102.2	0.5	2.9	16.7
10.84		(±1.13E-09)	(±0.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.3)	(±4.8)	(±4.7)	(±0.0)	(±0.1)	(±0.3)

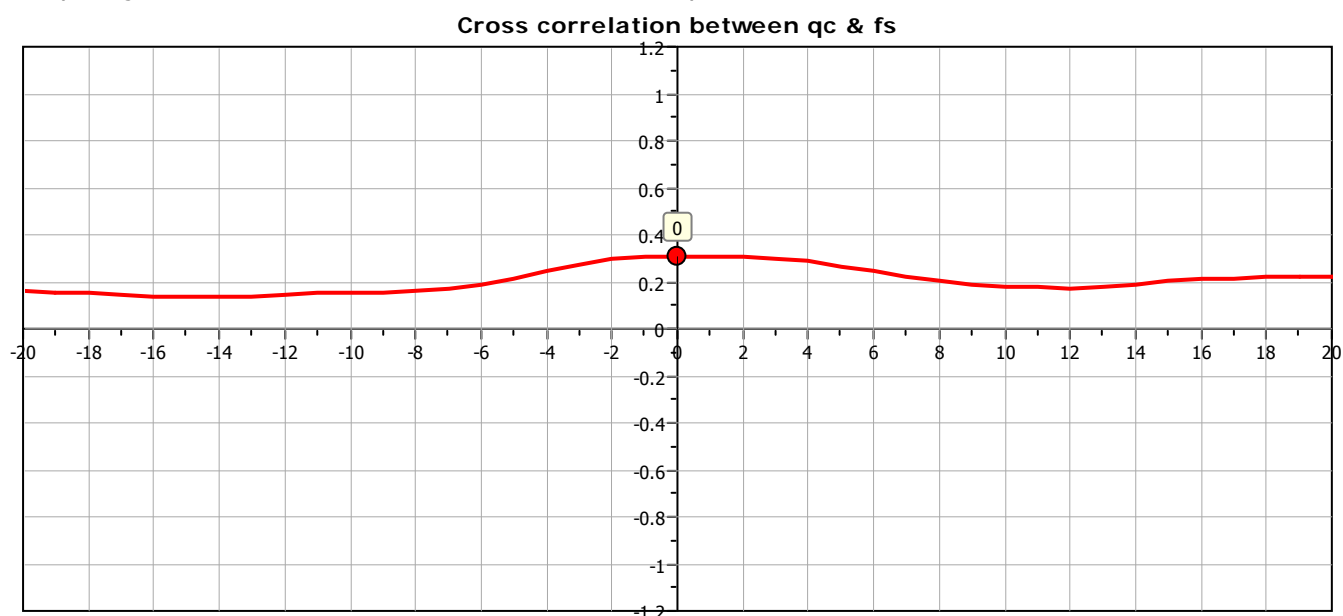
Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
10.84	0.76	2.19E-09	8.1	0.0	0.0	0.0	8.0	60.7	88.4	0.5	2.2	17.3
11.60		(±9.86E-10)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.3)	(±7.2)	(±9.7)	(±0.1)	(±0.4)	(±0.4)
11.60	0.69	1.15E-08	12.9	0.0	0.0	0.0	25.8	87.3	174.8	0.8	4.7	18.2
12.29		(±1.53E-08)	(±3.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±18.8)	(±20.1)	(±74.0)	(±0.3)	(±2.5)	(±0.6)
12.29	0.64	1.47E-09	9.1	0.0	0.0	0.0	8.0	69.3	91.0	0.4	1.9	17.6
12.93		(±6.85E-10)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.7)	(±8.4)	(±11.3)	(±0.1)	(±0.3)	(±0.4)
12.93	0.23	2.16E-09	7.2	0.0	0.0	0.0	4.8	51.4	84.2	0.3	1.7	16.4
13.16		(±1.43E-09)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.3)	(±4.2)	(±15.2)	(±0.0)	(±0.4)	(±0.4)
13.16	1.73	1.06E-09	8.4	0.0	0.0	0.0	5.2	64.6	80.5	0.3	1.5	17.2
14.89		(±7.17E-10)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.1)	(±11.1)	(±5.6)	(±0.0)	(±0.2)	(±0.7)
14.89	0.34	3.41E-09	7.5	0.0	0.0	0.0	4.8	50.4	106.1	0.3	1.9	15.9
15.23		(±5.80E-09)	(±0.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.0)	(±6.5)	(±32.6)	(±0.1)	(±0.7)	(±0.7)
15.23	3.17	9.93E-10	8.4	0.0	0.0	0.0	3.9	61.6	82.8	0.3	1.2	16.7
18.40		(±4.90E-10)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.9)	(±7.9)	(±6.0)	(±0.0)	(±0.2)	(±0.5)
18.40	1.05	1.20E-09	8.2	0.0	0.0	0.0	3.2	56.6	89.9	0.2	1.2	16.1
19.45		(±5.20E-10)	(±0.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)	(±7.6)	(±11.7)	(±0.0)	(±0.2)	(±0.6)

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

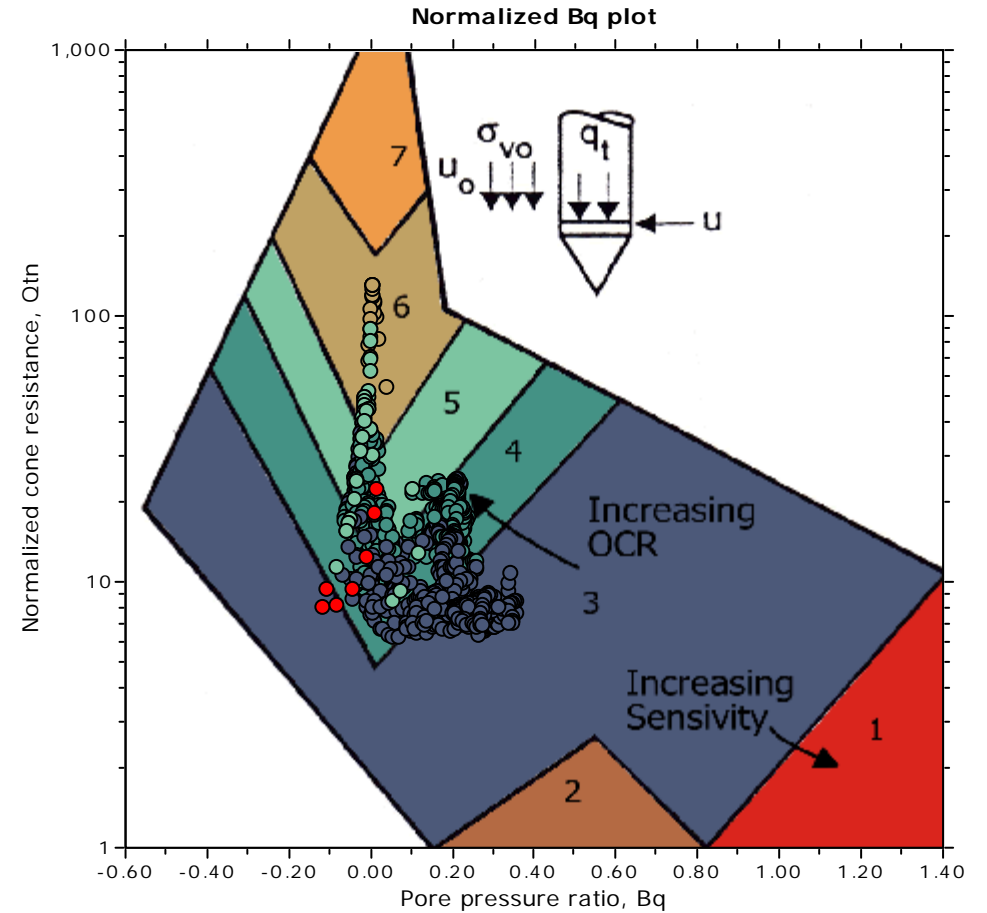
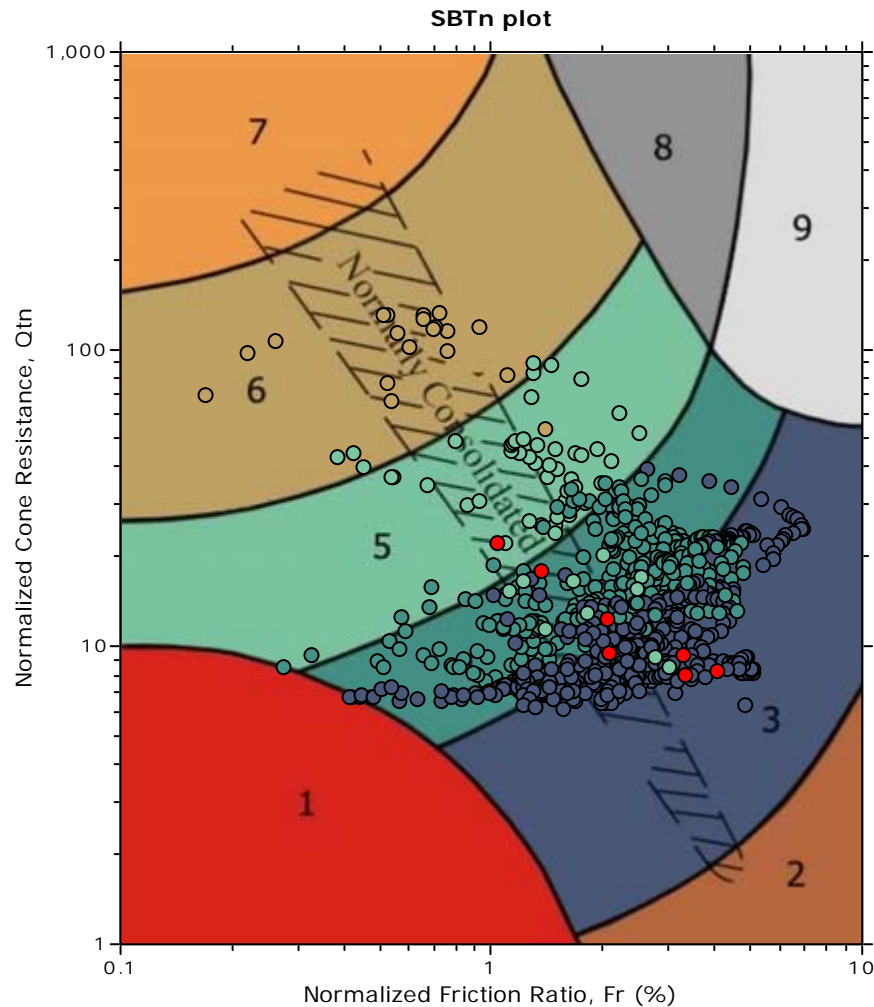


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw  $q_c$  and  $f_s$  values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



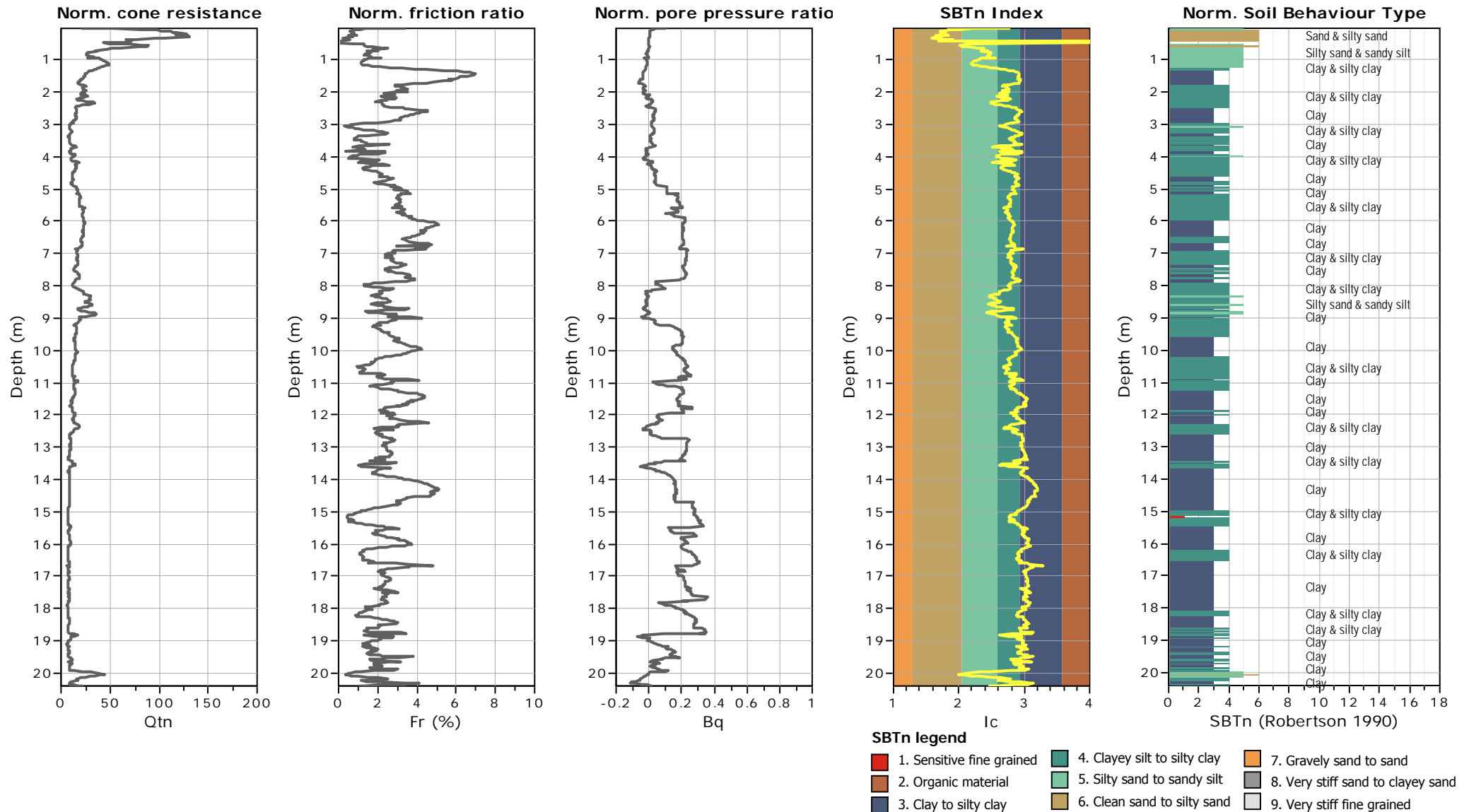


# SBT - Bq plots (normalized)



## 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        |

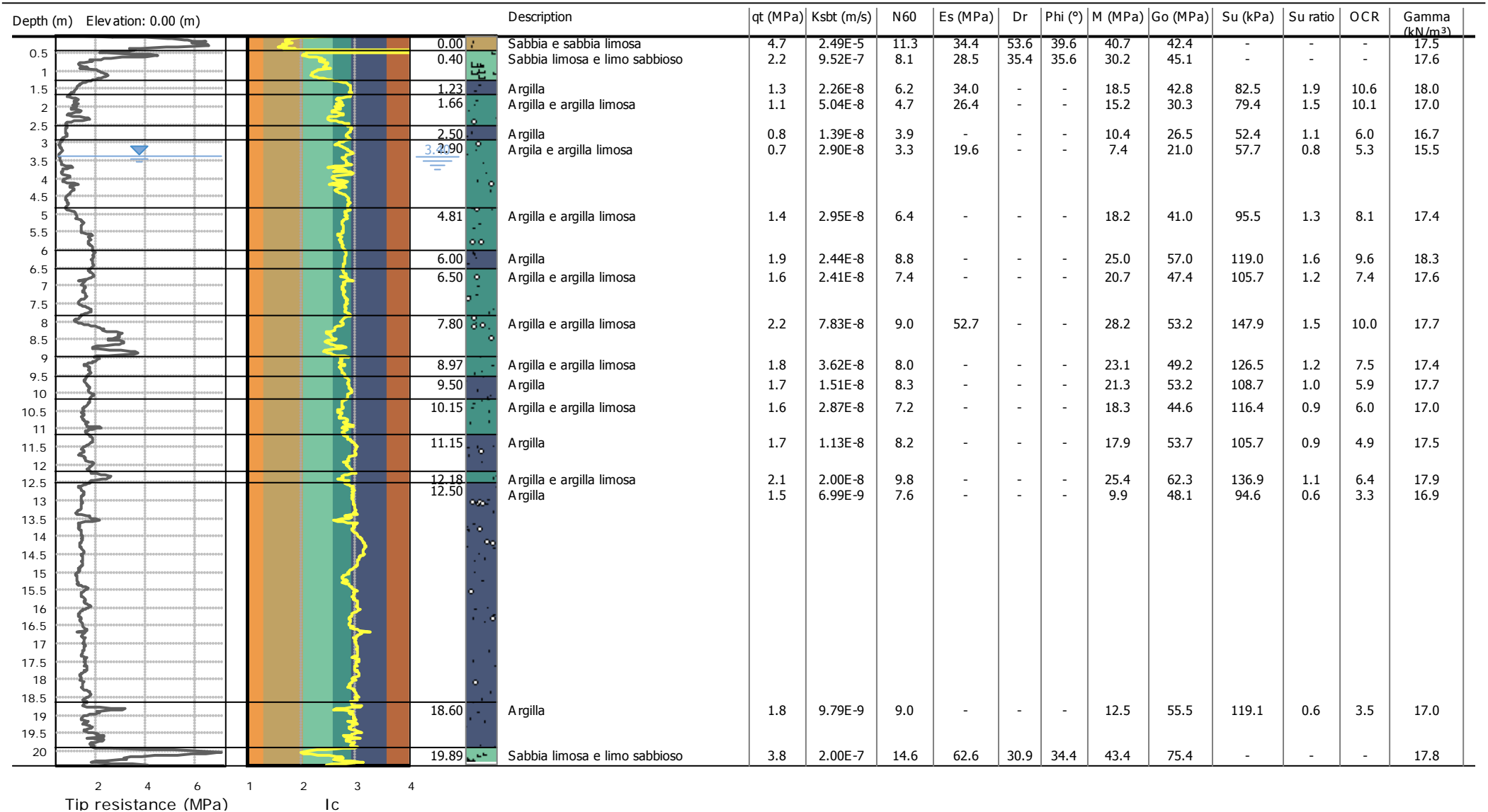


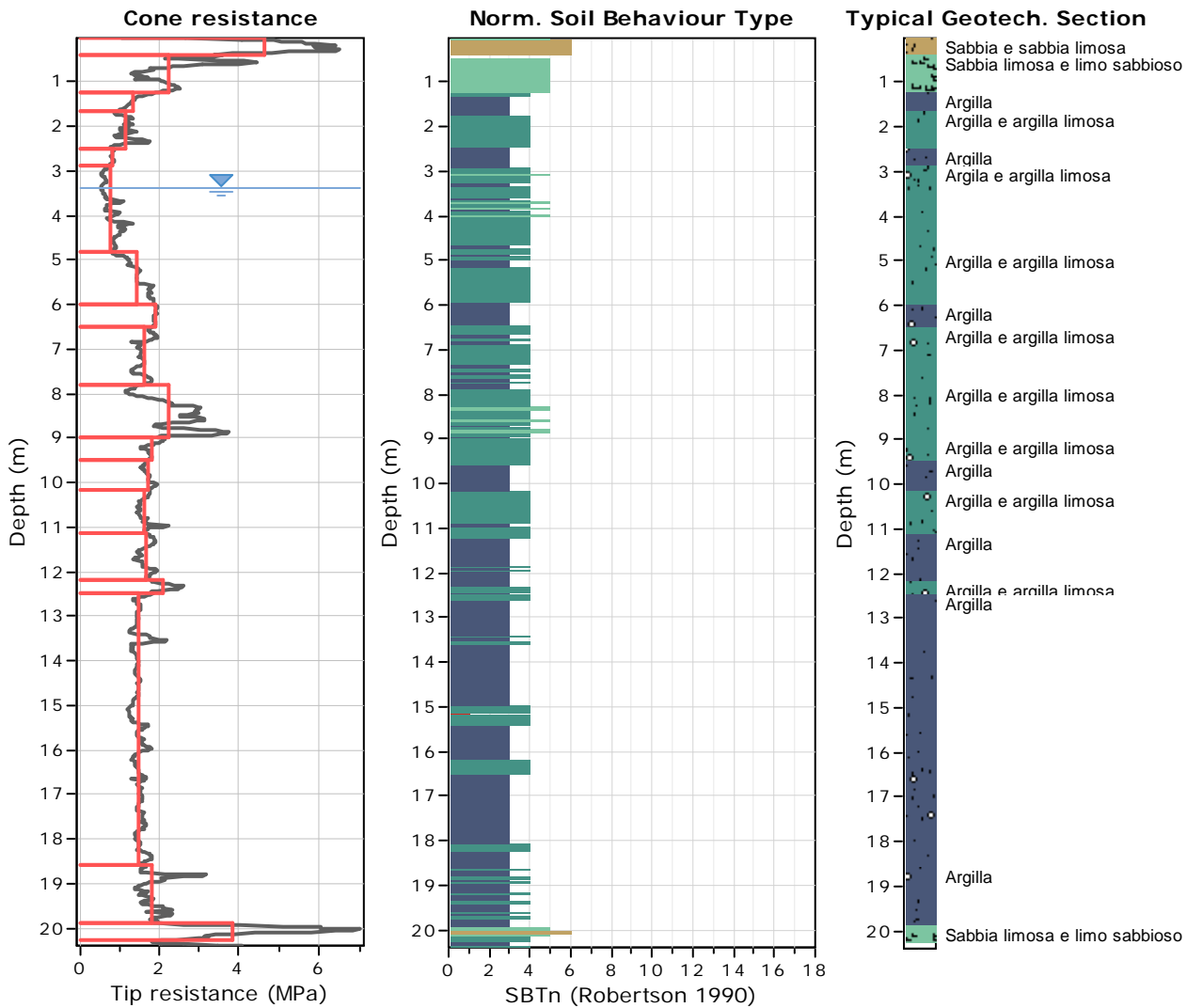
Dott. Geol. Alessandro Ghinoi  
Via Cortina d'Ampezzo, 17  
41125 Modena  
ghinoialessandro@gmail.com

Project: Biblioteca e centro polifunzionale  
Location: Castel Maggiore (BO)

CPT: CPTu-1\_Luglio2019

Total depth: 20.40 m





### Tabular results

#### ::: Layer No: 1 :::

**Code:** 1      **Start depth:** 0.00 (m), **End depth:** 0.40 (m)

**Description:** Sabbia e sabbia limosa

#### Basic results

Total cone resistance: 4.66 ±1.52 MPa

Sleeve friction: 29.67 ±13.73 kPa

SBT<sub>n</sub>: 6

SBT<sub>n</sub> description: Sand & silty sand

#### Estimation results

Permeability: 2.49E-05 ±4.51E-05 m/s

N<sub>60</sub>: 11.26 ±2.82 blows

E<sub>s</sub>: 34.38 ±6.24 MPa

Dr (%): 53.65 ±6.64

φ (degrees): 39.62 ±1.25 °

Unit weight: 17.48 ±0.71 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 40.74 ±10.13 MPa

G<sub>o</sub>: 42.44 ±8.08 MPa

S<sub>u</sub>: 0.00 ±0.00 kPa

S<sub>u</sub> ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

## ::: Layer No: 2 :::

**Code:** 2      **Start depth:** 0.40 (m), **End depth:** 1.23 (m)**Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 2.23 ±0.87 MPa

Sleeve friction: 29.91 ±23.30 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5

SBTn description: Silty sand &amp; sandy silt

**Estimation results**

Permeability: 9.52E-07 ±1.09E-05 m/s

N60: 8.12 ±7.24 blows

Es: 28.50 ±6.26 MPa

Dr (%): 35.40 ±6.39

φ (degrees): 35.63 ±1.64 °

Unit weight: 17.64 ±1.42 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 30.16 ±10.31 MPa

Go: 45.06 ±126.34 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

## ::: Layer No: 3 :::

**Code:** 3      **Start depth:** 1.23 (m), **End depth:** 1.66 (m)**Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.35 ±0.32 MPa

Sleeve friction: 71.04 ±14.35 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

**Estimation results**

Permeability: 2.26E-08 ±1.00E-07 m/s

N60: 6.17 ±0.80 blows

Es: 33.97 ±1.09 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.01 ±0.25 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 18.53 ±4.56 MPa

Go: 42.78 ±3.76 MPa

Su: 82.49 ±23.75 kPa

Su ratio: 1.85 ±0.42

O.C.R.: 10.58 ±4.00

## ::: Layer No: 4 :::

**Code:** 4      **Start depth:** 1.66 (m), **End depth:** 2.50 (m)**Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.12 ±0.25 MPa

Sleeve friction: 30.96 ±7.20 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4

SBTn description: Clay &amp; silty clay

**Estimation results**

Permeability: 5.04E-08 ±6.62E-08 m/s

N60: 4.74 ±0.71 blows

Es: 26.40 ±1.89 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.98 ±0.31 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 15.19 ±3.47 MPa

Go: 30.35 ±3.22 MPa

Su: 79.37 ±21.14 kPa

Su ratio: 1.55 ±0.35

O.C.R.: 10.08 ±3.46

## ::: Layer No: 5 :::

**Code:** 5      **Start depth:** 2.50 (m), **End depth:** 2.90 (m)**Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 0.80 ±0.05 MPa

Sleeve friction: 26.48 ±4.78 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

**Estimation results**

Permeability: 1.39E-08 ±3.18E-09 m/s

N60: 3.89 ±0.30 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.67 ±0.24 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 10.38 ±0.93 MPa

Go: 26.48 ±1.86 MPa

Su: 52.36 ±2.86 kPa

Su ratio: 1.07 ±0.07

O.C.R.: 5.97 ±0.43

**::: Layer No: 6 :::****Code: 6**      **Start depth: 2.90 (m), End depth: 4.81 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 0.74 ±0.19 MPa

Sleeve friction: 9.53 ±5.76 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 2.90E-08 ±4.26E-08 m/s

N60: 3.32 ±0.78 blows

Es: 19.56 ±3.37 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 15.48 ±0.75 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 7.39 ±3.63 MPa

Go: 20.97 ±4.62 MPa

Su: 57.67 ±15.68 kPa

Su ratio: 0.78 ±0.17

O.C.R.: 5.26 ±1.50

**::: Layer No: 7 :::****Code: 7**      **Start depth: 4.81 (m), End depth: 6.00 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.42 ±0.31 MPa

Sleeve friction: 41.34 ±13.82 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 2.95E-08 ±1.10E-08 m/s

N60: 6.42 ±1.29 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.40 ±0.52 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 18.22 ±4.75 MPa

Go: 41.00 ±7.46 MPa

Su: 95.48 ±20.12 kPa

Su ratio: 1.33 ±0.25

O.C.R.: 8.11 ±1.74

**::: Layer No: 8 :::****Code: 8**      **Start depth: 6.00 (m), End depth: 6.50 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.89 ±0.03 MPa

Sleeve friction: 79.42 ±7.62 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.44E-08 ±3.12E-09 m/s

N60: 8.84 ±0.37 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.27 ±0.11 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 25.04 ±0.41 MPa

Go: 57.03 ±1.80 MPa

Su: 118.97 ±1.96 kPa

Su ratio: 1.64 ±0.05

O.C.R.: 9.60 ±0.20

**::: Layer No: 9 :::****Code: 9**      **Start depth: 6.50 (m), End depth: 7.80 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.61 ±0.18 MPa

Sleeve friction: 47.45 ±14.90 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 2.41E-08 ±6.46E-09 m/s

N60: 7.39 ±0.78 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.61 ±0.37 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 20.70 ±2.59 MPa

Go: 47.40 ±5.69 MPa

Su: 105.75 ±10.02 kPa

Su ratio: 1.25 ±0.17

O.C.R.: 7.45 ±1.05



**:: Layer No: 10 ::****Code: 10**      **Start depth: 7.80 (m), End depth: 8.97 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 2.21 ±0.76 MPa

Sleeve friction: 46.12 ±20.28 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 7.83E-08 ±1.05E-07 m/s

N60: 9.04 ±2.42 blows

Es: 52.69 ±5.91 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.70 ±0.66 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 28.23 ±11.14 MPa

Go: 53.16 ±11.91 MPa

Su: 147.89 ±55.10 kPa

Su ratio: 1.47 ±0.52

O.C.R.: 9.96 ±4.44

**:: Layer No: 11 ::****Code: 11**      **Start depth: 8.97 (m), End depth: 9.50 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.81 ±0.17 MPa

Sleeve friction: 38.97 ±13.18 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 3.62E-08 ±8.91E-09 m/s

N60: 8.04 ±0.73 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.43 ±0.37 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 23.11 ±2.57 MPa

Go: 49.16 ±5.74 MPa

Su: 126.46 ±10.09 kPa

Su ratio: 1.17 ±0.14

O.C.R.: 7.52 ±0.82

**:: Layer No: 12 ::****Code: 12**      **Start depth: 9.50 (m), End depth: 10.15 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.70 ±0.11 MPa

Sleeve friction: 49.86 ±9.88 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.51E-08 ±4.23E-09 m/s

N60: 8.27 ±0.68 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.69 ±0.24 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 21.26 ±1.69 MPa

Go: 53.25 ±4.40 MPa

Su: 108.71 ±6.37 kPa

Su ratio: 1.04 ±0.06

O.C.R.: 5.90 ±0.40

**:: Layer No: 13 ::****Code: 13**      **Start depth: 10.15 (m), End depth: 11.15 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.62 ±0.17 MPa

Sleeve friction: 27.03 ±13.17 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 2.87E-08 ±1.33E-08 m/s

N60: 7.25 ±0.98 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.97 ±0.53 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 18.33 ±3.45 MPa

Go: 44.59 ±6.99 MPa

Su: 116.41 ±9.93 kPa

Su ratio: 0.93 ±0.11

O.C.R.: 6.00 ±0.67

## :: Layer No: 14 ::

Code: 14 Start depth: 11.15 (m), End depth: 12.18 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.67 ±0.17 MPa

Sleeve friction: 44.46 ±11.80 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

## Estimation results

Permeability: 1.13E-08 ±6.75E-09 m/s

N60: 8.20 ±0.70 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.55 ±0.31 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 17.95 ±4.12 MPa

Go: 53.68 ±5.00 MPa

Su: 105.69 ±13.78 kPa

Su ratio: 0.88 ±0.11

O.C.R.: 4.88 ±0.81

## :: Layer No: 15 ::

Code: 15 Start depth: 12.18 (m), End depth: 12.50 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

## Basic results

Total cone resistance: 2.10 ±0.33 MPa

Sleeve friction: 55.59 ±15.65 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4

SBTn description: Clay &amp; silty clay

## Estimation results

Permeability: 2.00E-08 ±1.68E-08 m/s

N60: 9.76 ±1.13 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.89 ±0.37 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 25.38 ±5.52 MPa

Go: 62.30 ±7.13 MPa

Su: 136.88 ±26.37 kPa

Su ratio: 1.09 ±0.19

O.C.R.: 6.41 ±1.58

## :: Layer No: 16 ::

Code: 16 Start depth: 12.50 (m), End depth: 18.60 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.47 ±0.14 MPa

Sleeve friction: 25.74 ±13.39 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

## Estimation results

Permeability: 6.99E-09 ±9.60E-09 m/s

N60: 7.55 ±0.83 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.87 ±0.64 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 9.86 ±2.80 MPa

Go: 48.10 ±7.48 MPa

Su: 94.58 ±13.15 kPa

Su ratio: 0.59 ±0.09

O.C.R.: 3.27 ±0.72

## :: Layer No: 17 ::

Code: 17 Start depth: 18.60 (m), End depth: 19.89 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.81 ±0.38 MPa

Sleeve friction: 27.58 ±11.20 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3

SBTn description: Clay

## Estimation results

Permeability: 9.79E-09 ±1.55E-08 m/s

N60: 9.03 ±1.40 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.03 ±0.49 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 12.49 ±7.20 MPa

Go: 55.45 ±8.52 MPa

Su: 119.06 ±30.98 kPa

Su ratio: 0.61 ±0.16

O.C.R.: 3.55 ±1.28

## .: Layer No: 18 .:

**Code:** 18      **Start depth:** 19.89 (m), **End depth:** 20.28 (m)**Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 3.84 ±1.75 MPa

Sleeve friction: 40.67 ±15.51 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 2.00E-07 ±2.61E-06 m/s

N60: 14.57 ±3.15 blows

Es: 62.64 ±3.47 MPa

Dr (%): 30.94 ±3.58

φ (degrees): 34.36 ±1.13 °

Unit weight: 17.77 ±0.36 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 43.42 ±23.84 MPa

Go: 75.42 ±8.96 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

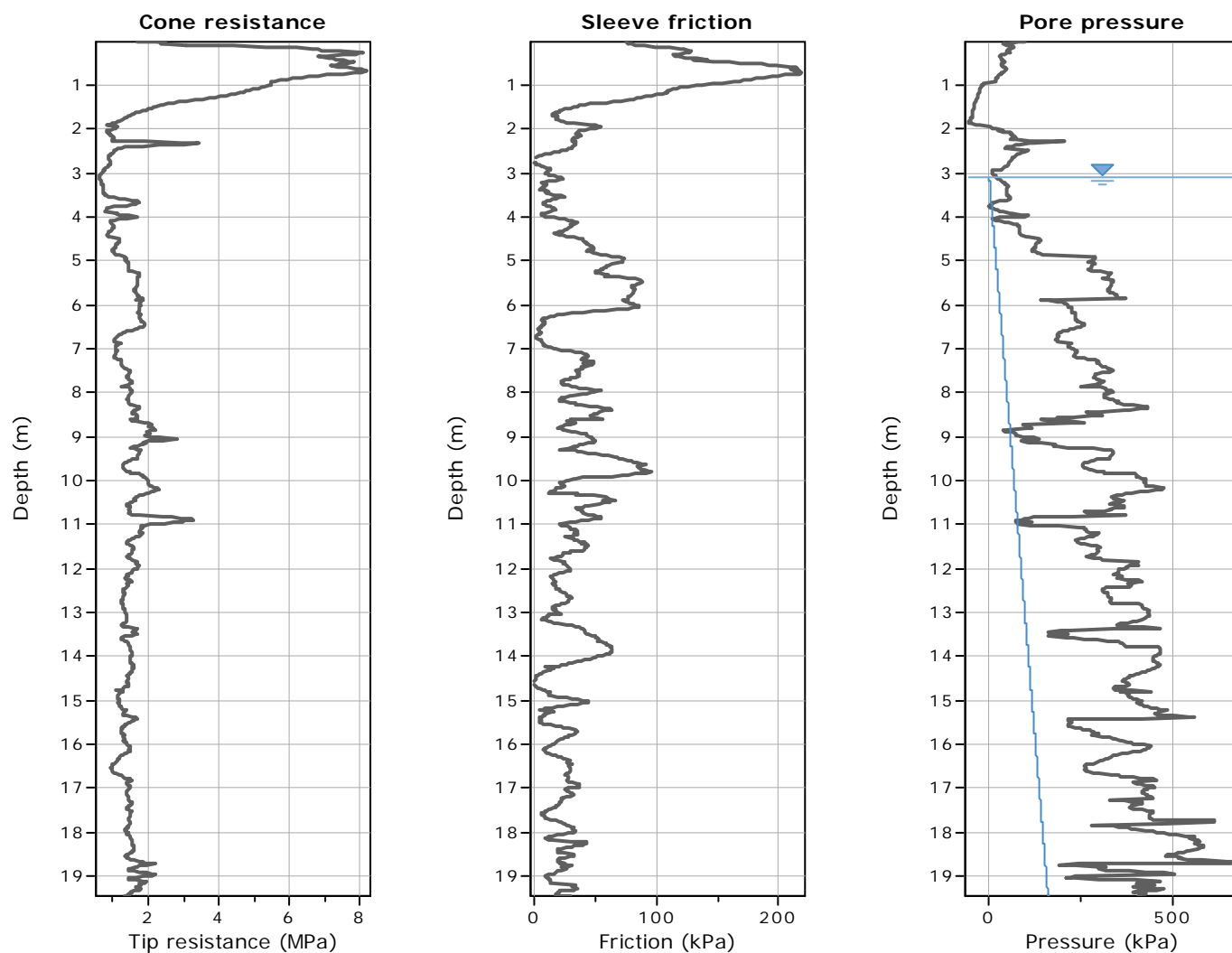
Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
0.00	0.40	2.49E-05	11.3	34.4	53.6	39.6	40.7	42.4	0.0	0.0	0.0	17.5
0.40		(±4.51E-05)	(±2.8)	(±6.2)	(±6.6)	(±1.2)	(±10.1)	(±8.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.7)
0.40	0.83	9.52E-07	8.1	28.5	35.4	35.6	30.2	45.1	0.0	0.0	0.0	17.6
1.23		(±1.09E-05)	(±7.2)	(±6.3)	(±6.4)	(±1.6)	(±10.3)	(±126.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.4)
1.23	0.43	2.26E-08	6.2	34.0	0.0	0.0	18.5	42.8	82.5	1.9	10.6	18.0
1.66		(±1.00E-07)	(±0.8)	(±1.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.6)	(±3.8)	(±23.7)	(±0.4)	(±4.0)	(±0.2)
1.66	0.84	5.04E-08	4.7	26.4	0.0	0.0	15.2	30.3	79.4	1.5	10.1	17.0
2.50		(±6.62E-08)	(±0.7)	(±1.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.5)	(±3.2)	(±21.1)	(±0.4)	(±3.5)	(±0.3)
2.50	0.40	1.39E-08	3.9	0.0	0.0	0.0	10.4	26.5	52.4	1.1	6.0	16.7
2.90		(±3.18E-09)	(±0.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.9)	(±1.9)	(±2.9)	(±0.1)	(±0.4)	(±0.2)
2.90	1.91	2.90E-08	3.3	19.6	0.0	0.0	7.4	21.0	57.7	0.8	5.3	15.5
4.81		(±4.26E-08)	(±0.8)	(±3.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.6)	(±4.6)	(±15.7)	(±0.2)	(±1.5)	(±0.8)
4.81	1.19	2.95E-08	6.4	0.0	0.0	0.0	18.2	41.0	95.5	1.3	8.1	17.4
6.00		(±1.10E-08)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.8)	(±7.5)	(±20.1)	(±0.3)	(±1.7)	(±0.5)
6.00	0.50	2.44E-08	8.8	0.0	0.0	0.0	25.0	57.0	119.0	1.6	9.6	18.3
6.50		(±3.12E-09)	(±0.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)	(±1.8)	(±2.0)	(±0.0)	(±0.2)	(±0.1)
6.50	1.30	2.41E-08	7.4	0.0	0.0	0.0	20.7	47.4	105.7	1.2	7.4	17.6
7.80		(±6.46E-09)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.6)	(±5.7)	(±10.0)	(±0.2)	(±1.1)	(±0.4)
7.80	1.17	7.83E-08	9.0	52.7	0.0	0.0	28.2	53.2	147.9	1.5	10.0	17.7
8.97		(±1.05E-07)	(±2.4)	(±5.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±11.1)	(±11.9)	(±55.1)	(±0.5)	(±4.4)	(±0.7)
8.97	0.53	3.62E-08	8.0	0.0	0.0	0.0	23.1	49.2	126.5	1.2	7.5	17.4
9.50		(±8.91E-09)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.6)	(±5.7)	(±10.1)	(±0.1)	(±0.8)	(±0.4)

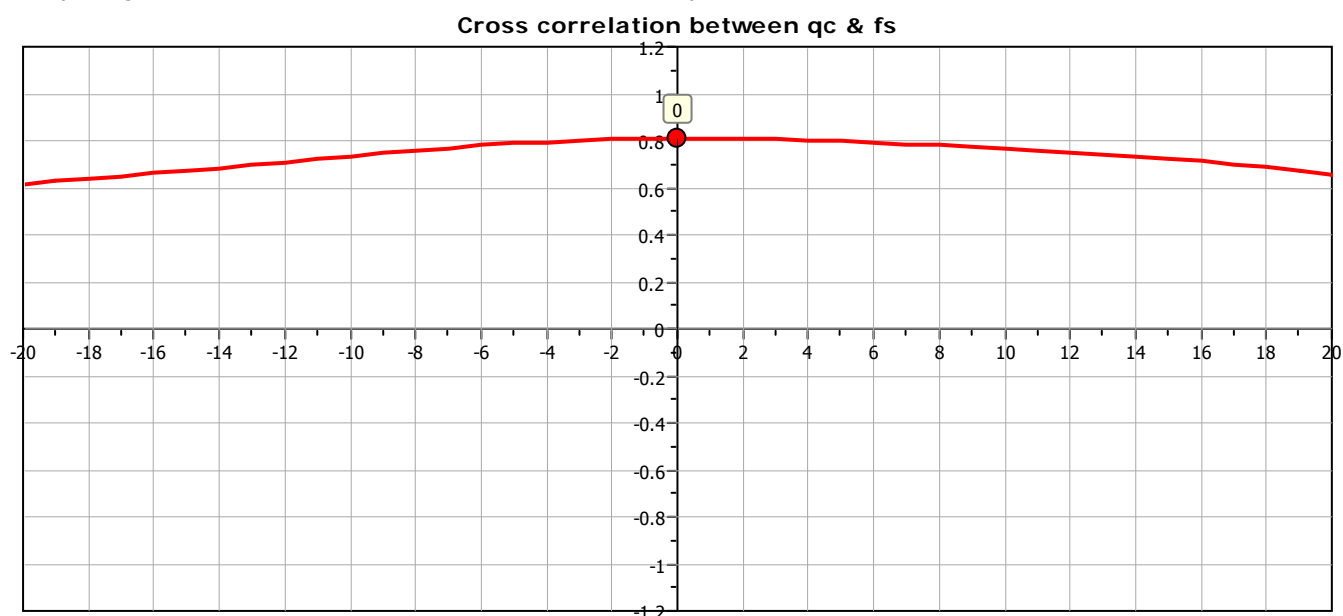
Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
9.50	0.65	1.51E-08	8.3	0.0	0.0	0.0	21.3	53.2	108.7	1.0	5.9	17.7
10.15		(±4.23E-09)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.7)	(±4.4)	(±6.4)	(±0.1)	(±0.4)	(±0.2)
10.15	1.00	2.87E-08	7.2	0.0	0.0	0.0	18.3	44.6	116.4	0.9	6.0	17.0
11.15		(±1.33E-08)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.5)	(±7.0)	(±9.9)	(±0.1)	(±0.7)	(±0.5)
11.15	1.03	1.13E-08	8.2	0.0	0.0	0.0	17.9	53.7	105.7	0.9	4.9	17.5
12.18		(±6.75E-09)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.1)	(±5.0)	(±13.8)	(±0.1)	(±0.8)	(±0.3)
12.18	0.32	2.00E-08	9.8	0.0	0.0	0.0	25.4	62.3	136.9	1.1	6.4	17.9
12.50		(±1.68E-08)	(±1.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.5)	(±7.1)	(±26.4)	(±0.2)	(±1.6)	(±0.4)
12.50	6.10	6.99E-09	7.6	0.0	0.0	0.0	9.9	48.1	94.6	0.6	3.3	16.9
18.60		(±9.60E-09)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.8)	(±7.5)	(±13.1)	(±0.1)	(±0.7)	(±0.6)
18.60	1.29	9.79E-09	9.0	0.0	0.0	0.0	12.5	55.5	119.1	0.6	3.5	17.0
19.89		(±1.55E-08)	(±1.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.2)	(±8.5)	(±31.0)	(±0.2)	(±1.3)	(±0.5)
19.89	0.39	2.00E-07	14.6	62.6	30.9	34.4	43.4	75.4	0.0	0.0	0.0	17.8
20.28		(±2.61E-06)	(±3.1)	(±3.5)	(±3.6)	(±1.1)	(±23.8)	(±9.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)

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

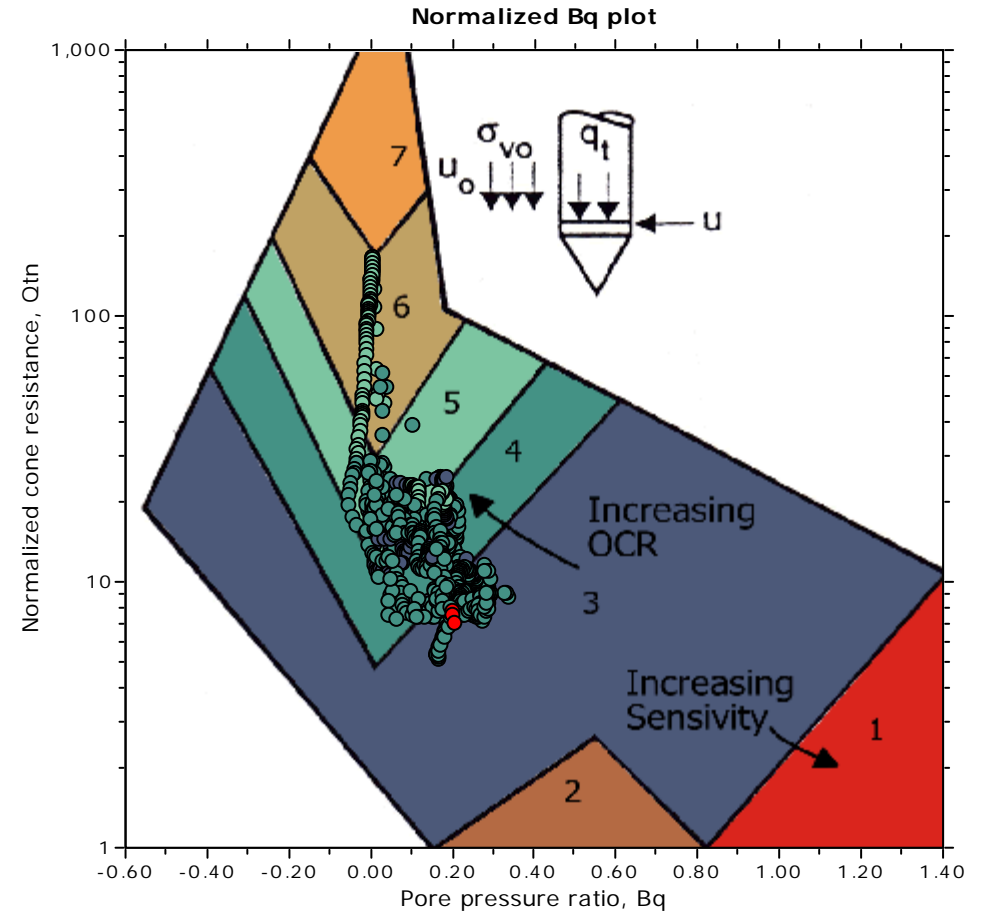
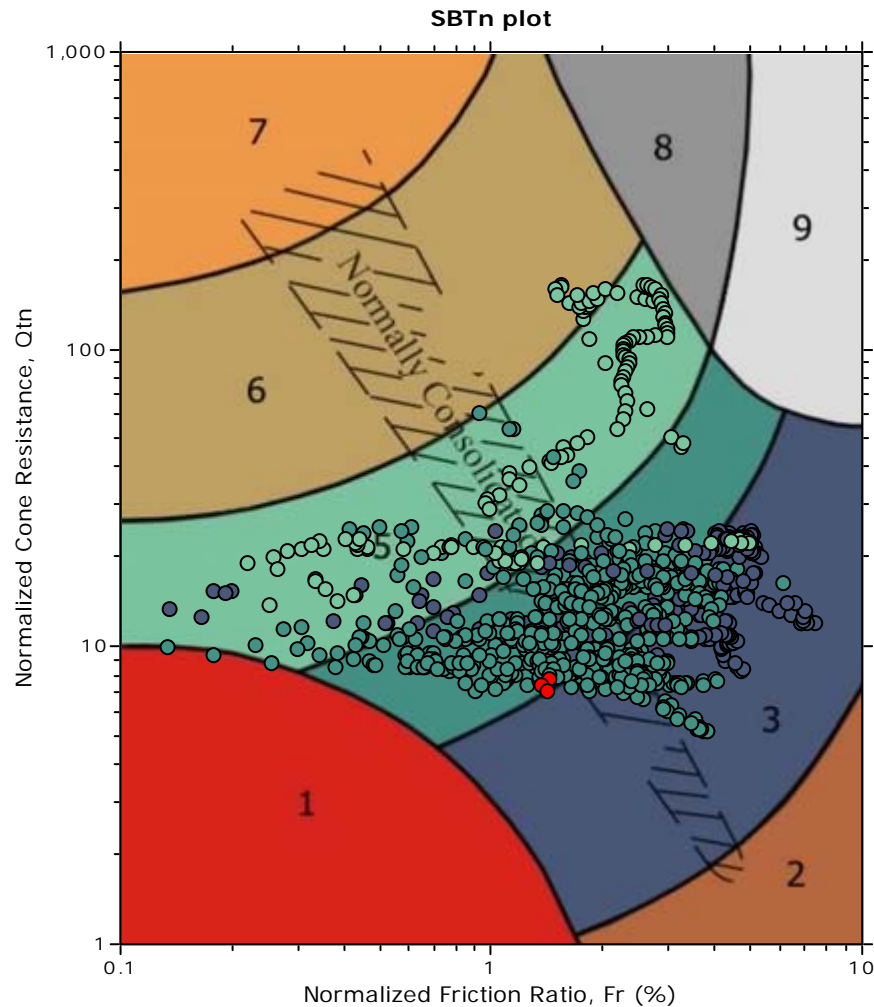


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw  $q_c$  and  $f_s$  values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



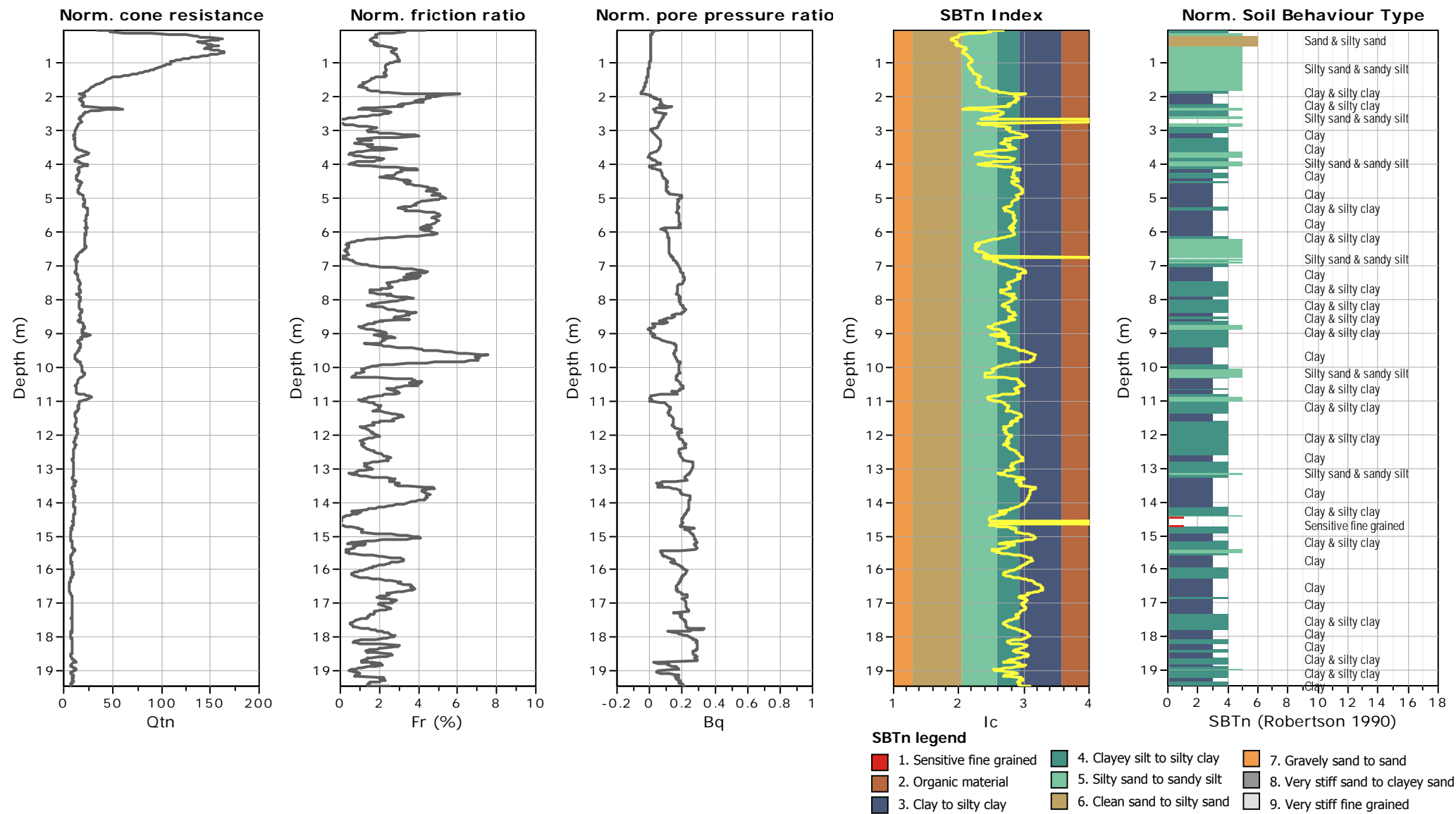


# SBT - Bq plots (normalized)



## SBTn legend

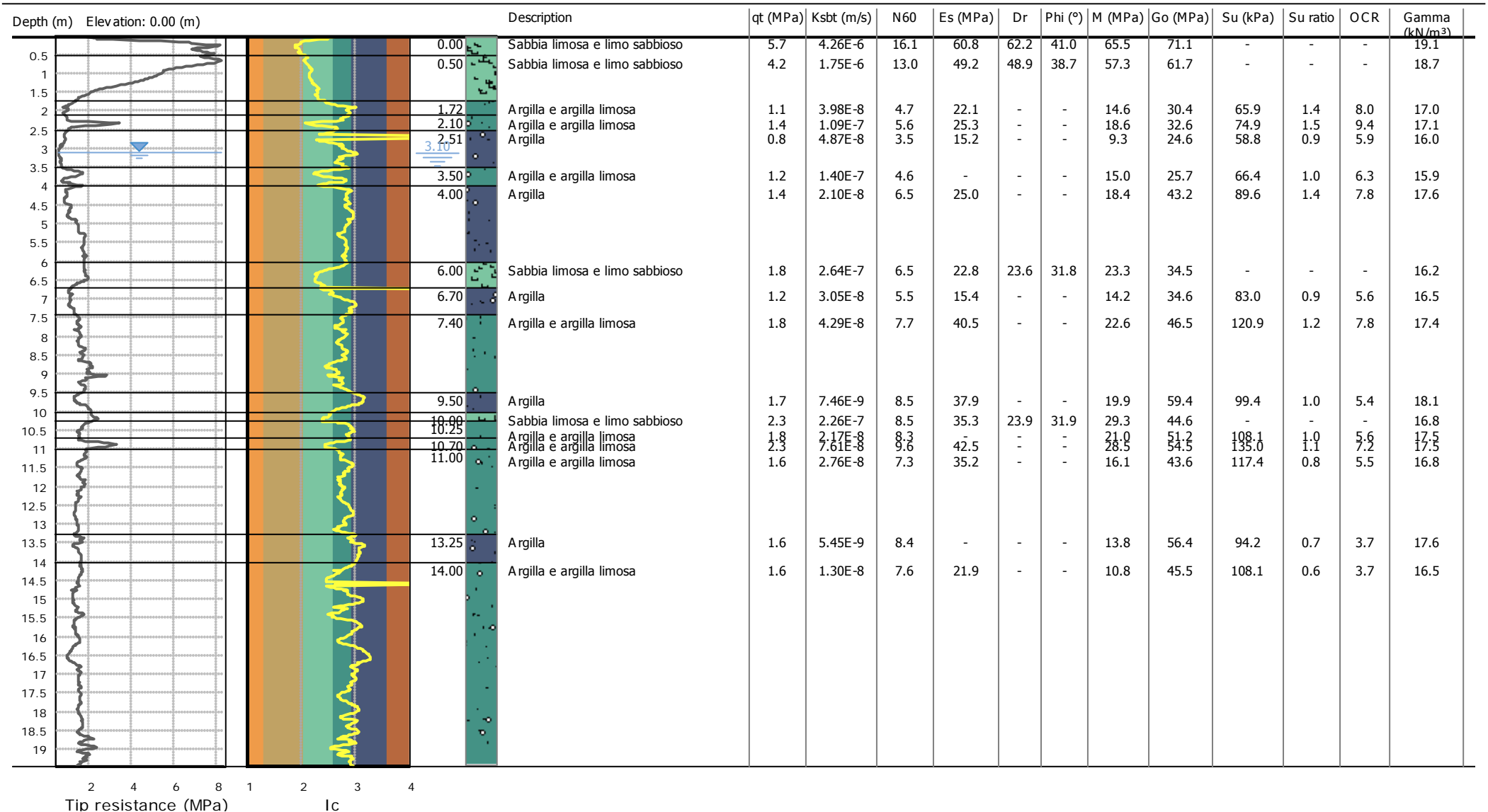
- |                           |                              |                                   |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand           |
| 2. Organic 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        |

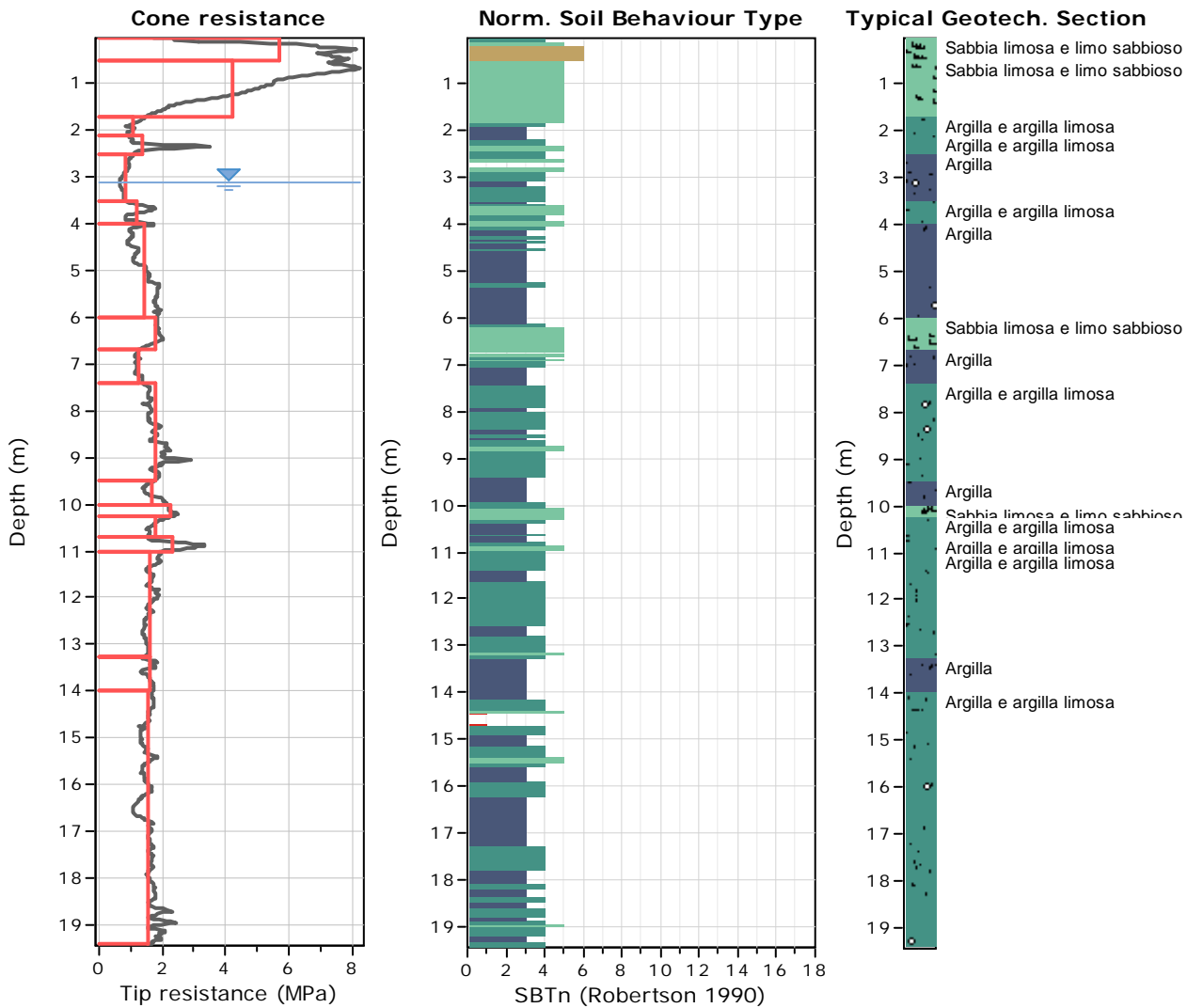


Project: Biblioteca e centro polifunzionale  
Location: Castel Maggiore (BO)

CPT: CPTu-2\_Luglio2019

Total depth: 19.45 m





### Tabular results

::: Layer No: 1 :::

Code: 1 Start depth: 0.00 (m), End depth: 0.50 (m)

Description: Sabbia limosa e limo sabbioso

#### Basic results

Total cone resistance:  $5.68 \pm 2.15$  MPa

Sleeve friction:  $113.92 \pm 25.57$  kPa

SBT<sub>n</sub>: 5

SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt

#### Estimation results

Permeability:  $4.26E-06 \pm 6.11E-06$  m/s

N<sub>60</sub>:  $16.08 \pm 4.45$  blows

Es:  $60.80 \pm 6.38$  MPa

Dr (%):  $62.25 \pm 6.29$

$\phi$  (degrees):  $41.04 \pm 1.08$  °

Unit weight:  $19.10 \pm 0.43$  kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.:  $65.46 \pm 19.30$  MPa

Go:  $71.13 \pm 12.55$  MPa

Su:  $0.00 \pm 0.00$  kPa

Su ratio:  $0.00 \pm 0.00$

O.C.R.:  $0.00 \pm 0.00$

**::: Layer No: 2 :::****Code: 2**      **Start depth: 0.50 (m), End depth: 1.72 (m)****Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 4.22 ±2.27 MPa

Sleeve friction: 90.06 ±76.73 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 1.75E-06 ±1.37E-06 m/s

N60: 12.96 ±6.21 blows

Es: 49.21 ±20.67 MPa

Dr (%): 48.93 ±12.92

φ (degrees): 38.67 ±2.62 °

Unit weight: 18.72 ±1.19 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 57.34 ±28.65 MPa

Go: 61.67 ±25.91 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**::: Layer No: 3 :::****Code: 3**      **Start depth: 1.72 (m), End depth: 2.10 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.08 ±0.19 MPa

Sleeve friction: 31.68 ±13.28 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 3.98E-08 ±1.35E-07 m/s

N60: 4.73 ±0.44 blows

Es: 22.14 ±22.14 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.99 ±0.42 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 14.58 ±2.65 MPa

Go: 30.41 ±3.53 MPa

Su: 65.87 ±12.17 kPa

Su ratio: 1.38 ±0.17

O.C.R.: 7.98 ±1.88

**::: Layer No: 4 :::****Code: 4**      **Start depth: 2.10 (m), End depth: 2.51 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.39 ±0.81 MPa

Sleeve friction: 32.27 ±3.69 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 1.09E-07 ±1.28E-06 m/s

N60: 5.59 ±1.79 blows

Es: 25.32 ±25.32 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.11 ±0.23 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 18.64 ±10.54 MPa

Go: 32.61 ±4.53 MPa

Su: 74.88 ±11.90 kPa

Su ratio: 1.49 ±0.18

O.C.R.: 9.37 ±1.89

**::: Layer No: 5 :::****Code: 5**      **Start depth: 2.51 (m), End depth: 3.50 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 0.80 ±0.13 MPa

Sleeve friction: 0.00 ±0.00 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 4.87E-08 ±1.83E-07 m/s

N60: 3.55 ±1.92 blows

Es: 15.15 ±3.22 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.03 ±1.98 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 9.30 ±2.68 MPa

Go: 24.60 ±35.70 MPa

Su: 58.77 ±12.18 kPa

Su ratio: 0.88 ±0.20

O.C.R.: 5.92 ±1.83

**::: Layer No: 6 :::****Code: 6**      **Start depth: 3.50 (m), End depth: 4.00 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.17 ±0.35 MPa

Sleeve friction: 12.01 ±5.16 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 1.40E-07 ±4.81E-07 m/s

N60: 4.57 ±0.70 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 15.91 ±0.39 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 15.01 ±5.35 MPa

Go: 25.72 ±1.92 MPa

Su: 66.44 ±13.36 kPa

Su ratio: 0.98 ±0.15

O.C.R.: 6.30 ±1.50

**::: Layer No: 7 :::****Code: 7**      **Start depth: 4.00 (m), End depth: 6.00 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.41 ±0.35 MPa

Sleeve friction: 50.34 ±22.57 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.10E-08 ±9.58E-08 m/s

N60: 6.54 ±1.46 blows

Es: 25.04 ±25.04 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.63 ±0.63 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 18.37 ±4.92 MPa

Go: 43.22 ±10.01 MPa

Su: 89.61 ±21.97 kPa

Su ratio: 1.36 ±0.27

O.C.R.: 7.82 ±1.82

**::: Layer No: 8 :::****Code: 8**      **Start depth: 6.00 (m), End depth: 6.70 (m)****Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 1.78 ±0.20 MPa

Sleeve friction: 13.58 ±32.57 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 2.64E-07 ±5.45E-07 m/s

N60: 6.52 ±1.44 blows

Es: 22.84 ±3.20 MPa

Dr (%): 23.64 ±1.78

φ (degrees): 31.80 ±0.75 °

Unit weight: 16.21 ±1.33 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 23.29 ±2.80 MPa

Go: 34.49 ±12.26 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

**::: Layer No: 9 :::****Code: 9**      **Start depth: 6.70 (m), End depth: 7.40 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.22 ±0.08 MPa

Sleeve friction: 0.00 ±0.00 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 3.05E-08 ±1.40E-07 m/s

N60: 5.52 ±1.63 blows

Es: 15.44 ±15.44 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.46 ±1.54 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 14.20 ±1.88 MPa

Go: 34.60 ±24.56 MPa

Su: 83.00 ±12.19 kPa

Su ratio: 0.94 ±0.07

O.C.R.: 5.57 ±1.04



## :: Layer No: 10 ::

Code: 10 Start depth: 7.40 (m), End depth: 9.50 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

## Basic results

Total cone resistance: 1.76 ±0.27 MPa

Sleeve friction: 36.82 ±11.77 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

## Estimation results

Permeability: 4.29E-08 ±5.75E-08 m/s

N60: 7.71 ±0.89 blows

Es: 40.50 ±5.76 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.35 ±0.37 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 22.59 ±3.70 MPa

Go: 46.50 ±5.55 MPa

Su: 120.86 ±20.64 kPa

Su ratio: 1.21 ±0.14

O.C.R.: 7.81 ±1.45

## :: Layer No: 11 ::

Code: 11 Start depth: 9.50 (m), End depth: 10.00 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.67 ±0.27 MPa

Sleeve friction: 70.44 ±20.31 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay

## Estimation results

Permeability: 7.46E-09 ±3.30E-08 m/s

N60: 8.50 ±0.51 blows

Es: 37.90 ±37.90 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.08 ±0.35 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 19.92 ±4.77 MPa

Go: 59.36 ±4.81 MPa

Su: 99.36 ±30.53 kPa

Su ratio: 1.04 ±0.18

O.C.R.: 5.38 ±2.08

## :: Layer No: 12 ::

Code: 12 Start depth: 10.00 (m), End depth: 10.25 (m)

Description: Sabbia limosa e limo sabbioso

## Basic results

Total cone resistance: 2.27 ±0.12 MPa

Sleeve friction: 21.63 ±3.92 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt

## Estimation results

Permeability: 2.26E-07 ±1.27E-07 m/s

N60: 8.52 ±0.52 blows

Es: 35.27 ±1.14 MPa

Dr (%): 23.91 ±0.65

φ (degrees): 31.91 ±0.26 °

Unit weight: 16.84 ±0.20 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 29.31 ±1.66 MPa

Go: 44.65 ±1.70 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

## :: Layer No: 13 ::

Code: 13 Start depth: 10.25 (m), End depth: 10.70 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

## Basic results

Total cone resistance: 1.75 ±0.24 MPa

Sleeve friction: 40.48 ±15.95 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

## Estimation results

Permeability: 2.17E-08 ±1.49E-07 m/s

N60: 8.31 ±0.56 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.46 ±0.52 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 21.03 ±4.19 MPa

Go: 51.19 ±5.98 MPa

Su: 108.12 ±15.65 kPa

Su ratio: 0.99 ±0.11

O.C.R.: 5.59 ±1.11

**:: Layer No: 14 ::****Code: 14**      **Start depth: 10.70 (m), End depth: 11.00 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 2.30 ±0.67 MPa

Sleeve friction: 39.40 ±10.43 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 7.61E-08 ±1.57E-07 m/s

N60: 9.56 ±1.63 blows

Es: 42.51 ±11.53 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.53 ±0.36 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 28.50 ±10.25 MPa

Go: 54.51 ±6.49 MPa

Su: 134.97 ±48.29 kPa

Su ratio: 1.14 ±0.35

O.C.R.: 7.22 ±3.37

**:: Layer No: 15 ::****Code: 15**      **Start depth: 11.00 (m), End depth: 13.25 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.61 ±0.17 MPa

Sleeve friction: 22.51 ±8.95 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 2.76E-08 ±2.23E-08 m/s

N60: 7.34 ±0.57 blows

Es: 35.17 ±35.17 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.75 ±0.47 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 16.09 ±4.42 MPa

Go: 43.65 ±4.77 MPa

Su: 117.35 ±17.69 kPa

Su ratio: 0.83 ±0.13

O.C.R.: 5.48 ±1.20

**:: Layer No: 16 ::****Code: 16**      **Start depth: 13.25 (m), End depth: 14.00 (m)****Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.58 ±0.14 MPa

Sleeve friction: 47.69 ±12.77 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 5.45E-09 ±5.08E-09 m/s

N60: 8.38 ±0.72 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.61 ±0.38 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 13.81 ±2.86 MPa

Go: 56.37 ±5.96 MPa

Su: 94.20 ±12.21 kPa

Su ratio: 0.73 ±0.08

O.C.R.: 3.73 ±0.63

**:: Layer No: 17 ::****Code: 17**      **Start depth: 14.00 (m), End depth: 19.39 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.57 ±0.22 MPa

Sleeve friction: 16.08 ±12.21 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 1.30E-08 ±4.00E-08 m/s

N60: 7.55 ±1.17 blows

Es: 21.92 ±0.54 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.47 ±0.96 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 10.84 ±3.53 MPa

Go: 45.47 ±15.42 MPa

Su: 108.07 ±32.24 kPa

Su ratio: 0.59 ±0.09

O.C.R.: 3.69 ±1.55

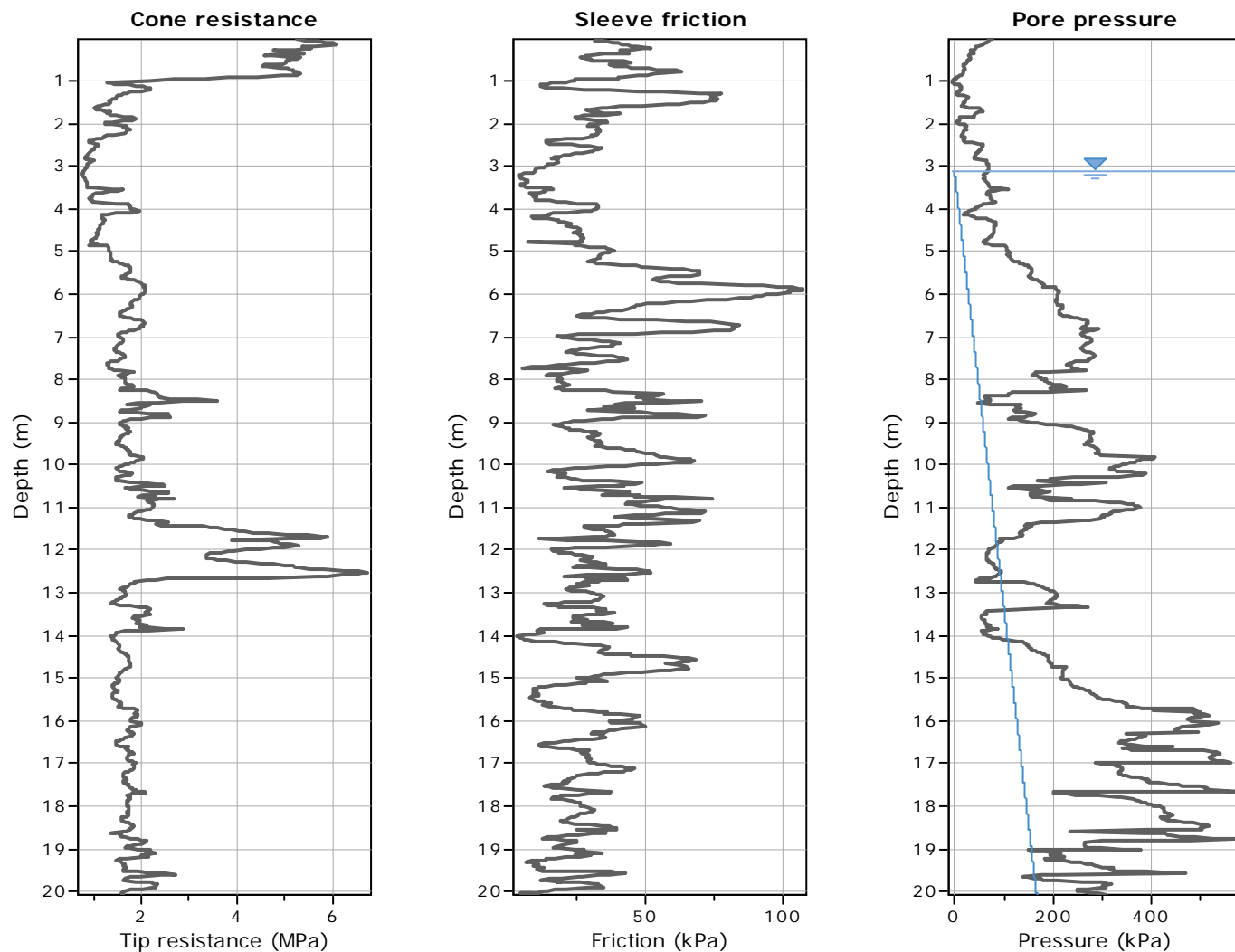
Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
0.00	0.50	4.26E-06	16.1	60.8	62.2	41.0	65.5	71.1	0.0	0.0	0.0	19.1
0.50		(±6.11E-06)	(±4.4)	(±6.4)	(±6.3)	(±1.1)	(±19.3)	(±12.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)
0.50	1.22	1.75E-06	13.0	49.2	48.9	38.7	57.3	61.7	0.0	0.0	0.0	18.7
1.72		(±1.37E-06)	(±6.2)	(±20.7)	(±12.9)	(±2.6)	(±28.7)	(±25.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.2)
1.72	0.38	3.98E-08	4.7	22.1	0.0	0.0	14.6	30.4	65.9	1.4	8.0	17.0
2.10		(±1.35E-07)	(±0.4)	(±22.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.7)	(±3.5)	(±12.2)	(±0.2)	(±1.9)	(±0.4)
2.10	0.41	1.09E-07	5.6	25.3	0.0	0.0	18.6	32.6	74.9	1.5	9.4	17.1
2.51		(±1.28E-06)	(±1.8)	(±25.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±10.5)	(±4.5)	(±11.9)	(±0.2)	(±1.9)	(±0.2)
2.51	0.99	4.87E-08	3.5	15.2	0.0	0.0	9.3	24.6	58.8	0.9	5.9	16.0
3.50		(±1.83E-07)	(±1.9)	(±3.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.7)	(±35.7)	(±12.2)	(±0.2)	(±1.8)	(±2.0)
3.50	0.50	1.40E-07	4.6	0.0	0.0	0.0	15.0	25.7	66.4	1.0	6.3	15.9
4.00		(±4.81E-07)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.3)	(±1.9)	(±13.4)	(±0.1)	(±1.5)	(±0.4)
4.00	2.00	2.10E-08	6.5	25.0	0.0	0.0	18.4	43.2	89.6	1.4	7.8	17.6
6.00		(±9.58E-08)	(±1.5)	(±25.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.9)	(±10.0)	(±22.0)	(±0.3)	(±1.8)	(±0.6)
6.00	0.70	2.64E-07	6.5	22.8	23.6	31.8	23.3	34.5	0.0	0.0	0.0	16.2
6.70		(±5.45E-07)	(±1.4)	(±3.2)	(±1.8)	(±0.7)	(±2.8)	(±12.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.3)
6.70	0.70	3.05E-08	5.5	15.4	0.0	0.0	14.2	34.6	83.0	0.9	5.6	16.5
7.40		(±1.40E-07)	(±1.6)	(±15.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.9)	(±24.6)	(±12.2)	(±0.1)	(±1.0)	(±1.5)
7.40	2.10	4.29E-08	7.7	40.5	0.0	0.0	22.6	46.5	120.9	1.2	7.8	17.4
9.50		(±5.75E-08)	(±0.9)	(±5.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.7)	(±5.6)	(±20.6)	(±0.1)	(±1.5)	(±0.4)
9.50	0.50	7.46E-09	8.5	37.9	0.0	0.0	19.9	59.4	99.4	1.0	5.4	18.1
10.00		(±3.30E-08)	(±0.5)	(±37.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.8)	(±4.8)	(±30.5)	(±0.2)	(±2.1)	(±0.4)

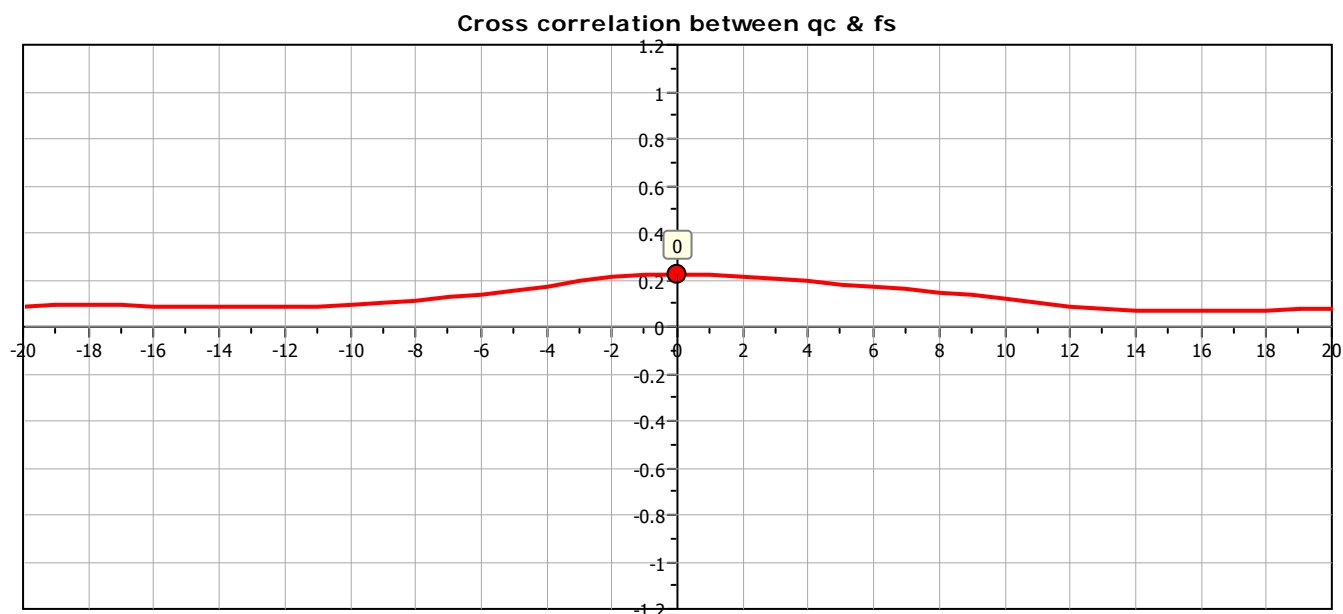
Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
10.00	0.25	2.26E-07	8.5	35.3	23.9	31.9	29.3	44.6	0.0	0.0	0.0	16.8
10.25		(±1.27E-07)	(±0.5)	(±1.1)	(±0.7)	(±0.3)	(±1.7)	(±1.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.2)
10.25	0.45	2.17E-08	8.3	0.0	0.0	0.0	21.0	51.2	108.1	1.0	5.6	17.5
10.70		(±1.49E-07)	(±0.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.2)	(±6.0)	(±15.6)	(±0.1)	(±1.1)	(±0.5)
10.70	0.30	7.61E-08	9.6	42.5	0.0	0.0	28.5	54.5	135.0	1.1	7.2	17.5
11.00		(±1.57E-07)	(±1.6)	(±11.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±10.2)	(±6.5)	(±48.3)	(±0.4)	(±3.4)	(±0.4)
11.00	2.25	2.76E-08	7.3	35.2	0.0	0.0	16.1	43.6	117.4	0.8	5.5	16.8
13.25		(±2.23E-08)	(±0.6)	(±35.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.4)	(±4.8)	(±17.7)	(±0.1)	(±1.2)	(±0.5)
13.25	0.75	5.45E-09	8.4	0.0	0.0	0.0	13.8	56.4	94.2	0.7	3.7	17.6
14.00		(±5.08E-09)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.9)	(±6.0)	(±12.2)	(±0.1)	(±0.6)	(±0.4)
14.00	5.39	1.30E-08	7.6	21.9	0.0	0.0	10.8	45.5	108.1	0.6	3.7	16.5
19.39		(±4.00E-08)	(±1.2)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.5)	(±15.4)	(±32.2)	(±0.1)	(±1.5)	(±1.0)

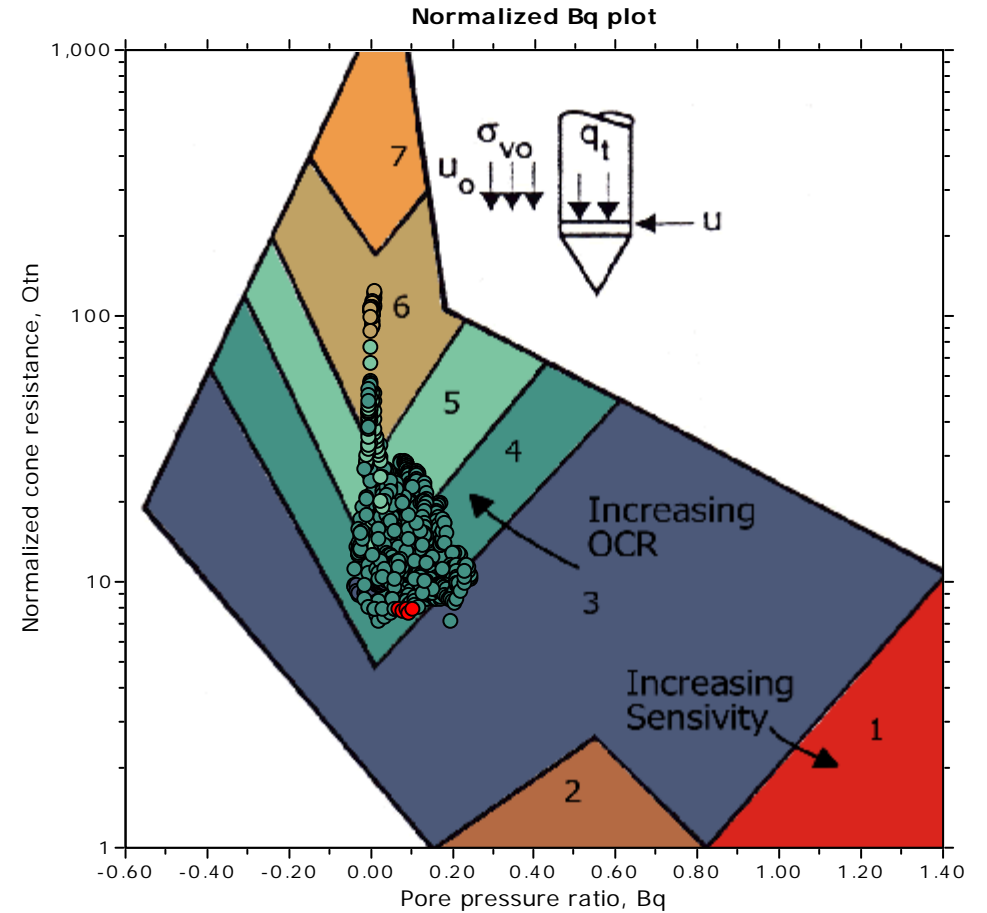
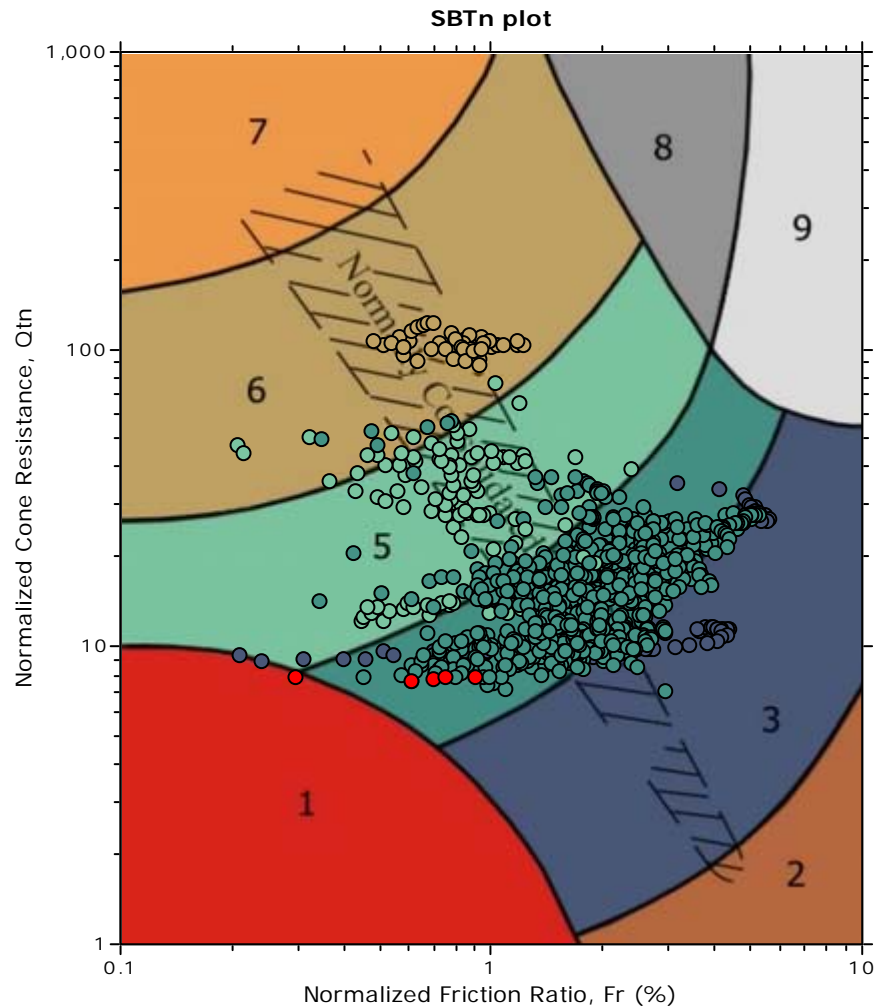
Depth values presented in this table are measured from free ground surface



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).



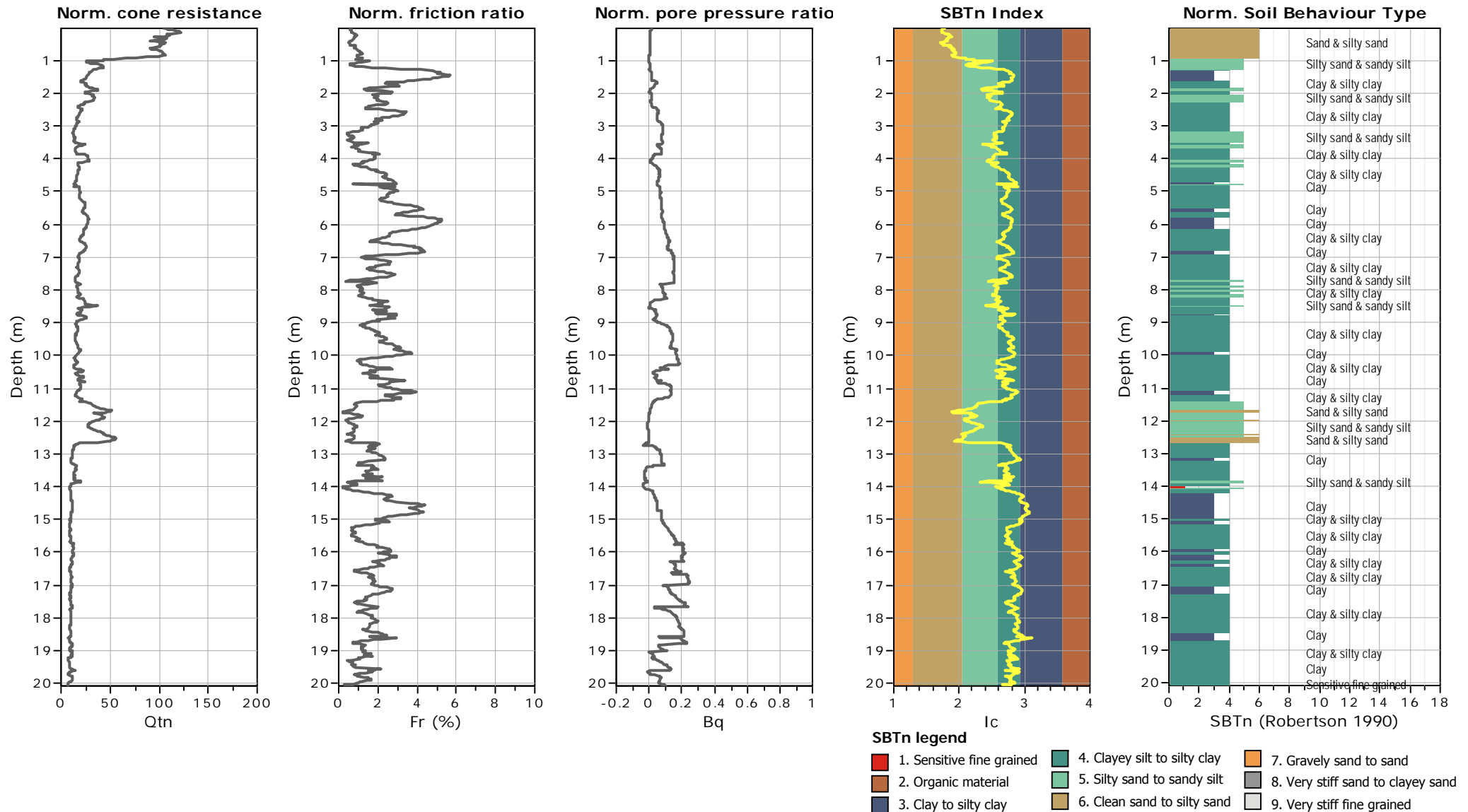
# SBT - Bq plots (normalized)



## 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        |

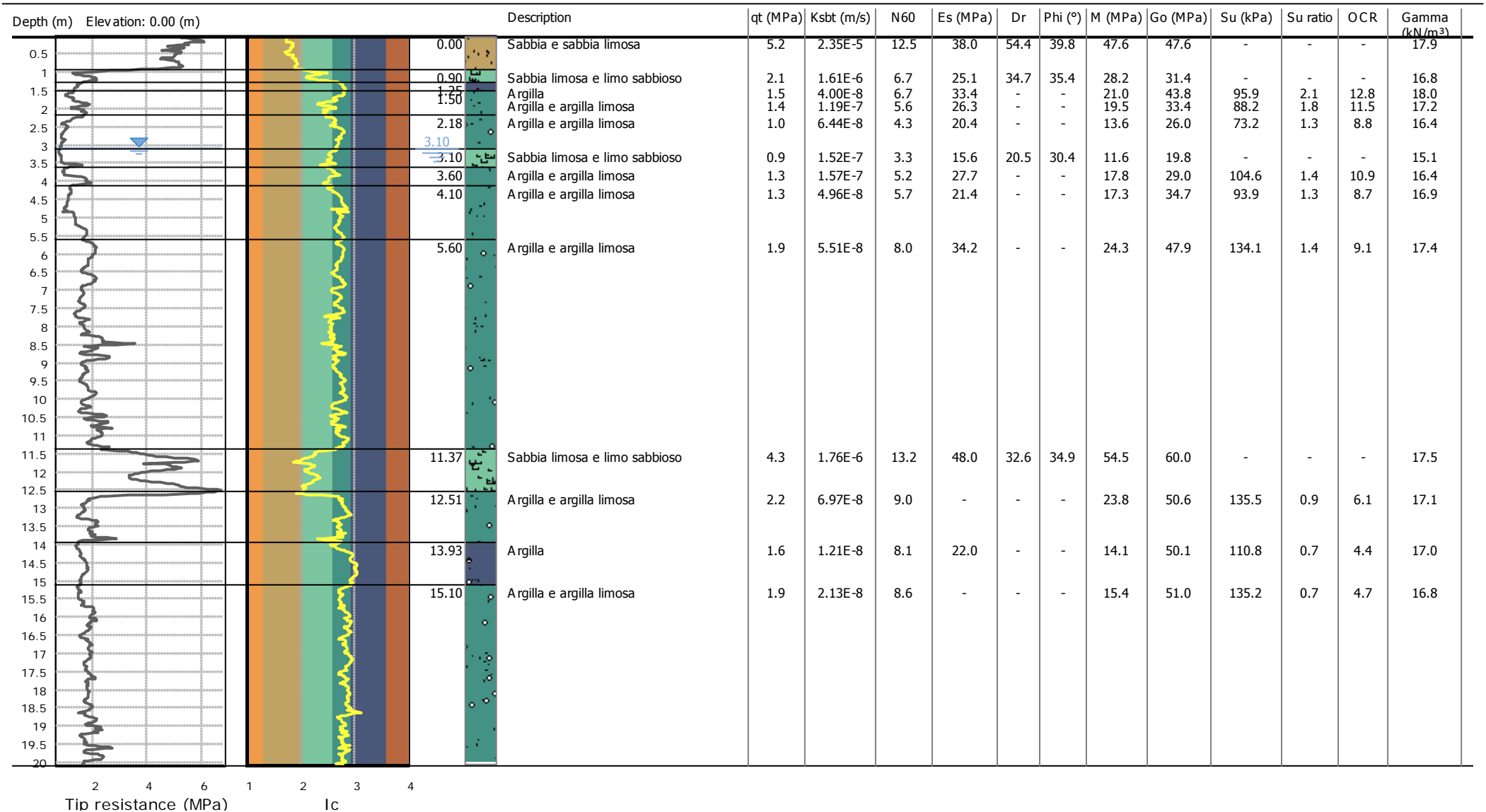


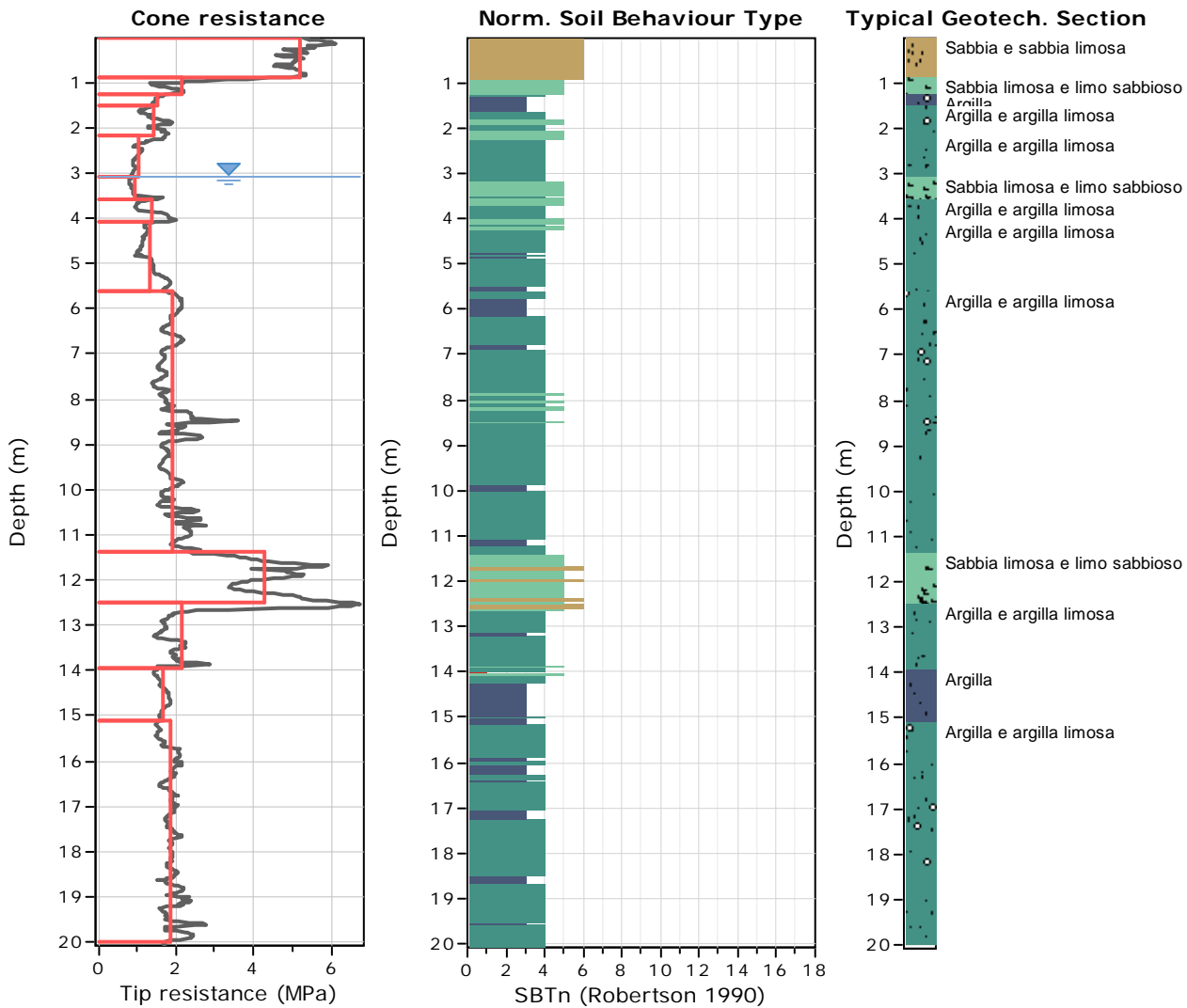


Project: Biblioteca e centro polifunzionale  
Location: Castel Maggiore (BO)

CPT: CPTu-3\_Luglio2019

Total depth: 20.08 m





### Tabular results

#### ::: Layer No: 1 :::

**Code:** 1      **Start depth:** 0.00 (m), **End depth:** 0.90 (m)

**Description:** Sabbia e sabbia limosa

#### Basic results

Total cone resistance:  $5.18 \pm 0.39$  MPa

Sleeve friction:  $40.79 \pm 9.55$  kPa

SBT<sub>n</sub>: 6

SBT<sub>n</sub> description: Sand & silty sand

#### Estimation results

Permeability:  $2.35E-05 \pm 1.39E-05$  m/s

N<sub>60</sub>:  $12.50 \pm 0.87$  blows

E<sub>s</sub>:  $37.99 \pm 3.05$  MPa

Dr (%):  $54.39 \pm 2.04$

φ (degrees):  $39.76 \pm 0.36$  °

Unit weight:  $17.88 \pm 0.27$  kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.:  $47.62 \pm 3.82$  MPa

G<sub>o</sub>:  $47.62 \pm 3.82$  MPa

S<sub>u</sub>:  $0.00 \pm 0.00$  kPa

S<sub>u</sub> ratio:  $0.00 \pm 0.00$

O.C.R.:  $0.00 \pm 0.00$

## ::: Layer No: 2 :::

**Code:** 2      **Start depth:** 0.90 (m), **End depth:** 1.25 (m)**Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 2.12 ±0.85 MPa

Sleeve friction: 21.09 ±12.22 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt**Estimation results**

Permeability: 1.61E-06 ±3.00E-06 m/s

N60: 6.68 ±1.86 blows

Es: 25.07 ±5.72 MPa

Dr (%): 34.67 ±6.30

φ (degrees): 35.43 ±1.62 °

Unit weight: 16.78 ±0.67 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 28.16 ±8.29 MPa

Go: 31.43 ±7.17 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

## ::: Layer No: 3 :::

**Code:** 3      **Start depth:** 1.25 (m), **End depth:** 1.50 (m)**Description:** Argilla**Basic results**

Total cone resistance: 1.53 ±0.18 MPa

Sleeve friction: 70.30 ±8.67 kPa

SBT<sub>n</sub>: 3SBT<sub>n</sub> description: Clay**Estimation results**

Permeability: 4.00E-08 ±7.41E-08 m/s

N60: 6.70 ±0.47 blows

Es: 33.38 ±33.38 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.04 ±0.13 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 21.03 ±2.60 MPa

Go: 43.81 ±1.53 MPa

Su: 95.91 ±12.31 kPa

Su ratio: 2.10 ±0.20

O.C.R.: 12.77 ±2.09

## ::: Layer No: 4 :::

**Code:** 4      **Start depth:** 1.50 (m), **End depth:** 2.18 (m)**Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.43 ±0.26 MPa

Sleeve friction: 34.66 ±11.55 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 1.19E-07 ±2.10E-07 m/s

N60: 5.61 ±0.49 blows

Es: 26.26 ±1.82 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.20 ±0.29 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 19.55 ±3.62 MPa

Go: 33.43 ±3.11 MPa

Su: 88.17 ±12.89 kPa

Su ratio: 1.76 ±0.20

O.C.R.: 11.49 ±2.13

## ::: Layer No: 5 :::

**Code:** 5      **Start depth:** 2.18 (m), **End depth:** 3.10 (m)**Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.02 ±0.24 MPa

Sleeve friction: 19.88 ±8.12 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 6.44E-08 ±6.77E-08 m/s

N60: 4.30 ±0.77 blows

Es: 20.38 ±4.48 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.43 ±0.51 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 13.59 ±3.36 MPa

Go: 26.00 ±3.95 MPa

Su: 73.16 ±9.92 kPa

Su ratio: 1.28 ±0.23

O.C.R.: 8.75 ±1.74

**::: Layer No: 6 :::****Code: 6**      **Start depth: 3.10 (m), End depth: 3.60 (m)****Description:** Sabbia limosa e limo sabbioso**Basic results**

Total cone resistance: 0.92 ±0.25 MPa  
 Sleeve friction: 6.33 ±3.77 kPa  
 SBT<sub>n</sub>: 5  
 SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt

**Estimation results**

Permeability: 1.52E-07 ±1.26E-07 m/s  
 N60: 3.34 ±0.86 blows  
 Es: 15.60 ±3.23 MPa  
 Dr (%): 20.49 ±2.51  
 φ (degrees): 30.42 ±1.07 °  
 Unit weight: 15.08 ±0.61 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 11.56 ±3.71 MPa  
 Go: 19.79 ±3.75 MPa  
 Su: 0.00 ±0.00 kPa  
 Su ratio: 0.00 ±0.00  
 O.C.R.: 0.00 ±0.00

**::: Layer No: 7 :::****Code: 7**      **Start depth: 3.60 (m), End depth: 4.10 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.34 ±0.40 MPa  
 Sleeve friction: 17.14 ±10.29 kPa  
 SBT<sub>n</sub>: 4  
 SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

**Estimation results**

Permeability: 1.57E-07 ±9.16E-08 m/s  
 N60: 5.22 ±1.37 blows  
 Es: 27.70 ±4.21 MPa  
 Dr (%): 0.00 ±0.00  
 φ (degrees): 0.00 ±0.00 °  
 Unit weight: 16.37 ±0.75 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 17.85 ±5.53 MPa  
 Go: 29.04 ±7.03 MPa  
 Su: 104.58 ±27.70 kPa  
 Su ratio: 1.42 ±0.42  
 O.C.R.: 10.91 ±3.33

**::: Layer No: 8 :::****Code: 8**      **Start depth: 4.10 (m), End depth: 5.60 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.32 ±0.26 MPa  
 Sleeve friction: 28.53 ±16.73 kPa  
 SBT<sub>n</sub>: 4  
 SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

**Estimation results**

Permeability: 4.96E-08 ±5.11E-08 m/s  
 N60: 5.70 ±1.14 blows  
 Es: 21.40 ±0.22 MPa  
 Dr (%): 0.00 ±0.00  
 φ (degrees): 0.00 ±0.00 °  
 Unit weight: 16.95 ±0.64 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 17.30 ±3.57 MPa  
 Go: 34.72 ±7.81 MPa  
 Su: 93.94 ±16.74 kPa  
 Su ratio: 1.34 ±0.22  
 O.C.R.: 8.66 ±1.57

**::: Layer No: 9 :::****Code: 9**      **Start depth: 5.60 (m), End depth: 11.37 (m)****Description:** Argilla e argilla limosa**Basic results**

Total cone resistance: 1.89 ±0.33 MPa  
 Sleeve friction: 38.57 ±22.66 kPa  
 SBT<sub>n</sub>: 4  
 SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

**Estimation results**

Permeability: 5.51E-08 ±5.49E-08 m/s  
 N60: 8.02 ±1.36 blows  
 Es: 34.20 ±6.82 MPa  
 Dr (%): 0.00 ±0.00  
 φ (degrees): 0.00 ±0.00 °  
 Unit weight: 17.43 ±0.65 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 24.31 ±4.54 MPa  
 Go: 47.87 ±9.32 MPa  
 Su: 134.15 ±21.51 kPa  
 Su ratio: 1.35 ±0.28  
 O.C.R.: 9.07 ±1.91

## :: Layer No: 10 ::

Code: 10 Start depth: 11.37 (m), End depth: 12.51 (m)

Description: Sabbia limosa e limo sabbioso

## Basic results

Total cone resistance: 4.29 ±0.99 MPa

Sleeve friction: 30.18 ±11.41 kPa

SBT<sub>n</sub>: 5SBT<sub>n</sub> description: Silty sand & sandy silt

## Estimation results

Permeability: 1.76E-06 ±3.60E-06 m/s

N60: 13.23 ±2.12 blows

Es: 48.04 ±6.20 MPa

Dr (%): 32.63 ±3.44

φ (degrees): 34.87 ±1.01 °

Unit weight: 17.47 ±0.46 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 54.46 ±11.18 MPa

Go: 60.05 ±7.62 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

## :: Layer No: 11 ::

Code: 11 Start depth: 12.51 (m), End depth: 13.93 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

## Basic results

Total cone resistance: 2.16 ±1.40 MPa

Sleeve friction: 26.93 ±9.25 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

## Estimation results

Permeability: 6.97E-08 ±2.36E-06 m/s

N60: 8.97 ±2.82 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.07 ±0.49 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 23.84 ±16.69 MPa

Go: 50.55 ±8.72 MPa

Su: 135.50 ±21.93 kPa

Su ratio: 0.91 ±0.15

O.C.R.: 6.13 ±1.26

## :: Layer No: 12 ::

Code: 12 Start depth: 13.93 (m), End depth: 15.10 (m)

Description: Argilla

## Basic results

Total cone resistance: 1.63 ±0.13 MPa

Sleeve friction: 28.41 ±22.14 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

## Estimation results

Permeability: 1.21E-08 ±3.13E-08 m/s

N60: 8.07 ±1.27 blows

Es: 22.05 ±0.06 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.03 ±1.02 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 14.05 ±2.44 MPa

Go: 50.12 ±11.70 MPa

Su: 110.77 ±20.61 kPa

Su ratio: 0.73 ±0.06

O.C.R.: 4.36 ±1.24

## :: Layer No: 13 ::

Code: 13 Start depth: 15.10 (m), End depth: 19.98 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

## Basic results

Total cone resistance: 1.86 ±0.22 MPa

Sleeve friction: 22.37 ±10.77 kPa

SBT<sub>n</sub>: 4SBT<sub>n</sub> description: Clay & silty clay

## Estimation results

Permeability: 2.13E-08 ±1.25E-08 m/s

N60: 8.64 ±1.08 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.80 ±0.58 kN/m<sup>3</sup>

Constrained Mod.: 15.42 ±4.18 MPa

Go: 50.96 ±7.62 MPa

Su: 135.16 ±17.87 kPa

Su ratio: 0.71 ±0.09

O.C.R.: 4.67 ±0.71



Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
0.00	0.90	2.35E-05	12.5	38.0	54.4	39.8	47.6	47.6	0.0	0.0	0.0	17.9
0.90		(±1.39E-05)	(±0.9)	(±3.1)	(±2.0)	(±0.4)	(±3.8)	(±3.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.3)
0.90	0.35	1.61E-06	6.7	25.1	34.7	35.4	28.2	31.4	0.0	0.0	0.0	16.8
1.25		(±3.00E-06)	(±1.9)	(±5.7)	(±6.3)	(±1.6)	(±8.3)	(±7.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.7)
1.25	0.25	4.00E-08	6.7	33.4	0.0	0.0	21.0	43.8	95.9	2.1	12.8	18.0
1.50		(±7.41E-08)	(±0.5)	(±33.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.6)	(±1.5)	(±12.3)	(±0.2)	(±2.1)	(±0.1)
1.50	0.68	1.19E-07	5.6	26.3	0.0	0.0	19.5	33.4	88.2	1.8	11.5	17.2
2.18		(±2.10E-07)	(±0.5)	(±1.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.6)	(±3.1)	(±12.9)	(±0.2)	(±2.1)	(±0.3)
2.18	0.92	6.44E-08	4.3	20.4	0.0	0.0	13.6	26.0	73.2	1.3	8.8	16.4
3.10		(±6.77E-08)	(±0.8)	(±4.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.4)	(±4.0)	(±9.9)	(±0.2)	(±1.7)	(±0.5)
3.10	0.50	1.52E-07	3.3	15.6	20.5	30.4	11.6	19.8	0.0	0.0	0.0	15.1
3.60		(±1.26E-07)	(±0.9)	(±3.2)	(±2.5)	(±1.1)	(±3.7)	(±3.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)
3.60	0.50	1.57E-07	5.2	27.7	0.0	0.0	17.8	29.0	104.6	1.4	10.9	16.4
4.10		(±9.16E-08)	(±1.4)	(±4.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.5)	(±7.0)	(±27.7)	(±0.4)	(±3.3)	(±0.7)
4.10	1.50	4.96E-08	5.7	21.4	0.0	0.0	17.3	34.7	93.9	1.3	8.7	16.9
5.60		(±5.11E-08)	(±1.1)	(±0.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.6)	(±7.8)	(±16.7)	(±0.2)	(±1.6)	(±0.6)
5.60	5.77	5.51E-08	8.0	34.2	0.0	0.0	24.3	47.9	134.1	1.4	9.1	17.4
11.37		(±5.49E-08)	(±1.4)	(±6.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.5)	(±9.3)	(±21.5)	(±0.3)	(±1.9)	(±0.6)
11.37	1.14	1.76E-06	13.2	48.0	32.6	34.9	54.5	60.0	0.0	0.0	0.0	17.5
12.51		(±3.60E-06)	(±2.1)	(±6.2)	(±3.4)	(±1.0)	(±11.2)	(±7.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
12.51	1.42	6.97E-08	9.0	0.0	0.0	0.0	23.8	50.6	135.5	0.9	6.1	17.1
13.93		(±2.36E-06)	(±2.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±16.7)	(±8.7)	(±21.9)	(±0.1)	(±1.3)	(±0.5)

**Dott. Geol. Alessandro Ghinoi**

Via Cortina d'Ampezzo, 17

41125 Modena

ghinoialessandro@gmail.com

**Project: Biblioteca e centro polifunzionale**

**Location: Castel Maggiore (BO)**

**CPT: CPTu-3\_Luglio2019**

Total depth: 20.08 m, Date: 18/07/2019

**Summary table of mean values**

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT <sub>N60</sub> (blows/30cm)	E <sub>s</sub> (MPa)	D <sub>r</sub>	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G <sub>0</sub> (MPa)	Undrained strength, S <sub>u</sub> (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )
13.93	1.17	1.21E-08	8.1	22.0	0.0	0.0	14.1	50.1	110.8	0.7	4.4	17.0
15.10		(±3.13E-08)	(±1.3)	(±0.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.4)	(±11.7)	(±20.6)	(±0.1)	(±1.2)	(±1.0)
15.10	4.88	2.13E-08	8.6	0.0	0.0	0.0	15.4	51.0	135.2	0.7	4.7	16.8
19.98		(±1.25E-08)	(±1.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.2)	(±7.6)	(±17.9)	(±0.1)	(±0.7)	(±0.6)

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

## **Allegato 3**

### **Indagini geofisiche realizzate per questo studio (1 MASW)**

**REGIONE EMILIA ROMAGNA**  
**PROVINCIA DI BOLOGNA**  
**COMUNE DI CASTEL MAGGIORE**

**INDAGINE GEOFISICA  
CON METODO SISMICO MASW  
CASTELMAGGIORE**

**RELAZIONE TECNICA**

A cura di:  
Dott. Geol. G. Vaccari

*LUGLIO 2019*

## **INDAGINE SISMICA**

Su incarico del Dott. Geol. Alessandro Ghinoi, è stata eseguita nei pressi di un'area situata a Castelmaggiore, una campagna sismica a rifrazione con metodo MASW di tipo attivo. L'indagine è stata svolta con l'obiettivo di determinare la velocità ponderata delle onde sismiche di taglio nei primi 30 metri a partire da piano campagna ( $V_{s30}$ ), in riferimento alle NTC 2018 del 17/01/2018.

Di seguito si riportano la metodologia della ricerca e i risultati dell'indagine eseguita.

### **Metodo d'Indagine**

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un sismografo multicanale "PASI 16S24-U", dotato di 24 geofoni verticali PASI con frequenza propria di 4,5 Hz, collegati allo strumento tramite cavi elettrici schermati.

Nella campagna di indagine del lavoro in oggetto è stato eseguito uno stendimento di 24 geofoni con spaziatura tra i geofoni di 2.0 metri per una lunghezza della linea sismica di 46 metri. L'energizzazione è stata eseguita a 2, 5 e 10 metri dal primo geofono.

L'elaborazione è stata effettuata con un software dedicato (*Winmasw 6.0 – Eliosoft*) in grado di gestire le fasi di preparazione, analisi, modellizzazione e restituzione finale.

### **Risultati–Determinazione delle categoria del suolo di fondazione**

L'analisi delle onde di taglio ( $V_s$ ) tramite metodo MASW, ha consentito di determinare gli spessori dei sismostrati e le relative velocità di taglio, come riportato in tabella e relativo diagramma, permettendo di calcolare il valore  $V_{s30}$  per la sezione indagata.

Per l'elaborazione è stata eseguita una correlazione tra i dati sismici ed indagini geognostiche eseguite nell'area.

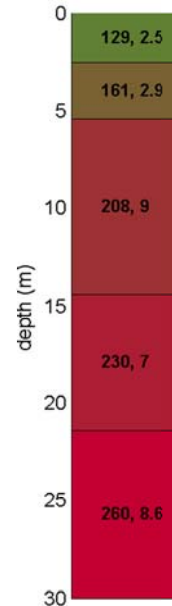
Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per la MASW eseguita.

## Sismostratigrafia

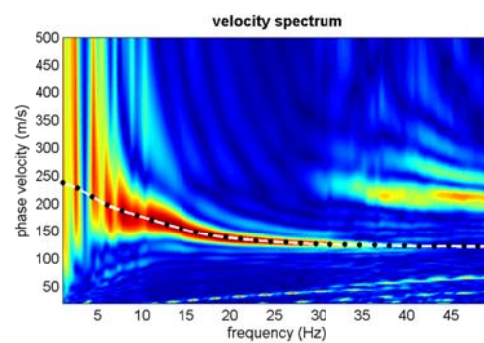
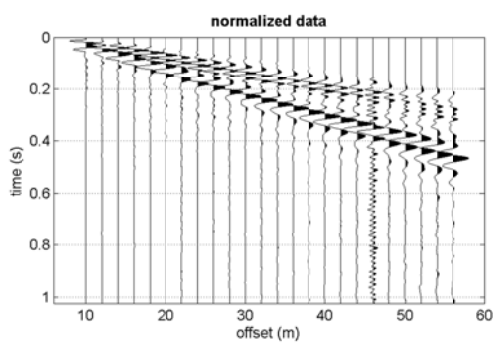
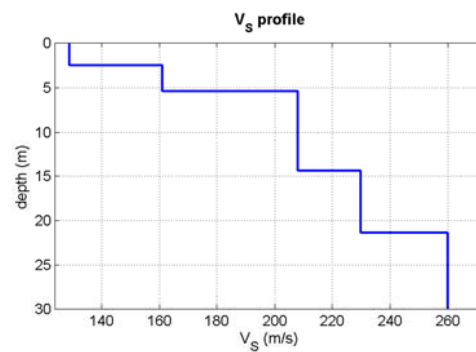
Profondità da p.c. (m)	Spessore (m)	Velocità onde S (m/sec)
2.5	2.5	129
5.4	2.9	161
14.4	9.0	208
21.4	7.0	230
30.0	8.6	260

Il valore delle Vs30 calcolato rispetto al piano campagna è uguale a 208 m/s

Subsurface model



[www.winmasw.com](http://www.winmasw.com)



- Sismogramma acquisito, la curva di dispersione e il profilo Vs/profondità-

## Allegato 4

### Dati numerici degli spettri di risposta da RSL, normalizzati (per gli SL: SLO, SLD, SLV e SLC)

Time	SLO-Acc.(g)	SLD-Acc.(g)	SLV-Acc.(g)	SLC-Acc.(g)
0	0.09	0.14	0.3	0.37
0.01	0.15192	0.17562222	0.37	0.41696154
0.01103674	0.158339494	0.17931532	0.37725718	0.42183023
0.012180962	0.165424517	0.18339129	0.38526673	0.42720367
0.01344381	0.173244072	0.18788984	0.39410667	0.4331342
0.014837583	0.181874314	0.19285477	0.40386308	0.43967957
0.016375854	0.191399288	0.19833443	0.41463098	0.44690353
0.018073604	0.201911756	0.20438219	0.42651523	0.45487642
0.019947366	0.21351409	0.21105695	0.43963156	0.4636759
0.022015388	0.226319282	0.2184237	0.45410772	0.47338765
0.024297811	0.240452046	0.2265542	0.47008468	0.48410626
0.026816861	0.256050003	0.23552762	0.48771803	0.4959361
0.029597071	0.273265064	0.24543134	0.5071795	0.5089924
0.032665516	0.292264875	0.25636183	0.52865861	0.52340229
0.036052079	0.313234473	0.26842552	0.55236455	0.53930611
0.039789741	0.336378076	0.2817399	0.57852819	0.55685875
0.043914901	0.361921067	0.29643464	0.60740431	0.57623113
0.048467732	0.390112197	0.31265283	0.63927412	0.59761193
0.053492574	0.3996	0.33055244	0.67444802	0.62120936
0.05903836	0.3996	0.35030776	0.71326852	0.64725322
0.065159101	0.3996	0.3721112	0.75611371	0.67599716
0.071914402	0.3996	0.39617508	0.80340081	0.7077211
0.079370053	0.3996	0.42273377	0.85559037	0.74273398
0.08759866	0.3996	0.45204589	0.91319062	0.78137678
0.096680359	0.3996	0.4606	0.93	0.82402584
0.106703594	0.3996	0.4606	0.93	0.87109649
0.117765978	0.3996	0.4606	0.93	0.92304715
0.129975243	0.3996	0.4606	0.93	0.98038374
0.14345029	0.3996	0.4606	0.93	0.9805
0.158322349	0.396262438	0.4606	0.93	0.9805
0.174736253	0.359039403	0.4606	0.93	0.9805
0.192851851	0.325312926	0.4606	0.93	0.9805
0.212845565	0.294754556	0.4606	0.93	0.9805
0.234912106	0.267066696	0.4606	0.93	0.9805
0.259266373	0.241979703	0.4606	0.93	0.9805

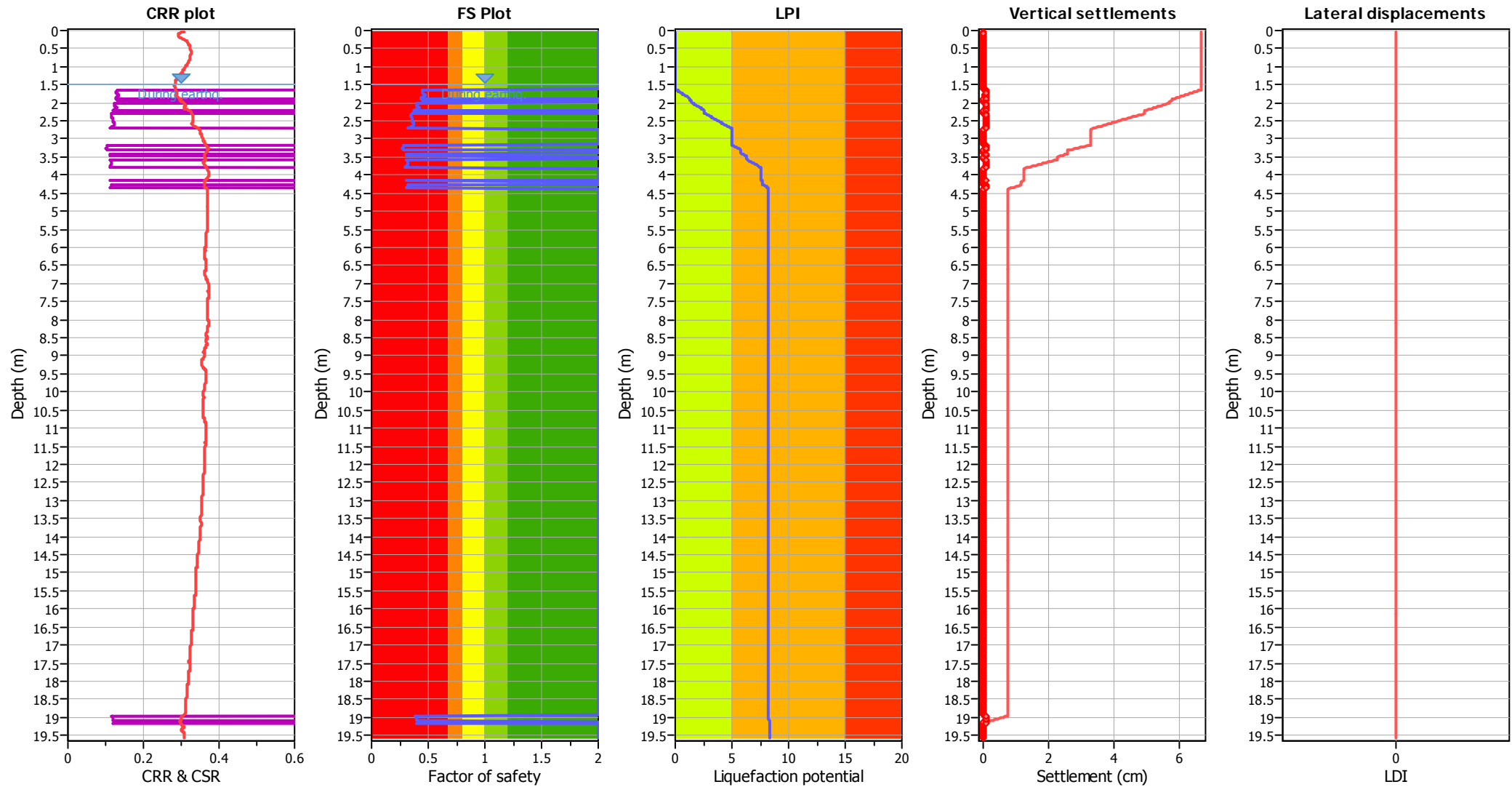


0.286145543	0.219249265	0.43950999	0.87787494	0.9805
0.315811383	0.198654017	0.39822449	0.79541148	0.9805
0.348552798	0.179993391	0.36081715	0.72069426	0.9805
0.384688645	0.163085656	0.32692368	0.65299562	0.97999317
0.424570838	0.147766154	0.296214	0.59165627	0.88793721
0.468587776	0.133885695	0.26838905	0.53607886	0.80452855
0.517168124	0.121309101	0.24317784	0.48572212	0.72895491
0.570784988	0.109913893	0.22033485	0.44009567	0.66048031
0.629960525	0.099589097	0.19963763	0.39875514	0.59843789
0.695271024	0.090234165	0.18088461	0.36129796	0.54222344
0.76735252	0.08175799	0.16389316	0.32735932	0.49128951
0.84690699	0.074078028	0.1484978	0.29660872	0.44514008
0.934709187	0.067119486	0.13454861	0.26874669	0.40332571
1.031614184	0.060814596	0.12190975	0.24350189	0.36543918
1.138565706	0.055101958	0.11045812	0.22062846	0.33111154
1.256605315	0.049925939	0.1000822	0.19990366	0.30000848
1.386882557	0.04523613	0.09068095	0.18112565	0.27182709
1.530666156	0.04098686	0.08216281	0.16411155	0.24629293
1.689356369	0.037136747	0.07444482	0.14869568	0.22315732
1.864498624	0.033648295	0.06745182	0.13472791	0.20219497
2.057798569	0.029038587	0.06111571	0.1220722	0.18320172
2.271138684	0.023839322	0.05266501	0.11060531	0.16599261
2.506596612	0.019570968	0.04323551	0.10021557	0.15040005
2.766465394	0.016066849	0.03549433	0.09080179	0.13627217
3.053275801	0.013190132	0.02913919	0.07544763	0.1234714
3.369820977	0.010828481	0.02392191	0.06193897	0.10225145
3.719183643	0.008889676	0.01963877	0.050849	0.08394366
4.104766118	0.007298009	0.01612251	0.04174465	0.06891382
4.530323453	0.005991324	0.01323583	0.03427041	0.05657502
5	0.004918596	0.01086599	0.0281344	0.04644544

## **Allegato 5**

### **Calcolo dell'Indice di Potenziale Liquefazione sulle CPTu considerate per questo studio**

## Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	$K_d$ applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	5.35	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.30	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

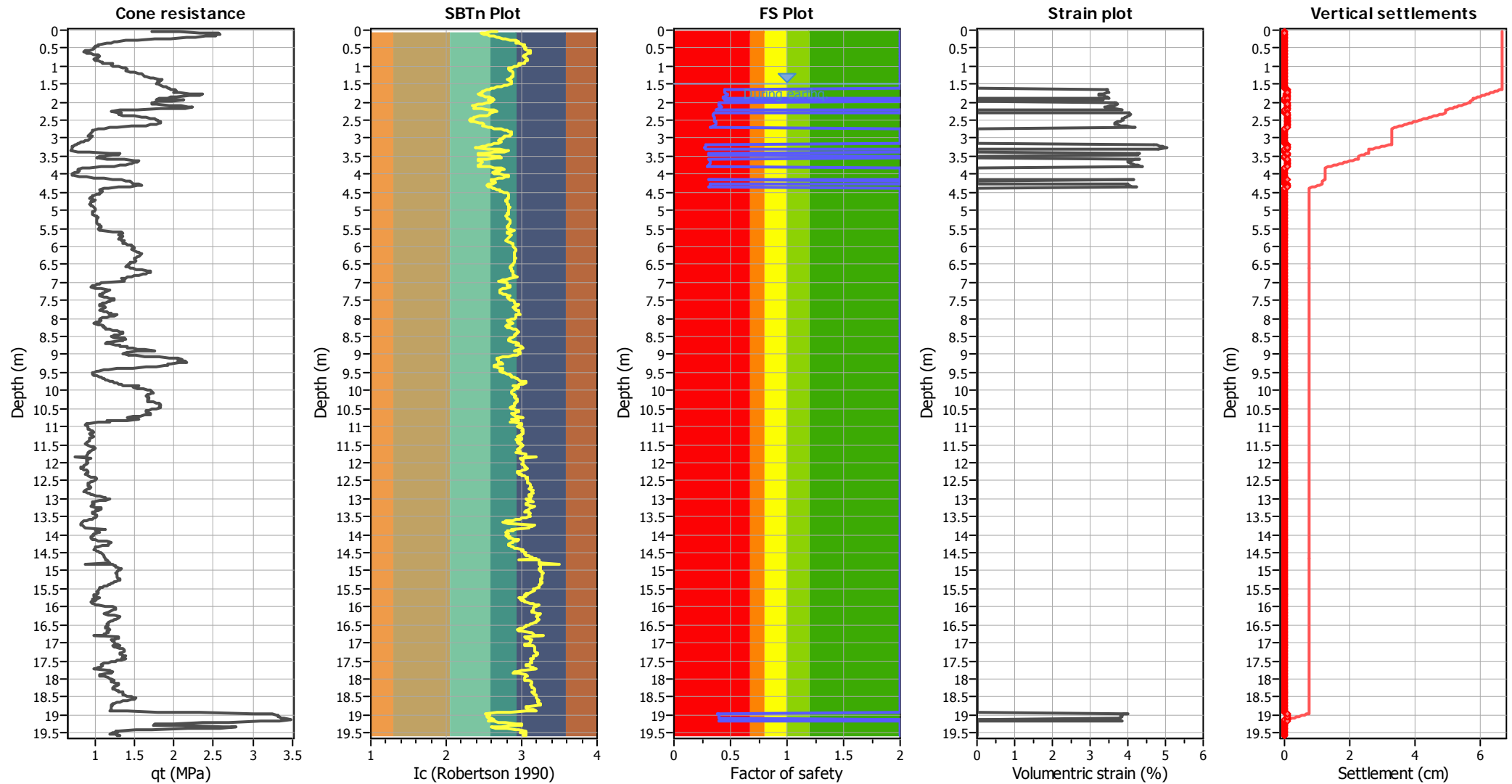
## F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

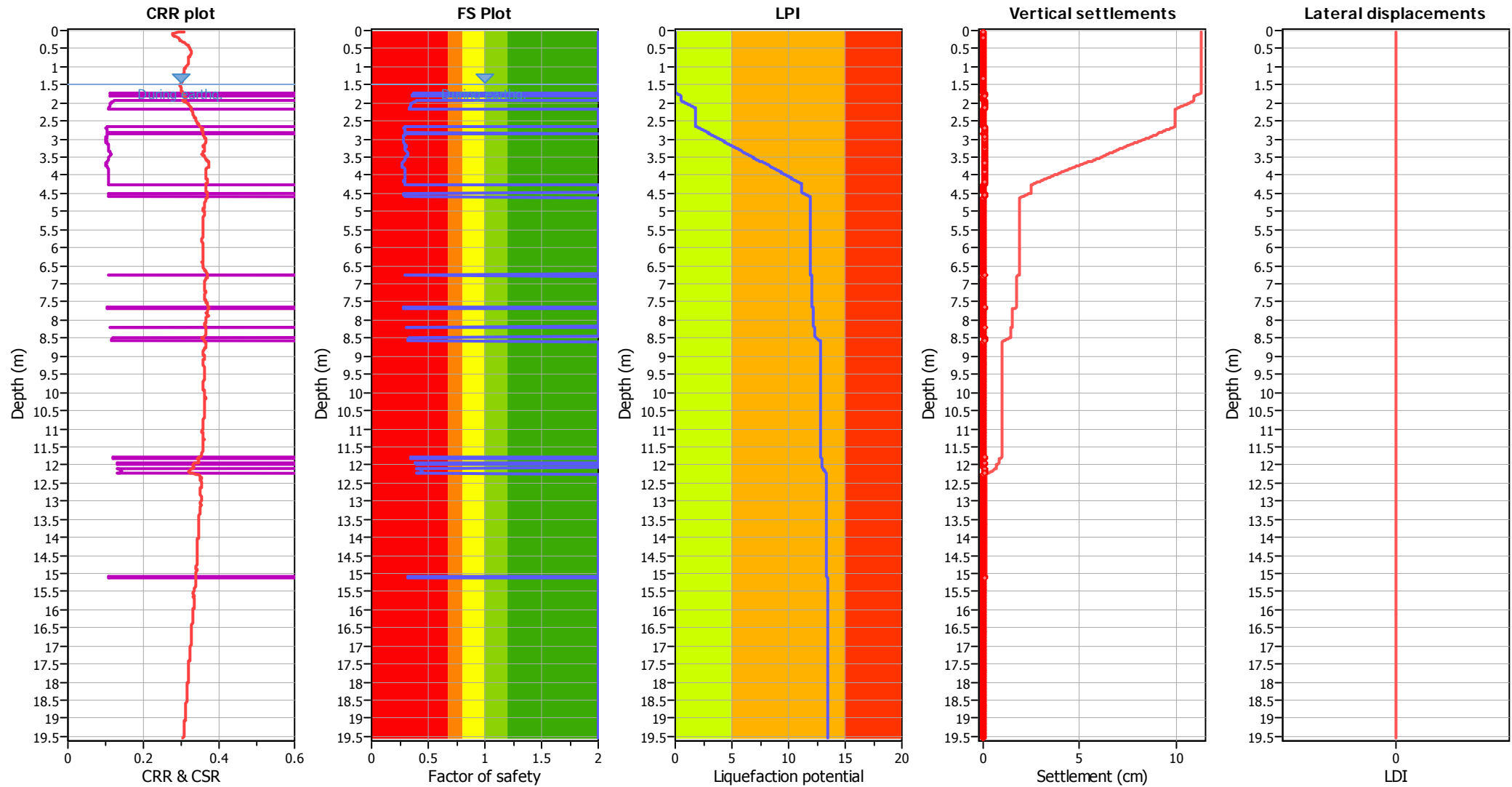
## Estimation of post-earthquake settlements



### Abbreviations

$q_t$ : Total cone resistance (cone resistance  $q_c$  corrected for pore water effects)  
 $I_c$ : Soil Behaviour Type Index  
 FS: Calculated Factor of Safety against liquefaction  
 Volumetric strain: Post-liquefaction volumetric strain

## Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	$K_f$ applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	5.35	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.30	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

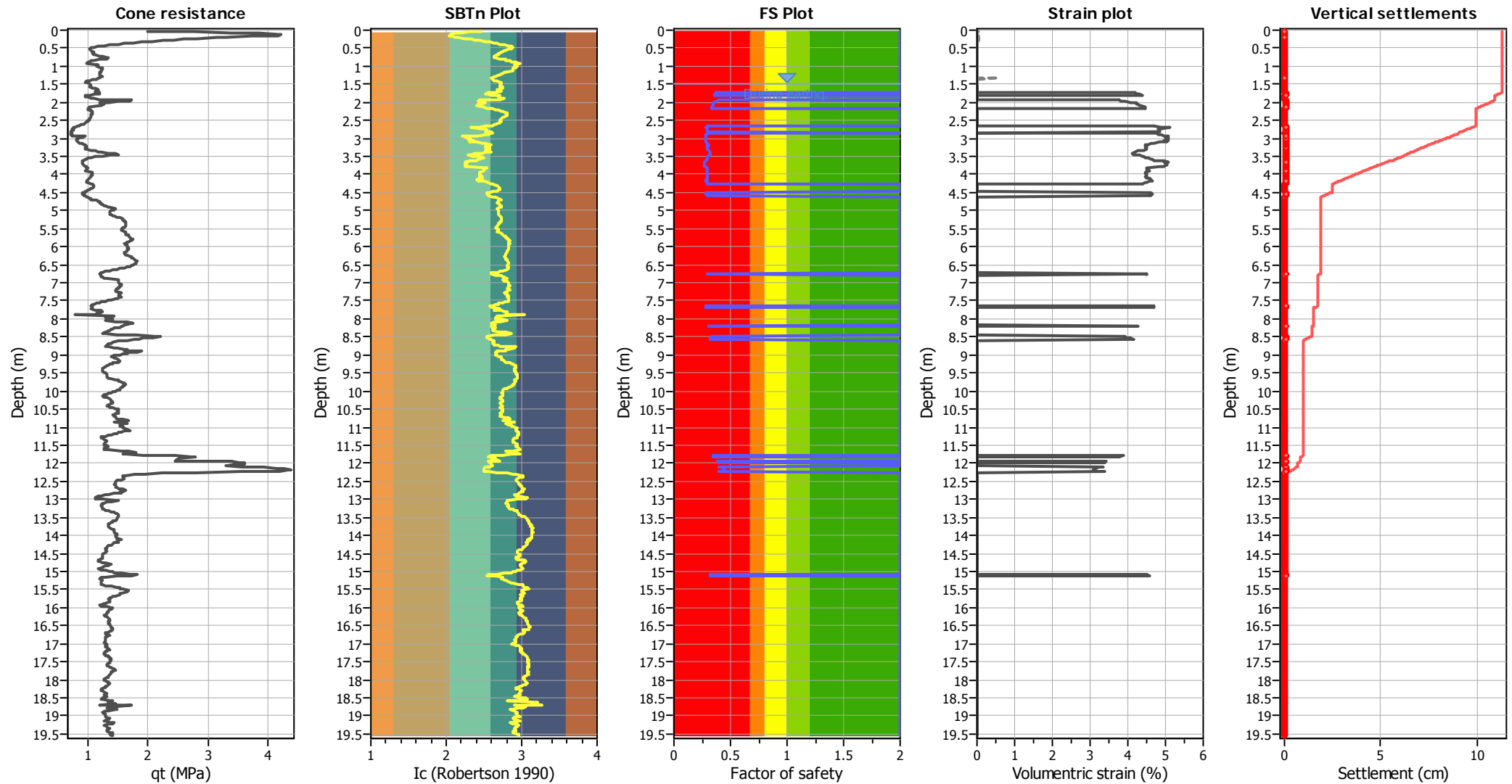
## F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

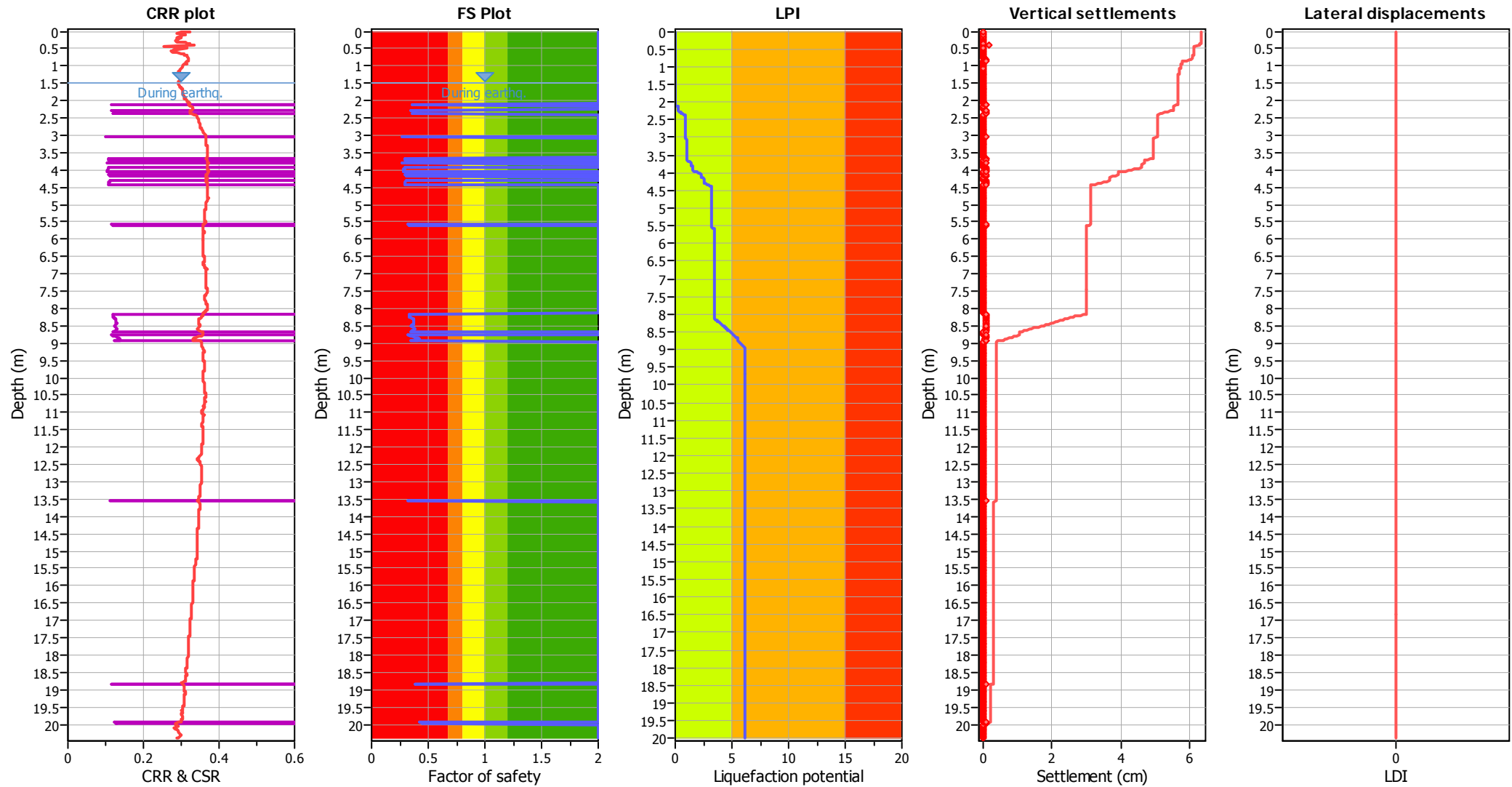
## Estimation of post-earthquake settlements



### Abbreviations

$q_t$ : Total cone resistance (cone resistance  $q_c$  corrected for pore water effects)  
 $I_c$ : Soil Behaviour Type Index  
 FS: Calculated Factor of Safety against liquefaction  
 Volumetric strain: Post-liquefaction volumetric strain

## Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (earthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	$K_f$ applied:	Yes
Earthquake magnitude $M_w$ :	5.35	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.30	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

## F.S. color scheme

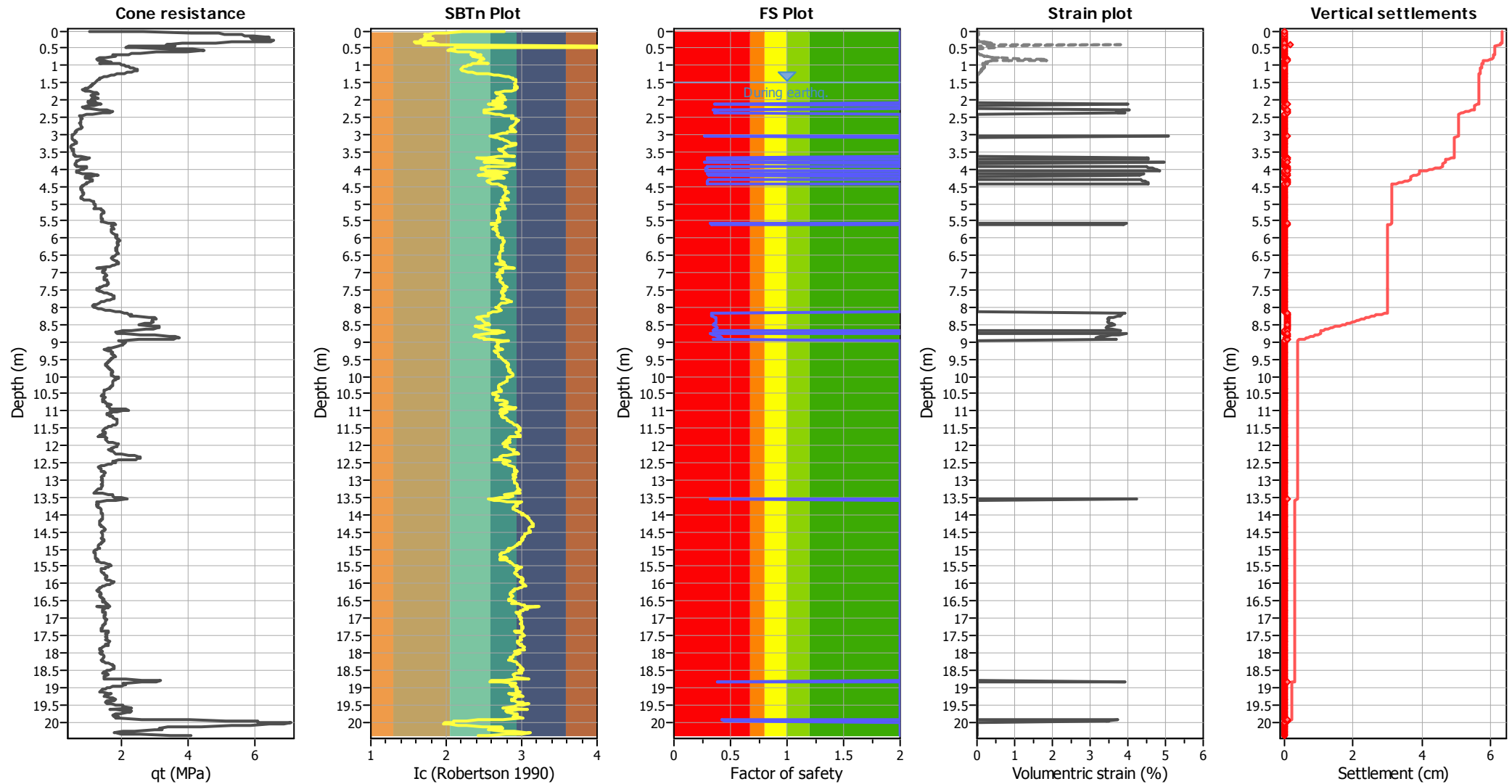
Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light green	Unlike to liquefy
Dark green	Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk



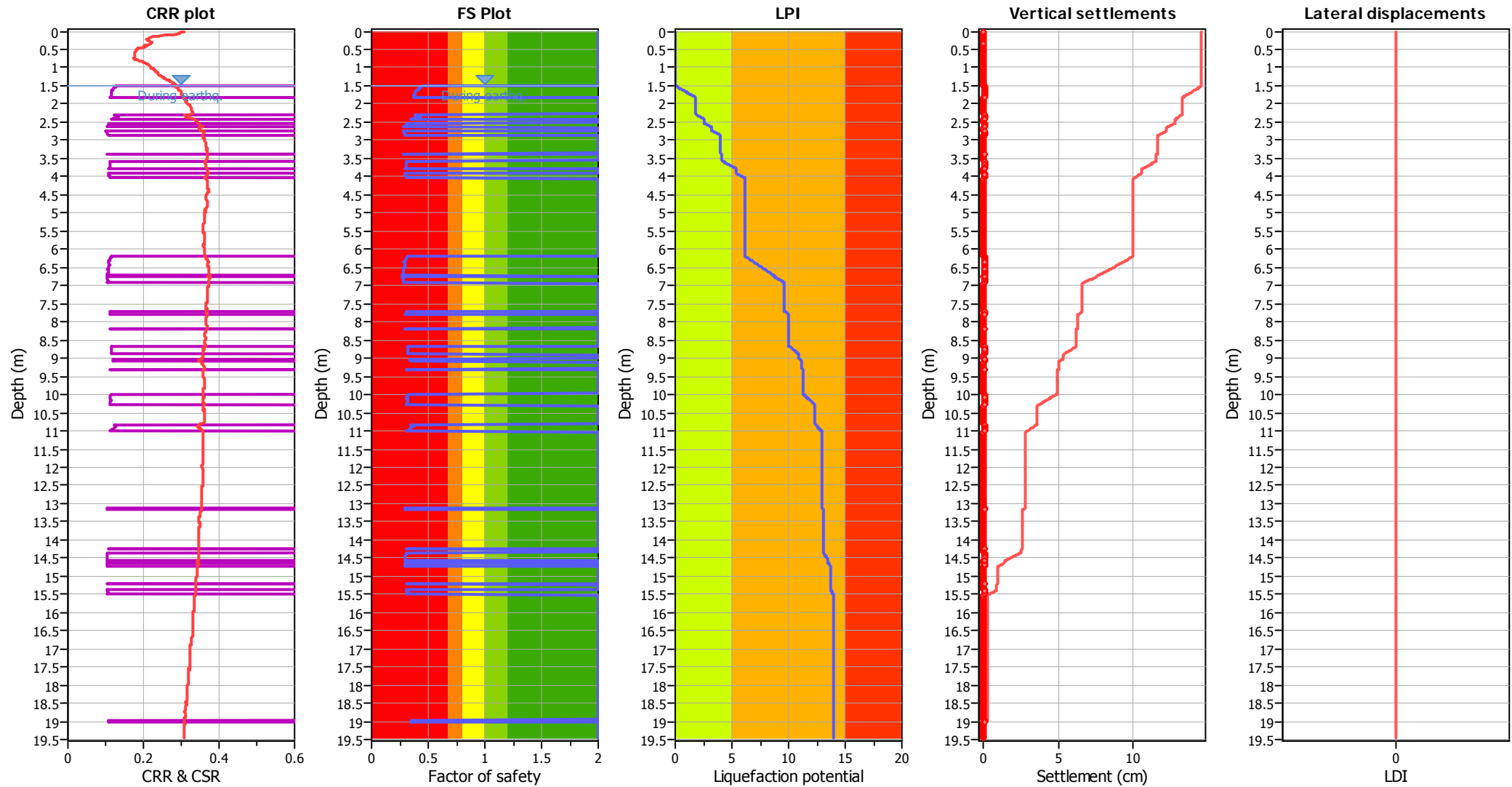
## Estimation of post-earthquake settlements



### Abbreviations

$q_t$ : Total cone resistance (cone resistance  $q_c$  corrected for pore water effects)  
 $I_c$ : Soil Behaviour Type Index  
 FS: Calculated Factor of Safety against liquefaction  
 Volumetric strain: Post-liquefaction volumetric strain

## Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>g</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	5.35	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.30	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

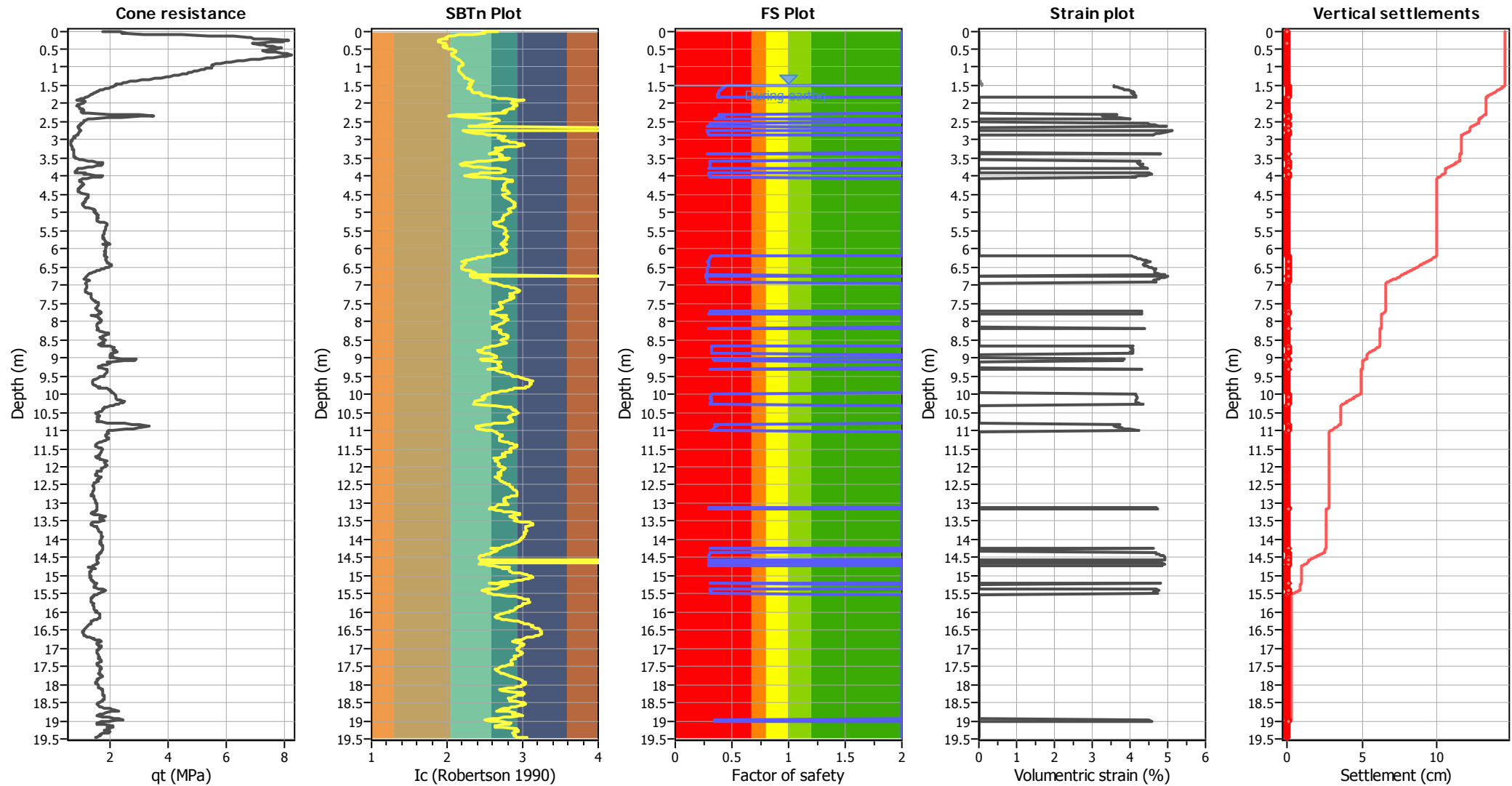
## F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

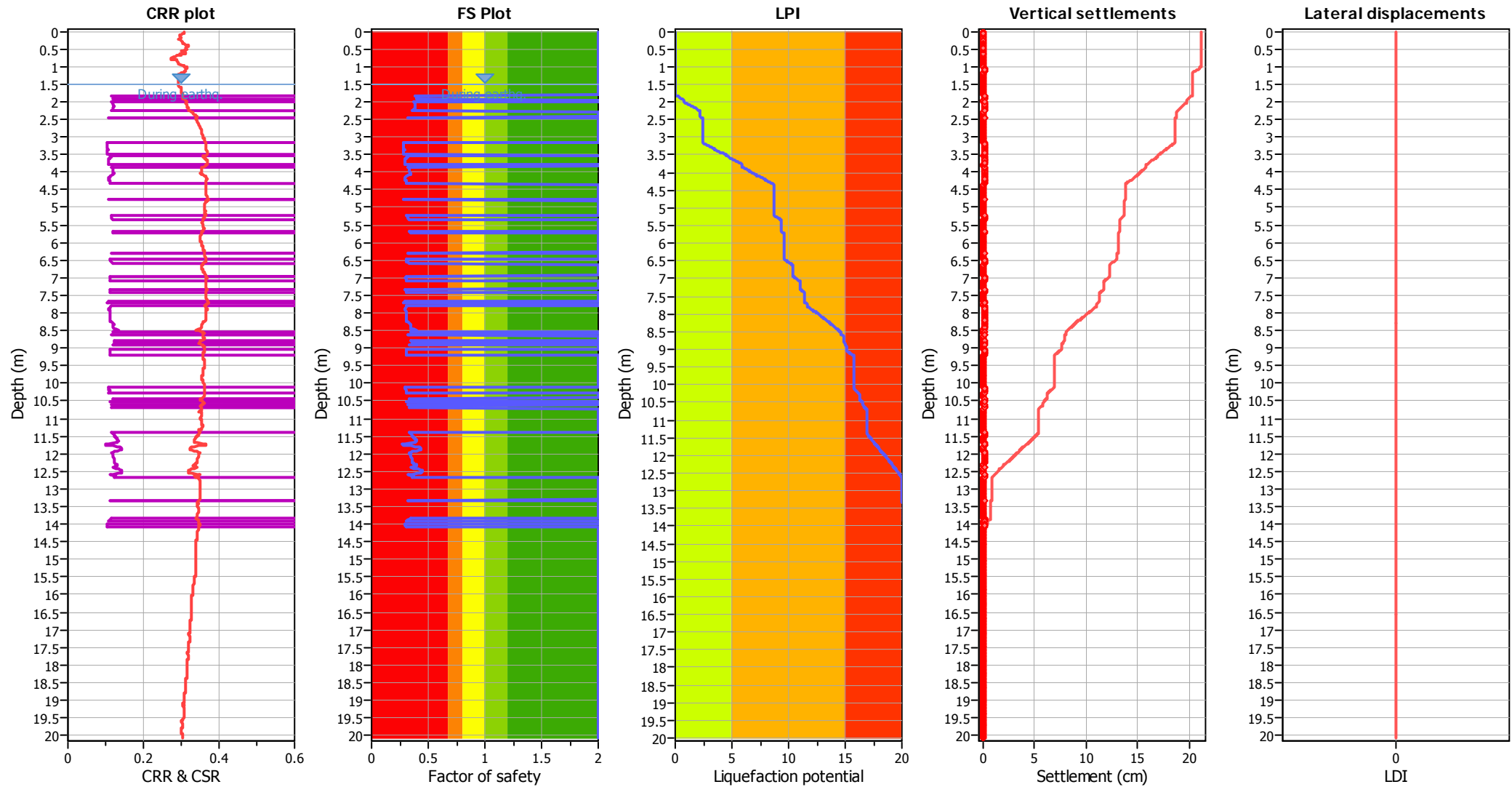
## Estimation of post-earthquake settlements



### Abbreviations

$q_t$ : Total cone resistance (cone resistance  $q_c$  corrected for pore water effects)  
 $I_c$ : Soil Behaviour Type Index  
 FS: Calculated Factor of Safety against liquefaction  
 Volumetric strain: Post-liquefaction volumetric strain

## Liquefaction analysis overall plots



## Input parameters and analysis data

Analysis method:	B&I (2014)	Depth to GWT (erthq.):	1.50 m	Fill weight:	N/A
Fines correction method:	B&I (2014)	Average results interval:	1	Transition detect. applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Ic cut-off value:	2.60	K <sub>g</sub> applied:	Yes
Earthquake magnitude M <sub>w</sub> :	5.35	Unit weight calculation:	Based on SBT	Clay like behavior applied:	Sands only
Peak ground acceleration:	0.30	Use fill:	No	Limit depth applied:	Yes
Depth to water table (insitu):	1.50 m	Fill height:	N/A	Limit depth:	20.00 m

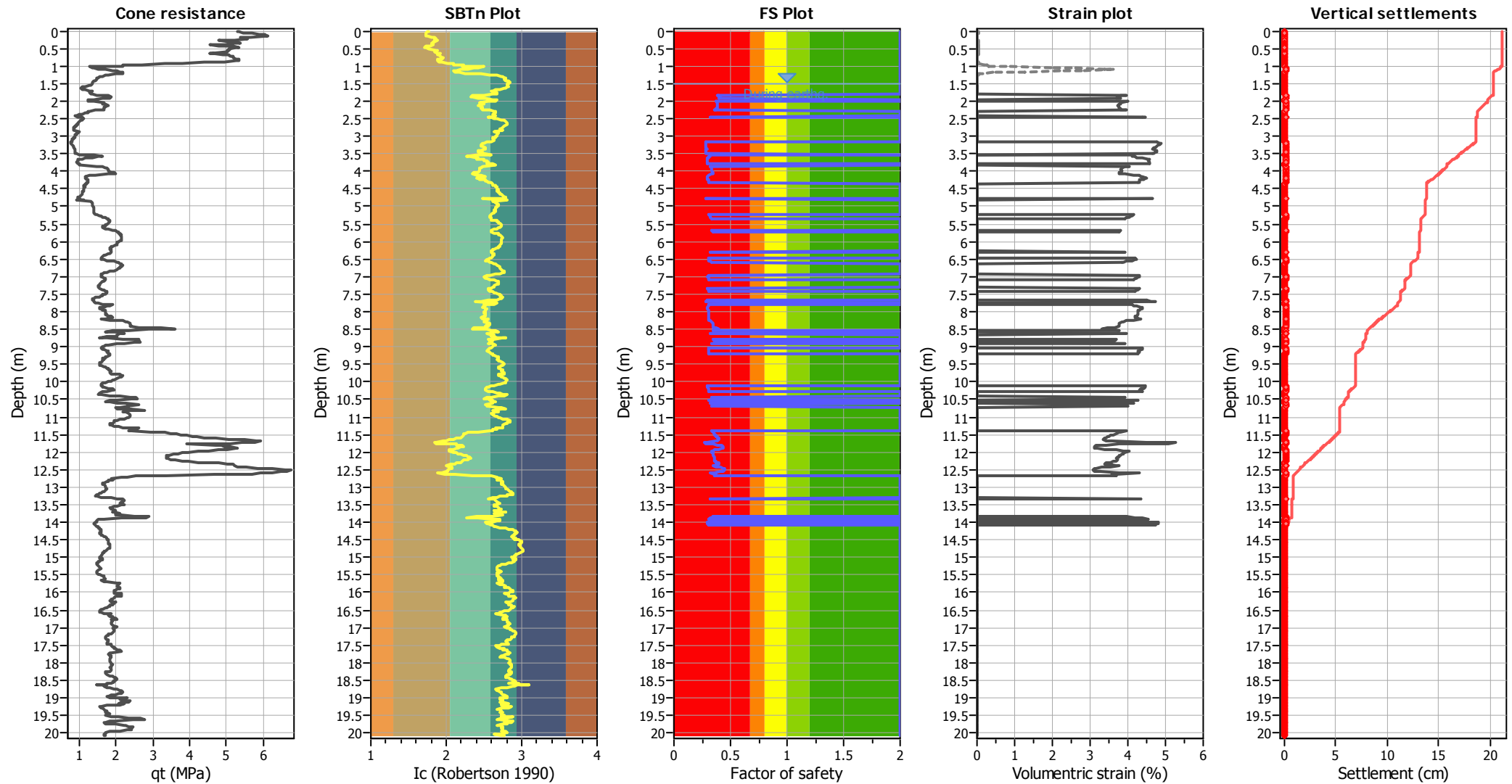
## F.S. color scheme

Red	Almost certain it will liquefy
Orange	Very likely to liquefy
Yellow	Liquefaction and no liq. are equally likely
Light Green	Unlike to liquefy
Dark Green	Almost certain it will not liquefy

## LPI color scheme

Red	Very high risk
Orange	High risk
Yellow	Low risk

## Estimation of post-earthquake settlements



### Abbreviations

$q_t$ : Total cone resistance (cone resistance  $q_c$  corrected for pore water effects)  
 $I_c$ : Soil Behaviour Type Index  
 FS: Calculated Factor of Safety against liquefaction  
 Volumetric strain: Post-liquefaction volumetric strain