

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

INDICE CONTENUTI

Premessa	3
1. Inquadramento geografico-fisico	4
1.1. Descrizione di massima del progetto.....	6
2. Inquadramento geologico, geomorfologico, idrogeologico ed idraulico	8
3. Caratterizzazione stratigrafica e sismica dell'area	14
3.1. Indagini penetrometriche	14
3.2. Sondaggio a carotaggio continuo	19
3.3. Indagine sismica	20
4. Microzonazione sismica	21
4.1. Liquefazione del terreno.....	24
4.1.1. Analisi di risposta sismica locale	24
4.1.2. Verifica suscettività a liquefazione	29
5. Sintesi dell'analisi dei dati raccolti e conclusioni.....	33

ALLEGATI

PREMESSA

Nella presente relazione vengono descritte le caratteristiche geologiche, geotecniche e sismiche dell'area che verrà interessata dalla realizzazione di una struttura ricettiva e residenziale, ubicata sul Lungomare della Repubblica, in Comune di Riccione (RN), prospiciente la zona 68 dell'arenile.

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 3/6/2019 al fine di verificarne l'idoneità geologica e geomorfologica.

Per la caratterizzazione litostratigrafia e geotecnica dei terreni di sottofondazione, nelle date 6-7/06/2019 sono stati effettuati 1 sondaggio geognostico a carotaggio continuo con prelievo di campioni per laboratorio geotecnico ed esecuzione di prove SPT in foro, spinto fino alla profondità di 35 m dal piano campagna, nonché 4 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu) spinte fino alla profondità massima di 20 m dal piano campagna.

Per la classificazione sismica del terreno di sottofondazione sono stati utilizzati i dati ricavati da una indagine sismica di tipo Down-hole, eseguita in data 17/06/2019 all'interno del foro di sondaggio a carotaggio continuo fino alla profondità di -35 m. Dall'indagine è stato possibile ricavare i profili di Vs e Vp con la profondità, i moduli elastici dinamici del terreno e il parametro di Normativa Vs₃₀. Al Down-hole è stata affiancata un'indagine a sismica passiva HVSR, eseguita in data 6/06/2019 all'interno dell'area d'indagine, che ha permesso stimare la frequenza di vibrazione fondamentale del terreno.

1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO-FISICO

L'area d'indagine, corrispondente con quella dell'ex Delfinarium di Riccione, si trova sul Lungomare della Repubblica, prospiciente la zona 68 dell'arenile, circoscritta dal perimetro formato dal Lungomare stesso, a NE, viale Cesare Battisti, a SE, viale Milano, a SO, e viale Oberdan, a NO, a distanza di un isolato. Si tratta di un'area già da tempo densamente antropizzata in funzione delle attività ricettive a servizio del turismo locale, caratterizzata da estese superfici impermeabili separate da sottili strisce verdi destinate a giardini e cortili. Dal punto di vista topografico si trova in corrispondenza di una zona pianeggiante, costiera, con una debole pendenza verso NE, e con quote che, in corrispondenza dell'area, sono prossime a 2,3 m s.l.m. Per quanto riguarda il sistema idrografico, esso è rappresentato dal Rio Melo (che scorre circa 800 m a NO dell'area) e dal Rio Grande, suo affluente di destra all'altezza del cimitero. Il clima è caratterizzato, nel periodo 1991-2015, da precipitazioni totali annue, in media, di 772 mm e temperature medie annue di 14,4°C¹, pari, rispettivamente, ad una variazione di +30 mm e +0,9°C rispetto al periodo 1961-1990. Nella cartografia regionale, l'area è compresa nella Tavola alla scala 1:25.000 nr. 256SE denominata "Rimini" (Figura 1), nella Sezione alla scala 1:10.000 nr. 256160 denominata "Riccione Marina" e nell'Elemento alla scala 1:5.000 nr. 256162 denominato "Riccione Marina" (Figura 2).

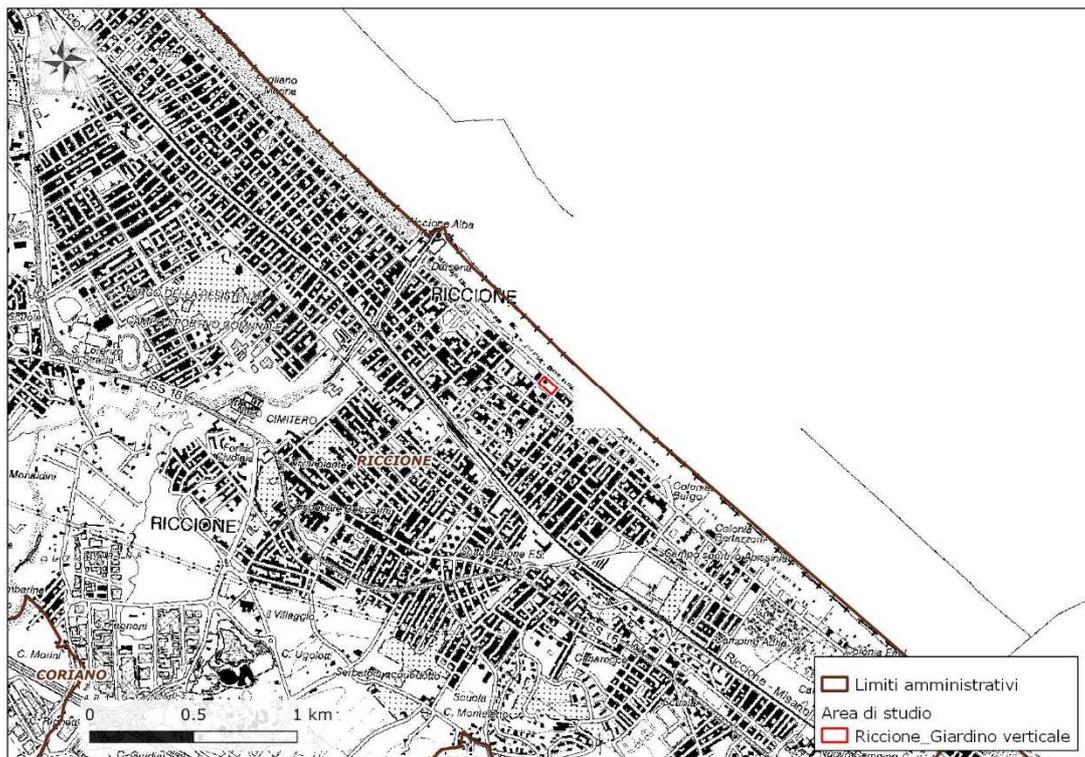


Figura 1 - Inquadramento geografico su C.T.R. con dettaglio topografico a scala 1:25.000 – Tavola nr. 256SE denominata "Rimini".

¹ Atlante Idroclimatico dell'Emilia-Romagna - <http://www.arpa.emr.it/sim/?clima>

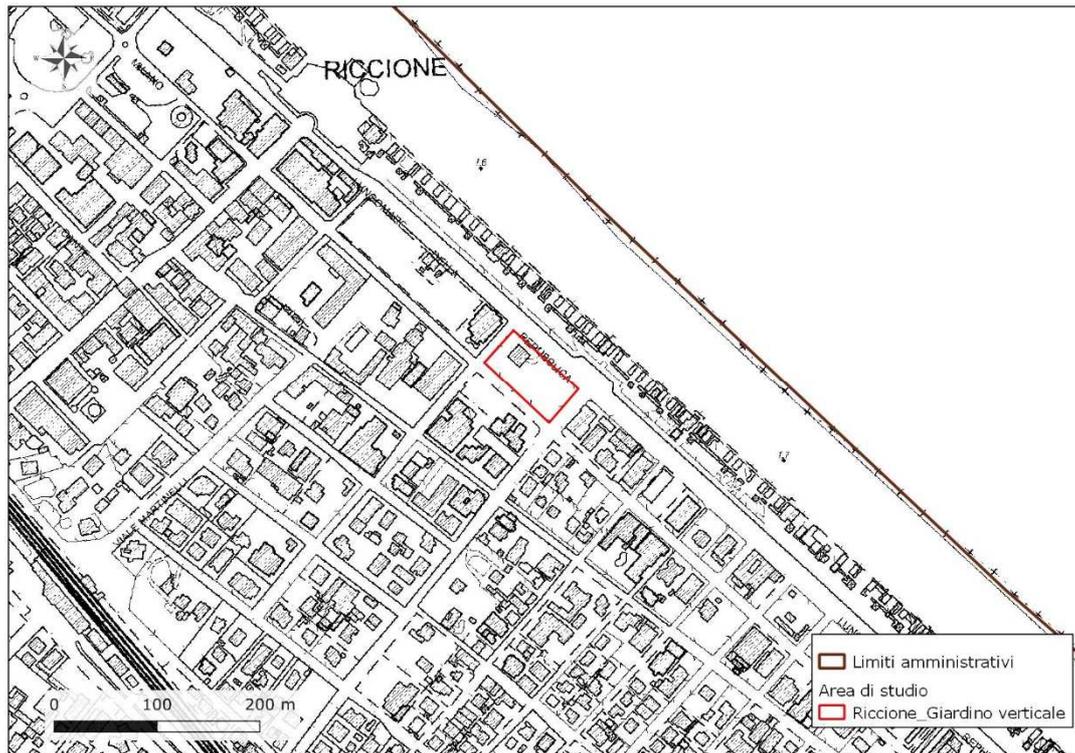


Figura 2 - Ubicazione dell'area d'indagine su C.T.R. con dettaglio topografico a scala 1:5.000 – Elemento nr. 256162 denominato "Riccione marina".



Figura 3 - Ubicazione dell'area d'indagine su ortofoto satellitare (fonte: Ortofoto Google satellite, data di visualizzazione: 25/06/2019).

1.1. Descrizione di massima del progetto

Il progetto prevede la realizzazione di un edificio a destinazione mista, ricettiva e residenziale, nell'area precedentemente occupata dal Delfinarium di Riccione (Figura 4) e ad oggi dedicata ad attività ricreative, ed il recupero dell'adiacente Villa Ernesta da adibire a Spa. Il nuovo edificio si svilupperà su 10 piani per un'altezza totale fuori terra di circa 35,6 m. Verrà inoltre realizzato un piano interrato, per circa 3,5 m sotto il piano campagna, per garage.



Figura 4 - Stato di fatto (sinistra) e di progetto (destra) dell'area destinata ad ospitare il nuovo edificio ad uso ricettivo-residenziale. Progetto preliminare a cura di "Stefano Boeri Architetti".

Come visibile in Figura 5, il progetto prevede la creazione di un livello interrato per parcheggi sotterranei da realizzarsi su di una superficie più ampia rispetto all'impronta del nuovo edificio. Il piano terra verrà destinato a spazi comuni e reception, mentre i piani dal primo al decimo verranno destinati alla struttura ricettiva ed alla residenza.

La Spa verrà realizzata interamente nell'adiacente Villa Ernesta.

Elemento caratterizzante il nuovo edificio sarà il "bosco verticale", che si svilupperà sui numerosi tetti e terrazzi che in modo irregolare vengono a crearsi lungo le quattro facciate del palazzo (Figura 5).

PROSPETTO EST

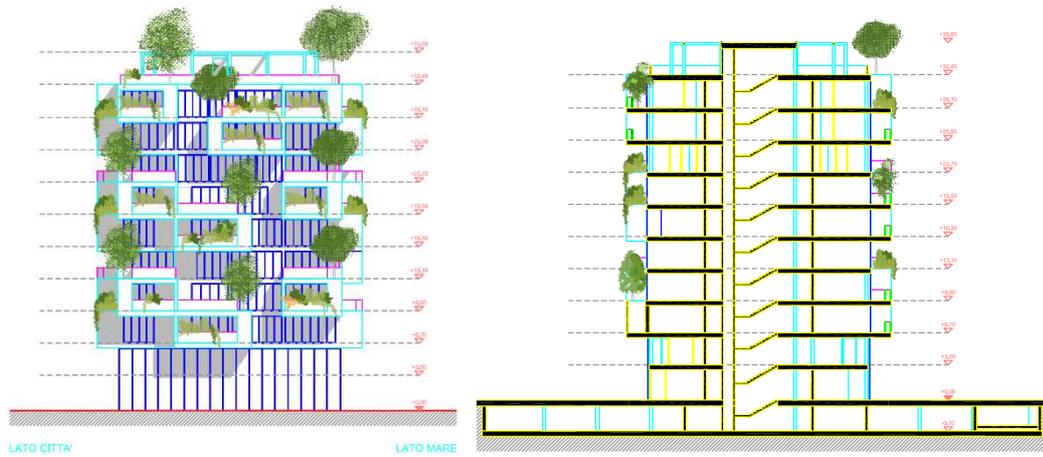


Figura 5 – Sezione del nuovo edificio tra viale Milano e il Lungomare della Repubblica (sopra); rendering dell'edificio in basso. Progetto preliminare a cura di "Stefano Boeri Architetti".

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO, IDROGEOLOGICO ED IDRAULICO

Il territorio del Comune di Riccione si colloca in corrispondenza del margine padano-adriatico della catena orogenica appenninica. Risulta caratterizzato, verso SO, da dolci rilievi collinari a prevalente composizione argillosa, effetto di spinte tettoniche NE-vergenti, su cui, procedendo verso la costa, un'ampia pianura alluvionale poggia in discordanza e, in modo netto, passa a depositi litorali recenti ed attuali di origine marina in corrispondenza del lineamento morfologico rappresentato dall'orlo di terrazzo marino di Figura 6.

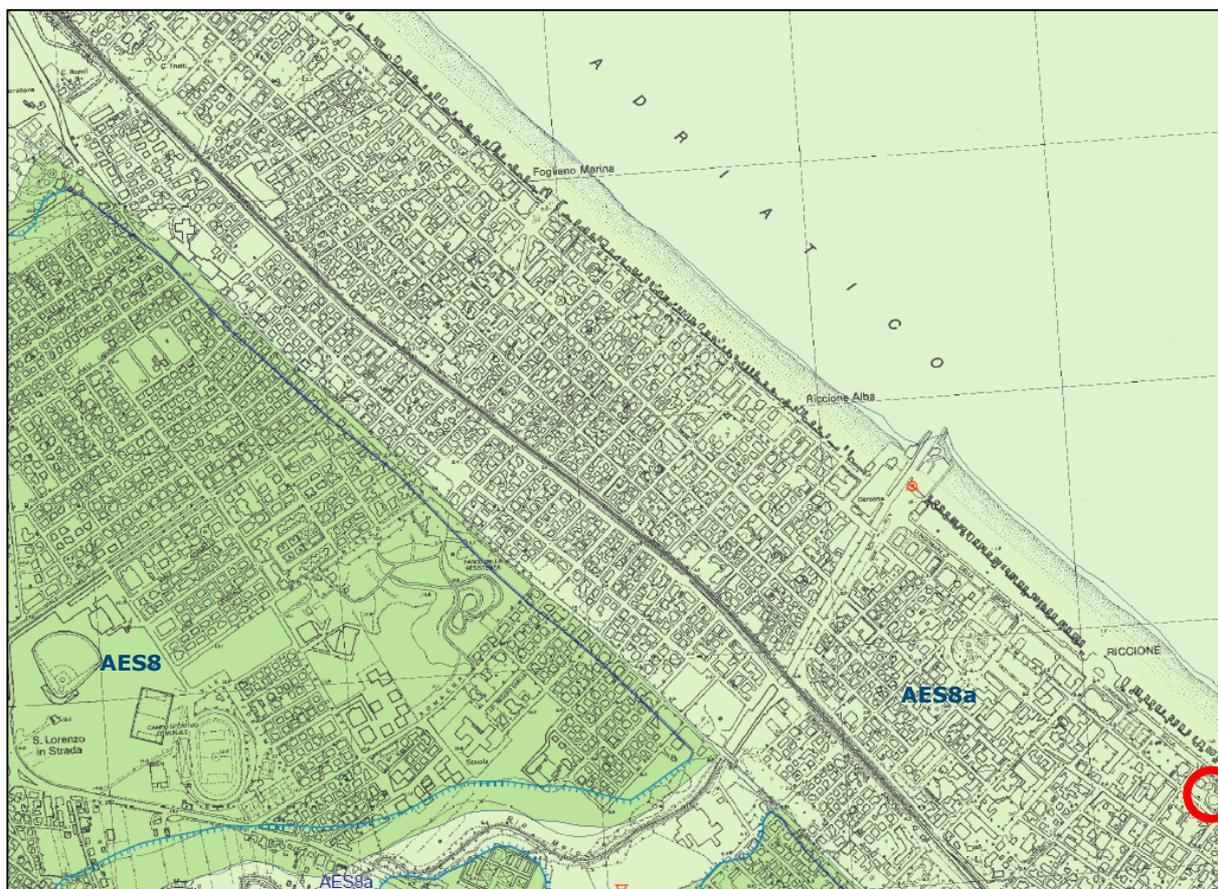


Figura 6 – Stralcio della Carta geologica dell'appennino emiliano-romagnolo, a scala 1:10.000, Sezione 256160 "Riccione Marina" del Servizio geologico, sismico e dei suoli della Regione Emilia-Romagna (edizione 2009) - Rilevamento geologico originale eseguito alla scala 1:10.000, negli anni 1982\1996. Revisione della banca dati regionale, relativo aggiornamento delle unità geologiche e coperture eseguiti alla data 25\03\2009. **Legenda** - AES8: Subsintema di Ravenna; AES8a: Unità di Modena; linea dentata azzurra: orlo di terrazzo fluviale; linea dentata blu: orlo di terrazzo marino. L'area di studio è individuata dal cerchio rosso, al margine della Sezione 256160.

La distanza tra la linea di costa attuale e l'orlo di terrazzo marino suddetto è di circa 800 m e corrisponde anche all'ampiezza della fascia costiera a cui la carta geologica regionale in Figura 6 assegna, come litologia di superficie, i terreni olocenici dell'Unità di Modena (AES8a), costituiti da depositi alluvionali eterometrici dati da ciottoli, sabbie e limi.

L'orlo di terrazzo marino segna il limite sud-occidentale raggiunto dai depositi di spiaggia legati alla trasgressione flandriana (Olocene, circa 15.000 anni BP),

legata alla fase di miglioramento climatico conseguente la fine del Tardoglaciale, che portò ad un generalizzato innalzamento del livello del mare dopo la lunga fase di *low-stand* dell'Ultimo Massimo Glaciale.

Il limite coincide, nel territorio cervese, con un cordone litoraneo ghiaioso (indicato dalla freccia blu in Figura 7), mentre tale litologia non sembra essere presente in corrispondenza dello stesso limite nel territorio di Riccione (freccia rossa in Figura 7). La profondità della linea di costa creatasi a seguito della trasgressione post-glaciale varia sensibilmente procedendo da Gabicce verso Porto Corsini, con profondità minime di 4/5 m a Riccione e massime di 20 m nell'entroterra ravennate (Figura 8). La linea di costa stessa mostra anche una deviazione progressiva dalla linea di costa attuale verso l'entroterra.

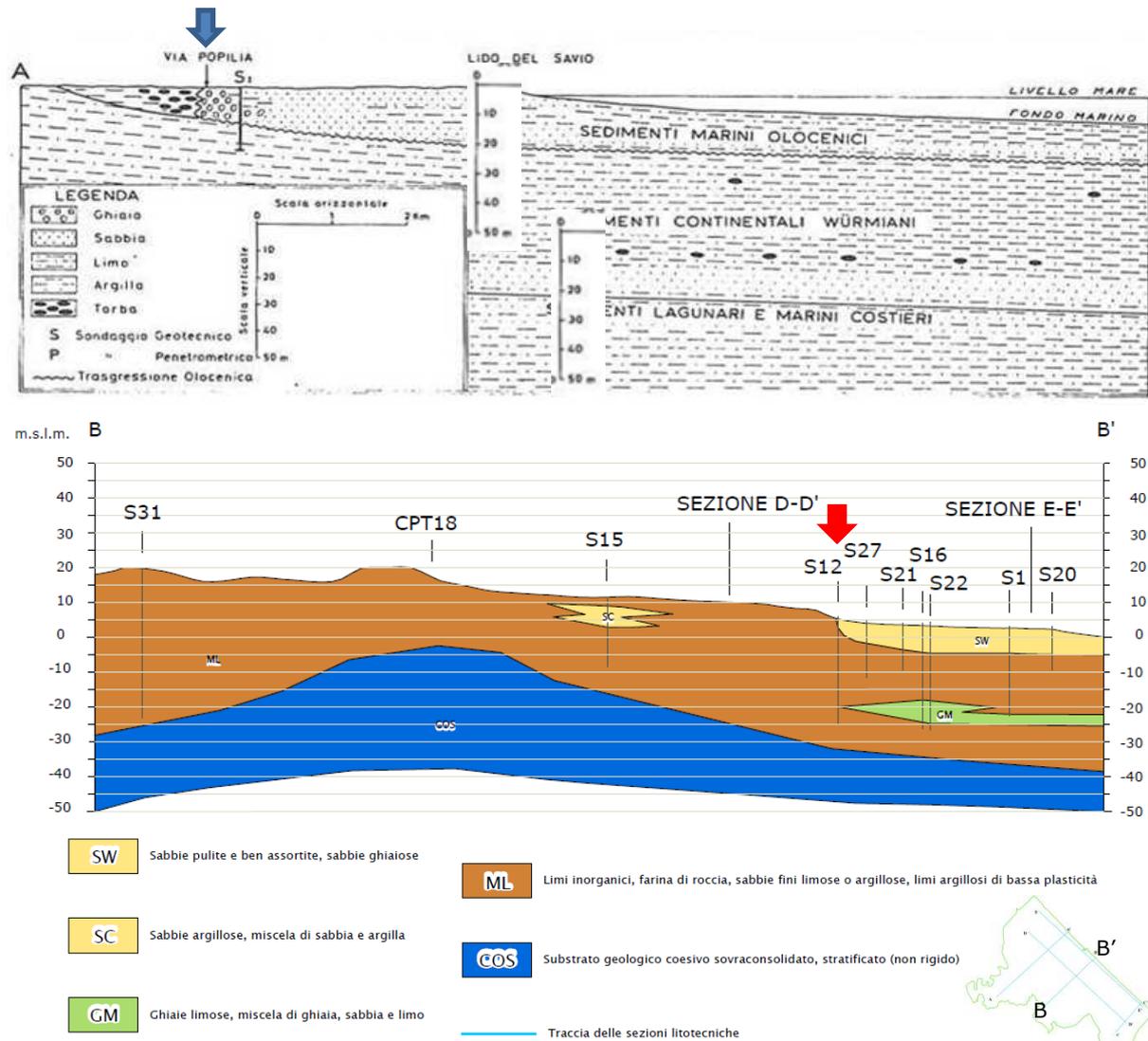


Figura 7 - In alto: sezione geologica attraverso i sedimenti recenti tra il territorio cervese e l'area marina antistante (da Veggiani, 1971); sotto: sezione geologica B-B' dell'elaborato "Sezioni Litotecniche" dello studio di microzonazione sismica di II livello del Comune di Riccione (2014).

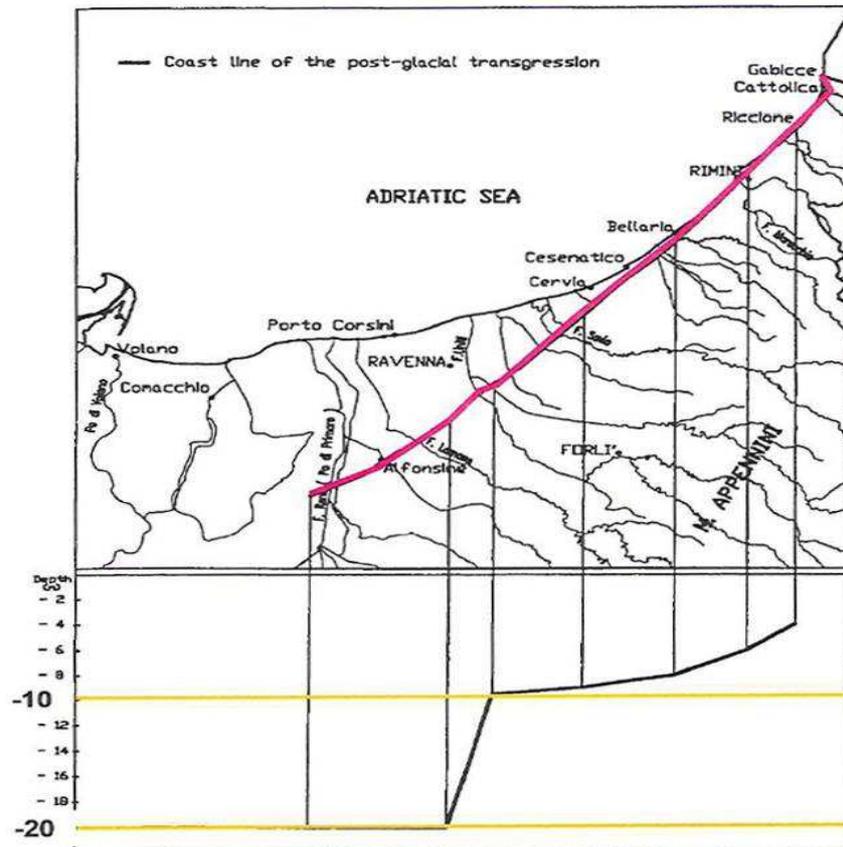


Figura 8 - Profondità attualmente rilevabile della spiaggia originatasi durante il periodo di massima trasgressione olocenica (tratto da: Preti, 1999).

Le due sezioni di Figura 7, benché relative a due aree lontane tra loro, evidenziano una stratigrafia simile:

- i sedimenti olocenici (sabbiosi e limo-argillosi) cervesi chiudono a monte con la linea di massima trasgressione flandriana, che si presenta netta come per i coevi terreni di Riccione (SW); lo spessore dei sedimenti olocenici è circa 20 m per l'area cervese e circa 7-8 m per quella di Riccione;
- i sedimenti limo-argillosi (con livelli sabbiosi e ghiaiosi) continentali, dell'ultimo periodo glaciale, e marini costieri, della precedente trasgressione interglaciale, cervesi hanno uno spessore superiore a 80 m, mentre gli stessi sedimenti (ML, GM e SC), a Riccione, raggiungono circa 30 m di spessore.

La differenza più evidente è il minore spessore di sedimenti continentali e marini costieri a Riccione rispetto al cervese, differenza evidenziata anche dalla Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (edizione 2016), dove la base del SERS (Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore) a Cervia è tra -250 e -300 m dal livello del mare, mentre a Riccione è tra 0 e -50 m.

La sezione geologica di Figura 9 (Allegato 5), passante per Misano Adriatico (la sezione più prossima all'area di studio - circa 4 km a SE - presente nel database delle sezioni geologiche della Regione Emilia-Romagna), mostra la presenza di circa 7 m (a partire dal piano campagna) di sabbie in prossimità della linea di costa, in posizione assimilabile a quella che ospiterà il nuovo edificio in progetto.

Seguono 16 m di limi, limi sabbiosi e argille: a circa -17 m dal p.d.c. è collocata la base dell'acquifero A1, corrispondente al subsistema di Villa Verrucchio (AES7). Le sabbie si ripresentano tra -23 m e -25 m, seguite da 5 m di ghiaie intervallate da uno strato argilloso. Tra -32 m e -35 m è presente uno spessore di terreni fini, seguito probabilmente da ghiaie fino alla base dell'acquifero A2, a circa -41 m, corrispondente al subsistema di Bazzano (AES6).

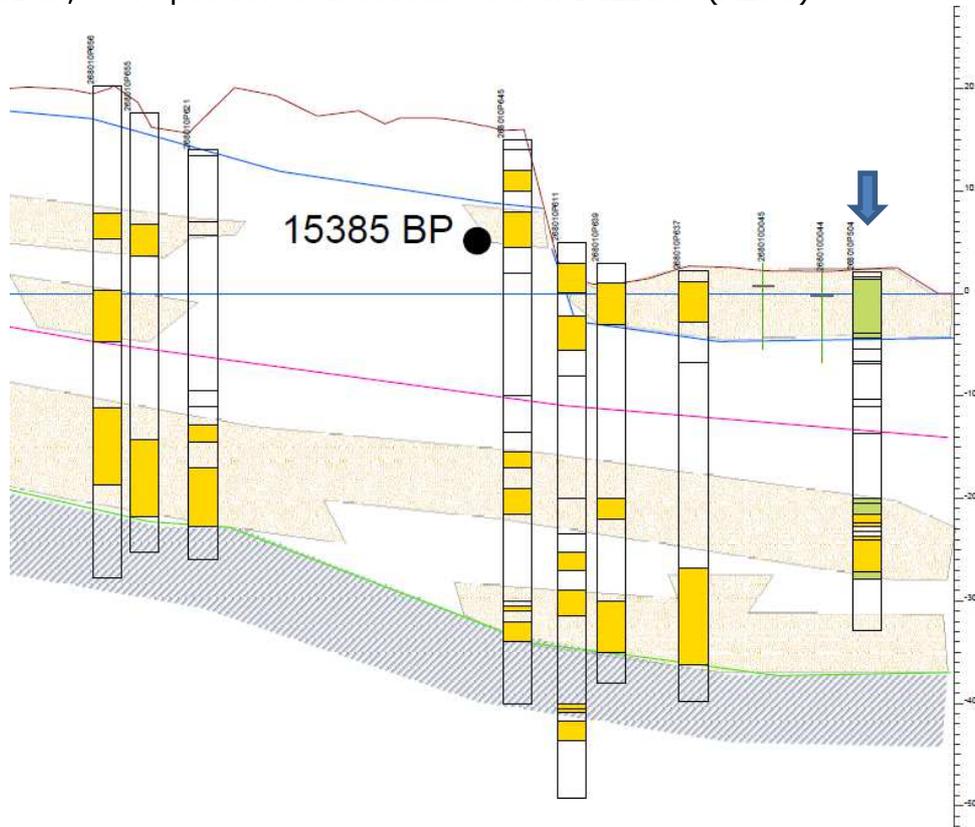


Figura 9 – Sezione geologica nr. 126 (Allegato 5), passante per Misano, del database delle indagini geognostiche e sezioni geologiche della Regione Emilia-Romagna. L'area oggetto del presente studio si colloca ad una distanza dalla linea di costa (estremo destro della figura) comparabile al punto indicato dalla freccia blu.

Interessante notare la datazione di 15.385 yBP all'altezza della linea di massima trasgressione flandriana, che conferma anche qui la presenza della linea di costa post-Tardoglaciale.

La carta geomorfologica del QC-PSC di Riccione (Figura 10) mostra chiaramente il gradino morfologico rappresentato dalla paleo-falesia prodottasi a seguito dell'abbassamento glacio-eustatico dell'Ultimo Massimo Glaciale, in seguito raggiunta dalla linea di costa della massima trasgressione flandriana. Il gradino morfologico risulta fortemente urbanizzato. Come per tutta la costa romagnola, la prevalente direzione SE-NO delle correnti lungo-costa determina una maggiore sedimentazione a SE delle foci fluviali, che si manifesta in una spiaggia in avanzamento.

Per quanto riguarda le **caratteristiche idrogeologiche locali**, l'intera zona costiera a valle delle prime colline è costituita da un'unità idrogeologica a

permeabilità ridotta, costituita dai sedimenti alluvionali terrazzati (Pleistocene medio-superiore) e dalle sabbie del litorale (Pleistocene medio-recente).



Figura 10 - Stralcio della TAV. B.6 "Carta geomorfologica" del QC-PSC di Riccione (2007). Il cerchio rosso individua l'area di studio.

In base al report Arpae sulla qualità delle acque sotterranee in Provincia di Rimini (2014-2016), l'acquifero costiero è caratterizzato da una soggiacenza media annua del freatico da 1 a 2 m e una soggiacenza media annua dei corpi idrici liberi e confinati superiori compresa tra 5 e 10 m.

Dal punto di vista **idraulico**, la Variante 2006 al Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) dell'Autorità Interregionale di Bacino Marecchia-Conca evidenzia come l'area in esame si trovi in posizione esterna al limite delle aree inondabili per piana di ritorno fino a 500 anni, relativamente al tratto del Fiume Melo tra l'attraversamento della S.S. 16 e la foce.

Riguardo alla **subsidenza**, il più recente rilevamento dei tassi di abbassamento/innalzamento del terreno eseguito da Arpae (Figura 11) mostra, per l'area in esame, un tasso di subsidenza variabile tra -2,5 e 0 mm/anno nel periodo 2011-2016, decisamente diminuito rispetto al precedente periodo di monitoraggio, 2006-2011, in cui il tasso era variabile tra -5 e -2,5 mm/anno.



Figura 11 – Subsidenza del terreno nel periodo 2011-2016. Fonte: Arpae. Il cerchio rosso identifica l'area di studio.

3. CARATTERIZZAZIONE STRATIGRAFICA E SISMICA DELL'AREA

Per la caratterizzazione litostratigrafica specifica dell'area in esame sono stati eseguiti 1 sondaggio a carotaggio continuo spinto fino alla profondità di 35 m, con esecuzione di prove SPT ogni 2 m e prelievo di nr. 1 campione di terreno disturbato e di nr. 3 campioni di terreno indisturbato per analisi di laboratorio geotecnico, e 4 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu) spinte fino alla profondità massima di 20 m.

Per la caratterizzazione sismica del sito sono state eseguite 1 indagine a sismica passiva HVSR ed un Down-hole all'interno del foro di sondaggio appositamente attrezzato. L'ubicazione di tutti i sondaggi e prove geofisiche è riportata nella seguente Figura 12.



Figura 12 – Ubicazione dei sondaggi geognostici e geofisici eseguiti per questo studio.

3.1. Indagini penetrometriche

Nelle date 6-7/06/2019 sono state eseguite complessivamente 4 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu) nell'area in oggetto al fine di analizzare le caratteristiche litostratigrafiche e geotecniche dei terreni che saranno interessati dall'intervento in progetto (Figura 12). Le verticali penetrometriche, che hanno raggiunto la profondità variabili tra 12 e 20 m, sono state eseguite utilizzando un piezocono G1-CPL2IN, con le seguenti caratteristiche tecniche:

PIEZOCONO

Area di punta	10.00 cm ²
Diametro	35.70 mm
Area netta (AN)	6.60 cm ²
Superficie manicotto	150.00 cm ²
Lunghezza manicotto	133.70 mm
Area superiore manicotto (F sup.)	2.22 cm ²
Area inferiore manicotto (F inf.)	3.31 cm ²
Lunghezza totale piezocono	600.00 mm
Peso complessivo	3.00 Kg
Lunghezza raccordo punta - aste	250.00 mm
Passo letture	2 cm
Posizione filtro pressioni neutre:	U ₂

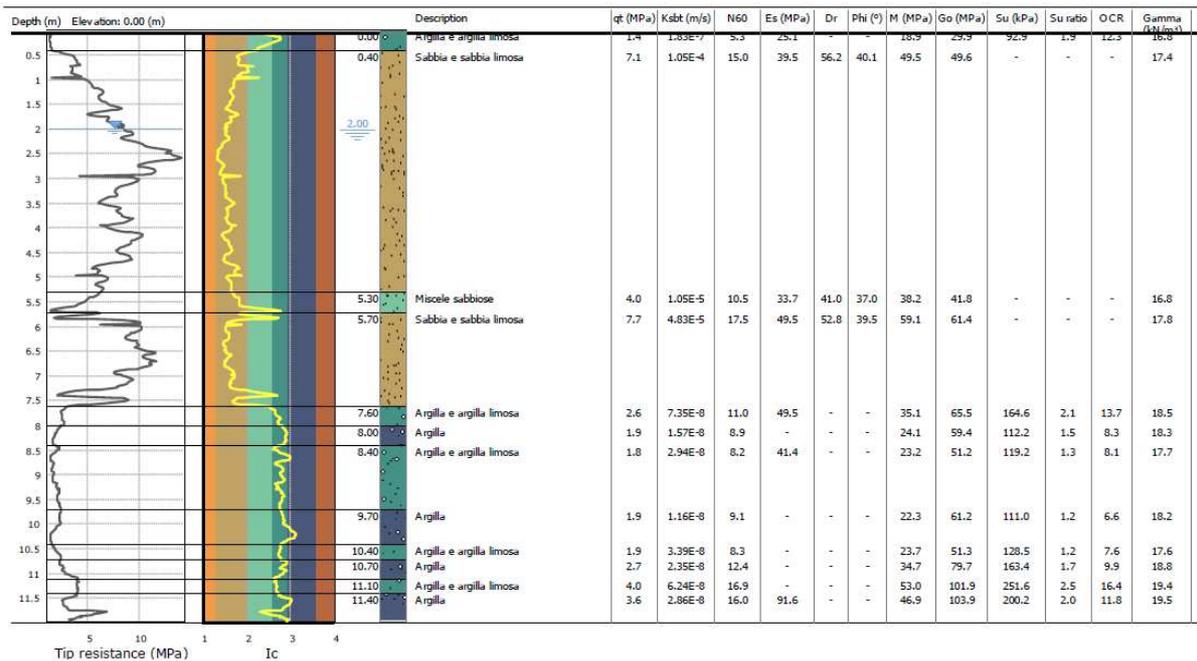


Figura 13 - Modello stratigrafico-geotecnico CPTu-1.

Ciò che appare da subito chiaro è un'omogeneità stratigrafica sull'intera area in esame, caratterizzata da circa 6,5 m di sabbie, seguite da alternanze di argille e argille limose fino a 20 m. Stratigrafia che ben può essere correlata a quella delle sezioni geologiche già presentate in Figura 7 (in basso) e in Figura 9 almeno fino alla profondità comune di 20 m. Lo spessore sabbioso più superficiale corrisponderebbe, pertanto, ai sedimenti marini olocenici, accumulatisi a partire dal post-Tardoglaciale ad oggi. Ad essi seguono, in profondità, argille e argille limose di ambiente deposizionale continentale, legate all'ultimo periodo glaciale. Dal sondaggio eseguito nell'area (vedasi il paragrafo successivo) si può ricavare la profondità dello spessore argilloso, pari a circa 27 m. Tra 27 e 28 m è presente uno strato di ghiaia fine e media a sua volta seguito da argilla limosa fino a 34 m. Il livello ghiaioso sembra coincidere con quello identificato dalla sezione di Figura 7 (in basso) con il simbolo GM.

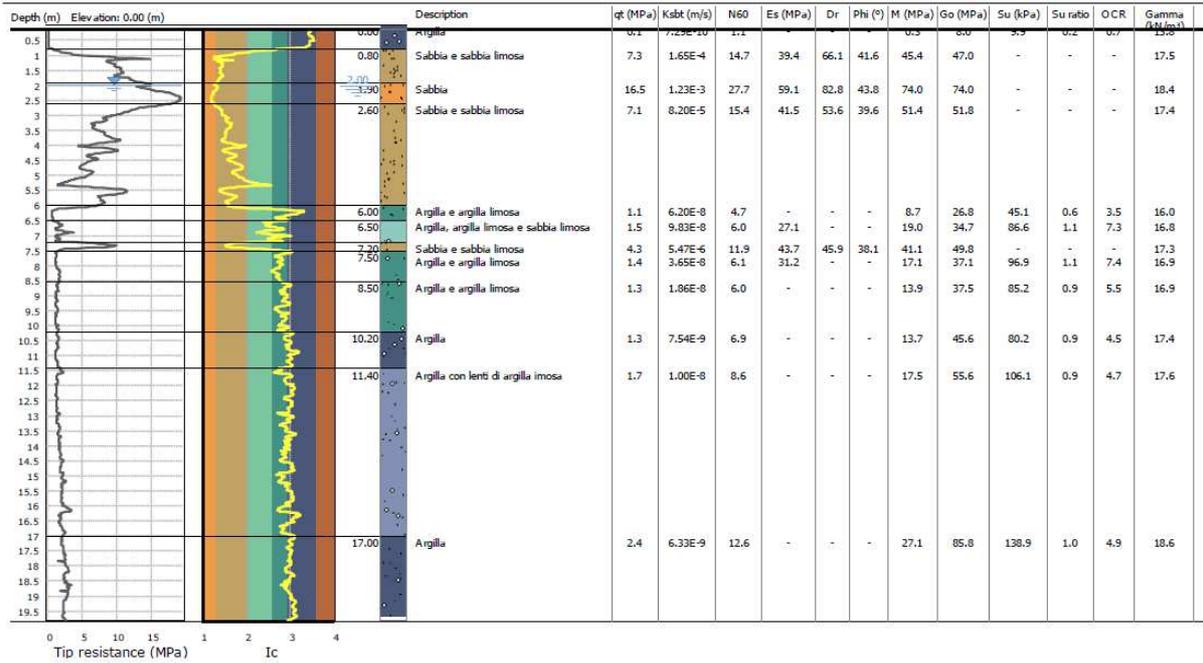


Figura 14 – Modello stratigrafico-geotecnico CPTu-2.

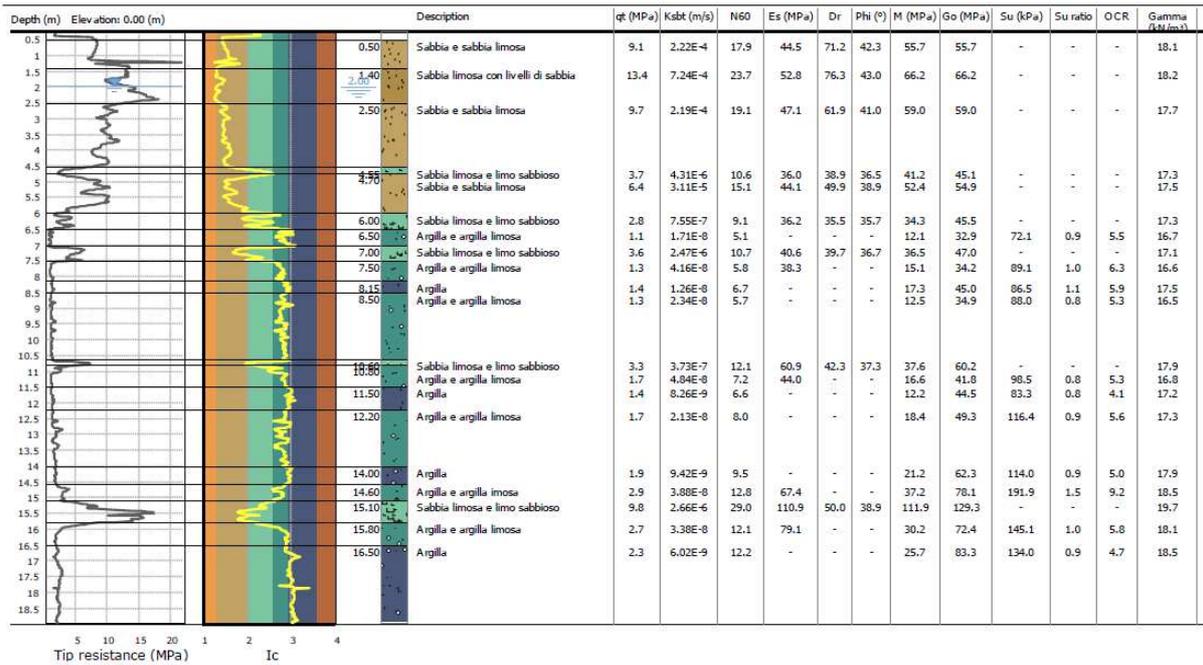


Figura 15 - Modello stratigrafico-geotecnico CPTu-3.

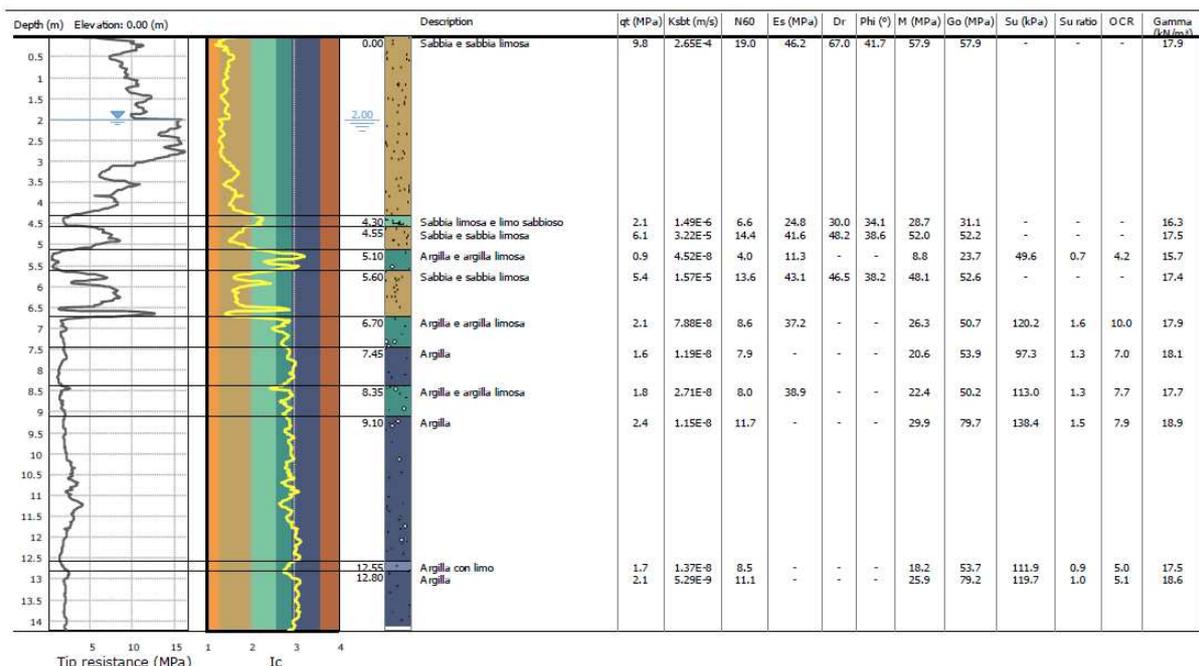


Figura 16 - Modello stratigrafico-geotecnico CPTu-4.

Anche dal punto di vista geotecnico emerge, chiaramente, una uniformità su tutta l'area di studio (Figura 17).

Le sabbie mostrano alti valori di densità relativa nei primi 3 m (al di là del primo metro più superficiale), sempre al di sopra del 50%, che poi decadono verso valori mediocri da circa -3 m al letto dello spessore sabbioso (Figura 17, primo grafico). L'andamento del parametro di stato per le sabbie (Figura 17, secondo grafico) è chiaramente speculare al primo, con valori indicativi di forte addensamento tra -1 e -3 m che si avvicinano allo 0 (a luoghi superandolo) tra 4,5 e 7,5 m.

Tra -5,5 e -7,5 m, il grafico della coesione non drenata (Figura 17, terzo grafico) fa intuire la compresenza di livelli fini che si intervallano ai livelli sabbioso-limosi, con valori di resistenza meccanica da subito mediocri, ma che aumentano speditamente già a partire da 8-9 m, mantenendosi mediamente sopra i 100 kPa e raggiungendo a luoghi massimi di 200 e 300 kPa.

Il profilo continuo di permeabilità (Figura 17, quarto grafico) mostra chiaramente una buona permeabilità nello spessore sabbioso, con ordine di grandezza di $1 \cdot 10^{-3}$ da -1 a -3 m, con un andamento molto irregolare tra -3 e -7,5 m (nello spessore ove frequenti sono le intercalazioni coi livelli argilloso-limosi), variabile da $1 \cdot 10^{-3}$ a $1 \cdot 10^{-9}$, che si stabilizza su $1 \cdot 10^{-8}$ nello spessore argilloso-limoso.

Per maggiori dettagli sull'interpretazione delle prove penetrometriche statiche si rimanda all'Allegato 1.

In corrispondenza della CPTu-3 sono state eseguiti 4 test di dissipazione per calcolare la permeabilità orizzontale dei terreni. I test hanno dato i seguenti risultati:

Profondità (m)	k_h
7,1	$1,07 \cdot 10^{-9}$
8,41	$1,33 \cdot 10^{-9}$
11,89	$1,47 \cdot 10^{-9}$
15,64	$5,84 \cdot 10^{-9}$

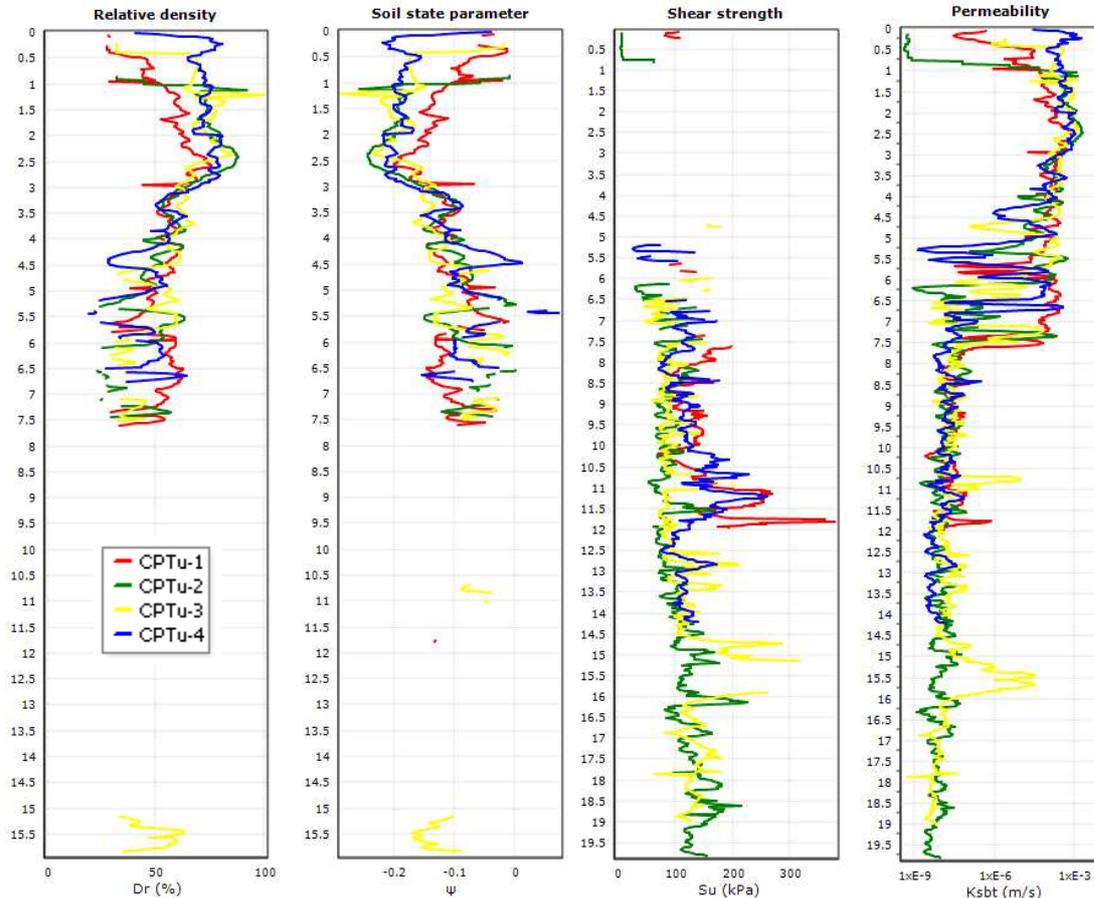


Figura 17 – Confronto dei profili con la profondità di: densità relativa, parametro di stato per le sabbie, coesione non drenata e permeabilità verticale, in corrispondenza di tutte le 4 CPTu eseguite per questo studio.

Per la relazione completa dei test di dissipazione si rimanda all'Allegato 2. Singolarmente, le curve del test di dissipazione sono indicative del grado di consolidamento dei terreni.

Nel caso del test a -7,1 m di profondità, la forma della curva è quella tipica di terreni da moderatamente a molto sovraconsolidati (codificata da Sully et al., 1999 come "TypeV")² (l'OCR a tale profondità è risultato pari a 10), per cui la pressione neutra registrata dietro la punta del piezocono può essere inferiore a quella idrostatica. In tale condizione, dal momento in cui l'avanzamento della punta viene fermato, la pressione neutra aumenta in modo monotono fino a raggiungere il valore di quella idrostatica.

² $OCR \leq 1$: normal-consolidato; $1 < OCR \leq 4$: leggermente sovraconsolidato; $4 < OCR \leq 10$: moderatamente sovraconsolidato; $10 < OCR \leq 25$: molto sovraconsolidato; $25 < OCR$: fortemente sovraconsolidato (Sully, J.P., Robertson, P.K., Campanella, R.G. & Woeller, D.J. (1999) – An approach to evaluation of field CPTU dissipation data in overconsolidated fine-grained soils. Can. Geotech. J., 36, 369-381).

Nei test alle profondità di 8,41 e 11,89 m, le curve sono simili e codificabili come "Type III", dove la pressione neutra registrata dietro la punta del piezocono è maggiore di quella idrostatica ed aumenta raggiungendo un picco prima dell'inizio della fase di dissipazione.

Il test eseguito alla profondità di -15,65 m ha restituito una curva codificabile come "Type IV", tipica di terreni da moderatamente a molto sovraconsolidati (anche in questo caso l'OCR a tale profondità è risultato > 10): la pressione neutra registrata dietro la punta del piezocono è inferiore a quella idrostatica ed aumenta raggiungendo un picco prima dell'inizio della fase di dissipazione.

3.2. Sondaggio a carotaggio continuo

Il sondaggio **S1** (Allegato 3), eseguito in prossimità dell'angolo nord dell'area in esame e dell'angolo orientale di Villa Ernesta (Figura 12), mostra un profilo stratigrafico pressoché identico a quello individuato attraverso l'esecuzione delle CPTu-1 e CPTu-2: 7,5 m di sabbia, seguiti da limo argilloso e argilla fino a -26,95 m (le due CPTu terminano una a circa 12 m e l'altra a circa 20 m). Seguono nel sondaggio 1,5 m di ghiaia e poi argilla fino a fondo foro (-34,3 m).

Le prove SPT eseguite in foro offrono una stima dei principali parametri geomeccanici dei terreni alle varie profondità d'esecuzione, ovvero in modo discontinuo. I risultati dell'interpretazione delle prove SPT vengono riportati in Tabella 1.

Nr.	Prof. m	Colpi	N _{SPT}	Dr %	φ' °	E _y MPa	Cu kPa	Lito.
1	2	15	15	65	28-37	17.1-19.5		Sf
2	4	12	12	52	26-36	15.2-17.1		Sf
3	6	11	11	33-37	25-35	14.5-16.3		Sm/g
4	8	10	10				59-73	AL
5	10	13	13				76-95	LAS
6	12	13	13				76-95	LA
7	14	13	13				76-95	LA
8	15	18	16.5				97-121	LA
9	18	22	18.5				108-136	LA
10	20	29	22				129-161	LA
11	22.30	23	19				112-140	LA
12	24.4	28	21.5				126-158	LA
13	26.5	38	26.5				156-195	AL
14	28	33	24	44	30-40	17-32		G
15	30	39	27				159-198	AL
16	32	38	26.5				156-195	AL
17	34.55	63	/	/	/	/	/	/

Tabella 1 – Penetrometrie SPT eseguite nel foro di sondaggio e parametri geotecnici derivati. Legenda – Dr: densità relativa; φ': angolo d'attrito interno di picco; E_y: modulo elastico di Young; Cu: coesione non drenata; Sf: sabbia fine; Sm/g: sabbia media/grossolana; AL: argilla limosa; LAS: limo argilloso-sabbioso; LA: limo argilloso; G: ghiaia.

Come di può notare, nei primi 6 m indagati dalle SPT, costituiti da sabbie, si nota un progressivo decremento della densità relativa, così come già individuato dalle CPTu. Per quanto riguarda lo spessore limo-argilloso e argilloso, le SPT identificano un progressivo aumento dei valori di coesione non drenata a partire da -14 m, così come da CPTu-2 e CPTu-3; diverso è l'andamento del profilo di coesione non drenata per le CPTu-1 e CPTu-4, che mostrano valori buoni anche da -7 a -14 m.

3.3. Indagine sismica

Per la classificazione sismica del terreno sono stati utilizzati i risultati dell'indagine Down-hole eseguita all'interno del foro di sondaggio 17/06/2019. L'indagine ha consentito di determinare, per ogni metro, la velocità delle onde di taglio "S" e delle onde di compressione "P", permettendo di derivare i principali parametri elastici dinamici del terreno e di calcolare il parametro di Normativa V_{s30} , risultato pari a **285 m/s**, che inserisce il terreno di fondazione all'interno della **classe C** (NTC18)- *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 dai profili di V_p e V_s con la profondità (Figura 18 e Allegato 4), appare chiaramente il passaggio, a circa 8 m di profondità, tra le sabbie poco addensate superficiali e le argille, quest'ultime caratterizzate da profili di velocità pressoché lineari con la profondità.



Figura 18 – Profili di velocità delle onde "P" ed "S" ricavati dall'indagine Down-hole eseguita nel foro di sondaggio per questo studio.

E' stata inoltre eseguita una verticale a sismica passiva con tecnica HVSR, in prossimità della CPTu-4, con l'obiettivo di determinare la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno.

In Allegato 4, si riporta anche il report e la metodologia d'esecuzione dell'indagine geofisica HVSR.

A seguire, si riporta il risultato finale dell'elaborazione dei rapporti H/V (Figura 19). L'analisi dei rapporti spettrali ha consentito di valutare la risposta sismica in funzione della frequenza ed il relativo periodo (T) del sito oggetto di studio.

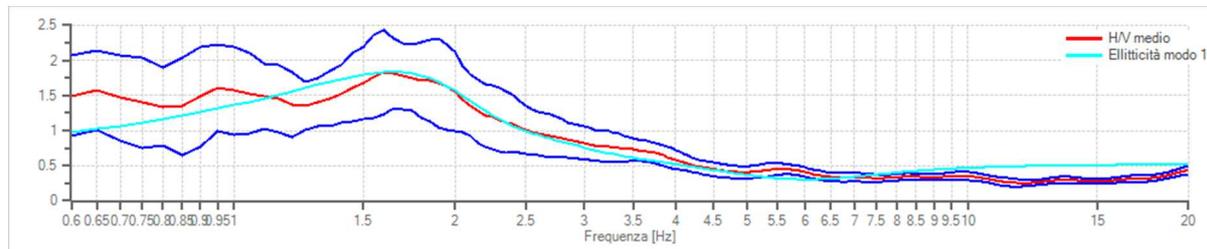


Figura 19 - Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Nell'analisi spettrale è stato evidenziato un picco principale, con ampiezza del rapporto H/V non particolarmente accentuata (poco meno di 2), alla frequenza di **1,6±0,32 Hz**. Un picco secondario è visibile a circa 0,95 Hz.

Utilizzando l'equazione di inversione del picco di frequenza dell'HVSR proposta nella recente pubblicazione di Mascandola et al. (2019)³, tale picco di frequenza sarebbe indicativo di una superficie di risonanza variabile tra 46 e 73 m di profondità (considerata la grande deviazione standard associata al valore del picco principale) che, in base alla stratigrafia mostrata in Figura 7, potrebbe collocarsi al passaggio tra il substrato geologico coesivo, sovraconsolidato (COS), non rigido, e i sedimenti continentali e marini superiori.

4. MICROZONAZIONE SISMICA

Come già anticipato in Figura 7, la Microzonazione sismica di II livello del Comune di Riccione, a cura del Dott. Geol. Carlo Copioli, identifica nell'area di studio la presenza di sabbie pulite e sabbie ghiaiose, per quanto attiene le litologie di superficie (Figura 20), almeno per i primi 5 m dal p.d.c. Questa fascia è quindi interpretata come "Zona di attenzione per liquefazioni tipo 1" dalla carta delle MOPS (Figura 21), ovvero in cui gli studi di livello 1 hanno verificato che esistono 4 condizioni predisponenti il fenomeno:

1. terreni sabbiosi;
2. falda a profondità inferiore a 15 m;
3. Mw attesa al sito >5;
4. Accelerazioni massime in superficie (PGA) >0.1g.

³ 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. Bulletin of the Seismological Society of America, doi: 10.1785/0120180193.

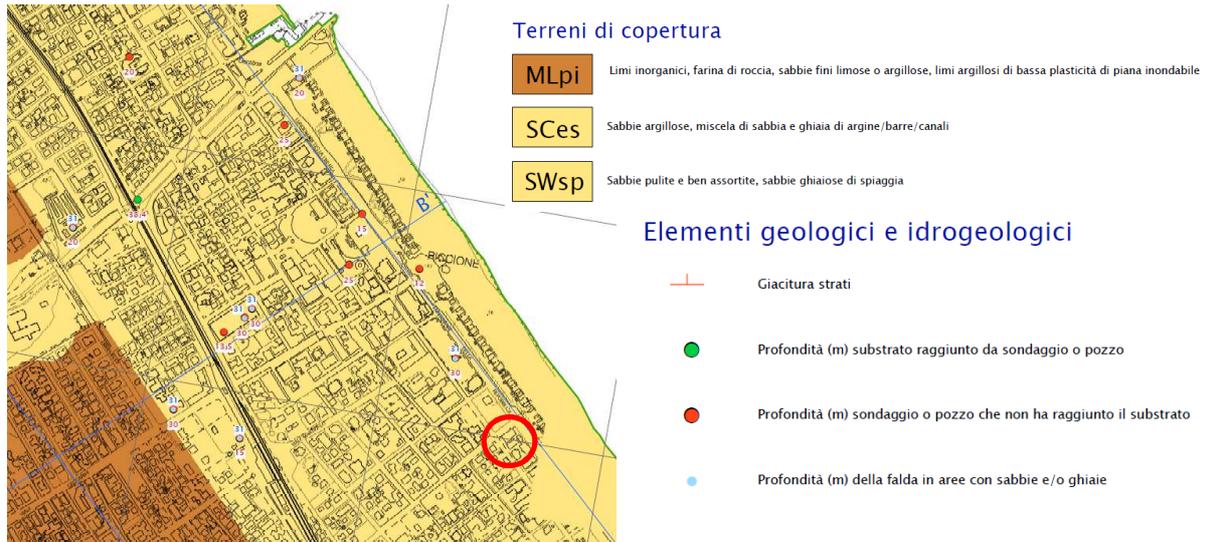
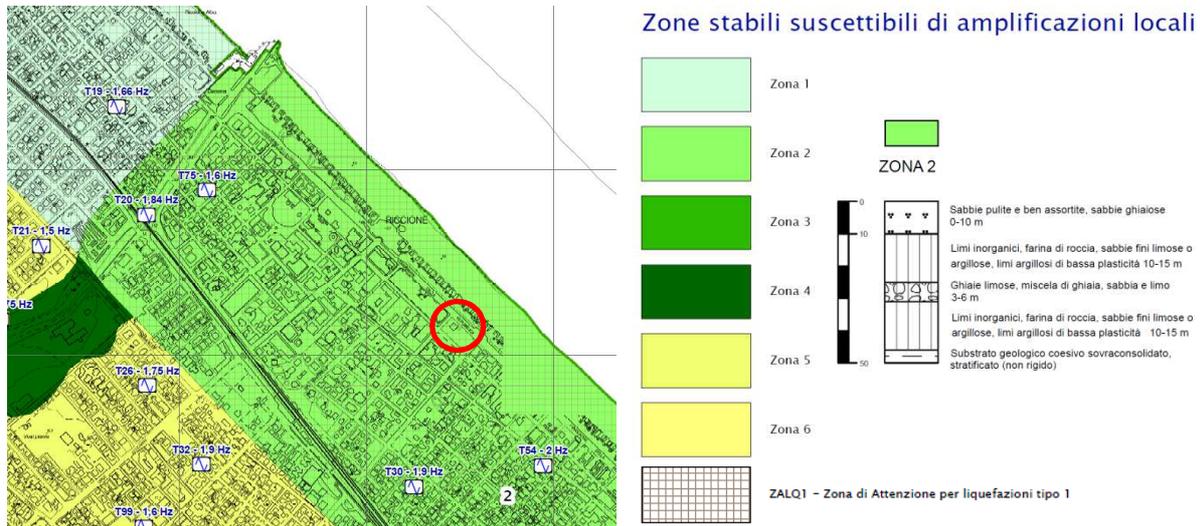


Figura 20 – Estratto della Tavola “Carta Geologico-Tecnica / B” della Microzonazione di II livello del Comune di Riccione (aggiornamento 2015). Il cerchio rosso identifica l’area di indagine.



Punti di misura di rumore ambientale

Punto di misura di rumore ambientale con indicazione del valore di f0 e codice prova

Figura 21 – Estratto della Tavola “Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica” della Microzonazione di II livello del Comune di Riccione. Il cerchio rosso identifica l’area di indagine.

La “Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)” della MS2 (2014) indica velocità in uno stretto intorno dell’area comprese tra 213 e 252 m/s, mentre la “Carta delle frequenze naturali dei terreni” della stessa MS2 indica valori compresi tra 1,6 e 2 Hz. Entrambe le carte risultano pertanto sufficientemente comparabili con i risultati delle indagini geofisiche eseguite per questo studio. La carta di microzonazione sismica Livello 2 (FPGA) (Figura 22) indica per l’area fattori di amplificazione della PGA tra 1,7 e 1,8, ed una di attenzione per liquefazione di tipo 1. I fattori di amplificazione per l’intensità di Housner nei periodi 0,1-0,5s sono 2,1-2,2 mentre quelli nei periodi 0,5-1s sono 2,3-2,4.

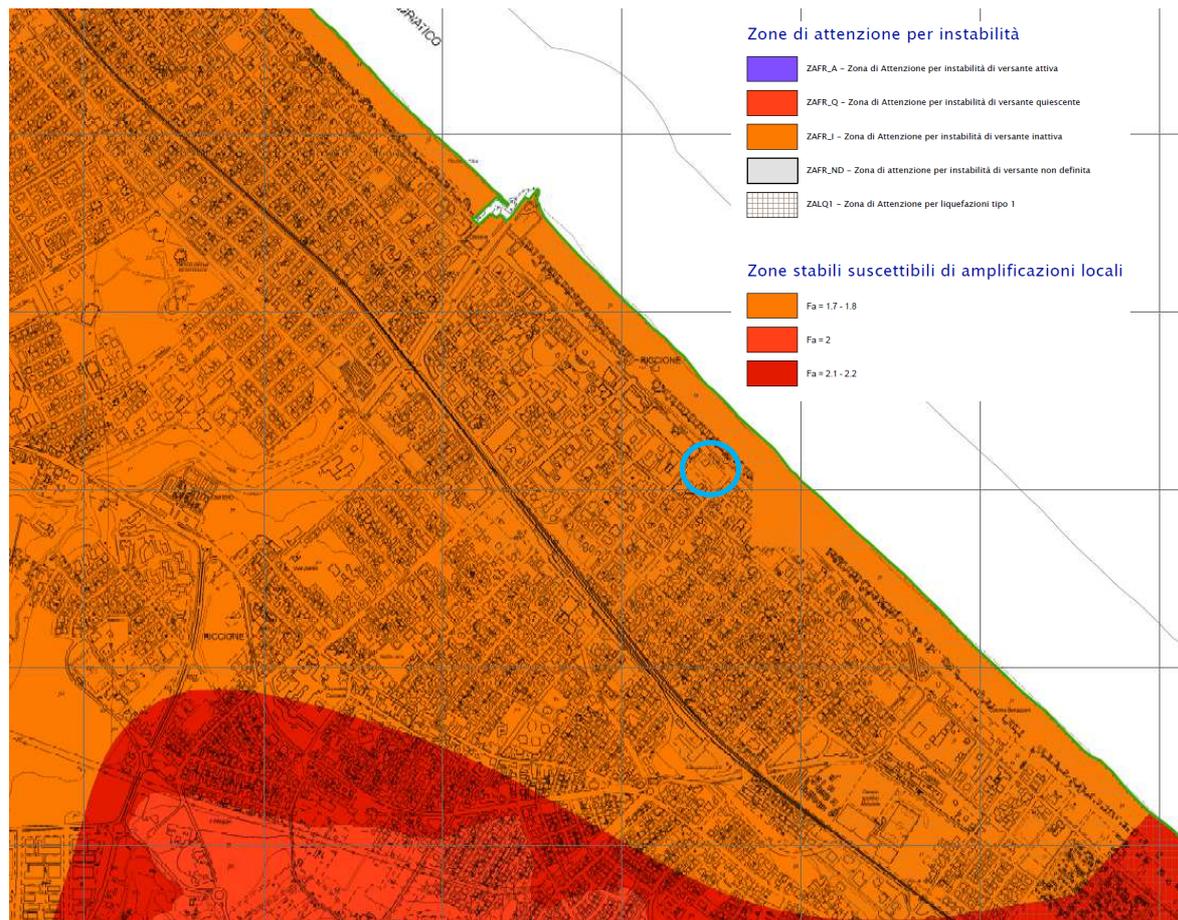


Figura 22 – Stralcio della “Carta di microzonazione sismica Livello 2 (FPGA)” della Microzonazione di II livello del Comune di Riccione. Il cerchio azzurro identifica l’area di indagine.

In base agli aggiornamenti in materia di microzonazione sismica introdotti dalla DGR 630/2019, e a valle dei risultati delle indagini geognostiche e geofisiche eseguite per questo studio, l’area d’indagine può essere collocata all’interno dell’Ambito “PIANURA 1” delle DGR stessa (Allegato A2.1.2), per cui i fattori di amplificazione risulterebbero:

FA PGA: 1,6
FA SA1: 1,7
FA SA2: 2,2
FA SA3: 2,7
FA SA4: 2,4
FA SI1: 1,8
FA SI2: 2,5
FA SI3: 2,5

Considerata l’omogeneità litologica, geotecnica e sismica dell’area, è possibile assegnare all’intera superficie dell’area in esame l’insieme di fattori di amplificazione sopra indicati, aggiungendo per tutta l’area una predisposizione al verificarsi di fenomeni di liquefazione in caso di sisma, considerati i bassi valori di densità relativa e parametro di stato per le sabbie che caratterizzano soprattutto i livelli compresi tra -3 e -7 m dal p.d.c.

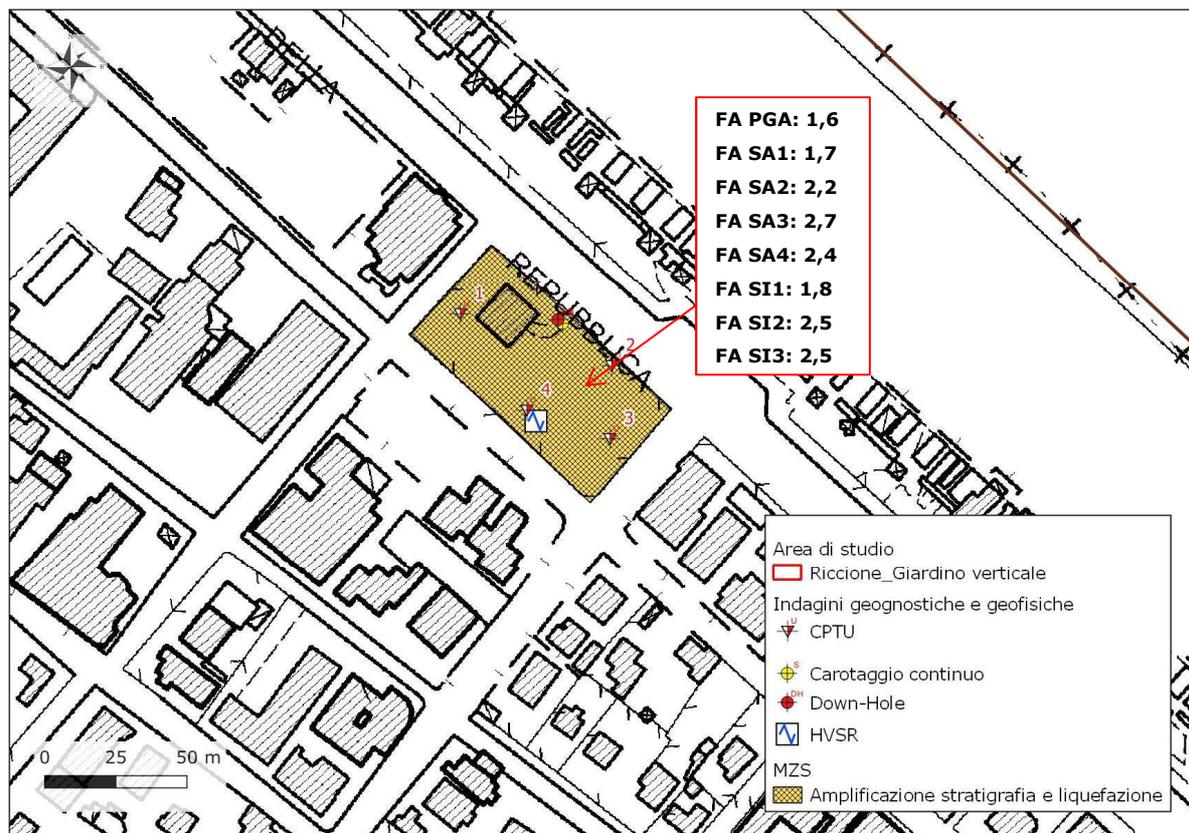


Figura 23 – Microzonazione sismica dell’area. Con il retino intrecciato a sfondo giallo viene indicata la presenza di condizioni geotecniche che favoriscono lo sviluppo di cedimenti sia in campo statico che sismico e fattori di amplificazione sismici come indicati all’interno del poligono e nel testo.

4.1. Liquefazione del terreno

Data la presenza di alcuni livelli con sabbie sciolte nei primi 20 m dal piano campagna, come evidenziato dalle indagini penetrometriche eseguite per questo studio, e vista anche la presenza di una falda superficiale, si è ritenuto necessario eseguire un’analisi numerica dell’Indice di Potenziale Liquefazione, a valle di un’analisi di risposta sismica locale che fornisca l’accelerazione massima attesa al suolo e alla profondità di imposta delle fondazioni, nonché il rispettivo profilo di CSR (*Cyclic Stress Ratio* – Rapporto di Sforzo Ciclico).

4.1.1. Analisi di risposta sismica locale

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”⁴, includendo l’effetto delle possibili incertezze sui dati di base e valutando:

4 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.

- 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.

Il moto di riferimento prescelto è costituito dalle componenti orizzontali di tre accelerogrammi forniti dalla Regione Emilia-Romagna per l'intera regione⁵, moltiplicandone le accelerazioni normalizzate per il valore di accelerazione di riferimento più prossimo al sito, pari a **0,18g**, considerando una vita nominale di 50 anni ed una classe d'uso **II**.

Il profilo stratigrafico è stato inserito, fino a -35 m, in base alla stratigrafia ricavata dal sondaggio a carotaggio continuo realizzato nell'area per questo studio. Oltre tale profondità, fino a -90 m (profondità ipotizzata del bedrock sismico), la stratigrafia è stata assunta uguale a quella ricavata dalla sezione geologica nr. 126 di Figura 9. La profondità del bedrock sismico è stata ipotizzata sulla base della relazione tra frequenza di vibrazione fondamentale del terreno, ricavata dall'indagine HVSr, ed il profilo di Vs nei primi 35 m ricavato dall'indagine Down-hole, proposta da Albarello et al. (2011)⁶: tale relazione permette di estrapolare i valori di Vs ben oltre la profondità raggiunta dall'indagine geofisica, fino a raggiungere la profondità ipotizzata per il bedrock sismico.

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 ,sabbie, argille e ghiaie. 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 24, mentre in Figura 25 viene confrontato lo spettro mediano da RSL con quello di normativa per l'area di studio, sottosuolo di tipo C, SLV, $V_n = 50$ e $c_u = II$.

Come si vede, lo spettro di risposta in superficie (sia nella forma normalizzata che in quella non normalizzata, **50° percentile della popolazione**), ottenuto dalla presente analisi, è sempre più basso di quello di normativa per: suolo C, $V_n = 50$ anni e $c_u = II$. I valori dello spettro normalizzato sono riportati in Allegato 6 (50° percentile). La PGA risulta pari a **0,19g**; il massimo valore dello spettro in accelerazione è pari a **0,61g** a 0,29 secondi; l'ordinata del plateau dello spettro normalizzato è pari a **0,53g**.

⁵ http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/archivio_pdf/sismica/Allegato_4.zip/ - DGR 2193/2015

⁶ Albarello, D., Cesi, C., Eulilli, V., Guerrini, F., Lunedei, E., Paolucci, E., Pileggi, D., Puzzilli, L., 2011. The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzoning: an example from the area damaged by the April 6, 2009 L'Aquila (Italy) earthquake. Boll. di Geofis. Teor. e Appl. 52, 513-538.

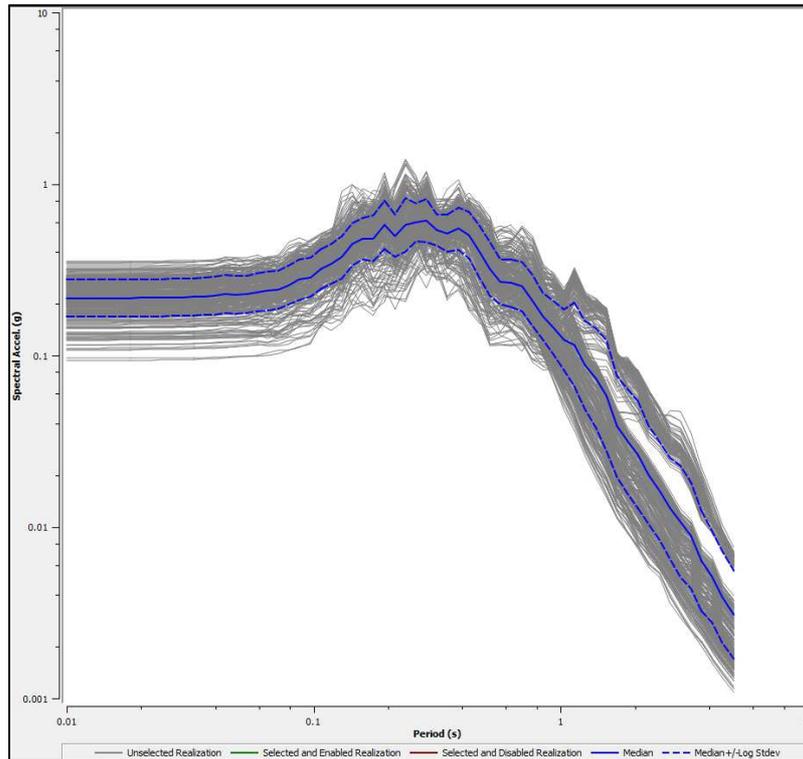


Figura 24 - Popolazione degli spettri di risposta visco-elastici (5% di smorzamento) alla superficie di campagna per il sito (scala logaritmica per entrambi gli assi del grafico). La linea blu continua indica la mediana (50° percentile) della distribuzione mentre i due andamenti tratteggiati corrispondono rispettivamente al 16° e 84° percentile della distribuzione.

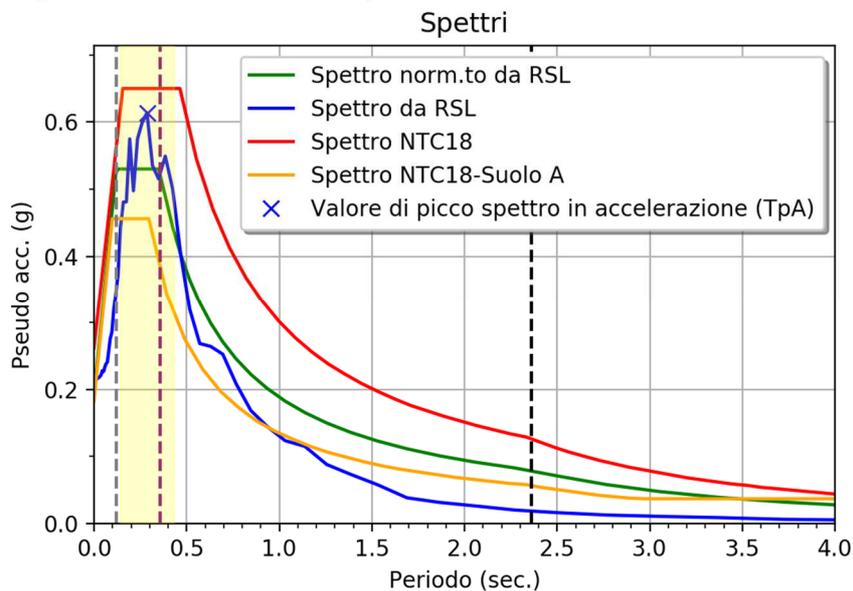


Figura 25 - Curva blu: spettro di risposta visco-elastico (5% di smorzamento, 50° percentile della popolazione) relativo al sito in esame, alla **superficie topografica attuale** (in verde: normalizzato). In rosso: spettro di risposta secondo Normativa per suolo C, SLV, $V_n=50$ e $C_u=II$.

Lo spettro in pseudo-accelerazione è stato calcolato anche alla profondità d'imposta delle fondazioni, ovvero a -5 m dal piano campagna attuale. Il risultato è visibile in Figura 26.

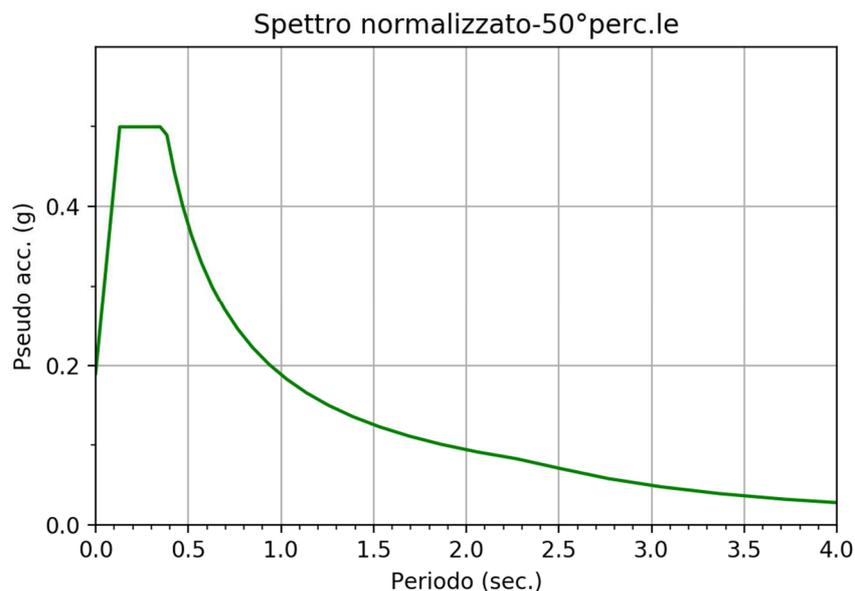


Figura 26 - Spettro di risposta visco-elastico (5% di smorzamento, 50° percentile della popolazione) relativo al sito in esame, alla **profondità di -5 m dal piano campagna attuale** (normalizzato).

Di seguito, i parametri fondamentali per la costruzione degli spettri normalizzati da RSL, al piano campagna (p.d.c.) e a -5 m:

	p.d.c	- 5 m
Ag (g) - Suolo A	0.183	
F ₀	2.79	2.63
T _b	0.12	0.13
T _c	0.36	0.38
T _d	2.36	2.36
S	1.04	1.04

I fattori di amplificazione della PGA e dell'intensità di Housner (sensu DGR 630/2019) sono risultati pari a:

Fattori di amplificazione	p.d.c.	-5 m
F.A. PGA	1,04	1,04
F.A. SA1	1,33	1,28
F.A. SA2	1,38	1,51
F.A. SA3	1,34	1,58
F.A. SA4	1,37	1,57
F.A. SI1	1,41	1,35
F.A. SI2	1,32	1,54
F.A. SI3	1,39	1,59

I valori di pericolosità sismica, sempre secondo la DGR 630/2019, sono risultati pari a:

Indici di pericolosità (cm/s^2)	p.d.c.	-5 m
H_{SM}	495,69	475,92
H_{0408}	287,06	314,43
H_{0711}	173,65	203,59
H_{0515}	148,23	169,78

Sempre a valle dell'analisi di risposta sismica locale, è stato possibile ricavare il profilo con la profondità del CSR (Rapporto di Sforzo Ciclico – Cyclic Stress Ratio), che esprime lo stato di sforzo indotto dal sisma nel terreno ed è dato dal rapporto fra il valore di picco dello sforzo di taglio indotto dalla sollecitazione sismica e la pressione geostatica verticale efficace. A seguire si fornisce il profilo di CSR in formato tabellare.

Profondità (m)	CSR
0	0.077133586
0.3048	0.077133586
0.6096	0.154267172
0.9144	0.211123321
1.2192	0.21984525
1.524	0.22395502
1.8288	0.228050753
2.1336	0.23221773
2.4384	0.237949151
2.7432	0.245780743
3.048	0.253731648
3.3528	0.261762961
3.6576	0.269753539
3.9624	0.276418021
4.2672	0.280812277
4.572	0.285176811
4.8768	0.288956187
5.1816	0.290736953
5.4864	0.291824869
5.7912	0.291416624
6.096	0.290968648
6.4008	0.290510535
6.7056	0.290042203
7.0104	0.287855277
7.3152	0.284509982
7.62	0.281153423
7.9248	0.277788904
8.2296	0.274416101
8.5344	0.271034668
8.8392	0.267636494

9.144	0.264268876
9.4488	0.260865716
9.7536	0.257455793
10.0584	0.254038838
10.3632	0.250614566
10.668	0.247182672
10.9728	0.243780846
11.2776	0.240506908
11.5824	0.237705226
11.8872	0.235087311
12.192	0.232561558
12.4968	0.230069191
12.8016	0.227569901
13.1064	0.225093982
13.4112	0.222728669
13.716	0.220355944
14.0208	0.218263465
14.3256	0.216288944
14.6304	0.21430998
14.9352	0.212348987
15.24	0.210432778
15.5448	0.208551547
15.8496	0.206666038
16.1544	0.204776136
16.4592	0.203023963
16.764	0.20133362
17.0688	0.199640301
17.3736	0.197936321
17.6784	0.196195118
17.9832	0.19448581
18.288	0.192773943
18.5928	0.191059446
18.8976	0.189347953
19.2024	0.187637407
19.5072	0.185919348
19.812	0.184170689

Lo stesso profilo di CSR è stato inserito nel codice di calcolo per la verifica a liquefazione, di cui si tratterà nel seguente capitolo.

4.1.2. Verifica suscettività a liquefazione

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 poi 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 e 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 distanze $R(km)$ 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 Riccione entrambe le condizioni sono verificate e viene fornito un valore di magnitudo di riferimento per la liquefazione pari a **6,14**. Per la PGA è stato scelto il valore ottenuto dall'analisi di risposta sismica locale sopra esposta, pari a **0,29g**. In realtà, quest'ultimo valore è indispensabile nelle verifiche a liquefazione per costruire il profilo di CSR in modo empirico: avendo eseguito un'analisi di risposta sismica locale, il profilo "reale" del CSR è dato.

Si è quindi proceduto ad un'analisi di suscettibilità alla liquefazione in corrispondenza delle 4 verticali penetrometriche con piezocono (CPTu), utilizzando l'algoritmo di calcolo sviluppato da Boulanger & Idriss (2014)⁷ assegnando una percentuale di fini pari al 20% allo strato di sabbie compreso tra piano campagna e circa -7 m (così come da analisi granulometrica eseguita sulla carota di sondaggio dai progettisti). L'analisi è stata condotta eliminando i primi 5 m di terreno (che ospiteranno il piano interrato) ed imponendo un carico unitario in fondazione pari a 95 kPa.

I risultati della verifica sono riportati in tabella 1:

CPTu	% fini	IPL	Cedimenti verticali (cm)
CPTu-1	20	2	3
CPTu-2	20	3	4
CPTu-3	20	4,8	6
CPTu-4	20	2,4	4

Tabella 1 – Risultati dell'analisi di suscettibilità a liquefazione utilizzando il metodo di Boulanger & Idriss (2014) con coefficienti C_{Fc} sito-specifici.

Come si vede da tabella 1, l'IPL varia entro l'intervallo 2-4,8 che, in base alla classificazione di Sonmez (2003), rientra nella classe di pericolosità "**moderata**":

⁷ Boulanger, R.W., Idriss, I.M., 2014. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Davis, California.

LPI	Pericolosità di liquefazione
0	Nulla
$0 \leq LPI \leq 2$	Bassa
$2 \leq LPI \leq 5$	Moderata
$5 \leq LPI \leq 15$	Alta
$LPI > 15$	Molto alta

Tabella 2 – Valori soglia della pericolosità di liquefazione (da: Sonmez, 2003).

In particolare, i risultati dell'analisi (riportati in dettaglio in Allegato 7), mostrano come il valore maggiore dell'indice di potenziale liquefazione (IPL) sia maggiore in corrispondenza della CPTu-3.



Figura 27 - Microzonazione sismica dell'area (sensu DGR 630/2019) a valle delle analisi di risposta sismica locale e potenziale liquefazione eseguite in questo studio, con riferimento al piano di posa delle fondazioni a -5 m dal p.d.c. Con il retino intrecciato a sfondo giallo viene indicata la presenza di condizioni geotecniche che favoriscono lo sviluppo di fenomeni di liquefazione in condizioni sismiche e fattori di amplificazione sismici ed indici di pericolosità sismica come indicati all'interno del riquadro.

5. SINTESI DELL'ANALISI DEI DATI RACCOLTI E CONCLUSIONI

Dalle prove geognostiche eseguite per il presente studio emerge come la zona in esame sia caratterizzata da un sottosuolo composto, nei primi 6/7 m dal piano campagna, da terreni sabbiosi da mediamente addensati, nei primi 3 m, a poco addensati, da -3 a -7 m. Alle sabbie più superficiali seguono alternanze di limi argillosi e argille fino al contatto con un livello ghiaioso compreso tra 27 e 28 m, a cui seguono nuovamente argille limose fino -34 m.

I parametri di resistenza meccanica dei terreni sabbiosi risultano discreti nei primi 3 m dal p.d.c., per poi abbassarsi su valori mediocri nello spessore compreso tra -3 e -6/7 m, dove il grado di addensamento diviene basso. I terreni limo-argillosi ed argillosi, per contro, mostrano i valori relativamente più bassi nei primi 7 m della sequenza fine (tra -7 e -14 m); oltre i -14 m la coesione non drenata aumenta in modo costante con la profondità raggiungendo valori buoni.

La soggiacenza della falda più superficiale, misurata all'interno di un vicino pozzo per acqua, è risultata intorno a -2 m dal piano campagna. Il report Arpae sulla qualità delle acque sotterranee in Provincia di Rimini (2014-2016) identifica una soggiacenza media annua dell'acquifero freatico costiero da -1 a -2 m e una soggiacenza media annua dei corpi idrici liberi e confinati superiori compresa tra -5 e -10 m.

Per la caratterizzazione sismica del terreno sono state utilizzate le indagini Down-hole e HVSR eseguite all'interno dell'area in studio, che hanno restituito un valore di V_{s30} pari a 285 m/s ed una frequenza fondamentale di vibrazione del terreno pari circa 1,6 Hz.

Secondo normativa, la categoria di appartenenza della stratigrafia locale è la **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.).

Relativamente alla microzonazione sismica, le indagini eseguite per questo studio hanno permesso di confermare quanto già individuato per l'area dagli studi di microzonazione sismica di II livello eseguiti nel 2014/2015 per il Comune di Riccione, ovvero la presenza delle 4 condizioni che possono favorire l'insorgenza di fenomeni di liquefazione in caso di eventi sismici; tra queste, le indagini penetrometriche hanno permesso di circoscrivere lo spessore sabbioso meno addensato, in grado di fornire il contributo maggiore allo sviluppo di fenomeni di liquefazione, ovvero lo spessore compreso tra -3 e -6/7 m.

Considerando che il piano di posa delle fondazioni raggiungerà circa -5 m dall'attuale p.d.c., lo spessore potenzialmente liquefacibile viene a ridursi a circa 2/2,5 m, diminuendo, in tal modo, il valore dell'Indice di Potenziale Liquefazione, il cui calcolo è stato qui eseguito a valle di un'analisi di risposta sismica locale da cui è stato possibile calcolare il profilo di CSR. I valori di IPL calcolati sulle 4 CPTu variano tra 2 e 4,8, con il valore più alto in corrispondenza della CPTu-3, indicativi di una pericolosità "moderata".

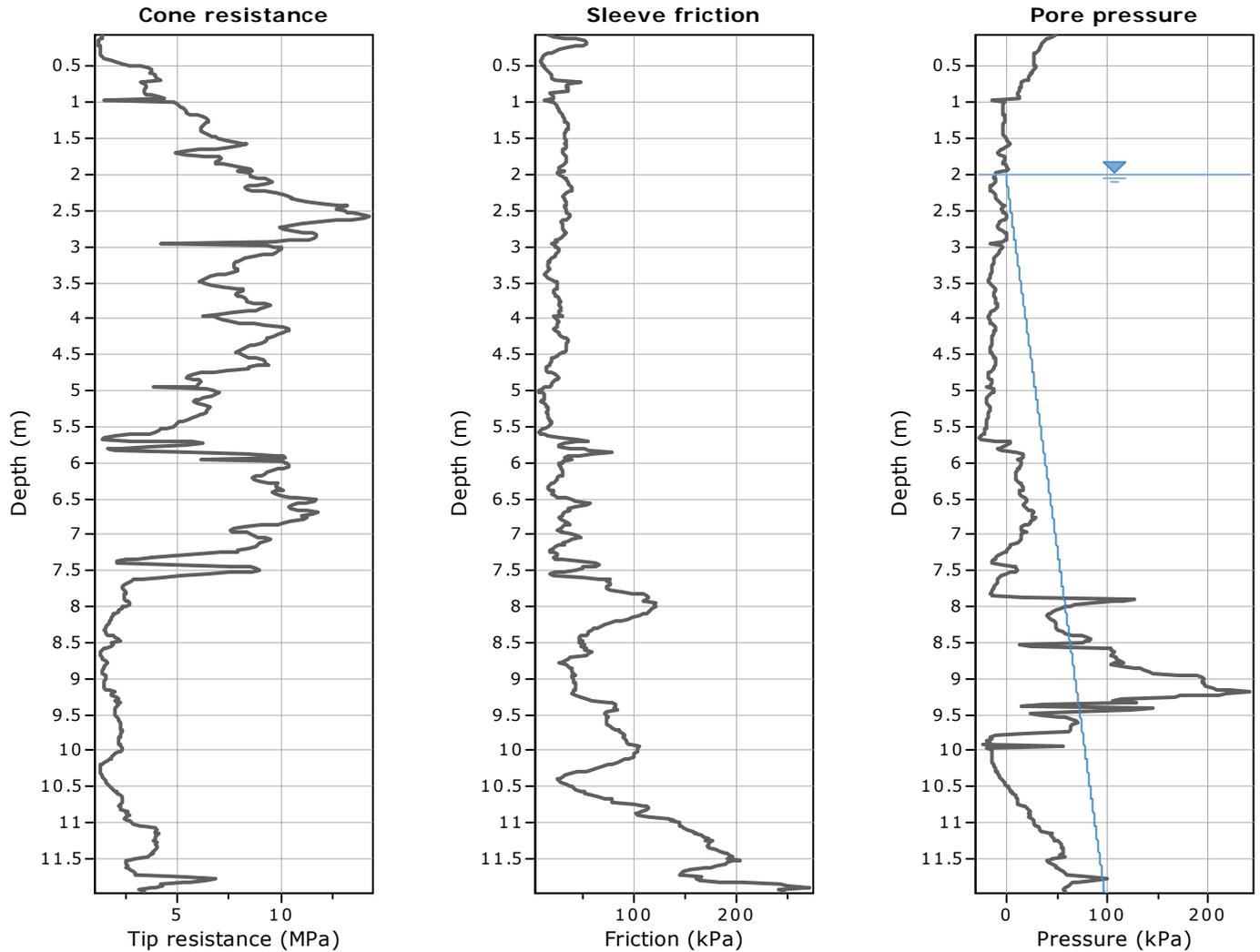
E' evidente che le operazioni di scavo per la realizzazione del piano interrato dovranno avvenire mediante l'impiego di sistemi di sostegno dell'intero perimetro, quali palancole o palificate, attrezzate con well-point per eliminare l'acqua sotterranea dall'area di lavoro.

Modena, 15/10/2019

Il Tecnico
Dott. Geol. Valeriano Franchi

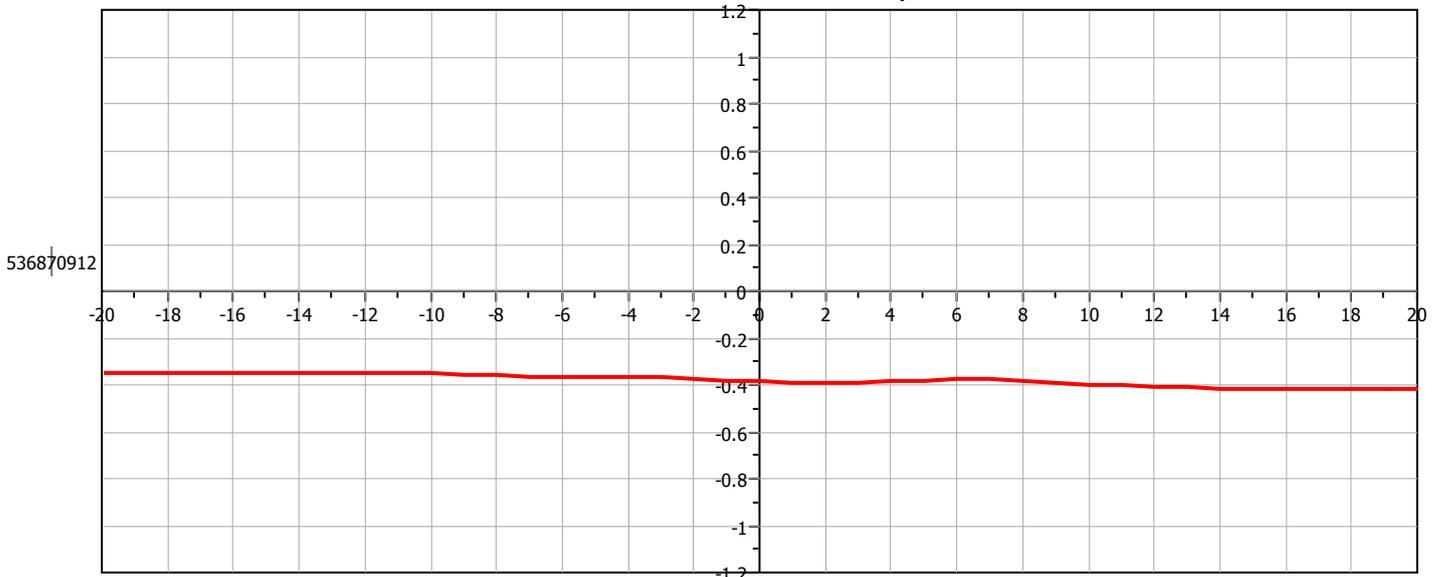
Allegato 1

Indagini geognostiche eseguite per questo studio (4 CPTu)

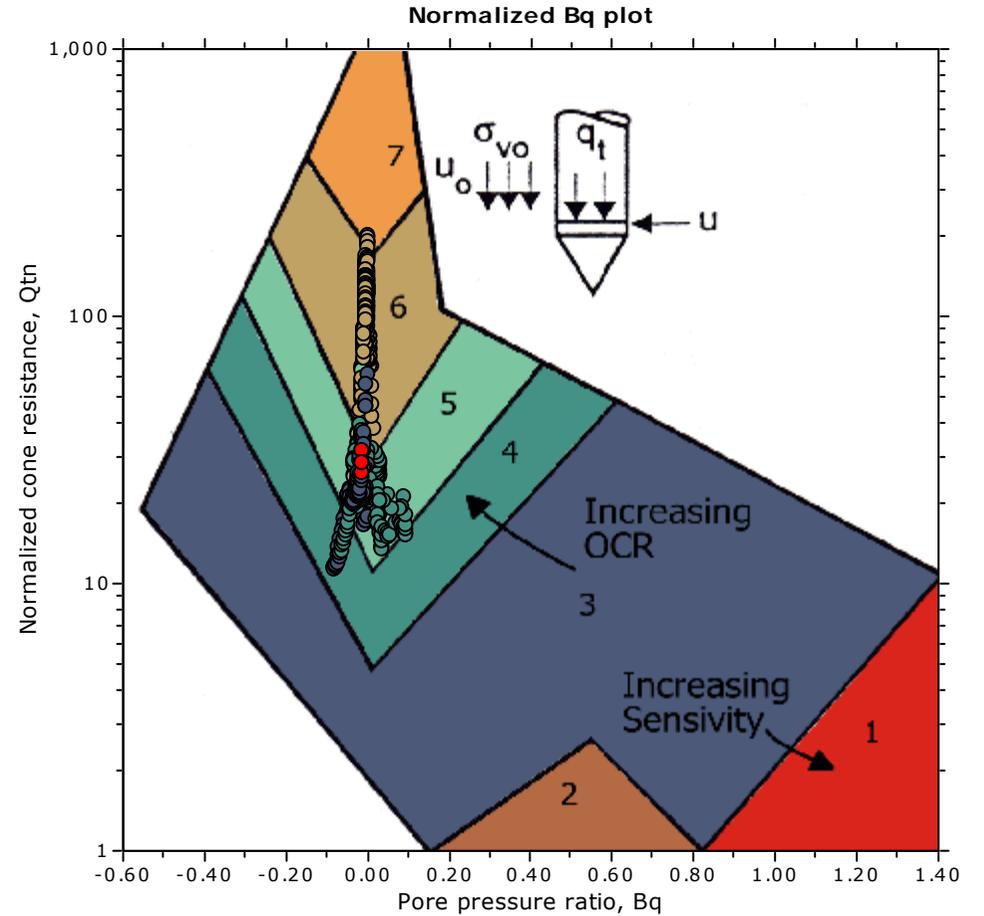
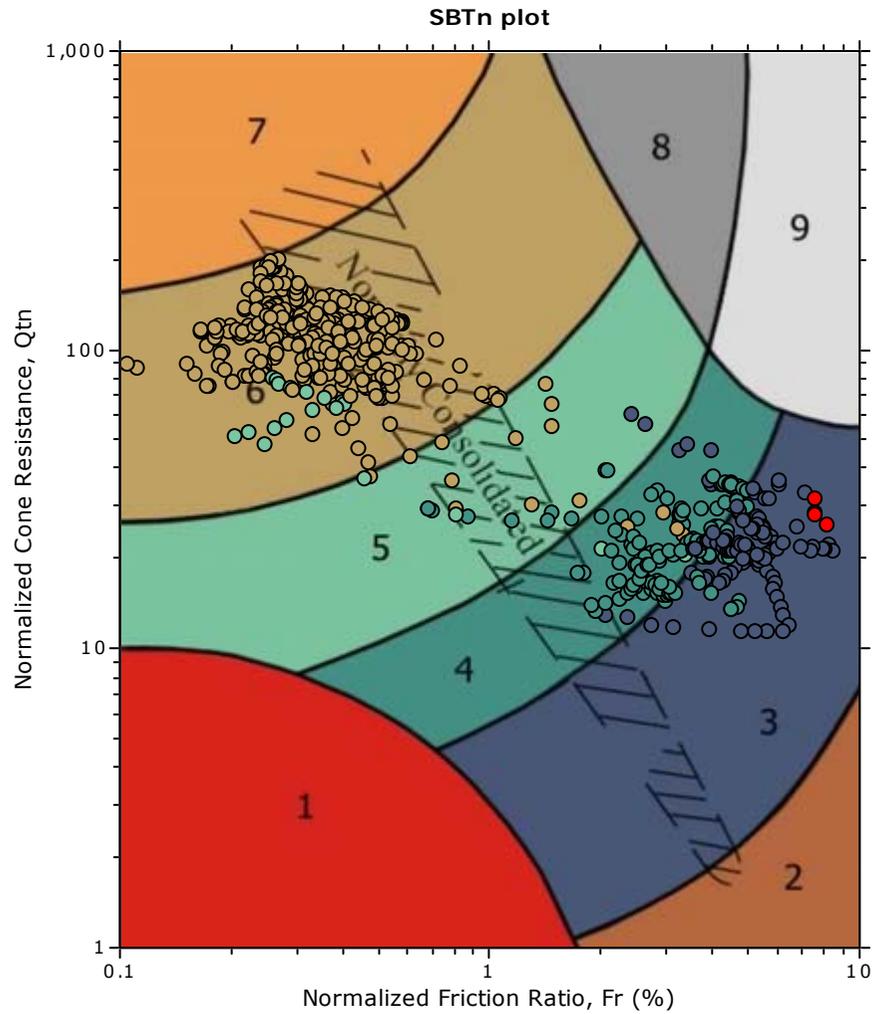


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s

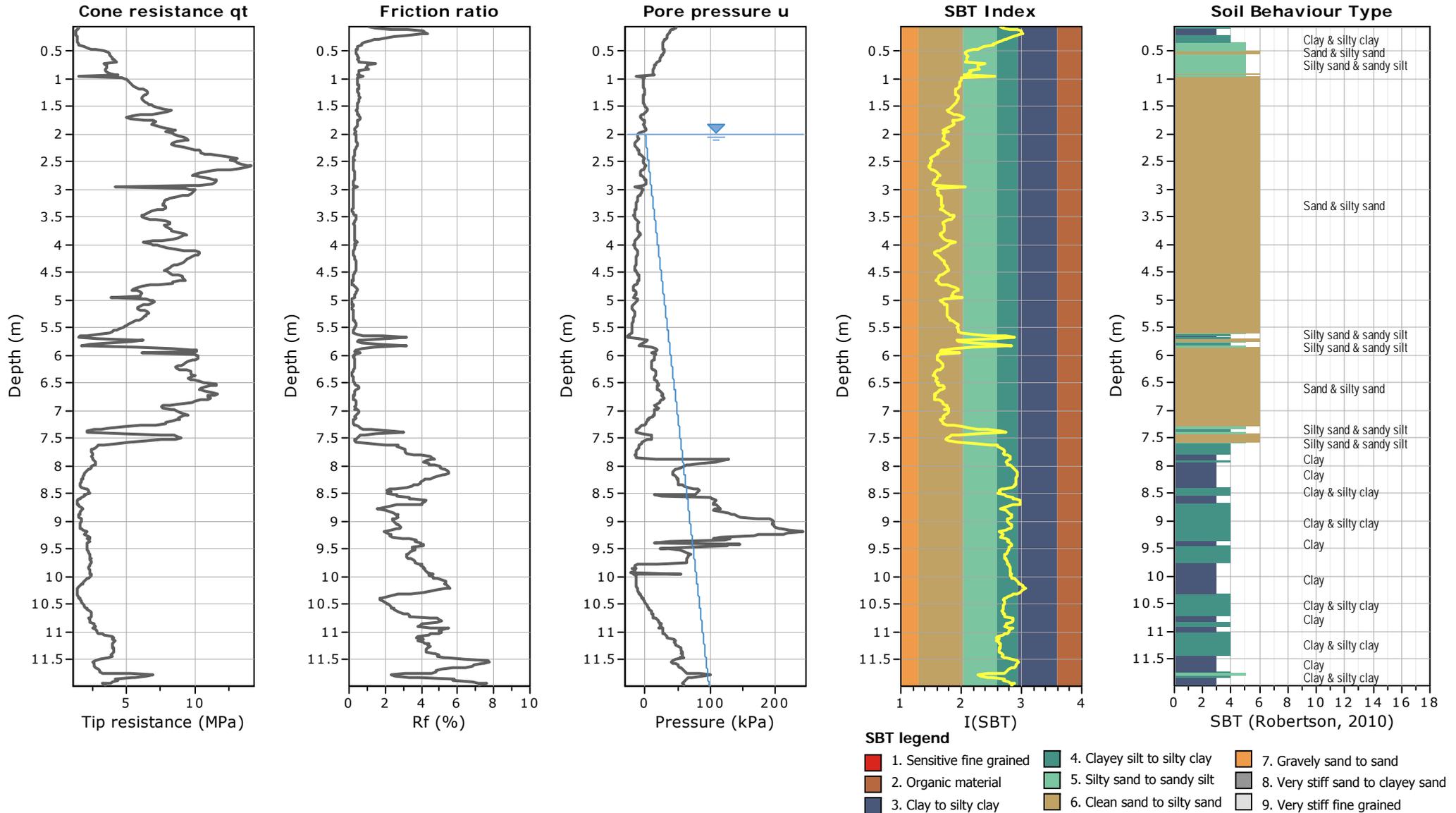


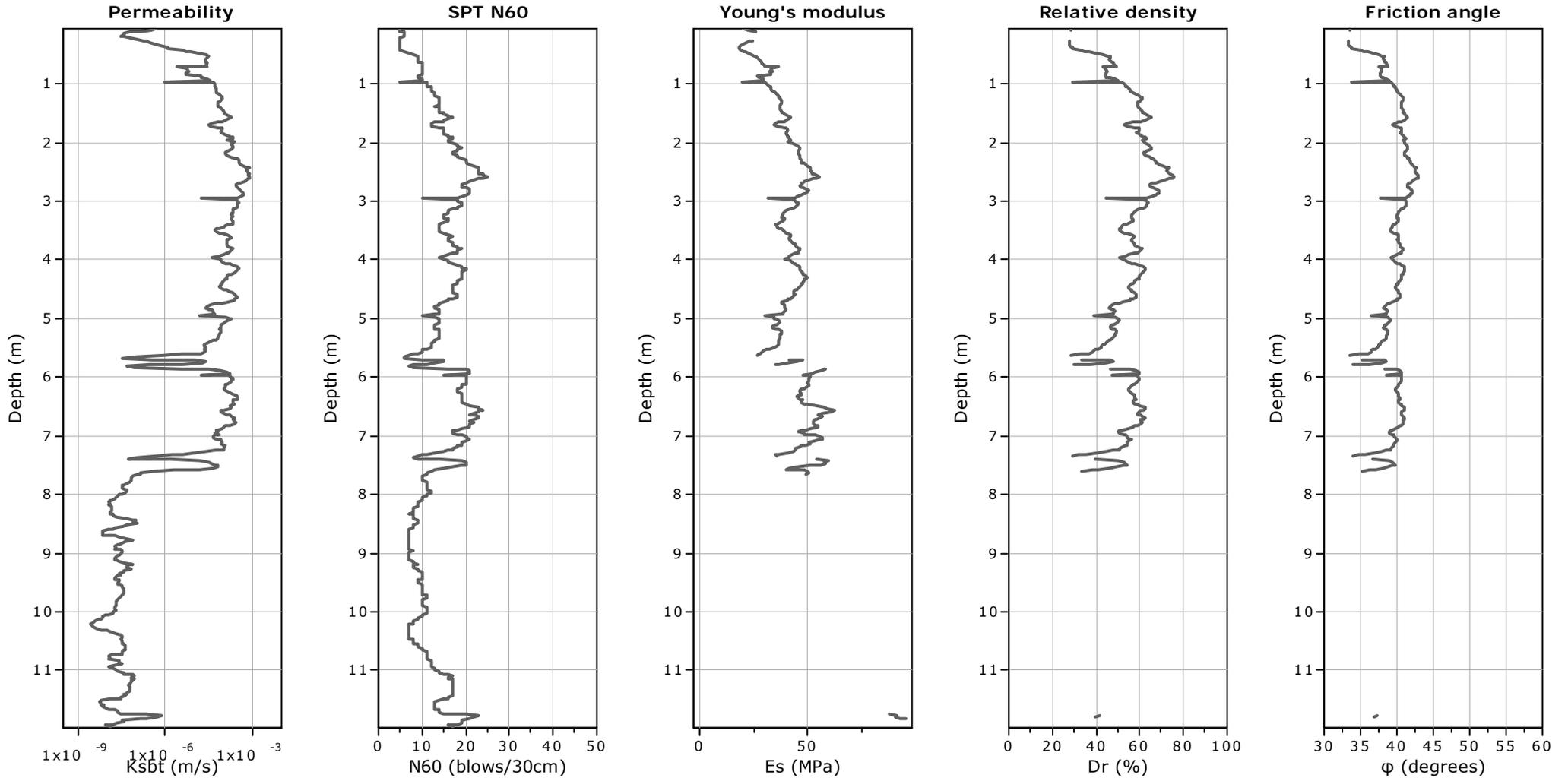
SBT - Bq plots (normalized)



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 |





Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

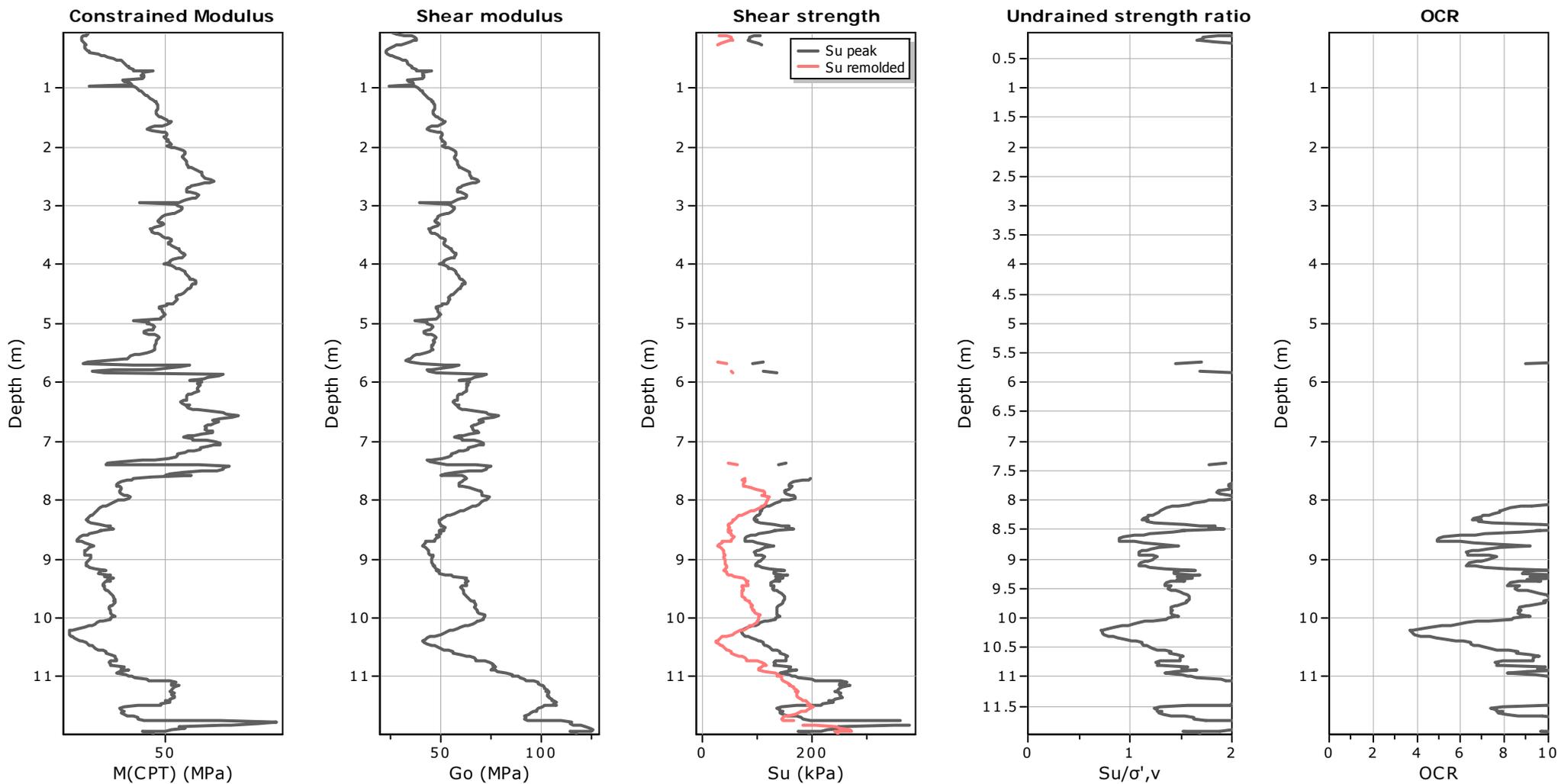
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr}: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_m (Robertson, 2009)

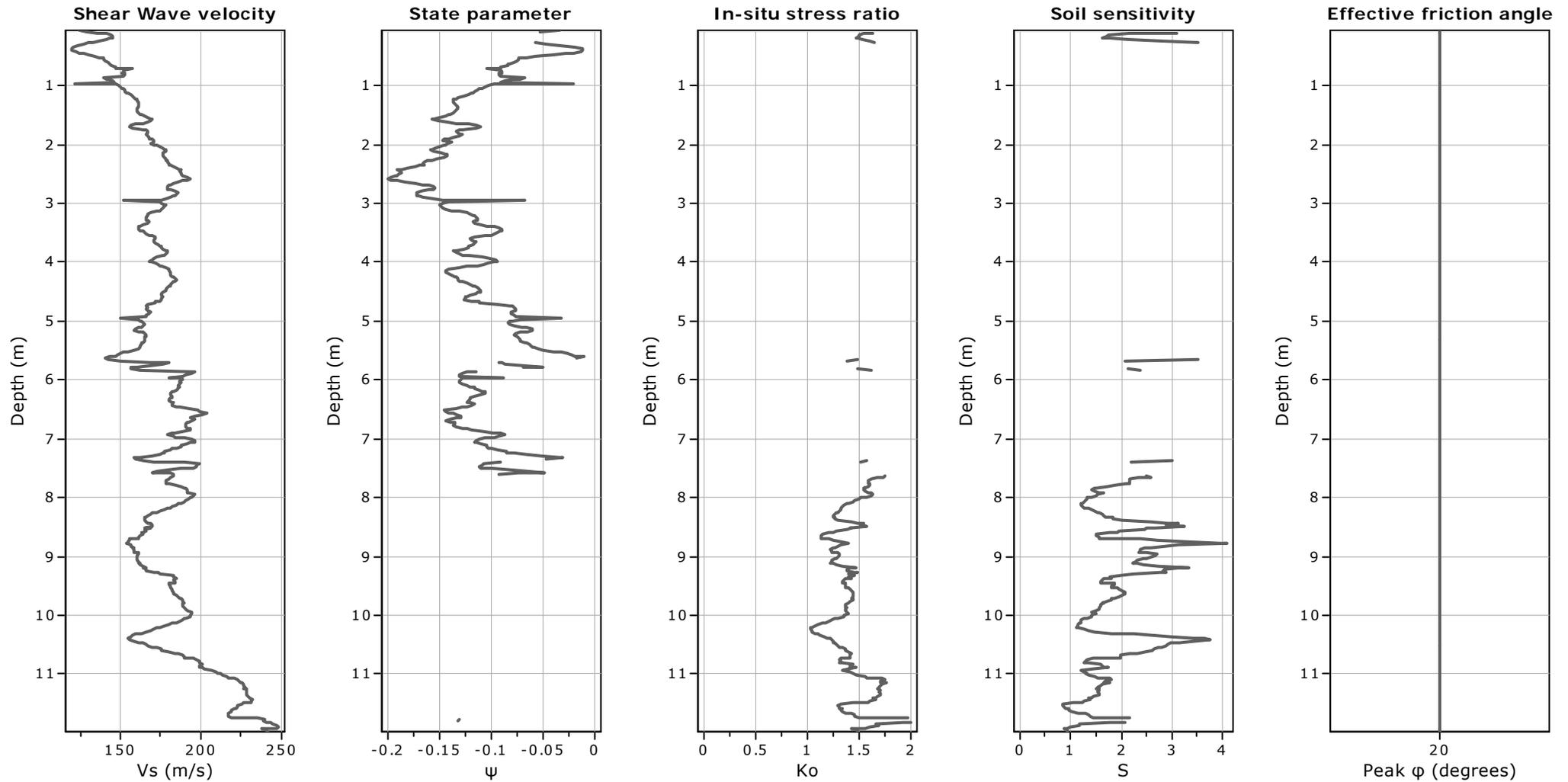
Go: Based on variable *alpha* using I_c (Robertson, 2009)

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

OCR factor for clays, N_{kt} : Auto

● User defined estimation data

● Flat Dilatometer Test data



Calculation parameters

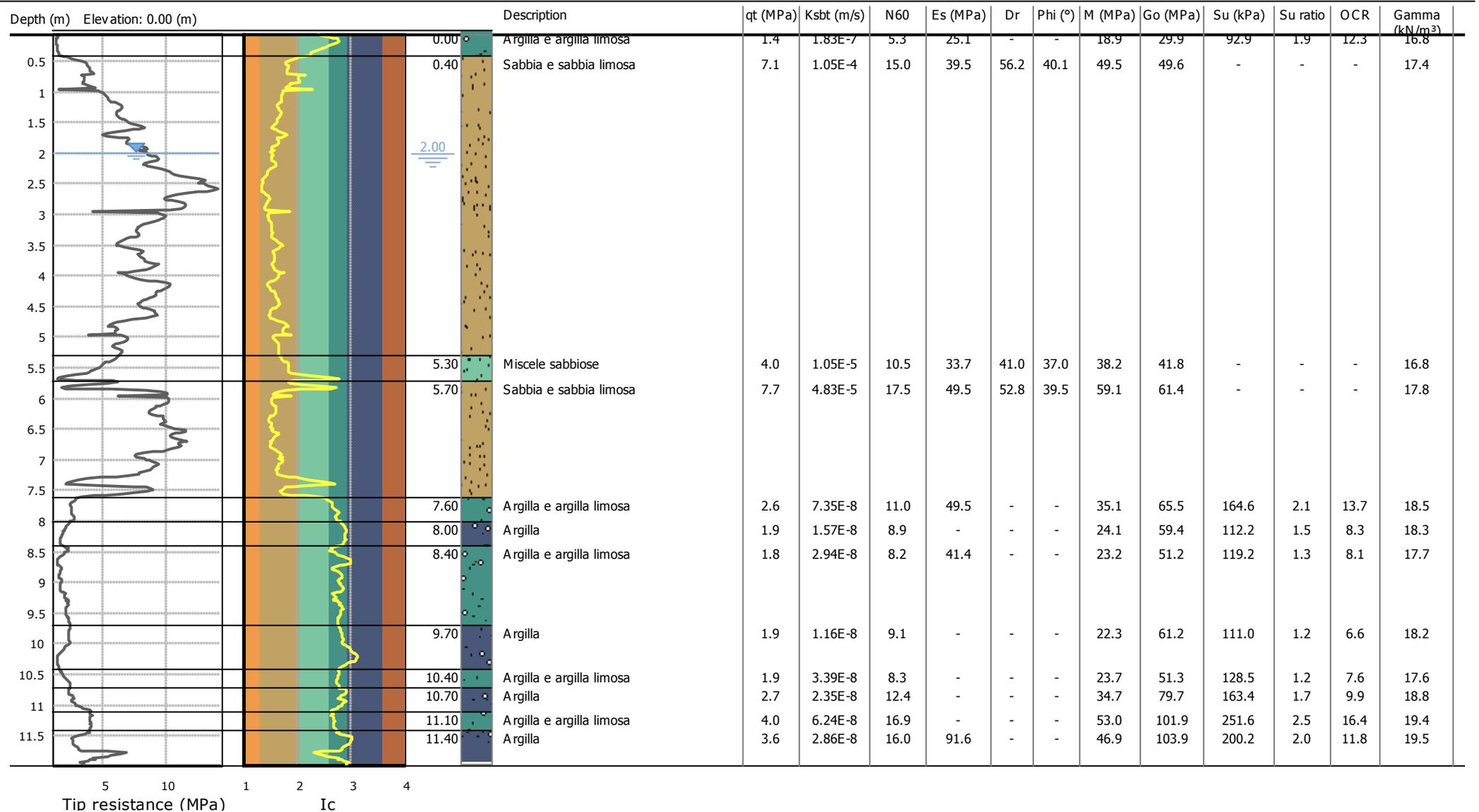
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.10

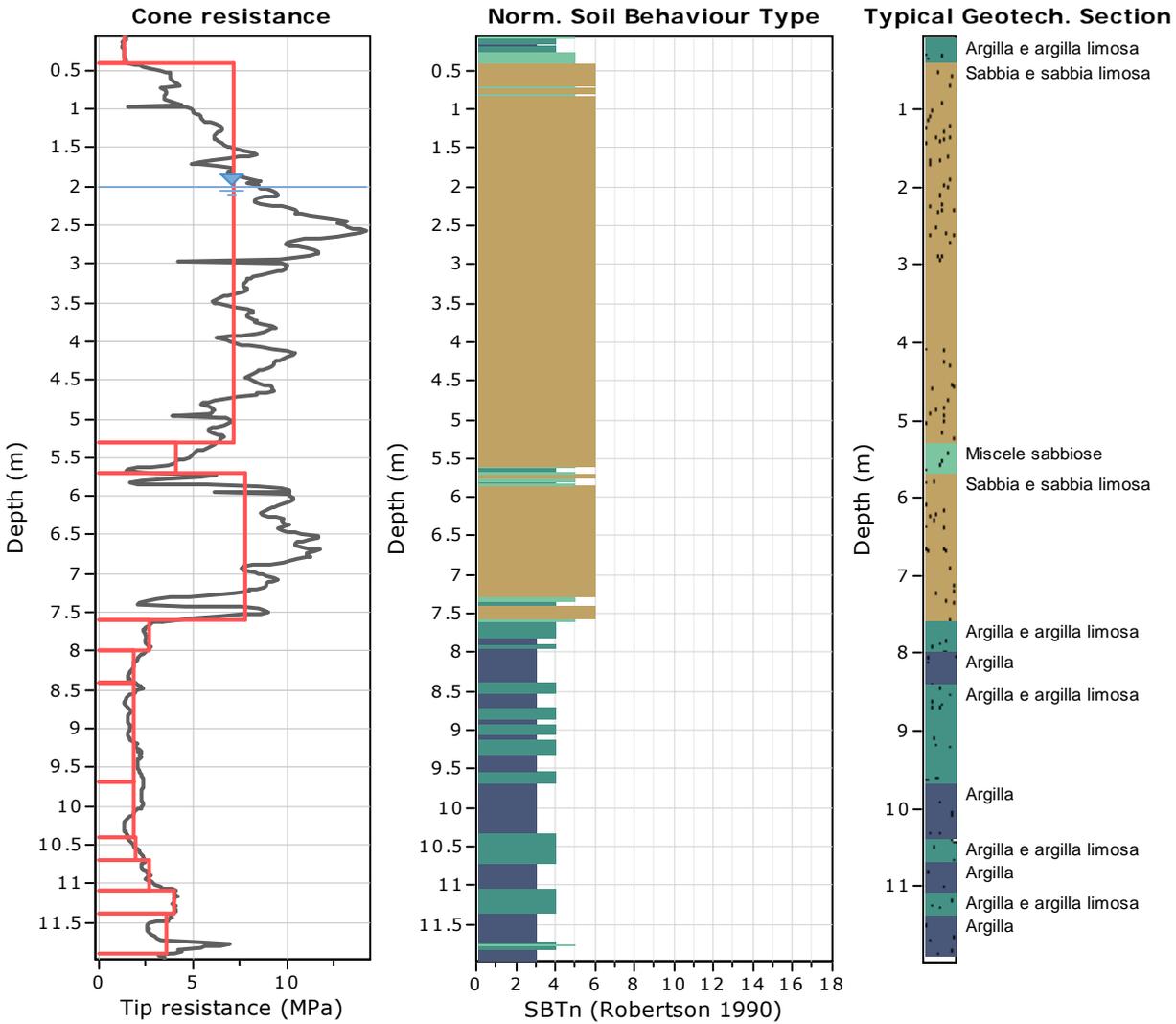
—●— User defined estimation data

Dott. Geol. Valeriano Franchi
 V.le Caduti in Guerra, 1
 41121 Modena
 valerianofranchi@tin.it

Project: **Bosco verticale**
 Location: **Riccione**

CPT: CPTu-1
 Total depth: 11.98 m





Tabular results

:: Layer No: 1 ::		
Code: 1	Start depth: 0.00 (m), End depth: 0.40 (m)	
Description: Argilla e argilla limosa		
Basic results		
Total cone resistance:	1.35 ±0.07 MPa	
Sleeve friction:	24.63 ±17.05 kPa	
SBT _n :	4	
SBT _n description:	Clay & silty clay	
Estimation results		
Permeability:	1.83E-07 ±4.40E-07 m/s	Constrained Mod.: 18.88 ±0.98 MPa
N60:	5.26 ±0.46 blows	Go: 29.89 ±5.65 MPa
Es:	25.13 ±0.83 MPa	Su: 92.87 ±9.68 kPa
Dr (%):	0.00 ±0.00	Su ratio: 1.86 ±0.07
φ (degrees):	0.00 ±0.00 °	O.C.R.: 12.27 ±1.61
Unit weight:	16.79 ±0.70 kN/m ³	

.: Layer No: 2 .:

Code: 2 Start depth: 0.40 (m), End depth: 5.30 (m)

Description: Sabbia e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 7.11 ±2.53 MPa

Sleeve friction: 24.48 ±8.05 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 1.05E-04 ±1.77E-04 m/s

N60: 15.03 ±3.84 blows

Es: 39.54 ±7.00 MPa

Dr (%): 56.24 ±8.33

φ (degrees): 40.06 ±1.49 °

Unit weight: 17.42 ±0.50 kN/m³

Constrained Mod.: 49.50 ±8.86 MPa

Go: 49.56 ±8.77 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: 5.30 (m), End depth: 5.70 (m)

Description: Miscele sabbiose

Basic results

Total cone resistance: 4.03 ±1.56 MPa

Sleeve friction: 16.61 ±11.78 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 1.05E-05 ±2.80E-05 m/s

N60: 10.54 ±2.54 blows

Es: 33.69 ±4.35 MPa

Dr (%): 40.98 ±5.60

φ (degrees): 37.04 ±1.39 °

Unit weight: 16.75 ±0.50 kN/m³

Constrained Mod.: 38.19 ±8.73 MPa

Go: 41.76 ±5.43 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

.: Layer No: 4 .:

Code: 4 Start depth: 5.70 (m), End depth: 7.60 (m)

Description: Sabbia e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 7.74 ±2.64 MPa

Sleeve friction: 32.01 ±12.87 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 4.83E-05 ±1.05E-04 m/s

N60: 17.53 ±3.94 blows

Es: 49.51 ±6.09 MPa

Dr (%): 52.84 ±7.69

φ (degrees): 39.46 ±1.58 °

Unit weight: 17.76 ±0.40 kN/m³

Constrained Mod.: 59.13 ±11.38 MPa

Go: 61.42 ±8.01 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: 7.60 (m), End depth: 8.00 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 2.64 ±0.44 MPa

Sleeve friction: 89.77 ±21.92 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 7.35E-08 ±4.30E-07 m/s

N60: 10.97 ±0.78 blows

Es: 49.54 ±0.96 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.53 ±0.26 kN/m³

Constrained Mod.: 35.13 ±6.46 MPa

Go: 65.47 ±5.26 MPa

Su: 164.63 ±13.58 kPa

Su ratio: 2.12 ±0.12

O.C.R.: 13.74 ±1.46

.: Layer No: 6 .:

Code: 6 Start depth: 8.00 (m), End depth: 8.40 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 1.87 ±0.31 MPa

Sleeve friction: 84.48 ±25.12 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay

Estimation results

Permeability: 1.57E-08 ±5.66E-09 m/s

N60: 8.93 ±1.19 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.33 ±0.40 kN/m³

Constrained Mod.: 24.08 ±4.32 MPa

Go: 59.42 ±8.32 MPa

Su: 112.17 ±18.08 kPa

Su ratio: 1.48 ±0.28

O.C.R.: 8.25 ±1.81

.: Layer No: 7 .:

Code: 7 Start depth: 8.40 (m), End depth: 9.70 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.82 ±0.31 MPa

Sleeve friction: 51.27 ±16.41 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 2.94E-08 ±2.27E-08 m/s

N60: 8.15 ±1.23 blows

Es: 41.42 ±41.42 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.75 ±0.39 kN/m³

Constrained Mod.: 23.19 ±4.32 MPa

Go: 51.16 ±7.41 MPa

Su: 119.21 ±22.48 kPa

Su ratio: 1.32 ±0.22

O.C.R.: 8.06 ±1.79

.: Layer No: 8 .:

Code: 8 Start depth: 9.70 (m), End depth: 10.40 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 1.86 ±0.42 MPa

Sleeve friction: 76.68 ±23.05 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay

Estimation results

Permeability: 1.16E-08 ±1.02E-08 m/s

N60: 9.11 ±1.56 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.22 ±0.49 kN/m³

Constrained Mod.: 22.31 ±6.99 MPa

Go: 61.15 ±9.42 MPa

Su: 110.95 ±28.39 kPa

Su ratio: 1.22 ±0.33

O.C.R.: 6.63 ±2.27

.: Layer No: 9 .:

Code: 9 Start depth: 10.40 (m), End depth: 10.70 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.90 ±0.32 MPa

Sleeve friction: 42.93 ±16.83 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 3.39E-08 ±5.06E-09 m/s

N60: 8.34 ±1.32 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.56 ±0.48 kN/m³

Constrained Mod.: 23.69 ±4.64 MPa

Go: 51.30 ±8.46 MPa

Su: 128.46 ±18.27 kPa

Su ratio: 1.20 ±0.21

O.C.R.: 7.59 ±1.29

.: Layer No: 10 .:

Code: 10 Start depth: 10.70 (m), End depth: 11.10 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 2.68 ±0.51 MPa

Sleeve friction: 116.44 ±24.00 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.35E-08 ±2.08E-08 m/s

N60: 12.39 ±1.74 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.84 ±0.29 kN/m³

Constrained Mod.: 34.75 ±7.18 MPa

Go: 79.71 ±9.17 MPa

Su: 163.37 ±36.12 kPa

Su ratio: 1.70 ±0.33

O.C.R.: 9.88 ±2.73

.: Layer No: 11 .:

Code: 11 Start depth: 11.10 (m), End depth: 11.40 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 3.99 ±0.07 MPa

Sleeve friction: 169.65 ±8.48 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 6.24E-08 ±1.20E-08 m/s

N60: 16.87 ±0.34 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 19.42 ±0.05 kN/m³

Constrained Mod.: 53.03 ±1.03 MPa

Go: 101.92 ±2.10 MPa

Su: 251.58 ±7.56 kPa

Su ratio: 2.52 ±0.06

O.C.R.: 16.38 ±0.73

.: Layer No: 12 .:

Code: 12 Start depth: 11.40 (m), End depth: 11.90 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 3.57 ±1.26 MPa

Sleeve friction: 184.22 ±31.54 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 2.86E-08 ±1.83E-07 m/s

N60: 16.02 ±3.24 blows

Es: 91.62 ±3.96 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 19.48 ±0.23 kN/m³

Constrained Mod.: 46.91 ±17.57 MPa

Go: 103.85 ±10.74 MPa

Su: 200.17 ±71.83 kPa

Su ratio: 2.04 ±0.61

O.C.R.: 11.77 ±5.56

Dott. Geol. Valeriano Franchi

V.le Caduti in Guerra, 1

41121 Modena

valerianofranchi@tin.it

Project: Bosco verticale

Location: Riccione

CPT: CPTu-1

Total depth: 11.98 m, Date: 11/06/2019

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.40	1.83E-07	5.3	25.1	0.0	0.0	18.9	29.9	92.9	1.9	12.3	16.8
0.40		(±4.40E-07)	(±0.5)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.0)	(±5.7)	(±9.7)	(±0.1)	(±1.6)	(±0.7)
0.40	4.90	1.05E-04	15.0	39.5	56.2	40.1	49.5	49.6	0.0	0.0	0.0	17.4
5.30		(±1.77E-04)	(±3.8)	(±7.0)	(±8.3)	(±1.5)	(±8.9)	(±8.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
5.30	0.40	1.05E-05	10.5	33.7	41.0	37.0	38.2	41.8	0.0	0.0	0.0	16.8
5.70		(±2.80E-05)	(±2.5)	(±4.4)	(±5.6)	(±1.4)	(±8.7)	(±5.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
5.70	1.90	4.83E-05	17.5	49.5	52.8	39.5	59.1	61.4	0.0	0.0	0.0	17.8
7.60		(±1.05E-04)	(±3.9)	(±6.1)	(±7.7)	(±1.6)	(±11.4)	(±8.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)
7.60	0.40	7.35E-08	11.0	49.5	0.0	0.0	35.1	65.5	164.6	2.1	13.7	18.5
8.00		(±4.30E-07)	(±0.8)	(±1.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±6.5)	(±5.3)	(±13.6)	(±0.1)	(±1.5)	(±0.3)
8.00	0.40	1.57E-08	8.9	0.0	0.0	0.0	24.1	59.4	112.2	1.5	8.3	18.3
8.40		(±5.66E-09)	(±1.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.3)	(±8.3)	(±18.1)	(±0.3)	(±1.8)	(±0.4)
8.40	1.30	2.94E-08	8.2	41.4	0.0	0.0	23.2	51.2	119.2	1.3	8.1	17.7
9.70		(±2.27E-08)	(±1.2)	(±41.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.3)	(±7.4)	(±22.5)	(±0.2)	(±1.8)	(±0.4)
9.70	0.70	1.16E-08	9.1	0.0	0.0	0.0	22.3	61.2	111.0	1.2	6.6	18.2
10.40		(±1.02E-08)	(±1.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.0)	(±9.4)	(±28.4)	(±0.3)	(±2.3)	(±0.5)
10.40	0.30	3.39E-08	8.3	0.0	0.0	0.0	23.7	51.3	128.5	1.2	7.6	17.6
10.70		(±5.06E-09)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.6)	(±8.5)	(±18.3)	(±0.2)	(±1.3)	(±0.5)
10.70	0.40	2.35E-08	12.4	0.0	0.0	0.0	34.7	79.7	163.4	1.7	9.9	18.8
11.10		(±2.08E-08)	(±1.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.2)	(±9.2)	(±36.1)	(±0.3)	(±2.7)	(±0.3)
11.10	0.30	6.24E-08	16.9	0.0	0.0	0.0	53.0	101.9	251.6	2.5	16.4	19.4
11.40		(±1.20E-08)	(±0.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.0)	(±2.1)	(±7.6)	(±0.1)	(±0.7)	(±0.1)

Dott. Geol. Valeriano Franchi

V.le Caduti in Guerra, 1

41121 Modena

valerianofranchi@tin.it

Project: **Bosco verticale**

Location: **Riccione**

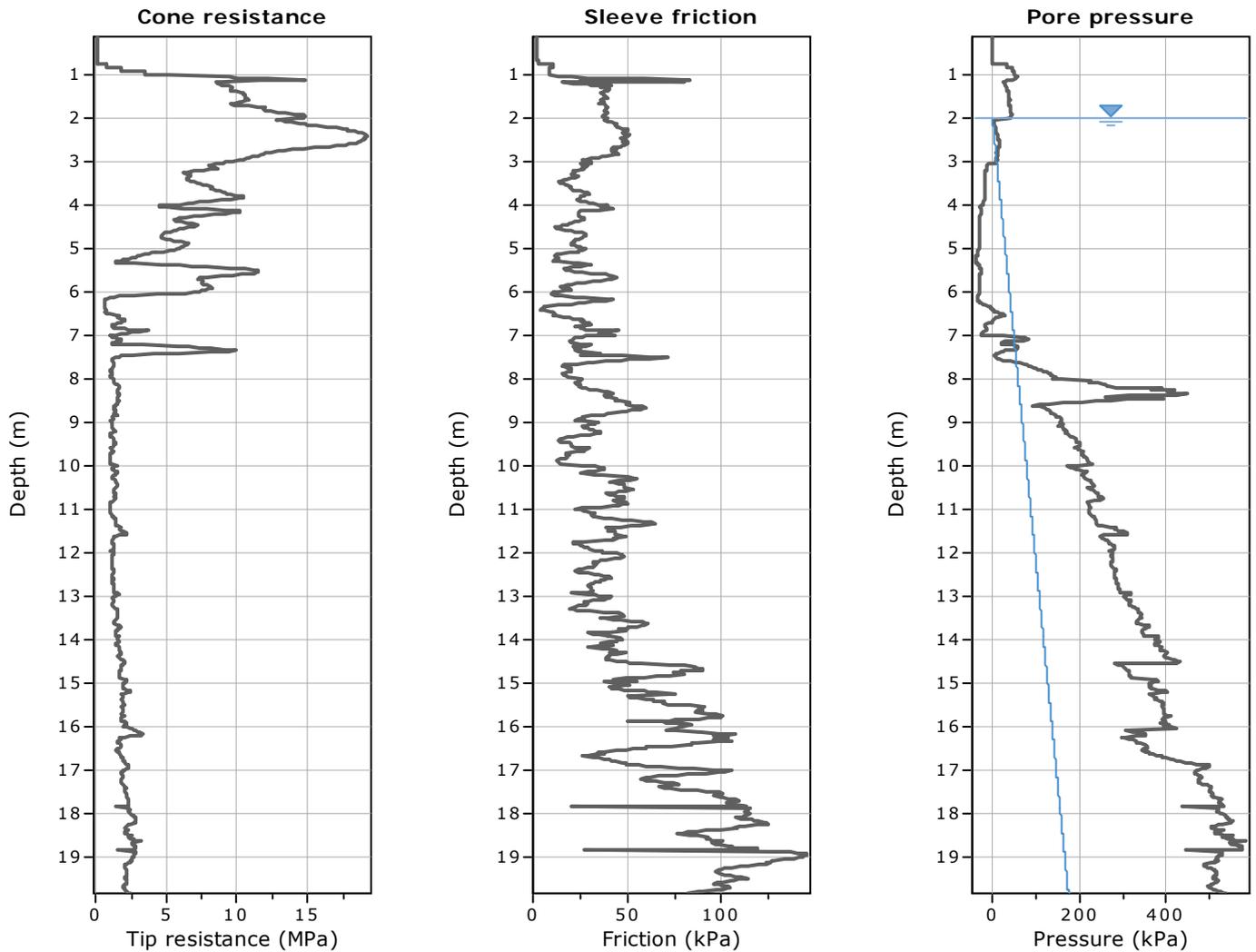
CPT: CPTu-1

Total depth: 11.98 m, Date: 11/06/2019

Summary table of mean values

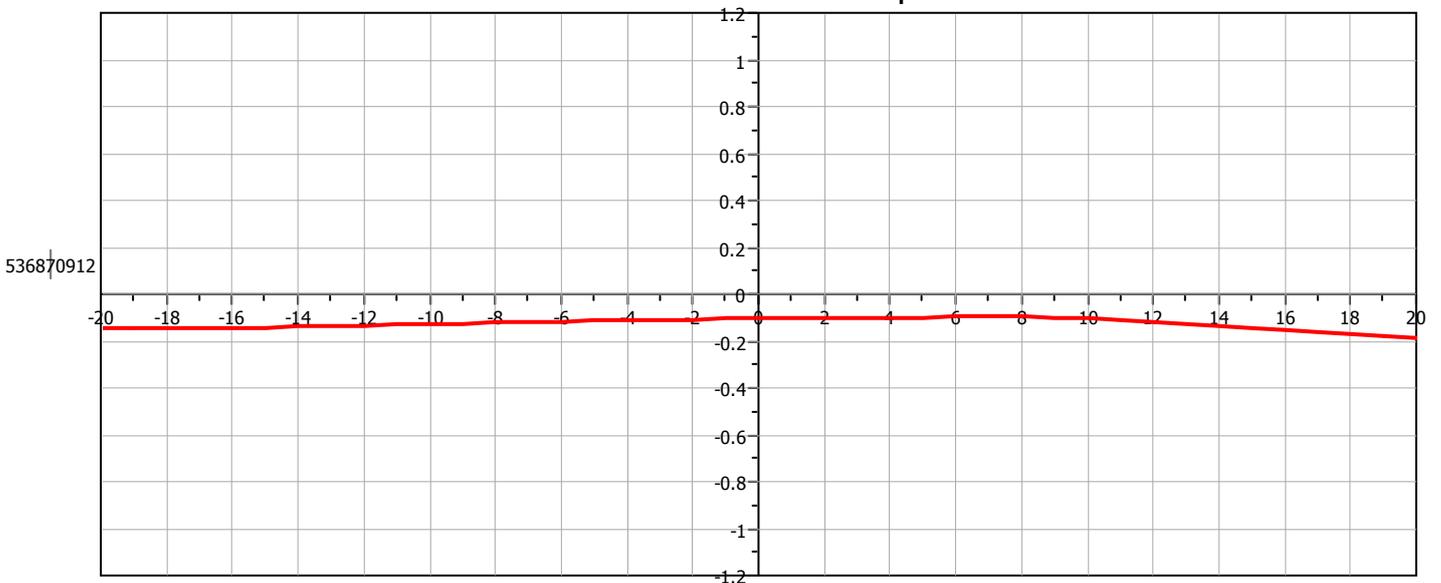
From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
11.40	0.50	2.86E-08	16.0	91.6	0.0	0.0	46.9	103.9	200.2	2.0	11.8	19.5
11.90		(±1.83E-07)	(±3.2)	(±4.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±17.6)	(±10.7)	(±71.8)	(±0.6)	(±5.6)	(±0.2)

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

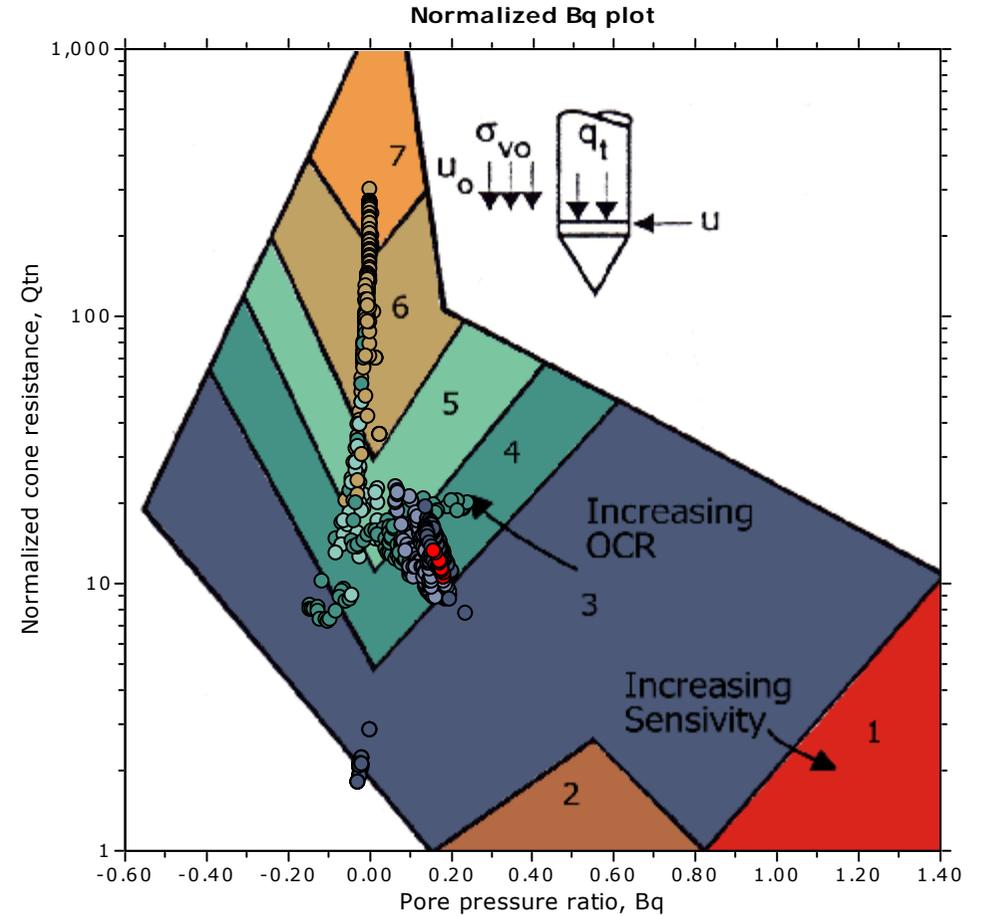
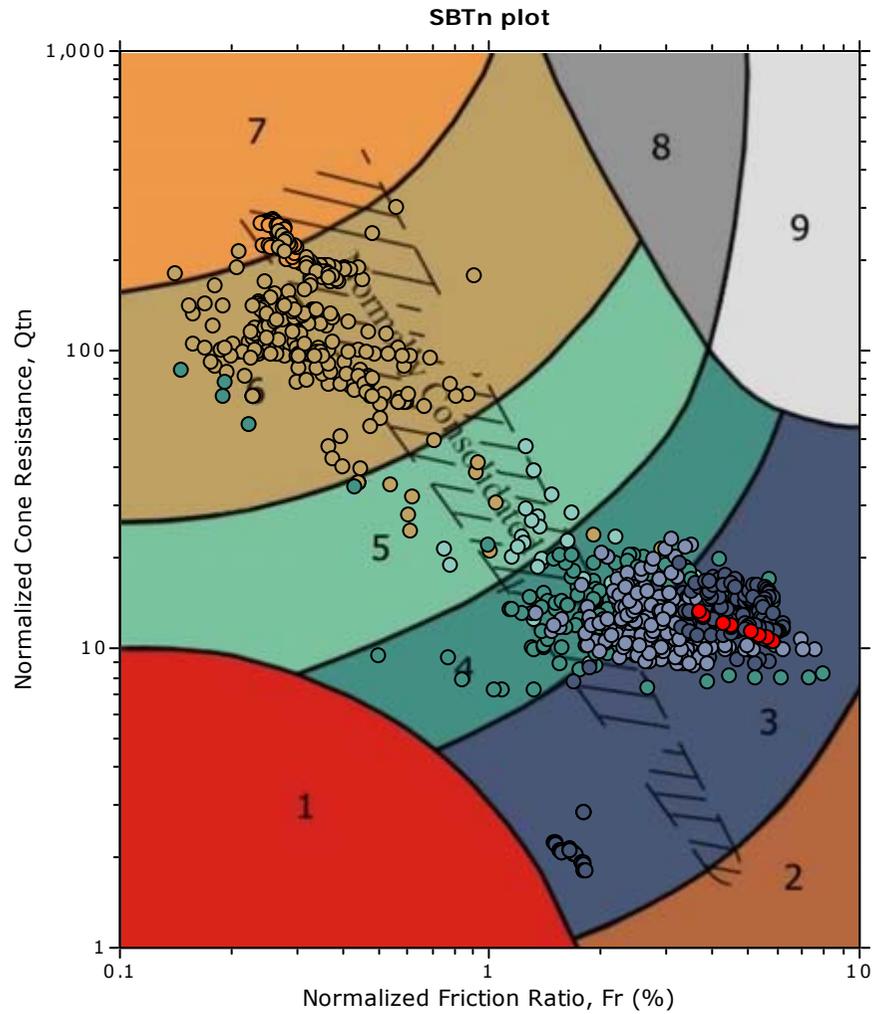


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s

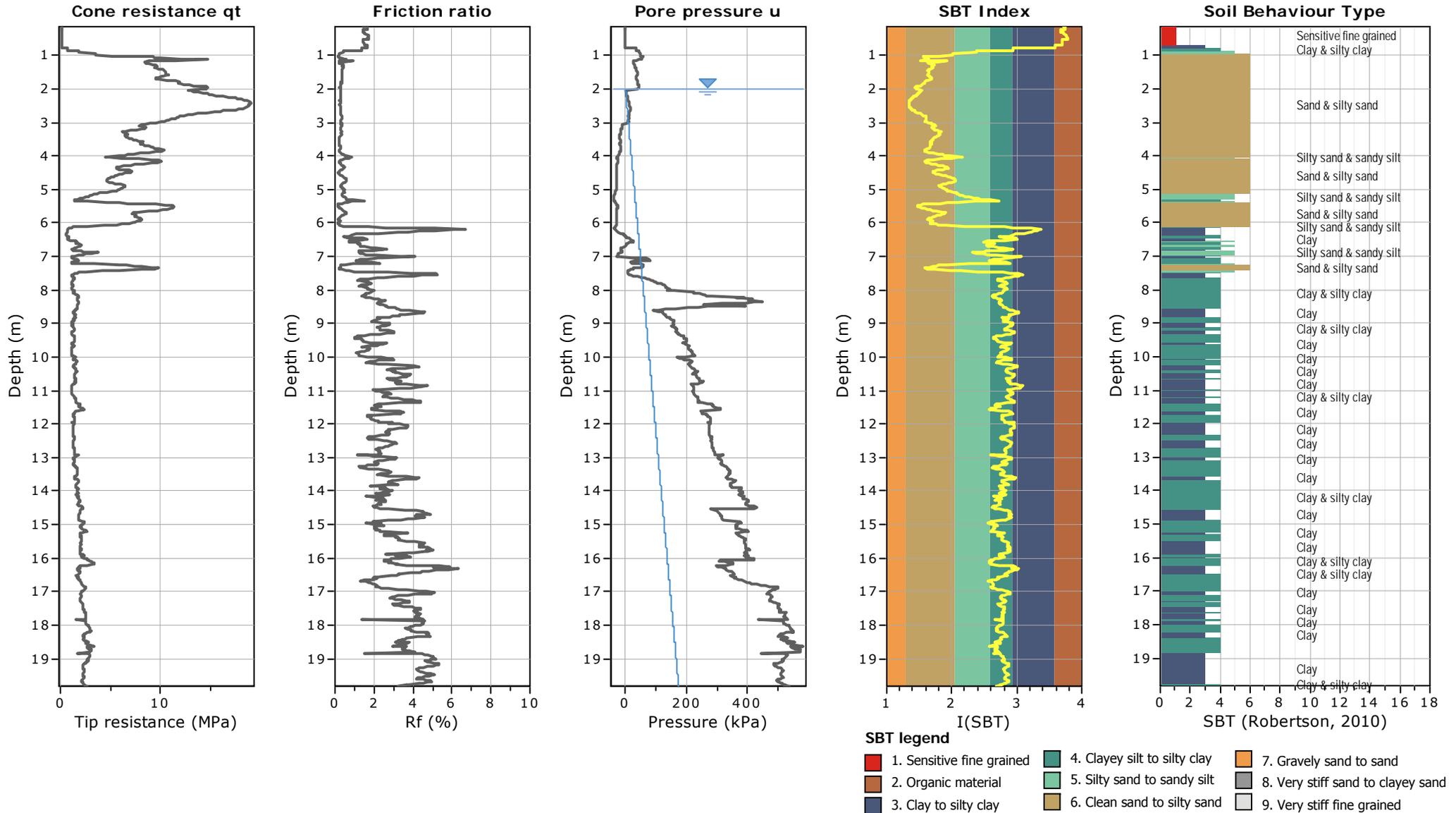


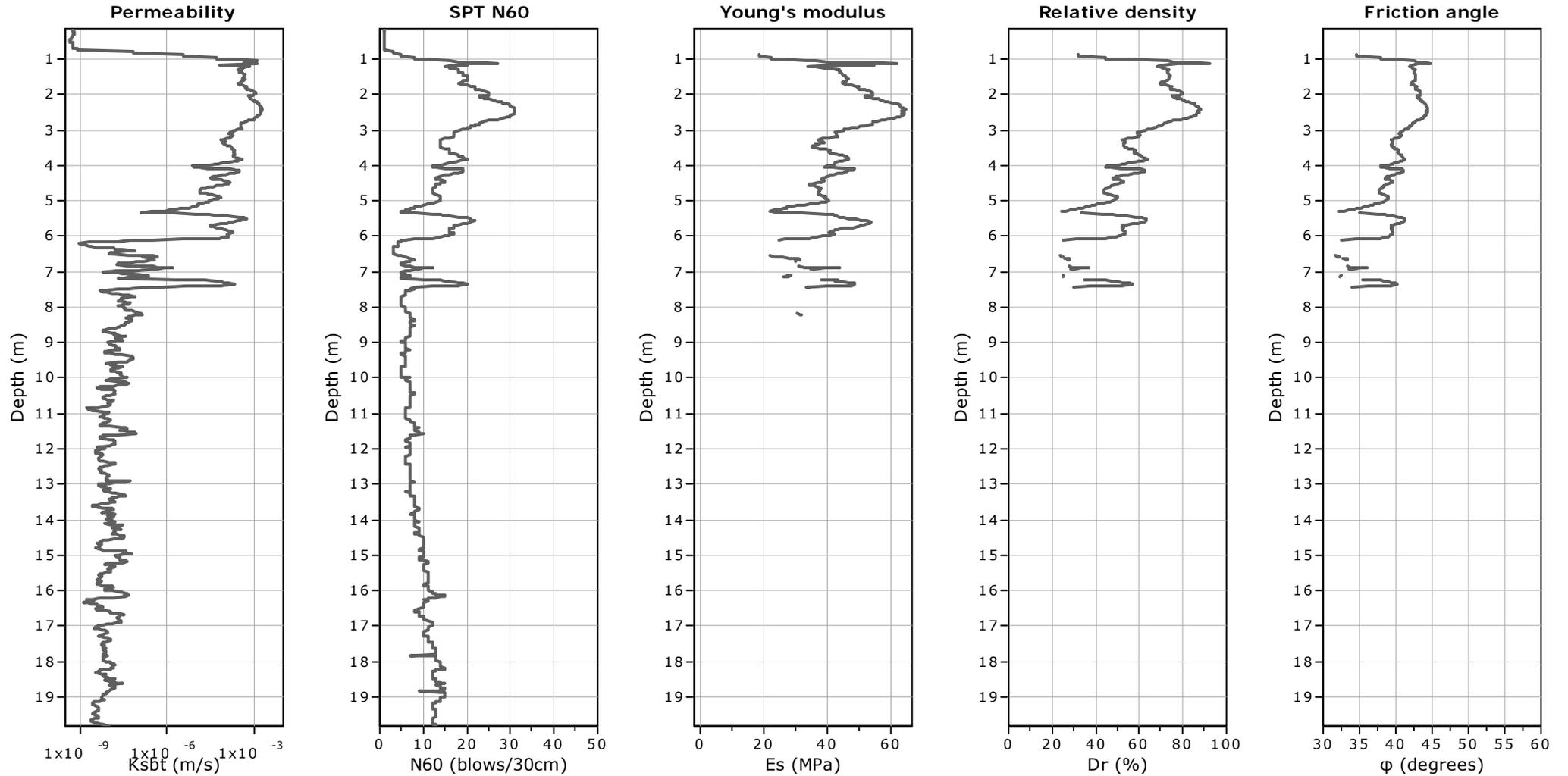
SBT - Bq plots (normalized)



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 |





Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

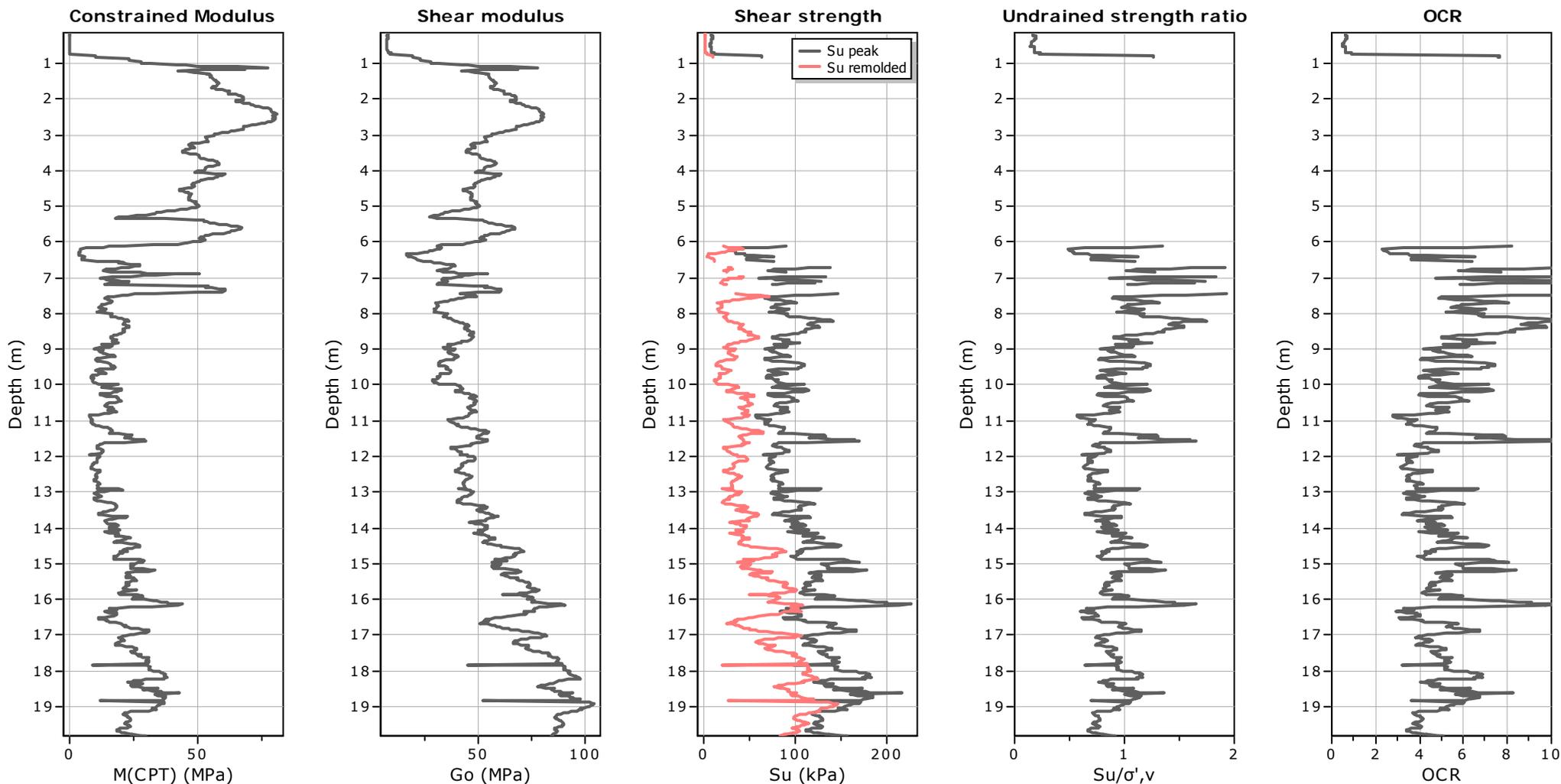
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr}: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_m (Robertson, 2009)

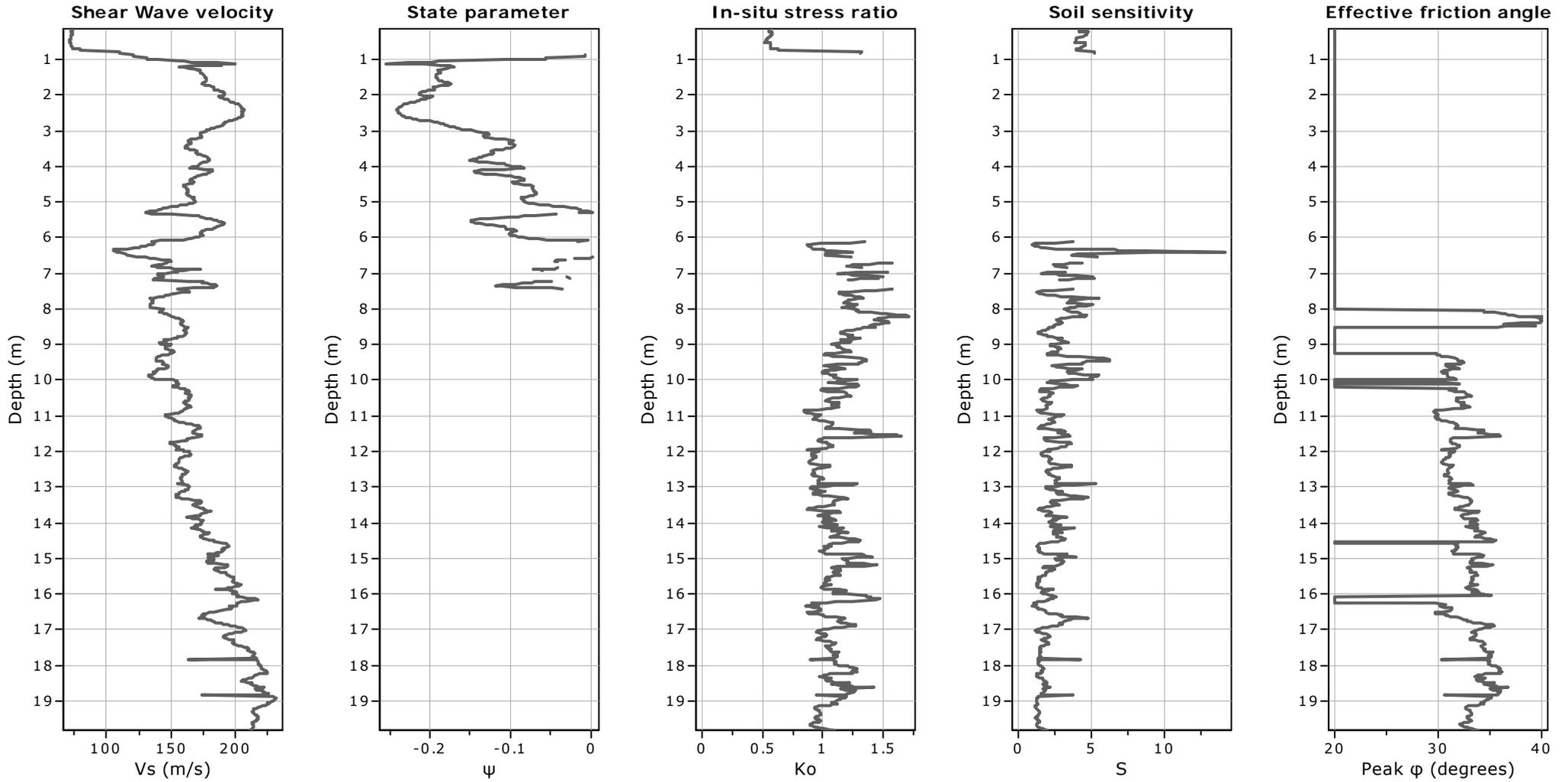
Go: Based on variable *alpha* using I_c (Robertson, 2009)

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

OCR factor for clays, N_{kt} : Auto

● User defined estimation data

● Flat Dilatometer Test data



Calculation parameters

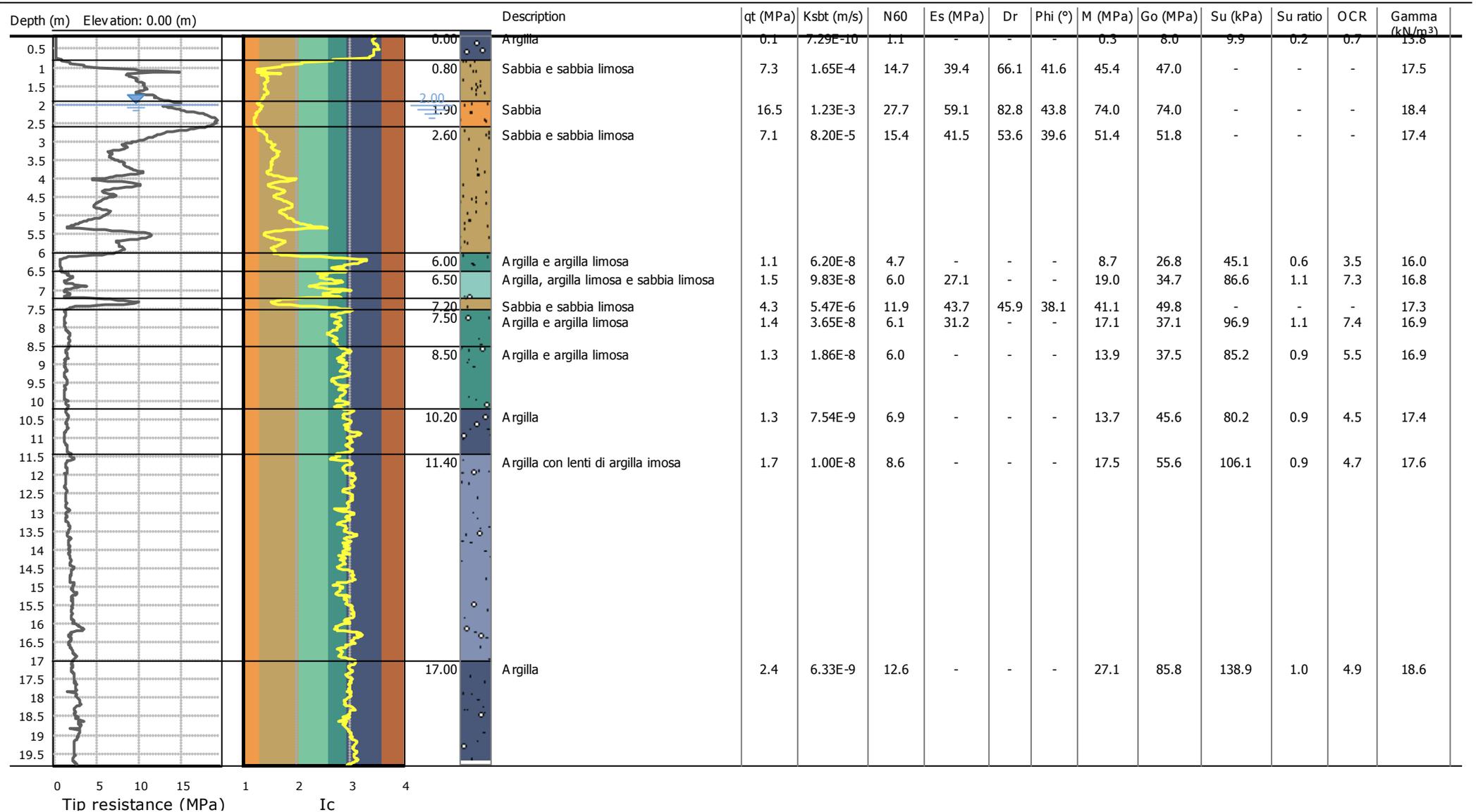
Soil Sensitivity factor, N_s : 7.10

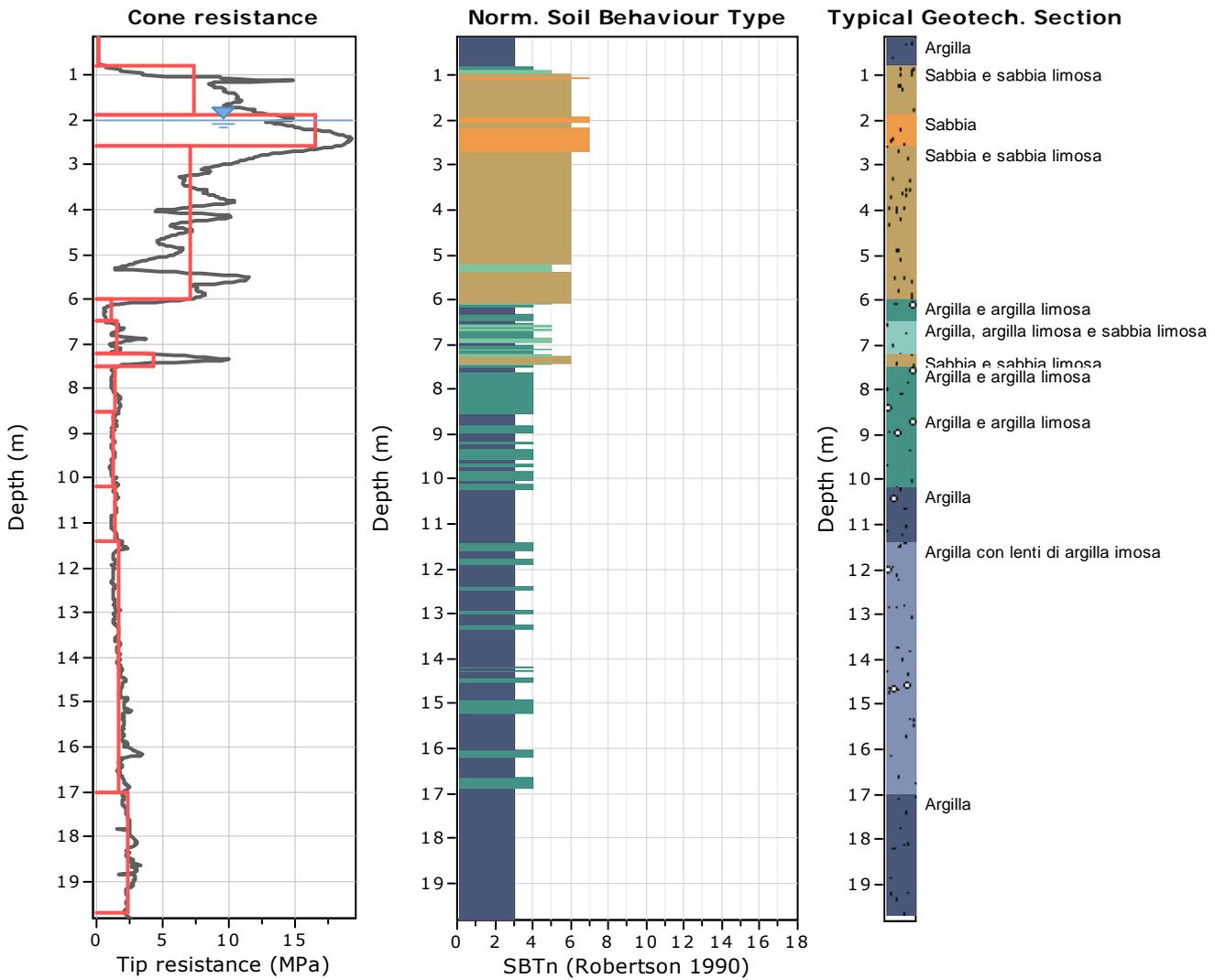
—●— User defined estimation data

Dott. Geol. Valeriano Franchi
 V.le Caduti in Guerra, 1
 41121 Modena
 valerianofranchi@tin.it

Project: Bosco verticale
 Location: Riccione

CPT: CPTu-2
 Total depth: 19.82 m





Tabular results

::: Layer No: 1 :::		
Code: 1	Start depth: 0.00 (m), End depth: 0.80 (m)	
Description: Argilla		
Basic results		
Total cone resistance:	0.13 ±0.15 MPa	
Sleeve friction:	1.95 ±1.97 kPa	
SBT _n :	3	
SBT _n description:	Clay	
Estimation results		
Permeability:	7.29E-10 ±1.60E-08 m/s	Constrained Mod.: 0.28 ±2.43 MPa
N60:	1.07 ±0.48 blows	Go: 8.04 ±2.86 MPa
Es:	0.00 ±0.00 MPa	Su: 9.87 ±13.28 kPa
Dr (%):	0.00 ±0.00	Su ratio: 0.17 ±0.22
φ (degrees):	0.00 ±0.00 °	O.C.R.: 0.74 ±1.70
Unit weight:	13.84 ±0.42 kN/m ³	

.: Layer No: 2 .:

Code: 2 Start depth: 0.80 (m), End depth: 1.90 (m)

Description: Sabbia e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 7.29 ±3.93 MPa

Sleeve friction: 26.27 ±17.02 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 1.65E-04 ±3.57E-04 m/s

N60: 14.69 ±6.31 blows

Es: 39.45 ±10.64 MPa

Dr (%): 66.12 ±13.71

φ (degrees): 41.56 ±2.43 °

Unit weight: 17.51 ±1.02 kN/m³

Constrained Mod.: 45.42 ±16.37 MPa

Go: 47.02 ±15.02 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: 1.90 (m), End depth: 2.60 (m)

Description: Sabbia

Basic results

Total cone resistance: 16.50 ±2.24 MPa

Sleeve friction: 44.50 ±4.79 kPa

SBT_n: 7

SBTn description: Sand

Estimation results

Permeability: 1.23E-03 ±4.10E-04 m/s

N60: 27.71 ±2.95 blows

Es: 59.05 ±4.66 MPa

Dr (%): 82.79 ±4.18

φ (degrees): 43.78 ±0.49 °

Unit weight: 18.43 ±0.18 kN/m³

Constrained Mod.: 74.01 ±5.84 MPa

Go: 74.01 ±5.84 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

.: Layer No: 4 .:

Code: 4 Start depth: 2.60 (m), End depth: 6.00 (m)

Description: Sabbia e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 7.15 ±3.11 MPa

Sleeve friction: 24.10 ±9.31 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 8.20E-05 ±2.56E-04 m/s

N60: 15.39 ±4.56 blows

Es: 41.47 ±7.51 MPa

Dr (%): 53.61 ±10.76

φ (degrees): 39.58 ±1.97 °

Unit weight: 17.40 ±0.52 kN/m³

Constrained Mod.: 51.41 ±10.10 MPa

Go: 51.82 ±9.54 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: 6.00 (m), End depth: 6.50 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.14 ±2.33 MPa

Sleeve friction: 12.77 ±12.13 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 6.20E-08 ±4.38E-05 m/s

N60: 4.72 ±4.09 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 15.97 ±0.88 kN/m³

Constrained Mod.: 8.66 ±17.32 MPa

Go: 26.80 ±9.87 MPa

Su: 45.14 ±16.78 kPa

Su ratio: 0.63 ±0.18

O.C.R.: 3.54 ±1.66

::: Layer No: 6 :::

Code: 6 Start depth: 6.50 (m), End depth: 7.20 (m)

Description: Argilla, argilla limosa e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.52 ±0.63 MPa

Sleeve friction: 23.54 ±9.38 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 9.83E-08 ±3.15E-07 m/s

N60: 6.05 ±1.78 blows

Es: 27.08 ±1.91 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.78 ±0.54 kN/m³

Constrained Mod.: 18.99 ±9.29 MPa

Go: 34.69 ±6.82 MPa

Su: 86.62 ±27.01 kPa

Su ratio: 1.12 ±0.28

O.C.R.: 7.32 ±2.69

::: Layer No: 7 :::

Code: 7 Start depth: 7.20 (m), End depth: 7.50 (m)

Description: Sabbia e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 4.33 ±3.35 MPa

Sleeve friction: 26.92 ±6.92 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 5.47E-06 ±8.21E-05 m/s

N60: 11.88 ±5.39 blows

Es: 43.71 ±4.88 MPa

Dr (%): 45.92 ±8.91

φ (degrees): 38.10 ±1.99 °

Unit weight: 17.34 ±0.32 kN/m³

Constrained Mod.: 41.07 ±18.06 MPa

Go: 49.83 ±9.87 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

::: Layer No: 8 :::

Code: 8 Start depth: 7.50 (m), End depth: 8.50 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.39 ±0.26 MPa

Sleeve friction: 28.05 ±13.77 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 3.65E-08 ±3.00E-08 m/s

N60: 6.10 ±0.97 blows

Es: 31.16 ±0.74 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.95 ±0.52 kN/m³

Constrained Mod.: 17.11 ±3.99 MPa

Go: 37.10 ±6.25 MPa

Su: 96.89 ±20.58 kPa

Su ratio: 1.14 ±0.21

O.C.R.: 7.41 ±1.75

::: Layer No: 9 :::

Code: 9 Start depth: 8.50 (m), End depth: 10.20 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.28 ±0.17 MPa

Sleeve friction: 26.94 ±12.73 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 1.86E-08 ±1.61E-08 m/s

N60: 6.03 ±0.77 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.87 ±0.52 kN/m³

Constrained Mod.: 13.93 ±3.72 MPa

Go: 37.48 ±5.41 MPa

Su: 85.24 ±14.04 kPa

Su ratio: 0.92 ±0.16

O.C.R.: 5.53 ±1.17

.: Layer No: 10 .:

Code: 10 Start depth: 10.20 (m), End depth: 11.40 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 1.34 ±0.17 MPa

Sleeve friction: 42.15 ±10.16 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 7.54E-09 ±6.07E-09 m/s

N60: 6.87 ±0.67 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.40 ±0.32 kN/m³

Constrained Mod.: 13.69 ±3.98 MPa

Go: 45.62 ±4.60 MPa

Su: 80.24 ±13.28 kPa

Su ratio: 0.85 ±0.13

O.C.R.: 4.46 ±0.97

.: Layer No: 11 .:

Code: 11 Start depth: 11.40 (m), End depth: 17.00 (m)

Description: Argilla con lenti di argilla imosa

Basic results

Total cone resistance: 1.73 ±0.42 MPa

Sleeve friction: 47.19 ±22.62 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.00E-08 ±1.30E-08 m/s

N60: 8.63 ±1.81 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.63 ±0.54 kN/m³

Constrained Mod.: 17.51 ±7.22 MPa

Go: 55.62 ±12.30 MPa

Su: 106.14 ±29.70 kPa

Su ratio: 0.87 ±0.19

O.C.R.: 4.75 ±1.47

.: Layer No: 12 .:

Code: 12 Start depth: 17.00 (m), End depth: 19.68 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 2.43 ±0.33 MPa

Sleeve friction: 98.44 ±21.67 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 6.33E-09 ±3.93E-09 m/s

N60: 12.57 ±1.43 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.61 ±0.35 kN/m³

Constrained Mod.: 27.13 ±6.41 MPa

Go: 85.79 ±9.84 MPa

Su: 138.87 ±21.94 kPa

Su ratio: 0.96 ±0.14

O.C.R.: 4.86 ±0.95

Dott. Geol. Valeriano Franchi

V.le Caduti in Guerra, 1

41121 Modena

valerianofranchi@tin.it

Project: Bosco verticale

Location: Riccione

CPT: CPTu-2

Total depth: 19.82 m, Date: 11/06/2019

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G _o (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	0.80	7.29E-10	1.1	0.0	0.0	0.0	0.3	8.0	9.9	0.2	0.7	13.8
0.80		(±1.60E-08)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.4)	(±2.9)	(±13.3)	(±0.2)	(±1.7)	(±0.4)
0.80	1.10	1.65E-04	14.7	39.4	66.1	41.6	45.4	47.0	0.0	0.0	0.0	17.5
1.90		(±3.57E-04)	(±6.3)	(±10.6)	(±13.7)	(±2.4)	(±16.4)	(±15.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.0)
1.90	0.70	1.23E-03	27.7	59.1	82.8	43.8	74.0	74.0	0.0	0.0	0.0	18.4
2.60		(±4.10E-04)	(±3.0)	(±4.7)	(±4.2)	(±0.5)	(±5.8)	(±5.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.2)
2.60	3.40	8.20E-05	15.4	41.5	53.6	39.6	51.4	51.8	0.0	0.0	0.0	17.4
6.00		(±2.56E-04)	(±4.6)	(±7.5)	(±10.8)	(±2.0)	(±10.1)	(±9.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
6.00	0.50	6.20E-08	4.7	0.0	0.0	0.0	8.7	26.8	45.1	0.6	3.5	16.0
6.50		(±4.38E-05)	(±4.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±17.3)	(±9.9)	(±16.8)	(±0.2)	(±1.7)	(±0.9)
6.50	0.70	9.83E-08	6.0	27.1	0.0	0.0	19.0	34.7	86.6	1.1	7.3	16.8
7.20		(±3.15E-07)	(±1.8)	(±1.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±9.3)	(±6.8)	(±27.0)	(±0.3)	(±2.7)	(±0.5)
7.20	0.30	5.47E-06	11.9	43.7	45.9	38.1	41.1	49.8	0.0	0.0	0.0	17.3
7.50		(±8.21E-05)	(±5.4)	(±4.9)	(±8.9)	(±2.0)	(±18.1)	(±9.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.3)
7.50	1.00	3.65E-08	6.1	31.2	0.0	0.0	17.1	37.1	96.9	1.1	7.4	16.9
8.50		(±3.00E-08)	(±1.0)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.0)	(±6.3)	(±20.6)	(±0.2)	(±1.8)	(±0.5)
8.50	1.70	1.86E-08	6.0	0.0	0.0	0.0	13.9	37.5	85.2	0.9	5.5	16.9
10.20		(±1.61E-08)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.7)	(±5.4)	(±14.0)	(±0.2)	(±1.2)	(±0.5)
10.20	1.20	7.54E-09	6.9	0.0	0.0	0.0	13.7	45.6	80.2	0.9	4.5	17.4
11.40		(±6.07E-09)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.0)	(±4.6)	(±13.3)	(±0.1)	(±1.0)	(±0.3)
11.40	5.60	1.00E-08	8.6	0.0	0.0	0.0	17.5	55.6	106.1	0.9	4.7	17.6
17.00		(±1.30E-08)	(±1.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.2)	(±12.3)	(±29.7)	(±0.2)	(±1.5)	(±0.5)

Dott. Geol. Valeriano Franchi

V.le Caduti in Guerra, 1

41121 Modena

valerianofranchi@tin.it

Project: **Bosco verticale**

Location: **Riccione**

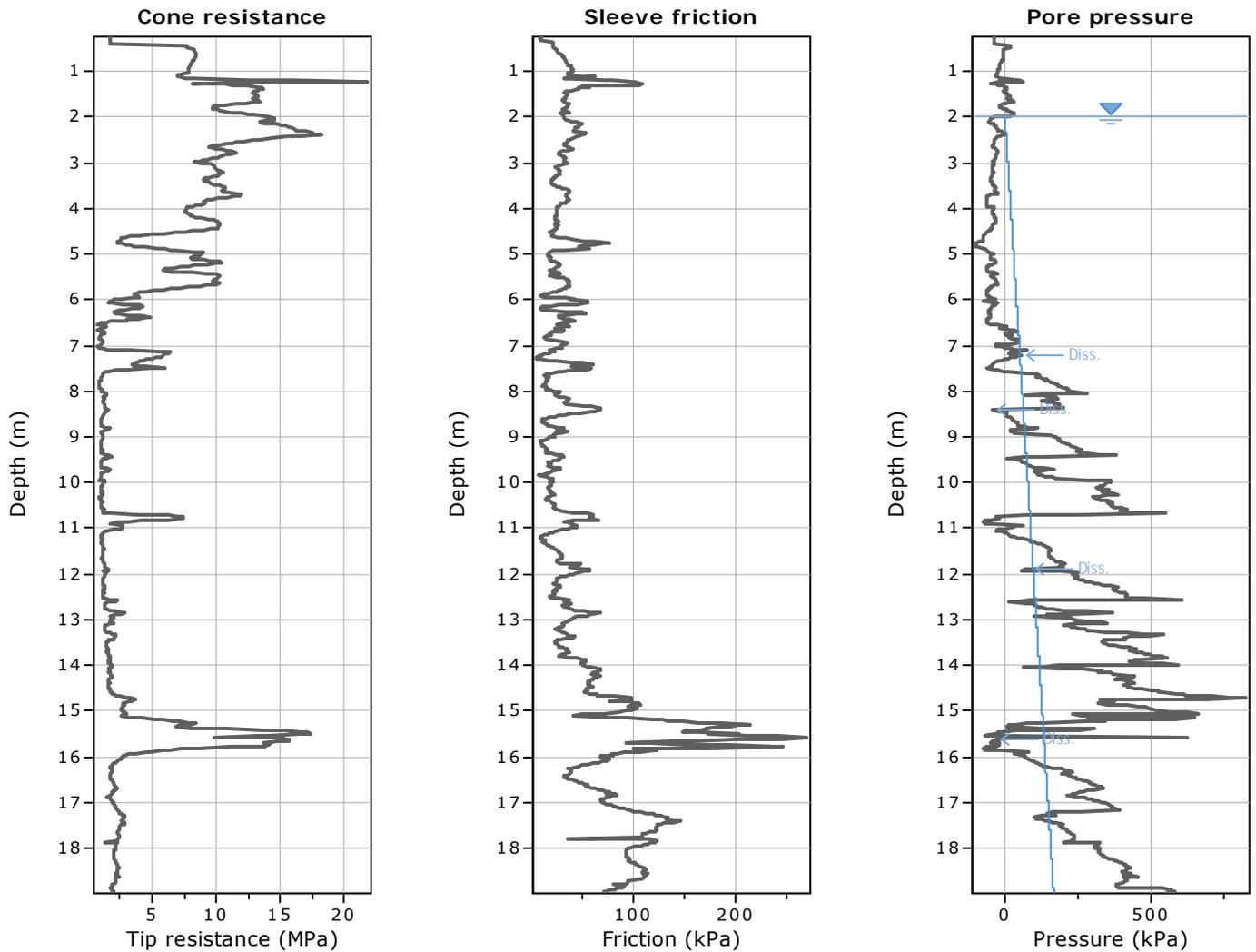
CPT: CPTu-2

Total depth: 19.82 m, Date: 11/06/2019

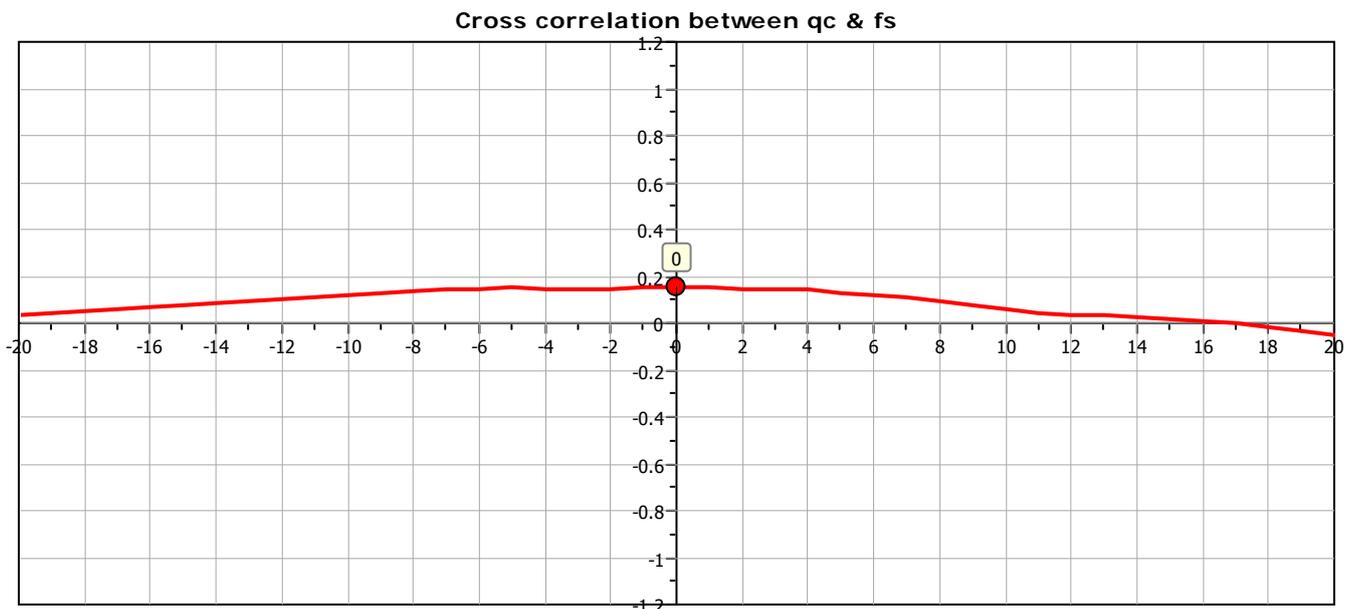
Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
17.00	2.68	6.33E-09	12.6	0.0	0.0	0.0	27.1	85.8	138.9	1.0	4.9	18.6
19.68		(±3.93E-09)	(±1.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±6.4)	(±9.8)	(±21.9)	(±0.1)	(±1.0)	(±0.3)

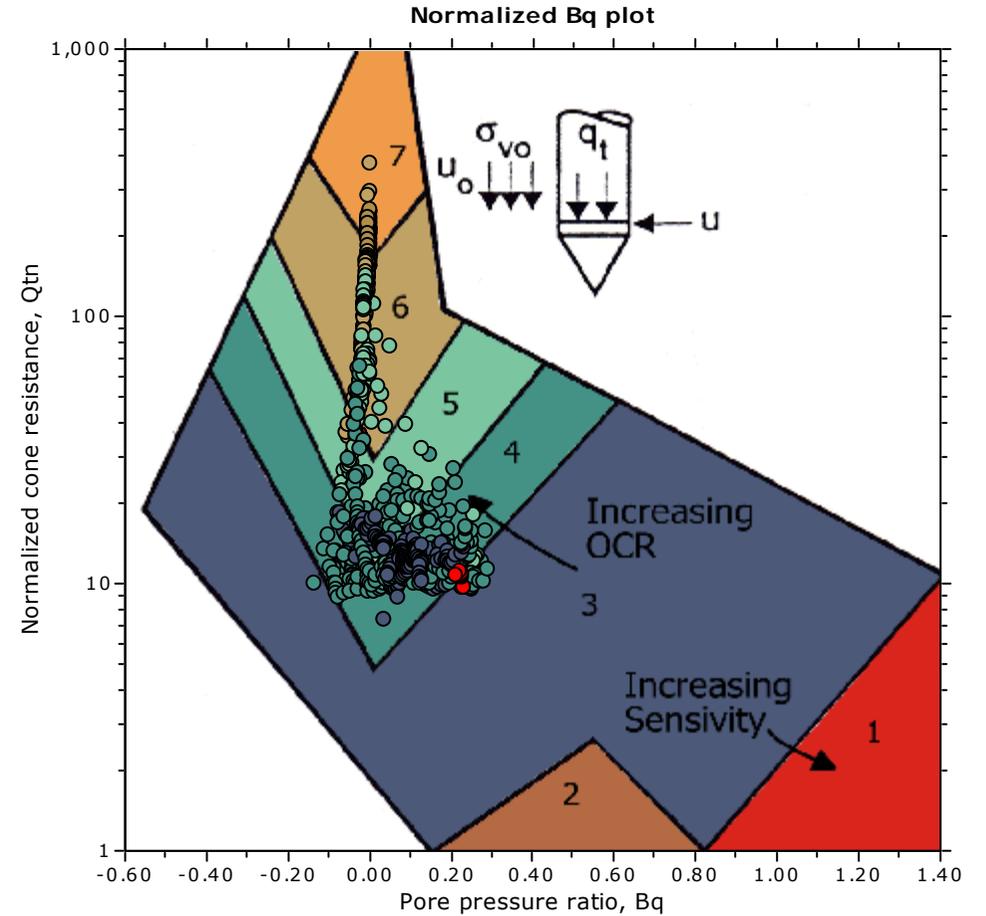
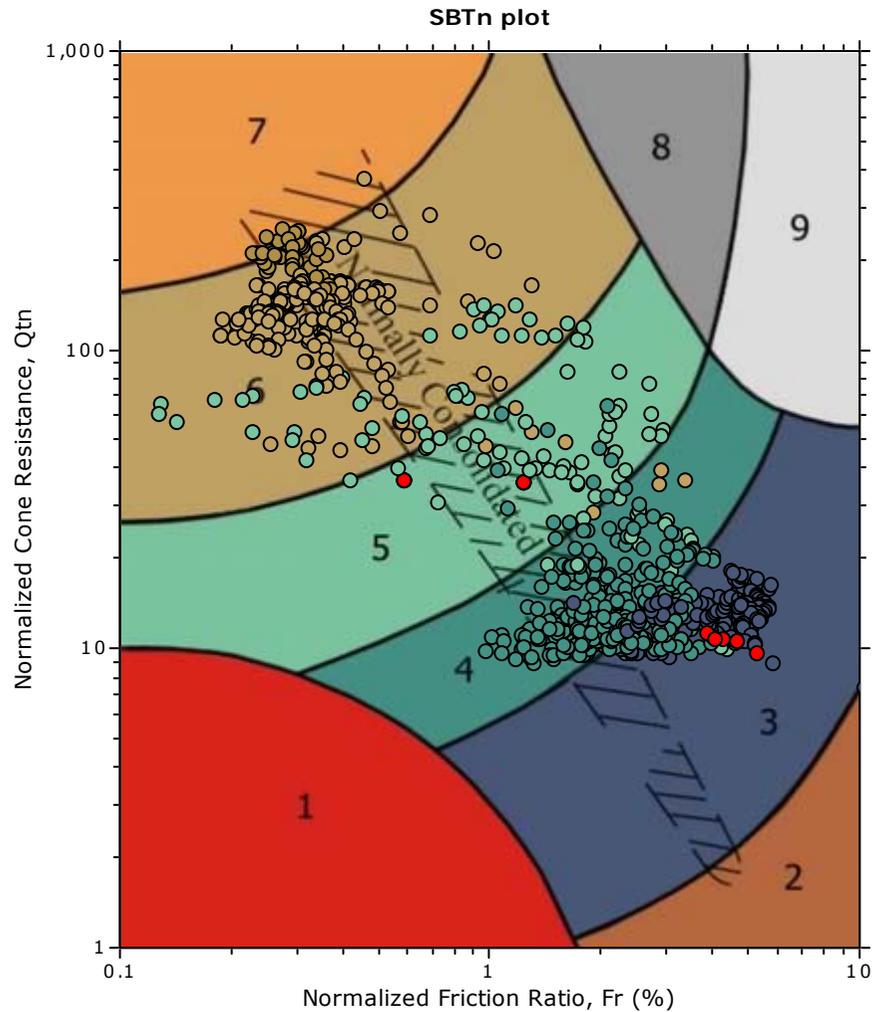
Depth values presented in this table are measured from free ground surface



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).

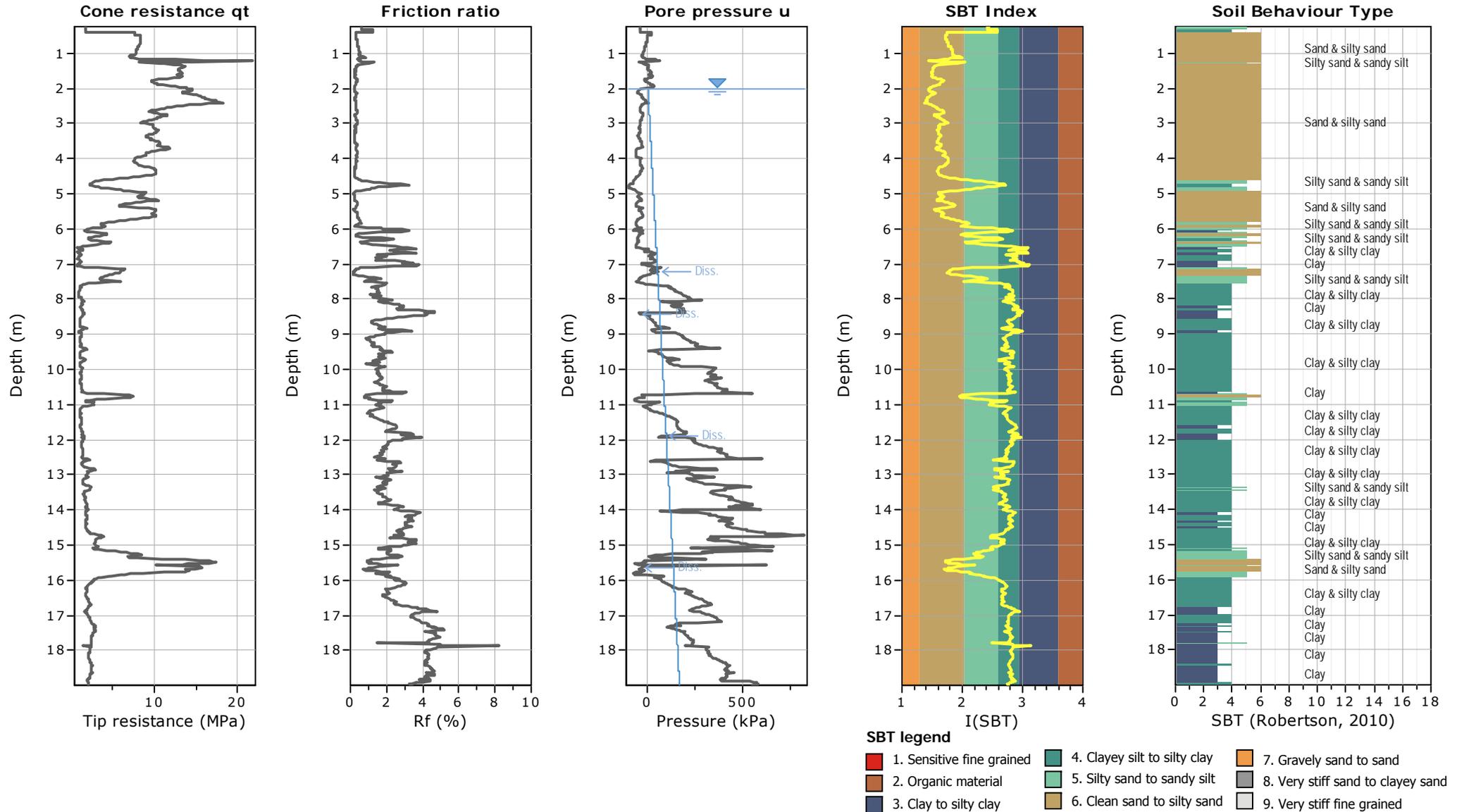


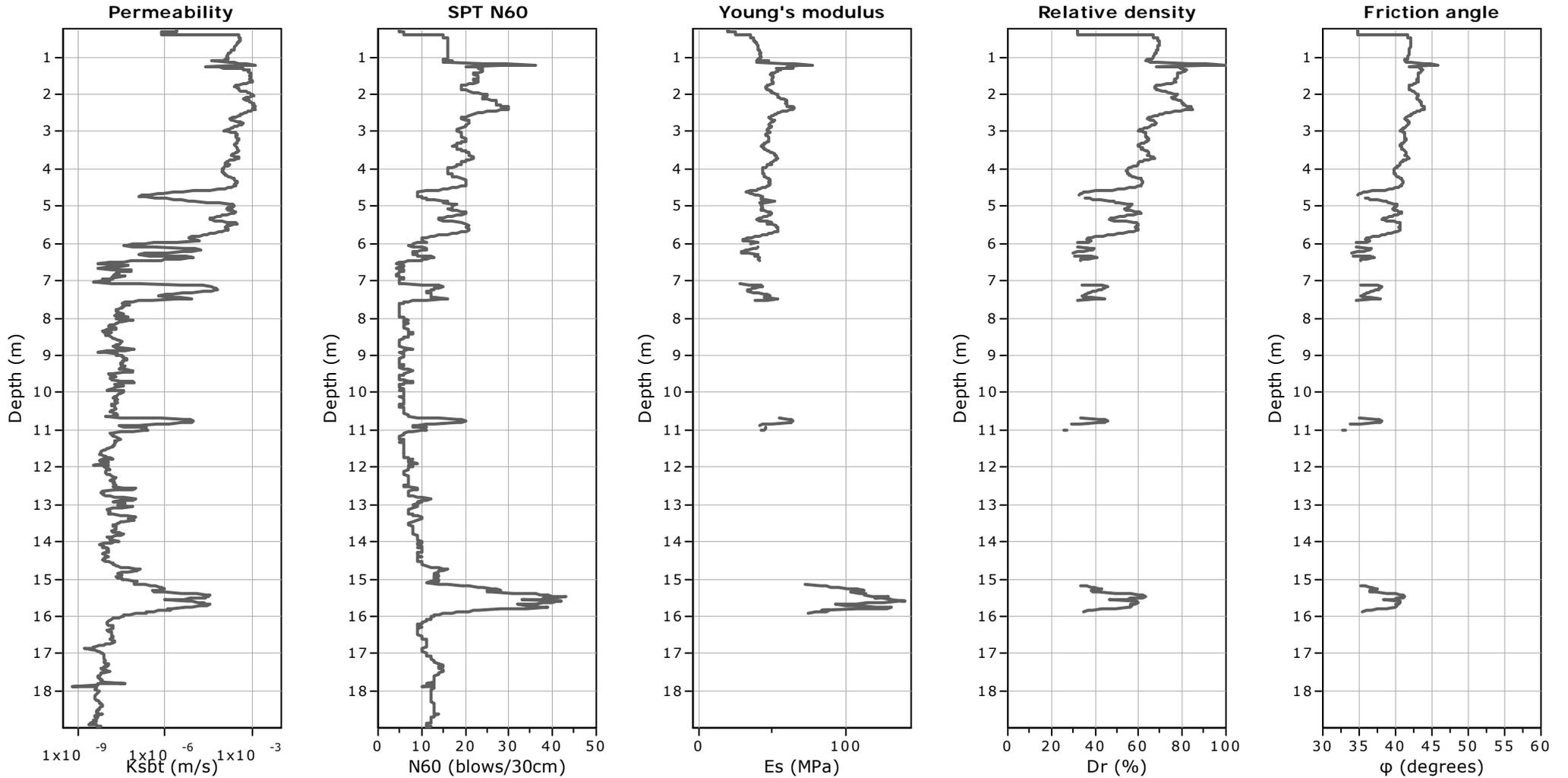
SBT - Bq plots (normalized)



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 |





Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

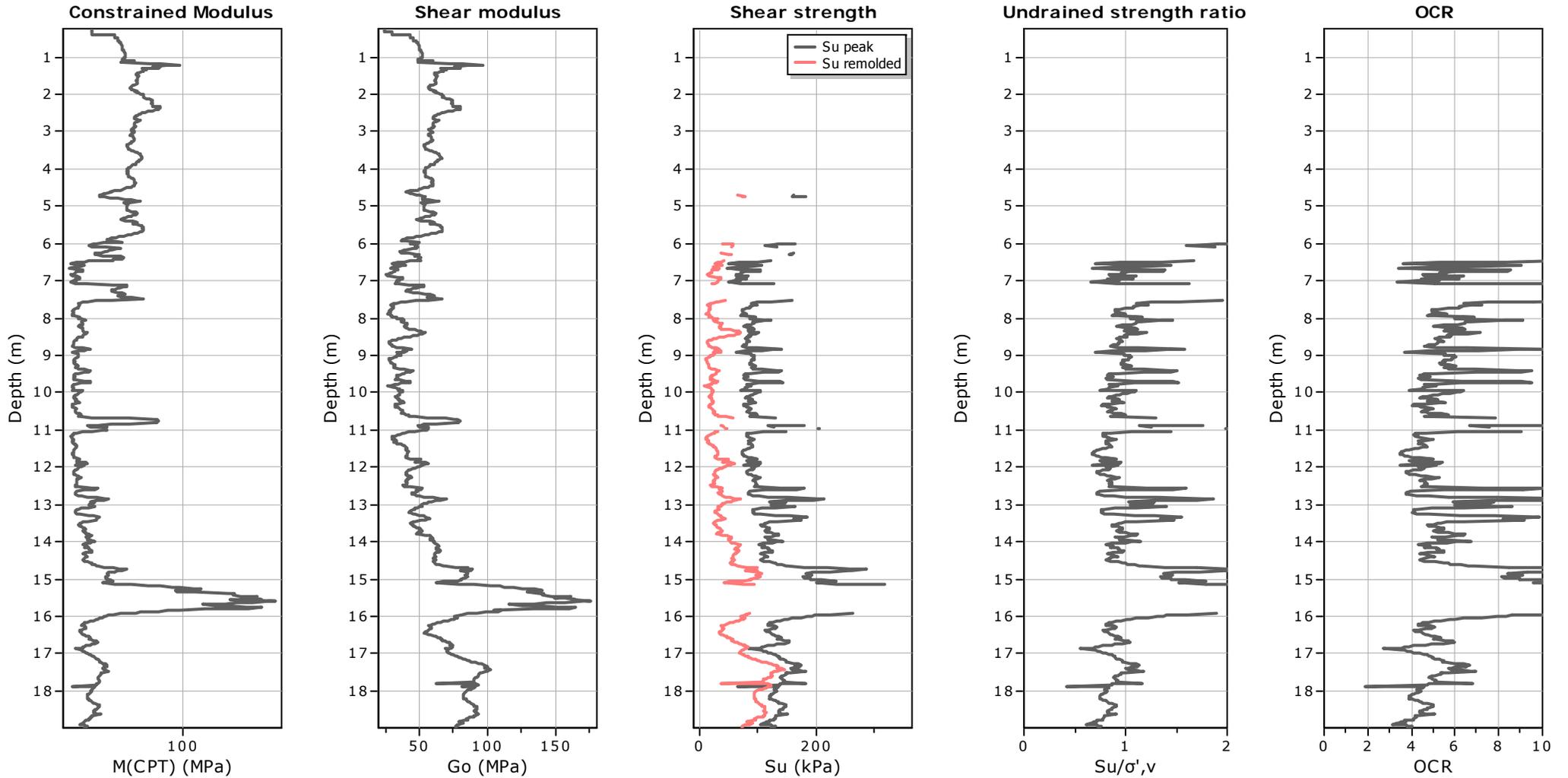
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr}: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable *alpha* using I_c and Q_m (Robertson, 2009)

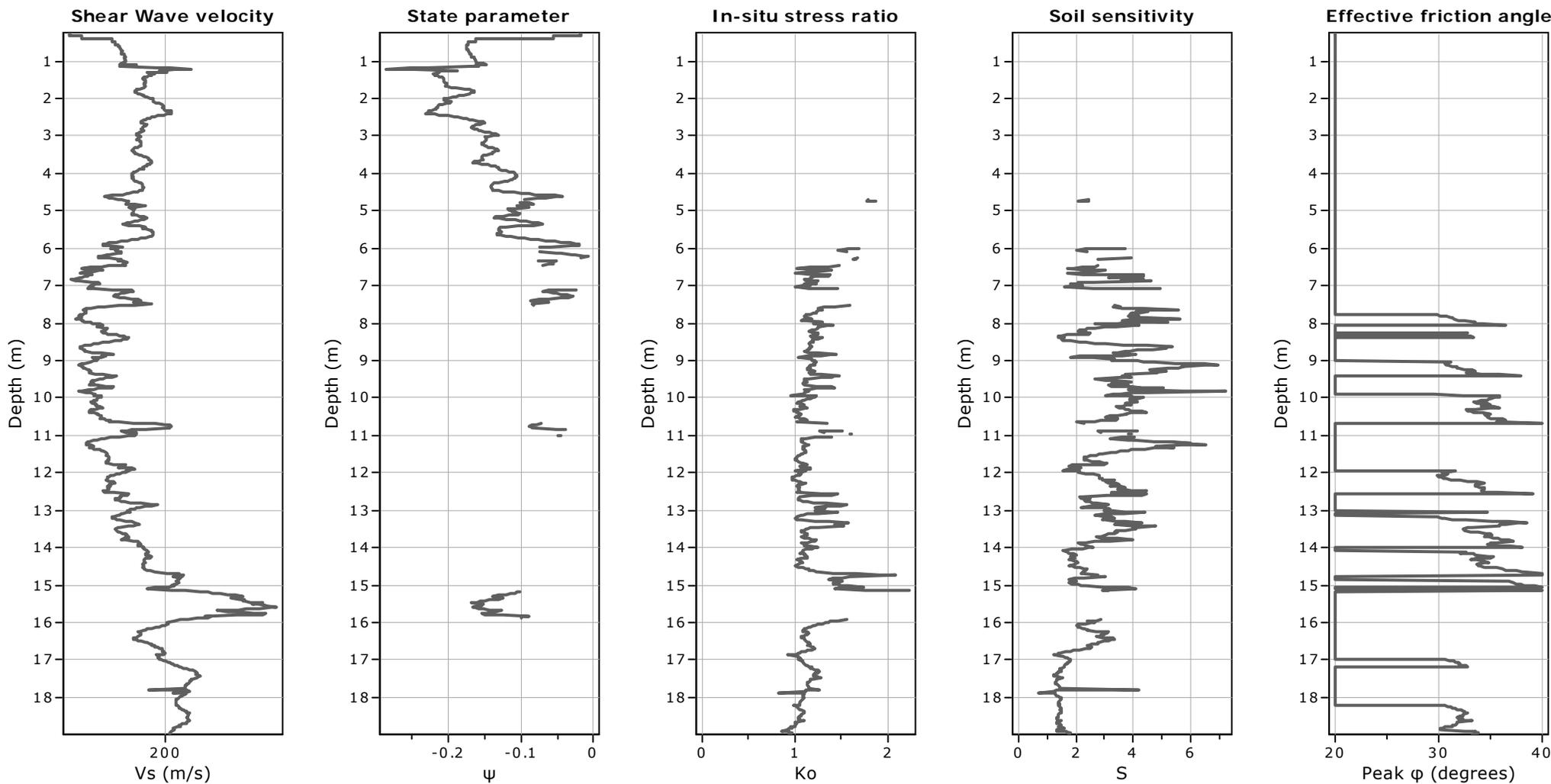
Go: Based on variable *alpha* using I_c (Robertson, 2009)

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

OCR factor for clays, N_{kt} : Auto

● User defined estimation data

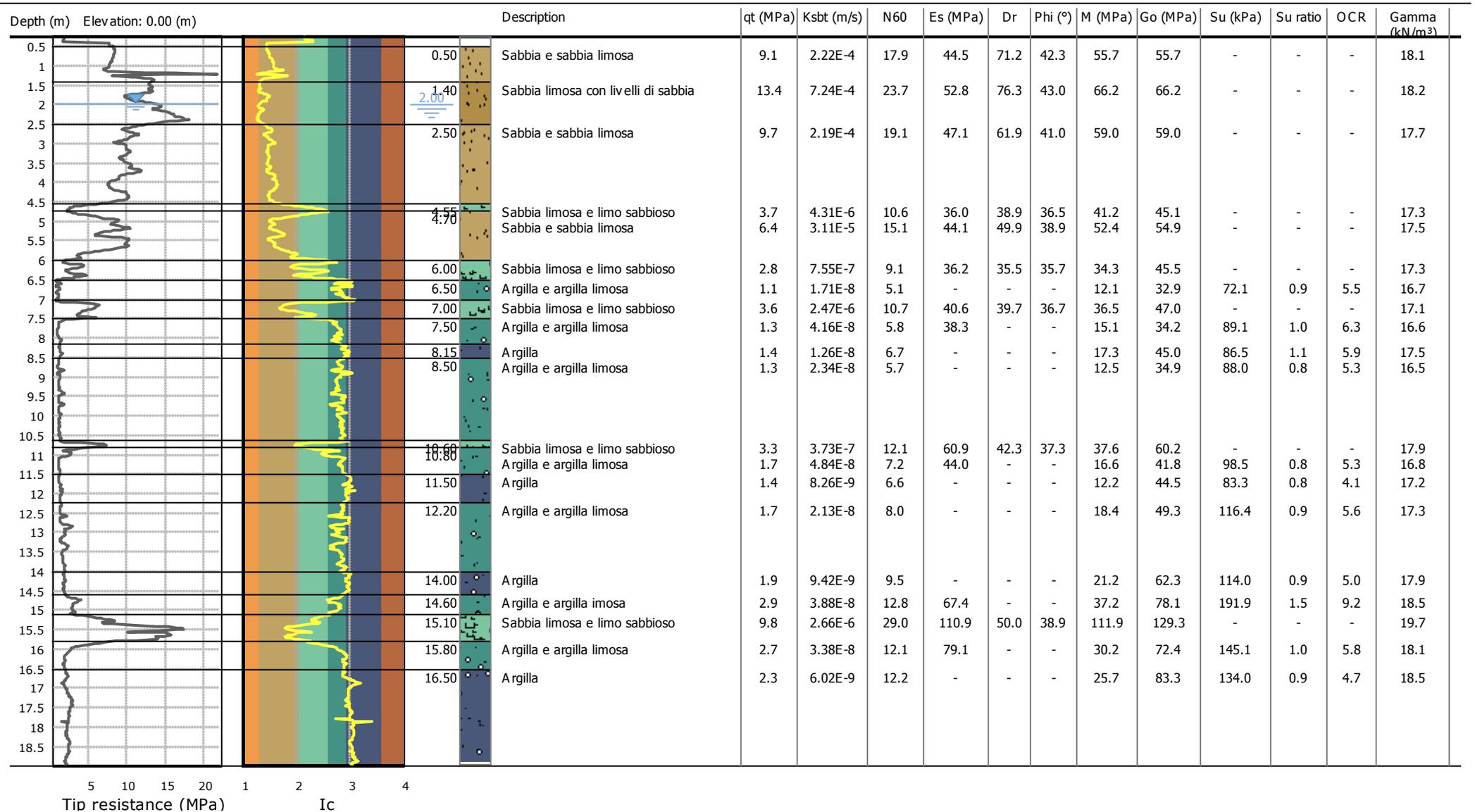
● Flat Dilatometer Test data

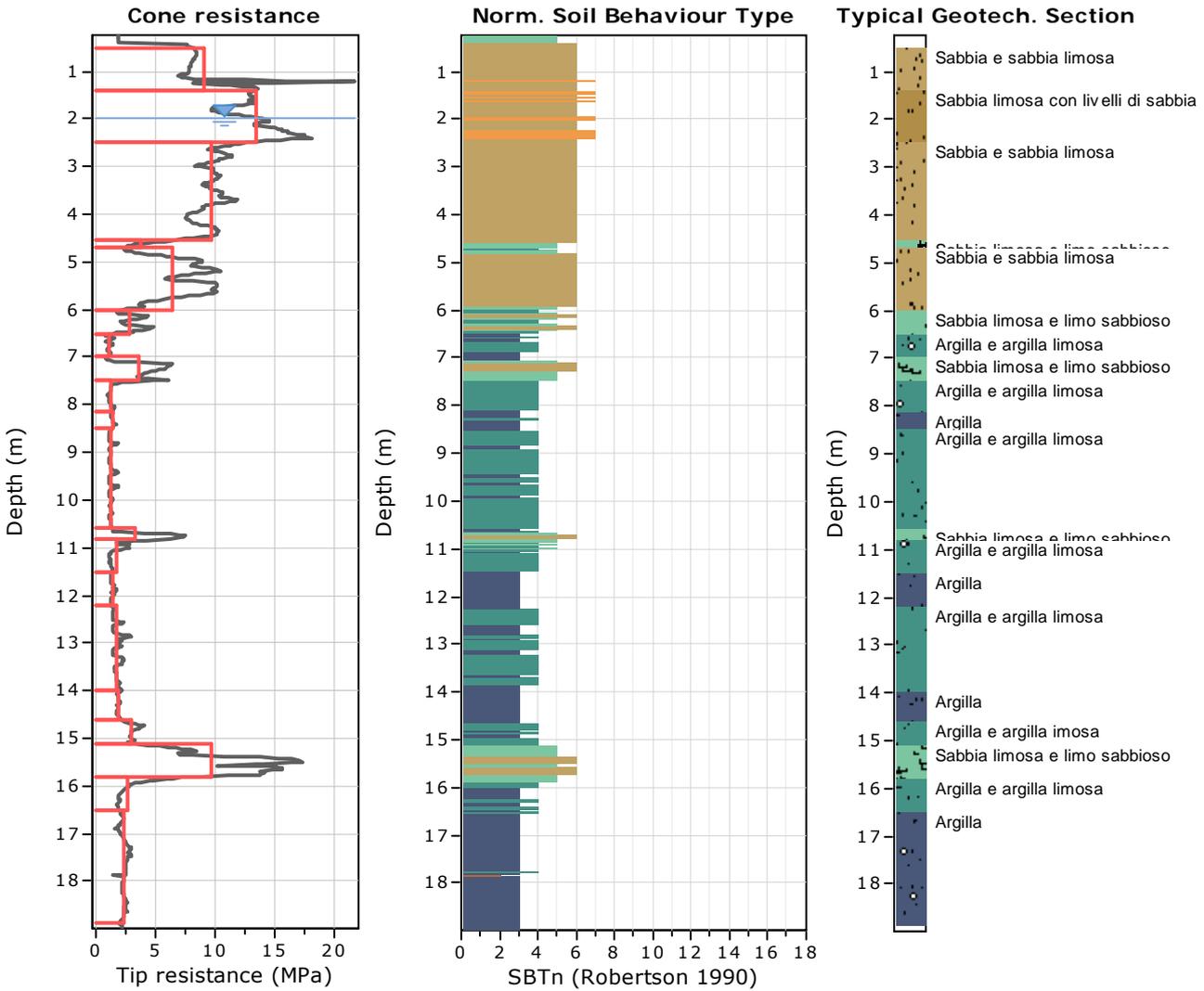


Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.10

—●— User defined estimation data





Tabular results

:: Layer No: 1 ::		
Code: 1	Start depth: 0.50 (m), End depth: 1.40 (m)	
Description: Sabbia e sabbia limosa		
Basic results		
Total cone resistance:	9.10 ±2.95 MPa	
Sleeve friction:	42.45 ±23.81 kPa	
SBT _n :	6	
SBT _n description:	Sand & silty sand	
Estimation results		
Permeability:	2.22E-04 ±2.43E-04 m/s	Constrained Mod.: 55.71 ±12.45 MPa
N60:	17.92 ±4.63 blows	Go: 55.71 ±12.45 MPa
Es:	44.45 ±9.93 MPa	Su: 0.00 ±0.00 kPa
Dr (%):	71.19 ±7.97	Su ratio: 0.00 ±0.00
φ (degrees):	42.33 ±1.00 °	O.C.R.: 0.00 ±0.00
Unit weight:	18.15 ±0.53 kN/m ³	

.: Layer No: 2 .:

Code: 2 Start depth: 1.40 (m), End depth: 2.50 (m)

Description: Sabbia limosa con livelli di sabbia

Basic results

Total cone resistance: 13.42 ±2.14 MPa

Sleeve friction: 38.53 ±6.55 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 7.24E-04 ±2.83E-04 m/s

N60: 23.67 ±3.05 blows

Es: 52.85 ±5.41 MPa

Dr (%): 76.26 ±4.50

φ (degrees): 42.99 ±0.57 °

Unit weight: 18.18 ±0.23 kN/m³

Constrained Mod.: 66.24 ±6.78 MPa

Go: 66.24 ±6.78 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: 2.50 (m), End depth: 4.55 (m)

Description: Sabbia e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 9.66 ±1.17 MPa

Sleeve friction: 29.16 ±5.46 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 2.19E-04 ±1.03E-04 m/s

N60: 19.07 ±1.70 blows

Es: 47.06 ±2.90 MPa

Dr (%): 61.89 ±4.13

φ (degrees): 40.99 ±0.64 °

Unit weight: 17.74 ±0.24 kN/m³

Constrained Mod.: 58.98 ±3.64 MPa

Go: 58.98 ±3.64 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

.: Layer No: 4 .:

Code: 4 Start depth: 4.55 (m), End depth: 4.70 (m)

Description: Sabbia limosa e limo sabbioso

Basic results

Total cone resistance: 3.70 ±1.62 MPa

Sleeve friction: 28.28 ±11.23 kPa

SBT_n: 5

SBTn description: Silty sand & sandy silt

Estimation results

Permeability: 4.31E-06 ±2.72E-05 m/s

N60: 10.56 ±2.40 blows

Es: 36.00 ±2.88 MPa

Dr (%): 38.88 ±6.85

φ (degrees): 36.53 ±1.60 °

Unit weight: 17.33 ±0.28 kN/m³

Constrained Mod.: 41.24 ±6.30 MPa

Go: 45.12 ±3.60 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: 4.70 (m), End depth: 6.00 (m)

Description: Sabbia e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 6.38 ±2.75 MPa

Sleeve friction: 28.41 ±14.84 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 3.11E-05 ±1.12E-04 m/s

N60: 15.11 ±4.01 blows

Es: 44.05 ±6.04 MPa

Dr (%): 49.85 ±8.66

φ (degrees): 38.89 ±1.77 °

Unit weight: 17.55 ±0.48 kN/m³

Constrained Mod.: 52.44 ±10.21 MPa

Go: 54.91 ±7.51 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: 6.00 (m), End depth: 6.50 (m)

Description: Sabbia limosa e limo sabbioso

Basic results

Total cone resistance: 2.77 ±1.06 MPa

Sleeve friction: 31.40 ±15.49 kPa

SBT_n: 5SBT_n description: Silty sand & sandy silt

Estimation results

Permeability: 7.55E-07 ±5.60E-06 m/s

N60: 9.15 ±1.77 blows

Es: 36.24 ±4.65 MPa

Dr (%): 35.46 ±3.66

φ (degrees): 35.67 ±0.99 °

Unit weight: 17.34 ±0.54 kN/m³

Constrained Mod.: 34.32 ±10.12 MPa

Go: 45.53 ±4.95 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: 6.50 (m), End depth: 7.00 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.09 ±0.19 MPa

Sleeve friction: 25.48 ±7.92 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 1.71E-08 ±1.91E-08 m/s

N60: 5.07 ±0.71 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.74 ±0.40 kN/m³

Constrained Mod.: 12.10 ±3.78 MPa

Go: 32.87 ±4.01 MPa

Su: 72.06 ±16.70 kPa

Su ratio: 0.94 ±0.19

O.C.R.: 5.54 ±1.59

.: Layer No: 8 .:

Code: 8 Start depth: 7.00 (m), End depth: 7.50 (m)

Description: Sabbia limosa e limo sabbioso

Basic results

Total cone resistance: 3.57 ±1.91 MPa

Sleeve friction: 23.32 ±17.50 kPa

SBT_n: 5SBT_n description: Silty sand & sandy silt

Estimation results

Permeability: 2.47E-06 ±2.77E-05 m/s

N60: 10.71 ±3.42 blows

Es: 40.63 ±6.32 MPa

Dr (%): 39.71 ±4.19

φ (degrees): 36.75 ±1.01 °

Unit weight: 17.10 ±0.74 kN/m³

Constrained Mod.: 36.49 ±17.72 MPa

Go: 47.05 ±10.10 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: 7.50 (m), End depth: 8.15 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.32 ±0.75 MPa

Sleeve friction: 21.22 ±11.49 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 4.16E-08 ±4.23E-07 m/s

N60: 5.82 ±2.03 blows

Es: 38.31 ±38.31 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.61 ±0.57 kN/m³

Constrained Mod.: 15.12 ±11.05 MPa

Go: 34.17 ±8.51 MPa

Su: 89.06 ±18.97 kPa

Su ratio: 0.96 ±0.22

O.C.R.: 6.35 ±1.75

.: Layer No: 10 .:

Code: 10 Start depth: 8.15 (m), End depth: 8.50 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 1.40 ±0.11 MPa

Sleeve friction: 46.46 ±14.04 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay

Estimation results

Permeability: 1.26E-08 ±5.13E-09 m/s

N60: 6.71 ±0.65 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.53 ±0.35 kN/m³

Constrained Mod.: 17.34 ±1.84 MPa

Go: 45.00 ±5.26 MPa

Su: 86.46 ±6.55 kPa

Su ratio: 1.07 ±0.09

O.C.R.: 5.89 ±0.55

.: Layer No: 11 .:

Code: 11 Start depth: 8.50 (m), End depth: 10.60 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.25 ±0.19 MPa

Sleeve friction: 19.94 ±6.31 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 2.34E-08 ±1.69E-08 m/s

N60: 5.73 ±0.78 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.52 ±0.38 kN/m³

Constrained Mod.: 12.49 ±3.82 MPa

Go: 34.85 ±4.12 MPa

Su: 87.95 ±15.91 kPa

Su ratio: 0.84 ±0.15

O.C.R.: 5.33 ±1.27

.: Layer No: 12 .:

Code: 12 Start depth: 10.60 (m), End depth: 10.80 (m)

Description: Sabbia limosa e limo sabbioso

Basic results

Total cone resistance: 3.34 ±2.98 MPa

Sleeve friction: 47.38 ±13.95 kPa

SBT_n: 5SBT_n description: Silty sand & sandy silt

Estimation results

Permeability: 3.73E-07 ±5.34E-06 m/s

N60: 12.06 ±6.11 blows

Es: 60.92 ±3.24 MPa

Dr (%): 42.26 ±4.72

φ (degrees): 37.34 ±1.16 °

Unit weight: 17.89 ±0.64 kN/m³

Constrained Mod.: 37.55 ±32.59 MPa

Go: 60.22 ±17.00 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: 10.80 (m), End depth: 11.50 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.70 ±1.42 MPa

Sleeve friction: 23.86 ±14.46 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 4.84E-08 ±1.57E-06 m/s

N60: 7.23 ±3.43 blows

Es: 44.01 ±2.56 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 16.84 ±0.76 kN/m³

Constrained Mod.: 16.64 ±19.11 MPa

Go: 41.81 ±12.79 MPa

Su: 98.50 ±35.60 kPa

Su ratio: 0.82 ±0.33

O.C.R.: 5.31 ±2.71

.: Layer No: 14 .:

Code: 14 Start depth: 11.50 (m), End depth: 12.20 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 1.35 ±0.14 MPa

Sleeve friction: 33.74 ±10.37 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 8.26E-09 ±2.55E-09 m/s

N60: 6.62 ±0.83 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.15 ±0.34 kN/m³

Constrained Mod.: 12.17 ±3.17 MPa

Go: 44.51 ±5.12 MPa

Su: 83.34 ±8.83 kPa

Su ratio: 0.76 ±0.09

O.C.R.: 4.08 ±0.52

.: Layer No: 15 .:

Code: 15 Start depth: 12.20 (m), End depth: 14.00 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.74 ±0.37 MPa

Sleeve friction: 33.91 ±10.37 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 2.13E-08 ±2.39E-08 m/s

N60: 8.01 ±1.26 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.25 ±0.37 kN/m³

Constrained Mod.: 18.35 ±6.85 MPa

Go: 49.26 ±6.78 MPa

Su: 116.40 ±29.90 kPa

Su ratio: 0.92 ±0.22

O.C.R.: 5.63 ±1.90

.: Layer No: 16 .:

Code: 16 Start depth: 14.00 (m), End depth: 14.60 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 1.89 ±0.10 MPa

Sleeve friction: 59.66 ±5.28 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 9.42E-09 ±4.15E-09 m/s

N60: 9.47 ±0.51 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.94 ±0.10 kN/m³

Constrained Mod.: 21.24 ±2.56 MPa

Go: 62.26 ±1.68 MPa

Su: 114.02 ±9.74 kPa

Su ratio: 0.93 ±0.06

O.C.R.: 4.97 ±0.56

.: Layer No: 17 .:

Code: 17 Start depth: 14.60 (m), End depth: 15.10 (m)

Description: Argilla e argilla imosa

Basic results

Total cone resistance: 2.92 ±0.51 MPa

Sleeve friction: 81.22 ±19.77 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 3.88E-08 ±3.73E-08 m/s

N60: 12.82 ±1.63 blows

Es: 67.39 ±4.87 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.46 ±0.35 kN/m³

Constrained Mod.: 37.25 ±7.13 MPa

Go: 78.07 ±9.00 MPa

Su: 191.86 ±40.24 kPa

Su ratio: 1.47 ±0.29

O.C.R.: 9.22 ±2.56

.: Layer No: 18 .:

Code: 18 Start depth: 15.10 (m), End depth: 15.80 (m)

Description: Sabbia limosa e limo sabbioso

Basic results

Total cone resistance: 9.79 ±4.73 MPa

Sleeve friction: 155.33 ±58.01 kPa

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

Permeability: 2.66E-06 ±1.32E-05 m/s

N60: 29.00 ±9.25 blows

Es: 110.95 ±14.68 MPa

Dr (%): 50.03 ±9.50

φ (degrees): 38.92 ±1.87 °

Unit weight: 19.67 ±0.66 kN/m³

Constrained Mod.: 111.93 ±39.51 MPa

Go: 129.32 ±27.97 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

.: Layer No: 19 .:

Code: 19 Start depth: 15.80 (m), End depth: 16.50 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 2.72 ±2.23 MPa

Sleeve friction: 61.64 ±44.43 kPa

SBT_n: 4SBT_n description: Clay & silty clay**Estimation results**

Permeability: 3.38E-08 ±4.60E-07 m/s

N60: 12.09 ±5.97 blows

Es: 79.13 ±79.13 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.11 ±0.75 kN/m³

Constrained Mod.: 30.20 ±33.05 MPa

Go: 72.44 ±24.03 MPa

Su: 145.09 ±52.63 kPa

Su ratio: 0.98 ±0.38

O.C.R.: 5.75 ±3.13

.: Layer No: 20 .:

Code: 20 Start depth: 16.50 (m), End depth: 18.87 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 2.34 ±0.28 MPa

Sleeve friction: 93.20 ±24.28 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 6.02E-09 ±4.98E-09 m/s

N60: 12.18 ±1.35 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.53 ±0.36 kN/m³

Constrained Mod.: 25.68 ±5.74 MPa

Go: 83.29 ±10.19 MPa

Su: 133.95 ±17.92 kPa

Su ratio: 0.93 ±0.13

O.C.R.: 4.67 ±0.84

Dott. Geol. Valeriano Franchi

V.le Caduti in Guerra, 1

41121 Modena

valerianofranchi@tin.it

Project: Bosco verticale

Location: Riccione

CPT: CPTu-3

Total depth: 18.99 m, Date: 11/06/2019

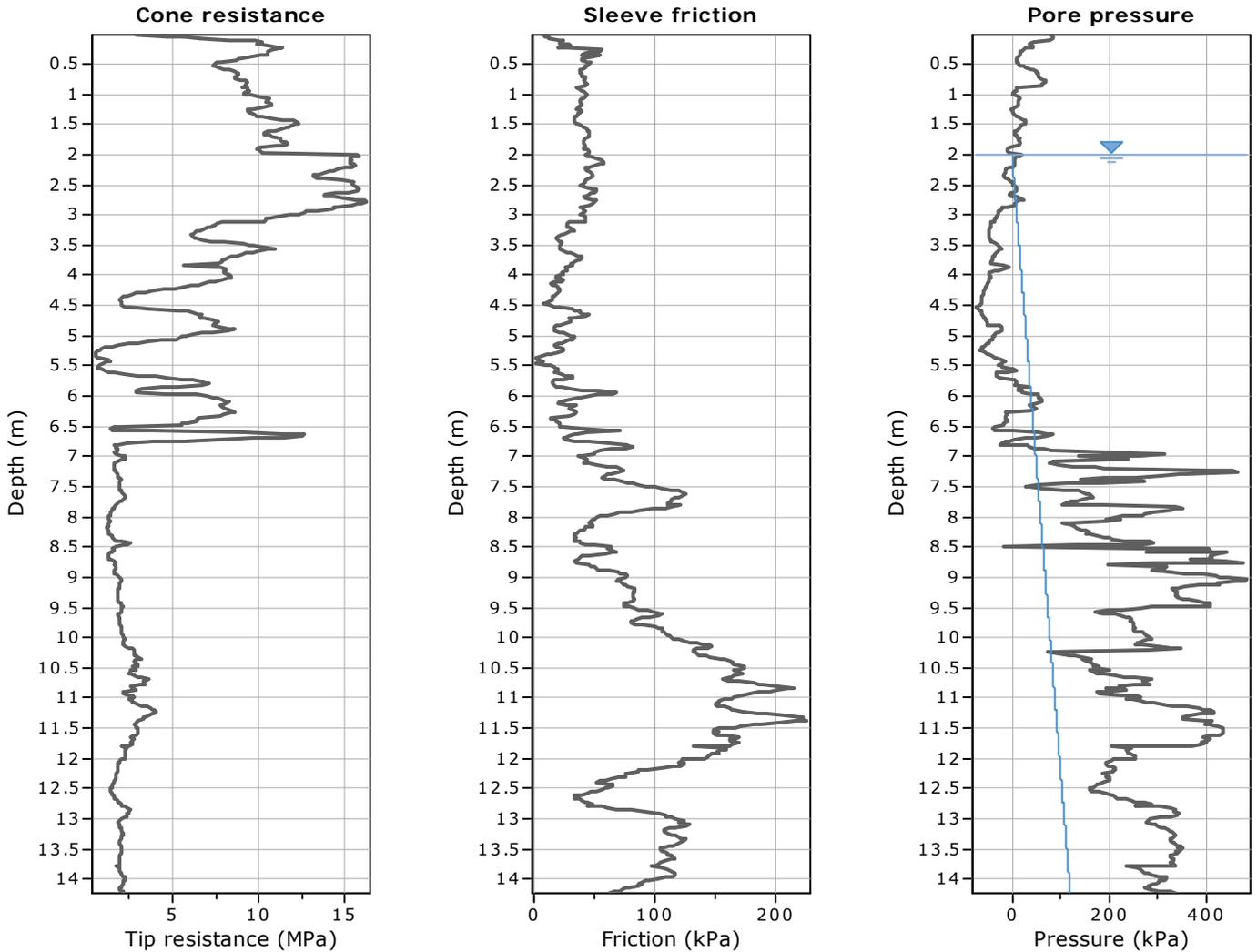
Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G _o (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.50	0.90	2.22E-04	17.9	44.5	71.2	42.3	55.7	55.7	0.0	0.0	0.0	18.1
1.40		(±2.43E-04)	(±4.6)	(±9.9)	(±8.0)	(±1.0)	(±12.5)	(±12.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
1.40	1.10	7.24E-04	23.7	52.8	76.3	43.0	66.2	66.2	0.0	0.0	0.0	18.2
2.50		(±2.83E-04)	(±3.1)	(±5.4)	(±4.5)	(±0.6)	(±6.8)	(±6.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.2)
2.50	2.05	2.19E-04	19.1	47.1	61.9	41.0	59.0	59.0	0.0	0.0	0.0	17.7
4.55		(±1.03E-04)	(±1.7)	(±2.9)	(±4.1)	(±0.6)	(±3.6)	(±3.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.2)
4.55	0.15	4.31E-06	10.6	36.0	38.9	36.5	41.2	45.1	0.0	0.0	0.0	17.3
4.70		(±2.72E-05)	(±2.4)	(±2.9)	(±6.9)	(±1.6)	(±6.3)	(±3.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.3)
4.70	1.30	3.11E-05	15.1	44.1	49.9	38.9	52.4	54.9	0.0	0.0	0.0	17.5
6.00		(±1.12E-04)	(±4.0)	(±6.0)	(±8.7)	(±1.8)	(±10.2)	(±7.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
6.00	0.50	7.55E-07	9.1	36.2	35.5	35.7	34.3	45.5	0.0	0.0	0.0	17.3
6.50		(±5.60E-06)	(±1.8)	(±4.7)	(±3.7)	(±1.0)	(±10.1)	(±4.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
6.50	0.50	1.71E-08	5.1	0.0	0.0	0.0	12.1	32.9	72.1	0.9	5.5	16.7
7.00		(±1.91E-08)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.8)	(±4.0)	(±16.7)	(±0.2)	(±1.6)	(±0.4)
7.00	0.50	2.47E-06	10.7	40.6	39.7	36.7	36.5	47.0	0.0	0.0	0.0	17.1
7.50		(±2.77E-05)	(±3.4)	(±6.3)	(±4.2)	(±1.0)	(±17.7)	(±10.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.7)
7.50	0.65	4.16E-08	5.8	38.3	0.0	0.0	15.1	34.2	89.1	1.0	6.3	16.6
8.15		(±4.23E-07)	(±2.0)	(±38.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±11.1)	(±8.5)	(±19.0)	(±0.2)	(±1.7)	(±0.6)
8.15	0.35	1.26E-08	6.7	0.0	0.0	0.0	17.3	45.0	86.5	1.1	5.9	17.5
8.50		(±5.13E-09)	(±0.7)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±1.8)	(±5.3)	(±6.6)	(±0.1)	(±0.5)	(±0.3)
8.50	2.10	2.34E-08	5.7	0.0	0.0	0.0	12.5	34.9	88.0	0.8	5.3	16.5
10.60		(±1.69E-08)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.8)	(±4.1)	(±15.9)	(±0.2)	(±1.3)	(±0.4)

Summary table of mean values

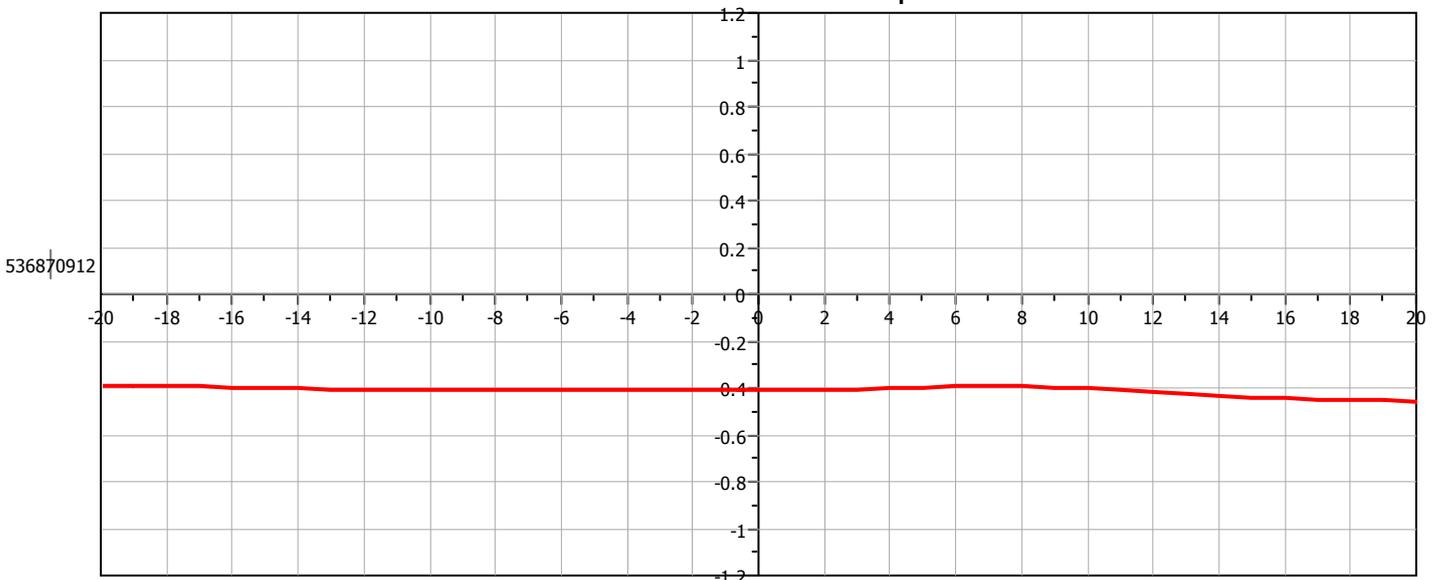
From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G ₀ (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
10.60	0.20	3.73E-07	12.1	60.9	42.3	37.3	37.6	60.2	0.0	0.0	0.0	17.9
10.80		(±5.34E-06)	(±6.1)	(±3.2)	(±4.7)	(±1.2)	(±32.6)	(±17.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.6)
10.80	0.70	4.84E-08	7.2	44.0	0.0	0.0	16.6	41.8	98.5	0.8	5.3	16.8
11.50		(±1.57E-06)	(±3.4)	(±2.6)	(±0.0)	(±0.0)	(±19.1)	(±12.8)	(±35.6)	(±0.3)	(±2.7)	(±0.8)
11.50	0.70	8.26E-09	6.6	0.0	0.0	0.0	12.2	44.5	83.3	0.8	4.1	17.2
12.20		(±2.55E-09)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±3.2)	(±5.1)	(±8.8)	(±0.1)	(±0.5)	(±0.3)
12.20	1.80	2.13E-08	8.0	0.0	0.0	0.0	18.4	49.3	116.4	0.9	5.6	17.3
14.00		(±2.39E-08)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±6.9)	(±6.8)	(±29.9)	(±0.2)	(±1.9)	(±0.4)
14.00	0.60	9.42E-09	9.5	0.0	0.0	0.0	21.2	62.3	114.0	0.9	5.0	17.9
14.60		(±4.15E-09)	(±0.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.6)	(±1.7)	(±9.7)	(±0.1)	(±0.6)	(±0.1)
14.60	0.50	3.88E-08	12.8	67.4	0.0	0.0	37.2	78.1	191.9	1.5	9.2	18.5
15.10		(±3.73E-08)	(±1.6)	(±4.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±7.1)	(±9.0)	(±40.2)	(±0.3)	(±2.6)	(±0.4)
15.10	0.70	2.66E-06	29.0	110.9	50.0	38.9	111.9	129.3	0.0	0.0	0.0	19.7
15.80		(±1.32E-05)	(±9.2)	(±14.7)	(±9.5)	(±1.9)	(±39.5)	(±28.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.7)
15.80	0.70	3.38E-08	12.1	79.1	0.0	0.0	30.2	72.4	145.1	1.0	5.8	18.1
16.50		(±4.60E-07)	(±6.0)	(±79.1)	(±0.0)	(±0.0)	(±33.0)	(±24.0)	(±52.6)	(±0.4)	(±3.1)	(±0.8)
16.50	2.37	6.02E-09	12.2	0.0	0.0	0.0	25.7	83.3	134.0	0.9	4.7	18.5
18.87		(±4.98E-09)	(±1.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.7)	(±10.2)	(±17.9)	(±0.1)	(±0.8)	(±0.4)

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

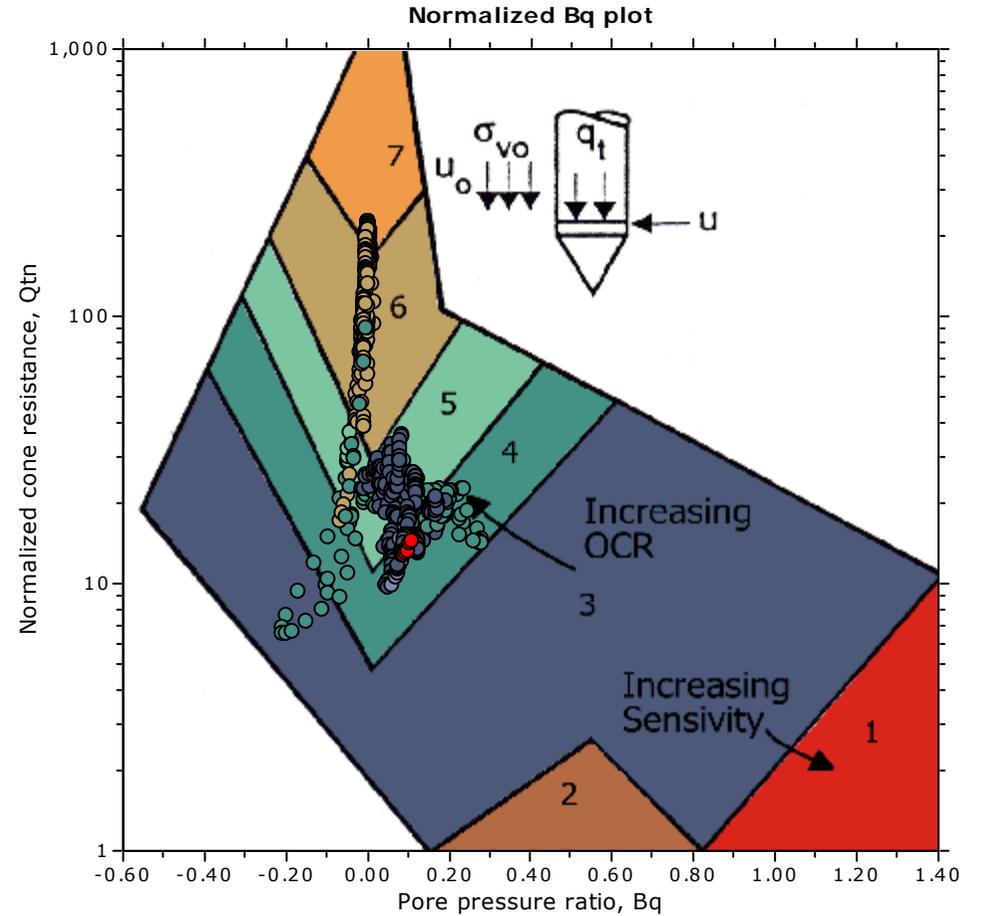
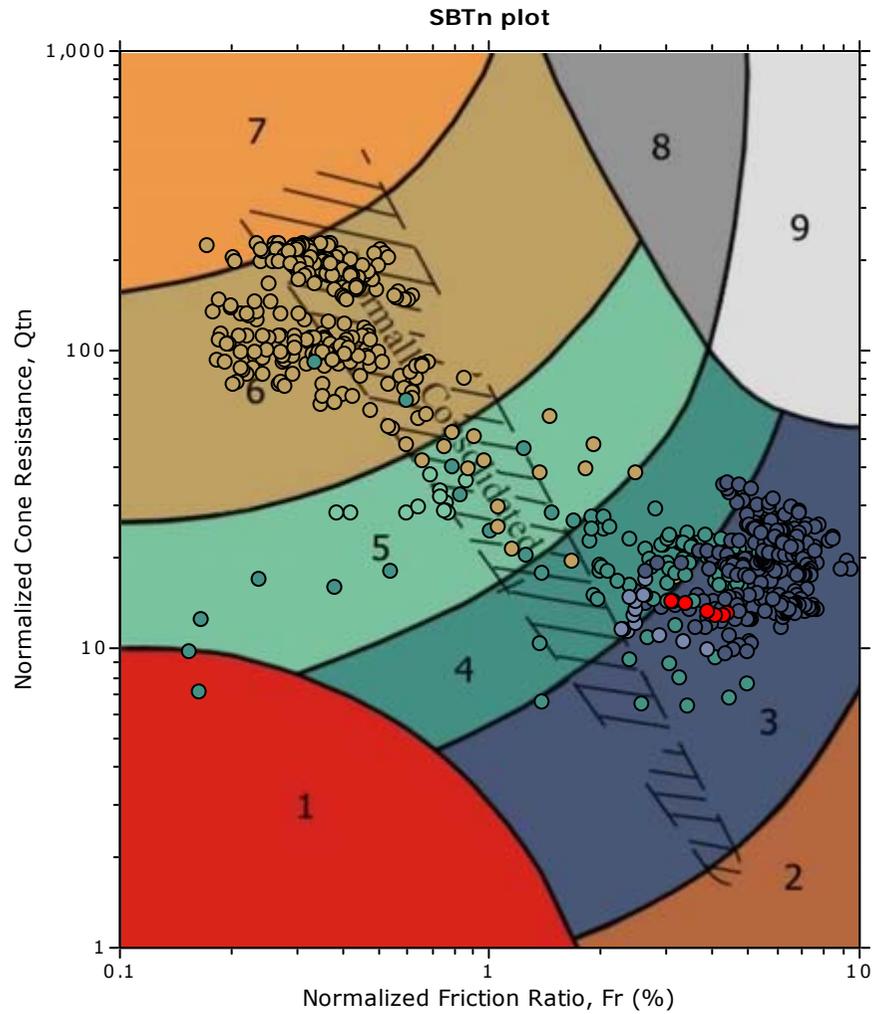


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between q_c & f_s

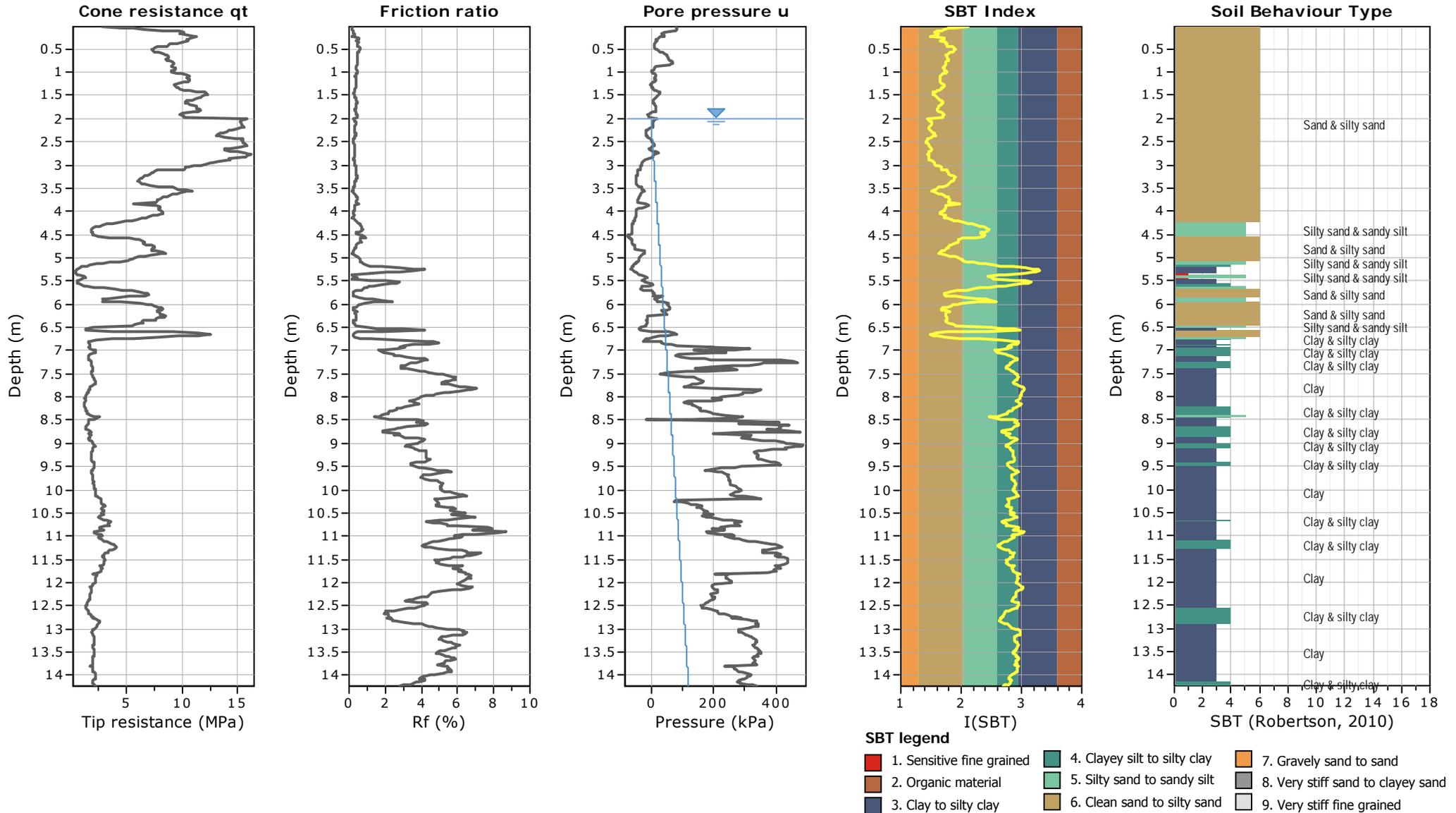


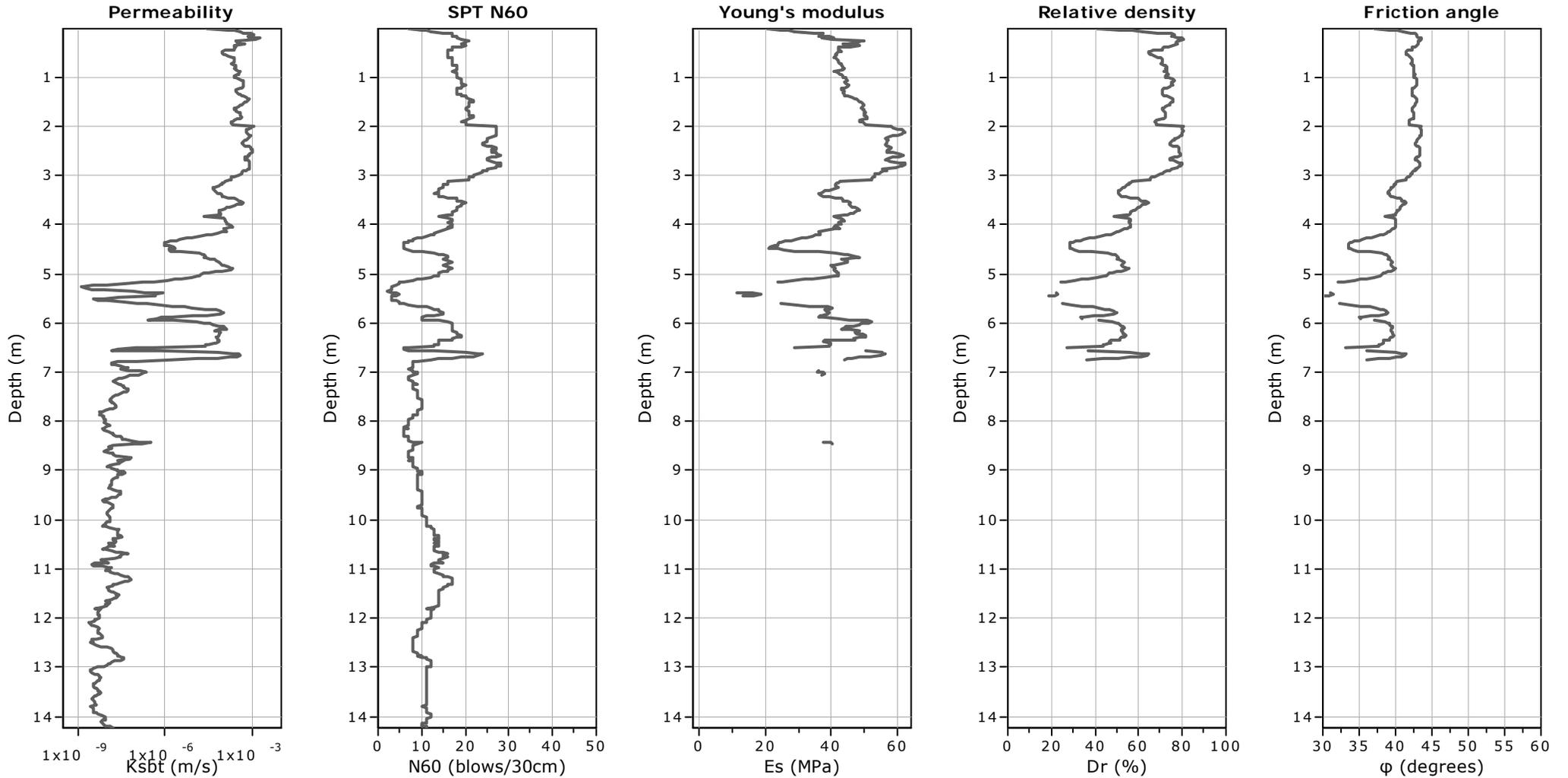
SBT - Bq plots (normalized)



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 |





Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

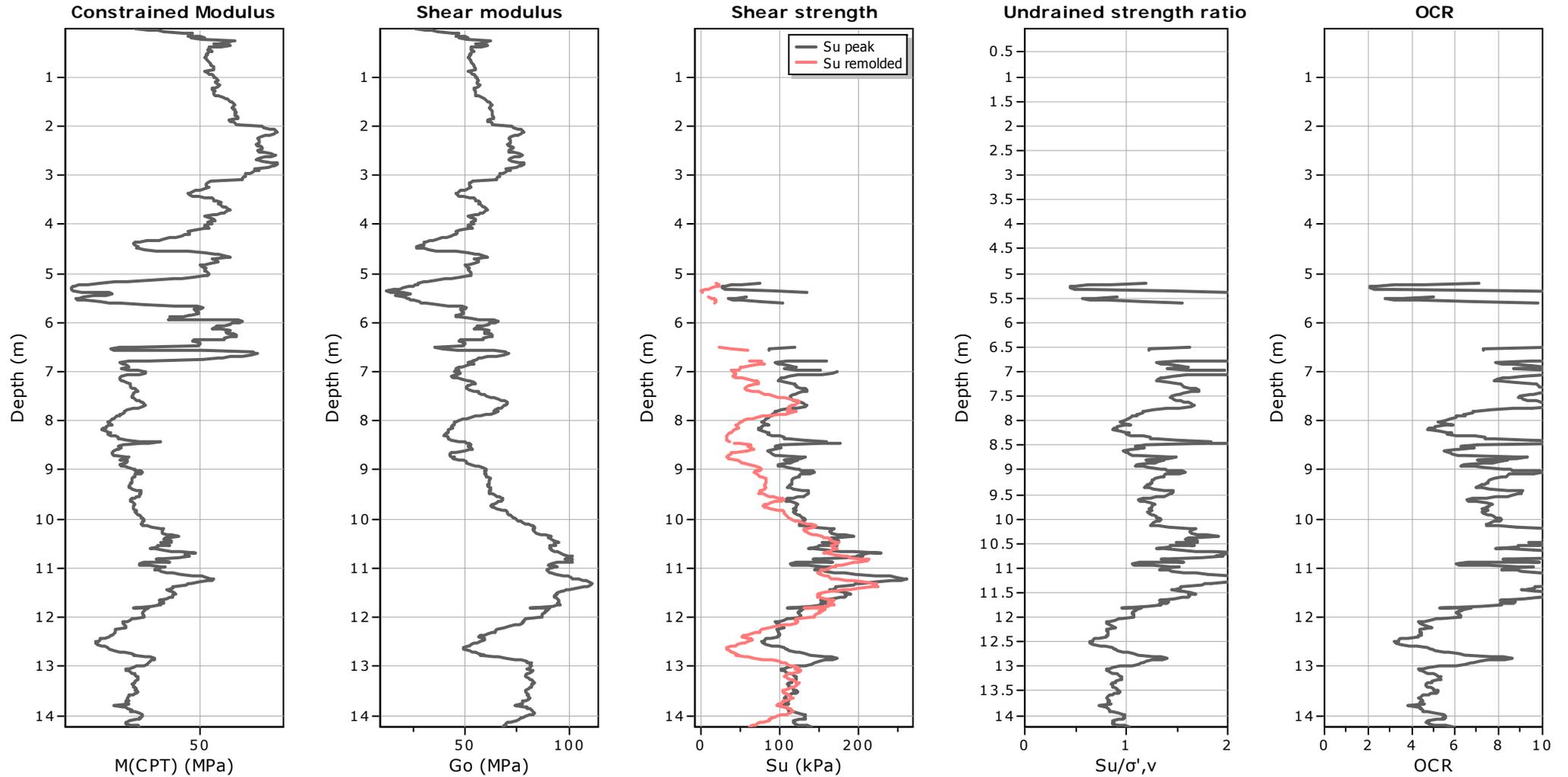
SPT N₆₀: Based on I_c and q_t

Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009)

Relative density constant, C_{Dr}: 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

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

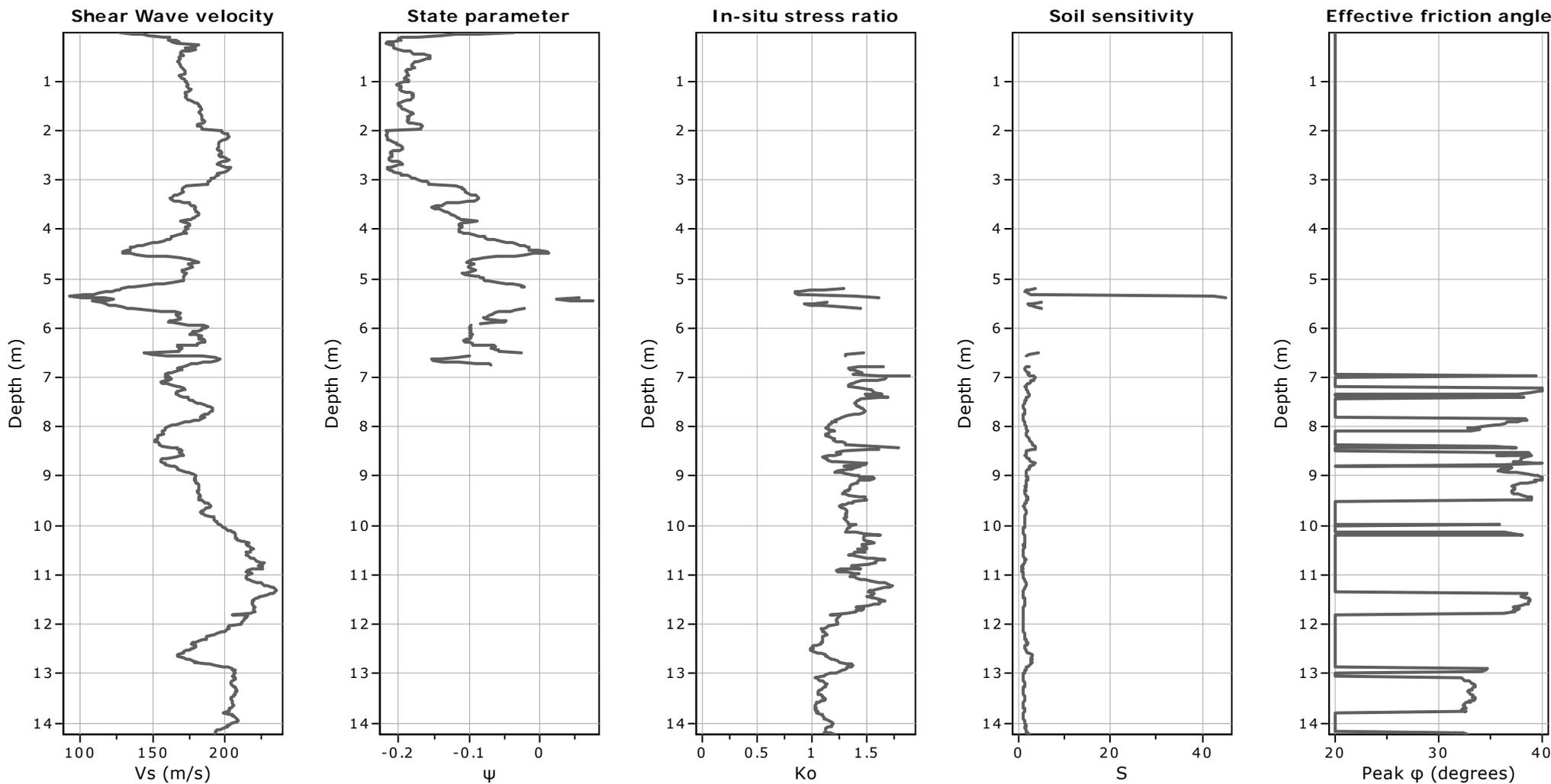
Go: Based on variable *alpha* using I_c (Robertson, 2009)

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

OCR factor for clays, N_{kt} : Auto

● User defined estimation data

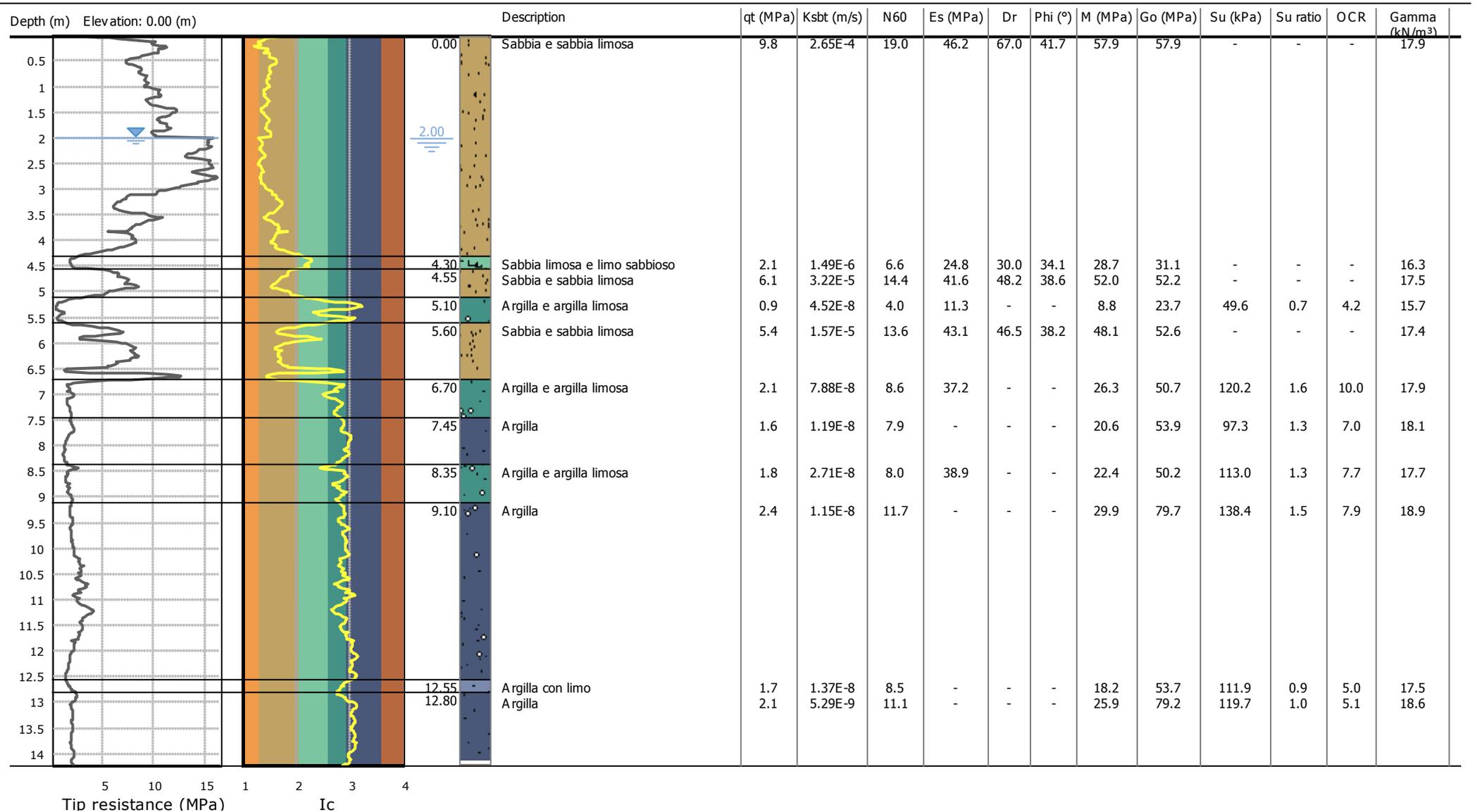
● Flat Dilatometer Test data

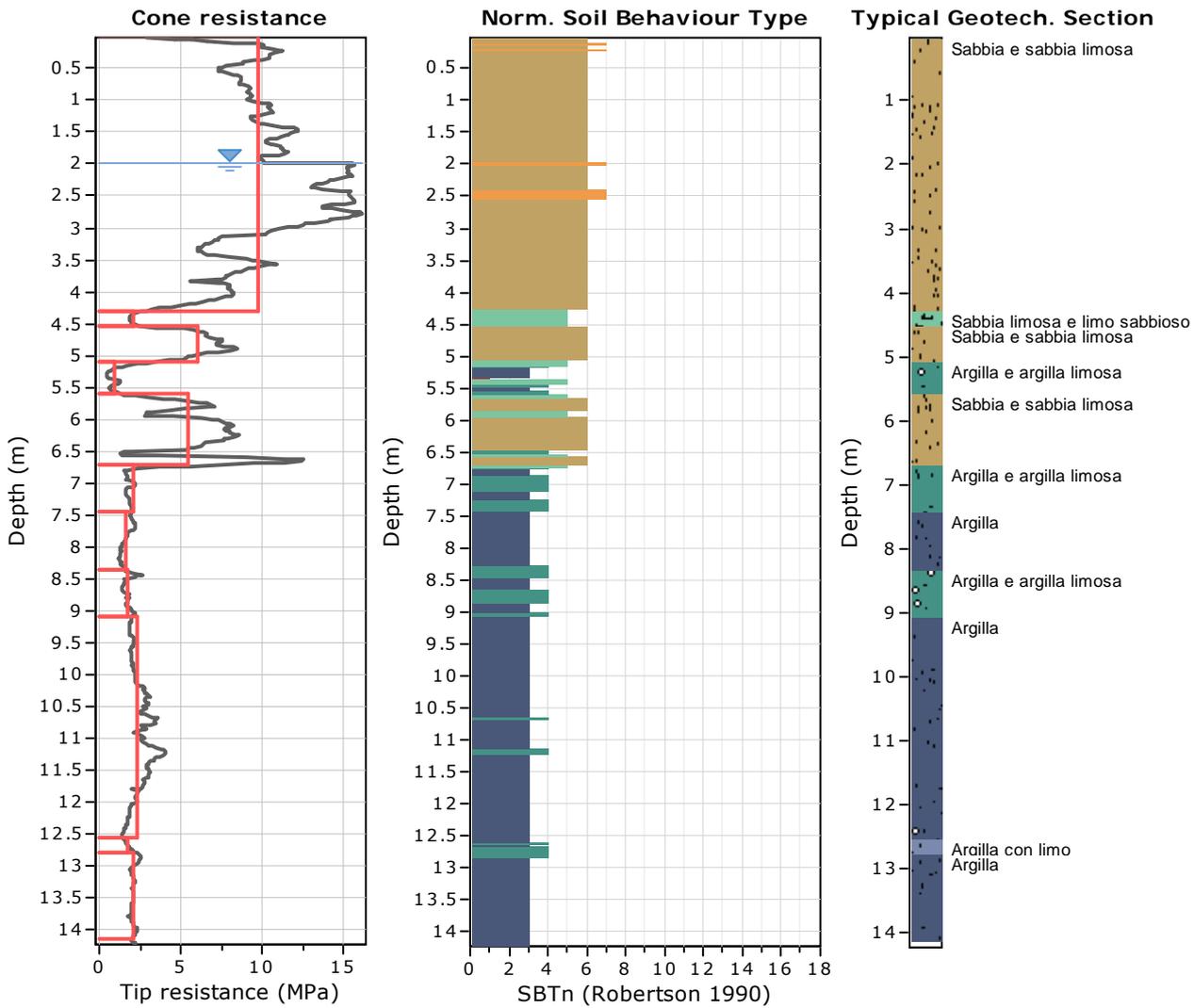


Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—●— User defined estimation data





Tabular results

:: Layer No: 1 ::		
Code: 1	Start depth: 0.00 (m), End depth: 4.30 (m)	
Description: Sabbia e sabbia limosa		
Basic results		
Total cone resistance:	9.81 ±3.08 MPa	
Sleeve friction:	34.03 ±10.71 kPa	
SBT _n :	6	
SBT _n description:	Sand & silty sand	
Estimation results		
Permeability:	2.65E-04 ±3.22E-04 m/s	Constrained Mod.: 57.95 ±10.02 MPa
N60:	18.96 ±4.45 blows	Go: 57.95 ±10.02 MPa
Es:	46.24 ±8.00 MPa	Su: 0.00 ±0.00 kPa
Dr (%):	66.95 ±10.27	Su ratio: 0.00 ±0.00
φ (degrees):	41.72 ±1.59 °	O.C.R.: 0.00 ±0.00
Unit weight:	17.92 ±0.51 kN/m ³	

.: Layer No: 2 .:

Code: 2 Start depth: 4.30 (m), End depth: 4.55 (m)

Description: Sabbia limosa e limo sabbioso

Basic results

Total cone resistance: 2.13 ±0.31 MPa

Sleeve friction: 13.57 ±3.88 kPa

SBT_n: 5

SBTn description: Silty sand & sandy silt

Estimation results

Permeability: 1.49E-06 ±7.01E-07 m/s

N60: 6.64 ±0.86 blows

Es: 24.84 ±2.58 MPa

Dr (%): 30.05 ±2.06

φ (degrees): 34.09 ±0.63 °

Unit weight: 16.28 ±0.39 kN/m³

Constrained Mod.: 28.66 ±3.82 MPa

Go: 31.14 ±3.24 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: 4.55 (m), End depth: 5.10 (m)

Description: Sabbia e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 6.10 ±1.50 MPa

Sleeve friction: 26.72 ±8.09 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 3.22E-05 ±6.52E-05 m/s

N60: 14.35 ±2.24 blows

Es: 41.64 ±3.90 MPa

Dr (%): 48.23 ±5.62

φ (degrees): 38.60 ±1.21 °

Unit weight: 17.46 ±0.34 kN/m³

Constrained Mod.: 52.04 ±5.24 MPa

Go: 52.19 ±4.89 MPa

Su: 0.00 ±0.00 kPa

Su ratio: 0.00 ±0.00

O.C.R.: 0.00 ±0.00

.: Layer No: 4 .:

Code: 4 Start depth: 5.10 (m), End depth: 5.60 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 0.94 ±0.78 MPa

Sleeve friction: 10.25 ±8.64 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 4.52E-08 ±8.97E-07 m/s

N60: 4.01 ±2.01 blows

Es: 11.33 ±11.33 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 15.74 ±1.01 kN/m³

Constrained Mod.: 8.75 ±11.97 MPa

Go: 23.72 ±7.48 MPa

Su: 49.64 ±31.49 kPa

Su ratio: 0.67 ±0.24

O.C.R.: 4.19 ±3.34

.: Layer No: 5 .:

Code: 5 Start depth: 5.60 (m), End depth: 6.70 (m)

Description: Sabbia e sabbia limosa

Basic results

Total cone resistance: 5.44 ±2.93 MPa

Sleeve friction: 26.95 ±13.94 kPa

SBT_n: 6

SBTn description: Sand & silty sand

Estimation results

Permeability: 1.57E-05 ±9.54E-05 m/s

N60: 13.63 ±4.63 blows

Es: 43.06 ±7.24 MPa

Dr (%): 46.49 ±8.95

φ (degrees): 38.21 ±2.00 °

Unit weight: 17.43 ±0.51 kN/m³

Constrained Mod.: 48.08 ±14.16 MPa

Go: 52.58 ±9.92 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: 6.70 (m), End depth: 7.45 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 2.10 ±1.70 MPa

Sleeve friction: 53.65 ±15.38 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 7.88E-08 ±3.12E-05 m/s

N60: 8.62 ±2.55 blows

Es: 37.22 ±0.94 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.85 ±0.26 kN/m³

Constrained Mod.: 26.30 ±10.59 MPa

Go: 50.70 ±4.33 MPa

Su: 120.23 ±20.51 kPa

Su ratio: 1.60 ±0.18

O.C.R.: 9.98 ±2.04

.: Layer No: 7 .:

Code: 7 Start depth: 7.45 (m), End depth: 8.35 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 1.63 ±0.34 MPa

Sleeve friction: 71.45 ±34.18 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 1.19E-08 ±6.96E-09 m/s

N60: 7.95 ±1.51 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.09 ±0.61 kN/m³

Constrained Mod.: 20.61 ±5.02 MPa

Go: 53.92 ±10.95 MPa

Su: 97.29 ±19.63 kPa

Su ratio: 1.30 ±0.33

O.C.R.: 7.05 ±2.01

.: Layer No: 8 .:

Code: 8 Start depth: 8.35 (m), End depth: 9.10 (m)

Description: Argilla e argilla limosa

Basic results

Total cone resistance: 1.76 ±0.29 MPa

Sleeve friction: 50.45 ±15.78 kPa

SBT_n: 4

SBTn description: Clay & silty clay

Estimation results

Permeability: 2.71E-08 ±5.80E-08 m/s

N60: 8.02 ±0.96 blows

Es: 38.94 ±1.79 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.71 ±0.37 kN/m³

Constrained Mod.: 22.44 ±4.10 MPa

Go: 50.16 ±6.17 MPa

Su: 112.98 ±21.92 kPa

Su ratio: 1.28 ±0.20

O.C.R.: 7.68 ±1.86

.: Layer No: 9 .:

Code: 9 Start depth: 9.10 (m), End depth: 12.55 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 2.38 ±0.61 MPa

Sleeve friction: 123.35 ±44.73 kPa

SBT_n: 3

SBTn description: Clay

Estimation results

Permeability: 1.15E-08 ±1.23E-08 m/s

N60: 11.70 ±2.44 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.86 ±0.51 kN/m³

Constrained Mod.: 29.91 ±9.10 MPa

Go: 79.73 ±15.47 MPa

Su: 138.42 ±38.63 kPa

Su ratio: 1.47 ±0.40

O.C.R.: 7.88 ±2.82

.: Layer No: 10 .:

Code: 10 Start depth: 12.55 (m), End depth: 12.80 (m)

Description: Argilla con limo

Basic results

Total cone resistance: 1.75 ±0.27 MPa

Sleeve friction: 41.51 ±7.04 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 1.37E-08 ±9.17E-09 m/s

N60: 8.54 ±0.76 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 17.49 ±0.22 kN/m³

Constrained Mod.: 18.24 ±5.81 MPa

Go: 53.71 ±4.20 MPa

Su: 111.93 ±22.82 kPa

Su ratio: 0.88 ±0.16

O.C.R.: 5.02 ±1.27

.: Layer No: 11 .:

Code: 11 Start depth: 12.80 (m), End depth: 14.13 (m)

Description: Argilla

Basic results

Total cone resistance: 2.13 ±0.17 MPa

Sleeve friction: 106.08 ±14.69 kPa

SBT_n: 3SBT_n description: Clay**Estimation results**

Permeability: 5.29E-09 ±7.71E-09 m/s

N60: 11.13 ±0.42 blows

Es: 0.00 ±0.00 MPa

Dr (%): 0.00 ±0.00

φ (degrees): 0.00 ±0.00 °

Unit weight: 18.64 ±0.17 kN/m³

Constrained Mod.: 25.88 ±2.91 MPa

Go: 79.24 ±3.59 MPa

Su: 119.71 ±16.49 kPa

Su ratio: 1.04 ±0.11

O.C.R.: 5.11 ±1.03

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _s (MPa)	D _r	Friction angle	Constrained modulus, M (MPa)	Shear modulus, G _o (MPa)	Undrained strength, S _u (kPa)	Undrained strength ratio	OCR	Unit weight (kN/m ³)
0.00	4.30	2.65E-04	19.0	46.2	67.0	41.7	57.9	57.9	0.0	0.0	0.0	17.9
4.30		(±3.22E-04)	(±4.5)	(±8.0)	(±10.3)	(±1.6)	(±10.0)	(±10.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
4.30	0.25	1.49E-06	6.6	24.8	30.0	34.1	28.7	31.1	0.0	0.0	0.0	16.3
4.55		(±7.01E-07)	(±0.9)	(±2.6)	(±2.1)	(±0.6)	(±3.8)	(±3.2)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.4)
4.55	0.55	3.22E-05	14.4	41.6	48.2	38.6	52.0	52.2	0.0	0.0	0.0	17.5
5.10		(±6.52E-05)	(±2.2)	(±3.9)	(±5.6)	(±1.2)	(±5.2)	(±4.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.3)
5.10	0.50	4.52E-08	4.0	11.3	0.0	0.0	8.8	23.7	49.6	0.7	4.2	15.7
5.60		(±8.97E-07)	(±2.0)	(±11.3)	(±0.0)	(±0.0)	(±12.0)	(±7.5)	(±31.5)	(±0.2)	(±3.3)	(±1.0)
5.60	1.10	1.57E-05	13.6	43.1	46.5	38.2	48.1	52.6	0.0	0.0	0.0	17.4
6.70		(±9.54E-05)	(±4.6)	(±7.2)	(±8.9)	(±2.0)	(±14.2)	(±9.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.5)
6.70	0.75	7.88E-08	8.6	37.2	0.0	0.0	26.3	50.7	120.2	1.6	10.0	17.9
7.45		(±3.12E-05)	(±2.6)	(±0.9)	(±0.0)	(±0.0)	(±10.6)	(±4.3)	(±20.5)	(±0.2)	(±2.0)	(±0.3)
7.45	0.90	1.19E-08	7.9	0.0	0.0	0.0	20.6	53.9	97.3	1.3	7.0	18.1
8.35		(±6.96E-09)	(±1.5)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.0)	(±11.0)	(±19.6)	(±0.3)	(±2.0)	(±0.6)
8.35	0.75	2.71E-08	8.0	38.9	0.0	0.0	22.4	50.2	113.0	1.3	7.7	17.7
9.10		(±5.80E-08)	(±1.0)	(±1.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±4.1)	(±6.2)	(±21.9)	(±0.2)	(±1.9)	(±0.4)
9.10	3.45	1.15E-08	11.7	0.0	0.0	0.0	29.9	79.7	138.4	1.5	7.9	18.9
12.55		(±1.23E-08)	(±2.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±9.1)	(±15.5)	(±38.6)	(±0.4)	(±2.8)	(±0.5)
12.55	0.25	1.37E-08	8.5	0.0	0.0	0.0	18.2	53.7	111.9	0.9	5.0	17.5
12.80		(±9.17E-09)	(±0.8)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±5.8)	(±4.2)	(±22.8)	(±0.2)	(±1.3)	(±0.2)
12.80	1.33	5.29E-09	11.1	0.0	0.0	0.0	25.9	79.2	119.7	1.0	5.1	18.6
14.13		(±7.71E-09)	(±0.4)	(±0.0)	(±0.0)	(±0.0)	(±2.9)	(±3.6)	(±16.5)	(±0.1)	(±1.0)	(±0.2)

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

Allegato 2

Indagini geognostiche eseguite per questo studio (4 test di dissipazione – CPTu-3)

Dissipation Tests Results

Dissipation tests

Dissipation tests consists of stopping the piezocone penetration and observing porepressures (u) with elapsed time (t). The data are automatic recorded by the field computer and should take place until a minimum of 50% dissipation.

The porepressures are plotted as a function of square root of (t). The graphical technique suggested by Robertson and Campanella (1989), yields a value for t_{50} , which corresponds to the time for 50% consolidation.

The value of the coefficient of consolidation in the radial or horizontal direction c_h was then calculated by Houlsby and Teh's (1988) theory using the following equation:

$$c_h = \frac{T \times r^2 \times I_r^{0.5}}{t_{50}}$$

where:

T: time factor given by Houlsby and Teh's (1988) theory corresponding to the porepressure position

r: piezocone radius

I_r : stiffness index, equal to shear modulus G divided by the undrained strength of clay (S_u).

t_{50} : time corresponding to 50% consolidation

Permeability estimates based on dissipation test

The dissipation of pore pressures during a CPTu dissipation test is controlled by the coefficient of consolidation in the horizontal direction (c_h) which is influenced by a combination of the soil permeability (k_h) and compressibility (M), as defined by the following:

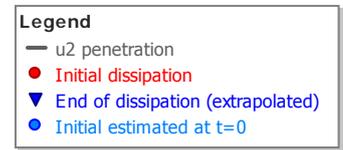
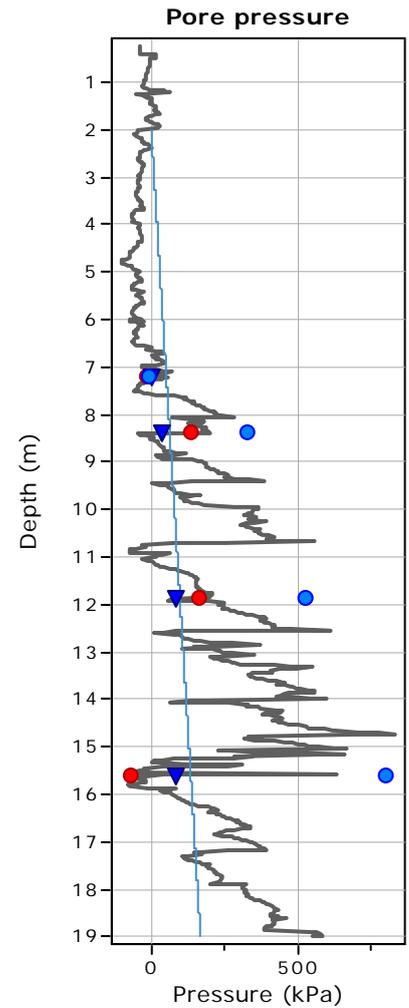
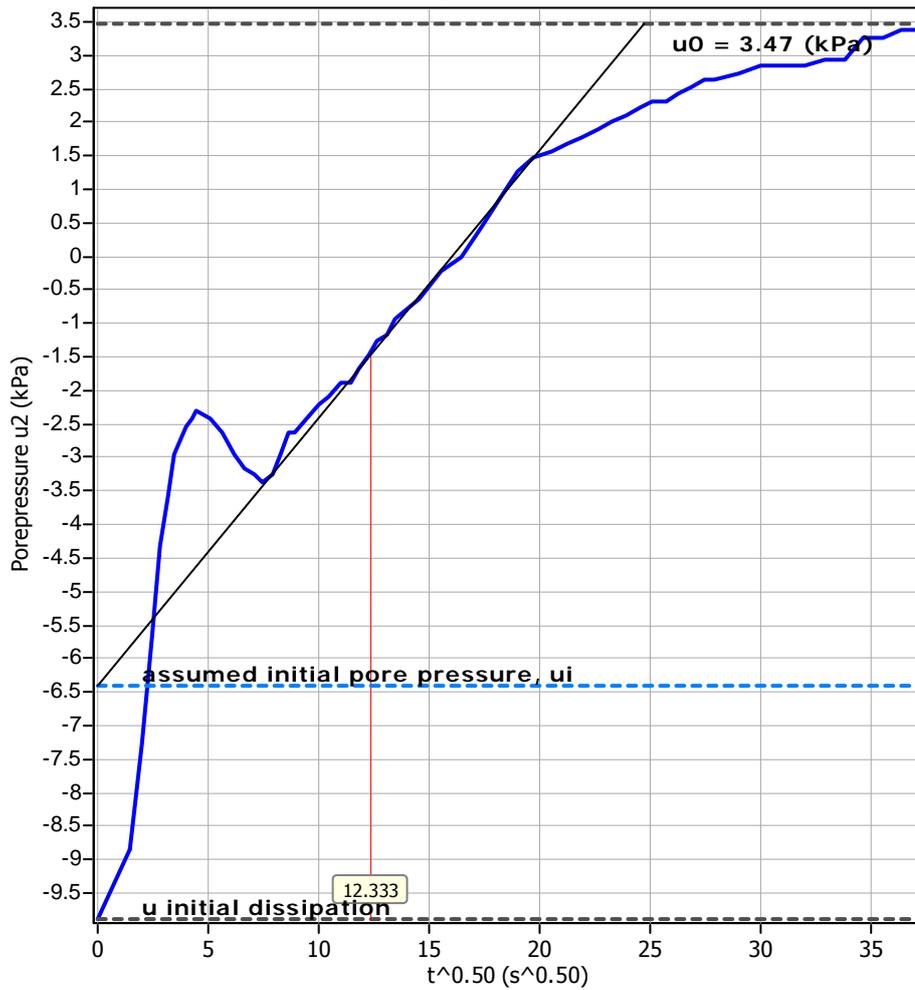
$$k_h = c_h \times \gamma_w / M$$

where: M is the 1-D constrained modulus and γ_w is the unit weight of water, in compatible units.

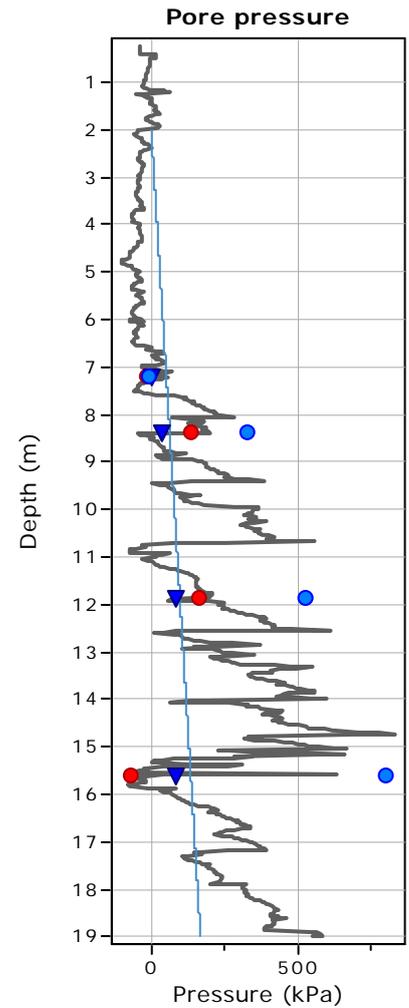
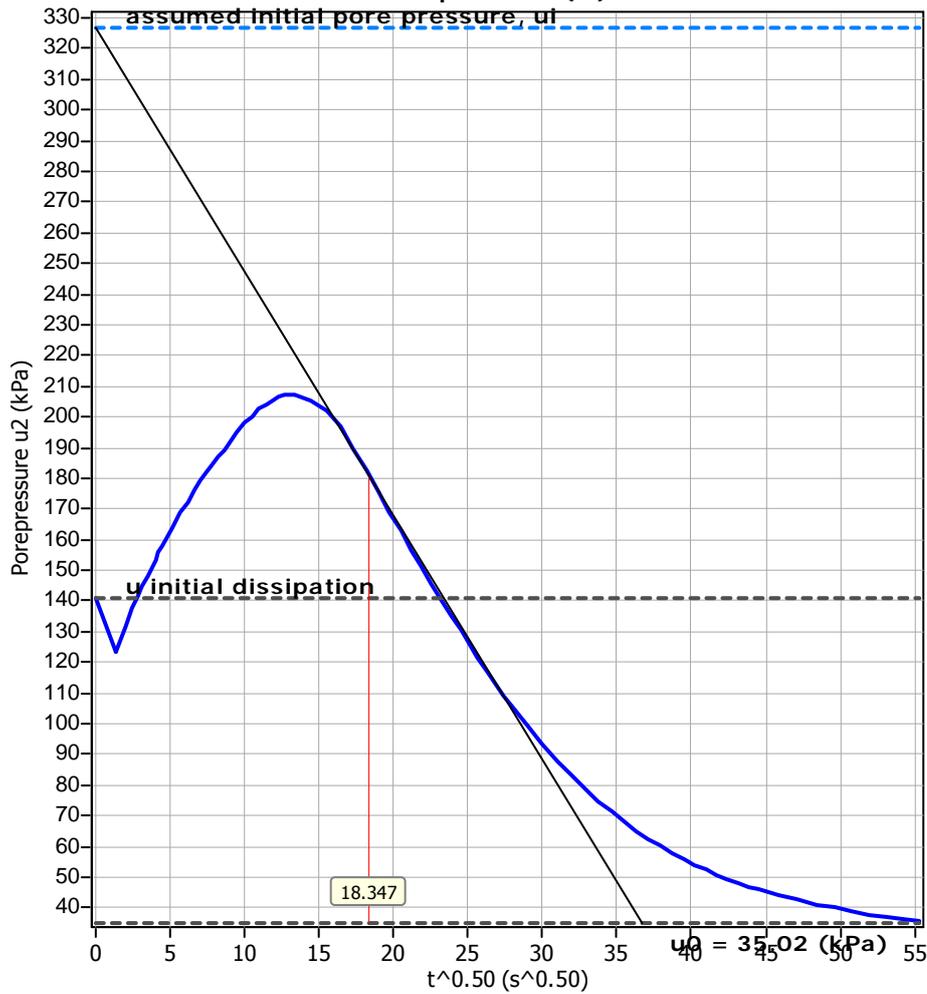
Tabular results

CPTu Borehole	Depth (m)	$(t_{50})^{0.50}$	t_{50} (s)	t_{50} (years)	G/ S_u	c_h (m^2/s)	c_h ($m^2/year$)	M (MPa)	k_h (m/s)
CPTu-3	7.21	12.3	152	4.82E-006	100.00	5.10E-006	161	46.90	1.07E-009
CPTu-3	8.41	18.3	337	1.07E-005	159.33	2.91E-006	92	21.53	1.33E-009
CPTu-3	11.89	17.8	316	1.00E-005	157.33	3.08E-006	97	20.60	1.47E-009
CPTu-3	15.64	2.9	8	2.65E-007	100.00	9.30E-005	2933	156.36	5.84E-009

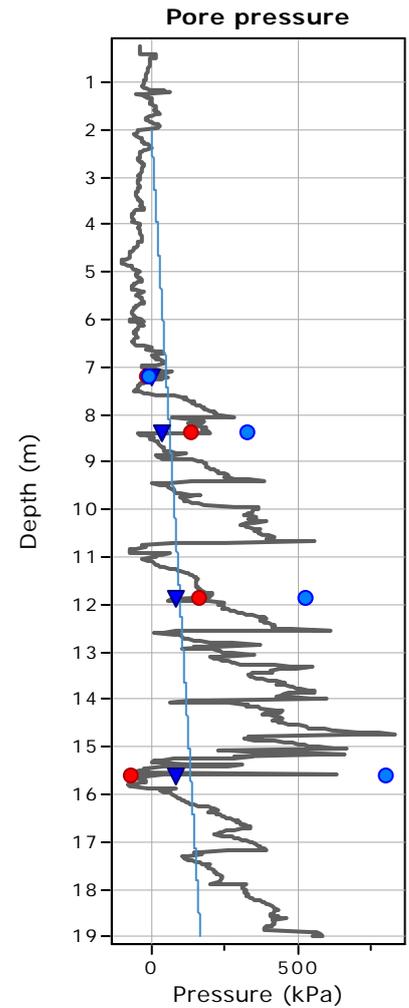
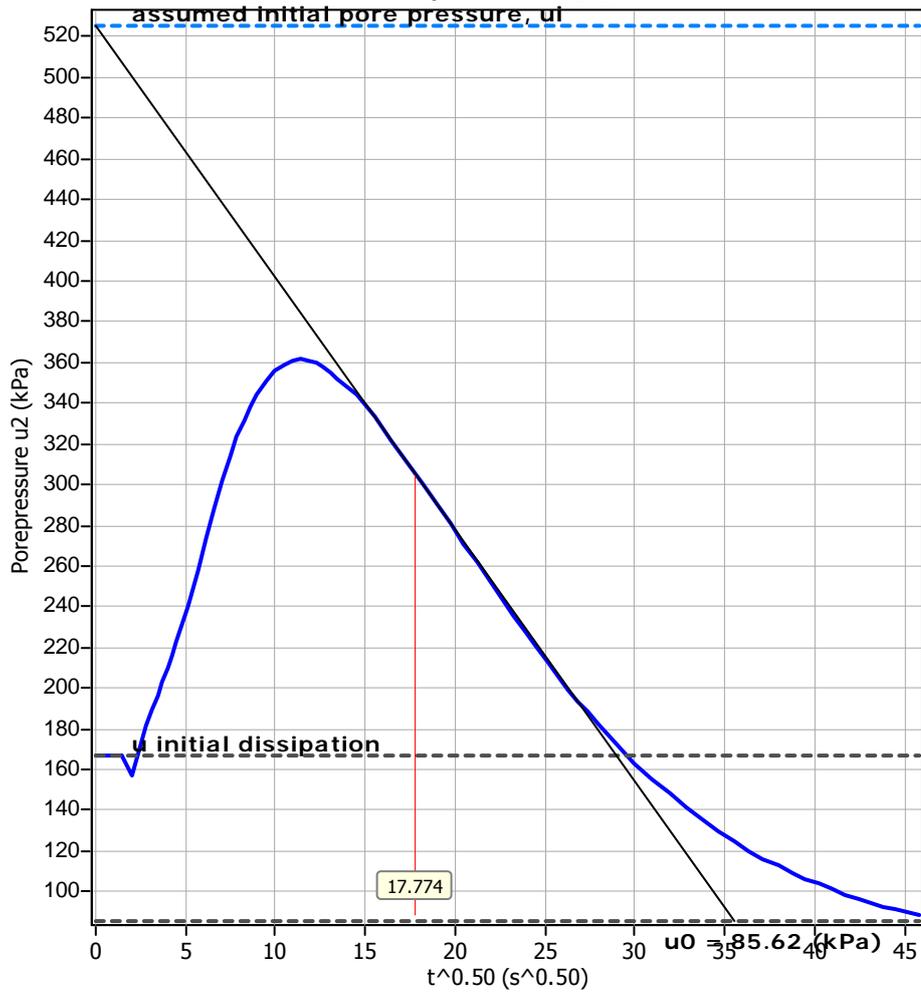
Piezocone Dissipation Test: CPTu-3
Depth: 7.21 (m)



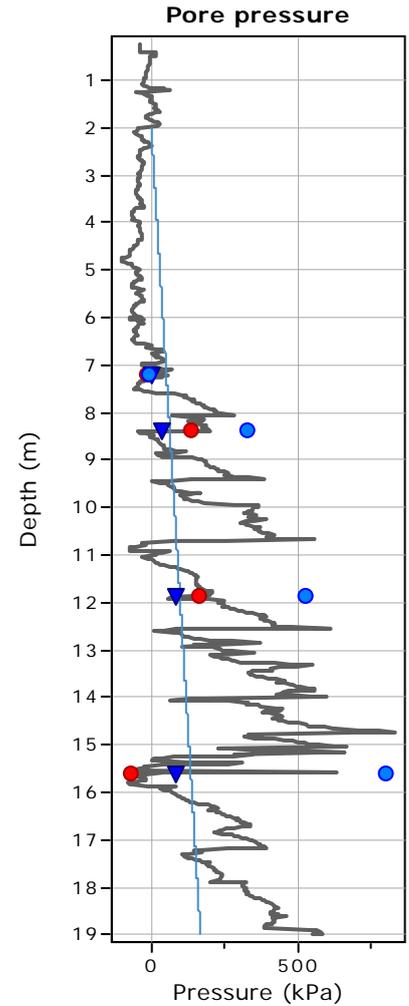
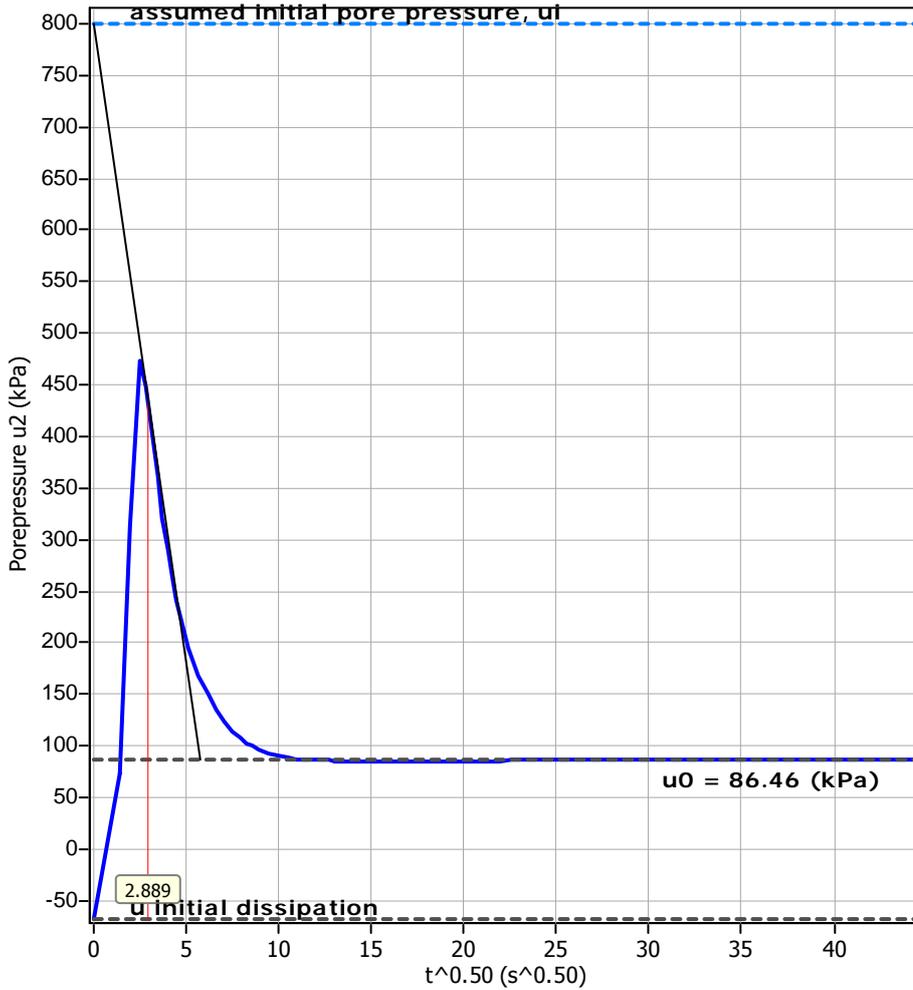
Piezcone Dissipation Test: CPTu-3
Depth: 8.41 (m)



Piezocone Dissipation Test: CPTu-3
Depth: 11.89 (m)



Piezcone Dissipation Test: CPTu-3 Depth: 15.64 (m)



Allegato 3

Indagini geognostiche eseguite per questo studio (1 sondaggi carotaggio continuo)



COMMITTENTE: Dott. Geol. Franchi Valeriano	SOND.N°: S.1	PROF.(m): 35.00
CANTIERE: Riccione (FC), Via Milano angolo Via Oberdan c/o ex Delfinario	QUOTA (m): p.d.c.	
PERFORATRICE: CMV MK900 D1	LATITUDINE (°): N.44.001082°	
METODO PERFORAZ.: Carotaggio continuo	LONGITUDINE (°): E.12.664268°	
ATTREZZO PERFORAZ.: Carotiere semplice	DATA INIZ-FINE: 06/06/2019-07/06/2019	
PIEZOMETRO:	SCALA: 1:100	
RIF.PREV.N°: 129-19	CERTIFICATO N°: C19-044-1	RAPPORTO N°: -----
	DATA DI EMISSIONE: 11/06/2019	PAGINA N°: 1 di 2

Scala 1:100	P.P. I [daN/cm²]	Vane Test [daN/cm²]	Profondita'	Stratigrafia	Descrizione	Falda	Campioni	Campioni Rim.	S.P.T. [n. colpi] P.A.	Pz.Norton	Tube Down Hole	
1			0.40		Terreno di riporto costituito da ghiaia, sabbia e frammenti di laterizi							
2					Sabbia media-fine di colore nocciola scuro-ocra, con livelli decimetrici, da -0.7 a -0.8 m e da -1.9 a -2.0 m, più limosi. Presenti rare radici e rari frustoli organici di colore nerastro fino a -1.5 m			1.80 CD1	2.00 5/7/8			
3								2.00	2.45			
4									4.00	4/6/6		
5			5.20						4.45			
6						Sabbia media-grossolana di colore grigio, con scarsa matrice limosa. Presenti piccoli frammenti di bivalvi			6.00	4/5/6		
7			7.00		Limo sabbioso di colore grigio-verde, con sfumature nerastre nella parte centrale dell'intervallo, in corrispondenza di un aumento della componente sabbiosa. Presenti piccoli frammenti di bivalvi							
8	3.0	1.60	7.50 7.70						8.00	3/4/6		
9	0.9	0.60	8.40		Sabbia fine debolmente limosa di colore nocciola. Presenti piccoli frammenti di bivalvi				8.45			
	1.5	0.80			Argilla limosa di colore grigio-verde con sfumature nerastre. Presenti calcinelli							
10			9.50		Limo argilloso sabbioso di colore nocciola con sfumature grigie e zonature ocre. Presenti calcinelli		9.50 C.I.1		10.00			
	2.5	1.10	10.00		Campione indisturbato		10.00		5/6/7			
11	4.0	1.80	10.45		Limo argilloso sabbioso di colore nocciola con sfumature grigie e zonature ocre. Presenti calcinelli				10.45			
12	4.5	2.00			Limo argilloso, talora sabbioso, di colore variabile da grigio chiaro a grigio scuro-verde, con sfumature nerastre e striature ocracee nelle zone più sabbiose. Presenti calcinelli				12.00			
	3.5	2.00							6/6/7	12.45		
13	5.0	2.20										
14	> 6		13.50		Campione indisturbato		13.50 C.I.2		14.00			
	2.5	1.60	14.00		Limo argilloso, talora sabbioso, di colore variabile da grigio chiaro a grigio scuro-verde, tendente all'azzurro nella componente più fine da circa -20.0 m, con sfumature nerastre e striature ocracee nelle zone più sabbiose. Presenti calcinelli				5/6/7			
15	3.0	1.60							14.45			
16	3.0	1.60							15.00	8/9/9		
	2.5	1.10							15.45			
17	5.0	2.00										
	2.5	1.20								18.00		
18	2.0	0.80							8/11/11	18.45		
19	2.5	1.60										
	1.3	0.90										
20	2.2	0.80								20.00		
	2.4	0.80							11/13/16			
21	2.3	1.00							20.45			
	3.5	1.60										
22	2.8	1.40							22.30			
	3.0	1.20							10/10/13			
23	3.0	1.20							22.75			
	3.5	1.80										
24	3.0	1.80	23.90		Campione indisturbato		23.90 C.I.3		24.40			
			24.40		Limo argilloso, talora sabbioso, di colore variabile da grigio chiaro a grigio scuro-verde, tendente all'azzurro nella componente più fine, con sfumature nerastre e striature ocracee nelle zone più sabbiose. Presenti calcinelli		24.40		24.40			
25			24.85						13/13/15			
					Argilla limosa di colore marrone-grigio, con sfumature ocracee-rossastre, con ghiaia fine e rari ciottoli (Ømax = 4 cm)				24.85			
26			26.00									
					Argilla limosa di colore grigio chiaro-nocciola con rare sfumature ocracee, con ghiaia fine e rari ciottoli (Ømax = 4 cm)				26.50			
27			26.95						17/18/20			
					Ghiaia fine in matrice limosa sabbiosa di colore grigio chiaro-nocciola chiaro				26.95			
28			27.70									
					Ghiaia media (Ømax = 1 cm) in matrice limo sabbiosa di colore grigio				27.00 CD2			
								27.40				
29	1.2	0.60	28.45		Argilla limosa, debolmente sabbiosa, di colore nocciola-grigio-verdastro, con sfumature ocre. Presenti rari calcinelli				28.00			
	2.7	1.40							15/16/17			
	2.3	1.60							28.45			
30	2.0	1.20	29.40		Argilla limosa, debolmente sabbiosa, di colore grigio-verde-azzurro, con rare sfumature ocracee nei livelli più sabbiosi							
	3.0	1.60										

Lo Sperimentatore

Il Direttore del Laboratorio



SOGEO S.R.L.
 INDAGINI GEOGNOSTICHE ED AMBIENTALI
 Via S. Potito n. 43 - 48022 S. Potito di LUGO (RA)
 Tel. 054522042 - Fax 054534443 - E-mail: sogeo@sogeo-srl.com
 Concessione Ministero Infrastrutture e Trasporti - Settore C
 Decr. n. 005754 del 05/07/2010

COMMITTENTE: Dott. Geol. Franchi Valeriano	SOND.N°: S.1	PROF.(m): 35.00
CANTIERE: Riccione (FC), Via Milano angolo Via Oberdan c/o ex Delfinario	QUOTA (m): p.d.c.	
PERFORATRICE: CMV MK900 D1	LATITUDINE (°): N.44.001082°	
METODO PERFORAZ.: Carotaggio continuo	LONGITUDINE (°): E.12.664268°	
RIVESTIMENTO: Ø 127 mm	ATTREZZO PERFORAZ.: Carotiere semplice	
PIEZOMETRO:	DATA INIZ-FINE: 06/06/2019-07/06/2019	
RIF.PREV.N°: 129-19	CERTIFICATO N°: C19-044-1	RAPPORTO N°: -----
	DATA DI EMISSIONE: 11/06/2019	PAGINA N°: 1 di 2

Scala 1:100	P.P. I [daN/cm²]	Vane Test [daN/cm²]	Profondita'	Stratigrafia	Descrizione	Falda	Campioni	Campioni Rim.	S.P.T. [n. colpi] P.A.	Pz.Norton	Tubo Down Hole
31	3.0 2.5	1.60 1.60							30.00 18/19/20 30.45		
32	1.8 2.5	1.20 1.40			Argilla limosa, debolmente sabbiosa, di colore grigio-verde-azzurro, con rare sfumature ocracee nei livelli più sabbiosi				32.00 19/19/19 32.45		
33	1.8	1.40									
34	2.6 2.8 3.2 1.5	1.60 1.60 1.50 0.40	33.70		Argilla limosa, debolmente sabbiosa, di colore grigio scuro-antracite-grigio						
35			34.30 34.60 35.00		Sabbia media-fine, debolmente limosa, di colore grigio-grigio scuro-azzurro-verdastro				34.55 32/30/33 35.00		35.00
36											
37											
38											
39											
40											

Note:
 Variazione litologica a -10.45 m stimata perchè all'interno del campione C.I.1 o della prova S.P.T. da -10.00 a -10.45 m.
 Variazione litologica a -26.95 m stimata perchè all'interno della prova S.P.T. da -26.50 a -26.95 m.

C.I. = campioni indisturbati
 CD = campioni rimaneggiati

Lo Sperimentatore

Il Direttore del Laboratorio



SOGEO S.R.L.
INDAGINI GEOGNOSTICHE ED AMBIENTALI
Via S. Potito n. 43 - 48022 S. Potito di Lugo (RA)
Tel. 054522042 - Fax 054534443 - E-mail: sogeo@sogeo-srl.com

COMMITTENTE: Dott. Franchi Valeriano

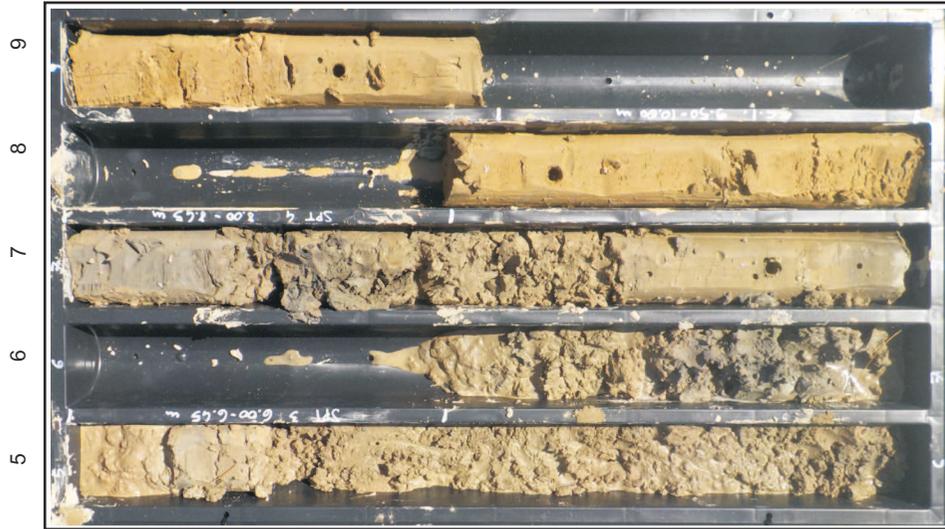
LOCALITA': Via Milano, Riccione (FC) - ex Delfinario

SONDAGGIO N: S.1

RIF. N° : 129-19

ALLEGATO A: C19-044-1

DATA: 06/06/2019



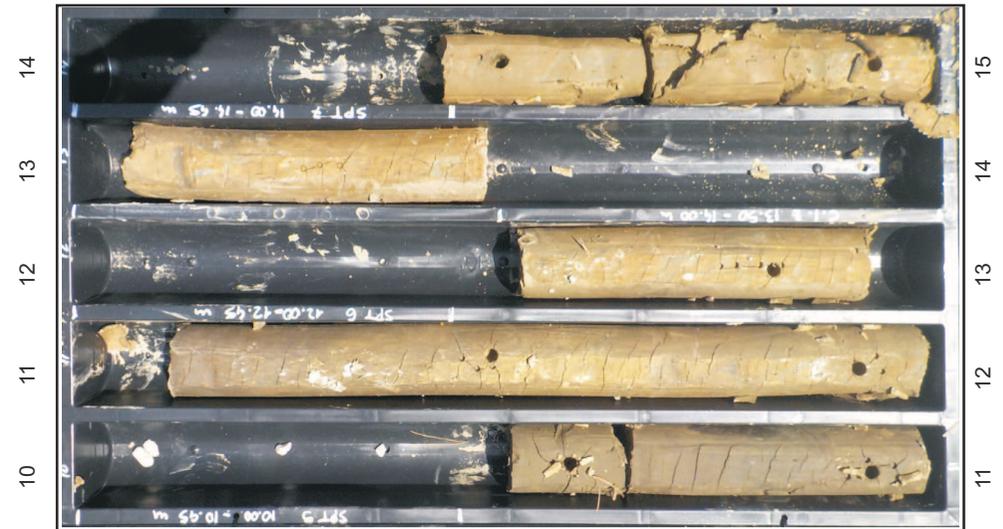
Cassa 2 da -5.0 a -10.0 m



Cassa 1 da 0.0 a -5.0 m



Cassa 4 da -15.0 a -20.0 m



Cassa 3 da -10.0 a -15.0 m



SOGEO S.R.L.
INDAGINI GEOGNOSTICHE ED AMBIENTALI
Via S. Potito n. 43 - 48022 S. Potito di Lugo (RA)
Tel. 054522042 - Fax 054534443 - E-mail: sogeo@sogeo-srl.com

COMMITTENTE: Dott. Franchi Valeriano

LOCALITA': Via Milano, Riccione (FC) - ex Delfinario **SONDAGGIO N: S.1**

RIF. N° : 129-19

ALLEGATO A: C19-044-1

DATA: 06/06/2019



Cassa 6 da -25.0 a -30.0 m



Posizionamento



Cassa 5 da -20.0 a -25.0 m



Cassa 7 da -30.0 a -35.0 m