

Dott. Saul Beghelli

GEOLOGO

(Ordine dei Geologi R.E.R. n°1018)

P. IVA 00874901200

C.F. BGH SLA 75A02 A944D

COMUNE DI CENTO

Provincia di Ferrara

PIANO DI RICOSTRUZIONE - COMUNE DI CENTO

Revisione del vincolo e declassamento

da restauro e risanamento conservativo di tipo B a ristrutturazione edilizia
in fabbricato situato nel centro storico di Cento, in Via Olindo Malagodi n°29

RELAZIONE GEOLOGICA - GEOTECNICA E SISMICA

Proprietà:

DOTT. BORGI PAOLO

Redazione:

DOTT. BEGHELLI SAUL



Bologna, lì 18 dicembre 2014

Via Saragozza n° 72 - 40123 Bologna

Tel. e fax 051-6446165 / Cell. 339-1903302

Via Lavino n° 479 - 40050 Monte S. Pietro (BO)

E-mail: beghelli@rilgeo.it - beghelli@epap.sicurezza postale.it

INDICE

1. PREMESSA	2
2. INQUADRAMENTO MORFOLOGICO E SEDIMENTOLOGICO	3
3. MODELLO DEL SOTTOSUOLO	4
4.1 PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CPTU)	4
4.2 SITUAZIONE LITOSTRATIGRAFICA	5
4.3 QUADRO IDROGEOLOGICO	6
4.4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	7
4. CARATTERIZZAZIONE SISMICA	9
4.1 LIQUEFAZIONE DEI TERRENI IN CONDIZIONI SISMICHE.....	10
4.1.1 Verifica a liquefazione da prove CPTU	10
4.1.2 Cedimenti post-sismici	12
5. CAPACITÀ PORTANTE TERRENI	12

IN ALLEGATO:

Tavola 1: Corografia, scala 1:25.000;

Tavola 2: Inquadramento territoriale, scala 1:5.000;

Tavola 3: Inquadramento geologico, scala 1: 5.000;

Tavola 4: Ubicazione indagini geologiche, scala 1:250;

Allegato A: Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU);

Allegato B: Prove penetrometriche statiche (CPT);

Allegato C: Studio sismico;

Allegato D: Verifica a liquefazione e cedimenti post-sismici.

1. PREMESSA

Il presente elaborato è stato redatto nell'ambito della richiesta, ai sensi del Piano di Ricostruzione del Comune di Cento, di revisione del vincolo e declassamento da restauro e risanamento conservativo di tipo B a ristrutturazione edilizia in fabbricato situato nel centro storico di Cento in Via Olindo Malagodi n°29. In particolare l'edificio in oggetto e l'area in cui si inserisce sono individuati:

- nella Tavola 202-NE "Cento" della Carta Topografica Regionale (Tavola 1);
- nell'Elemento n°202081 "Cento Est" della Cartografia Tecnica Regionale (Tavola 2);
- nel Foglio 63, Mappale 133, Subalterno 3 della Cartografia catastale del Comune di Cento.

Lo studio intende definire le caratteristiche litostratigrafiche e fisico-meccaniche dei depositi del primo sottosuolo, nonché inquadrare l'area dal punto di vista morfologico, idrogeologico e sismico, allo scopo di sviluppare un modello geologico del sito.

Al fine di perseguire gli obiettivi prefissati l'indagine si è svolta attraverso le seguenti fasi:

- analisi di superficie volta a definire il contesto d'inserimento e le caratteristiche morfologiche dell'area;
- ricostruzione di un quadro conoscitivo esauriente mediante l'esame della seguente cartografia e documentazione:
 - Carta geologica di pianura dell'Emilia Romagna alla scala 1:250.000, a cura della Regione Emilia Romagna;
 - Cartografia geologica a cura del Servizio geologico sismico e dei suoli della Regione Emilia Romagna (Tav. 3);
 - Sezioni geologiche e prove geognostiche della pianura emiliano-romagnola, a cura del Servizio geologico sismico e dei suoli regionale;
 - Quadro Conoscitivo del PSC Associazione Intercomunale alto ferrarese – Comuni di Bondeno - Cento- Mirabello - Poggio Renatico - Sant'Agostino - Vigarano Mainarda;
 - Cartografia di Microzonazione Sismica del Comune di Cento elaborata ai sensi dell'Ordinanza RER n°70/2012;
 - Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico;
 - Ortofoto AGEA 2008 e AGEA 2011;
- definizione delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni e ricostruzione del quadro litostratigrafico mediante:
 - la realizzazione di n°2 prove penetrometriche statiche con piezocono (certificati di indagine riportati nell'Allegato A);
 - l'analisi di dati già a disposizione nel medesimo sito, derivanti da n°2 prove penetrometriche statiche eseguite ad aprile 2008 a supporto di uno studio geologico-tecnico dei terreni del primo sottosuolo di un'area sita in Via Malagodi, sulla quale era in progetto la ristrutturazione di due fabbricati (certificati di indagine riportati nell'Allegato B);
- caratterizzazione sismo-stratigrafica e ricostruzione del profilo di velocità delle onde S, mediante indagine MASW abbinata a prova HVSR, e successivo studio di risposta sismica locale, attraverso una modellazione numerica della propagazione del moto sismico (Allegato C - studio sismico);
- verifica della resistenza alla liquefazione e calcolo dei cedimenti post-sismici;

- o redazione del presente elaborato in ottemperanza alla normativa vigente, dove si riportano i risultati dello studio, secondo le finalità dello stesso.

2. INQUADRAMENTO MORFOLOGICO E SEDIMENTOLOGICO

Il fabbricato in oggetto è situato ad una quota di circa 14 m s.l.m., al margine orientale del centro storico di Cento, in un contesto ampiamente urbanizzato, ad assetto sub-pianeggiante. L'edificazione e le opere infrastrutturali hanno in gran parte obliterato la morfologia di superficie originaria e le strutture tipiche dell'ambiente deposizionale di piana alluvionale. Circa 400 m ad Ovest si delinea l'argine destro del Fiume Reno, che si eleva di circa 8 m rispetto alla pianura adiacente.

I terreni presenti sono di origine alluvionale, depositi da corsi d'acqua (fiume Reno in primis) che nel tempo, non essendo arginati, oltre a subire notevoli diversioni di alveo sono stati interessati da numerose rotte e tracimazioni. I depositi alluvionali nel loro complesso sono costituiti da sedimenti a grana fine (argille e limi) o più grossolana (sabbie e subordinatamente ghiaie). I materiali limosi e argillosi sono prevalenti ai margini delle conoidi fluviali, in zone interposte fra le conoidi stesse oppure in aree di piana inondabile. Mentre i depositi sabbiosi e ghiaiosi si rinvencono principalmente in corrispondenza dei paleo-alvei oppure dei conoidi fluviali, dove tuttavia la granulometria dei sedimenti tende a diminuire spostandosi verso la porzione distale della struttura morfologica.

In particolare, secondo quanto riportato dalla Carta geologica di pianura dell'Emilia Romagna alla scala 1:250.000, l'area in esame si inserisce in un contesto dove si individuano sequenze deposizionali riconducibili a facies di canale e argine prossimale. Si tratta di sabbie medie e fini in strati di spessore decimetrico passanti lateralmente ed intercalate a sabbie fini e finissime limose, subordinatamente limi argillosi a cui si aggiungono localmente sabbie medie e grossolane in corpi lenticolari e nastriformi.

La Cartografia geologica a cura del Servizio geologico sismico e dei suoli della R.E.R. inserisce l'area in corrispondenza dell'Unità di Modena (AES8a) che, in base alla datazione archeologica, risulta di età post-romana (IV-VI sec. d.C. – attuale). Tale classificazione deriva dall'attribuzione dei depositi a insiemi più ampi, che per significato e caratteristiche fisiche si possono definire "Unconformity bounded subsurface units, o U.B.S.U." (Salvador, 1994), cioè corpi sedimentari compresi da superfici di discontinuità. Dal punto di vista litologico la medesima cartografia riporta superficialmente depositi limoso-sabbiosi.

Le indagini geognostiche hanno evidenziato come, oltrepassato un orizzonte superficiale di terreni a granulometria variabile (limi sabbiosi e limi argillosi) che risentono di rimaneggiamenti antropici, si individui una successione di depositi fini con rare intercalazioni di sottili lenti limoso-sabbiose, che si spinge fino a -18,0 m dal piano campagna.

3. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Al fine di ricostruire il modello del sottosuolo sono state previste n°2 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU), che hanno permesso di integrare e raffinare i dati già a disposizione (n°2 prove penetrometriche statiche), derivanti da una campagna geognostica eseguita ad aprile 2008 nell'ambito di uno studio geologico-tecnico dei terreni del primo sottosuolo della medesima area, sulla quale era in progetto la ristrutturazione di due fabbricati.

Le indagini hanno permesso di ricostruire un quadro rappresentativo dei terreni che costituiscono il volume significativo. Di seguito viene riportata una tabella esplicativa delle profondità raggiunte dalle varie perforazioni.

INDAGINI GEOGNOSTICHE	
Prova	Profondità [m]
CPTU1	-20,04
CPTU2	-19,06
CPT1-08	-15,00
CPT1-08	-10,00

Tabella 1: Quadro riassuntivo delle profondità raggiunte dalle indagini geognostiche.

L'indagine CPTU2 è stata interrotta a -19,06 m, a causa dell'elevata resistenza dei terreni che, oltre a rendere difficoltoso l'avanzamento, rischiava di compromettere la strumentazione in uso.

L'ubicazione di tutte le indagini geognostiche a disposizione è illustrata in Tavola 4.

4.1 PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CPTU)

Le perforazioni sono state eseguite dalla ditta GEOLOG S.r.l. con attrezzatura PAGANI montata su autocarro UNIMOG MERCEDES. Il penetrometro statico utilizzato è dotato di una cella di carico da 20 t, ed impiega una punta elettrica con piezocono, avente un'apertura di 60° ed una superficie di 10 cm², ed un manicotto di frizione (friction jacket) della superficie di 150 cm².

Le indagini sono state eseguite con infissione nel terreno a velocità costante (2 cm/s +/- 0,4 cm/sec), mediante una batteria di aste (di lunghezza pari ad 1 m) azionate da un martinetto idraulico, misurando ad intervalli di 1 cm i seguenti dati:

- o resistenza alla penetrazione della punta (qc);
- o attrito laterale locale (fs);
- o pressione dinamica dei pori (U2);
- o velocità di avanzamento cm/sec;
- o inclinazione dalla verticale.

Nell'allegato A sono riportati i certificati di prova ed i grafici di elaborazione dei dati acquisiti, per la ricostruzione della litologia e la definizione delle caratteristiche geotecniche.

In particolare per descrivere la natura litologica dei terreni ci si è basati sugli studi di caratterizzazione del terreno di Robertson 1990 e 2010, tarati su misure derivanti da CPTU.

4.2 SITUAZIONE LITOSTRATIGRAFICA

Le indagini hanno evidenziato la seguente successione stratigrafica:

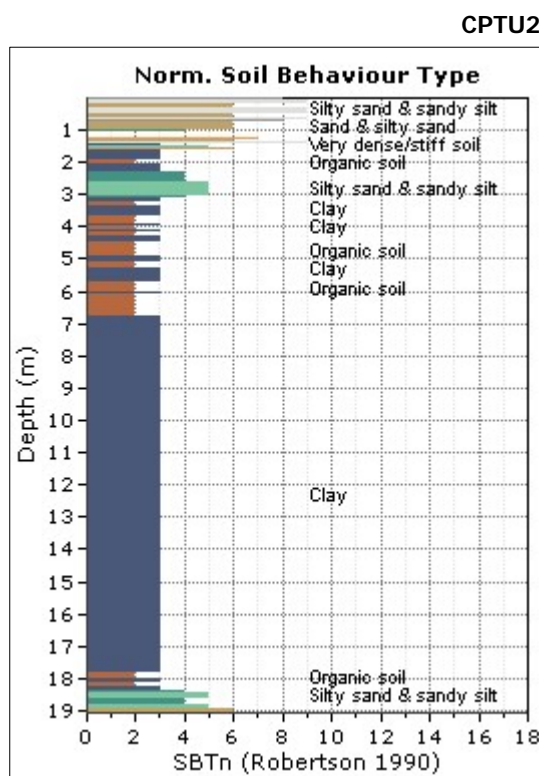
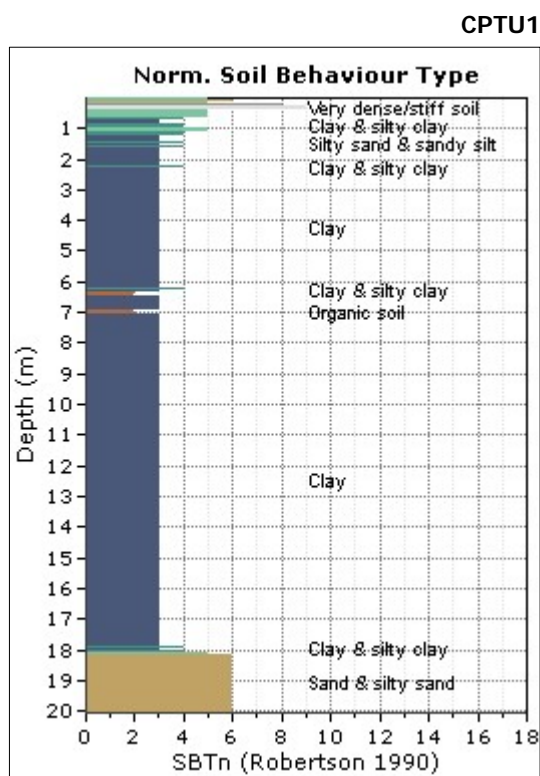
0,0 ÷ 1,5/1,6 m: terreni da limoso-argillosi a limoso-sabbiosi a consistenza media, con locali frammenti di varia natura. Si tratta di materiali con caratteristiche litologiche variabili per effetto di rimaneggiamenti antropici superficiali. Proprietà geotecniche discrete.

1,5/1,6 ÷ 6,9/7,4 m: argille e argille limose a consistenza molle. Si intercettano livelli ricchi di sostanza organica e locali lenti di limi sabbiosi e sabbie limose (2,4 ÷ 3,0 m in CPTU2). Proprietà geotecniche modeste.

6,9/7,4 ÷ 18,0/18,4 m: argille e argille limose a consistenza da media a compatta. Proprietà geotecniche da discrete a buone.

18,0/18,4 ÷ 19,0/20,0 (fondo foro) m: sabbie e sabbie limose da moderatamente addensate ad addensate.

Nei seguenti grafici è riportata nel dettaglio la sequenza deposizionale ricostruita, in corrispondenza di ciascun punto di indagine, facendo riferimento alla classificazione di Robertson (1990):



Al fine di definire il grado di consistenza dei materiali a comportamento geotecnico coesivo, si è fatto riferimento alla classificazione riportata nella "Guida alla stima delle proprietà geotecniche e alla loro applicazione alle fondazioni: Bruschi Alberto (2010), *Prove geotecniche in situ*, Dario Flaccovio Editore", basata sui valori di resistenza alla punta acquisiti dalle prove CPT.

GRADO DI CONSISTENZA DALLA PROVA CPT	
q_c/P_a	Consistenza
< 5	Molto molle
5 - 15	Da molle a media
15 - 30	Compatta
30 - 60	Molto compatta
> 60	Dura

Tabella 2: Grado di consistenza di un terreno argilloso [da Bruschi Alberto (2010), *Prove geotecniche in situ*, Dario Flaccovio Editore - TABELLA 3.11].

In tabella 2:

q_c : resistenza alla punta acquisita durante le prove penetrometriche statiche;

P_a : pressione atmosferica ($\approx 1 \text{ kg/cm}^2$).

4.3 QUADRO IDROGEOLOGICO

Durante la realizzazione delle indagini è stato possibile effettuare, in corrispondenza di ciascun punto di perforazione, una misura della soggiacenza della falda superficiale. I valori individuati sono riportati nel seguente prospetto con indicata la data di acquisizione.

SOGGIACENZA FALDA SUPERFICIALE		
Indagine	Profondità dal p.c. [m]	Data di acquisizione
CPTU1	-1,00	18/12/2014
CPTU2	-1,35	18/12/2014
CPT1-08	-1,30	28/04/2008
CPT2-08	-1,20	28/04/2008

Tabella 3: Soggiacenza della falda superficiale.

Ad integrazione e completamento dei dati acquisiti nell'area in oggetto, si evidenzia come in corrispondenza di prove penetrometriche statiche eseguite nell'ex ghetto di Cento nel dicembre 1992 (database regionale) fosse stata evidenziata una soggiacenza della falda di -1,0 m.

In base alla Carta della superficie freatica del Quadro Conoscitivo del PSC Associazione Intercomunale alto ferrarese, redatta utilizzando rilevamenti effettuati nel periodo 1998-2007, l'area in esame ricade in prossimità dell'isofreatica di 13 m s.l.m.. Considerata la quota del piano campagna del sito, ne deriva una soggiacenza dell'acquifero libero pari a -1,0 m.

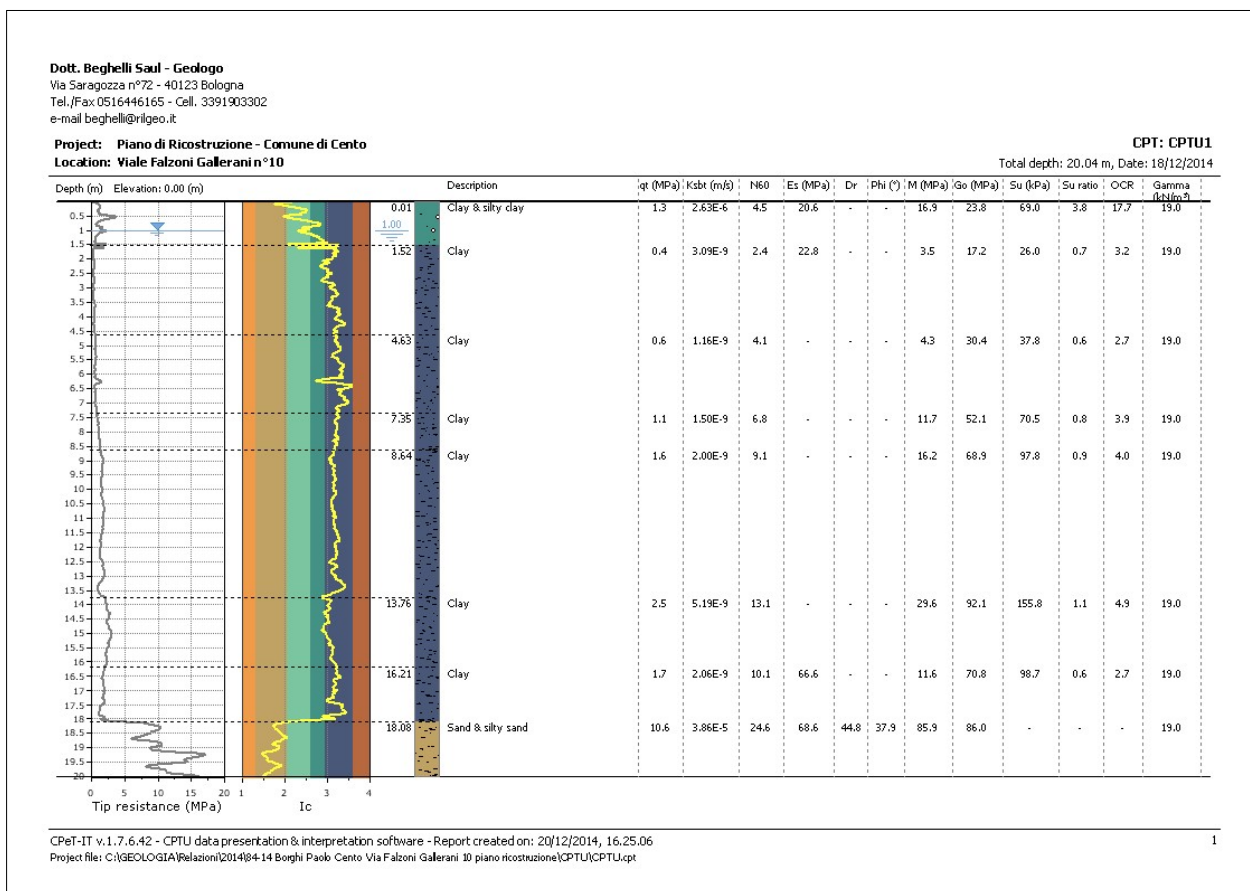
Alla luce del quadro a disposizione si ritiene che -1,0 m possa essere considerata la soggiacenza minima dell'area e pertanto è stata assunta come profondità cautelativa della falda per le verifiche di liquefazione e per la stima della capacità portante dei terreni.

4.4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Al fine di caratterizzare i terreni dal punto di vista geotecnico in corrispondenza di ciascun punto di prova è stata individuata una serie di unità, omogenee per caratteristiche litologiche e fisico-meccaniche. Per ciascuna unità identificata sono stati definiti i parametri geotecnici medi ed il range di variazione, facendo riferimento alle correlazioni riportate nell'ultima pagina dell'allegato A.

Di seguito si riportano, per ciascuna prova le unità distinte e la relativa caratterizzazione geotecnica. I grafici e le tabelle sono riportati anche nell'Allegato A, dove il formato permette una lettura più agevole.

CPTU1



Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rlgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT: CPTU1
 Total depth: 20.04 m, Date: 18/12/2014

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT ₆₀ (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)
0.01		2.63E-06	4.5	20.6	0.0	0.0	16.9	23.8	69.0	3.8	17.7	19.0
1.52	1.51	(+6.61E-06)	(+1.9)	(+3.2)	(+0.0)	(+0.0)	(+9.3)	(+8.3)	(+23.8)	(+2.0)	(+9.2)	(+0.0)
1.52		3.09E-09	2.4	22.8	0.0	0.0	3.5	17.2	26.0	0.7	3.2	19.0
4.63	3.11	(+5.27E-08)	(+0.6)	(+22.8)	(+0.0)	(+0.0)	(+2.5)	(+4.1)	(+7.4)	(+0.3)	(+1.2)	(+0.0)
4.63		1.16E-09	4.1	0.0	0.0	0.0	4.3	30.4	37.8	0.6	2.7	19.0
7.35	2.72	(+5.61E-09)	(+0.6)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+3.1)	(+3.8)	(+12.3)	(+0.2)	(+0.3)	(+0.0)
7.35		1.50E-09	6.8	0.0	0.0	0.0	11.7	52.1	70.5	0.8	3.9	19.0
8.64	1.29	(+3.52E-10)	(+0.8)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+2.7)	(+6.0)	(+9.7)	(+0.1)	(+0.4)	(+0.0)
8.64		2.00E-09	9.1	0.0	0.0	0.0	16.2	68.9	97.8	0.9	4.0	19.0
13.76	5.12	(+1.40E-09)	(+1.1)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+5.6)	(+9.1)	(+17.6)	(+0.2)	(+1.0)	(+0.0)
13.76		5.19E-09	13.1	0.0	0.0	0.0	29.6	92.1	155.8	1.1	4.9	19.0
16.21	2.45	(+3.81E-09)	(+1.1)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+4.7)	(+7.5)	(+19.2)	(+0.1)	(+0.7)	(+0.0)
16.21		2.06E-09	10.1	66.6	0.0	0.0	11.6	70.8	98.7	0.6	2.7	19.0
18.08	1.87	(+6.37E-08)	(+1.5)	(+66.6)	(+0.0)	(+0.0)	(+8.3)	(+10.0)	(+24.7)	(+0.2)	(+0.7)	(+0.0)
18.08		3.86E-05	24.6	68.6	44.8	37.9	85.9	86.0	0.0	0.0	0.0	19.0
20.04	1.96	(+8.22E-05)	(+4.1)	(+6.0)	(+6.8)	(+1.4)	(+7.6)	(+7.6)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)

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

CPeT-IT v.1.7.6.42 - CPTU data presentation & interpretation software - Report created on: 20/12/2014, 16.25.06
 Project file: C:\GEOLOGIA\Relazioni\2014\8-14 Borghi Paolo Cento Via Falzoni Gallerani 10 piano ricostruzione\CPTU\CPTU1.cpt

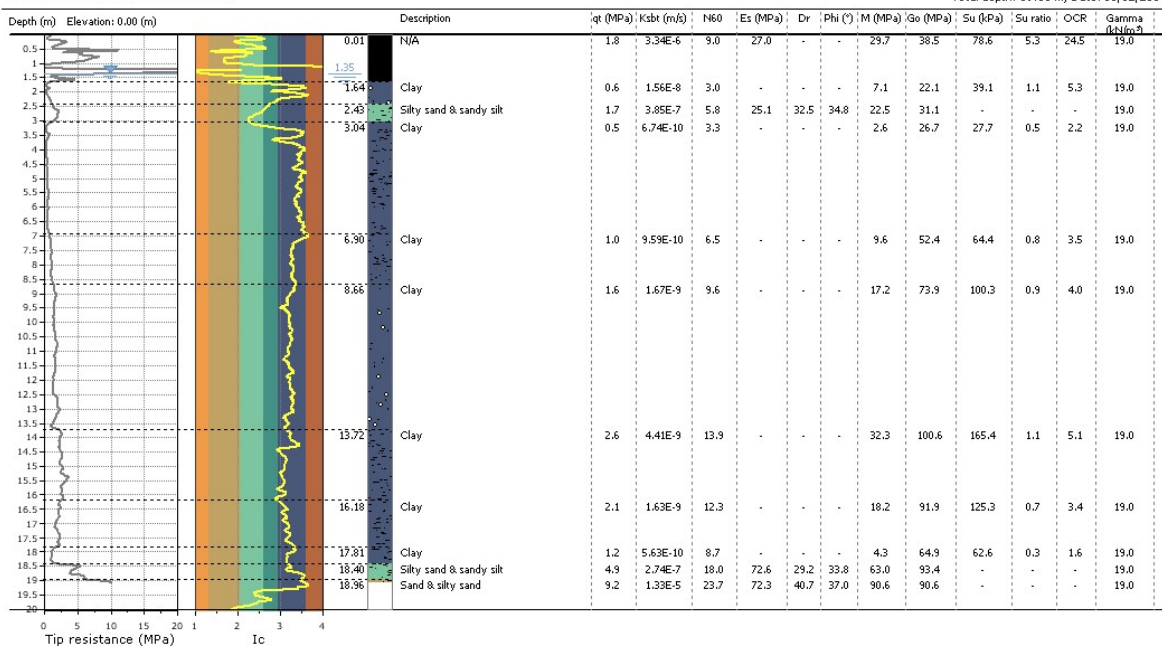
5

CPTU2

Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rlgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT: CPTU2
 Total depth: 19.06 m, Date: 18/12/2014



CPeT-IT v.1.7.6.42 - CPTU data presentation & interpretation software - Report created on: 20/12/2014, 16.16.22
 Project file: C:\GEOLOGIA\Relazioni\2014\8-14 Borghi Paolo Cento Via Falzoni Gallerani 10 piano ricostruzione\CPTU\CPTU2.cpt

1

Dott. Beghelli Saul - GeologoVia Saragozza n°72 - 40123 Bologna
Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
e-mail beghelli@rlgeo.it**Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento**
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10**CPT: CPTU2**

Total depth: 19.06 m, Date: 18/12/2014

Summary table of mean values

From depth To depth (m)	Thickness (m)	Permeability (m/s)	SPT _{N60} (blows/30cm)	E _v (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)
0.01		3.34E-06	9.0	27.0	0.0	0.0	29.7	38.5	78.6	5.3	24.5	19.0
1.64	1.63	(+8.01E-04)	(+11.9)	(+23.8)	(+0.0)	(+0.0)	(+31.2)	(+27.3)	(+121.2)	(+5.0)	(+23.1)	(+0.0)
1.64	0.79	1.56E-08	3.0	0.0	0.0	0.0	7.1	22.1	39.1	1.1	5.3	19.0
2.43		(+1.97E-08)	(+1.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+4.7)	(+4.6)	(+21.1)	(+0.5)	(+2.5)	(+0.0)
2.43	0.61	3.85E-07	5.8	25.1	32.5	34.8	22.5	31.1	0.0	0.0	0.0	19.0
3.04		(+4.49E-07)	(+0.9)	(+3.3)	(+2.5)	(+0.8)	(+4.9)	(+3.6)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)
3.04	3.86	6.74E-10	3.3	0.0	0.0	0.0	2.6	26.7	27.7	0.5	2.2	19.0
6.90		(+7.79E-09)	(+0.7)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+1.9)	(+5.0)	(+7.9)	(+0.2)	(+0.8)	(+0.0)
6.90	1.76	9.59E-10	6.5	0.0	0.0	0.0	9.6	52.4	64.4	0.8	3.5	19.0
8.66		(+1.64E-10)	(+0.7)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+2.0)	(+6.2)	(+8.1)	(+0.1)	(+0.3)	(+0.0)
8.66	5.06	1.67E-09	9.6	0.0	0.0	0.0	17.2	73.9	100.3	0.9	4.0	19.0
13.72		(+9.30E-10)	(+1.2)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+5.3)	(+8.3)	(+17.7)	(+0.2)	(+0.8)	(+0.0)
13.72	2.46	4.41E-09	13.9	0.0	0.0	0.0	32.3	100.6	165.4	1.1	5.1	19.0
16.18		(+2.78E-09)	(+1.4)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+4.5)	(+9.9)	(+22.3)	(+0.1)	(+0.6)	(+0.0)
16.18	1.63	1.63E-09	12.3	0.0	0.0	0.0	18.2	91.9	125.3	0.7	3.4	19.0
17.81		(+6.61E-10)	(+1.1)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+5.1)	(+7.5)	(+17.2)	(+0.1)	(+0.5)	(+0.0)
17.81	0.59	5.63E-10	8.7	0.0	0.0	0.0	4.3	64.9	62.6	0.3	1.6	19.0
18.40		(+6.59E-09)	(+1.1)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+5.2)	(+9.0)	(+23.1)	(+0.1)	(+0.6)	(+0.0)
18.40	0.56	2.74E-07	18.0	72.6	29.2	33.8	63.0	93.4	0.0	0.0	0.0	19.0
18.96		(+1.30E-06)	(+2.0)	(+8.9)	(+2.6)	(+0.8)	(+12.3)	(+11.6)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)
18.96	0.10	1.33E-05	23.7	72.3	40.7	37.0	90.6	90.6	0.0	0.0	0.0	19.0
19.06		(+4.82E-06)	(+1.6)	(+2.7)	(+2.2)	(+0.5)	(+3.4)	(+3.4)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)	(+0.0)

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

CPeT-IT v.1.7.6.42 - CPTU data presentation & interpretation software - Report created on: 20/12/2014, 16.16.22
Project file: C:\GEOLOGIA\Relazioni\2014\84-14 Borghi Paolo Cento Via Falzoni Gallerani 10 piano ricostruzione\CPTU\CPTU.cpt

6

4. CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Il Comune di Cento in base alla classificazione sismica dei Comuni dell'Emilia Romagna, ai sensi dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 marzo 2003 n° 3274, ricade in Zona 3.

Le Norme Tecniche per le costruzioni approvate con D.M. 14 gennaio 2008 evidenziano come le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto degli stati limite, si definiscono a partire dalla pericolosità sismica di base del sito.

L'area in oggetto nella cartografia di Microzonazione Sismica del Comune di Cento ricade in Zona LQ2 "Substrato a profondità ≥ 120 ; Presenza di terreni suscettibili di liquefazione tra 10 e 20 m dal piano campagna".

In queste zone non è ammessa la definizione dell'azione sismica tramite l'approccio semplificato previsto al paragrafo 3.2.2 delle NTC08.

Per questa ragione è stato effettuato uno specifico studio sismico per la stima della risposta sismica di sito, che ha previsto un'analisi del microtremore sismico ambientale con tecnica passiva a stazione singola (HVSr) ed un'indagine di tipo attivo con tecnica MASW, mediante un tromografo digitale portatile TROMINO ENGY con cavo trigger. L'acquisizione è stata realizzata nell'area cortiliva di proprietà che si sviluppa fra Viale Falzoni Gallerani e Via Olindo Malagodi, come indicato in Tavola 4. Tenendo conto del modello sismo-stratigrafico ricostruito è stata effettuata un'elaborazione con il software Strata, che ha portato alla definizione dello spettro di risposta sismica locale di

riferimento. I risultati dello studio sismico e la descrizione delle metodologie utilizzate sono riportati nell'Allegato C, a cui si rimanda integralmente.

4.1 LIQUEFAZIONE DEI TERRENI IN CONDIZIONI SISMICHE

La liquefazione nei terreni denota una diminuzione di resistenza a taglio e di rigidità, causata dall'aumento della pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante un evento sismico, tale da generare deformazioni permanenti significative o persino l'annullamento degli sforzi efficaci nel terreno.

Tale fenomeno si verifica quando si presentano simultaneamente alcune condizioni che riguardano le caratteristiche del terreno e dell'azione sismica.

Le condizioni predisponenti del terreno sono:

- profondità dello strato potenzialmente liquefacibile < 15-20 m dal p.c.;
- profondità della falda < 5 m;
- densità relativa $D_r < 60\%$;
- diametro medio $0.02 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$
- frazione di fini (diametro < 0.005 mm) < 15%.

Tra i fattori geologici risultano inoltre fondamentali la presenza e lo spessore degli strati non liquefacibili superficiali, l'assenza di cementazione fra i grani, l'origine e l'età del deposito, la presenza di strati drenanti grossolani intercalati alla sabbia fine liquefacibile e la morfologia. Tra i fattori geotecnici influiscono in maniera sostanziale: lo stato di addensamento, la granulometria, il grado di saturazione, le condizioni di drenaggio, lo stato tensionale efficace iniziale, la storia tensionale e deformativa

Le condizioni scatenanti che riguardano le caratteristiche dell'azione sismica sono:

- magnitudo > 5,5;
- a_g (accelerazione orizzontale max su suolo rigido) > 0,15g;
- durata > 15-20 sec.

4.1.1 Verifica a liquefazione da prove CPTU

Lo studio ha previsto la verifica della liquefazione delle sabbie in corrispondenza dei punti investigati con le prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU).

Le elaborazioni hanno considerato il modello del sottosuolo descritto nei paragrafi precedenti e sono state effettuate con il programma di calcolo "CLiq v.1.7.6.34" della Geologismiki Geotechnical Software – Serres (Grecia).

In particolare le analisi sono state condotte, utilizzando il metodo di calcolo di Robertson (NCEER R&W 1998, 2009), considerando i seguenti dati di input:

- Falda: -1,0 m;
- Magnitudo: 6,14, facendo riferimento alla magnitudo attesa massima per la zona sismogenetica 912 della Zonizzazione sismica ZS9;
- a_{max} : 0,23g.

L'analisi ha incluso anche i terreni argillosi e a comportamento simile a quelli argillosi ("clay-like-soil") per la valutazione della liquefazione e delle condizioni di "cyclic softening" dei sedimenti poco coesivi.

Le elaborazioni, che hanno considerato ogni intervallo da 1 cm acquisito della CPTU, hanno permesso di definire il fattore di sicurezza a liquefazione (F_{SL}), inteso come rapporto tra la capacità di resistenza a liquefazione (CRR) e la domanda di resistenza ciclica alla liquefazione (CSR).

$$F_{SL} = CRR_{eq}/CSR$$

Nel grafico F_s plot riportato nell'Allegato D sono evidenziati gli strati in cui il fattore di sicurezza è inferiore a 1,0.

Nel medesimo elaborato è riportato anche il valore dell'indice del potenziale di liquefazione (IP_L o LPI) basato sul metodo di Iwasaki e al. (1982). La stima di questo indice viene applicata ai metodi che prevedono il calcolo del fattore di sicurezza (F_{SL}) e consente una valutazione del rischio di liquefazione in funzione della profondità degli intervalli liquefacibili.

Sulla base degli esiti ottenuti, Sonmez (2003) ha proposto le seguenti classi di rischio di liquefazione in funzione del valore di LPI.

CLASSI DI RISCHIO (Sonmez 2003)	
LPI	Rischio di liquefazione
0	Non liquefacibile
$0 < LPI \leq 2$	Basso
$2 < LPI \leq 5$	Moderato
$5 < LPI \leq 15$	Alto
$LPI > 15$	Molto alto

Tabella 4: Classi rischio di liquefazione.

I risultati della verifica a liquefazione sono riportati integralmente a fine testo (Allegato D), nella seguente tabella sono riportati i valori dell'indice del potenziale di liquefazione (IP_L o LPI) individuati in corrispondenza dei punti investigati con le prove CPTU.

RISULTATI VERIFICA A LIQUEFAZIONE	
Indagine	Indice del potenziale di liquefazione
CPTU1	0,16
CPTU2	0,72

Tabella 5: Indice del potenziale di liquefazione.

Alla luce di quanto emerso si può affermare che il sito in esame è esposto ad un rischio di liquefazione basso, con valori dell'indice del potenziale di liquefazione prossimi allo zero, che denotano una scarsa propensione del sito alla liquefazione, anche considerando un'azione sismica cautelativa ($M_w = 6,14$; $a_{max} = 0,23g$).

4.1.2 Cedimenti post-sismici

Il calcolo dei cedimenti post-sismici è stato effettuato con l'ausilio del programma di calcolo "CLiq v.1.7.6.34" della Geologismiki Geotechnical Software – Serres (Grecia).

In particolare nei sedimenti saturi a comportamento granulare, si è proceduto alla stima dei cedimenti utilizzando la recente procedura di Robertson (2009) e Zhang et. al. (2007). L'approccio si è basato sulla valutazione delle deformazioni volumetriche post-cicliche e ha quantificato i cedimenti sulla base dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione FL calcolato (se $< 1,20$) e sulla base degli esiti di densità relativa DR desunti dalle resistenze di punta (qc_{1N})_{cs} (equivalent clean sand normalized CPT tip resistance).

Per i sedimenti fini coesivi a comportamento fine (zone "B" e "C" della carta di comportamento di Robertson – 1990), il cedimento è causato principalmente da fenomeni di riconsolidazione conseguenti alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto e al manifestarsi di deformazioni da taglio indotte dalle sollecitazioni cicliche. Generalmente, le deformazioni di riconsolidazione post-sisma sono ritenute molto più piccole di quelle osservate nei sedimenti granulari ed i cedimenti rilevati in seguito a sismi recenti risultano statisticamente modesti anche per potenti intervalli di depositi di argille compressibili (Boulanger and Idriss, 2007).

Le deformazioni volumetriche sono state calcolate secondo il metodo di Robertson (2009) ed i risultati dell'analisi sono illustrati nel grafico "Vertical settlement" dell'Allegato D. Nella seguente tabella sono riportati i valori dei cedimenti post-sismici individuati in corrispondenza dei punti investigati con le prove CPTU.

CALCOLO CEDIMENTI POST-SISMICI	
Indagine	Cedimenti [cm]
CPTU1	4,20
CPTU2	2,70

Tabella 6: Cedimenti post-sismici.

5. CAPACITÀ PORTANTE TERRENI

Nel presente ambito si forniscono a livello indicativo valori di riferimento del carico limite in condizioni statiche per una fondazione nastriforme, impostata ad una profondità variabile da 0,8 m a 1,0 m dal piano campagna. L'analisi è stata realizzata attenendosi ai principi introdotti dalle Norme Tecniche per le costruzioni approvate con D.M. 14 gennaio 2008 ed in particolare adottando un approccio progettuale 1 (DA1) combinazione 2.

Considerato il comportamento prevalentemente coesivo dei terreni di sedime, la verifica è stata condotta in termini di tensioni totali, supponendo che la rottura avvenga in condizioni di assenza di drenaggio.

Per la determinazione della portanza si è fatto riferimento ai seguenti parametri geotecnici che hanno tenuto in debita considerazione i livelli di terreno a consistenza modesta presenti nell'intervallo compreso fra -1,5 m e -7,0 m.

PARAMETRI GEOTECNICI CARATTERISTICI Calcolo capacità portante		
Peso di volume del terreno γ_k [t/m ³]	Angolo d'attrito interno ϕ'_k [°]	Coesione non drenata c_{uk} [KPa]
1,90	0	25

Tabella 7: Parametri geotecnici caratteristici – calcolo capacità portante.

Nell'analisi sono stati introdotti i seguenti parametri geotecnici di progetto, ottenuti applicando i coefficienti parziali M2 di Tabella 6.2.II, come previsto dalle NTC08 per l'approccio prescelto.

PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO Calcolo capacità portante		
Peso di volume del terreno γ_d [t/m ³]	Angolo d'attrito interno ϕ'_d [°]	Coesione non drenata c_{ud} [KPa]
1,90	0	17,86

Tabella 8: Parametri geotecnici di progetto – calcolo capacità portante.

La falda è stata impostata cautelativamente ad una profondità di 1,00 m dal piano campagna.

La verifica della capacità portante dei terreni di sedime è stata eseguita utilizzando la relazione del Terzaghi per fondazioni superficiali nastriformi:

$$q_{lim} = c \cdot N_c + \gamma \cdot D \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma$$

dove:

q_{lim} = capacità portante unitaria [KN/m²];

N_c ; N_q ; N_γ = fattori di capacità portante dipendenti dall'angolo di attrito interno del terreno;

c = coesione del terreno di fondazione [kg/cm²];

γ = peso di volume del terreno di fondazione [t/m³];

D = approfondimento piano di posa della fondazione [m];

B = larghezza di fondazione [m].

In Tabella 9, vengono riportati i valori di capacità portante unitaria, determinati considerando una trave di larghezza di base compresa fra 0,6 m e 1,2 m, impostata ad una profondità variabile fra 0,8 e 1,0 m.

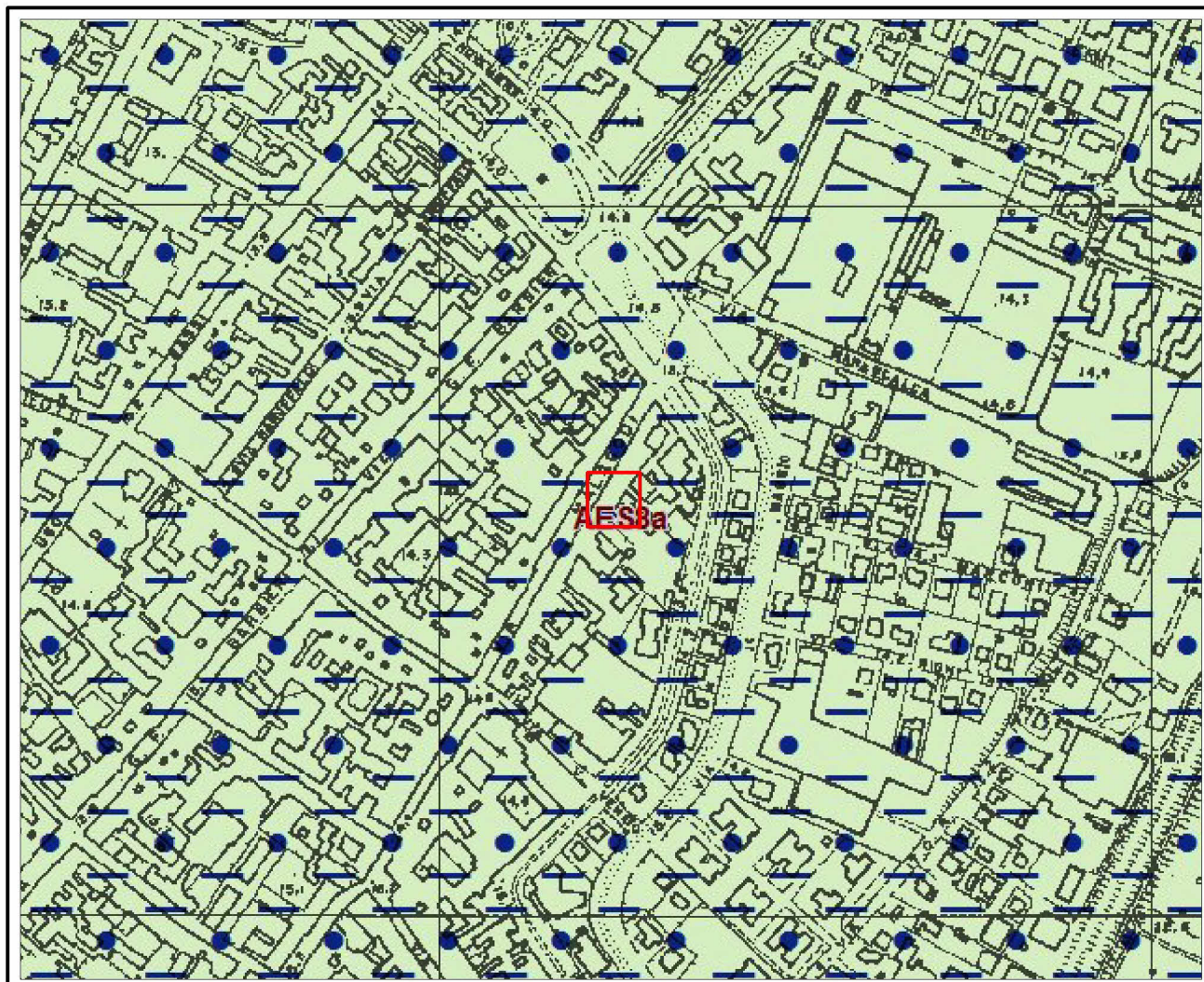
CAPACITÀ PORTANTE UNITARIA – q_{lim} [KN/m ²]					
		B [m]			
		0,6	0,8	1,0	1,2
D [m]	0,8	101,1	101,1	101,1	101,1
	1,0	101,0	101,0	101,0	101,0

Tabella 9: Valori di riferimento della capacità portante unitaria.



Dott. Saul Beghelli – GEOLOGO

Bologna, 18 dicembre 2014.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO**Scala 1:5.000**

Cartografia geologica on-line
a cura del Servizio geologico sismico e dei suoli della R.E.R.

Legenda:

Area e fabbricato in oggetto

Limi sabbiosi
Piana alluvionale**AES8a**

UNITÀ DI MODENA

.....

ALLEGATO A

Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)

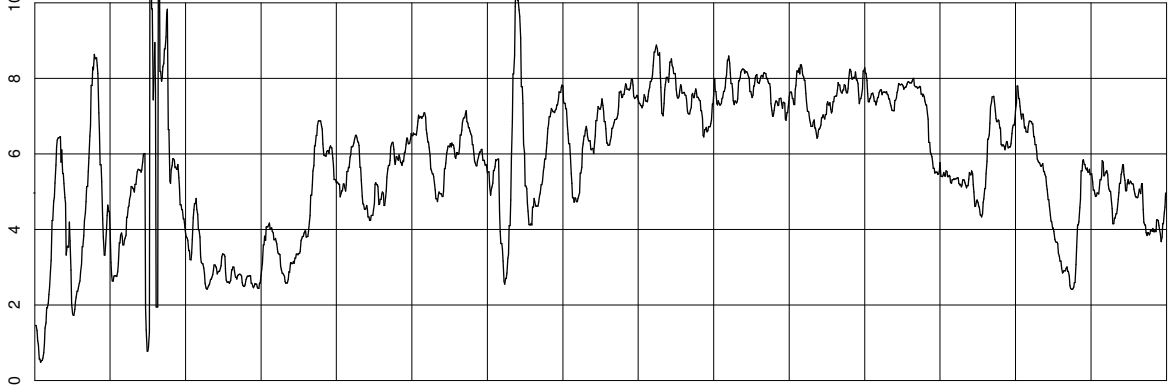
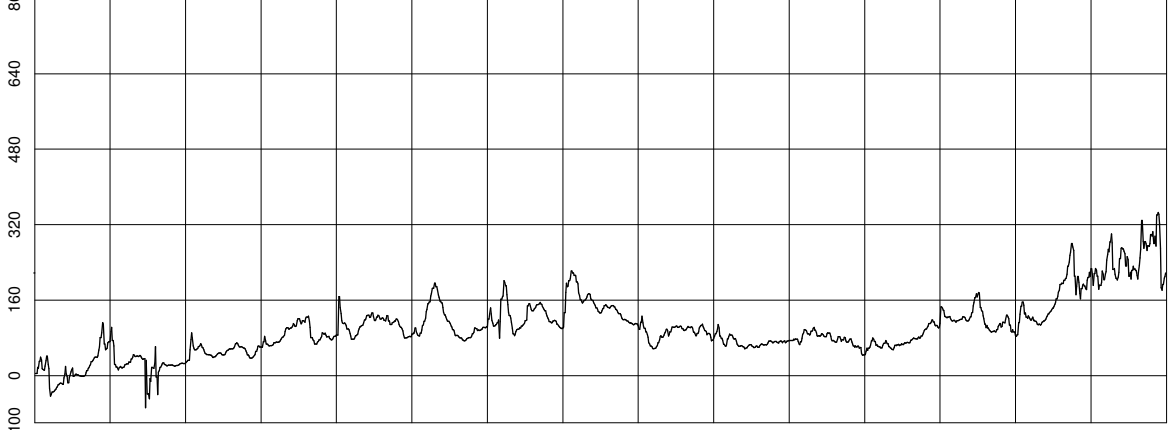
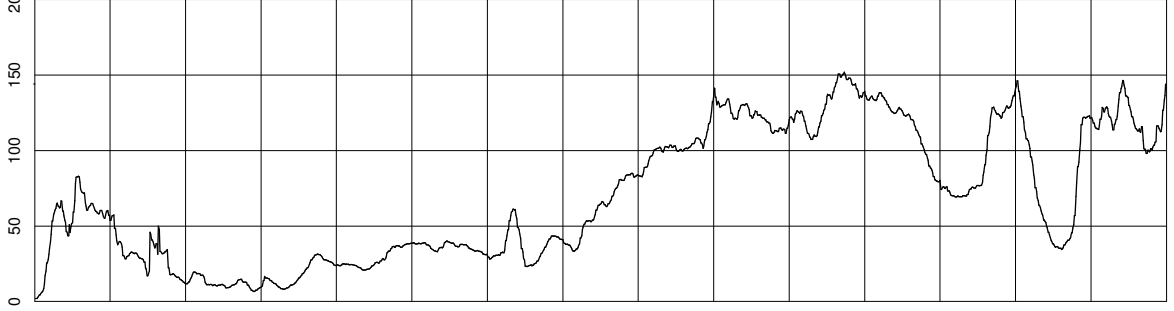
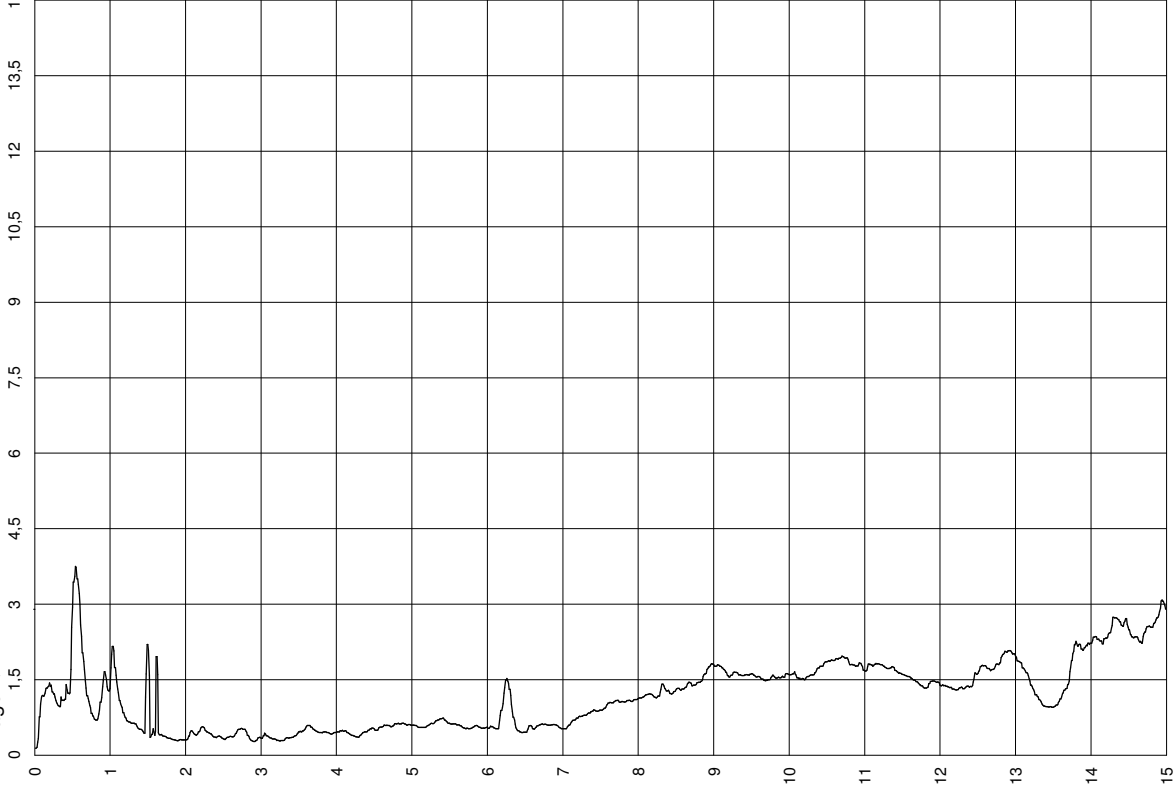
.....

Site: Piano della Ricostruzione Comune di Cento (BO)
Locality: Cento, Viale Falzoni Gallerani

Test Location: CPTU 1
Date: 18/12/2014

Abs. quota [cm]: 0
Prehole [cm]: 0
Hydrostatic Line [cm]: 100

Page 1/2

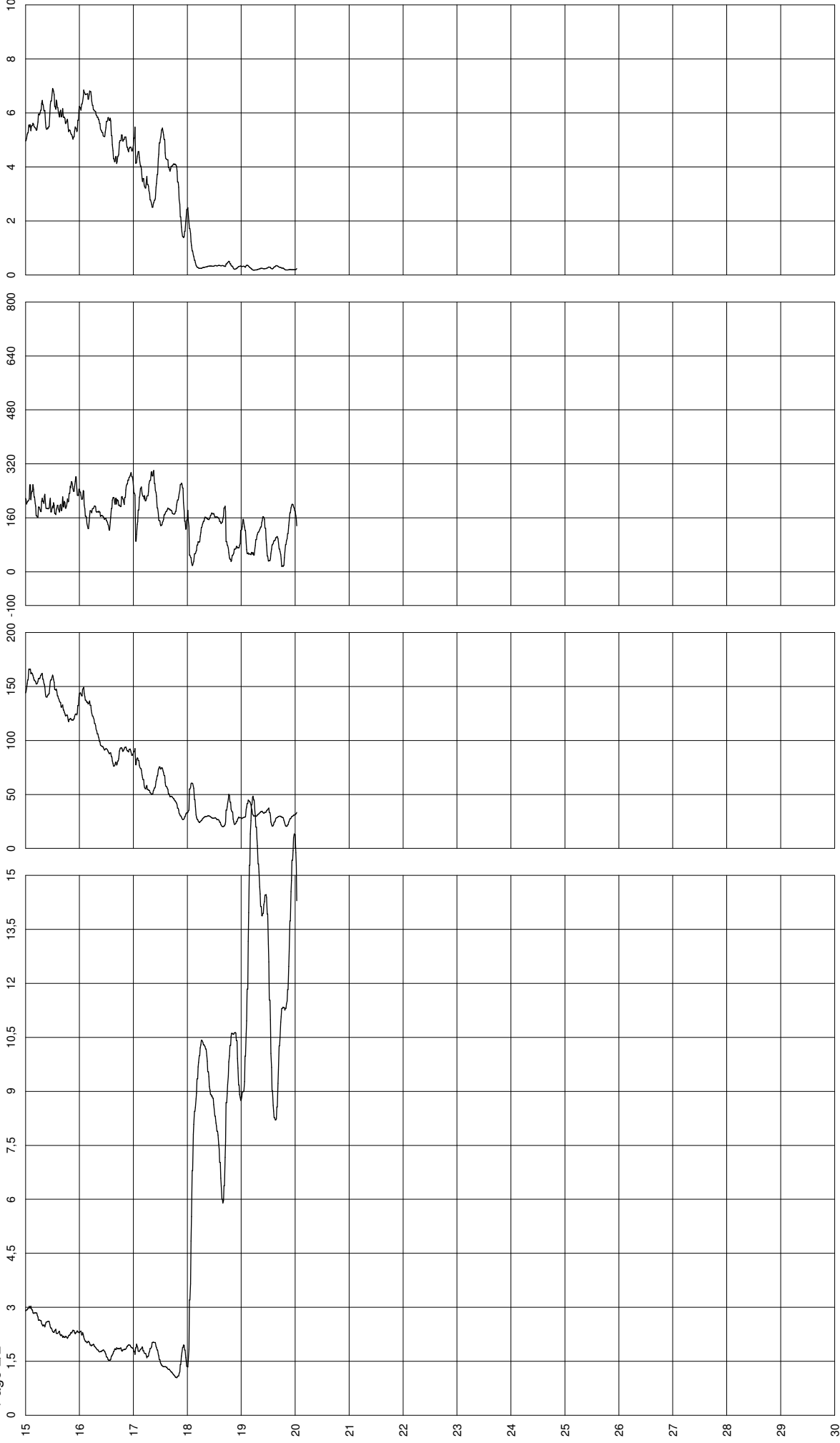


Site: Piano della Ricostruzione Comune di Cento (BO)
Locality: Cento, Viale Falzoni Gallerani

Test Location: CPTU 1
Date: 18/12/2014

Abs. quota [cm]: 0
Prehole [cm]: 0
Hydrostatic Line [cm]: 100

Page 2/2

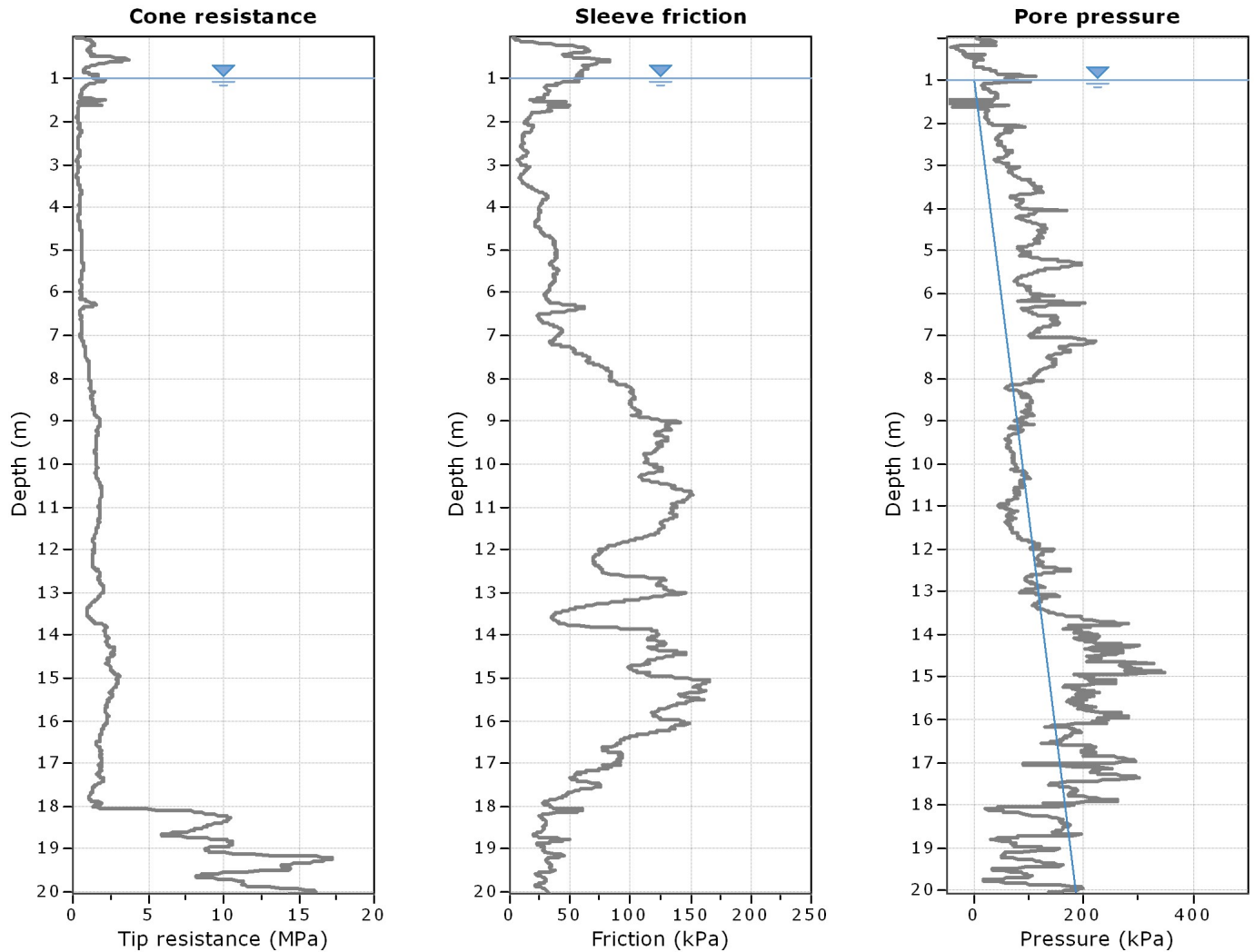


Qc [MPa]

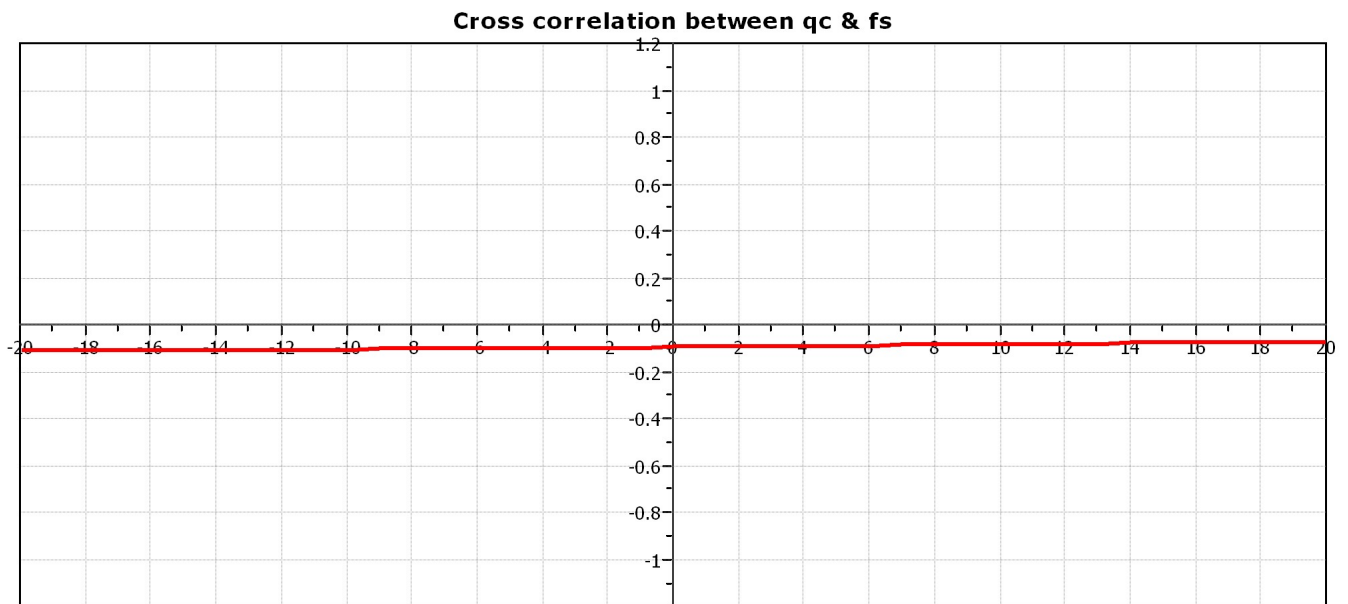
Fs [kPa]

U2 [kPa]

Rf [%]



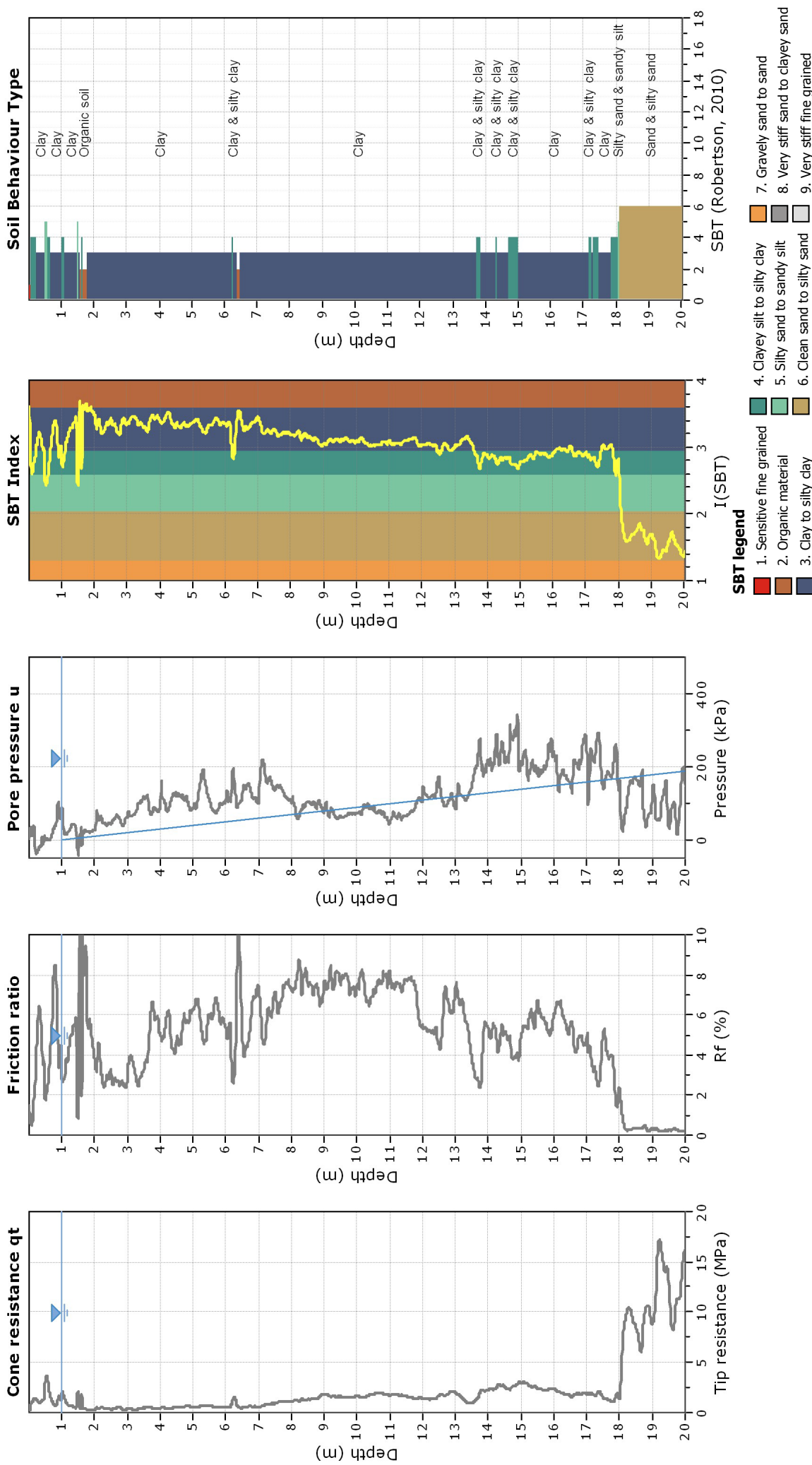
The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw qc and fs values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

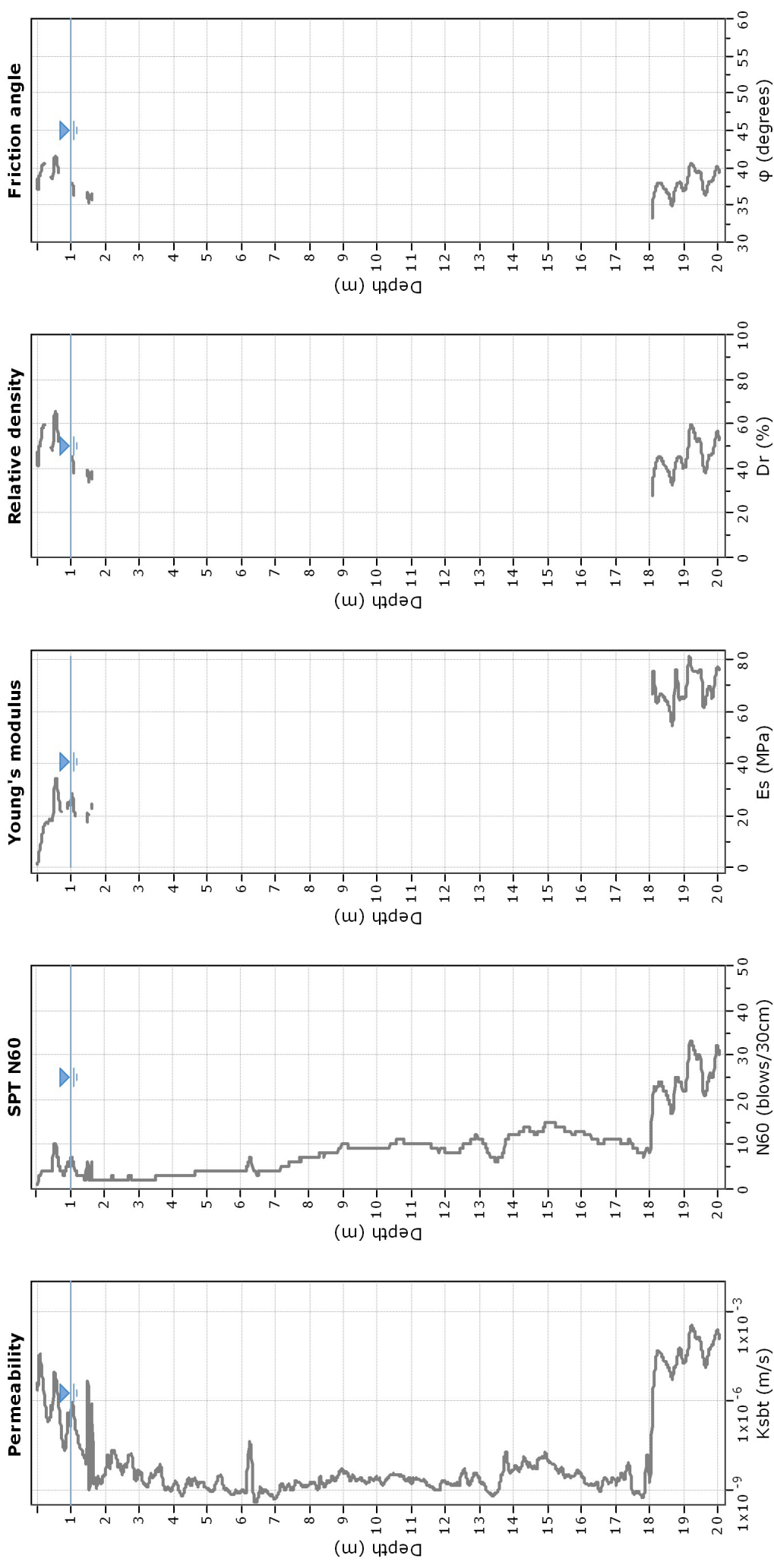
CPT: CPTU1
 Total depth: 20.04 m, Date: 18/12/2014



Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT: CPTU1
 Total depth: 20.04 m, Date: 18/12/2014



Calculation parameters
 Permeability: Based on SBT_n
 SPT N_{60} : Based on I_c and q_t
 Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009) —●— User defined estimation data
 Relative desnisty constant, C_{Dr} : 350.0
 Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

Dott. Beghelli Saul - Geologo

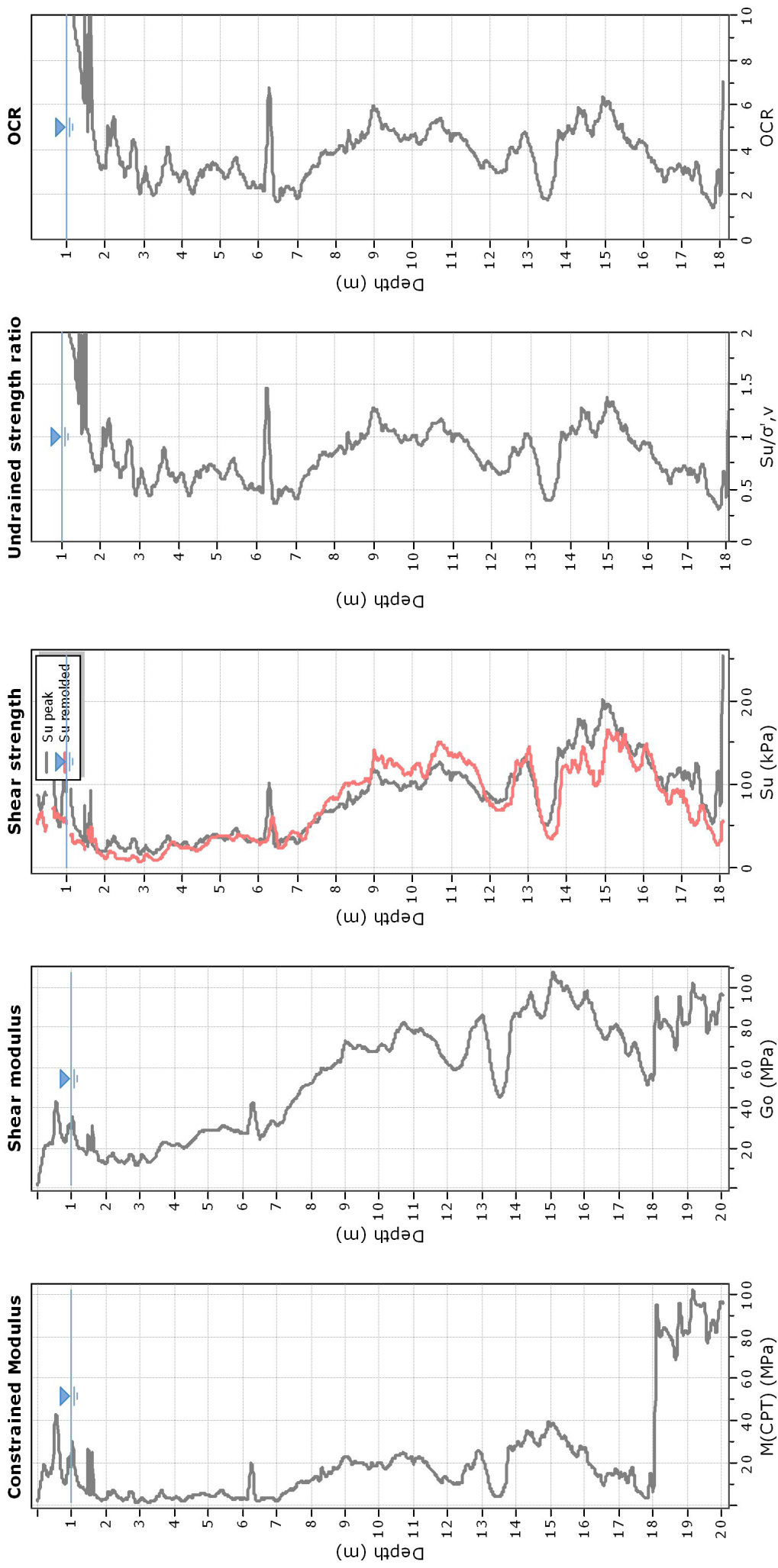
Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
e-mail beghelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento

Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT: CPTU1

Total depth: 20.04 m, Date: 18/12/2014



Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable $\alpha/\beta/\eta$ using I_c and Q_{th} (Robertson, 2009)

Go: Based on variable $\alpha/\beta/\eta$ using I_c (Robertson, 2009)

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

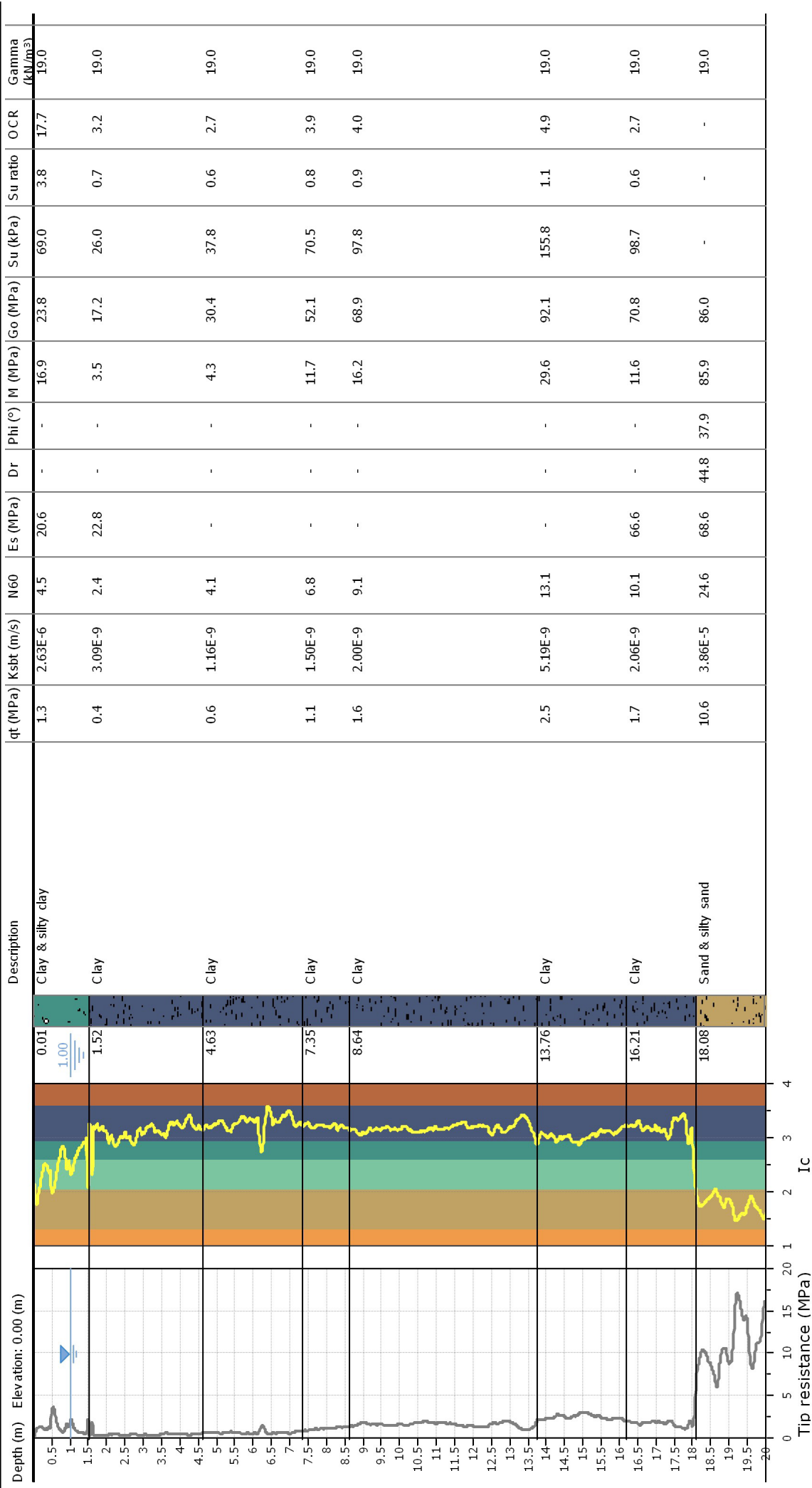
OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

—●— User defined estimation data

Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT: CPTU1
 Total depth: 20.04 m, Date: 18/12/2014



Dott. Beggelli Saul - Geologo

Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
e-mail beggelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento

Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT: CPTU1

Total depth: 20.04 m, Date: 18/12/2014

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)
0.01	1.51	2.63E-06 (±6.61E-06)	4.5 (±1.9)	20.6 (±3.2)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	16.9 (±9.3)	23.8 (±8.3)	69.0 (±23.8)	3.8 (±2.0)	17.7 (±9.2)	19.0 (±0.0)
1.52	3.11	3.09E-09 (±5.27E-08)	2.4 (±0.6)	22.8 (±22.8)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	3.5 (±2.5)	17.2 (±4.1)	26.0 (±7.4)	0.7 (±0.3)	3.2 (±1.2)	19.0 (±0.0)
4.63	2.72	1.16E-09 (±5.61E-09)	4.1 (±0.6)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	4.3 (±3.1)	30.4 (±3.8)	37.8 (±12.3)	0.6 (±0.2)	2.7 (±0.9)	19.0 (±0.0)
7.35	1.29	1.50E-09 (±3.52E-10)	6.8 (±0.8)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	11.7 (±2.7)	52.1 (±6.0)	70.5 (±9.7)	0.8 (±0.1)	3.9 (±0.4)	19.0 (±0.0)
8.64	5.12	2.00E-09 (±1.40E-09)	9.1 (±1.1)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	16.2 (±5.6)	68.9 (±9.1)	97.8 (±17.6)	0.9 (±0.2)	4.0 (±1.0)	19.0 (±0.0)
13.76	2.45	5.19E-09 (±3.81E-09)	13.1 (±1.1)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	29.6 (±4.7)	92.1 (±7.5)	155.8 (±19.2)	1.1 (±0.1)	4.9 (±0.7)	19.0 (±0.0)
16.21	1.87	2.06E-09 (±6.37E-08)	10.1 (±1.5)	66.6 (±66.6)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	11.6 (±8.3)	70.8 (±10.0)	98.7 (±24.7)	0.6 (±0.2)	2.7 (±0.7)	19.0 (±0.0)
18.08	1.96	3.86E-05 (±8.22E-05)	24.6 (±4.1)	68.6 (±6.0)	44.8 (±6.8)	37.9 (±1.4)	85.9 (±7.6)	86.0 (±7.6)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	19.0 (±0.0)

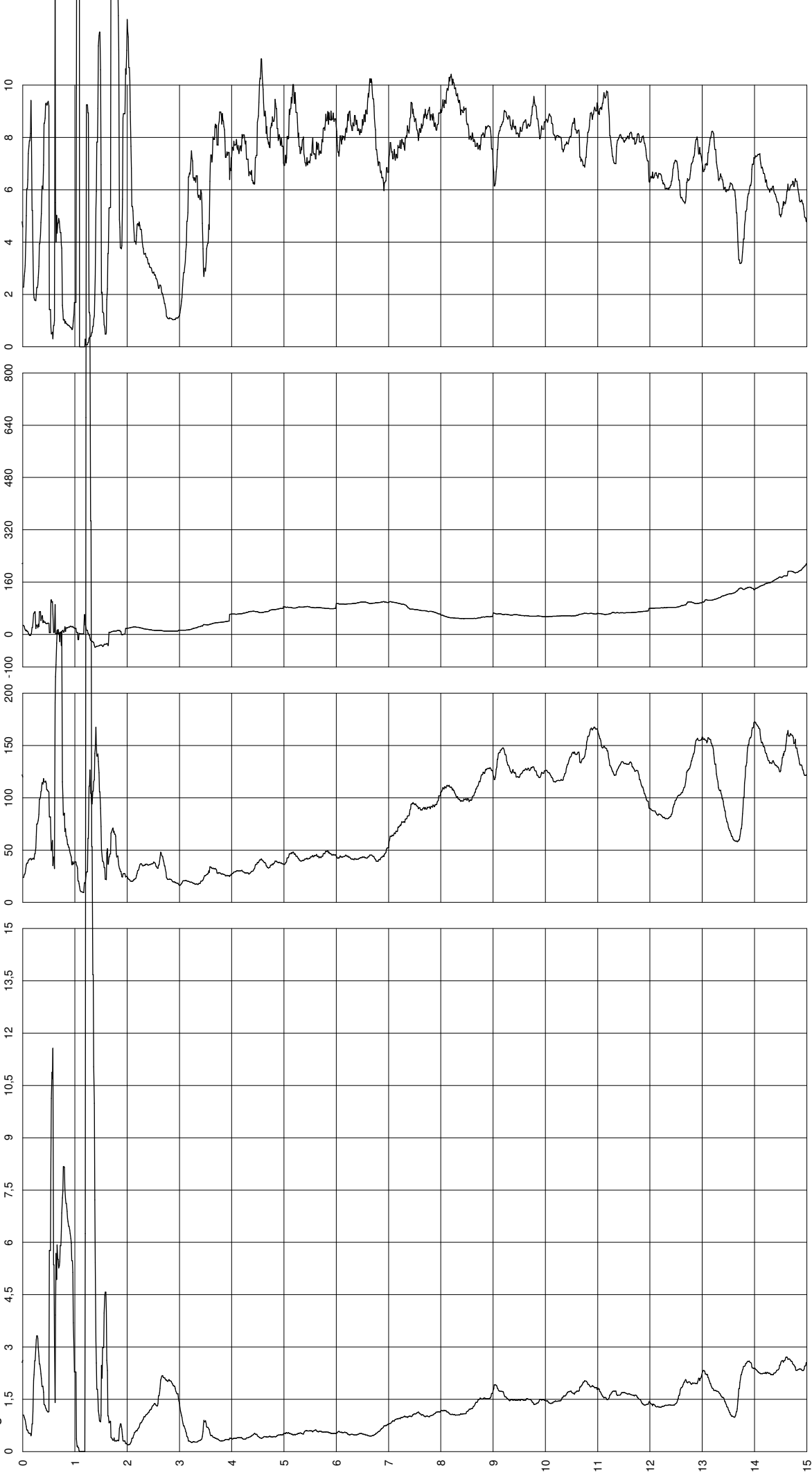
Depth values presented in this table are measured from free ground surface

Site: Piano della Ricostruzione Comune di Cento (BO)
Locality: Cento, Viale Falzoni Gallerani

Test Location: CPTU 2
Date: 18/12/2014

Abs. quota [cm]: 0
Prehole [cm]: 0
Hydrostatic Line [cm]: 135

Page 1/2



Qc [MPa]

Fs [kPa]

U2 [kPa]

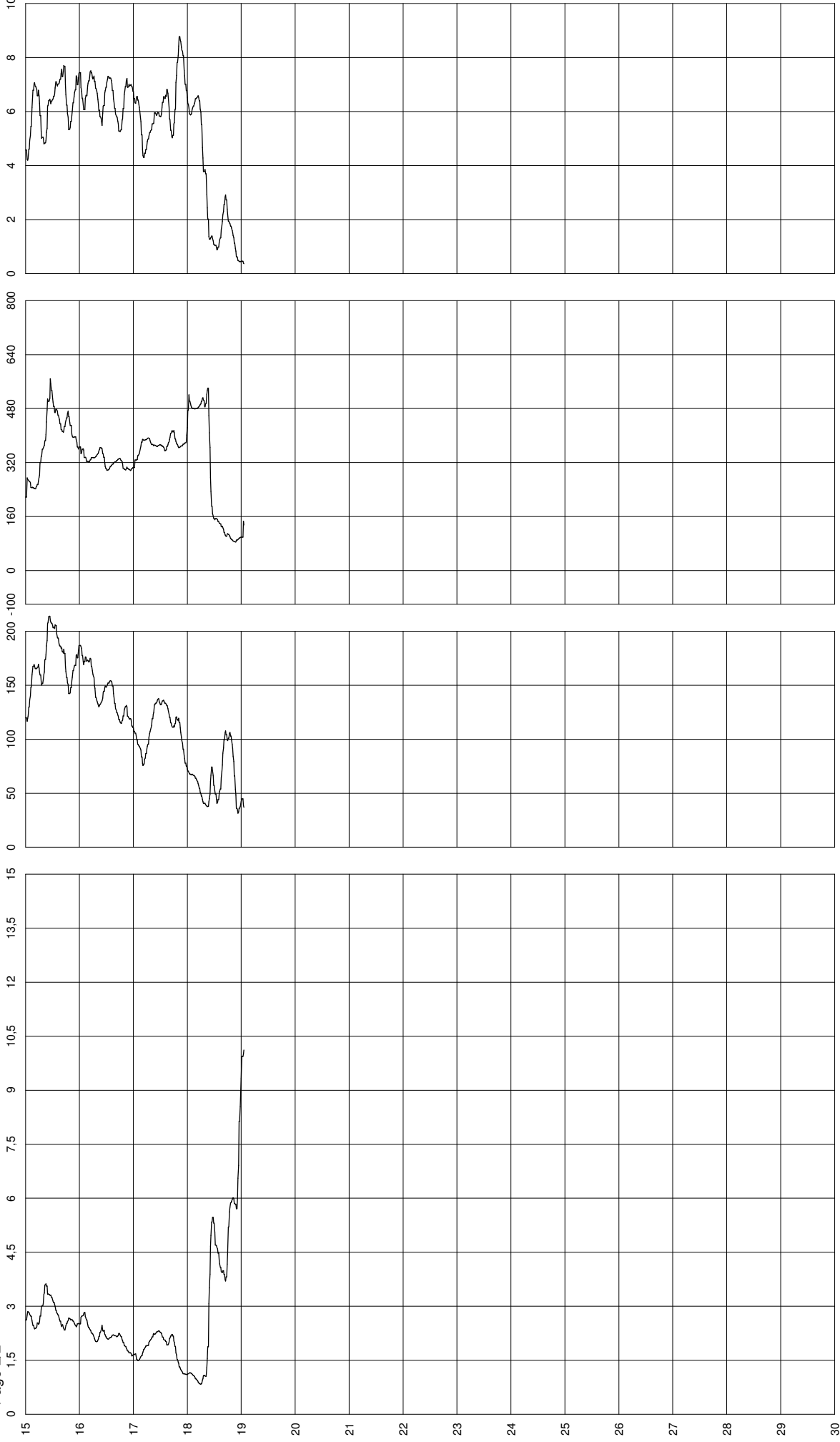
Rf [%]

Site: Piano della Ricostruzione Comune di Cento (BO)
Locality: Cento, Viale Falzoni Gallerani

Test Location: CPTU 2
Date: 18/12/2014

Abs. quota [cm]: 0
Prehole [cm]: 0
Hydrostatic Line [cmj]: 135

Page 2/2

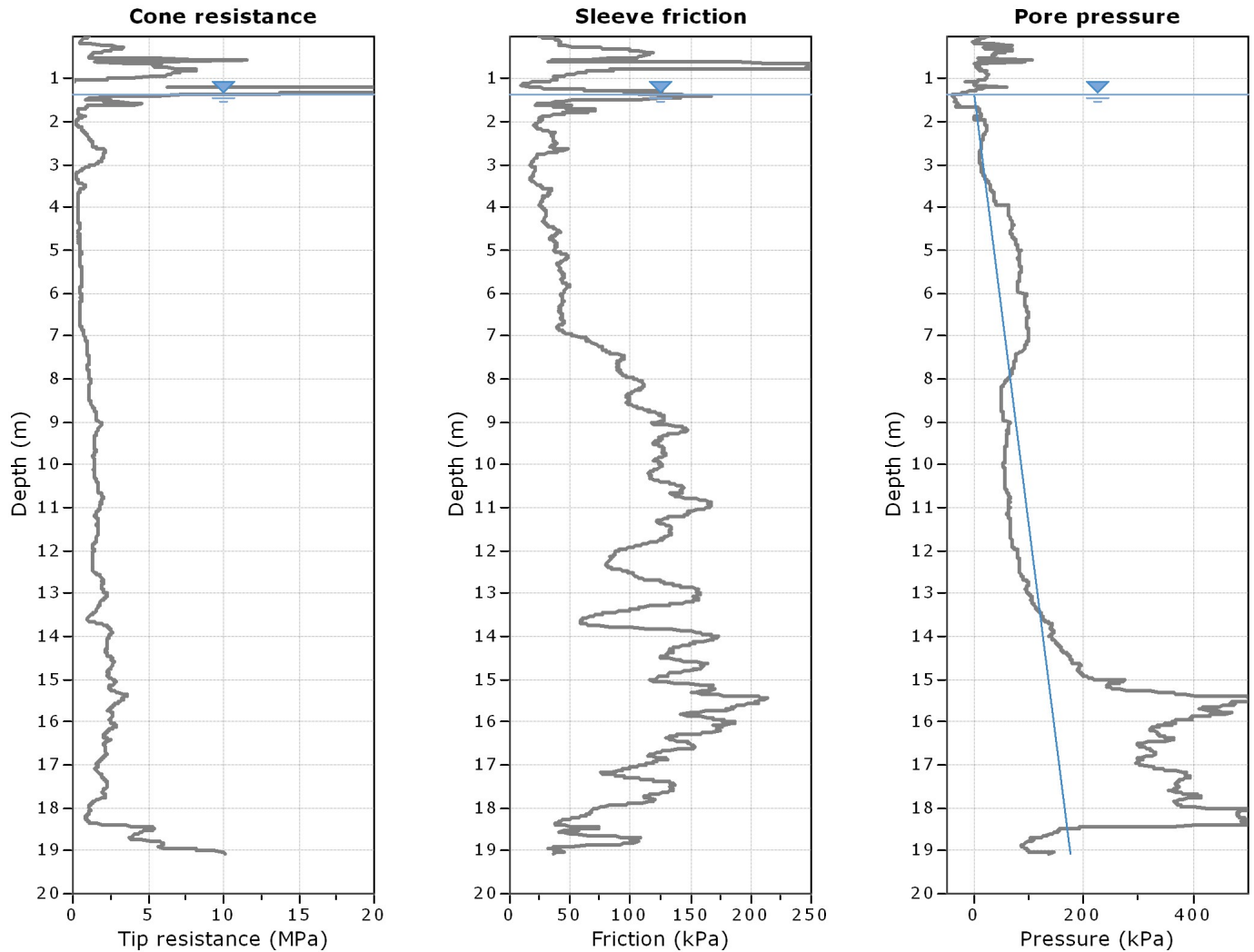


Qc [MPa]

Fs [kPa]

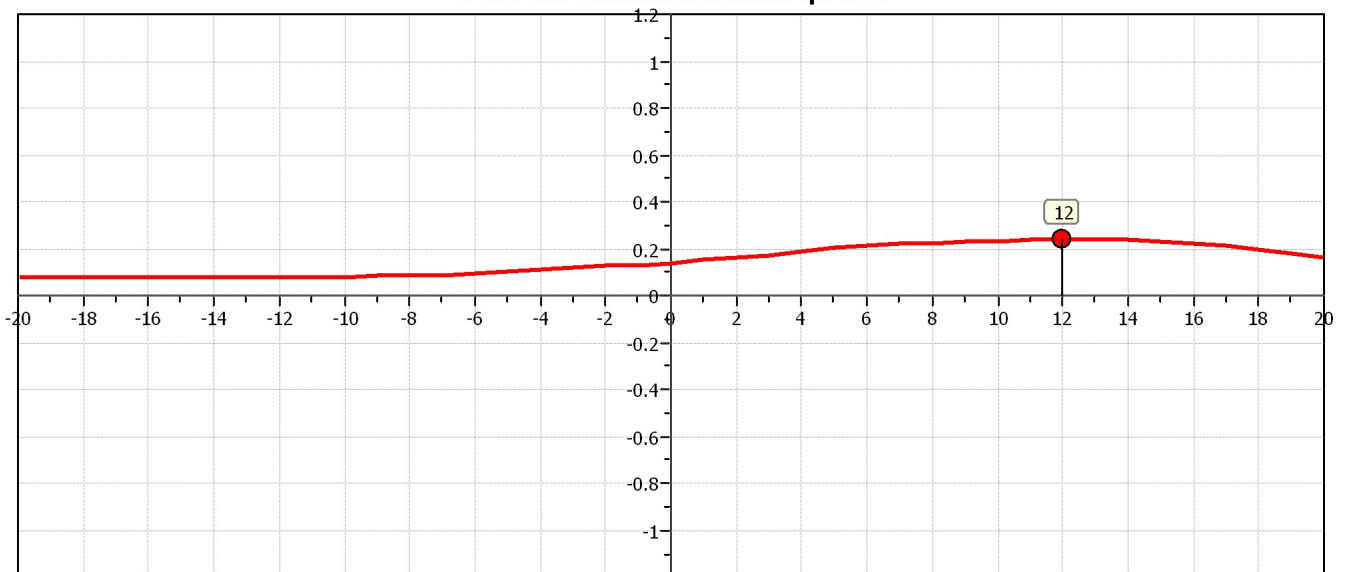
U2 [kPa]

Rf [%]



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

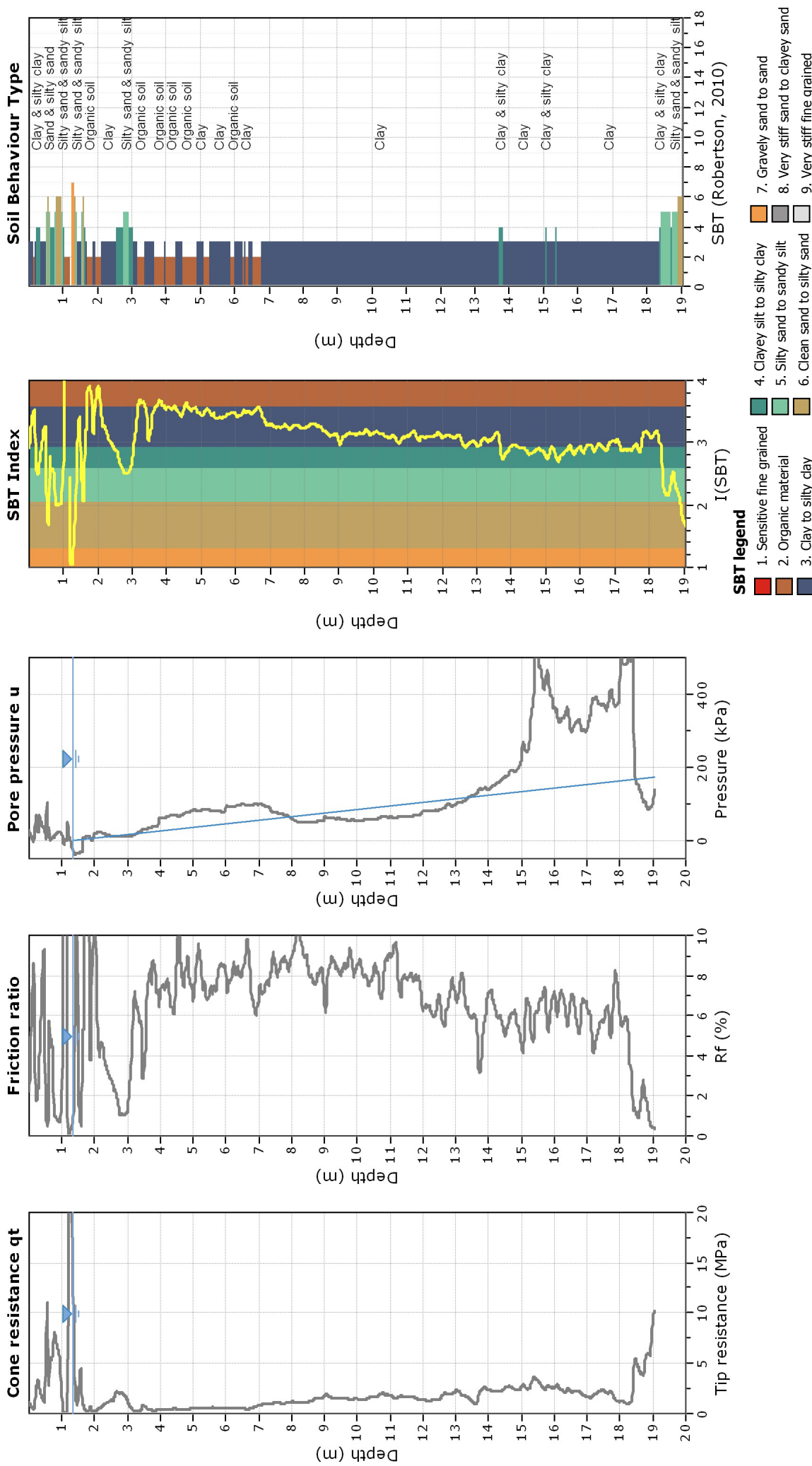
Cross correlation between qc & fs



Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

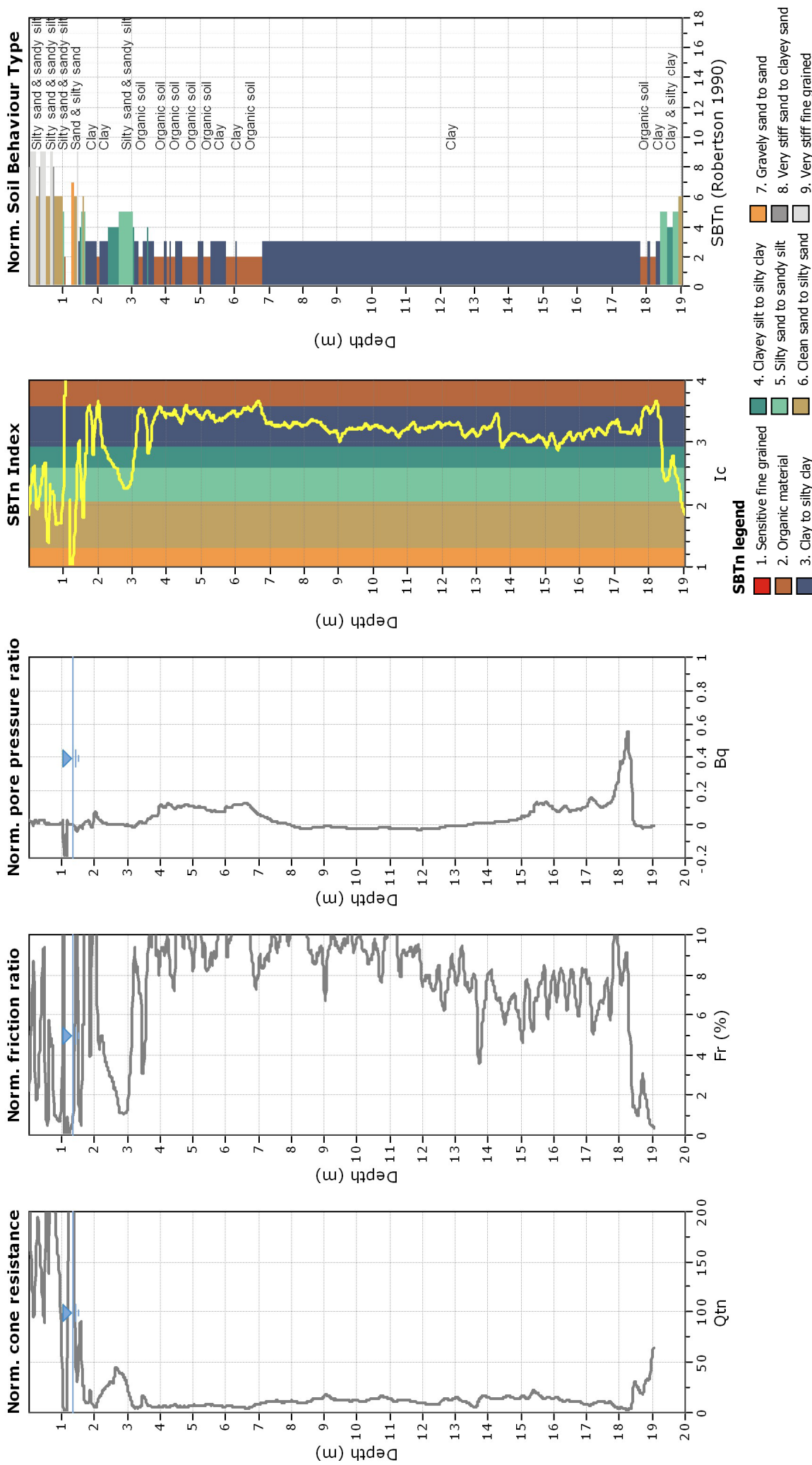
CPT: CPTU2
 Total depth: 19,06 m, Date: 18/12/2014



Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

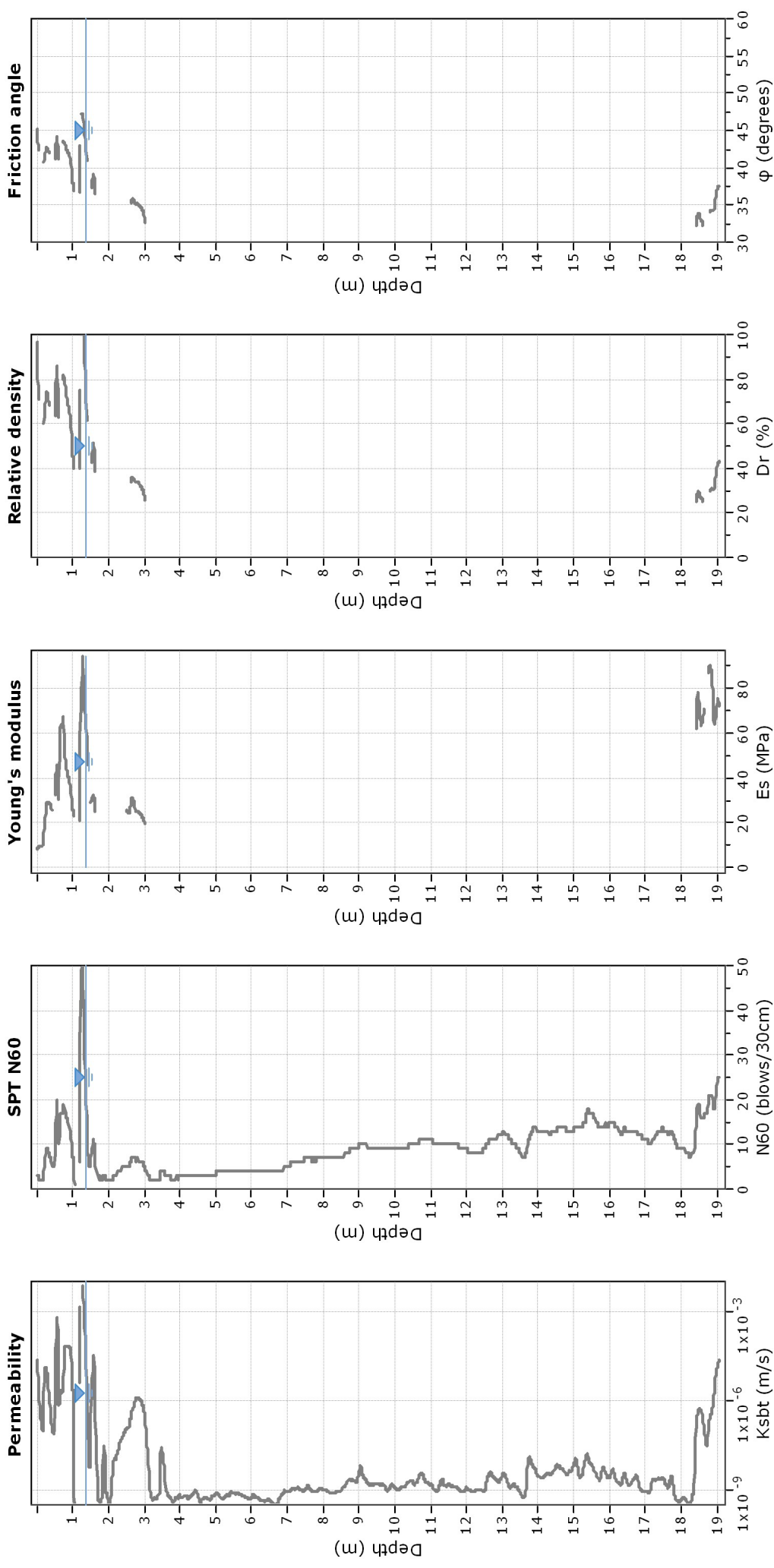
CPT: CPTU2
 Total depth: 19.06 m, Date: 18/12/2014



Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT: CPTU2
 Total depth: 19,06 m, Date: 18/12/2014



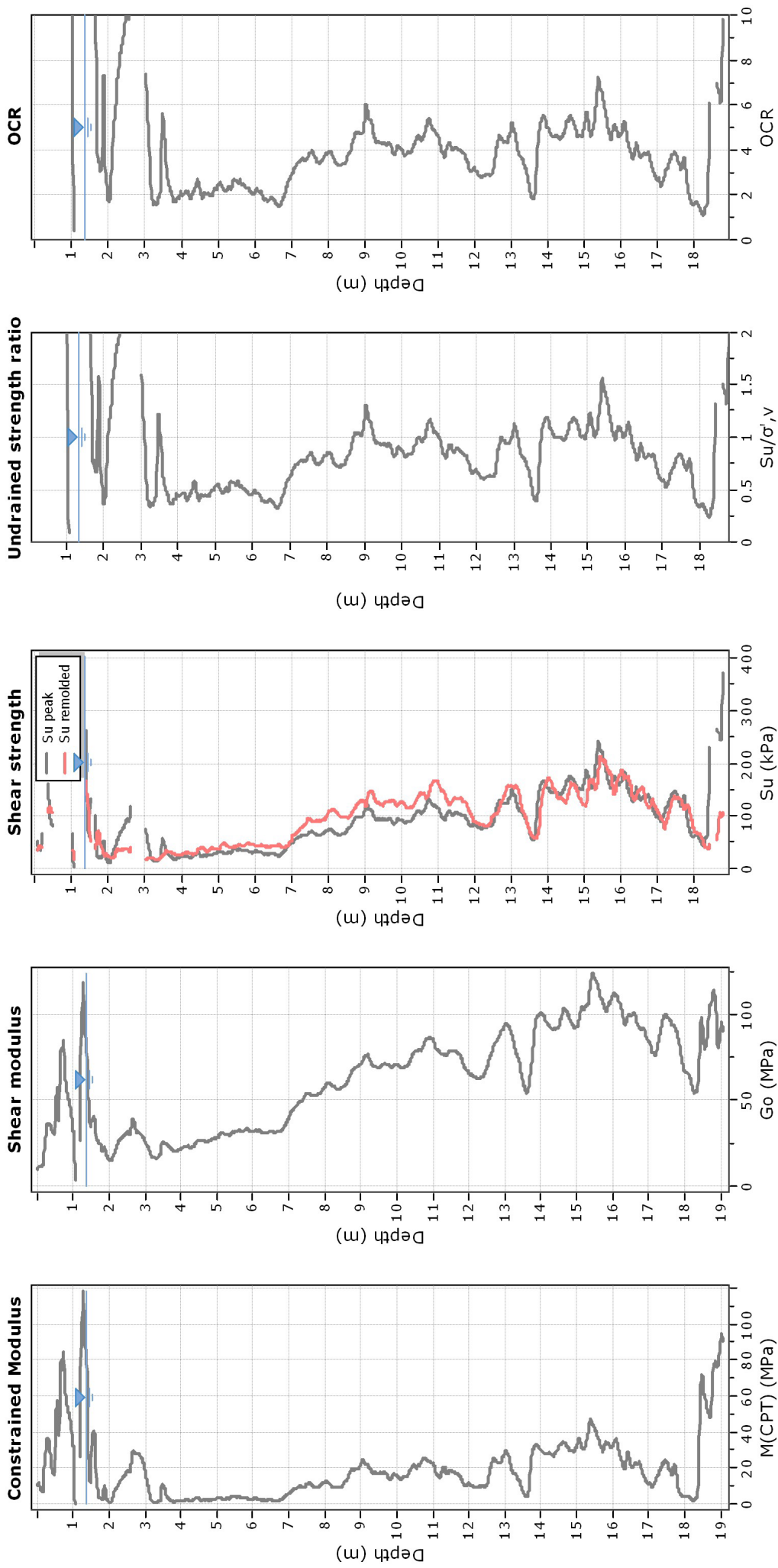
Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n
 SPT N_{60} : Based on I_c and q_t
 Young's modulus: Based on variable alpha using I_c (Robertson, 2009) —●— User defined estimation data
 Relative density constant, C_{br} : 350.0
 Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT: CPTU2
 Total depth: 19.06 m, Date: 18/12/2014



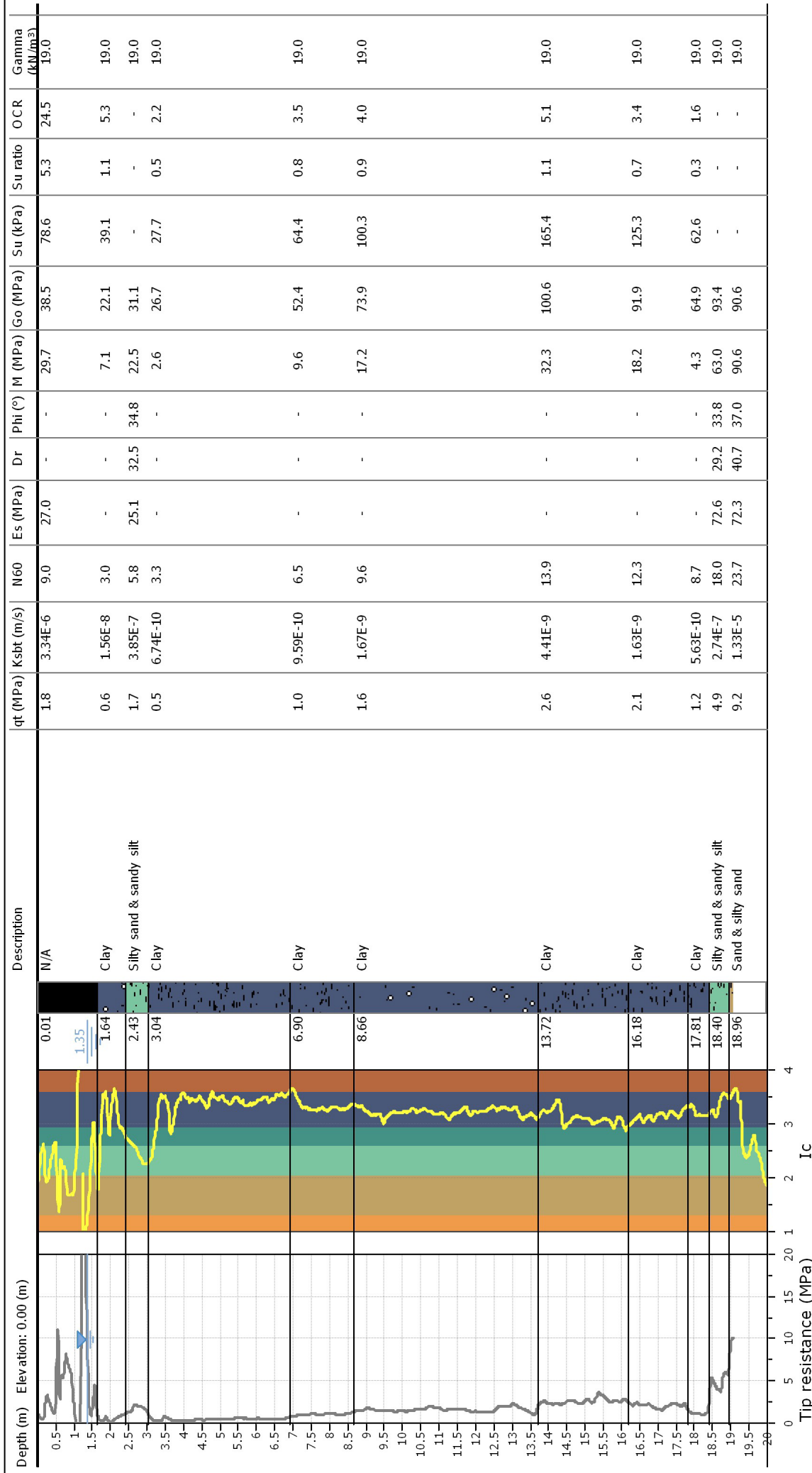
Calculation parameters

Constrained modulus: Based on variable $\alpha/\rho/\alpha$ using I_c and Q_{th} (Robertson, 2009) OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33
 Go: Based on variable $\alpha/\rho/\alpha$ using I_c (Robertson, 2009) —●— User defined estimation data
 Undrained shear strength cone factor for clays, N_{kt} : 14

Dott. Beghelli Saul - Geologo
 Via Saragozza n°72 - 40123 Bologna
 Tel./Fax 0516446165 - Cell. 3391903302
 e-mail beghelli@rilgeo.it

Project: Piano di Ricostruzione - Comune di Cento
Location: Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT: CPTU2
 Total depth: 19.06 m, Date: 18/12/2014



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)
0.01	1.63	3.34E-06 (±8.01E-04)	9.0 (±11.9)	27.0 (±23.8)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	29.7 (±31.2)	38.5 (±27.3)	78.6 (±121.2)	5.3 (±5.0)	24.5 (±23.1)	19.0 (±0.0)
1.64	0.79	1.56E-08 (±1.97E-08)	3.0 (±1.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	7.1 (±4.7)	22.1 (±4.6)	39.1 (±21.1)	1.1 (±0.5)	5.3 (±2.5)	19.0 (±0.0)
2.43	0.61	3.85E-07 (±4.49E-07)	5.8 (±0.9)	25.1 (±3.3)	32.5 (±2.5)	34.8 (±0.8)	22.5 (±4.9)	31.1 (±3.6)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	19.0 (±0.0)
3.04	3.86	6.74E-10 (±7.79E-09)	3.3 (±0.7)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	2.6 (±1.9)	26.7 (±5.0)	27.7 (±7.9)	0.5 (±0.2)	2.2 (±0.8)	19.0 (±0.0)
6.90	1.76	9.59E-10 (±1.64E-10)	6.5 (±0.7)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	9.6 (±2.0)	52.4 (±6.2)	64.4 (±8.1)	0.8 (±0.1)	3.5 (±0.3)	19.0 (±0.0)
8.66	5.06	1.67E-09 (±9.30E-10)	9.6 (±1.2)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	17.2 (±5.3)	73.9 (±8.3)	100.3 (±17.7)	0.9 (±0.2)	4.0 (±0.8)	19.0 (±0.0)
13.72	2.46	4.41E-09 (±2.78E-09)	13.9 (±1.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	32.3 (±4.5)	100.6 (±9.9)	165.4 (±22.3)	1.1 (±0.1)	5.1 (±0.6)	19.0 (±0.0)
16.18	1.63	1.63E-09 (±6.61E-10)	12.3 (±1.1)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	18.2 (±5.1)	91.9 (±7.5)	125.3 (±17.2)	0.7 (±0.1)	3.4 (±0.5)	19.0 (±0.0)
17.81	0.59	5.63E-10 (±6.59E-09)	8.7 (±1.1)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	4.3 (±5.2)	64.9 (±9.0)	62.6 (±23.1)	0.3 (±0.1)	1.6 (±0.6)	19.0 (±0.0)
18.40	0.56	2.74E-07 (±1.30E-06)	18.0 (±2.0)	72.6 (±8.9)	29.2 (±2.6)	33.8 (±0.8)	63.0 (±12.3)	93.4 (±11.6)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	19.0 (±0.0)
18.96	0.10	1.33E-05 (±4.82E-06)	23.7 (±1.6)	72.3 (±2.7)	40.7 (±2.2)	37.0 (±0.5)	90.6 (±3.4)	90.6 (±3.4)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	0.0 (±0.0)	19.0 (±0.0)

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

Presented below i□
that all components are expressed in the same units.

:: Unit Weight, g (kN/m³) ::

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

where g_w = water unit weight

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

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

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

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

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

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

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

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

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

:: Relative Density, Dr (%) ::

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

:: State Parameter, ψ ::

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

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

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

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

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

If $I_c > 2.20$
 $\alpha = 14$ for $Q_{tn} > 14$
 $\alpha = Q_{tn}$ for $Q_{tn} \leq 14$
 $M_{CPT} = \alpha \cdot (q_t - \sigma_v)$

If $I_c \leq 2.20$
 $M_{CPT} = (q_t - \sigma_v) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55 \cdot I_c + 1.68}$

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

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

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

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

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

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

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

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

:: Remolded undrained shear strength, Su(rem) (kPa) ::

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

:: Overconsolidation Ratio, OCR ::

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

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

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

:: In situ Stress Ratio, Ko ::

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

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

:: Soil Sensitivity, St ::

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

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

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

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

(applicable for $0.10 < B_q < 1.00$)

References

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

.....

ALLEGATO B

Prove penetrometriche statiche (CPT)
Studio geologico-tecnico a cura di Geo-probe S.r.l.
(Maggio 2008)

.....

Committente: Baranzoni Architetti s.r.l.
 Località: Cento (FE)
 Cantiere: via Malagodi
 n° prova: 1
 Profondità falda: 1.30 m
 Attrezzatura: Penetrometro da 200 kN
 Note: ---

Rapporto di prova N°: **08.0597 /RSP**

Data prova: 28/04/2008
 Quota: ---
 Codice lavoro: 2008.138
 Procedura di prova: IP_2

L1 kg/cm ²	L2 kg/cm ²	qc MPa	fs kPa	qc/fs -	Rf %	
16		1,63	45,78	36	2,81	
11	18	1,12	39,24	29	3,50	
9	15	0,92	52,32	18	5,70	
11	19	1,12	58,86	19	5,25	
9	18	0,92	52,32	18	5,70	1,0 m
6	14	0,61	32,70	19	5,35	
5	10	0,51	13,08	39	2,57	
3	5	0,31	19,62	16	6,42	
11	14	1,12	26,16	43	2,33	
18	22	1,83	32,70	56	1,78	2,0 m
14	19	1,43	26,16	55	1,83	
14	18	1,43	26,16	55	1,83	
17	21	1,73	26,16	66	1,51	
10	14	1,02	19,62	52	1,92	
3	6	0,31	6,54	47	2,14	3,0 m
2	3	0,20	13,08	16	6,42	
4	6	0,41	19,62	21	4,81	
5	8	0,51	26,16	19	5,13	
3	7	0,31	19,62	16	6,42	
5	8	0,51	32,70	16	6,42	4,0 m
4	9	0,41	26,16	16	6,42	
5	9	0,51	32,70	16	6,42	
6	11	0,61	32,70	19	5,35	
4	9	0,41	26,16	16	6,42	
5	9	0,51	32,70	16	6,42	5,0 m
8	13	0,82	39,24	21	4,81	
11	17	1,12	19,62	57	1,75	
7	10	0,71	45,78	16	6,42	
6	13	0,61	26,16	23	4,28	
9	13	0,92	39,24	23	4,28	6,0 m
7	13	0,71	39,24	18	5,50	
5	11	0,51	26,16	19	5,13	
8	12	0,82	45,78	18	5,61	
6	13	0,61	39,24	16	6,42	
6	12	0,61	26,16	23	4,28	7,0 m
9	13	0,92	32,70	28	3,56	
13	18	1,33	85,02	16	6,42	
18	31	1,83	117,72	16	6,42	
22	40	2,24	124,26	18	5,54	
23	42	2,34	111,18	21	4,74	8,0 m
21	38	2,14	137,34	16	6,42	
26	47	2,65	150,42	18	5,68	
24	47	2,45	117,72	21	4,81	
30	48	3,06	183,12	17	5,99	
27	55	2,75	183,12	15	6,65	9,0 m
24	52	2,45	98,10	25	4,01	
23	38	2,34	104,64	22	4,46	
26	42	2,65	176,58	15	6,66	
27	54	2,75	156,96	18	5,70	
26	50	2,65	104,64	25	3,95	10,0 m

Revisione	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
0	28/04/2008	Dr. Chelli	Dr. Luca Conti

Segue Rapporto di Prova N°: **08.0597 /RSP**

L1 kg/cm ²	L2 kg/cm ²	qc MPa	fs kPa	qc/fs -	Rf %	
26	42	2,65	163,50	16	6,17	
24	49	2,45	124,26	20	5,08	
33	52	3,36	124,26	27	3,69	
33	52	3,36	117,72	29	3,50	
31	49	3,16	130,80	24	4,14	11,0 m
26	46	2,65	176,58	15	6,66	
34	61	3,47	209,28	17	6,04	
33	65	3,36	209,28	16	6,22	
38	70	3,87	209,28	19	5,40	
25	57	2,55	117,72	22	4,62	12,0 m
26	44	2,65	104,64	25	3,95	
23	39	2,34	117,72	20	5,02	
36	54	3,67	91,56	40	2,50	
42	56	4,28	104,64	41	2,44	
37	53	3,77	78,48	48	2,08	13,0 m
25	37	2,55	111,18	23	4,36	
17	34	1,73	104,64	17	6,04	
21	37	2,14	78,48	27	3,67	
39	51	3,98	137,34	29	3,45	
34	55	3,47	176,58	20	5,09	14,0 m
36	63	3,67	183,12	20	4,99	
44	72	4,49	170,04	26	3,79	
45	71	4,59	137,34	33	2,99	
36	57	3,67	130,80	28	3,56	
41	61	4,18				15,0 m

Revisione	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
0	28/04/2008	Dr. Chelli	Dr. Luca Conti

Committente: Baranzoni Architetti s.r.l.
 Località : Cento (FE)
 Cantiere : via Malagodi
 n° prova : 2
 Profondità falda : 1.20 m
 Attrezzatura: Penetrometro da 200 kN
 Note: ---

Rapporto di prova N°: **08.0598 /RSP**

Data prova: 28/04/2008
 Quota: ---
 Codice lavoro: 2008.138
 Procedura di prova: IP_2

L1 kg/cm ²	L2 kg/cm ²	qc MPa	fs kPa	qc/fs -	Rf %	
22		2,24	117,72	19	5,25	
18	36	1,83	85,02	22	4,63	
16	29	1,63	71,94	23	4,41	
9	20	0,92	52,32	18	5,70	
8	16	0,82	32,70	25	4,01	1,0 m
9	14	0,92	13,08	70	1,43	
3	5	0,31	6,54	47	2,14	
2	3	0,20	13,08	16	6,42	
2	4	0,20	13,08	16	6,42	
5	7	0,51	19,62	26	3,85	2,0 m
12	15	1,22	19,62	62	1,60	
9	12	0,92	26,16	35	2,85	
7	11	0,71	19,62	36	2,75	
5	8	0,51	13,08	39	2,57	
4	6	0,41	13,08	31	3,21	3,0 m
3	5	0,31	13,08	23	4,28	
4	6	0,41	19,62	21	4,81	
6	9	0,61	26,16	23	4,28	
5	9	0,51	32,70	16	6,42	
5	10	0,51	13,08	39	2,57	4,0 m
4	6	0,41	26,16	16	6,42	
4	8	0,41	26,16	16	6,42	
6	10	0,61	32,70	19	5,35	
4	9	0,41	19,62	21	4,81	
6	9	0,61	39,24	16	6,42	5,0 m
7	13	0,71	39,24	18	5,50	
7	13	0,71	45,78	16	6,42	
8	15	0,82	52,32	16	6,42	
8	16	0,82	52,32	16	6,42	
8	16	0,82	45,78	18	5,61	6,0 m
7	14	0,71	45,78	16	6,42	
6	13	0,61	39,24	16	6,42	
7	13	0,71	45,78	16	6,42	
7	14	0,71	39,24	18	5,50	
7	13	0,71	39,24	18	5,50	7,0 m
10	16	1,02	65,40	16	6,42	
15	25	1,53	85,02	18	5,56	
17	30	1,73	91,56	19	5,28	
21	35	2,14	104,64	20	4,89	
19	35	1,94	117,72	16	6,08	8,0 m
20	38	2,04	124,26	16	6,09	
21	40	2,14	130,80	16	6,11	
20	40	2,04	124,26	16	6,09	
22	41	2,24	143,88	16	6,42	
24	46	2,45	143,88	17	5,88	9,0 m
21	43	2,14	104,64	20	4,89	
25	41	2,55	137,34	19	5,39	
26	47	2,65	150,42	18	5,68	
27	50	2,75	163,50	17	5,94	
26	51	2,65				10,0 m

Revisione	Data emissione	Sperimentatore	Il Direttore di Laboratorio
0	28/04/2008	Dr. Tabarroni	Dr. Luca Conti

Rapporto di Prova N°: **08.0597 /RSP**

Quota: ---

Data prova: 28/04/2008

Codice lavoro: 2008.138

N. 1

CPT (CONE PENETRATION TEST)

Committente: Baranzoni Architetti s.r.l.

via Malagodi

Località: Cento (FE)

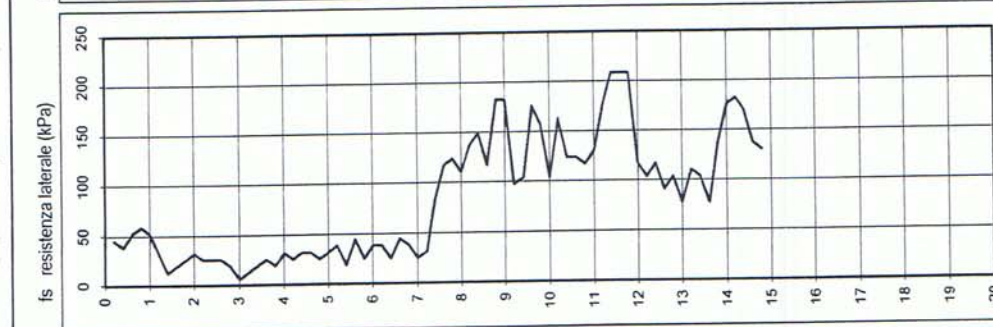
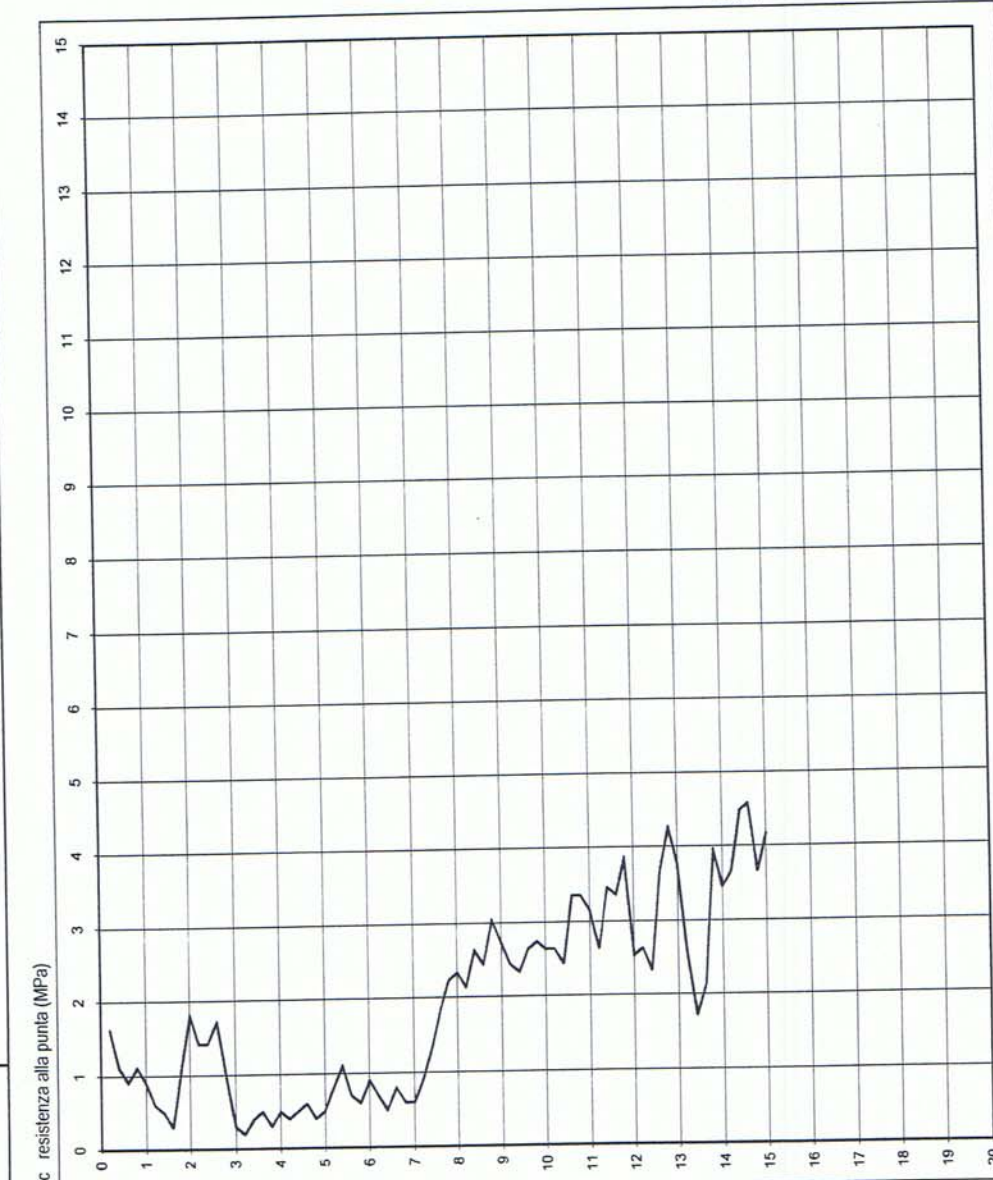
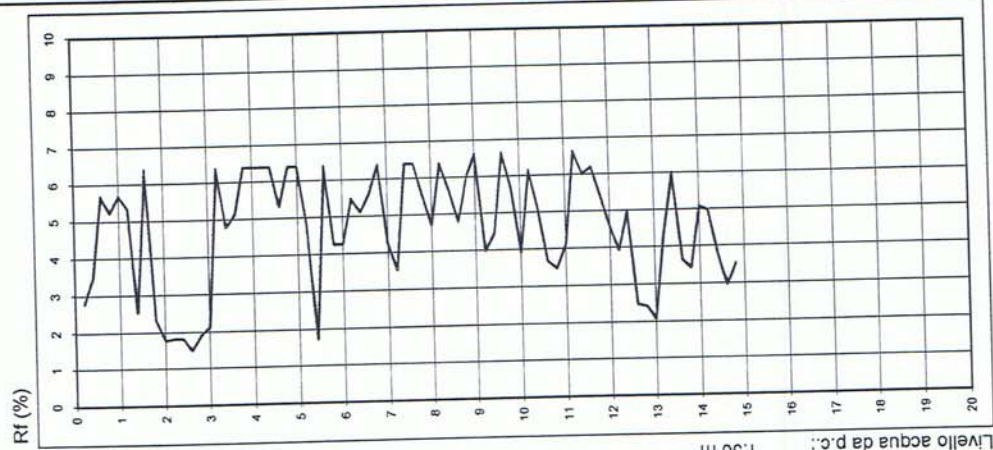
Attrezzatura: Penetrometro da 200 kN

GEO-PROBE S.r.l.

- Indagini Geognostiche -

40033 CASALECCHIO DI RENO

Via Cimarosa, 119 - Tel. 051/61.33.072



Livello acqua da p.c.: 1,30 m

Note: ---

Il Direttore di Laboratorio

Sperimentatore

Data emissione

Rev.

Normativa di riferimento

IP_2

ASTM D 3441-94

28/04/2008

0

Dr. Chelli

Dr. Luca Conti

GEO-PROBE S.r.l.

- Indagini Geognostiche -

40033 CASALECCHIO DI RENO

Via Cimarosa, 119 - Tel. 051/61.33.072

CPT (CONE PENETRATION TEST)

N. 2

Committente: Baranzoni Architetti s.r.l.

Località: Cento (FE) via Malagodi

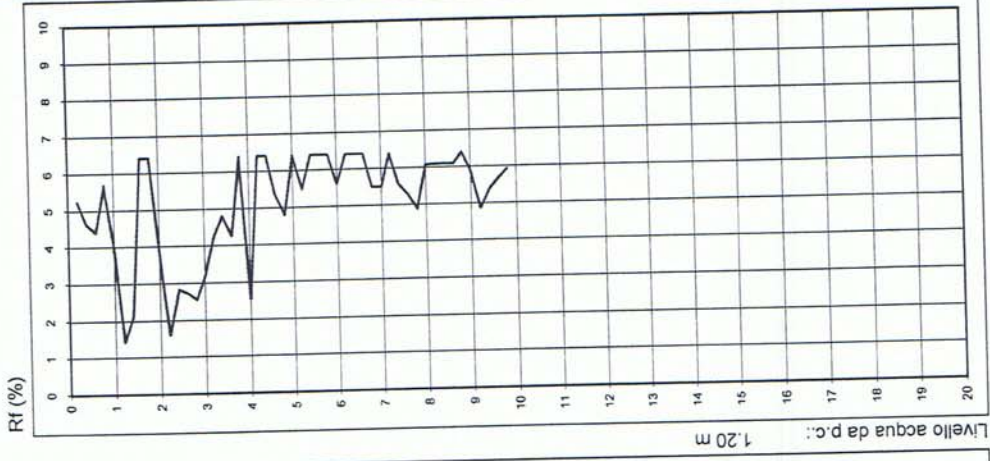
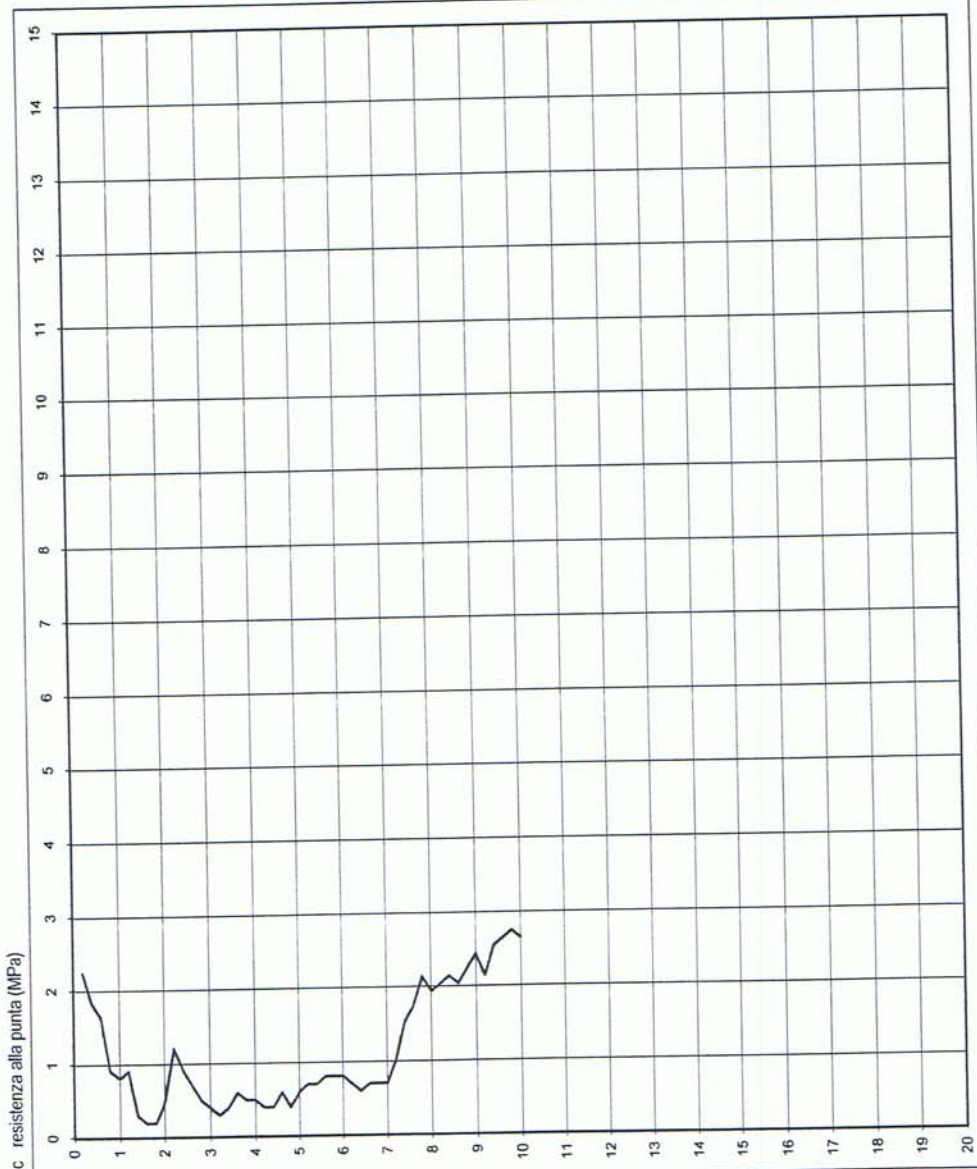
Attrezzatura: Penetrometro da 200 kN

Rapporto di Prova N°: **08.0598 /RSP**

Quota: ---

Data prova: 28/04/2008

Codice lavoro: 2008.138



Livello acqua da p.c.: 1,20 m

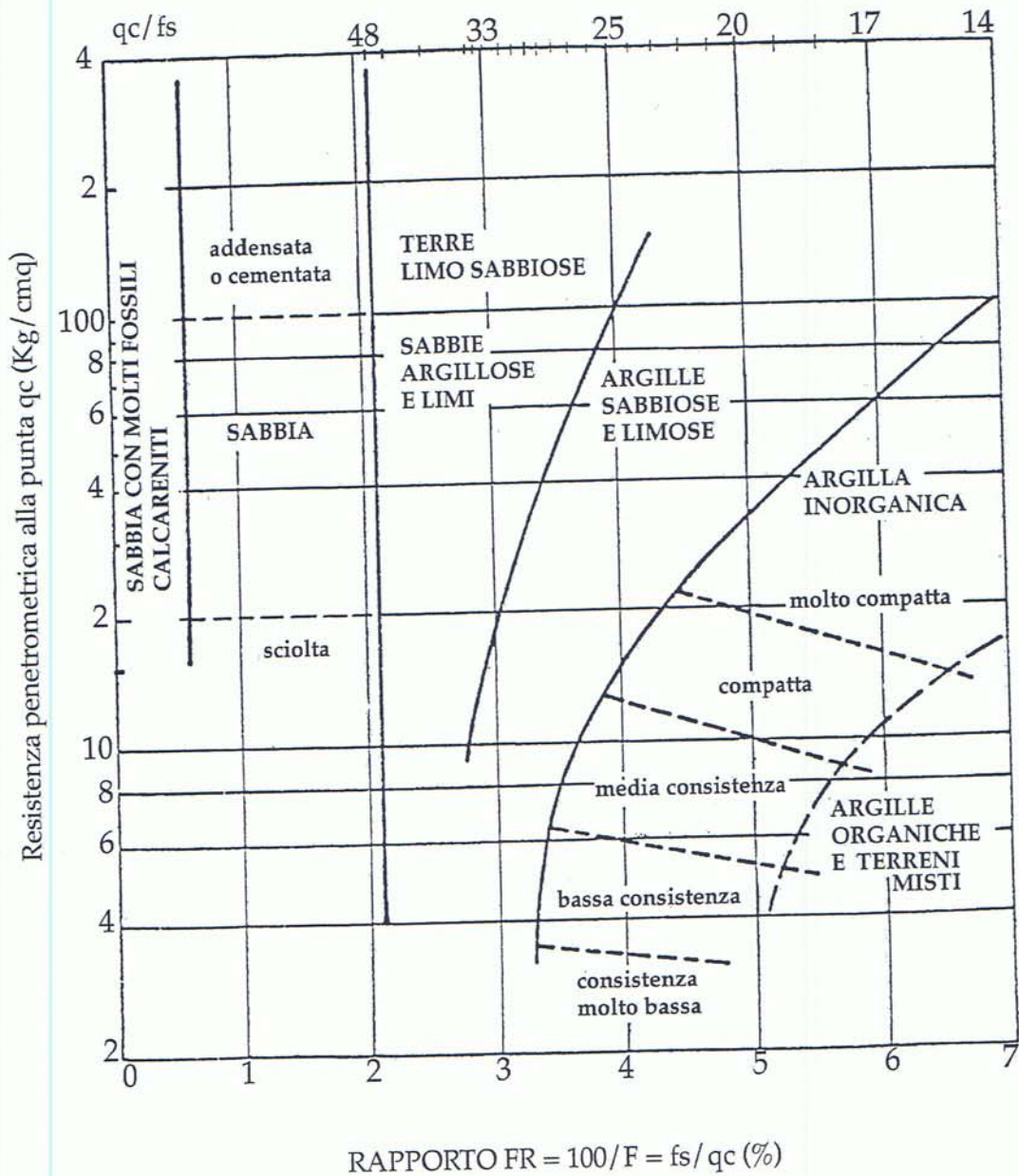
Note: ---

Procedura di prova	IP_2	Normativa di riferimento	ASTM D 3441-94	Rev.	0	Data emissione	28/04/2008	Sperimentatore	Dr. Tabarroni	Il Direttore di Laboratorio	Dr. Luca Conti
--------------------	------	--------------------------	----------------	------	---	----------------	------------	----------------	---------------	-----------------------------	----------------

Classificazione orientativa dei terreni
(Schmertmann, 1978)

CLASSIFICAZIONE ORIENTATIVA DEI TERRENI IN BASE AI DATI PENETROMETRICI STATICI q_c E f_s

(Schmertmann, 1978)



Baranzoni Architetti S.r.l.
Cento (FE) - via Malagodi
CPT 1

08138001

Prof mt	Strati	Tipologia	Gamma kg/m ³	Gamma' kg/m ³	Sioma' V kg/cm ²	CU kg/cm ²	FI %	DR %	Mv cm ² /Kg	K oriz Kg/cm ³	Perm cm/sec
0.40		Argilla limosa	1912	1912	0.076	0.675	0	0	0.014815	1.3500	0.00
0.60		Argilla organicaft. misti	1896	1896	0.114	0.450	0	0	0.018519	1.8000	0.00
1.00		Argilla media	1900	1900	0.190	0.500	0	0	0.018182	1.0000	0.00
1.20		Argilla organicaft. misti	1881	1881	0.228	0.300	0	0	0.022222	1.2000	0.00
	FALDA										
1.60		Argilla molto tenera	1866	866	0.263	0.200	0	0	0.029412	0.4000	0.00
1.80		Limo argilloso	1904	904	0.281	0.550	0	0	0.014782	0.7333	0.02
		Sabbia sciolta	1800	800	0.345	0.000	33	23	0.031746	0.7875	0.05
2.60		Sabbia sciolta	1800	800	0.361	0.000	31	15	0.050000	0.5000	0.04
2.80		Argilla organicaft. misti	1870	870	0.570	0.225	0	0	0.026936	0.9000	0.00
5.20		Sabbia sciolta	1800	800	0.586	0.000	29	15	0.045455	0.5500	0.05
5.40		Argilla media	1887	887	0.745	0.350	0	0	0.020408	0.7000	0.00
7.20		Argilla organicaft. misti	1917	917	0.782	0.775	0	0	0.012903	3.1000	0.00
7.60		Argilla molto compatta	1935	935	1.044	1.246	0	0	0.010065	2.4929	0.00
10.40		Argilla molto compatta	1945	945	1.176	1.629	0	0	0.006140	3.2571	0.00
11.80		Argilla compatta	1934	934	1.232	1.233	0	0	0.010307	2.4667	0.00
12.40		Sabbia argillosa e limosa	1850	850	1.283	0.000	31	29	0.013043	2.5556	0.02
13.00		Argilla compatta	1935	935	1.302	1.250	0	0	0.010000	2.5000	0.00
13.20		Argilla compatta	1920	920	1.320	0.850	0	0	0.024510	1.7000	0.00
13.40		Argilla limosa	1928	928	1.339	1.050	0	0	0.009524	2.1000	0.00
13.60		Argilla sabbiosa e limosa	1952	952	1.472	1.964	0	0	0.005091	2.6190	0.00
15.00											

Baranzoni Architetti S.r.l.
Cento (FE) - via Malagodi
CPT 2

08138002

Prof mt	Strati	Tipologia	Gamma kg/m3	Gamma' kg/m3	Sioma'V kg/cm2	CU kg/cm2	FI %	DR %	Mv cm2/Kg	K oriz Kg/cm3	Perm cm/sec
0.20		Argilla molto compatta	1930	1930	0.039	1.100	0	0	0.013369	2.2000	0.00
0.60		Argilla compatta	1920	1920	0.115	0.850	0	0	0.024510	1.7000	0.00
1.20		Argilla media	1895	1895	0.229	0.433	0	0	0.018711	0.8667	0.00
	FALDA										
2.00		Argilla molto tenera	1855	855	0.298	0.150	0	0	0.037037	0.3000	0.00
2.20		Sabbia sciolta	1800	800	0.314	0.000	32	15	0.041667	0.6000	0.06
2.60		Argilla limosa	1892	892	0.349	0.400	0	0	0.019231	0.8000	0.01
7.00		Argilla organica/t. misti	1880	880	0.736	0.291	0	0	0.022642	1.1636	0.00
7.60		Argilla compatta	1913	913	0.791	0.700	0	0	0.035714	1.4000	0.00
10.00		Argilla molto compatta	1931	931	1.015	1.133	0	0	0.012486	2.2667	0.00

.....

ALLEGATO C

Studio sismico

.....

Dott. Saul Beghelli

GEOLOGO

(Ordine dei Geologi R.E.R. n°1018)

P. IVA 00874901200

C.F. BGH SLA 75A02 A944D

COMUNE DI CENTO

Provincia di Ferrara

Analisi di risposta sismica locale
in un'area situata nel centro storico di Cento
tra Viale Falzoni Gallerani n°10 e Via Olindo Malagodi n°29

STUDIO SISMICO

Proprietà:

DOTT. BORGHINI PAOLO

Redazione:

DOTT. BEGHELLI SAUL



Bologna, lì 18 dicembre 2014

Via Saragozza n° 72 - 40123 Bologna

Via Lavino n° 479 - 40050 Monte S. Pietro (BO)

Tel. e fax 051-6446165 / Cell. 339-1903302

E-mail: beghelli@rilgeo.it

INDICE

1. PREMESSA	2
2. PROVA MASW	2
2.1 TEORIA ONDE DI SUPERFICIE	2
2.2 STRATIGRAFIA SISMICA	3
3. MISURA DI SISMICA PASSIVA CON TROMOGRAFO DIGITALE	4
3.1 SISMICA TROMOGRAFICA	4
3.2 TECNICA HVSR.....	4
3.3 STRATIGRAFIA SISMICA	5
4. CARATTERISTICHE STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	5
5. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI DA PROVA MASW	7
6. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI DA SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA	8
7. INTERPRETAZIONE PROVA MASW	10
8. INTERPRETAZIONE COMBINATA DELLE MISURE SISMICHE	11
9. RISPOSTA SISMICA LOCALE	13
9.1 FUNZIONE DI TRASFERIMENTO.....	17
9.2 SPETTRO DI RISPOSTA DEL SITO	17

1. PREMESSA

Il presente studio ha come obiettivo la stima della risposta sismica di sito attraverso una modellazione numerica della propagazione del moto sismico. A tale scopo è stata realizzata un'analisi del microtremore sismico ambientale con tecnica passiva a stazione singola (HVSr) ed una prova MASW, mediante un tomografo digitale portatile TROMINO ENGY con cavo trigger. Le indagini avevano la finalità di caratterizzare il comparto dal punto di vista sismo-stratigrafico e di ricostruire il profilo di velocità delle onde S.

Le acquisizioni sono state eseguite nell'area cortiliva di pertinenza che si sviluppa fra i fabbricati di Viale Falzoni Gallerani n°10 e di Via Olindo Malagodi n°29, come indicato nella Tavola 4.

2. PROVA MASW

L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è un'affidabile ed accreditata metodologia sismica che consente di determinare il profilo di velocità delle onde di taglio S nel sottosuolo. Tale metodo consiste nell'analisi delle onde di superficie Rayleigh, registrate da una serie di geofoni posizionati a formare uno stendimento. Le usuali e consolidate tecniche di elaborazione delle onde sismiche utilizzano unicamente i tempi di primo arrivo delle onde sismiche di volume indagate (P e S), considerando come "disturbo" la restante parte del segnale caratterizzato dalla presenza delle onde di superficie (Rayleigh e Love). Nuovi studi hanno dimostrato la possibilità di elaborare un modello matematico dall'analisi ed interpretazione di tale "disturbo".

Inoltre, a differenza di tutte le altre tecniche di indagine sismica, i metodi basati sull'analisi delle onde di superficie di Rayleigh non risultano limitati dalle inversioni di velocità ed, essendo la loro propagazione funzione innanzitutto delle onde S e solo in parte legata alla V_p e alla densità del mezzo, risultano un ottimo strumento per la caratterizzazione sismica del sito tramite la ricostruzione del profilo di V_s , come previsto dalla normativa vigente (D.M. 14 gennaio 2008).

2.1 TEORIA ONDE DI SUPERFICIE

Le onde di Rayleigh sono onde polarizzate su di un piano verticale (Fig. 1) generate in corrispondenza della superficie libera del mezzo dall'interazione delle onde di volume P e S. Il movimento delle particelle mobilizzate da tali onde è di tipo ellittico con ampiezza dello spostamento che decresce con la distanza dalla superficie libera.



Fig. 1: Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh, caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento retrogrado delle particelle rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

Quando si applica una sollecitazione sismica in aria libera più del 65% dell'energia sismica prodotta è distribuita alle onde di Rayleigh, mentre per le onde P e S corrisponde rispettivamente al 7% e al 26%.

In un mezzo stratificato le onde di superficie sono dispersive (fenomeno della dispersione geometrica), cioè onde con diversa lunghezza d'onda di propagano con diverse velocità di fase (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. And Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. Le onde superficiali di Rayleigh, quando si propagano in un mezzo omogeneo, non presentano dispersione e la loro velocità è uguale a $0.92 V_s$. In un mezzo disomogeneo, quale la Terra, la loro velocità varia in funzione della lunghezza d'onda tra i limiti 0 e $0.92 V_s$ (Fig. 2). La teoria della propagazione delle onde superficiali è ben conosciuta ed è descritta dettagliatamente da Ewing et al. (1957).

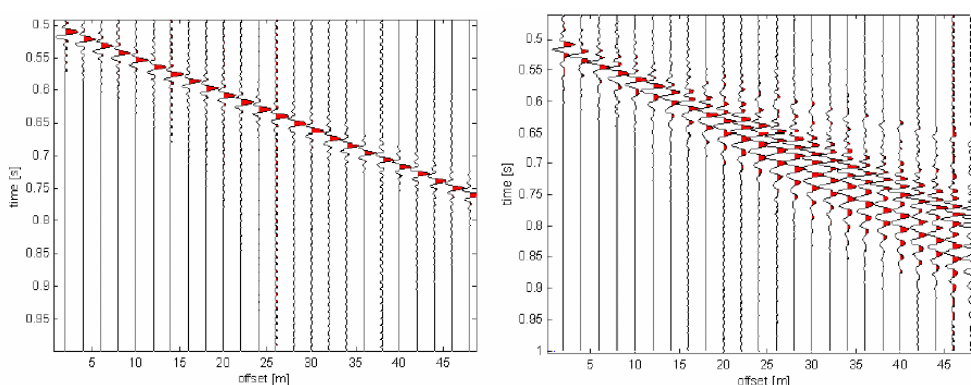


Fig. 2: Segnali sismici che evidenziano (in rosso) le onde di Rayleigh in un mezzo non stratificato (a sinistra) e in un mezzo stratificato (a destra). Risulta evidente il fenomeno della dispersione di tali onde sismiche.

Tramite l'analisi e l'elaborazione numerica del segnale è possibile costruire la curva di dispersione, ovvero la variazione della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza, dalla quale è possibile determinare il profilo di velocità delle onde S tramite il processo di inversione.

2.2 STRATIGRAFIA SISMICA

La tecnica MASW può essere applicata in campo geologico per fornire una prospezione del sottosuolo. La definizione di un modello che consenta di descrivere il profilo sismico del sito, prevede la costruzione di una curva sintetica di dispersione che riesca a riprodurre la curva sperimentale.

Sono però presenti alcune limitazioni dovute a:

- dimensioni dello stendimento;
- tipo di energizzazione;
- limiti di conoscenze del mezzo geologico;
- limitazioni intrinseche della misura.

È fondamentale, ai fini di una corretta interpretazione, la determinazione della profondità di indagine massima raggiunta dalla misura. Per fare ciò si individua la frequenza minima che la curva di dispersione ha raggiunto e si applica la formula elaborata da Stokoe et al. (1994):

$$h_{\max} \approx 0,5\lambda_{\max}$$

dove:

- h_{\max} indica la massima profondità di indagine;
- λ_{\max} indica la massima lunghezza d'onda registrata (ricordando che $\lambda=v/f$ con v che corrisponde alla velocità ed f alla frequenza dell'onda).

3. MISURA DI SISMICA PASSIVA CON TROMOGRAFO DIGITALE

3.1 SISMICA TROMOGRAFICA

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

Il rumore sismico ambientale è generato da:

- fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento);
- attività dinamica terrestre;
- attività antropica.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione ed elaborazione si dicono passivi in quanto le vibrazioni non risultano quindi localizzate e fornite ad hoc, come per le tecniche di sismica attiva.

Le onde sismiche, durante il loro tragitto dalla sorgente al sito di misura, subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di "guida d'onda", attenuazioni che dipendono dalla natura dei terreni attraversati. Questo significa che, mentre sono perse tutte le informazioni che riguardano la sorgente, l'onda conserva le informazioni relative alla struttura del terreno nelle vicinanze del punto di misura. Attraverso tecniche opportune è possibile recuperare i dati contenuti nel rumore sismico ambientale e ricostruire un modello puntuale del terreno.

3.2 TECNICA HVSR

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spazial Ratio), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970) e poi da Nakamura (1989), è quella maggiormente utilizzata. Essa consiste nello studio dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale, per la determinazione dell'amplificazione sismica locale. È ormai ampiamente riconosciuto in letteratura che l'HVSR è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali di risonanza dei sottosuoli. Inoltre si riconosce che le singole componenti del rumore ambientale possono registrare ampie variazioni in funzione dei disturbi naturali e antropici, mentre il rapporto delle componenti orizzontali con la componente verticale risulta stabile, conservando il picco della frequenza di risonanza fondamentale.

3.3 STRATIGRAFIA SISMICA

La tecnica HVSR può essere applicata in campo geologico per fornire una prospezione geologica del sottosuolo.

In un modello ideale di terreno costituito da due strati (1 e 2) con diversa densità (ρ_1 e ρ_2) e diverse velocità delle onde S (V_{s1} e V_{s2}) è possibile mettere in relazione la frequenza di risonanza dello strato superficiale con il suo spessore e con la velocità delle onde S al suo interno. Tale relazione è espressa in maniera semplificata dalla seguente formula:

$$f_r = V_{s1}/4h$$

dove:

- f_r è la frequenza di risonanza dello strato 1;
- V_{s1} è la velocità delle onde S nello strato 1;
- h è lo spessore dello strato 1;

Questo metodo, nella sua forma estesa e completa, viene utilizzato per la ricostruzione di modelli multistrato complessi, in grado di fornire parametri fisici del terreno.

Come è possibile notare, all'interno dell'equazione sono presenti tre incognite. Dalla misura tromografica si ottiene unicamente il valore della frequenza di risonanza degli strati (f_r), per cui l'equazione risulta indeterminata. È necessario fornire un valore di riferimento (V_{s1} o h), detto "vincolo", che ne consenta la soluzione. Tale valore può giungere da altre indagini o da bibliografia.

4. CARATTERISTICHE STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Per le indagini è stato utilizzato un tromografo digitale portatile TROMINO, prodotto da Micromed S.p.A., nella versione Engineering, al quale è stato collegato un cavo trigger della lunghezza di 50 m, unito ad un geofono con puntale, con frequenza propria di 4,5 Hz.

Di seguito sono riportate le principali caratteristiche tecniche dello strumento, secondo le indicazioni fornite dalla ditta costruttrice.

SPECIFICHE TECNICHE	
Costruttore	Micromed S.P.A.
Apparato	TROMINO® sistema ultraportatile di acquisizione del rumore sismico
Classificazione	CISPR 11 - EN 55011; Gruppo1 ; Classe B.
Conformità agli standard	EN 55011; IEC 61000-4-2; EC 61000-4-4; , IEC 61000-4-3
Alimentazione	2 batterie alcaline x 1.5 VDC AA
Voltaggio interno	+3.3 V, +3.6 V per la sezione analogica
Consumi	75 mW (GPS disattivato), 450 mW (GPS attivo)
Durata delle batterie	80 h di misura continua con GPS disattivato
Numero di canali	3+1 analogici
Amplificatori	tutti canali con input differenziali
Rumore	< 0.5 μ V r.m.s. @128 Hz sampling
Impedenza dell'input	10 ⁶ Ohm
Range di frequenze	DC - 360 Hz
Frequenza di campionamento	16384 Hz per canale
Frequenze di sovracampionamento	32x, 64x, 128x
Conversione A/D	equivalente a 24 bit
Massimo input analogico	51.2 mV (781 nV/digit)
Display grafico	grafico, 128 x 64 pixel, retroilluminato
Tastiera	4 tasti a membrana
Orologio	interno, permanente con datario e allarme, può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
GPS	12 canali con time-marker (precisione 1 μ s), può essere visualizzato anche durante l'acquisizione
Livella	a bolla d'aria, elevata precisione orizzontale, sensibilità 5' d'arco (0.083°)
Connessioni	porta USB, tipo B
Registrazione dati	memoria interna, standard 512 Mb, opzionale fino a 2 Gb
Dimensione e peso	10 x 14 x 7.7 (altezza) cm 1.1 kg contenitore di alluminio
Accoppiamento col terreno	su punte e cuscinetto reologico
Condizioni ambientali per l'uso	temperatura - 10 / +70°C umidità 0-90% senza condensa
Impermeabilità	indice di protezione IP = 65 (resistente alla polvere, resistente agli spruzzi)
Sensori	3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione autobloccaggio quando non in acquisizione 1 geofono verticale con puntale con frequenza propria di 4,5 Hz
Cavo trigger	Cavo di lunghezza 50 metri, con avvolgitore

Tabella 1: Principali specifiche tecniche dello strumento di acquisizione.

Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati secondo le tre componenti spaziali (N-S, E-W e Up-Down), che consentono di acquisizione digitale in alta definizione delle vibrazioni del terreno (ampiezze d'onda inferiori a 10 μm), nel campo delle frequenze 0 – 200 Hz. In seguito ad una registrazione di un determinato tempo t, tale segnale digitalizzato viene elaborato tramite un software dedicato, Grilla, il quale esegue un'elaborazione per ognuna delle componenti del moto e ne fornisce i grafici relativi.

5. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI DA PROVA MASW

L'abbinamento tra Tromino Engineering ed un geofono consente di effettuare stendimenti sismici di dimensioni massime pari a 50 m. La presenza di un unico geofono, detto starter in quanto registra i primi arrivi delle onde sismiche, impone il suo spostamento continuo secondo le posizioni dello schema prestabilito (Fig. 3). Lo stendimento aveva una lunghezza di 49 m con il primo geofono a distanza di 1,0 m dal Tromino mentre l'interdistanza tra le altre posizioni del geofono era di 3,0 metri; l'energizzazione, ottenuta tramite un salto effettuato dall'operatore, è avvenuta a 3,0 m di distanza dallo starter lungo l'asse geofono-Tromino.



Fig. 3: Schema dello stendimento per la registrazione della prova MASW. G1, G2, G3, ... corrispondono alle posizioni nelle quali il geofono starter viene spostato ad ogni energizzazione del terreno. L'interdistanza tra le posizioni del geofono è di 3,0 metri.

Da tale stendimento viene elaborato un sismogramma definito "virtuale" in quanto non deriva dalla registrazione simultanea di più geofoni, ma i segnali di ogni energizzazione vengono composti in un unico sismogramma tramite software dedicati.

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

M1	
Inizio registrazione	Data 18/12/14 Ore 13:57:56
Fine registrazione	Data 18/12/14 Ore 14:05:26
Lunghezza della traccia	7'24"
Frequenza di campionamento	1024 Hz
N° geofoni	17

Tabella 2: Descrizione tecnica della misura.

L'elaborazione del segnale registrato si compone dei seguenti passaggi:

1. picking dei primi arrivi sulla traccia di registrazione del geofono;
2. ricostruzione del sismogramma delle tracce registrate dal sismografo (Tromino) tramite software Grilla;
3. selezione per ogni traccia delle finestre temporali contenenti onde superficiali di Rayleigh;
4. calcolo della curva di dispersione sperimentale tramite software dedicato.

La curva di dispersione fornisce con una scala cromatica l'intensità della risonanza delle onde di Rayleigh alle varie frequenze (asse delle ascisse) e la relativa velocità delle onde (asse delle ordinate). A questo punto è possibile procedere con l'interpretazione della misura.

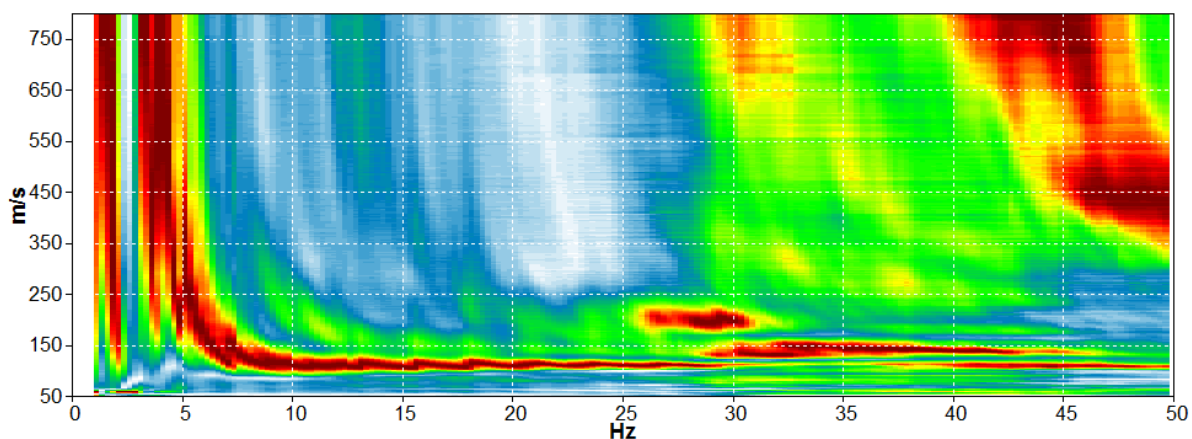


Fig. 4: Curva di dispersione del sito.

6. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI DA SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA

È stata effettuata inoltre una misura di sismica passiva; lo strumento è stato posizionato al di sopra di una superficie resa idonea dall'operatore, al fine di permettere il perfetto accoppiamento strumento / terreno. La registrazione in particolare è stata effettuata in adiacenza alla prova penetrometrica CPTU1. Nella tabella seguente viene riportata la descrizione tecnica della misura effettuata.

Tr1	
Inizio registrazione	Data 18/12/14 Ore 13:25:01
Fine registrazione	Data 18/12/14 Ore 13:45:01
Lunghezza della traccia	20'00"
Frequenza di campionamento	128 Hz
Dimensione della finestra di suddivisione del tracciato	12 sec
Percentuale di traccia analizzata	86%
Lisciamento	10%

Tabella 3: Descrizione tecnica della misura.

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

L'elaborazione del segnale ha previsto i seguenti passaggi:

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

Osservando gli spettri delle singole componenti è possibile notare, dall'andamento uniforme delle tre linee (fig. 5), come la misura sia stata eseguita correttamente, effettuando un buon accoppiamento tra strumento e terreno.

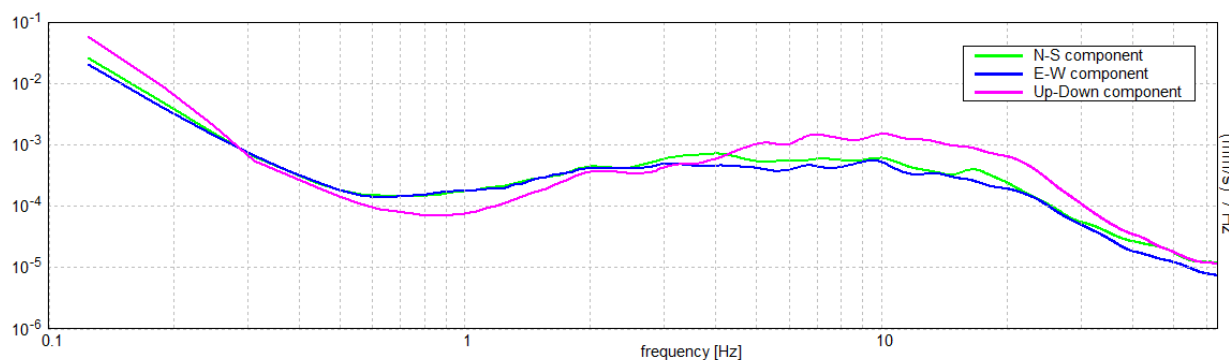


Fig. 5: Grafico delle componenti ortogonali della misura Tr1.

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

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

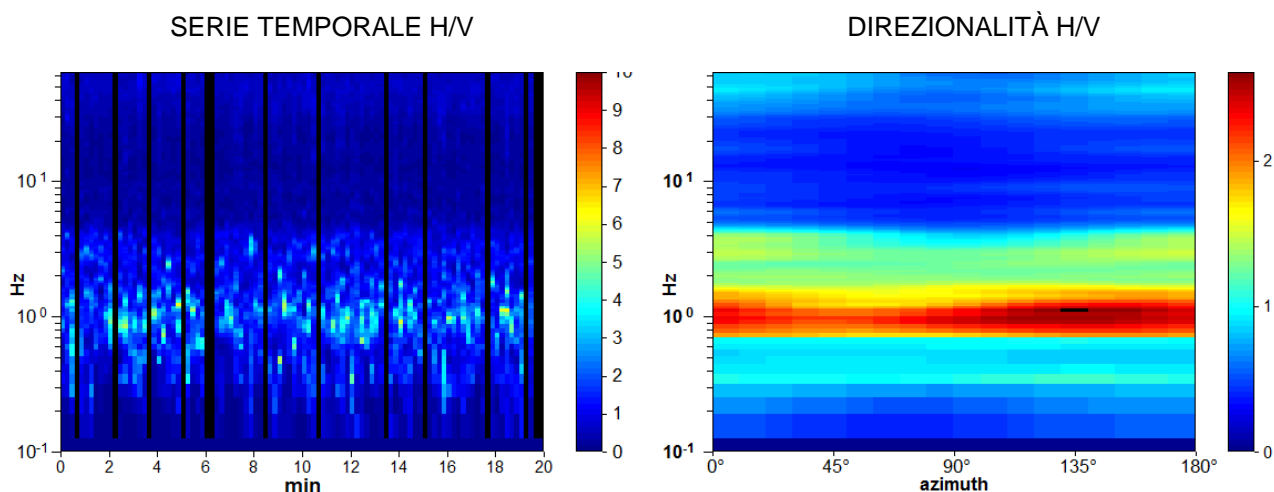


Fig. 6: Grafico della serie temporale H/V (sinistra) e grafico della direzionalità H/V (destra) relativi alla misura Tr1.

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

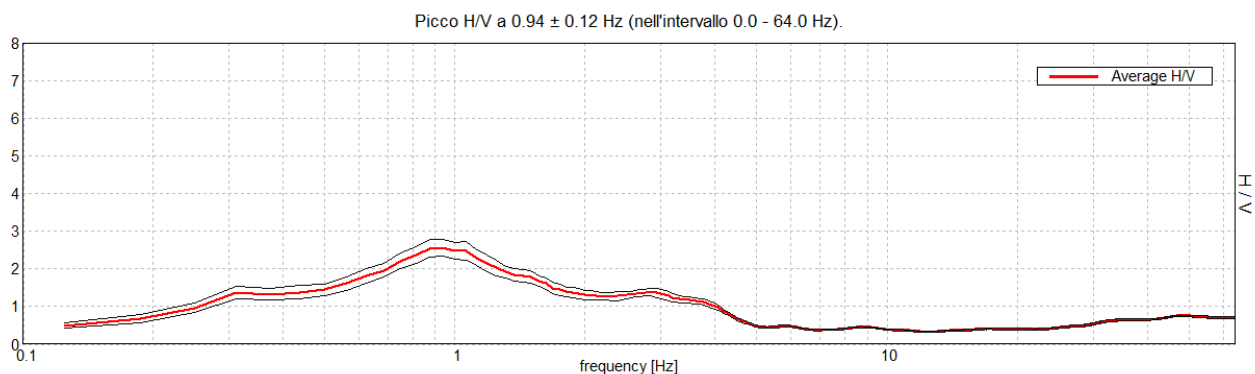


Fig. 7: Diagramma HVSR relativo alla misura Tr1.

Si osserva come il tratto della curva HVSR compreso tra 64 e 4,3 Hz si attesti su valori di H/V inferiori a 1 per effetto di una inversione delle Vs nel sito. È da considerare tuttavia che l'area d'indagine è stata interessata da lavorazioni che hanno coinvolto almeno i primi 1,0 – 1,5 m di materiale, con apporto di terreni di riporto. Tali lavorazioni hanno perciò causato un'inversione di velocità molto superficiale che non è stata considerata perciò nelle fasi di interpretazione.

7. INTERPRETAZIONE PROVA MASW

Il grafico risultante dalla misura consente lo studio e l'elaborazione dei dati relativi al primo modo di vibrare del terreno, individuato come la curva definita dai colori caldi con velocità e frequenza minore (Fig. 4 e 8). Nel grafico è possibile riconoscere gran parte della curva di dispersione fondamentale, con tratti ben visibili compresi 50 e 38 Hz e tra 32 e 5 Hz, frequenza alla quale la curva tende a Vs infinite, indicando il limite strumentale della misura.

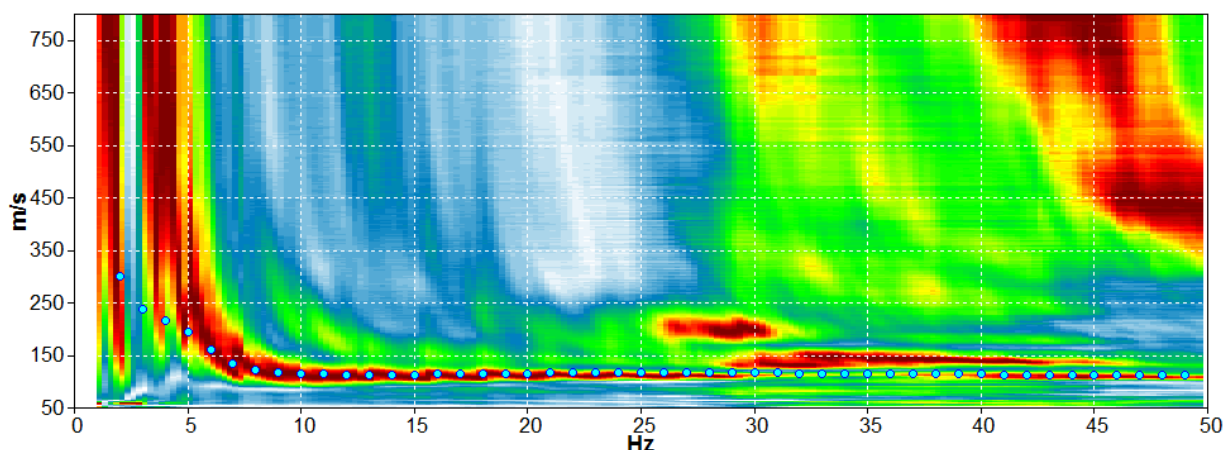


Fig. 8: Curva di dispersione del sito e fit per la costruzione del modello sintetico.

Dal grafico è possibile ricostruire la successione sismo-stratigrafica, individuando i cambi di pendenza della curva di dispersione del modo fondamentale. Il tratto iniziale della curva denota V_s di circa 110 m/s, che si mantengono costanti fino a circa 7 Hz. A tale frequenza la curva subisce un aumento di pendenza, riconducibile ad un passaggio litotecnico posto a -7,5 m, marcato anche dalle prove penetrometriche che registrano a tale profondità un aumento dei valori di q_c ed f_s . Procedendo in profondità si osserva un aumento costante dei valori di V_s fino a 5 Hz, dove la curva tende a V_s infinite, indicando il limite strumentale della misura. A tale frequenza il modello associa la superfici di un sismostrato a -18,0 m dal piano campagna.

8. INTERPRETAZIONE COMBINATA DELLE MISURE SISMICHE

Per ovviare alla limitata profondità di indagine della prova MASW si è proceduto con l'interpretazione della misura tomografica effettuata nello stesso ambito, utilizzando come vincolo il modello creato a partire dallo stendimento.

L'analisi combinata delle misure sismiche ha permesso di verificare come nel grafico HVSr la curva blu corrispondente al modello ricostruito individua tra 2,6 e 4 Hz un picco di risonanza ampio, costituito dagli effetti di amplificazione dei due sismostrati individuati.

Alle alte frequenze sono state inserite due unità sismiche, poste rispettivamente fino a -0,5 m e fino a -2,0 m, rappresentate dai terreni superficiali in parte rimaneggiati.

Il picco fondamentale e principale di risonanza del sito ha frequenza di 0,94 Hz, con valore massimo di H/V pari a 2,7. Tale marker è stato interpretato imponendo n°3 strati in quanto si osservano lievi flessioni della componente verticale anche a 1,6 Hz e a 0,65 Hz. Tali unità vengono interpretate dal modello come superfici di risonanza sismica rispettivamente a -50,0 m, -126,0 m e a -326,0 m dal p.c..

Al di sotto di tale frequenza non sono presenti altri effetti di risonanza ritenuti significativi.

L'elaborazione della misura, mediante ricostruzione della curva sintetica H/V, è riuscita a riprodurre con buona approssimazione la curva HVSr registrata, fornendo il profilo sismico del sito.

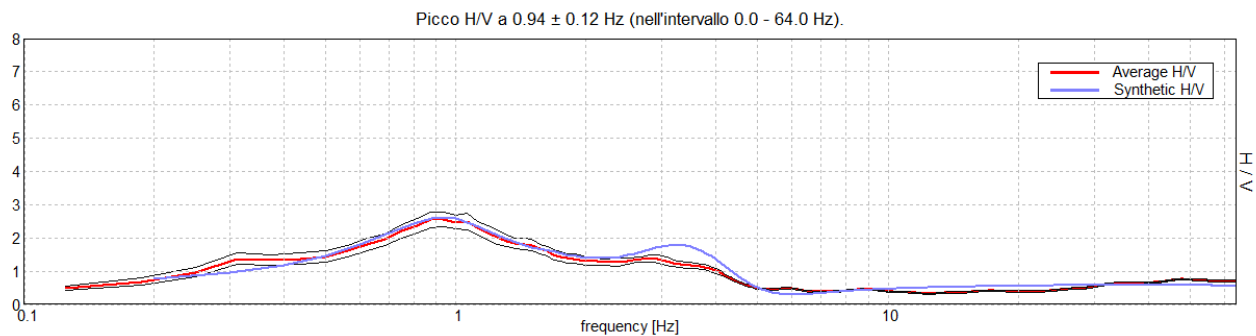
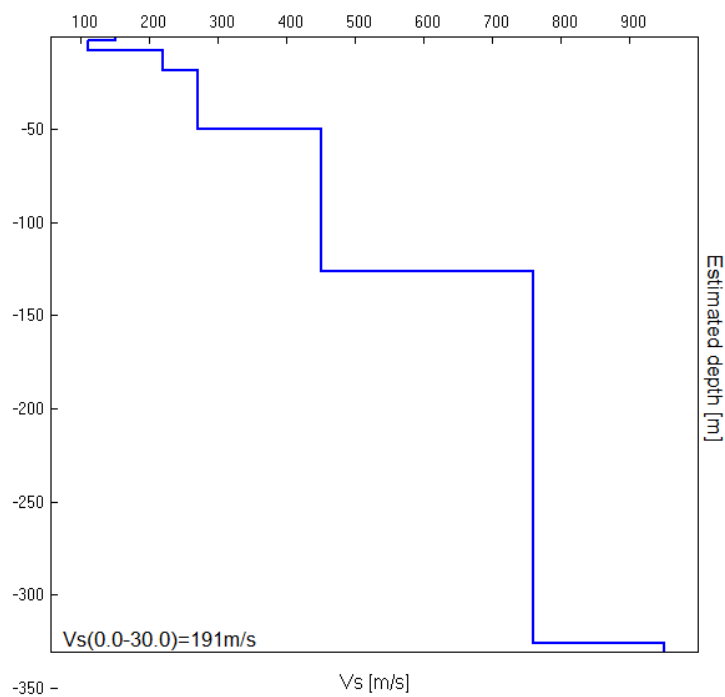


Fig. 9: Elaborazione della curva sintetica (blu) sulla curva HVSR (rosso) registrata.

Nella tabella e nel grafico seguenti vengono evidenziati gli strati sismici con le relative velocità delle onde S.

Strati sismici	Profondità [m]	Vs [m/s]
1	0 – 0.50	105
2	0.50 – 2.00	150
3	2.00 – 7.50	110
4	7.50 – 18.00	220
5	18.00 – 50.00	270
6	50.00 – 126.00	450
7	126.00 – 326.00	760
8	326.00 – inf.	950



9. RISPOSTA SISMICA LOCALE

Lo studio è stato svolto utilizzando il software Strata che permette una modellazione numerica 1D della propagazione dell'onda sismica a partire da segnali sismici di input. In particolare il software conduce un'analisi lineare equivalente di risposta del sito nel dominio delle frequenze, usando come input le sollecitazioni nel dominio del tempo (accelerogrammi).

La Regione Emilia Romagna per studi di risposta sismica locale, nell'ambito della microzonazione sismica con livello di approfondimento III, ha elaborato per ogni comune un set di tre accelerogrammi di riferimento. Tali accelerogrammi sono resi disponibili già scalati e definiti per uno spettro con vita nominale (V_n) pari a 50 anni e classe d'uso dell'opera II (con coefficiente d'uso del valore di 1,0). Essendo tali valori corrispondenti a quelli di riferimento per le strutture in oggetto (vedi tabella 4) questi segnali sono stati considerati compatibili.

Al fine di effettuare un'analisi statisticamente valida sono stati ricercati anche altri segnali spettro-compatibili per il sito. Tali accelerogrammi sono stati ricavati attraverso l'utilizzo del software Rexel¹, che consulta un data-base di terremoti registrati nazionali e mondiali, e seleziona accelerogrammi compatibili con gli spettri delle NTC08.

Perciò si è proceduto con il definire lo spettro di risposta elastico in accelerazione per il sito, facendo riferimento ai parametri progettuali definiti per l'opera (dati di input riportati nella tabella seguente). Inoltre è stato necessario eseguire uno studio sulla pericolosità e sulla storia sismica dell'area, che permettesse di individuare le caratteristiche in magnitudo e distanza epicentrale di un possibile sisma atteso per l'area. La ricerca è stata condotta nella banca dati European Strong-motion Data-base², tenendo conto dei dati di input riportati nella seguente tabella.

	Long.	Lat.
Coordinate [°]	11.2943	44.7287
Categoria sottosuolo	C	
Categoria topografica	T1	
Vita nominale - V_n [anni]	50	
Coefficiente d'uso - C_u	1,0	
Stato limite	SLV	
	minimo	massimo
Magnitudo	5.5	6.5
Distanza epicentrale [km]	5	25

Tabella 4: Dati di input per software Rexel.

¹ Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E.

REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis.
Bulletin of Earthquake Engineering, 8:339-362, 2010; DOI 10.1007/s10518-009-9146-1

² Ambraseys, N., Smit, P., Sigbjornsson, R., Suhadolc, P. and Margaris, B.

Internet-Site for European Strong-Motion Data,
 European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme (2002); <http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/ESD/>

Sono stati quindi individuati 7 segnali sismici spettro-compatibili con il sito ai quali è stato associato un fattore di scala per poterli ricondurre al valore di PGA di interesse, corrispondente a 0,157 g, che deriva dalla curva definita dalle NTC08, considerando i parametri di riferimento utilizzati per la progettazione dell'opera (tabella 4). Nell'immagine che segue è riportato lo spettro di normativa di riferimento (target spectrum), con il limite inferiore e superiore (Lower e Upper Tolerance) per la ricerca dei sismi "spettro-compatibili" all'interno dell'intervallo di 0,15 s e 2,0 s (Range of Period), gli spettri dei sismi individuati, con i relativi fattori di scala (SF – scale factor), e il loro spettro medio (Average Spectrum).

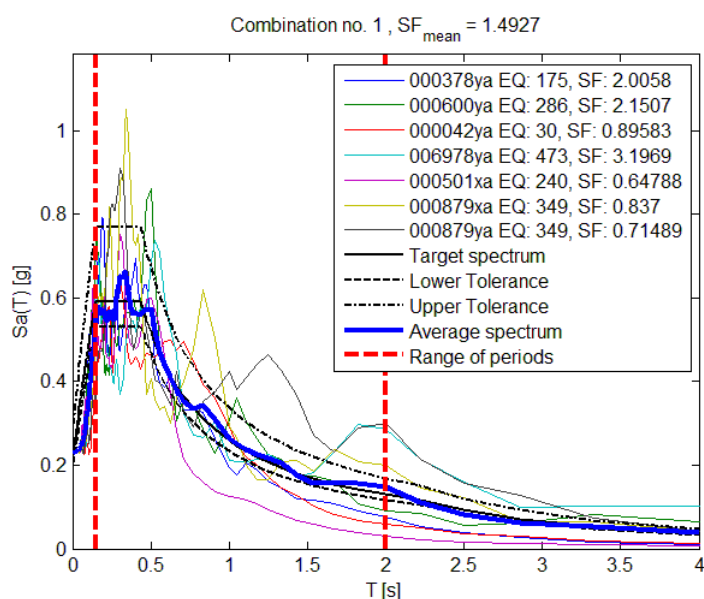


Fig. 10: Spettri dei 7 sismi di riferimento individuati e rispettivi fattori di scala.

Da questo set di accelerogrammi sono stati selezionati quelli che mostravano un valore di fattore di scala inferiore, corrispondenti a segnali molto simili in termini energetici a quelli attesi per il sito (000042ya, 000501xa, 000879xa e 000879ya). Questi accelerogrammi sono stati aggiunti al set di tre accelerogrammi di riferimento elaborato per ogni comune dalla Regione Emilia Romagna.

Di seguito sono riportati i 7 accelerogrammi non scalati utilizzati per l'analisi numerica.

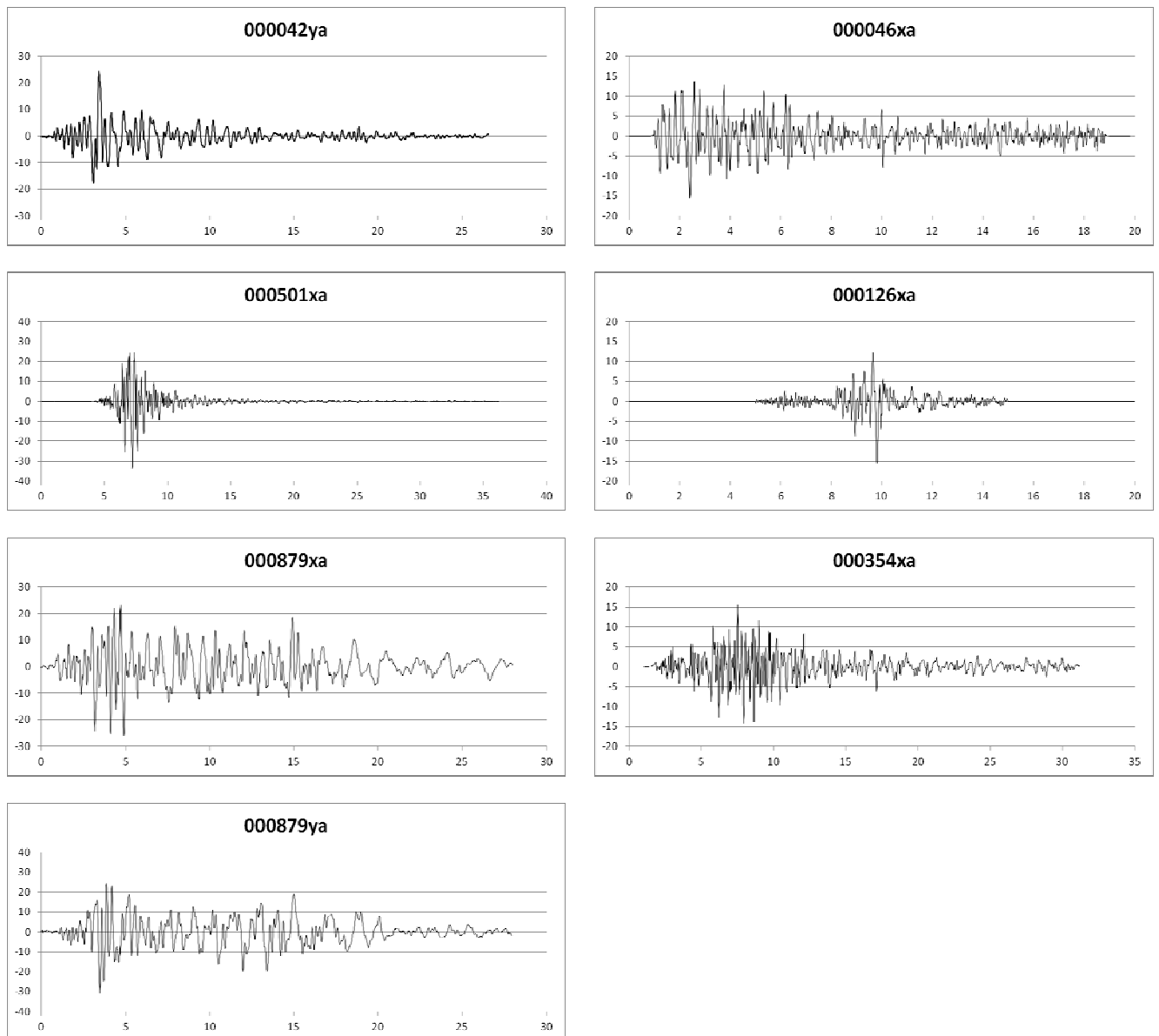


Fig. 11: Accelerogrammi non scalati dei 7 sismi di riferimento.

Una volta definiti i segnali di input, opportunamente scalati, è stato inserito il modello fisico-meccanico e sismico del sottosuolo (1-D) fino alla profondità del bedrock sismico. A tal fine, utilizzando i dati ottenuti dalle indagini compiute nel sito, è possibile definire nel programma le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali di riferimento per la ricostruzione del profilo del sito. In particolare sono associati a ciascuna litologia il peso di volume del materiale e le curve di degrado (G/G_{max} in funzione dello sforzo di taglio [%]) e di smorzamento (Damping Ratio [%] in funzione dello sforzo di taglio [%]). I valori utilizzati per il sito derivano da apposite curve riportate in bibliografia (Seed e Idriss 1970 e Idriss 1990 per le argille e per le sabbie – vedi fig. 12). Al bedrock sismico (ultimo strato del profilo sismico) viene riferito un valore di smorzamento pari a 1,0%.

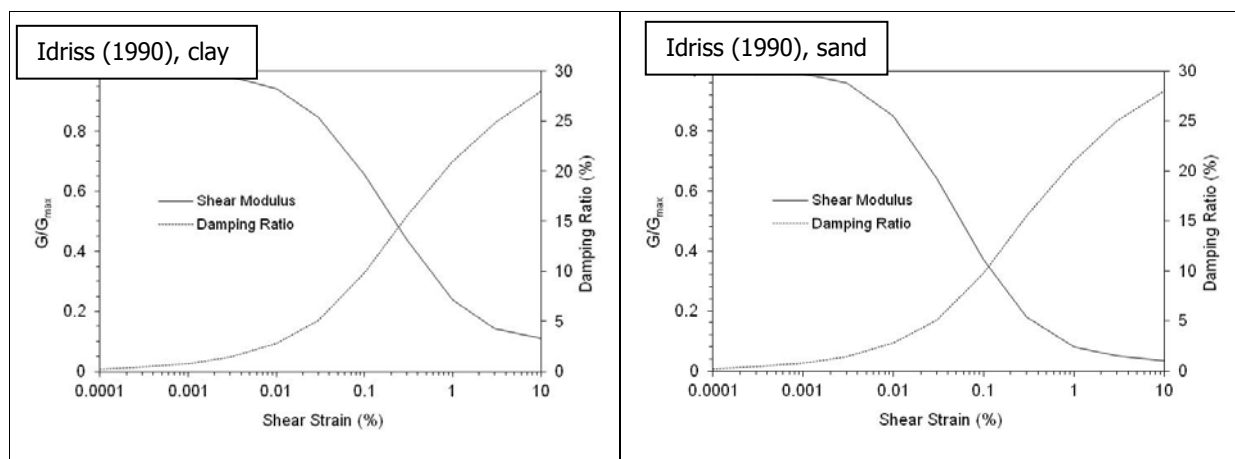


Fig. 12: Grafici delle curve di degrado e di smorzamento dei materiali presenti nel sito.

I parametri che caratterizzano i materiali sono stati attribuiti agli strati definiti nel profilo sismico, così come ricavato dall'indagine geofisica. Di seguito viene riportato il modello di sottosuolo utilizzato per il sito.

Strati sismici	Profondità [m]	Vs [m/s]	Materiali	Peso unità di volume [kN/m ³]	Curva di degrado	Curva di smorzamento
1	0 – 0.50	105	Terreno di riporto	18,50	Idriss (1990), sand	Idriss (1990), sand
2	0.50 – 2.00	150	Terreno di riporto	18,50	Idriss (1990), sand	Idriss (1990), sand
3	2.00 – 7.50	110	Argille poco consistenti	18,00	Idriss (1990), clay	Idriss (1990), clay
4	7.50 – 18.00	220	Argille consistenti	18,50	Idriss (1990), clay	Idriss (1990), clay
5	18.00 – 50.00	270	Sabbie	18,50	Idriss (1990), sand	Idriss (1990), sand
6	50.00 – 126.00	450	Depositi quaternari	19,00	Idriss (1990), clay	Idriss (1990), clay
7	126.00 – 326.00	760	Depositi quaternari	19,00	Idriss (1990), clay	Idriss (1990), clay
8	326.00 – inf.	950	Bedrock sismico	22,0	-	1,0%

Tabella 5: Modello sismo-stratigrafico del sito.

9.1 FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

Nella figura 13 è riportata la funzione di trasferimento per ogni segnale ed il valore medio nel campo delle frequenze che corrisponde al rapporto tra lo spettro del moto sismico atteso in superficie e lo spettro della sollecitazione in corrispondenza del bedrock sismico.

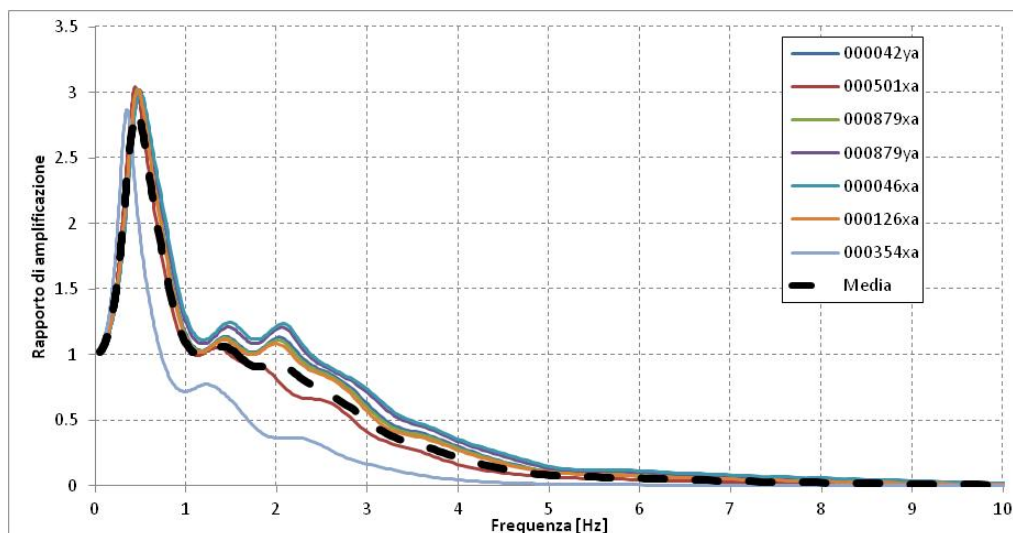


Fig. 13: Funzione di trasferimento (rapporto tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock).

9.2 SPETTRO DI RISPOSTA DEL SITO

Nella figura 14 sono riportati gli spettri di risposta in accelerazione relativi ai 7 sismi, così come ottenuti dall'elaborazione numerica.

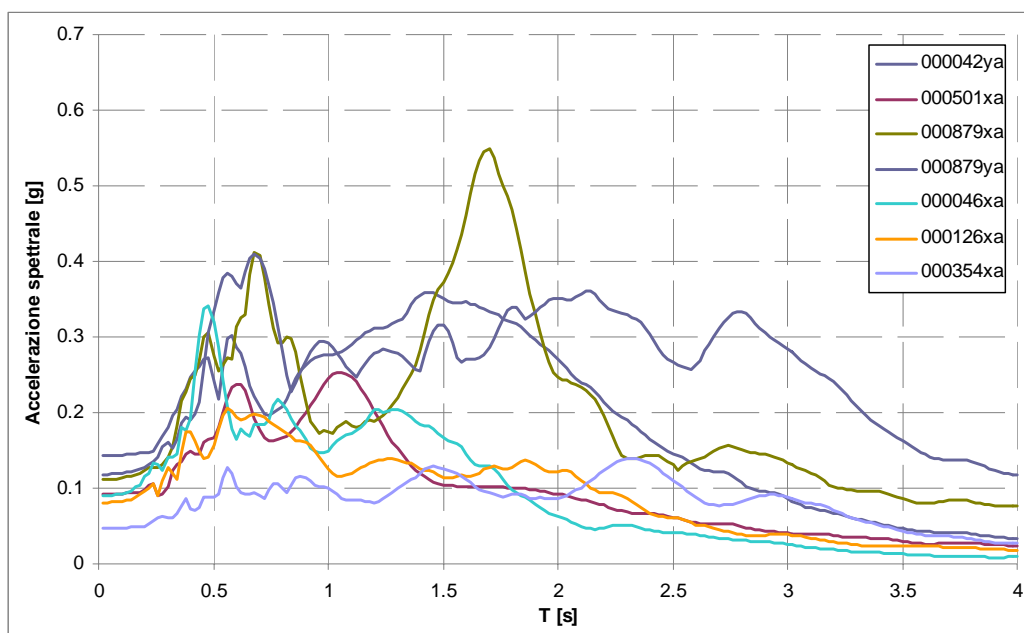


Fig. 14: Spettri di risposta calcolati a partire dai 7 sismi di riferimento.

Alla luce di quanto emerso dall'elaborazione numerica dei 7 sismi, si ritiene che la curva dei valori medi costituisca una buona rappresentazione della curva di risposta sismica locale attesa per il sito.

Nella tabella 6 vengono riportate le coordinate numeriche dello spettro di risposta medio ottenuto.

T	Media	T	Media	T	Media	T	Media	T	Media
0.02	0.092502	0.82	0.190508	1.62	0.186722	2.42	0.107336	3.22	0.057392
0.04	0.092709	0.84	0.190938	1.64	0.186115	2.44	0.104872	3.24	0.055872
0.06	0.093054	0.86	0.193204	1.66	0.186205	2.46	0.10236	3.26	0.054381
0.08	0.093545	0.88	0.193583	1.68	0.187563	2.48	0.09992	3.28	0.052972
0.1	0.094186	0.9	0.190161	1.7	0.188334	2.5	0.097672	3.3	0.051674
0.12	0.095208	0.92	0.18628	1.72	0.187425	2.52	0.095543	3.32	0.050495
0.14	0.096128	0.94	0.184114	1.74	0.184759	2.54	0.094423	3.34	0.049652
0.16	0.098448	0.96	0.182741	1.76	0.181935	2.56	0.092857	3.36	0.048932
0.18	0.10005	0.98	0.182391	1.78	0.180537	2.58	0.090832	3.38	0.04823
0.2	0.103376	1	0.181286	1.8	0.179079	2.6	0.08924	3.4	0.047489
0.22	0.107224	1.02	0.18026	1.82	0.177071	2.62	0.088257	3.42	0.046663
0.24	0.111493	1.04	0.180323	1.84	0.174004	2.64	0.087677	3.44	0.045732
0.26	0.109234	1.06	0.178795	1.86	0.169927	2.66	0.087201	3.46	0.044706
0.28	0.115689	1.08	0.178964	1.88	0.165549	2.68	0.086986	3.48	0.04362
0.3	0.124323	1.1	0.178182	1.9	0.161382	2.7	0.086924	3.5	0.042528
0.32	0.128547	1.12	0.178636	1.92	0.157327	2.72	0.086633	3.52	0.041484
0.34	0.136025	1.14	0.180609	1.94	0.153635	2.74	0.085998	3.54	0.040536
0.36	0.157571	1.16	0.182716	1.96	0.15045	2.76	0.085012	3.56	0.03972
0.38	0.168957	1.18	0.184519	1.98	0.14794	2.78	0.083775	3.58	0.039059
0.4	0.170283	1.2	0.184996	2	0.146162	2.8	0.08246	3.6	0.038555
0.42	0.176892	1.22	0.185137	2.02	0.145003	2.82	0.081241	3.62	0.038201
0.44	0.184409	1.24	0.185362	2.04	0.143998	2.84	0.080246	3.64	0.03797
0.46	0.202161	1.26	0.185929	2.06	0.142227	2.86	0.079525	3.66	0.037824
0.48	0.209636	1.28	0.187113	2.08	0.13993	2.88	0.079095	3.68	0.037721
0.5	0.206873	1.3	0.187965	2.1	0.137686	2.9	0.078767	3.7	0.037667
0.52	0.207754	1.32	0.188207	2.12	0.135847	2.92	0.078332	3.72	0.03755
0.54	0.223756	1.34	0.188518	2.14	0.134327	2.94	0.077633	3.74	0.037331
0.56	0.232959	1.36	0.188667	2.16	0.13284	2.96	0.07659	3.76	0.036989
0.58	0.227007	1.38	0.187853	2.18	0.131257	2.98	0.075227	3.78	0.036527
0.6	0.220749	1.4	0.18855	2.2	0.129691	3	0.073638	3.8	0.035966
0.62	0.220055	1.42	0.192372	2.22	0.128241	3.02	0.071945	3.82	0.035337
0.64	0.217931	1.44	0.196118	2.24	0.126744	3.04	0.070252	3.84	0.034676
0.66	0.21826	1.46	0.197726	2.26	0.124823	3.06	0.068631	3.86	0.034014
0.68	0.219869	1.48	0.196541	2.28	0.122174	3.08	0.067108	3.88	0.033377
0.7	0.213144	1.5	0.193969	2.3	0.120178	3.1	0.065723	3.9	0.032783
0.72	0.204455	1.52	0.191869	2.32	0.118415	3.12	0.064484	3.92	0.032271
0.74	0.203312	1.54	0.190959	2.34	0.116233	3.14	0.063202	3.94	0.032013
0.76	0.203291	1.56	0.189714	2.36	0.113925	3.16	0.061823	3.96	0.031849
0.78	0.19989	1.58	0.188814	2.38	0.111602	3.18	0.060327	3.98	0.031758
0.8	0.194886	1.6	0.188074	2.4	0.109604	3.2	0.058877	4	0.031725

Tabella 6: Coordinate della curva dei valori medi degli spettri di risposta calcolati.

Nella figura 15 si riporta lo spettro di risposta di riferimento per il sito, confrontato con lo spettro di normativa relativo ad un sottosuolo di categoria C, con V_n di 50 anni e C_u pari a 1,0.

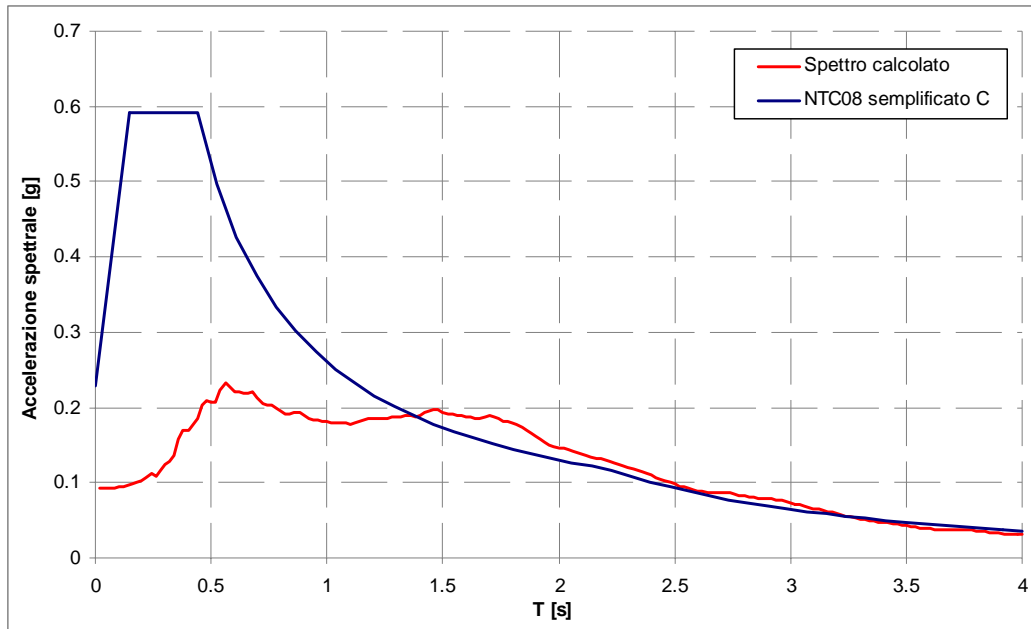


Fig. 15: Confronto tra lo spettro di normativa e lo spettro di risposta calcolato.

Il grafico di confronto evidenzia chiaramente come lo spettro di normativa da procedura semplificata risulti, nell'intervallo significativo per le strutture in oggetto, decisamente a favore di sicurezza.



Dott. Saul Beghelli – GEOLOGO

Bologna, 18 dicembre 2014.

.....

ALLEGATO D

Verifica a liquefazione e cedimenti post-sismici

.....

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

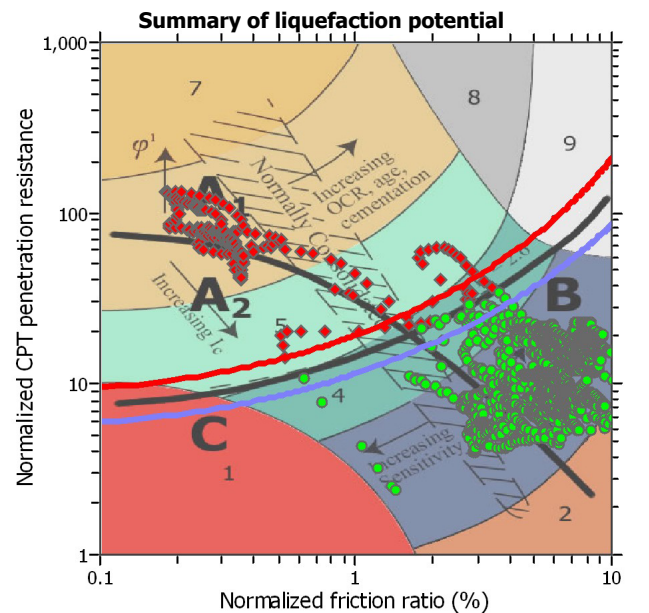
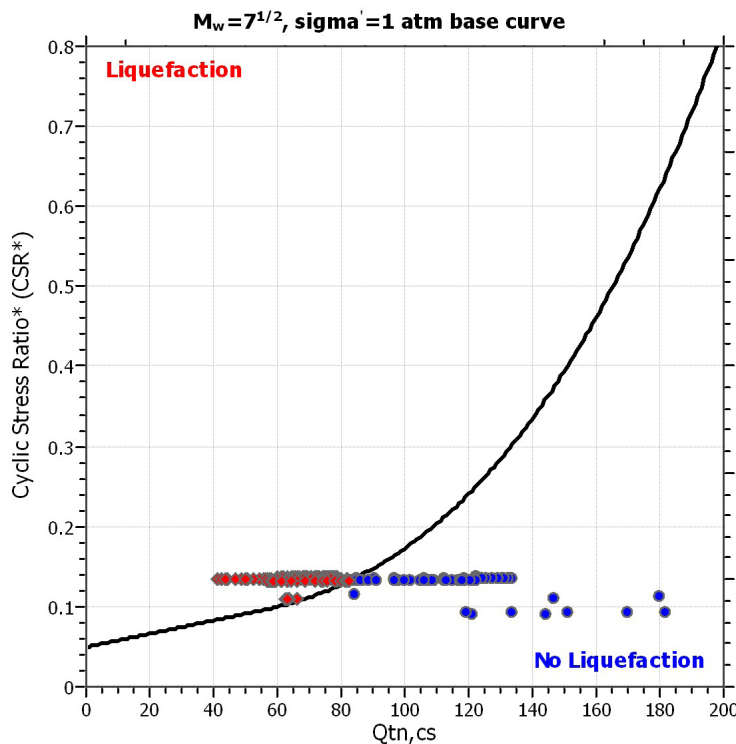
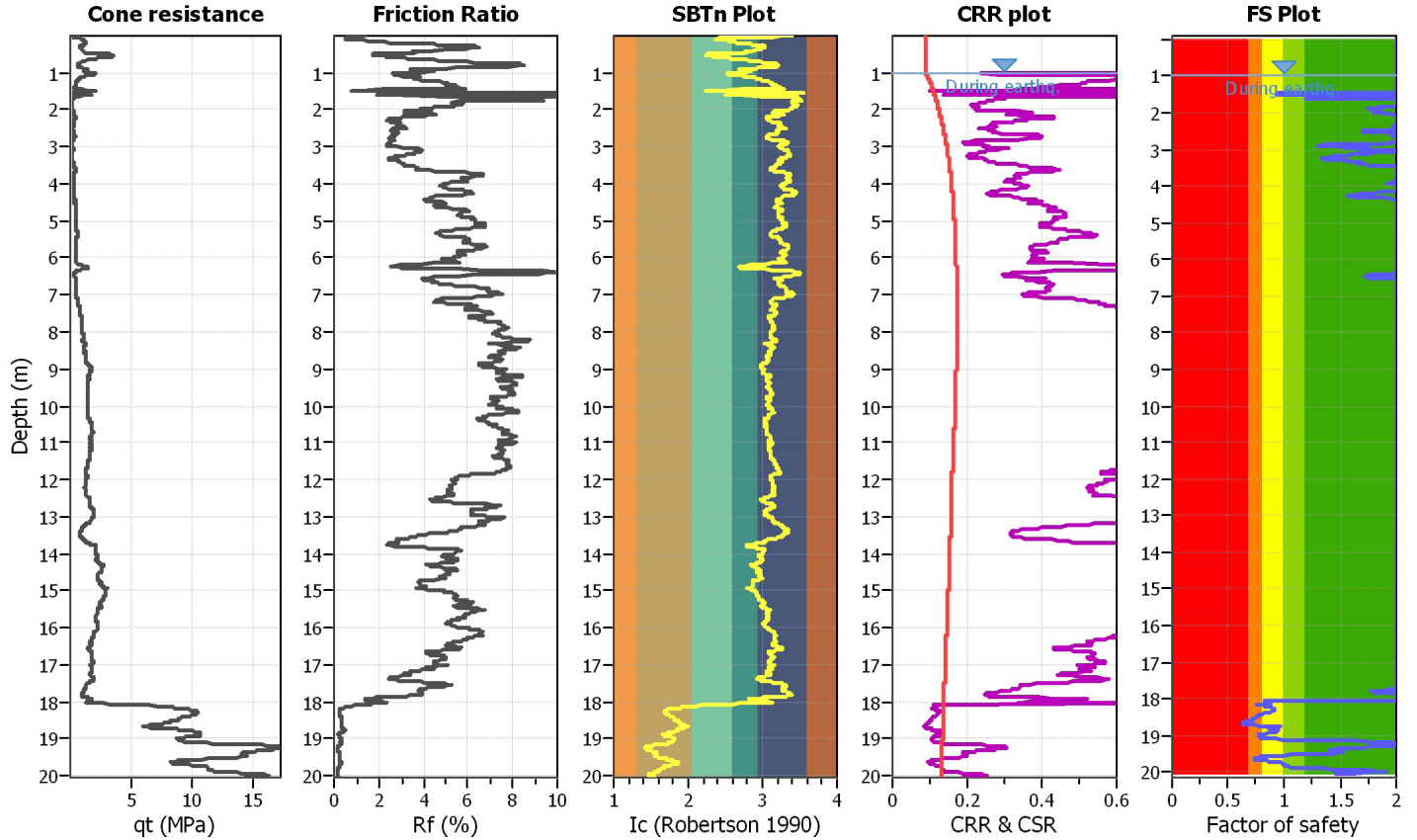
Project title : Piano di Ricostruzione - Comune di Cento

Location : Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT file : CPTU1

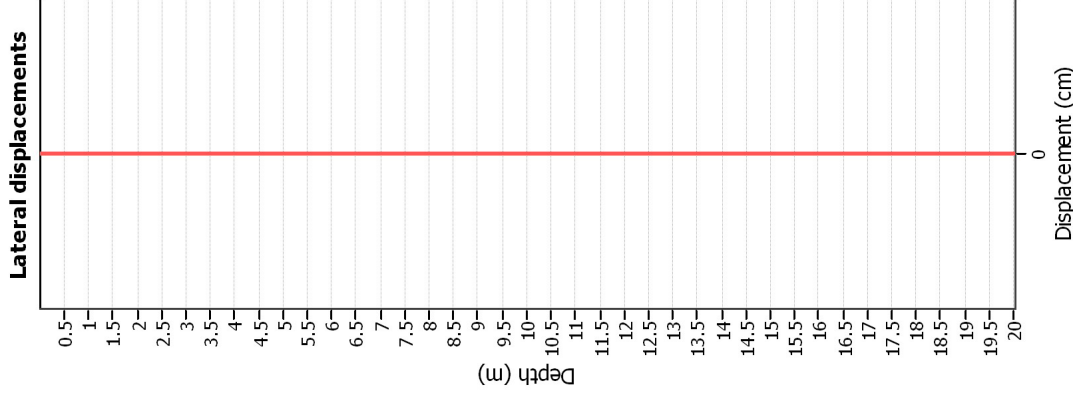
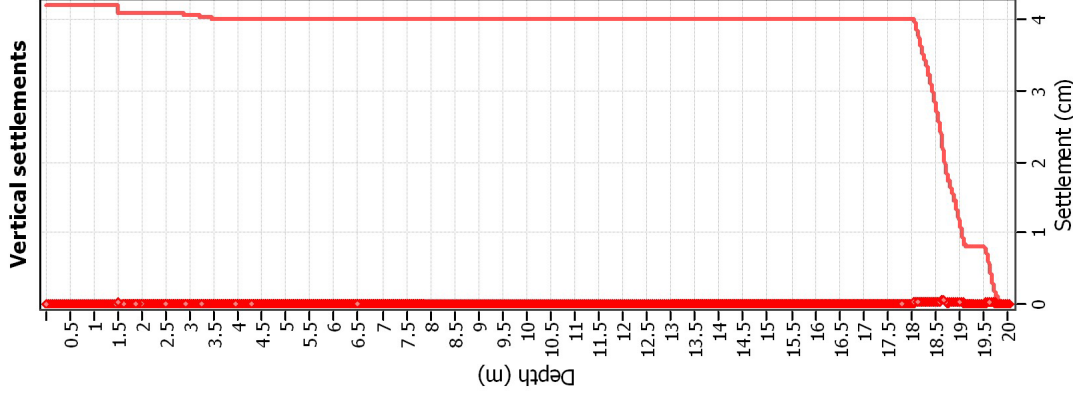
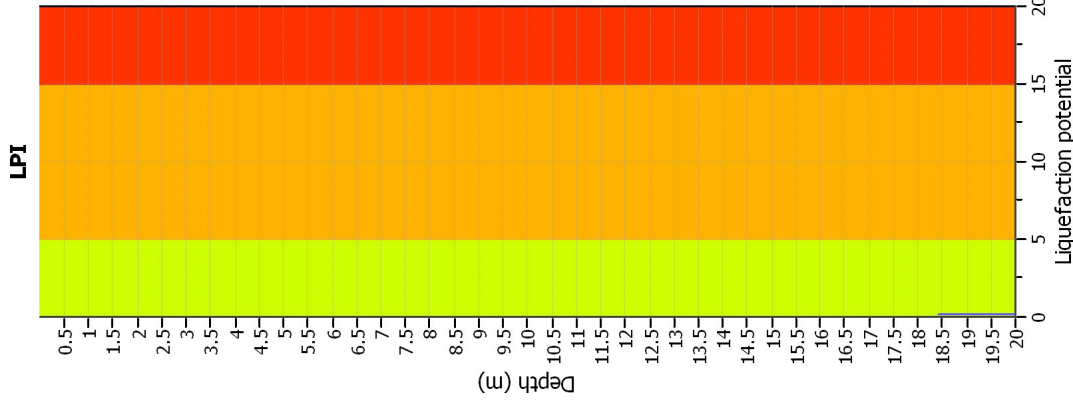
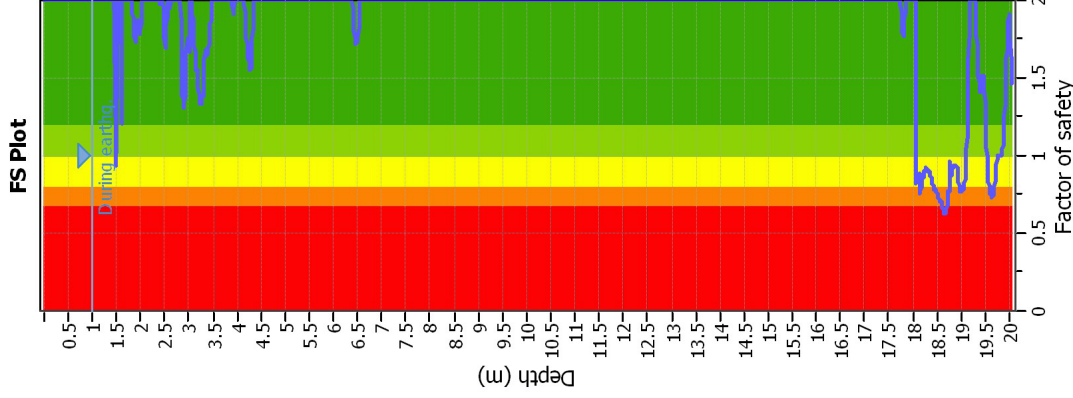
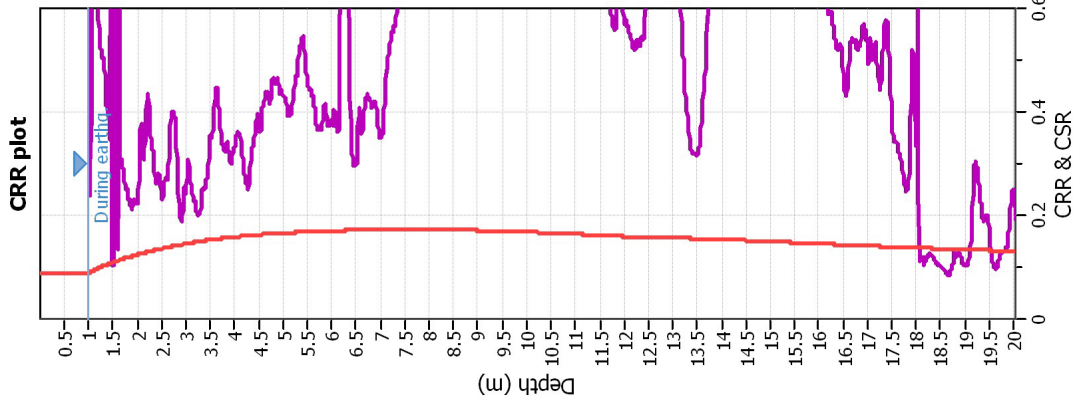
Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	N/A
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes		



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: Robertson (2009)
 Fines correction method: Robertson (2009)
 Points to test: Based on Ic value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 1.00 m

Depth to water table (earthq.): 1.00 m
 Average results interval: 3
 Ic cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_G applied: Yes
 Clay like behavior applied: All soils
 Limit depth applied: No
 Limit depth: N/A

F.S. color scheme

- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlikely to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

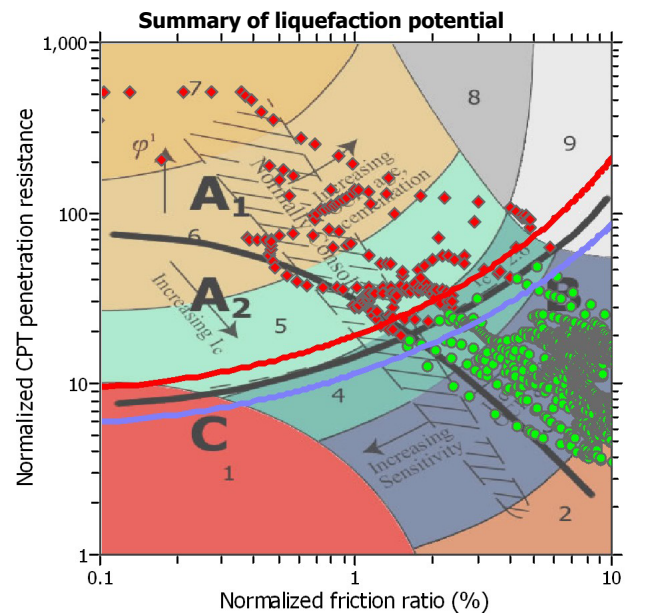
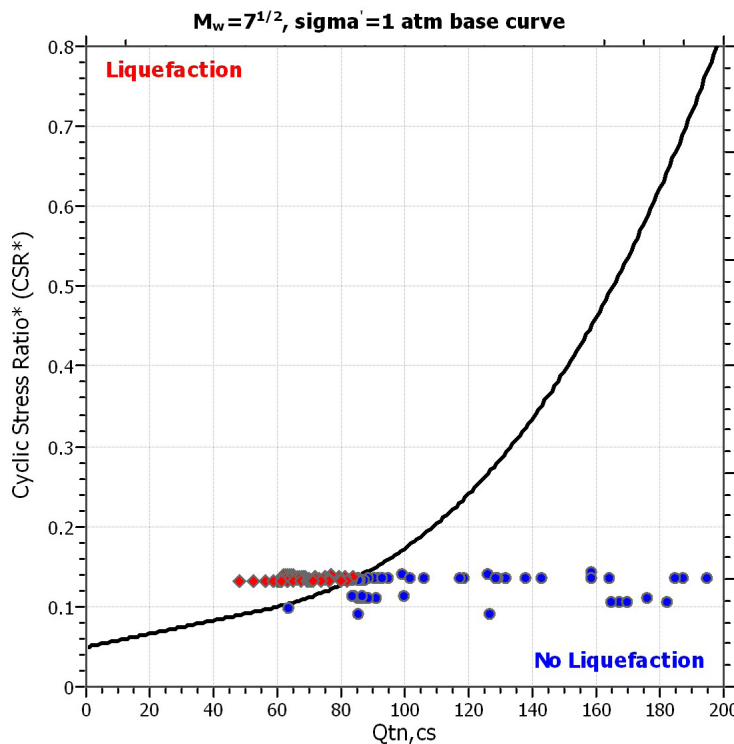
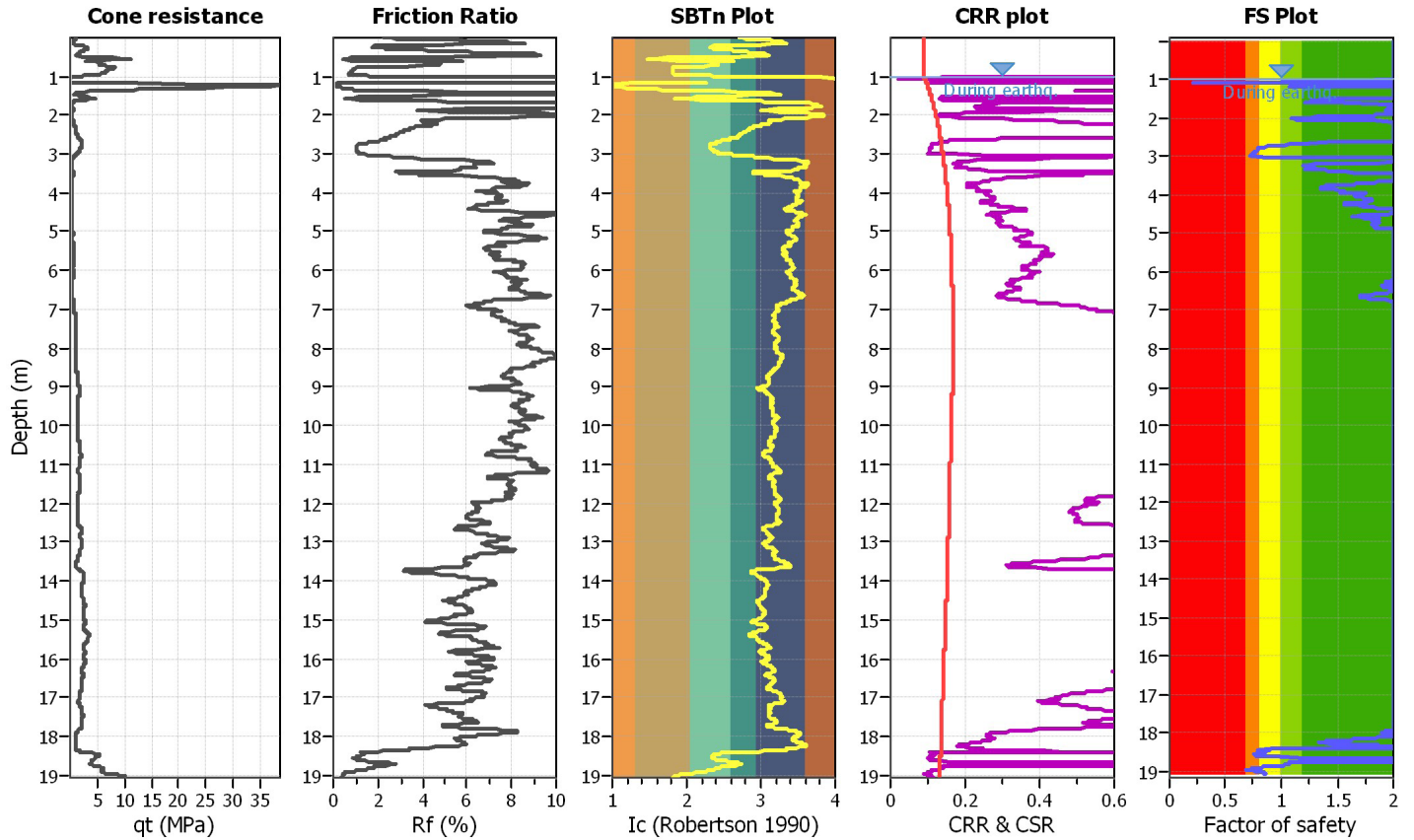
Project title : Piano di Ricostruzione - Comune di Cento

Location : Viale Falzoni Gallerani n°10

CPT file : CPTU2

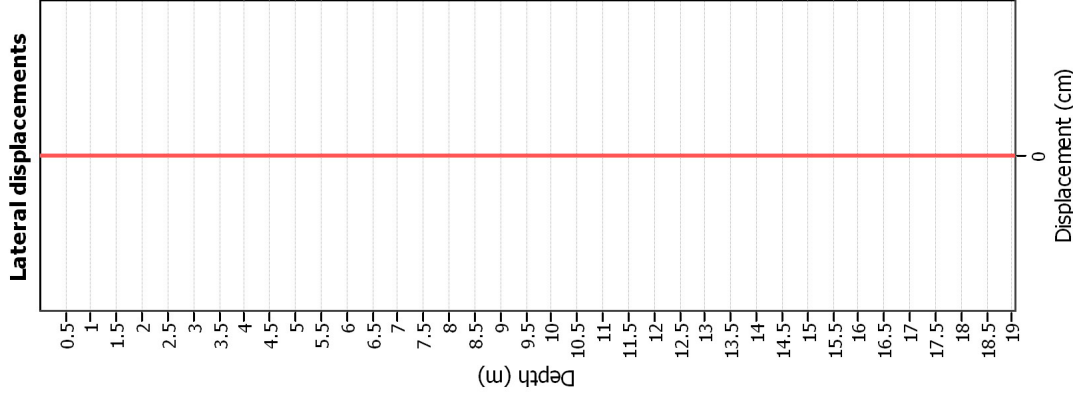
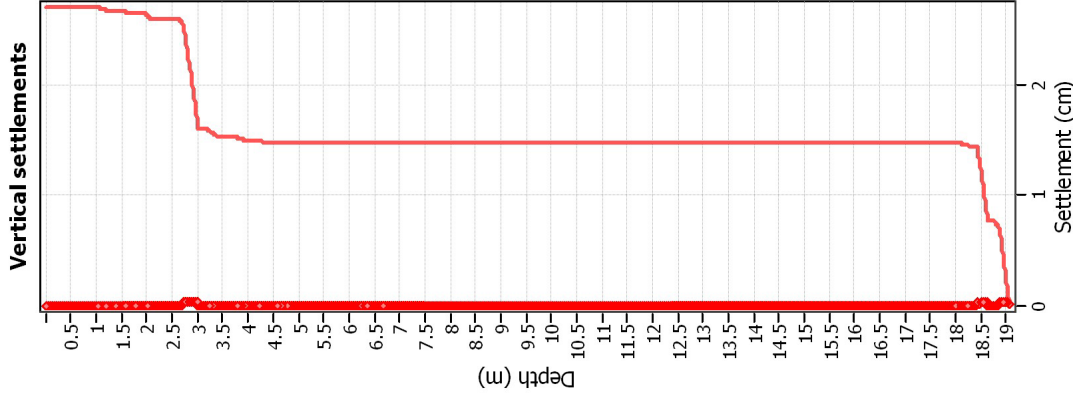
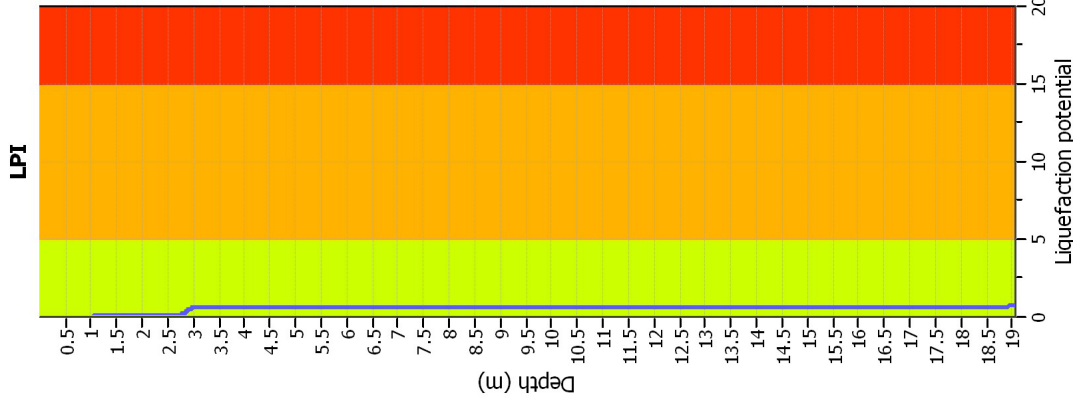
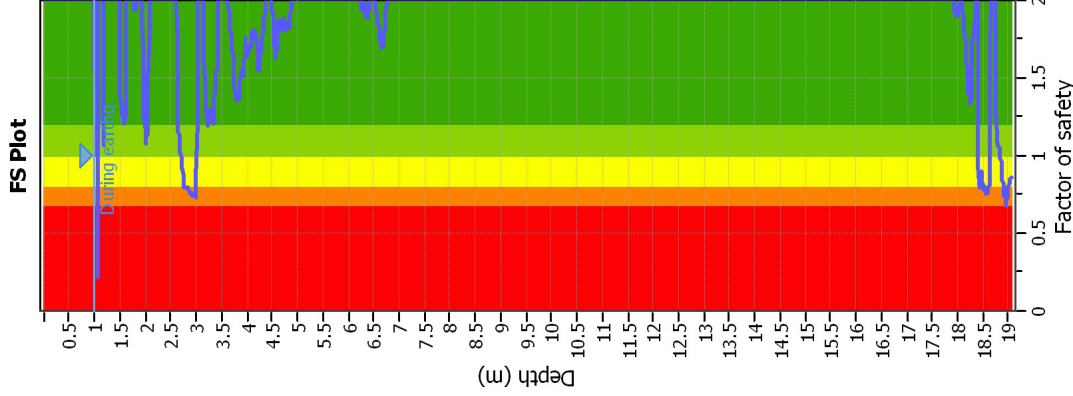
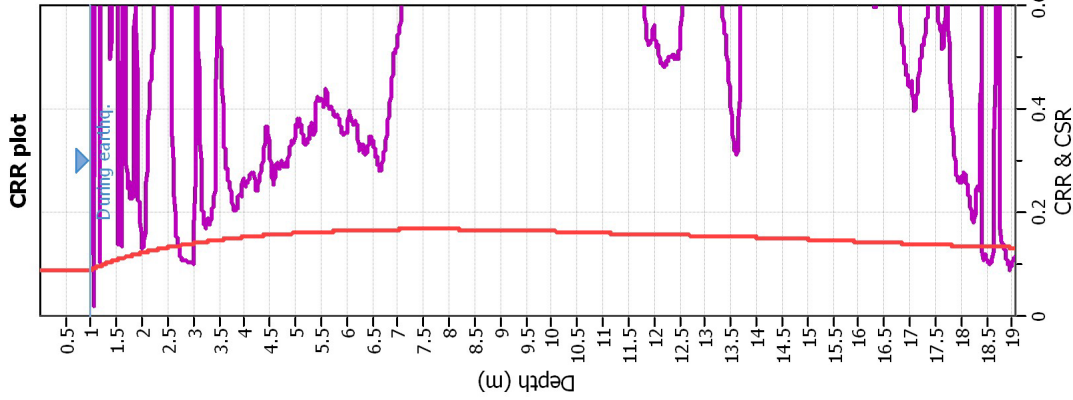
Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	1.00 m	Use fill:	No	Clay like behavior applied:	All soils
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	1.00 m	Fill height:	N/A	Limit depth applied:	No
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth:	N/A
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	No	MSF method:	Method based
Peak ground acceleration:	0.23	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	Yes		



Zone A₁: Cyclic liquefaction likely depending on size and duration of cyclic loading
 Zone A₂: Cyclic liquefaction and strength loss likely depending on loading and ground geometry
 Zone B: Liquefaction and post-earthquake strength loss unlikely, check cyclic softening
 Zone C: Cyclic liquefaction and strength loss possible depending on soil plasticity, brittleness/sensitivity, strain to peak undrained strength and ground geometry

Liquefaction analysis overall plots



Input parameters and analysis data

Analysis method: Robertson (2009)
 Fines correction method: Robertson (2009)
 Points to test: Based on I_c value
 Earthquake magnitude M_w : 6.14
 Peak ground acceleration: 0.23
 Depth to water table (insitu): 1.00 m

Depth to water table (earthq.): 1.00 m
 Average results interval: 3
 I_c cut-off value: 2.60
 Unit weight calculation: Based on SBT
 Use fill: No
 Fill height: N/A

Fill weight: N/A
 Transition detect. applied: No
 K_G applied: Yes
 Clay like behavior applied: All soils
 Limit depth applied: No
 Limit depth: N/A

F.S. color scheme

- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlikely to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk