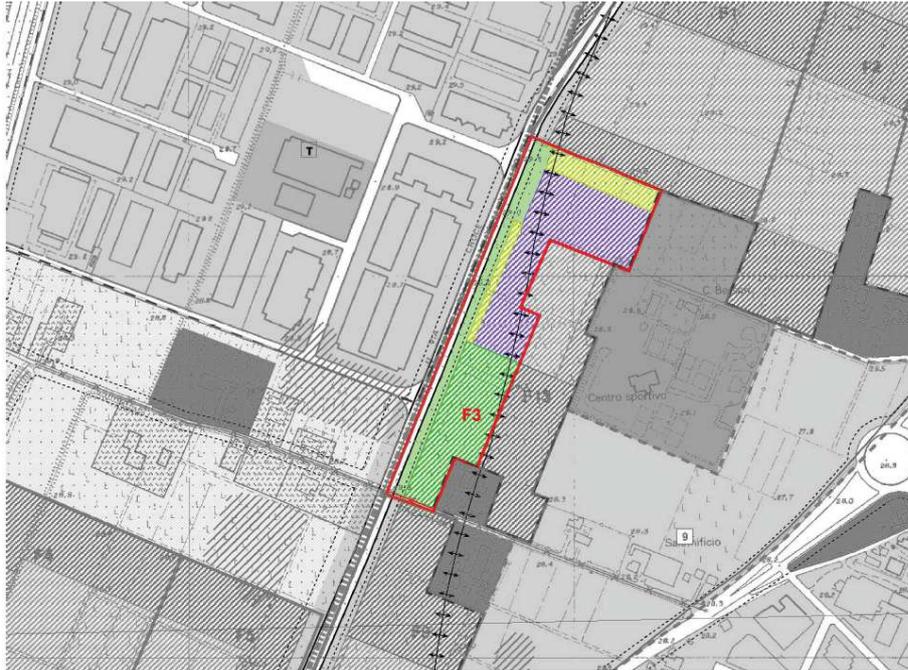


COMUNE DI CARPI

Piano Particolareggiato Area Commerciale Via dell'Industria – F3 GRANDE STRUTTURA UNITARIA



MODELLAZIONE GEOLOGICA E SISMICA DELL'AREA

27 Maggio 2016

IL TECNICO

Dott. Geol. Paolo Pallante



PROPRIETÀ

Sig.ra Annovi Brunella

Sig.ra Rustichelli Alessandra

Sig. Rustichelli Enrico

SOGET Srl

Dott. Rocca Mauro

Modellazione geologica e sismica dell'area

Indice

Indice	2
Premessa	4
Inquadramento topografico	5
Inquadramento catastale	5
Descrizione dell'intervento previsto	5
Analisi dei vincoli presenti sull'area	7
P.T.C.P. della Provincia di Modena	7
PRG Comune di Carpi	9
Realizzazione delle indagini geologiche e geofisiche	10
Modellazione sismica	12
Classificazione sismica	12
Sorgenti sismogenetiche	14
Esecuzione di misure sismiche	15
<i>Classificazione del suolo di fondazione (MASW)</i>	15
<i>Misure passive a stazione singola (HVSR)</i>	16
<i>Modello sismico del sottosuolo</i>	16
Pericolosità sismica di base	17
<i>Pericolosità sismica di sito</i>	18
Valutazione dei fattori di amplificazione sismica	23
Microzonazione Sismica del Comune di Carpi	23
Calcolo della risposta sismica locale	25
Modellazione Geologica	29
Inquadramento geologico e geomorfologico	29
Litologia di superficie	31
Pedologia	32
Idrografia di superficie	33
Idrogeologia	33
Piezometria	35
Idrochimica	36
Vulnerabilità dell'acquifero	39
Caratterizzazione del primo sottosuolo	40
<i>Ricostruzione litostratigrafica e modello geologico del sottosuolo</i>	40
<i>Omogeneità e coerenza delle prove CPT</i>	41

Modellazione geologica e sismica dell'area

Prove penetrometriche _____	43
<i>Elaborazione dei dati</i> _____	43
<i>Valori caratteristici e valori di progetto</i> _____	48
<i>Valutazione delle caratteristiche dell'area</i> _____	52
Analisi del rischio liquefazione _____	53
Cedimenti post-sismici _____	62
Pericolosità geologica e problematiche geologico-tecniche _____	64
Conclusioni _____	65

ALLEGATI

- *Allegato 1. Inquadramento dell'area, scala 1:25.000*
- *Allegato 2. Inquadramento dell'area, scala 1:5.000*
- *Allegato 3. Inquadramento catastale, scala 1:2.000*
- *Allegato 4. Estratto dal PRG vigente*
- *Allegato 5. Ubicazione delle prove effettuate*
- *Allegato 6. Estratto della carta di microzonazione sismica del Comune di Carpi, Tavola 2 - livello 2° - FA PGA*
- *Allegato 7. Estratto della carta di microzonazione sismica del Comune di Carpi, Tavola 2 - Carta delle frequenze naturali dei terreni*
- *Allegato 8. Estratto della carta di microzonazione sismica del Comune di Carpi, Tavola B - Indice del potenziale di liquefazione*

- *Diagrammi prove penetrometriche statiche CPT1, CPT2, CPT3, CPTU*
- *relazione sismica*

Piano Particolareggiato Area Commerciale Via dell'Industria - F3 Comune di Carpi (MO) - GRANDE STRUTTURA UNITARIA

MODELLAZIONE GEOLOGICA E SISMICA DELL'AREA

Premessa

Su incarico dello Studio di Architettura degli Architetti Franco e Lorenzo Lipparini e della Proprietà, Sig.ra Annovi Brunella, Sig.ra Rustichelli Alessandra, Sig. Rustichelli Enrico, SOGET S.r.l. e Dott. Rocca Mauro è stata redatta la seguente relazione tecnica relativa alla modellazione geologica e sismica di un'area ubicata in Via dell'Industria, in angolo con Via Zappiano, nella zona industriale del Comune di Carpi (MO).

Scopo del presente studio è quello di valutare la fattibilità geologica del progetto d'intervento urbanistico sull'area, relativamente al presente Piano Particolareggiato di Iniziativa Privata "zona F3" Il P.P. è ubicato all'interno di una Zona di Trasformazione Tipo F (art. 61 NTA PRG 2000 del Comune di Carpi, aggiornamento 2015 – Zone di trasformazione direzionali - commerciali), e prevede la realizzazione di alcuni edifici da adibire a centri commerciale/direzionale, gallerie e uffici.

L'area era precedentemente adibita ad uso agricolo, e in parte coltivata fino al 2015.

Nell'ambito della presente relazione vengono fornite indicazioni sulla geologia, idrologia e idrogeologia relative all'area in oggetto e di un intorno significativo.

Vengono presi in considerazione gli aspetti inerenti i vincoli presenti nell'area, gli scenari di pericolosità geologica e sulla base dei dati disponibili, ricavati sia da prove geognostiche che geotecniche e di letteratura, viene definito il modello geologico del sottosuolo relativamente all'ambito di intervento. In base alla misurazione di rumore sismico ambientale, alle prove geognostiche ed ai dati presenti in letteratura viene effettuata la modellazione sismica, valutando gli effetti di sito presenti ai sensi della recente normativa sismica nazionale e regionale ed in conformità al PTCP della Provincia di Modena.

Tale studio è stato effettuato nello spirito ed ai sensi delle seguenti circolari, Leggi, Deliberazioni, Decreti ed opere di pianificazione territoriale:

- L.R. n. 20 del 24/03/00 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio" e ss.mm.e ii, con particolare riferimento all'Artt. 31 e 35 (PUA)
- L.R. n. 19 del 30/10/08 "Norme per la riduzione del rischio sismico"
- L.R. n. 6 del 06/07/09
- Indicazioni illustrative delle innovazioni in materia di governo del territorio introdotte dai Titoli I e II della L.R. n. 6 del 2009.
- Delibera della Giunta RER n. 1677 del 24/10/2005 – All. B,
- DPR 328/01
- Ordinanza del PCM n. 3274/2003 "Primi elementi in materia di criteri per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica",
- O.P.C.M. 3519/06,
- Delibera dell'Assemblea legislativa progr. n°112 - oggetto n°3121 del 2 maggio 2007 della Regione Emilia Romagna contenente l'Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1,

Modellazione geologica e sismica dell'area

della L. R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" e relativi allegati

- D.M. 14.01.2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008)
- Circolare n° 617 del 02.02.2009 del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.Min. 14 gennaio 2008
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici "Pericolosità sismica e criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale" Allegato al voto 36 del 27.07.2007
- P.T.P.R. vigente;
- P.A.I. vigente
- P.T.C.P. vigente (P.T.C.P.2009)
- P.R.G. vigente

Inquadramento topografico

L'area è ubicata in via dell'Industria, nella zona ovest di Carpi, ad una distanza di circa 650 metri in linea d'aria dall'autostrada A22 Modena-Brennero (ubicata a ovest dell'area, con percorso N-S) e di circa 500 m in linea d'aria dalla tangenziale Bruno Losi (a est dell'area, con percorso NO-SE). L'area confina a nord con il centro commerciale/ipermercato Borgo Gioioso, a est con terreni agricoli e con il Club Sporting (attrezzature e impianti sportivi, ristorante, parco), a sud con via Zappiano, a ovest con via dell'Industria.

L'area del P.P. è situata nella media pianura modenese, ad una quota media di circa 28.5 m dal p.c. Per questo motivo, la zona è assimilabile alla categoria topografica T1 e

il valore del coefficiente di amplificazione topografica $S_T = 1.0$

Nella cartografia della Regione Emilia Romagna l'area è individuabile nelle seguenti carte:

1:25.000	Tavoletta 201 NE "Carpi" (Allegato 1)
1:10.000	Sezione 201130 "Carpi"
1:5.000	Elemento 201034 "Carpi Ovest" (Allegato 2)

L'ubicazione dell'area è riportata cartograficamente sia alla scala 1:25.000 (Allegato 1) che a quella 1:5.000 (Allegato 2).

Inquadramento catastale

Dal punto di vista catastale, l'area del Piano Particolareggiato è individuata nel Foglio 134 del Comune di Carpi (Allegato 3), mappali 1, 5, 10, 123, 124, 125

Descrizione dell'intervento previsto

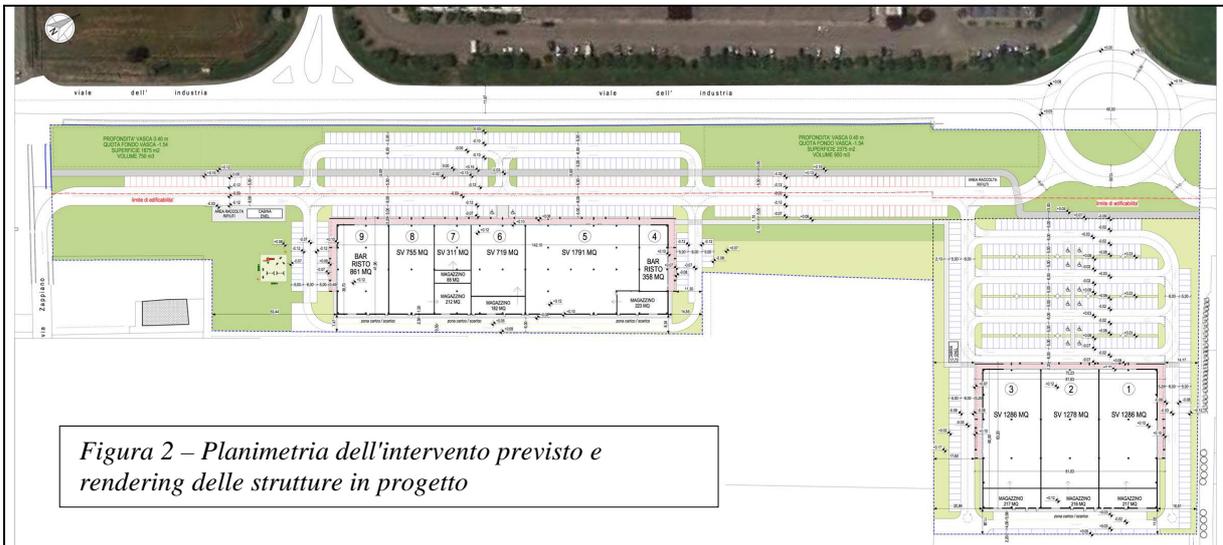
Il Piano Particolareggiato Area Commerciale è relativo ad un'area ubicata in Via dell'Industria e compresa tra il centro commerciale Borgogioioso e Via Zappiano, in Comune di Carpi (MO).

Nel P.P. è prevista la realizzazione di due edifici da adibire a centro commerciale e direzionale (figure 1 e 2). La superficie dell'area di intervento è pari complessivamente a circa 50.000 mq. Allo stato attuale non sono previsti piani o garages interrati.

Modellazione geologica e sismica dell'area



Figura 1 – In giallo l'individuazione dell'area in oggetto – situazione attuale (da Google Earth)



Analisi dei vincoli presenti sull'area

P.T.C.P. della Provincia di Modena

Con riferimento agli strumenti della pianificazione territoriale della Provincia di Modena, in particolare al PTCP 2009, l'area in oggetto presenta le seguenti caratteristiche:

Carte delle tutele

- Tavola 1.1.1 *"Tutela delle risorse paesistiche e storico – culturali"*
 - L'area è interessata da Paleodossi di modesta rilevanza (Art. 23A, comma 2, lettera c). Il PTCP per i paleodossi in lettera c (modesta rilevanza) demanda agli strumenti di pianificazione comunali eventuali prescrizioni. Il PRG del Comune di Carpi, Art. 69 punto 69.05, indica prescrizioni specifiche per i paleodossi di cui alle lettere a e b;
 - Tutta l'area in oggetto rientra nelle Zone di tutela degli elementi della centuriazione Art 41B comma 2 lettera a;
 - Le due strade adiacenti all'area, Viale dell'Industria e Via Zappiano, sono identificate come viabilità storica Art. 44A, mentre Viale dell'Industria viene inoltre identificata come Elemento della centuriazione Art. 41B comma 2 lettera b;
- Tavola 1.2.1 *"Tutela delle risorse naturali, forestali e della biodiversità del territorio"*
 - L'area è classificata come Ambiti agricoli periurbani di rilievo provinciale (art. 72)
 - "connettivo ecologico diffuso:

Nelle carte delle tutele non si rilevano vincoli ostativi all'intervento, che risulta compatibile con le NTA del PTCP.

Carte delle sicurezze del territorio

- Tavola 2.2 a.1 *"Rischio sismico: carta delle aree suscettibili di effetti locali"*

"Area potenzialmente soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche e a potenziale liquefazione" in cui occorre procedere alla valutazione del coefficiente di amplificazione litologico, del potenziale di liquefazione e dei cedimenti attesi. Microzonazione sismica approfondimenti di III livello.

- Tavola 2.3.1 *"Rischio idraulico: carta della pericolosità e della criticità idraulica"*

L'area è compresa all'interno del "Limite delle aree soggette a criticità idraulica (Art.11)". In particolare, l'area è classificata rientrante nella "Fascia di espansione inondabili Art. 9 comma 2 lettera a". La norma (Art. 11) prevede, in questo caso:

comma 7. (I) Nella Carta 2.3 "Rischio idraulico: carta della pericolosità e della criticità idraulica" del presente Piano viene rappresentato il limite delle aree soggette a criticità idraulica, per il quale la riduzione delle condizioni di rischio generate da eventi a bassa probabilità di inondazione e l'obiettivo di garantire un grado di sicurezza accettabile alla popolazione è affidato alla predisposizione di programmi di prevenzione e protezione civile ai sensi della L. 225/1992 e s.m.i.. Tali programmi e i piani di emergenza per la difesa della popolazione e del territorio investono anche i territori di cui agli articoli 9,

Modellazione geologica e sismica dell'area

10 del presente Piano.

comma 8. (D) Nei territori che ricadono all'interno del limite delle aree soggette a criticità idraulica, di cui al comma 7, il Comune nell'ambito della elaborazione del PSC dispone l'adozione di misure volte alla prevenzione del rischio idraulico ed alla corretta gestione del ciclo idrico. In particolare sulla base di un bilancio relativo alla sostenibilità delle trasformazioni urbanistiche e infrastrutturali sul sistema idrico esistente, entro ambiti territoriali definiti dal piano, il Comune prevede:

- per i nuovi insediamenti e le infrastrutture - l'applicazione del principio di invarianza idraulica (o udometrica) attraverso la realizzazione di un volume di invaso atto alla laminazione delle piene ed idonei dispositivi di limitazione delle portate in uscita o l'adozione di soluzioni alternative di pari efficacia per il raggiungimento delle finalità sopra richiamate;

Nelle vicinanze non sono presenti nodi di criticità idraulica.

Nelle carte della sicurezza del territorio non sono quindi presenti vincoli ostativi all'intervento, che risulta compatibile con le NTA del PTCP.

Carte di vulnerabilità ambientale

- Tavola 3.1.1 "Rischio inquinamento acque: vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero principale"

Nell'area per l'acquifero è indicato un Grado di vulnerabilità: Basso (B)

- L'area di P.P. non rientra nell'area cartografata dalla Tavola 3.2.1 "Rischio inquinamento acque: Zone di protezione delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano".
- Tavola 3.6.1 "Rischio elettromagnetico: limitazioni territoriali alla localizzazione di nuovi siti per l'emittenza radiotelevisiva". La zona si trova all'interno di un'area classificata come "Classe B" in cui viene posta una soglia di attenzione alle localizzazioni;

Nelle carte della vulnerabilità ambientale del territorio non sono quindi presenti vincoli ostativi all'intervento, che risulta compatibile con le NTA del PTCP.

Assetto strutturale

- Tavola 4.1 "Assetto strutturale del sistema insediativo e del territorio rurale: in questa tavola l'area in oggetto è classificata come "Ambiti produttivi di espansione", all'interno di "Ambiti specializzati per attività produttive di rilievo sovracomunale";

In conclusione della verifica del progetto con le previsioni del PTCP della Provincia di Modena non si ravvisano impedimenti o vincoli che ne impediscano la fattibilità.

Nell'analisi della vincolistica presente sull'area in oggetto non sono emersi elementi ostativi all'intervento in progetto.

Modellazione geologica e sismica dell'area

PRG Comune di Carpi

Destinazione urbanistica

All'interno del PRG 2000 del Comune di Carpi, aggiornato con D.D.le 589 del 29/08/2015, nella cartografia PS2 l'area di P.P. è individuata nella Tavola PS8 – Macroclassificazione del territorio come TPU – territorio in corso di urbanizzazione – Produttivo, e nella Tavola PS2-18 (Allegato 4) come F3 - Zona di trasformazione Tipo F direzionale – commerciale (art. 61)

Zonizzazione sismica

Nella Microzonazione sismica comunale (Variante in adeguamento al 1° stralcio del Piano della Ricostruzione) vengono fornite una serie di informazioni relative alle caratteristiche dei terreni dell'area. Le misure effettuate sono coerenti con quelle riportate negli elaborati cartografici della Microzonazione comunale PS15/MS.

Un confronto più dettagliato con la microzonazione sismica comunale viene riportato all'interno del capitolo relativo alla modellazione sismica dell'area.

Archeologia

All'interno dell'area di Piano Particolareggiato non sono presenti aree sottoposte a vincolo archeologico

Nelle altre tavole di PRG non sono presenti vincoli per l'area in oggetto.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Realizzazione delle indagini geologiche e geofisiche

Per indagare la natura del primo sottosuolo, e determinare le caratteristiche geotecniche dei terreni presenti sono state realizzate n° 4 prove penetrometriche statiche, di cui 3 con punta meccanica (CPT ovvero Cone Penetration Test), spinte fino alla profondità di 20.2 m dal p.c. (foto 1) e una con punta elettrica e piezocono (CPTU), spinta alla profondità di 25.4 m dal p.c. (foto 2)

Le caratteristiche della macchina utilizzata sono state riportate in allegato.

Per l'elaborazione delle prove penetrometriche (CPT) è stato utilizzato il software Static Probing della GeoStru Software.

Per determinare la categoria di sottosuolo e conoscere la velocità delle onde sismiche nei primi 30 m di profondità in data 03.11.2015 sono state realizzate:

- un'acquisizione di sismica attiva con metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves);
- un'acquisizione in sismica passiva in onde di superficie con array bidimensionale tipo ESAC (Extended Spatial Autocorrelation) (le cui misure sono state elaborate e interpretate congiuntamente a quelle dell'acquisizione attiva)

utilizzando un sismografo digitale Dolang, modello DBS280, a 24 canali, dotato di cavi di 60 metri e di geofoni da 4,5 Hz, per una lunghezza complessiva di 34.5 m di stendimento (1.5 m di distanza intergeofonica). Come sistema di energizzazione è stata utilizzata una mazza da 10 Kg battente su piastra.

In aggiunta, sono state eseguite 2 acquisizioni di sismica passiva (micrortemori) a stazione singola (HVSr - *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) È stato utilizzato un sismografo a tre canali, munito di terna triassiale di geofoni caratterizzati da frequenza di taglio di 4,5 Hz, modello Geobox della ditta Sara Electronics Instruments di Perugia.

L'ubicazione delle prove effettuate è stata riportata nell'Allegato 5, in cui risultano:

- l'area oggetto del presente Piano Particolareggiato (foto Google Earth di settembre 2014)
- l'ubicazione delle 3 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT) effettuate in data 13.11.2015 (in rosso)
- l'ubicazione della prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono (CPTU) effettuata in data 13.11.2015 (in arancione)
- l'ubicazione dello stendimento MASW (linea verde), dell'array ESAC (in verde tratteggiato) e delle misure di rumore sismico ambientale (HVSr, in azzurro chiaro), effettuati in data 14.11.2015.

Modellazione geologica e sismica dell'area



Foto 1 - realizzazione della prova penetrometrica con punta meccanica CPT1



Foto 2 - realizzazione della prova penetrometrica con punta elettrica CPTU

Modellazione geologica e sismica dell'area

Modellazione sismica

Classificazione sismica

La classificazione sismica del territorio nazionale (Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003) prevede che tutto il territorio nazionale sia classificato sismico, con diversi gradi di pericolosità.

In Emilia-Romagna, con l'applicazione della **classificazione sismica**, attualmente 105 comuni sono classificati in zona 2 (praticamente tutta la Romagna, il settore orientale della Provincia di Bologna, il comprensorio delle ceramiche modenese-reggiano, alcuni comuni del crinale tosco-emiliano delle Province di Modena, Reggio Emilia e Parma), 214 comuni in zona 3 e i rimanenti 22 comuni in zona 4 (tutti in pianura: l'estremità nord-occidentale delle Province di Piacenza, alcuni comuni in prossimità del Po, nelle Province di Piacenza, Reggio Emilia e Ferrara, e la zona del delta del Po).

Nel DM 14.09.2005 ("Norme Tecniche per le Costruzioni" - prima versione), poi sostituito dal D.M. 14.01.2008 vigente "Norme Tecniche per le Costruzioni" le norme tecniche includono tra le referenze tecniche essenziali anche l'Ordinanza n. 3274/2003 e s.m.i e diventa obbligatoria la progettazione antisismica per tutto il territorio nazionale, facendo riferimento alle zone sismiche di cui alla OPCM 3274/2003.

Secondo la classificazione vigente, il territorio del comune di Carpi ricade in **Zona 3**.

Ai fini dell'applicazione di queste norme, il territorio nazionale è stato suddiviso in quattro zone sismiche, a ciascuna delle quali è assegnato un intervallo di valori dell'accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g), con probabilità di superamento del 10% in 50 anni; in particolare, per la determinazione delle azioni sismiche, risulta assegnato un valore (a_g / g), di ancoraggio dello spettro di risposta elastico, diverso per ogni zona sismica.

I valori di a_g , espressi come frazione dell'accelerazione di gravità g , da adottare in ciascuna delle zone sismiche del territorio nazionale sono:

Zona	Valore di a_g
1	0,35g
2	0,25g
3	0,15g
4	0,05g

Dal momento che il Carpi ricade in zona 3, **$a_g = 0.15 g$**

I terreni presenti nell'area di indagine devono essere quindi classificati sulla base di V_{s30} (velocità media di propagazione entro i primi 30 m di profondità delle onde di taglio) o altrimenti sulla base della c_u , per i terreni prevalentemente coesivi.

In base a questi parametri sono state distinte diverse categorie di suolo di fondazione con velocità decrescenti, dalla A (velocità maggiori 800 m/s, tipiche di un substrato rigido) fino alla D (< 180 m/s), e alcune categorie particolari (E, S1, S2).

I terremoti storici che hanno colpito i comuni più "sismici" dell'Emilia-Romagna hanno prodotto danni dell'VIII-IX grado della scala MCS, con Magnitudo stimata compresa tra 5,5 e 6 della scala Richter.

Tra gli eventi storici (documentati) di maggiore intensità e vicinanza agli epicentri della zona oggetto degli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 vi è il terremoto di Ferrara del 1570. Questo terremoto, la cui magnitudo è stata stimata in 5,5 Richter, è stato un evento sismico localizzato nel ducato di Ferrara sviluppatosi tra il 16 e il 17 novembre 1570. Lo sciame sismico si protrasse sino al 1574 ed è

Modellazione geologica e sismica dell'area

stato ipotizzato come si siano verificate circa duemila scosse, concentrate per la maggior parte nei primi tre mesi dal sisma. Il terremoto ha causato il primo episodio documentato di liquefazione del suolo nella Pianura padana, ha portato alla costituzione di un osservatorio dei terremoti, e alla stesura di alcune delle prime note di progetti di costruzione di strutture antisismiche su basi scientifiche.

Nel corso dei terremoti di maggiore intensità ($M > 4$ Richter) avvenuti nel maggio 2012 (tabella e figura 4) la magnitudo per i due eventi principali riportata dall'INGV è risultata pari a 5,9 Richter (20 maggio) e 5,8 Richter (29 maggio). La zona di Piano Particolareggiato è situata a 18 km dall'epicentro del sisma $M=5.8$ del 29.05.2012 e a 30 km dall'epicentro del sisma $M=5.9$ del 20.05.2012.

Tempo Origine (UTC)	Latit.	Longit.	Profondità km	Magnitudo	Tempo Origine (UTC)	Latit.	Longit.	Profondità km	Magnitudo
19/05/2012 23.13	44.898	11.258	6.2	4.1	25/05/2012 13.14	44.883	11.108	10	4
20/05/2012 2.03	44.889	11.228	6.3	5.9	27/05/2012 18.18	44.882	11.158	4.7	4
20/05/2012 2.06	44.886	11.189	7.7	4.8	29/05/2012 7.00	44.851	11.086	10.2	5.8
20/05/2012 2.07	44.863	11.37	5	5.1	29/05/2012 7.07	44.854	10.992	10	4
20/05/2012 2.11	44.84	11.367	7.8	4.3	29/05/2012 7.09	44.926	11.036	10.4	4.1
20/05/2012 2.12	44.823	11.218	20.4	4.3	29/05/2012 8.25	44.901	10.943	3.2	4.5
20/05/2012 2.21	44.892	11.155	5	4.1	29/05/2012 8.27	44.854	11.106	10	4.7
20/05/2012 2.25	44.871	11.348	10	4	29/05/2012 8.40	44.892	10.962	5.3	4.2
20/05/2012 2.35	44.876	11.548	10	4	29/05/2012 9.30	44.892	11.053	1.2	4.2
20/05/2012 2.39	44.894	11.261	5.2	4	29/05/2012 10.55	44.888	11.008	6.8	5.3
20/05/2012 3.02	44.86	11.095	10	4.9	29/05/2012 11.00	44.879	10.947	5.4	5.2
20/05/2012 9.13	44.879	11.241	3.1	4.2	29/05/2012 11.00	44.873	10.95	11	4.9
20/05/2012 13.18	44.831	11.49	4.7	5.1	29/05/2012 11.07	44.876	11.076	15	4
20/05/2012 13.21	44.882	11.383	2.4	4.1	31/05/2012 14.58	44.88	10.867	5.8	4
20/05/2012 17.37	44.876	11.382	3.2	4.5	31/05/2012 19.04	44.891	10.98	8.7	4.2
21/05/2012 16.37	44.851	11.348	10.4	4.1	03/06/2012 19.20	44.899	10.943	9.2	5.1
23/05/2012 21.41	44.868	11.251	4.8	4.3	12/06/2012 1.48	44.88	10.888	10.8	4.3

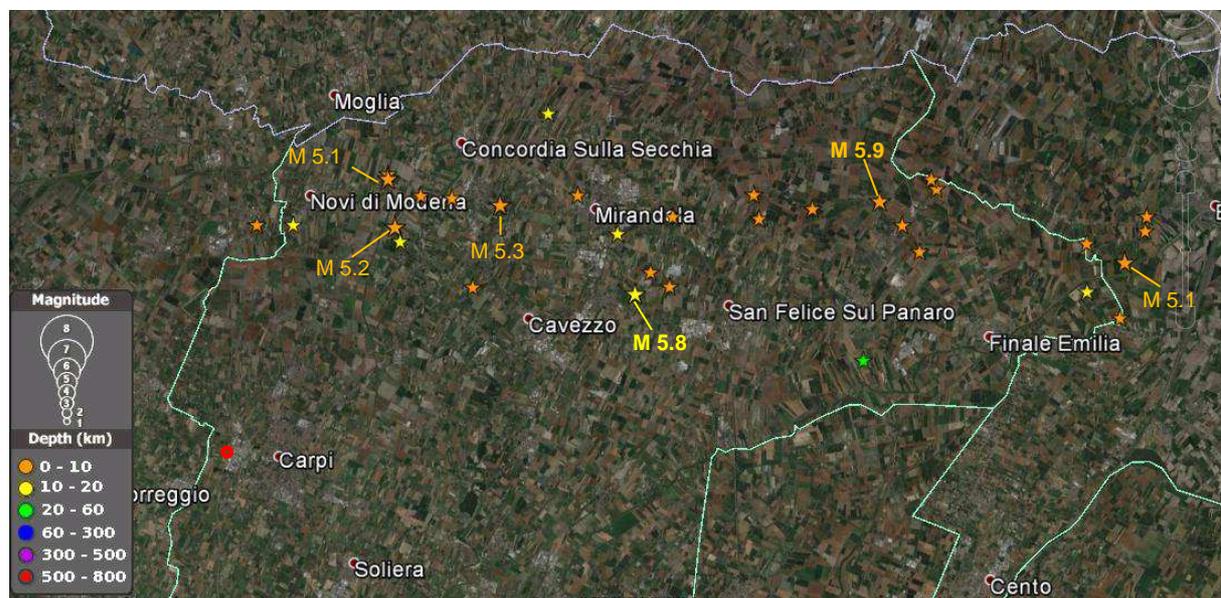


Figura 3 - Ubicazione della zona soggetta a Piano Particolareggiato (in rosso) e ubicazione dei sismi di magnitudo > 4 (Richter) della sequenza sismica per il periodo compreso tra il 19/05 e il 07/11 2012 nella pianura emiliana. Dati da INGV (Istituto Geofisica e Vulcanologia) – ISIDE (Italian Seismological Instrumental and parametric DatabasE)

Modellazione geologica e sismica dell'area

Sorgenti sismogenetiche

Carpi nella zonazione sismo genetica ZS9 è compresa all'interno della Zona Sismica 912 – Dorsale Ferrarese, che rappresenta la porzione più esterna della fascia in compressione dell'arco appenninico settentrionale, Per la zona 912 viene indicata una magnitudo massima attesa Mw = 6.14, una profondità da 5 a 8 km, con una profondità efficace di 7 km.

Nel DISS 3.1.1 (Database delle sorgenti sismo genetiche) dell'INGV Carpi è molto vicina a due distinte sorgenti sismogenetiche, come rappresentato nella successiva figura.



Nella tabella riportata nel seguito sono individuati i nomi delle sorgenti sismogenetiche più vicine, le profondità minime e massime delle sorgenti e la massima magnitudo attesa (su dati regionali o sulla base di singoli eventi o sorgenti)

sigla	nome	Profondità (km)	Magnitudo max
ITCS049	Reggio Emilia-Rolo	3-10	5.5
ITCS051	Novi-Poggio Renatico	3-10	5.9

La distanza dai limiti delle zone sismogenetiche cartografate è inferiore a 10 km, la magnitudo massima attesa è elevata (M=5.9), dello stesso ordine di grandezza di quella degli eventi sismici del Maggio 2012.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Esecuzione di misure sismiche

Classificazione del suolo di fondazione (MASW)

Per determinare la velocità delle onde di taglio nei primi 30 m di profondità e poter classificare la categoria del suolo di fondazione, è stata realizzata una prova MASW, combinata con un array ESAC. Con questa tecnica è possibile realizzare il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori posti sulla superficie del suolo.

Per realizzare le misurazioni è stata utilizzata una strumentazione a 24 canali.

I dettagli della strumentazione la relazione sulle misure sismiche effettuate sono riportati in allegato.

La prova MASW combinata con l'array ESAC, come indicato in Allegato, ha fornito un valore di V_{s30} pari a

V_{s30} a partire da p.c.:	193 m/s
V_{s30} a partire da -1m da p.c.:	197 m/s
V_{s30} a partire da -2 m da pc.:	201 m/s.

Nel modello complessivo utilizzato, le velocità appaiono complessivamente crescenti con la profondità.

In base a questa misura, **nel caso di fondazioni superficiali** con una profondità del piano di posa ad almeno 1 m di profondità dal piano di campagna,

la categoria di suolo di fondazione è la C

definita come: *“Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).. (NTC 2008, Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo)*

La prova ESAC ha permesso di approfondire la profondità raggiunta dalla prova MASW fino ad una profondità (teorica) di 81 m.

Grazie alla misura combinata MASW-ESAC è possibile avere valori di riferimento a cui "agganciare" le misure effettuate con sismica passiva, effettuate per individuare sia le frequenze di risonanza dei terreni che gli orizzonti più profondi se caratterizzati da un adeguato contrasto di impedenza.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Misure passive a stazione singola (HVSr)

Nell'area circostante gli edifici sono state eseguite due misure di micrortemori a stazione singola (Allegato 5). L'elaborazione delle prove, riportata in allegato, ha individuato al di sotto degli orizzonti misurati con le prove MASW-ESAC:

- un picco a bassa frequenza (0.15-0.16 Hz), comune ad entrambe le registrazioni ma con una marcata deviazione. Questo picco presenta a valori di frequenza al di fuori dei limiti della sensibilità strumentale dichiarata dalla ditta produttrice dello strumento utilizzato, pertanto la misura va trattata con estrema cautela e non può essere presa in considerazione per la modellazione sismica degli orizzonti più profondi. Questo picco, nel caso fosse confermato da strumenti più sensibili, sarebbe probabilmente da ascrivere a una superficie di contrasto d'impedenza piuttosto profonda (probabilmente ben oltre i 500 m) (Pliocene? Gruppo acquifero C?)
- un picco a frequenza di circa 0.84 Hz, coerente coi dati da bibliografia, che stratigraficamente potrebbe essere interpretabile come dovuto a un contrasto d'impedenza localizzabile alla base del subsistema di Bazzano, posizionato in zona a profondità dell'ordine dei 120-130 m (cfr sezione di cui alle figure 8 e 18) (Figure 17 e 18) (vedi relazione sismica in Allegato e figura 4 riportata nel seguito).
- altri picchi a frequenze più elevate, ovvero a 15 Hz,

Modello sismico del sottosuolo

L'elaborazione combinata delle registrazioni attive e di quelle passive in *array* ha permesso di definire un modello di profilo verticale di velocità (V_s) caratterizzato da valori complessivamente crescenti con la profondità, coerente con i dati geognostici e geologici disponibili (da prove penetrometriche, sondaggi e sezioni geologiche interpretative).

Il modello consente di individuare un contrasto di impedenza significativo ad una profondità di circa 126 m dal piano di campagna. In questo orizzonte la velocità delle onde sismiche passa da 390 a circa 600 m/s e, anche se non viene raggiunta la velocità di 800 m/s, questo passaggio può essere considerato come il bedrock sismico dell'area.

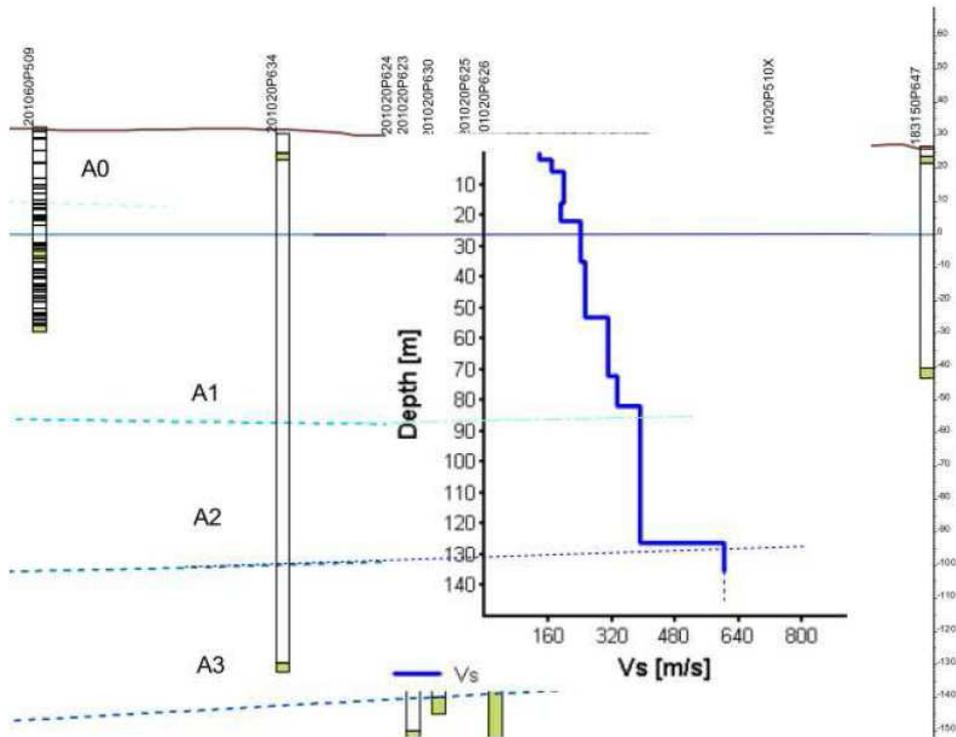
Il modello deve ovviamente la sua validità alle misure effettuate in precedenza, ed è basato quindi su un approccio conservativo che prevede valido e vincolante il modello MASW/ESAC fino a circa 80 m

Il modello e la sezione interpretativa sono brevemente schematizzati nel seguito

H [m]	D [m]	Vp [m/s]	Vs [m/s]	ρ [kg/m ³]
2	2	281	135	1800
4	6	841	165	1800
10	16	994	195	1800
6	22	969	190	1800
13	35	1224	240	1900
18	53	1275	250	2000
19	72	1581	310	2100
10	82	1734	330	2100
44	126	2040	390	2100
-	> 126	2550	600	2100

Figura 4 – Modello sismico del sottosuolo, ottenuto combinando le prove MASW + ESAC e HVSr (tabella a sinistra e grafico nel seguito).

Modellazione geologica e sismica dell'area

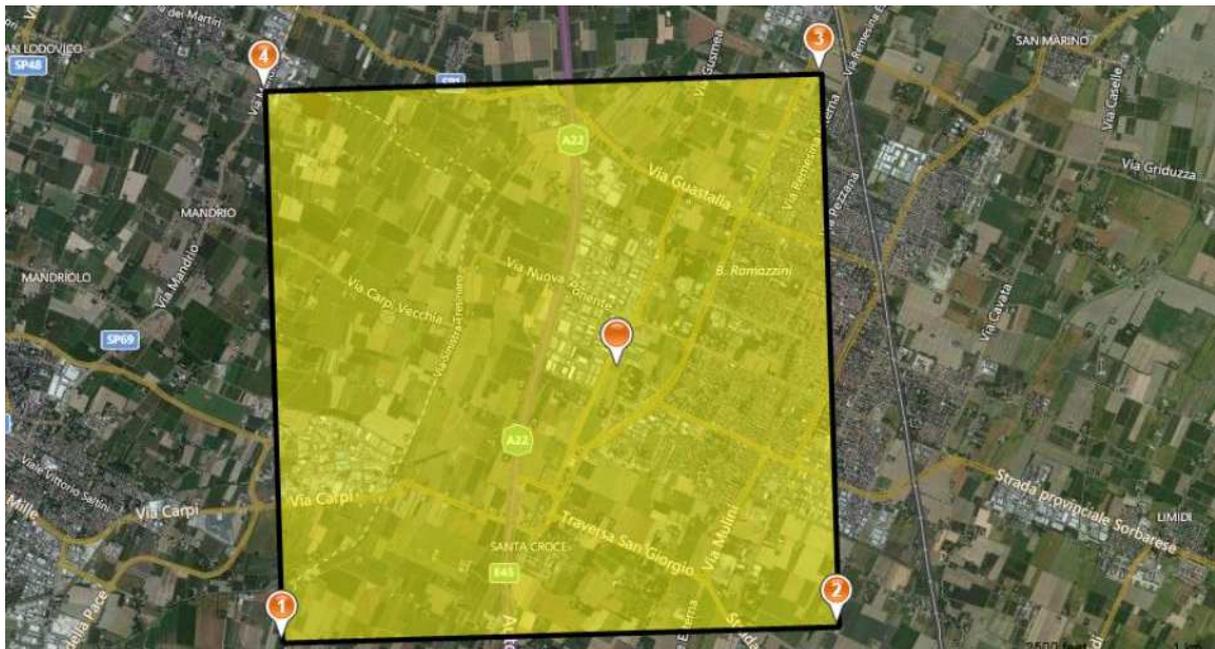


Pericolosità sismica di base

I parametri sismici relativi all'area in oggetto sono stati ricavati utilizzando il software GeostruPS. Nel seguito, si riportano le elaborazioni.

Vita nominale (Vn): 50[anni]
 Classe d'uso: III
 Coefficiente d'uso (Cu): 1
 Periodo di riferimento (Vr): 75[anni]

Periodo di ritorno (Tr) SLO: 45 [anni]
 Periodo di ritorno (Tr) SLD: 75 [anni]
 Periodo di ritorno (Tr) SLV: 712 [anni]
 Periodo di ritorno (Tr) SLC: 1462 [anni]



Modellazione geologica e sismica dell'area

Tipo di interpolazione:

Media ponderata

Latitudine (WGS84):	44.7786600 [°]
Longitudine (WGS84):	10.8577000 [°]
Latitudine (ED50):	44.7796000 [°]
Longitudine (ED50):	10.8587100 [°]

Coordinate dei punti della maglia elementare del reticolo di riferimento che contiene il sito e valori della distanza rispetto al punto in esame

Punto	ID	Latitudine (ED50) [°]	Longitudine (ED50) [°]	Distanza [m]
1	15613	44.754880	10.816230	4336.26
2	15614	44.756440	10.886560	3386.34
3	15392	44.806420	10.884320	3602.31
4	15391	44.804860	10.813940	4513.17

Parametri di pericolosità sismica per TR diversi da quelli previsti nelle NTC08, per i nodi della maglia elementare del reticolo di riferimento

Parametri per il punto d'indagine

Stato limite	Tr [anni]	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]
SLO	45	0.052	2.507	0.262
SLD	75	0.065	2.495	0.274
SLV	712	0.181	2.548	0.274
SLC	1462	0.240	2.489	0.283

Pericolosità sismica di sito

Coefficiente di smorzamento viscoso ξ : 5 %
Fattore di alterazione dello spettro elastico $\eta=[10/(5+\xi)]^{(1/2)}$: 1.000

Categoria sottosuolo:

C: Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero NSPT30 compreso tra 15 e 50 nei terreni a grana grossa c_{u30} compreso tra 70 e 250 kPa nei terreni a grana fina).

Categoria topografica:

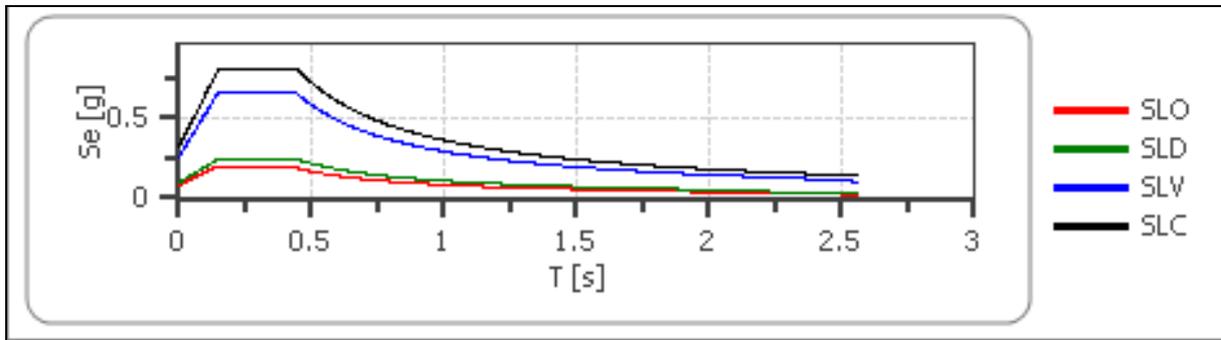
T1: Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media minore o uguale a 15°

Coefficienti sismici fondazioni

Coefficienti	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.015	0.019	0.062	0.090
kv	0.008	0.010	0.031	0.045
Amax [m/s ²]	0.758	0.952	2.518	3.150
Beta	0.200	0.200	0.240	0.280

Modellazione geologica e sismica dell'area

Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali

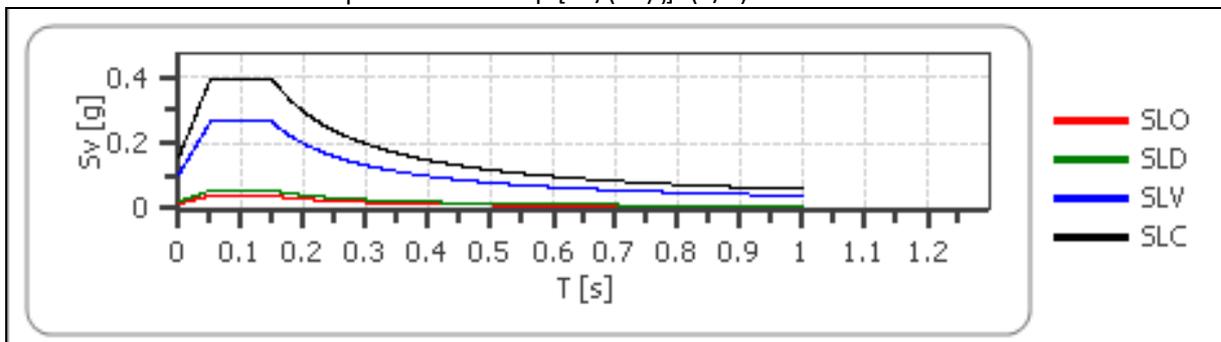


	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	η [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	1.5	0.052	2.507	0.262	1.500	1.630	1.000	1.500	1.000	0.142	0.427	1.806	0.077	0.194
SLD	1.5	0.065	2.495	0.274	1.500	1.610	1.000	1.500	1.000	0.147	0.441	1.859	0.097	0.242
SLV	1.5	0.181	2.548	0.274	1.420	1.610	1.000	1.420	1.000	0.147	0.442	2.323	0.257	0.654
SLC	1.5	0.240	2.489	0.283	1.340	1.590	1.000	1.340	1.000	0.150	0.449	2.559	0.321	0.799

Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti verticali

Coefficiente di smorzamento viscoso ξ: 5 %

Fattore di alterazione dello spettro elastico $\eta = [10/(5+\xi)]^{1/2}$: 1.000



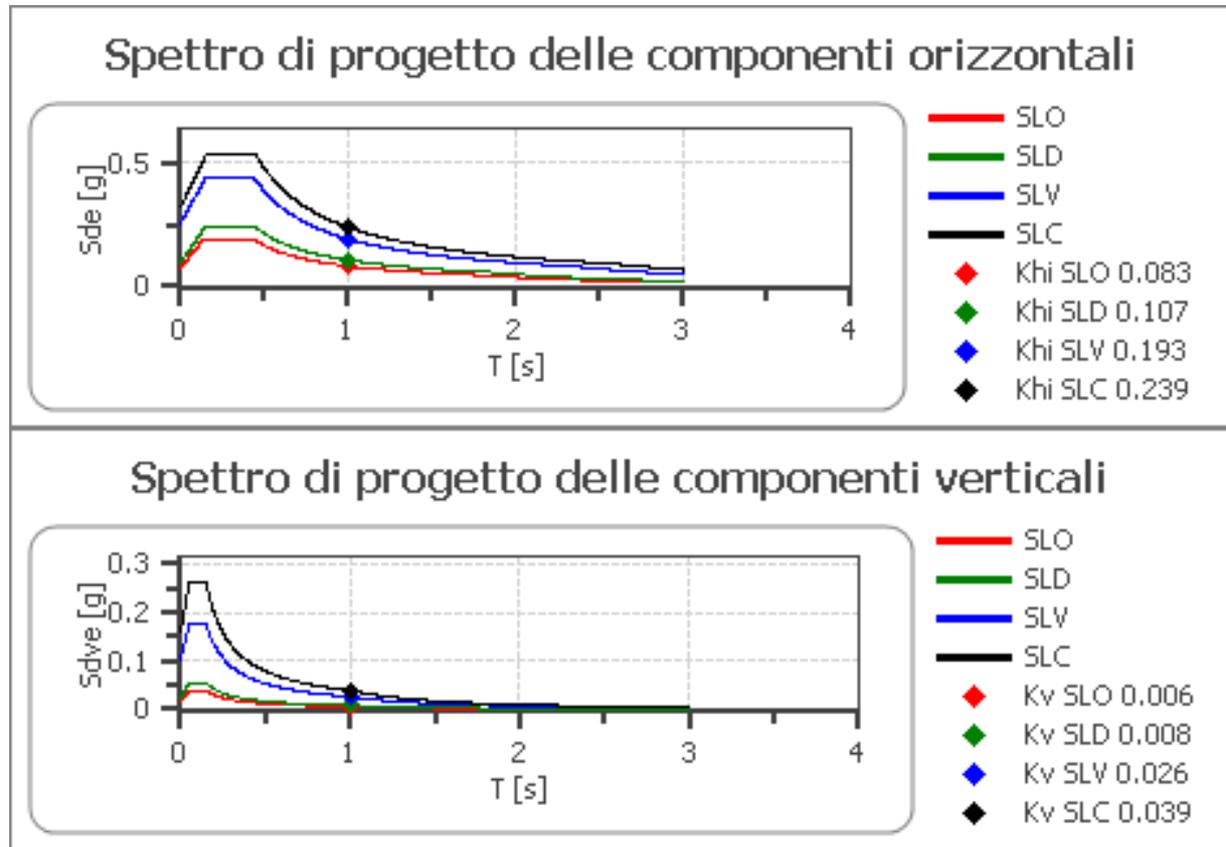
	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	η [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]
SLO	1.5	0.052	2.507	0.262	1	1.630	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.016	0.040
SLD	1.5	0.065	2.495	0.274	1	1.610	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.022	0.055
SLV	1.5	0.181	2.548	0.274	1	1.610	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.104	0.265
SLC	1.5	0.240	2.489	0.283	1	1.590	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.158	0.394

Modellazione geologica e sismica dell'area

Spettro di progetto

Fattore di struttura spettro orizzontale q: 1.50
Fattore di struttura spettro verticale q: 1.50
Periodo fondamentale T: 1.00 [s]

	SLO	SLD	SLV	SLC
khi = Sde(T) Orizzontale [g]	0.083	0.107	0.193	0.239
kv = Sdve(T) Verticale [g]	0.006	0.008	0.026	0.039



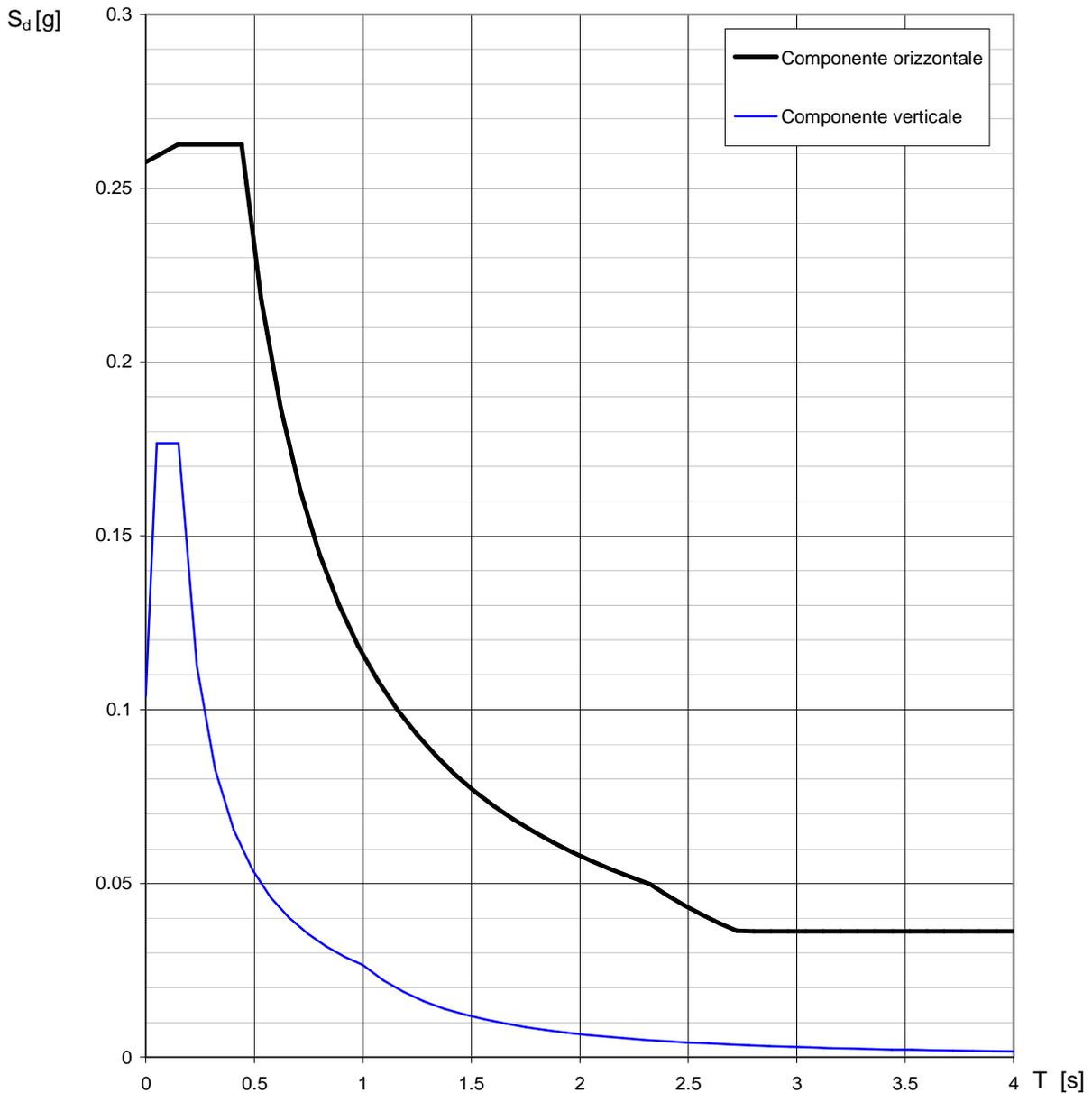
	cu	ag [g]	F0 [-]	Tc* [s]	Ss [-]	Cc [-]	St [-]	S [-]	q [-]	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Sd(0) [g]	Sd(TB) [g]
SLO orizz.	1.5	0.052	2.507	0.262	1.500	1.630	1.000	1.500	1.000	0.142	0.427	1.806	0.077	0.194
SLO vert.	1.5	0.052	2.507	0.262	1.500	1.630	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.016	0.040
SLD orizz.	1.5	0.065	2.495	0.274	1.500	1.610	1.000	1.500	1.000	0.147	0.441	1.859	0.097	0.242
SLD vert.	1.5	0.065	2.495	0.274	1.500	1.610	1.000	1.000	1.000	0.050	0.150	1.000	0.022	0.055
SLV orizz.	1.5	0.181	2.548	0.274	1.420	1.610	1.000	1.420	1.500	0.147	0.442	2.323	0.257	0.436
SLV vert.	1.5	0.181	2.548	0.274	1.420	1.610	1.000	1.000	1.500	0.050	0.150	1.000	0.104	0.176
SLC orizz.	1.5	0.240	2.489	0.283	1.340	1.590	1.000	1.340	1.500	0.150	0.449	2.559	0.321	0.533
SLC vert.	1.5	0.240	2.489	0.283	1.340	1.590	1.000	1.000	1.500	0.050	0.150	1.000	0.158	0.263

Modellazione geologica e sismica dell'area

Calcolo dei parametri sismici e degli spettri di risposta (CSLP)

Nel seguito sono stati riportati gli spettri di progetto (componente orizzontale, come calcolati secondo il foglio di calcolo "spettri NTC" del Consiglio Superiore Lavori Pubblici

Spettri di risposta (componenti orizz. e vert.) per lo stato limite: SLV



Parametri e punti dello spettro di risposta orizzontale per lo stato limite: SLV

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_g	0.181 g
F_0	2.548
T_C	0.274 s
S_S	1.423
C_C	1.609
S_T	1.000
q	2.500

Parametri dipendenti

S	1.423
η	0.400
T_B	0.147 s
T_C	0.442 s
T_D	2.324 s

Espressioni dei parametri dipendenti

$$S = S_S \cdot S_T \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.5})$$

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55; \quad \eta = 1/q \quad (\text{NTC-08 Eq. 3.2.6; §. 3.2.3.5})$$

$$T_B = T_C / 3 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.8})$$

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.7})$$

$$T_D = 4,0 \cdot a_g / g + 1,6 \quad (\text{NTC-07 Eq. 3.2.9})$$

Espressioni dello spettro di risposta (NTC-08 Eq. 3.2.4)

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

Lo spettro di progetto $S_d(T)$ per le verifiche agli Stati Limite Ultimi è ottenuto dalle espressioni dello spettro elastico $S_e(T)$ sostituendo η con $1/q$, dove q è il fattore di struttura. (NTC-08 § 3.2.3.5)

Punti dello spettro di risposta

	T [s]	Se [g]
	0.000	0.258
T_B ←	0.147	0.263
T_C ←	0.442	0.263
	0.531	0.218
	0.621	0.187
	0.710	0.163
	0.800	0.145
	0.890	0.130
	0.979	0.118
	1.069	0.108
	1.159	0.100
	1.248	0.093
	1.338	0.087
	1.428	0.081
	1.517	0.076
	1.607	0.072
	1.696	0.068
	1.786	0.065
	1.876	0.062
	1.965	0.059
	2.055	0.056
	2.145	0.054
	2.234	0.052
T_D ←	2.324	0.050
	2.404	0.047
	2.484	0.044
	2.563	0.041
	2.643	0.039
	2.723	0.036
	2.803	0.036
	2.883	0.036
	2.962	0.036
	3.042	0.036
	3.122	0.036
	3.202	0.036
	3.282	0.036
	3.361	0.036
	3.441	0.036
	3.521	0.036
	3.601	0.036
	3.681	0.036
	3.761	0.036
	3.840	0.036
	3.920	0.036
	4.000	0.036

Modellazione geologica e sismica dell'area

Valutazione dei fattori di amplificazione sismica

La valutazione dei fattori di amplificazione sismica (secondo livello di approfondimento) è stata effettuata secondo le indicazioni contenute nell' Allegato A2 della Delibera dell'Assemblea legislativa della Regione Emilia Romagna progr. n°112 - oggetto n°3121 del 2 maggio 2007.

Le velocità delle onde sismiche è stata misurata utilizzando le prove MASW + ESAC.

Dati misurati (a partire da 1 m dal p.c.):

$$V_{S30} = 197 \text{ m/s (approssimata a 200 m/s)}$$

Le prove geofisiche effettuate non hanno consentito di individuare un bedrock sismico s.s. ($v_s > 800$ m/s), ma hanno individuato un contrasto di impedenza significativo ($v_s = 600$ m/s) alla profondità di 126 m dal p.c.

Dal momento che la zona di interesse è situata all'interno di una con bedrock a profondità maggiore di 100 m dal piano di campagna), questo corrisponde al Profilo:

PIANURA2 "alternanze di sabbie e peliti, con spessori anche decametrici, talora con intercalazioni di orizzonti di ghiaie (di spessore anche decine di metri), con substrato profondo (≥ 100 m da p.c.)"

Vs m/s (MASW)	profilo	F.A. P.G.A.	F.A. INTENSITA' SPETTRALE	
			0.1s < To < 0.5s	0.5s < To < 1.0s
200	Pianura 2	1.5	0.1s < To < 0.5s	1.8
			0.5s < To < 1.0s	2.5

Il valore di accelerazione massima orizzontale di picco al suolo, cioè per $T = 0$, espressa in frazione dell'accelerazione di gravità g (a_{refg}) riportato in Tabella 2 della DGR 112/2007 per il Comune di Carpi, è $a_{refg} = 0.154$

Microzonazione Sismica del Comune di Carpi

Nella Microzonazione sismica comunale (Variante in adeguamento al 1° stralcio del Piano della Ricostruzione) vengono fornite una serie di informazioni relative alle caratteristiche dei terreni dell'area. Le misure effettuate sono coerenti con quelle riportate negli elaborati cartografici della Microzonazione comunale PS15/MS.

1° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

- Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica - Tav.2
L'are ricade in Zona 6- "Zona 6-Alternanze tra strati metrici/plurimetrici sabbiosi e strati metrici/plurimetrici pelitici". Nell'area e su buona parte del territorio comunale viene individuata la possibilità di liquefazioni.

2° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

- Carta di microzonazione sismica, livello 2° - FA PGA - Tav.2 (Allegato 6)
Nell'area viene individuato un fattore di amplificazione FA PGA nella classe 1.5-1.6, con possibilità di liquefazioni.
- Carta di microzonazione sismica, livello 2° - FA SI 0,1-0,5 s - Tav.2
Nell'area viene individuato un fattore di amplificazione FA (FA SI da 0.1 a 0.5 secondi) nella classe 1.7-1.8, con possibilità di liquefazioni.

Modellazione geologica e sismica dell'area

- Carta delle frequenze naturali dei terreni - Tav.2 (Allegato 7)

parametro	microzonazione	distanza	misure
f_0	a) 0.84 (N) b) 0.88 (NE) c) 0.81 (SE) d) 0.88 (O)	a) 600 m b) 700 m c) 600 m d) 700 m	0.84
A_0	a) 2.06 (N) b) 2.0 (NE) c) 2.31 (SE) d) 2.27 (O)	a) 600 m b) 700 m c) 600 m d) 700 m	2.115

Nelle cartografia della microzonazione, nelle vicinanze sono presenti quattro misure, qui identificate con le lettere a-d, la distanza e la direzione rispetto all'area di Piano Particolareggiato. Le misure distano mediamente 600/700 m dai confini dell'area di Piano Particolareggiato.

Le misure effettuate sono coerenti con quanto riportato nella Tavola 2, sia per quanto riguarda le frequenze che per le intensità.

3° LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

- Cedimenti post-sismici nei terreni coesivi "soffici" - Tav. B
Il cedimento post-sismico viene indicato come "Medio" - Accettabile per strutture in muratura e intelaiate 2.5-5 cm
- Cedimenti post-sismici nei terreni liquefacibili - Tav. B
Il cedimento assoluto post-sismico per terreni liquefacibili, il più vicino centro abitato nelle vicinanze al sito in oggetto, viene considerato "Basso" - Accettabile per strutture in muratura e intelaiate 0-2.5 cm.
- Indice del potenziale di liquefazione - Tav. B (Allegato 8)
L'area viene individuata a "Rischio di liquefazione moderato $2 < IPL <= 5$ "

Modellazione geologica e sismica dell'area

Calcolo della risposta sismica locale

Il calcolo della risposta sismica locale è stato effettuato utilizzando le indicazioni contenute nell'Allegato A4 della Delibera dell'Assemblea legislativa della Regione Emilia Romagna progr. n°112 - oggetto n°3121 del 2 maggio 2007.

Il valore di a_{refg} (10% di probabilità di superamento in 50 anni) del Comune di Carpi, pari a **0.154**, è contenuto nella Tabella 2 del sopraccitato Allegato A4.

I segnali di riferimento utilizzati sono quelli disponibili nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli regionale. Per ogni Comune della Regione Emilia Romagna sono infatti disponibili archivi che contengono i tre segnali già scalati per il Comune a cui si riferiscono, da impiegare per le analisi di terzo livello nel comune in questione. I segnali sono già scalati in modo che la loro accelerazione massima corrisponda al valore di a_{refg} del Comune.

I segnali sono stati selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motion database" (ISESD). I tre segnali utilizzati sono i seguenti:

000046xa_036005Carpi.xy
000126xa_036005Carpi.xy
000354xa_036005Carpi.xy

L'analisi della risposta sismica locale è stata effettuata utilizzando il programma EERA (Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits), del Dipartimento di Ingegneria Civile della University of Southern California.

Sono stati utilizzati i tre segnali di riferimento, la stratigrafia sismica calcolata fino al bedrock e, in aggiunta a quelle fornite dal programma, le litologie (strain, moduli G/G_0 , etc) contenute in M. Casadio & C. Elmi (2006) "Il Manuale del Geologo" pagg. 633-634, Tabella 1.1.

Nel calcolo della RSL sono state utilizzate le profondità e gli spessori misurati nelle prove penetrometriche e i risultati della modellazione sismica del sottosuolo riportati in precedenza.

I pesi di volume per gli orizzonti superficiali sono quelli (ponderati) ricavati dalla prova CPTU. Per gli orizzonti più profondi i pesi di volume sono stati stimati in accordo alla velocità (crescente) delle onde sismiche e ai dati di letteratura. Le litologie utilizzate sono le seguenti:

n° strato	Profondità base strato [m]	spessore [m]	Vs da modello [m/s]	Peso di volume da CPTU + stima (kN-m ³)	Litologia da CPTU + letteratura	Litologia (EERA + M. Casadio & C. Elmi, 2006, Tabella 1.1)
1	2	2	135	17.7	Limi argillosi e limi sabbiosi	silt sabbioso
2	6	4	165	18.5	Argille	argilla IP 15
3	16	10	195	19.5	Limi e limi sabbiosi	silt sabbioso
4	22	6	190	19.4	Limi argillosi e limi sabbiosi	silt IP 7 12
5	35	13	240	19.8	Limi e limi sabbiosi	silt sabbioso
6	53	18	250	20.1	Limi argillosi e limi sabbiosi	silt IP 7 12
7	72	19	310	20.6	Alternanze di Limi e limi argillosi	silt argilloso
8	82	10	330	20.6	alternanze di sabbie e livelli limoso argillosi	sabbia siltosa
9	126	44	390	21.1	alternanze di sabbie e livelli limoso argillosi	sabbia
10	>126		800			Bedrock sismico

Per gli orizzonti 8 e 9 è stata valutata una litologia prevalentemente sabbiosa. In corrispondenza di questi orizzonti hanno sede i gruppi acquiferi A1 e A2 captati nei pozzi di controllo della RER.

Modellazione geologica e sismica dell'area

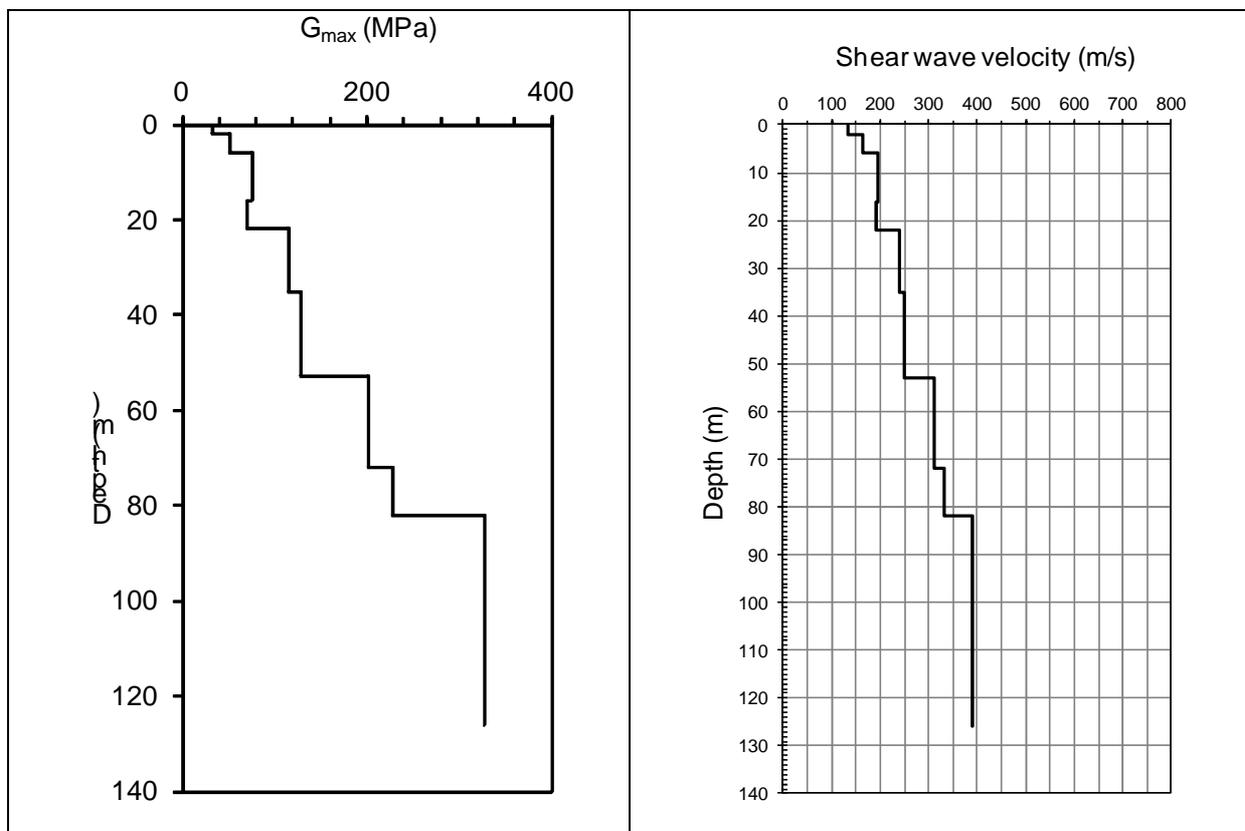
I tre accelerogrammi di riferimento, per la stratigrafia considerata, hanno fornito i seguenti valori:

accelerogramma	F.A. P.G.A.	FA (0,1s<To≤0,5s)	FA (0,5s<To≤1,0s)	Accelerazione massima (g)
000046xa_036005Carpi.xy	1,42	1.48	1.97	0,219
000126xa_036005Carpi.xy	1,49	1.23	1.63	0,23
000354xa_036005Carpi.xy	1,36	1.71	2.01	0,21

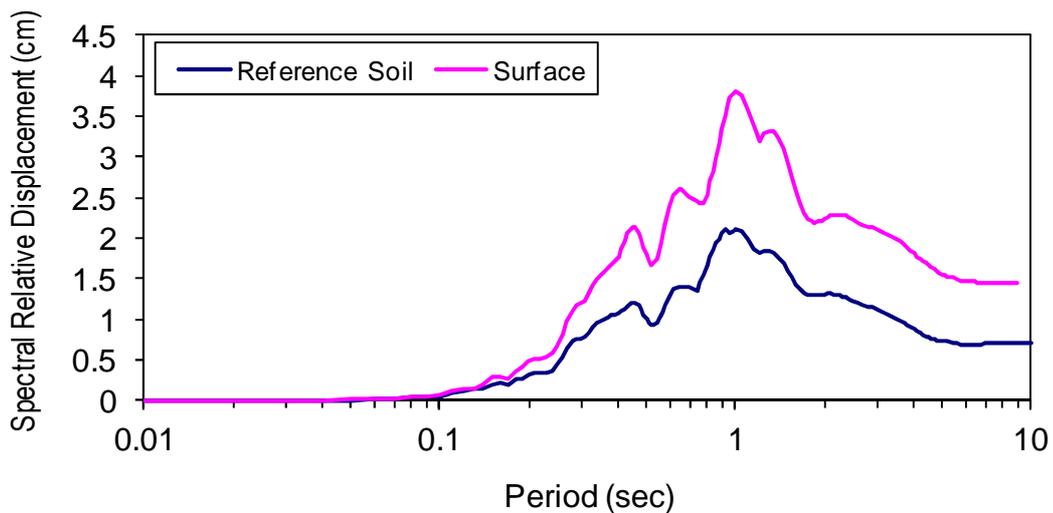
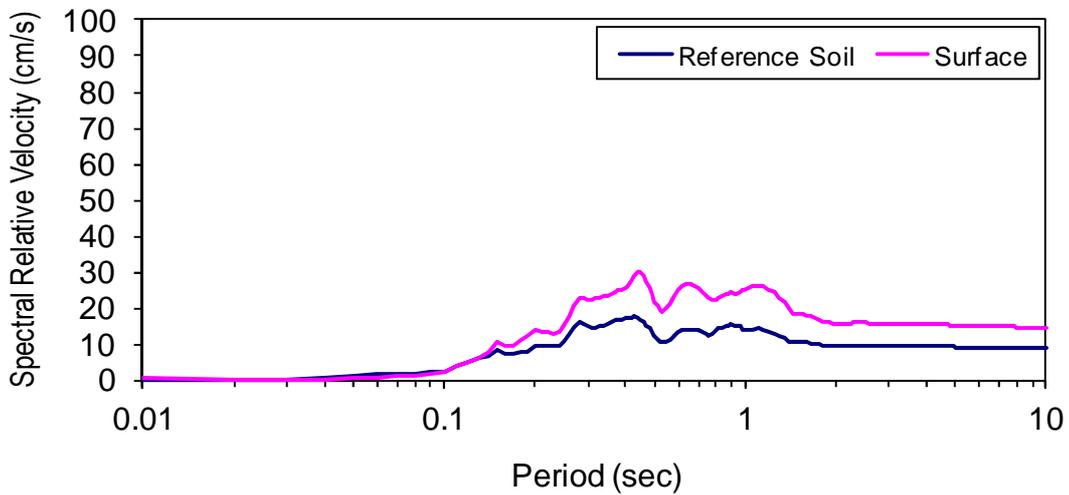
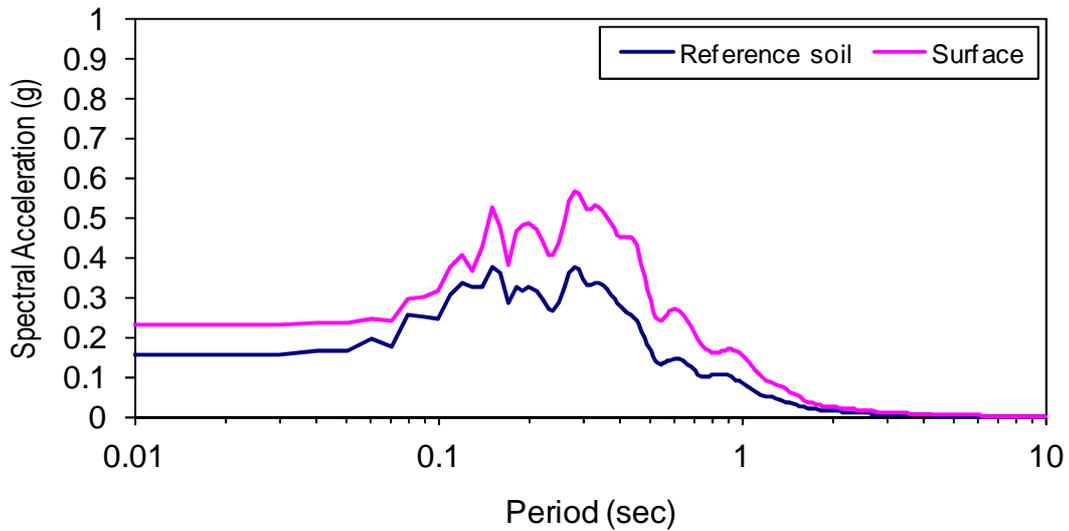
I diagrammi riportati nel seguito sono riferiti al segnale la cui elaborazione ha fornito i valori più elevati in termini di P.G.A. (segnale 000126xa).

Segnale di riferimento 000126xa_036005Carpi.xy

- Time step ΔT (sec) = 0.005
- Desired maximum acceleration (g) = 0.154
- Maximum frequency cut-off (Hz) = 25
- Use frequency cut-off in calculation ? Yes
- Number of points for FFT = 8192
- Total number of values read = No
- Peak Acceleration in input file (g) = 000126xa_036005Carpi.xy
- Time of peak acceleration (sec) = 6576
- Mean Square Frequency (Hz) = -0.1540
- Peak acceleration after filtering (g) = 9.825



Modellazione geologica e sismica dell'area

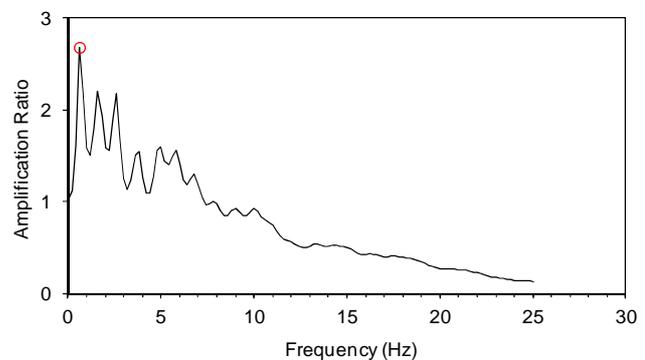


Amplificazioni (accelerazione, velocità e spostamento) sulla superficie topografica del sito rispetto al suolo di riferimento

Modellazione geologica e sismica dell'area

Number of sublayer = 1
Type of sublayer = Outcrop
Depth at top of sublayer (m) = 0
Maximum acceleration (g) = 0.229
Time of maximum acceleration (sec) = 10.29
Mean Square frequency (Hz) = 3.57
Maximum relative velocity (m/s) = 0.15485
Time of maximum relative velocity (sec) = 10.18
Maximum relative displacement (m) = 0.01751
Time of maximum relative displacement (sec) = 10.31

Number of first sublayer = 10
Type of first sublayer = Outcrop
Number of second sublayer = 1
Type of second sublayer = Outcrop
Maximum amplification = 2.685
Frequency of max. amplification (Hz) = 0.60



Il fattore di amplificazione tra due strati (nel caso specifico, tra bedrock e superficie) individua il picco massimo a 0.6 Hz, con un fattore pari a circa 2.7, e numerosi altri picchi secondari.

Questi valori sono relativi all'analisi della risposta sismica locale, stata effettuata utilizzando il programma EERA, del Dipartimento di Ingegneria Civile della University of Southern California e l'accelerogramma

000354xa_036023Modena.xy, che tra i 3 segnali dalla banca dati accelerometrica ISESD è quello che ha fornito il valore più elevato in termini di PGA.

Il risultato è in discreto accordo con la misura effettuata con il tromografo digitale (frequenza del terreno a 0.84 Hz) e indica che il modello matematico utilizzato ha una corrispondenza con quanto misurato sul terreno.

I valori calcolati, riferiti al suolo dell'area in oggetto, risultano inferiori rispetto a quelli previsti dall'analisi di II livello

Modellazione Geologica

Inquadramento geologico e geomorfologico

La pianura modenese è caratterizzata in superficie da depositi alluvionali di età molto recente. Questi depositi sono costituiti da canali d'alveo, ventagli di rotta fluviale e depositi palustri di piana alluvionale (Cremaschi, 1987; Gasperi et al., 1987), e la loro granulometria appare differenziata in funzione della posizione relativa rispetto agli alvei o ai paleoalvei di dominio. In termini generali, si passa da sedimenti a granulometria più grossolana (prevalentemente ghiaie, con matrice sabbiosa o limosa e lenti sabbiose e limose) nell'alta pianura (compresa tra il margine collinare e la zona poco più a nord della via Emilia, corrispondente ai depositi più distali di conoidi e/o terrazzi), per passare a limi prevalenti ed argille nella media pianura e ad argille più o meno limose nella bassa pianura, estesa fino al corso del F. Po. Le zone costituite da argille franche e/o argille organiche sono quasi sempre in corrispondenza di piane alluvionali racchiuse tra gli alvei pensili dei corsi d'acqua.

Il territorio in cui è compresa l'area oggetto di indagine si colloca nella media pianura modenese, generalmente definita come quel settore di pianura compreso tra la via Emilia (a sud) e a nord dalla curva di livello di 20 m sln secondo alcuni Autori (Panizza et Al, manuale di Geomorfologia Applicata), oppure dalla linea Carpi-S. Felice- Finale E. da altri Autori (AAVV, Touring Ed.).

La media pianura è costituita da una serie di depositi prevalentemente fini (sabbie, limi e argille), dovuti ai successivi processi di tracimazione e rotte fluviali che, nel tempo, hanno portato alla formazione di depositi e strati di forma lenticolare. Il protrarsi nel tempo di questi eventi ha portato ad una crescita verticale di questi depositi, fino ad formarsi delle condizioni di pianura attuali, contraddistinte da pendenze piuttosto ridotte, alvei di scorrimento fluviali generalmente pensili inframmezzati da aree morfologicamente più depresse.

Il sottosuolo è prevalentemente costituito da alternanze di sabbie, limi e argille di origine alluvionale di età Pleistocene medio-Olocene riferibili a due cicli deposizionali di ordine maggiore:

- il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI), di età compresa tra 700.000/650.000 e 450.000/400.000 anni,
- il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), di età compresa tra 450.000/400.000 anni e l'Attuale (RER & ENI-Agip, 1998).

Questa successione continentale poggia generalmente su un substrato costituito da depositi marini e transizionali del Pleistocene inferiore e medio, riferibili alla Sabbie Gialle o Sabbie di Imola del margine appenninico-padano (RER & ENI-Agip, 1998).

Il limite Pleistocene inf-medio nell'area in oggetto (grossomodo corrispondente al limite inferiore del complesso acquifero C2), ricavato da sondaggi esplorativi profondi (pozzo AGIP "Modena 1Pr" e "Formigine 1" da: "Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia Romagna, 1988", sezione 3, valutata in prossimità dei pozzi Correggio1 e 2), è posto ad una profondità di circa 400 m dal piano di campagna. Nella stessa sezione, il limite del substrato marino tra Pliocene e Pleistocene viene riportato a circa 450 metri di profondità.

Più a nord, ad una distanza di circa 12/14 km in linea d'aria, l'area è caratterizzata dalla presenza, a bassa profondità dal piano campagna, di acque salate e strutture tettoniche di importanza regionale. Si tratta del "substrato marino" pliocenico-quadernario il quale, interessato da intensi fenomeni tettonici, forma una vasta struttura sinclinalica subito a sud di Finale Emilia. Essa rappresenta una delle massime depressioni della Pianura Padana, in cui lo spessore delle alluvioni supera i 500 m. Il

Modellazione geologica e sismica dell'area

fianco nord della sinclinale si sviluppa fino alla zona di Concordia-Mirandola-San Felice sul Panaro, determinando un suo progressivo innalzamento. A nord di tale allineamento si ha una serie di pieghe che, nel complesso, danno luogo ad una struttura positiva notevolmente sollevata, facente parte della "dorsale ferrarese" (figura 5) lungo la quale, in alcuni tratti, il substrato marino è ricoperto da "soli" 80 metri di terreni alluvionali (RER & ENI-Agip, 1998)

La risalita dei terreni marini fa sì che a partire dalla zona di Bomporto anche le acque salate tendono a rialzarsi (più o meno gradatamente), sino ad arrivare direttamente in superficie. Tale salienza è da connettersi a fenomeni di trascinalamento verso l'alto da parte di gas metano diffuso in zona, sotto forma di emulsione. Un tale andamento strutturale del substrato si riflette anche sui terreni alluvionali di copertura, tanto più che l'area è interessata da movimenti neotettonici dovuti ad un reticolo di faglie; queste ultime sono da collegarsi in parte ai movimenti che hanno determinato il sollevamento della catena appenninica e in parte a quelli che hanno controllato l'attuale configurazione idrografica della Pianura interessata dai Fiumi Secchia e Panaro. Il fenomeno di sollevamento, seppure molto lento, è tutt'ora in atto.

Dal punto di vista deposizionale, nella media pianura sono ancora predominanti gli apporti sedimentari dovuti ai corsi d'acqua di provenienza appenninica. I depositi alluvionali più recenti presenti nell'area sono dovuti infatti agli apporti del F. Secchia.

La morfologia della zona è pianeggiante e presenta una diminuzione generale delle quote in direzione SSO-NNE, con pendenza media pari a circa lo 0.3-0.4 %. Pendenze leggermente maggiori si possono avere avvicinandosi ai corsi attuali.

Nell'area sono presenti pochissimi rilievi, sia di origine antropica (argini artificiali dei corsi d'acqua e rilevati stradali) che naturale e in questo caso corrispondono a dossi di sistemi di canale-argine, risultato dell'attività deposizionale del Po e dei suoi affluenti appenninici (principalmente Secchia e Panaro). Molti di questi dossi fluviali sono oggi sede di strade e centri abitati in quanto sono le aree a minore rischio di allagamento.

L'azione morfogenetica predominante nel territorio è quella dovuta ai corsi d'acqua appenninici, unitamente all'azione antropica. Quest'ultima, in tempi più recenti (a partire dall'età preromana), ha modificato notevolmente l'assetto del territorio con una serie di interventi di bonifica, che hanno dapprima mitigato e quindi ridotto ed infine annullato la dinamica evolutiva del reticolo idrografico e degli apporti sedimentari dovuti alle continue esondazioni.

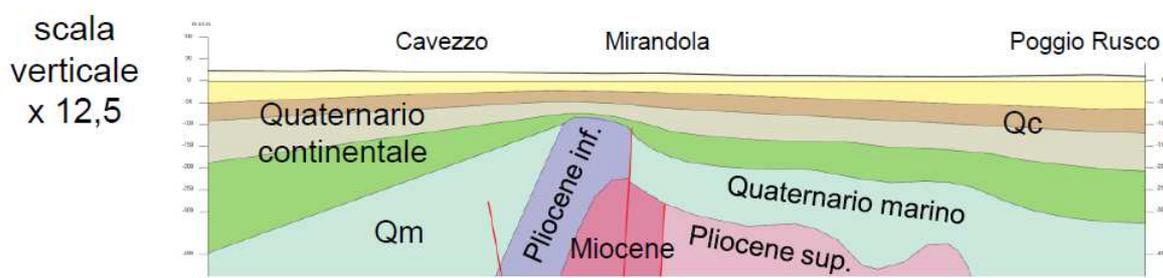


Figura 5. Sezione geologica orientata grossomodo N-S, in cui è visibile l'innalzamento delle formazioni marine nel sottosuolo in corrispondenza della c.d. "dorsale ferrarese".

Modellazione geologica e sismica dell'area

Litologia di superficie

Nella Carta geologica della Regione Emilia-Romagna (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, progetto CARG, figura 6), nell'area vengono individuati terreni appartenenti alla Successione neogenico - quaternaria (AES8a - Sintema emiliano-romagnolo superiore - Subsintema di Ravenna - unità di Modena). Le Unità presenti nelle immediate vicinanze dell'area in oggetto, vengono brevemente descritte nel seguito (descrizione tratta da Progetto CARG, R.E.R.).

Le linee tratteggiate orizzontali, riportate nella carta, indicano che i depositi più superficiali sono costituiti da limi sabbiosi di piana alluvionale.

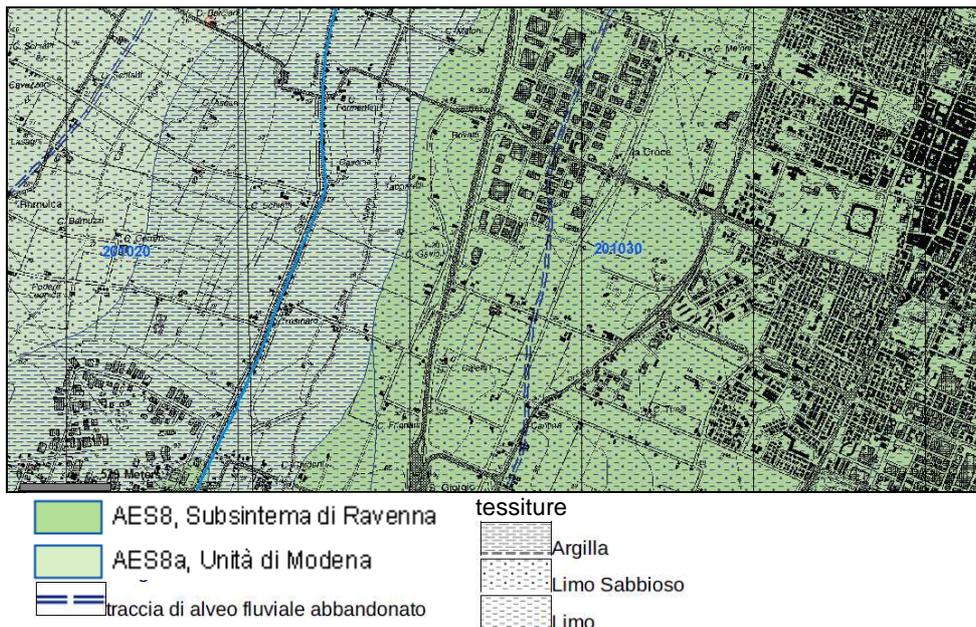


Figura 6. Carta geologica e ubicazione dell'area

AES8 - Subsintema di Ravenna

Ghiaie e ghiaie sabbiose, passanti a sabbie e limi organizzate in numerosi ordini di terrazzi alluvionali. Limi prevalenti nelle fasce pedecollinari di interconoide. A tetto suoli a basso grado di alterazione con fronte di alterazione potente fino a 150 cm e parziale decarbonatazione; orizzonti superficiali di colore giallo-bruno. Contengono frequenti reperti archeologici di età del Bronzo, del Ferro e Romana. Potenza fino a oltre 25 m. Il subsintema di Ravenna (AES8) rappresenta l'intero spessore dei sedimenti, prevalentemente fini, deposti nell'ultimo postglaciale, al di sopra dell'esteso corpo ghiaioso attribuito all'unità di Vignola. La sedimentazione dell'unità si sviluppa estesamente in condizioni di piana inondabile. L'area oggetto di indagine è situata su terreni appartenenti al Subsintema di Ravenna.

Olocene (età radiometrica della base: 11.000 - 8.000 anni).

AES8a - Unità di Modena

Depositi ghiaiosi passanti a sabbie e limi di terrazzo alluvionale. Limi prevalenti nelle fasce pedecollinari di interconoide. Unità definita dalla presenza di un suolo a bassissimo grado di alterazione, con profilo potente meno di 100 cm, calcareo, grigio-giallastro o bruno grigiastro. Nella pianura ricopre resti archeologici di età romana del VI secolo d.C.. Potenza massima di alcuni metri (< 10 m). I depositi attribuiti a questa unità si rinvencono generalmente in prossimità delle aste fluviali e corrispondono al primo ordine dei terrazzi nelle zone intravallive.

Post-VI secolo d.C.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Idrografia di superficie

L'area è situata ad una distanza di circa 1.500 m ad est del Cavo Tresinaro, sulla sua destra orografica ed appartiene al bacino idrografico del F. Secchia. L'idrografia di superficie risulta composta da fossi e canali di scolo con andamento prevalente da SSO a NNE, che complessivamente creano buone condizioni di deflusso delle acque superficiali, tendendo singolarmente a confluire nei corsi d'acqua di ordine superiore.

Nella Tavola 2.3.1 del PTCP 2009 "Rischio idraulico: carta della pericolosità e della criticità idraulica" (Allegato 5) l'area è compresa all'interno del "Limite delle aree soggette a criticità idraulica (Art.11, c7-c11 delle NTA)", che comprende tutta la fascia di pianura, a partire dal limite pedecollinare.

L'area non risulta compresa all'interno degli ambiti a diversa pericolosità idraulica (A1-A4) in cui è stato suddiviso il territorio della pianura. In ogni caso, anche se non vengono evidenziate particolari criticità idrauliche, l'art. 11 disciplina gli interventi di nuova edificazione, di recupero e riqualificazione, sia in aree urbane che rurali, per evitare che interventi che non prevedano invarianza e/o attenuazione idraulica (laminazioni, riduzioni delle portate, etc.) possano creare nuove criticità.

Idrogeologia

Sulla base delle conoscenze idrogeologiche locali, dei dati litostratigrafici dei pozzi trivellati nella zona e delle ricerche dei pozzi AGIP per idrocarburi ("Riserve idriche sotterranee della RER", 1988) è possibile inquadrare idrogeologicamente l'area nel contesto generale dell'acquifero di questo settore della pianura.

Il sistema acquifero è strettamente legato a quello deposizionale. Gli orizzonti sabbiosi che ospitano falde idriche nell'area si raccordano con quelli presenti nell'alta pianura, fino al margine pedecollinare. Dal momento che la litologia di superficie è caratterizzata da sedimenti fini, con scarsa permeabilità verticale, l'area di alimentazione di questi acquiferi si trova prevalentemente nell'alta pianura, lungo il margine pedecollinare, caratterizzato dalla presenza di terreni con buona permeabilità in cui le acque meteoriche e superficiali hanno buona capacità di infiltrazione e di alimentazione e ricarica dei corpi acquiferi.

Lo schema stratigrafico dei depositi quaternari del margine appenninico e della pianura emiliano-romagnola, ha portato alla definizione di tre unità idrostratigrafiche principali, suddivisibili a loro volta in unità di rango minore (Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia Romagna, 1998). La principale suddivisione in verticale delle unità sepolte, ha portato a raggruppare i terreni in tre complessi idrogeologici principali, definiti come Gruppi Acquiferi A, B e C:

- il Gruppo Acquifero A è il più recente ed ha un'età che va dall'Attuale sino a 350.000 – 450.000 anni;
- il Gruppo Acquifero B, intermedio, va da 350.000 – 450.000 anni sino a 650.000 circa;
- il Gruppo Acquifero C è il più vecchio e va da 650.000 sino a oltre 3 milioni di anni.

I complessi idrogeologici sono definiti come corpi aventi litologie simili, una comprovata unità spaziale ed un grado di permeabilità che si mantiene in un campo di variazione piuttosto ristretto. Gli acquiferi sono riconducibili a depositi permeabili di età diversa, depositi dalle diverse unità fluviali all'interno del c.d. "golfo padano" e rielaborati in prossimità delle linee di costa e dei diversi episodi trasgressivi e regressivi.

Modellazione geologica e sismica dell'area

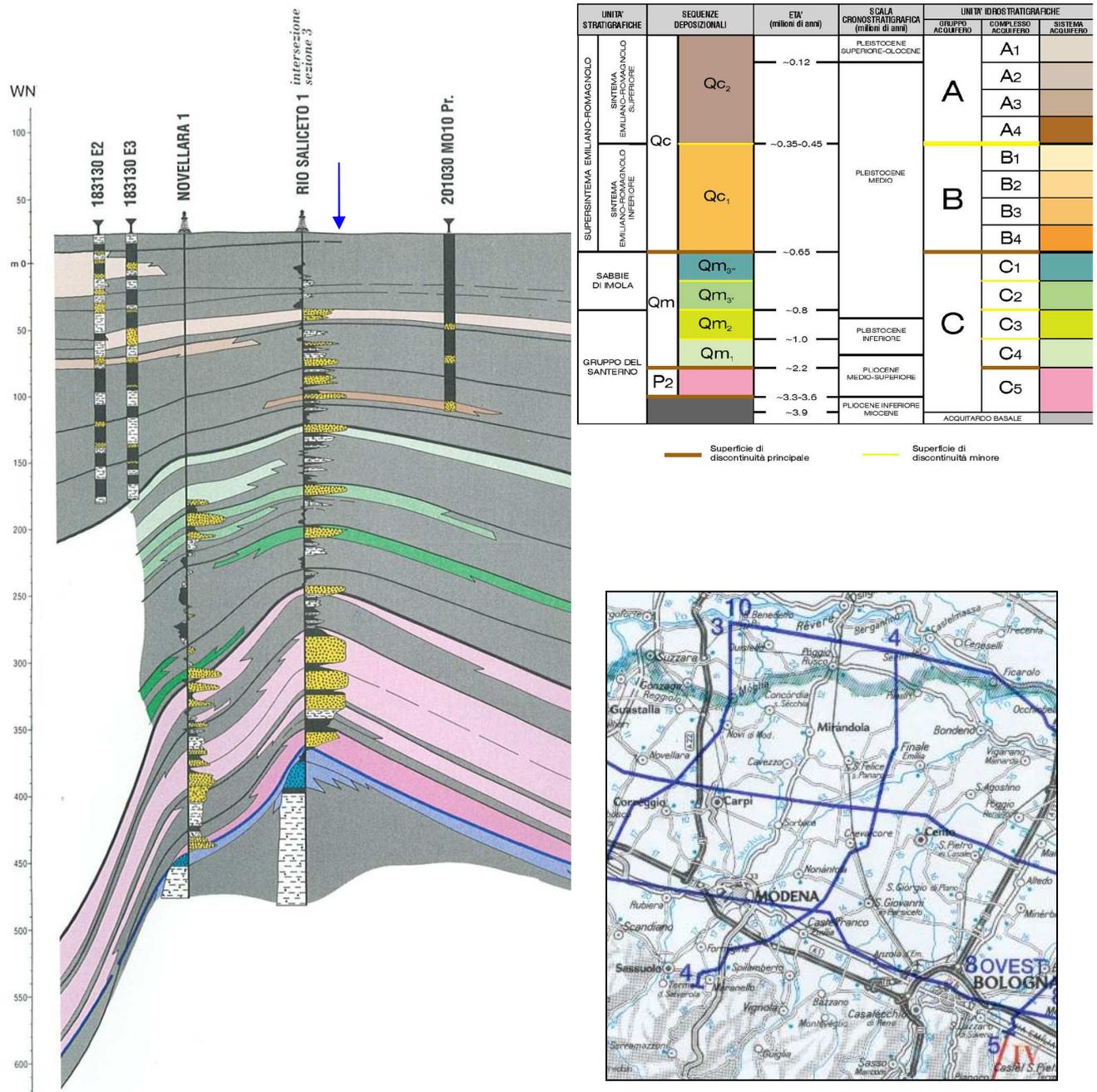


Figura 8. Sezione idrostratigrafica del sottosuolo n° 9 (O-N). Ubicazione delle tracce di sezione. Tratto da: "Riserve idriche sotterranee della RER", RER-ENI-AGIP, 1988. Con la freccia blu è individuata schematicamente la posizione dell'area in oggetto.

Come riportato nel sito della RER relativamente all'idrogeologia di pianura "il Gruppo Acquifero A ed il Gruppo Acquifero B sono costituiti principalmente da depositi alluvionali ed in particolare dalle ghiaie delle conoidi alluvionali, dai depositi fini di piana alluvionale e dalle sabbie della piana del Fiume Po; il gruppo acquifero C è formato principalmente da depositi costieri e marino marginali ed è costituito principalmente da pacchi di sabbie alternati a sedimenti più fini. In prossimità dei principali sbocchi vallivi il gruppo acquifero C contiene anche delle ghiaie intercalate alle sabbie, che costituiscono i

Modellazione geologica e sismica dell'area

delta conoide dei fiumi appenninici durante il Pleistocene inferiore e medio"

Esiste una corrispondenza tra i Gruppi Acquiferi (definiti come Unità Idrostratigrafiche) e le Unità Stratigrafiche utilizzate nella Carta Geologica d'Italia. Nello specifico, il Gruppo Acquifero A corrisponde al Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), il Gruppo acquifero B al Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI), il Gruppo Acquifero C a diverse unità affioranti nell'Appennino, la più recente delle quali è la Formazione delle Sabbie Gialle di Imola (IMO).

Come è possibile notare dalla sezione di figura 8, i livelli permeabili nel sottosuolo dell'area che possono essere sede di acquiferi sono numerosi.

Fino ad una profondità di circa 140-150 m dal p.c. sarebbero presenti i complessi acquiferi appartenenti al gruppo acquifero A (A1 fino a 60-70m, A2 fino a circa 100m, A3 fino a circa 130 m), dai 140-150 ai 220-230 m circa i complessi acquiferi del gruppo B e, inferiormente, il complesso acquifero C.

L'alimentazione degli acquiferi presenti avviene quasi esclusivamente da infiltrazione dalla superficie topografica, soprattutto dall'area pedecollinare, con ridotti tassi di rinnovamento. A questa situazione va sommato il contributo indotto dalla presenza estremamente diffusa di pozzi ad uso privato, in genere realizzati prevedendo l'intercettazione di più strati acquiferi.

Le falde situate a profondità inferiori al Complesso Acquifero A1 sono limitate superiormente da strati impermeabili. A partire dal Complesso Acquifero A2, le falde sono di tipo confinato e in pressione.

La direzione di flusso della falda è quella evidenziata a carattere regionale, da SSO a NNE. Possono essere presenti componenti laterali nella direzione di flusso (verso est o ovest), dovute alle condizioni di alimentazione o drenaggio operate dai corpi idrici più superficiali, in corrispondenza delle aree dove la falda non è confinata.

Piezometria

Per quanto riguarda i gruppi acquiferi principali, i pozzi più vicini della rete di controllo ARPA (figura 9) sono:

- il pozzo MO10-01 ad uso irriguo, situato ad una distanza di circa 1.5 km a N-NE rispetto all'area di indagine, profondo 120 m e situato ad una quota (riportata nel sito) di 25.52 fino al 2007, di 26.9 m dal p.c. per il 2008-2009. Capta i Complessi Acquiferi A1 e A2 e il livello piezometrico (metri s.l.m.) monitorato dal 1990 al 2009 varia da un minimo di 17.75 ad un massimo di 7.3 m slm (corrispondente ad una soggiacenza da -19.6 a -7.77 m dal p.c.), con un'escursione di circa 10.5 m
- il pozzo MO37-02 ad uso industriale, situato ad una distanza di 2.7 km a E, profondo 95 m ad una quota del p.c. di 26 m slm. Capta il Complesso Acquifero A2. Il livello piezometrico, monitorato dal 2003 al 2009, varia da un minimo di 20.74 ad un massimo di 5.68 m slm, corrispondenti ad una soggiacenza da 5.26 a 20.32 m dal p.c. ed un'escursione di 15.06m

I dati sulla piezometria qui riportati sono relativi alla quota in metri slm del primo Gruppo Acquifero A e dei Complessi A1 e A2. Questo non esclude che possano esserci ulteriori falde sospese più superficiali, ubicate soprattutto all'interno di livelli più permeabili, il cui andamento risulterebbe maggiormente influenzato dalla piovosità e dall'apporto dei corsi d'acqua superficiali.

Modellazione geologica e sismica dell'area

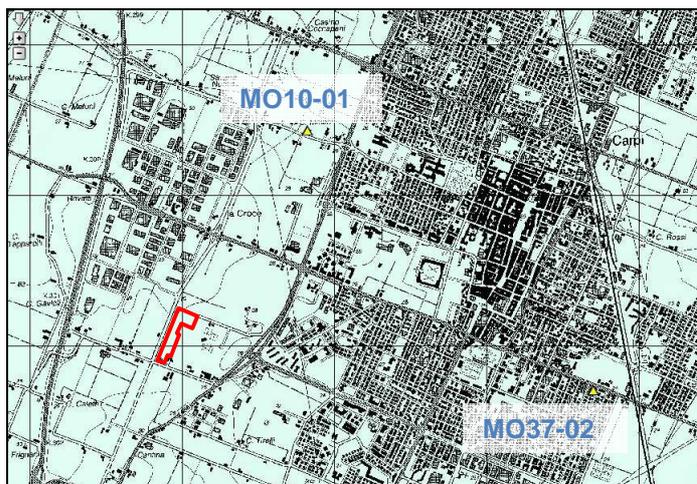


Figura 9. Ubicazione dei pozzi MO10-01 e MO37-02 (triangolo giallo) e dell'area di P.P. (in rosso)

Nel corso delle prove penetrometriche effettuate, è stata rilevata una falda superficiale con soggiacenza da -2.40 a -2.90 m dal p.c. e una pendenza pari a circa lo 0.15 %.

In base alle indicazioni di letteratura è estremamente probabile che la falda, in corrispondenza delle stagioni più piovose, possa risalire anche a quote maggiori, indicativamente ad almeno 1 m dal piano di campagna.

La Tavola A4.5 del PRG di Carpi ("carta della profondità media dei livelli freatici") indica per la zona una profondità media inferiore a 2 m nell'area a sud del P.P., tra 2 e 10 nel settore più a nord.

Le quote diverse delle falde indicano la presenza di una falda superficiale a pelo libero e di più falde profonde sovrapposte, in pressione.

Idrochimica

Per i due pozzi della rete di controllo ARPA citati in precedenza sono disponibili on-line le analisi chimiche di un'ampia serie di parametri (organici ed inorganici), riferiti al periodo monitorato.

Le concentrazioni riportate sono relative a diversi potenziali inquinanti, riferibili ad attività di origine sia agricola che industriale. I pozzi captano gli acquiferi A1 e A2 e quanto esposto nel seguito si riferisce a questi Complesso Acquiferi. I dati sono anche stati confrontati con quelli riportati nel "Report sulle acque superficiali e sotterranee in provincia di Modena anno 2010-2011" (anno 2003), a cura di ARPA.

La conducibilità elettrica specifica di un'acqua è data dal contenuto di sali minerali disciolti, e rappresenta un indicatore del tenore salino e del grado di mineralizzazione. E' quindi utilizzata come un indicatore complessivo delle caratteristiche di qualità. Alti tenori nei valori di conducibilità sono riconducibili:

- alla presenza di acque salmastre, di ingressione marina o di risalita (può accadere in aree vicine alla costa, ma non è il caso dell'area in oggetto);
- ad elevati tempi di permanenza all'interno dell'acquifero, in cui sono presenti acque con età di migliaia di anni (aree del ravennate, aree della bassa pianura ed acquiferi profondi);
- all'elevato contenuto salino dei fiumi che l'alimentano. Il caso più conosciuto è quello della conoide del F. Secchia.

I valori medi di conducibilità per quest'area variano tra circa 700 e 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, non particolarmente elevati e in linea con i valori medi della media pianura.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Nelle analisi presenti la durezza dell'acqua è espressa in termini di mg/l (ppm) di CaCO₃ e, trasformata in gradi francesi, presenta valori medi nell'intorno di 30 °F. Per durezza di un'acqua è da intendersi la concentrazione totale di ioni Ca²⁺ e Mg²⁺ presenti nella stessa e valori superiori a 50 °F indicano acque molto dure.

Le concentrazioni dei solfati sono legate sia alle condizioni idrodinamiche dell'acquifero che alle zone di alimentazione dello stesso. Alte concentrazioni in solfati sono presenti soprattutto nelle aree di conoide del fiume Secchia, che attraversa formazioni gessose (solfato di calcio idrato), e negli acquiferi da questo alimentati.

Negli acquiferi in connessione con acque che ricevono apporti dal fiume Secchia, le concentrazioni medie in solfati sono dell'ordine dei 160-180 mg/l.

Le concentrazioni medie in solfati per le acque del pozzo MO10-01 sono nell'ordine di 0.1 mg/l, quelle del pozzo MO37-02 di 0.1 mg/l in un'analisi, di 41 mg/l nell'altra analisi, e attestano in questo caso un apporto sotterraneo di acque solfate simili a quelle indicate in precedenza.

I cloruri presentano concentrazioni nell'ordine di 13-20 mg/l. Nell'analisi "anomala" di aprile 2009 del pozzo MO37-02 sono presenti valori più elevati di cloruri (30 mg/l), con un incremento meno marcato che per i solfati.

Le caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero e la presenza di ferrobatteri condizionano la presenza nelle acque sotterranee del ferro, che compare in consistenti concentrazioni dove l'acquifero diventa confinato e le acque tendono ad evolversi chimicamente. Le maggiori concentrazioni di ferro nelle acque si presentano nelle aree in cui le condizioni sono più favorevoli alla dissoluzione, mentre dove l'equilibrio tende verso la precipitazione, il ferro entra in minor quantità nelle acque. Nell'area in oggetto, le concentrazioni in ferro variano da meno di 20 a circa 400 mg/l per il pozzo MO37-02, a 1.200-2.000 mg/l per il pozzo MO10-01. E' possibile che una tale variabilità nelle concentrazioni possa essere dovuta sia alla tipologia di Gruppo Acquifero (MO37-02 capta solo A2, MO10-01 sia A1 che A2), che ad una possibile attività batterica.

Il manganese presenta valori decisamente costanti, nell'ordine di 50-70 µg/l, e non mostra le elevate variabilità riscontrate per il ferro.

L'ammoniaca attesta la presenza di un ambiente prevalentemente riducente, con concentrazioni nell'ordine di 3-4 mg/l.

Infine, si osservano valori relativamente elevati nelle concentrazioni in boro, che passa da 550 a quasi 700 mg/l. Non sono presenti nelle immediate vicinanze stabilimenti ceramici e le concentrazioni tendono via via ad aumentare andando in direzione dell'alta pianura, attestando così un'origine naturale per le concentrazioni in questo elemento.

Abbastanza elevate le concentrazioni in arsenico, per cui sono stati misurati da 2 a 14 µg/l nelle acque di questi due pozzi.

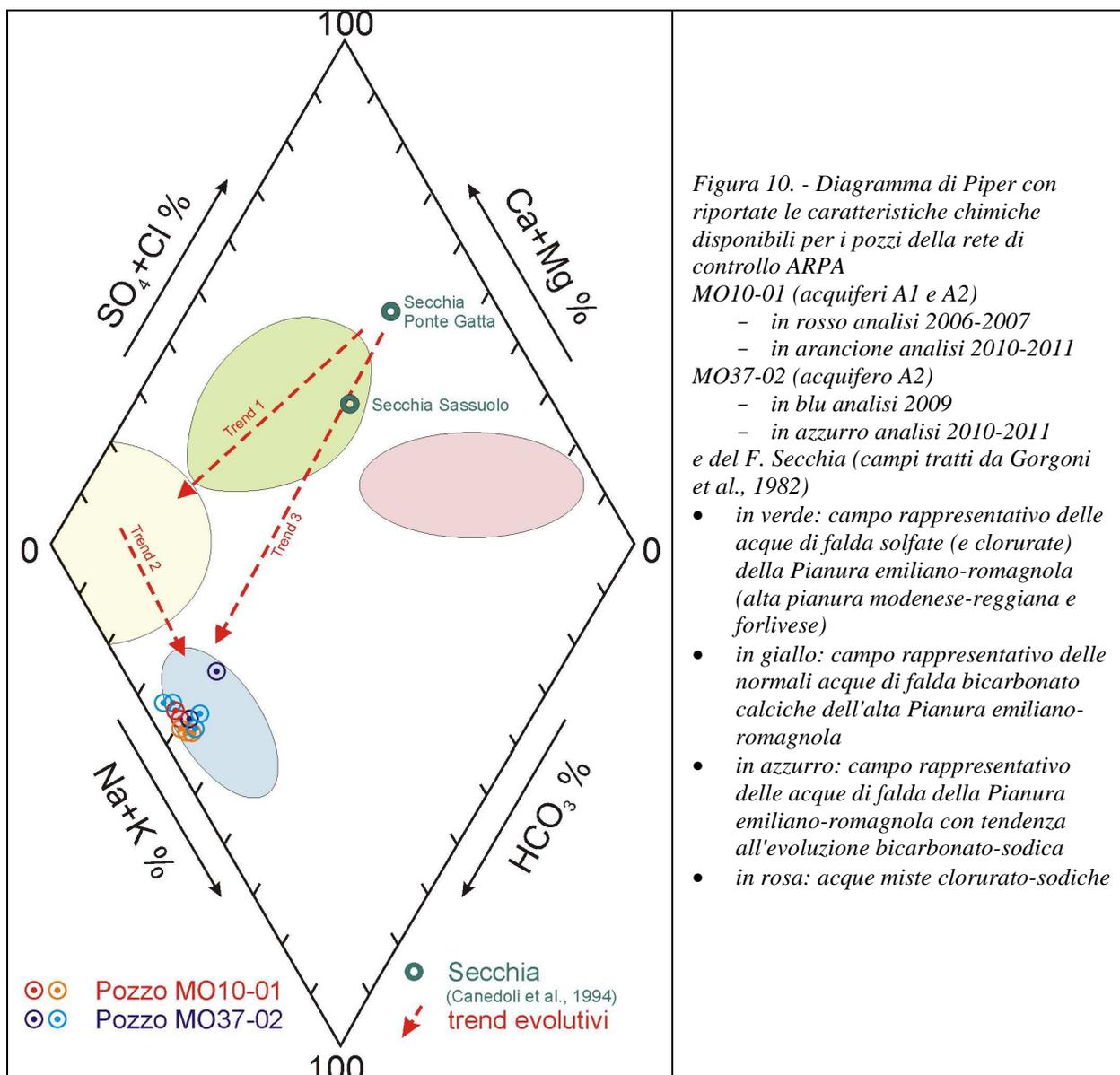
Per definire le caratteristiche idrochimiche di questo acquifero i dati relativi ai due pozzi considerati (banca dati ARPA) e al Fiume Secchia sono stati riportati sul diagramma di Piper (Figura 10). In questo diagramma le concentrazioni delle diverse specie ioniche, espresse in milliequivalenti, vengono espresse come percentuali relativamente alle sommatorie dei cationi (Na+K e Ca+Mg) e degli anioni (SO₄+Cl e HCO₃). Per ognuno dei due pozzi sono stati rappresentati due valori analitici tra quelli riportati nel sito, per verificare la costanza nel tempo delle caratteristiche di queste acque di falda.

Nel diagramma, in cui sono stati riportati anche campi di letteratura per altre acque con diversa evoluzione, sono riconoscibili ed individuabili 3 trend evolutivi principali, rimarcati in figura:

1. Da acque solfato (clorurate) verso normali acque bicarbonato calciche. Si mescola l'acqua che ha dilavato i solfati in Appennino (Poiano e Cerreto) con normali acque sotterranee che hanno interagito con i carbonati presenti in falda (limi, ghiaie, sabbie, etc);

Modellazione geologica e sismica dell'area

- Da normali acque bicarbonato calciche ad acque bicarbonato alcaline (sodiche) per evoluzione in ambienti protetti e riducenti. Idrolisi di silicati in falda e aumento di sodio (K stabile perché fissato in illiti); riduzione batterica del solfato a zolfo e solfuro, riduzione di calcio per precipitazione di carbonati, aumento di metalli pesanti e boro.
- Evoluzione risultante dalla combinazione dei due trend precedenti. Si verifica sia a piccola scala, con modesto sviluppo, sia a scala regionale, nel caso sussistano entrambe le condizioni evidenziate in precedenza.



Dal punto di vista idrochimico le acque di falda presenti nel sottosuolo dell'area presentano infatti una evoluzione bicarbonato-sodica, tipica dell'area della media pianura. Questa evoluzione permette di evidenziare, oltre al confinamento dell'acquifero, un gradiente evolutivo che necessita (in falda) di tempi di interazione con l'acquifero abbastanza lunghi.

Il pozzo MO10-01 (analisi nov. 2006 e mar. 2007) ha evidenziato una elevata costanza nei valori e nelle caratteristiche delle acque. Il pozzo MO37-02, al contrario, ha evidenziato una differenza tra i

Modellazione geologica e sismica dell'area

valori misurati nell'aprile 2009 e nel settembre dello stesso anno. Le analisi di aprile 2009 hanno evidenziato una discreta concentrazione in solfati (oltre 40 mg/l), tale da permettere di ipotizzare una connessione diretta con le acque del F. Secchia (o con falde alimentate dallo stesso nell'alta pianura), che presenta concentrazioni più elevate in solfati (trend evolutivo 3).

Le acque del F. Secchia sono infatti più ricche in solfati per aver attraversato e dilavato nell'alto corso formazioni evaporitiche (evaporiti triassiche) e anche grazie all'apporto di sorgenti ubicate all'interno delle stesse evaporiti (Poiano e Cerreto). Le concentrazioni di solfato, che normalmente sarebbero di svariate decine di ppm, incrementano sensibilmente, passando a valori nettamente superiori, fino ad oltre 200 ppm.

La variabilità osservata per il pozzo MO37-02 indica che in alcuni periodi dell'anno possono essere presenti anche apporti legati all'interazione con acque del F. Secchia, miscelate con altre acque di falda ad evoluzione bicarbonato-sodica, come quelle presenti nel pozzo MO10-01 e nello stesso pozzo MO37-02 in altri periodi dell'anno.

Vulnerabilità dell'acquifero

La vulnerabilità dell'acquifero per l'area considerata (tavola 3.1.1 del PTCP 2009) viene valutata come molto bassa. Secondo quanto riportato nella Tavola 3.1.1, l'acquifero è a pelo libero, il tetto delle sabbie si trova a profondità superiori a 100 m dal p.c. e la capacità di attenuazione del suolo è da alta a media.

Nella Tavola A4.4 del PRG di Carpi ("grado di infiltrazione") viene indicata la presenza di depositi di argini naturali con paleoalvei o dossi e un coefficiente medio di permeabilità $k = 1.6 \times 10^{-5}$ cm/s.

La Tavola A4.6 del PRG ("Carta della vulnerabilità naturale per infiltrazione") indica per la zona un grado di vulnerabilità da media a medio-forte.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Caratterizzazione del primo sottosuolo

Ricostruzione litostratigrafica e modello geologico del sottosuolo

La litostratigrafia dell'area in esame è stata ricavata dalle prove penetrometriche effettuate (riportate in allegato), dalle misure sismiche e dai dati di letteratura (per gli orizzonti più profondi).

Le prove penetrometriche statiche a punta meccanica sono state spinte alla profondità massima di 20.2 m dal p.c., la prova con punta elettrica a 25.4 m dal p.c.

Complessivamente, il modello geologico del sottosuolo presente nell'area che viene elaborato e proposto è il seguente. Dal momento che nelle diverse prove alcuni orizzonti sono stati incontrati a profondità leggermente differente, è stata approssimata e mediata la profondità dei diversi orizzonti considerati. Le litologie sono state interpretate utilizzando la metodologia proposta da Robertson (1983). Per il dettaglio degli orizzonti raggiunti dalle prove penetrometriche è stata utilizzata prevalentemente la litologia ricavata dalle CPTU, caratterizzata da un maggior dettaglio in fase di esecuzione della prova e (solitamente) da una maggior attendibilità per la ricostruzione delle litologie.

profondità (m)	descrizione
0-1.2	Primo orizzonte costituito da limi e limi sabbiosi, con valori di resistenza anomalmente elevati da circa 0.6 a circa 1.0 m di profondità (picco a 0.8, appena sotto all'orizzonte arato), costanti nelle quattro prove effettuate.
1.4-3.6	secondo orizzonte in cui sono presenti terreni coesivi, a matrice prevalentemente argillosa. Nella prova CPTU la profondità di questo orizzonte è stata valutata pari a 3.60 m dal p.c., nelle altre prove CPT variabile da 7.0 a 11.0 m, non essendo presente lo stesso livello di dettaglio e anche in presenza di valori leggermente differenti tra prove CPT e CPTU.
3.6-11.0	alternanze di limi argillosi e limi sabbiosi, a duplice comportamento (incoerente e coesivo) Nelle prove CPT è stata riconosciuta come prevalente la matrice coesiva, nella CPTU quella limosa a duplice comportamento.
11.0-18.0/18.4	alternanze di limi e limi sabbiosi, a duplice comportamento (incoerente e coesivo). In questo caso la corrispondenza tra le litologie indicate nelle CPT e nella CPTU è abbastanza buona.
18.2-19.6	nella sola CPTU è stato distinto un orizzonte costituito da alternanze di limi argillosi e limi sabbiosi a duplice comportamento (incoerente e coesivo) Nelle prove CPT è stata riconosciuta come prevalente la matrice coesiva
19.6-20.6	terreni prevalentemente argillosi, a comportamento coesivo, evidenziati sia nella CPT 2 che nella CPTU
20.6-25.4	alternanze di limi argillosi e limi sabbiosi, a duplice comportamento (incoerente e coesivo)
25.4-53	alternanze di terreni prevalentemente pelitici (argille, limi, limi argillosi e/o sabbiosi) con radi strati sabbiosi. Orizzonte probabilmente corrispondente alla Unità di Vignola e individuato dalle misure delle velocità delle onde sismiche effettuate con la metodologia ESAC, con un leggero incremento di velocità a 35 m dal piano di campagna. Questo orizzonte rappresenta con ogni probabilità la prosecuzione di quello individuato nella CPTU a partire dalla profondità di 20.6 m dal p.c., profondità alla quale, in base alle indicazioni di letteratura, dovrebbe terminare il Subsistema di Ravenna.
53-81	alternanze di terreni prevalentemente pelitici (argille, limi, limi argillosi e/o sabbiosi) con radi strati sabbiosi. Orizzonte probabilmente corrispondente alla Unità di Niviano e individuato dalle misure delle velocità delle onde sismiche effettuate con la metodologia ESAC, con un leggero incremento di velocità a 72 m dal piano di campagna. Acquiferi del complesso A1.
82-126	terreni appartenenti all'Unità di Bazzano. Per profondità analoghe nei sondaggi profondi di Medolla nord e Mirandola sud (più a nord rispetto alla zona in oggetto) sono riportate alternanze di limi e sabbie. In questa zona hanno sede gli acquiferi dei complessi A2.
> 126	orizzonte con elevato contrasto di impedenza rispetto al precedente (rif. HVSR). Probabile Bedrock sismico.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Omogeneità e coerenza delle prove CPT

Nelle quattro prove effettuate sono state riscontrate alcune differenze relative all'omogeneità del sottosuolo e alcune problematiche nel corso dell'esecuzione delle prove. Nel dettaglio:

- il primo orizzonte superficiale è apparso omogeneo nelle quattro prove considerate, con un picco dei valori alla profondità di 0.8 m dal piano di campagna
- la prova CPTU ha fornito quasi sempre valori di resistenza inferiori rispetto alle CPT. In questo caso la differenza non è limitata alla sola resistenza laterale RI (discrepanza già nota in letteratura), ma viene evidenziata anche nelle letture di resistenza alla punta.
- fino alla profondità di 11 m circa dal piano di campagna le tre prove penetrometriche a punta meccanica (CPT) sono quasi perfettamente sovrapponibili. L'unica differenza è una piccola lente più sabbiosa, presente tra 7 e 8 metri nella prova CPT1
- all'interno di questo intervallo la prova CPTU ha individuato un orizzonte presente tra 3.6 e 8.4 metri (limi argillosi e limi sabbiosi), caratterizzata da resistenze inferiori rispetto agli orizzonti sia sovrastanti che sottostanti. La differenza può essere dovuta alla maggiore sensibilità di questo tipo di prova, ma è anche possibile che si tratti di una eteropia laterale
- da 11 a 18 metri circa continua una discreta omogeneità tra le prove effettuate. Sono visibili scostamenti e discrepanze legati alle diverse profondità delle lenti e dei livelli più sabbiosi, ma nel complesso i valori risultano paragonabili. La prova CPTU non si discosta particolarmente, ma mostra comunque valori mediamente inferiori rispetto alle altre
- da 18 m fino alla profondità indagata (20.2 m) le tre prove CPT mostrano valori alla punta pressochè sovrapponibili, valori laterali con qualche differenza ma molto simili tra loro. In questo intervallo la CPTU si discosta parecchio, sia per quanto riguarda i valori di lettura alla punta (Rp) che quelli laterali (RI)
- la profondità massima raggiunta dalla prova CPTU (25.4 m) è stata tale in quanto l'angolo di inclinazione delle aste sconsigliava la prosecuzione della stessa.

Nel complesso, pur essendo presenti alcune eteropie laterali e diverse differenze tra i valori misurati nelle prove CPT e CPTU, per tutta la profondità indagata dalle prove penetrometriche (25.4 m) sono presenti terreni o a comportamento esclusivamente coesivo (matrice argillosa) o misto (incoerente-coesivo). Una più o meno accentuata componente coesiva è presente in tutti gli orizzonti indagati. Non sono state individuate sabbie a comportamento esclusivamente incoerente.

I grafici interpretativi delle tre prove CPT, della CPTU e le tabelle con i singoli valori sono riportati in allegato.

Nel seguito vengono riportati i grafici di confronto (figura 11) per le quattro prove.

Modellazione geologica e sismica dell'area

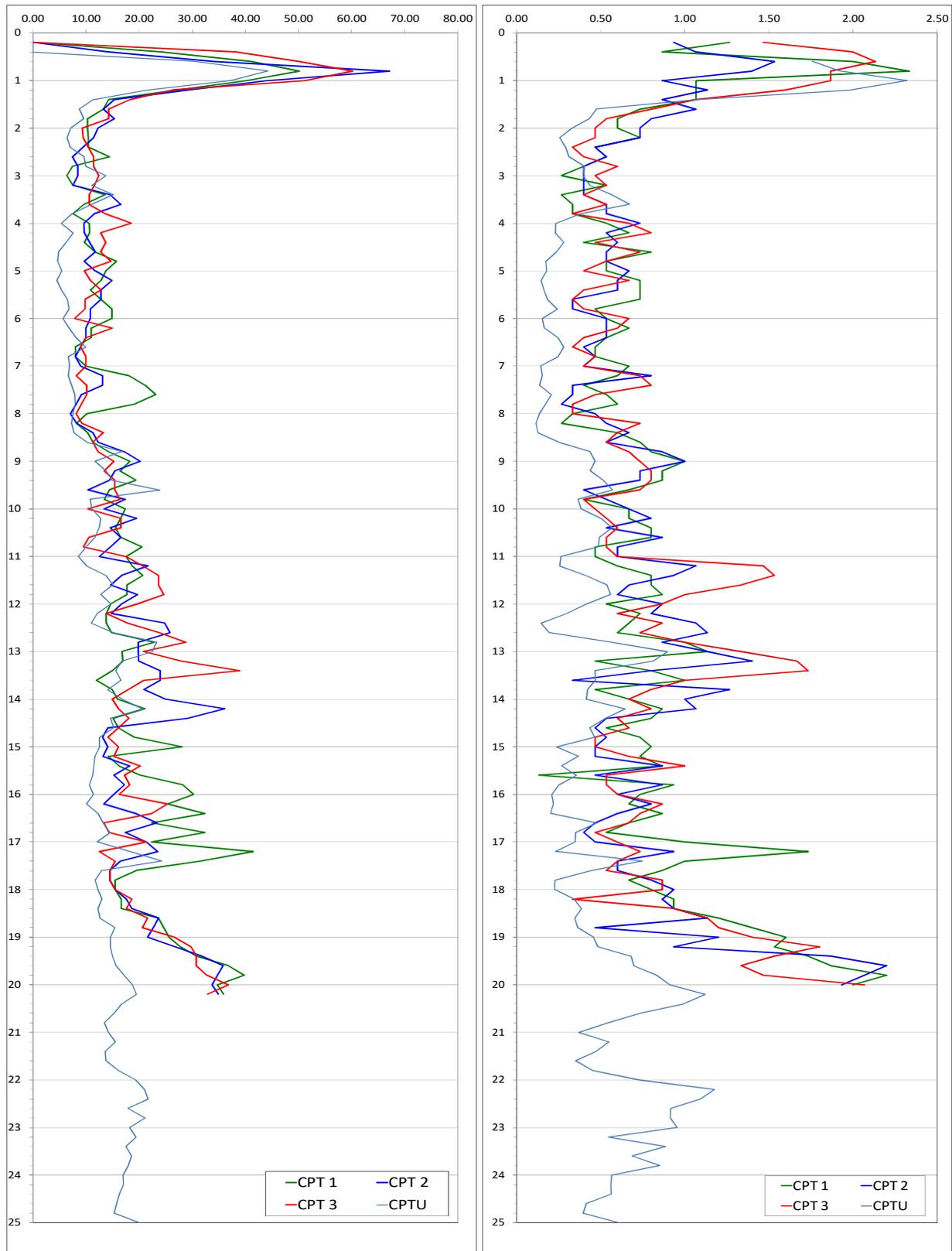


Figura 11. Diagrammi R_p (a sinistra) e R_l (a destra) con la sovrapposizione delle 3 prove CPT e della prova CPTU. In ordinata profondità in metri, in ascissa la resistenza in kg/cm^2 .

Modellazione geologica e sismica dell'area

Prove penetrometriche

In base ai risultati delle prove penetrometriche effettuate, sono stati individuati diversi orizzonti superficiali (da 7 nelle CPT1 - 3 a 12 nella CPTU, in cui è presente un maggior dettaglio). Il diverso numero di orizzonti considerati dipende sia dalle variazioni litologiche e granulometriche dei terreni presenti che dalle loro caratteristiche di resistenza.

Elaborazione dei dati

In base ai risultati delle prove CPT e CPTU sono stati distinti una serie di livelli che, anche se trattati come unità separate, in realtà non sempre costituiscono dei veri e propri strati ma piuttosto una serie di orizzonti formati da alternanze di sedimenti più o meno fini, con caratteristiche geotecniche simili. I parametri geotecnici riportati nel seguito sono i valori medi per i diversi orizzonti e sono stati ricavati utilizzando le seguenti correlazioni:

Per i terreni coesivi:

- la coesione non drenata (c_u) è stata ricavata utilizzando la correlazione di Terzaghi
- modulo edometrico (Eed): Metodo generale del modulo edometrico
- Modulo di deformazione a taglio G: Imai & Tomauchi
- Peso per unità di volume: relazione di Meyerhof
- Peso per unità di volume dei terreni saturi (nell'ipotesi di falda): Meyerhof

Per i terreni incoerenti:

- La densità relativa (%) Baldi 1978 - Schmertmann 1976
- L'angolo di resistenza al taglio (ϕ) con il metodo di De Beer
- modulo edometrico (Eed): Mitchell & Gardner 1975
- Modulo di reazione K_0 : Kulhawy & Mayne (1990)
- modulo di Young: Robertson & Campanella (1983)
- Modulo di deformazione a taglio G: Imai & Tomauchi
- Peso per unità di volume: relazione di Meyerhof ed altri
- Peso per unità di volume dei terreni saturi (nell'ipotesi di falda): Meyerhof
- Fattore di sicurezza alla liquefazione: Robertson & Wride 1997, non scalato (per sisma $M=7.5$)

Complessivi:

- Grado di consolidazione: stress-history
- Coefficiente di consolidazione: Piacentini-Righi 1988
- permeabilità: Piacentini-Righi 1988

Modellazione geologica e sismica dell'area

CPT 1

DATI GENERALI	Profondità base orizzonte (m)	qc Media (Kg/cm ²)	fs Media (Kg/cm ²)	Comp. Geotecnico	Descrizione
Orizzonte 1	1.20	30.50	1.44	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 2	7.00	11.08	0.56	Coesivo	Argille
Orizzonte 3	7.80	20.35	0.53	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
Orizzonte 4	15.40	16.20	0.71	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 5	17.40	28.63	0.83	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
Orizzonte 6	18.40	16.74	0.84	Coesivo	Argille
Orizzonte 7	20.20	31.06	1.50	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi

TERRENI COESIVI	Profondità base orizzonte (m)	Cu media (kPa)	Modulo Edometrico Eed (MPa)	Peso unità di volume (kN/m ³)	Peso unità di volume saturo (kN/m ³)	Modulo di deformazione a taglio G (MPa)
Orizzonte 1	1.20	149.1	6.0	20.0	20.8	22.2
Orizzonte 2	7.00	53.9	4.5	18.2	19.0	11.9
Orizzonte 3	7.80	100.0	4.0	19.3	20.1	17.3
Orizzonte 4	15.40	79.4	4.7	18.8	19.6	15.1
Orizzonte 5	17.40	140.2	5.6	19.8	20.6	21.3
Orizzonte 6	18.40	82.4	4.7	18.8	19.6	15.4
Orizzonte 7	20.20	152.0	6.1	20.0	20.8	22.4

TERRENI INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Modulo di Young (MPa)	Modulo Edometrico Eed (MPa)	Peso unità di volume (kN/m ³)	Peso unità di volume saturo (kN/m ³)	Modulo di deformazione a taglio G (MPa)
Orizzonte 1	1.20	6.0	6.0	17.7	20.6	22.2
Orizzonte 2	7.00	/	/	/	/	/
Orizzonte 3	7.80	4.0	4.0	17.7	20.6	17.3
Orizzonte 4	15.40	3.2	3.2	17.7	20.6	15.1
Orizzonte 5	17.40	5.6	5.6	17.7	20.6	21.3
Orizzonte 6	18.40	/	/	/	/	/
Orizzonte 7	20.20	6.1	6.1	17.7	20.6	22.4

TERRENI INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Densità relativa (%)	Angolo di resistenza al taglio (°)	Modulo di reazione Ko	Fattore di compressibilità C	Fattore di compressibilità Crm	Fattore di sicurezza a liquefazione*
Orizzonte 1	1.20	62.27	32.26	1.11	0.12111	0.01574	19.606
Orizzonte 2	7.00	/	/	/	/	/	/
Orizzonte 3	7.80	21.04	20.38	0	0.13236	0.01721	0.745
Orizzonte 4	15.40	< 5	17.71	0	0.14911	0.01938	0.717
Orizzonte 5	17.40	< 5	19.08	0	0.11345	0.01475	0.803
Orizzonte 6	18.40	/	/	/	/	/	/
Orizzonte 7	20.20	< 5	18.78	0	0.12041	0.01565	1.056

*Accelerazione sismica massima (g)=0,15 - Sisma magnitudo M=7.5

TERRENI COESIVI ED INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Grado di sovraconsolidazione	Coefficiente di consolidazione (cm ² /s)	Permeabilità (cm/s)
Orizzonte 1	1.20	5.91	1.24E-04	1.36E-09
Orizzonte 2	7.00	<0.5	4.12E-05	1.24E-09
Orizzonte 3	7.80	<0.5	2.34E+00	3.83E-05
Orizzonte 4	15.40	<0.5	1.05E-03	2.16E-08
Orizzonte 5	17.40	<0.5	9.72E-01	1.13E-05
Orizzonte 6	18.40	<0.5	4.58E-05	9.12E-10
Orizzonte 7	20.20	<0.5	5.58E-05	5.99E-10

Modellazione geologica e sismica dell'area

CPT 2

DATI GENERALI	Profondità base orizzonte (m)	qc Media (Kg/cm ²)	fs Media (Kg/cm ²)	Comp. Geotecnico	Descrizione
Orizzonte 1	1.20	31.50	1.16	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 2	11.00	12.05	0.58	Coesivo	Argille
Orizzonte 3	14.40	21.94	0.91	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 4	16.20	14.85	0.62	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 5	17.20	20.98	0.57	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
Orizzonte 6	18.40	16.19	0.79	Coesivo	Argille
Orizzonte 7	20.20	29.51	1.50	Coesivo	Argille

TERRENI COESIVI	Profondità base orizzonte (m)	Cu media (kPa)	Modulo Edometrico Eed (MPa)	Peso unità di volume (kN/m ³)	Peso unità di volume saturo (kN/m ³)	Modulo di deformazione a taglio G (MPa)
Orizzonte 1	1.20	154.0	6.2	20.1	20.9	22.6
Orizzonte 2	11.00	58.8	4.6	18.4	19.2	12.6
Orizzonte 3	14.40	107.9	4.3	19.4	20.2	18.1
Orizzonte 4	16.20	72.6	4.7	18.6	19.4	14.3
Orizzonte 5	17.20	103.0	4.1	19.3	20.1	17.6
Orizzonte 6	18.40	79.4	4.7	18.8	19.6	15.1
Orizzonte 7	20.20	145.1	5.8	19.9	20.7	21.7

TERRENI INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Modulo di Young (MPa)	Modulo Edometrico Eed (MPa)	Peso unità di volume (kN/m ³)	Peso unità di volume saturo (kN/m ³)	Modulo di deformazione a taglio G (MPa)
Orizzonte 1	1.20	6.2	6.2	17.7	20.6	22.6
Orizzonte 2	11.00	/	/	/	/	/
Orizzonte 3	14.40	4.3	4.3	17.7	20.6	18.1
Orizzonte 4	16.20	2.9	2.9	17.7	20.6	14.3
Orizzonte 5	17.20	4.1	4.1	17.7	20.6	17.6
Orizzonte 6	18.40	/	/	/	/	/
Orizzonte 7	20.20	/	/	/	/	/

TERRENI INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Densità relativa (%)	Angolo di resistenza al taglio (°)	Modulo di reazione Ko	Fattore di compressibilità C	Fattore di compressibilità Crm	Fattore di sicurezza a liquefazione*
Orizzonte 1	1.20	63.19	32.41	1.13	0.1199	0.01559	13.911
Orizzonte 2	11.00	/	/	/	/	/	/
Orizzonte 3	14.40	< 5	18.79	0	0.12761	0.01659	0.764
Orizzonte 4	16.20	< 5	16.18	0	0.15659	0.02036	0.618
Orizzonte 5	17.20	< 5	17.47	0	0.13041	0.01695	0.675
Orizzonte 6	18.40	/	/	/	/	/	/
Orizzonte 7	20.20	/	/	/	/	/	/

*Accelerazione sismica massima (g)=0,15 - Sisma magnitudo M=7.5

TERRENI COESIVI ED INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Grado di sovraconsolidazione	Coefficiente di consolidazione (cm ² /s)	Permeabilità (cm/s)
Orizzonte 1	1.20	2.81E-02	6.1	2.98E-07
Orizzonte 2	11.00	1.40E-04	<0.5	3.87E-09
Orizzonte 3	14.40	0.00268	<0.5	4.07E-08
Orizzonte 4	16.20	2.78E-03	<0.5	6.24E-08
Orizzonte 5	17.20	1.478834	<0.5	2.35E-05
Orizzonte 6	18.40	9.96E-05	<0.5	2.05E-09
Orizzonte 7	20.20	1.36E-05	<0.5	1.54E-10

Modellazione geologica e sismica dell'area

CPT 3

DATI GENERALI	Profondità base orizzonte (m)	qc Media (Kg/cm ²)	fs Media (Kg/cm ²)	Comp. Geotecnico	Descrizione
Orizzonte 1	1.20	37.66	1.82	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 2	10.80	11.98	0.55	Coesivo	Argille
Orizzonte 3	13.60	23.04	1.12	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 4	15.40	16.51	0.68	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 5	17.00	18.55	0.63	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 6	18.00	14.48	0.72	Coesivo	Argille
Orizzonte 7	20.20	27.16	1.20	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi

TERRENI COESIVI	Profondità base orizzonte (m)	Cu media (kPa)	Modulo Edometrico Eed (MPa)	Peso unità di volume (kN/m ³)	Peso unità di volume saturo (kN/m ³)	Modulo di deformazione a taglio G (MPa)
Orizzonte 1	1.20	184.4	7.4	20.4	21.2	25.2
Orizzonte 2	10.80	58.8	4.6	18.4	19.2	12.5
Orizzonte 3	13.60	112.8	4.5	19.5	20.3	18.7
Orizzonte 4	15.40	81.4	4.7	18.8	19.6	15.2
Orizzonte 5	17.00	91.2	4.4	19.0	19.8	16.4
Orizzonte 6	18.00	70.6	4.7	18.6	19.4	14.1
Orizzonte 7	20.20	133.4	5.3	19.7	20.5	20.6

TERRENI INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Modulo di Young (MPa)	Modulo Edometrico Eed (MPa)	Peso unità di volume (kN/m ³)	Peso unità di volume saturo (kN/m ³)	Modulo di deformazione a taglio G (MPa)
Orizzonte 1	1.20	7.4	7.4	17.7	20.6	25.2
Orizzonte 2	10.80	/	/	/	/	/
Orizzonte 3	13.60	4.5	4.5	17.7	20.6	18.7
Orizzonte 4	15.40	3.2	3.2	17.7	20.6	15.2
Orizzonte 5	17.00	3.6	3.6	17.7	20.6	16.4
Orizzonte 6	18.00	/	/	/	/	/
Orizzonte 7	20.20	5.3	5.3	17.7	20.6	20.6

TERRENI INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Densità relativa (%)	Angolo di resistenza al taglio (°)	Modulo di reazione Ko	Fattore di compressibilità C	Fattore di compressibilità Crm	Fattore di sicurezza a liquefazione*
Orizzonte 1	1.20	68.27	33.26	1.27	0.11372	0.01478	26.447
Orizzonte 2	10.80	/	/	/	/	/	/
Orizzonte 3	13.60	< 5	19.36	0	0.12473	0.01621	0.84
Orizzonte 4	15.40	< 5	17.06	0	0.14754	0.01918	0.634
Orizzonte 5	17.00	< 5	17.17	0	0.13871	0.01803	0.653
Orizzonte 6	18.00	/	/	/	/	/	/
Orizzonte 7	20.20	< 5	18.29	0	0.11596	0.01508	0.887

*Accelerazione sismica massima (g)=0,15 - Sisma magnitudo M=7.5

TERRENI COESIVI ED INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Grado di sovraconsolidazione	Coefficiente di consolidazione (cm ² /s)	Permeabilità (cm/s)
Orizzonte 1	1.20	7.3	3.66E-05	3.24E-10
Orizzonte 2	10.80	<0.5	3.55E-04	9.88E-09
Orizzonte 3	13.60	<0.5	6.99E-05	1.01E-09
Orizzonte 4	15.40	<0.5	3.09E-03	6.25E-08
Orizzonte 5	17.00	<0.5	9.49E-02	1.70E-06
Orizzonte 6	18.00	<0.5	6.29E-05	1.45E-09
Orizzonte 7	20.20	<0.5	6.96E-04	8.55E-09

Modellazione geologica e sismica dell'area

CPTU

DATI GENERALI	Profondità base orizzonte (m)	qc Media (Kg/cm ²)	fs Media (Kg/cm ²)	Comp. Geotecnico	Descrizione
Orizzonte 1	1.20	22.20	1.33	/	/
Orizzonte 2	3.60	10.07	0.47	Coesivo	Argille
Orizzonte 3	8.40	6.70	0.20	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 4	9.60	15.17	0.45	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 5	11.80	11.73	0.44	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 6	14.80	16.09	0.48	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
Orizzonte 7	17.40	13.34	0.33	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
Orizzonte 8	18.20	12.46	0.31	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
Orizzonte 9	19.60	14.31	0.49	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 10	20.60	17.46	0.92	Coesivo	Argille
Orizzonte 11	22.00	15.11	0.49	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
Orizzonte 12	25.40	18.42	0.76	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi

TERRENI COESIVI	Profondità base orizzonte (m)	Cu media (kPa)	Modulo Edometrico Eed (MPa)	Peso unità di volume (kN/m ³)	Peso unità di volume saturo (kN/m ³)	Modulo di deformazione a taglio G (MPa)
Orizzonte 1	1.20	/	/	/	/	/
Orizzonte 2	3.60	49.0	4.3	18.1	18.9	11.3
Orizzonte 3	8.40	32.4	3.3	17.4	18.1	8.8
Orizzonte 4	9.60	74.5	4.7	18.8	19.6	14.5
Orizzonte 5	11.80	57.9	4.6	18.3	19.1	12.4
Orizzonte 6	14.80	78.5	4.7	18.8	19.6	15.0
Orizzonte 7	17.40	65.7	4.7	18.4	19.2	13.4
Orizzonte 8	18.20	60.8	4.6	18.3	19.1	12.8
Orizzonte 9	19.60	70.6	4.7	18.5	19.3	14.0
Orizzonte 10	20.60	85.3	4.6	18.9	19.7	15.8
Orizzonte 11	22.00	74.5	4.7	18.6	19.4	14.4
Orizzonte 12	25.40	90.2	4.4	19.0	19.8	16.3

TERRENI INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Modulo di Young (MPa)	Modulo Edometrico Eed (MPa)	Peso unità di volume (kN/m ³)	Peso unità di volume saturo (kN/m ³)	Modulo di deformazione a taglio G (MPa)
Orizzonte 1	1.20	/	/	/	/	/
Orizzonte 2	3.60	/	/	/	/	/
Orizzonte 3	8.40	1.3	1.3	17.7	20.6	8.8
Orizzonte 4	9.60	3.0	3.0	17.7	20.6	14.5
Orizzonte 5	11.80	2.3	2.3	17.7	20.6	12.4
Orizzonte 6	14.80	3.2	3.2	17.7	20.6	15.0
Orizzonte 7	17.40	2.6	2.6	17.7	20.6	13.4
Orizzonte 8	18.20	2.4	2.4	17.7	20.6	12.8
Orizzonte 9	19.60	2.8	2.8	17.7	20.6	14.0
Orizzonte 10	20.60	/	/	/	/	/
Orizzonte 11	22.00	3.0	3.0	17.7	20.6	14.4
Orizzonte 12	25.40	3.6	3.6	17.7	20.6	16.3

Modellazione geologica e sismica dell'area

TERRENI INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Densità relativa (%)	Angolo di resistenza al taglio (°)	Modulo di reazione Ko	Fattore di compressibilità C	Fattore di compressibilità Crm	Fattore di sicurezza a liquefazione*
Orizzonte 1	1.20	/	/	/	/	/	/
Orizzonte 2	3.60	/	/	/	/	/	/
Orizzonte 3	8.40	< 5	16.7	0	0.26551	0.03452	0.501
Orizzonte 4	9.60	< 5	19.14	0	0.1547	0.02011	0.599
Orizzonte 5	11.80	< 5	17.2	0	0.18038	0.02345	0.536
Orizzonte 6	14.80	< 5	17.78	0	0.14967	0.01946	0.6
Orizzonte 7	17.40	< 5	16.06	0	0.16673	0.02167	0.549
Orizzonte 8	18.20	< 5	15.29	0	0.17378	0.02259	0.537
Orizzonte 9	19.60	< 5	15.69	0	0.15994	0.02079	0.607
Orizzonte 10	20.60	/	/	/	/	/	/
Orizzonte 11	22.00	< 5	15.42	0	0.155	0.02015	0.656
Orizzonte 12	25.40	< 5	15.88	0	0.13921	0.0181	0.73

*Accelerazione sismica massima (g)=0,15 - Sisma magnitudo M=7.5

TERRENI COESIVI ED INCOERENTI	Profondità base orizzonte (m)	Grado di sovraconsolidazione	Coefficiente di consolidazione (cm ² /s)	Permeabilità (cm/s)
Orizzonte 1	1.20	/	6.66E-07	1.00E-11
Orizzonte 2	3.60	0.61	2.89E-04	9.56E-09
Orizzonte 3	8.40	<0.5	2.69E-01	1.34E-05
Orizzonte 4	9.60	<0.5	4.74E-01	1.04E-05
Orizzonte 5	11.80	<0.5	1.57E-02	4.47E-07
Orizzonte 6	14.80	<0.5	4.62E-01	9.58E-06
Orizzonte 7	17.40	<0.5	3.12E+00	7.80E-05
Orizzonte 8	18.20	<0.5	2.61E+00	6.99E-05
Orizzonte 9	19.60	<0.5	6.69E-02	1.56E-06
Orizzonte 10	20.60	<0.5	1.30E-05	2.48E-10
Orizzonte 11	22.00	<0.5	1.29E-01	2.84E-06
Orizzonte 12	25.40	<0.5	3.61E-03	6.53E-08

I parametri geotecnici calcolati e riportati nelle precedenti tabelle, sono costituiti dai **valori medi** per gli orizzonti interessati.

Per la CPTU sono stati mediati i valori misurati ogni 20 cm, allo scopo di renderla confrontabile con le altre prove penetrometriche effettuate

Valori caratteristici e valori di progetto

L'EC7, al punto 2.4.5.2 2(P), definisce quanto segue:

"Il valore caratteristico di un parametro geotecnico sarà scelto come una stima cautelativa del valore che influenza l'insorgere dello stato limite"

Il DM 14/01/2008, "Norme tecniche per le costruzioni", ha adottato il concetto dei valori caratteristici, senza peraltro chiarirne la definizione e determinazione.

Il concetto dei valori caratteristici consiste nel caratterizzare un'intera distribuzione statistica dei parametri geotecnici di interesse mediante una stima puntuale a carattere cautelativo (modello semiprobabilistico). Tale stima puntuale viene generalmente individuata da un basso percentile, calcolato sulla distribuzione del parametro che influenza l'insorgere dello stato limite (ad esempio la media campionaria quando lo stato limite è influenzato dalla media spaziale dei dati o la media della distribuzione quando lo stato limite è influenzato dalla media locale dei dati). A tale scopo si adotta di

Modellazione geologica e sismica dell'area

solito il 5° percentile (Da: L. "McCoy" Nori "Introduzione operativa al concetto dei valori caratteristici secondo l'Eurocodice 7 norma europea prEN1997-1).

Infatti, secondo quanto indicato da EC7 2.4.5.2: "se si utilizzano metodi statistici, il valore caratteristico dovrebbe essere ricavato in maniera tale che la probabilità calcolata di valori più sfavorevoli, che determinano la manifestazione dello stato limite, non sia maggiore del 5%.

La trattazione statistica dei dati non è obbligatoria secondo l'EC7; tuttavia, non viene indicato un obiettivo e chiaro procedimento alternativo.

La distribuzione del valor medio, nel caso di distribuzione normale, viene generalmente calcolata utilizzando la 't' di Student ad n-1 gradi di libertà ed ipotizzando che la media del campione coincida con la media della popolazione, usando la seguente relazione:

$$x_k = \bar{x} \pm t_{n-1}^{0.95} \left(\frac{s}{\sqrt{n-1}} \right)$$

Dove:

x_k è il valore caratteristico desiderato

x con barra il valore medio (ignoto) della popolazione, ipotizzato essere uguale al valore medio del campione

t è il valore della distribuzione di student ad n-1 gradi di libertà con probabilità u = 95% (ossia, 1-α = 0.95 o alternativamente, α = 0.05)

s è la deviazione standard del campione

n il numero di dati.

I valori di progetto dei parametri geotecnici, X_d, possono essere ricavati dai valori caratteristici, utilizzando la seguente equazione:

$$X_d = X_k / \gamma_m$$

Nel caso di popolazioni di valori troppo esigue per poter trattare in modo adeguato dal punto di vista statistico i valori (< 4 valori), si opera una riduzione dei valori medi come ipotizzata nell'EC7 e cioè

$$x_k = \bar{x} \times \left(1 - \left(1.645 \times \left(\frac{\sigma}{\bar{x}} \right) \right) \right)$$

Dove:

x_k è il valore caratteristico desiderato

x con barra il valore medio (ignoto) della popolazione, ipotizzato essere uguale al valore medio del campione

σ è la deviazione standard del campione

Le Resistenze di Progetto (valori di progetto R_d) vengono ricavate applicando una serie di coefficienti parziali (γ_m) ai principali parametri geotecnici del terreno (Tabella 6.2. Il NTC).

Sono previsti due approcci:

- **M1**, in cui non vengono effettuate riduzioni (γ = 1) alle caratteristiche geotecniche dei terreni. In questo scenario, si è scelto cautelativamente di utilizzare il valore caratteristico, di cui si è parlato in precedenza, in cui viene comunque effettuata una riduzione al 5° percentile della media
- **M2**, in cui vengono applicati i coefficienti parziali (γ = 1,4 per C_u; γ = 1,25 per c' e Φ,) alle caratteristiche geotecniche dei terreni, riducendole drasticamente.

Il peso dell'unità di volume non varia con l'applicazione dei coefficienti parziali, sia per l'approccio M1 che M2.

Il calcolo dei valori caratteristici e dei valori di progetto negli scenari M1 e M2, per il parametro c_u (e per F, nei casi in cui è stato possibile ricavarlo) è riportato nelle tabelle seguenti.

Modellazione geologica e sismica dell'area

TABELLA 1 – CPT1 - valori caratteristici (Xk) valori di progetto (Xd)

orizzonte	Prof. (m)	cu Media (KPa)	Valori caratteristici		Φ° medio	Valori caratteristici		Comp. Geotecnico	Descrizione
			Cu - Xk (KPa)	Cu - Xd (KPa)		Φ - Xk ($^\circ$)	Φ - Xd ($^\circ$)		
1*	1.20	149.1	100.4	71.7	32.26	29.8	24.6	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
2	7.00	53.9	49.4	35.3	/			Coesivo	Argille
3	7.80	100.0	83.7	59.8	20.38	19.6	15.9	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
4	15.40	79.4	73.9	52.8	17.71	17.3	14.0	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
5	17.40	140.2	118.7	84.8	19.08	18.4	14.9	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
6	18.40	82.4	70.7	50.5	/			Coesivo	Argille
7	20.20	152.0	130.5	93.2	18.78	17.9	14.5	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi

TABELLA 2 – CPT2 - valori caratteristici (Xk) e valori di progetto (Xd)

orizzonte	Prof. Strato (m)	cu Media (KPa)	Valori caratteristici		Φ° medio	Valori caratteristici		Comp. Geotecnico	Descrizione
			Cu - Xk (KPa)	Cu - Xd (KPa)		Φ - Xk ($^\circ$)	Φ - Xd ($^\circ$)		
1*	1.20	154.0	73.0	52.2	32.41	30.0	24.7	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
2	11.00	58.8	54.6	39.0	/			Coesivo	Argille
3	14.40	107.9	95.4	68.1	18.79	18.4	14.9	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
4	16.20	72.6	66.1	47.2	16.18	15.8	12.8	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
5	17.20	103.0	88.1	62.9	17.47	16.9	13.6	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
6	18.40	79.4	71.1	50.8	/			Coesivo	Argille
7	20.20	145.1	125.2	89.4	/			Coesivo	Argille

TABELLA 3 – CPT3 - valori caratteristici (Xk) e valori di progetto (Xd)

orizzonte	Prof. Strato (m)	cu Media (KPa)	Valori caratteristici		Φ° medio	Valori caratteristici		Comp. Geotecnico	Descrizione
			Cu - Xk (KPa)	Cu - Xd (KPa)		Φ - Xk ($^\circ$)	Φ - Xd ($^\circ$)		
1*	1.20	184.4	126.9	90.7	33.26	30.2	24.9	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
2	10.80	58.8	55.3	39.5	/			Coesivo	Argille
3	13.60	112.8	97.4	69.6	19.36	18.8	15.3	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
4	15.40	81.4	74.7	53.3	17.06	16.7	13.5	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
5	17.00	91.2	75.2	53.7	17.17	16.4	13.3	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
6	18.00	70.6	63.5	45.3	/			Coesivo	Argille
7	20.20	133.4	115.1	82.2	18.29	17.7	14.3	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi

* Nota: l'orizzonte 1 è stato calcolato a partire da 40 cm dal p.c.

Modellazione geologica e sismica dell'area

TABELLA 4 – CPTU - valori caratteristici (Xk) e valori di progetto (Xd)

orizzonte	Prof. Strato (m)	cu Media (KPa)	Valori caratteristici		Φ° medio	Valori caratteristici		Comp. Geotecnico	Descrizione
			Cu - Xk (KPa)	Cu - Xd (KPa)		Φ - Xk ($^\circ$)	Φ - Xd ($^\circ$)		
1*	1.20	/	80.7	57.6	/	27.8	22.9	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
2	3.60	49.0	41.9	29.9	/			Coesivo	Argille
3	8.40	32.4	30.0	21.5	16.7	16.4	13.3	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
4	9.60	74.5	51.9	37.1	19.14	18.0	14.6	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
5	11.80	57.9	52.2	37.3	17.2	16.8	13.6	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
6	14.80	78.5	69.6	49.7	17.78	17.3	14.0	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
7	17.40	65.7	54.8	39.1	16.06	15.5	12.5	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
8	18.20	60.8	56.0	40.0	15.29	15.0	12.1	Incoerente-Coesivo	Limi e limi sabbiosi
9	19.60	70.6	64.7	46.2	15.69	15.4	12.4	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
10	20.60	85.3	75.6	54.0	/			Coesivo	Argille
11	22.00	74.5	65.2	46.6	15.42	15.0	12.1	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi
12	25.40	90.2	85.5	61.1	15.88	15.6	12.6	Incoerente-Coesivo	Limi argillosi e limi sabbiosi

* Nota: l'orizzonte 1 è stato calcolato a partire da 60 cm dal p.c.

Per gli orizzonti a duplice comportamento coesivo/incoerente, i valori di angolo di resistenza al taglio, calcolati come per i terreni incoerenti con il metodo di De Beer, sono da considerarsi solo indicativi e sono stati riportati in grigio.

Il peso dell'unità di volume non varia con l'applicazione dei coefficienti parziali, sia per l'approccio M1 che M2.

La prova CPTU ha evidenziato caratteristiche geotecniche per i diversi orizzonti considerati leggermente inferiori rispetto alle altre 3 CPT, e deve pertanto essere considerata come riferimento in quanto fornisce valori maggiormente cautelativi.

L'ulteriore attenuazione (rispetto al valor medio) fornita dalla trattazione statistica dei dati ha evidenziato affinità nei parametri geotecnici decisamente elevate per alcuni orizzonti della prova CPTU (orizzonti 4-5 e 7-8), che potrebbero essere considerati come orizzonti unici, eliminando la suddivisione effettuata. Le leggere differenze presenti sono da ascrivere ad un maggiore o minore contenuto di argille piuttosto che non di limi o (secondariamente) sabbie. Rimangono tuttavia abbastanza diversi i valori medi, ed altri parametri geotecnici riportati nelle tabelle del capitolo precedente.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Valutazione delle caratteristiche dell'area

I valori di progetto, calcolati e riportati nelle precedenti tabelle, permettono di individuare preliminarmente dal punto di vista geotecnico le caratteristiche dei terreni presenti nell'area.

Attualmente non sono previsti piani o garages interrati, per cui gli orizzonti da considerare come possibili piani di posa delle fondazioni sono soprattutto quelli più superficiali.

E' stata analizzata preliminarmente la coesione non drenata di progetto, parametro geotecnico legato in modo abbastanza proporzionale (a parità di condizioni, tipologie costruttive e profondità di posa) alle resistenze di progetto dei terreni.

Sono state valutate due possibili profondità di posa, ovvero:

- 0.6 - 1.0 m dal p.c., nell'ipotesi di fondazioni superficiali a platea;
- 1.2 - 1.5 m dal p.c., nell'ipotesi di fondazioni superficiali nastriformi (trave rovescio);

Per quanto riguarda i valori di coesione non drenata di progetto c_{uk} , la situazione può essere riassunta brevemente nel seguito:

	c_{uk} 0.6- 1.0 m dal p.c. kPa	c_{uk} 1.2 - 1.5 m dal p.c. kPa
CPT1	100.4	49.4
CPT2	73.0	54.6
CPT3	126.9	55.3
CPTU	80.7	41.9

Come risulta evidente dalla tabella precedente, la coesione non drenata di progetto c_{uk} è risultata:

- disomogenea nel primo metro di profondità (valori compresi tra circa 73 e 127 kPa), nell'ipotesi di realizzare una platea di fondazione;
- decisamente omogenea a profondità superiori, nell'ipotesi di realizzare una fondazione nastriforme (trave rovescio), anche se con valori di resistenza più ridotti (42 kPa rispetto a circa 70 kPa).

Si tratta comunque di valori che in questa fase preliminare si ritiene possano essere idonei per l'intervento in progetto, considerando l'ipotesi di fondazioni superficiali

L'orizzonte di terreno più superficiale (fino a 1.2 m di profondità) ha mostrato caratteristiche di resistenza elevate (picco di resistenza a 0.8 m di profondità, comune a tutte le prove) ma decisamente variabili. Questa disomogeneità è stata ulteriormente accentuata nel calcolo dei valori di progetto, in cui all'aumentare della variabilità (e quindi della deviazione standard) diminuiscono i valori di resistenza calcolati.

Nel caso in fase esecutiva si decida di utilizzare questo orizzonte come piano di appoggio per le fondazioni, si consiglia di considerare in modo estremamente cautelativo i parametri calcolati, che attualmente sono quelli di un terreno al di sopra della falda freatica ma che può risentire in modo anche sensibile delle influenze stagionali. La disomogeneità di questo orizzonte potrà influenzare anche i cedimenti sia totali che differenziali del terreno, che nell'ipotesi di una platea sono sempre più sensibili e interessano orizzonti di terreno più profondi.

Le tipologie più idonee di fondazioni da adottare verranno individuate in fase di progetto esecutivo, una volta note le azioni di progetto.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Analisi del rischio liquefazione

Nelle tavole della microzonazione sismica del Comune di Carpi relative al I°, II° e III° livello di approfondimento, nell'area viene valutata la possibilità di liquefazioni.

Come riportato nell'Allegato A3, capitolo 1 della Delibera della RER 112/07, la probabilità che nei terreni sabbiosi saturi si verifichino fenomeni di liquefazione è bassa o nulla se si verifica almeno una delle seguenti condizioni:

1. Eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5;
2. Accelerazione massima attesa in superficie in condizioni free-field minore di 0.1g;
3. Accelerazione massima attesa in superficie in condizioni free-field minore di 0.15g e terreni con caratteristiche ricadenti in una delle tre seguenti categorie:
 - frazione di fine¹, FC, superiore al 20%, con indice di plasticità $IP > 10$;
 - $FC \geq 35\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 20$;
 - $FC \leq 5\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 25$
4. Distribuzione granulometrica esterna ai fusi granulometrici riportati nell'Allegato 3 della Delibera 112/07
5. Profondità media stagionale della falda superiore ai 15 m dal piano campagna.

A tale riguardo si sottolinea che:

- durante il periodo compreso tra il 20.05.2012 e il 03.05.2012 sono avvenuti ben 7 sismi di magnitudo superiore a 5. Di questi, solo i due più intensi ($M \geq 5.8$) hanno innescato fenomeni di liquefazione. Tuttavia, nonostante la distanza dall'epicentro del terremoto del 29.05 non sia particolarmente elevata (circa 18 km), nelle aree circostante non sono avvenuti visibili fenomeni di liquefazione;
- l'accelerazione sismica in condizioni free-field è stata maggiore di 0.1g;
- Dal punto di vista della velocità delle onde sismiche nel sottosuolo l'area oggetto di indagine è ubicata in categoria C con $a=0.15g$ e $a_g(SLV) = 0.154g$
- nel corso dei sondaggi effettuati (prove penetrometriche statiche) è stata misurata una falda superficiale con soggiacenza variabile da -2.4 a -2.9 m dal piano di campagna. E' estremamente probabile che la falda, in corrispondenza delle stagioni più piovose, possa risalire anche a quote maggiori;
- al di sotto dei terreni coltivati più superficiali, situati comunque al di sopra della falda freatica, le litologie incontrate sono prevalentemente di tipo limoso, con duplice natura incoerente-coesiva. Una componente coesiva è stata sempre riscontrata nei diversi orizzonti

Sui terreni dell'area è stata quindi effettuata la valutazione della possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione.

La verifica alla liquefazione è stata effettuata utilizzando il software della Geostru "Liquiter".

Tra i diversi metodi semplificati proposti, è stato utilizzato quello di Idriss & Boulanger (2008). Le verifiche sono state effettuate anche utilizzando altri metodi, che hanno fornito risultati paragonabili.

Nel metodo proposto da **Idriss e Boulanger** l'indice di comportamento **Ic** per il tipo di suolo è ricavato con le formule riportate di seguito:

¹ La frazione di fine è definita come la frazione passante al setaccio 200 ASTM (0.074 mm).

Modellazione geologica e sismica dell'area

$$I_c = \left[(\log_{10} Q - 3,47)^2 + (\log_{10} R_f + 1,22)^2 \right]^{0,5}$$

$$Q = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{Pa} \left(\frac{Pa}{\sigma'_{vo}} \right)^n$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{vo}} 100$$

dove

q_c è la resistenza alla punta misurata

Pa è la tensione di riferimento (1 atmosfera) nelle stesse unità di σ'_{vo}

f_s è l'attrito del manicotto (resistenza laterale)

n è un'esponente che dipende dal tipo di suolo, variabile tra 0,5 e 1.

Calcolato I_c , si procede con la correzione della resistenza alla punta misurata q_c mediante la seguente espressione:

$$q_{c1N} = C_Q \cdot \left(\frac{q_c}{Pa} \right)$$

dove

$$C_Q = \left(\frac{Pa}{\sigma'_{vo}} \right)^n \leq 1,7$$

n si determina per via iterativa dalla seguente relazione:

$$n = 1,338 - 0,249 \cdot q_{c1N}^{0,264}$$

La correzione della resistenza alla punta dovuta al contenuto di materiale fine viene valutata mediante la seguente procedura:

$$(q_{c1N})_{cs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(5,4 + \frac{q_{c1N}}{16} \right) \cdot \exp \left[1,63 + \frac{9,7}{FC + 0,01} - \left(\frac{15,7}{FC + 0,01} \right)^2 \right]$$

Dove la frazione di fine FC(%) viene calcolata mediante l'espressione seguente:

$$FC(\%) = 2,8 \cdot (I_c)^{2,60}$$

La resistenza alla liquefazione per una magnitudo pari a 7,5 (**CRR_{7,5}**) si calcola da:

$$CRR = \exp \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{540} + \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{67} \right)^2 - \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{80} \right)^3 + \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{114} \right)^4 - 3 \right]$$

Per $z_w > z$, con z_w profondità della falda, e per $(q_{c1N})_{cs} \leq 160$ il terreno è non liquefacibile (NL).

Il rapporto di sforzo ciclico **CSR** (*Cyclic Stress Ratio*) si determina da:

$$CSR = 0,65 \cdot \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d$$

Dove per il coefficiente di riduzione delle tensioni r_d si utilizza la formula, con M si indica la magnitudo:

$$r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z) \cdot M]$$

dove

$$\alpha = -1,1012 - 1,126 \cdot \text{sen} \left[\frac{z}{11,73} + 5,133 \right]$$

$$\beta = 0,106 + 0,118 \cdot \text{sen} \left[\frac{z}{11,28} + 5,142 \right]$$

Modellazione geologica e sismica dell'area

Il fattore di sicurezza alla liquefazione è definito nel modo seguente:

$$FS = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}$$

Per determinare il fattore di scala della magnitudo **MSF**, la formula di **Idriss & Boulanger** utilizza l'espressione:

$$MSF = 6,9 \cdot \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 0,058 \leq 1,8$$

Il fattore di correzione della pressione di confinamento K_{σ} è dato da:

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a}\right) \leq 1 \quad \text{dove} \quad C_{\sigma} = \frac{1}{37,3 - 8,27 \cdot (q_{c1N})^{0,264}} \leq 0,3$$

Dal momento che nel corso delle prove penetrometriche sono state rinvenute litologie con comportamenti anche coesivi, è stata in primo luogo verificata questa condizione, e se i terreni fossero o no effettivamente soggetti a liquefazione.

Secondo quanto riportato in letteratura "Il terreno è giudicato non liquefacibile ($F(z) = 0$) per: $z < z_w$ (profondità maggiore di quella critica, solitamente impostata a 20 m) e/o $I_c > 2.6$ e/o $(q_{c1N})_{cs} \geq 160$."

In questa verifica preliminare, è risultato che tutti gli orizzonti considerati (ad eccezione del suolo superficiale, non sotto falda) hanno un Indice di Consistenza $I_c > 2.6$, e pertanto è estremamente improbabile la loro liquefazione.

Le tabelle con il calcolo di I_c sono riportate nel seguito.

Nei calcoli effettuati, a scopo cautelativo, la profondità della falda è stata impostata a -1.0 m dal p.c., anche se al momento delle prove si trovava a -2.4 / -2.9 m.

CPT 1	Profondità base strato dal p.c. (m)	Qc media (Kg/cm ²)	Fs media (Kg/cm ²)	Spessore (m)	Ic	Comportamento / note
Orizz. 1	1.2	30.5	1.44	1.2	2.18	Incoerente-Coesivo
Orizz 2	7	11.08	0.56	5.8	2.91	Coesivo
Orizz 3	7.8	20.35	0.53	0.8	2.67	Incoerente-Coesivo
Orizz 4	15.4	16.2	0.71	7.6	3.07	Incoerente-Coesivo
Orizz 5	17.4	28.63	0.83	2.0	2.86	Incoerente-Coesivo
Orizz 6	18.4	16.74	0.84	1.0	3.29	Coesivo
Orizz 7	20.2	31.06	1.5	1.8	3.03	Incoerente-Coesivo

CPT 2	Profondità base strato dal p.c. (m)	Qc media (Kg/cm ²)	Fs media (Kg/cm ²)	Spessore (m)	Ic	Comportamento / note
Orizz. 1	1.2	31.5	1.16	1.2	2.08	Incoerente-Coesivo
Orizz 2	11	12.05	0.58	9.8	2.99	Coesivo
Orizz 3	14.4	21.94	0.91	3.4	2.96	Incoerente-Coesivo
Orizz 4	16.2	14.85	0.62	1.8	3.22	Incoerente-Coesivo
Orizz 5	17.2	20.98	0.57	1.0	2.99	Incoerente-Coesivo
Orizz 6	18.4	16.19	0.79	1.2	3.29	Coesivo
Orizz 7	20.2	29.51	1.5	1.8	3.07	Coesivo

Modellazione geologica e sismica dell'area

CPT 3	Profondità base strato dal p.c. (m)	Qc media (Kg/cm ²)	Fs media (Kg/cm ²)	Spessore (m)	Ic	Comportamento / note
Orizz 1	1.2	37.66	1.82	1.2	2.15	Incoerente-Coesivo
Orizz 2	10.8	11.98	0.55	9.6	2.97	Coesivo
Orizz 3	13.6	23.04	1.12	2.8	2.98	Incoerente-Coesivo
Orizz 4	15.4	16.51	0.68	1.8	3.15	Incoerente-Coesivo
Orizz 5	17	18.55	0.63	1.6	3.09	Incoerente-Coesivo
Orizz 6	18	14.48	0.72	1.0	3.35	Coesivo
Orizz 7	20.2	27.16	1.2	2.2	3.06	Incoerente-Coesivo

CPTU	Profondità base strato dal p.c. (m)	Qc media (Kg/cm ²)	Fs media (Kg/cm ²)	Spessore (m)	Ic	Comportamento / note
Orizz. 1	1.2	22.2	1.33	1.2	2.34	
Orizz 2	3.6	10.07	0.47	2.4	2.79	Coesivo
Orizz 3	8.4	6.7	0.2	4.8	3.09	Incoerente-Coesivo
Orizz 4	9.6	15.17	0.45	1.2	2.87	Incoerente-Coesivo
Orizz 5	11.8	11.73	0.44	2.2	3.12	Incoerente-Coesivo
Orizz 6	14.8	16.09	0.48	3.0	3.01	Incoerente-Coesivo
Orizz 7	17.4	13.34	0.33	2.6	3.15	Incoerente-Coesivo
Orizz 8	18.2	12.46	0.31	0.8	3.24	Incoerente-Coesivo
Orizz 9	19.6	14.31	0.49	1.4	3.27	Incoerente-Coesivo
Orizz 10	20.6	17.46	0.92	1.0	3.31	Coesivo

I valori di Ic ricavati nelle tre prove CPT sono risultati simili tra loro, con lievi differenze.

Anche se Ic ha evidenziato che difficilmente i terreni sono liquefacibili, la verifica è stata ugualmente effettuata, utilizzando il sopradescritto metodo di Idriss e Boulanger.

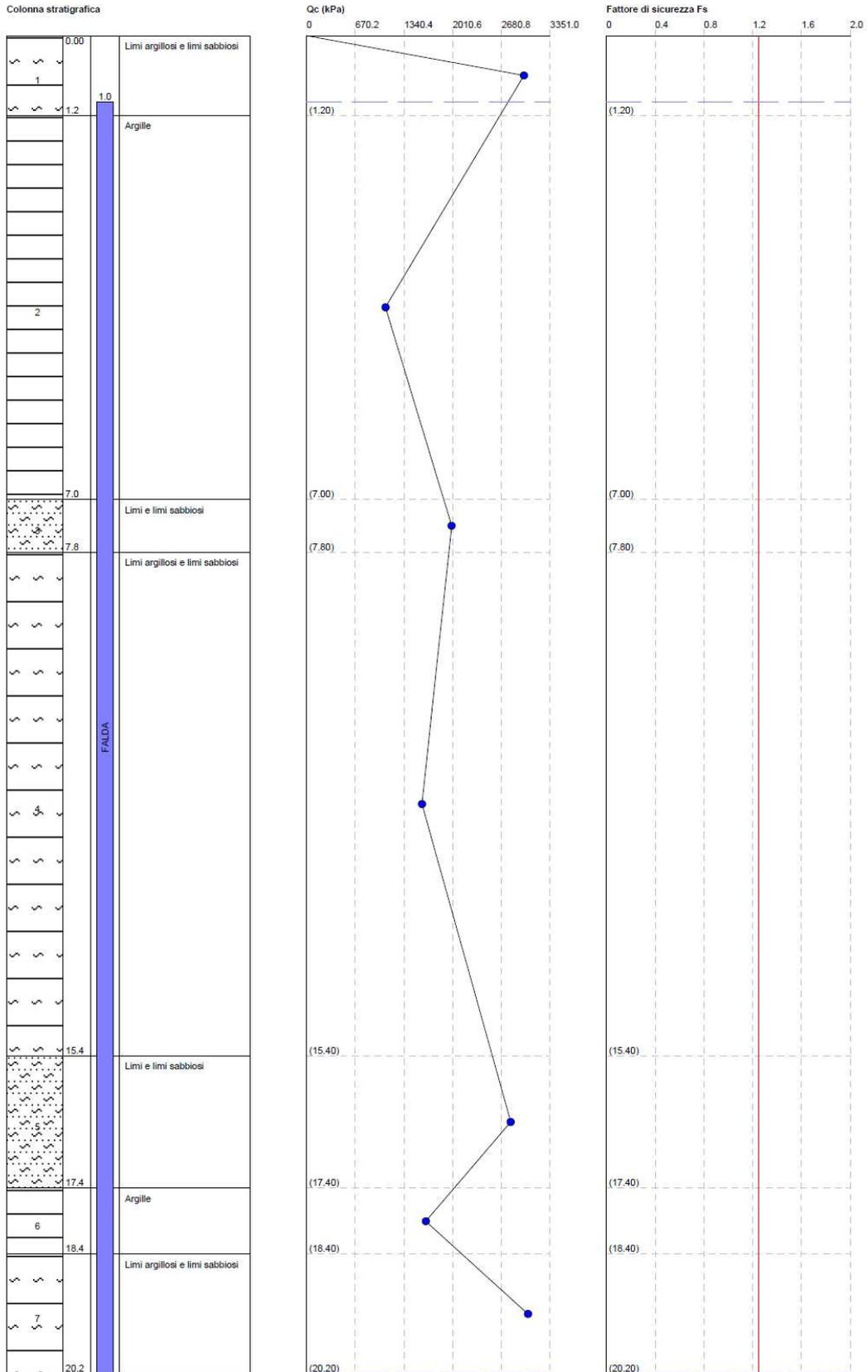
Le condizioni utilizzate sono descritte nel seguito.

Fattore sicurezza normativa	1.25
Profondità falda idrica	1 m
Accelerazione Bedrock	0.15
Fattore amplificazione	2.548
Tipo Suolo: C-Sabbie, ghiaie mediamente addensate, argille di media consistenza Vs30=180-360	
Morfologia: T1-Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	
Coefficiente amplificazione stratigrafica (SS)	1.47068
Coefficiente amplificazione topografica (ST)	1
Magnitudo momento sismico (Mw)	6.14
Distanza epicentro	5 Km
Peak ground acceleration (PGA)	0.23
Correzione per la magnitudo (MSF)	1.43

Nel seguito sono stati riportati i grafici relativi alle verifiche effettuate. Non sono stati rappresentati valori (né al di sopra della soglia di 1.25 né al di sotto di questa) in quanto l'elaborazione ha calcolato come non liquefacibili questi terreni

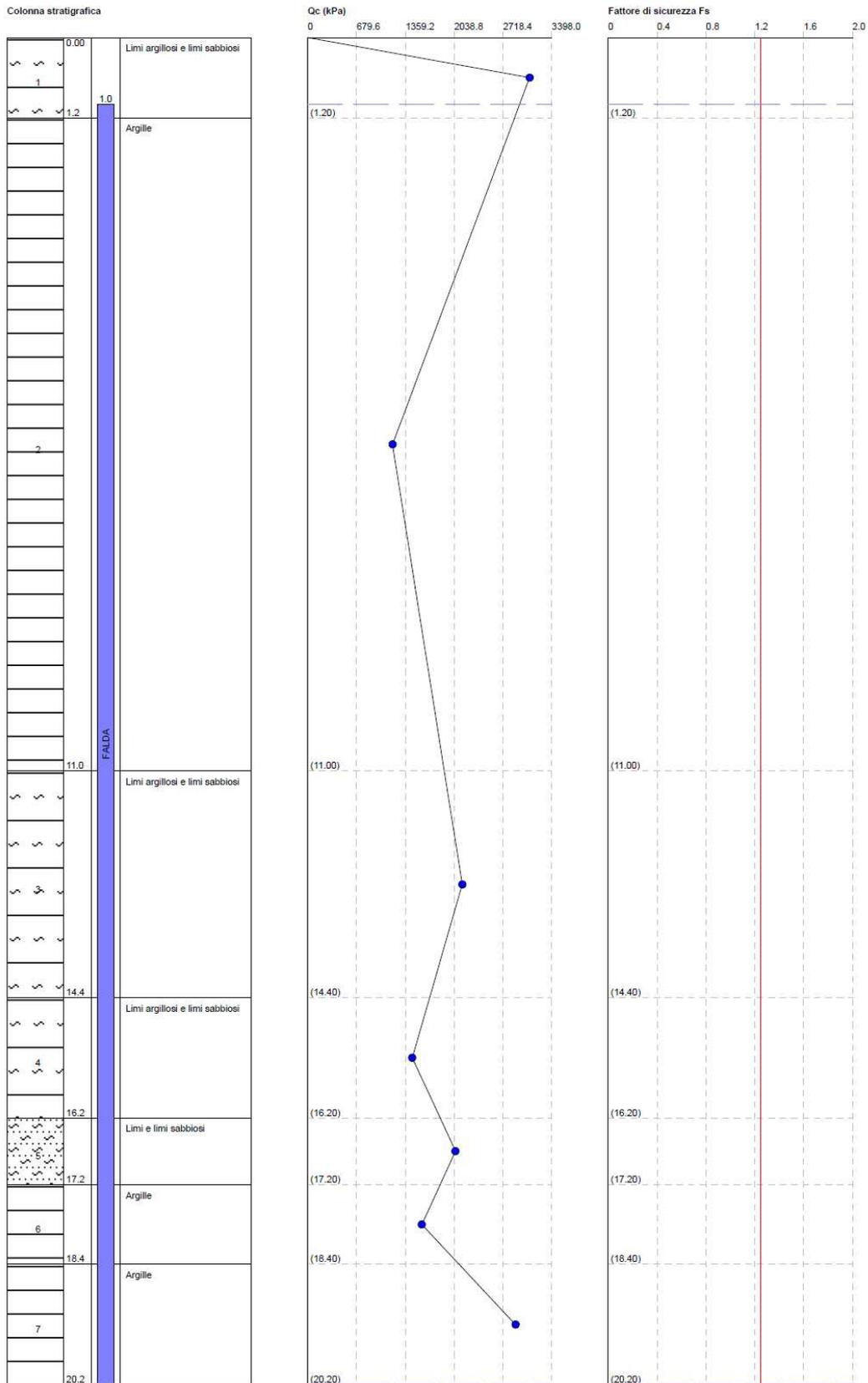
Modellazione geologica e sismica dell'area

CPT 1



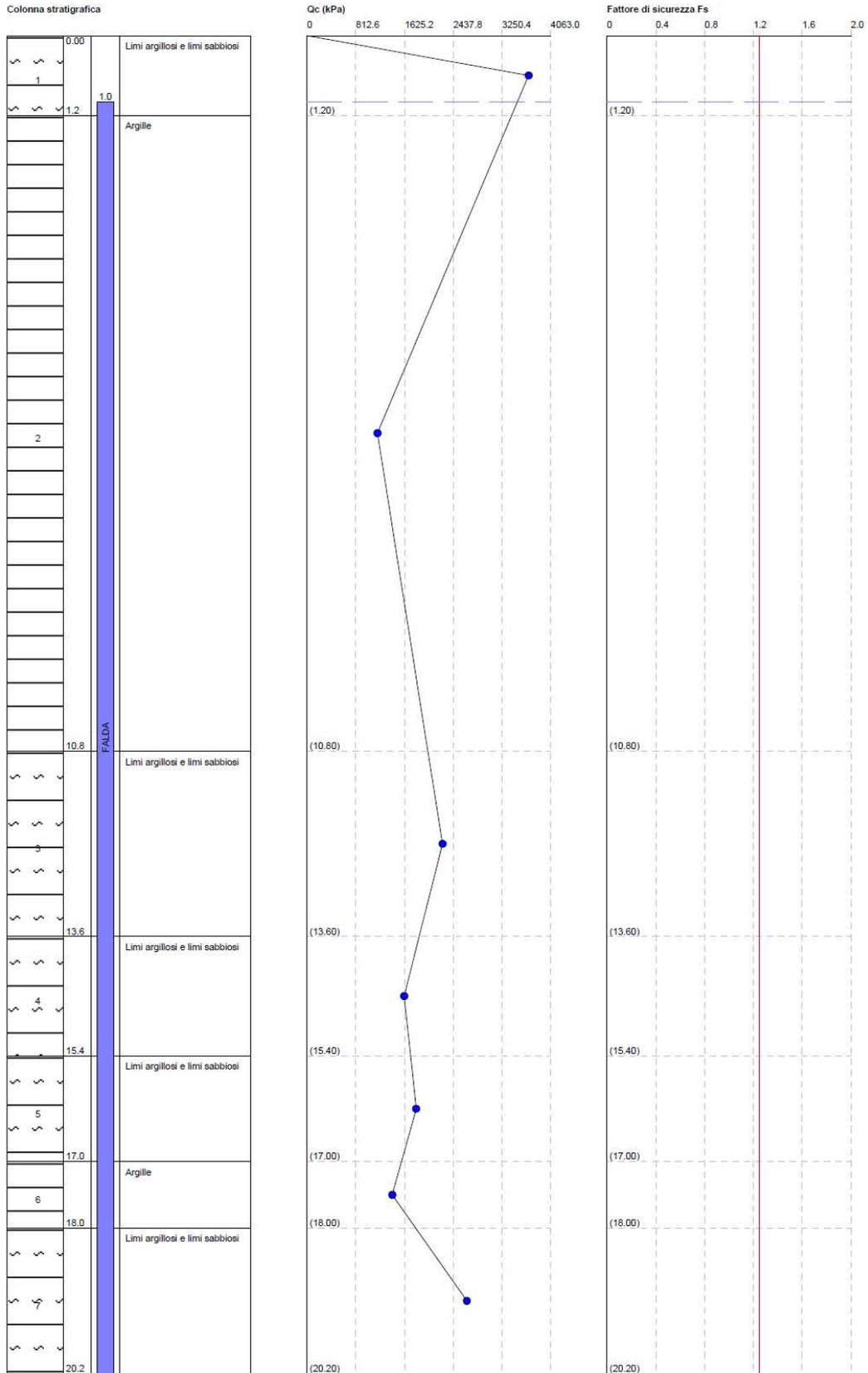
Modellazione geologica e sismica dell'area

CPT 2



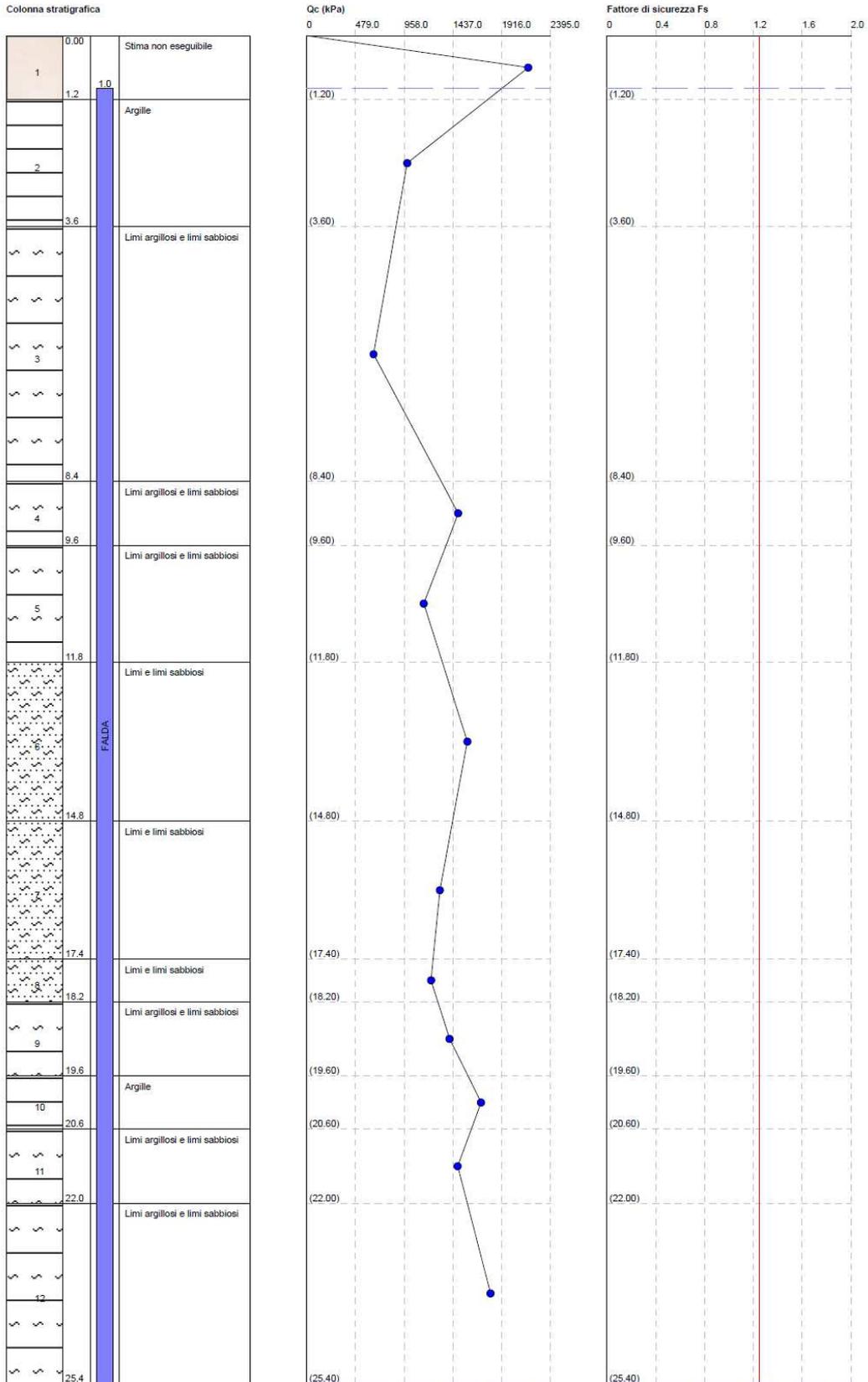
Modellazione geologica e sismica dell'area

CPT 3



Modellazione geologica e sismica dell'area

CPT U



Modellazione geologica e sismica dell'area

Come riportato in precedenza, le verifiche sono state impostate ipotizzando un sisma di magnitudo M pari a 6.14 Richter, superiore a quelli avvenuti in data 20 e 29.05.2012 e che hanno innescato diversi fenomeni di liquefazione nei terreni.

Tutte le verifiche sono state effettuate considerando un livello di falda a -1.0 metri dal piano di campagna, più alto di quello rilevato nel corso dei sondaggi (profondità da -2.4 a -2.9 m dal p.c.) e considerando saturi (per il calcolo delle pressioni efficaci) tutti gli orizzonti sottostanti.

Secondo le verifiche effettuate utilizzando i metodi semplificati di calcolo (Idriss e Boulanger) i terreni dell'area sono risultati caratterizzati da un elevato indice di consistenza ($I_c > 2.6$) e sono risultati non liquefacibili con fattore di sicurezza alla liquefazione (F_L) = 0

Occorre sottolineare che il risultato trovato è in accordo con le evidenze, dal momento che nell'area circostante l'edificio non sono stati documentati fenomeni di liquefazione dei terreni, pur essendo la zona abbastanza vicina all'epicentro del secondo evento sismico (29.06.2012, $M=5.8$).

Del resto, nelle analisi e nelle osservazioni effettuate nelle aree circostanti agli edifici (per questa area di indagine) non sono state evidenziate rotazioni o scivolamenti, come pure non sono state evidenziate perdite nelle capacità portanti dei terreni nei casi di fondazioni superficiali.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Cedimenti post-sismici

Come riportato nel capitolo precedente, per un sisma di intensità massima pari a quella di riferimento (M = 6.14) non sono stati individuati orizzonti di terreni potenzialmente liquefacibili ($F_L \leq 1$).

Tuttavia, dal momento che negli orizzonti più superficiali sono presenti orizzonti coesivi caratterizzati da una c_u media < 70 kPa, sono stati calcolati i cedimenti post sismici. I cedimenti sono stati calcolati cautelativamente per tutti gli orizzonti coesivi, non solo per quelli con $c_u < 70$ kPa.

Come riportato nell'Allegato A3, capitolo B della Delibera della RER 112/07, in prima approssimazione il cedimento di riconsolidazione post-sismico ΔH in un generico strato di spessore H può essere stimato con l'espressione:

$$\Delta H = \epsilon_v H$$

dove H è l'altezza dello strato liquefacibile ed ϵ_v (%) è la deformazione volumetrica, calcolabile secondo la relazione:

$$\epsilon_v = \frac{\alpha C_r}{1 + e_0} \log \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_0}} \right)$$

- α è una costante sperimentale che in prima approssimazione può essere posta uguale a 1 (da 1 a 1.5)
- e_0 è l'indice dei vuoti iniziale
- C_r è l'indice di riconsolidazione postciclica. C_r può essere posto pari a $C_r = 0.225 C_c$ (dove C_c è l'indice di compressione ottenuto in prove edometriche). In prima approssimazione C_c può essere stimato con la relazione empirica $C_c = 0.0348 + 0.0162 I_p$
- la quantità $\Delta u/\sigma'_0$ è stata ricavata in accordo alle indicazioni (tabella 2 e grafico 3) della DGR 112/07

Nei calcoli effettuati, la costante α è stata posta = 1, l'indice dei vuoti $e_0 = 1$. I valori degli indici di compressibilità C_r e C_c sono stati ricavati dall'elaborazione dei dati della prova penetrometrica ed hanno fornito valori comparabili a quelli ottenibili stimando il valore dell'indice plastico in base alle caratteristiche dei terreni presenti nel sottosuolo.

CPT1	profondità m	spessore cm	Cr (Cm)	Cc (C)	Ip	$\Delta u/\sigma'_0$	ϵ_v %	cedimento cm
Orizz. 1	1.2	120	/	/	/	/	/	
Orizz 2	7	580	0.070	0.310	17	3.9E-01	7.5E-05	0.044
Orizz 3	7.8	80	0.044	0.197	10	4.4E-01	5.6E-05	0.004
Orizz 4	15.4	760	0.055	0.245	13	6.1E-01	1.1E-04	0.086
Orizz 5	17.4	200	0.044	0.197	10	5.8E-01	8.4E-05	0.017
Orizz 6	18.4	100	0.077	0.343	19	1.3E-02	2.2E-06	0.000
Orizz 7	20.2	180	0.059	0.262	14	9.5E-03	1.2E-06	0.000
totale								0.15

CPT2	profondità m	spessore cm	Cr (Cm)	Cc (C)	Ip	$\Delta u/\sigma'_0$	ϵ_v %	cedimento cm
Orizz. 1	1.2	120	/	/	/	/	/	
Orizz 2	11.0	980	0.073	0.326	18	5.2E-01	1.2E-04	0.115
Orizz 3	14.4	340	0.059	0.262	14	6.3E-01	1.3E-04	0.043
Orizz 4	16.2	180	0.059	0.262	14	7.3E-01	1.7E-04	0.030
Orizz 5	17.2	100	0.041	0.181	9	7.0E-01	1.1E-04	0.011
Orizz 6	18.4	120	0.070	0.310	17	7.4E-01	2.1E-04	0.025
Orizz 7	20.2	180	0.070	0.310	17	6.7E-01	1.7E-04	0.030
totale								0.25

Modellazione geologica e sismica dell'area

CPT3	profondità m	spessore cm	Cr (Cm)	Cc (C)	lp	$\Delta u/\sigma'_0$	ε_v %	cedimento cm
Orizz. 1	0.6	120	/	/	/	/	/	
Orizz 2	6.0	960	0.066	0.294	16	5.2E-01	1.0E-04	0.100
Orizz 3	12.2	280	0.059	0.262	14	6.1E-01	1.2E-04	0.034
Orizz 4	14.5	180	0.059	0.262	14	7.1E-01	1.6E-04	0.028
Orizz 5	16.2	160	0.048	0.213	11	7.1E-01	1.3E-04	0.021
Orizz 6	17.5	100	0.066	0.294	16	7.6E-01	2.1E-04	0.021
Orizz 7	19.1	220	0.059	0.262	14	6.9E-01	1.5E-04	0.033
totale								0.24

CPTU	profondità m	spessore cm	Cr (Cm)	Cc (C)	lp	$\Delta u/\sigma'_0$	ε_v %	cedimento cm
Orizz. 1	120							
Orizz 2	240	0.070	0.310	17	240	2.7E-01	4.8E-05	0.011
Orizz 3	480	0.052	0.229	12	480	6.1E-01	1.0E-04	0.050
Orizz 4	120	0.052	0.229	12	120	5.5E-01	8.9E-05	0.011
Orizz 5	220	0.059	0.262	14	220	6.4E-01	1.3E-04	0.029
Orizz 6	300	0.052	0.229	12	300	6.4E-01	1.1E-04	0.034
Orizz 7	260	0.044	0.197	10	260	7.1E-01	1.2E-04	0.031
Orizz 8	80	0.044	0.197	10	80	7.3E-01	1.2E-04	0.010
Orizz 9	140	0.059	0.262	14	140	7.2E-01	1.6E-04	0.023
Orizz 10	100	0.073	0.326	18	100	7.0E-01	1.9E-04	0.019
Orizz 11	140	0.052	0.229	12	140	7.3E-01	1.4E-04	0.020
Orizz 12	340	0.059	0.262	14	340	1.0E-04	1.3E-06	0.000
totale								0.24

I cedimenti post-sismici di riconsolidazione calcolati sono nell'ordine di 2-3 mm.

Modellazione geologica e sismica dell'area

Pericolosità geologica e problematiche geologico-tecniche

Rischio idraulico / idrologico / idrogeologico

Nella Tavola 2.3.1 "Rischio idraulico: carta della pericolosità e della criticità idraulica" l'area è compresa all'interno del "Limite delle aree soggette a criticità idraulica (Art.11)". In particolare, l'area è classificata rientrando nella "Fascia di espansione inondabili Art. 9 comma 2 lettera a".

Per quanto riguarda la liquefazione dei terreni, in presenza di sismi con magnitudo superiore a quella degli eventi del maggio 2012 (M=6.14) le verifiche calcolate non hanno individuato orizzonti liquefacibili.

Nel corso delle prove effettuate è stata individuata la presenza di una falda superficiale nei primi metri di terreno (da 2.4 a 2.9 m dal p.c.). Risulta estremamente probabile che in diversi periodi dell'anno, caratterizzati da precipitazioni intense, la profondità della falda possa risultare decisamente inferiore, nell'ordine di 1 m dal piano di campagna e interessare il piano di posa delle fondazioni.

Dal punto di vista geologico-tecnico l'intervento potrebbe presentare alcune problematiche in fase di scavo per la realizzazione delle fondazioni, ovvero:

- a. dovrà essere assicurata la tenuta delle pareti di scavo, sagomando opportunamente le pareti.
- b. in funzione della profondità dello scavo e del periodo dell'anno in cui questo verrà realizzato, vi è la possibile presenza di una falda superficiale di carattere temporaneo, che potrebbe:
 - provocare un moto di filtrazione lungo le pareti di scavo, peggiorando le caratteristiche di resistenza dei terreni e provocando fenomeni di dissesto perimetrali
 - causare un allagamento all'interno dello scavo
 - causare un sollevamento del fondo scavo, con possibili (anche se improbabili viste le profondità considerate) fenomeni di rottura del fondo stesso.
- c. condizioni meteorologiche avverse, con intense precipitazioni. Questa situazione, collegata con la scarsa permeabilità dei terreni presenti, può portare ad allagamenti dello scavo con successivi ristagni di acqua. In funzione delle condizioni meteorologiche, le acque di ristagno potranno essere allontanate utilizzando idonei sistemi di pompaggio.

Rischio dissesto e movimenti gravitativi

L'area si trova in pianura, il rischio non è presente

Vulnerabilità ambientale

Nel PTCP 2009, Tavola 3.1.1 "Rischio inquinamento acque: vulnerabilità all'inquinamento dell'acquifero principale" la zona si trova in corrispondenza di un'area a vulnerabilità bassa

Nella cartografia più di dettaglio del PRG di Carpi:

- nella Tavola A4.4 ("grado di infiltrazione") viene indicata la presenza di depositi di argini naturali con paleovalvi o dossi e un coefficiente medio di permeabilità $k = 1.6 \times 10^{-5}$ cm/s
- nella Tavola A4.6 ("Carta della vulnerabilità naturale per infiltrazione") viene indicata per la zona un grado di vulnerabilità da media a medio-forte.

Pericolosità geologica e ambientale:

Il sito è stato sede di attività agricola. Si ritengono improbabili influenze negative nel sottosuolo od inquinamenti specifici dovuti a tale attività

Modellazione geologica e sismica dell'area

Conclusioni

La presente relazione tecnica è stata redatta per definire il modello geologico e sismico del sottosuolo e valutare la fattibilità geologica del progetto d'intervento urbanistico del Piano Particolareggiato di iniziativa privata relativo all'Area Commerciale "F3", ubicato in dell'Industria a Carpi (MO). Il progetto prevede la realizzazione di alcuni edifici da adibire a centri commerciale/direzionale, gallerie e uffici.

Valutando le caratteristiche geologiche e geotecniche dell'area considerata, viene confermata la fattibilità dell'intervento.

A tale riguardo, si sottolinea che:

- sono state realizzate n° 3 prove penetrometriche a punta meccanica (CPT) spinte alla profondità di 20.2 m dal p.c. e n° 1 prova penetrometrica a punta elettrica (CPTU), fino alla profondità di 25.4 m dal p.c. Al di sotto dello strato più superficiale di terreno vegetale, sovraconsolidato e con elevate caratteristiche di resistenza, sono presenti alternanze di terreni a granulometria fine, fino alla profondità indagata. Questi orizzonti sono costituiti prevalentemente da limi, con natura sia coesiva che incoerente.
- Nel corso delle prove è stata individuata una falda superficiale a profondità compresa tra 2.4 m (a sud dell'area) e 2.9 m (a nord dell'area) dal piano di campagna. In base alle indicazioni di letteratura è estremamente probabile che la falda, in corrispondenza delle stagioni più piovose possa risalire anche a quote maggiori, indicativamente ad almeno 1 m dal piano di campagna.
- Nelle Tavole del PTCP la vulnerabilità dell'acquifero per l'area considerata viene valutata come "bassa".
- La velocità delle onde sismiche ($V_s 30$) permette di classificare i terreni (ODPCM 3274/03) nella categoria C ($S = 1.25$). Il Comune di Carpi è stato classificato come zona sismica in zona 3 (ODPCM 3274/03). Il bedrock sismico in base alle misure di sismica passiva, vincolate sia alle prove penetrometriche che alle misure di sismica attiva (MASW-ESAC), è stato valutato alla profondità di 126 m dal p.c.
- Il calcolo della risposta sismica locale ha individuato un valore di P.G.A. pari a 1.49, praticamente identico a quello indicato nella DGR 112/2007 per il secondo livello ($PGA = 1.5$). I coefficienti di amplificazione sismica sono risultati pari a 1.23 per l'intervallo $0,1s < T_0 \leq 0,5s$, 1.63 nell'intervallo $0,5s < T_0 \leq 1,0s$
- Nel rilievo dei microtremori (HVSr) effettuato il rapporto H/V ha evidenziato due picchi principali: un picco a bassissima frequenza, ai limiti della sensibilità strumentale (0.15/0.15 Hz) e un picco a circa 0.84 Hz, coerente coi dati da bibliografia, che stratigraficamente potrebbe essere interpretabile come dovuto a un contrasto d'impedenza localizzabile alla base del subsistema di Bazzano e che corrisponde con ogni probabilità a una delle frequenze di risonanza naturale del terreno.
- I valori medi, caratteristici e di progetto dei parametri geotecnici calcolati in base alle prove penetrometriche statiche effettuate (CPT e CPTU) sono idonei alla realizzazione di fabbricati come quelli in progetto. La prova CPTU ha evidenziato caratteristiche geotecniche per i diversi orizzonti considerati leggermente inferiori rispetto alle altre 3 CPT, e deve pertanto essere considerata come riferimento in quanto fornisce valori maggiormente cautelativi.
- L'orizzonte di terreno più superficiale (fino a 1.2 m di profondità) ha mostrato caratteristiche di resistenza elevate (picco di resistenza a 0.8 m di profondità, comune a tutte le prove) ma

Modellazione geologica e sismica dell'area

decisamente variabili. Nel caso in fase esecutiva si decida di utilizzare questo orizzonte come piano di appoggio per le fondazioni, si consiglia di considerare in modo estremamente cautelativo i parametri calcolati, che attualmente sono quelli di un terreno al di sopra della falda freatica ma che può risentire in modo anche sensibile delle influenze stagionali.

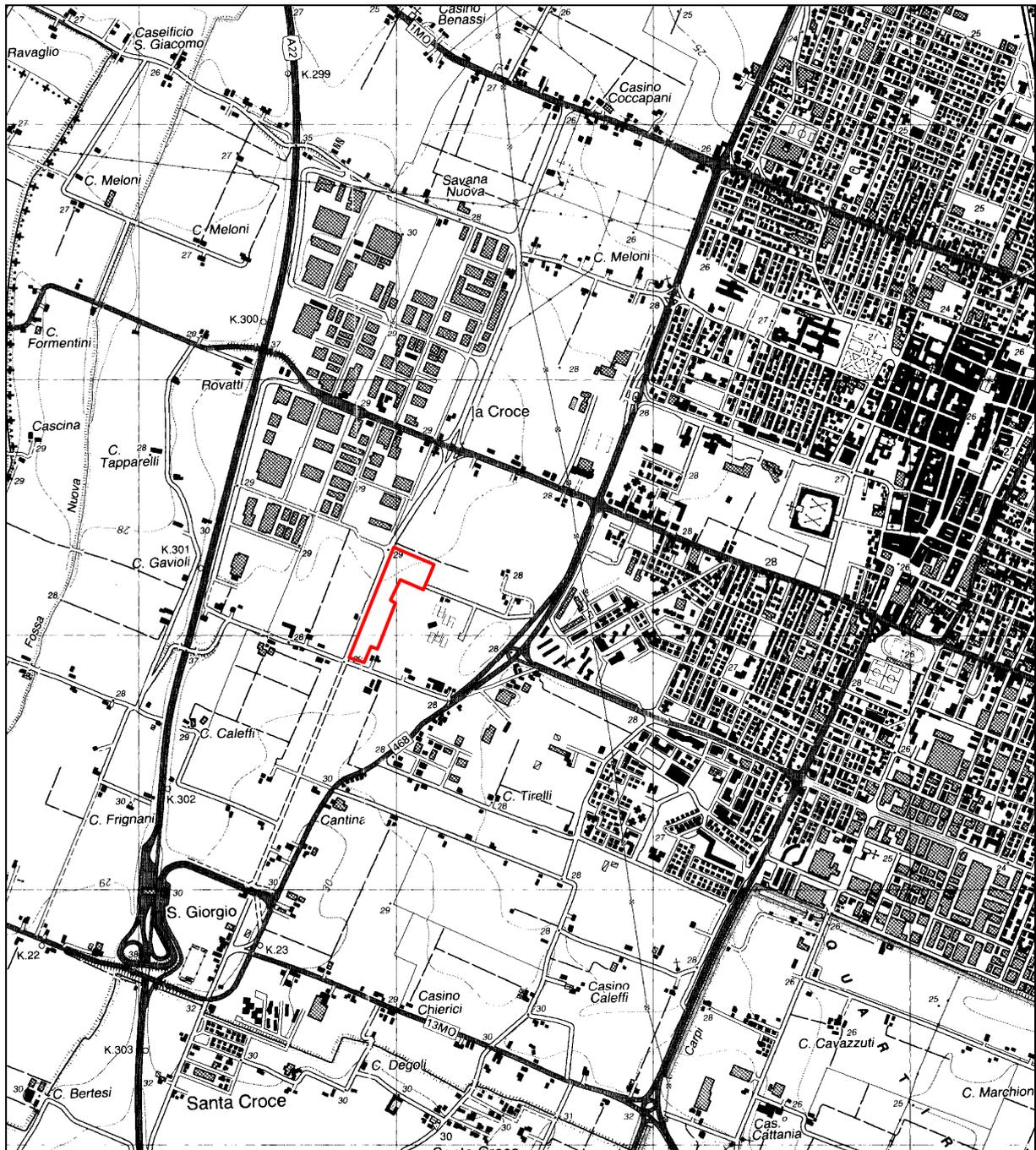
- Nelle verifiche alla liquefazione (effettuate per una magnitudo $M = 6.14$), non sono risultati presenti orizzonti potenzialmente liquefacibili. L'indice di consistenza dei terreni è elevato ($I_c > 2.6$) e il fattore di sicurezza alla liquefazione (FL) è risultato sempre maggiore di 1.25.
- I cedimenti post- sismici di riconsolidazione calcolati sono risultati bassi, in linea con le indicazioni di letteratura (2-3 mm)
- Dal punto di vista del rischio idraulico, nel PTCP 2009 l'area è compresa all'interno del "Limite delle aree soggette a criticità idraulica (Art.11)". In particolare, l'area è classificata rientrando nella "Fascia di espansione inondabili Art. 9 comma 2 lettera a"
- Le tipologie più idonee di fondazioni da adottare verranno individuate in fase di progetto esecutivo, una volta note le azioni di progetto ed effettuate le verifiche allo SLU e allo SLE.

Modena, 27.05 2016

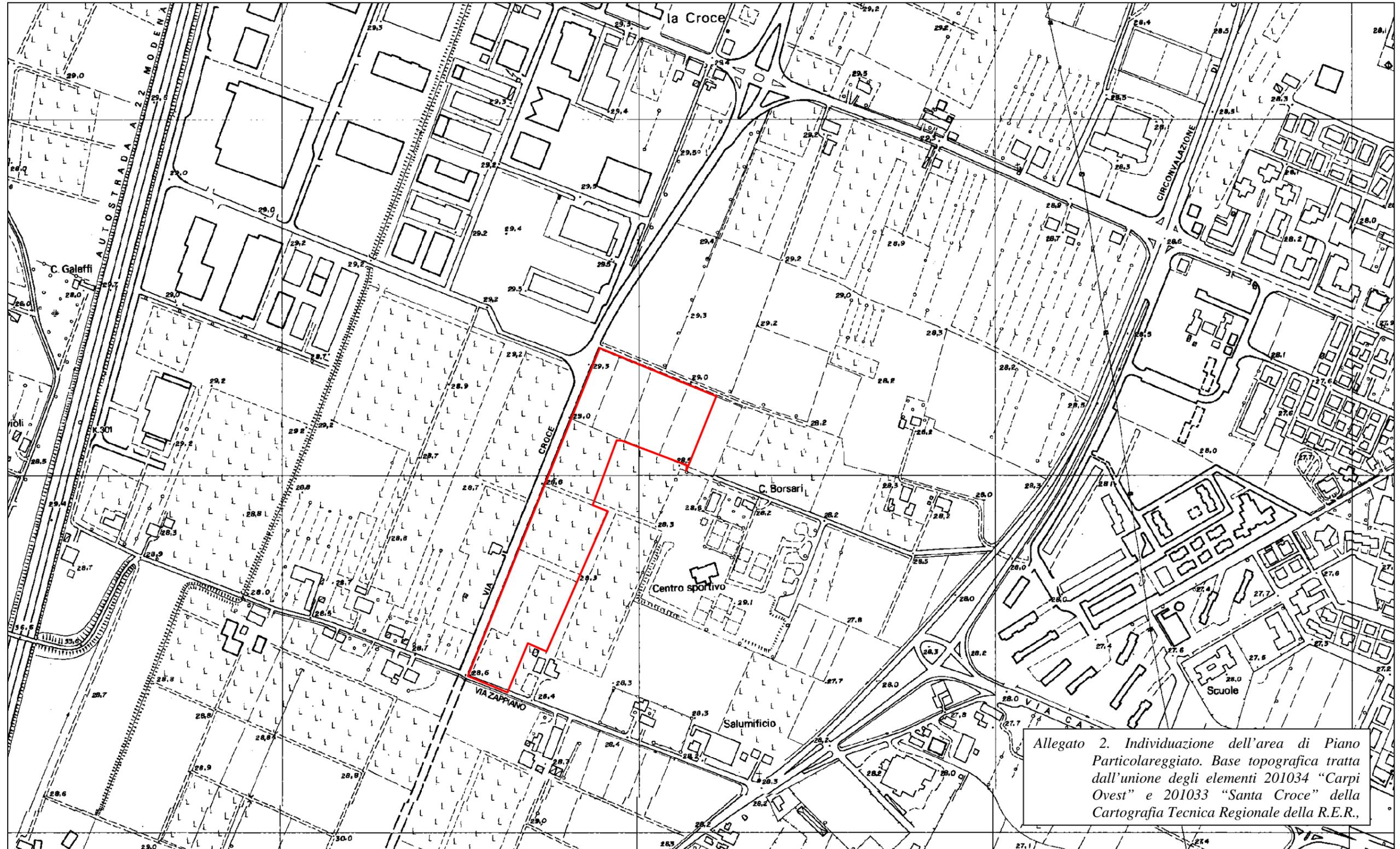
Il Tecnico



Modellazione geologica e sismica dell'area - ALLEGATI

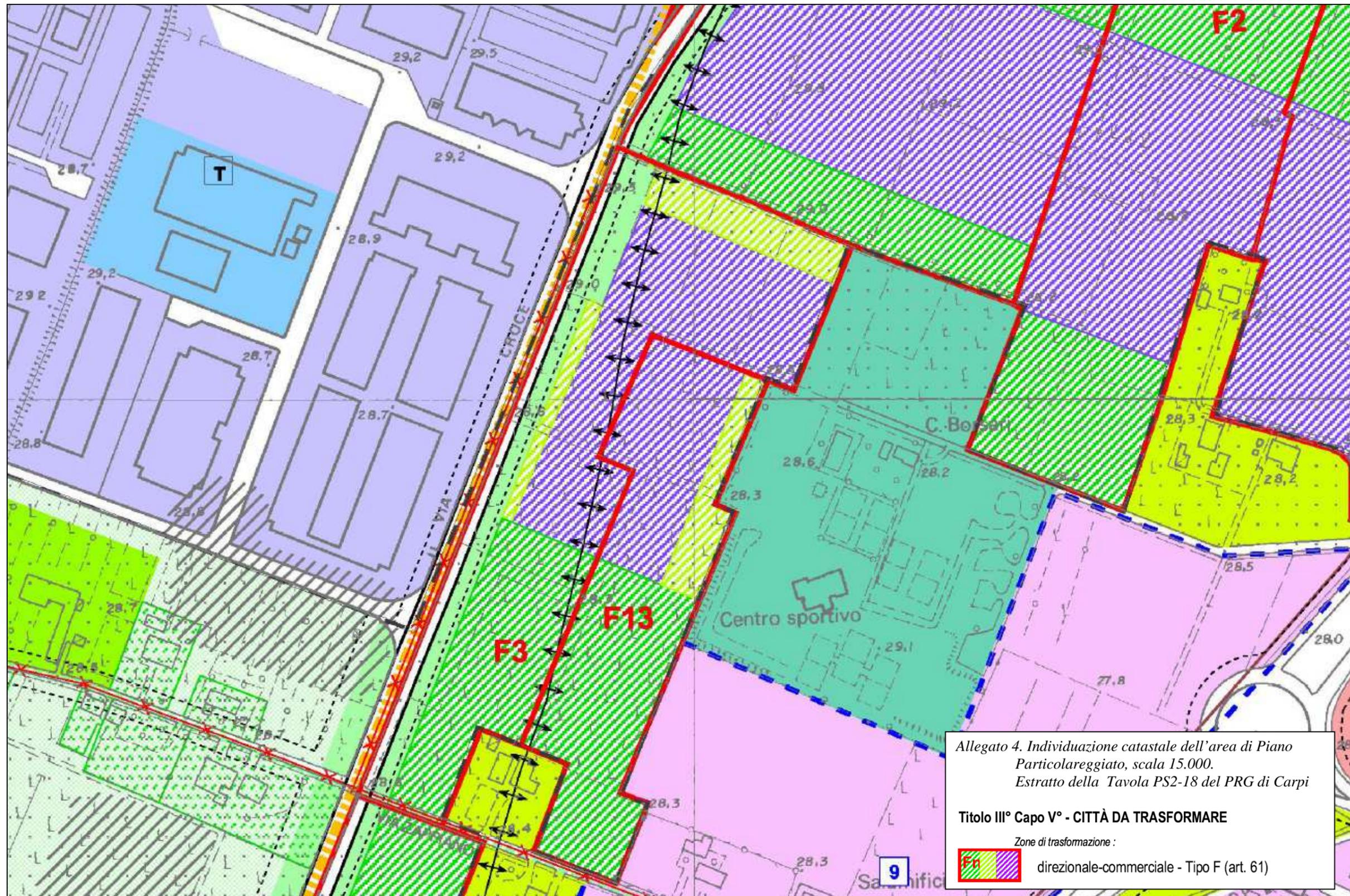


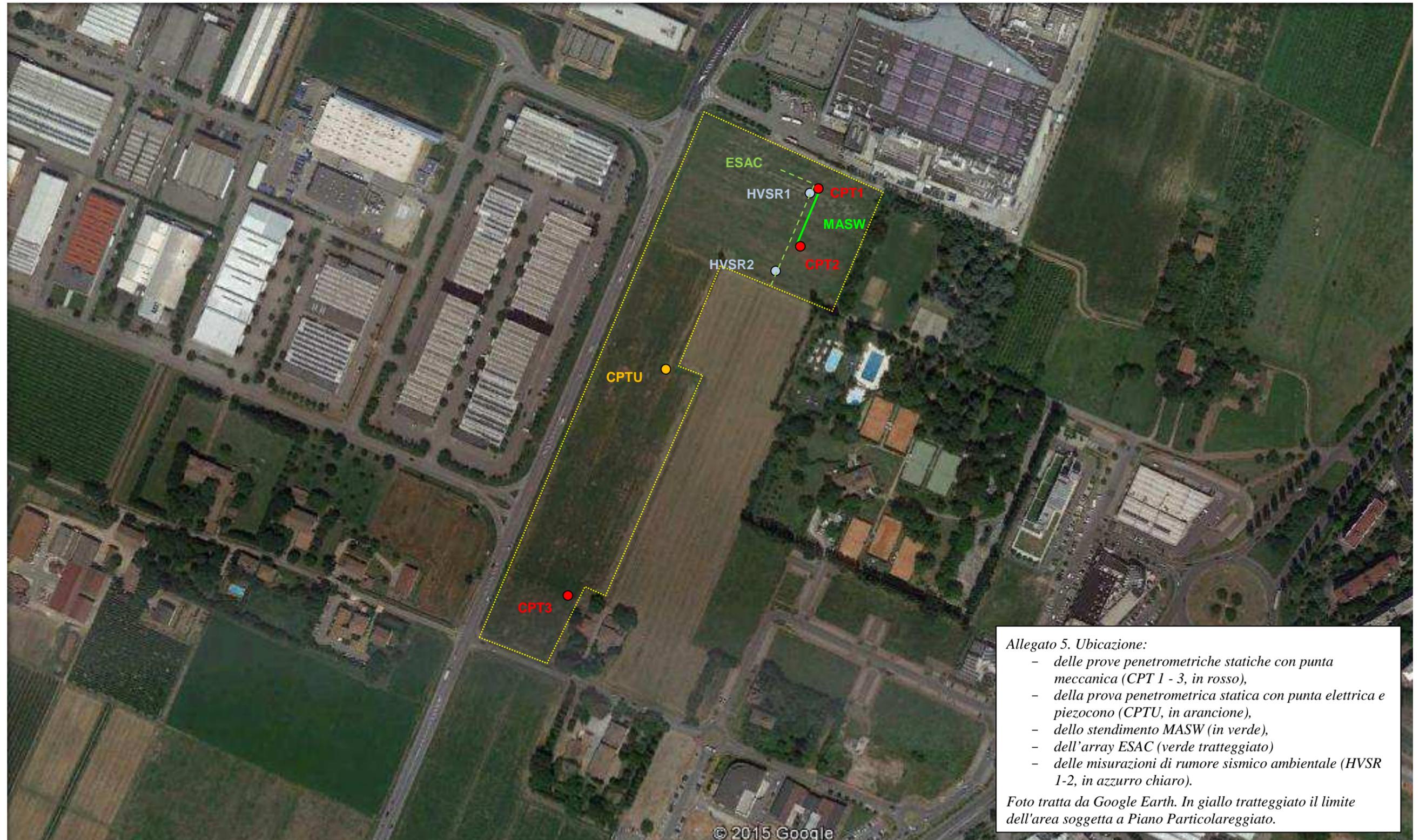
Allegato 1. Ubicazione dell'area. Base topografica tratta dalla CTR 201NE "Carpi" della cartografia della R.E.R., scala 1:25.000.



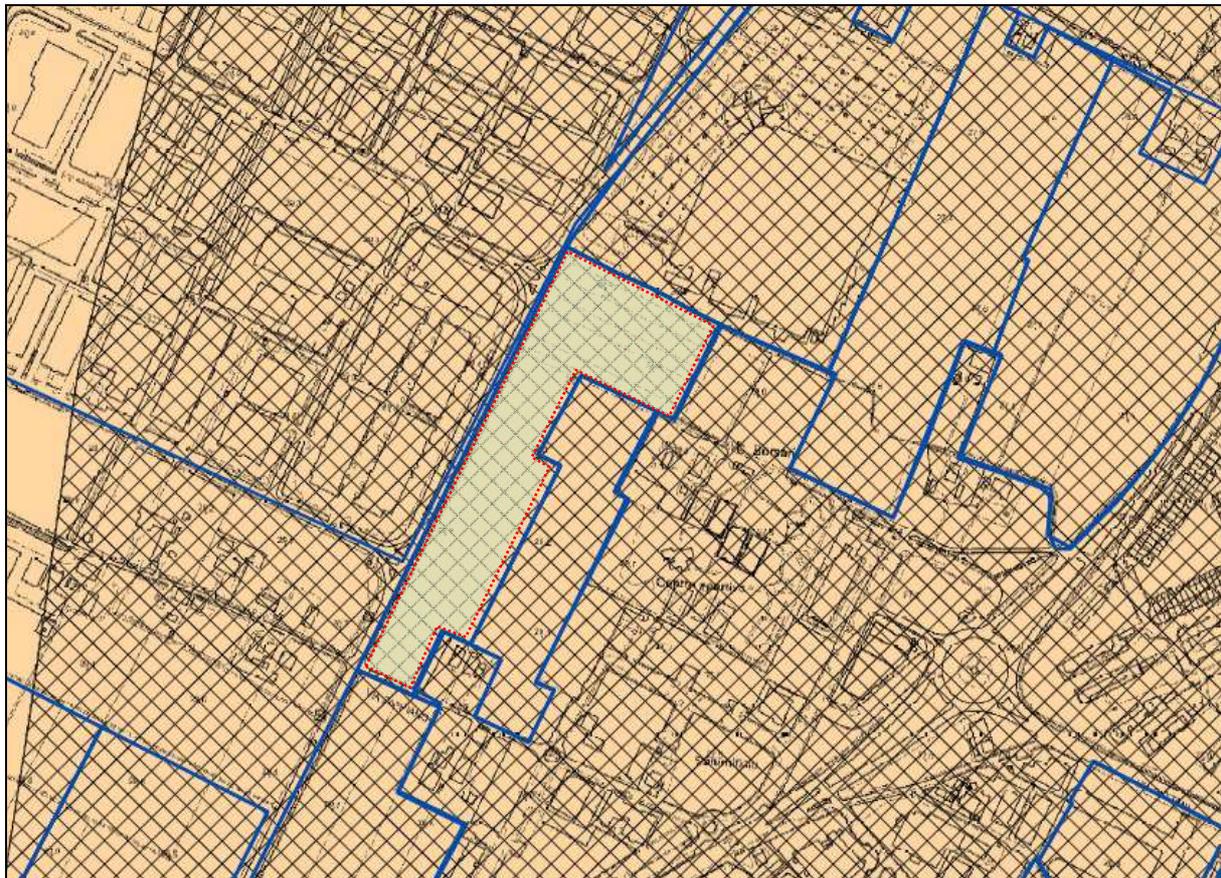
Modellazione geologica e sismica dell'area - ALLEGATI



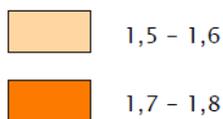




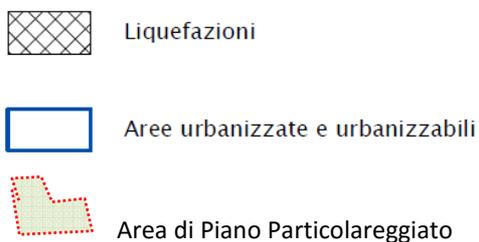
Modellazione geologica e sismica dell'area - ALLEGATI



Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (FA PGA)

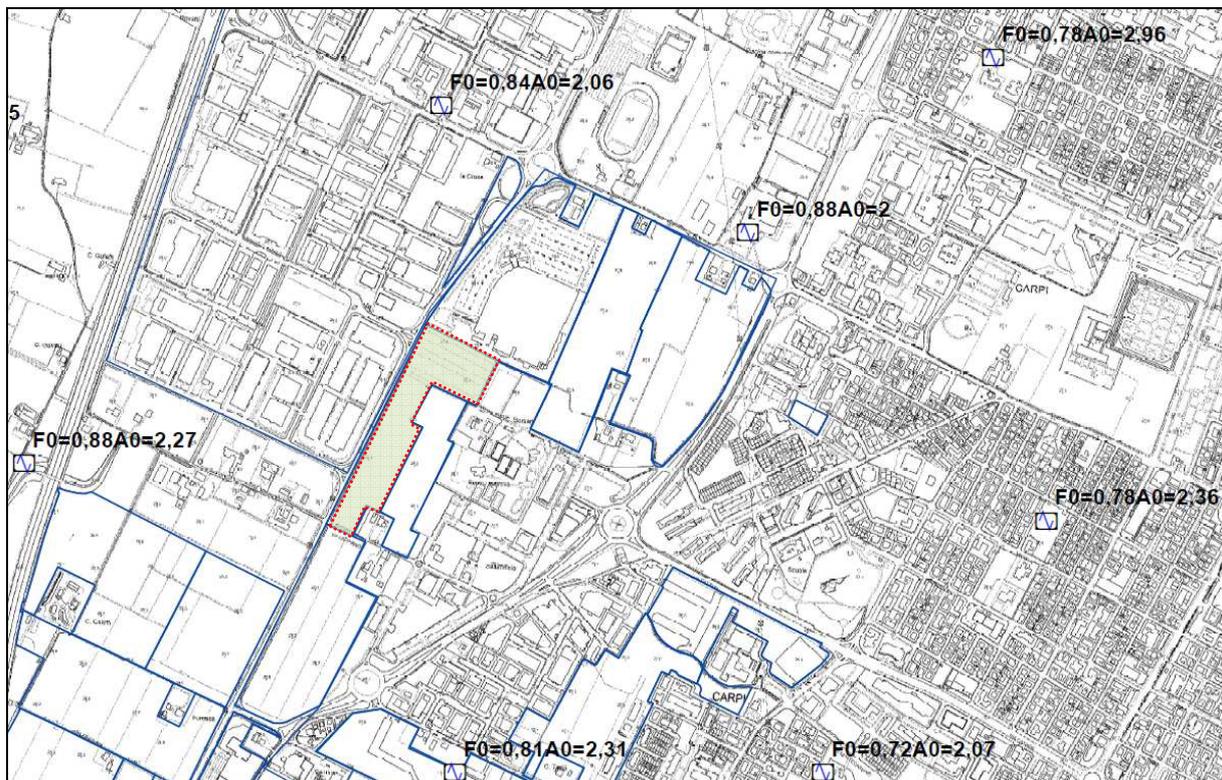


Zone suscettibili di instabilità



Allegato 6. Carta di microzonazione sismica, livello 2° - FA PGA

Modellazione geologica e sismica dell'area - ALLEGATI



F0 – Frequenza naturale dell'indagine HVSr (in hertz)

A0 – Ampiezza del rapporto H/V

Indagini puntuali



Stazione microtremore a stazione singola



Prova sismica in foro tipo Downhole



Aree urbanizzate e urbanizzabili



Confine Comunale



Area di Piano Particolareggiato

Allegato 7. Carta delle frequenze naturali dei terreni - Tav.2



Aree a uguale "rischio" di liquefazione

- Rischio di liquefazione basso $0 \leq \text{IPL} \leq 2$
- Rischio di liquefazione moderato $2 < \text{IPL} \leq 5$
- Rischio di liquefazione alto $5 < \text{IPL} \leq 15$
- Rischio di liquefazione molto alto $\text{IPL} > 15$



Area di Piano Particolareggiato

Allegato 8. Indice del potenziale di liquefazione - Tav. B

ALLEGATI – PROVE PENETROMETRICHE CPT e CPTU

ALLEGATI – INDAGINE SISMICA

LEGENDA VALORI DI RESISTENZA FATTORI DI CONVERSIONE

Strumento utilizzato:

GOUDA 200 kN -

Caratteristiche:

- punta conica meccanica \varnothing 35.7 mm, area punta $A_p = 10 \text{ cm}^2$
- punta conica meccanica angolo di apertura: $\alpha = 60^\circ$
- manicotto laterale di attrito tipo 'Begemann' ($\varnothing = 35.7 \text{ mm} - h = 133 \text{ mm} - A_m = 150 \text{ cm}^2$)
- velocità di avanzamento costante $V = 2 \text{ cm/sec}$ ($\pm 0,5 \text{ cm / sec}$)
- spinta max nominale dello strumento S_{max} variabile a seconda del tipo
- costante di trasformazione $CT = \text{SPINTA (Kg)} / \text{LETTURA DI CAMPAGNA}$
(dato tecnico legato alle caratteristiche del penetrometro utilizzato, fornito dal costruttore)

fase 1 - resistenza alla punta: $q_c \text{ (MPa)} = (L_1) \times CT / 10$

fase 2 - resistenza laterale locale: $f_s \text{ (kPa)} = [(L_2) - (L_1)] \times CT / 150$

fase 3 - resistenza totale : $R_t \text{ (kPa)} = (L_t) \times CT$

- Prima lettura = lettura di campagna durante l' infissione della sola punta (fase 1)
- Seconda lettura = lettura di campagna relativa all'infissione di punta e manicotto (fase 2)
- Terza lettura = lettura di campagna relativa all'infissione delle aste esterne (fase 3)

N.B. : la spinta $S \text{ (Kg)}$, corrispondente a ciascuna fase, si ottiene moltiplicando la corrispondente lettura di campagna L per la costante di trasformazione CT .

N.B. : causa la distanza intercorrente (20 cm circa) fra il centro del manicotto laterale e la punta conica del penetrometro, la resistenza laterale locale f_s viene computata 20 cm sopra la punta.

CONVERSIONI

1 kN (kiloNewton) = 1000 N \approx 100 kg = 0,1 t

1 MN (megaNewton) = 1.000 kN = 1.000.000 N \approx 100 t

1 kPa (kiloPascal) = 1 kN/m² = 0,001 MN/m² = 0,001 MPa \approx 0,1 t/m² = 0,01 kg/cm²

1 MPa (megaPascal) = 1 MN/m² = 1.000 kN/m² = 1000 kPa \approx 100 t/m² = 10 kg/cm²

1 kg/cm² = 10 t/m² \approx 100 kN/m² = 100 kPa = 0,1 MN/m² = 0,1 MPa

1 t = 1000 kg \approx 10 kN

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA

LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI

CPT
1

riferimento

092-2015

 Committente: **Studio Tecnico Associato For-Geo**

 U.M.: **MPa**

 Data exec.: **13/11/2015**

 Cantiere: **Studio terreno di fondazione**

 Pagina: **1/2**

 Località: **Carpi (MO), via dell'Industria**

Elaborato:

 Falda: **-2,90 m**

H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc MPa	fs kPa	F -	Rf %	H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc MPa	fs kPa	F -	Rf %
0,20	0,0	0,0		0,0	127,00	0		15,20	12,0	24,0		1,2	73,00	16	6,1
0,40	24,0	43,0		2,4	87,00	28	3,6	15,40	14,0	25,0		1,4	87,00	16	6,2
0,60	41,0	54,0		4,0	200,00	21	4,9	15,60	18,0	31,0		1,8	13,00	138	0,7
0,80	50,0	80,0		4,9	233,00	21	4,7	15,80	26,0	28,0		2,5	93,00	28	3,6
1,00	40,0	75,0		3,9	107,00	37	2,7	16,00	28,0	42,0		2,7	73,00	38	2,6
1,20	27,0	43,0		2,6	107,00	25	4,0	16,20	23,0	34,0		2,3	67,00	34	2,9
1,40	14,0	30,0		1,4	107,00	13	7,6	16,40	30,0	40,0		2,9	87,00	34	2,9
1,60	13,0	29,0		1,3	73,00	18	5,6	16,60	20,0	33,0		2,0	67,00	30	3,4
1,80	10,0	21,0		1,0	60,00	17	6,0	16,80	30,0	40,0		2,9	53,00	57	1,8
2,00	10,0	19,0		1,0	60,00	17	6,0	17,00	20,0	28,0		2,0	100,00	20	5,0
2,20	10,0	19,0		1,0	73,00	14	7,3	17,20	39,0	54,0		3,8	173,00	23	4,4
2,40	10,0	21,0		1,0	47,00	21	4,7	17,40	29,0	55,0		2,8	100,00	29	3,4
2,60	14,0	21,0		1,4	53,00	26	3,8	17,60	17,0	32,0		1,7	87,00	20	5,1
2,80	7,0	15,0		0,7	40,00	18	5,7	17,80	13,0	26,0		1,3	67,00	19	5,2
3,00	6,0	12,0		0,6	27,00	22	4,5	18,00	13,0	23,0		1,3	80,00	16	6,2
3,20	7,0	11,0		0,7	53,00	13	7,6	18,20	14,0	26,0		1,4	93,00	15	6,6
3,40	13,0	21,0		1,3	27,00	48	2,1	18,40	14,0	28,0		1,4	93,00	15	6,6
3,60	9,0	13,0		0,9	33,00	27	3,7	18,60	21,0	35,0		2,1	120,00	18	5,7
3,80	7,0	12,0		0,7	33,00	21	4,7	18,80	22,0	40,0		2,2	140,00	16	6,4
4,00	10,0	15,0		1,0	53,00	19	5,3	19,00	23,0	44,0		2,3	160,00	14	7,0
4,20	10,0	18,0		1,0	67,00	15	6,7	19,20	25,0	49,0		2,5	153,00	16	6,1
4,40	9,0	19,0		0,9	40,00	23	4,4	19,40	28,0	51,0		2,7	173,00	16	6,2
4,60	11,0	17,0		1,1	80,00	14	7,3	19,60	34,0	60,0		3,3	187,00	18	5,5
4,80	15,0	27,0		1,5	53,00	28	3,5	19,80	37,0	65,0		3,6	220,00	17	5,9
5,00	13,0	21,0		1,3	53,00	25	4,1	20,00	32,0	65,0		3,1	200,00	16	6,3
5,20	12,0	20,0		1,2	73,00	16	6,1	20,20	33,0	63,0		3,2			
5,40	10,0	21,0		1,0	73,00	14	7,3								
5,60	12,0	23,0		1,2	73,00	16	6,1								
5,80	14,0	25,0		1,4	47,00	30	3,4								
6,00	14,0	21,0		1,4	53,00	26	3,8								
6,20	10,0	18,0		1,0	67,00	15	6,7								
6,40	10,0	20,0		1,0	53,00	19	5,3								
6,60	7,0	15,0		0,7	47,00	15	6,7								
6,80	7,0	14,0		0,7	47,00	15	6,7								
7,00	9,0	16,0		0,9	67,00	13	7,4								
7,20	17,0	27,0		1,7	60,00	28	3,5								
7,40	20,0	29,0		2,0	40,00	50	2,0								
7,60	22,0	28,0		2,2	53,00	42	2,4								
7,80	18,0	26,0		1,8	60,00	30	3,3								
8,00	9,0	18,0		0,9	33,00	27	3,7								
8,20	7,0	12,0		0,7	27,00	26	3,9								
8,40	9,0	13,0		0,9	60,00	15	6,7								
8,60	10,0	19,0		1,0	73,00	14	7,3								
8,80	13,0	24,0		1,3	80,00	16	6,2								
9,00	17,0	29,0		1,7	100,00	17	5,9								
9,20	15,0	30,0		1,5	87,00	17	5,8								
9,40	18,0	31,0		1,8	87,00	21	4,8								
9,60	13,0	26,0		1,3	67,00	19	5,2								
9,80	12,0	22,0		1,2	40,00	30	3,3								
10,00	16,0	22,0		1,6	67,00	24	4,2								
10,20	15,0	25,0		1,5	67,00	22	4,5								
10,40	14,0	24,0		1,4	80,00	18	5,7								
10,60	15,0	27,0		1,5	80,00	19	5,3								
10,80	19,0	31,0		1,9	47,00	40	2,5								
11,00	16,0	23,0		1,6	47,00	34	2,9								
11,20	17,0	24,0		1,7	60,00	28	3,5								
11,40	19,0	28,0		1,9	80,00	24	4,2								
11,60	16,0	28,0		1,6	80,00	20	5,0								
11,80	16,0	28,0		1,6	87,00	18	5,4								
12,00	13,0	26,0		1,3	53,00	25	4,1								
12,20	12,0	20,0		1,2	73,00	16	6,1								
12,40	12,0	23,0		1,2	67,00	18	5,6								
12,60	13,0	23,0		1,3	60,00	22	4,6								
12,80	21,0	30,0		2,1	100,00	21	4,8								
13,00	15,0	30,0		1,5	113,00	13	7,5								
13,20	15,0	32,0		1,5	47,00	32	3,1								
13,40	13,0	20,0		1,3	80,00	16	6,2								
13,60	10,0	22,0		1,0	100,00	10	10,0								
13,80	13,0	28,0		1,3	47,00	28	3,6								
14,00	14,0	21,0		1,4	67,00	21	4,8								
14,20	19,0	29,0		1,9	87,00	22	4,6								
14,40	13,0	26,0		1,3	80,00	16	6,2								
14,60	14,0	26,0		1,4	53,00	26	3,8								
14,80	17,0	25,0		1,7	73,00	23	4,3								
15,00	26,0	37,0		2,5	80,00	33	3,1								

PROVE PENETROMETRICHE Srl
Elaborazione Dati
Il Tecnico

H = profondità

L1 = prima lettura (punta)

L2 = seconda lettura (punta + laterale)

Lt = terza lettura (totale)

CT = 10,00 costante di trasformazione

qc = resistenza di punta

fs = resistenza laterale calcolata

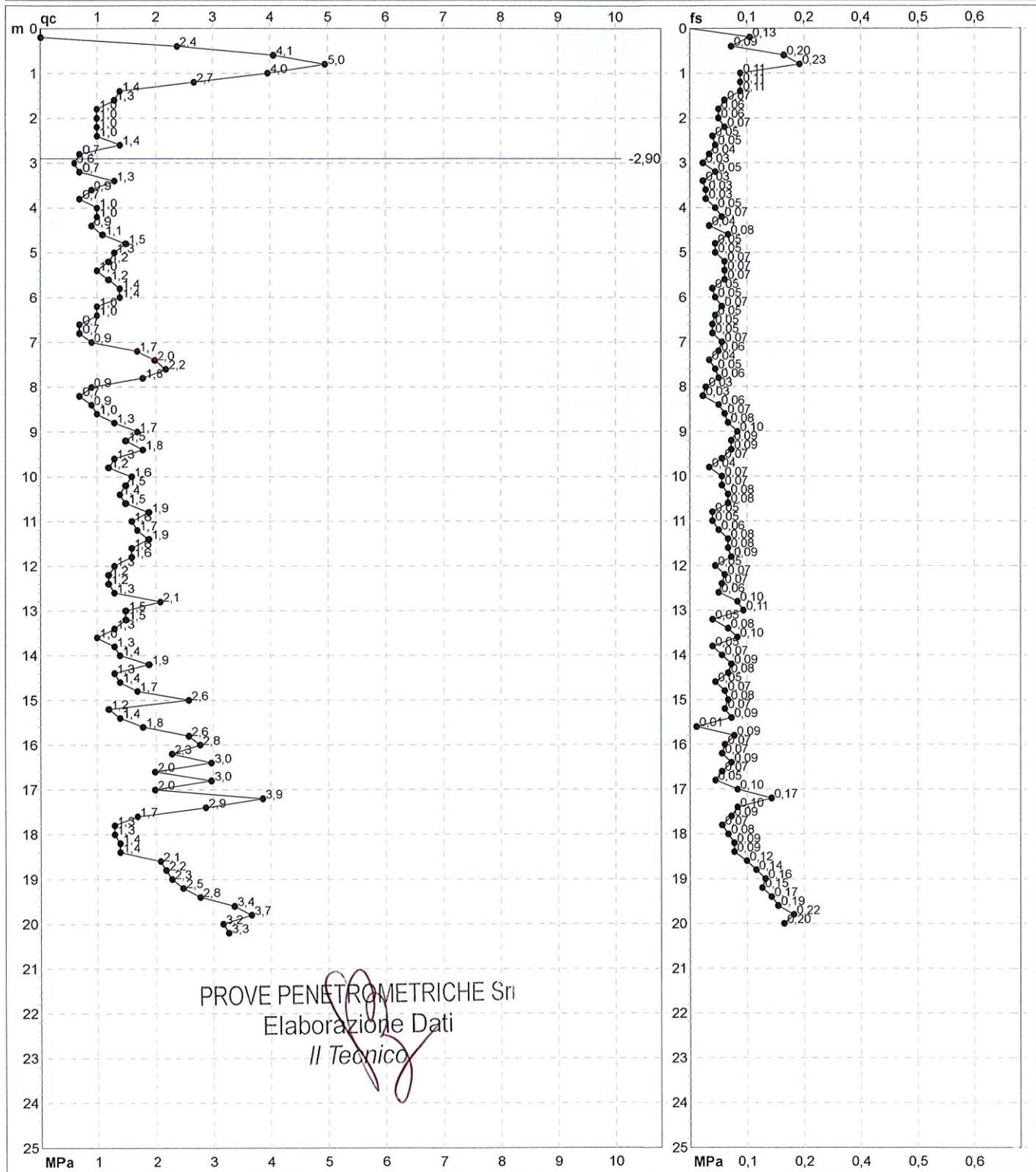
0.20 m sopra quota qc

F = rapporto Begemann (qc / fs)

Rf = rapporto Schmertmann (fs / qc)*100

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA	CPT	1
	riferimento	092-2015

Committente: Studio Tecnico Associato For-Geo	U.M.: MPa	Data esec.: 13/11/2015
Cantiere: Studio terreno di fondazione	Scala: 1:125	
Località: Carpi (MO), via dell'Industria	Pagina: 2/2	Quota inizio:
	Elaborato:	Falda: -2,90 m



	Penetrometro: GOUDA 200 kN	Preforo: m
	Responsabile: Dott. Geol. Salvatore Mucci	Corr.astine: kN/ml
	Assistente:	Cod. punta:

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA

LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI

CPT	2
riferimento	092-2015

Committente: Studio Tecnico Associato For-Geo Cantiere: Studio terreno di fondazione Località: Carpi (MO), via dell'Industria	U.M.: MPa	Data esec.: 13/11/2015
	Pagina: 1/2 Elaborato:	Falda: -2,90 m

H	L1	L2	Lt	qc	fs	F	Rf	H	L1	L2	Lt	qc	fs	F	Rf
m	-	-	-	MPa	kPa	-	%	m	-	-	-	MPa	kPa	-	%
0,20	0,0	0,0		0,0	93,00	0		15,20	11,0	18,0		1,1	47,00	23	4,3
0,40	14,0	28,0		1,4	107,00	13	7,6	15,40	16,0	23,0		1,6	87,00	18	5,4
0,60	34,0	50,0		3,3	153,00	22	4,5	15,60	13,0	26,0		1,3	47,00	28	3,6
0,80	67,0	90,0		6,6	140,00	48	2,1	15,80	15,0	22,0		1,5	87,00	17	5,8
1,00	44,0	65,0		4,3	87,00	51	2,0	16,00	13,0	26,0		1,3	60,00	22	4,6
1,20	29,0	42,0		2,8	113,00	26	3,9	16,20	11,0	20,0		1,1	80,00	14	7,3
1,40	15,0	32,0		1,5	87,00	17	5,8	16,40	17,0	29,0		1,7	60,00	28	3,5
1,60	13,0	26,0		1,3	107,00	12	8,2	16,60	21,0	30,0		2,1	47,00	45	2,2
1,80	15,0	31,0		1,5	80,00	19	5,3	16,80	15,0	22,0		1,5	40,00	38	2,7
2,00	12,0	24,0		1,2	73,00	16	6,1	17,00	19,0	25,0		1,9	47,00	40	2,5
2,20	11,0	22,0		1,1	73,00	15	6,6	17,20	21,0	28,0		2,1	93,00	23	4,4
2,40	9,0	20,0		0,9	47,00	19	5,2	17,40	14,0	28,0		1,4	60,00	23	4,3
2,60	7,0	14,0		0,7	53,00	13	7,6	17,60	12,0	21,0		1,2	60,00	20	5,0
2,80	8,0	16,0		0,8	40,00	20	5,0	17,80	12,0	21,0		1,2	80,00	15	6,7
3,00	8,0	14,0		0,8	40,00	20	5,0	18,00	13,0	25,0		1,3	93,00	14	7,2
3,20	7,0	13,0		0,7	40,00	18	5,7	18,20	15,0	29,0		1,5	87,00	17	5,8
3,40	14,0	20,0		1,4	40,00	35	2,9	18,40	16,0	29,0		1,6	93,00	17	5,8
3,60	16,0	22,0		1,6	53,00	30	3,3	18,60	21,0	35,0		2,1	113,00	19	5,4
3,80	11,0	19,0		1,1	53,00	21	4,8	18,80	20,0	37,0		2,0	47,00	43	2,4
4,00	9,0	17,0		0,9	73,00	12	8,1	19,00	19,0	26,0		1,9	120,00	16	6,3
4,20	9,0	20,0		0,9	53,00	17	5,9	19,20	24,0	42,0		2,4	93,00	26	3,9
4,40	10,0	18,0		1,0	60,00	17	6,0	19,40	29,0	43,0		2,8	187,00	16	6,4
4,60	11,0	20,0		1,1	53,00	21	4,8	19,60	33,0	61,0		3,2	220,00	15	6,7
4,80	9,0	17,0		0,9	53,00	17	5,9	19,80	32,0	65,0		3,1	207,00	15	6,5
5,00	11,0	19,0		1,1	67,00	16	6,1	20,00	31,0	62,0		3,0	193,00	16	6,2
5,20	14,0	24,0		1,4	60,00	23	4,3	20,20	32,0	61,0		3,1			
5,40	12,0	21,0		1,2	60,00	20	5,0								
5,60	12,0	21,0		1,2	33,00	36	2,8								
5,80	10,0	15,0		1,0	33,00	30	3,3								
6,00	10,0	15,0		1,0	53,00	19	5,3								
6,20	9,0	17,0		0,9	53,00	17	5,9								
6,40	9,0	17,0		0,9	53,00	17	5,9								
6,60	8,0	16,0		0,8	40,00	20	5,0								
6,80	7,0	13,0		0,7	47,00	15	6,7								
7,00	8,0	15,0		0,8	40,00	20	5,0								
7,20	12,0	18,0		1,2	80,00	15	6,7								
7,40	12,0	24,0		1,2	33,00	36	2,8								
7,60	8,0	13,0		0,8	33,00	24	4,1								
7,80	7,0	12,0		0,7	27,00	26	3,9								
8,00	6,0	10,0		0,6	47,00	13	7,8								
8,20	7,0	14,0		0,7	53,00	13	7,6								
8,40	10,0	18,0		1,0	67,00	15	6,7								
8,60	11,0	21,0		1,1	53,00	21	4,8								
8,80	16,0	24,0		1,6	87,00	18	5,4								
9,00	19,0	32,0		1,9	100,00	19	5,3								
9,20	14,0	29,0		1,4	73,00	19	5,2								
9,40	13,0	24,0		1,3	73,00	18	5,6								
9,60	9,0	20,0		0,9	40,00	23	4,4								
9,80	16,0	22,0		1,6	53,00	30	3,3								
10,00	12,0	20,0		1,2	67,00	18	5,6								
10,20	18,0	28,0		1,8	80,00	23	4,4								
10,40	13,0	25,0		1,3	53,00	25	4,1								
10,60	15,0	23,0		1,5	87,00	17	5,8								
10,80	13,0	26,0		1,3	60,00	22	4,6								
11,00	11,0	20,0		1,1	60,00	18	5,5								
11,20	20,0	29,0		2,0	107,00	19	5,4								
11,40	15,0	31,0		1,5	93,00	16	6,2								
11,60	13,0	27,0		1,3	67,00	19	5,2								
11,80	18,0	28,0		1,8	60,00	30	3,3								
12,00	15,0	24,0		1,5	87,00	17	5,8								
12,20	13,0	26,0		1,3	80,00	16	6,2								
12,40	23,0	35,0		2,3	107,00	21	4,7								
12,60	24,0	40,0		2,4	113,00	21	4,7								
12,80	18,0	35,0		1,8	87,00	21	4,8								
13,00	18,0	31,0		1,8	113,00	16	6,3								
13,20	18,0	35,0		1,8	140,00	13	7,8								
13,40	22,0	43,0		2,2	80,00	28	3,6								
13,60	22,0	34,0		2,2	33,00	67	1,5								
13,80	19,0	24,0		1,9	127,00	15	6,7								
14,00	23,0	42,0		2,3	100,00	23	4,3								
14,20	34,0	49,0		3,3	107,00	32	3,1								
14,40	27,0	43,0		2,6	53,00	51	2,0								
14,60	12,0	20,0		1,2	47,00	26	3,9								
14,80	11,0	18,0		1,1	53,00	21	4,8								
15,00	12,0	20,0		1,2	47,00	26	3,9								

PROVE PENETROMETRICHE Srl
 Elaborazione Dati
Il Tecnico

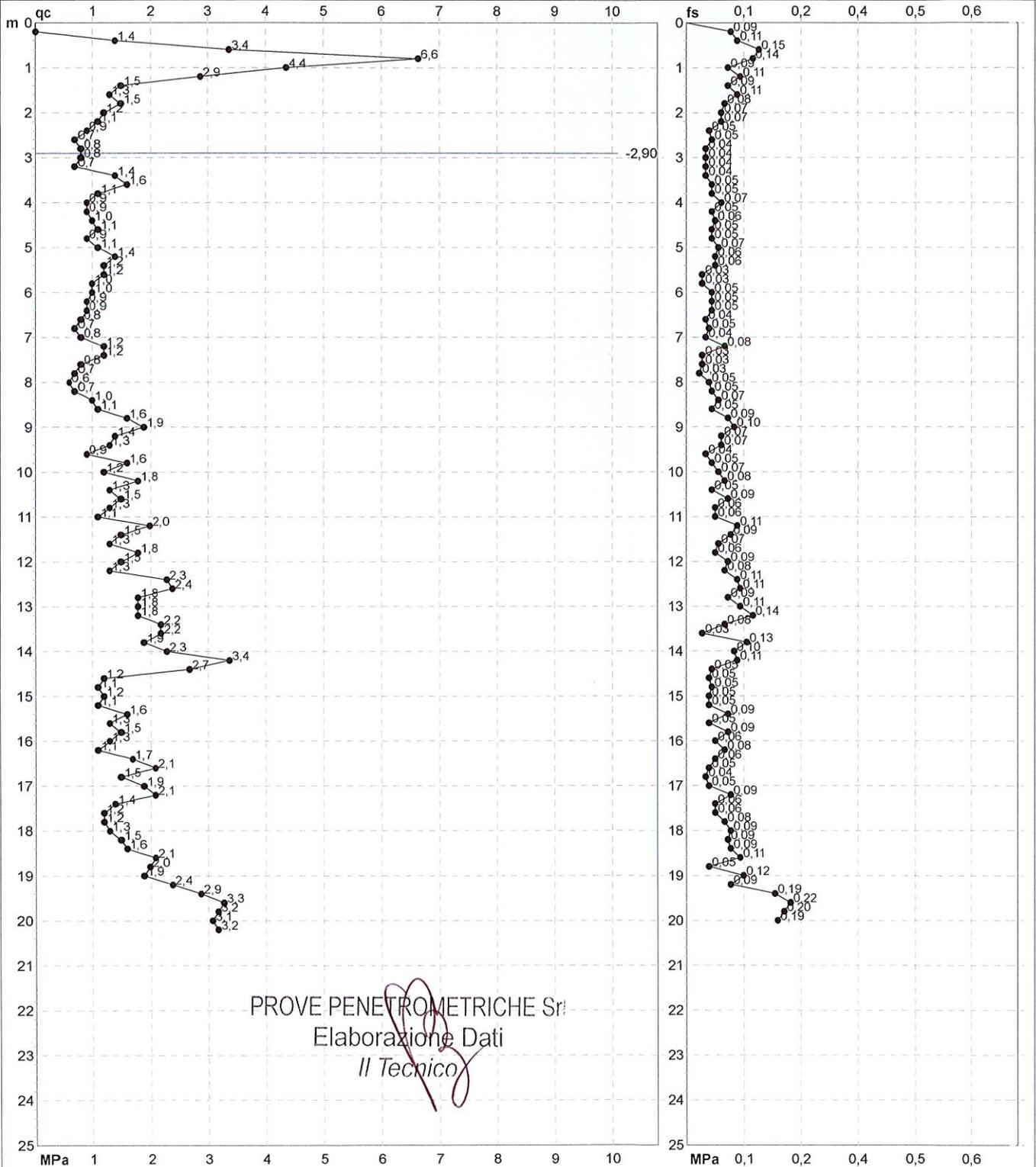
H = profondità
 L1 = prima lettura (punta)
 L2 = seconda lettura (punta + laterale)
 Lt = terza lettura (totale)
 CT = 10,00 costante di trasformazione
 qc = resistenza di punta
 fs = resistenza laterale calcolata
 0.20 m sopra quota qc
 F = rapporto Begemann (qc / fs)
 Rf = rapporto Schmertmann (fs / qc)*100

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA
DIAGRAMMI DI RESISTENZA

CPT	2
riferimento	092-2015

Committente: **Studio Tecnico Associato For-Geo**
 Cantiere: **Studio terreno di fondazione**
 Località: **Carpi (MO), via dell'Industria**

U.M.: **MPa** Data eseg.: **13/11/2015**
 Scala: **1:125**
 Pagina: **2/2** Quota inizio:
 Elaborato: Falda: **-2,90 m**



PROVE PENETROMETRICHE Srl
 Elaborazione Dati
Il Tecnico

Penetrometro: GOUDA 200 kN	Proforo: m
Responsabile: Dott. Geol. Salvatore Mucci	Corr.astine: kN/ml
Assistente:	Cod. punta:

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA

LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI

CPT
3

riferimento

092-2015

 Committente: **Studio Tecnico Associato For-Geo**

 Cantiere: **Studio terreno di fondazione**

 Località: **Carpi (MO), via dell'Industria**

 U.M.: **MPa**

 Data exec.: **13/11/2015**

 Pagina: **1/2**

Elaborato:

 Falda: **-2,40 m**

H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc MPa	fs kPa	F -	Rf %	H m	L1 -	L2 -	Lt -	qc MPa	fs kPa	F -	Rf %
0,20	0,0	0,0		0,0	147,00	0		15,20	13,0	20,0		1,3	67,00	19	5,2
0,40	38,0	60,0		3,7	200,00	19	5,3	15,40	18,0	28,0		1,8	100,00	18	5,6
0,60	50,0	80,0		4,9	213,00	23	4,3	15,60	15,0	30,0		1,5	53,00	28	3,5
0,80	60,0	92,0		5,9	187,00	32	3,1	15,80	16,0	24,0		1,6	53,00	30	3,3
1,00	51,0	79,0		5,0	187,00	27	3,7	16,00	14,0	22,0		1,4	60,00	23	4,3
1,20	26,0	54,0		2,5	160,00	16	6,2	16,20	23,0	32,0		2,3	87,00	26	3,8
1,40	18,0	42,0		1,8	107,00	17	5,9	16,40	20,0	33,0		2,0	73,00	27	3,7
1,60	14,0	30,0		1,4	80,00	18	5,7	16,60	11,0	22,0		1,1	67,00	16	6,1
1,80	14,0	26,0		1,4	53,00	26	3,8	16,80	12,0	22,0		1,2	47,00	26	3,9
2,00	9,0	17,0		0,9	47,00	19	5,2	17,00	19,0	26,0		1,9	60,00	32	3,2
2,20	9,0	16,0		0,9	47,00	19	5,2	17,20	10,0	19,0		1,0	73,00	14	7,3
2,40	10,0	17,0		1,0	33,00	30	3,3	17,40	13,0	24,0		1,3	60,00	22	4,6
2,60	11,0	16,0		1,1	40,00	28	3,6	17,60	12,0	21,0		1,2	53,00	23	4,4
2,80	11,0	17,0		1,1	60,00	18	5,5	17,80	12,0	20,0		1,2	87,00	14	7,3
3,00	12,0	21,0		1,2	47,00	26	3,9	18,00	13,0	26,0		1,3	87,00	15	6,7
3,20	11,0	18,0		1,1	53,00	21	4,8	18,20	16,0	29,0		1,6	33,00	48	2,1
3,40	10,0	18,0		1,0	40,00	25	4,0	18,40	15,0	20,0		1,5	93,00	16	6,2
3,60	10,0	16,0		1,0	53,00	19	5,3	18,60	19,0	33,0		1,9	113,00	17	5,9
3,80	13,0	21,0		1,3	33,00	39	2,5	18,80	18,0	35,0		1,8	120,00	15	6,7
4,00	18,0	23,0		1,8	67,00	27	3,7	19,00	24,0	42,0		2,4	140,00	17	5,8
4,20	12,0	22,0		1,2	80,00	15	6,7	19,20	27,0	48,0		2,6	180,00	15	6,7
4,40	13,0	25,0		1,3	47,00	28	3,6	19,40	28,0	55,0		2,7	153,00	18	5,5
4,60	12,0	19,0		1,2	73,00	16	6,1	19,60	28,0	51,0		2,7	133,00	21	4,8
4,80	14,0	25,0		1,4	53,00	26	3,8	19,80	30,0	50,0		2,9	147,00	20	4,9
5,00	9,0	17,0		0,9	40,00	23	4,4	20,00	34,0	56,0		3,3	207,00	16	6,1
5,20	10,0	16,0		1,0	67,00	15	6,7	20,20	30,0	61,0		2,9			
5,40	12,0	22,0		1,2	40,00	30	3,3								
5,60	9,0	15,0		0,9	33,00	27	3,7								
5,80	9,0	14,0		0,9	40,00	23	4,4								
6,00	7,0	13,0		0,7	67,00	10	9,6								
6,20	14,0	24,0		1,4	60,00	23	4,3								
6,40	9,0	18,0		0,9	40,00	23	4,4								
6,60	8,0	14,0		0,8	33,00	24	4,1								
6,80	9,0	14,0		0,9	47,00	19	5,2								
7,00	9,0	16,0		0,9	40,00	23	4,4								
7,20	7,0	13,0		0,7	73,00	10	10,4								
7,40	9,0	20,0		0,9	80,00	11	8,9								
7,60	9,0	21,0		0,9	47,00	19	5,2								
7,80	8,0	15,0		0,8	33,00	24	4,1								
8,00	7,0	12,0		0,7	33,00	21	4,7								
8,20	8,0	13,0		0,8	73,00	11	9,1								
8,40	12,0	23,0		1,2	60,00	20	5,0								
8,60	10,0	19,0		1,0	53,00	19	5,3								
8,80	11,0	19,0		1,1	67,00	16	6,1								
9,00	14,0	24,0		1,4	73,00	19	5,2								
9,20	12,0	23,0		1,2	80,00	15	6,7								
9,40	14,0	26,0		1,4	80,00	18	5,7								
9,60	14,0	26,0		1,4	73,00	19	5,2								
9,80	15,0	26,0		1,5	40,00	38	2,7								
10,00	9,0	15,0		0,9	47,00	19	5,2								
10,20	15,0	22,0		1,5	53,00	28	3,5								
10,40	15,0	23,0		1,5	60,00	25	4,0								
10,60	9,0	18,0		0,9	53,00	17	5,9								
10,80	8,0	16,0		0,8	53,00	15	6,6								
11,00	16,0	24,0		1,6	60,00	27	3,8								
11,20	19,0	28,0		1,9	147,00	13	7,7								
11,40	22,0	44,0		2,2	153,00	14	7,0								
11,60	22,0	45,0		2,2	133,00	17	6,0								
11,80	23,0	43,0		2,3	100,00	23	4,3								
12,00	18,0	33,0		1,8	87,00	21	4,8								
12,20	12,0	25,0		1,2	60,00	20	5,0								
12,40	16,0	25,0		1,6	87,00	18	5,4								
12,60	22,0	35,0		2,2	73,00	30	3,3								
12,80	27,0	38,0		2,6	100,00	27	3,7								
13,00	19,0	34,0		1,9	133,00	14	7,0								
13,20	26,0	46,0		2,5	167,00	16	6,4								
13,40	37,0	62,0		3,6	173,00	21	4,7								
13,60	19,0	45,0		1,9	100,00	19	5,3								
13,80	16,0	31,0		1,6	80,00	20	5,0								
14,00	13,0	25,0		1,3	67,00	19	5,2								
14,20	14,0	24,0		1,4	80,00	18	5,7								
14,40	16,0	28,0		1,6	60,00	27	3,8								
14,60	14,0	23,0		1,4	67,00	21	4,8								
14,80	12,0	22,0		1,2	47,00	26	3,9								
15,00	14,0	21,0		1,4	47,00	30	3,4								

PROVE PENETROMETRICHE Srl
Elaborazione Dati
Il Tecnico

H = profondità

L1 = prima lettura (punta)

L2 = seconda lettura (punta + laterale)

Lt = terza lettura (totale)

CT = 10,00 costante di trasformazione

qc = resistenza di punta

fs = resistenza laterale calcolata

0,20 m sopra quota qc

F = rapporto Begemann (qc / fs)

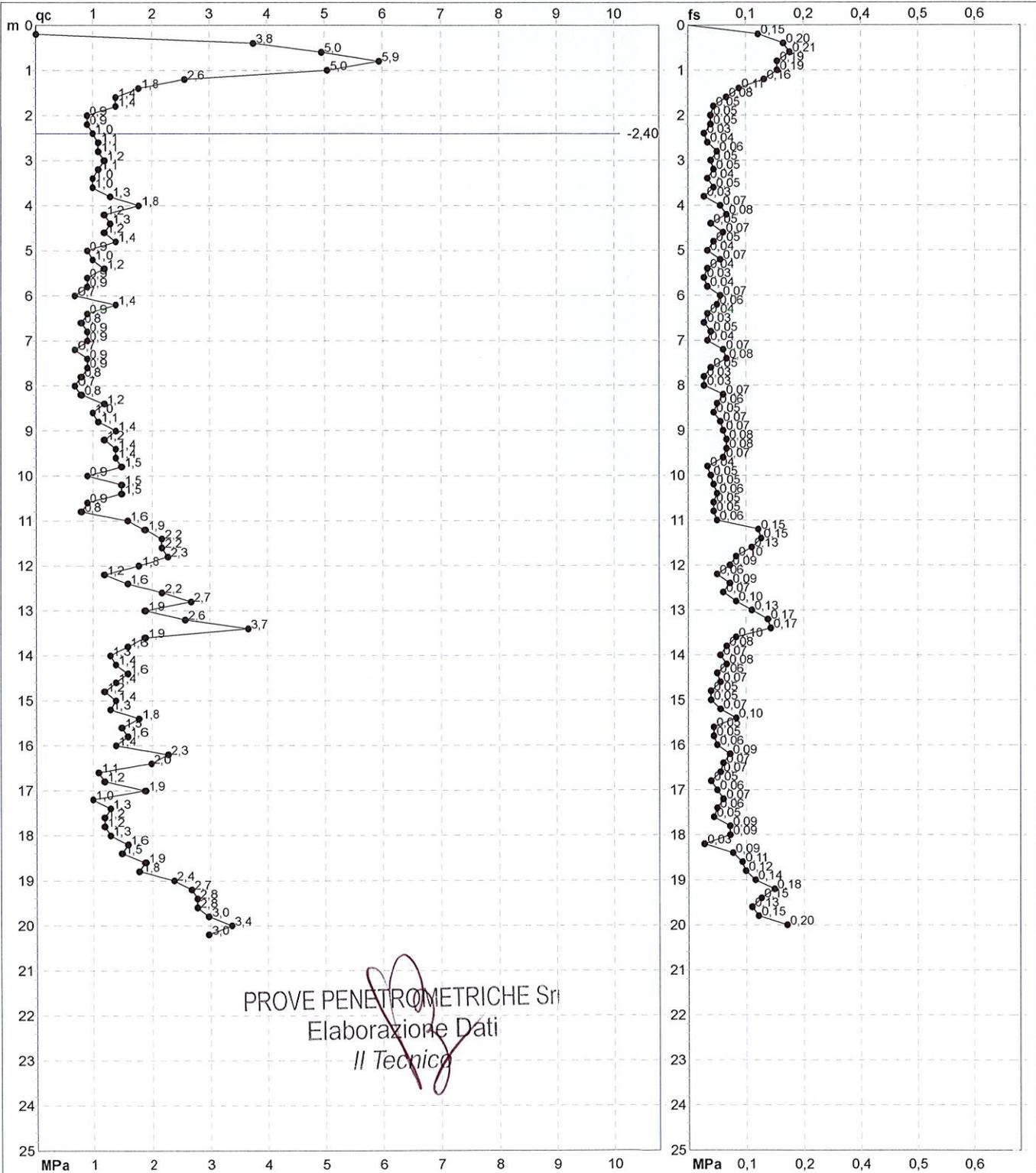
Rf = rapporto Schmertmann (fs / qc)*100

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA
DIAGRAMMI DI RESISTENZA

CPT	3
riferimento	092-2015

Committente: **Studio Tecnico Associato For-Geo**
 Cantiere: **Studio terreno di fondazione**
 Località: **Carpi (MO), via dell'Industria**

U.M.: **MPa** Data esec.: **13/11/2015**
 Scala: **1:125**
 Pagina: **2/2** Quota inizio:
 Elaborato: Falda: **-2,40 m**



Penetrometro: GOUDA 200 kN	Preforo: m
Responsabile: Dott. Geol. Salvatore Mucci	Corr.astine: kN/ml
Assistente:	Cod. punta:

LEGENDA VALUTAZIONI LITOLOGICHE CORRELAZIONI GENERALI

Valutazioni in base al rapporto: $F = (q_c / f_s)$

Begemann 1965 - Raccomandazioni A.G.I. 1977

Valide in via approssimata per terreni immersi in falda :

$F = q_c / f_s$	NATURA LITOLOGICA	PROPRIETA'
$F \leq 1470 \text{ kPa}$	TORBE ED ARGILLE ORGANICHE	COESIVE
$1470 \text{ kPa} < F \leq 2940 \text{ kPa}$	LIMI ED ARGILLE	COESIVE
$2940 \text{ kPa} < F \leq 5880 \text{ kPa}$	LIMI SABBIOSI E SABBIE LIMOSE	GRANULARI
$F > 5880 \text{ kPa}$	SABBIE E SABBIE CON GHIAIA	GRANULARI

Vengono inoltre riportate le valutazioni stratigrafiche fornite da Schmertmann (1978), ricavabili in base ai valori di q_c e di $FR = (f_s / q_c) \%$:

- AO = argilla organica e terreni misti
- Att = argilla (inorganica) molto tenera
- At = argilla (inorganica) tenera
- Am = argilla (inorganica) di media consistenza
- Ac = argilla (inorganica) consistente
- Acc = argilla (inorganica) molto consistente
- ASL = argilla sabbiosa e limosa
- SAL = sabbia e limo / sabbia e limo argilloso
- Ss = sabbia sciolta
- Sm = sabbia mediamente addensata
- Sd = sabbia densa o cementata
- SC = sabbia con molti fossili, calcareniti

Secondo Schmertmann il valore della resistenza laterale da usarsi, dovrebbe essere pari a:

- $1/3 \pm 1/2$ di quello misurato , per depositi sabbiosi
- quello misurato (inalterato) , per depositi coesivi.

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA

DIAGRAMMI LITOLOGIA

CPT

1

riferimento

092-2015

Committente: Studio Tecnico Associato For-Geo

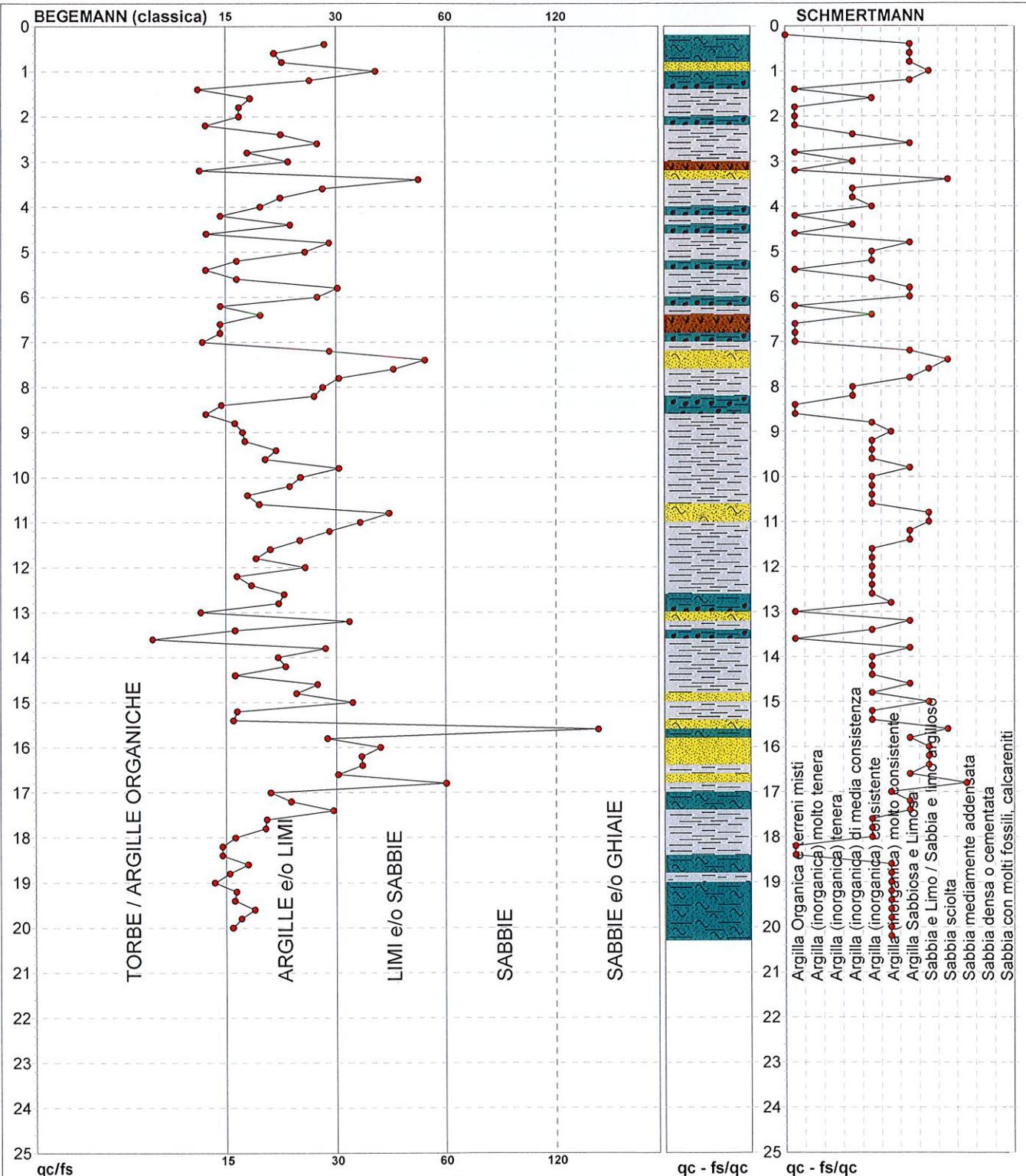
Cantiere: Studio terreno di fondazione

Località: Carpi (MO), via dell'Industria

U.M.: MPa
Scala: 1:125
Pagina: 1
Elaborato:

Data exec.: 13/11/2015

Falda: -2,90 m



Torbe / Argille org. :	16 punti, 12,90%	Argilla Organica e terreni misti:	19 punti, 15,32%	Argilla Sabbiosa e Limosa:	20 punti, 16,13%
Argille e/o Limi :	71 punti, 57,26%	Argilla (inorganica) media consist.:	7 punti, 5,65%	Sabbia e Limo / Sabbia e limo arg.:	8 punti, 6,45%
Limi e/o Sabbie :	12 punti, 9,68%	Argilla (inorganica) consistente:	30 punti, 24,19%	Sabbia sciolta:	3 punti, 2,42%
		Argilla (inorganica) molto consist.:	11 punti, 8,87%	Sabbia mediamente addensata:	1 punto, 0,81%
Sabbie e/o Ghiaie :	1 punti, 0,81%				

FON018

Software by dott. Geol. Diego Merlin 0425-840820

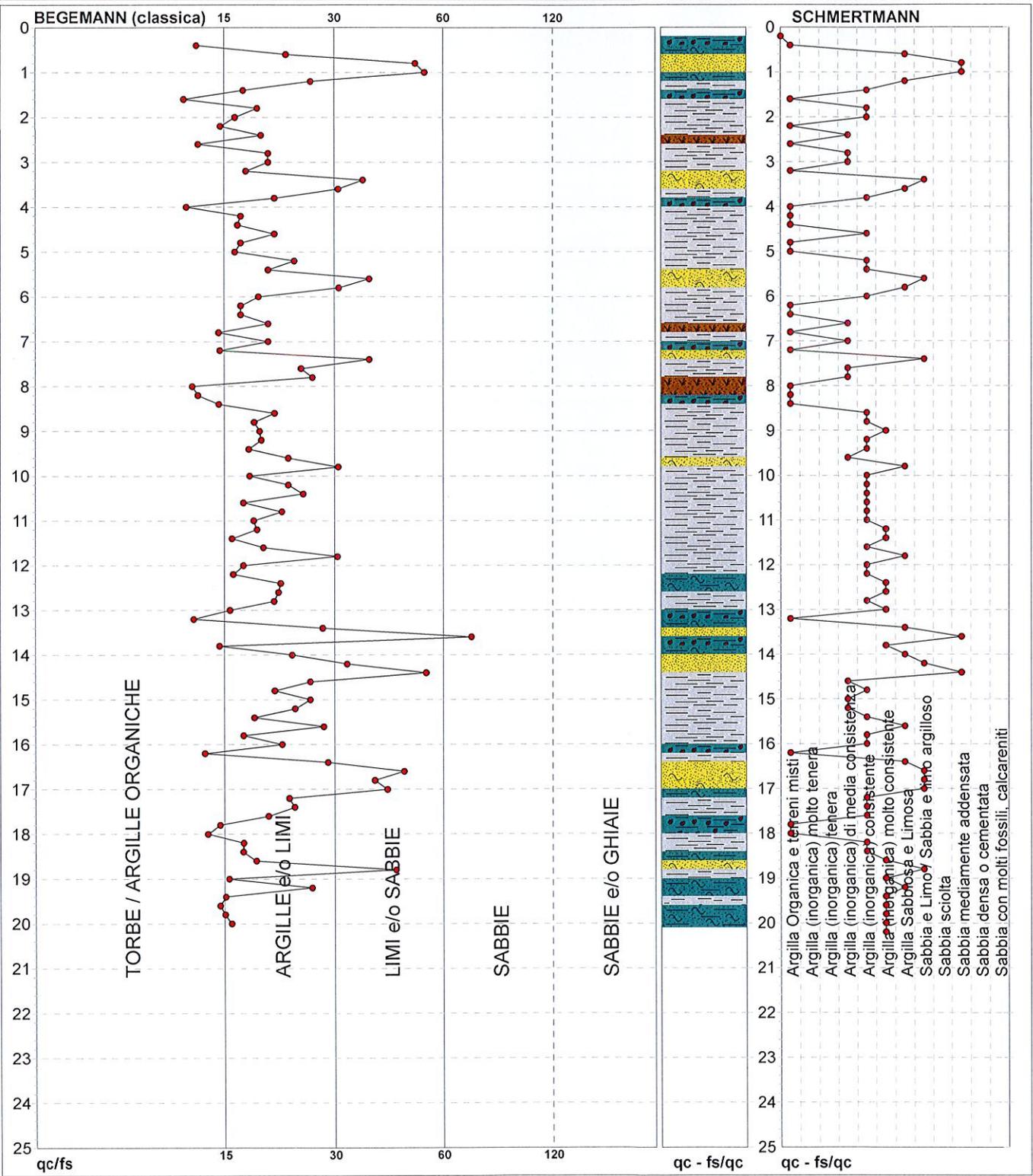
PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA

DIAGRAMMI LITOLOGIA

CPT	2
referimento	092-2015

Committente: **Studio Tecnico Associato For-Geo**
 Cantiere: **Studio terreno di fondazione**
 Località: **Carpi (MO), via dell'Industria**

U.M.:	MPa	Data exec.:	13/11/2015
Scala:	1:125		
Pagina:	1		
Elaborato:		Falda:	-2,90 m



Torbe / Argille org. :	16 punti, 12,90%	Argilla Organica e terreni misti:	21 punti, 16,94%	Argilla Sabbiosa e Limosa:	11 punti, 8,87%
Argille e/o Limi :	69 punti, 55,65%	Argilla (inorganica) media consist.:	11 punti, 8,87%	Sabbia e Limo / Sabbia e limo arg.:	8 punti, 6,45%
Limi e/o Sabbie :	14 punti, 11,29%	Argilla (inorganica) consistente:	31 punti, 25,00%	Sabbia mediamente addensata:	4 punti, 3,23%
Sabbie:	1 punti, 0,81%	Argilla (inorganica) molto consist.:	13 punti, 10,48%		

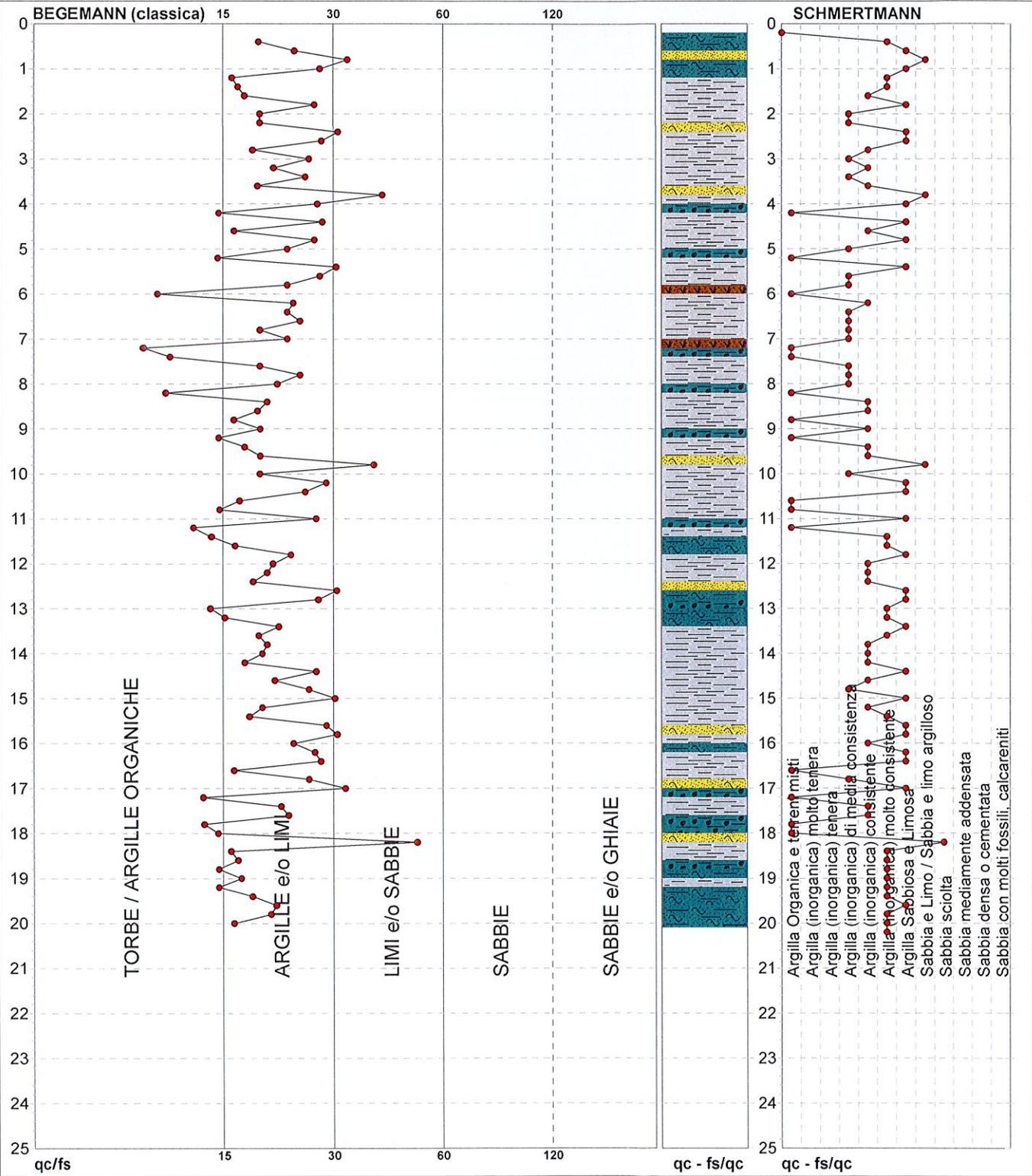
PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA

DIAGRAMMI LITOLOGIA

CPT	3
referimento	092-2015

Committente: Studio Tecnico Associato For-Geo
 Cantiere: Studio terreno di fondazione
 Località: Carpi (MO), via dell'Industria

U.M.: MPa
 Scala: 1:125
 Pagina: 1
 Elaborato: Falda: -2,40 m
 Data exec.: 13/11/2015



Torbe / Argille org. :	16 punti, 12,90%	Argilla Organica e terreni misti:	15 punti, 12,10%	Argilla Sabbiosa e Limosa:	24 punti, 19,35%
Argille e/o Limi :	76 punti, 61,29%	Argilla (inorganica) media consist.:	17 punti, 13,71%	Sabbia e Limo / Sabbia e limo arg.:	3 punti, 2,42%
Limi e/o Sabbie :	8 punti, 6,45%	Argilla (inorganica) consistente:	22 punti, 17,74%	Sabbia sciolta:	1 punto, 0,81%
		Argilla (inorganica) molto consist.:	17 punti, 13,71%		

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA PARAMETRI GEOTECNICI

CPT	1
riferimento	092-2015

Committente: Studio Tecnico Associato For-Geo	U.M.: MPa	Data esec.: 13/11/2015
Cantiere: Studio terreno di fondazione	Pagina: 2	
Località: Carpi (MO), via dell'Industria	Elaborato:	Falda: -2,90 m

Prof. m	qc U.M.	qc/fs	zone	γ' t/m ³	σ'_{vo} kPa	Vs m/s	NATURA COESIVA			NATURA GRANULARE													
							Cu kPa	OCR %	Eu50 U.M.	Eu25 U.M.	Mo U.M.	Dr %	Sc (°)	Ca (°)	Ko (°)	DB (°)	DM (°)	Me (°)	FL1	FL2	E'50 U.M.	E'25 U.M.	Mo U.M.
20,00	3,1	16,0	4	0,97	205,7	204	104,5	2,7	54,0	81,0	9,4	15	30	23	20	19	26	29	--	--	5,2	7,8	9,4
20,20	3,2	--	3	0,88	207,5	207	--	--	--	--	--	16	30	23	20	19	27	29	--	--	5,4	8,1	9,7

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA PARAMETRI GEOTECNICI

CPT	2
riferimento	092-2015

Committente: Studio Tecnico Associato For-Geo	U.M.: MPa	Data esec.: 13/11/2015
Cantiere: Studio terreno di fondazione	Pagina: 2	
Località: Carpi (MO), via dell'Industria	Elaborato:	Falda: -2,90 m

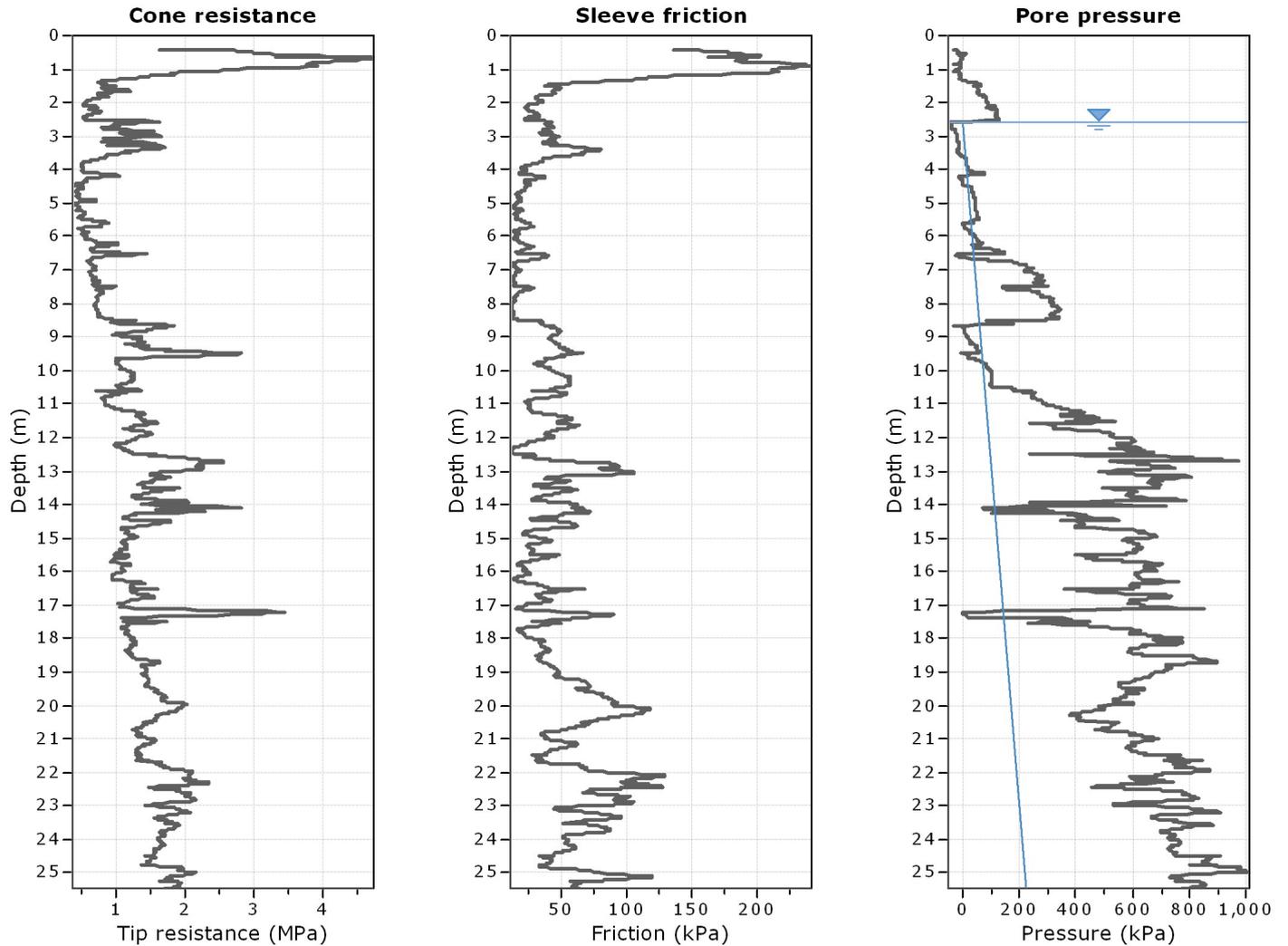
Prof. m	qc U.M.	qc/fs	zone	γ' t/m ³	σ'_{vo} kPa	Vs m/s	NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE											
							Cu kPa	OCR %	Eu50 U.M.	Eu25 U.M.	Mo U.M.	Dr %	Sc (°)	Ca (°)	Ko (°)	DB (°)	DM (°)	Me (°)	FL1	FL2	E'50 U.M.	E'25 U.M.	Mo U.M.
20,00	3,0	16,1	4	0,97	205,0	202	101,3	2,6	53,0	79,5	9,1	14	30	23	20	19	26	29	--	--	5,1	7,6	9,1
20,20	3,1	--	3	0,88	206,7	204	--	--	--	--	--	15	30	23	20	19	26	29	--	--	5,2	7,8	9,4

PROVA PENETROMETRICA STATICA MECCANICA
PARAMETRI GEOTECNICI

CPT	3
riferimento	092-2015

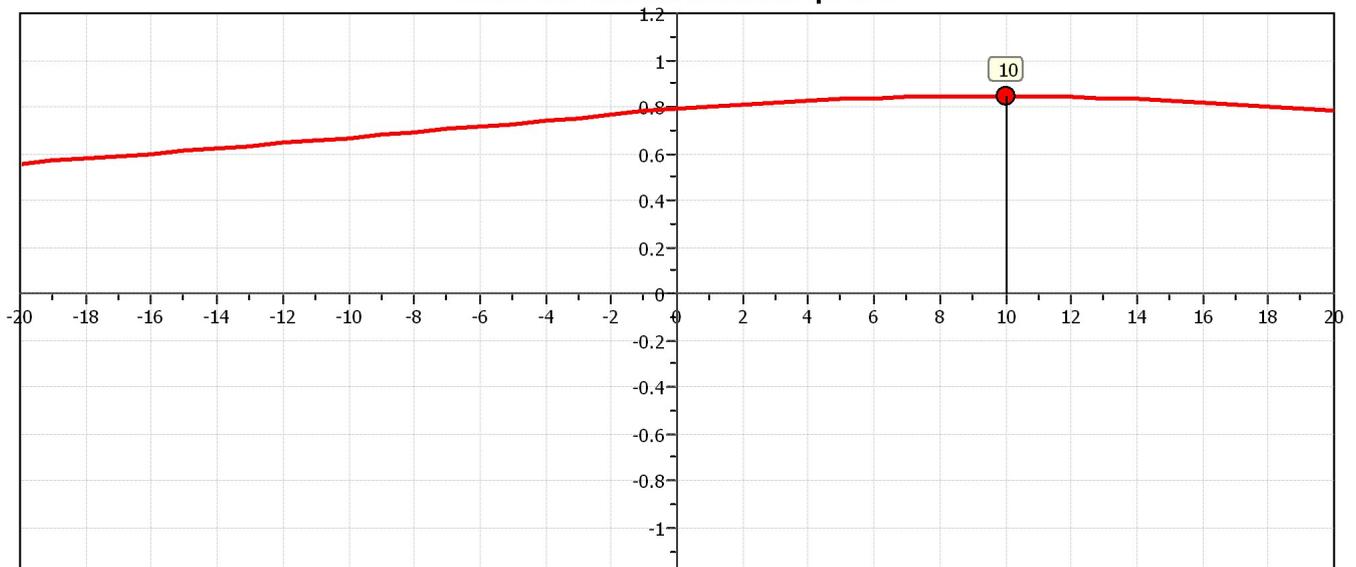
Committente: Studio Tecnico Associato For-Geo	U.M.: MPa	Data esec.: 13/11/2015
Cantiere: Studio terreno di fondazione	Pagina: 2	
Località: Carpi (MO), via dell'Industria	Elaborato:	Falda: -2,40 m

Prof. m	qc U.M.	qc/fs	zone	γ' t/m ³	σ'_{vo} kPa	Vs m/s	NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE											
							Cu kPa	OCR %	Eu50 U.M.	Eu25 U.M.	Mo U.M.	Dr %	Sc (°)	Ca (°)	Ko (°)	DB (°)	DM (°)	Me (°)	FL1	FL2	E'50 U.M.	E'25 U.M.	Mo U.M.
20,00	3,3	16,4	4 	0,98	201,1	209	111,1	3,0	54,9	82,3	10,0	17	30	24	20	19	27	29	--	--	5,6	8,3	10,0
20,20	2,9	--	3 	0,88	202,8	199	--	--	--	--	--	13	30	23	20	19	26	29	--	--	4,9	7,4	8,8

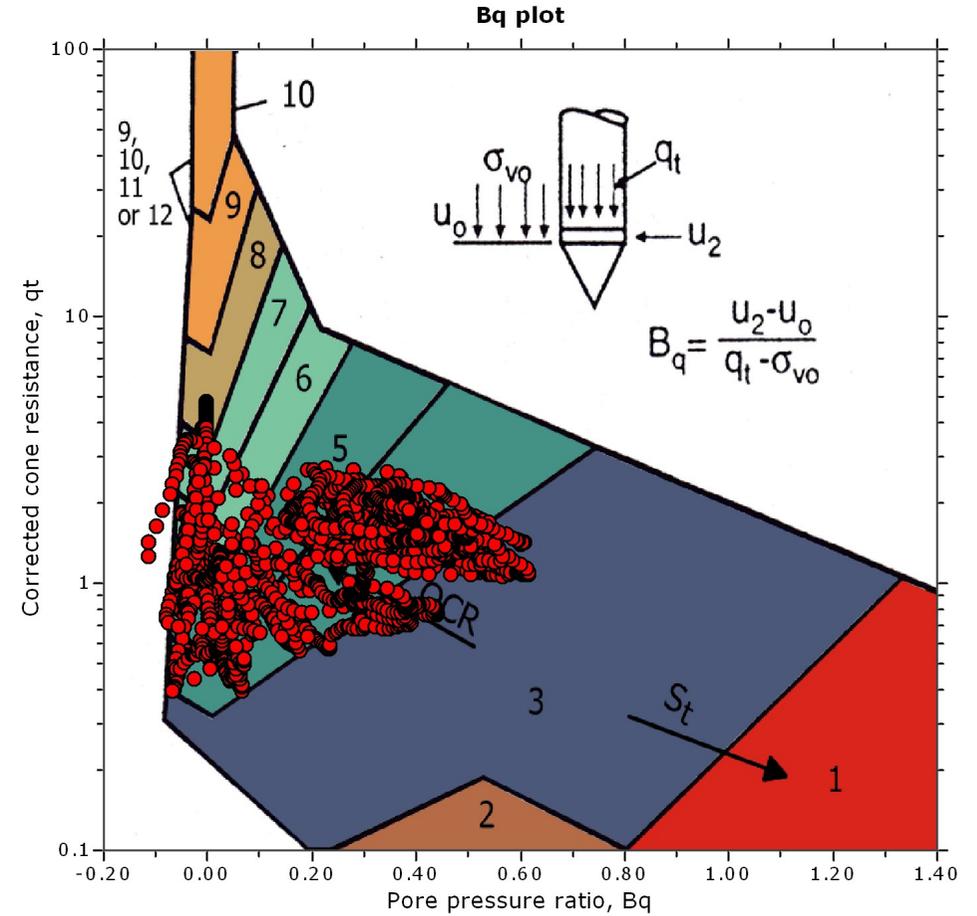
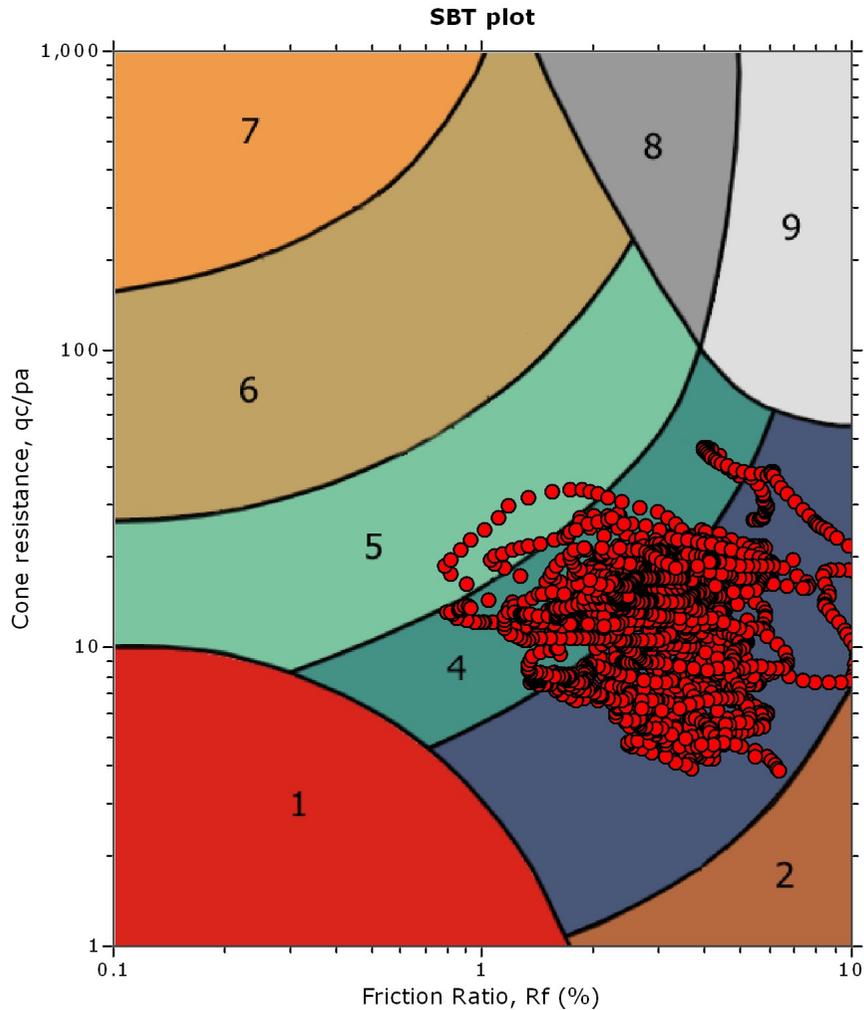


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw qc and fs values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).

Cross correlation between qc & fs



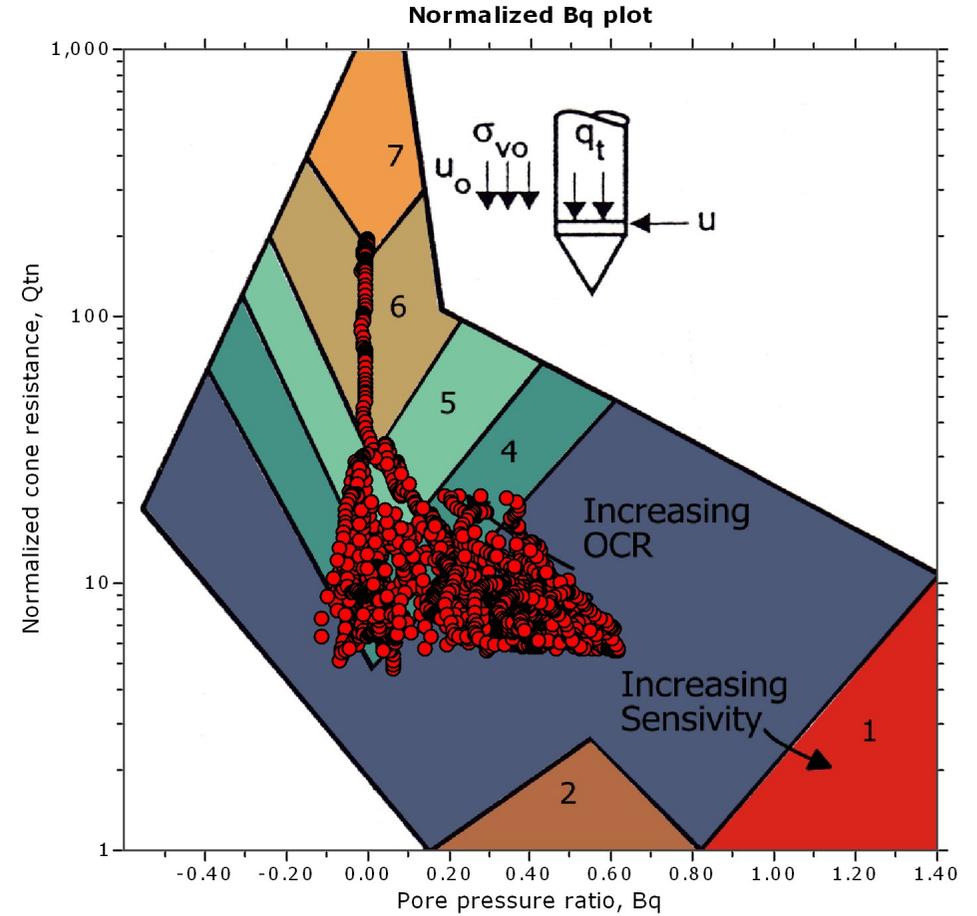
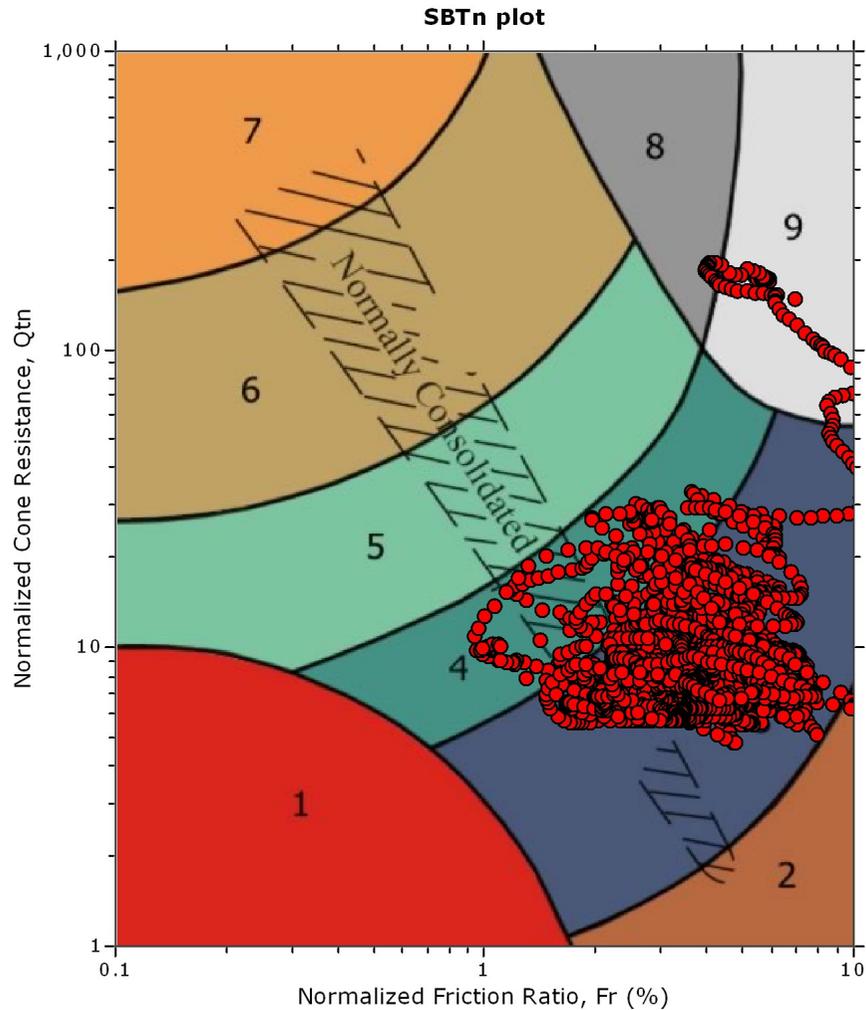
SBT - Bq plots



SBT legend

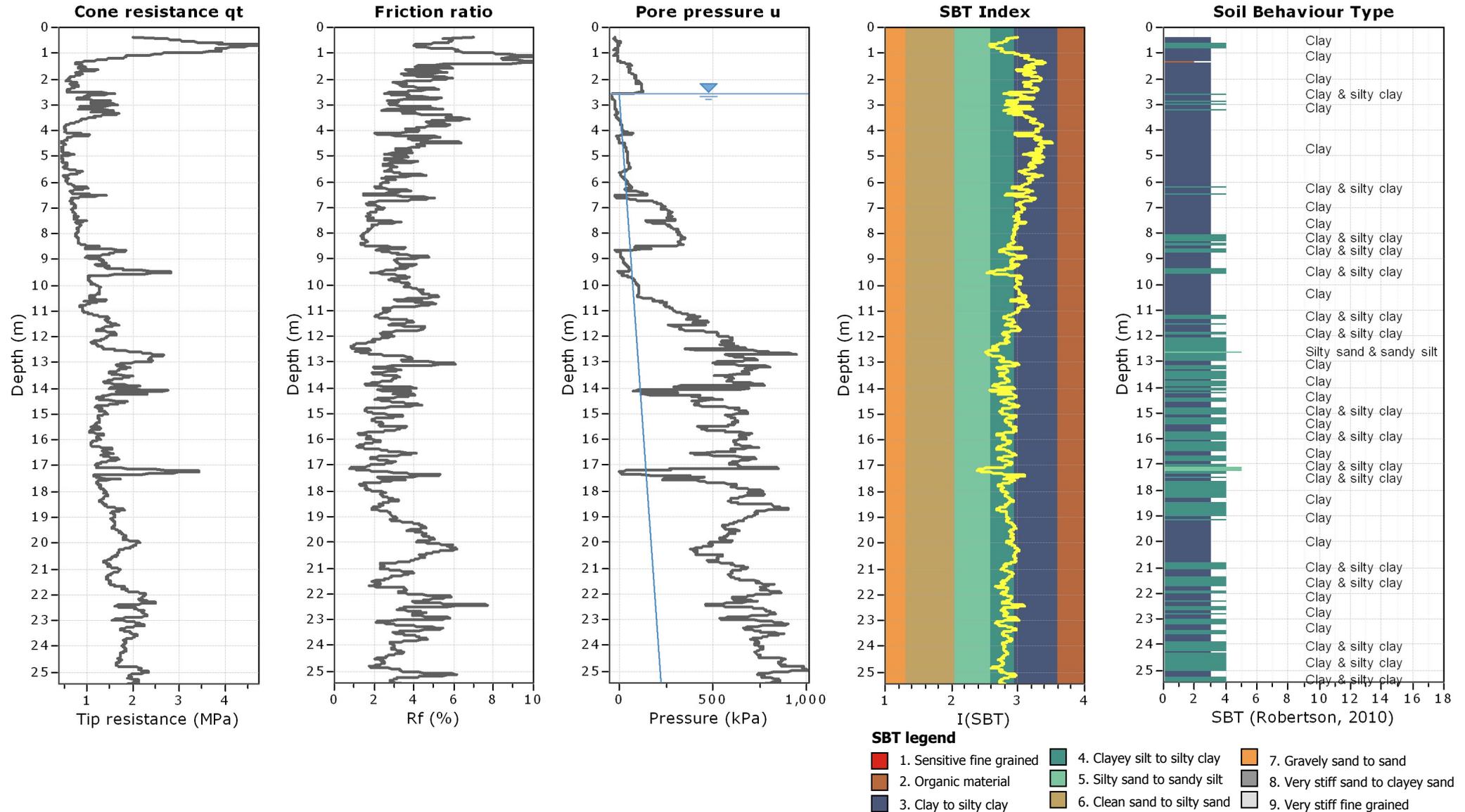
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty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

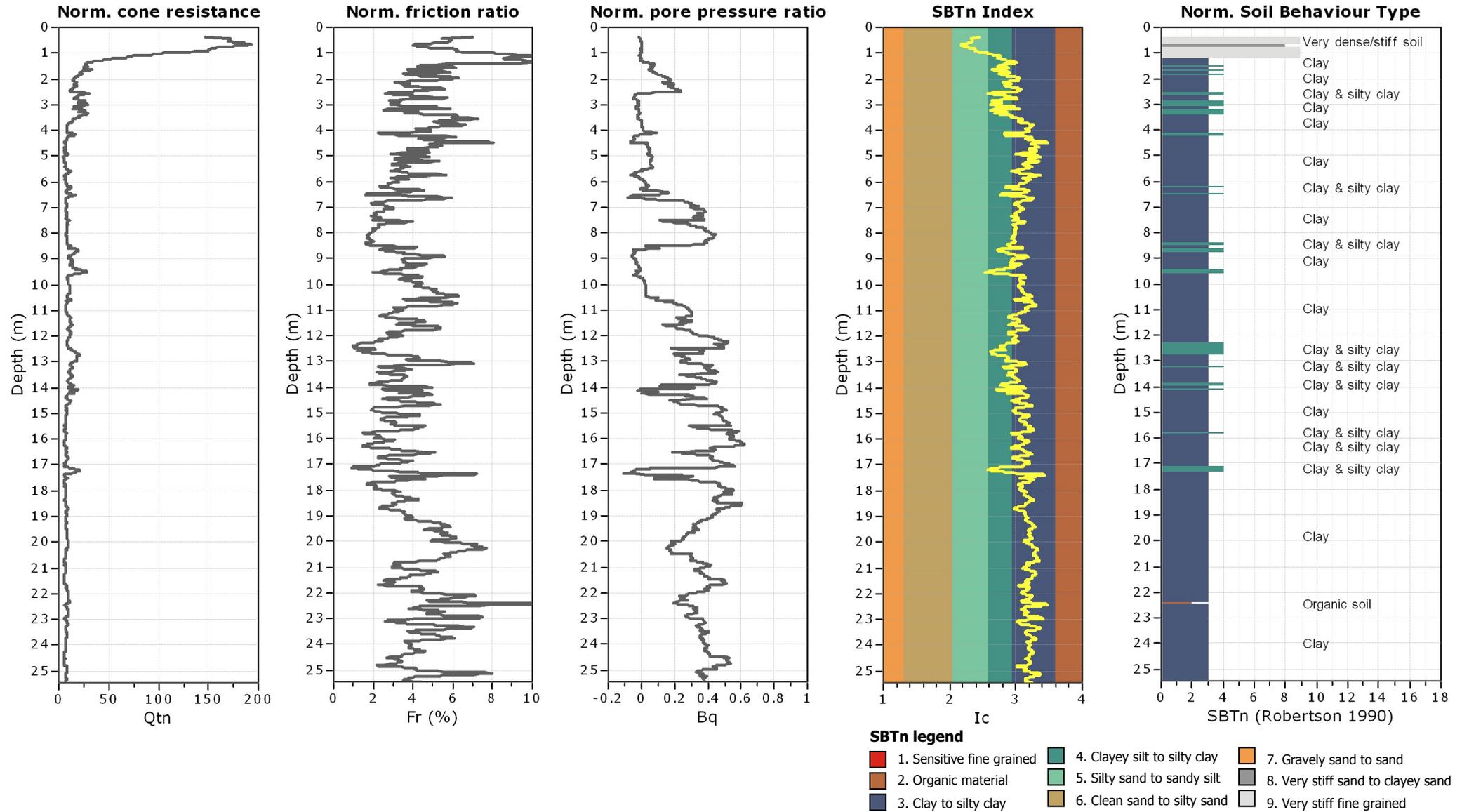
SBT - Bq plots (normalized)

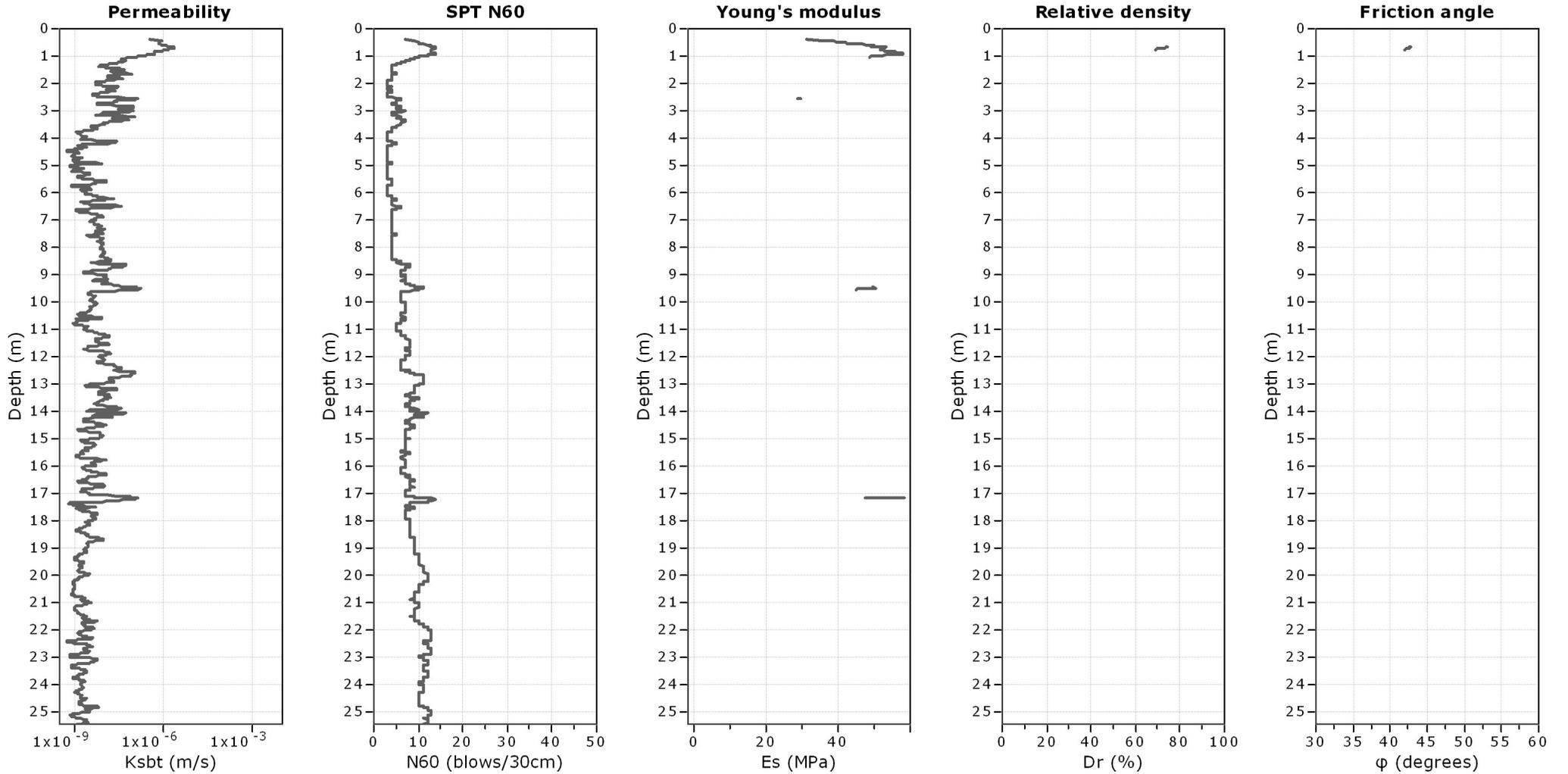


SBTn legend

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







Calculation parameters

Permeability: Based on SBT_n

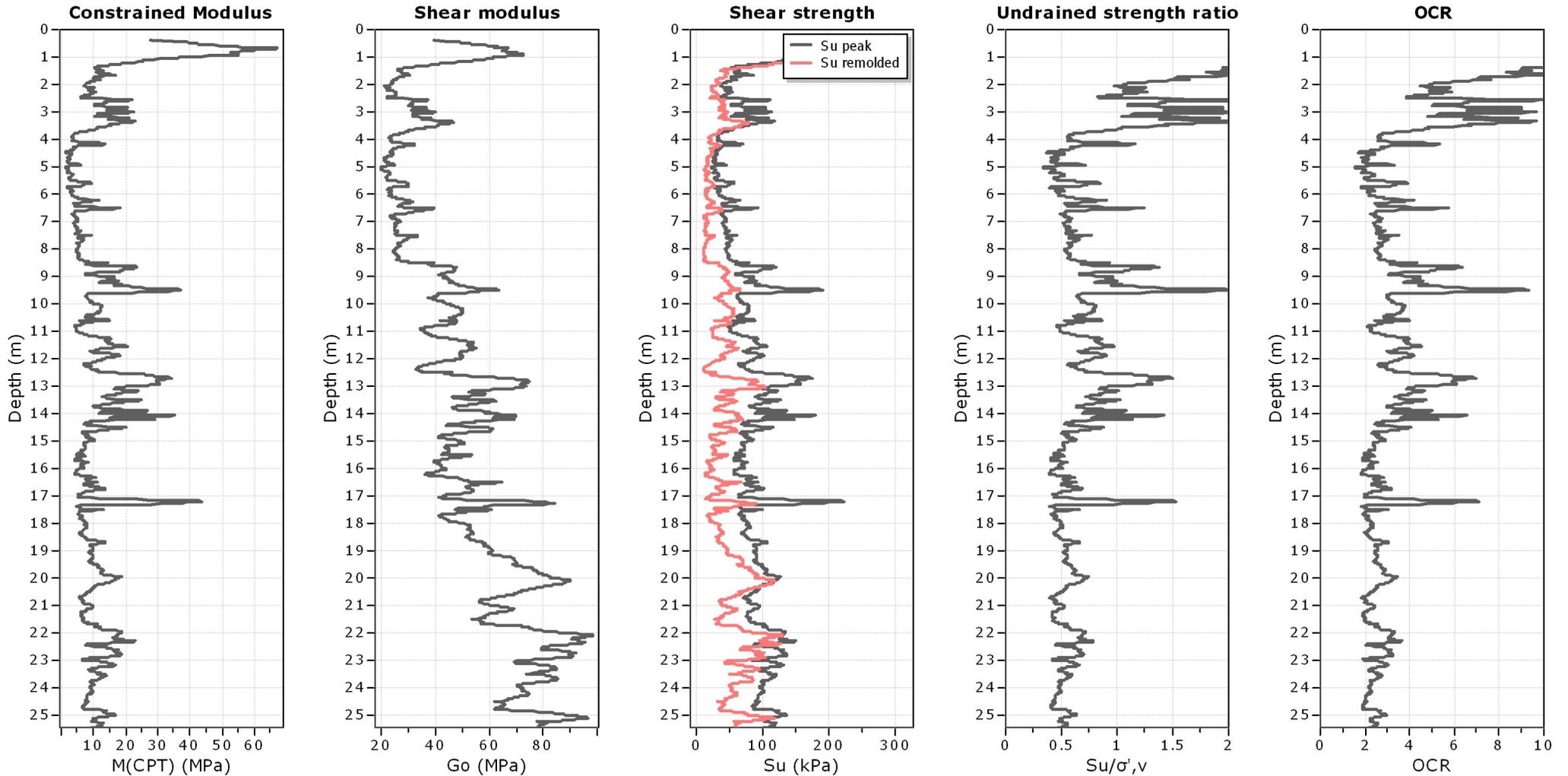
SPT N_{60} : Based on I_c and q_t

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

Relative density constant, C_{Dr} : 350.0

Phi: Based on Kulhawy & Mayne (1990)

● — User defined estimation data



Calculation parameters

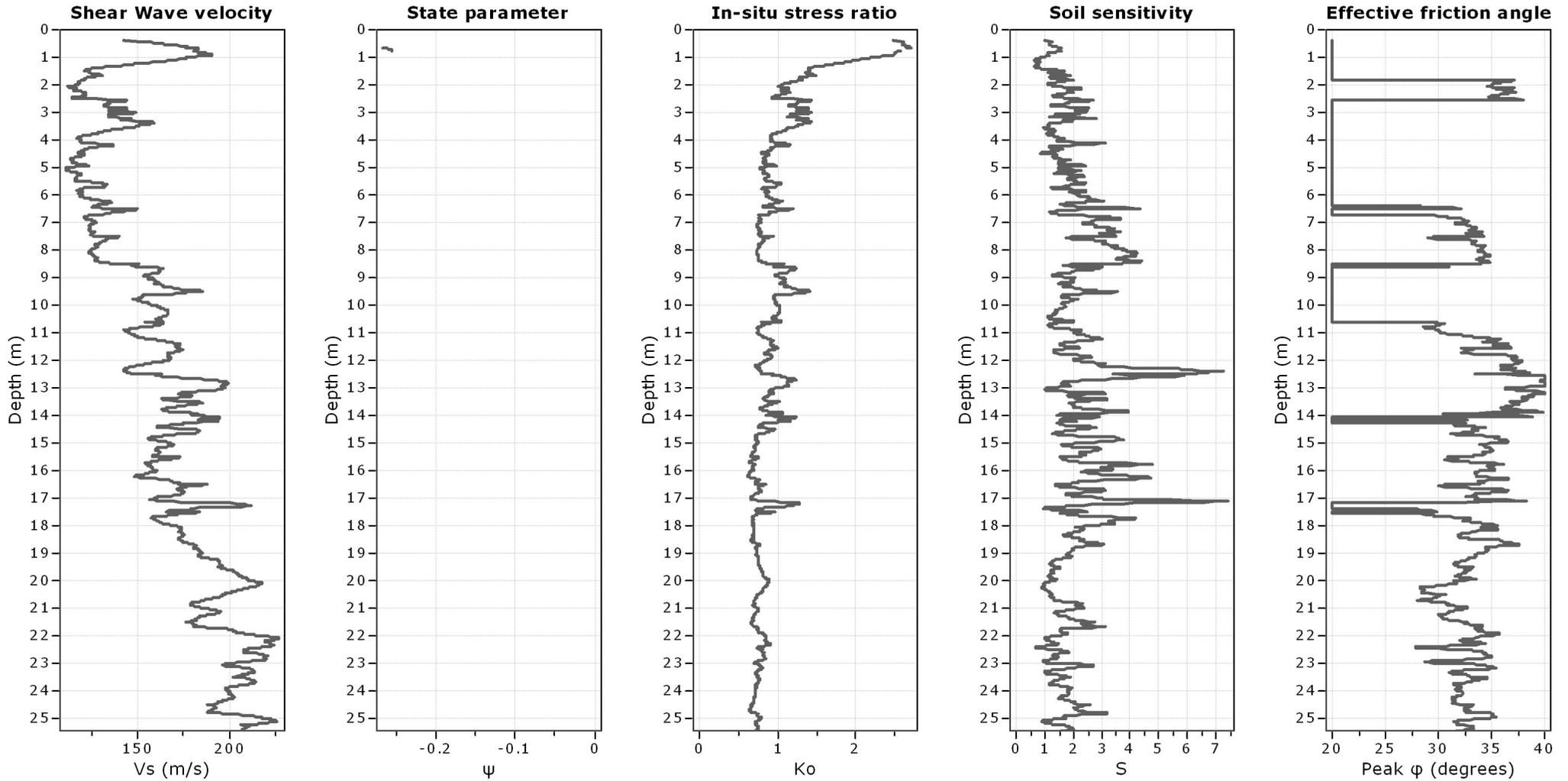
Constrained modulus: Based on variable α using I_c and Q_m (Robertson, 2009)

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

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

OCR factor for clays, N_{kt} : 0.33

● User defined estimation data



Calculation parameters

Soil Sensitivity factor, N_s : 7.00

—●— User defined estimation data

Indagine Sismica MASW-ESAC e HVSR a Carpi Via dell'Industria (Comune di Carpi, Provincia di Modena)

Premessa

Su incarico e d'intesa con il Dott. Geol. Paolo Pallante e il Dott. Fabio Parmeggiani, dello studio For.Geo di Modena, sono state eseguite (in data 16 novembre 2015) un'acquisizione di sismica attiva con metodologia MASW (*Multichannell Analysis of Surface Waves*), un'acquisizione di sismica passiva in onde di superficie con *array* bidimensionale tipo ESAC (*Extended Spatial Autocorrelation*) (le cui misure sono state elaborate e interpretate congiuntamente a quelle dell'acquisizione attiva) e due acquisizioni di sismica passiva a stazione singola con metodologia HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), detta anche metodologia di Nakamura, a Carpi, in via dell'Industria (Figura 1).

Acquisizione di sismica attiva (MASW)

Strumentazione, geometria e parametri di acquisizione

È stato impiegato un sismografo digitale Dolang, modello DBS280, a 24 canali, dotato di cavi di 60 metri e di geofoni da 4,5 Hz, per una lunghezza complessiva di 34,5 m di stendimento (1,5 m di distanza intergeofonica). Come sistema di energizzazione è stata utilizzata una mazza da 10 Kg battente su piastra, con chiusura del circuito (*trigger*) a contatto. Sono state eseguite più acquisizioni (sia in andata che in ritorno) con *offset* minimo (distanza tra il punto di energizzazione e primo geofono) pari a 3x e 5x (essendo x la distanza intergeofonica di 1,5 m), acquisendo 4096 campioni, con un passo di campionamento di 0,6 ms.

Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato il software MASW (di "Roma e associati"). Nelle Figure 2 e 3 sono riportate le tracce dei sismogrammi, lo spettro FK e la curva di dispersione effettiva sperimentale.



Figura 1. A sinistra: Estratto da CTR con ubicazione dell'area d'intervento (cerchio in magenta), dello stendimento MASW (linea in magenta), dell'array bidimensionale (linea arancione) e delle acquisizioni a stazione singola HVSR (punti in verde, sigla HV). A destra: stendimento sismico MASW, visto dal lato del geofono 1, eseguito a Carpi, in via dell'Industria.

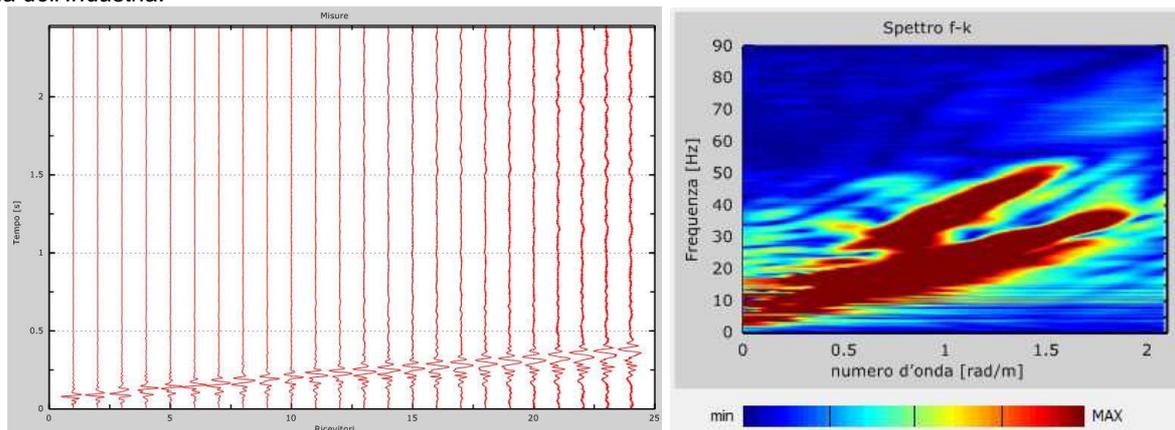


Figura 2. A destra: spettro f-k relativo ai sismogrammi riportati sulla sinistra

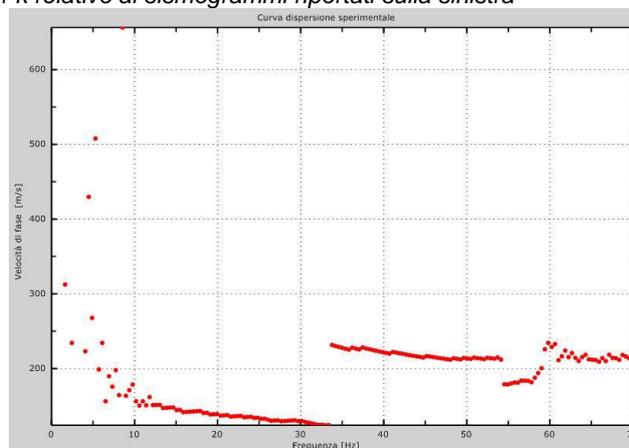


Figura 3. Curva di dispersione effettiva sperimentale relativa all'acquisizione di sismica attiva in onde di superficie. (l'andamento della curva è chiaramente interpretabile a frequenze superiori a circa 8 Hz, interpretabile con difficoltà a frequenze inferiori)

Acquisizione di sismica passiva con array bidimensionale (ESAC)

Strumentazione, geometria e parametri di acquisizione

Ci si è avvalsi della medesima strumentazione utilizzata per l'acquisizione attiva, disposta secondo uno stendimento a geometria bidimensionale a forma simile alla lettera "L" (Figura 4), con lato maggiore (sud-nord) lungo circa 75 m e lato minore (est-ovest) di circa 36 m, con i geofoni posizionati a 5 m di distanza l'uno dall'altro (Figura 4).

Per l'acquisizione delle tracce di sismica passiva è stato adottato un passo di campionamento di 2.4 ms, per registrare il numero massimo di campioni (10982) consentito dalla strumentazione. Tali parametri corrispondono a circa 25,5 secondi di registrazione complessiva. Sono state quindi acquisite 38 registrazioni, ciascuna di 25,5 secondi, che sono state riunite assieme ed elaborate per ottenere la curva di dispersione effettiva dell'acquisizione passiva, che è stata sovrapposta alla curva derivata dall'analisi MASW (Figura 5). Per la modellazione interpretativa si è fatto riferimento alla curva MASW per le frequenze alte (>10 Hz) e alla curva ESAC per frequenze più basse (<10 Hz).

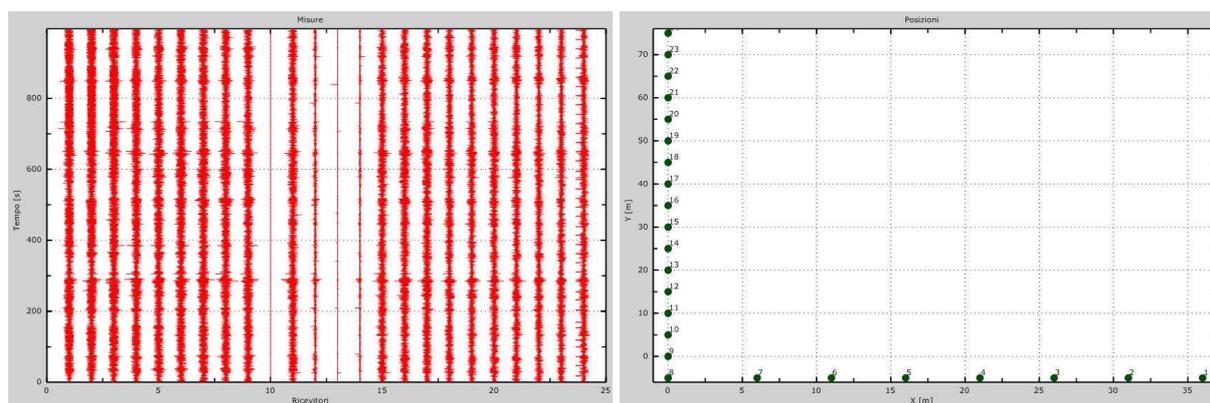


Figura 4. A sinistra, tracce complessive dell'acquisizione di sismica passiva in array bidimensionale. A destra: disposizione geometrica dello stendimento in array bidimensionale (est sul lato sinistro, sud in alto, figura non in scala con l'asse orizzontale "E-O" esagerato rispetto quello verticale "N-S").

Interpretazione

A supporto dell'interpretazione delle misure (eseguita per modellazione diretta) ci si è avvalsi dei dati derivanti dalle prove penetrometriche (tre CPT) eseguite in loco a cura della proprietà, oltre che delle informazioni derivabili dalla bibliografia e/o contenute nella Banca Dati Geognostici di Pianura (sito web regione Emilia-Romagna).

I dati penetrometrici indicano che il primo sottosuolo è formato da terreni prevalentemente argilloso limosi con intercalazioni di strati sabbiosi decimetrici, fino

almeno a 20 m di profondità, corrispondenti ai depositi ascrivibili al così detto subsistema di Ravenna.

* * *

Nella figura 5 sono riportate le curve di dispersione effettive (ricavate dalla prova MASW e dalla prova ESAC), nonché la selezione dei punti (*picking*) per la modellazione diretta il cui risultato è riportato nella Figura 6 (confronto tra curva teorica e curva sperimentale).

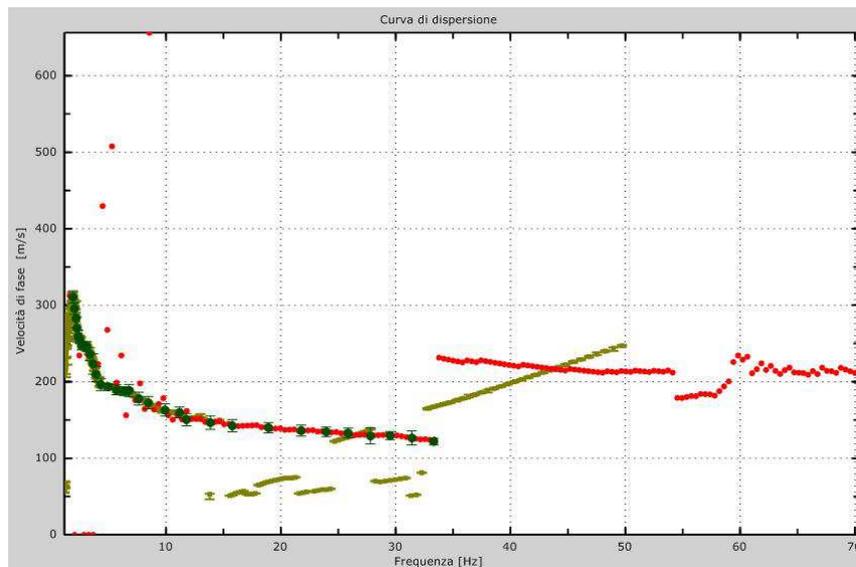


Figura 5 – Curva di dispersione effettiva MASW (rosso), ESAC (verde chiaro) e selezione dei punti interpretativi per la modellazione diretta (punti verde scuro con intervallo di incertezza).

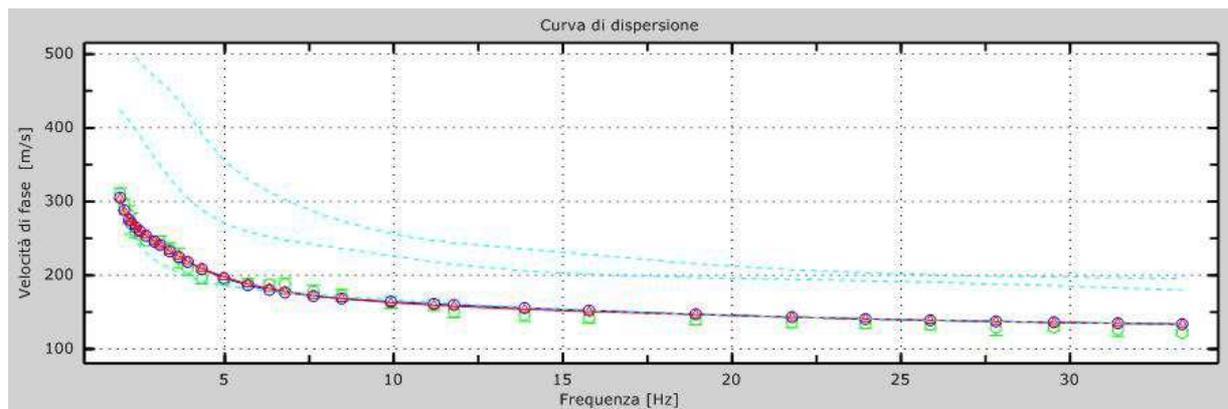


Figura 6-Confronto tra il picking della curva effettiva sperimentale e le curve effettiva e apparente sintetiche (curve rossa e blu) (discrepanza pari al 3%) e modi vibrazionali riferibili al modello di profilo di velocità (curva in celeste) (Figura 7 e Tabella 1).

La curva effettiva sperimentale indica la presenza di terreni normal-dispersivi con velocità di fase crescenti con la profondità. Essa può essere grossolanamente

suddivisa in quattro tratti considerando valori di frequenza decrescenti (incremento della profondità esplorata):

- a) a frequenze > 10 Hz, la velocità di fase è compresa tra circa 160 e 120 m/s con valori decrescenti con l'aumentare della frequenza (ovvero con il ridursi della profondità esplorata);
- b) tra 4 e 10 Hz, i valori della velocità di fase sono compresi tra circa 200 e 170 m/s;
- c) Tra circa 2.5 e 4 Hz la velocità di fase è all'incirca compresa tra 210 e 260 m/s;
- d) A frequenze inferiori a 2.5 Hz, la velocità di fase ha valori dell'ordine di 270-310 m/s. La curva effettiva è distinguibile fino a circa 1.9 Hz con una velocità di fase di circa 310 m/s, da cui si ricava una profondità teorica esplorata dall'indagine di poco più di 80 m.

* * *

Il modello di profilo verticale di velocità (Figura 7 e Tabella 1), ricavato per modellazione diretta della curva effettiva MASW/ESAC, è indicativo di un sottosuolo di tipo normal-dispersivo, caratterizzato da bassi valori del V_s (< 200 - 210 m/s) fino a circa 22 m dal p.c: i sismostrati che costituiscono il modello di profilo verticale di velocità riprendono gli strati definiti dall'interpretazione delle prove CPT, nonché i citati dati da bibliografia (Figura 8).

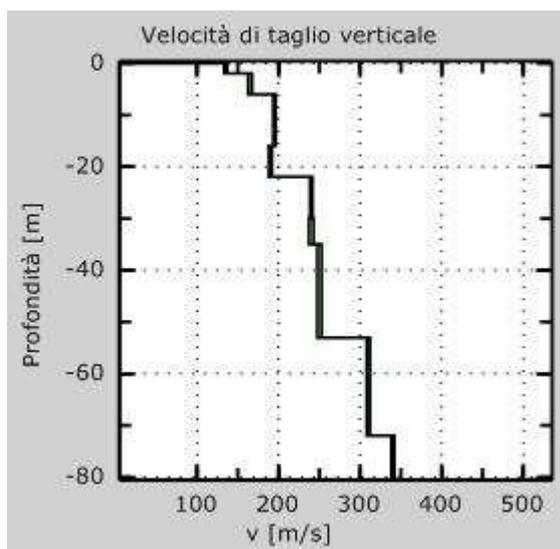


Figura 7- Modello di profilo verticale di velocità ottenuto per modellazione diretta della curva di dispersione effettiva (Figure 3, 5 e 6): Incertezza $0, 1\sigma$. (la prova ha esplorato una profondità teorica pari a poco più di 80 m).

Il modello è caratterizzato da velocità Vs crescenti con la profondità. Si distinguono:

- a) una prima unità da piano campagna fino a circa 22 m, argilloso-limosa con strati sabbiosi, lenta, caratterizzata da valori di Vs dell'ordine di 135-190 m/s (subsistema di Ravenna);
- b) una seconda unità prevalentemente pelitica, ma possono essere presenti strati sabbiosi, da 22 a 53 m, relativamente più veloce (Vs di circa 240-250 m/s) (subsistema di Villa Verucchio, unità di Vignola);
- c) una terza unità prevalentemente pelitica, con Vs 310-340 m/s, nella quale sono presenti anche strati metrici sabbiosi, da 53 a circa 81 m di profondità (limite teorico di esplorazione dell'indagine) (subsistema di Villa Verucchio).

Il dato MASW/ESAC non permette di valutare la profondità della base di tale orizzonte: il *picking* della curva effettiva ha una velocità di fase di circa 310 m/s al punto con frequenza più bassa (circa 1.9 Hz), corrispondente a una lunghezza d'onda di 163 m e pertanto la profondità massima esplorata può essere stimata "teoricamente" a mezza lunghezza d'onda (circa 81.5 m).

Nella Figura 8 viene riportato uno stralcio della sezione geologica 107 (sito web "Sezioni geologiche" della Regione Emilia-Romagna) dalla quale risulterebbe che la base del subsistema di Villa Verrucchio (A1) si posizionerebbe a circa 85-90 m di profondità, cioè poco più sotto rispetto la profondità esplorata dall'indagine MASW/ESAC (Figura 8).

Descrizione	Spessore (m)	Profondità base (m)	Densità (kg/m ³)	Coefficiente di Poisson	Vs (m/s)	Vp (m/s)
Terreni prevalentemente peitici (subsistema di Ravenna)	2	-2	1800	0,35	135	281
	4	-6	1800	0,48	165	841
	10	-16	1800	0,48	195	994
	6	-22	1800	0,48	190	969
Terreni prevalentemente peitici con radi strati sabbiosi (unità di Vignola?)	13	-35	1900	0,48	240	1224
	18	-53	2000	0,48	250	1275
Terreni prevalentemente peitici con radi strati sabbiosi (unità di Niviano?)	19	-72	2100	0,48	310	1581
	9	-81	2100	0,48	340	1734

Tabella 1. Dati riassuntivi relativi al modello di profilo verticale di velocità.

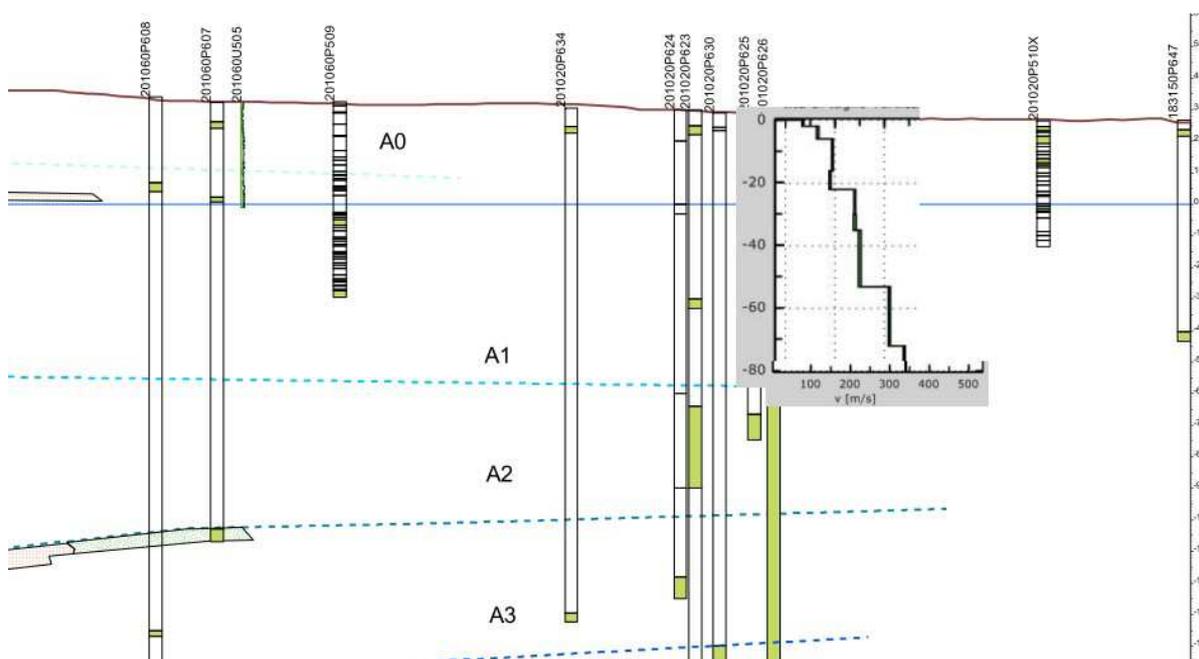


Figura 8- Stralcio dalla sezione geologica n. 107 (Sito web del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, orientata all'incirca N-S) con modifiche e con sovrapposto il modello verticale di velocità Vs ricavato dall'interpretazione del rilievo MASW-ESAC. (Il nord è a destra della figura, la legenda è riportata nella Figura 9 seguente. (La sezione passa all'incirca 2 km a ovest del sito in studio). A0:subsistema di Ravenna; A1: subsistema di Villa Verucchio; A2:subsistema di Bazzano-fuori scala.



Figura 9- Legenda della sezione di cui alla Figura 8 precedente.

* * *

Dai dati del modello di profilo verticale di velocità (in onde S) è possibile ricavare la stima del valore del Vs30 (classificazione di cui al punto 3.2.2 del DM 14 gennaio 2008) come segue:

- Vs30 a partire da p.c.: 193 m/s
- Vs30 a partire da -1m da p.c.: 197 m/s
- Vs30 a partire da -2 m da pc.: 201 m/s.

Acquisizione HVSR

Strumentazione, geometria e parametri di acquisizione

Sono state eseguite due registrazioni di rumore ambientale a stazione singola, della durata di 30 minuti ciascuna e con frequenza di campionamento di 300 Hz, ubicate come da Figura 1, per mezzo di un sismografo munito di terna triassiale di geofoni con frequenza di taglio di 4,5 Hz, modello Geobox della ditta Sara Electronics Instruments di Perugia.

Per l'elaborazione dei dati sono stati utilizzati il software di libero utilizzo Geopsy (www.geopsy.org) e il software GeoexplorerHVSR della Sara Electronics Instruments di Perugia.

Si è proceduto con una prima elaborazione speditiva per verificare la coerenza reciproca dei grafici dei rapporti H/V delle due acquisizioni (Figura 10). Successivamente si è proceduto all'elaborazione più approfondita della registrazione identificata con la sigla HV2 nella Figura 1.

Elaborazione preliminare

L'elaborazione (condotta per mezzo del citato *software* Geopsy) è stata eseguita suddividendo i segnali in finestre temporali della durata di 30 secondi, con sovrapposizione del 5%, lisciamento secondo il metodo di Konno & Omachi (costante=40%) e *taper* con funzione coseno (5%). Per l'elaborazione preliminare sono state considerate tutte le "finestre" temporali nella quali sono state suddivise le registrazioni.

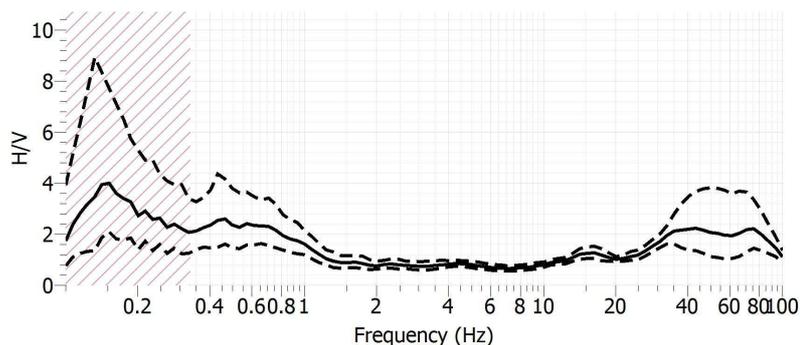


Figura 10a Andamento del rapporto H/V relativo alla registrazione HV1

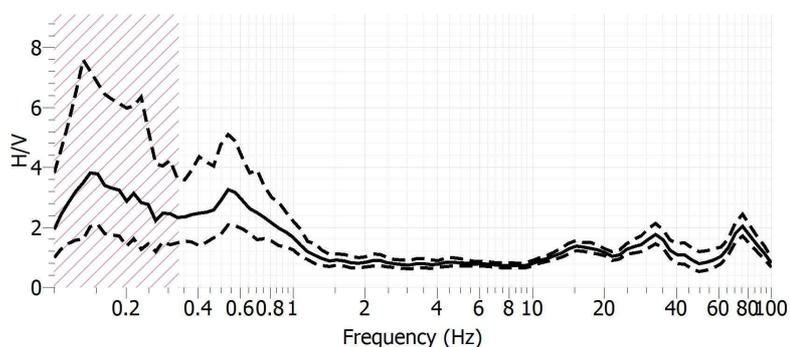


Figura 10b Andamento del rapporto H/V relativo alla registrazione HV2

I due grafici (Figura 10) mostrano alcune analogie:

- un picco a bassa frequenza (0.15-0.16 Hz), comune ad entrambe le registrazioni, caratterizzato da marcata deviazione. Esso si presenta a valori di frequenza al di fuori dei limiti della sensibilità strumentale dichiarata dalla ditta produttrice dello strumento utilizzato, pertanto non lo si prenderà in considerazione. La sua presenza, qualora venisse confermata da strumenti più sensibili, sarebbe probabilmente da ascrivere a una superficie di contrasto d'impedenza piuttosto profonda (probabilmente ben oltre i 500 m);
- un picco a frequenze dell'ordine di 0.55-0.65 Hz, che nella prima registrazione non così evidente.

Elaborazione della registrazione HV2

L'elaborazione è stata condotta per mezzo del software GeoexploreHVSR.

SIGNAL AND WINDOWING

Sampling frequency: 300 Hz

Recording start time: 2015/11/16 12:32:21

Recording length: 30 min

Windows count: 27

Average windows length: 30

Signal coverage: 45%

Figura 11-Informazioni relative alla durata del segnale e alle modalità di elaborazione”

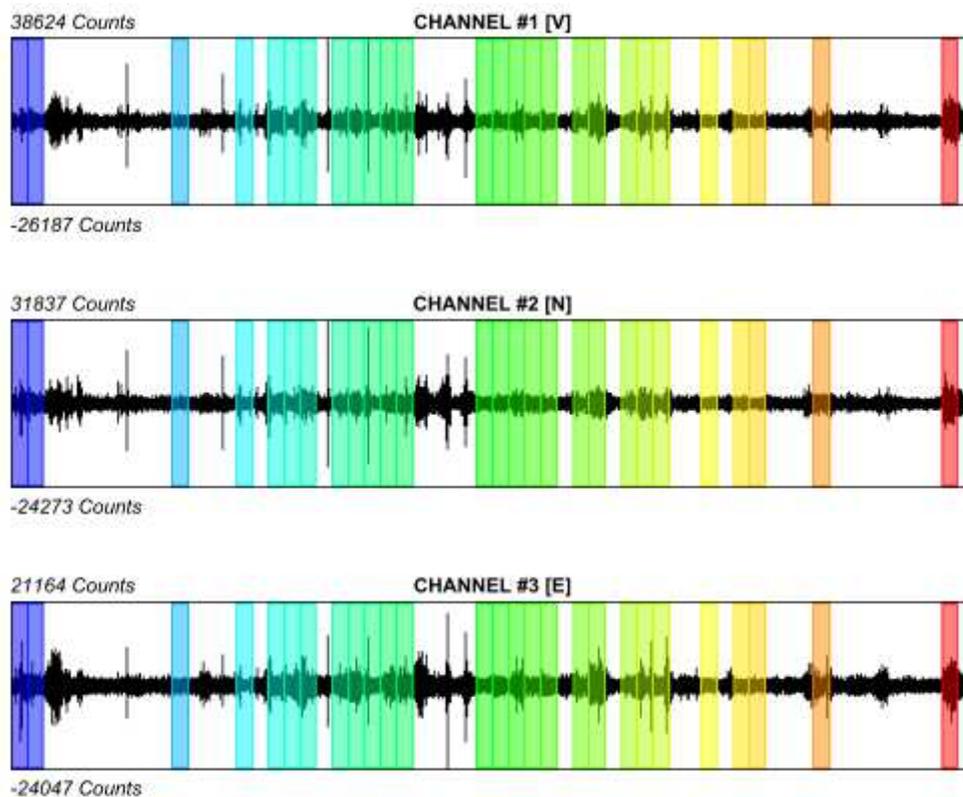


Figura 12-Tracce della registrazione HV2: in alto la traccia a direzione verticale; al centro la traccia a direzione NS; in basso la traccia a direzione EW.

HVSR ANALYSIS

Tapering: Enabled (Bandwidth = 5%)

Smoothing: Konno-Ohmachi (Bandwidth coefficient = 40)

Instrumental correction: Disabled

HVSR average

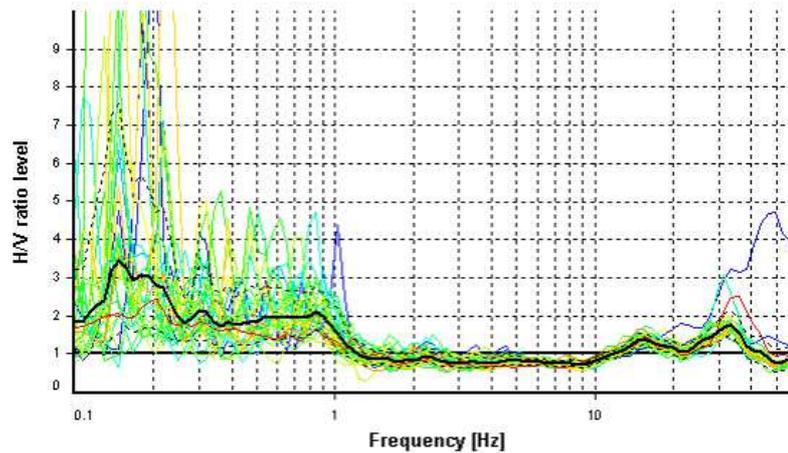


Figura 13– Grafico del rapporto HV medio (riga nera in grassetto) e grafici del rapporto HV relativi alle singole finestre temporali (linee colorate, cfr figura precedente).

Signal spectra average

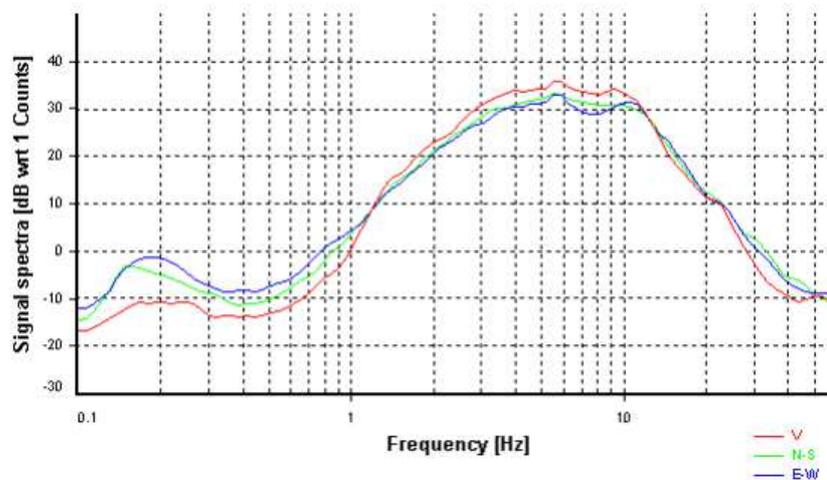


Figura 12-Spettri medi delle tre componenti (rosso-componente verticale; blu-componente EW; verde-componente-NS)

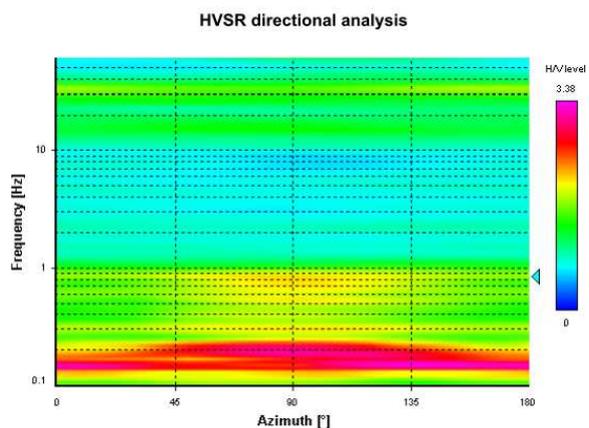


Figura 13- Mappa della direzionalità del rapporto H/V

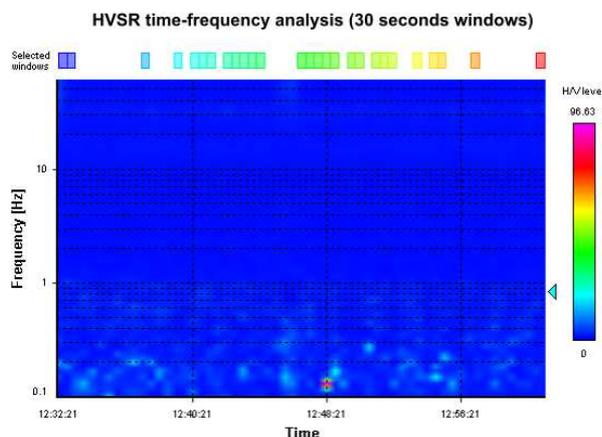


Figura 14 – Diagramma della persistenza temporale del rapporto H/V

SESAME CRITERIA

Selected f_0 frequency

0.843 Hz

A_0 amplitude = 2.115

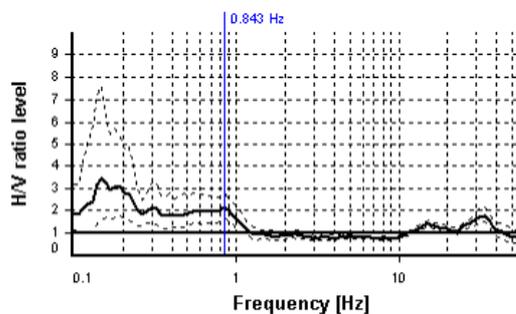


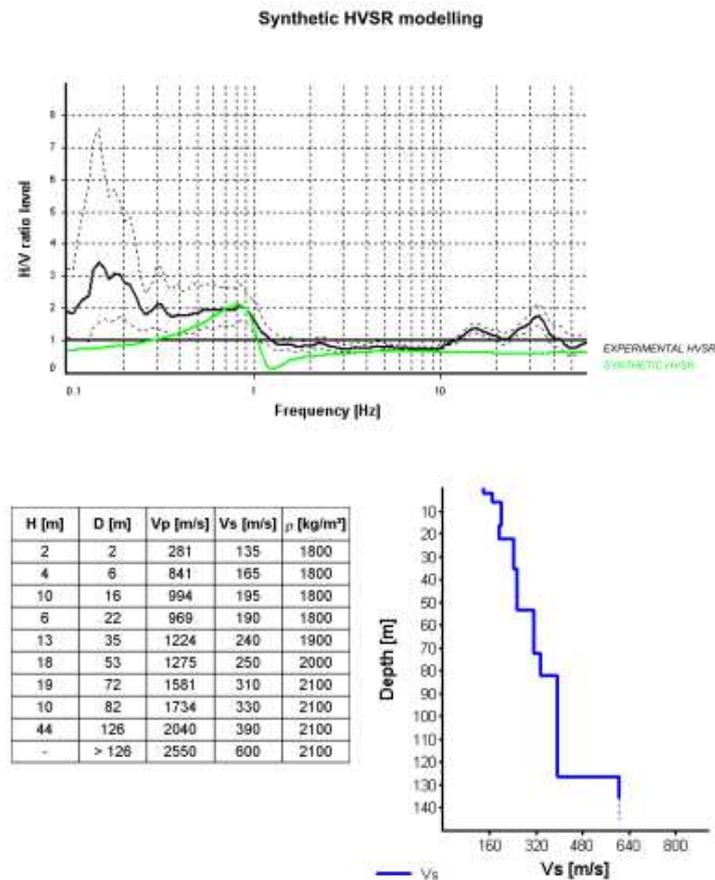
Figura 15-Grafico del rapporto spettrale H/V e suo intervallo di confidenza (picco a 0,84 Hz)

HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	27 valid windows (length > 11.86 s) out of 27	OK
$n_s(f_0) > 200$	683.18 > 200	OK
$\sigma_s(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 21	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HVSr}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HVSr}(f') < A_0/2$	1.24286 Hz	OK
$A_0 > 2$	2.11 > 2	OK
$f_{peak}[A_{HVSr}(f) \pm \sigma_s(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_s < \epsilon(f_0)$	0.10904 < 0.12651	OK
$\sigma_s(f_0) < \theta(f_0)$	1.30932 < 2	OK
Overall criteria fulfillment		OK

Figura 16-Criteri SESAME.

L'elaborazione dell'acquisizione HV2 suggerirebbe la presenza di due picchi stratigrafici a bassa frequenza nel grafico del rapporto spettrale H/V: a meno di 0.2 Hz (pertanto al di sotto del limite della sensibilità della strumentazione utilizzata) e a circa 0.84 Hz. Quest'ultimo picco verifica pressoché tutti i criteri di affidabilità del progetto SESAME, (Figura 16) con esclusione del primo del secondo gruppo, in quanto il picco seppure graficamente distinguibile, appartiene ad una regione del grafico che forma una sorta di *plateau* (tra circa 0.6 a 0.9 Hz) per cui il criterio Sesame in questione non può essere verificato. Il dato a 0,84 Hz risulta in linea con quanto indicato nella Carta delle Frequenze allegata al Piano per la Ricostruzione del Comune di Carpi (sito web Comune di Carpi) che in zona indica valori di picco del grafico HV in corrispondenza di frequenze comprese all'incirca tra 0.6 e 1 Hz.

La modellazione della curva sintetica HVSr (Figura 17) eseguita considerando vincolante il modello di velocità ricavato dall'indagine MASW/ESAC indicherebbe che l'interfaccia responsabile della generazione del picco HV a circa 0.84 Hz si porrebbe a una profondità di circa 126 m (Figura 17). Tale dato di profondità va considerato come stima basata su un approccio conservativo che prevede valido e vincolante il modello MASW/ESAC fino a circa 80 m. La modellazione basata su assunzioni diverse potrebbe portare a risultati anche sensibilmente diversi in relazione alla stima della profondità del contrasto d'impedenza correlato al picco HV. Le simulazioni aggiuntive, eseguite adottando come approccio di partenza delle versioni semplificate del modello MASW/ESAC hanno comunque dato risultati di profondità del contrasto d'impedenza indicativamente attorno a 120-130 m dal p.c.



Vs 30 = 193 m/s (Offset = 0 m)

Figura 17-Modellazione della curva sintetica del rapporto HVSR basata sui dati del modello di velocità ricavato attraverso l'elaborazione/modellazione diretta dei risultati dell'indagine attiva/passiva (MASW/ESAC). L'interfaccia (contrasto d'impedenza) che darebbe luogo al picco nel grafico HV (che comunque non è ben definito) si posizionerebbe alla profondità di circa 126 m dal p.c.

Se si assumono valide, per l'area in esame, le profondità delle unità stratigrafiche riportate nella sezione geologica di cui alla Figura 8, si può interpretativamente correlare la profondità di 126 m del contrasto d'impedenza all'interfaccia tra gruppi acquiferi A2 e A3, ovvero alla base del subsistema di Bazzano (Figura 18).

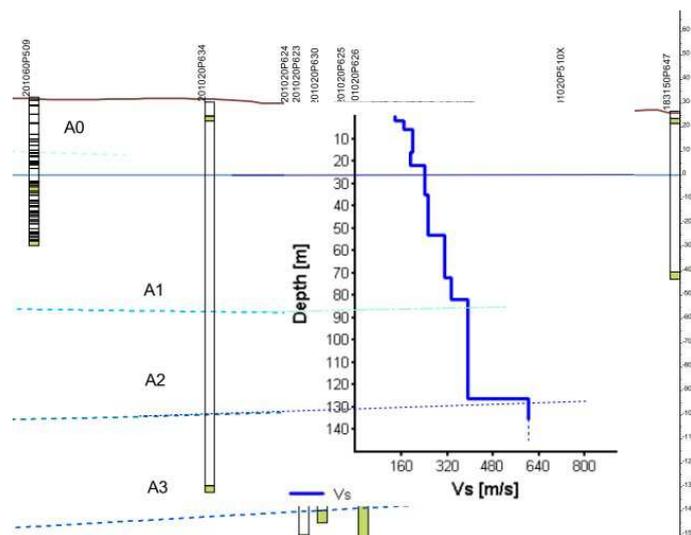


Figura 18- Stralcio dalla sezione geologica n. 107 (Sito web del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, con modifiche) con sovrapposto il modello verticale di velocità Vs ottenuto dalla modellazione della curva HV, assumendo come vincolante il modello di velocità MASW/ESAC fino alla profondità di 80 m. (Il nord è a destra della figura, la legenda è riportata nella Figura 9. (La sezione passa all'incirca 2 km a ovest del sito in studio). A0:subsistema di Ravenna; A1: subsistema di Villa Verucchio; A2:subsistema di Bazzano-furi scala

Conclusioni

Su incarico e d'intesa col Dott. Geol. Paolo Pallante e col Dott. Fabio Parmeggiani, dello studio For.Geo di Modena, sono state eseguite a Carpi, in via dell'Industria:

- un'acquisizione di sismica attiva (metodologia MASW) per mezzo di uno stendimento di geofoni lineare;
- un'acquisizione di sismica passiva (metodologia ESAC) per mezzo di uno stendimento di geofoni bidimensionale;
- un'acquisizione di sismica passiva a stazione singola (metodologia HVSR).

L'elaborazione combinata delle registrazioni attiva e di quella passiva in *array* ha permesso di definire un modello di profilo verticale di velocità (Vs) caratterizzato da valori crescenti con la profondità, coerente con i dati geognostici e geologici disponibili (da prove penetrometriche, sondaggi e sezioni geologiche), valido fino alla profondità di circa 80 m da p.c. (Figure 7 e 8 e tabella 1) . L'elaborazione delle misure a stazione singola, ha permesso di ipotizzare il prolungamento di tale modello di velocità fino a circa 126 m dal p.c. (Figure 17 e 18) e di interpretarlo collocandolo nel contesto stratigrafico definito a scala regionale da bibliografia.

Il grafico del rapporto H/V, ottenuto dall'elaborazione delle misure passive a stazione singola, suggerisce l'esistenza di un picco, probabilmente di origine stratigrafica, alla frequenza di circa 0.84 Hz, coerente coi dati da bibliografia, che stratigraficamente potrebbe essere interpretabile come dovuto a un contrasto d'impedenza localizzabile alla base del subsistema di Bazzano, posizionato in zona a profondità dell'ordine dei 120-130 m (cfr sezione di cui alle figure 8 e 18) (Figure 17 e 18).

La misura a stazione singola suggerirebbe inoltre l'esistenza di un'interfaccia di contrasto d'impedenza molto più profonda, per la presenza di un altro picco nel grafico HV a frequenza inferiore a 0.2 Hz, valore che tuttavia è al di sotto del limite della risoluzione della strumentazione, utilizzata per le misure, dichiarato dal produttore.

Dal modello di profilo verticale di velocità (in onde S) si ricavano i seguenti valori del Vs30 (classificazione di cui al punto 3.2.2 del DM 14 gennaio 2008):

Vs30 a partire da p.c.: 193 m/s

Vs30 a partire da -1m da p.c.: 197 m/s

Vs30 a partire da -2 m da p.c.: 201 m/s.

Vignola, 25 novembre 2015

Il tecnico
Dott. Geol. Marco Capitani

