

COMMITENTE:

GESCO S.R.L.

LOCALITA':

Forlimpopoli, via Paganello

RELAZIONE GEOLOGICA Archivio Comunale

Geologo Paride Antolini

Iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Emilia-Romagna al n. 524

Via Albisola 41, 47522 - Cesena FO cell. 335 6780120

E-mail: geoparide@libero.it PEC: paride.antolini@epap.sicurezza postale.it

Cesena 4 Novembre 2022

INDICE

pag.	cap.	
pag. 3	1.	INTRODUZIONE
pag. 3	2.	ELENCO ELABORATI
pag. 3	3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO REGIONALE E TETTONICA
pag. 4	3.1.	STRATIGRAFIA DELLE UNITA' PRESENTI NELL'AREA D'INDAGINE
pag. 5	3.2	GEOMORFOLOGIA
pag. 5	4.	IDROLOGIA E IDROGEOLOGIA
pag. 5	5.	PERICOLOSITA' E FATTIBILITA'
pag. 5	6.	MODELLO GEOLOGICO
pag. 6	6.1	DEFIIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO AI FINI DELLA RSL
pag. 7	7.	SISMICITA'
pag. 10	7.1	NTC 2018 RSL SEMPLIFICATA DA NORMATIVA
pag. 13	8.0	DGR 630 E SUCCESSIVE - SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO – ANALISI SEMPLIFICATA
pag. 18	9.0	VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE
pag. 23	10.0	RISPOSTA SISMICA LOCALE
pag. 24	11.0	CONCLUSIONI

1. INTRODUZIONE

Su incarico della Committenza, GESCO S.R.L. è stata redatta la seguente relazione geologica per la costruzione dell'Archivio Comunale in via Paganello, Forlimpopoli. L'intervento consiste nella costruzione di un edificio a base rettangolare con lunghezza di 40,75 m. e larghezza di 13 metri; formato da un unico piano con altezza di 5 m. e con la copertura che raggiunge 7,60 m. in altezza.

Lo studio procede come se si trattasse di una costruzione in cui si prevedono normali affollamenti senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali, sulla scorta del D.M. 17.01.2018 la Classe d'Uso, specificato dal progettista, è la Classe III (NTC2018 2.4.2.). Questa relazione pertanto, seguendo i dettami della normativa vigente e dello stato dell'arte, è finalizzata alla costruzione del modello geologico, che è imprescindibile per la redazione del successivo modello geotecnico, facente parte della relazione d'opera geotecnica.

Per quanto concerne la conoscenza e la caratterizzazione geo-meccanica del terreno sono state effettuate le seguenti indagini.

- ✓ N. 2 prove penetrometriche CPTu con piezocono, CPTu1-2, spinte fino alla profondità di 20 m.
- ✓ N.1 HVSr nell'area del sedime, + N. 1 MASW nella confinante area ex Sapro + N. 1 MASW della confinante area circoscrizione, + indagini geofisiche inserite nella microzonazione sismica di II livello.

Nel presente studio sono stati consultati ed utilizzati dati prelevati da:

- ✓ Dati della caratterizzazione Litotecnica (2020) della confinante area EX SAPRO.
- ✓ Microzonazione Sismica del Comune di Forlimpopoli; Febbraio 2019.
- ✓ Indagini ed immagini scaricate dalla banca dati della Regione Emilia-Romagna.

Le prove penetrometriche, CPTu1-2, sono state elaborate in una prima fase con il sistema di acquisizione Pagani in cui sono riportate le informazioni strumentali ed una prima lettura dei Test riportando i log di Qc, Fs, U2, Rf, il Tilt e lo Speed (vedi figure in relazione).

In Allegato A1 sono riportate le elaborazioni delle prove CPTu1-2 mediante software della ProgramGeo. Per ogni punto indagine è riportato:

- Grafico della prova
- Grafico del profilo stratigrafico (si consiglia di stamparlo in A3)
- Colonna stratigrafica
- Grafici dei principali parametri geotecnici
- Grafico del profilo stratigrafico per strati accorpati
- Tabelle con i parametri geotecnici per strati accorpati
- Tabella riassuntiva con i metodi di calcolo dei parametri geotecnici.

I parametri riportati negli strati accorpati sono stimati con il valore caratteristico della media.

2. ELENCO ELABORATI

Alla seguente relazione si allega:

- Inquadramento, Tavola 240SO, scala 1:25.000; Fig.1.
- Elemento 240143, planimetria con posizione delle indagini, , scala 1:5.000; Fig.2.
- Ortofoto 2018 con posizione indagini, scala 1:1.000; Fig 3.
- Carta Geologica della Regione Emilia Romagna 240140, scala 1:10.000; Fig. 4.
- Planimetria sezioni geologiche e prove geognostiche banca dati RER, scala 1: 10.000; Fig. 5.
- Sezione Geologica n. 85 estratta dalla banca dati RER; Fig. 6.
- Sezione Geologiche n. 83 estratta dalla banca dati RER; Fig. 7.
- Sezione Geologica CPTu1-2; Fig. 8.
- Indagini sismiche
- Allegato A1 - Elaborazione prove CPTu1-2 con software ProgramGeo
- Allegato A2 – Risposta Sismica Locale

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO REGIONALE E TETTONICA

Nel territorio comunale di Forlimpopoli affiora una successione sedimentaria di terreni relativamente recente della successione plio-pleistocenica con copertura olocenica nelle zone intravallive e nella pianura.

L'assetto strutturale dell'area e la sua evoluzione presenta evidenti differenziazioni paleogeografiche, con conseguente influsso sulle caratteristiche deposizionali della successione.

Le strutture che interessano le successioni sedimentarie del Dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo (prevalentemente presente nel sottosuolo) hanno mediamente una direzione NO-SE (appenninica). Si tratta sostanzialmente di pieghe e sovrascorrimenti a dominante vergenza NE. Lo studio delle strutture mostra che il substrato carbonatico Mesozoico, in particolare la Formazione dello Schlier, rappresenta uno dei maggiori livelli di scollamento.

In generale tutti gli autori concordano che i raccorciamenti della catena aumentano verso SO e decrescono andando a NE verso l'avampaese. Le strutture si presentano tipicamente come pieghe-faglie, con anticlinali generalmente strette e spesso col fianco frontale rovesciato e tagliato da sovrascorrimenti e con sinclinali ampie. I terreni della FMA sono scollati alla base della successione clastica (Formazione dello schlier). Sia i sedimenti della FMA sia le sottostanti unità carbonatiche meso-cenozoiche sono poi state successivamente coinvolte in un piegamento a grande scala (plurichilometrico) che è collegabile alla crescita delle strutture più esterne delle pieghe romagnole.

3.1. STRATIGRAFIA DELLE UNITA' PRESENTI NELL'AREA D'INDAGINE

Le Unità litostratigrafiche presenti nel sottosuolo del territorio comunale appartengono al Dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo: esse possono essere distinte, per comodità di esposizione, in tre grandi gruppi: Formazione Marnosa Arenacea, la successione messiniana e la successione plio-pleistocenica. Tutte sono ricoperte dalla successione neogenico - quaternaria del margine appenninico padano.

L'intervento in oggetto si sviluppa nella successione quaternaria del margine appenninico padano, Subsistema di Ravenna, Unità di Modena AES8a.

Successione neogenico - quaternaria del margine appenninico padano

AES - Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore

Unità costituita da depositi alluvionali intravallivi, terrazzati, di conoide alluvionale ghiaiosa e di interconoide, passanti lateralmente a limi più o meno sabbiosi e argillosi di piana alluvionale. In affioramento comprende anche depositi litorali e marini. L'unità è suddivisa in subsistemi, sulla base dell'individuazione di deboli discordanze angolari o di scarpate erosive particolarmente ampie, e, nel sottosuolo della pianura, di bruschi contatti fra depositi trasgressivi marino-marginali e palustri su dep Nel sottosuolo della pianura l'unità è costituita dall'alternanza di cicli trasgressivo-regressivi di depositi grossolani e fini, di ambiente alluvionale e subordinatamente di ambiente deltizio e litorale, nelle porzioni sommitali dei quali frequentemente. Pleistocene medio – Olocene

AES8 - Subsistema di Ravenna

Ghiaie da molto grossolane a fini con matrice sabbiosa, sabbie e limi stratificati con copertura discontinua di limi argillosi, limi e limi sabbiosi, rispettivamente depositi di conoide ghiaiosa, intravallivi terrazzati e di interconoide. Argille, limi ed alternanze limoso-sabbiose di tracimazione fluviale (piana inondabile, argine, e tracimazioni indifferenziate). Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico. A tetto suoli, variabili da non calcarei a calcarei, a basso grado di alterazione con fronte di alterazione potente meno di 150 cm, e a luoghi parziale decarbonatazione; orizzonti superficiali di colore giallobruno. I suoli non calcarei e scarsamente calcarei hanno colore bruno scuro e bruno scuro giallastro, spessore dell'alterazione da 0,5 ad 1,5 m, contengono frequenti reperti archeologici di età del Bronzo, del Ferro e Romana. I suoli calcarei appartengono all'unità AES8a. nel sottosuolo della pianura: depositi argillosi e limosi grigi e grigio scuri, arricchiti in sostanza organica, di piana inondabile non drenata, palude e laguna passanti, verso l'alto, a limi-sabbiosi, limi ed argille bruni e giallastri di piana alluvioni Il contatto di base è discontinuo, spesso erosivo e discordante, sugli altri subsistemi e sulle unità più antiche. Lo spessore massimo dell'unità circa 28 metri. Pleistocene sup. – Olocene.

Unità di Modena (AES8a)

Ghiaie prevalenti e sabbie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, talora organizzate in corpi a geometria lenticolari, nastriformi, tabulari e cuneiformi. Depositati alluvionali intravallivi, terrazzati, deltizi, litorali, di conoide e, localmente, di piana inondabile. Limite superiore coincidente con il piano topografico dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (meno di 100 cm). Può ricoprire resti archeologici di età romana del VI secolo d.c. Limite inferiore in conforme, marcato da una superficie di erosione fluviale lateralmente correlata a un suolo da decarbonatato a parzialmente carbonatato contenete resti archeologici di età dal Neolitico al Romano. Olocene.

3.2 GEOMORFOLOGIA

Il sito ricade in una zona di pianura, in destra idrografica del fiume Ronco; la quota sul livello del mare (rilevata nella CTR) è pari a 26 m.; i sedimenti sono ascrivibili a depositi alluvionali della pianura. Le curve di livello della tavola 240 indica un deflusso naturale superficiale delle acque verso nord.

4. IDROGEOLOGIA

L'attività idrogeologica si manifesta all'interno dei sedimenti alluvionali. Il tetto delle ghiaie del primo acquifero è ad una profondità variabile da m. 26 a m. 30

L'attività idrogeologica si manifesta all'interno dei sedimenti alluvionali; nei fori lasciati dall'estrazione delle aste utilizzate per le CPTu, è stato misurato il livello piezometrico della falda freatica attestata ad una profondità di 2,80-2,90 m. dal p.c.

Le misure sono limitate al momento dell'effettuazione dell'indagine. Non si conosce il massimo ravvenamento della falda, che si presume venga raggiunto nel periodo primaverile, quindi con un ulteriore innalzamento e avvicinamento al piano campagna. Si tratta di un acquifero libero.

5. PERICOLOSITA' E FATTIBILITA'

Per la valutazione della Pericolosità e della Fattibilità si è fatto riferimento alla Direttiva Alluvioni della Regione Emilia-Romagna. Nelle mappe di pericolosità di alluvione, allagamento temporaneo di aree normalmente non coperte d'acqua, alluvioni causate da corsi d'acqua naturali e artificiali, il sito ricade in uno scenario di alluvioni poco frequenti MP2.

La probabilità che si manifestino fenomeni di liquefazione è bassa o nulla se è verificata almeno una delle seguenti condizioni:

1. Magnitudo attesa inferiore a 5;
2. Accelerazione massima attesa in superficie in condizioni free-field minore di 0.1g;
3. Terreni sabbiosi con caratteristiche ricadenti in una delle tre seguenti categorie:

- frazione di fine, FC, superiore al 20%, con indice di plasticità $IP > 10\%$;
- $FC \geq 35\%$ e resistenza $(N1)_{60} > 20$ oppure $qc_{1N} > 120$ oppure $VS1 > 200$ m/s;

- $FC \leq 5\%$ e resistenza $(N1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 160$ oppure $VS1 > 220$ m/s ($N1)_{60}$, qc_{1N} , $VS1$ sono i valori normalizzati dell'indice NSPT della Standard Penetration Test, della resistenza di punta qc della prova CPT e della velocità di propagazione delle onde di taglio da prove geofisiche.

4. Distribuzione granulometrica esterna per oltre il 50% al fuso indicato in Figura 1a nel caso di materiale con coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$.

5. Profondità media stagionale della falda superiore ai 15 m dal piano campagna.

Sulle verticali delle CPTu1-2 sono state eseguite le opportune verifiche i cui risultati sono esposti nel capitolo Liquefazione; nelle due verticali il potenziale di liquefazione è risultato essere 3,3 (rischio moderato) e 2 (rischio basso). Il metodo usato per la verifica è: per il CSR Boulanger & Idriss 2014; MSF Idriss 1995; CRR Boulanger & Idriss 2014.

6. MODELLO GEOLOGICO

Il modello geologico è stato costruito utilizzando le prove penetrometriche CPTu1, 2 e la banca dati della Regione Emilia-Romagna.

I sedimenti sono formati da depositi alluvionali, sabbie di riempimenti di canale fluviale, di argine prossimale, argille e limi di piana inondabile, alternanze di sabbie limi ed argille di tracimazione fluviale indifferenziata, in una alternanza variabile e fortemente eteropica. In figura 8 è rappresentata la sezione geologica CPTu1-CPTu2 con gli orizzonti litotecnici, A, B, C, D, E, F, G, H, I, L, M, N, corrispondenti agli strati accorpate indicati nelle tavole dei parametri geotecnici (da 1 a 12)

Gli orizzonti sono riconoscibili su entrambe le verticali.

Facendo riferimento alla sezione geologica A-A' si osserva:

Orizzonte A: da m. 0,00 a m. 1,22÷1,48; terreno agrario con una buona componente sabbiosa.

Orizzonte B: da m. 1,22÷1,48 a m. 1,77÷1,86; Terreni a grana fine molto consistenti, sovraconsolidati per essiccamento. Per quanto riguarda i parametri (a cui si rimanda alle apposite tabelle) ne vengono qui rappresentati alcuni. Valori di O.C.R da 18,44 a 21,69; Cu da 0,135 MPa a 0,14MPa; Eedom da 4,68 MPa a 4,88 MPa.

Orizzonte C: da m. 1,77÷1,86 a m. 2,65÷2,83; da limo argilloso ad argilla limosa sovraconsolidate per essiccamento. O.C.R = 5,56÷5,94; Cu = 0,055÷0,58 MPa; Eedm = 3,50÷3,75 MPa.

Orizzonte D: da m. 2,65÷2,83 a m. 3,96÷4,50; da argilla limosa a argilla. O.C.R = 3,13÷3,48; Cu = 0,042÷0,045 MPa; Eedm = 2,77÷2,59 MPa. Rappresenta un orizzonte di argilla molle.

Orizzonte E: da m. 3,96÷4,50 a m. 6,06÷6,36; da limo argilloso ad argilla limosa. O.C.R = 5,36÷5,46; Cu = 0,088÷0,089 MPa; Eedm = 5,95÷6,02 MPa.

Orizzonte F: da m. 6,06÷6,36 a m. 7,38÷9,08; da sabbia limosa a limo sabbioso con orizzonti sottili di limo/limo argilloso.

$\phi = 32^\circ \div 33^\circ$; Eedm = 3,15÷3,49 MPa.

Orizzonte G: da m. 7,38÷9,08 a m. 9,90÷10,26; da limo argilloso ad argilla limosa con sottili orizzonti di sabbia/sabbia limosa/ limo sabbioso. O.C.R = 3,88÷4,10; Cu = 0,094 MPa; Eedm = 6,44÷6,51 MPa.

Orizzonte H: da m. 9,90÷10,26 a m. 11,58÷11,62; da sabbia limosa a limo sabbioso con rari orizzonti sottili di limo/limo argilloso.

$\phi = 34^\circ$; Eedm = 4,24÷4,42 MPa.

Orizzonte I: da m. 11,58÷11,62 a m. 14,86÷15,67; da argilla limosa a argilla. O.C.R = 2,20÷2,31; Cu = 0,071 MPa; Eedm = 4,65.

Orizzonte L: da m. 14,86÷15,67 a m. 16,37÷16,48; da limo argilloso ad argilla limosa con rari e sottili orizzonti sabbiosi. O.C.R = 2,32÷2,72; Cu = 0,08÷0,099 MPa; Eedm = 5,36÷6,79 MPa.

Orizzonte M: da m. m. 16,37÷16,48 a m. 17,48÷17,62; da argilla limosa a argilla. O.C.R = 1,78÷1,94; Cu = 0,068÷0,071 MPa; Eedm = 4,41÷4,65 MPa.

Orizzonte N: da m. 17,48÷17,62 a m. 19,99; da argilla limosa a argilla. O.C.R = 1,84÷2,30; Cu = 0,075÷0,091 MPa; Eedm = 4,97÷6,16 MPa.

C' - Coesione efficace:

Nella tabella parametri geotecnici per strati accorpati (dati SLU) sono riportati i valori ottenuti con elaborazione del software; è un tentativo di stima effettuato tramite il software, occorre precisare che tale valore va preso con molta attenzione e senso critico in quanto è tendenzialmente sovrastimato.

ϕ' - Angolo di attrito drenato:

Negli orizzonti non sabbiosi e con caratteristiche prettamente coesive, valori più diffusi variano da ϕ' 20° a ϕ' 25° talora 26°, esclusi ovviamente i livelli più sabbiosi.

6.1 DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOLOGICO AI FINI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE.

La stratigrafia profonda oltre che dalle sezioni allegate 83 e 85 è stata desunta dalle stratigrafie dei pozzi 240140P601, 240140P621 240140P622 e 240140P632 posizionati a nord-ovest dell'area. La stratigrafia adottata è la seguente:

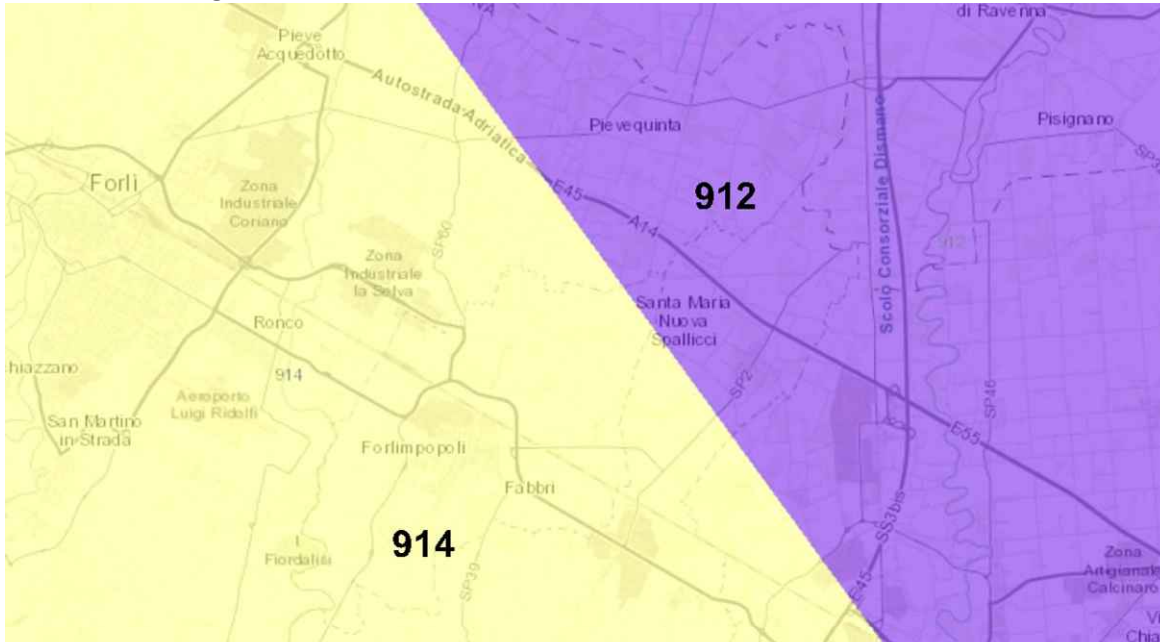
profondità alla base dello strato m	Spessore m	Vs (m/s)	Litologia prevalente
6	6	165	Limi e argille
12	6	205	Sabbia
26	14	180	Argilla
36	10	400	Ghiaia
70	34	250	Argilla

96	26	550	Ghiaia
150	54	450	Sabbia
Ind.	Ind.	800	Bed rock sismico

7. SISMICITÀ

La raccolta delle potenziali fonti per i terremoti più grandi di 5,5 M in Italia e nelle aree circostanti è presente nel database accessibile al sito <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © **INGV– Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**.

Zonazione Sismogenetica ZS9 - Il sito ricade nella zona 914



Nella zona 914 si verificano terremoti prevalentemente compressivi probabilmente distensivi nella porzione più sud-orientale; si possono altresì avere meccanismi trascorrenti nelle zone di svincolo che dissecano la continuità longitudinale delle strutture. L'intera fascia è caratterizzata da terremoti storici che raramente hanno raggiunto valori molto elevati di magnitudo. Le profondità ipocentrali sono mediamente maggiori in questa fascia di quanto non siano nella fascia più esterna. L'individuazione della zona 914 (Forlivese) è motivata dalle peculiari caratteristiche di rilascio della sismicità (nella fattispecie la frequenza degli eventi). Magnitudo momento massima di 6,14 Mw max.

Infine la zona 912 rappresentano la porzione più esterna della fascia in compressione dell'arco appenninico settentrionale, la sismicità sembra evidenziare l'andamento del fronte compressivo sepolto più avanzato (a ridosso del Po) "Dorsale ferrarese". Magnitudo momento massima di 6,14 Mw max.

Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI15

Versione 3.0 (gennaio 2021)

Citazione della fonte: *Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P., Antonucci A. (2021). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.3>*

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (2020). The Italian earthquake catalogue CPTI15. Bulletin of Earthquake Engineering, 18(7), 2953-2984. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00818-y>

La nuova versione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI15 rappresenta una significativa evoluzione rispetto alle versioni precedenti, che sono quindi da considerare del tutto superate. La magnitudo utilizzata è la magnitudo momento (Mw) e in tutti i casi è riportata la relativa incertezza. Include i terremoti con intensità massima o epicentrale maggiore o uguale a 5, insieme a quelli con magnitudo strumentale equivalente (secondo i metodi e le conversioni descritte nel seguito) a Mw 4.0 o superiore.

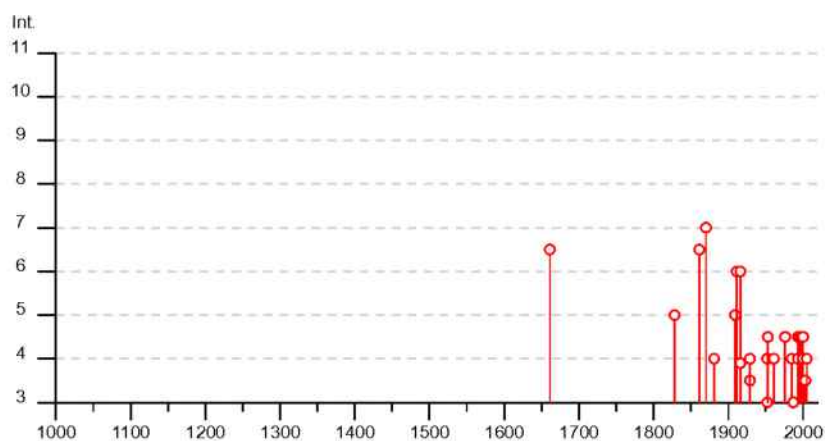
Forlimpopoli

PlaceID IT_41780
 Coordinate (lat, lon) 44.188, 12.126
 Comune (ISTAT 2015) Forlimpopoli
 Provincia Forlì-Cesena
 Regione Emilia-Romagna
 Numero di eventi riportati 43

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
6-7	1661	03	22	12	50		Appennino forlivese	79	9	6.05
5	1828	10	08	22	30		Romagna	8	5-6	4.57
6-7	1861	10	16				Romagna	10	6-7	5.13
7	1870	10	30	18	34		Forlivese	41	8	5.61
4	1881	09	28				Cesena	24	6-7	4.71
NF	1895	03	23				Comacchio	33	6	4.65
NF	1898	01	16	13	10		Romagna settentrionale	110	6	4.59
NF	1898	03	09	11	43		Romagna settentrionale	68	6	4.59
NF	1899	07	08	22	56	55	Bagno di Romagna	37	4	4.02
5	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
6	1911	02	19	07	18	30	Forlivese	181	7	5.26
6	1916	05	17	12	50		Riminese	132	8	5.82
F	1916	06	16	01	27		Riminese	17	6	4.82
3-4	1929	04	10	05	44		Bolognese	87	6	5.05
4	1929	07	18	21	02		Mugello	56	6-7	4.96
4	1952	07	04	20	35	12	Appennino forlivese	64	7	4.94
3	1952	12	02	06	13	22	Appennino forlivese	53	5	4.42
4-5	1953	12	14	07	11	06	Appennino forlivese	48	5-6	4.70
NF	1956	04	26	03	00	03	Appennino bolognese	89	6	4.74
2	1956	05	26	18	40		Appennino forlivese	76	7	4.99
NF	1960	04	30	00	52	06	Appennino forlivese	16	5	4.28
4	1961	05	08	22	45	51	Forlivese	40	5	4.37
4-5	1976	05	06	20	00	1	Friuli	770	9-10	6.45
4	1985	11	24	06	54	0	Appennino forlivese	29	5-6	4.29
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
3	1987	07	05	13	12	3	Montefeltro	90	6	4.44
4	1993	11	05	02	01	0	Cesenate	10		3.99
4	1993	11	07	23	21	1	Cesenate	36	4-5	3.95
4-5	1993	11	09	13	46	2	Cesenate	28	4-5	3.93
4-5	1995	12	27	23	44	2	Forlivese	37	5	3.97
4-5	1997	09	26	09	40	0	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
4-5	1999	01	25	22	45	5	Appennino forlivese	97	5	4.36
3-4	2000	05	06	22	07	0	Faentino	85	5	4.08

Effetti In occasione del terremoto del

Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
4	2000	05	08	12	29	0	Faentino	126	5	4.67
4	2000	05	10	16	52	0	Faentino	151	5-6	4.82
4-5	2000	08	01	02	34	31	Montefeltro	84	5-6	4.27
NF	2001	11	26	00	56	5	Casentino	211	5-6	4.63
NF	2002	11	02	10	57	4	Ferrarese	79	4	4.21
3-4	2003	01	26	20	15	0	Appennino forlivese	63	5-6	4.50
3-4	2003	01	29	23	50	1	Appennino forlivese	71	4-5	4.06
3-4	2003	12	07	10	20	3	Forlivese	165	5	4.18
4	2005	07	15	15	17	18	Forlivese	173	4-5	4.29
NF	2006	10	21	07	04	1	Anconetano	287	5	4.21



Località vicine (entro 10km)

Località	EQs	Distanza (km)
Sant'Andrea	1	2
Santa Maria delle Grazie di Fornò	2	5
Bertinoro	71	5
Capocolle	1	5
Carpena	1	5
Santa Maria Nova	1	5
Frattra Terme	1	6
Diegaro	1	6
Forlì	121	8
Polenta	2	8
Collinello	1	8
Meldola	60	9
San Mauro in Valle	1	9
Casemurate	1	10

7.1 NTC 2018 RSL SEMPLIFICATA DA NORMATIVA

Il territorio comunale di Forlimpopoli con l'Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 23.03.2003 è classificato sismico in zona 2. Si riporta la tabella ove ciascuna zona è individuata secondo valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo a_g , con probabilità di superamento del 10% in 50 anni.

Zona sismica	Accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (a_g/g)	Accelerazione orizzontale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (a_g/g)
1	>0.25	0.35
2	0.15 - 0.25	0.25
3	0.05 - 0.15	0.15
4	<0.05	0.05

Con l'entrata in vigore del D.M. 14 gennaio 2008 la stima della pericolosità sismica viene definita mediante un approccio "sito dipendente" e non più un criterio "zona dipendente".

L'azione sismica di progetto in base alla quale valutare il rispetto dei diversi stati limiti presi in considerazione viene definita partendo dalla "pericolosità di base" del sito di costruzione, che è l'elemento essenziale di conoscenza per la determinazione dell'azione sismica.

CATEGORIA DI SOTTOSUOLO - INDAGINE DELLA VELOCITÀ DELLE ONDE SISMICHE NEI PRIMI 30 METRI DI TERRENO

Per l'indagine è stata incaricata la ditta specializzata INTERGEO s.r.l. – Servizi Geologici di San Marino che ha eseguito un'indagine sismica consistente in una prova HVSR a stazione singola; oltre a questa nuova indagine si aveva a disposizione una prova MASW ed una prova HVSR effettuate nell'area limitrofa per la costruzione del nuovo stabilimento ed un'altra prova MASW effettuata per la progettazione della adiacente circonvallazione; il tutto per stimare il profilo della velocità delle onde di taglio (nel nostro caso V_{s30}), fornire la categoria di suolo di fondazione secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018). La velocità delle onde di taglio nei primi trenta metri a partire dalla profondità di metri 4 dal piano campagna sono risultate rispettivamente:

- indagine HVSR anno 2022 - **193 m/sec (V_{s30})** per una profondità variabile da 0÷30.
- indagine HVSR anno 2020 - **184 m/sec (V_{s30})** per una profondità variabile da 0÷30.
- indagine MASW anno 2020 - **186 m/sec (V_{s30})** per una profondità variabile da 0÷30.
- indagine MASW anno 2018 (circonvallazione) **229 m/sec (V_{s30})** per una profondità variabile da 0÷30

Congruentemente con la descrizione stratigrafica secondo la tab. 3.2.II. delle NTC 2018, il sito in esame ricade nella **categoria di sottosuolo C**.

Per le cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle presenti norme. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche definita mediante un approccio "sito dipendente" e non più un criterio "zona dipendente".

L'azione sismica di progetto in base alla quale valutare il rispetto dei diversi *stati limiti* presi in considerazione viene definita partendo dalla "pericolosità di base" del sito di costruzione, che è l'elemento essenziale di conoscenza per la determinazione dell'azione sismica.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, VS. I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità VS per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad [3.2.1]$$

con:

h_i spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle presenti norme. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

Condizioni topografiche

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale. Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione (Tab. 3.2.III):

Tab. 3.2.III – Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

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

Nel caso specifico si può collocare nella categoria T1, zona pianeggiante.

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

CALCOLO DEL FATTORE DI AMPLIFICAZIONE SISMICO

Il valore di a_g (accelerazione massima orizzontale), si ricava dalla seguente relazione:

$a_{max} = S a_g = S_s S_t a_g$. Dove S = coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica (S_s) e dell'amplificazione topografica (S_t). a_g = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

Parametri sismici (EDIFICIO IN CLASSE III)

Tipo di elaborazione: Stabilità dei pendii

Muro rigido: 0

Sito in esame.

latitudine: 44,20191

longitudine: 12,119188

Classe: 3

Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1 ID: 18295 Lat: 44,1767 Lon: 12,0963 Distanza: 3350,855

Sito 2 ID: 18296 Lat: 44,1775 Lon: 12,1659 Distanza: 4609,191

Sito 3 ID: 18074 Lat: 44,2275 Lon: 12,1648 Distanza: 4611,757

Sito 4 ID: 18073 Lat: 44,2267 Lon: 12,0951 Distanza: 3355,955

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 75anni

Coefficiente c_u : 1,5

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %

Tr: 45 [anni]

a_g : 0,076 g

Fo: 2,406

T_c^* : 0,271 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %

Tr: 75 [anni]

a_g : 0,096 g

Fo: 2,399

T_c^* : 0,280 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %

Tr: 712 [anni]

a_g : 0,228 g

Fo: 2,426

T_c^* : 0,315 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %

Tr: 1462 [anni]

a_g : 0,284 g

Fo: 2,486

Tc*: 0,326 [s]

Coefficienti Sismici Stabilità dei pendii

SLO:

Ss: 1,500
Cc: 1,620
St: 1,000
Kh: 0,023
Kv: 0,011
Amax: 1,121
Beta: 0,200

SLD:

Ss: 1,500
Cc: 1,600
St: 1,000
Kh: 0,029
Kv: 0,014
Amax: 1,413
Beta: 0,200

SLV:

Ss: 1,370
Cc: 1,540
St: 1,000
Kh: 0,088
Kv: 0,044
Amax: 3,069
Beta: 0,280

SLC:

Ss: 1,280
Cc: 1,520
St: 1,000
Kh: 0,102
Kv: 0,051
Amax: 3,564
Beta: 0,280

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50

Geostru

Coordinate WGS84

latitudine: 44.200970

longitudine: 12.118218

8.0 DGR 630 e successive - NUOVI INDIRIZZI - SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO – ANALISI SEMPLIFICATA

L'analisi semplificata è richiesta e ritenuta sufficiente per la stima dell'amplificazione nelle aree pianeggianti e sub pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale, e sui versanti stabili, compresi quelli con coperture di spessore circa costante e acclività $\leq 15^\circ$, vale a dire nelle aree in cui il modello geologico può essere assimilato ad un modello fisico monodimensionale.

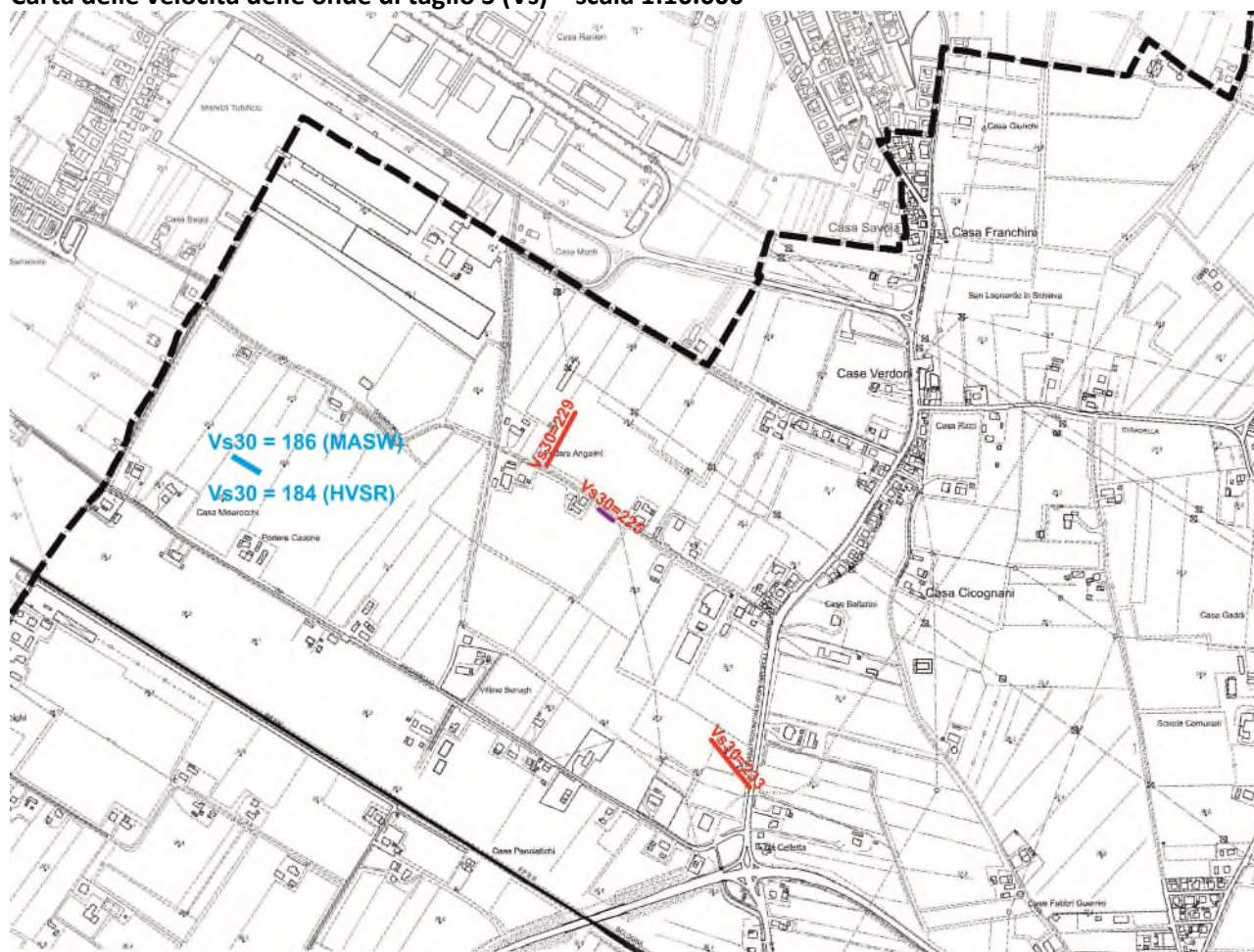
Dal sito web del Comune di Forlimpopoli,

<http://www.comune.forlimpopoli.fc.it/servizi/Menu/dinamica.aspx?idSezione=616&idArea=16379&idCat=17167&ID=18412&TipoElemento=categoria>

si è consultata la Microzonazione sismica allegata al PSC (Piano strutturale Comunale), lo studio è del febbraio del 2019.

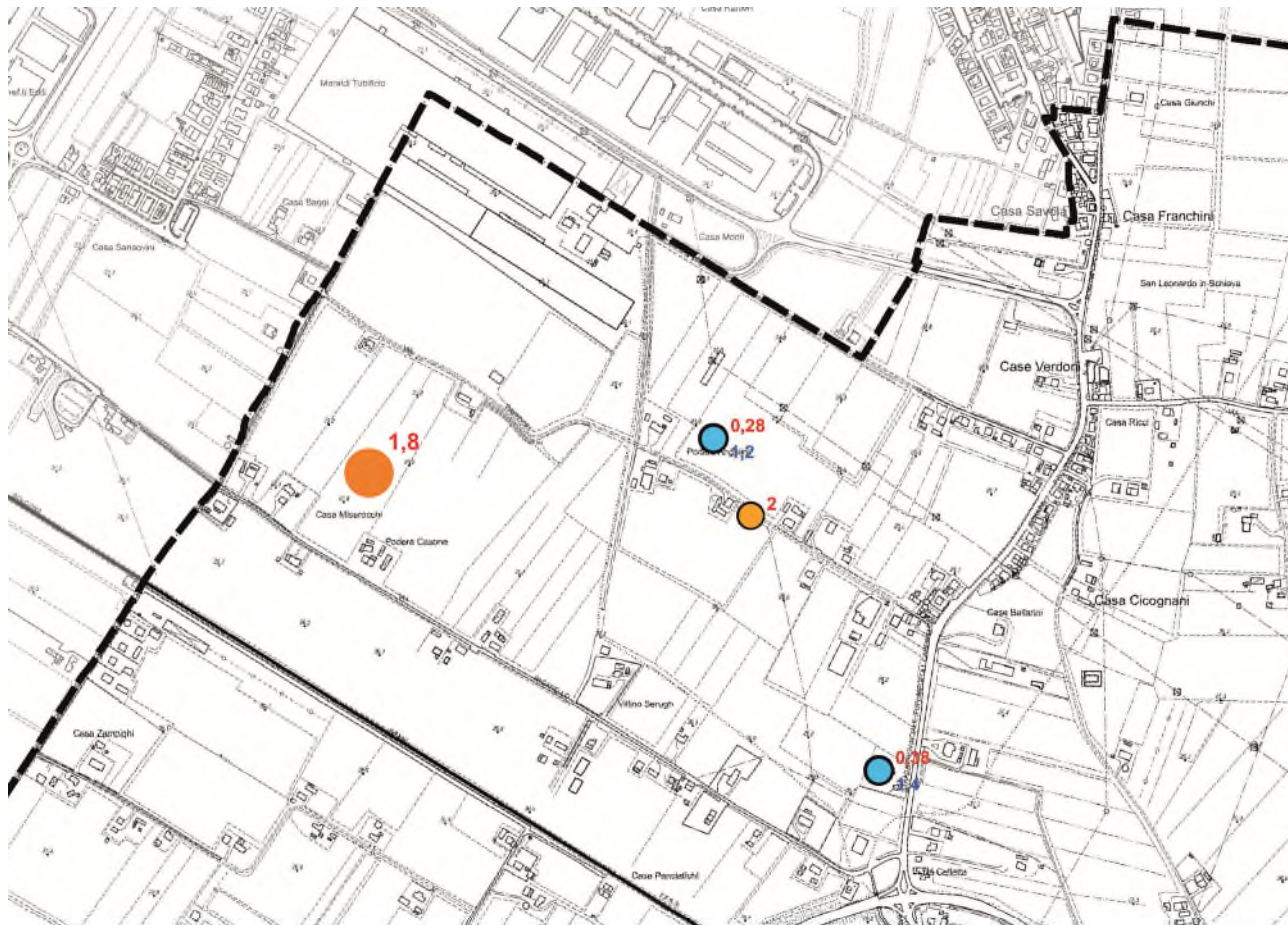
Qui di seguito verrà eseguita una comparazione dei dati presenti nella Microzonazione Sismica del Comune di Forlimpopoli pubblicata con i valori desunti dall'attuale studio.

Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s) – scala 1:10.000



Nella carta delle V_s sopra riportata, i valori ottenuti dalle attuali indagini (in azzurro) sono poco superiori a 180 m/sec, comparabili con i valori presenti nella MS di Forlimpopoli (in rosso) variabili da 220 a 230 m/sec. In entrambi i casi per le NTC la categoria di suolo rientra nella C.

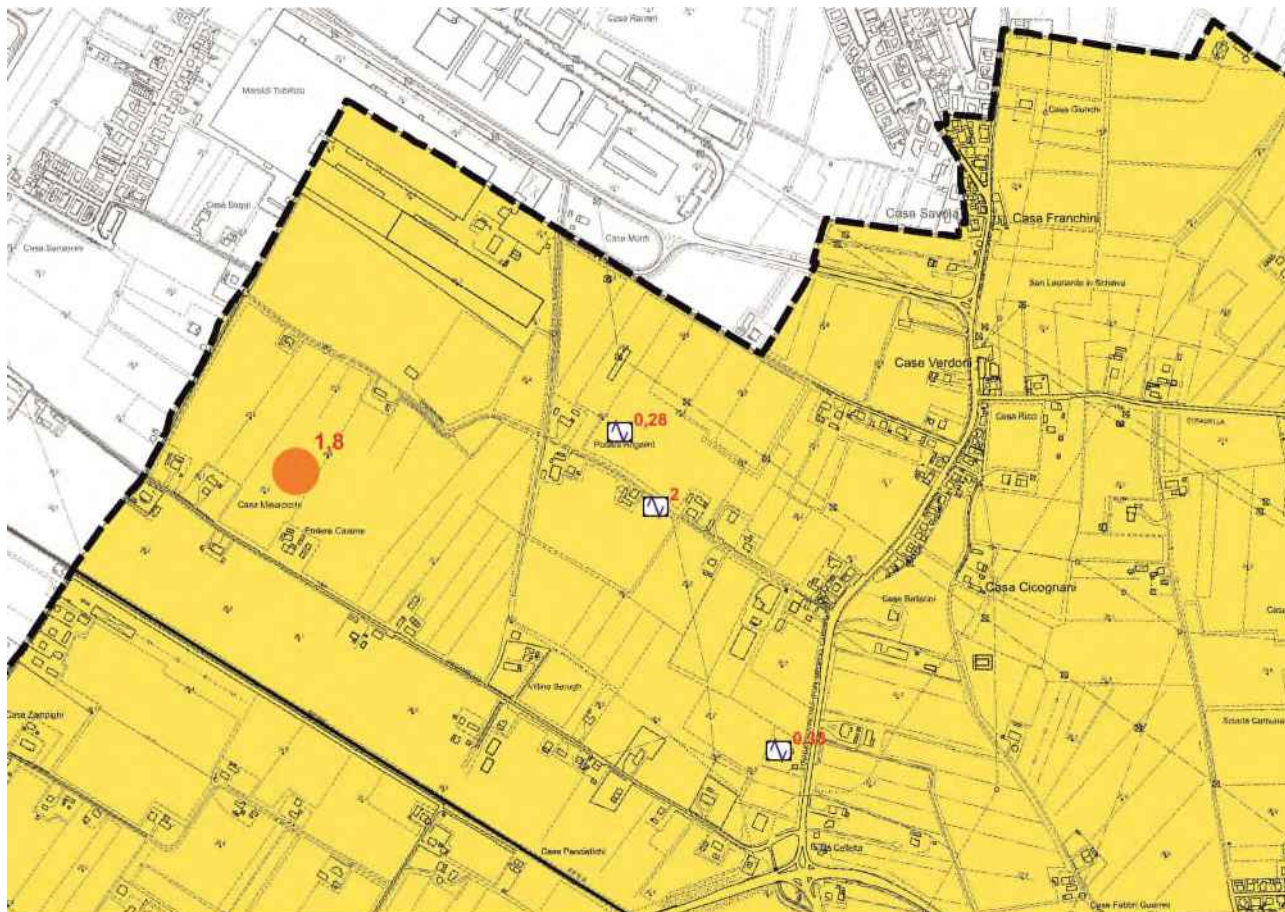
Carta delle frequenze naturali dei terreni - scala 1:10.000



In questa carta sono riportate le ubicazioni dei punti ove sono state eseguite le indagini sismiche HVSR, con simbolicamente precisato il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (frequenza principale). A fianco di ciascun simbolo è riportata la frequenza relativa al primo picco significativo (in rosso). Nel caso sia presente, è indicata anche la frequenza (in blu) di un secondo picco (frequenza secondaria).

Il pallino arancione più grande corrisponde al sito di intervento con un picco di frequenza pari a 1,8.

Carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)



2008

ZONA 8: successione stratigrafica costituita da alternanze di depositi fini e grossolani, poggianti su un substrato coesivo sovraconsolidato stratificato non rigido ($V_s < 800$ m/s), situato a profondità maggiori di 50 metri dal piano campagna. In superficie è presente un orizzonte limo-argilloso che ricopre un primo livello ghiaioso situato a profondità maggiori di 20 metri dal piano campagna.



Punto di misura di rumore ambientale con indicazione del valore di f_0 (rosso)



Punto di misura di rumore ambientale con indicazione del valore f_0 (rosso) nel sito di intervento (indagini novembre 2020).

Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la microzona in prospettiva sismica MOPS zona 8

PROGETTO	LIVELLO
COMUNE DI FORLIMPOPOLI (FC) Studio di microzonazione sismica	Secondo

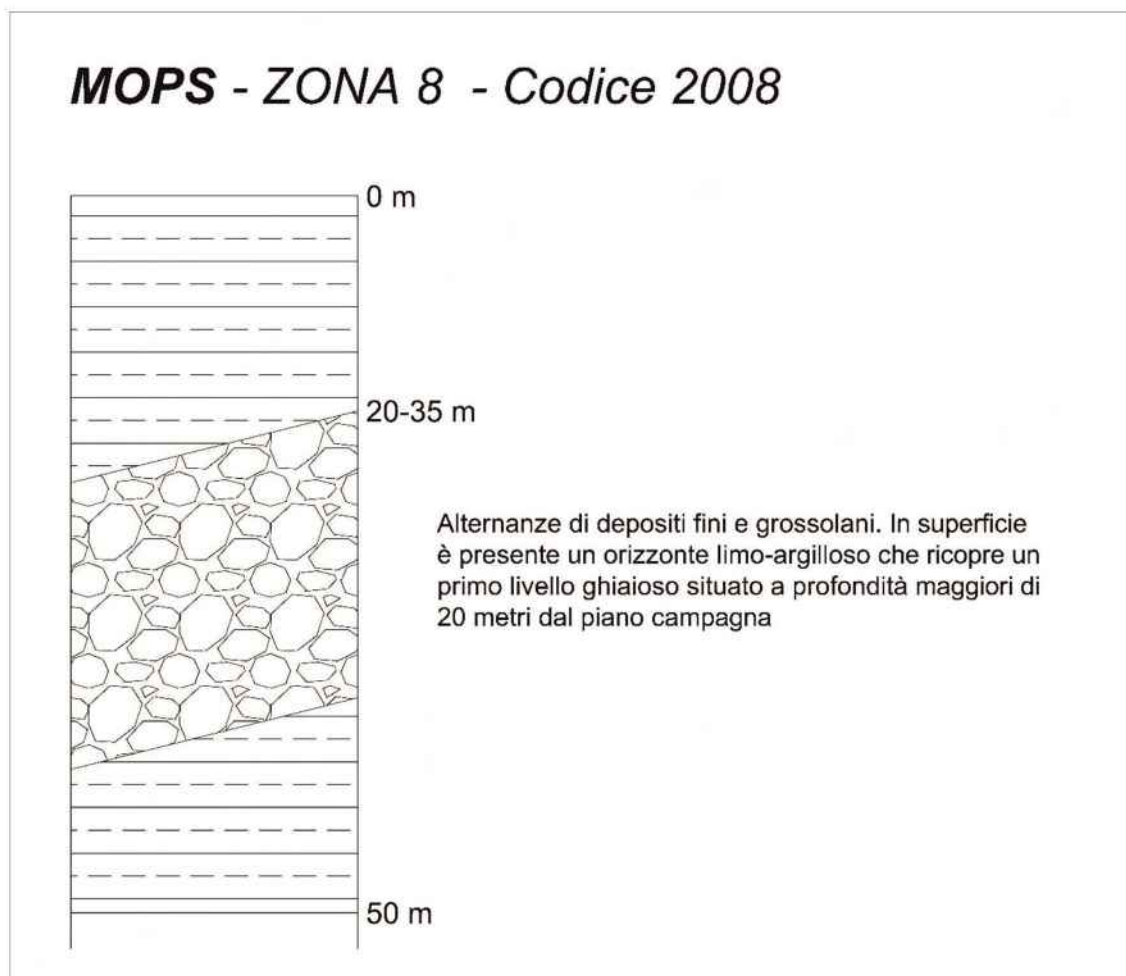


Figura n. 21 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 8 Cod. 2008

Le carte di microzonazione sismica di secondo livello delle aree individuate, suscettibili di effetti locali, costituiscono l'elaborato principale di questo livello di approfondimento. La stima dell'amplificazione tramite procedure semplificate (utilizzo di tabelle) è possibile laddove l'assetto geologico è assimilabile ad un modello fisico monodimensionale. L'amplificazione è quantificata in termini di PGA, SA1, SA2, SA3, SA4, SI1, SI2, SI3 che esprimono l'amplificazione per motivi stratigrafici eventualmente incrementati con il fattore di amplificazione per cause topografiche S_T . Tali coefficienti di amplificazione vengono stimati impiegando le tabelle e le formule dell'Allegato A2 (punti A2.1 e A2.2) che permettono di calcolare i fattori di amplificazione di amplificazione sismica rispetto ad un suolo di riferimento.

La scelta delle tabelle per la stima dell'amplificazione non dipende dalle sole caratteristiche litologiche e morfologiche dell'area ma deve essere attentamente valutata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo, in particolare della profondità e del tipo di substrato.

Per il sito di intervento, Zona stabile suscettibile di amplificazione locale (MOPS zona 8), sono state impiegate le tabelle degli indirizzi regionali denominate "Margine di tipo B", caratterizzato da spessore dei terreni superficiali fini o grossolani poco consolidati superiore a 30 m; la successione sottostante è costituita da alternanze di orizzonti grossolani e orizzonti fini.

TABELLE PER LA STIMA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE SISMICA PER LA MICROZONAZIONE SISMICA – SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO

MARGINE di tipo B: caratterizzato da spessore dei terreni superficiali fini o grossolani poco consolidati superiore a 30 m; la successione sottostante è costituita da alternanze di orizzonti grossolani e orizzonti fini;

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5
SA2	2,6	2,6	2,3	2,1	1,9	1,7
SA3	3,1	2,9	2,7	2,4	2,3	2,1
SA4	3,0	2,9	2,6	2,3	2,1	1,9

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$) e **SA4** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6
SI2	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1	2,0
SI3	3,3	3,1	2,7	2,4	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), **SI3** ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)

In base alle seguenti tabelle riferite al margine di tipo B, in cui ricade il sito di intervento, i singoli valori dei fattori di amplificazione sono i seguenti:

PGA = 1,6 (FA PGA Microzonazione Forlimpopoli = $1,5 \div 1,6$)

SA1 = 1,8

SA2 = 2,6

SA3 = 2,9

SA4 = 2,9

SI1 = 1,9 (FA I.S. 0,1-0,5s = 1,9 - 2,0 - Microzonazione Forlimpopoli)

SI2 = 2,8 (FA I.S. 0,5-1,0s = 2,5 - 3,0 - Microzonazione Forlimpopoli)

SI3 = 3,1

I valori numerici relativi al sito di intervento sono ricavati dall'allegato A2, A2.1.2 Pianura Padana e Costa Adriatica, Delibera Giunta Regionale Num. 630 del 29/04/2019

9.0 VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE CON METODI SEMPLIFICATI

Valutazione del sisma di progetto - Stima dell'accelerazione sismica di riferimento

La valutazione della massima magnitudo attesa stimata, Magnitudo momento massima, è pari 6,14 Mw; nel seguente capitolo è stata eseguita una verifica alla liquefazione considerando il valore di accelerazione risultante dallo spettro da normativa SLV Cat. C - $ag = 0.31$.

Nella risposta sismica locale il valore di ag ottenuto nello spettro normalizzato è pari a 0,27; ai fini prudenziali si è utilizzato il valore maggiore.

Metodi semplificati

Tutti i metodi semplificati permettono di esprimere la suscettibilità alla liquefazione del deposito attraverso un coefficiente di sicurezza, dato dal rapporto fra la resistenza al taglio mobilabile nello strato (CRR) e lo sforzo tagliante indotto dal sisma (CSR). Cioè in pratica si ha:

$F_s = CSR/CRR$. Un deposito dovrà essere considerato suscettibile di liquefazione, se il coefficiente di sicurezza sarà minore di 1 (di 1.25 secondo l'Eurocodice 8). La grandezza CSR dipende dai parametri del sisma di progetto (accelerazione sismica e magnitudo di progetto). CRR è funzione delle caratteristiche meccaniche dello strato, principalmente del suo stato di addensamento, e può essere ricavato direttamente attraverso correlazioni con i risultati di prove penetrometriche dinamiche e statiche o con i valori delle velocità delle onde S ricavati da indagine geofisica.

Il metodo usato per la verifica è: per il CSR Boulanger & Idriss 2014; MSF Idriss 1995; CRR Boulanger & Idriss 2014.

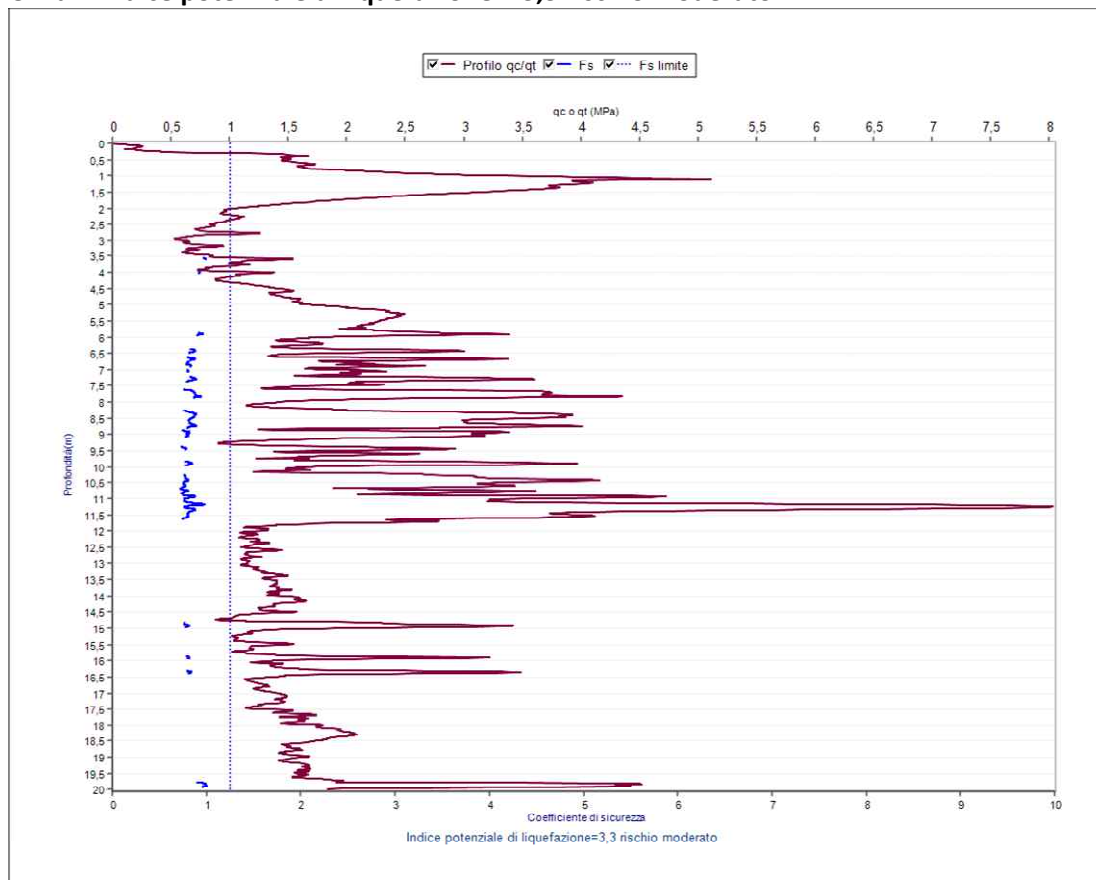
Per una migliore comprensione del fenomeno si è utilizzata la stratigrafia desunta dalla CPT con strati centimetrici.

L'elaborazione è stata effettuata con il programma di calcolo Liquef3 della ProgramGeo.

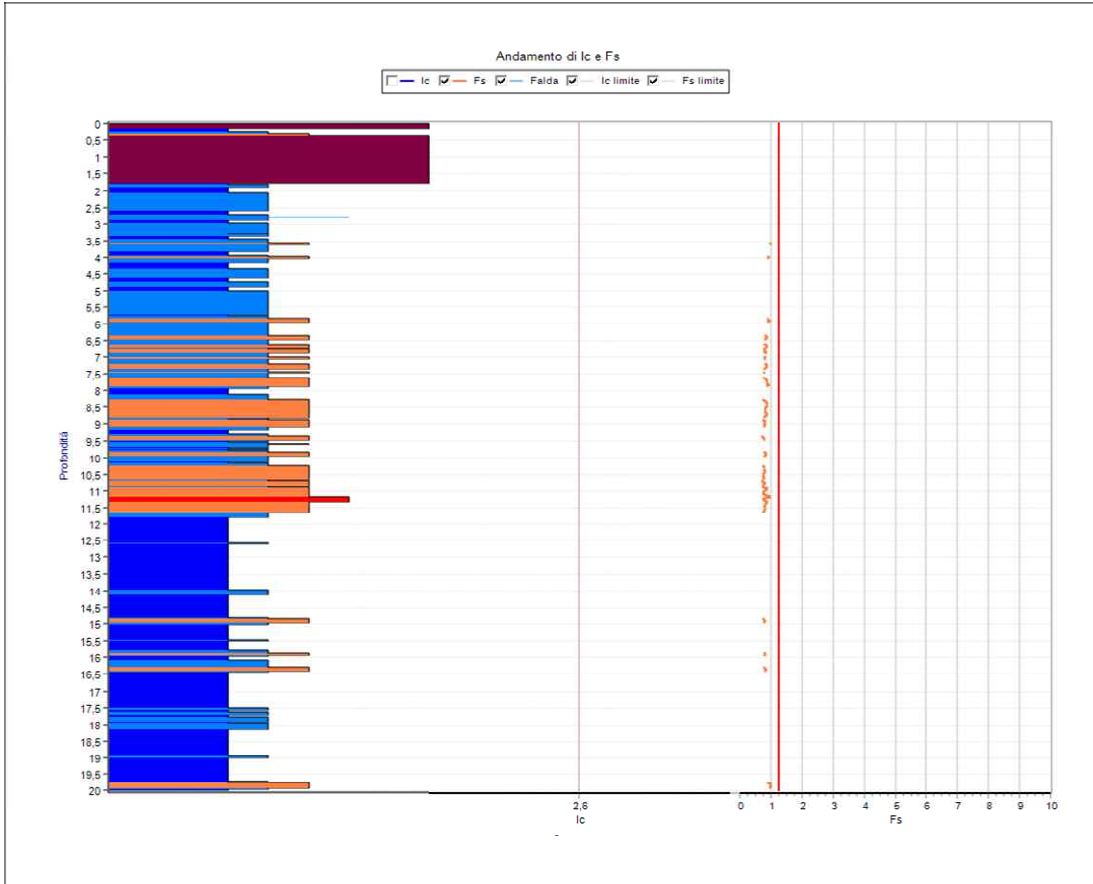
Nelle due verticali di indagine CPTu1 e 2, l'indice del potenziale di liquefazione è risultato inferiore a 5; rispettivamente pari a 3,3 (rischio moderato) e 2 (rischio basso).

Qui di seguito i risultati tabellari.

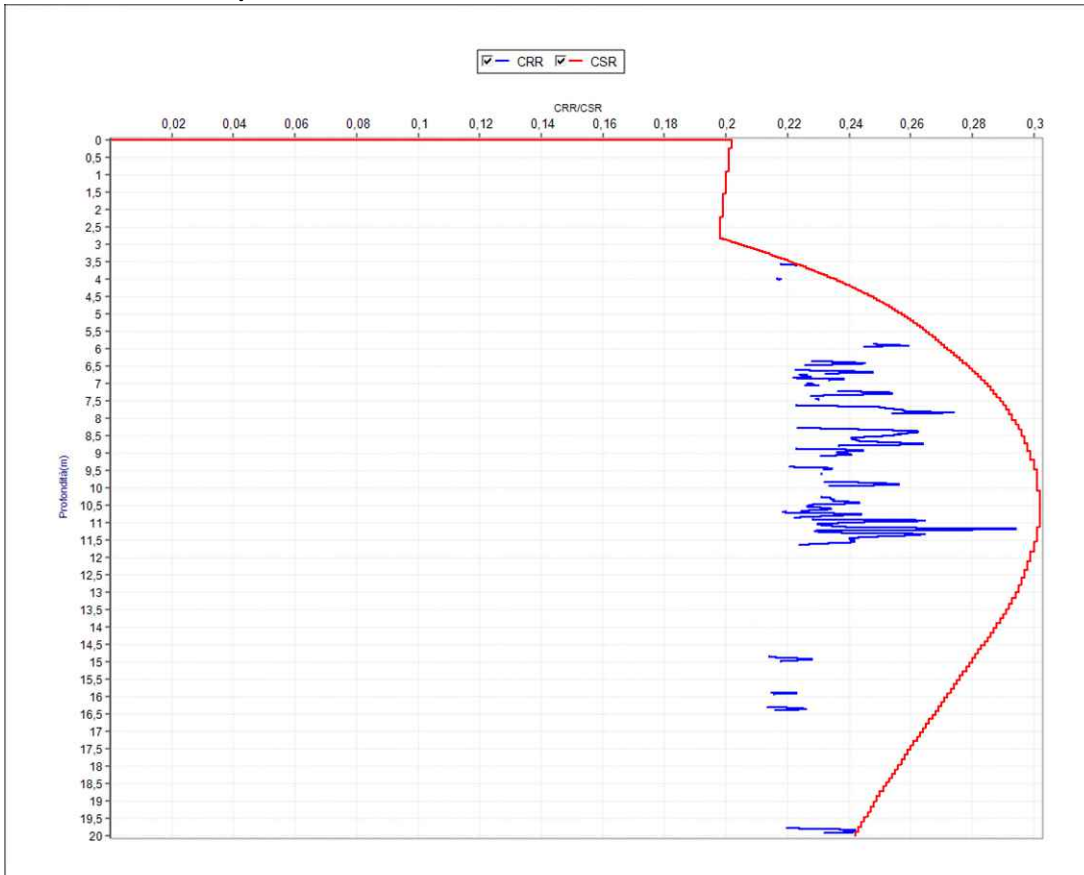
CPTu1: Indice potenziale di liquefazione = 3,3 rischio moderato



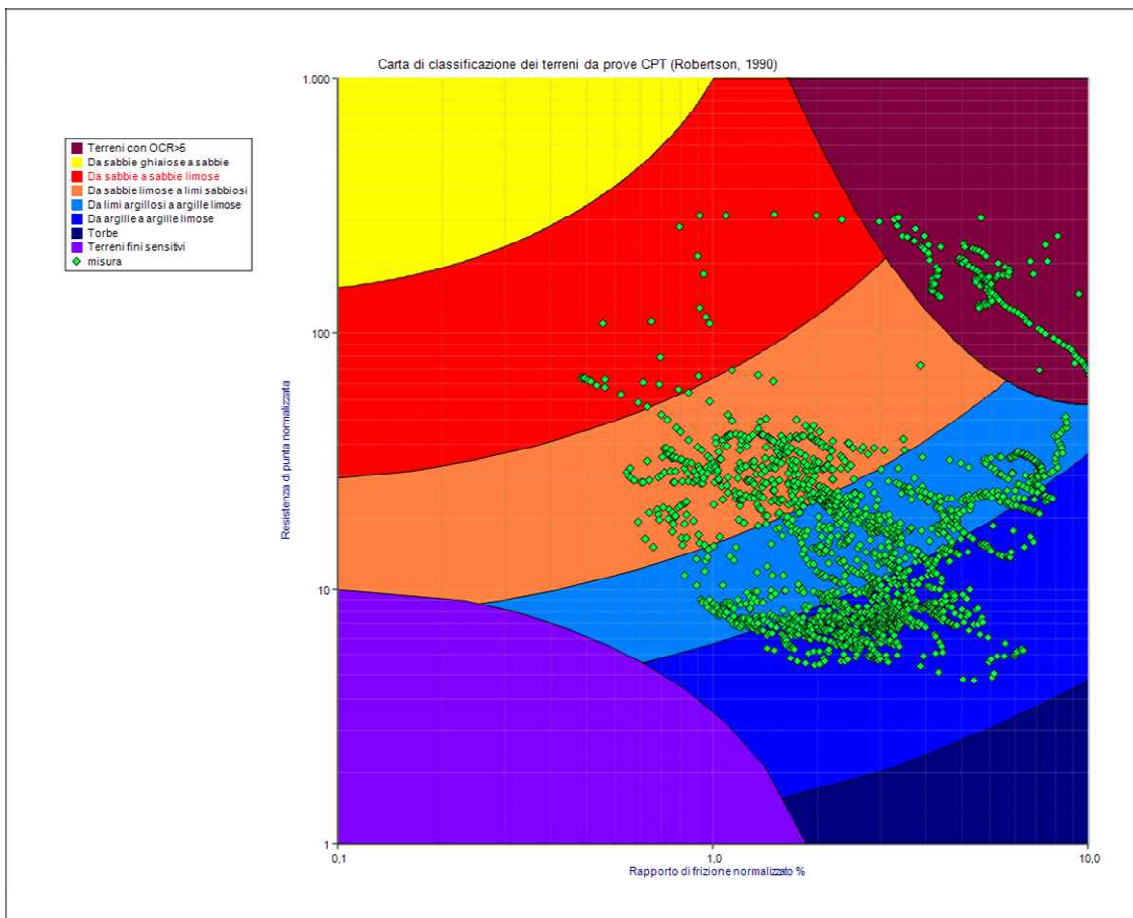
CPTu1: andamento di Ic e Fs



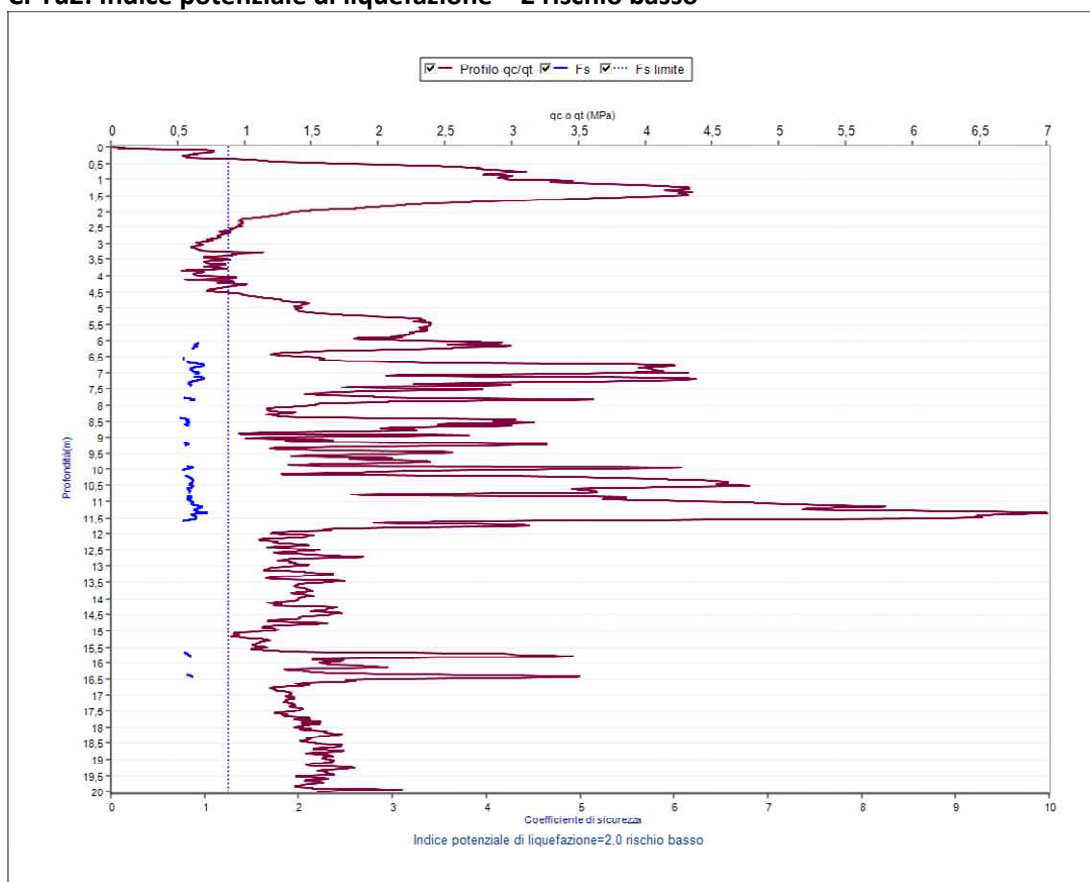
CPTu1: Grafico CRR/CSR



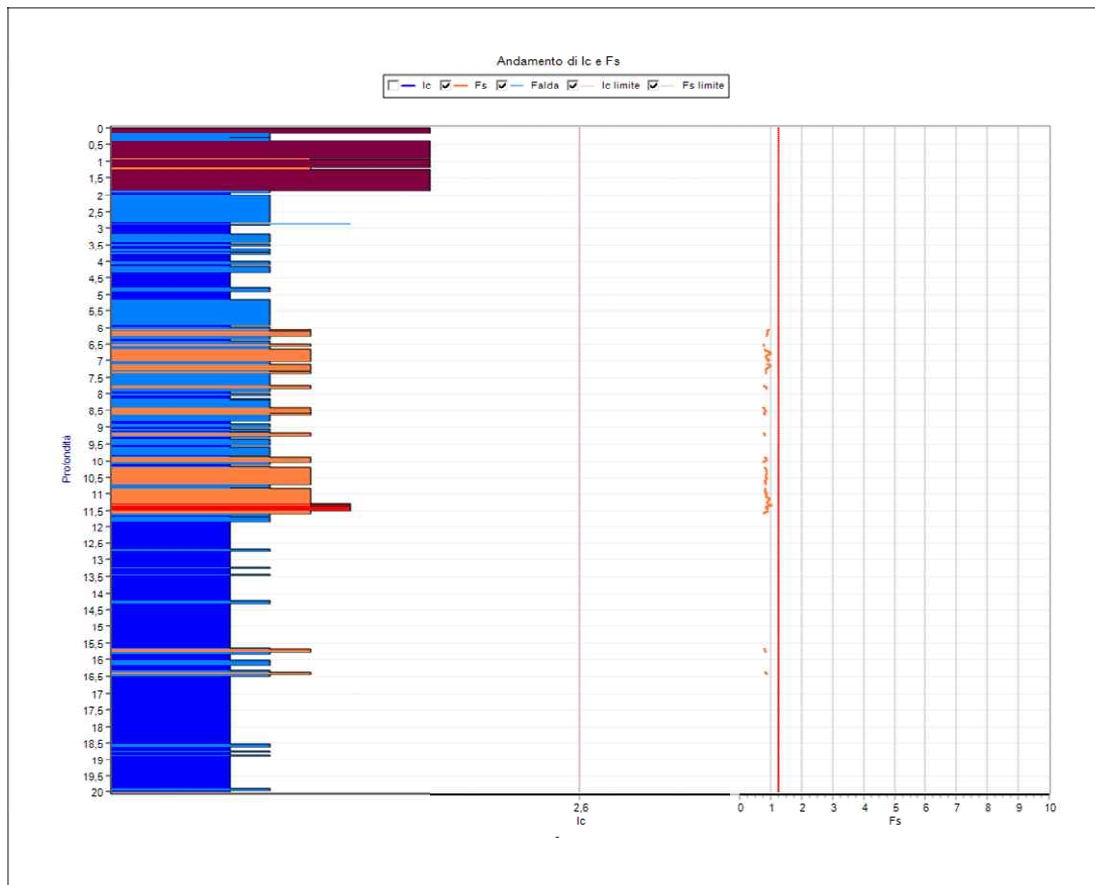
CPTu1: Classificazione terreni da prova CPTu



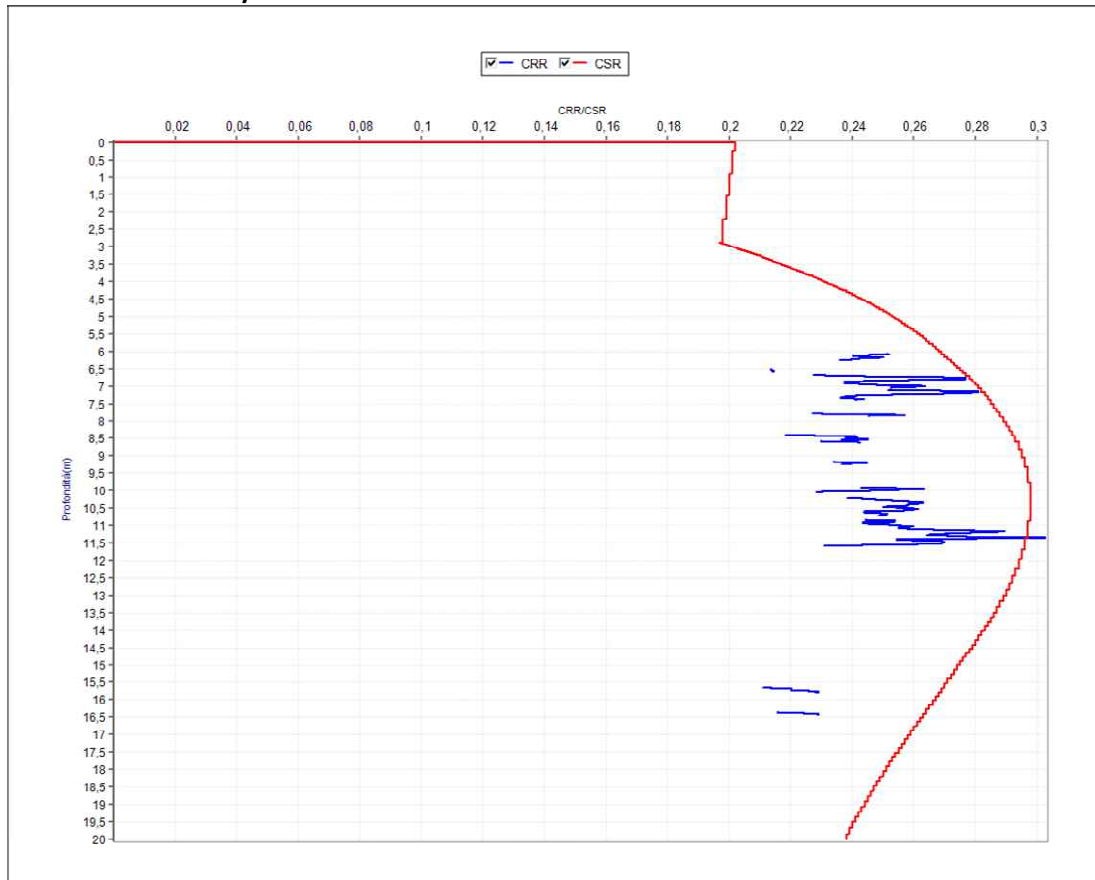
CPTu2: Indice potenziale di liquefazione = 2 rischio basso



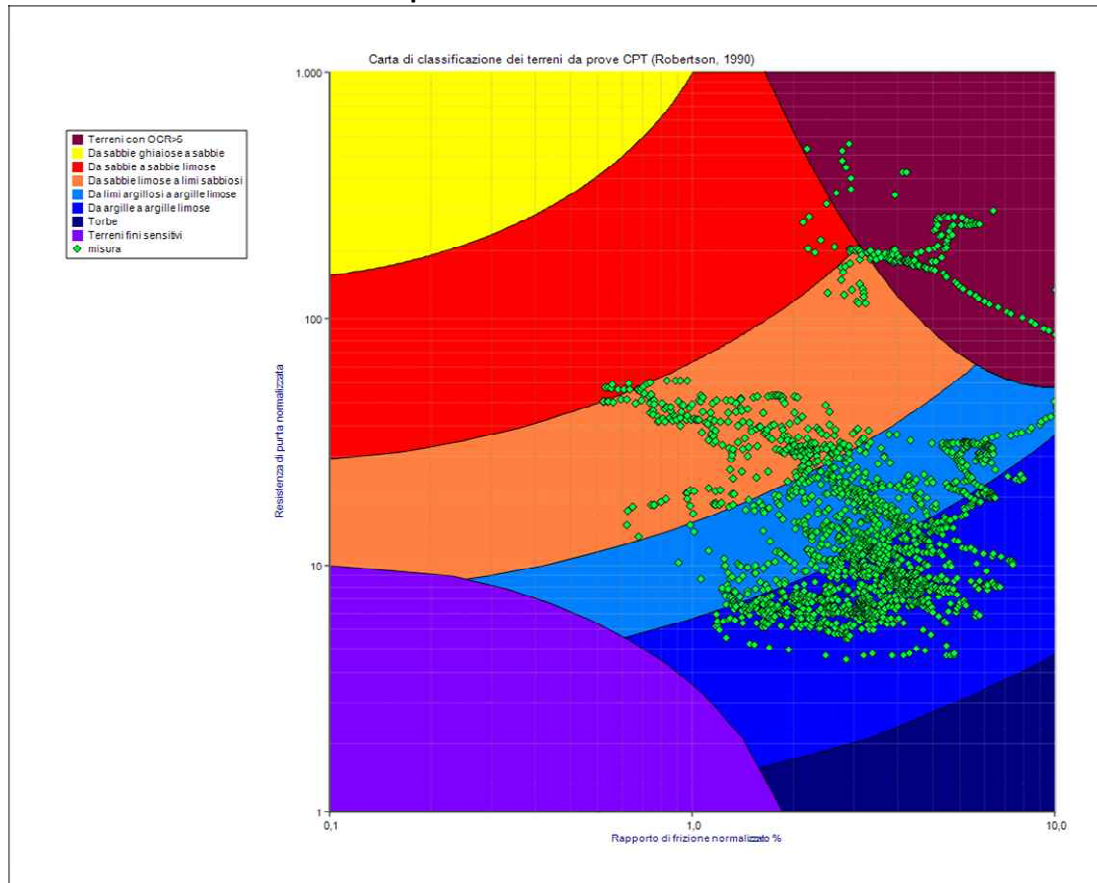
CPTu2: andamento di IC e Fs



CPTu2: Grafico CRR/CSR



CPTu2: Classificazione terreni da prova CPTu



10.0 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Vedi Allegato A2

11. CONCLUSIONI

Nelle 2 verticali di indagini che si sono spinte a 20 dal piano campagna si è riscontrata una stratigrafia variabile con un contenuto in sabbia, limo sabbioso e sabbia limosa in un intervallo compreso all'incirca fra 6 e 12 metri intervallati ad orizzonti di limo argilloso; sopra e sotto a questo intervallo sono presenti terreni prettamente coesivi. Il livello della falda freatica superficiale è prossimo alla superficie. Il valore da normativa di A_{max} è pari a 3,069 (PGA (g) 0,31 per un tempo di ritorno di 712 anni. Con lo sviluppo della Risposta Sismica Locale si è ottenuto una PGA (g) pari a 0,27. In considerazione della vicinanza dei due spettri (da normativa e normalizzato da RSL) si ritiene di adottare la PGA da normativa più cautelativa.

Si è eseguita una verifica alla liquefazione (Magnitudo momento massima pari 6,14 Mw e ag 0.31) sulle due verticali di indagine (CPTu1 e CPTu2) con un risultato del potenziale di liquefazione rispettivamente di 3,3 (rischio liquefazione moderato) e 2 (rischio liquefazione basso). In considerazione della presenza di 6 metri di terreno coesivo sopra l'orizzonte con terreni sabbiosi si ritiene che il rischio di liquefazione sia ulteriormente ridotto e da considerarsi basso.

Cesena 4 Novembre 2022

Geologo Paride Antolini



Provincia di Forlì-Cesena Comune di Forlimpopoli
 Committente: GESCO S.R.L. - Inquadramento scala 1:25.000 - TAVOLA 240 SO-255 NO

 Sito di intervento Archivio Comunale

Fig. 1

† CPTu1-2
HVSR

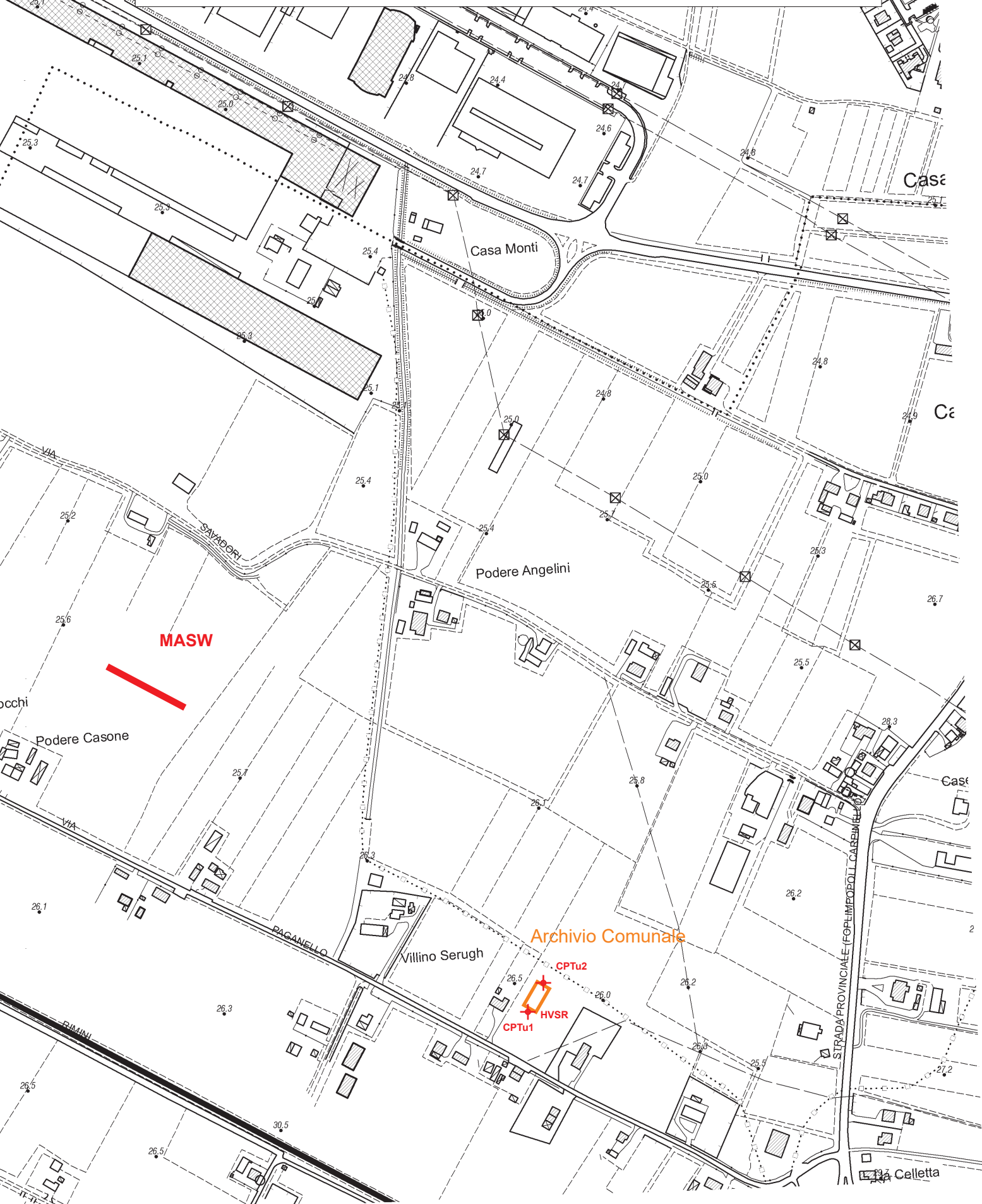


Sito di intervento con posizione delle indagini, CPTu1-2, HVSR

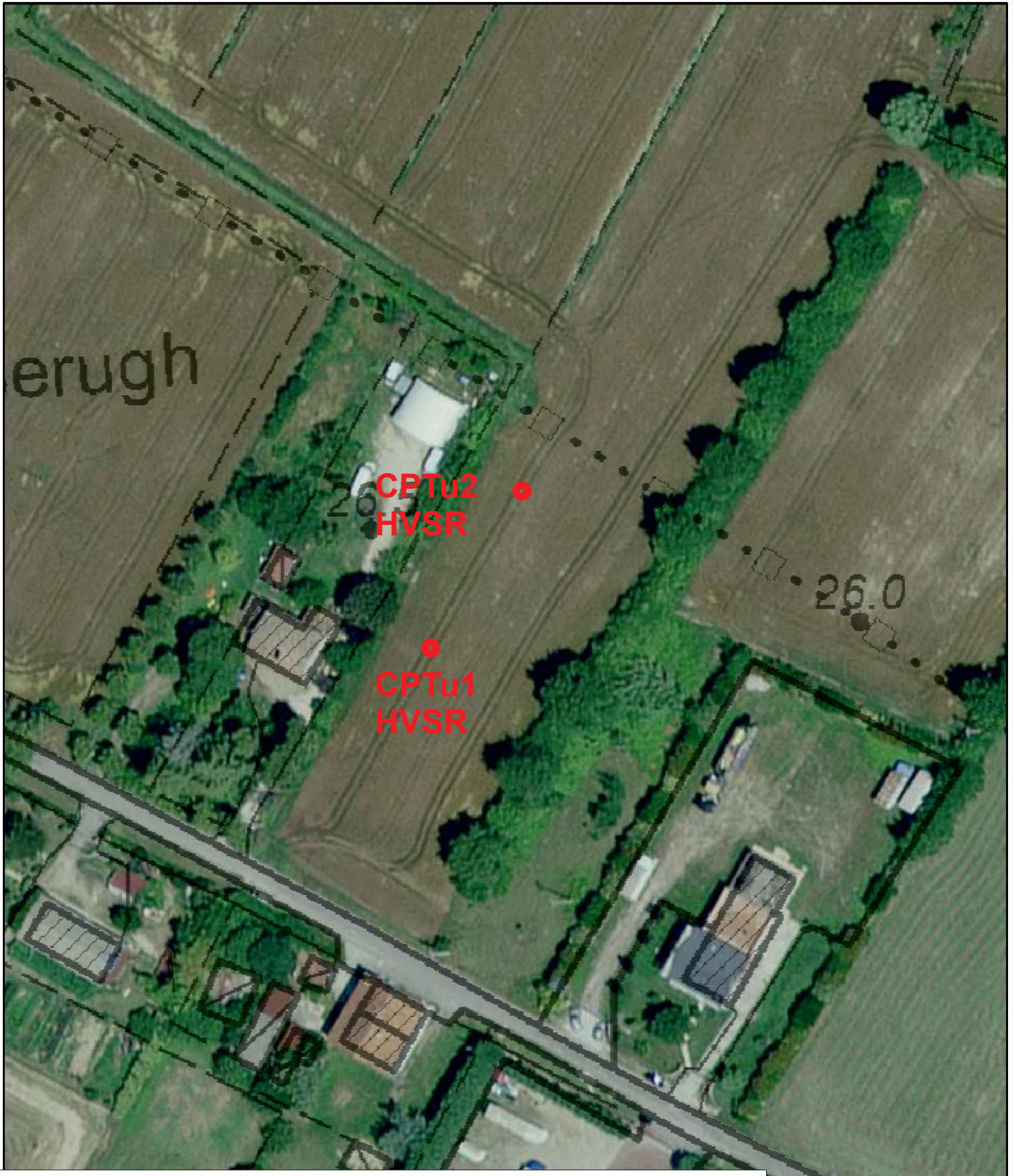


MASW

Fig. 2



Consultazione Database Topografico Regionale



PROVINCIA FORLÌ-CESENA COMUNE DI FORLIMPOPOLI
Committente: GESCO S.R.L.
Ortofoto RER 2018 con posizione delle indagini
scala 1:1.000

1:1.000
0,01 0,03 mi
0,03 0,05 km

● **CPTu1 + HVSR** Posizione indagini

Fig. 3

Legenda

Province




Comuni



Griglia 10.000



Prove lineari


 *prova MASW*


 *prova ReMi*

Prove puntuali


- *carotaggio continuo*
- *misure di microtremore a stazione singola (HVSr)*
- *pozzo per acqua*
- *prova CPT con punta elettrica*
- *prova CPT con punta elettrica con piezocono*
- *prova CPT con punta meccanica*
- *prova dinamica generica*

Forme geomorf./antrop. (10K)


 *orlo di terrazzo fluviale*

 *traccia di alveo fluviale abbandonato*


Ambienti deposiz. e litologie (10K)


 *Limo Argilloso Sabbioso - Piana alluvionale*

 *Sabbia - Piana alluvionale*


 *Sabbia Limoso Argillosa - Piana alluvionale*

Coperture quaternarie (10K)

 *AES8 - Subsistema di Ravenna*

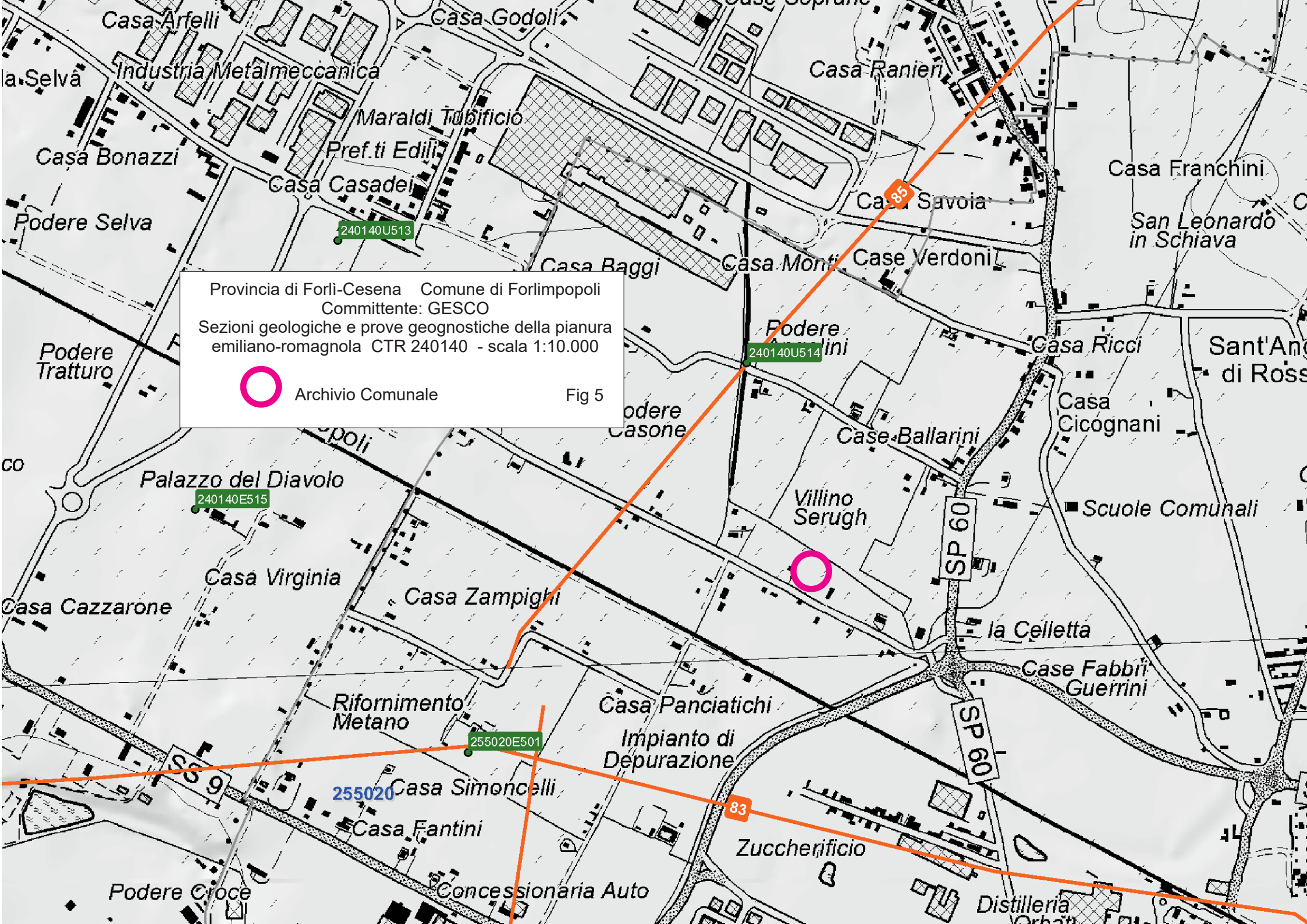
 *AES8a - Unità di Modena*

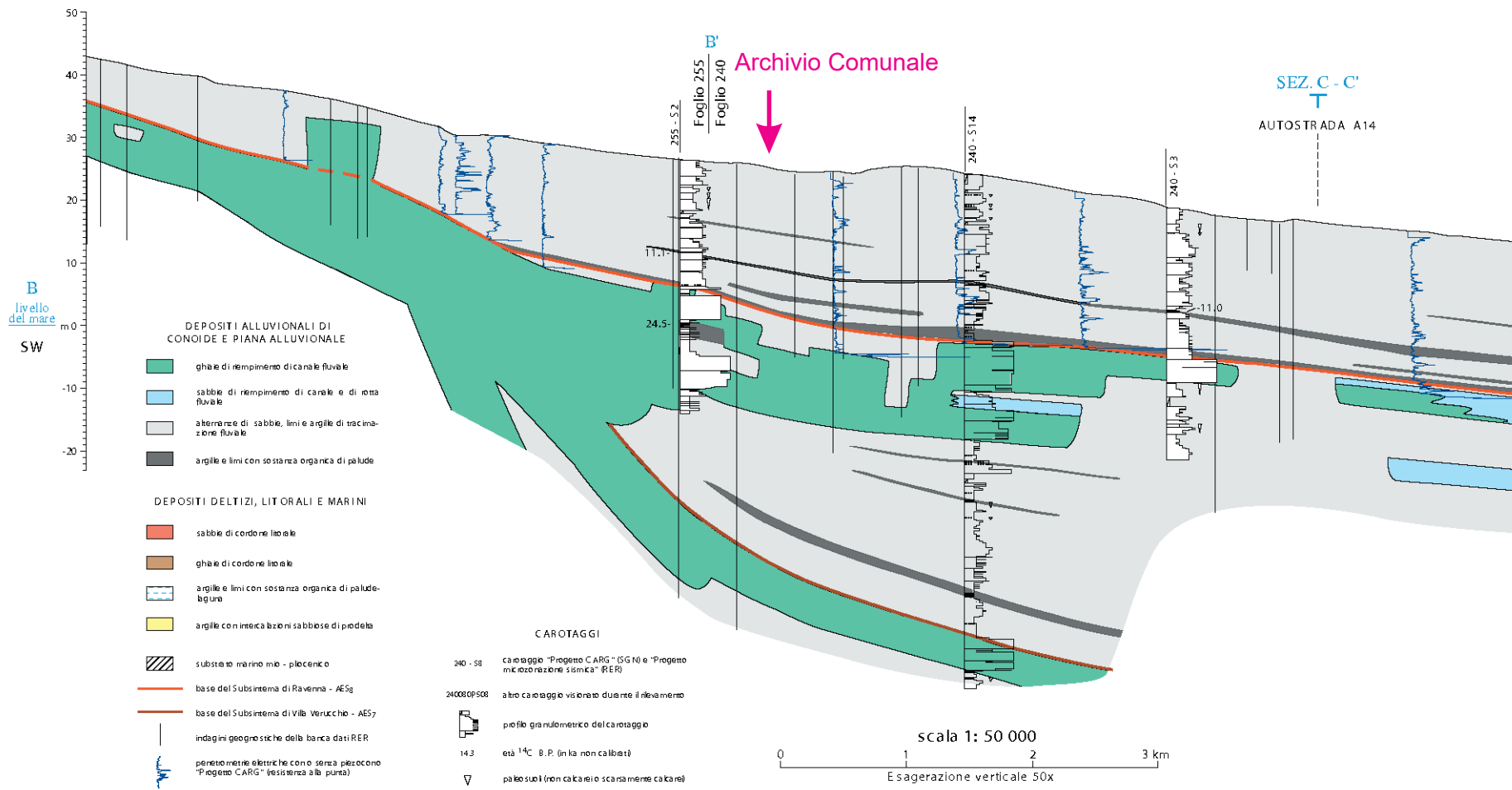
Limiti di unità geologiche (10K)

 *limite di natura incerta*

Unità geologiche (10K)

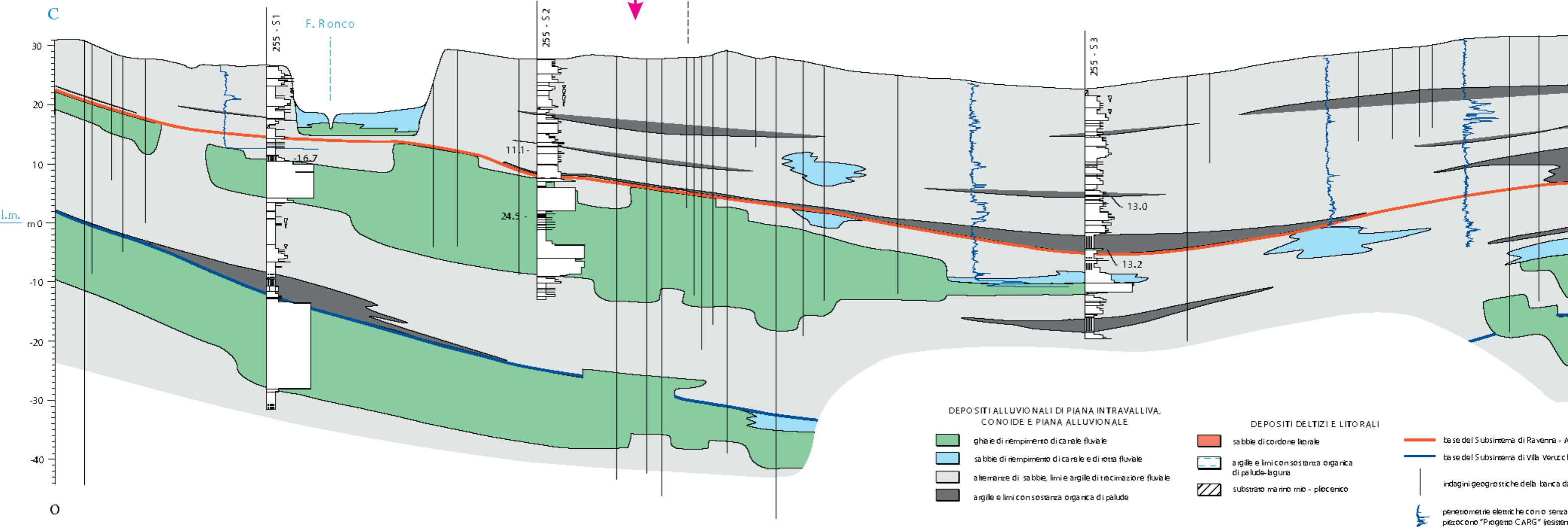
 *FAA - Argille Azzurre*





Provincia di Forlì-Cesena Comune di Forlimpopoli
 Committente: GESCO
 Sezione geologica n. 85
 Fig 6

SEZ. B-B'-B''
 Archivio Comunale
 Forlimpopoli



Provincia di Forlì-Cesena Comune di Forlimpopoli
 Committente: GESCO
 Sezione geologica n. 83
 Fig 7

SEZIONE GEOLOGICA CPTu1-CPTu2 scala 1:200

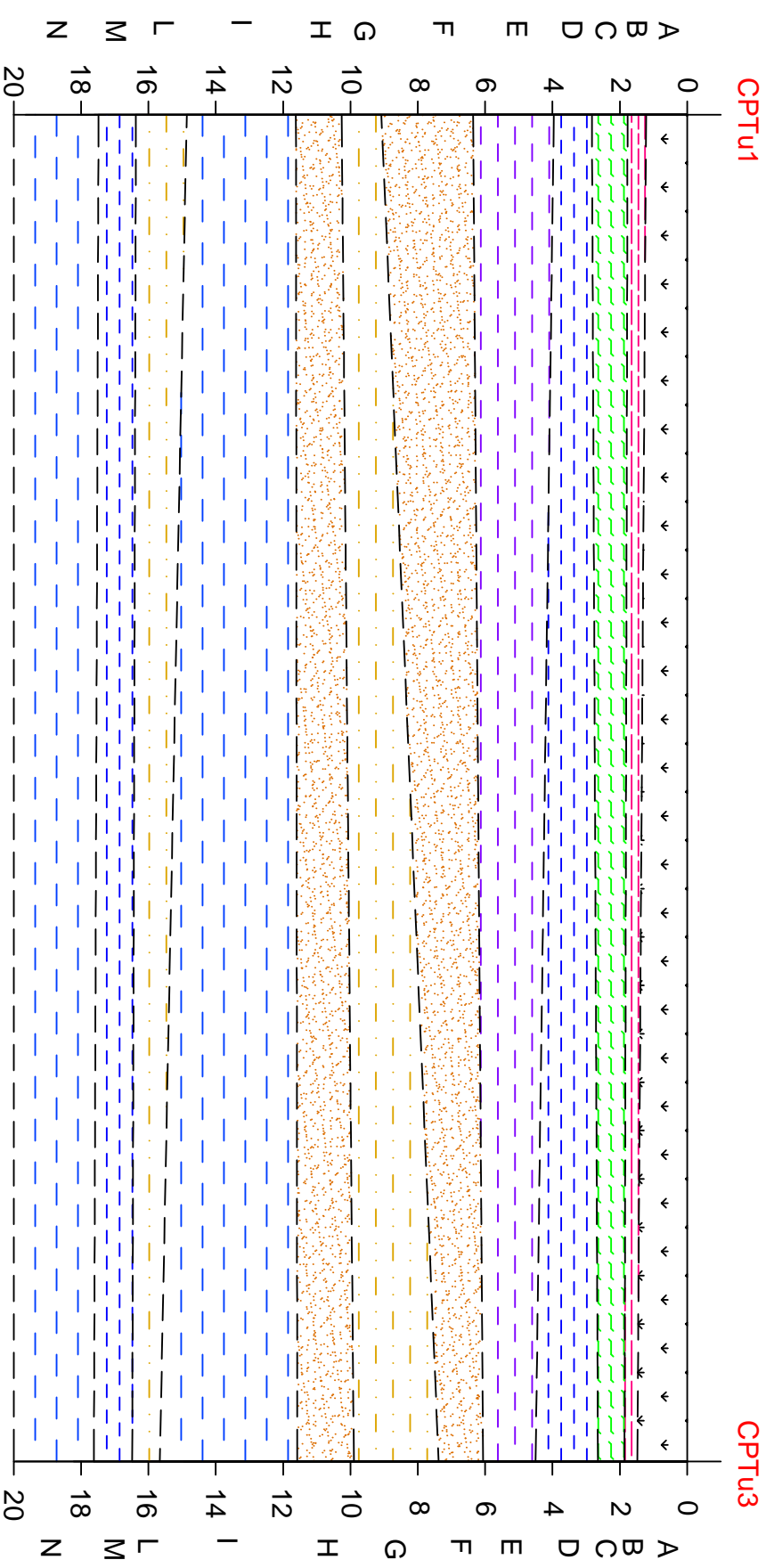
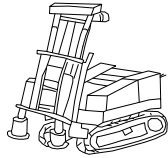


Fig. 8



INTERGEO s.r.l. - **Servizi Geologici**
Strada Acquasalata, 9 47899 Serravalle - RSM
Codice Operatore Economico - SM21197
Tel. 333 2208376
www.intergeosm.com - mail: info@intergeosm.com

Località:

Forlimpopoli (FC) - Via Paganello

Oggetto:

Indagine sismica passiva a stazione singola HVSR

Data:

Ottobre 2022

Premessa

Il giorno 17/10/2022 a Forlimpopoli (FC) - Via Paganello è stata eseguita un'indagine sismica passiva a stazione singola al fine di stimare il profilo della velocità delle onde di taglio ($V_{s,eq}$) per fornire la categoria di suolo di fondazione, secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (2018);

Strumentazione utilizzata e modalità esecutive

La misura di microtremore ambientale è stata effettuata per mezzo di un registratore sismico mostrato in figura 1.



Fig. 1

Il registratore è composto da una terna di velocimetri, i quali trasmettono il segnale ad un sistema di acquisizione digitale a basso rumore.

Lo strumento è stato posizionato correttamente (tramite bolla sferica e piedini regolabili) sul terreno; inizia l'acquisizione dei microtremori: i modi di vibrare del terreno vengono amplificati, convertiti in forma digitale, organizzati e salvati su una memoria digitale. Successivamente i dati vengono trasferiti nel PC dove, mediante il codice di calcolo Grilla appositamente sviluppato, vengono analizzati ed elaborati come mostrato in seguito.

Procedura di analisi dati per stazione singola H/V

Dall'elaborazione della registrazione del rumore sismico ambientale, è stata ricavata la curva H/V (HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO) (Pag. 4).

Il grafico H/V TIME HISTORY (Pag. 4) mostra le “finestre temporali” analizzate per l'elaborazione della curva H/V e permette di individuare eventuali finestre di disturbo all'interno di una registrazione.

Il grafico DIRECTIONAL H/V (Pag. 4) rappresenta la proiezione del HVSR lungo le diverse direzioni, da 0° a 180° in senso orario, dove 0° rappresenta la direzione del Nord segnato sullo strumento (da 180° a 360° i risultati sono simmetrici). Questo permette di vedere se una componente orizzontale prevale sull'altra: cioè se la media HVSR riceve più il contributo da parte di un componente orizzontale.

In seguito, il grafico SINGLE COMPONENT SPECTRA (Pag. 5), mostra l'andamento delle singole componenti nelle tre direzioni (N-S_E-O_Verticale).

In base alle conoscenze stratigrafiche, utilizzando la curva H/V, è stato possibile realizzare su di essa un modello sintetico di V_s (EXPERIMENTAL VS. SYNTHETIC H/V) (Pag. 5) seguendo inoltre le linee guida Sesame, 2005 (Pag. 6).

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione (Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 del 17/01/2018), con la seguente formula:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

h_i : spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$: velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N : numero di strati;

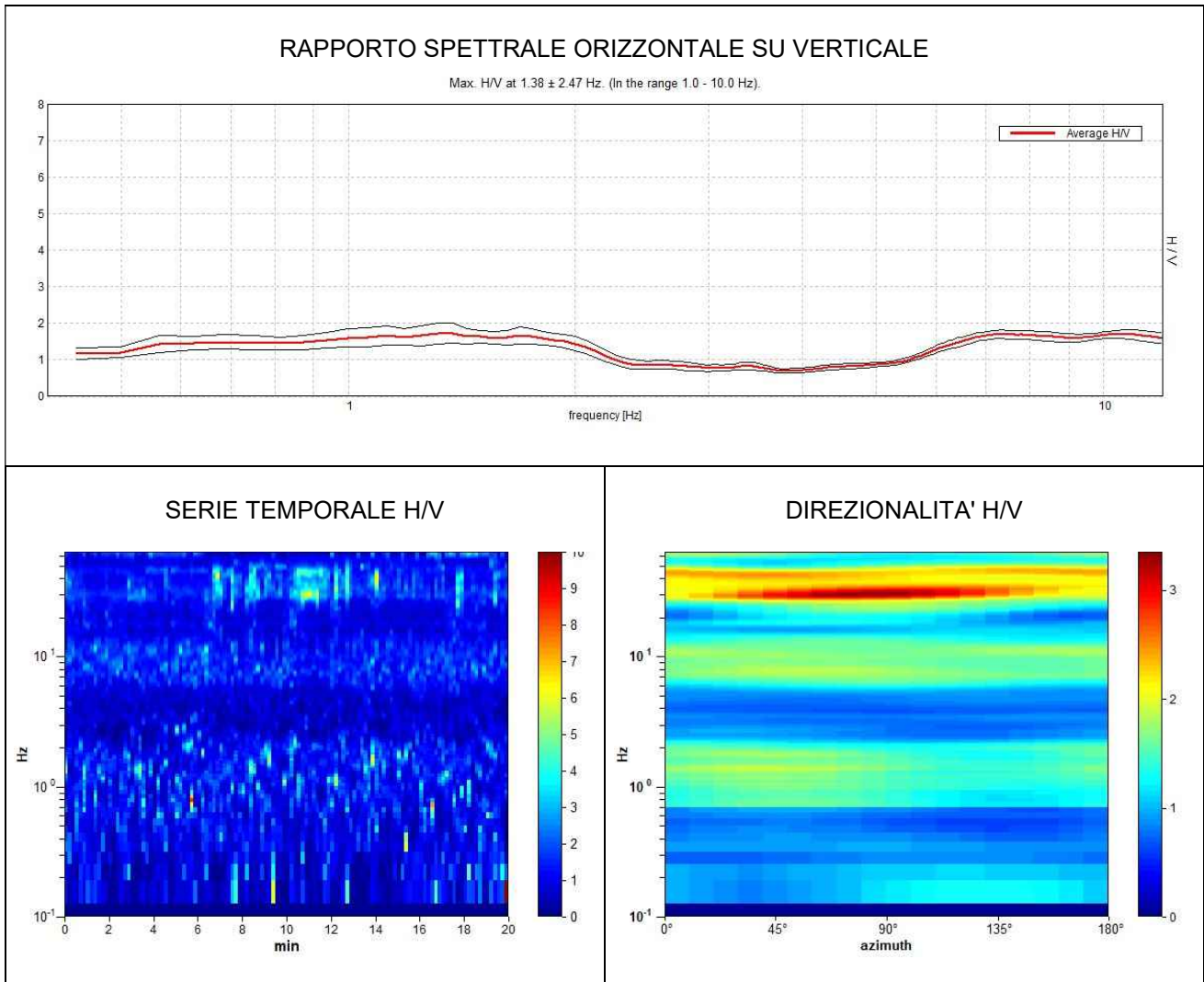
H : profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

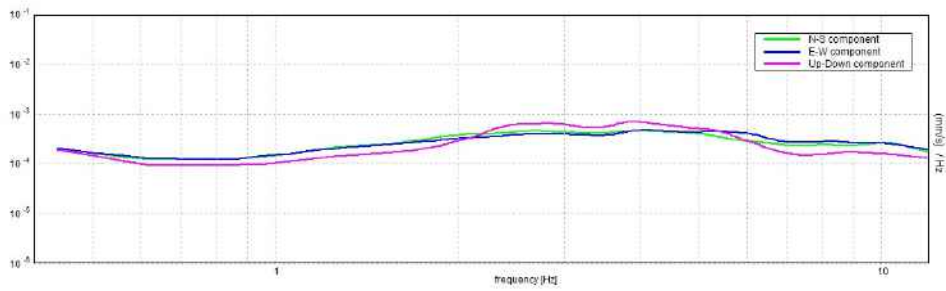
FORLIMPOPOLI

Inizio registrazione: 17/10/22 10:38:14 Fine registrazione: 17/10/22 10:58:15
Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN
Dato GPS: 44.200695 - 12.118111

Durata registrazione: 0h20'00". Analisi effettuata sull'intera traccia.
Freq. campionamento: 128 Hz
Lunghezza finestre: 10 s
Tipo di lisciamento: Triangular window
Lisciamento: 10%

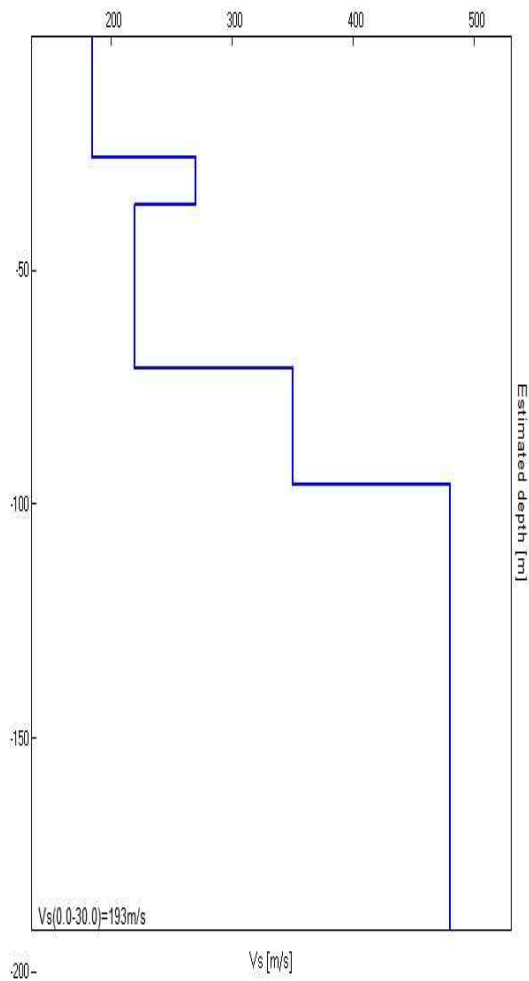
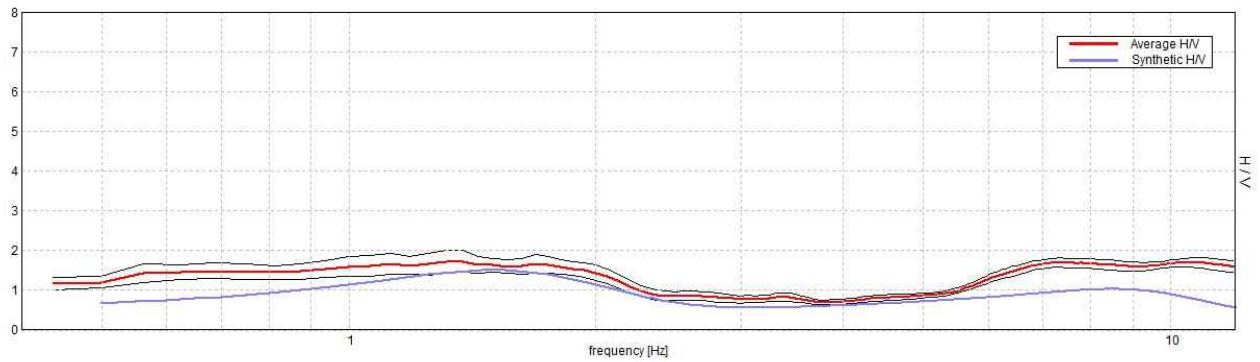


SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO

Picco H/V a 1.38 ± 2.47 Hz (nell'intervallo 1.0 - 10.0 Hz).



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
26.00	26.00	185
36.00	10.00	270
71.00	35.00	220
96.00	25.00	350
inf.	inf.	480

$V_s(0.0-30.0)=193\text{m/s}$

Picco H/V a 1.38 ± 2.47 Hz (nell'intervallo 1.0 - 10.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.38 > 1.00$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$742.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 34	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	1.220 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	2.438 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$1.73 > 2$		NO
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.02932 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.11565 < 0.1375$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2818 < 1.78$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

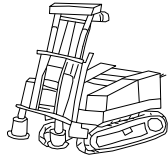
According to the Sesame, 2005 guidelines.

Con la determinazione delle onde di taglio Vs i terreni indagati vengono inseriti in una delle seguenti categorie di sottosuolo (N.T.C. 2018_Tabella 3.2.II):

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Dall'analisi dell'indagine si può affermare che il sito è caratterizzato dalle seguenti velocità delle onde di taglio (V_{s30}):

profondità di calcolo	V_{s30} m/sec.	Categoria di suolo
0,00-30,00mt.	193	C
1,00-31,00mt.	195	C
2,00-32,00mt.	197	C
3,00-33,00mt.	200	C
4,00-34,00mt.	202	C



INTERGEO s.r.l. - **Servizi Geologici**
Strada Acquasalata, 9 47899 Serravalle - RSM
Codice Operatore Economico - SM21197
Tel. 333 2208376
www.intergeosm.com - mail: info@intergeosm.com

Località:

Forlimpopoli (FC) - Via Paganello

Oggetto:

Prova MASW (multichannel analysis of surface waves)

Data:

Novembre 2020

PREMESSA

Il giorno 02/11/2020 a Forlimpopoli (FC) - Via Paganello è stata eseguita un'indagine geofisica mediante una prova MASW (ubicazione fig. 1) per il calcolo del valore V_{S30} .

Lo scopo dell'indagine era di ottenere la stratigrafia delle velocità delle onde trasversali V_s da cui ricavare il parametro V_{S30} .

In questo cantiere è stata realizzata n. 1 prova MASW.

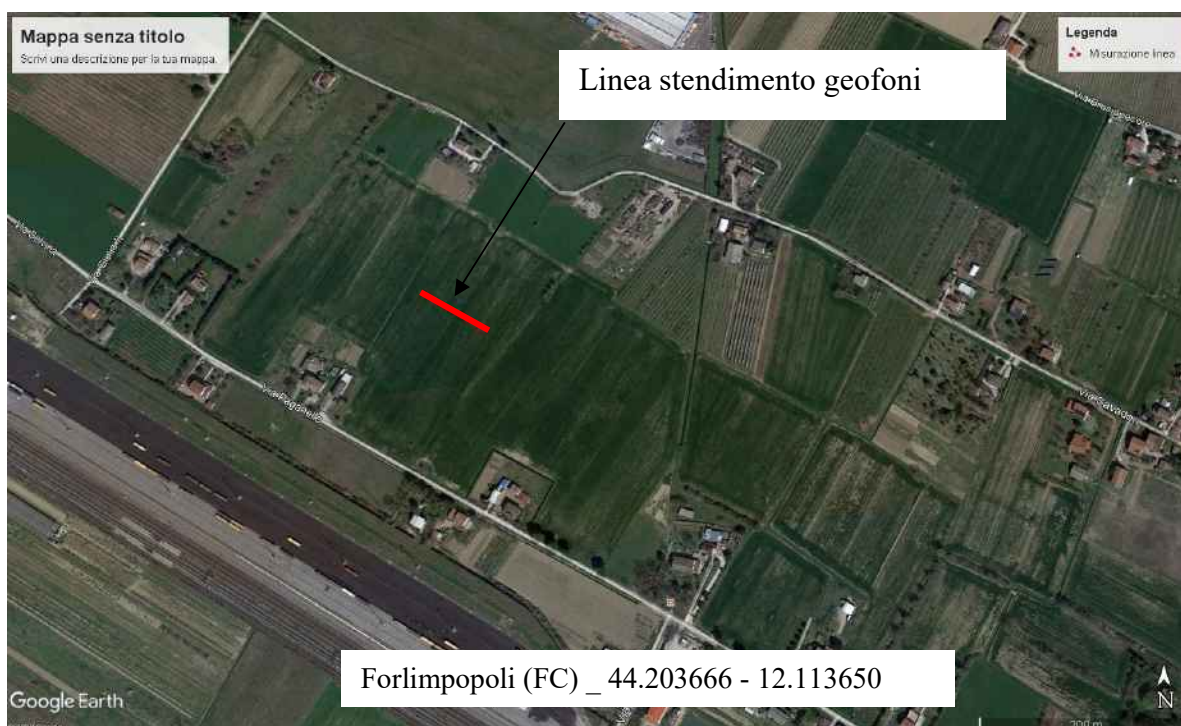


Fig. 1

Le caratteristiche della prova sono:

Nome	Stendimento geofonico (m)	Energizzaz.	Geofoni
Forlimpopoli	46	3	24

ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI

Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali; questo viene interpretato con la metodologia MASW.

Questa pratica permette di utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali e di costruire un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh.

L'inversione della curva di dispersione viene realizzata utilizzando la curva ottenuta dalla modellazione diretta.

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA



fig. 2

La strumentazione utilizzata (fig. 2) è costituita da:

un sismografo PASI 16S24P; processore Intel Celeron; Ambiente Operativo Windows Xp; Numero canali 24; Display VGA a colori LCD touch screen; Supporto memorizzazione Hard-Disk; Temperatura di funzionamento 0°-55°; Umidità 5% - 90%; 24 geofoni da 4.5Hz; una mazza da 8 Kg;

DESCRIZIONE GENERALE DELLA PROCEDURA MASW

La procedura MASW può sintetizzarsi in tre stadi distinti:

- 1- acquisizione dei dati di campo;
- 2- estrazione della curva di dispersione;
- 3- inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s (profilo 1D) che descrive la variazione di V_s con la profondità.

ELABORAZIONE E RISULTATI

In allegato sono riportati i risultati della prova MASW eseguita.

Nella prima figura (allegato 1) si osserva l'acquisizione delle onde generate in seguito all'energizzazione.

Segue (allegato 2) il piking effettuato sulla curva di dispersione per la modellazione delle V_s .

Infine viene mostrato il grafico delle V_s (allegato 3).

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione (Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 del 17/01/2018), con la seguente formula:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con:

h_i : spessore dell' i -esimo strato;

$V_{S,i}$: velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N : numero di strati;

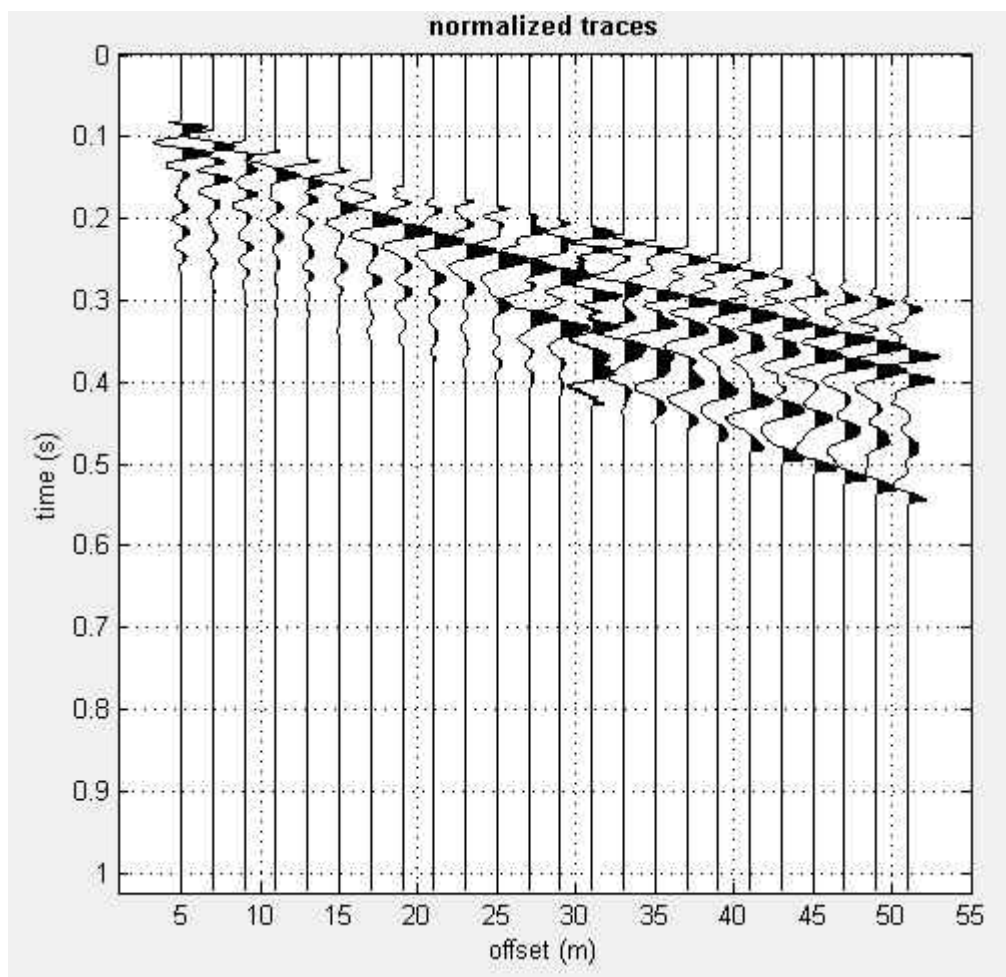
H : profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

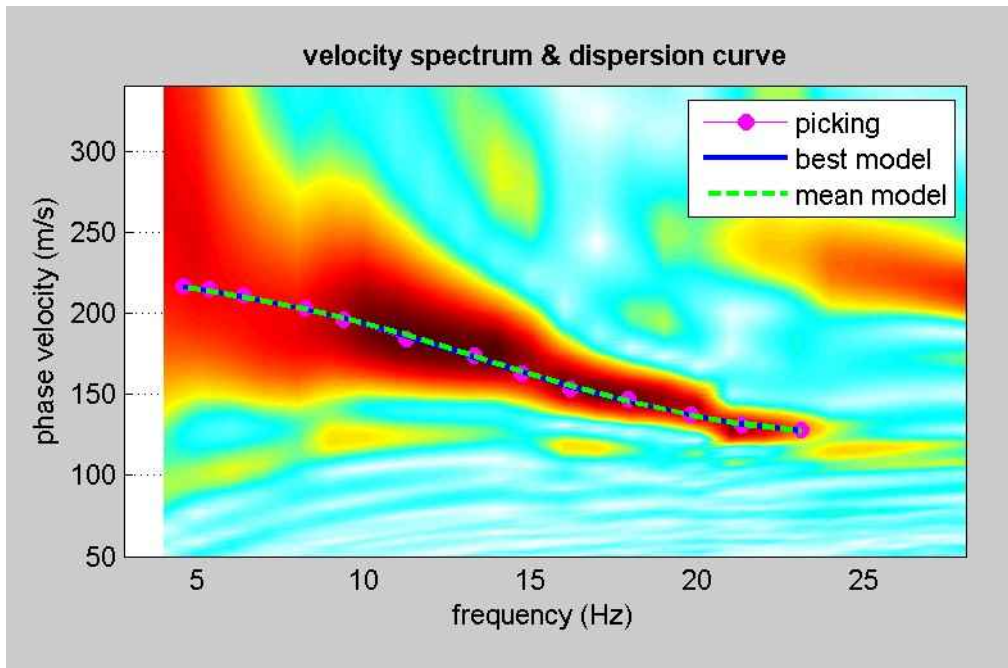
Con la determinazione delle onde di taglio Vs i terreni indagati vengono inseriti in una delle seguenti categorie di sottosuolo (N.T.C. 2018_Tabella 3.2.II):

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

ALLEGATO 1 - Acquisizione delle onde



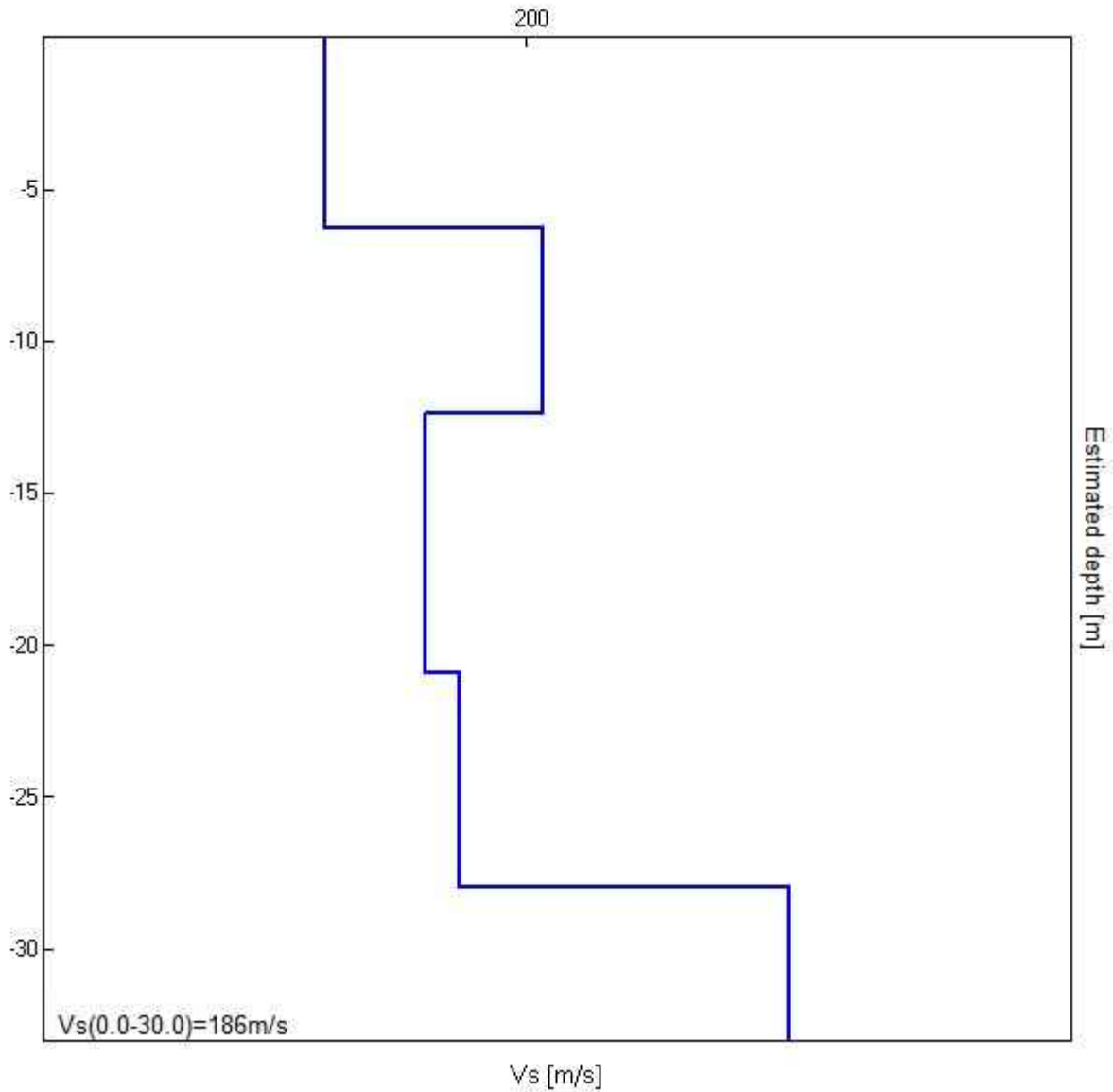
ALLEGATO 2 - Picking della curva di dispersione



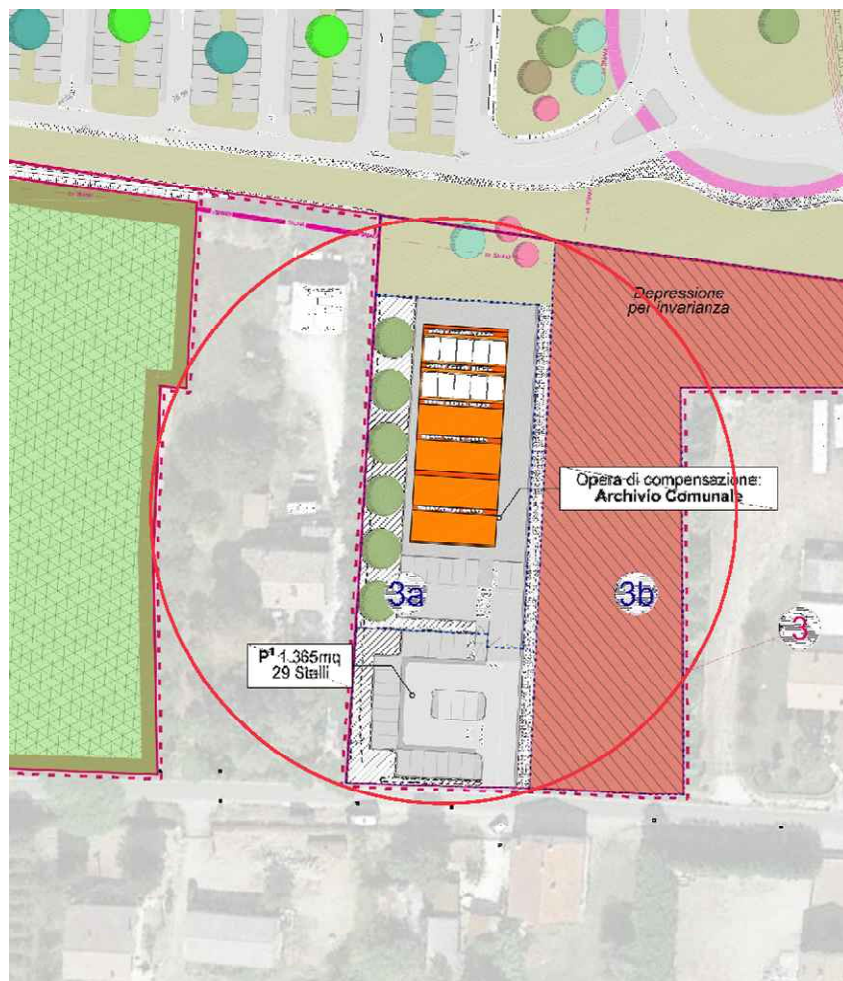
ALLEGATO 3 - CALCOLO VS

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
6.30	6.30	164
12.40	6.10	203
20.90	8.50	182
inf.	inf.	247

Vs(0.0-30.0)=186m/s



Profondità di calcolo	Vs30 m/sec.	Categoria di suolo
0,00-30,00mt.	186	C
1,00-31,00mt.	189	C
2,00-32,00mt.	191	C
3,00-33,00mt.	194	C
4,00-34,00mt.	196	C



COMMITENTE:

GESCO S.R.L.

LOCALITA':

Forlimpopoli, via Paganello

RELAZIONE GEOLOGICA Archivio Comunale

ALLEGATO A1: Elaborazioni CPTu1-2 - Software ProgramGeo
Profili stratigrafici, grafici, parametri geotecnici.

Geologo Paride Antolini

Iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Emilia-Romagna al n. 524

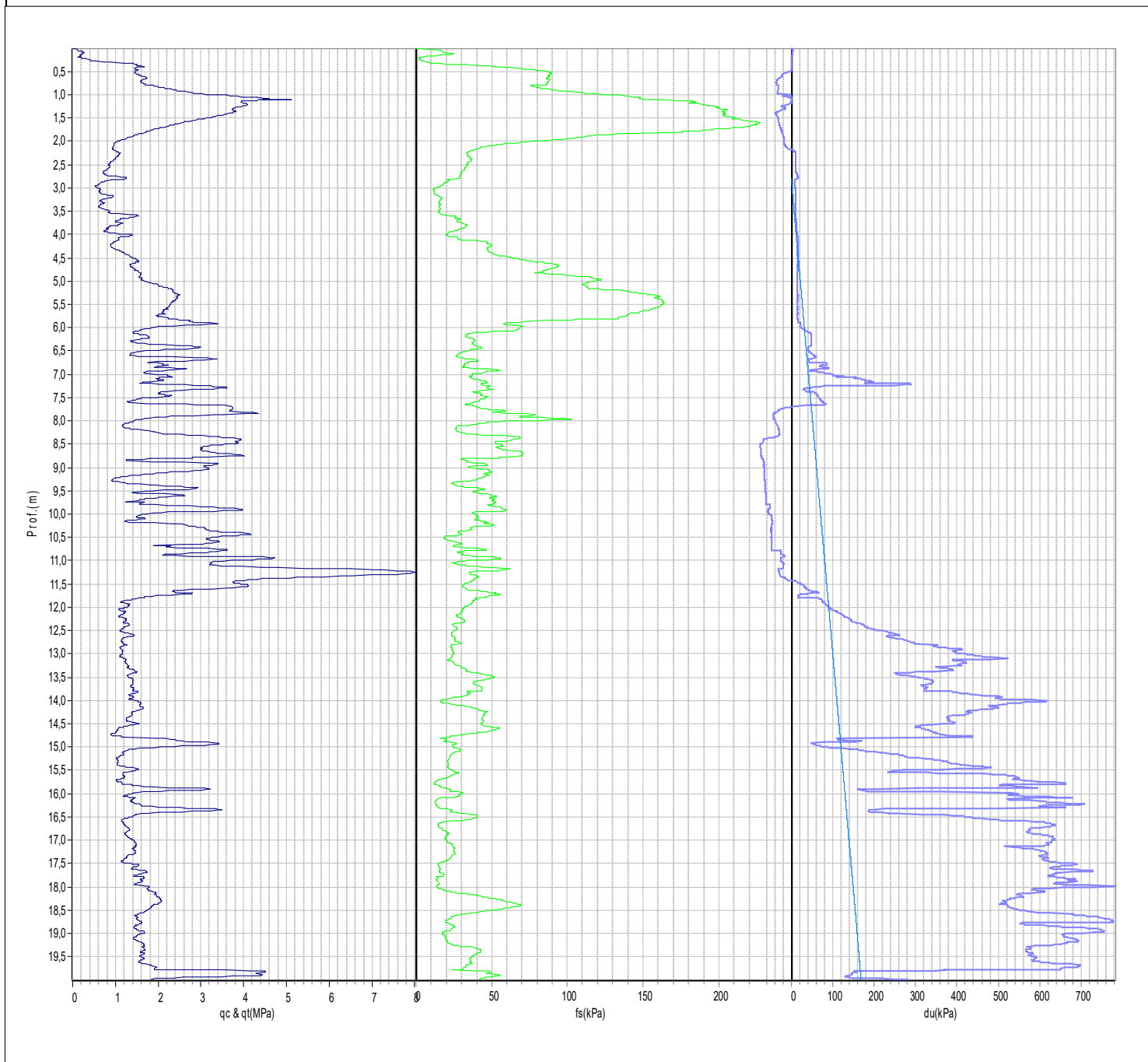
Via Albisola 41, 47522 - Cesena FO cell. 335 6780120

E-mail: geoparide@gmail.com PEC: paride.antolini@pec.epap.it

Cesena Novembre 2022

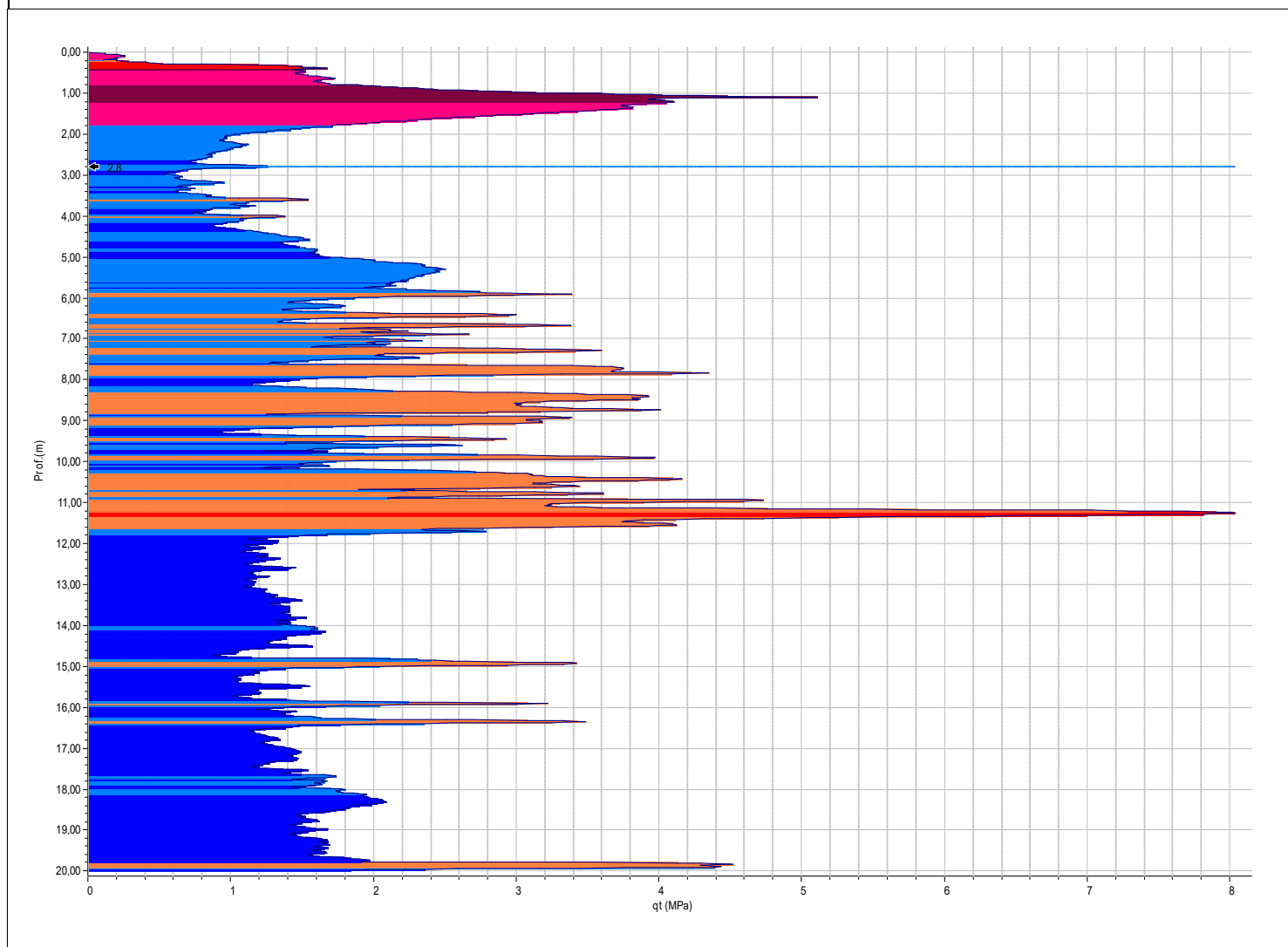
Committente:	GESCO S.R.L		
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli	Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022
		Sigla:	CPT1
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono		
Coordinate:			

GRAFICI PROVA



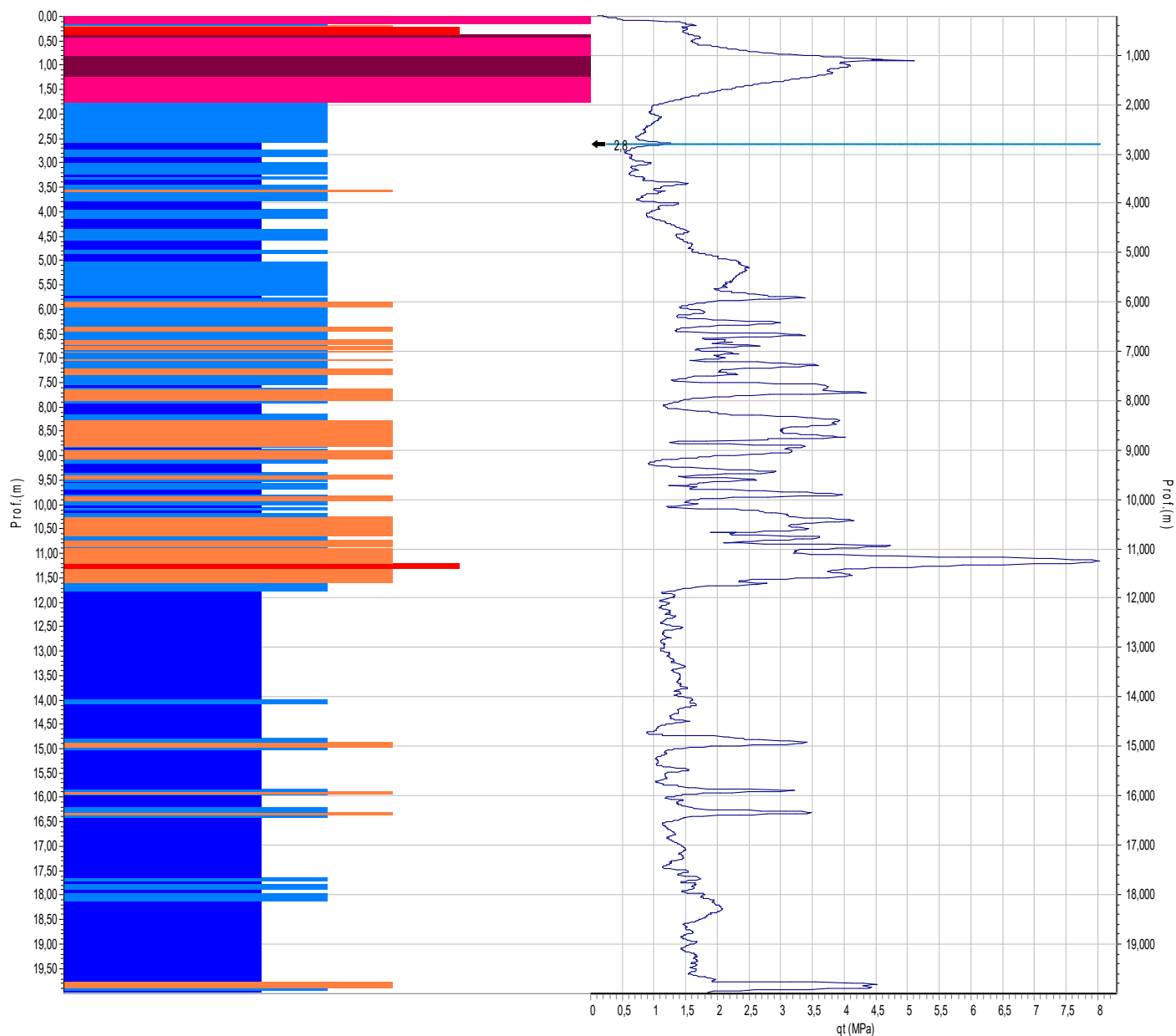
Committente:	GESCO S.R.L		
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli	Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data finale:	Ottobre 2022
		Sigla:	CPT1
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono		
Coordinate:			

GRAFICO DEL PROFILO STRATIGRAFICO



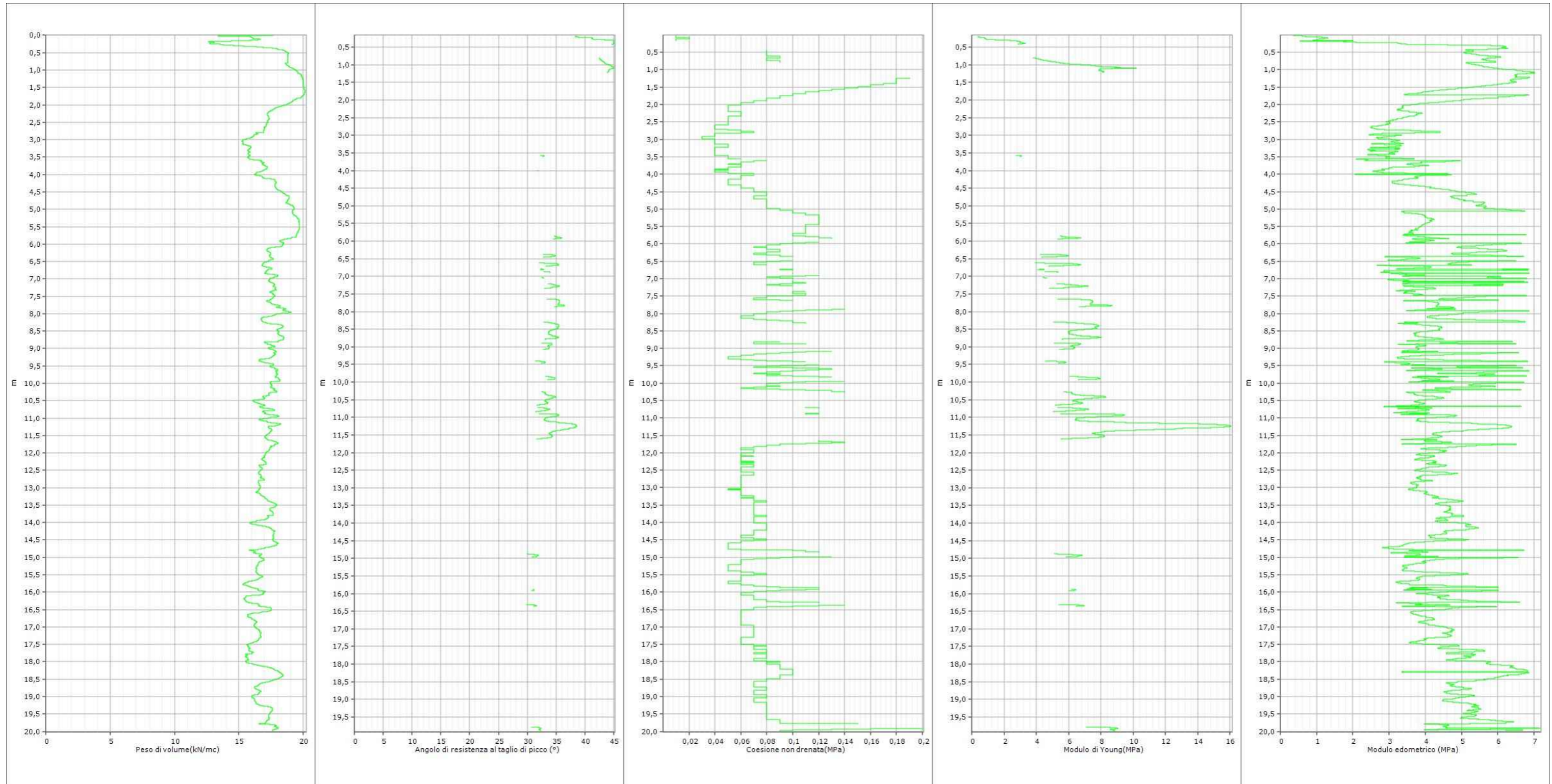
Committente:	GESCO S.R.L		
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli	Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022
		Sigla:	CPT1
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono		
Coordinate:			

COLONNA STRATIGRAFICA



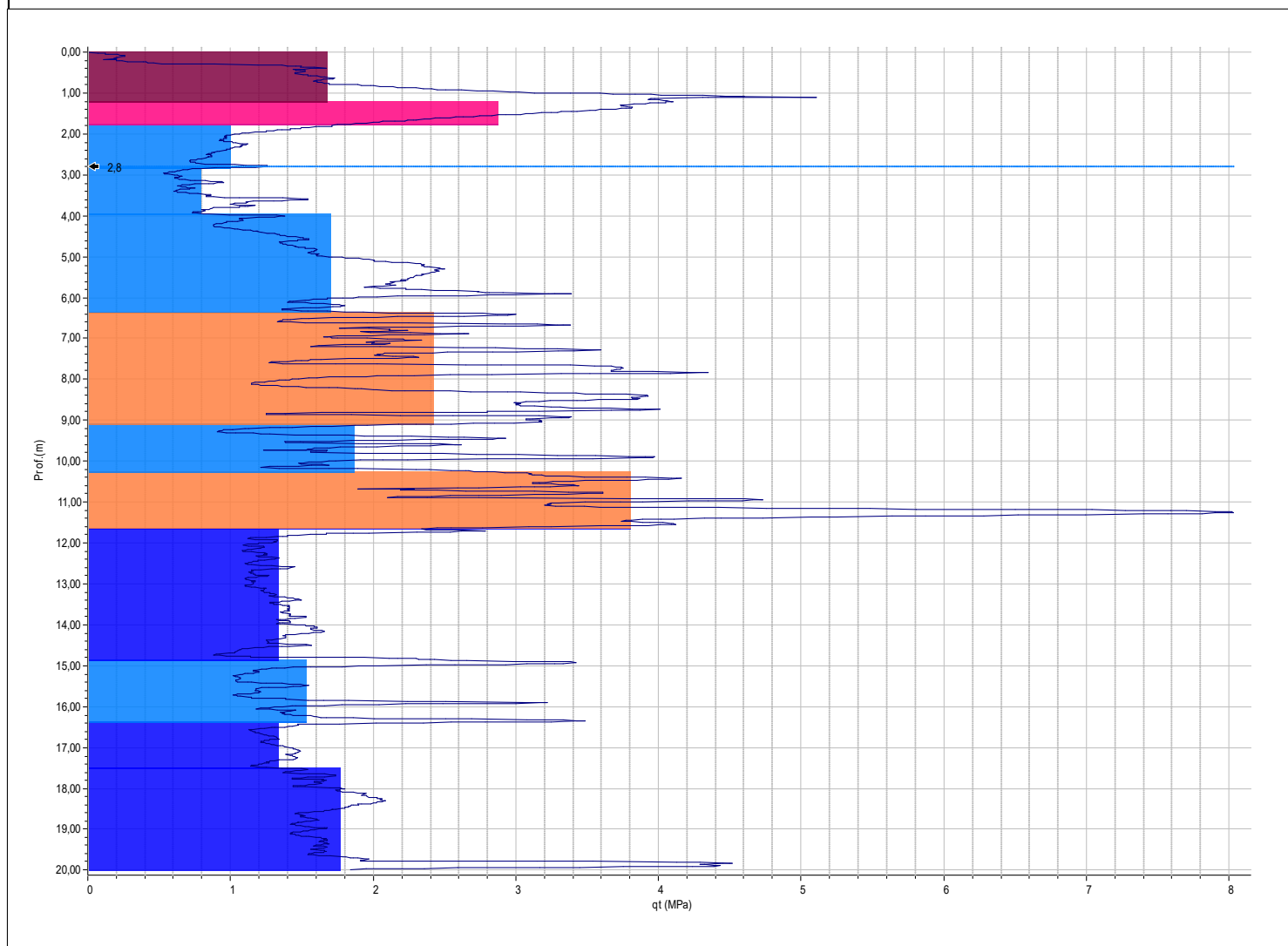
Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022	Sigla:	CPT1
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

GRAFICI DEI PRINCIPALI PARAMETRI GEOTECNICI



Committente:	GESCO S.R.L		
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli	Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data finale:	Ottobre 2022
		Sigla:	CPT1 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono		
Coordinate:			

GRAFICO DEL PROFILO STRATIGRAFICO



Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022	Sigla:	CPT1 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

PARAMETRI GEOTECNICI: PROFILO DEL TERRENO

N.	Prof.(m)	qc (MPa)	du (kPa)	qt (MPa)	fs (kPa)	Descrizione	qcn1 (MPa)	P.V.(kN/mc)	s.ef.(MPa)
1	1,22	1,67	-14,62	1,67	70,4	Da sabbia S.C. a sabbia argillosa	49,7	18,46	0,011
2	1,77	2,87	-29,96	2,87	206,16	Terreni a grana fine molto consistenti	54,2	20,01	0,028
3	2,83	1,0	-1,77	1,0	48,67	Da limo argilloso ad argilla limosa	15,2	17,85	0,043
4	3,96	0,79	10,39	0,79	18,71	Da limo argilloso ad argilla limosa	10,6	16,13	0,056
5	6,36	1,7	18,63	1,7	84,51	Da limo argilloso ad argilla limosa	20,3	18,75	0,07
6	9,08	2,42	4,4	2,42	44,49	Da sabbia limosa a limo sabbioso	25,3	17,7	0,091
7	10,26	1,86	-59,1	1,86	42,93	Da limo argilloso ad argilla limosa	18,0	17,64	0,107
8	11,62	3,8	-28,83	3,8	33,26	Da sabbia limosa a limo sabbioso	35,2	17,18	0,116
9	14,86	1,33	285,16	1,33	32,7	Da argilla limosa a argilla	11,5	17,15	0,133
10	16,37	1,53	367,56	1,53	20,44	Da limo argilloso ad argilla limosa	12,5	16,29	0,15
11	17,48	1,33	544,71	1,33	22,34	Da argilla limosa a argilla	10,5	16,46	0,159
12	19,99	1,76	579,85	1,76	29,35	Da argilla limosa a argilla	13,4	16,96	0,171

Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022	Sigla:	CPT1 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

PARAMETRI GEOTECNICI: DATI S.L.U.

N.	Prof.(m)	qt (MPa)	Phi picco(°)	Phi c.v.(°)	Dr %	O.C.R.	Cu(MPa)	Cusals(MPa)	C'(MPa)
1	1,22	1,67	42,8	36,3	63,2				
2	1,77	2,87				21,69	0,14	0,006	0,015
3	2,83	1,0				5,56	0,055	0,01	0,015
4	3,96	0,79				3,48	0,045	0,013	0,019
5	6,36	1,7				5,46	0,088	0,016	0,024
6	9,08	2,42	32,6	32,6	25,6				
7	10,26	1,86				3,88	0,095	0,025	0,026
8	11,62	3,8	34,0	33,4	35,3				
9	14,86	1,33				2,31	0,071	0,031	0,031
10	16,37	1,53				2,32	0,08	0,035	0,035
11	17,48	1,33				1,94	0,071	0,037	0,031
12	19,99	1,76				2,30	0,091	0,039	0,039

Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022	Sigla:	CPT1 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

PARAMETRI GEOTECNICI: DATI S.L.E

N.	Prof.(m)	qt (MPa)	Young(MPa)	Eedom.(MPa)	G0(MPa)	Vs(m/s)	K(m/s)	Cc(mq/s)
1	1,22	1,67	3,34	5,11	15,52	n.c.	1,0E-09	
2	1,77	2,87		4,88	21,61	n.c.		0,14
3	2,83	1,0		3,5	11,35	n.c.		0,15
4	3,96	0,79		2,77	9,82	n.c.		0,15
5	6,36	1,7		5,95	15,69	n.c.		0,15
6	9,08	2,42	4,84	3,15	19,47	n.c.	9,2E-06	
7	10,26	1,86		6,51	16,58	n.c.		0,16
8	11,62	3,8	7,6	4,24	25,65	n.c.	3,6E-04	
9	14,86	1,33		4,65	13,51	n.c.		0,16
10	16,37	1,53		5,36	14,71	n.c.		0,16
11	17,48	1,33		4,65	13,51	n.c.		0,17
12	19,99	1,76		6,16	16,03	n.c.		0,16

Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022	Sigla:	CPT1 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

PARAMETRI GEOTECNICI: TABELLA RIASSUNTIVA DEI DATI

N.	Prof.(m)	qt (MPa)	Phi picco(°)	Phi c.v.(°)	P.V.(kN/mc)	Dr %	Cu(MPa)	Young(MPa)	Eedom.(MPa)
1	1,22	1,67	42,8	36,3	18,46	63,2		3,34	5,11
2	1,77	2,87			20,01		0,14		4,88
3	2,83	1,0			17,85		0,055		3,5
4	3,96	0,79			16,13		0,045		2,77
5	6,36	1,7			18,75		0,088		5,95
6	9,08	2,42	32,6	32,6	17,7	25,6		4,84	3,15
7	10,26	1,86			17,64		0,095		6,51
8	11,62	3,8	34,0	33,4	17,18	35,3		7,6	4,24
9	14,86	1,33			17,15		0,071		4,65
10	16,37	1,53			16,29		0,08		5,36
11	17,48	1,33			16,46		0,071		4,65
12	19,99	1,76			16,96		0,091		6,16

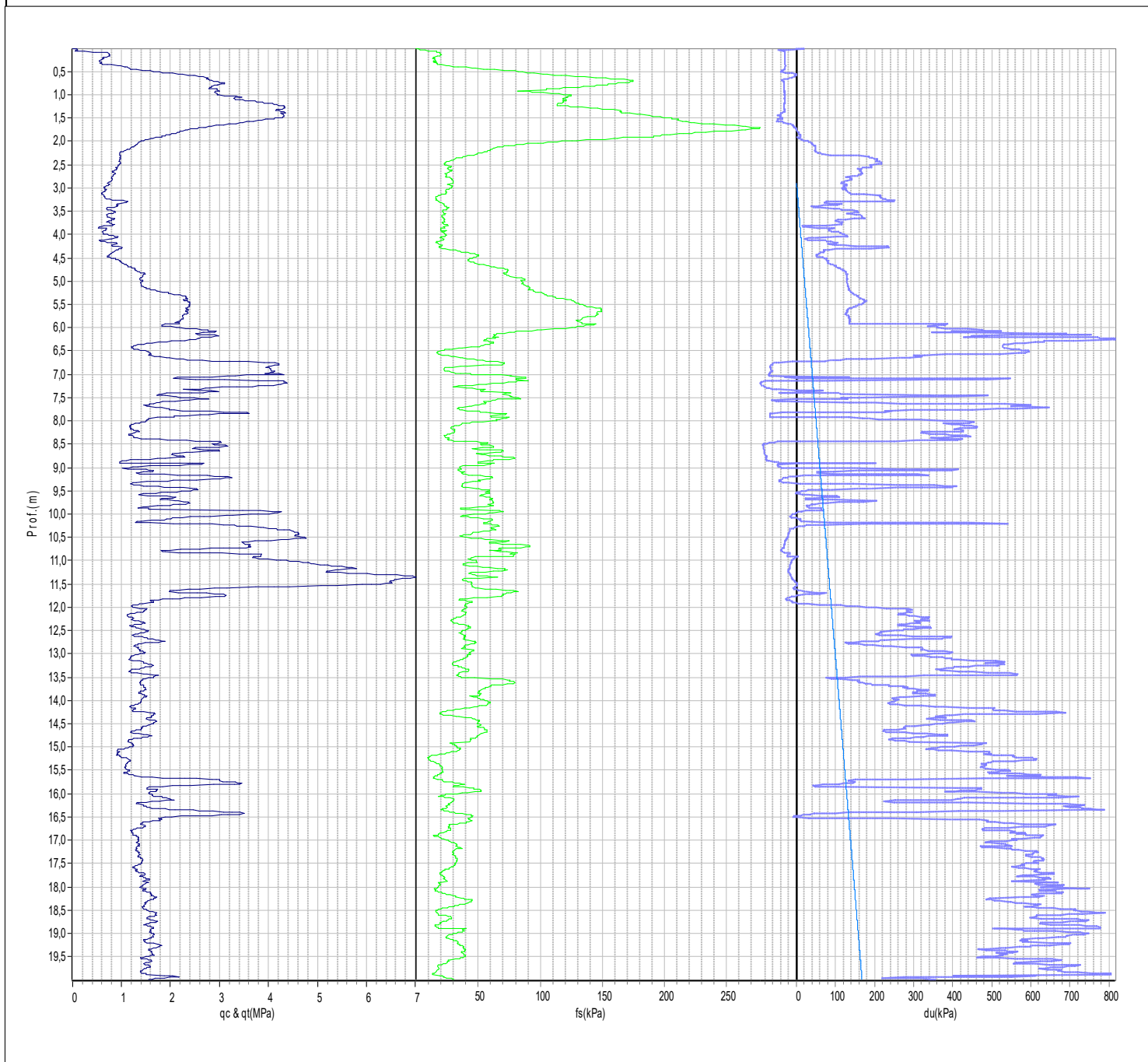
Committente:	GESCO S.R.L.													
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli											Quota(m):		
Data inizio:	Ottobre 2022				Data fine:	Ottobre 2022				Sigla:	CPT1 acc			
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono													
Coordinate:														

PARAMETRI GEOTECNICI: TABELLA RIASSUNTIVA DEI METODI DI CALCOLO

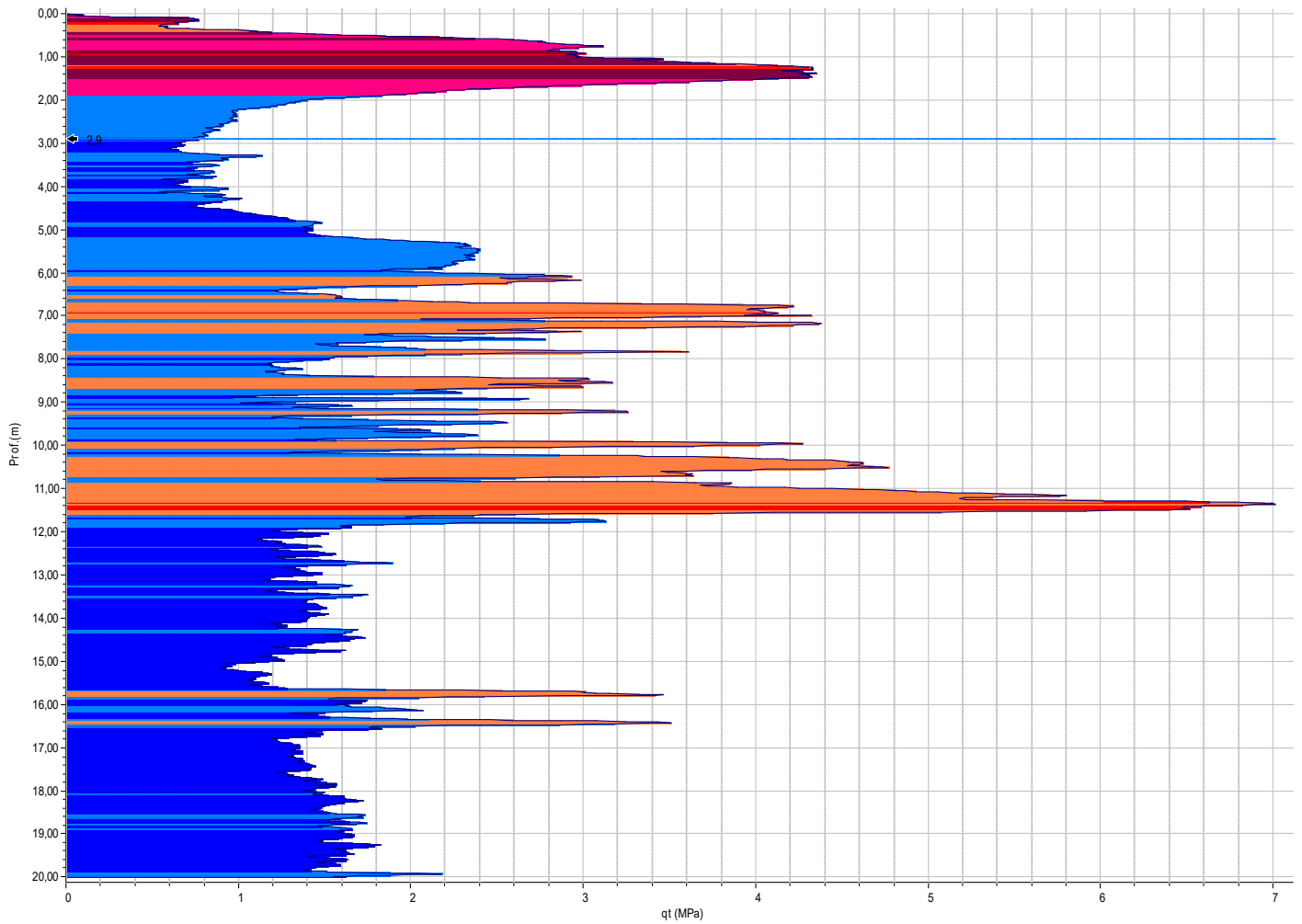
N.	Phi picco	Phi c.v.	Dr %	O.C.R.	Cu	Cusals	C'	Cc	Young	Eedom.	G0	Vs	Kh	P.V.
1	K&M	Bolton-	Harman	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Schm	R&C	I&T	n.c.	P&R	M&P
2	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
3	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
4	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
5	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
6	K&M	Bolton-	Harman	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Schm	R&C	I&T	n.c.	P&R	M&P
7	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
8	K&M	Bolton-	Harman	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Schm	R&C	I&T	n.c.	P&R	M&P
9	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
10	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
11	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
12	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P

Committente:	GESCO S.R.L.		
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli	Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022
		Sigla:	CPTu2
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono		
Coordinate:			

GRAFICI PROVA

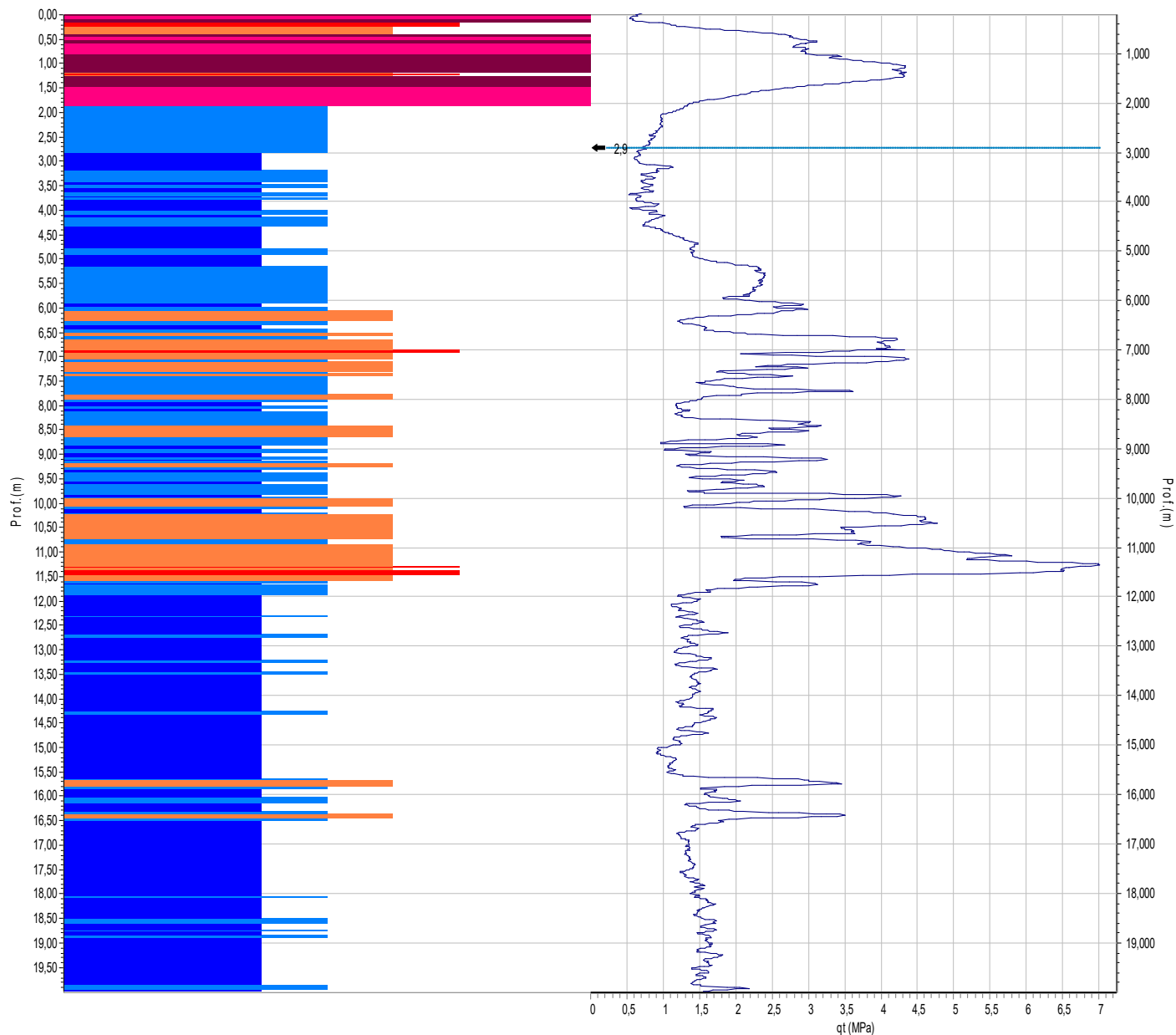


Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data finale:	Ottobre 2022	Sigla:	CPTu2
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

GRAFICO DEL PROFILO STRATIGRAFICO

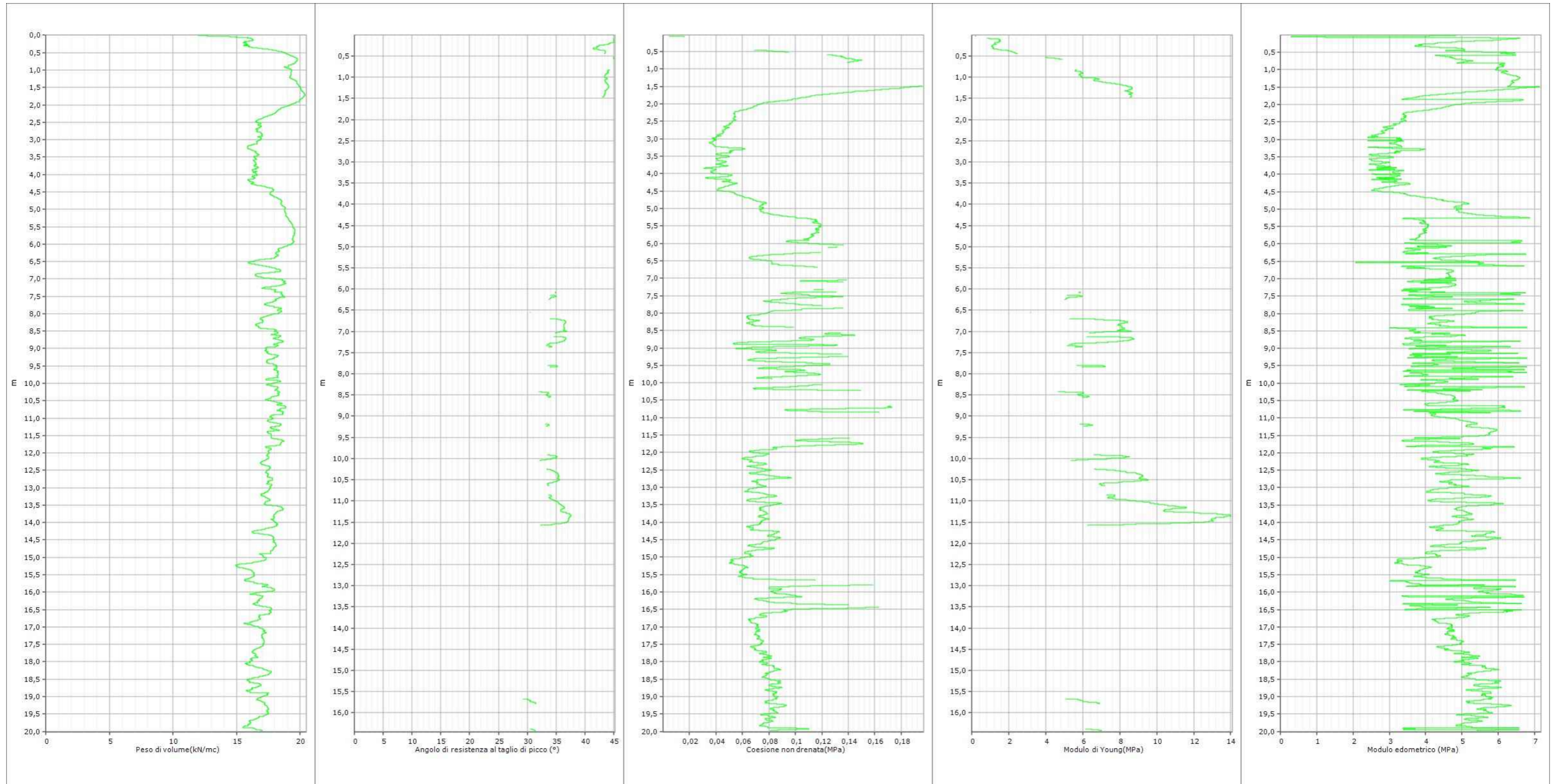
Committente:	GESCO S.R.L.		
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli	Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022
		Sigla:	CPTu2
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono		
Coordinate:			

COLONNA STRATIGRAFICA



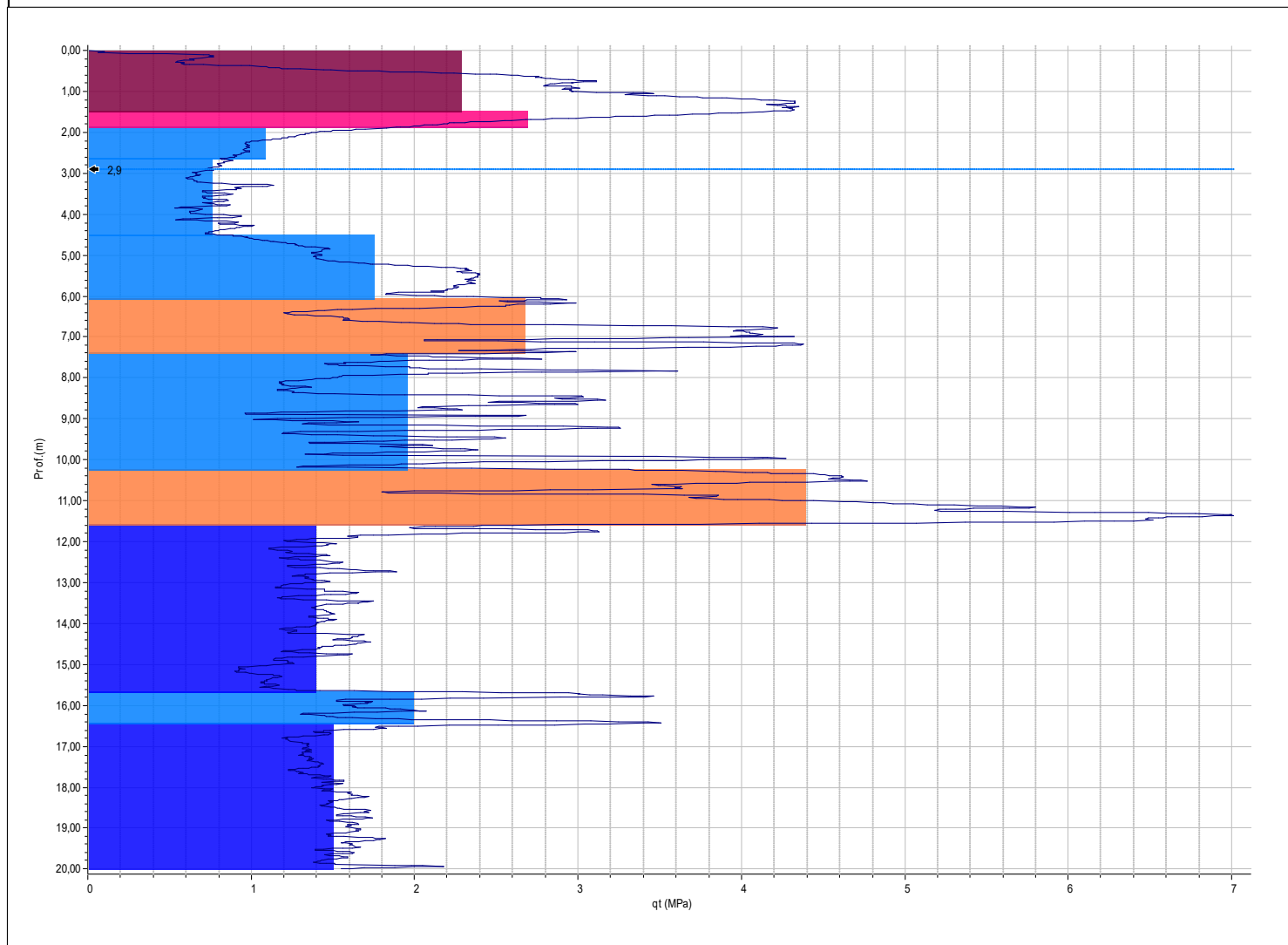
Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022	Sigla:	CPTu2
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

GRAFICI DEI PRINCIPALI PARAMETRI GEOTECNICI



Committente:	GESCO S.R.L.		
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli	Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data finale:	Ottobre 2022
		Sigla:	CPTu2 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono		
Coordinate:			

GRAFICO DEL PROFILO STRATIGRAFICO



Committente:	GESCO S.R.L.		
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli	Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022
		Sigla:	CPTu2 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono		
Coordinate:			

PARAMETRI GEOTECNICI: PROFILO DEL TERRENO

N.	Prof.(m)	qc (MPa)	du (kPa)	qt (MPa)	fs (kPa)	Descrizione	qcn1 (MPa)	P.V.(kN/mc)	s.ef.(MPa)
1	1,48	2,28	-30,66	2,28	90,55	Da sabbia S.C. a sabbia argillosa	76,4	12,0	0,009
2	1,88	2,69	-19,14	2,69	227,4	Terreni a grana fine molto consistenti	57,6	20,01	0,022
3	2,65	1,08	93,81	1,08	55,04	Da limo argilloso ad argilla limosa	18,7	19,92	0,033
4	4,5	0,76	113,0	0,76	23,91	Da limo argilloso ad argilla limosa	10,7	16,78	0,05
5	6,06	1,75	145,22	1,75	98,88	Da limo argilloso ad argilla limosa	22,1	17,68	0,063
6	7,38	2,67	194,0	2,67	47,95	Da sabbia limosa a limo sabbioso	30,9	18,76	0,075
7	10,22	1,95	113,93	1,95	49,97	Da limo argilloso ad argilla limosa	20,2	18,59	0,093
8	11,59	4,39	-18,03	4,39	54,34	Da sabbia limosa a limo sabbioso	41,6	18,23	0,111
9	15,66	1,39	312,79	1,39	39,62	Da argilla limosa a argilla	12,0	18,08	0,134
10	16,44	1,99	374,96	1,99	28,44	Da limo argilloso ad argilla limosa	16,1	15,63	0,153
11	19,99	1,5	578,33	1,5	27,05	Da argilla limosa a argilla	11,5	17,69	0,169

Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022	Sigla:	CPTu2 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

PARAMETRI GEOTECNICI: DATI S.L.U.

N.	Prof.(m)	qt (MPa)	Phi picco(°)	Phi c.v.(°)	Dr %	O.C.R.	Cu(MPa)	Cusals(MPa)	C'(MPa)
1	1,48	2,28	45	36,1	79,6				
2	1,88	2,69				26,38	0,132	0,005	0,014
3	2,65	1,08				7,66	0,059	0,008	0,016
4	4,5	0,76				3,75	0,043	0,012	0,019
5	6,06	1,75				6,27	0,09	0,014	0,024
6	7,38	2,67	34,6	33,7	33,9				
7	10,22	1,95				4,64	0,099	0,021	0,027
8	11,59	4,39	35,2	33,9	41,3				
9	15,66	1,39				2,39	0,074	0,031	0,032
10	16,44	1,99				2,87	0,101	0,035	0,044
11	19,99	1,5				2,02	0,079	0,039	0,034

Committente:	GESCO S.R.L.						
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli					Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022		Data fine:	Ottobre 2022		Sigla:	CPTu2 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono						
Coordinate:							

PARAMETRI GEOTECNICI: DATI S.L.E

N.	Prof.(m)	qt (MPa)	Young(MPa)	Eedom.(MPa)	G0(MPa)	Vs(m/s)	K(m/s)	Cc(mq/s)
1	1,48	2,28	4,56	6,38	18,77	n.c.	2,5E-09	
2	1,88	2,69		4,57	20,77	n.c.		0,14
3	2,65	1,08		3,78	11,89	n.c.		0,14
4	4,5	0,76		2,66	9,59	n.c.		0,15
5	6,06	1,75		6,13	15,97	n.c.		0,15
6	7,38	2,67	5,34	3,6	20,68	n.c.	1,1E-05	
7	10,22	1,95		6,83	17,06	n.c.		0,16
8	11,59	4,39	8,78	4,67	28,02	n.c.	9,0E-05	
9	15,66	1,39		4,86	13,88	n.c.		0,16
10	16,44	1,99		3,38	17,28	n.c.		0,16
11	19,99	1,5		5,25	14,54	n.c.		0,16

Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022	Sigla:	CPTu2 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

PARAMETRI GEOTECNICI: TABELLA RIASSUNTIVA DEI DATI

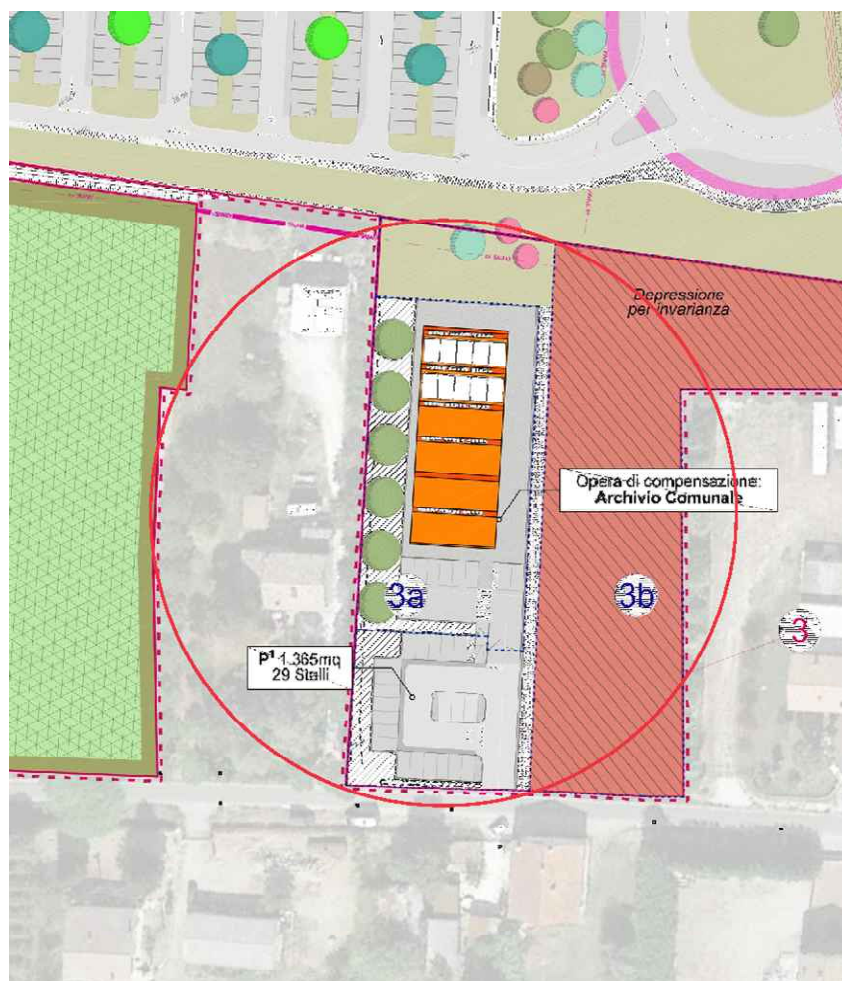
N.	Prof.(m)	qt (MPa)	Phi picco(°)	Phi c.v.(°)	P.V.(kN/mc)	Dr %	Cu(MPa)	Young(MPa)	Eedom.(MPa)
1	1,48	2,28	45	36,1	12,0	79,6		4,56	6,38
2	1,88	2,69			20,01		0,132		4,57
3	2,65	1,08			19,92		0,059		3,78
4	4,5	0,76			16,78		0,043		2,66
5	6,06	1,75			17,68		0,09		6,13
6	7,38	2,67	34,6	33,7	18,76	33,9		5,34	3,6
7	10,22	1,95			18,59		0,099		6,83
8	11,59	4,39	35,2	33,9	18,23	41,3		8,78	4,67
9	15,66	1,39			18,08		0,074		4,86
10	16,44	1,99			15,63		0,101		3,38
11	19,99	1,5			17,69		0,079		5,25

Committente:	GESCO S.R.L.				
Località:	Via Paganello, Forlimpopoli			Quota(m):	
Data inizio:	Ottobre 2022	Data fine:	Ottobre 2022	Sigla:	CPTu2 acc
Penetrometro:	Pagani semovente con punta elettrica e piezocono				
Coordinate:					

PARAMETRI GEOTECNICI: TABELLA RIASSUNTIVA DEI METODI DI CALCOLO

N.	Phi picco	Phi c.v.	Dr %	O.C.R.	Cu	Cusals	C'	Cc	Young	Eedom.	G0	Vs	Kh	P.V.
1	K&M	Bolton-	Harman	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Schm	R&C	I&T	n.c.	P&R	M&P
2	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
3	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
4	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
5	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
6	K&M	Bolton-	Harman	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Schm	R&C	I&T	n.c.	P&R	M&P
7	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
8	K&M	Bolton-	Harman	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	Schm	R&C	I&T	n.c.	P&R	M&P
9	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
10	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P
11	n.c.	n.c.	n.c.	Mayne	Mesre	Mesre	Mesre	Schm	n.c.	M&GCL	I&T	n.c.	n.c.	M&P

PROVINCIA DI FORLI'-CESENA – COMUNE DI FORLIMPOPOLI



COMMITENTE:

GESCO S.R.L.

LOCALITA':

Forlimpopoli, via Paganello

RELAZIONE GEOLOGICA

 Archivio Comunale

ALLEGATO A2:

 Risposta Sismica Locale Software GeoStru

Geologo Paride Antolini

Iscritto all'Ordine dei Geologi della Regione Emilia-Romagna al n. 524

Via Albisola 41, 47522 - Cesena FO cell. 335 6780120

E-mail: geoparide@libero.it

PEC: paride.antolini@epap.sicurezzapostale.it

Cesena, Novembre 2022

INTRODUZIONE

PROCEDURA DI CALCOLO

La procedura di calcolo adoperata da RSL per la valutazione della funzione di trasferimento presuppone come base di partenza uno o più accelerogrammi, od uno spettro di risposta in accelerazione, e la conoscenza della stratigrafia del sito attraverso i seguenti parametri geotecnici per ogni strato:

- peso per unità di volume;
- velocità di propagazione delle onde di taglio;
- coefficiente di spinta laterale;
- modulo di taglio iniziale (opzionale);
- spessore;
- indice di plasticità.

La non linearità del calcolo è introdotta dalla dipendenza del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso dalla deformazione.

Schematicamente la procedura è riassumibile nel seguente modo:

1. Valutazione dello spettro di Fourier dell'accelerogramma (omessa nel caso si debba analizzare uno spettro);
2. Ricerca di un errore relativo piccolo seguendo la procedura di:
 - 2.1. Stima della funzione di trasferimento;
 - 2.2. Valutazione della deformazione indotta in ciascuno strato;
 - 2.3. Correzione del modulo di deformazione al taglio e del coefficiente di smorzamento viscoso per ogni strato;

Le operazioni 2.1, 2.2 e 2.3 sono ripetute fino a quando la differenza di deformazione tra un'iterazione e la precedente non rimane al di sotto di una soglia ritenuta accettabile;

3. Trasformazione inversa di Fourier dello spettro precedentemente calcolato ed opportunamente pesato per mezzo della funzione di trasferimento calcolata.

Attraverso questa procedura è possibile "trasferire" l'accelerogramma dal bedrock in superficie. La deformazione per ciascuno strato viene corretta sulla base del rapporto fra deformazione effettiva e massima come suggerito dalla letteratura scientifica, ovvero

$$\frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{max}} = \frac{M - 1}{10}$$

dove M rappresenta la magnitudo del sisma.

Per la valutazione della funzione di trasferimento, RSL considera un suolo variamente stratificato composto da N strati orizzontali di cui l' N -esimo è il letto di roccia (bedrock). Ponendo come ipotesi che ciascuno

strato si comporti come un solido di Kelvin-Voigt $\left[\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma(z, t)}{\partial z \partial t} \right]$, la propagazione delle onde di taglio che attraversano gli strati verticalmente può essere definita dall'equazione dell'onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1)$$

dove: u rappresenta lo spostamento; t il tempo; ρ la densità; G il modulo di deformazione al taglio; η la viscosità. Per onde armoniche lo spostamento può essere scritto come:

$$u(z, t) = U(z)^{i\omega t} \quad (2)$$

che sostituita nella (1) pone

$$(G + i\omega\eta) \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho\omega^2 U \quad (3)$$

dove ω rappresenta la frequenza angolare. La (3) può essere riscritta come

$$G^* \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho\omega^2 U \quad (4)$$

avendo posto $G^* = G + i\omega\eta$, ovvero il modulo di deformazione al taglio *complesso*. Questo può essere ulteriormente riscritto come

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad (5)$$

avendo posto

$$\eta = \frac{2G}{\omega} \xi \quad (6)$$

dove ξ rappresenta il coefficiente di smorzamento viscoso. Ciò posto, e fatta convenzione che l'apice * indica la natura complessa della variabili in gioco, la soluzione dell'equazione generica dell'onda è la seguente:

$$u(z, t) = Ee^{i(\omega t + k^* z)} + Fe^{i(\omega t - k^* z)} \quad (7)$$

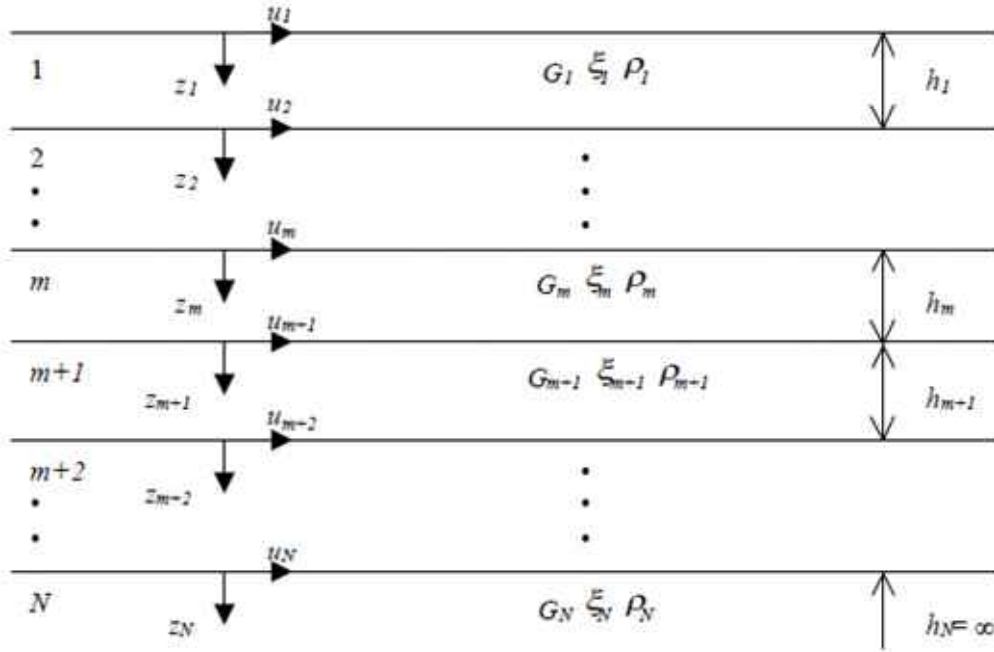


Figura 1: Esempio di stratigrafia per riferimento.

dove E e F dipendono dalle condizioni al contorno e rappresentano l'ampiezza d'onda che viaggia rispettivamente verso l'alto (-z) e verso il basso (+z), mentre k^* rappresenta il numero d'onda complesso dato dalla seguente espressione:

$$k^* = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \quad (8)$$

Il taglio invece è dato da:

$$\tau(z, t) = G^* \frac{dU}{dz} e^{i\omega t} = ik^* G^* \left[Ee^{i(\omega t + k^* z)} + Fe^{i(\omega t - k^* z)} \right] e^{i\omega t} \quad (9)$$

Per il generico strato m di spessore h_m gli spostamenti, rispettivamente in sommità ($z = 0$) ed al fondo ($z = h_m$), sono:

$$u_m(0, t) = (E_m + F_m) e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$u_m(h_m, t) = \left(E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \right) e^{i\omega t} \quad (11)$$

Poiché deve essere rispettata la congruenza sullo spostamento all'interfaccia tra gli strati, ovvero lo spostamento in sommità ad uno strato deve essere uguale allo spostamento sul fondo di quello immediatamente sopra, se ne deduce che:

$$u_m(z = h_m, t) = u_{m+1}(z = 0, t) \quad (12)$$

Usando la (10), (11) e la (12), ne consegue che

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m^* h_m} + F_m e^{-ik_m^* h_m} \quad (13)$$

Il taglio in sommità ed al fondo dell' m -esimo strato è dato da:

$$\tau_m(0, t) = ik_m^* G_m^* [E_m - F_m] e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$\tau_m(h_m, t) = ik_m^* G_m^* [E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}] e^{i\omega t} \quad (15)$$

Poiché fra uno strato e l'altro il taglio deve essere continuo si ha

$$\tau_m(z = h_m, t) = \tau_{m+1}(z = 0, t) \quad (16)$$

ovvero

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m^* h_m} - F_m e^{-ik_m^* h_m}) \quad (17)$$

Sommando la (13) alla (17) e sottraendo la (17) alla (13) si ottiene

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (18)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (19)$$

dove α_m^* rappresenta il coefficiente di impedenza complesso al contorno tra gli strati m ed $m+1$, ed è dato dalla seguente espressione:

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} \quad (20)$$

Poiché in superficie il taglio è nullo,

$$\tau_1(0, t) = ik_1^* G_1^* [E_1 - F_1] e^{i\omega t} = 0$$

si deduce che $E_1 = F_1$.

Le equazioni (18) e (19) possono essere successivamente applicate agli strati successivi da 2 ad m . La funzione di trasferimento A_{mn} che lega gli spostamenti in sommità degli strati m ed n è definita dalla seguente espressione:

$$A_{mn} = \frac{u_m}{u_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (21)$$

A_{mn} rappresenta la funzione di trasferimento, ovvero la funzione che mette in relazione il modulo della deformazione tra i punti m e n .

In pratica lo stato deformativo di una stratigrafia rimane definito una volta nota la deformazione di un suo qualsiasi punto. Inoltre, poiché la velocità e l'accelerazione sono legati allo spostamento,

$$\dot{u}(z, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = i\omega u(z, t) \quad \ddot{u}(z, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 u(z, t)$$

(22)

La funzione di trasferimento A_{mn} può essere espressa anche in funzione delle velocità e dell'accelerazione al tetto degli strati n ed m :

$$A_{mn}(\omega) = \frac{u_m}{u_n} = \frac{\dot{u}_m}{\dot{u}_n} = \frac{\ddot{u}_m}{\ddot{u}_n} = \frac{E_m + F_m}{E_n + F_n} \quad (23)$$

La deformazione tangenziale rimane definita alla profondità z e al tempo t dalla relazione:

$$\gamma(z, t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik^* (E e^{ik^* z} - F e^{-ik^* z}) e^{i\omega t} \quad (24)$$

E la corrispondente tensione tangenziale, dalla seguente espressione:

$$\tau(z, t) = G^* \gamma(z, t) \quad (25)$$

Ai fini di una corretta interpretazione del problema della risposta sismica locale, risulta utile riprodurre la rappresentazione schematica di Figura 2 in cui è riportata la terminologia utilizzata per lo studio del moto sismico di un deposito che poggia su un basamento roccioso.

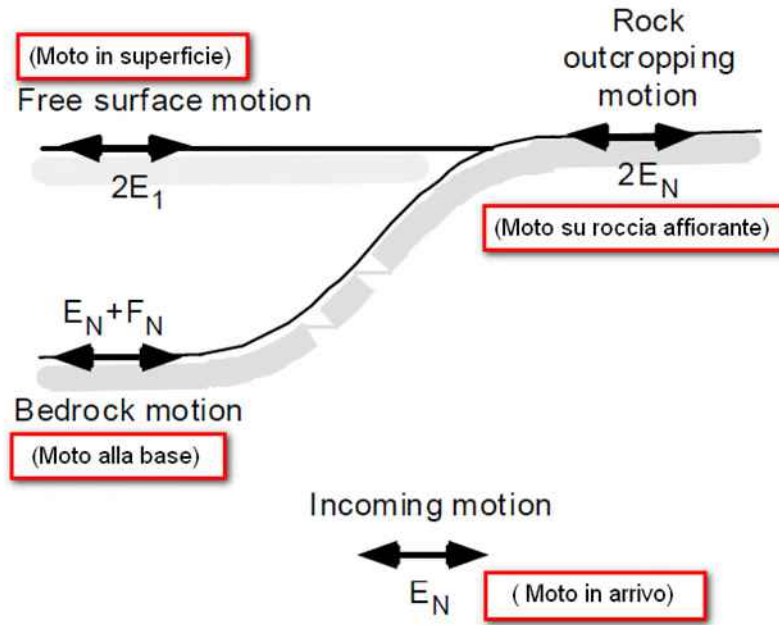


Figura 2: Schema di riferimento e terminologia utilizzata.

Le onde di taglio si propagano verticalmente attraverso il bedrock con ampiezza pari ad E_N ; al tetto del bedrock, sotto il deposito degli strati di terreno, il moto ha un'ampiezza pari a $E_N + F_N$. Sulla roccia affiorante, poiché le tensioni tangenziali sono nulle ($E_N = F_N$), il moto avrà ampiezza pari a $2E_N$. La funzione di trasferimento dal bedrock al bedrock-affiorante è la seguente:

$$A_{NN}(\omega) = \frac{2E_N}{E_N + F_N} \quad (26)$$

A è non lineare poiché G è funzione di γ . Nella procedura di calcolo infatti, da una stima iniziale del modulo di deformazione al taglio, si ottiene la tensione ipotizzando un legame lineare, per poi ottenere un nuovo valore di γ . Grazie a questo valore aggiornato si valuta un nuovo modulo G così da ripetere la procedura fino a quando la differenza tra la deformazione aggiornata e quella ottenuta dalla precedente iterazione viene ritenuta accettabile. Il modello per $G(\gamma)$ adoperato è quello suggerito da Ishibashi e Zhang (1993) che tiene conto degli effetti della pressione di confinamento e dell'indice di plasticità:

$$G = G_{max} \cdot K(\gamma, PI) (\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_0} \quad (24)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad (25)$$

$$m(\gamma, PI) - m_0 = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3}) \quad (26)$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{per } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{per } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{per } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{per } PI > 70 \end{cases} \quad (27)$$

dove G_{max} è dato dalla relazione

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (28)$$

dove ρ è la densità del terreno e V_s la velocità di propagazione delle onde di taglio nello stesso. La (28) fornisce il valore iniziale di G per la prima iterazione.

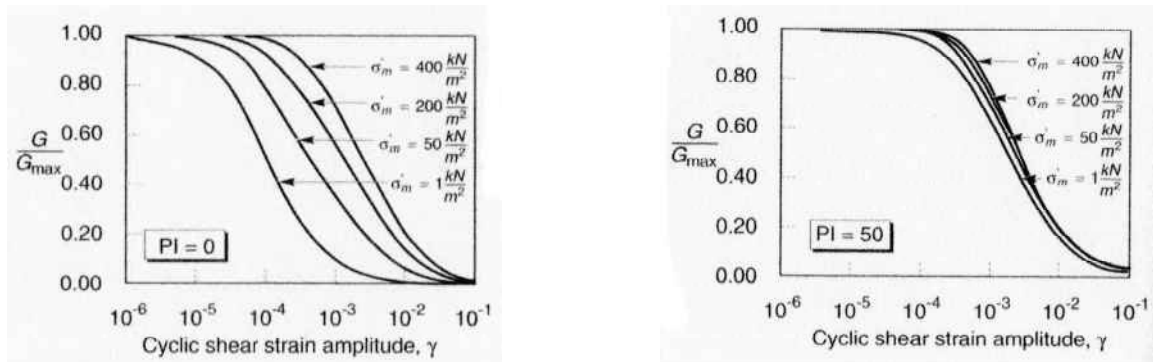


Figura 2: Influenza della pressione di confinamento e della plasticità sul modulo di deformazione al taglio.

Per quanto riguarda invece il coefficiente di smorzamento viscoso ξ , in conseguenza del modello introdotto dalla (24) si ha:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{2.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \quad (29)$$

da cui si deduce che anche ξ deve essere ricalcolato ad ogni iterazione.

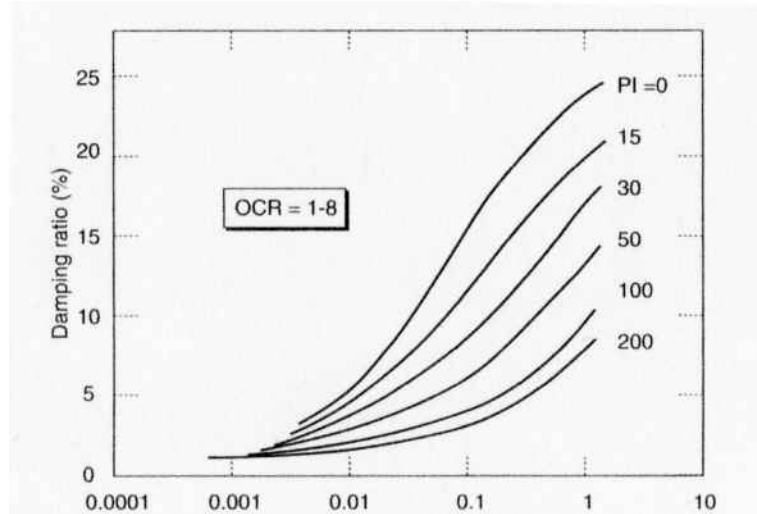


Figura 3: Influenza della plasticità sul coefficiente di smorzamento viscoso.

Dati generali

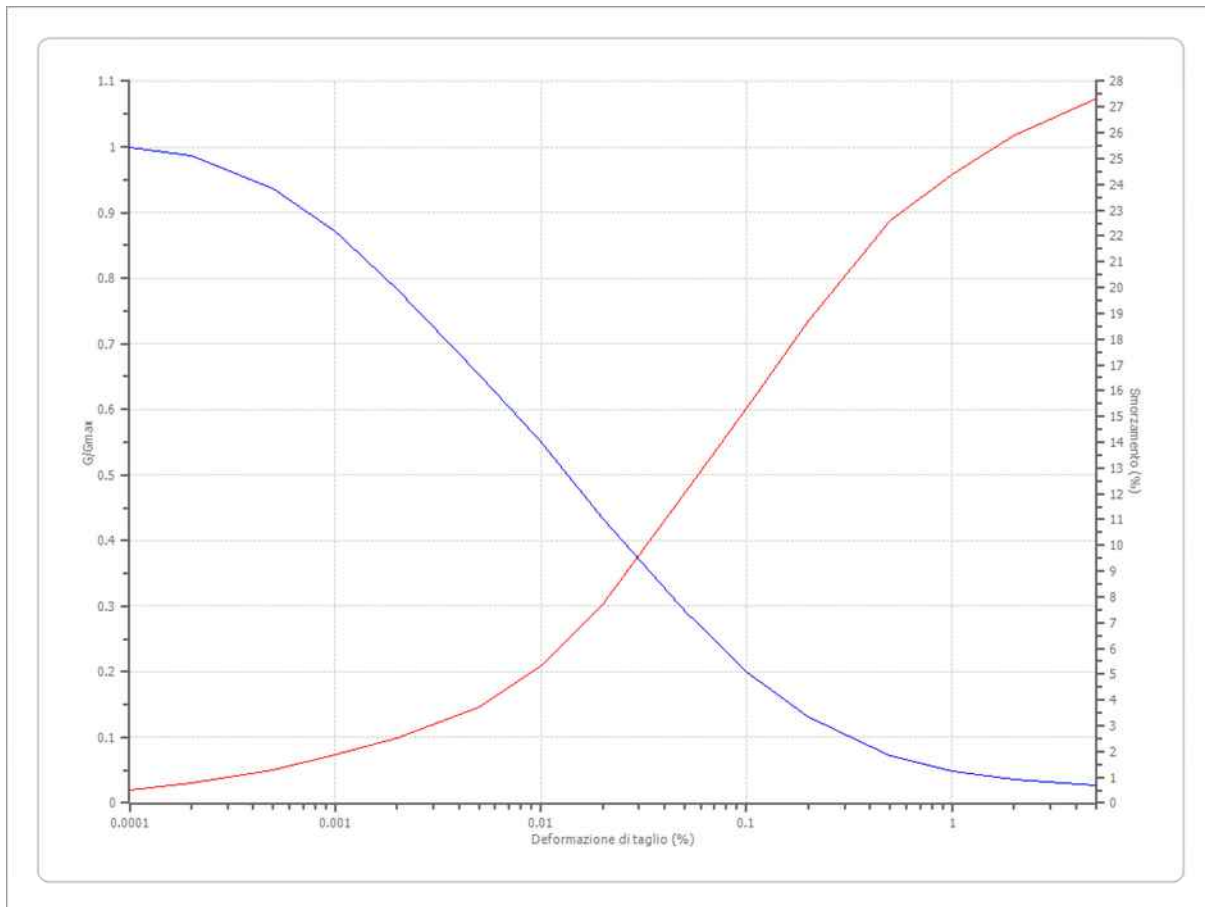
Descrizione	RSL per la costruzione dell'Archivio Comunale
Committente	GESCO S.r.l.
Cantiere	Via Paganello, Forlimpopoli
Data della prova	d.C./10/2022
Via	Paganello, Forlimpopoli FC
Latitudine	44,20097[°]
Longitudine	12,1182184[°]



Terreni

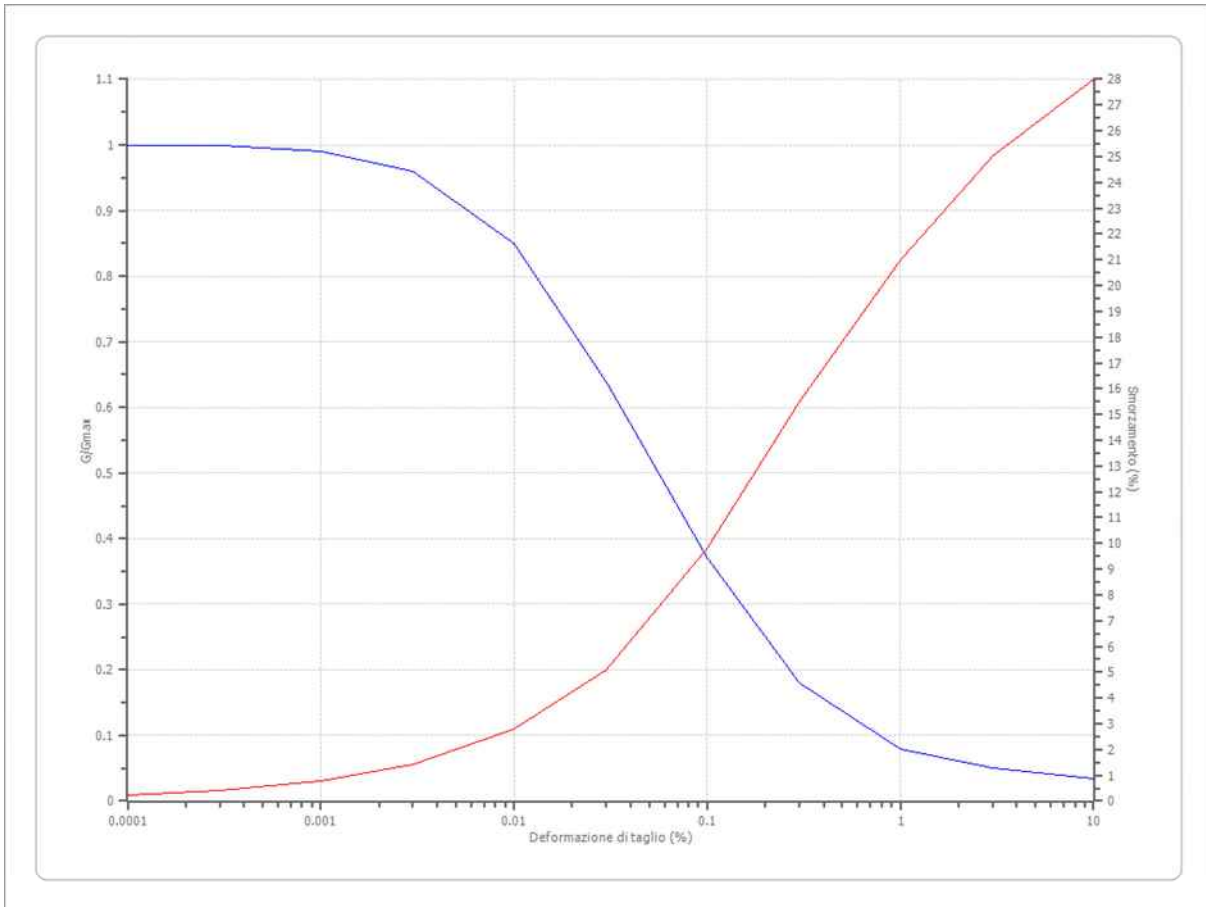
Seed et al. (1986) Gravel

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.500
0.0002	0.987	0.0002	0.800
0.0005	0.937	0.0005	1.300
0.001	0.872	0.001	1.900
0.002	0.783	0.002	2.500
0.005	0.653	0.005	3.700
0.010	0.550	0.010	5.300
0.020	0.434	0.020	7.700
0.050	0.293	0.050	12.000
0.100	0.200	0.100	15.300
0.200	0.132	0.200	18.700
0.500	0.072	0.500	22.600
1.000	0.049	1.000	24.400
2.000	0.036	2.000	25.900
5.000	0.027	5.000	27.300



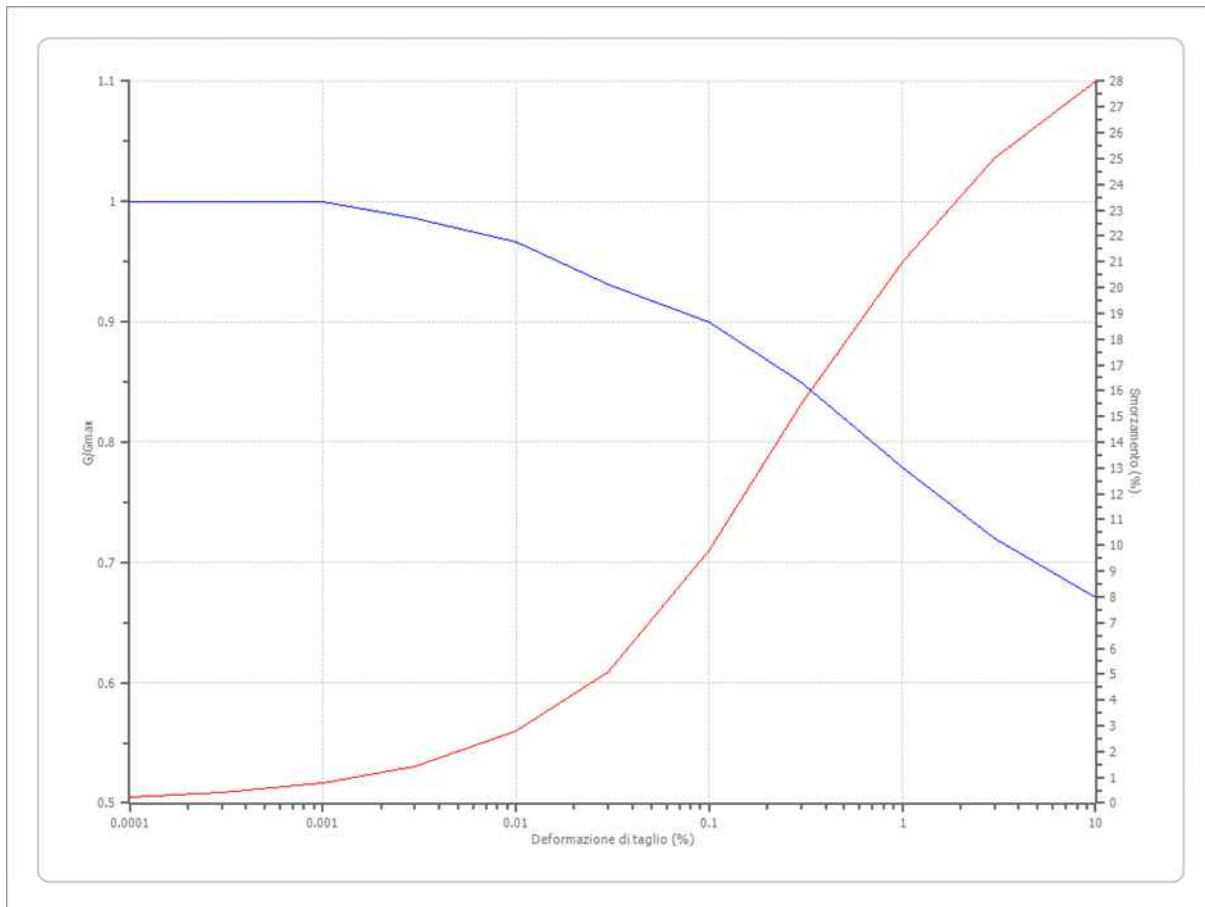
Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.240
0.0003	1.000	0.0003	0.420
0.001	0.990	0.001	0.800
0.003	0.960	0.003	1.400
0.010	0.850	0.010	2.800
0.030	0.640	0.030	5.100
0.100	0.370	0.100	9.800
0.300	0.180	0.300	15.500
1.000	0.080	1.000	21.000
3.000	0.050	3.000	25.000
10.000	0.035	10.000	28.000



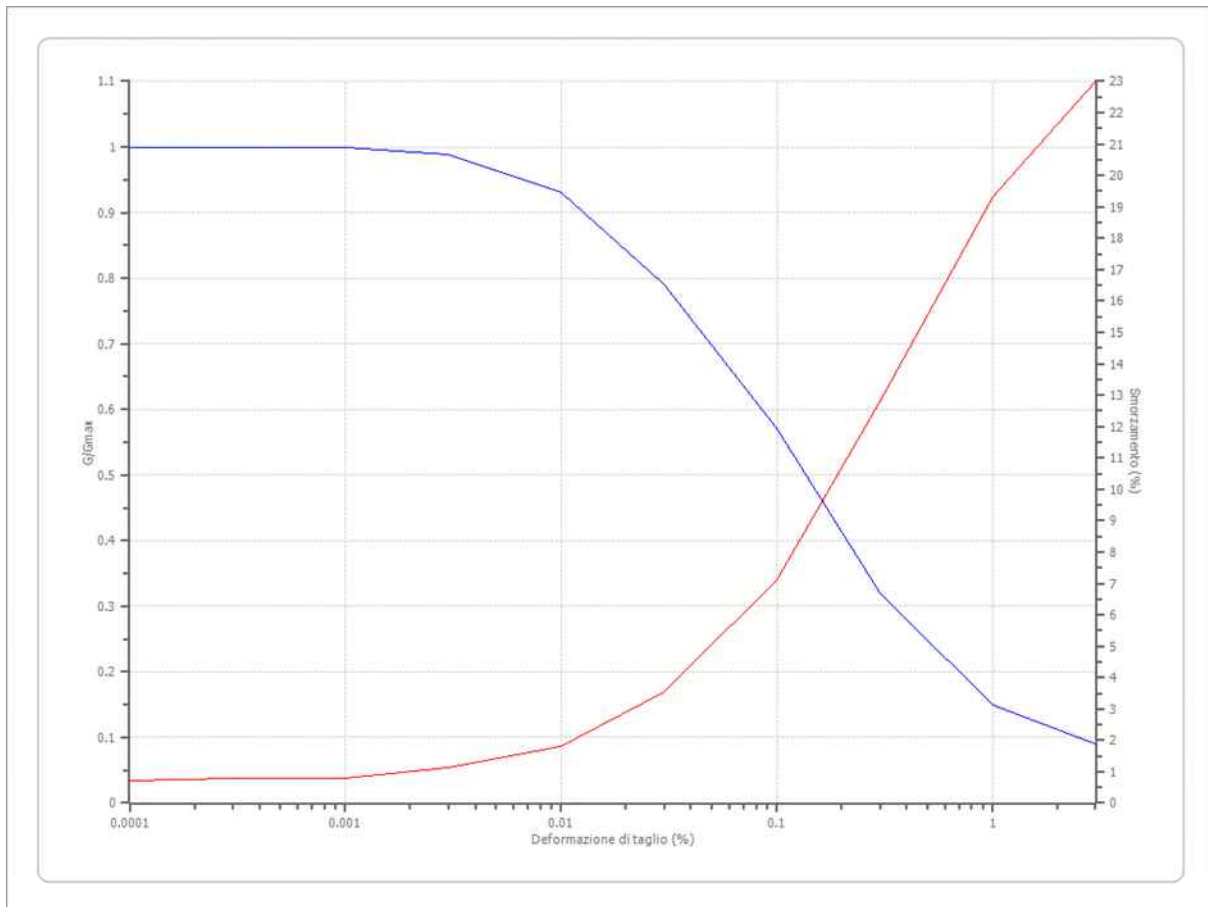
Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.240
0.0003	1.000	0.0003	0.420
0.001	1.000	0.001	0.800
0.003	0.986	0.003	1.400
0.010	0.966	0.010	2.800
0.030	0.931	0.030	5.100
0.100	0.900	0.100	9.800
0.300	0.850	0.300	15.500
1.000	0.779	1.000	21.000
3.000	0.720	3.000	25.000
10.000	0.671	10.000	28.000



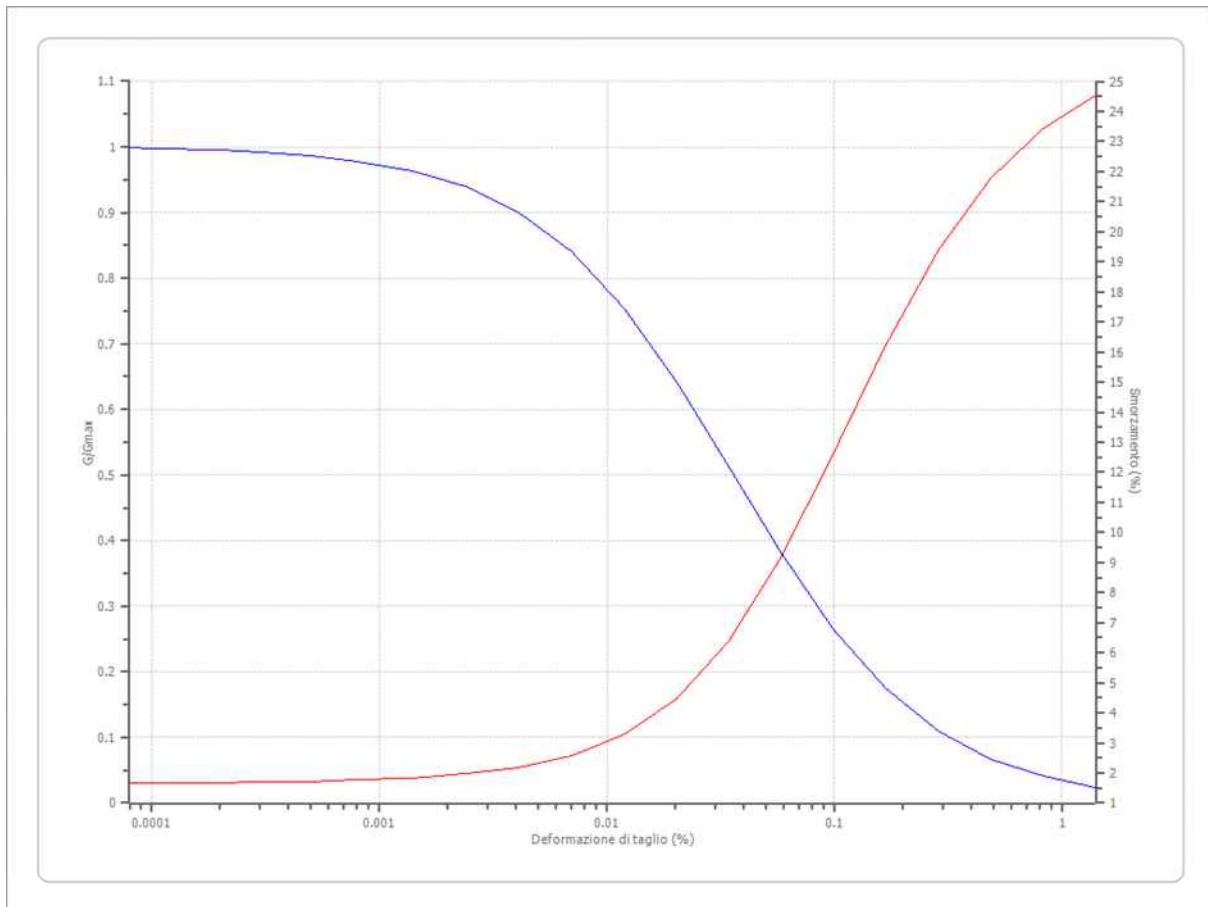
EPRI Sand (1993) 76,50-152,40 metri

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.0001	1.000	0.0001	0.700
0.0003	1.000	0.0003	0.800
0.001	1.000	0.001	0.800
0.003	0.988	0.003	1.120
0.010	0.930	0.010	1.800
0.030	0.791	0.030	3.530
0.100	0.570	0.100	7.100
0.300	0.321	0.300	12.780
1.000	0.150	1.000	19.300
3.000	0.090	3.000	23.000



Lombardia - Limi argillosi

Deformazione %	G/Gmax	Deformazione %	Smorzamento %
0.00008	1.000	0.00008	1.665475
0.0001	0.9974	0.0001	1.67745
0.0002	0.995575	0.0002	1.685925
0.0003	0.992475	0.0003	1.700375
0.0005	0.9872	0.0005	1.725175
0.0008	0.978325	0.0008	1.767775
0.0014	0.963575	0.0014	1.841375
0.0024	0.939225	0.0024	1.96895
0.0041	0.900325	0.0041	2.191675
0.007	0.8407	0.007	2.583075
0.0119	0.755075	0.0119	3.270475
0.0202	0.64305	0.0202	4.454025
0.0343	0.512875	0.0343	6.375775
0.0583	0.381	0.0583	9.167875
0.099	0.2647	0.099	12.63128
0.1684	0.173975	0.1684	16.22277
0.2862	0.109725	0.2862	19.36967
0.4866	0.0673	0.4866	21.77518
0.8272	0.040525	0.8272	23.44093
1.4063	0.024175	1.4063	24.52093



Stratigrafia

n.	Descrizione	Profondità [m]	Spessore [m]	Terreno	Numero sottostrati	Gmax [MPa]	Smorzamento critico [%]	Peso unità vol. [kN/m ³]	Vs [m/s]	Tensione verticale [kPa]
1		--	6.0	Lombardia - Limi argillosi	0	52.73	--	19.0	165.0	57.0
2		6.0	6.0	Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)	0	79.25	--	18.5	205.0	140.1
3		12.0	14.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	0	62.75	--	19.0	180.0	230.5
4		26.0	10.0	Seed et al.	0	342.51	--	21.0	400.0	350.8

				(1986) Gravel						
5		36.0	34.0	Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	0	127.42	--	20.0	250.0	579.9
6		70.0	26.0	Seed et al. (1986) Gravel	0	678.39	--	22.0	550.0	911.6
7		96.0	54.0	EPRI Sand (1993) 76,50-1 52,40 metri	0	454.13	--	22.0	450.0	1399.2
8		oo	--	Smorza mento costante	0	1435.27	--	22.0	800.0	1728.4

Strato con falda:

1

Strato rilevamento accelerogramma:

8 Affiorante

Profilo			Velocità onde di taglio		Tensione verticale	
6.00 [m]	6.00 [m]		165.0 [m/s]		57.0 [kPa]	
6.00 [m]	12.00 [m]		205.0 [m/s]		140.1 [kPa]	
14.00 [m]	26.00 [m]		180.0 [m/s]		230.5 [kPa]	
10.00 [m]	36.00 [m]		400.0 [m/s]		350.8 [kPa]	
34.00 [m]	70.00 [m]		250.0 [m/s]		579.9 [kPa]	
26.00 [m]	96.00 [m]		550.0 [m/s]		911.6 [kPa]	
54.00 [m]	150.00 [m]		450.0 [m/s]		1399.2 [kPa]	
	oo		800.0 [m/s]		1728.4 [kPa]	

Elaborazione

Numero di iterazioni 16
 Rapporto tra deformazione a taglio effettiva e deformazione massima 0.5
 Tipo di modulo elastico Shake
 Massimo errore percentuale di convergenza 1.54 E-01

Fattori di amplificazione ICMS 2018

Tai	0.240 [s]
Tvi	2.000 [s]
Tao	0.390 [s]
Tvo	1.950 [s]
Sami	5.276 [m/s ²]
Svmi	0.335 [m/s]
Samo	6.767 [m/s ²]
Svmo	0.703 [m/s]
Fa	1.283 [-]
Fv	2.095 [-]
TB	0.217 [s]
TC	0.652 [s]
TD	2.684 [s]
SA(0)	0.271 [g]
SA(TB)	0.690 [g]

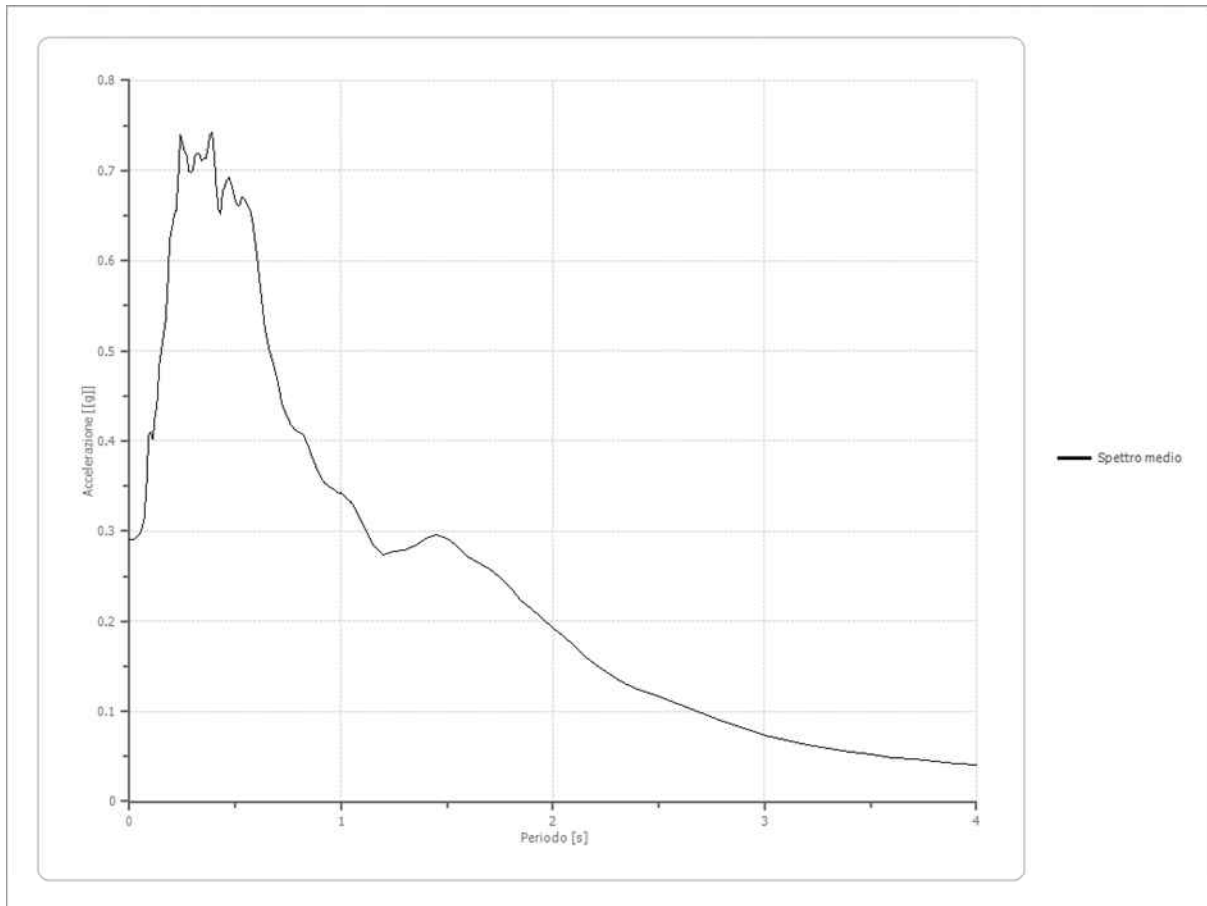
Fattori di amplificazione su intensità spettrale

Periodo minimo [s]	Periodo massimo [s]	Int. Housner input [m]	Int. Housner output [m]	Int. Housner input/output [m]	FA
--------------------	---------------------	------------------------	-------------------------	-------------------------------	----

Spettro medio di risposta elastico

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2904	0.26	0.7212	0.52	0.6607	0.98	0.3435	2.25	0.1434
0.01	0.2904	0.27	0.7171	0.53	0.6697	1.00	0.3413	2.30	0.1364
0.02	0.2911	0.28	0.6995	0.54	0.6695	1.05	0.3314	2.35	0.1300
0.03	0.2922	0.29	0.6976	0.55	0.6651	1.10	0.3094	2.40	0.1249
0.04	0.2948	0.30	0.7009	0.56	0.6604	1.15	0.2849	2.50	0.1164
0.05	0.2971	0.31	0.7173	0.57	0.6562	1.20	0.2739	2.60	0.1067
0.06	0.3046	0.32	0.7184	0.58	0.6451	1.25	0.2773	2.70	0.0980
0.07	0.3139	0.33	0.7192	0.60	0.6088	1.30	0.2789	2.80	0.0892
0.08	0.3496	0.34	0.7114	0.62	0.5651	1.35	0.2838	2.90	0.0814
0.09	0.4060	0.35	0.7140	0.64	0.5241	1.40	0.2926	3.00	0.0730
0.10	0.4102	0.36	0.7132	0.66	0.5011	1.45	0.2961	3.10	0.0676
0.11	0.4018	0.37	0.7238	0.68	0.4844	1.50	0.2914	3.20	0.0623
0.12	0.4273	0.38	0.7398	0.70	0.4660	1.55	0.2829	3.30	0.0586
0.13	0.4407	0.39	0.7425	0.72	0.4418	1.60	0.2711	3.40	0.0555
0.14	0.4828	0.40	0.7169	0.74	0.4291	1.65	0.2647	3.50	0.0520
0.15	0.5008	0.41	0.6806	0.76	0.4194	1.70	0.2577	3.60	0.0489
0.16	0.5163	0.42	0.6574	0.78	0.4118	1.75	0.2485	3.70	0.0465

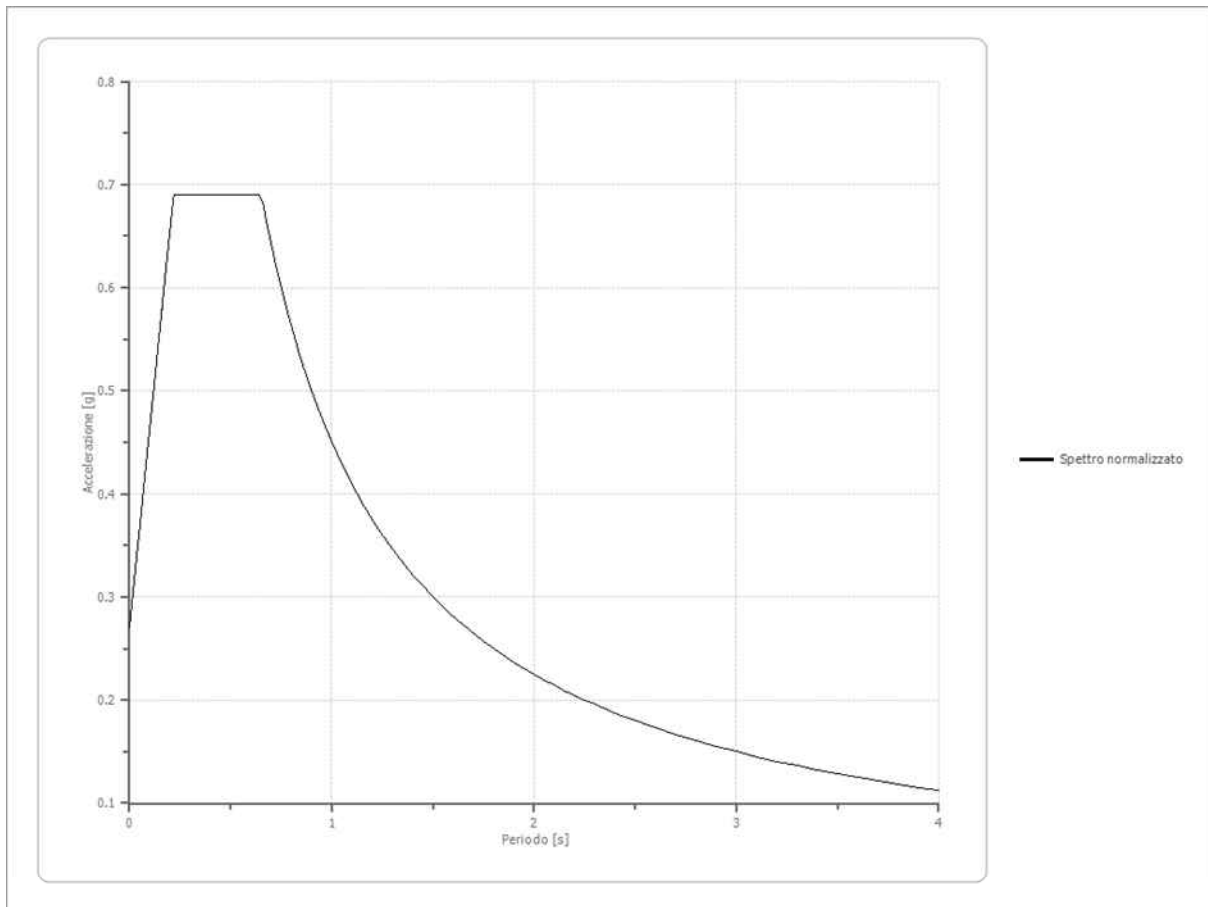
0.17	0.5329	0.43	0.6522	0.80	0.4094	1.80	0.2367	3.80	0.0443
0.18	0.5698	0.44	0.6782	0.82	0.4071	1.85	0.2229	3.90	0.0421
0.19	0.6251	0.45	0.6828	0.84	0.3966	1.90	0.2130	4.00	0.0402
0.20	0.6353	0.46	0.6901	0.86	0.3831	1.95	0.2032		
0.21	0.6498	0.47	0.6920	0.88	0.3719	2.00	0.1927		
0.22	0.6562	0.48	0.6859	0.90	0.3612	2.05	0.1831		
0.23	0.6909	0.49	0.6766	0.92	0.3532	2.10	0.1725		
0.24	0.7401	0.50	0.6683	0.94	0.3491	2.15	0.1617		
0.25	0.7306	0.51	0.6607	0.96	0.3468	2.20	0.1517		



Spettro normalizzato di risposta elastico

Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]	Periodo [s]	Accelerazione [g]
0.00	0.2711	0.26	0.6898	0.52	0.6898	0.98	0.4592	2.25	0.2000
0.01	0.2904	0.27	0.6898	0.53	0.6898	1.00	0.4500	2.30	0.1957
0.02	0.3096	0.28	0.6898	0.54	0.6898	1.05	0.4286	2.35	0.1915
0.03	0.3289	0.29	0.6898	0.55	0.6898	1.10	0.4091	2.40	0.1875
0.04	0.3481	0.30	0.6898	0.56	0.6898	1.15	0.3913	2.50	0.1800
0.05	0.3674	0.31	0.6898	0.57	0.6898	1.20	0.3750	2.60	0.1731
0.06	0.3866	0.32	0.6898	0.58	0.6898	1.25	0.3600	2.70	0.1667
0.07	0.4059	0.33	0.6898	0.60	0.6898	1.30	0.3462	2.80	0.1607
0.08	0.4251	0.34	0.6898	0.62	0.6898	1.35	0.3334	2.90	0.1552
0.09	0.4444	0.35	0.6898	0.64	0.6898	1.40	0.3214	3.00	0.1500

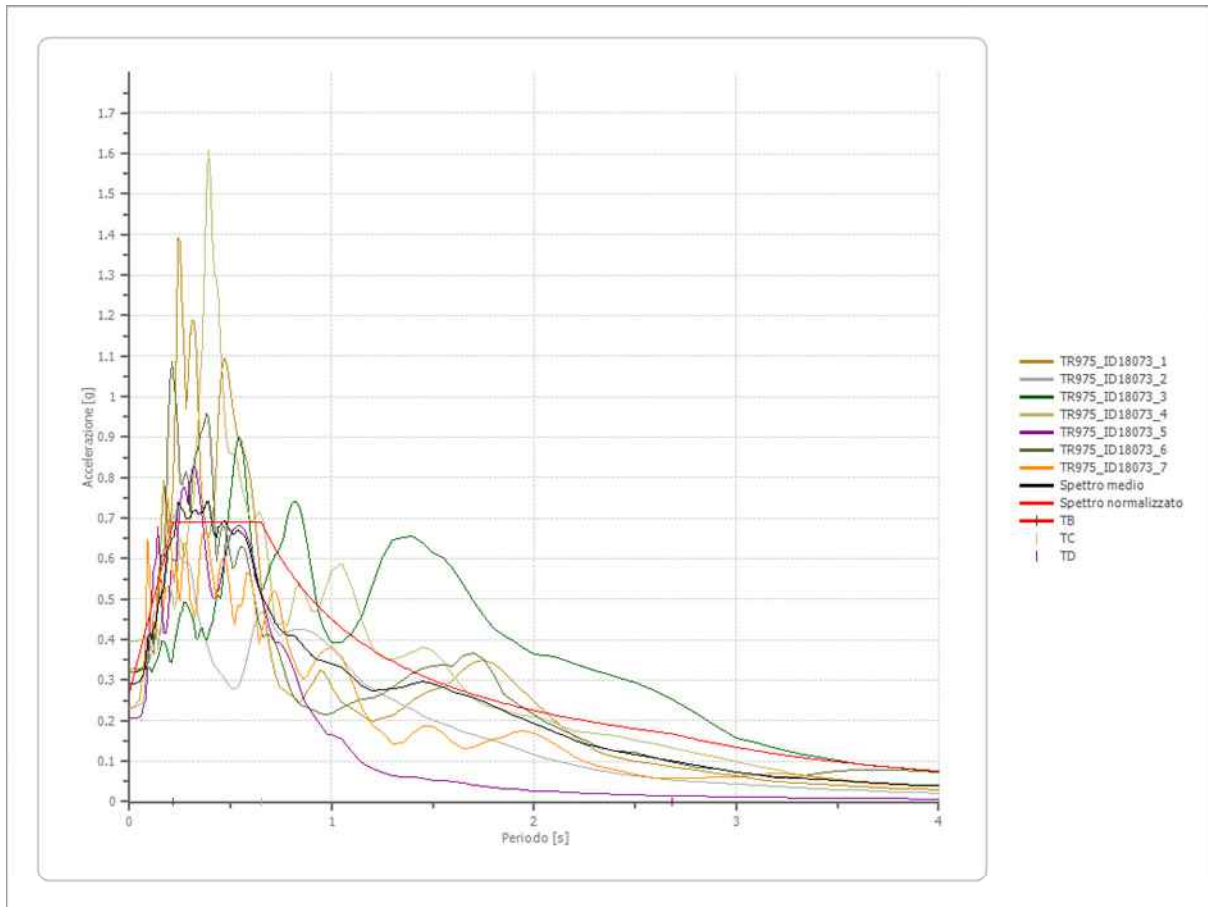
0.10	0.4637	0.36	0.6898	0.66	0.6819	1.45	0.3104	3.10	0.1452
0.11	0.4829	0.37	0.6898	0.68	0.6618	1.50	0.3000	3.20	0.1406
0.12	0.5022	0.38	0.6898	0.70	0.6429	1.55	0.2903	3.30	0.1364
0.13	0.5214	0.39	0.6898	0.72	0.6250	1.60	0.2813	3.40	0.1324
0.14	0.5407	0.40	0.6898	0.74	0.6081	1.65	0.2727	3.50	0.1286
0.15	0.5599	0.41	0.6898	0.76	0.5921	1.70	0.2647	3.60	0.1250
0.16	0.5792	0.42	0.6898	0.78	0.5770	1.75	0.2572	3.70	0.1216
0.17	0.5984	0.43	0.6898	0.80	0.5625	1.80	0.2500	3.80	0.1184
0.18	0.6177	0.44	0.6898	0.82	0.5488	1.85	0.2433	3.90	0.1154
0.19	0.6369	0.45	0.6898	0.84	0.5357	1.90	0.2369	4.00	0.1125
0.20	0.6562	0.46	0.6898	0.86	0.5233	1.95	0.2308		
0.21	0.6755	0.47	0.6898	0.88	0.5114	2.00	0.2250		
0.22	0.6898	0.48	0.6898	0.90	0.5000	2.05	0.2195		
0.23	0.6898	0.49	0.6898	0.92	0.4892	2.10	0.2143		
0.24	0.6898	0.50	0.6898	0.94	0.4788	2.15	0.2093		
0.25	0.6898	0.51	0.6898	0.96	0.4688	2.20	0.2046		



Parametri spettro normalizzato

Ag [g]	F0	Tc*	TB [s]	TC [s]	TD [s]	Se(0) [g]	Se(TB) [g]	S
0.271	2.544538	--	0.217	0.652	2.684	0.271	0.690	1.189

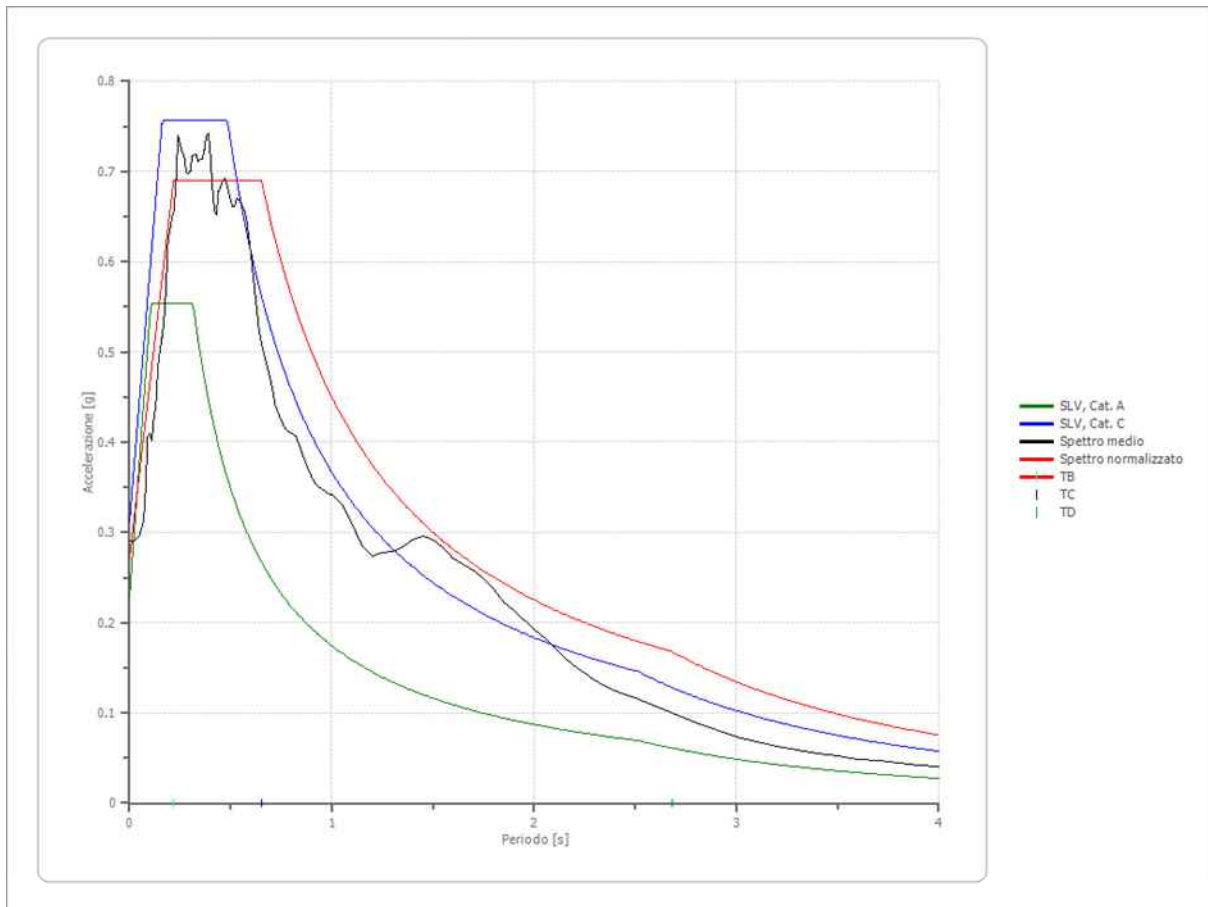
Confronto tra gli spettri



Confronto spettro normativa

Tipo di spettro: Spettro di risposta elastico

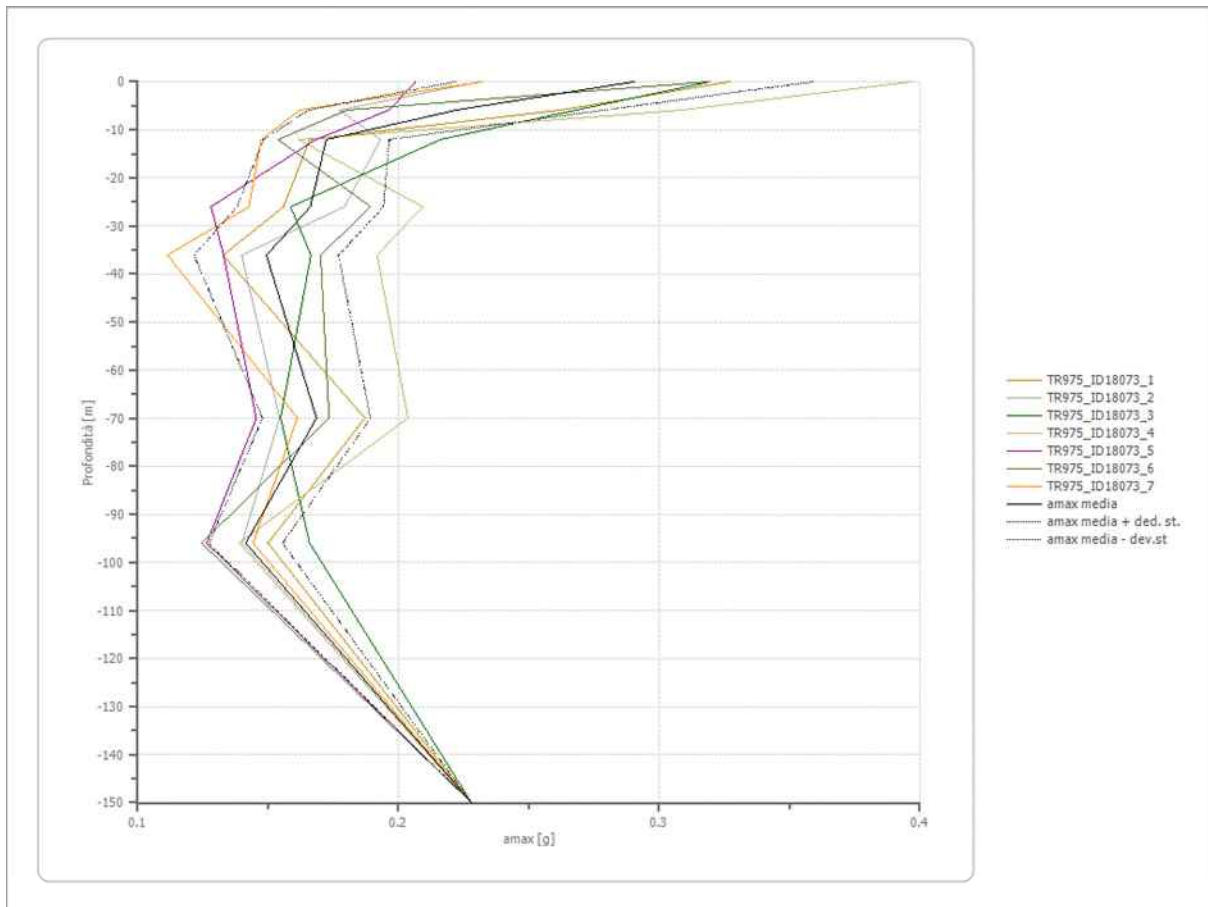
	Operatività à SLO Cat. A	Danno SLD Cat. A	Salvaguardia dia vita SLV Cat. A	Prev. collasso SLC Cat. A	Operatività à SLO Cat. C	Danno SLD Cat. C	Salvaguardia dia vita SLV Cat. C	Prev. collasso SLC Cat. C
Tr [anni]	45	75	712	1462	45	75	712	1462
ag [g]	0.076	0.096	0.228	0.284	0.076	0.096	0.228	0.284
Fo	2.406	2.399	2.426	2.486	2.406	2.399	2.426	2.486
Tc* [s]	0.271	0.28	0.315	0.326	0.271	0.28	0.315	0.326
Ss	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50	1.37	1.28
St	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cc	1.00	1.00	1.00	1.00	1.62	1.60	1.54	1.52
TB [s]	0.090	0.093	0.105	0.109	0.146	0.149	0.161	0.165
TC [s]	0.271	0.280	0.315	0.326	0.438	0.447	0.484	0.496
TD [s]	1.904	1.984	2.512	2.736	1.904	1.984	2.512	2.736
Se(0) [g]	0.076	0.096	0.228	0.284	0.114	0.144	0.312	0.362
Se(TB) [g]	0.183	0.230	0.553	0.706	0.274	0.346	0.757	0.901



Profilo a max

	0.0 [m]	6.0 [m]	12.0 [m]	26.0 [m]	36.0 [m]	70.0 [m]	96.0 [m]	150.0 [m]
TR975_I D18073_ 1 [g]	0.327	0.262	0.166	0.156	0.133	0.187	0.150	0.228
TR975_I D18073_ 2 [g]	0.231	0.177	0.193	0.179	0.140	0.154	0.140	0.228
TR975_I D18073_ 3 [g]	0.320	0.268	0.216	0.159	0.166	0.155	0.166	0.228
TR975_I D18073_ 4 [g]	0.397	0.309	0.162	0.209	0.192	0.204	0.139	0.228
TR975_I D18073_ 5 [g]	0.207	0.196	0.168	0.128	0.133	0.145	0.126	0.228
TR975_I D18073_ 6 [g]	0.319	0.180	0.154	0.189	0.170	0.173	0.124	0.228
TR975_I D18073_ 7 [g]	0.232	0.162	0.147	0.143	0.111	0.161	0.144	0.228

media [g]	0.290	0.222	0.172	0.166	0.149	0.169	0.141	0.228
Dev. St. [g]	0.069	0.057	0.024	0.028	0.028	0.021	0.014	0.000



Indice

Dati generali	.7
Terreni	.7
Seed et al. (1986) Gravel	.7
Idriss (1990) Sand (Seed and Idriss 1970)	.8
Idriss (1990) Clay (Seed and Sun 1989)	.9
EPRI Sand (1993) 76,50-152,40 metri	.10
Lombardia - Limi argillosi	.11
Stratigrafia	.12
Elaborazione	.14
Fattori di amplificazione ICMS 2018	.14
Fattori di amplificazione su intensità spettrale	.14
Spettro medio di risposta elastico	.14
Spettro normalizzato di risposta elastico	.15
Confronto tra gli spettri	.17
Confronto spettro normativa	.17
Profilo a max	.18
Indice	.20