



CONSORZIO DI BONIFICA PIANURA DI FERRARA

Sede legale e recapito postale:

44121 Ferrara - Via Borgo dei Leoni, 28 - C.F. 93076450381
web: www.bonificaferrara.it - e-mail: info@bonificaferrara.it
pec: posta.certificata@pec.bonificaferrara.it

aderente all'**ANB**

Associazione Nazionale Bonifiche, Irrigazioni e Miglioramenti Fondiari

IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PROGETTO ESECUTIVO



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Piano nazionale di ripresa e resilienza disciplinato dal Regolamento del Parlamento Europeo (UE) 2021/241 del 12 febbraio 2021, relativo al dispositivo per la ripresa e la resilienza (Next Generation UE), all'attuazione e rendicontazione degli interventi dell'investimento M2C4 2.1a per le più urgenti necessità, segnalati dalle regioni Emilia-Romagna, Toscana e Marche, per la gestione del rischio alluvioni e per la riduzione del rischio idrogeologico. Ordinanza n. 35/2024 del Commissario straordinario alla ricostruzione nel territorio delle regioni Emilia-Romagna, Toscana e Marche.

ID INTERVENTO **ER-UBIS-000108**

CUP **J78H24000430007**

TITOLO INTERVENTO **"Messa in sicurezza impianto idrovoro cittadino per la laminazione delle portate di piena del reticolo idraulico di bonifica"**

RELAZIONE GEOLOGICA

Data: **31.03.2025**

ELABORATO:

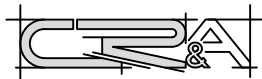
R02

Rev.:

-

IL PROGETTISTA GENERALE

(Ing. Alessio Colombi)



Ing.A.Colombi Ing.M.Roversi Ing.O.Vitarelli
Colombi Roversi & Associati
Studio di Ingegneria
Via Piangipane, 1.
44121 FERRARA

IL GEOLOGO

(Dott.Geol. Thomas Veronese)



Studio Servizi Tecnici
Settore geologia e ambiente

DOTT. GEOL. THOMAS VERONESE
Via Roma, 10
44021 CODIGORO (Ferrara)
Tel e fax. 0533 / 713798 cell. 335-5240380
E-mail: t.veronese@studio-sst.it
PEC: thomas.veronese@pec.epap.it

IL RESPONSABILE UNICO DEL PROGETTO

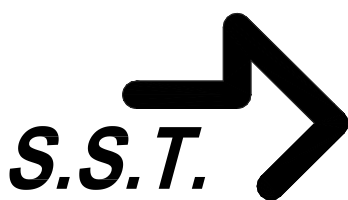
(Ing. Alessandro Buzzoni)



IL DIRETTORE AREA TERRITORIO
Ing. Alessandro Buzzoni

Rev.		COLOMBI ALESSIO Ordine degli Ingegneri della Provincia di Ferrara Ingegnere 10.04.2025 19:02:41 GMT+02:00	Redatto	Data 31/03/2025	Codice Intervento OC174
00	Emissione				





Studio Servizi Tecnici
Settore geologia e ambiente

DOTT. GEOL. THOMAS VERONESE

Via Roma, 10

44021 CODIGORO (Ferrara)

Tel e fax. 0533 / 713798 cell. 335-5240380

E-mail: t.veronese@studio-sst.it

PEC: thomas.veronese@pec.epap.it

***RELAZIONE DI MODELLAZIONE GEOLOGICA, SISMICA e
GEOTECNICA SULLE INDAGINI***

Comune di Ferrara (FE)

OGGETTO: Piano nazionale di ripresa e resilienza disciplinato dal Regolamento del Parlamento Europeo (UE) 2021/241 del 12 febbraio 2021, relativo al dispositivo per la ripresa e la resilienza (Next Generation UE), all'attuazione e rendicontazione degli interventi dell'investimento M2C4 2.1a per le più urgenti necessità, segnalati dalle regioni Emilia-Romagna, Toscana e Marche, per la gestione del rischio alluvioni e per la riduzione del rischio idrogeologico.

Ordinanza n. 35/2024 del Commissario straordinario alla ricostruzione nel territorio delle regioni Emilia-Romagna, Toscana e Marche.

ID INTERVENTO: ER-UBIS-000109

MESSA IN SICUREZZA IMPIANTO IDROVORO CITTADINO PER LA LAMINAZIONE DELLE PORTATE
DI PIENA DEL RETICOLO IDRAULICO DI BONIFICA – **CUP J78H24000430007 – CIG B544DA6EFF**

Committente: **Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara**

Sede in: via Borgo dei Leoni n. 28
44121 Ferrara (Fe)

S.S.T. SETTORE GEOLOGIA E AMBIENTE

Geotecnica; Studio terreni di fondazione; Stabilità dei versanti; Rilevamento geologico;
Rilievi topografici; Geofisica - Contributi allo Studio di Impatto Ambientale;
Assistenza alle pubbliche amministrazioni negli studi di fattibilità e di realizzazione dei
P.S.C., cimiteri, discariche, piani attività estrattive, studi di acquiferi per la tutela e per
l'utilizzo di risorse idriche sotterranee; subirrigazioni.

28 gennaio 2025

Timbro





Studio Servizi Tecnici
Settore geologia e ambiente

DOTT. GEOL. THOMAS VERONESE

Via Roma, 10

44021 CODIGORO (Ferrara)

Tel e fax. 0533 / 713798 cell. 335-5240380

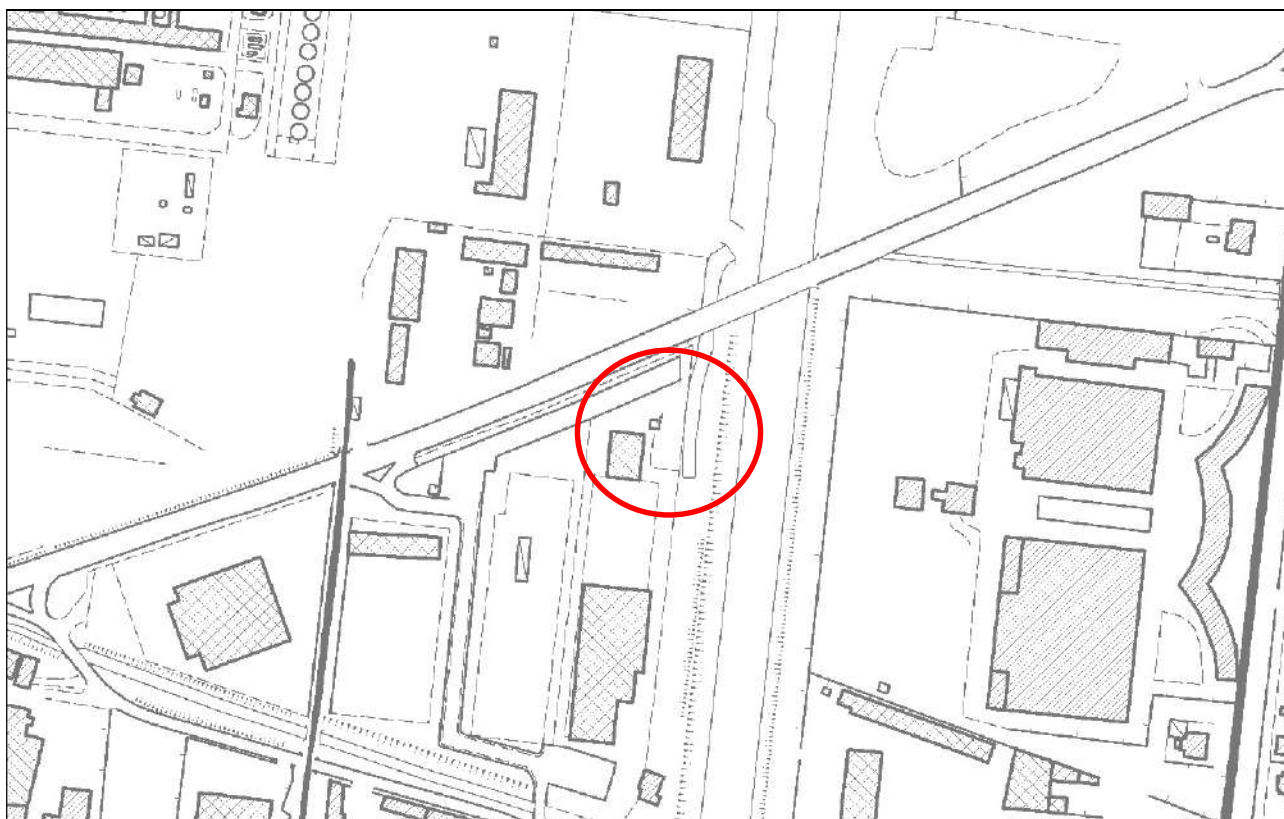
E-mail: t.veronese@studio-sst.it

PEC: thomas.veronese@pec.epap.it

MODELLAZIONE GEOLOGICA, SISMICA e GEOTECNICA SULLE INDAGINI

Comune di Ferrara (FE)

Intervento di messa in sicurezza impianto idrovoro cittadino pe la laminazione delle portate di piena del reticolo idraulico di bonifica sull'impianto Cittadino di Ferrara – Piano Figliuolo – CUP J78H24000430007.



Committente: **Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara**
Sede in: via Borgo dei Leoni n. 28
44121 Ferrara (Fe)

28 gennaio 2025

S.S.T. SETTORE GEOLOGIA E AMBIENTE

Geotecnica; Studio terreni di fondazione; Stabilità dei versanti; Rilevamento geologico; Rilievi topografici; Geofisica - Contributi allo Studio di Impatto Ambientale; Assistenza alle pubbliche amministrazioni negli studi di fattibilità e di realizzazione dei P.S.C., cimiteri, discariche, piani attività estrattive, studi di acquiferi per la tutela e per l'utilizzo di risorse idriche sotterranee; subirrigazioni.



INDICE:

1. PREMESSA	4
NORMATIVA E RACCOMANDAZIONI DI RIFERIMENTO	5
2. MODELLAZIONE GEOLOGICA.....	5
2.1. GEOLOGIA STRUTTURALE DELL'AREA	5
2.2. CARATTERI STRATIGRAFICI E LITOLOGICI.....	10
2.3. CARATTERI GEOMORFOLOGICI.....	21
2.4. CARATTERI IDROGEOLOGICI.....	23
3. DEFINIZIONE DEI PARAMETRI SISMICI	26
3.1. DATI DI AUSILIO PER LA PROGETTAZIONE SISMICA	26
Categoria di suolo di fondazione	26
Parametri sismici secondo "D.M. 17 gennaio 2018"	35
Magnitudo di progetto	38
3.2. VERIFICA DELLA RESISTENZA ALLA LIQUEFAZIONE DELLE SABBIE.....	38
3.3. CALCOLO CEDIMENTI POSTSISMICI TERRENI GRANULARI	42
4. MODELLAZIONE GEOTECNICA SULLE INDAGINI.....	42
4.1. MODELLO GEOTECNICO DEL SOTTOSUOLO.....	43
4.1.1. PARAMETRI GEOTECNICI DA PROVE CPTU	43
4.1.2. PARAMETRI GEOTECNICI DA PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO	47
ALLEGATO: ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	51
5. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	53
5.1. STUDI SPECIFICI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE	54
5.2. DATI DI INPUT PER LA RSL	55
5.3. CODICE STRATA PER LA RSL	60
5.4. DATI DI OUTPUT DELLA RSL.....	63
5.5. SCOPO DI QUESTA ANALISI DI RSL E CONCLUSIONI	68

Report Fotografico



CPTU1



SCPTU1



SCPTU2



Sondaggio S1

1. PREMESSA

Su incarico del Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara, con sede in via Borgo dei Leoni n. 28, a Ferrara (FE), si redige lo studio per ricostruire la modellazione geologica, sismica e geotecnica sulle indagini per il progetto di *“Intervento di messa in sicurezza impianto idrovoro cittadino pe la laminazione delle portate di piena del reticolo idraulico di bonifica sull'impianto Cittadino”* di Ferrara – Piano Figliuolo – CUP J78H24000430007.

In **FIGURA 1.1** si riporta l'ubicazione dell'area di intervento.

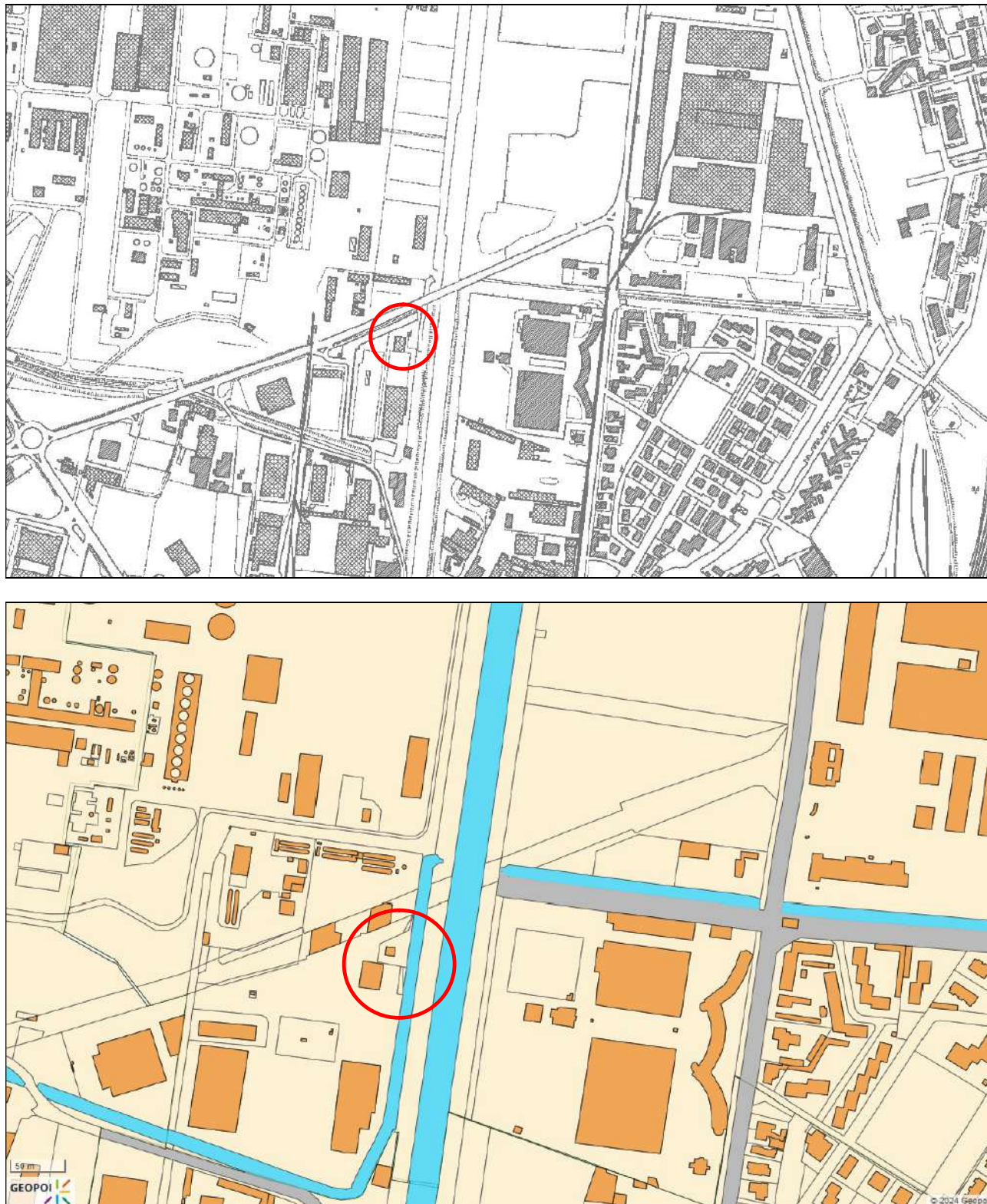


FIGURA 1.1 – Planimetria dell'area di intervento a Ferrara

Normativa e Raccomandazioni di riferimento

- Decreto del Ministro delle Infrastrutture 17 gennaio 2018 Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”.
- Circolare n. 7/2019 del C.S.LL.PP.: Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018 Gazzetta Ufficiale n. 35/2019 - 11 febbraio 2019.
- Deliberazione della Giunta Regionale 12 aprile 2021, N. 476 Aggiornamento dell’Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)” di cui alla deliberazione della Giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630”.
- Deliberazione della Giunta Regionale 26 aprile 2021, N. 564 integrazione della propria deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'allegato A, "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (Art. 22 e 49, L.R. N. 24/2017)"
- Delibera di Giunta Regionale Num. 630 del 29/04/2019, Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, l.r. n. 24/2017).
- A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana)
“Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche (giugno 1977).
- A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana)
“Raccomandazioni sui pali di fondazione (dicembre 1984)”.
- A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana)
“Aspetti geotecnici nella progettazione in zona sismica (Edizione Provvisoria, marzo 2005)”.
- C.N.R. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
Eurocode EC-7: Geotechnics, design – dicembre 1987.
- C.N.R. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
Eurocode EC-8: Design provisions for earthquake resistance of structures – ottobre 1994.

2. MODELLAZIONE GEOLOGICA

2.1. GEOLOGIA STRUTTURALE DELL'AREA

La Pianura Padana è un'area a basso rilievo morfologico ricoperta da un ingente spessore di sedimenti terrigeni Plio-Pleistocenici.

A grande scala, nella Pianura Padana si distinguono a nord le pieghe del Subalpino e, nella parte meridionale, tre strutture principali ad arco, costituite dai thrust più avanzati della catena appenninica. Da ovest a est: l'arco del Monferrato, l'arco Emiliano (Mirandola) e l'arco di Ferrara. Quest'ultimo si può suddividere in tre gruppi minori: le pieghe ferraresi, le pieghe romagnole e più a est le pieghe adriatiche, che costituiscono il vero fronte esterno (sepolto) della catena appenninica. L'arco ferrarese è sepolto al di sotto di una sequenza Plio-Pleistocenica terrigena che copre la successione carbonatica mesozoica, che costituisce la vera ossatura dell'Appennino.

Nella **FIGURA 2.1** viene riportata la mappa geologico-strutturale, dove si possono notare le principali strutture tettoniche sepolte in Pianura Padana.

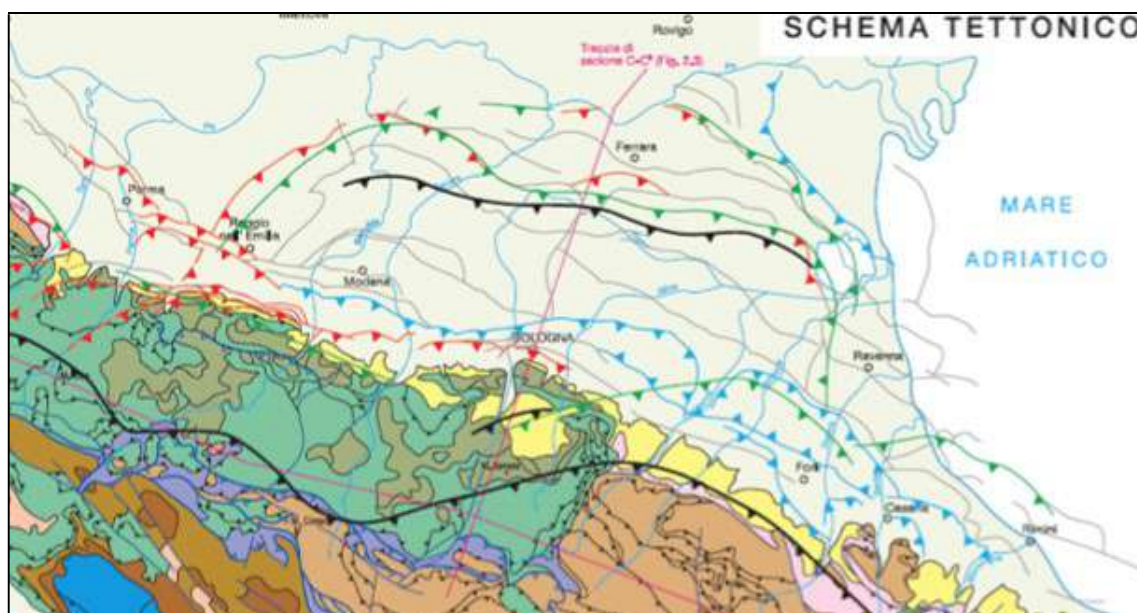


FIGURA 2.1 - Mappa geologico-strutturale della Pianura Padana

Nella **FIGURA 2.2** si riporta la sezione geologica passante per Occhiobello, Fiume Po, e Poggio Renatico, in cui si possono apprezzare gli spessori dei sedimenti del Quaternario sopra i pliocenici medio superiore, che coincide con il passaggio dai sedimenti sciolti a quelli litificati o pseudolitificati.

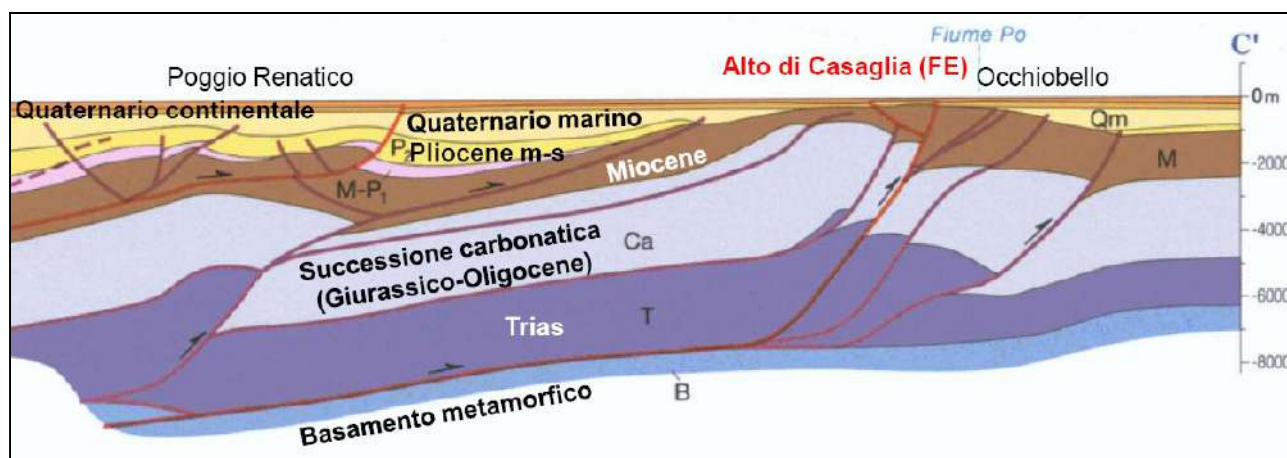
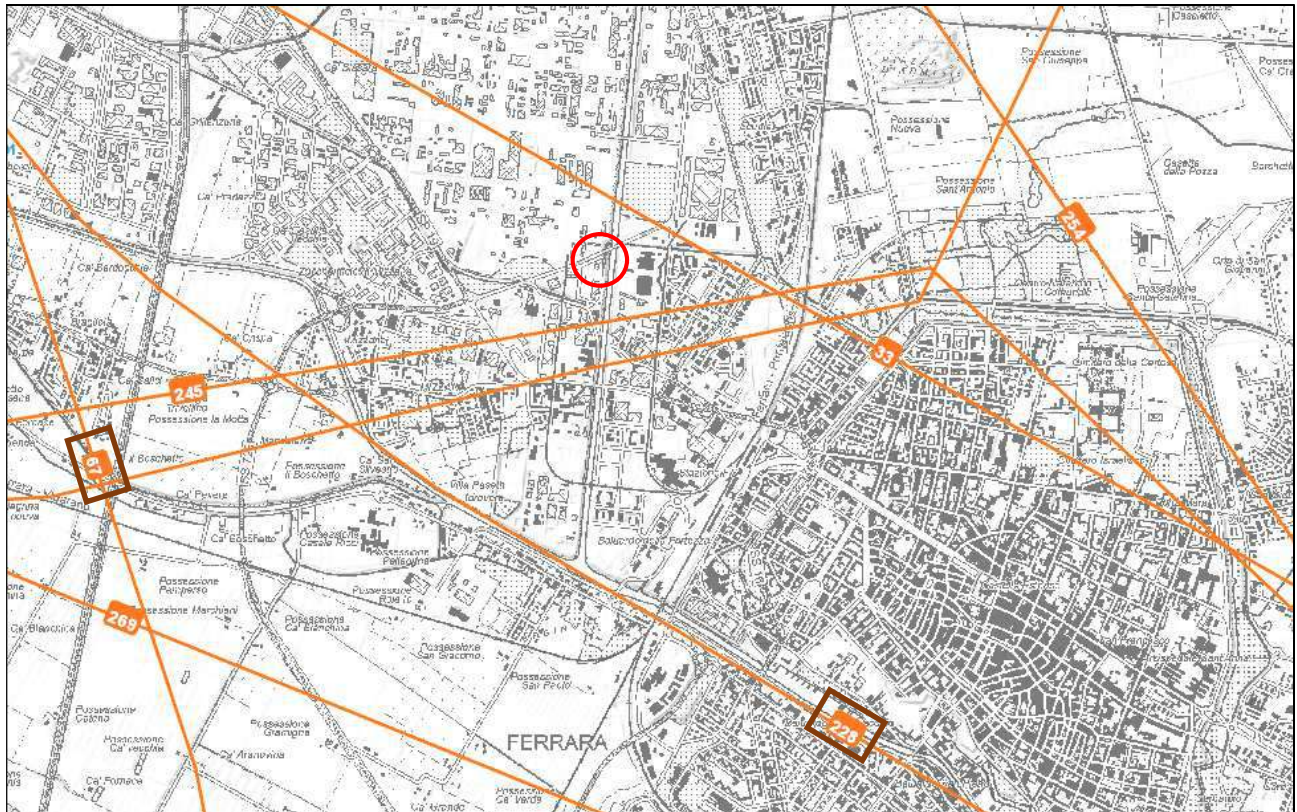
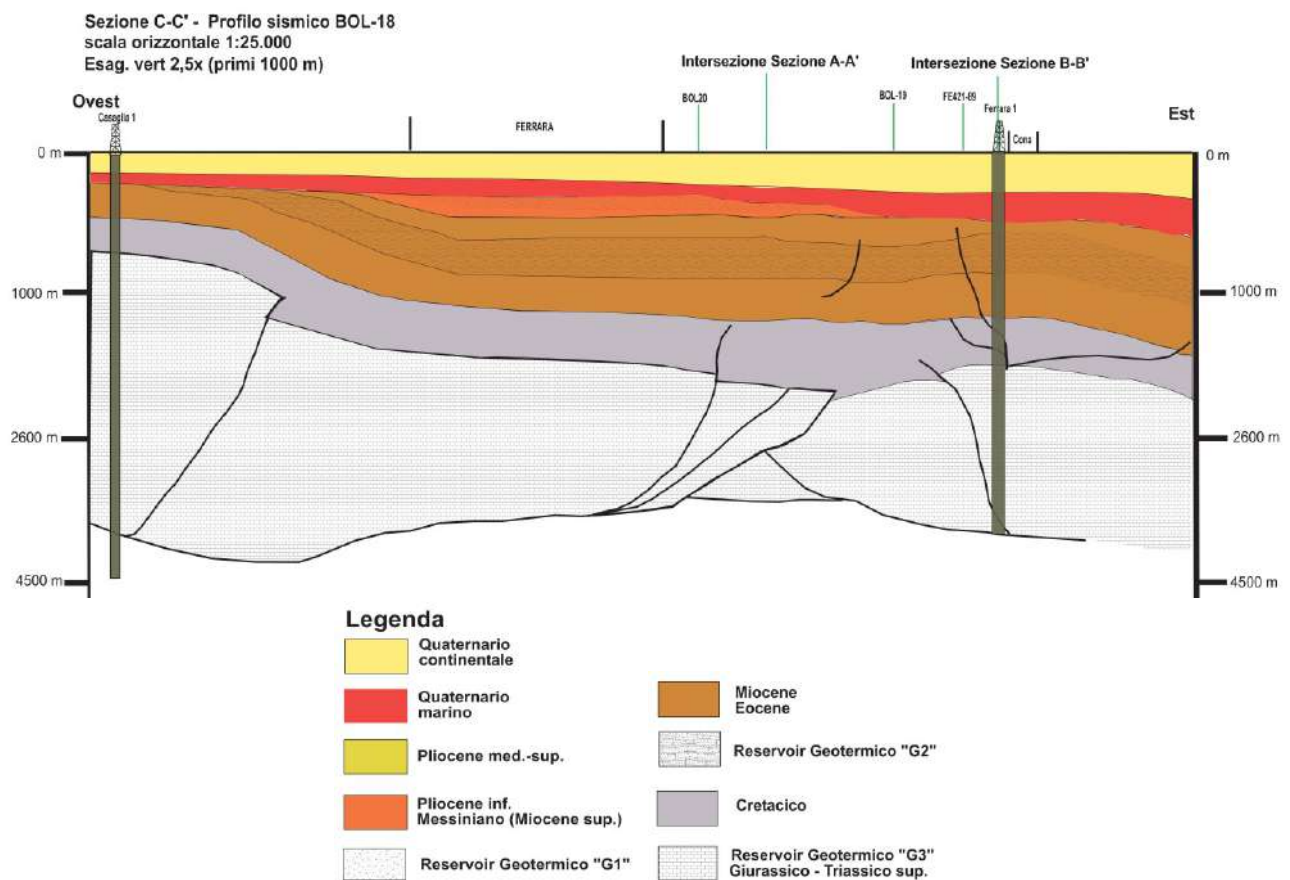


FIGURA 2.2 – Principali strutture del substrato della Padania; ben visibile in sezione la Dorsale Ferrarese.

Nella **FIGURA 2.3** si riportano due sezioni geologiche profonde passanti per Ferrara, estrapolate dal servizio geologico della regione Emilia Romagna, la sezione 228 orientata nord-ovest sud-est ubicata a sud del sito, e la sezione geologica n. 67 orientata nord-ovest sud-est ubicata ad ovest del sito.



UBICAZIONE SEZIONI



SEZIONE 228

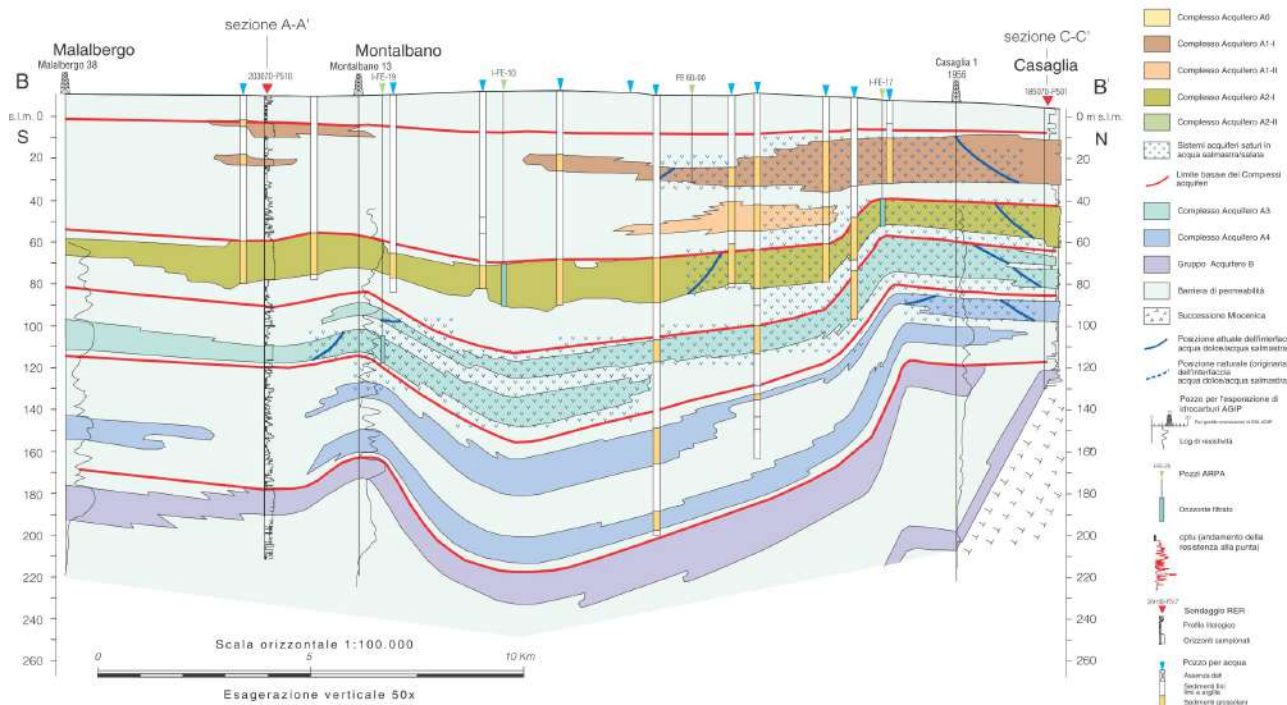
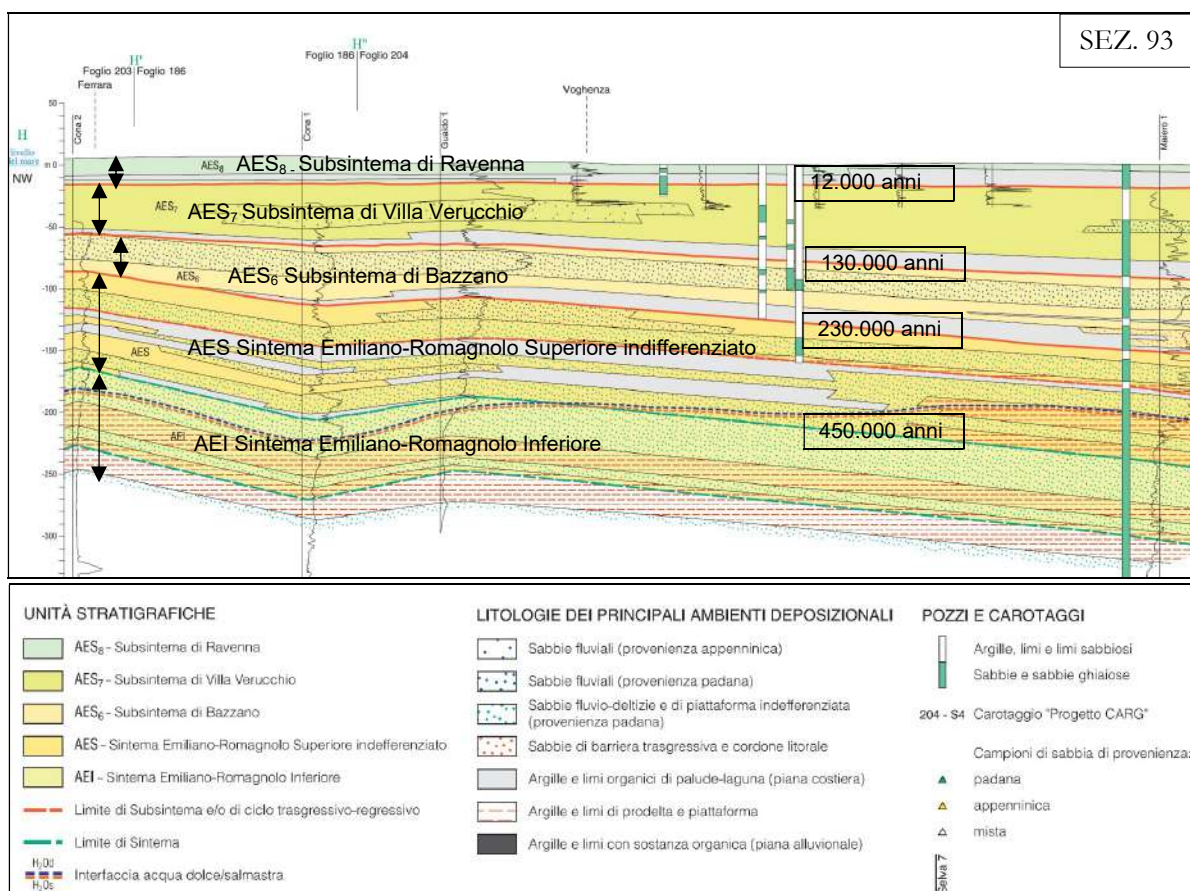


FIGURA 2.3 – Sezioni profonde passanti per il sito allo studio.

Nella **FIGURA 2.4** si riporta inoltre la sezione geologica n. 93 passante nelle vicinanze dell’abitato di Ferrara, con la Suddivisione nei subsistemi principali fino a circa 300m di profondità.



Suddivisione nei subsistemi principali fino a circa 300m di profondità.

FIGURA 2.4 – Sezione geologica 93.

Nella **FIGURA 2.5** viene riportata la Carta Strutturale della Pianura Padana, con le Pieghe Ferraresi dell'Appennino sepolto (Pieri & Groppi, 1981, CNR, 1992) con visibili le varie strutture sepolte e le faglie e sistemi trascorrenti attivi e non attivi, che sono all'origine della nuova attribuzione alla Zona sismica 3, in cui il comune di Ferrara è stato inserito nella OPCM 3274/2003.

Come si può notare a Ferrara, nel substrato roccioso, posto a profondità di poche centinaia di metri, sono presenti sistemi di faglie dovute a sovrascorrimenti e a fronti di accavallamento, classificate come riattivate e come soggette a possibili riattivazioni.

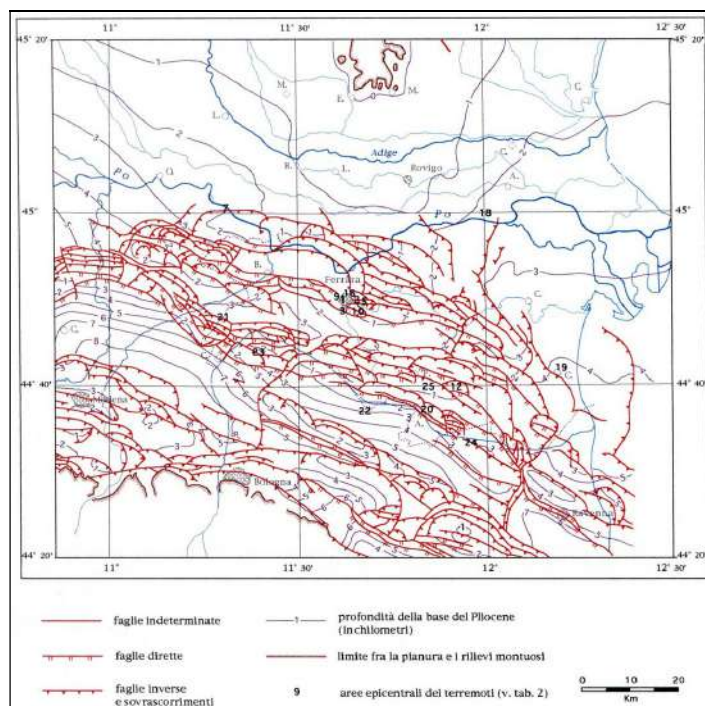


FIGURA 2.5 – Carta strutturale della Pianura Padana orientale (Pieri e Groppi, 1981, CNR, 1992)

Si fa inoltre presente che quasi tutto il territorio comunale di Ferrara ricade all'interno della zona sismogenetica 912 (**FIGURA 2.6**), in particolare sulla Dorsale Ferrarese, dunque è potenzialmente sede epicentrale di eventi sismici.

La zonizzazione sismica ZS9 pone come magnitudo attesa massima nella zona sismogenetica 912 il valore di $M = 6,14$.

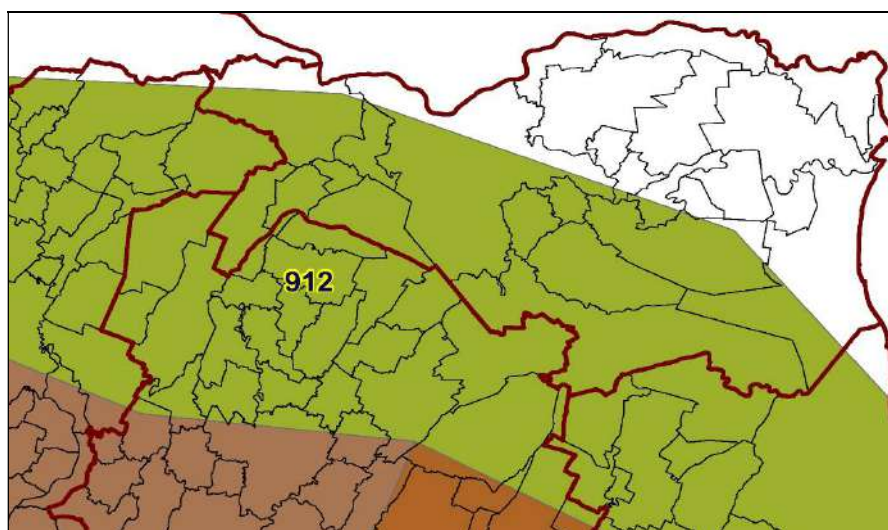


FIGURA 2.6 - Mappa delle aree sismogenetiche dell'Italia Settentrionale

2.2. CARATTERI STRATIGRAFICI E LITOLOGICI

La formazione dell'ambiente, nella sua configurazione attuale, è relativamente recente e consegue a ripetute variazioni dei rapporti di equilibrio tra livello del mare, apporti solidi dei corsi d'acqua, entità di subsidenza e, non ultimo, l'intervento umano.

Nell'attuale configurazione fisica del territorio sono riconoscibili le tracce sia della sua evoluzione naturale che quella operata dall'uomo.

Tra le più evidenti e più importanti nel disegnare l'assetto morfologico si possono elencare i paleoalvei, i con di esondazione, i cordoni dunari testimoni della veloce progradazione verso est della linea di costa, ed infine si individuano quelle aree particolarmente depresse che erano sede di bacini palustri.

Per ogni struttura geomorfologica corrisponde, in linea di massima, una caratteristica classe litologica; la granulometria e la storia tensionale, strettamente legata alla storia geologica, ne condizionano le caratteristiche meccaniche ed idrauliche.

Generalmente i sedimenti che si rilevano in questa zona del comune di Ferrara sono di tipo alluvionale.

I depositi possono essere di canale ed argine prossimale con sedimenti ad alta energia idrodinamica e di canale distale con sedimenti a bassa energia idrodinamica.

Per la validazione del modello geologico e per la ricostruzione di un modello del terreno che permetta di definire al meglio la stratigrafia del sottosuolo dell'area in esame, sono state eseguite:

- una prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono **CPTU1** con *rif. U72-24*, spinta fino alla profondità di -40,0 m da p.c. eseguita sulla sommità dell'argine;
- una prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono sismico **SCPTU1** con *rif. U72-24*, spinta fino alla profondità di -35,6 m da p.c. eseguita sulla sommità dell'argine;
- una prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono sismico **SCPTU2** con *rif. U72-24*, spinta fino alla profondità di -19,8 m da p.c.;
- un sondaggio geognostico a carotaggio continuo **S1**, spinto a -30,00 m da p.c. con prelievo di campioni indisturbati da sottoporre ad analisi di laboratorio geotecnico, eseguito sulla sommità dell'argine.

La prova CPTU1 e la prova SCPTU1 sono state commissionate alla ditta Servizi Tecnici S.r.l., mentre la prova SCPTU2 è stata realizzata dallo scrivente e il sondaggio S1 è stato commissionato alla ditta Songeo S.r.l.

In **FIGURA 2.7** si riporta una immagine satellitare con l'ubicazione delle prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU eseguite in sito.



FIGURA 2.7 – Ortofoto con ubicazione sondaggio e prove CPTU eseguite in sito

Come si può vedere dall'ubicazione delle indagini, le prove CPTU1, SCPTU1 e il Sondaggio S1 sono stati realizzati sulla sommità dell'argine mentre la prova CPTU2 è stata realizzata ad ovest circa due metri più in basso.

Le quote dei p.c. sono state misurate attraverso un rilievo topografico allacciato ad un caposaldo di riferimento del consorzio di bonifica posto all'interno dell'impianto, corrispondente ad una borchia infissa nella passerella dell'impianto.

In **FIGURA 2.8** si riporta la monografia del caposaldo 03A del consorzio posto ad una quota di 6.081 m s.l.m. e ad una quota del consorzio di bonifica di +16,081 m (+10,0 m s.l.m.).



FIGURA 2.8 – Monografia caposaldo 03A

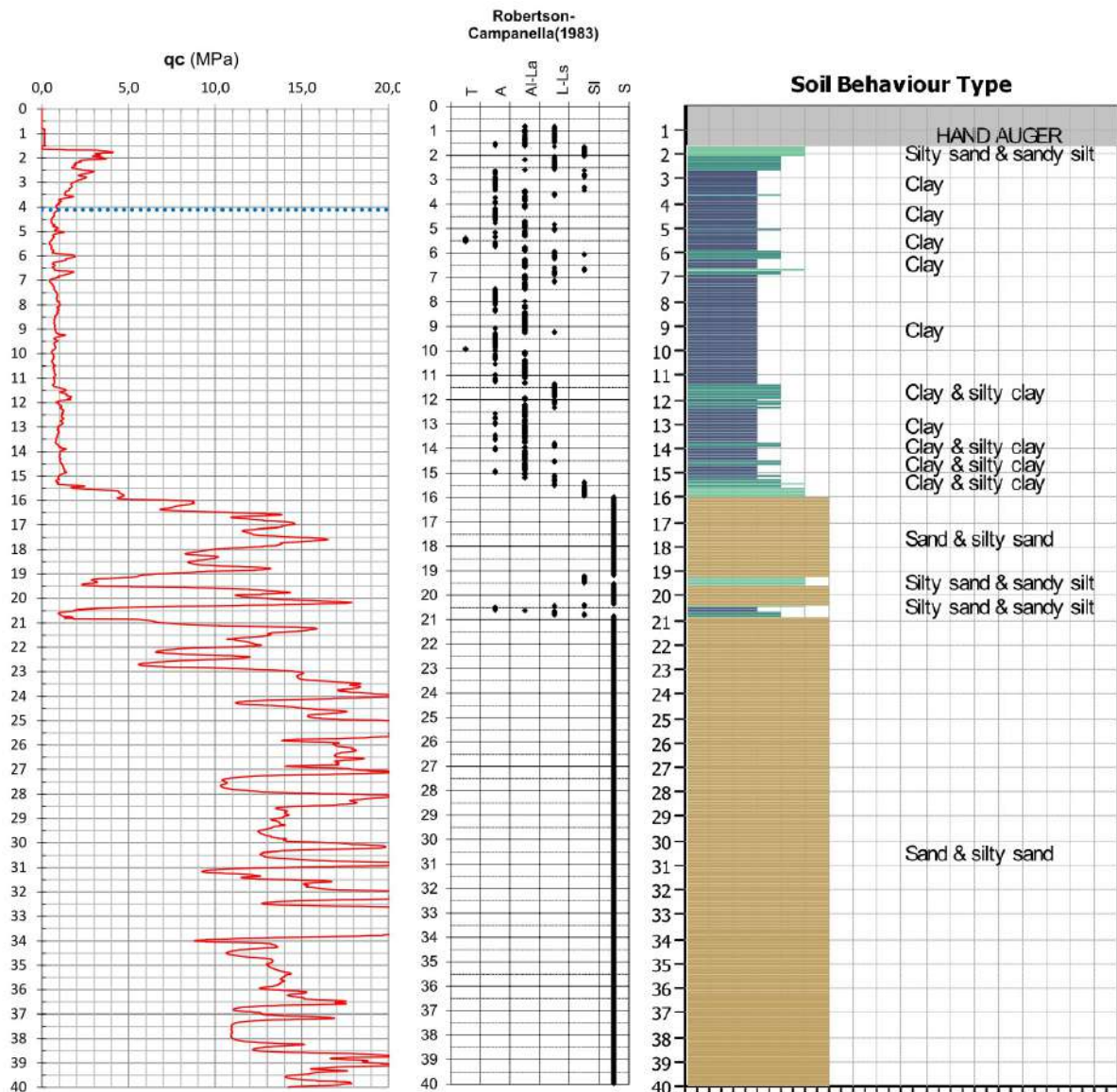
In **Tabella 2.1** si riportano le quote dei p.c. sui quali sono state realizzate le indagini riferite al livello medio mare e alle quote del consorzio di bonifica.

Indagine	Quota Assoluta (m s.l.m.)	Quota Consorzio (m)
CPTU1	+8,115	+18,115
SCPTU1	+7,940	+17,940
SCPTU2	+5,985	+15,985
S1	+7,925	+17,925

Tabella 2.1 – quote p.c. indagini

Il punto investigato con la prova penetrometrica statica a punta elettrica **CPTU1** con *rif. U72-24* rileva:

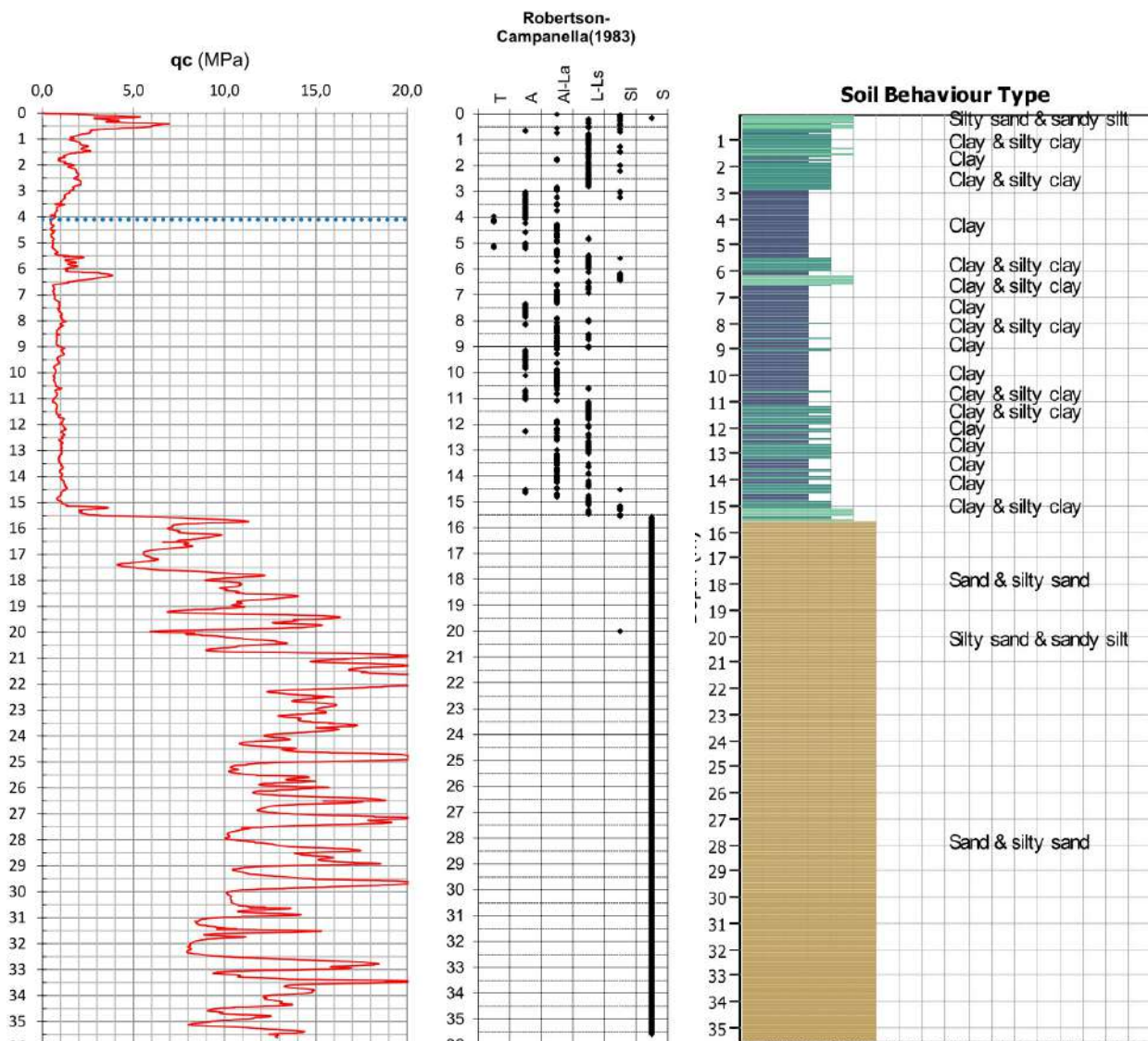
DA	A	qcm	litol.	consistenza ed addensamento
m	m	MPa	(-)	(-)
1,7	3,6	2,25	Al-La	molto consistente
3,6	6,0	0,77	A	moderatamente consistente
6,0	7,0	1,09	L-Ls	sciolta
7,0	11,4	0,74	Al-La	moderatamente consistente
11,4	15,5	1,11	Al-La	consistente
15,5	19,0	10,16	S	moderatamente addensata
19,0	21,0	7,33	SI	moderatamente addensata
21,0	22,9	10,41	S	moderatamente addensata
22,9	34,0	16,57	S	addensata
34,0	40,0	13,79	S	addensata



Diagrammi di resistenza e valutazioni litologiche – CPTU1

Il punto investigato con la prova penetrometrica statica a punta elettrica **SCPTU1** con *rif. U72-24* rileva:

DA	A	qcm	litol.	consistenza ed addensamento
m	m	MPa	(-)	(-)
0,0	1,5	3,02	Rip	riporto
1,5	3,4	1,59	Al-La	consistente
3,4	5,5	0,68	A	moderatamente consistente
5,5	6,5	2,11	Sl	poco addensata
6,5	11,5	0,84	Al-La	moderatamente consistente
11,5	15,2	1,09	Al-La	consistente
15,2	17,6	6,46	S	moderatamente addensata
17,6	20,7	11,05	S	moderatamente addensata
20,7	30,0	14,91	S	addensata
30,0	32,5	10,00	S	moderatamente addensata
32,5	35,6	12,86	S	addensata



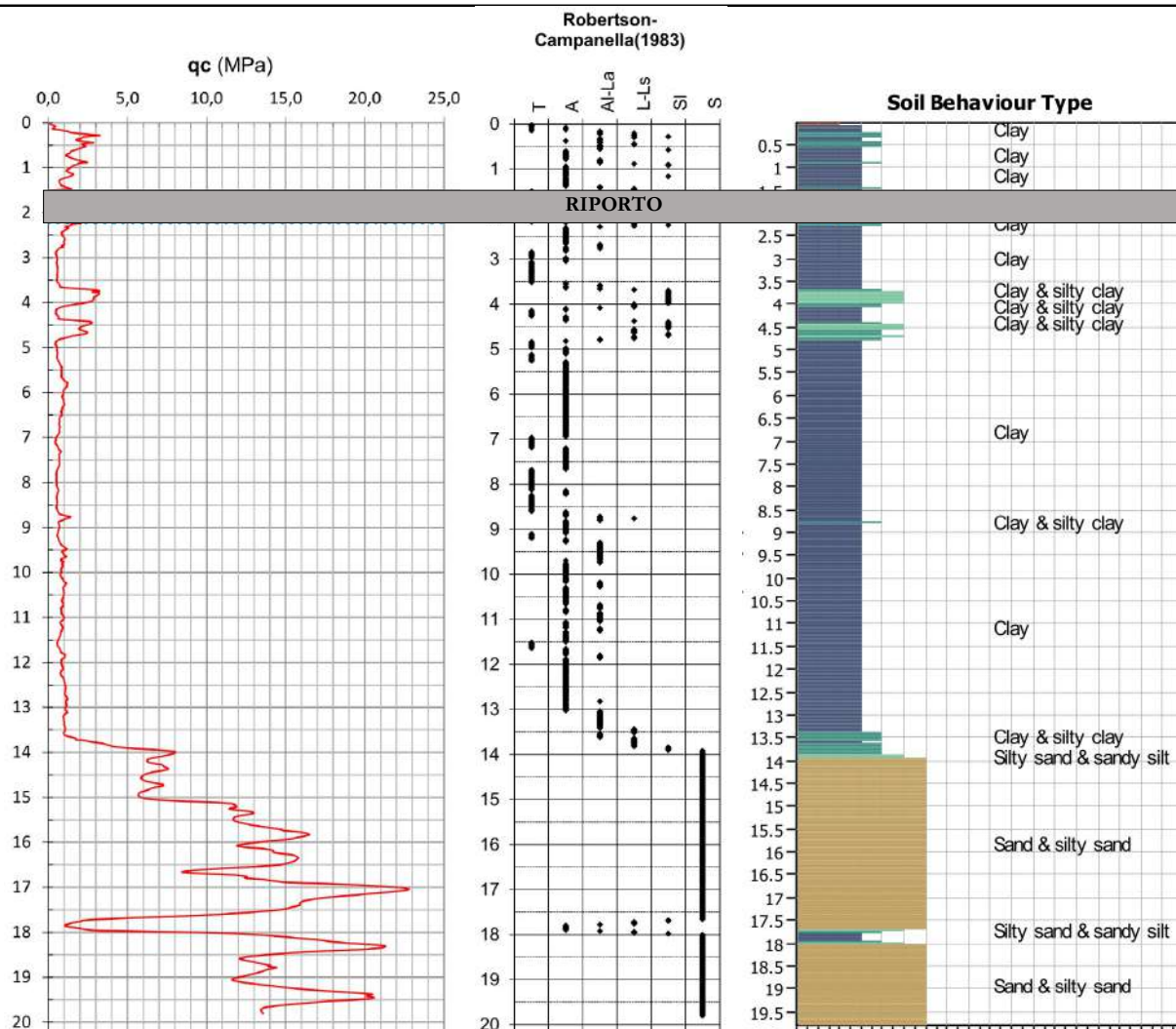
Diagrammi di resistenza e valutazioni litologiche – SCPTU1

Il punto investigato con la prova penetrometrica statica a punta elettrica **SCPTU2** con *rif.* U72-24 rileva:

DA	A	qcm	litol.	consistenza ed addensamento
m	m	MPa	(-)	(-)
0,0	1,5	1,41	Al-La	consistente
1,5	2,2	0,10	RIP	Riporto
2,2	2,8	1,06	Al-La	consistente
2,8	3,6	0,55	A	moderatamente consistente
3,6	4,1	2,23	SI	poco addensata
4,1	4,4	0,69	A	moderatamente consistente
4,4	4,8	2,07	SI	poco addensata
4,8	9,4	0,70	A	moderatamente consistente
9,4	13,7	0,93	Al-La	moderatamente consistente
13,7	15,0	6,05	S	moderatamente addensata
15,0	17,7	13,89	S	addensata
17,7	18,0	2,70	SI	poco addensata
18,0	19,8	15,28	S	addensata

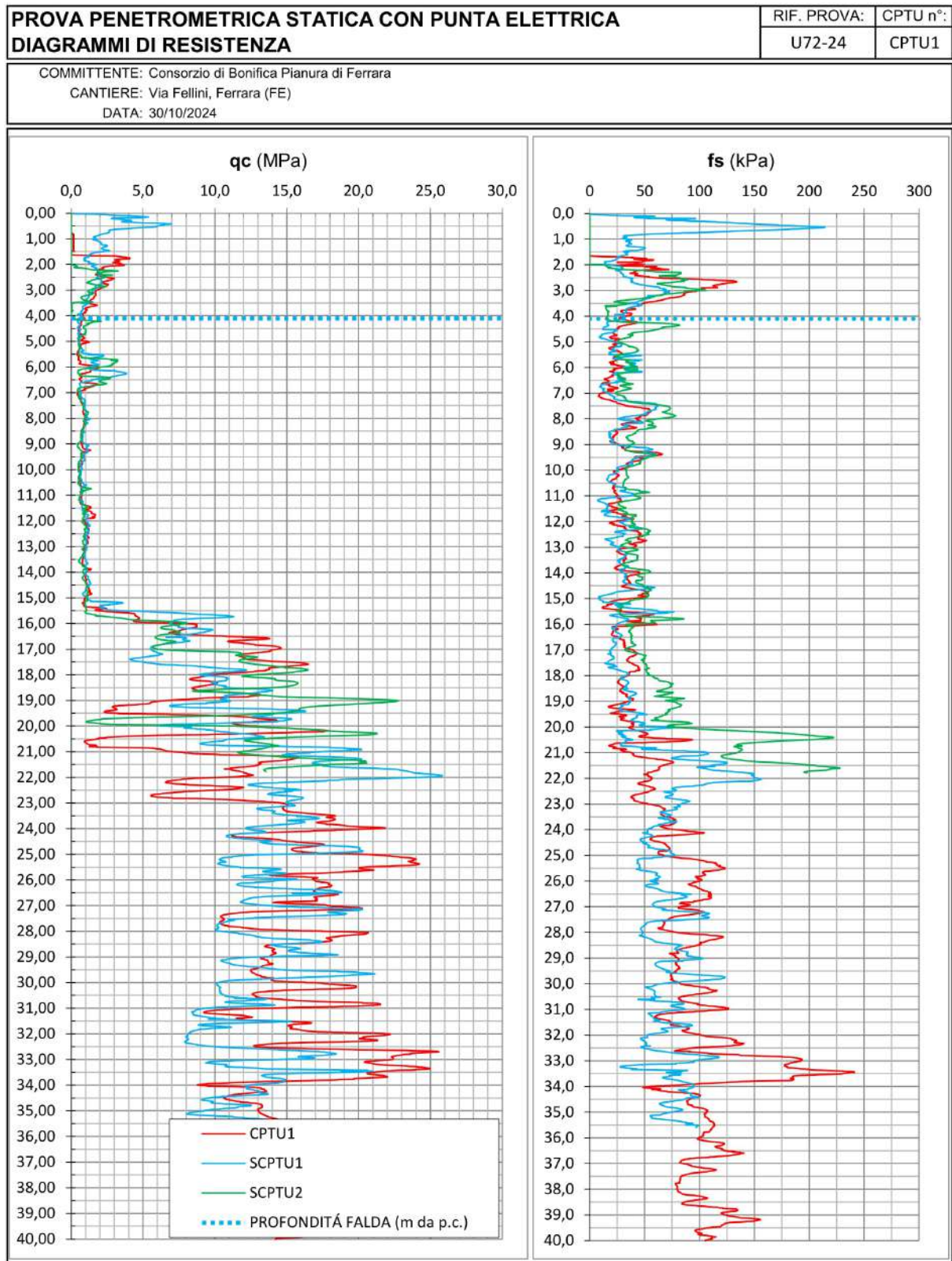
Legenda Litologia

RIP	Riporto
T	Torba
A	Argilla
Al-La	Argilla Limosa - Limo Argilloso
L-Ls	Limo - Limo Sabbioso
SI	Sabbia Limosa
S	Sabbia



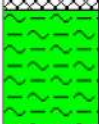
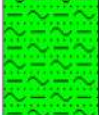
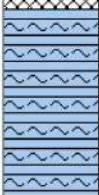
Diagrammi di resistenza e valutazioni litologiche – SCPTU2

Si riporta la sovrapposizione dei diagrammi di resistenza delle prove CPTU, tenendo conto del dislivello che c'è tra i piani campagna di realizzazione delle prove; come si può vedere l'area presenta una buona omogeneità lito-stratigrafica.



Sovrapposizione diagrammi di resistenza CPTU

Si riporta il certificato del sondaggio a carotaggio continuo S1.

Dott. Geol. Thomas Veronese - Via Roma, 10 - 44021 Codigoro (FE)													
SONDAGGIO: S1 DA METRI: 0,0 A METRI: 10,0 Responsabile: Songeo				LUNGHEZZA (m): 30,0 Sonda tipo: Operatore: Songeo			LEGENDA: PROVE S.P.T.: PA Punta aperta - PC Punta chiusa CAMPIONI: S Pareti sottili - O Osterberg - M Mazier R Rimaneggiato - Rs Rimaneggiato da S.P.T. PIEZOMETRI: A Aperto - C Casagrande - E Elettrico PERFORAZIONE: CS Carotiere semplice - CD Carotiere doppio - EC Elica continua STABILIZZAZIONE: RM Rivestimento metallico FB Fanghi bentonitici % CAROTAGGIO — R.Q.D. —						
COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica CANTIERE: Idrovero Cittadino LOCALITA': Ferrara DATA INIZIO: 6-11-2024 DATA FINE: 7-11-2024 QUOTA BOCCAFAORO (m s.l.m.):													
S.P.T. Prof. Tipo Valori	CAMPIONI Prof. Tipo		STRATIGRAFIA E DESCRIZIONE		Prof. (m)	Carot. (%) RQD (%) 20 40 60 80	Pocket Vane Test Test kg/cmq	FALDA Rinv Stab	Piezo- metri	Diam. (mm)	Metodo Perf.ne	Metodo Stab.ne	
				Riporto costituito da argilla limosa sabbiosa mista a macerie con laterizi e sassi									
	1				1,3								
				Argilla limosa sabbiosa consistente	1,5								
				OST1									
	2				2,2								
				Limo argilloso moderatamente consistente di colore nocciola			3,6 1,7 1,3						
	3				3,0								
				OST2									
					3,7								
	4			Limo argilloso moderatamente consistente di colore nocciola	4,1		0,8 1,0 1,3	0,2 0,3 0,4 0,7					
				Argilla limosa moderatamente consistente di colore nocciola	4,5								
				OST3									
	5				5,2								
				Argilla limosa moderatamente consistente di colore grigio verde	5,4		0,9 0,7	0,5 0,2					
				Limo e limo argilloso sabbioso moderatamente consistente di colore grigio verde			0,4	0,1					
	6				6,3								
				Sabbia fine di colore grigio	6,5								
				Limo moderatamente consistente di colore grigio	6,7		0,6 0,8	0,3 0,4					
	7			Argilla limosa moderatamente consistente con resti conchigliari di colore grigio verde	7,5		1,0	0,5					
				OST4									
8				8,2									
			Limo argilloso e argilla limosa moderatamente consistente di colore grigio			0,7 1,2 0,9	0,2 0,5 0,4						
9				9,5									
			Argilla limosa consistente di colore grigio	9,85		1,0 1,0	0,5 0,6						
10													

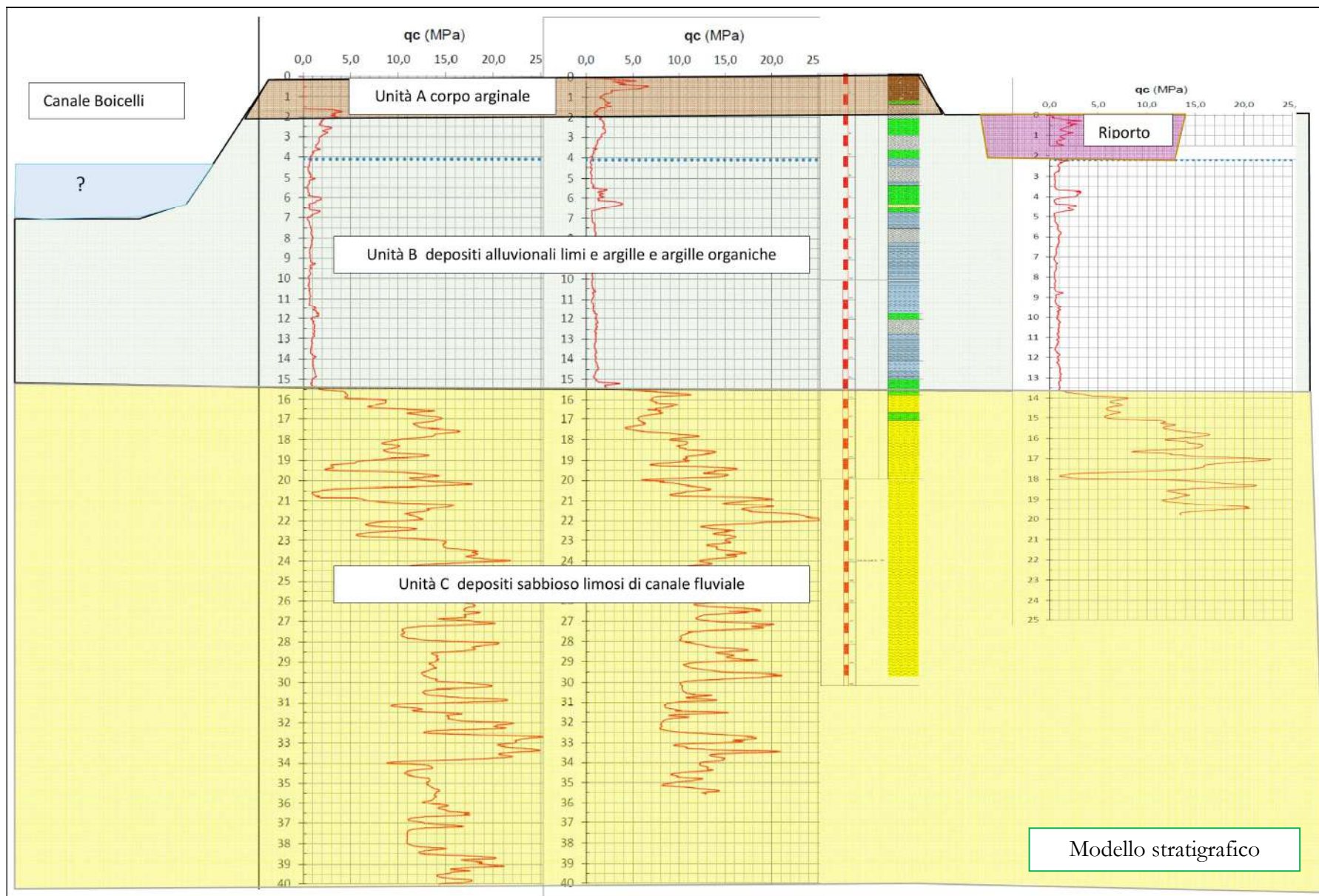
SCHEDA 1 da p.c. a -10 m da p.c. – SONDAGGIO S1

Dott. Geol. Thomas Veronese - Via Roma, 10 - 44021 Codigoro (FE)													
SONDAGGIO: S1				LUNGHEZZA (m): 30,0				LEGENDA:					
DA METRI: 10,0 A METRI: 20,0				Sonda tipo:				PROVE S.P.T.: PA Punta aperta - PC Punta chiusa					
Responsabile: Songeo				Operatore: Songeo				CAMPIONI: S Pareti sottili - O Osterberg - M Mazier					
COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica								R Rimaneggiato - Rs Rimaneggiato da S.P.T.					
CANTIERE: Idroforo Cittadino								PIEZOMETRI: A Aperto - C Casagrande - E Elettrico					
LOCALITA': Ferrara								PERFORAZIONE: CS Carotiere semplice - CD Carotiere doppio - EC Elica continua					
DATA INIZIO: 6-11-2024 DATA FINE: 7-11-2024								STABILIZZAZIONE: RM Rivestimento metallico					
QUOTA BOCCA FORO (m s.l.m.):								FB Fanghi bentonitici					
								% CAROTAGGIO — R.Q.D. —					
S.P.T. Prof. Tipo Valori	CAMPIONI Prof. Tipo	STRATIGRAFIA E DESCRIZIONE		Prof. (m)	Carot. (%) RQD (%) 20 40 60 80	Pocket Test kg/cmq	Vane Test kg/cmq	FALDA Rinv Stab	Piezo- metri	Diam. (mm)	Metodo Perf.ne	Metodo Stab.ne	
			Argilla organica grigio scura nerastra con livelli di torba nera	10,3		1,0	0,6						
			Argilla organica grigia molle con frustoli neri			0,4	0,2						
11						0,2	0,1						
				11,7		0,4	0,2						
						0,7	0,3						
12			Limo di colore grigio	12,0		0,9	0,4						
			OST5										
				12,7									
13			Argilla limosa molle di colore grigio chiaro in alternanza con strati decimetrici di limo debolmente argilloso			1,0	0,5						
						0,9	0,5						
14				14,1		1,2	0,6						
			Argilla organica consistente di colore marrone scuro con strati torbosi	14,6		1,6	0,6						
			Argilla limosa consistente di colore grigio chiaro	15,0		1,1	0,6						
15						1,3	0,5						
			Limo argilloso sabbioso di colore grigio	15,8									
16			Sabbia limosa di colore grigio										
				16,7									
17			Limo sabbioso argilloso e sabbia limosa argillosa di colore grigio	17,1									
18													
19													
20													

SCHEDA 2 da -10 m da p.c. a -20 m da p.c. – SONDAGGIO S1

Dott. Geol. Thomas Veronese - Via Roma, 10 - 44021 Codigoro (FE)													
SONDAGGIO: S1 DA METRI: 20,0 A METRI: 30,0 Responsabile: Songeo					LUNGHEZZA (m): 30,0 Sonda tipo: Operatore: Songeo			LEGENDA: PROVE S.P.T.: PA Punta aperta - PC Punta chiusa CAMPIONI: S Pareti sottili - O Osterberg - M Mazier R Rimaneggiato - Rs Rimaneggiato da S.P.T. PIEZOMETRI: A Aperto - C Casagrande - E Elettrico PERFORAZIONE: CS Carotiere semplice - CD Carotiere doppio - EC Elica continua STABILIZZAZIONE: RM Rivestimento metallico FB Fanghi bentonitici % CAROTAGGIO — R.Q.D. —					
COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica CANTIERE: Idroforo Cittadino LOCALITA': Ferrara DATA INIZIO: 6-11-2024 DATA FINE: 7-11-2024 QUOTA BOCCAFORE (m s.l.m.):													
S.P.T. Prof. Tipo Valori	CAMPIONI Prof. Tipo		STRATIGRAFIA E DESCRIZIONE		Prof. (m)	Carot. (%) RQD (%)	Pocket Test kg/cmq	Vane Test kg/cmq	FALDA Rinv Stab	Piezo- metri	Diam. (mm)	Metodo Perf.ne	Metodo Stab.ne
				Sabbia fine limosa di colore grigio		20 40 60 80							
21													
22													
23													
24	24,0-24,6	R											
25													
26													
27													
28													
29													
30					30,0								

SCHEDA 3 da -20 m da p.c. a -30 m da p.c. – SONDAGGIO S1



2.3. CARATTERI GEOMORFOLOGICI

Generalmente la formazione dei terreni della zona di Ferrara è legata alla presenza di ambienti deposizionali fluviali dovuti al dosso storico del Fiume Po di Ferrara.

A ridosso e sopra i paleoalvei, prevalgono sedimenti di alta energia idrodinamica, caratterizzati da sabbie e limi. Nelle aree più distanti, prevalgono invece sedimenti di bassa energia idrodinamica, quali argille e argille limose.

Il sito allo studio ricade in base alla cartografia all'esterno del tracciato del paleoalveo del Po di Ferrara; le prove CPTU svolte in sito lo confermano, con terreni in prevalenza coesivi.

Si propone nella **FIGURA 2.9** uno stralcio della *Carta geomorfologica di Ferrara*, dove si possono notare le forme geomorfologiche sopra citate; dalla carta emerge come l'area in esame sia posta all'esterno del tracciato del paleoalveo del Po di Ferrara, che attraversa l'abitato di Ferrara da ovest a est.

Le litologie presenti non possono essere definite senza un'indagine puntuale, poiché sedimenti generalmente fini di esondazione fluviale, e sedimenti generalmente più grossolani di alveo, sono stati sovrapposti, rendendo possibile la presenza di sabbie, o limi, o argille, o torbe, o miscele binarie e ternarie degli stessi, senza il rispetto di regole fisse sulla loro presenza e sulla loro distribuzione geometrica.

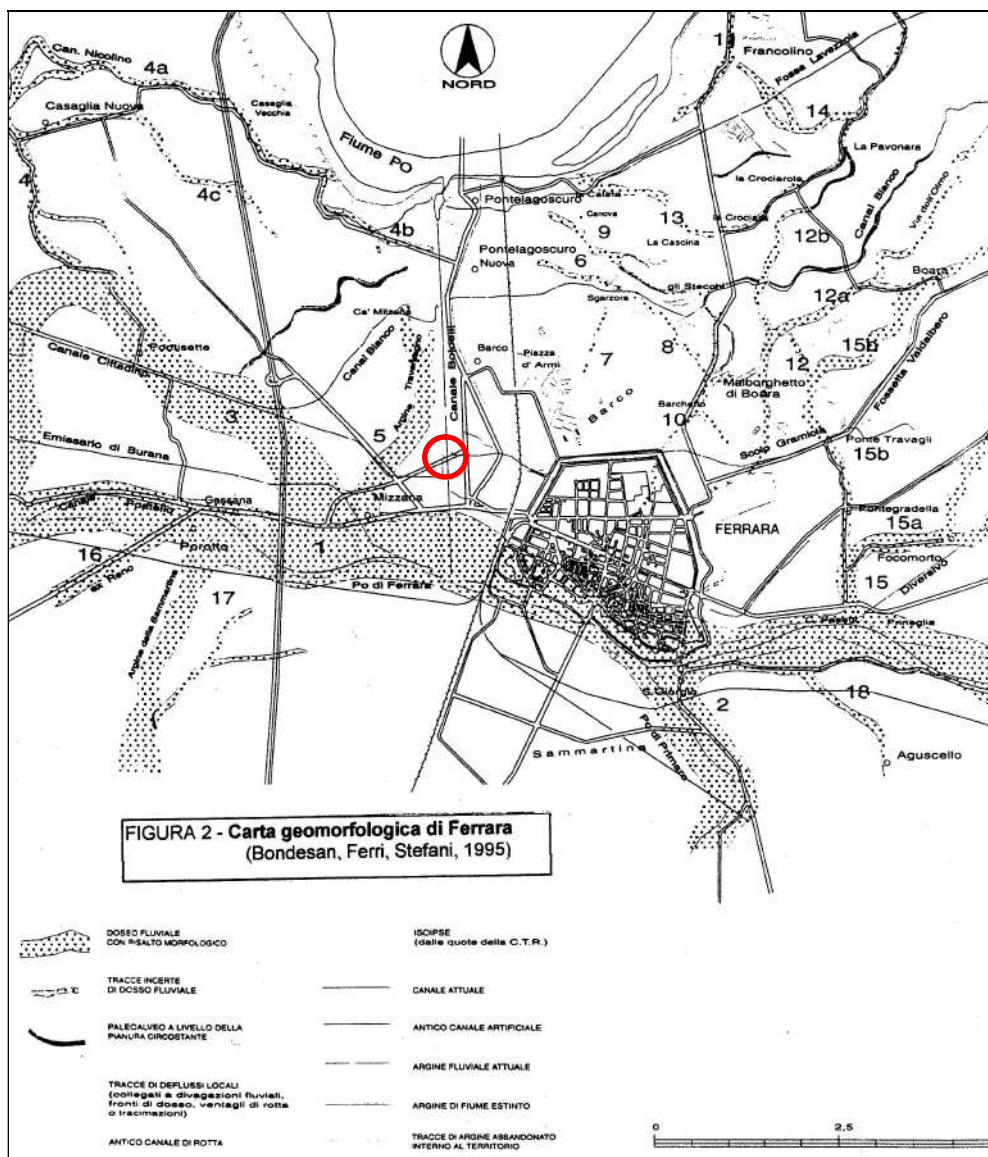
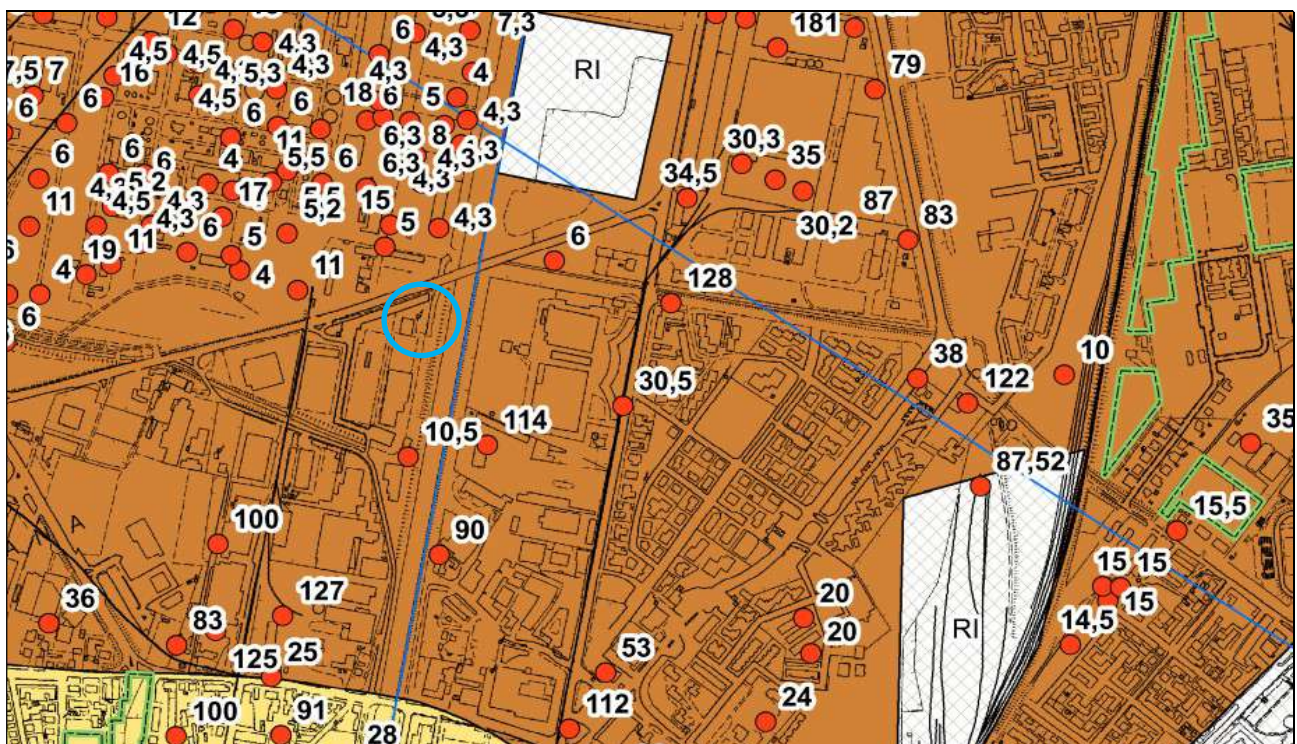
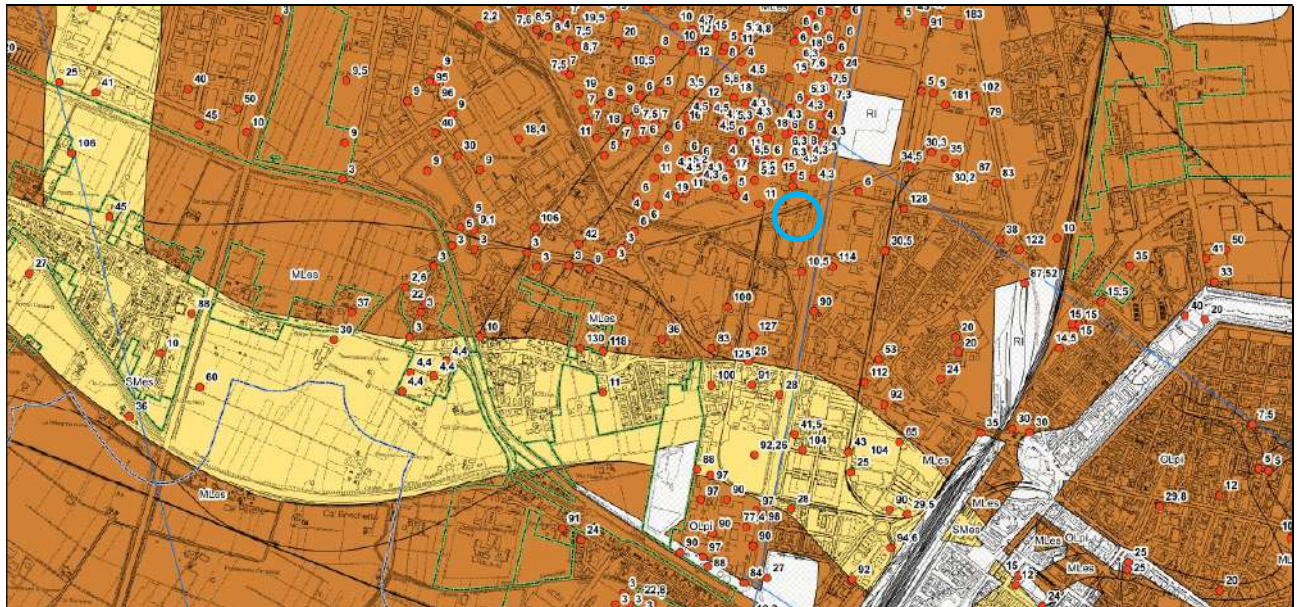


FIGURA 2.9– Carta Geomorfologica del territorio comunale di Ferrara

In **FIGURA 2.10** si riporta una zoomata della carta geologico tecnica della microzonazione sismica del comune di Ferrara con l'ubicazione del sito in esame. Dalla cartografia si evince come l'area allo studio sia fuori dal tracciato del paleoalveo del Po con sedimenti in prevalenza coesivi.

L'area risulta essere posta sul margine tra terreni limosi inorganici, sabbie fini limose o argillose e limi argillosi di bassa plasticità (MLes) e terreni contenenti resti di attività antropica (RI), come si evince dalla prova CPTU2. Potrebbe essere l'area del vallo delle mura, poi riempita.



RI	Terreni contenenti resti di attività antropica
SMes	Sabbie limose, miscela di sabbie e limo di argine e canale
OLpi	Limi organici, argille limose organiche di bassa plasticità di piana inondabile
MLes	Limi inorganici, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità

FIGURA 2.10 – Stralcio della Carta Geomorfologica del territorio comunale di Ferrara

2.4. CARATTERI IDROGEOLOGICI

Nell'area è stata rilevata la quota della superficie di falda all'interno del foro di esecuzione delle prove penetrometriche statiche con punta elettrica CPTU con rif. U72-24. Tale quota è stata rilevata in data 29/10/2024 alla profondità di -2,20 m dal p.c. per la prova SCPTU2, e in data 30/10/2024 a -4,10 m da p.c. per le prove CPTU1 e SCPTU1; si ricorda che la differenza è dovuta alle quote dei p.c. di realizzazione delle prove.

Il livello freatico non è statico, solo un monitoraggio di un anno idrogeologico permetterebbe di valutare le oscillazioni stagionali di queste quote.

2.4.1 PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI (P.G.R.A.)

Il Piano di gestione del rischio di alluvioni (P.G.R.A.) è un Piano introdotto dalla Direttiva comunitaria 2007/60/CE (cd. 'Direttiva Alluvioni') con la finalità di costruire un quadro omogeneo a livello distrettuale per la valutazione e la gestione dei rischi da fenomeni alluvionali, al fine di ridurre le conseguenze negative nei confronti della vita e salute umana, dell'ambiente, del patrimonio culturale, delle attività economiche e delle infrastrutture strategiche.

In base a quanto disposto dal D.Lgs. 49/2010 di recepimento della Direttiva 2007/60/CE, il PGRA, alla stregua dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI), è stralcio del Piano di Bacino ed ha valore di piano sovraordinato rispetto alla pianificazione territoriale e urbanistica. Alla scala di intero distretto, il PGRA agisce in sinergia con i PAI vigenti.

Il bacino del Burana-Po di Volano, ad oggi, non ha un suo piano di gestione del rischio alluvione.

Il territorio in esame è interamente compreso nella Unit of Management (UoM) ITN008 – Bacino Po (FIGURA 2.11).

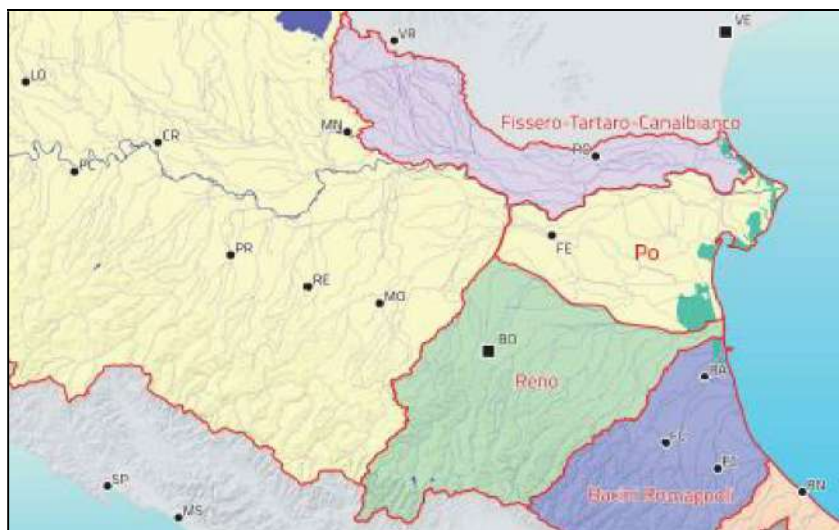


FIGURA 2.11 - Unit of Management (UoM) del Distretto Idrografico del fiume Po

Il territorio comunale in esame, è interessato da due scenari di pericolosità idraulica, derivanti dal Reticolo Principale (R.P.) e dal Reticolo Secondario di Pianura (R.S.P.).

In particolare, il territorio comunale ricade interamente nello scenario L-P1 per quanto riguarda l'ambito R.P. (Reticolo Principale) del Distretto Po.

In **FIGURA 2.12** si riporta uno stralcio della *Mappa di pericolosità e del rischio alluvioni 2022* della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE – Secondo Ciclo del Reticolo Principale con la mappa della pericolosità e degli elementi esposti della Direttiva Alluvioni del Distretto Po.

L'area allo studio è in fascia P1, alluvioni rare, con bassa probabilità di accadimento e tempo di ritorno fino a 200/500 anni.

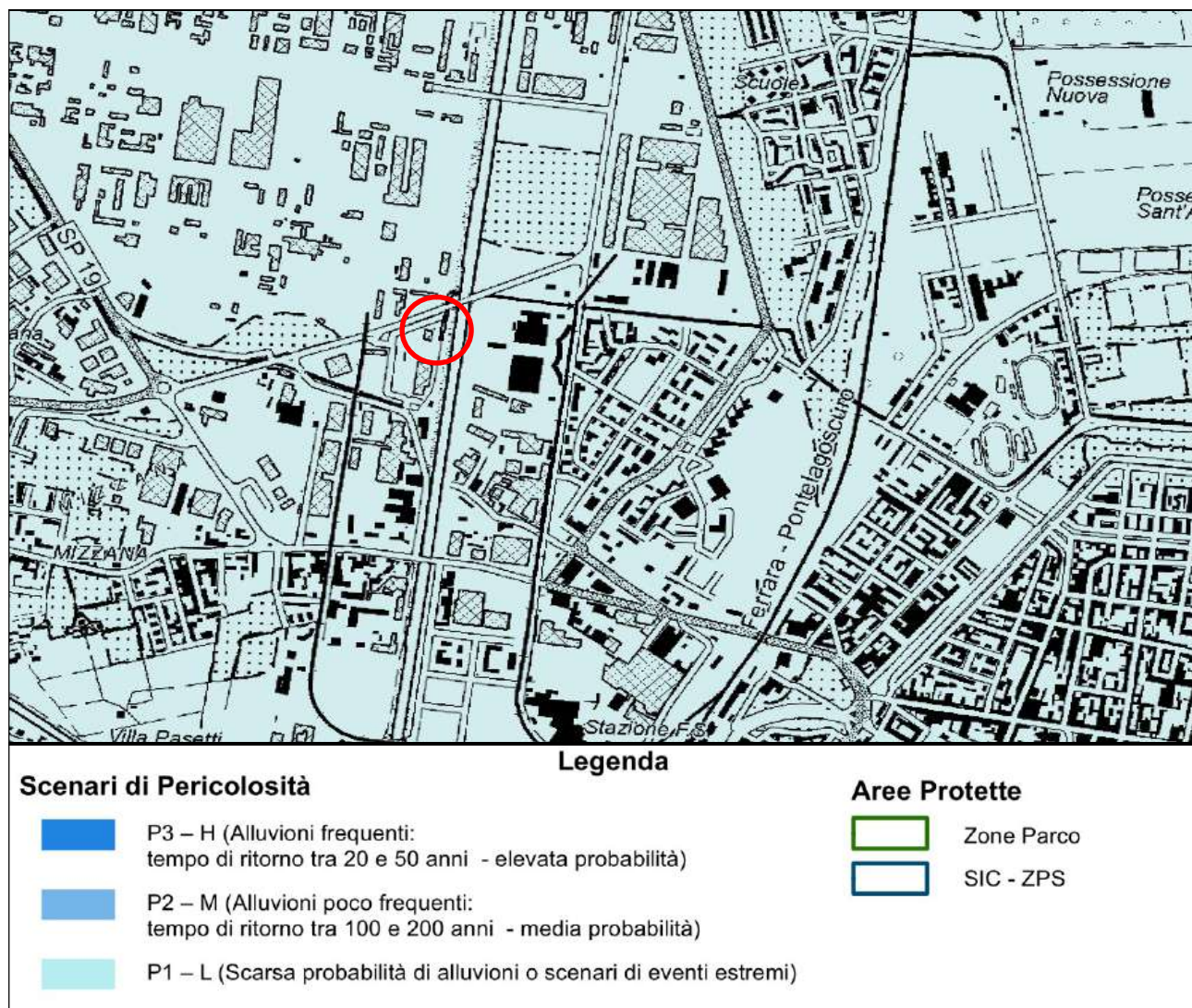


FIGURA 2.12 – Mappa della pericolosità idraulica da Reticolo Principale di Pianura - UoM del fiume Po ITN008.

Per quanto riguarda l'ambito R.S.P. (Reticolo Secondario di Pianura) del Bacino Po, il territorio in esame risulta essere interamente interessato dallo scenario M-P2 per tutta la sua estensione.

In **FIGURA 2.13** si riporta uno stralcio della *Mappa di pericolosità e del rischio alluvioni 2022* della Direttiva Alluvioni 2007/60/CE – Secondo Ciclo del Reticolo Secondario di Pianura con la mappa della pericolosità e degli elementi esposti della Direttiva Alluvioni, ovvero dai corsi d'acqua minori, per lo più artificiali, legati al sistema della bonifica.

L'area allo studio è in fascia P2, alluvioni poco frequenti, con media probabilità di accadimento e tempo di ritorno fino a 100/200 anni.

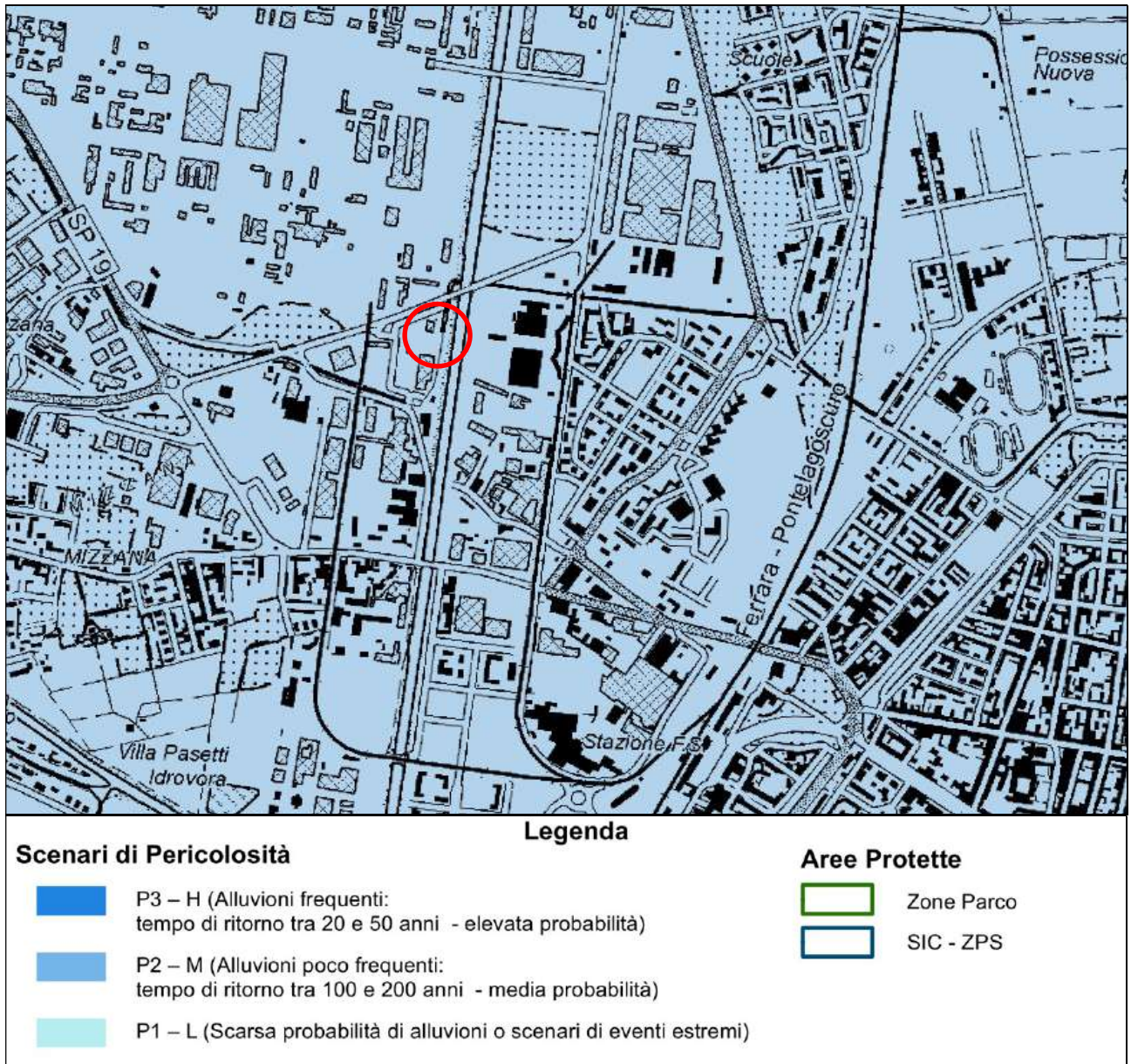


FIGURA 2.13– Mappa della pericolosità idraulica da Reticolo Secondario di Pianura - UoM del fiume Po ITN008.

Pur non ricadendo nella UoM ITI021 - Bacino Reno, l'area è lambita anche dalle alluvioni del Fiume Reno per quanto riguarda il Reticolo Principale di Pianura ed in particolare dallo scenario M-P2, alluvioni poco frequenti, come riportato in **FIGURA 2.14**.

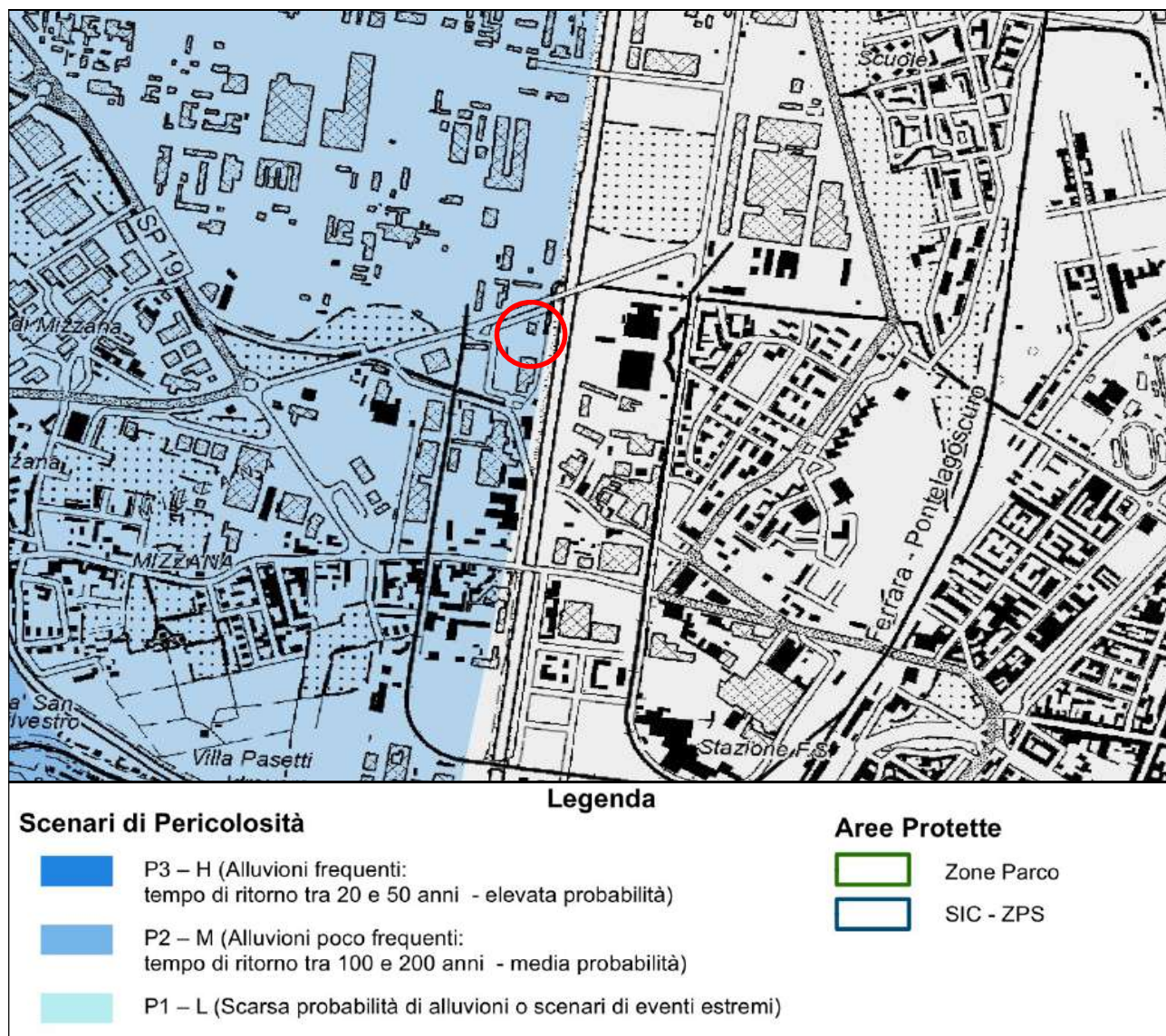


FIGURA 2.14 – Mappa della pericolosità idraulica da Reticolo Principale di Pianura - UoM ITI021-Bacino Reno.

3. DEFINIZIONE DEI PARAMETRI SISMICI

3.1. DATI DI AUSILIO PER LA PROGETTAZIONE SISMICA

“La Regione Emilia Romagna non è esente da attività sismo-tettonica. La sua sismicità può però essere definita media relativamente alla sismicità nazionale, poiché i terremoti storici hanno avuto magnitudo massima compresa tra 5,5 e 6 della scala Richter e intensità del IX-X grado della scala MCS. I maggiori terremoti (Magnitudo > 5,5) si sono verificati nel settore sud-orientale, in particolare nell’Appennino Romagnolo e lungo la costa riminese. Altri settori interessati da sismicità frequente ma **generalmente di minore energia (Magnitudo ≤ 5,5)** sono il margine appenninico-padano tra la Val d’Arda e Bologna, l’arco della dorsale ferrarese e il crinale appenninico” (Note illustrative, Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna, 2004).

Gli eventi del maggio 2012 hanno avuto magnitudo M_L massima 5,90.

Categoria di suolo di fondazione

La categoria di suolo dipende dal valore di V_{s30} . Il parametro V_{s30} rappresenta la media ponderata dei valori delle velocità dell’onda di taglio “S” nei primi 30 m di sottosuolo indagato, matematicamente espressa da (eq. 1):

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{v_i}}$$

dove,

V_{s30} : velocità media ponderata delle onde di taglio “S”,

h_i : spessore dello strato i -esimo,

V_i : velocità delle onde di taglio “S” nello strato i -esimo.

Il valore di V_{s30} è stato rilevato attraverso misure dirette mediante la realizzazione di una prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono sismico SCPTU1 con *rif. U72-24*, spinta fino alla profondità di -35,00 m da p.c..

Si ricorda che la V_{s30} va calcolata dal piano di posa della fondazione.

In **FIGURA 3.1** è riportata una ortofoto con l'ubicazione della prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono sismico SCPTU1.

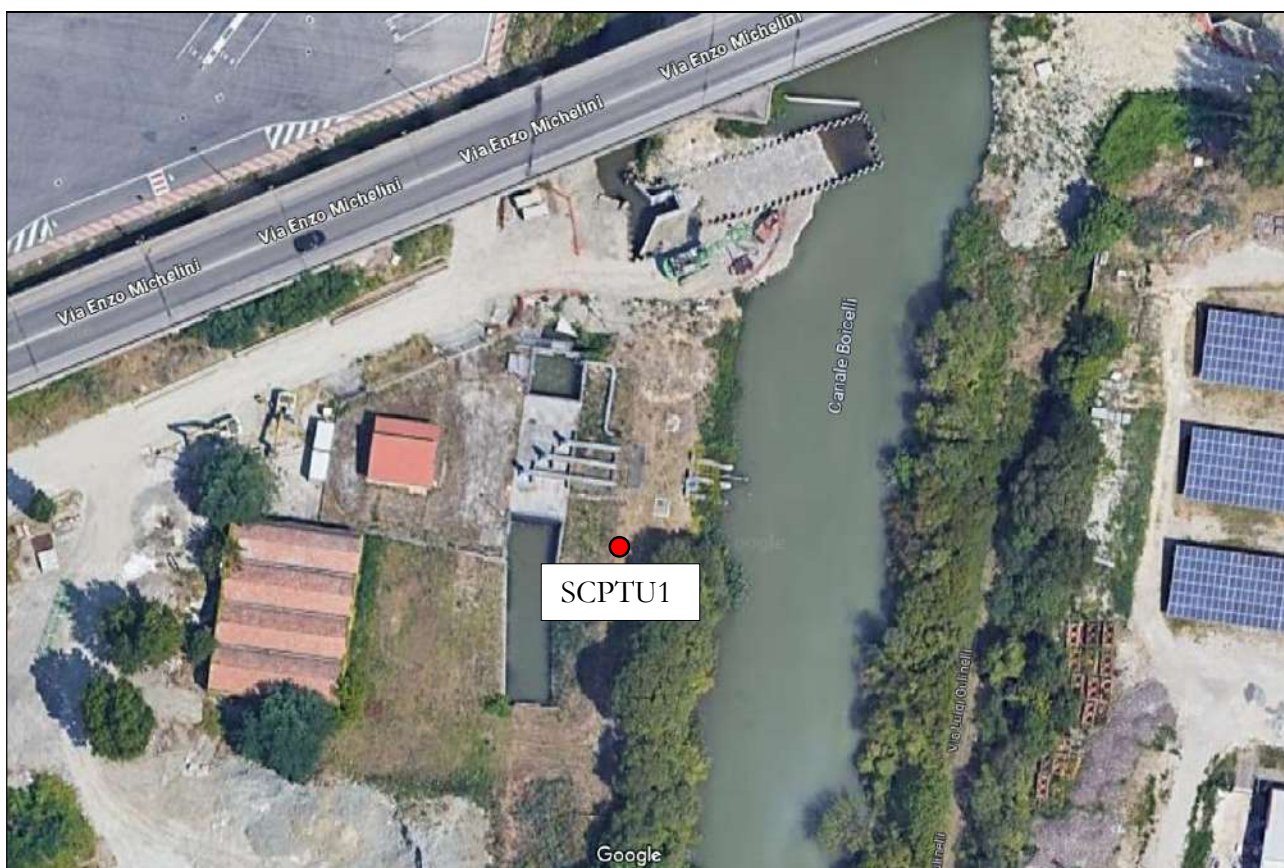


FIGURA 3.1 – Ubicazione prova SCPTU1

La prova SCPTU consiste nell'inserire sulla punta elettrica della prova penetrometrica elettrica dei ricevitori (geofoni) che con opportuna strumentazione e una sorgente di onde in superficie possono essere misurati, a profondità diverse, in questo caso ad ogni metro di profondità, i tempi di arrivo delle onde sismiche fra la superficie (sorgente) ed i ricevitori (in profondità), analogamente a quanto avviene con il metodo geofisico cosiddetto “downhole”.

La punta utilizzata prende il nome di Piezocono G1-CPL2IN (**FIGURA 3.2**).

In base ai tempi di arrivo conoscendo la distanza tra la sorgente ed il ricevitore si può calcolare la velocità delle onde sismiche ed in particolare delle onde di taglio (V_s).

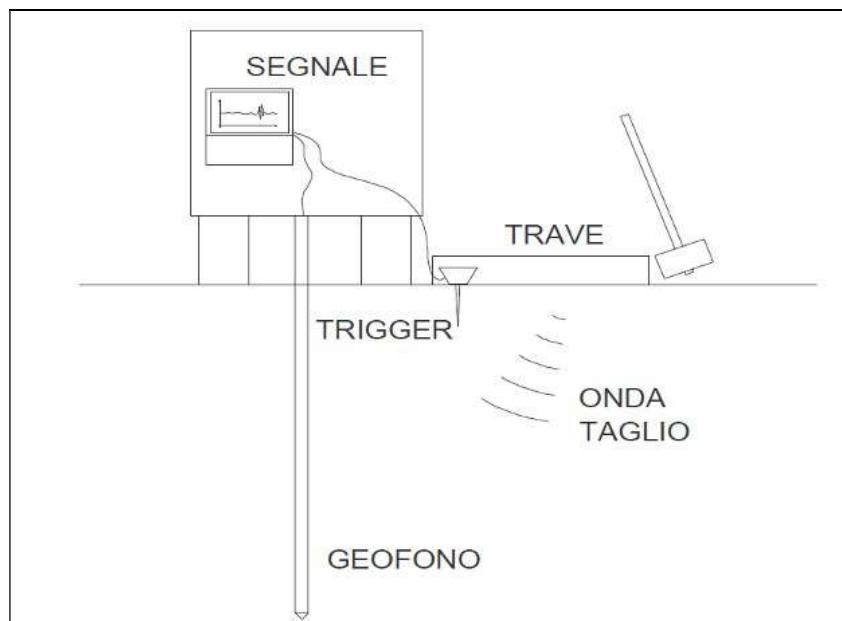
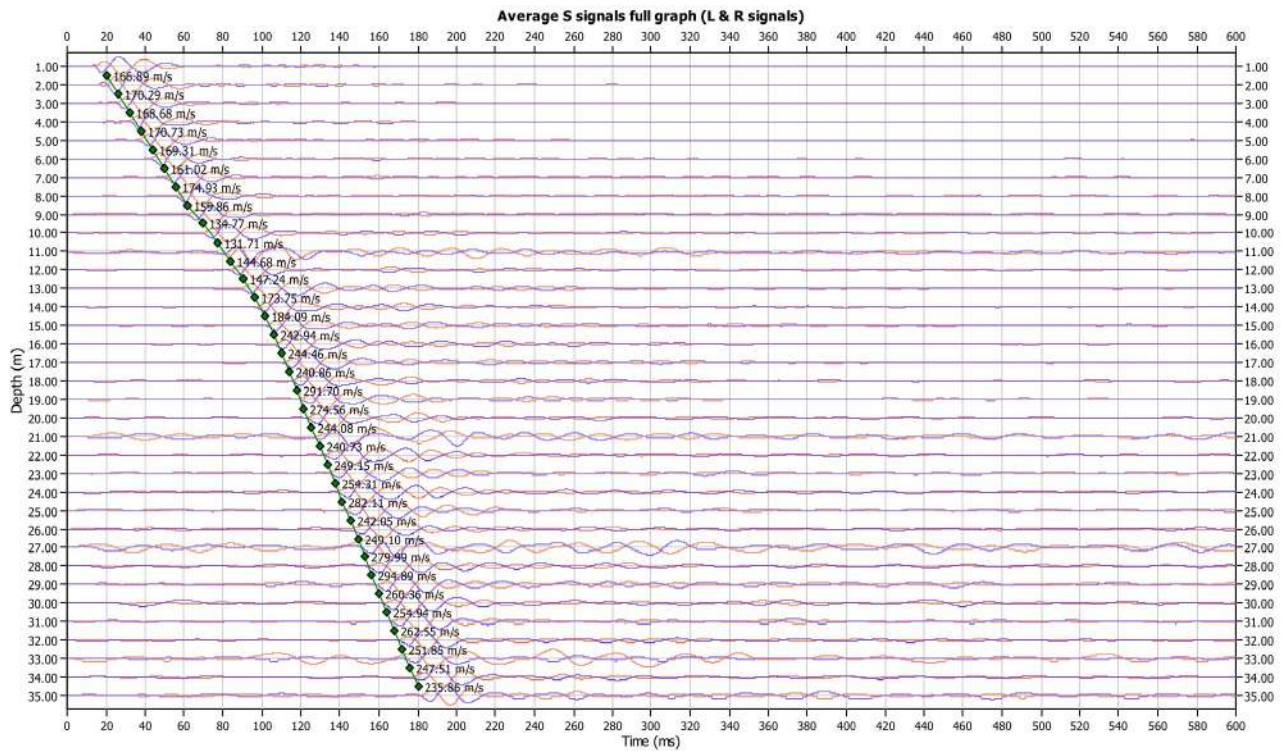
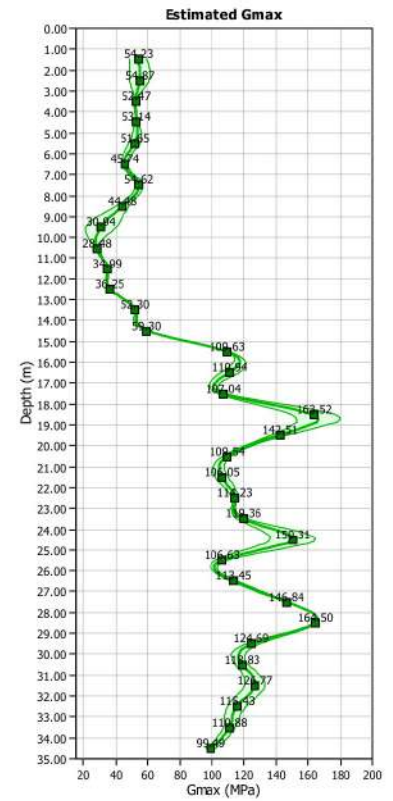
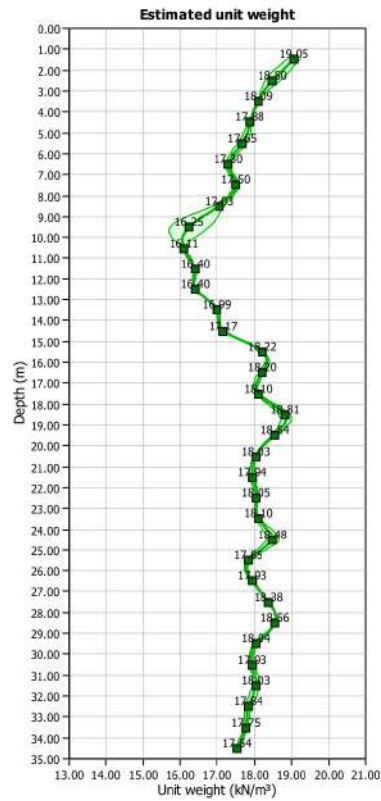
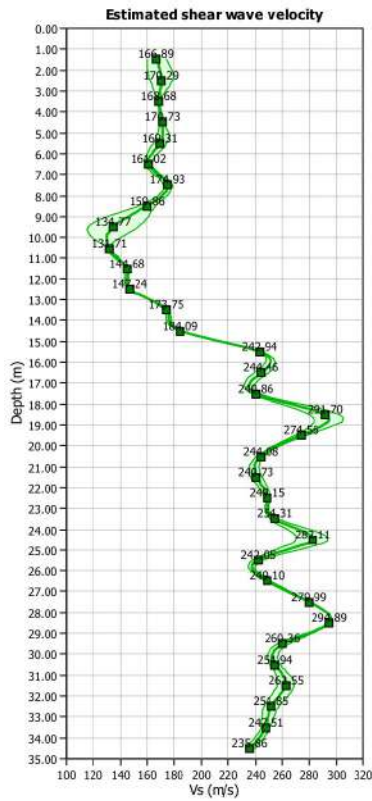


FIGURA 3.2 – Rappresentazione grafica della prova penetrometrica con piezocono sismico

Durante la realizzazione delle prove penetrometriche statiche con punta elettrica e sismocono SCPTU1 sono state realizzate letture dirette dei tempi di arrivo delle onde di taglio S ad intervalli regolari fino alla profondità di -35,0 m da p.c..

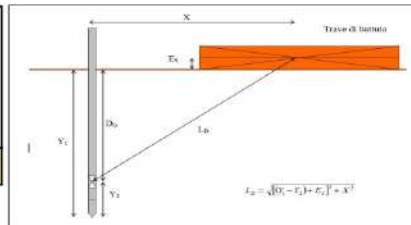
Attraverso questo strumento è possibile determinare la velocità di propagazione delle onde S alla profondità di 30 metri (V_{s30}).

Si riporta l'elaborazione della prova SCPTU svolta in sito dalla ditta Servizi geologici S.r.l. con la rappresentazione del profilo verticale della velocità delle onde di taglio S ad ogni metro di profondità e la categoria di suolo di fondazione (ricavata attraverso il profilo di V_s sito specifico fino alla profondità di -35 m da p.c.).

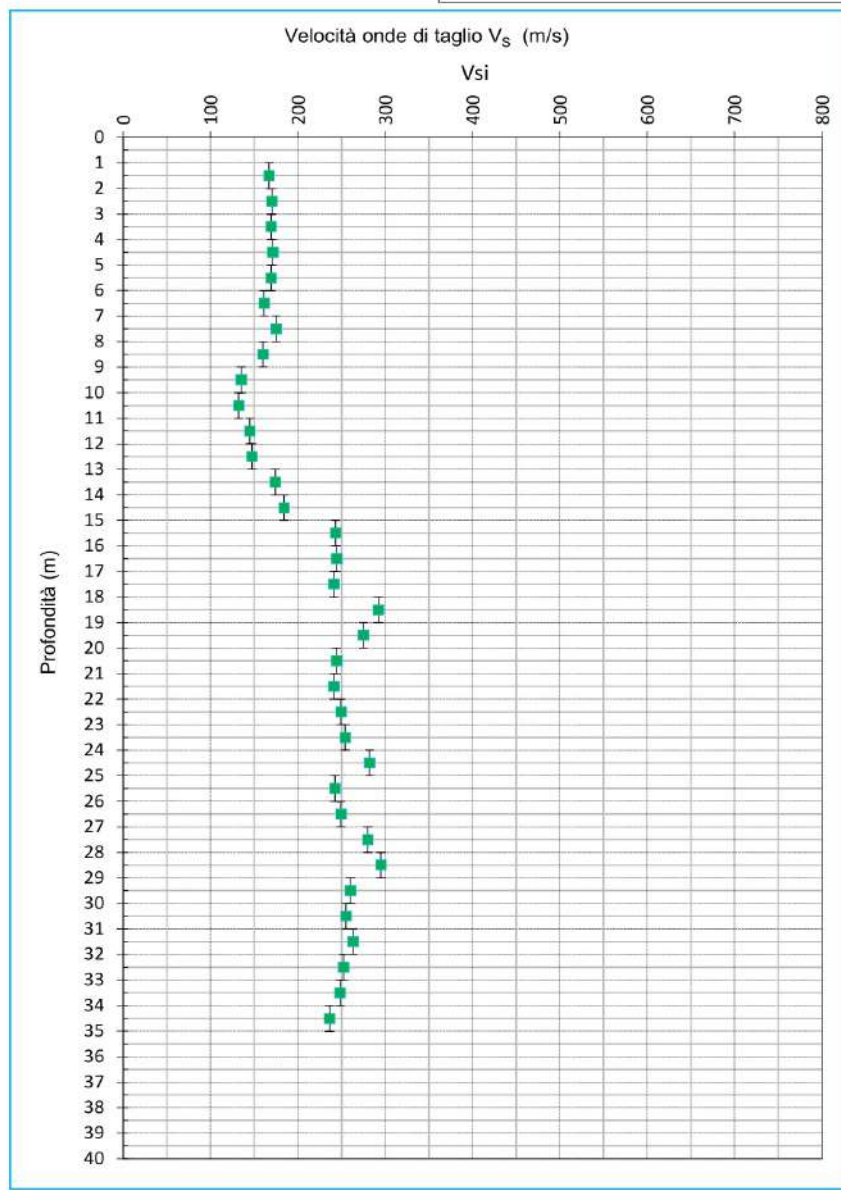


Peso mazza battente: 5Kg
Ricevitore Down Hole: G1-cpl2IN
Equipaggiamento di registrazione: D1-SISMI USB
Distanza centro sorgente-verticale X: 0,25 m
Distanza punta-accelerometro Y₂: 0,20 m

V_{s30} = 197 m/sec Categoria suolo di fondazione = C



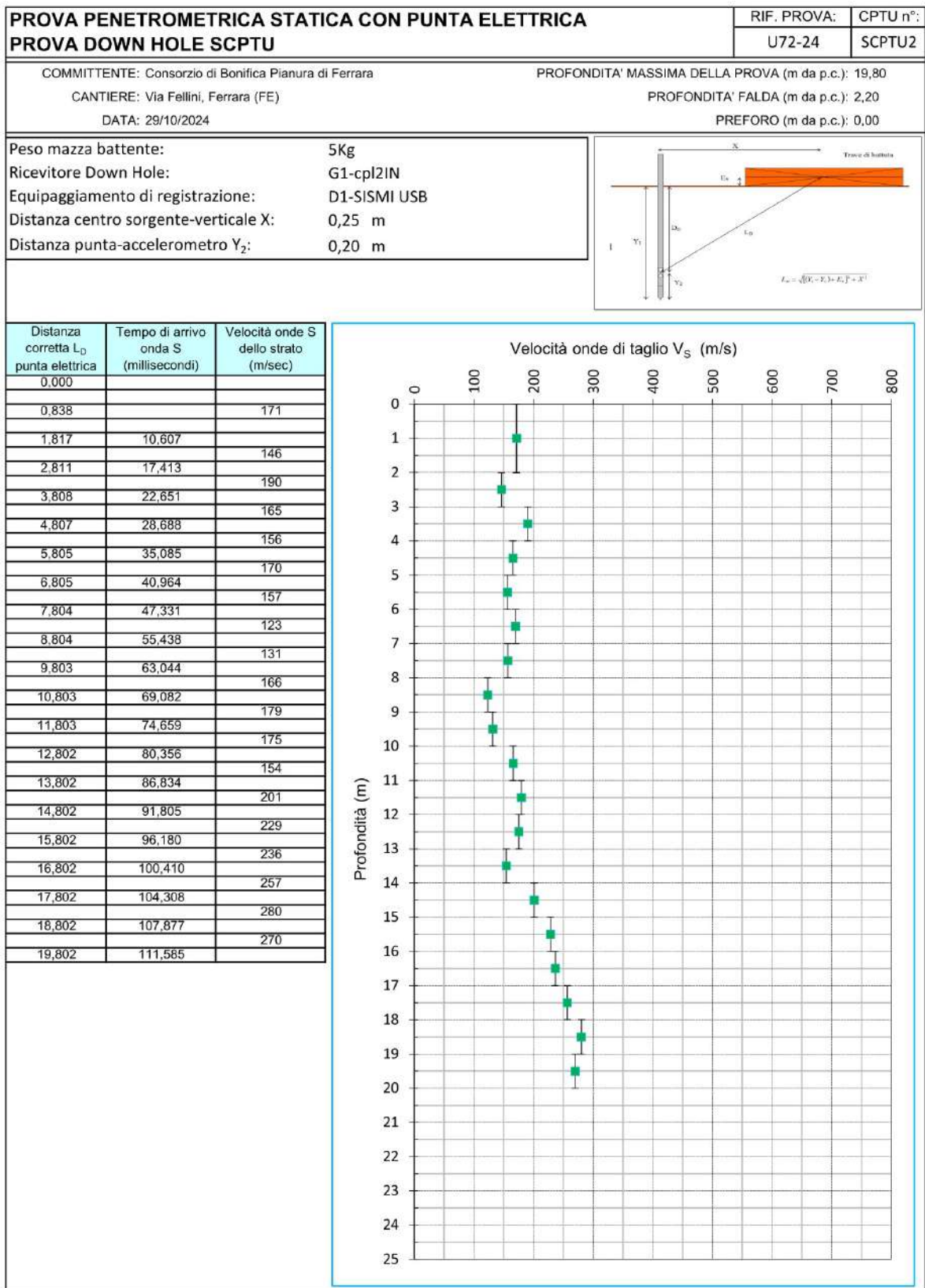
Profondità (m)	Velocità onde S dello strato (m/sec)
1,500	167
2,500	170
3,500	169
4,500	171
5,500	169
6,500	161
7,500	175
8,500	160
9,500	135
10,500	132
11,500	145
12,500	147
13,500	174
14,500	184
15,500	243
16,500	244
17,500	241
18,500	292
19,500	275
20,500	244
21,500	241
22,500	249
23,500	254
24,500	282
25,500	242
26,500	249
27,500	280
28,500	295
29,500	260
30,500	255
31,500	263
32,500	252
33,500	248
34,500	236
35,500	



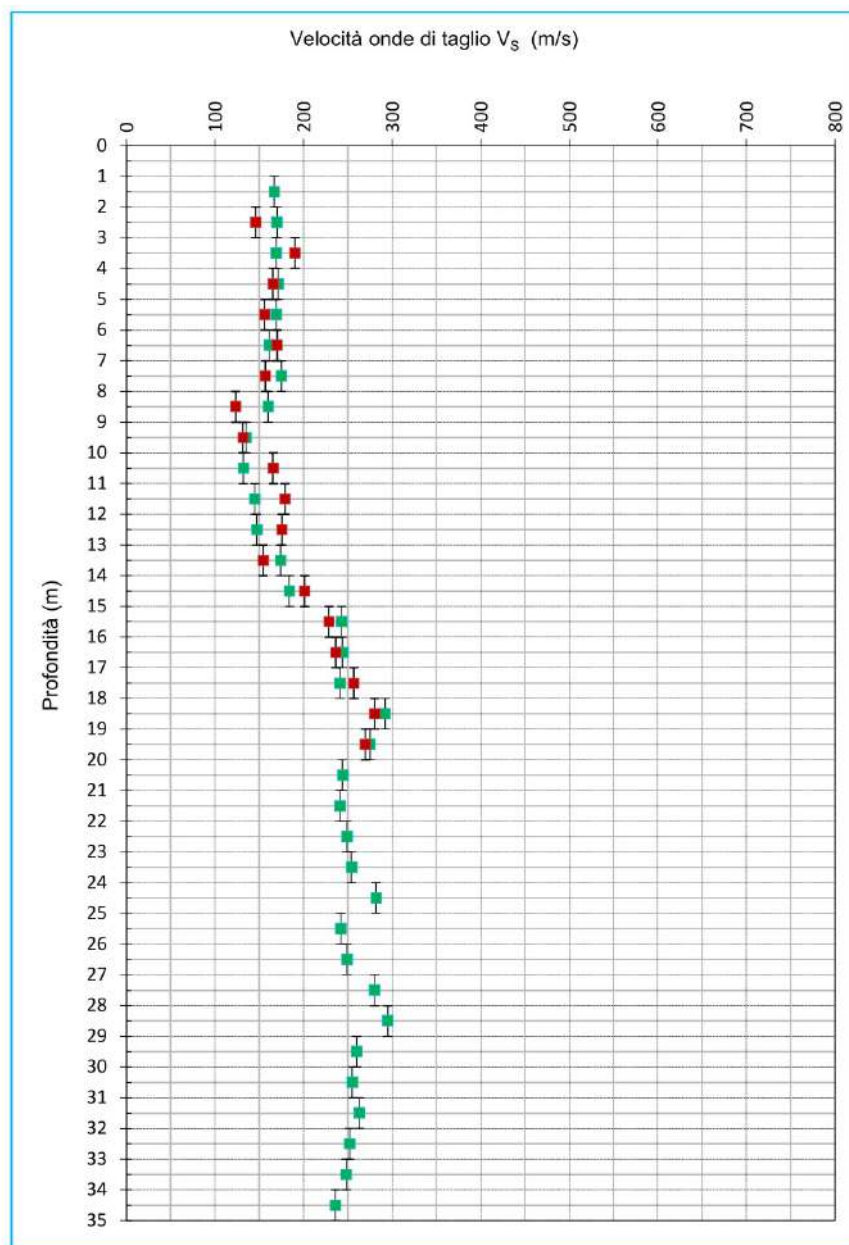
Il valore di V_{s30} risultante dalla lettura dei tempi di arrivo delle onde S alla profondità di 30,00 m da p.c. è di 197 m/s e quindi la Categoria di suolo di fondazione è C.

V_{s30} = 197 m/s Categoria di suolo C

Si riporta inoltre anche il profilo di Vs misurato con la prova penetrometrica statica con punta elettrica e piezocono sismico SCPTU2 con *rif.* U72-24, spinta fino alla profondità di -20,00 m da p.c..



Vengono dunque sovrapposti i profili di Vs ottenuti con le due prove SCPTU da cui si evince la buona coerenza coi dati ottenuti.



È stata inoltre commissionata alla ditta Teamgeofisica una indagine sismica di superficie consistente in una prova E.S.A.C. e n. 2 prove dei microtemori H.V.S.R., per la determinazione della sequenza sismica delle onde di taglio lungo un profilo sismico. Si rimanda alla relazione geofisica allegata, il dettaglio sulle modalità di acquisizione.

Le prove geofisiche ESAC sono caratterizzate con l'applicazione della tecnica dei microtemori (Autocorrelazione Spaziale Migliorato "ESAC") che permette di ottenere con minor costo di processo il profilo verticale della velocità media delle onde di taglio "S" e contemporaneamente di raggiungere profondità superiori a 30 m favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock sismico - così come definito dalla normativa ($V_s > 800$ m/s) - coadiuvando contemporaneamente l'interpretazione delle eventuali variazioni di rigidità sismica ($V_s^2 \times \rho$) dei terreni investigati.

Attraverso l'analisi delle onde superficiali "tipo Rayleigh R", che costituiscono un particolare tipo di onde superficiali trasmesse sulla superficie libera di un mezzo omogeneo ed isotropo, si ricava indirettamente la velocità delle onde di taglio "S" secondo l'equazione

$$V_R = \left(\frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \right) \times V_S$$

Dove:

$$V_R \cong 0.92 V_S$$

V_R : velocità di fase dell'onde Rayleigh

V_S : velocità di propagazione dell'onda di taglio

ρ : rapporto di Poisson

L'analisi delle tracce sismiche registrate è consistita nell'applicazione di una trasformata bi-dimensionale di tipo p - f (p =slowness "1/velocità"- f =frequenza "Hz"/McMechan e Yedlin, 1981) che analizza la variazione nel tempo dell'energia di propagazione del segnale sismico lungo tutte le direzioni rispetto alla linea sismica. Il risultato di tale analisi rappresenta il cosiddetto spettro di potenza da cui si ottiene in prima battuta la curva di dispersione sperimentale delle onde "R" e successivamente, attraverso una procedura di modellazione numerica, la determinazione delle velocità delle onde di taglio "S".

In **FIGURA 3.3** è riportata una ortofoto con l'ubicazione della prova E.S.A.C. e delle 2 prove H.V.S.R. eseguite in sito.



FIGURA 3.3 – Ubicazione prova ESAC e HVSR

Il modello sismico VS ottenuto dall'interpretazione quantitativa della curva di dispersione e riportata in **FIGURA 3.4**. Il modello numerico fino a 300 metri è riportato in **Tabella 3.1**.

Il modello sismico così ottenuto non ha raggiunto valori attribuibili a substrato sismico ($V_s \geq 800$ m/s). I valori di "Vs", del modello sismico ottenuto, risultano essere compresi tra 134 m/s e 461 m/s.

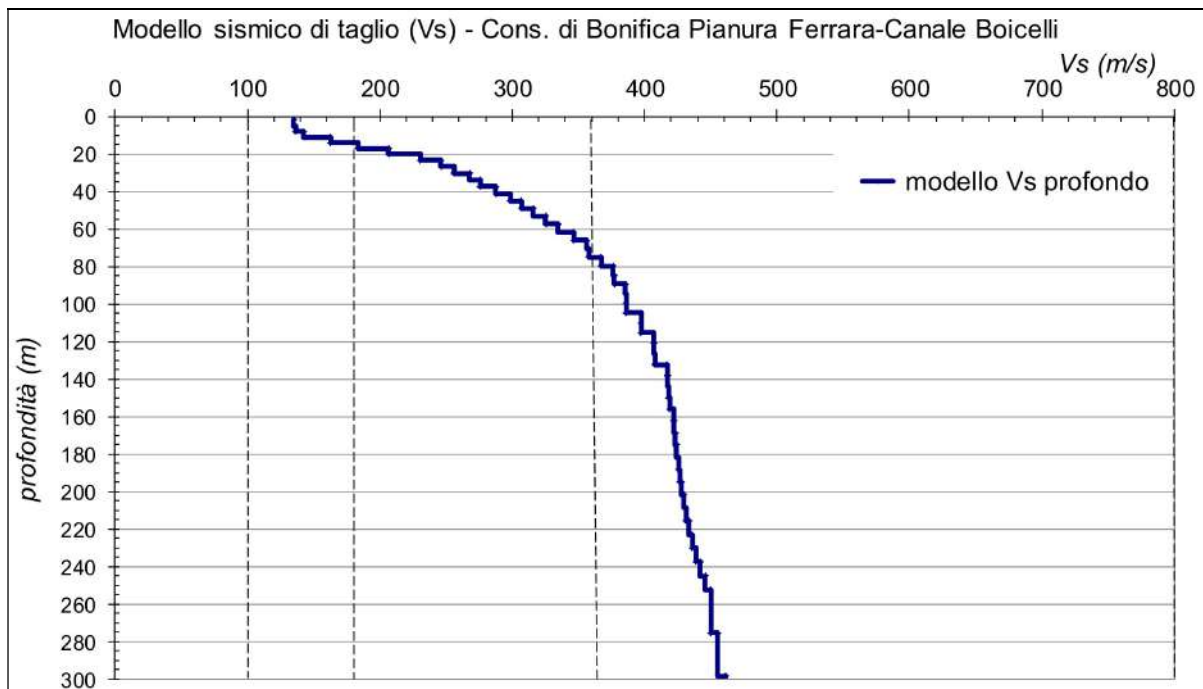


FIGURA 3.4 - Il profilo verticale VS ottenuto per l'area indagata dal profilo sismico.

ESAC-01	PROFILO sismico fino a 270 metri		
Sismo-strato	Profondità letto (m)	Velocità (m/s)	Spessore (m)
1	1.5	134.9	0.0
2	5.2	136.4	3.7
3	8.0	142.6	2.8
4	10.8	162.8	2.9
5	13.8	183.5	3.0
6	16.8	206.8	3.1
7	20.0	230.7	3.2
8	23.2	246.1	3.3
9	26.6	255.9	3.4
10	30.1	267.7	3.5
11	33.6	275.9	3.6
12	37.3	287.4	3.7
13	41.1	298.5	3.8
14	45.0	306.7	3.9
15	48.9	315.7	4.0
16	53.0	325.1	4.1
17	57.2	334.5	4.2
18	61.5	346.3	4.3
19	65.9	356.2	4.4
20	70.4	357.7	4.5
21	74.9	367.1	4.6
22	79.6	376.2	4.7
23	84.4	376.8	4.8
24	89.3	385.6	4.9
25	94.3	385.9	5.0

ESAC-01	Profondità letto (m)	Velocità (m/s)	Spessore (m)
Sismo-strato			
26	99.4	386.2	5.1
27	104.6	397.1	5.2
28	109.9	397.4	5.3
29	115.3	406.8	5.4
30	120.8	407.1	5.5
31	126.4	407.4	5.6
32	132.1	417.1	5.7
33	138.0	417.5	5.8
34	143.9	418.1	5.9
35	149.9	418.7	6.0
36	156.0	421.6	6.1
37	162.2	422.4	6.2
38	168.5	423.3	6.3
39	175.0	424.3	6.4
40	181.5	425.4	6.5
41	188.1	426.6	6.6
42	194.8	428.0	6.7
43	201.7	429.6	6.8
44	208.6	431.4	6.9
45	215.6	433.5	7.0
46	222.8	435.8	7.1
47	230.0	438.6	7.2
48	237.4	441.8	7.3
49	244.8	445.6	7.4
50	99.4	386.2	5.1
51	104.6	397.1	5.2
52	109.9	397.4	5.3
53	115.3	406.8	5.4
54	120.8	407.1	5.5

Parametri sismici secondo "D.M. 17 gennaio 2018"

La classificazione sismica introdotta dall'OPCM 3519/2006, recepita dal D.M. 17/01/2018, attribuisce a questa zona del comune di Ferrara un valore di accelerazione massima orizzontale di picco al suolo appartenente agli intervalli 0,125g – 0,150g, con $T=0$, su suolo rigido ($V_{s30}>800\text{m/sec}$) e con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni. Secondo il vigente D.M., gli spettri di risposta rappresentano delle componenti (orizzontale e verticale) delle azioni sismiche di progetto di un generico sito del territorio nazionale.

In **FIGURA 3.5**, si riporta un particolare della mappa di pericolosità sismica redatta dall'INGV, secondo la Tabella 1, allegata alle Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, recepito dal D.M. 2018.

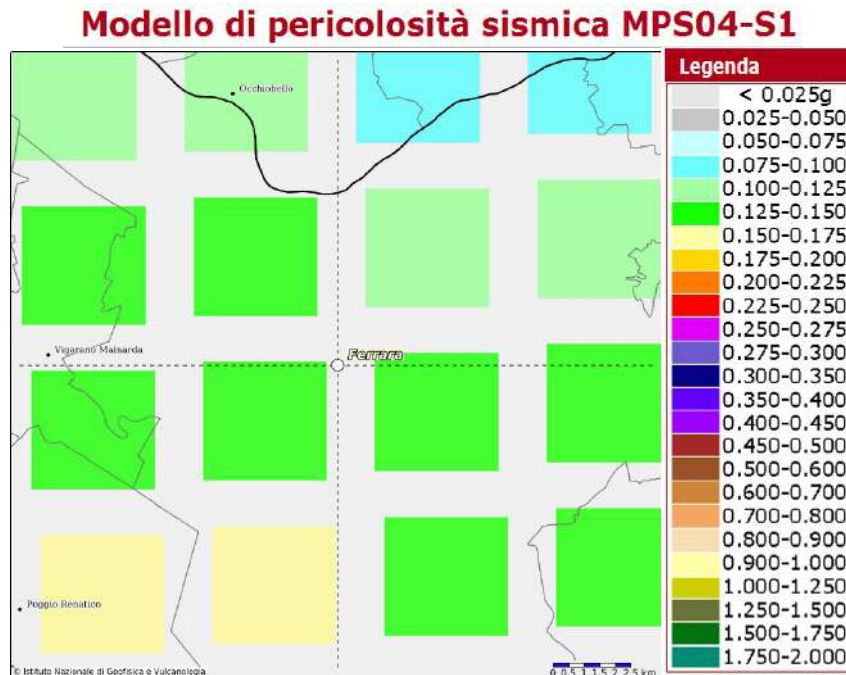


FIGURA 3.5 – carta pericolosità sismica, da progetto DCP – INGV – S1. fonte: <http://esse1-gis.mi.ingv.it>

Per la scelta della strategia di progettazione, il progettista procede in funzione delle caratteristiche dell'opera progettata e definisce lo spettro di risposta. Ai fini della normativa, *le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:*

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_o valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T^*_C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

In allegato alla norma per tutti i siti italiani, sono forniti i valori di a_g , F_o e T^*_C necessari per la determinazione delle azioni sismiche.

Nella **Tabella 3.2** tratta dalla normativa si riportano i valori di probabilità di superamento per i diversi stati limiti a cui si può spingere la progettazione.

Stati Limite		P_{VR} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 3.2 - Probabilità di superamento P_{VR} al variare dello stato limite considerato

Di seguito si riportano i parametri sismici calcolati secondo un approccio “sito dipendente”. Come indicato nell’Allegato A del D.M. 14 gennaio 2008, recepito dal D.M. 2018, si possono ottenere i valori dei suddetti parametri spettrali (a_g , F_0 e T^*c) del sito in esame utilizzando come riferimento le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento (**FIGURA 3.6**).

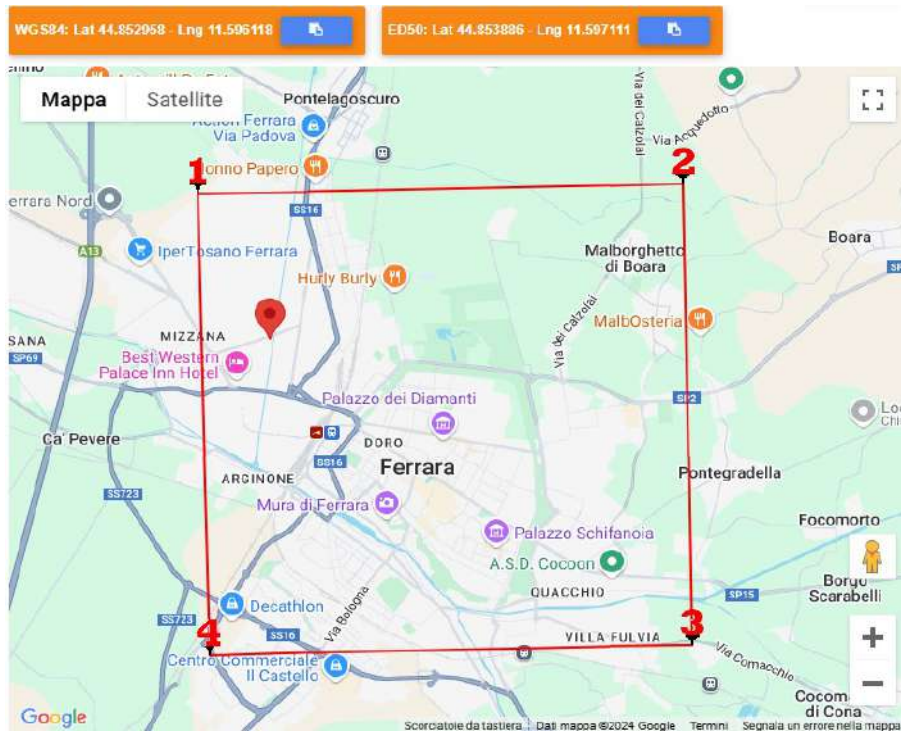


FIGURA 3.6– Vertici della griglia di riferimento (<http://www.geostru.com/geoapp/parametri-sismici.aspx>)

Si valutano i parametri spettrali a_g , F_0 e T^*c per il sito di progetto (approccio “sito-dipendente”) a titolo dimostrativo considerando l’amplificazione stratigrafica e topografica (**T1**) (Cap. 3.2.3 del D.M. 2018) la categoria del sottosuolo (**C**) e la classe d’uso della costruzione (**IV**) (Cap. 2.4.2 del D.M. 2018).

Parametri sismici

Tipo di elaborazione: Stabilità dei pendii e fondazioni

Sito in esame.

latitudine: 44,853886

longitudine: 11,597111

Classe: 4

Vita nominale: 50

Siti di riferimento

Sito 1	ID: 15180	Lat: 44,8697	Lon: 11,5867	Distanza: 1942,136
Sito 2	ID: 15181	Lat: 44,8708	Lon: 11,6571	Distanza: 5088,070
Sito 3	ID: 15403	Lat: 44,8208	Lon: 11,6586	Distanza: 6084,225
Sito 4	ID: 15402	Lat: 44,8197	Lon: 11,5883	Distanza: 3863,751

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: C

Categoria topografica: T1

Periodo di riferimento: 100anni

Coefficiente c_u : 2

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento:	81	%
Tr:	60	[anni]
ag:	0,049	g
Fo:	2,498	
Tc*:	0,278	[s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento:	63	%
Tr:	101	[anni]
ag:	0,063	g
Fo:	2,512	
Tc*:	0,284	[s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento:	10	%
Tr:	949	[anni]
ag:	0,172	g
Fo:	2,559	
Tc*:	0,280	[s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento:	5	%
Tr:	1950	[anni]
ag:	0,227	g
Fo:	2,499	
Tc*:	0,288	[s]

Coefficienti Sismici Stabilità dei pendii e fondazioni

SLO:

Ss:	1,500
Cc:	1,600
St:	1,000
Kh:	0,015
Kv:	0,007
Amax:	0,727
Beta:	0,200

SLD:

Ss:	1,500
Cc:	1,590
St:	1,000
Kh:	0,019
Kv:	0,010
Amax:	0,934
Beta:	0,200

SLV:

Ss:	1,440
Cc:	1,600
St:	1,000

Kh: 0,059
Kv: 0,030
Amax: 2,426 (Amax/g=0,247)
Beta: 0,240

SLC:

Ss: 1,360
Cc: 1,580
St: 1,000
Kh: 0,087
Kv: 0,043
Amax: 3,031
Beta: 0,280

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50

Geostru software - www.geostru.com

Magnitudo di progetto

La zonizzazione sismica ZS9 pone come magnitudo attesa massima nella zona sismogenetica 912 il valore di $M = 6,14$. Nei tempi storici erano stati stimati eventi con magnitudo di 5,6. Durante gli eventi del maggio 2012 si sono liberate energie sismiche sulla dorsale ferrarese con magnitudo di 5,9 (che è stato stimato da Picotti, 2013, come evento con T_R di 1000 anni). Conservativamente lo scrivente adotterà per le analisi della liquefazione delle sabbie la magnitudo di 6,14.

Magnitudo di progetto
 $M = 6,14$ Mw

3.2. VERIFICA DELLA RESISTENZA ALLA LIQUEFAZIONE DELLE SABBIE

L'obiettivo della riduzione del rischio sismico passa anche per l'analisi delle componenti territoriali che possono innescare fenomeni negativamente impattanti con le strutture antropiche e la loro sicurezza. Vale comunque la pena evidenziare che laddove sono presenti i caratteri predisponenti, non è detto che si possano realizzare le condizioni di cause scatenanti; ovvero un terreno sabbioso può avere tutti i requisiti granulometrici e di addensamento per liquefarsi, ma nell'area non si verificherà un sisma con energia sufficiente ad indurre liquefazione.

In particolare vengono ritenuti motivi di esclusione dalla verifica a liquefazione, la verifica di almeno una di queste circostanze:

1. Eventi sismici attesi di magnitudo di momento Mw inferiore a 6 e durata inferiore a 15 sec. ("La Liquefazione del terreno in condizioni sismiche" – Crespellani, Nardi, Simoncini – Zanichelli 1988).
2. Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni *free-field* minori di 0,1g;
3. Accelerazioni massime al piano campagna in condizioni *free-field* minori di 0,15g e terreni con caratteristiche ricadenti in una delle tre seguenti categorie:
 - -frazione di fine, FC, superiore al 20%, con indice di plasticità $PI > 10$;
 - $FC \geq 35\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 20$;
 - $FC \leq 5\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 25$

Dove $(N_1)_{60}$ è il valore normalizzato della resistenza penetrometrica della prova SPT.

4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella **FIGURA 3.7** da distinguere i materiali in funzione del coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ o $U_c > 3,5$.
5. Profondità media stagionale della falda superiore ai 15m dal piano campagna.

6. Copertura di strati superficiali non liquefacibili con spessore maggiore di 3m, oppure con spessore maggiore di 5m per magnitudo maggiori di $M > 7$.
7. Un ulteriore motivo di esclusione dalla verifica di liquefazione è dato dal valore della **densità relativa** D_r del deposito. Gibbs ha eseguito diversi studi su risultati di vari autori stabilendo che una densità relativa pari a 70% è valore limite tra terreni liquefacibili e non liquefacibili (*Manuale di geotecnica per l'ingegneria civile* di Nunziante Marino, Maggioli Editore, 2006), di conseguenza tutti i terreni con $D_r > 70\%$ vengono automaticamente esclusi dalla verifica alla liquefazione.

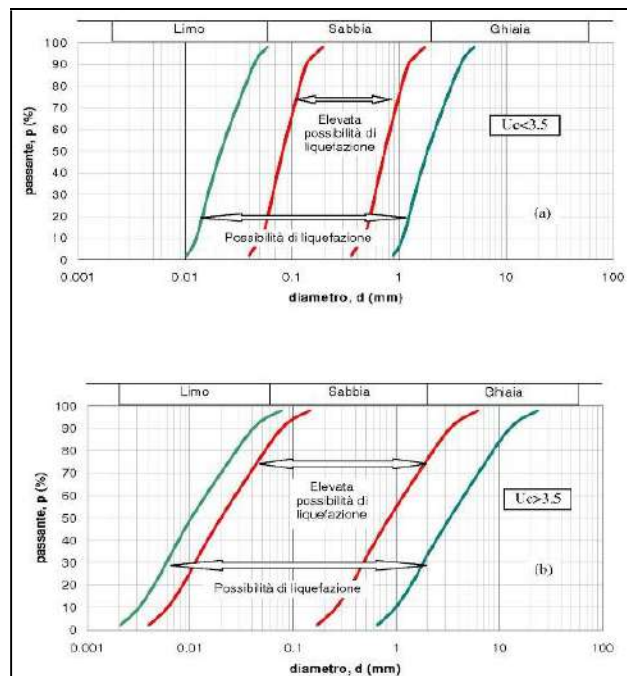


FIGURA 3.7 - Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione di un terreno

Il D.M. 17/01/2018 ha riassunto in questi 4 punti i casi in cui non è prevista liquefazione:

7.11.3.4.2 Esclusione della verifica a liquefazione

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Fig. 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ e in Fig. 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

Per la verifica della liquefazione delle sabbie è stato utilizzato il software di calcolo C-Liq che analizzando ogni strato da 2 cm individuato dalla prova CPTU, ne verifica la potenzialità di liquefazione.

Ai fini del calcolo sono state considerate le 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU con rif. U72-24, spinte rispettivamente fino alla profondità di -40,0 m da p.c. la prova CPTU1, -35,6 m da p.c. la prova SCPTU1 e -19,8 m da p.c. la prova SCPTU2.

Per questo calcolo si è considerata una magnitudo di 6,14 ed un'accelerazione PGA di 0,24g.

Utilizzando i dati di input visualizzati in **FIGURA 3.8**, se ne deduce che nell'area di studio il fenomeno della liquefazione è un effetto di sito atteso, solo per sottili livelli sabbiosi rilevati in profondità con le 3 prove.

Dott. Geol.
Thomas Veronese
SST Studi Servizi Tecnici

DOTT. GEOL. THOMAS VERONESE
Via Roma, 10, 44021, Codigoro (Fe)
Tel e fax. 0533 / 713798 – cell. 335. 5240380
E-mail: t.veronese@studio-sst.it

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

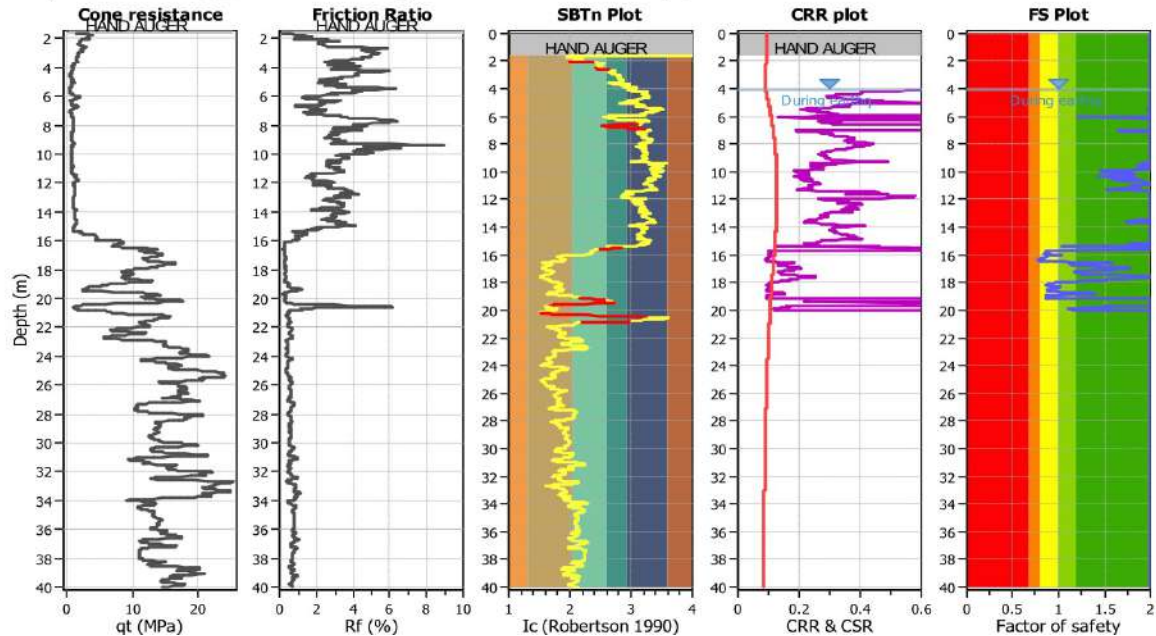
Project title :

Location :

CPT file : rif. U72-24 CPTU1 Ferrara Consorzio di Bonifica Canale Boicelli

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	4.10 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	4.10 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.24	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	No	MSF method:	Method based



Dott. Geol.
Thomas Veronese
SST Studi Servizi Tecnici

DOTT. GEOL. THOMAS VERONESE
Via Roma, 10, 44021, Codigoro (Fe)
Tel e fax. 0533 / 713798 – cell. 335. 5240380
E-mail: t.veronese@studio-sst.it

LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

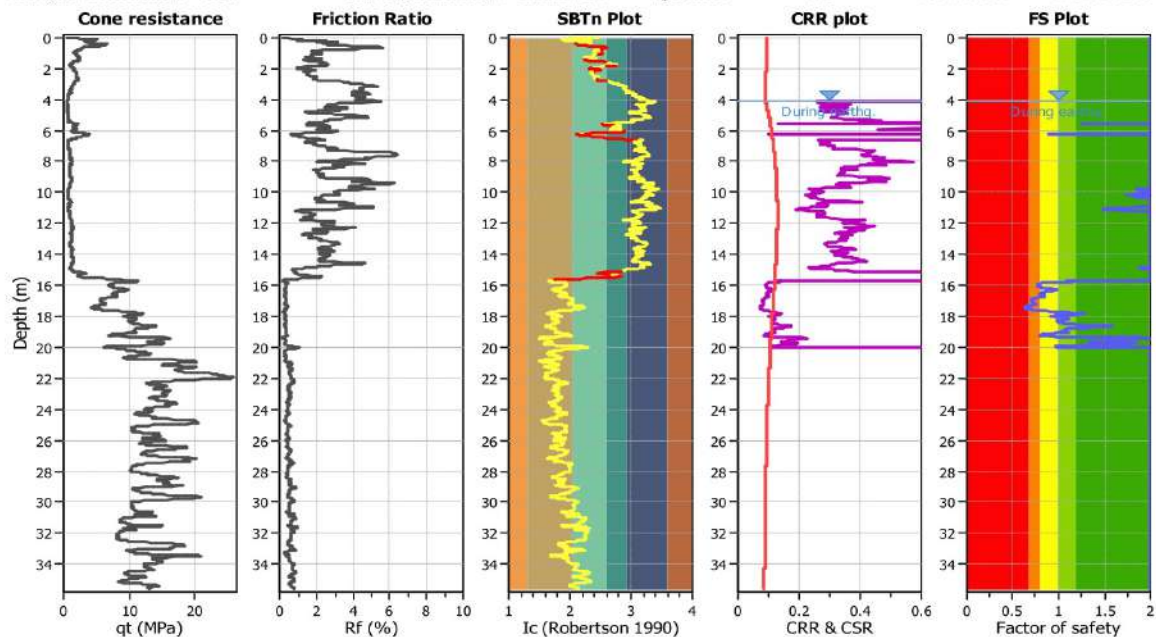
Project title :

Location :

CPT file : rif. U72-24 SCPTU1 Ferrara Consorzio di Bonifica Canale Boicelli

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	4.10 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	4.10 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.24	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	No	MSF method:	Method based



LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

Project title :

Location :

CPT file : rif. U72-24 CPTU2 Ferrara Conso

Input parameters and analysis data

Analysis method:	Robertson (2009)	G.W.T. (in-situ):	2.20 m	Use fill:	No	Clay like behavior	
Fines correction method:	Robertson (2009)	G.W.T. (earthq.):	2.20 m	Fill height:	N/A	applied:	All soils
Points to test:	Based on Ic value	Average results interval:	3	Fill weight:	N/A	Limit depth applied:	Yes
Earthquake magnitude M_w :	6.14	Ic cut-off value:	2.60	Trans. detect. applied:	Yes	Limit depth:	20.00 m
Peak ground acceleration:	0.24	Unit weight calculation:	Based on SBT	K_0 applied:	No	MSF method:	Method based

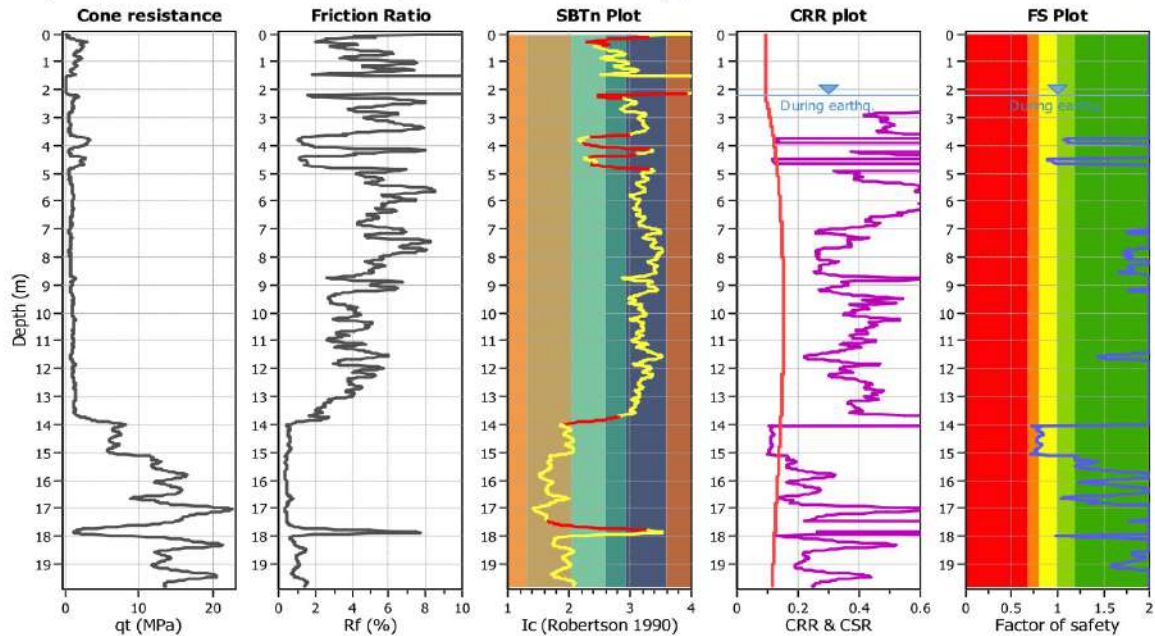


FIGURA 3.8: Dati input e metodi di calcolo adottati

Dei calcoli effettuati si riporta solo la sintesi dei risultati finali.

Inoltre è stato verificato l'indice del potenziale di liquefazione, I_L , definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz$$

in cui z è la profondità dal piano di campagna in metri e $w(z)=10-0.5z$

Ad una quota z il fattore $F(z)=F$ vale:

$$F = 1 - F_L \text{ se } F_L \leq 1.0$$

$$F = 0 \text{ se } F_L > 1.0$$

dove F_L è il fattore di sicurezza alla liquefazione alla quota considerata.

Con il software si calcola nei primi 20,00 m, il valore del potenziale di liquefazione per tutti gli strati incoerenti.

In base alla **Tabella 3.3** e **3.4** si può affermare che i terreni hanno un **basso** potenziale alla liquefazione per le 3 prove realizzate in sito, se sollecitate da un sisma di $M_w=6,14$ e con una accelerazione di progetto P.G.A. pari a $0,24g$.

Potenziale Liquefazione I_{PL}	Classificazione
$I_{PL} = 0$	<i>Non liquefacibile</i>
$0 < I_{PL} \leq 2$	<i>Basso</i>
$2 < I_{PL} \leq 5$	<i>Moderato</i>
$5 < I_{PL} \leq 15$	<i>Alto</i>
$I_{PL} \geq 15$	<i>Molto Alto</i>

Tabella 3.3 – Classificazione indice potenziale liquefazione

Prove	Potenziale Liquefazione I_{PL}
CPTU1	0,27
SCPTU1	0,70
SCPTU2	0,71

Tabella 3.4 – Indice potenziale liquefazione

3.3. CALCOLO CEDIMENTI POSTSISMICI TERRENI GRANULARI

Dell'elaborazione completa dei cedimenti post sismici si riporta solo il risultato finale; sono stati stimati i cedimenti postsismici nei banchi sabbiosi rilevati con le 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU con rif. U72-24, spinte rispettivamente fino alla profondità di -40,0 m da p.c. la prova CPTU1, -35,6 m da p.c. la prova SCPTU1 e -19,8 m da p.c. la prova SCPTU2.

Dalle elaborazioni informatiche, si ricava che con una Magnitudo di 6,14 e accelerazione P.G.A. di 0,20g, solo alcuni dei livelli hanno il fattore di resistenza alla liquefazione inferiore a 1,00, determinando cedimenti post sismici nei terreni granulari riportati in **Tabella 3.5**.

Prove	Cedimenti postsismici (cm)
CPTU1	5,94
SCPTU1	10,41
SCPTU2	4,33

Tabella 3.5 – Cedimenti post-simici

4. MODELLAZIONE GEOTECNICA SULLE INDAGINI

Uno dei motivi di pericolosità geologica del territorio, deriva, in questi luoghi, dall'interazione tra opere di fondazione e terreni compressibili, su cui le costruzioni in elevazione possono creare condizioni di instabilità del complesso opera-terreno.

Si rende quindi necessario fare alcune valutazioni per verificare le caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione, utilizzando in via indicativa, i dati derivabili dalle indagini specifiche eseguite per la modellazione geologica.

Sono dunque state prese in considerazione le 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU con rif. U72-24, spinte rispettivamente fino alla profondità di -40,0 m da p.c. la prova CPTU1, -35,6 m da p.c. la prova SCPTU1 e -19,8 m da p.c. la prova SCPTU2 e un sondaggio geognostico a carotaggio continuo **S1**, spinto a -30,00 m da p.c. con prelievo di campioni indisturbati da sottoporre ad analisi di laboratorio geotecnico.

In **FIGURA 4.1** si riporta una immagine satellitare con l'ubicazione delle prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU e del sondaggio a carotaggio continuo.



FIGURA 4.1 – Ortofoto con ubicazione indagini CPTU

Negli Allegati sono inserite, per le CPTU eseguite, le seguenti schede: a) tabelle valori, b) diagrammi di resistenza, c) valutazioni litologiche, d) tabelle parametri geotecnici.

4.1. MODELLO GEOTECNICO DEL SOTTOSUOLO

4.1.1. PARAMETRI GEOTECNICI DA PROVE CPTU

L'esecuzione della prova penetrometrica è avvenuta con un Penetrometro Statico con punta elettrica con piezocono CPTU, con 20 t di spinta.

Si allegano i diagrammi delle resistenze dal cui confronto si possono evincere le differenze di comportamento dei terreni nei vari strati incontrati; le interpretazioni litologiche, in base alle valutazioni stratigrafiche fornite da Douglas-Olsen (1981), Robertson-Campanella (1983) e Olsen-Farr (1986).

Le caratteristiche geotecniche dei terreni ricavate dai risultati della penetrometria statica sono riportate in tabella parametri geotecnici.

Nelle tabelle viene fatta distinzione fra i terreni di natura coesiva e quelli di natura granulare.

Per i terreni di natura coesiva vengono riportati, i valori di resistenza all'infissione della punta del penetrometro q_c (MPa), la resistenza laterale F_s (MPa), il peso di volume γ' (kN/m³), la coesione non drenata C_u (kPa), il grado di sovraconsolidazione OCR, dei moduli di deformazione non drenati E_{u50} (MPa) corrispondenti rispettivamente ad un grado di mobilitazione dello sforzo deviatorico pari al 50 e 25 %, del modulo di deformazione edometrico M_o (Mpa).

Per i terreni di natura granulare vengono riportati, i valori di resistenza all'infissione della punta del penetrometro q_c (MPa), la resistenza laterale F_s (MPa), la densità relativa D_r (%), dell'angolo di attrito interno

efficace ϕ' ($^{\circ}$), i moduli di deformazione drenati E'_{25} (MPa) e del modulo di deformazione edometrico M_0 (MPa).

Nella **Tabella 4.1** si riportano i parametri geotecnici medi per strati pseudomogenei rilevati con le 3 prove penetrometriche statiche CPTU:

Identificativo		PROVA PENETROMETRICA STATICA																						
Emissione		nov-24																						
Pagina		1 di 0																						
-Committente							Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara							-Prova n°						CPTU1				
-Cantiere							Via Fellini, Ferrara (FE)							-Data prova						30/10/2024				
-Quota p.c.							8,00 m s.l.m.							-Prof. preforo						0,80 m				
-Livello di falda							4,10 m da p.c.							-Prof. finale						40,00 m				
							MATERIALI COESIVI							MATERIALI GRANULARI										
DA	A	qcm	fsm	deltaU	litol.	Peso Vol.	Cu (qc)	OCR (qc)	OCR (U)	M ₀	Eu50	CR	Dr	F' _{CM}	F' _{Botton}	F' _{Schm.}				E'25	M ₀			
m	m	MPa	MPa	MPa	(-)	kN/m3	KPa	(-)	(-)	MPa	MPa	(-)	(%)	(°)	(°)	(°)				MPa	MPa			
1,7	3,6	2,25	0,07	0,00	Al-La	18,00	111	16	-	5,98	19,93	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-				
3,6	6,0	0,77	0,03	0,10	A	17,50	41	3	6	3,16	17,2	0,24	-	-	-	-	-	-	-	-				
6,0	7,0	1,09	0,02	0,05	L-Ls	20,00	53	3	8	3,82	22,38	0,23	<20	26	24	26	30	33	37	3,65	5,85			
7,0	11,4	0,74	0,03	0,15	Al-La	18,00	38	2	5	3,27	20,92	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-				
11,4	15,5	1,11	0,03	0,27	Al-La	18,00	53	2	5	4,16	28,17	0,29	-	-	-	-	-	-	-	-				
15,5	19,0	10,16	0,03	0,00	S	20,00	-	-	-	-	-	-	52	33	30	35	37	40	42	25,41	37,67			
19,0	21,0	7,33	0,04	0,03	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	44	30	27	32	35	37	40	19,82	28,86			
21,0	22,9	10,41	0,05	0,03	S	20,00	-	-	-	-	-	-	48	32	29	35	37	39	42	26,03	38,68			
22,9	34,0	16,57	0,10	0,00	S	20,00	-	-	-	-	-	-	62	34	30	37	39	41	43	41,43	53,12			
34,0	40,0	13,79	0,10	0,00	S	20,00	-	-	-	-	-	-	49	33	29	35	37	39	42	34,47	47,56			

Identificativo	U72-24
Emissione	nov-24
Pagina	1 di 0

PROVA PENETROMETRICA STATICA

PARAMETRI GEOTECNICI

-Committente	Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara	-Prova n°	SCPTU1
-Cantiere	Via Fellini, Ferrara (FE)	-Data prova	30/10/2024
-Quota p.c.	8,00 m s.l.m.	-Prof. preforo	0,00 m
-Livello di falda	4,10 m da p.c.	-Prof. finale	35,60 m

							MATERIALI COESIVI						MATERIALI GRANULARI								
DA	A	qcm	fsm	deltaU	litol.	Peso Vol.	Cu (qc)	OCR (qc)	OCR (U)	M ₀	Eu50	CR	Dr	FI' _{DM}	FI' _{Soltan}	FI'Schm.				E'25	M ₀
m	m	MPa	MPa	MPa	(-)	kN/m3	KPa	(-)	(-)	MPa	MPa	(-)	(%)	(°)	(°)	(°)				MPa	MPa
0,0	1,5	3,02	0,08	0,00	Rip	20,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,5	3,4	1,59	0,04	0,00	Al-La	18,15	90	16	-	5,15	16,5	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	
3,4	5,5	0,68	0,02	0,04	A	17,50	36	3	8	2,90	16,21	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	
5,5	6,5	2,11	0,03	0,02	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	<20	29	26	29	32	35	38	5,66	9,06
6,5	11,5	0,84	0,03	0,16	Al-La	18,00	43	2	6	3,57	22,56	0,29	-	-	-	-	-	-	-	-	
11,5	15,2	1,09	0,03	0,32	Al-La	18,00	51	2	4	4,10	27,46	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-	
15,2	17,6	6,46	0,03	0,03	S	20,00	-	-	-	-	-	-	37	31	28	33	35	38	41	16,16	25,78
17,6	20,7	11,05	0,04	0,01	S	20,00	-	-	-	-	-	-	54	33	30	36	38	40	42	27,63	41,19
20,7	30,0	14,91	0,08	0,01	S	20,00	-	-	-	-	-	-	60	34	30	36	38	41	43	37,28	49,81
30,0	32,5	10,00	0,06	-0,01	S	20,00	-	-	-	-	-	-	40	31	28	34	36	38	41	25,01	38,66
32,5	35,6	12,86	0,08	-0,01	S	20,00	-	-	-	-	-	-	48	32	29	35	37	39	42	32,16	45,45

Identificativo	U72-24
Emissione	nov-24
Pagina	1 di 0

PROVA PENETROMETRICA STATICA

PARAMETRI GEOTECNICI

-Committente	Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara	-Prova n°	SCPTU2
-Cantiere	Via Fellini, Ferrara (FE)	-Data prova	29/10/2024
-Quota p.c.	8,00 m s.l.m.	-Prof. preforo	0,00 m
-Livello di falda	2,20 m da p.c.	-Prof. finale	19,80 m

							MATERIALI COESIVI						MATERIALI GRANULARI								
DA	A	qcm	fsm	deltaU	litol.	Peso Vol.	Cu (qc)	OCR (qc)	OCR (U)	M ₀	Eu50	CR	Dr	F _{DM} '	F _{Bolton} '	F _{Schm.} '				E'25	M ₀
m	m	MPa	MPa	MPa	(-)	kN/m3	KPa	(-)	(-)	MPa	MPa	(-)	(%)	(°)	(°)	(°)				MPa	MPa
0,0	1,5	1,41	0,06	0,00	Al-La	18,00	80	19	-	4,60	13,54	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,5	2,2	0,10	0,02	0,00	RIP	20,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2,2	2,8	1,06	0,05	0,08	Al-La	18,00	57	9	8	4,00	12,85	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	
2,8	3,6	0,55	0,03	0,04	A	17,50	29	4	8	1,31	5,016	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	
3,6	4,1	2,23	0,03	0,04	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	28	33	30	32	35	37	40	6,64	10,62
4,1	4,4	0,69	0,03	0,02	A	17,50	31	3	10	2,03	8,99	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-	
4,4	4,8	2,07	0,03	0,03	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	<20	31	28	30	33	36	39	5,47	8,74
4,8	9,4	0,70	0,04	0,12	A	17,50	35	3	6	2,56	12,48	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	
9,4	13,7	0,93	0,04	0,34	Al-La	18,00	44	3	4	3,75	20,76	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-	
13,7	15,0	6,05	0,04	0,07	S	20,00	-	-	-	-	-	-	41	33	29	33	36	38	41	15,13	24,20
15,0	17,7	13,89	0,06	0,06	S	20,00	-	-	-	-	-	-	71	36	33	38	40	42	44	34,74	47,25
17,7	18,0	2,70	0,07	0,08	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	24	29	26	30	33	36	39	10,56	16,89
18,0	19,8	15,28	0,16	0,07	S	20,00	-	-	-	-	-	-	72	36	32	38	40	42	44	38,20	50,54

Tabella 4.1 – Stratigrafia geotecnica semplificata

Nell'area è stata rilevata la quota della superficie di falda all'interno del foro di esecuzione delle prove penetrometriche statiche con punta elettrica CPTU con *rif.* U72-24. Tale quota è stata rilevata in data 29/10/2024 alla profondità di -2,20 m dal p.c. per la prova SCPTU2, e in data 30/10/2024 a -4,10 m da p.c. per la prova CPTU1 e SCPTU1; si ricorda che la differenza è dovuta alle quote dei p.c. di realizzazione delle prove.

Il livello freatico non è statico, solo un monitoraggio di un anno idrogeologico permetterebbe di valutare le oscillazioni stagionali di queste quote.

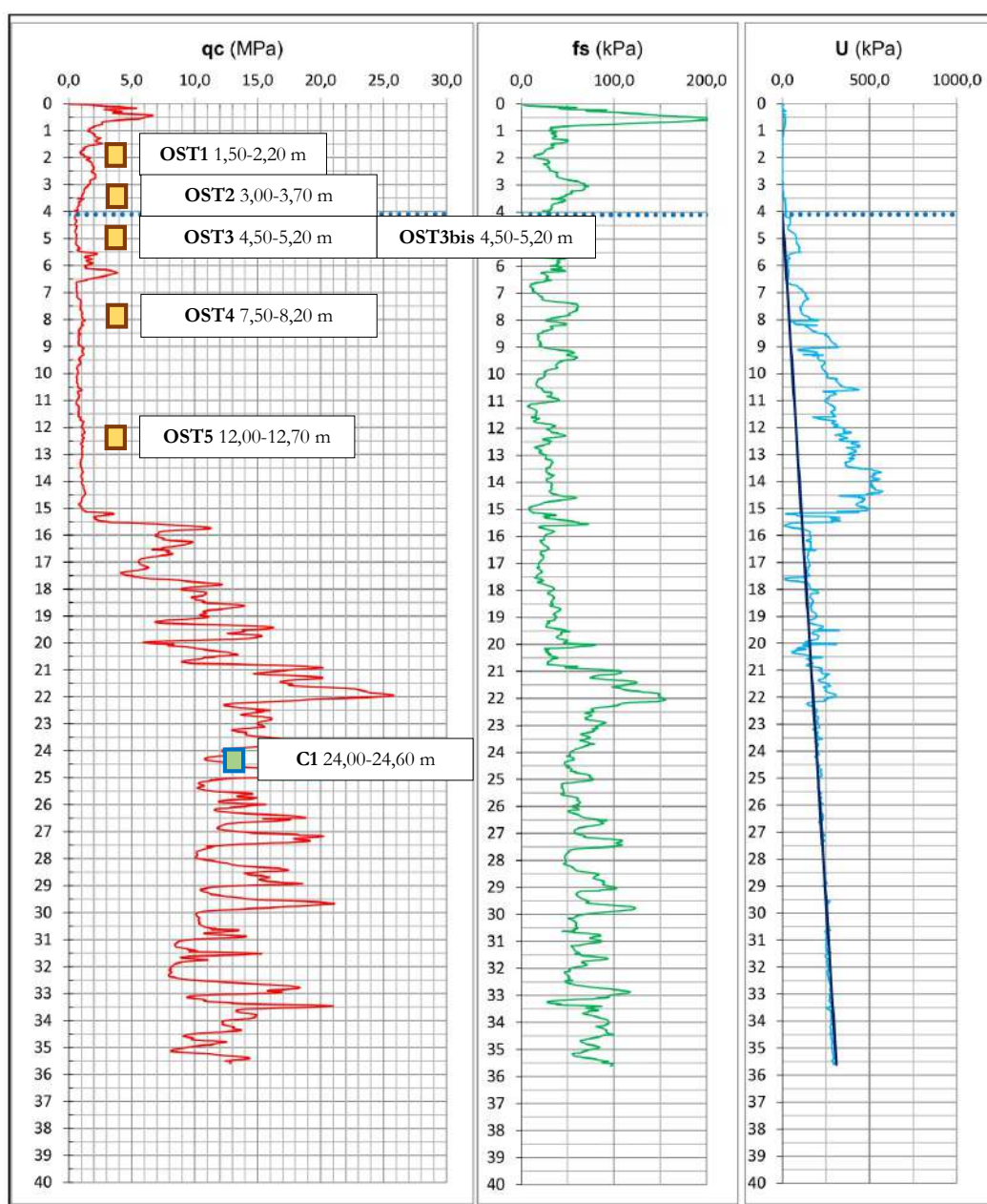
4.1.2. PARAMETRI GEOTECNICI DA PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO

Nel sito è stato realizzato un sondaggio a carotaggio continuo con il prelievo di n. 5 campioni indisturbati e n. 1 campione rimaneggiato da sottoporre a specifiche prove di laboratorio geotecniche, presso il laboratorio ISMGEO S.r.l. di Bergamo.

In **Tabella 4.2** sono riassunti i campioni indisturbati prelevati nel sondaggio S1

CAMPIONI	PROFONDITÀ (m da p.c.)
S1 – OST1	1,50 – 2,20
S1 – OST2	3,00 – 3,70
S1 – OST3	4,50 – 5,20
S1 – OST4	7,50 – 8,20
S1 – OST5	12,00 – 12,70
S1 – C1	24,00 – 24,60

Tabella 4.2 – Campioni indisturbati



CAMPIONI INDISTURBATI



Il foro di sondaggio è poi stato chiuso con compattonite e cementazione in testa come da prescrizioni della agenzia regionale per la sicurezza territoriale e protezione civile.





Affianco al primo foro ne è stato eseguito un secondo a -4,5m per consentire il campionamento della fustella OST3bis, in quanto il campionamento del OST3 non era stato giudicato di qualità dallo scrivente. Anche il secondo foro è stato chiuso con le medesime modalità del primo foro di sondaggio.

Per i terreni fini saranno eseguite n. 6 analisi granulometriche complete, n. 6 Limiti di Atterberg, n. 2 prove triassiali consolidate non drenate, n. 2 prove di taglio diretto e n. 2 prove di consolidazione edometrica, mentre per i terreni granulari saranno eseguite n. 2 analisi granulometriche complete e n. 2 prove triassiali consolidate non drenate con la ricostruzione dei provini mediante misure di Vs.

Queste prove di laboratorio sono state pianificate con il progettista responsabile della progettazione delle indagini geotecniche.

Le prove di laboratorio geotecnico sui campioni prelevati sono in fase di analisi in laboratorio, appena i certificati saranno pronti andranno ad integrare la relazione geologica e geotecnica.

Con le indagini geognostiche non sono stati indagati punti sotto il sedime del fabbricato di progetto. Quindi, in fase di esecuzione degli scavi per la realizzazione delle fondazioni, è bene che la direzione lavori verifichi la coerenza tra ciò che emerge nelle trincee di scavo con quanto rilevato e previsto nella relazione geologica.

Codigoro, li 28/01/2025


Dott. Geologo Thomas Veronese

ALLEGATO: ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

Sommario

5. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	53
5.1. STUDI SPECIFICI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	54
5.2. DATI DI INPUT PER LA RSL.....	55
5.2.1. MODELLO GEOLOGICO E SISMICO DEI PRIMI 40m.....	55
5.2.2. MODELLO GEOLOGICO E SISMICO FINO AL BEDROCK SIMICO.....	56
5.2.3. MOTO SISMICO DI INPUT.....	58
5.2.4. PROVA DI COLONNA RISONANTE DEI TERRENI SUPERFICIALI.....	60
5.3. CODICE STRATA PER LA RSL.....	60
5.4. DATI DI OUTPUT DELLA RSL.....	63
5.4.1. PROFILO DELLA PGA CON LA PROFONDITÀ E FATTORE DI AMPLIFICAZIONE FA.....	63
5.4.2. FUNZIONE DI TRASFERIMENTO.....	64
5.4.3. SPETTRO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE.....	65
5.5. SCOPO DI QUESTA ANALISI DI RSL E CONCLUSIONI.....	68

5. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

La funzione di amplificazione di un sito fornisce una chiara ed efficace rappresentazione dell'effetto "filtrante" di un deposito di terreno sulle onde sismiche. Essa mette in evidenza in quale campo di frequenze la presenza del terreno può indurre effetti significativi di amplificazione del moto sismico incidente o, viceversa, se tali effetti possano addirittura tradursi in un'attenuazione delle ampiezze in superficie.

La conoscenza della sola funzione di amplificazione non è comunque sufficiente per determinare le caratteristiche del moto sismico alla superficie di un deposito. In termini applicativi, scopo finale di un'analisi di risposta sismica locale è infatti quello di disporre di uno spettro di risposta dell'accelerazione (associato ad un terremoto presunto ed ad un dato fattore di smorzamento strutturale), che includa realisticamente l'effetto di amplificazione del sottosuolo. Ciò premesso la funzione di amplificazione (o meglio la funzione di trasferimento) rappresenta comunque un indispensabile elemento per determinare il moto in superficie. Si riporta in **FIGURA 5.1** lo schema del processo che porta alla determinazione del moto sismico alla superficie di un deposito di terreno su basamento roccioso, a cui è applicata l'eccitazione sismica rappresentata, anziché da un'onda armonica stazionaria, da un moto irregolare come nel caso di un sisma reale.

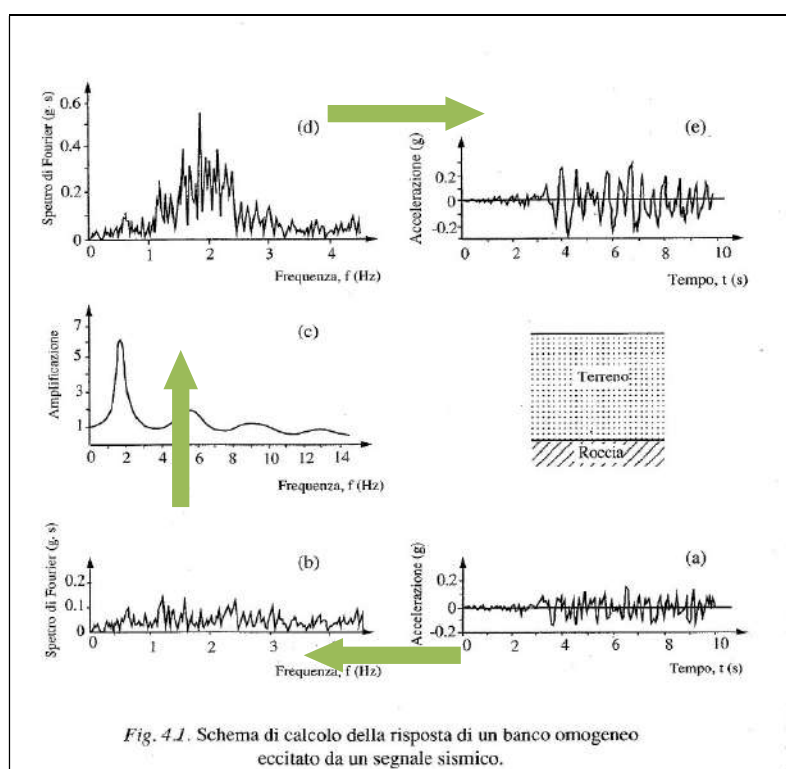


FIGURA 5.1

Per procedere a questo tipo di studio serve:

- modello geologico stratigrafico di dettaglio dei primi 30m/40m di terreno;
- profilo di Vs di dettaglio dei primi 30m/40m;
- profilo di Vs profondo fino al bedrock sismico;
- modello geologico stratigrafico di dettaglio fino al bedrock sismico;
- curve sitospecifiche di decadimento del modulo G_0 , espresse attraverso il rapporto G/G_0 , e curve di smorzamento D ricavati da prove di colonna risonante, o prove triassiali cicliche, per i terreni campionati nei primi 30m/40m;
- curve bibliografiche idonee di G_0 e D , da attribuire ai terreni profondi fino al bedrock sismico.
- gruppo di 7 accelerogrammi spettro compatibili per la definizione del moto sismico al bedrock.

5.1. STUDI SPECIFICI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Nel caso in esame valutata l'importanza strategica dell'impianto idrovoro, classificato dallo studio di progettazione come struttura in classe d'uso IV, si è sviluppata una analisi di Risposta Sismica Locale. Visti i tempi ristretti per la consegna della relazione, in accordo con i progettisti e la committenza, si redige l'analisi della risposta sismica locale sulla base dei dati acquisiti in sito e sulla base di dati bibliografici; in questo modo, facendo una attenta selezione dei dati bibliografici, si stimano le azioni sismiche attese in superficie tenendo in giusto conto le condizioni stratigrafiche reali profonde (e non limitate solo ai primi 30m dal piano di posa delle fondazioni). La norma è molto esplicita in merito agli studi di Risposta Sismica Locale, al paragrafo 7.11.3.1.:

7.11.3. RISPOSTA SISMICA E STABILITÀ DEL SITO

7.11.3.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche del sottosuolo e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni e degli ammassi rocciosi di cui è costituito. Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, l'analisi della risposta sismica locale consente quindi di definire le modifiche che il segnale sismico di ingresso subisce, a causa dei suddetti fattori locali.

Le analisi di risposta sismica locale richiedono un'adeguata conoscenza delle proprietà geotecniche dei terreni, da determinare mediante specifiche indagini e prove.

7.11.3.4.3 Metodi di analisi

Quando nessuna delle condizioni del § 7.11.3.4.2 risulti soddisfatta e il terreno di fondazione comprenda strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, occorre valutare il coefficiente di sicurezza alla liquefazione alle profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili.

La Circolare n. 7 del 21/01/2019 rinforza la richiesta:

C7.11.3 RISPOSTA SISMICA E STABILITÀ DEL SITO

C7.11.3.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Nella definizione delle azioni sismiche cui è sottoposta una costruzione, sia in fondazione, sia in elevazione, il progettista deve svolgere un'analisi della risposta sismica locale, cioè una valutazione delle modificazioni del segnale sismico, rispetto a quanto atteso sulla base delle indicazioni riportate al paragrafo 3.2 in merito alla pericolosità sismica di base, dovute alla deformabilità e alla capacità dissipativa del terreno compreso nel volume significativo. A questo fine, sono disponibili diversi strumenti per studiare gli effetti della propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo, basati in genere su metodi di analisi numerica, lineare e non, riferiti a problemi monodimensionali, bidimensionali o tridimensionali.

Mentre nelle analisi monodimensionali è possibile tenere conto soltanto degli effetti dell'amplificazione stratigrafica, nelle analisi condotte in condizioni bi-tridimensionali è possibile tenere conto, congiuntamente, sia dell'amplificazione stratigrafica, sia dell'amplificazione morfologica (superficiale e/o profonda) del sito.

Nel caso in cui il volume significativo di terreno sia caratterizzato da situazioni stratigrafiche tipiche e ben definite, cui corrispondano anche prefissati campi di variazione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, le norme offrono la possibilità di studiare la risposta sismica locale con un procedimento semplificato che permette di identificare uno spettro di risposta elastico in accelerazione ancorato all'accelerazione $a_{max}=S_s \cdot a_g$, dove a_g è l'accelerazione massima su sito di riferimento rigido ed S_s è il coefficiente di amplificazione stratigrafica. Analogamente, per condizioni topografiche riconducibili alle categorie di cui alla Tab. 3.2.III delle NTC, la valutazione dell'amplificazione topografica può essere effettuata con metodi semplificati, utilizzando il coefficiente di amplificazione topografica S_t .

Quindi le analisi di risposta sismica locale sono studi specifici sulla propagazione del moto sismico negli strati di terreno attraversati nel sito allo studio.

Per fare una corretta analisi di risposta sismica locale occorrerebbero indagini sito specifiche geofisiche e indagini di laboratorio geotecnico in campo dinamico sui terreni del sito allo studio. In questo modo i dati di input per l'analisi sarebbero solidi. Nel caso in esame vi è stato un attento studio del profilo di propagazione delle onde S nei primi 35m, mediante prova SCPTU, e una misura indiretta del profilo profondo di propagazione delle onde S mediante prova E.S.A.C.. Per i primi 15metri di terreni coesivi prevalenti si è adottato il modello di decadimento del modulo di taglio alle basse deformazioni G_0 dei terreni coesivi plastici (assunzione cautelativa, in quanto sono state usate le curve per $IP=30\%$, quando invece la componente limosa presente ne abbassa la plasticità). Per i terreni sabbiosi profondi si è tenuto conto dello stato tensionale derivante dalla profondità, prendendo a riferimento le rispettive giuste curve di G_0 .

5.2. DATI DI INPUT PER LA RSL

5.2.1. MODELLO GEOLOGICO E SISMICO DEI PRIMI 40m

Con le prove CPTU1 e SCPTU1 si è in grado di ricostruire il modello stratigrafico di dettaglio dei primi 40m. Con il cono sismico SCPTU1 si ha il profilo di dettaglio della velocità di propagazione delle onde di taglio S fino a -35m, ma che si può estendere responsabilmente fino a -40m. In **FIGURA 5.2** si riporta il modello di dettaglio con la suddivisione in strati pseudomogenei da utilizzare nell'analisi.

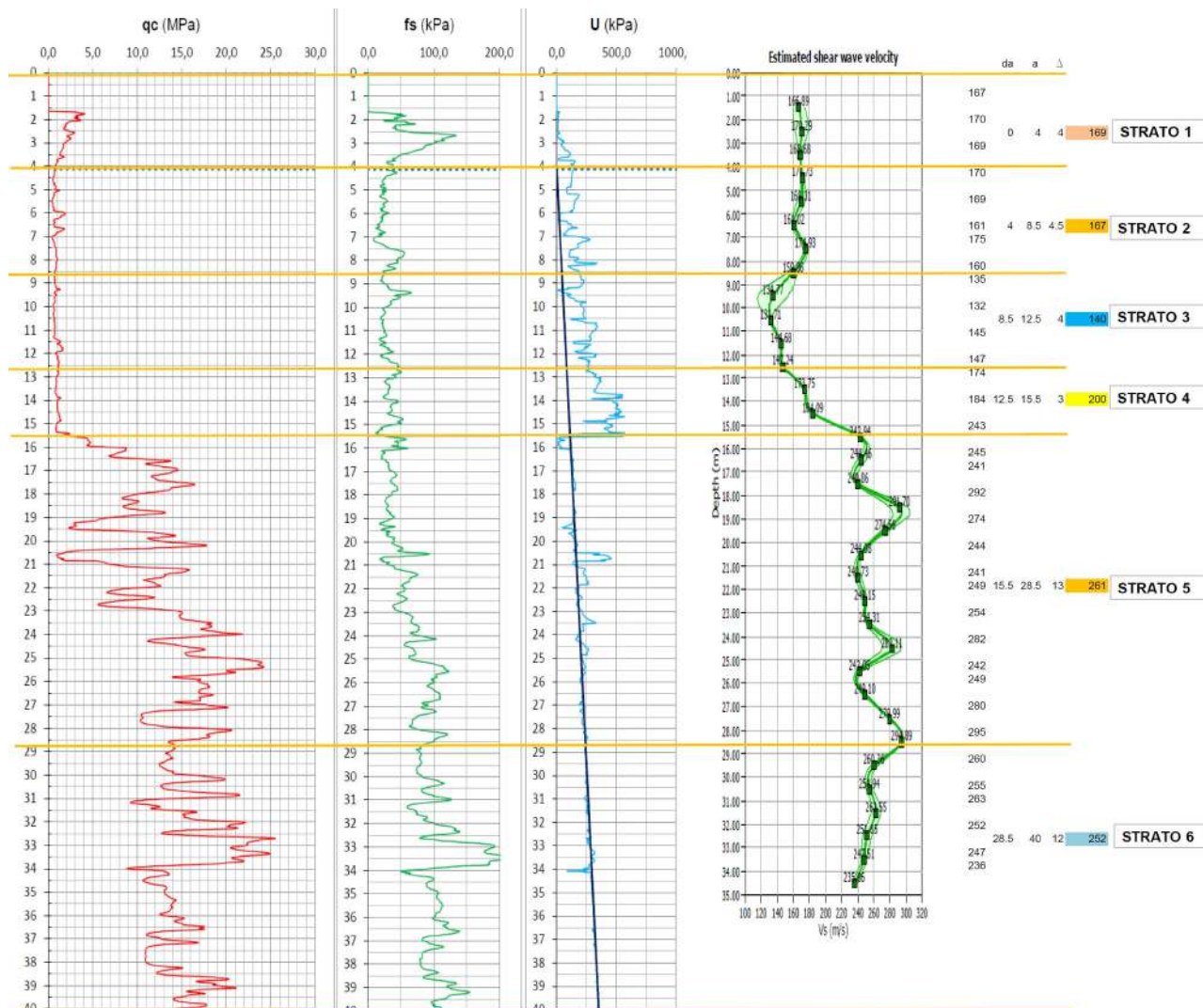
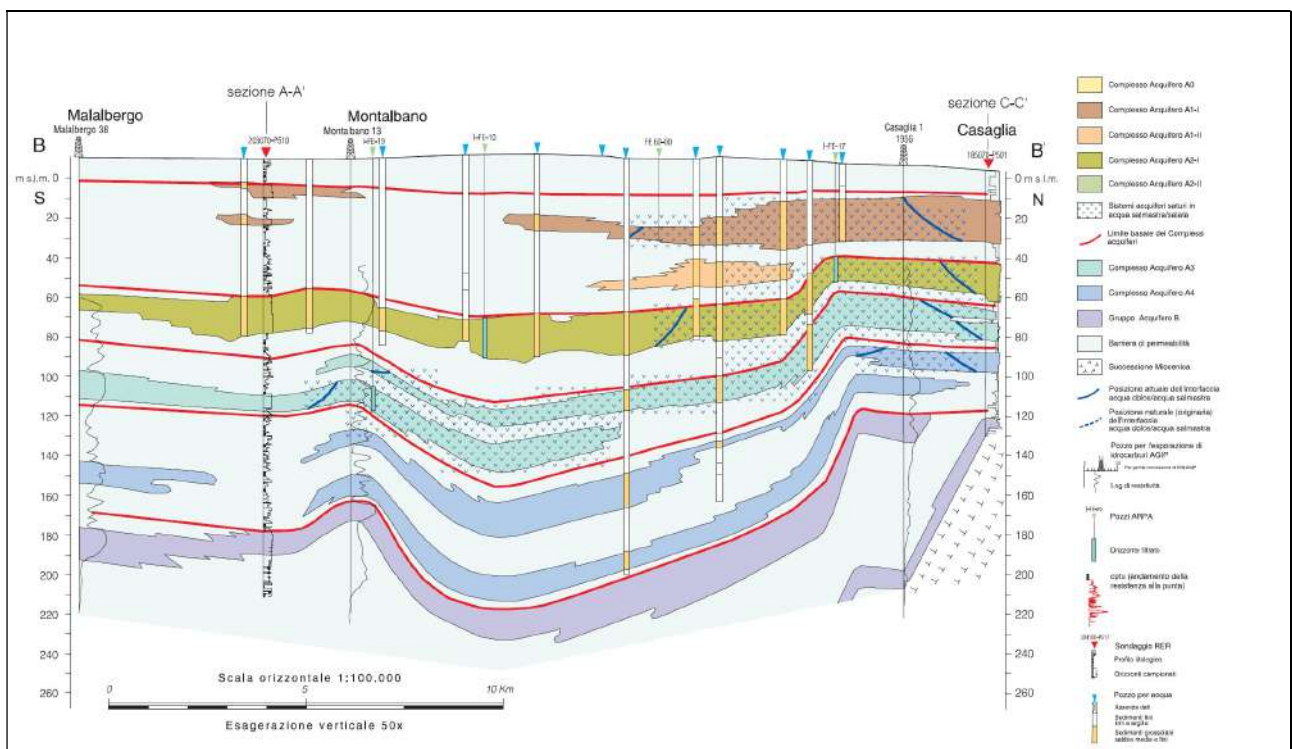
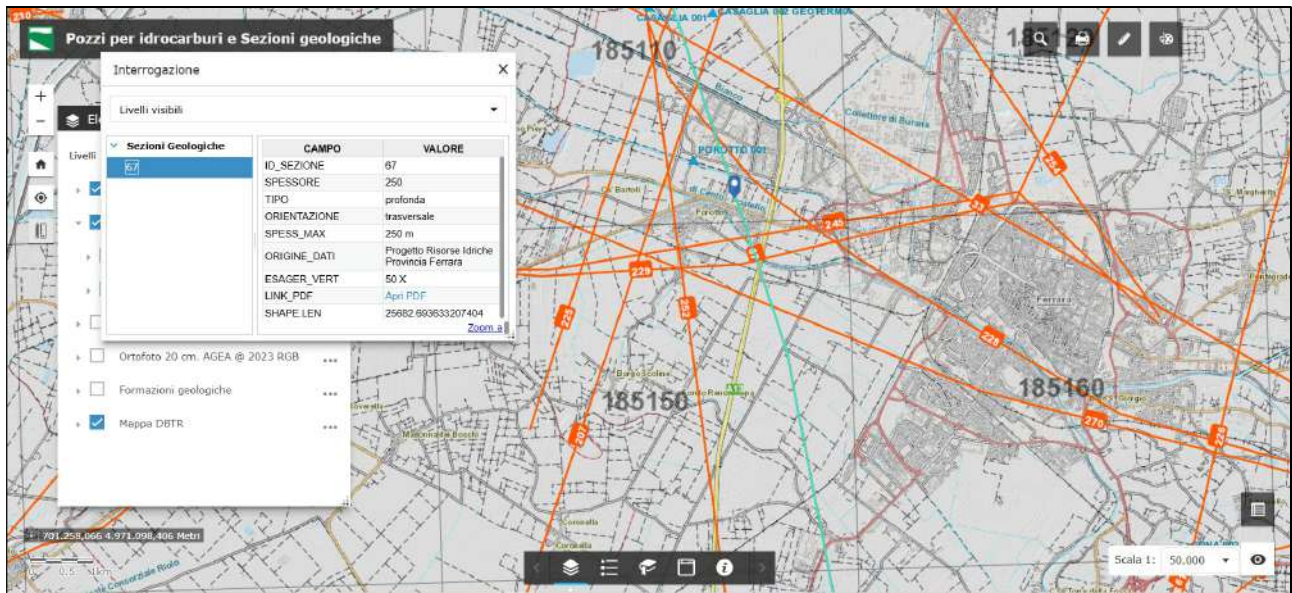


FIGURA 5.2 – Modello stratigrafico e geofisico dei primi 40m

5.2.2. MODELLO GEOLOGICO E SISMICO FINO AL BEDROCK SIMICO

Per il modello geologico profondo si è fatto riferimento alla sezione del progetto CARG riportata in **FIGURA 5.3**.

Per il profilo di Vs profondo si fa riferimento alla prova geofisica tipo ESAC fatta eseguire dallo scrivente alla soc. TeamGeofisica a 5,7 km a sud, nelle campagne di Bagnara di Romagna.



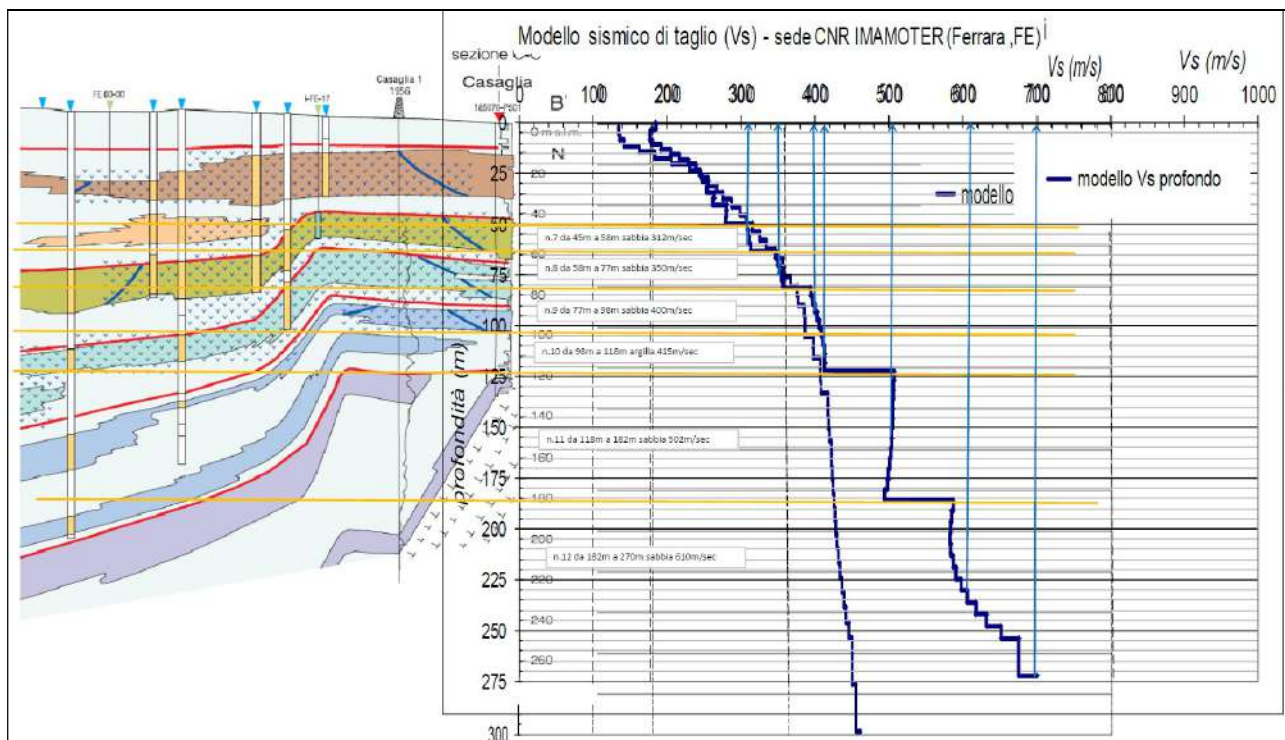


FIGURA 5.3– Modello stratigrafico e geofisico profondo

Si sono poi reperite in banca dati regionale delle misure di HVSR eseguite poco ad ovest del sito allo studio. Il primo modo di vibrare di interesse progettuale è indicato in 0,88 Hz (FIGURA 5.4 e 5.4bis).

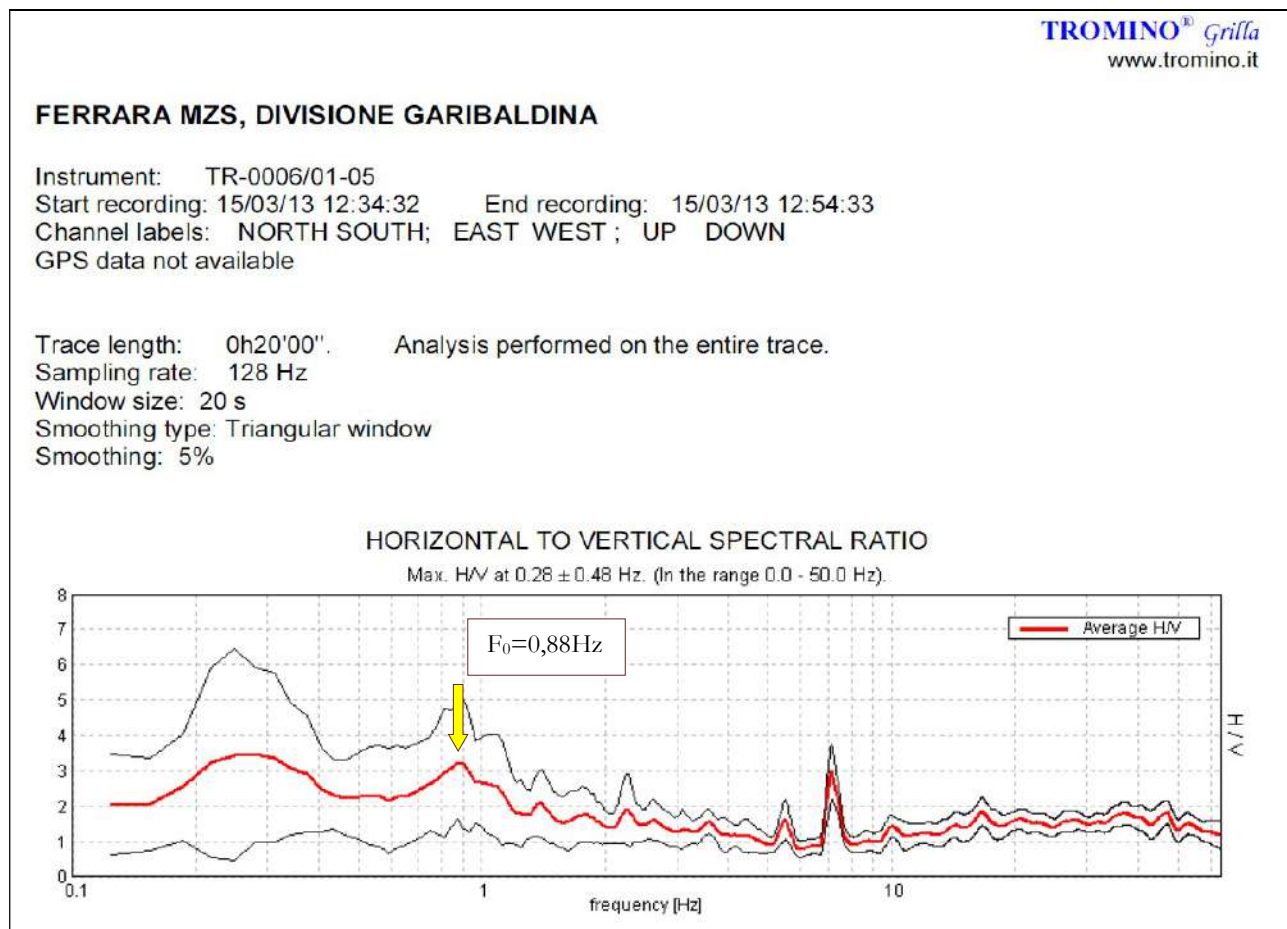


FIGURA 5.4–prova HVSR catalogata con la sigla 185160R003
<https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/gee/index.html>

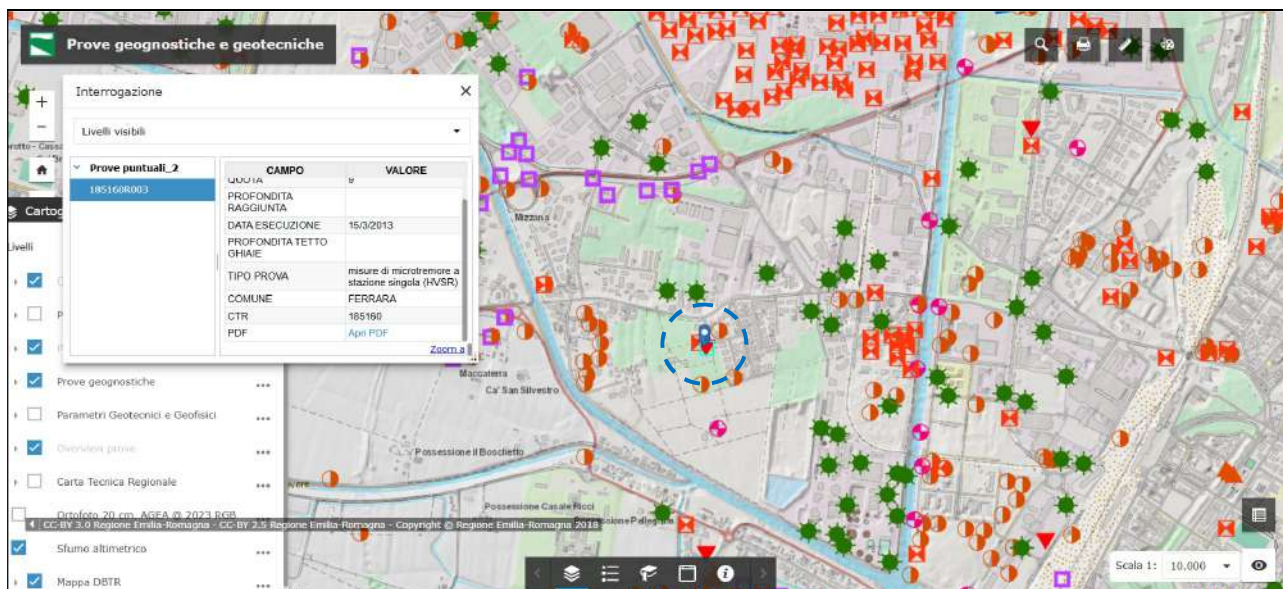


FIGURA 5.4bis – mappa della banca dati regionale e ubicazione prova HVSR

<https://servizi.moka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/geg/index.html>

Sul sito sono state effettuate due misure di HVSR che hanno dato valori di frequenza del primo modo di vibrare piuttosto bassi, che apparentemente approfondirebbero la collocazione del bedrock sismico.

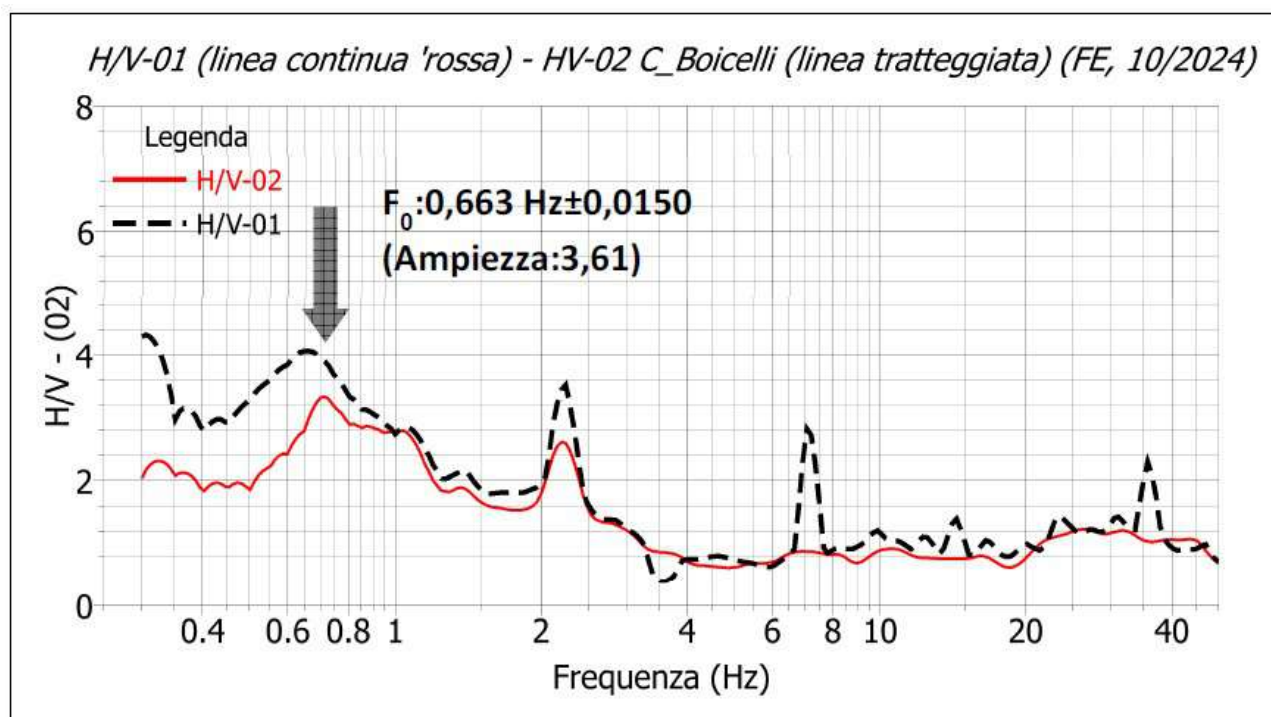


FIGURA 5.4 tris –prove HVSR eseguite in sito da TeamGeofisica.ced

5.2.3. MOTO SISMICO DI INPUT

Gli accelerogrammi di riferimento per rappresentare il moto sismico per il calcolo della risposta sismica locale sono stati estratti attraverso Roxel (**FIGURA 5.5**).

M	min:	5.6				Linf:	10				Lon.	[-]:	11.597			
M	max:	6.2				Lsup:	30				Lat.	[-]:	44.853			
R	min	[km]:	0				T1	[s]:	0.15				Site	class:	A	
R	max	[km]:	25				T2	[s]:	2				Top.	cat.:	T1	
Site	class:	Same	as	target	spectrum				Scaled:	Yes				Vn:	50 years	
Database: European Strong-mo Database									I'm	feeling	lucky:	Yes			CU:	IV
														SL:	SLV	

Waveform ID	Earthquake ID	Station ID	Earthquake Name	Date	Mw	Fault Mechanism	Epicentral Distance [km]	PGA_X [m/s^2]	EC8 Site class
368	175	ST143	Lazio Abruzzo	5/7/1984	5.9	normal	22	0.628	A
368	175	ST143	Lazio Abruzzo	5/7/1984	5.9	normal	22	0.628	A
5655	1825	ST2950	NE of Banja Luka	8/13/1981	5.7	oblique	10	0.7302	A
1243	473	ST575	Izmit (aftershock)	9/13/1999	5.8	oblique	15	0.7138	A
642	292	ST225	bria Marche (aftershock)	10/14/1997	5.6	normal	23	0.524	A
5272	1338	ST2487	Mt. Vatnafjoll	5/25/1987	6	oblique	24	0.3222	A
7156	2313	ST3291	Firuzabad	6/20/1994	5.9	strike slip	21	30.439	A
mean:					5.828571		19.57142857	0.941442857	

FIGURA 5.5 – parametri di estrazione della settupla di accelerogrammi con REXEL

Gli accelerogrammi scaricati sono poi stati scalati al valore di $PGA_0=0,172g$ (**FIGURA 5.6**).



FIGURA 5.6 – Rappresentazione grafica degli accelerogrammi al bedrock sismico scalati a $0,172g$ (Tr 949 anni)

5.2.4. PROVA DI COLONNA RISONANTE DEI TERRENI SUPERFICIALI

Le prove di colonna risonante consentono di determinare il modulo di taglio G e lo smorzamento dei terreni al variare delle deformazione di taglio imposta, da valori molto piccoli (intorno a $10^{-50}\%$) fino a circa $10^{-2}\%$. Vengono largamente impiegate in tutti i casi in cui i terreni sono sottoposti a sollecitazioni dinamiche, per lo studio dei problemi di deformazione dei terreni e di propagazione delle onde. Per i primi 15 metri di terreni coesivi prevalenti si è adottato il modello di decadimento del modulo di taglio alle basse deformazioni G_0 dei terreni coesivi plastici (assunzione cautelativa, in quanto sono state usate le curve per $IP=30\%$, quando invece la componente limosa presente ne abbassa la plasticità). Per i terreni sabbiosi profondi si è tenuto conto dello stato tensionale derivante dalla profondità, prendendo a riferimento le rispettive giuste curve di G_0 .

5.3. CODICE STRATA PER LA RSL

Nelle schermate del software STRATA utilizzato come codice di calcolo, si possono vedere le curve utilizzate e tutta la modellazione stratigrafica, geotecnica e geofisica che descrive il modello costruito per l'analisi.

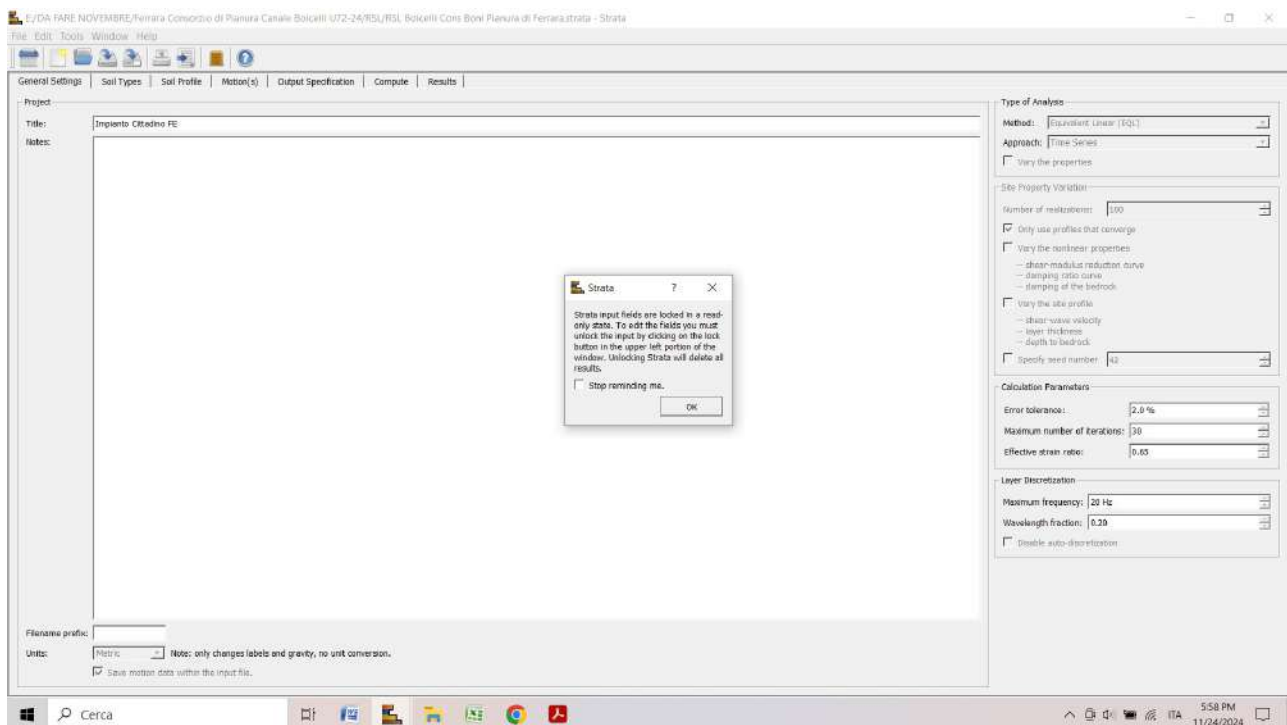


FIGURA 5.7

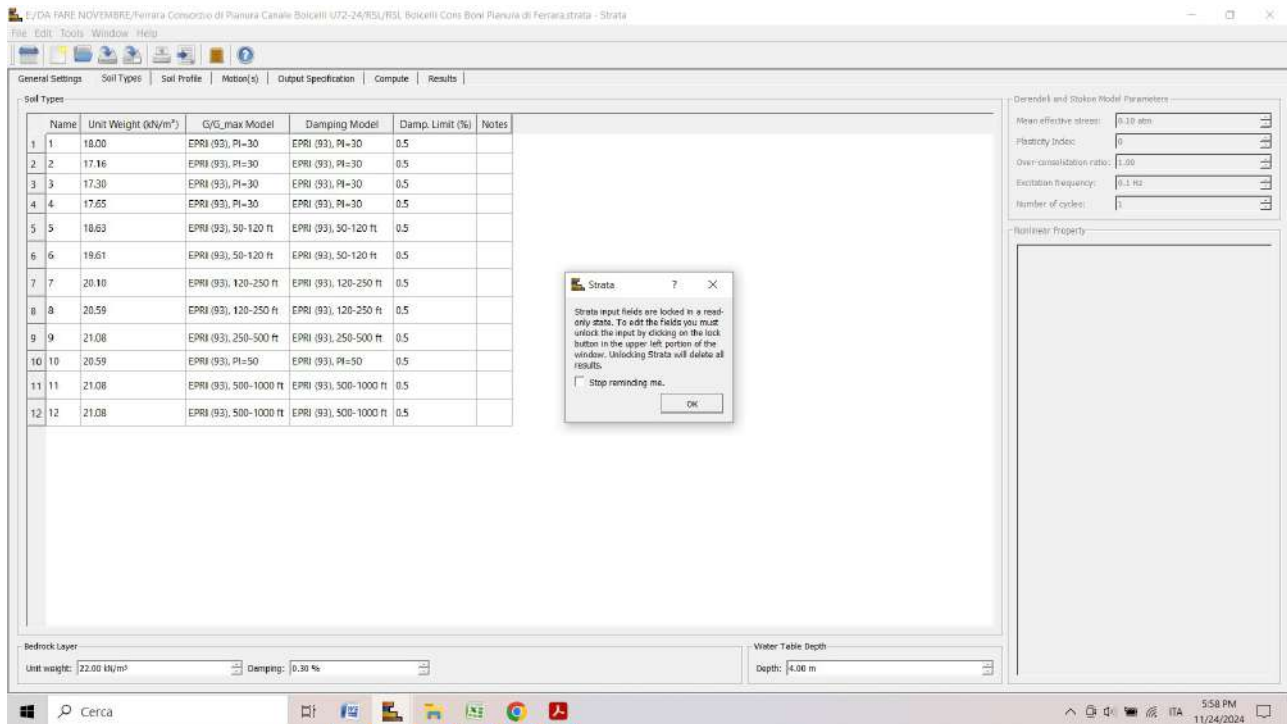


FIGURA 5.8

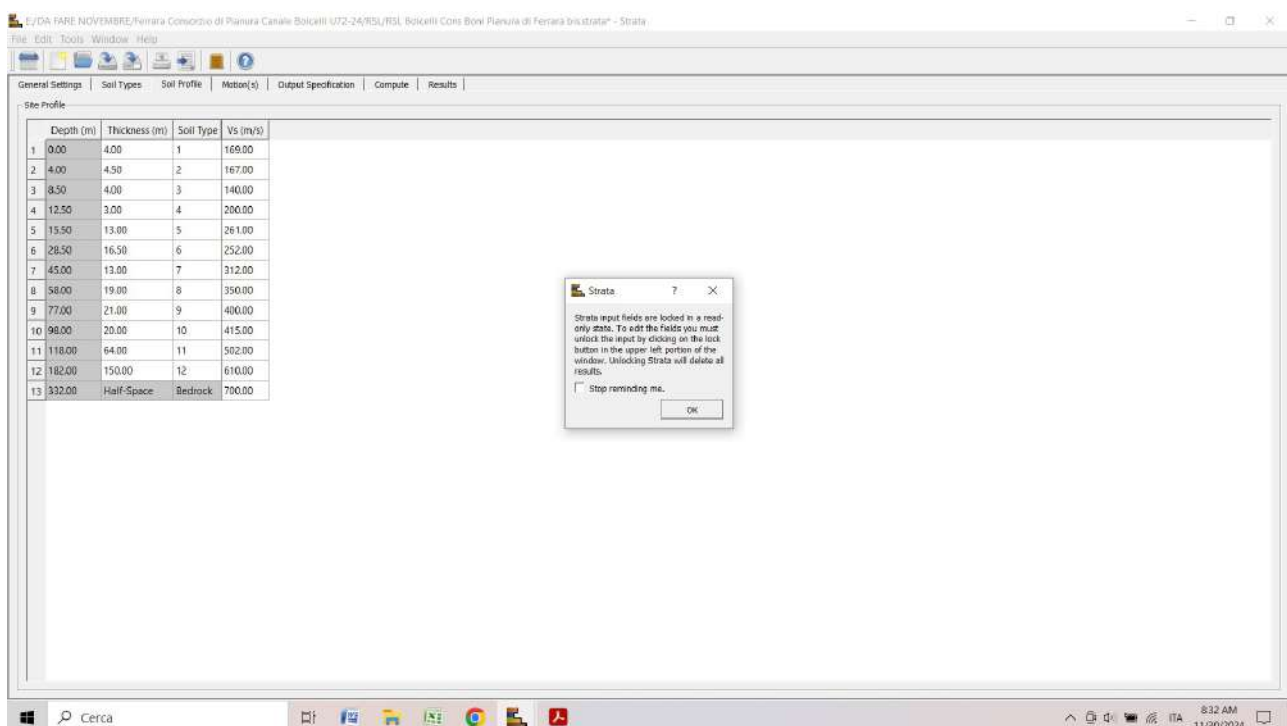


FIGURA 5.9

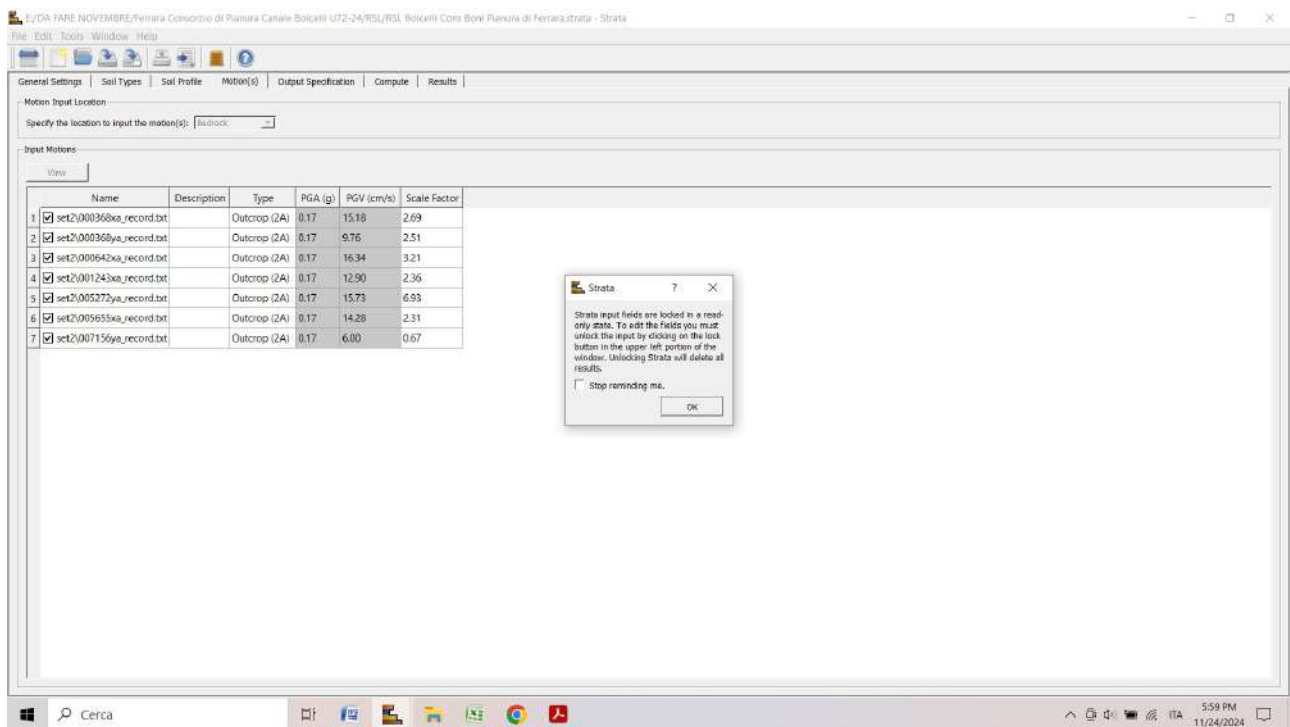
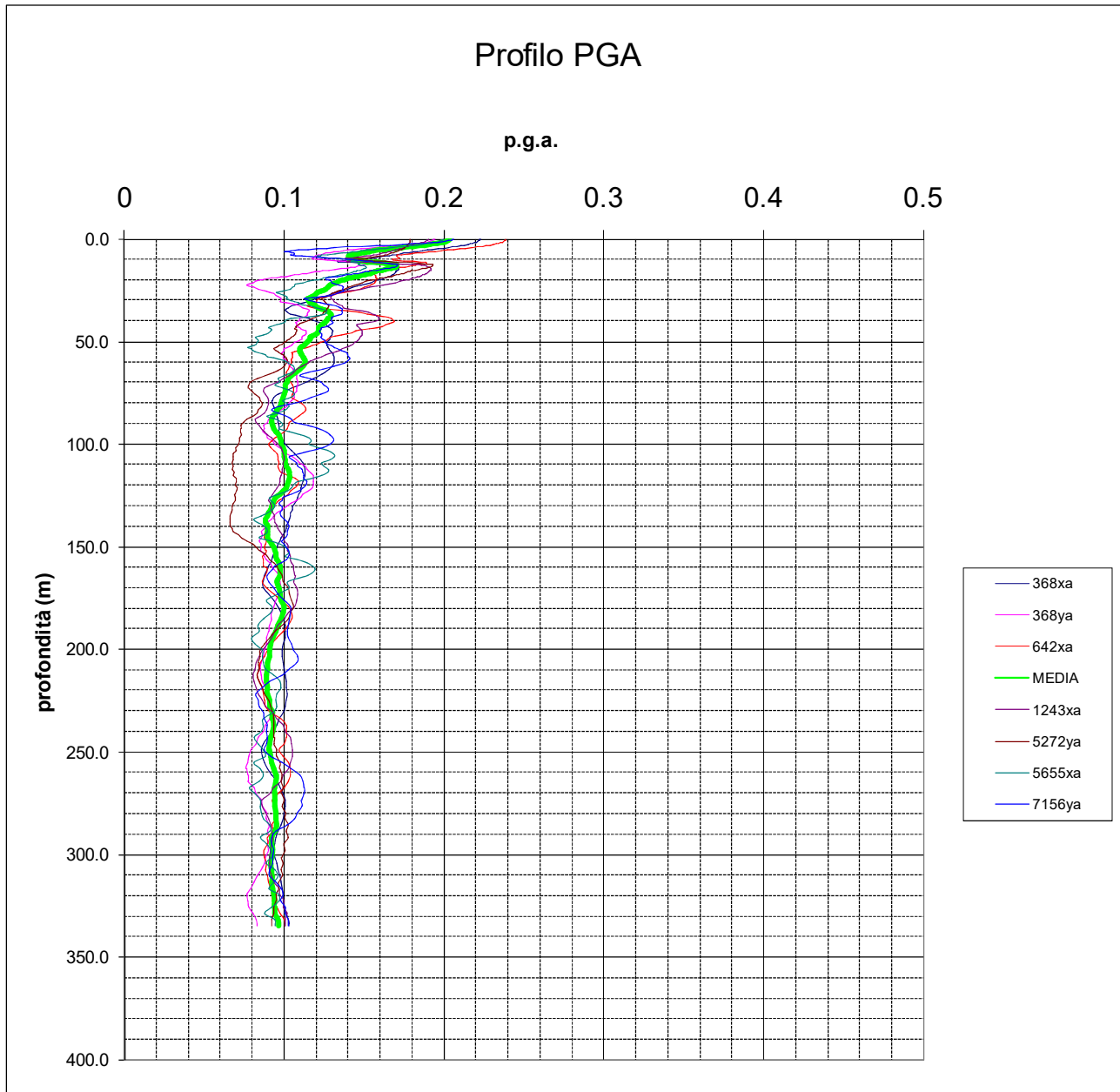


FIGURA 5.10– Schermate di input per l'analisi della RSL con il codice STRATA

5.4. DATI DI OUTPUT DELLA RSL

5.4.1. PROFILO DELLA PGA CON LA PROFONDITÀ E FATTORE DI AMPLIFICAZIONE

FA



falda		4 m	F.A.
P.G.A. bedrock		0.172	
P.G.A. superficie	368xa	0.223	1.29
P.G.A. superficie	368ya	0.194	1.13
P.G.A. superficie	642xa	0.239	1.39
P.G.A. superficie	1243xa	0.191	1.11
P.G.A. superficie	5272ya	0.179	1.04
P.G.A. superficie	5655xa	0.200	1.16
P.G.A. superficie	7156ya	0.206	1.20
P.G.A. superficie	Strata Media	0.204	1.18

FIGURA 5.11 – Profilo della PGA con la profondità e tabella riassuntiva dei fattori di amplificazione. F.A. medio è pari a 1,18.

5.4.2. FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

La funzione di trasferimento ricavata dal modello teorico adottato con l'analisi della risposta sismica locale viene confermato dai valori misurati con le prove HVSR in questo settore della Città. In verità è il modello che è stato adattato ai risultati della funzione di trasferimento, portando la profondità del bedrock a -332m di profondità per far tornare il primo modo di vibrare a 0,88Hz.

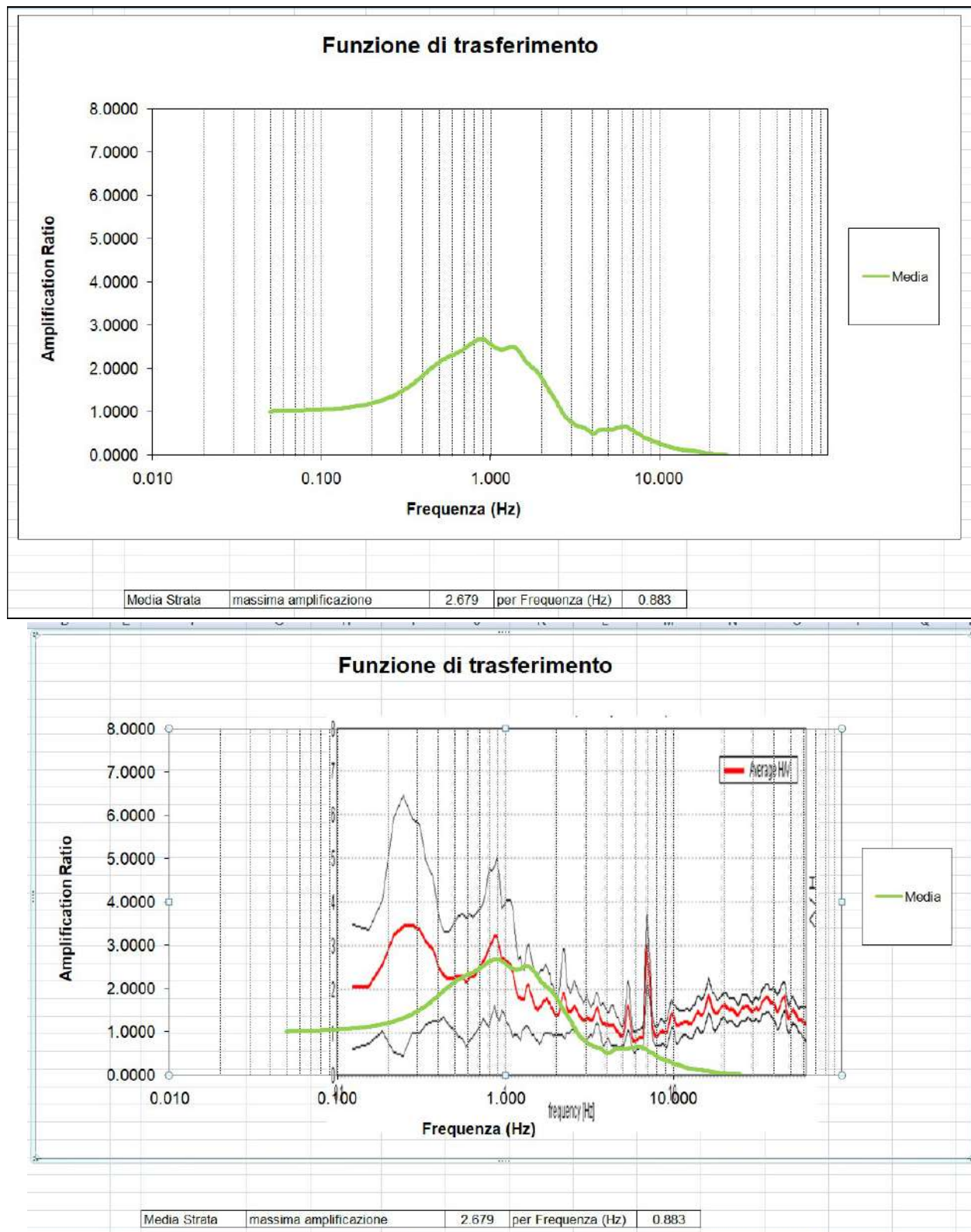


FIGURA 5.12 – Funzione di trasferimento da RSL

5.4.3. SPETTRO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE

In **FIGURA 5.13** si riporta lo spettro medio di risposta in accelerazione ricavato dalla analisi di risposta sismica locale raffrontato allo spettro semplificato di tipo C e di tipo D.

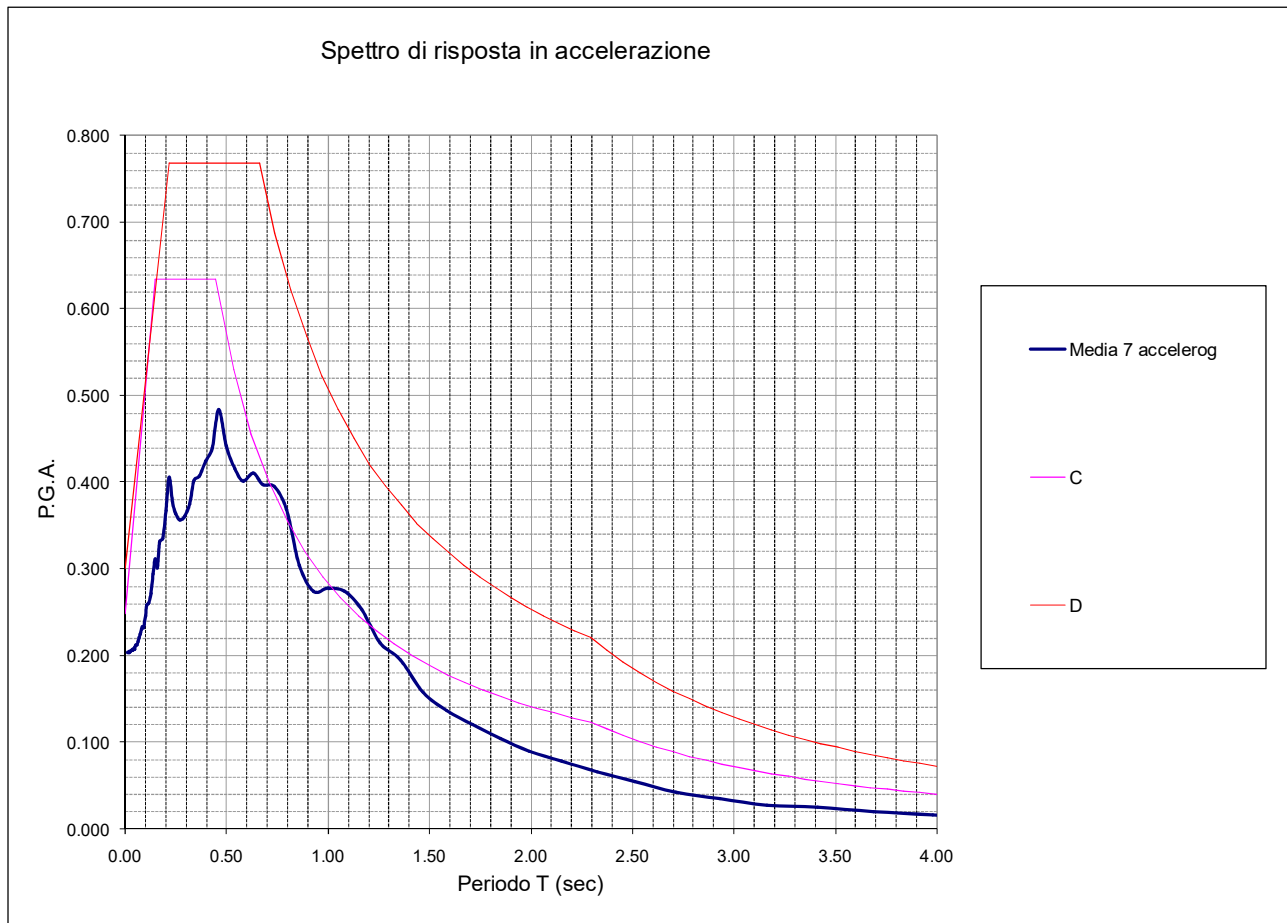


FIGURA 5.13 – Spettro in accelerazione di output derivato da analisi della risposta sismica locale condotta con alcuni dati bibliografici e altri sito specifici

NTC2008 C		NTC2008 D	
0.000	0.248	0.000	0.301
0.149	0.635	0.220	0.768
0.447	0.635	0.661	0.768
0.535	0.531	0.739	0.688
0.623	0.456	0.816	0.622
0.711	0.399	0.894	0.568
0.799	0.355	0.972	0.523
0.886	0.320	1.049	0.484
0.974	0.291	1.127	0.451
1.062	0.267	1.205	0.421
1.150	0.247	1.282	0.396
1.238	0.229	1.360	0.373
1.326	0.214	1.438	0.353
1.414	0.201	1.516	0.335
1.502	0.189	1.593	0.319
1.589	0.179	1.671	0.304
1.677	0.169	1.749	0.290
1.765	0.161	1.826	0.278
1.853	0.153	1.904	0.267
1.941	0.146	1.982	0.256
2.029	0.140	2.059	0.247
2.117	0.134	2.137	0.238
2.205	0.129	2.215	0.229
2.292	0.124	2.292	0.222
2.374	0.115	2.374	0.207
2.455	0.108	2.455	0.193
2.536	0.101	2.536	0.181
2.618	0.095	2.618	0.170
2.699	0.089	2.699	0.160
2.780	0.084	2.780	0.151
2.862	0.079	2.862	0.142
2.943	0.075	2.943	0.134
3.024	0.071	3.024	0.127
3.106	0.067	3.106	0.121
3.187	0.064	3.187	0.115
3.268	0.061	3.268	0.109
3.349	0.058	3.349	0.104
3.431	0.055	3.431	0.099
3.512	0.053	3.512	0.094
3.593	0.050	3.593	0.090
3.675	0.048	3.675	0.086
3.756	0.046	3.756	0.083
3.837	0.044	3.837	0.079
3.919	0.042	3.919	0.076
4.000	0.041	4.000	0.073

FIGURA 5.14 – valori tabellati degli spettri della Categoria C e della Categoria D

In **FIGURA 5.15** si riportano i valori tabellari che disegnano lo spettro di risposta sismica espresso in accelerazione spettrale.

periodo T (sec)	368xa	368ya	642xa	1243xa	5272ya	5655xa	7156ya	MEDIA
0.01	0.22	0.19	0.24	0.190528	0.179056	0.200133	0.206592	0.204
0.01	0.22	0.19	0.24	0.190559	0.17906	0.200174	0.206683	0.204
0.01	0.22	0.19	0.24	0.190596	0.17907	0.200222	0.206789	0.204
0.01	0.22	0.19	0.24	0.190651	0.179075	0.200279	0.206913	0.204
0.01	0.22	0.19	0.24	0.190702	0.179082	0.200345	0.20702	0.204
0.01	0.22	0.19	0.24	0.19076	0.179089	0.200423	0.207196	0.204
0.02	0.22	0.19	0.24	0.190829	0.179098	0.200526	0.207401	0.204
0.02	0.22	0.19	0.24	0.19091	0.179109	0.200633	0.207641	0.204
0.02	0.22	0.19	0.24	0.191005	0.17912	0.200759	0.207922	0.204
0.02	0.22	0.20	0.24	0.191116	0.179134	0.200907	0.208249	0.205
0.02	0.22	0.20	0.24	0.191246	0.179151	0.201082	0.208632	0.205
0.02	0.22	0.20	0.24	0.191399	0.179181	0.201289	0.209078	0.205
0.03	0.22	0.20	0.24	0.191603	0.179203	0.201535	0.2096	0.205
0.03	0.22	0.20	0.24	0.191815	0.179228	0.201828	0.210222	0.205
0.03	0.22	0.20	0.24	0.192066	0.179258	0.202179	0.210936	0.206
0.03	0.22	0.20	0.24	0.192361	0.179293	0.202311	0.211768	0.206
0.03	0.22	0.20	0.24	0.192708	0.179334	0.20287	0.212746	0.206
0.04	0.22	0.20	0.24	0.193121	0.179381	0.203613	0.213881	0.207
0.04	0.22	0.20	0.24	0.193545	0.179443	0.2047	0.213405	0.207
0.04	0.23	0.20	0.24	0.193944	0.179527	0.206173	0.213928	0.208
0.05	0.23	0.20	0.24	0.19457	0.179616	0.208904	0.211505	0.208
0.05	0.23	0.20	0.24	0.195579	0.179673	0.214828	0.216883	0.210
0.05	0.23	0.20	0.24	0.197934	0.179755	0.217443	0.227703	0.213
0.06	0.23	0.21	0.24	0.198715	0.179923	0.215936	0.223253	0.213
0.06	0.23	0.21	0.25	0.199469	0.180215	0.223209	0.241709	0.217
0.07	0.23	0.21	0.25	0.201132	0.180502	0.226723	0.263705	0.221
0.07	0.23	0.21	0.25	0.202192	0.180728	0.219313	0.296884	0.225
0.08	0.24	0.22	0.25	0.204213	0.181216	0.229437	0.317239	0.230
0.09	0.23	0.22	0.26	0.210349	0.18198	0.233528	0.316285	0.233
0.09	0.24	0.23	0.27	0.19986	0.182578	0.227129	0.302838	0.233
0.10	0.23	0.25	0.28	0.203096	0.182741	0.256793	0.359194	0.247
0.11	0.24	0.24	0.27	0.229221	0.189944	0.277213	0.404747	0.259
0.12	0.25	0.22	0.27	0.236445	0.2044	0.265314	0.423039	0.261
0.13	0.28	0.28	0.27	0.219256	0.206648	0.275103	0.42353	0.272
0.14	0.32	0.30	0.26	0.204269	0.21391	0.349695	0.483432	0.294
0.15	0.31	0.34	0.28	0.226776	0.21848	0.322594	0.58935	0.312
0.16	0.28	0.40	0.29	0.253832	0.184489	0.286299	0.508916	0.302
0.17	0.31	0.42	0.30	0.255394	0.214462	0.387432	0.540295	0.332
0.18	0.26	0.44	0.29	0.256368	0.257823	0.40654	0.530802	0.336
0.20	0.28	0.39	0.30	0.346745	0.299815	0.45617	0.563211	0.367
0.22	0.31	0.43	0.34	0.43636	0.311485	0.474376	0.633565	0.406
0.23	0.26	0.40	0.36	0.467145	0.276255	0.380449	0.578954	0.378
0.25	0.29	0.36	0.42	0.427914	0.273042	0.333402	0.501075	0.364
0.27	0.30	0.34	0.43	0.398289	0.25906	0.300114	0.536979	0.357
0.29	0.35	0.36	0.41	0.379122	0.257555	0.271233	0.578996	0.360
0.32	0.40	0.30	0.40	0.452995	0.27336	0.303149	0.575896	0.375
0.34	0.45	0.40	0.42	0.488545	0.272999	0.339215	0.495756	0.402
0.37	0.52	0.43	0.47	0.461203	0.274649	0.34084	0.416847	0.407
0.40	0.45	0.41	0.57	0.470146	0.304263	0.424401	0.390643	0.425
0.43	0.40	0.41	0.67	0.48578	0.343064	0.414208	0.413041	0.439
0.46	0.47	0.51	0.71	0.579197	0.431746	0.37243	0.388896	0.484
0.50	0.40	0.39	0.71	0.65559	0.439939	0.359716	0.283539	0.443
0.54	0.54	0.30	0.79	0.71741	0.350084	0.329654	0.206582	0.416
0.58	0.57	0.42	0.67	0.732319	0.359208	0.319885	0.127445	0.402
0.63	0.54	0.48	0.64	0.675565	0.396769	0.372157	0.119307	0.411
0.68	0.49	0.42	0.71	0.563498	0.386387	0.42904	0.117765	0.398
0.74	0.55	0.40	0.72	0.462998	0.381055	0.504377	0.108065	0.395
0.79	0.52	0.39	0.55	0.469723	0.389089	0.460751	0.098272	0.369
0.86	0.39	0.38	0.35	0.437273	0.396945	0.37608	0.071902	0.305
0.93	0.37	0.33	0.36	0.378953	0.404607	0.285897	0.060002	0.274
1.00	0.39	0.37	0.35	0.309765	0.416778	0.265655	0.075004	0.278
1.08	0.30	0.32	0.43	0.341463	0.455153	0.241194	0.074548	0.275
1.17	0.32	0.22	0.45	0.333998	0.492288	0.215863	0.05969	0.253
1.26	0.24	0.17	0.39	0.306081	0.545357	0.191617	0.042263	0.215
1.36	0.21	0.18	0.29	0.269835	0.656144	0.169321	0.033758	0.20
1.47	0.21	0.15	0.19	0.242441	0.464352	0.148185	0.025206	0.16
1.58	0.17	0.14	0.16	0.206183	0.396628	0.146613	0.0201	0.14
1.71	0.16	0.15	0.12	0.152005	0.439793	0.131783	0.014278	0.12
1.85	0.12	0.13	0.13	0.148162	0.343589	0.111562	0.011545	0.10
2.00	0.09	0.10	0.13	0.140393	0.27298	0.096636	0.011934	0.09
2.15	0.08	0.06	0.13	0.119282	0.225084	0.091997	0.011795	0.08
2.33	0.05	0.05	0.09	0.115697	0.24974	0.085094	0.010613	0.07
2.51	0.05	0.04	0.07	0.087378	0.19531	0.073959	0.009551	0.05
2.71	0.03	0.03	0.05	0.062747	0.136015	0.064127	0.008629	0.04
2.93	0.03	0.03	0.04	0.063267	0.090633	0.054067	0.00768	0.04
3.16	0.02	0.02	0.03	0.049322	0.069184	0.04229	0.007051	0.03
3.41	0.02	0.02	0.02	0.049977	0.064311	0.038885	0.006625	0.03
3.69	0.01	0.02	0.02	0.037761	0.055841	0.032806	0.00563	0.02
3.98	0.01	0.02	0.01	0.0232	0.046782	0.026105	0.004271	0.02
4.30	0.01	0.01	0.01	0.017466	0.037389	0.021449	0.003117	0.01

FIGURA 5.15– Valori degli spettri dei sette accelerogrammi analizzati e valore medio

5.5. SCOPO DI QUESTA ANALISI DI RSL E CONCLUSIONI

Questa analisi di risposta sismica locale è stata condotta in parte con dati sito specifici (che sono poi quelli più sensibili e condizionanti i risultati della RSL) ed in parte con i dati bibliografici attentamente reperiti selezionati dallo scrivente. Come indicato all'inizio del capitolo per condurre una analisi di Risposta Sismica Locale servono:

- a. modello geologico stratigrafico di dettaglio dei primi 30m/40m di terreno;
- b. profilo di Vs di dettaglio dei primi 30m/40m;
- c. profilo di Vs profondo fino al bedrock sismico;
- d. modello geologico stratigrafico di dettaglio fino al bedrock sismico;
- e. curve sitospecifiche di decadimento del modulo G_0 , espresse attraverso il rapporto G/G_0 , e curve di smorzamento D ricavati da prove di colonna risonante, o prove triassiali cicliche, per i terreni campionati nei primi 30m/40m;
- f. curve bibliografiche idonee di G_0 e D , da attribuire ai terreni profondi fino al bedrock sismico.
- g. gruppo di 7 accelerogrammi spettro compatibili per la definizione del moto sismico al bedrock.

Il punto a) ed il punto b) sono pienamente soddisfatti dalle indagini condotte in sito.

Il punto c) è pienamente soddisfatto dalle indagini condotte in sito.

Il punto d) è soddisfatto con la sezione geologica passante in prossimità del sito reperita in banca dati regionale.

Il punto e) è il più debole in questa analisi, ma le curve utilizzate sono state attentamente selezionate, con un approccio cautelativo, in modo da avere meno dumping (smorzamento) rispetto ai terreni in sito.

Per i terreni profondi fino al bedrock (punto f), essendo sostanzialmente costituiti da sabbie si sono scelte le idonee curve di decadimento di G_0 funzione dello stato tensionale, quindi della profondità. Per le argille profonde si è usata cautelativamente una curva per argille con IP pari al 50%.

Il punto g) è pienamente soddisfatto dalle operazioni svolte per la selezione del gruppo di accelerogrammi.

La bontà del modello adottato viene confermata dal confronto tra la curva della funzione di trasferimento misurata con le prove HVSR e la funzione di trasferimento di output della RSL (vedi **FIGURA 5.12**).

Quello che conta è dunque il finale delle analisi di risposta sismica locale che indicano un fattore di amplificazione di circa $F.A.=PGA/PGA_0=1,18$, inferiore al $F.A.=1,44$ ricavato dall'approccio semplificato che tiene conto solo della Vs30.

Anche lo spettro in accelerazione derivato dalla RSL per periodi minori di 0,7 secondi è inferiore come accelerazione spettrale rispetto a quello ricavato dal ricorso al suolo di categoria C (spettro semplificato). Per periodi superiori a 0,7 secondi i due spettri in accelerazione sono abbastanza simili.

La liquefazione delle sabbie non emerge utilizzando le azioni sismiche del suolo di categoria C, pertanto non è stato necessario ripetere l'analisi con accelerazioni sismiche di entità minore emerse dall'analisi della RSL.

Pertanto sia nelle analisi strutturali che in quelle geotecniche è più cautelativo ricorrere alla risposta sismica da spettro semplificato di categoria C (calcolato in base alla Vs30).

Codigoro, li 28/01/2025

Dott. Geologo Thomas Veronese

COMMITTENTE: Veronese Dott. Geol. Thomas

CANTIERE: Ferrara, Via Michelini

PROVA N°: CPTU1

DATA: 30/10/2024

Operatore M. Mengato

Punta Piezocono

Quota p.c.: 0,00 m.s.l.m.

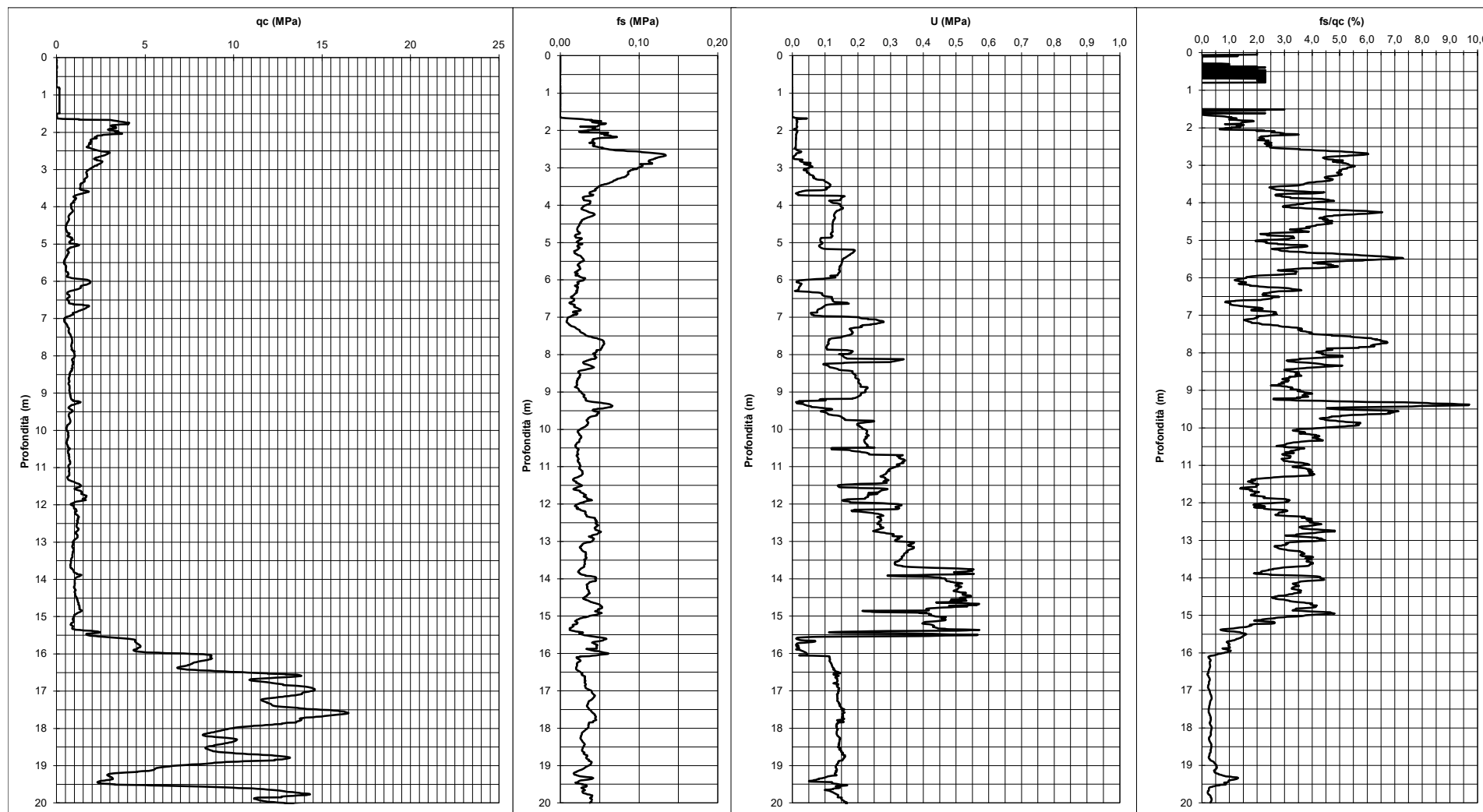
Coordinate X Y

Preforo 0,00 m

Livello acqua 4,10 m da p.c.

Profondità finale 40,00 m da p.c.

NOTE



COMMITTENTE: Veronese Dott. Geol. Thomas

CANTIERE: Ferrara, Via Michellini

PROVA N°: CPTU1

DATA: 30/10/2024

Operatore M. Mengato

Punta Piezocono Quota p.c.: 0,00 m.s.l.m.

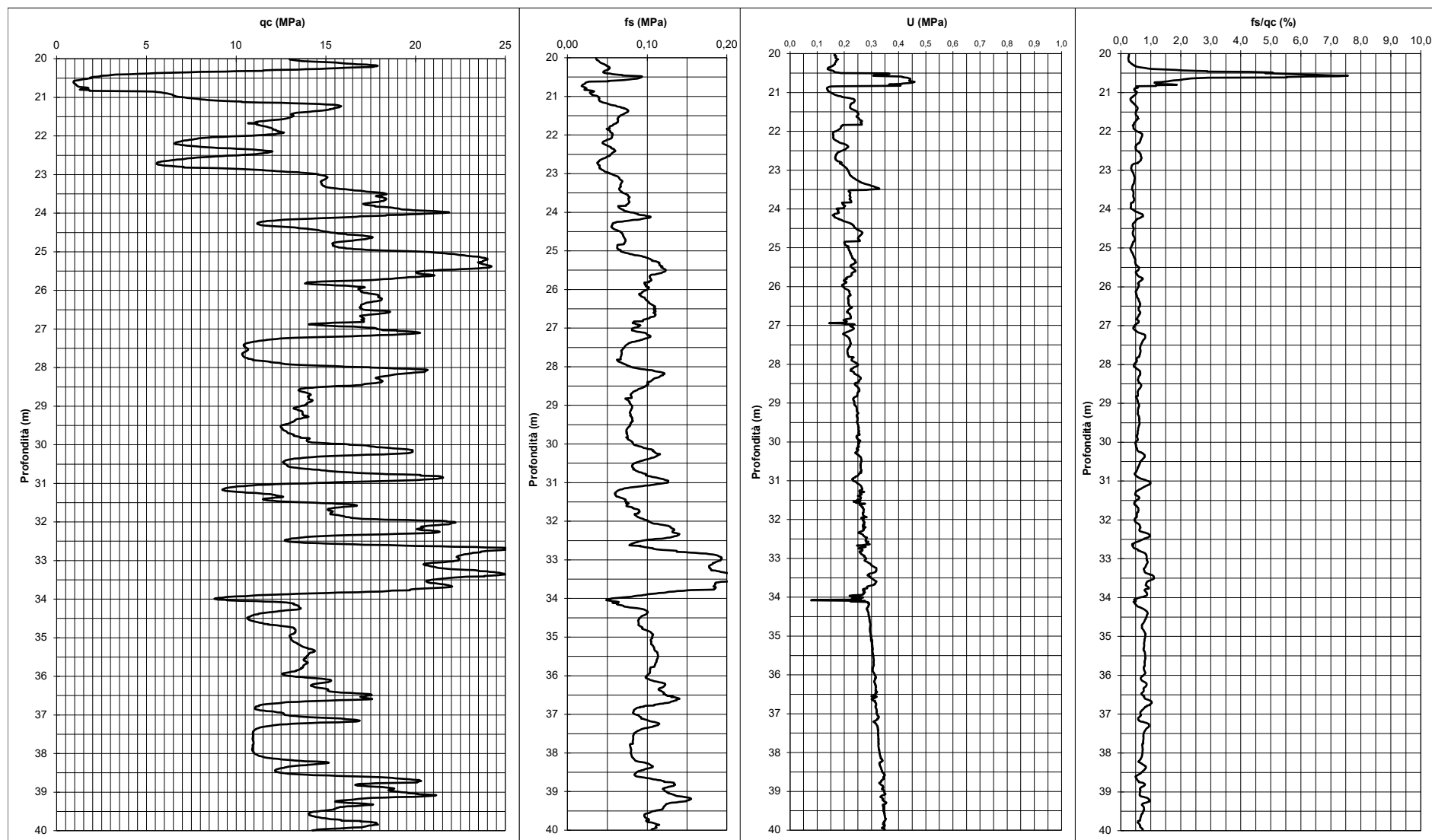
Coordinate X Y

Preforo 0,00 m

Livello acqua 4,10 m da p.c.

Profondità finale 40,00 m da p.c.

NOTE



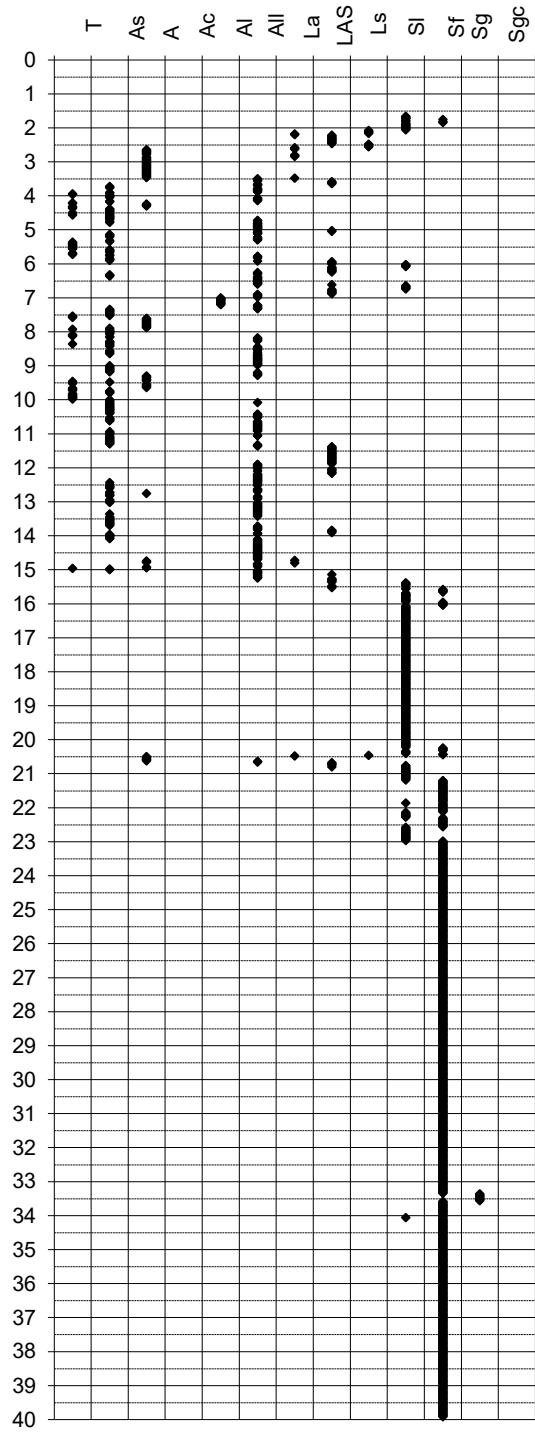
Identificativo	U72-24
Emissione	nov-24
Pagina	1 di

PROVA PENETROMETRICA STATICA

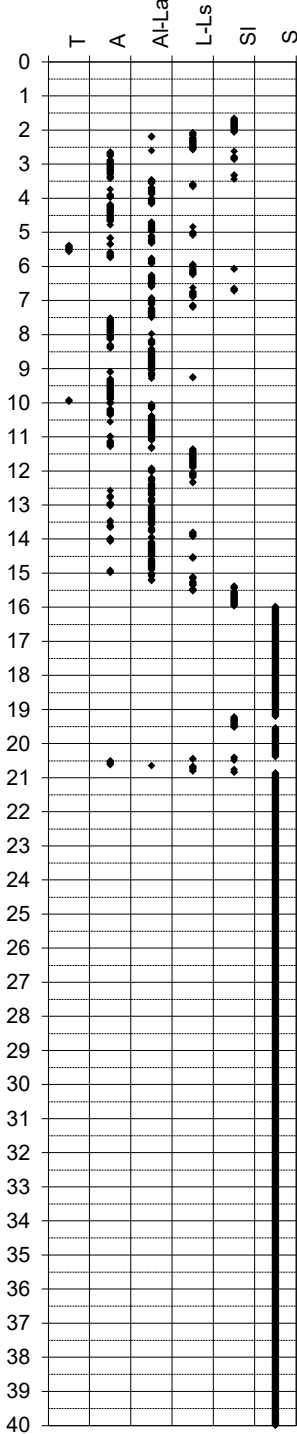
INTERPRETAZIONI LITOLOGICHE

-Committente	Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara	-Prova n°	CPTU1
-Cantiere	Via Fellini, Ferrara (FE)	-Data prova	30/10/2024
-Quota p.c.	8,00 m s.l.m.	-Prof. preforo	0,80 m
-Livello di falda	4,10 m da p.c.	-Prof. finale	40,00 m
-Attrezzatura	Punta elettrica con piezocono		

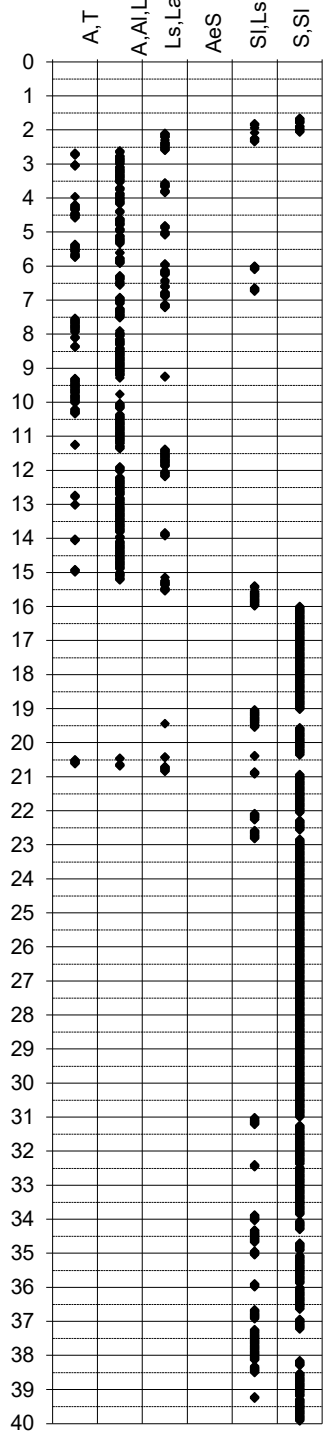
Douglas-Olsen (1981)



Robertson-Campanella(1983)



Olsen-Farr (1986)



PROVA PENETROMETRICA STATICA

Identificativo	U72-24
Emissione	nov-24
Pagina	1 di 0

PARAMETRI GEOTECNICI

-Committente	Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara	-Prova n°	CPTU1
-Cantiere	Via Fellini, Ferrara (FE)	-Data prova	30/10/2024
-Quota p.c.	8,00 m s.l.m.	-Prof. preforo	0,80 m
-Livello di falda	4,10 m da p.c.	-Prof. finale	40,00 m

							MATERIALI COESIVI						MATERIALI GRANULARI								
DA	A	qcm	fsm	deltaU	litol.	Peso Vol.	Cu (qc)	OCR (qc)	OCR (U)	M ₀	Eu50	CR	Dr	FI' _{DM}	FI' _{Bolton}	FI'Schm.				E'25	M ₀
m	m	MPa	MPa	MPa	(-)	kN/m3	KPa	(-)	(-)	MPa	MPa	(-)	(%)	(°)	(°)	(°)				MPa	MPa
1,7	3,6	2,25	0,07	0,00	Al-La	18,00	111	16	-	5,98	19,93	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	
3,6	6,0	0,77	0,03	0,10	A	17,50	41	3	6	3,16	17,2	0,24	-	-	-	-	-	-	-	-	
6,0	7,0	1,09	0,02	0,05	L-Ls	20,00	53	3	8	3,82	22,38	0,23	<20	26	24	26	30	33	37	3,65	5,85
7,0	11,4	0,74	0,03	0,15	Al-La	18,00	38	2	5	3,27	20,92	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	
11,4	15,5	1,11	0,03	0,27	Al-La	18,00	53	2	5	4,16	28,17	0,29	-	-	-	-	-	-	-	-	
15,5	19,0	10,16	0,03	0,00	S	20,00	-	-	-	-	-	-	52	33	30	35	37	40	42	25,41	37,67
19,0	21,0	7,33	0,04	0,03	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	44	30	27	32	35	37	40	19,82	28,86
21,0	22,9	10,41	0,05	0,03	S	20,00	-	-	-	-	-	-	48	32	29	35	37	39	42	26,03	38,68
22,9	34,0	16,57	0,10	0,00	S	20,00	-	-	-	-	-	-	62	34	30	37	39	41	43	41,43	53,12
34,0	40,0	13,79	0,10	0,00	S	20,00	-	-	-	-	-	-	49	33	29	35	37	39	42	34,47	47,56

COMMITTENTE: Veronese Dott. Geol. Thomas

CANTIERE: Ferrara, Via Michelini

PROVA N°: SCPTU1

DATA: 30/10/2024

Operatore M. Mengato

Punta Piezocono

Quota p.c.: 0,00 m.s.l.m.

Coordinate X

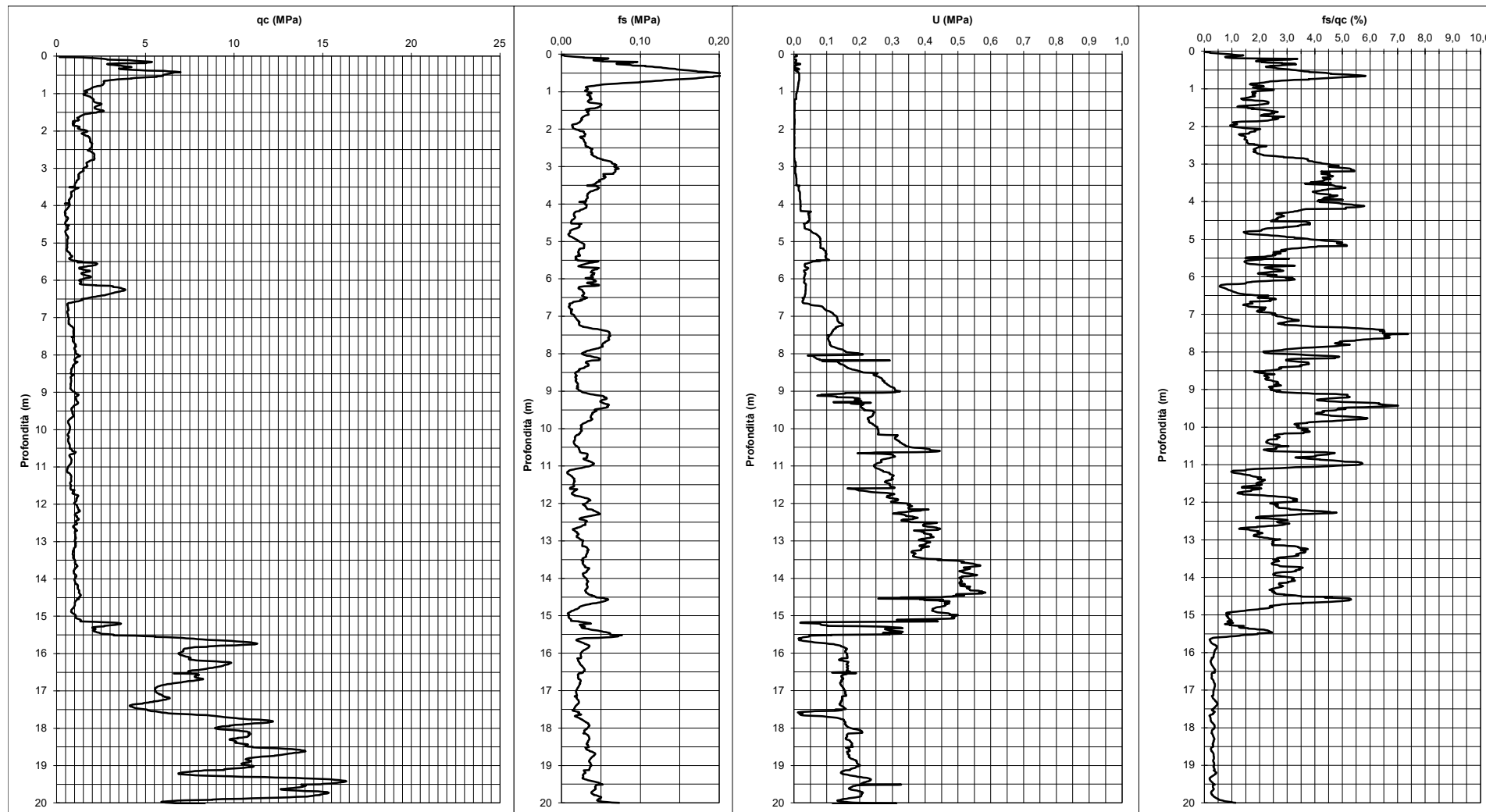
Y

Preforo 0,00 m

Livello acqua 4,10 m da p.c.

Profondità finale 35,60 m da p.c.

NOTE



COMMITTENTE: Veronese Dott. Geol. Thomas

CANTIERE: Ferrara, Via Michelinì

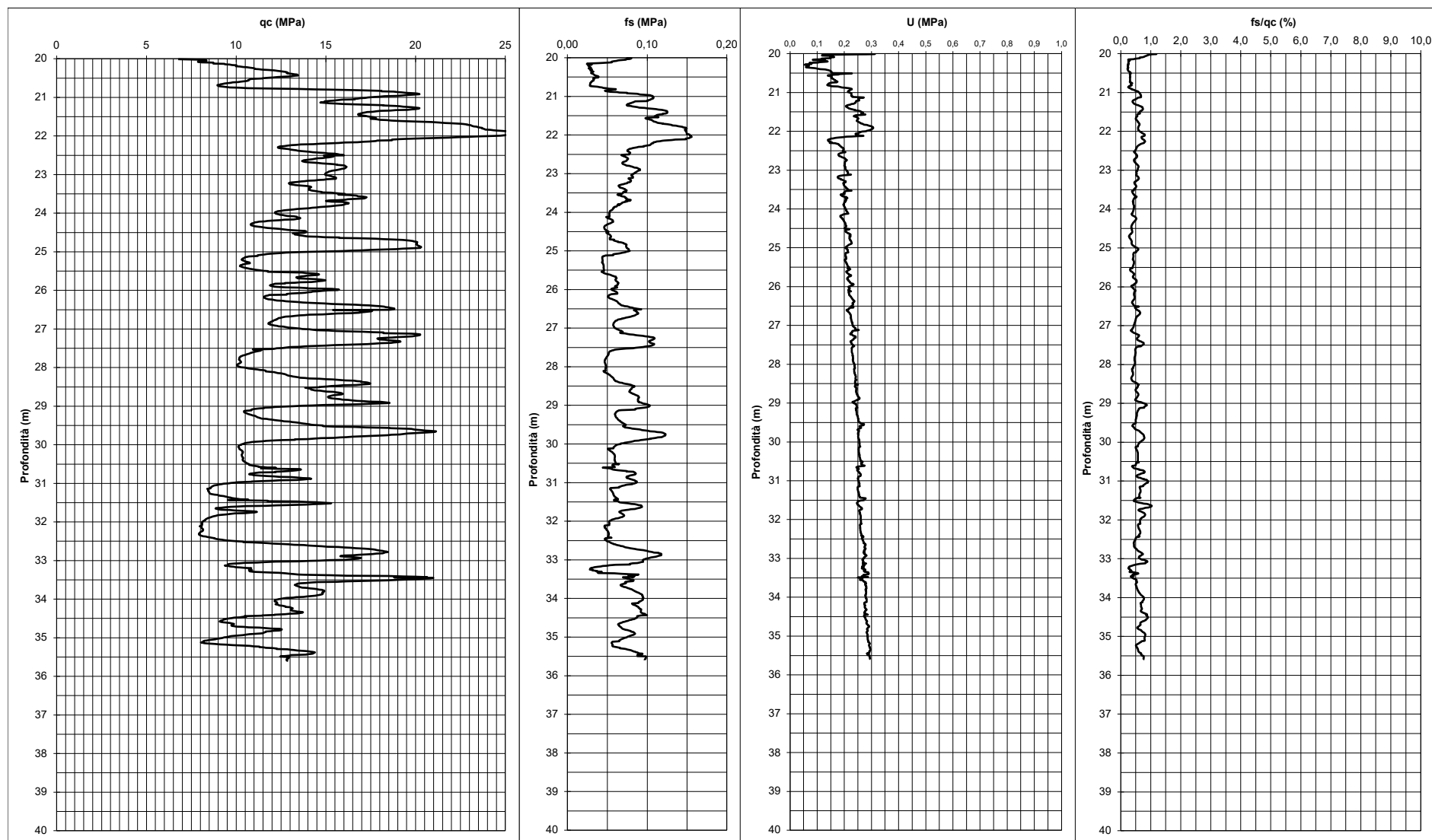
PROVA N°: SCPTU1

DATA: 30/10/2024

Operatore M. Mengato

Punta Piezocono Quota p.c.: 0,00 m.s.l.m. Coordinate X Y
Preforo 0,00 m Livello acqua 4,10 m da p.c. Profondità finale 35,60 m da p.c.

NOTE



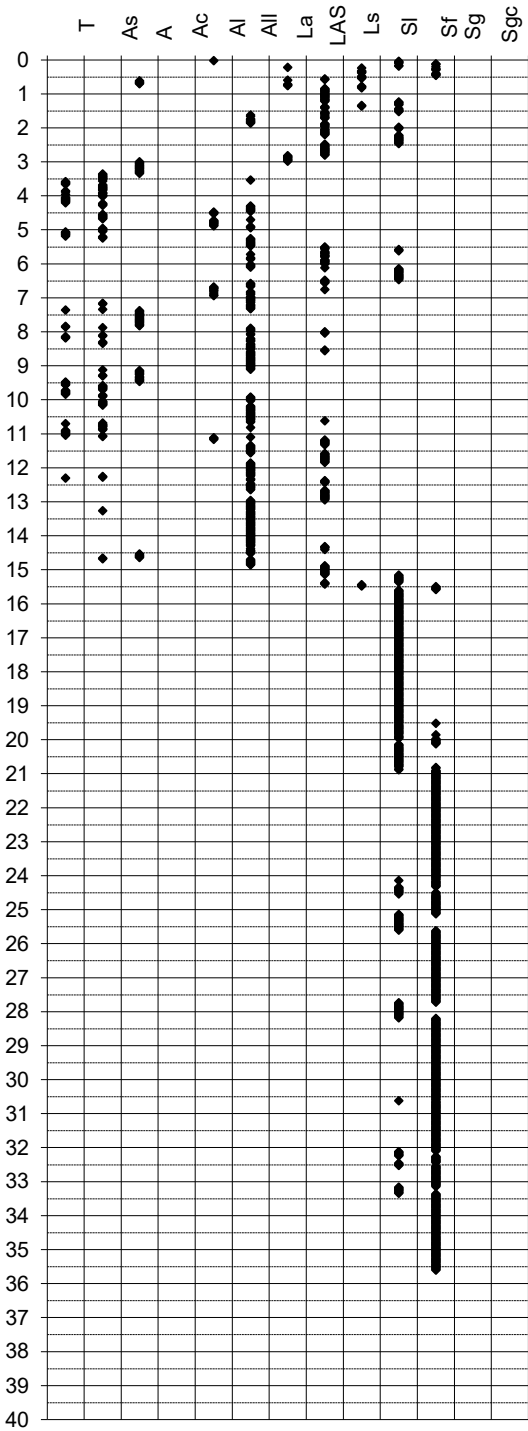
PROVA PENETROMETRICA STATICA

Identificativo	U72-24
Emissione	nov-24
Pagina	1 di

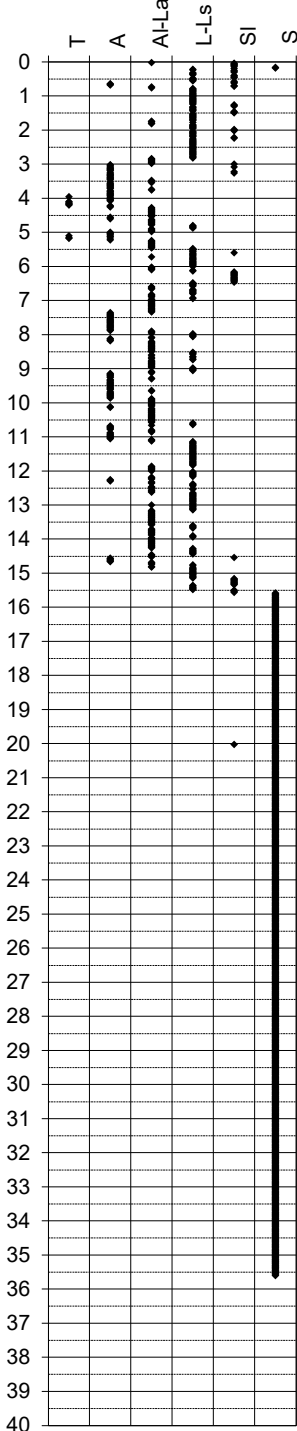
INTERPRETAZIONI LITOLOGICHE

-Committente	Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara	-Prova n°	SCPTU1
-Cantiere	Via Fellini, Ferrara (FE)	-Data prova	30/10/2024
-Quota p.c.	8,00 m s.l.m.	-Prof. preforo	m
-Livello di falda	4,10 m da p.c.	-Prof. finale	35,60 m
-Attrezzatura	Punta elettrica con piezocono		

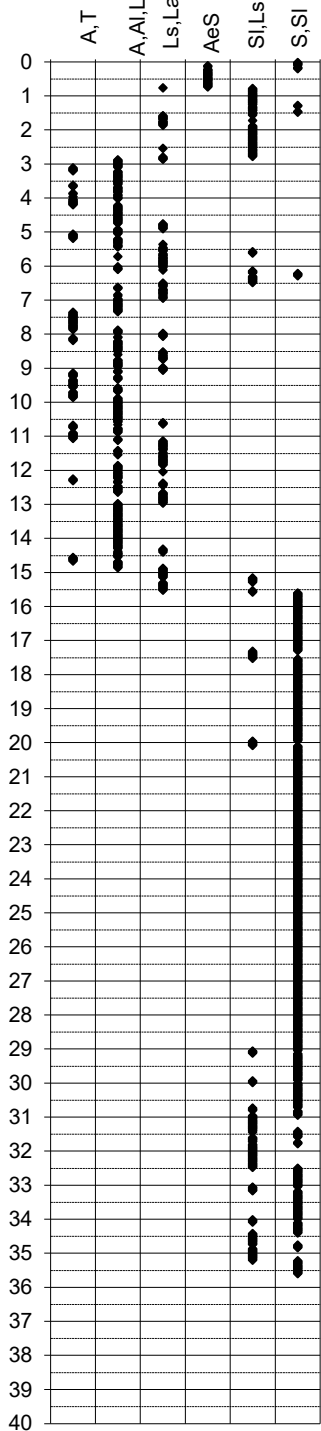
Douglas-Olsen (1981)



Robertson-Campanella(1983)



Olsen-Farr (1986)



PROVA PENETROMETRICA STATICA

Identificativo	U72-24
Emissione	nov-24
Pagina	1 di 0

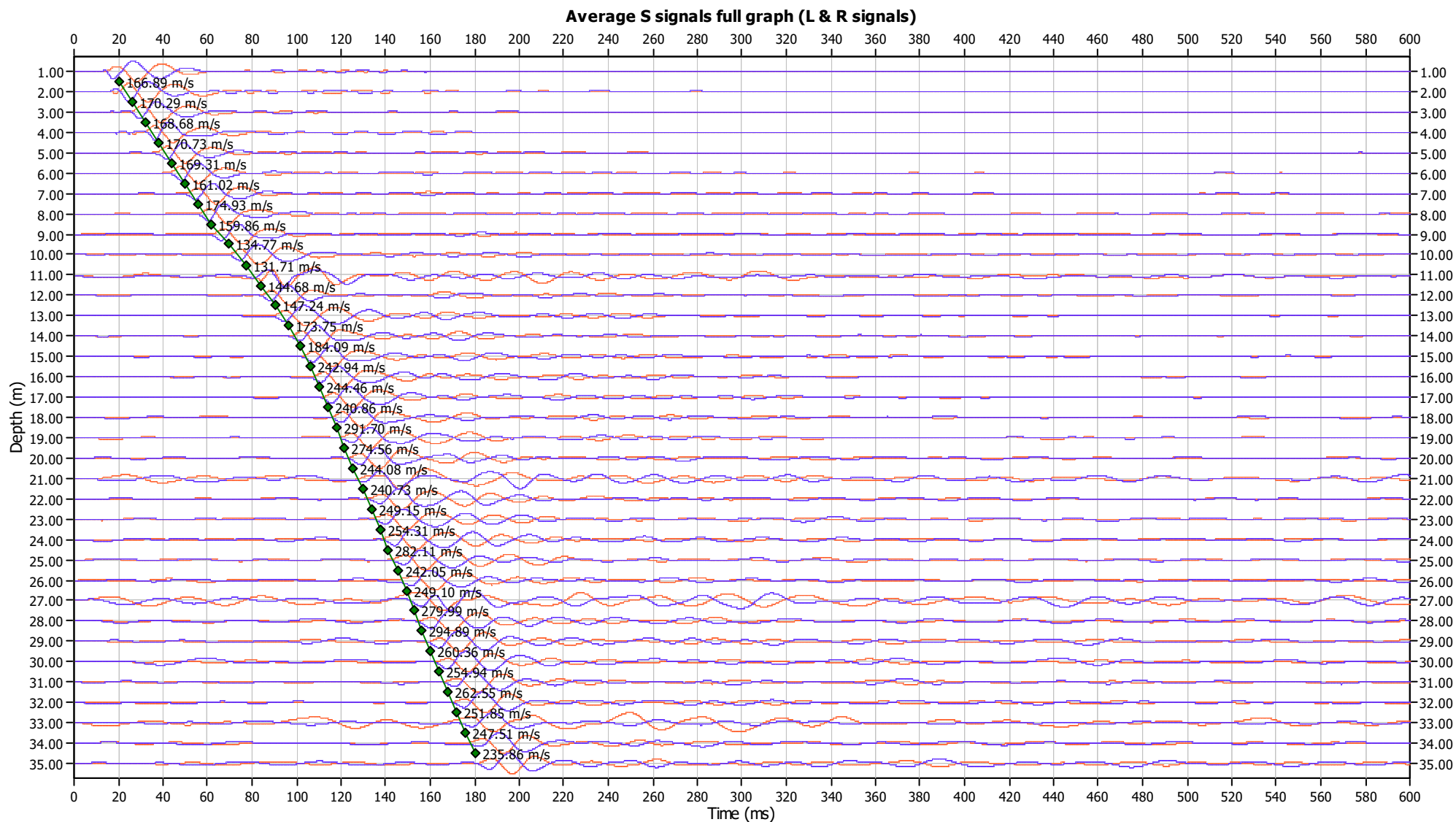
PARAMETRI GEOTECNICI

-Committente	Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara	-Prova n°	SCPTU1
-Cantiere	Via Fellini, Ferrara (FE)	-Data prova	30/10/2024
-Quota p.c.	8,00 m s.l.m.	-Prof. preforo	0,00 m
-Livello di falda	4,10 m da p.c.	-Prof. finale	35,60 m

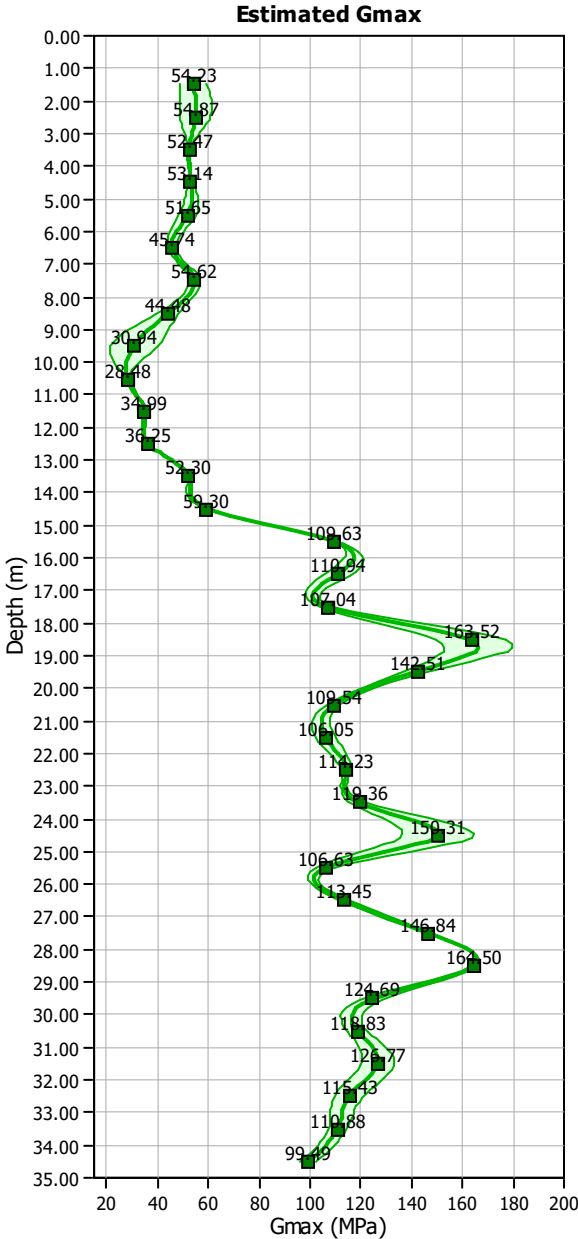
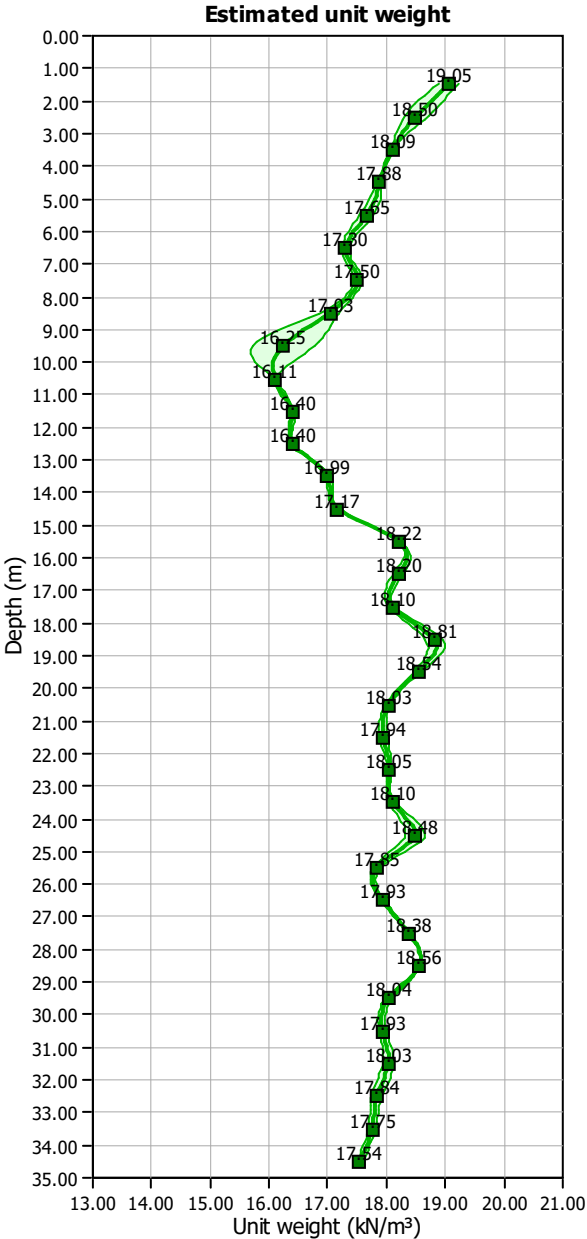
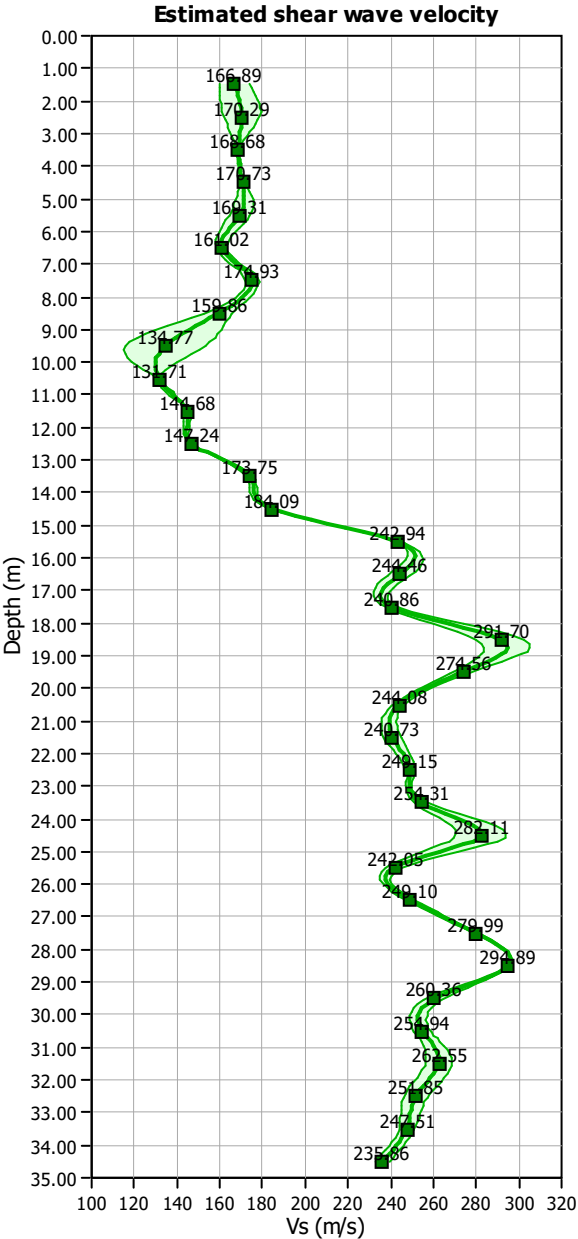
							MATERIALI COESIVI							MATERIALI GRANULARI									
DA	A	qcm	fsm	deltaU	litol.	Peso Vol.	Cu (qc)	OCR (qc)	OCR (U)	M ₀	Eu50	CR	Dr	FI' _{DM}	FI' _{Bolton}	FI'Schm.				E'25	M ₀		
m	m	MPa	MPa	MPa	(-)	kN/m3	KPa	(-)	(-)	MPa	MPa	(-)	(%)	(°)	(°)	(°)				MPa	MPa		
0,0	1,5	3,02	0,08	0,00	Rip	20,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
1,5	3,4	1,59	0,04	0,00	Al-La	18,15	90	16	-	5,15	16,5	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-			
3,4	5,5	0,68	0,02	0,04	A	17,50	36	3	8	2,90	16,21	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-			
5,5	6,5	2,11	0,03	0,02	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	<20	29	26	29	32	35	38	5,66	9,06		
6,5	11,5	0,84	0,03	0,16	Al-La	18,00	43	2	6	3,57	22,56	0,29	-	-	-	-	-	-	-	-			
11,5	15,2	1,09	0,03	0,32	Al-La	18,00	51	2	4	4,10	27,46	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-			
15,2	17,6	6,46	0,03	0,03	S	20,00	-	-	-	-	-	-	37	31	28	33	35	38	41	16,16	25,78		
17,6	20,7	11,05	0,04	0,01	S	20,00	-	-	-	-	-	-	54	33	30	36	38	40	42	27,63	41,19		
20,7	30,0	14,91	0,08	0,01	S	20,00	-	-	-	-	-	-	60	34	30	36	38	41	43	37,28	49,81		
30,0	32,5	10,00	0,06	-0,01	S	20,00	-	-	-	-	-	-	40	31	28	34	36	38	41	25,01	38,66		
32,5	35,6	12,86	0,08	-0,01	S	20,00	-	-	-	-	-	-	48	32	29	35	37	39	42	32,16	45,45		

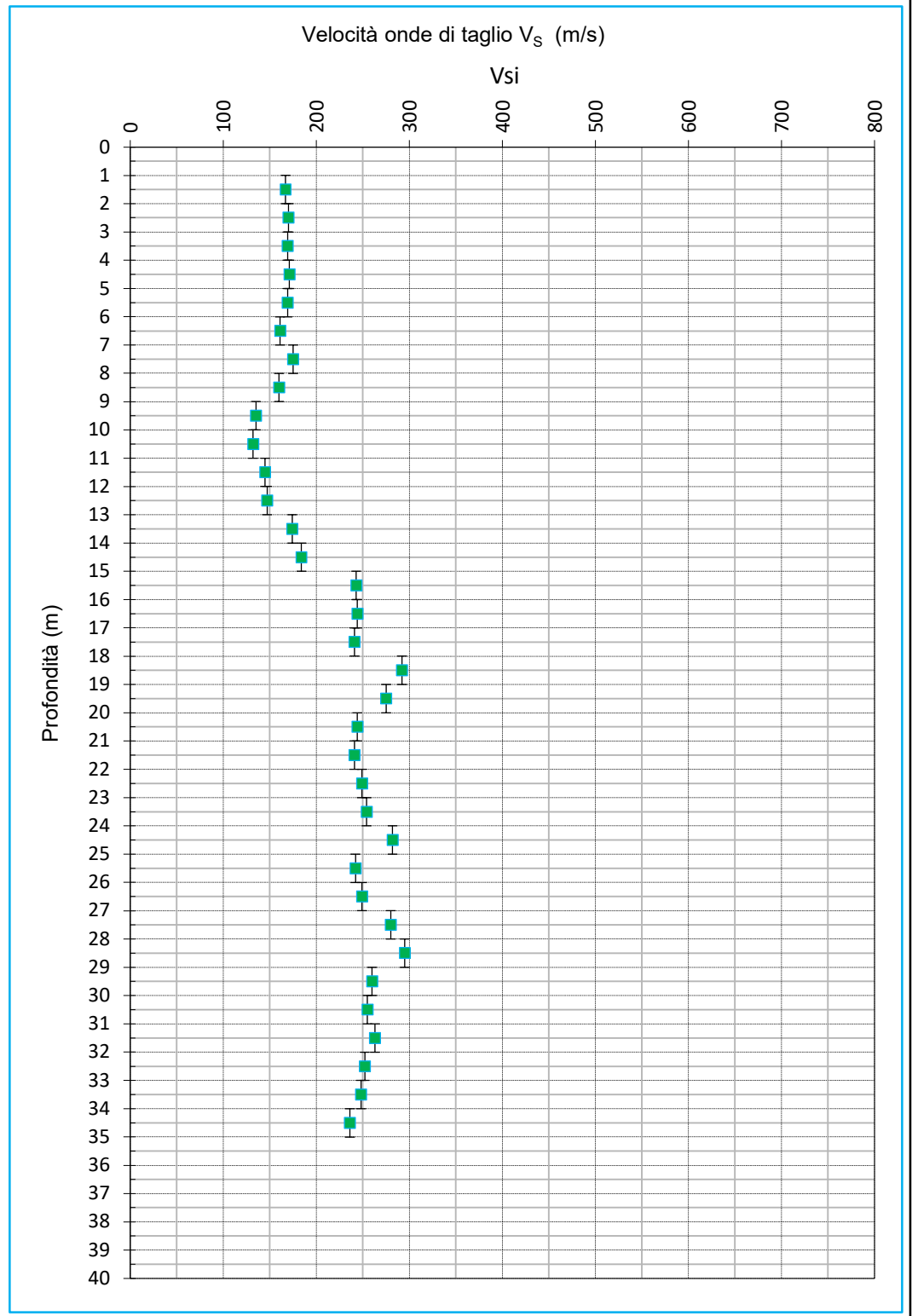
Project:

Borehole ID: SCPTU1

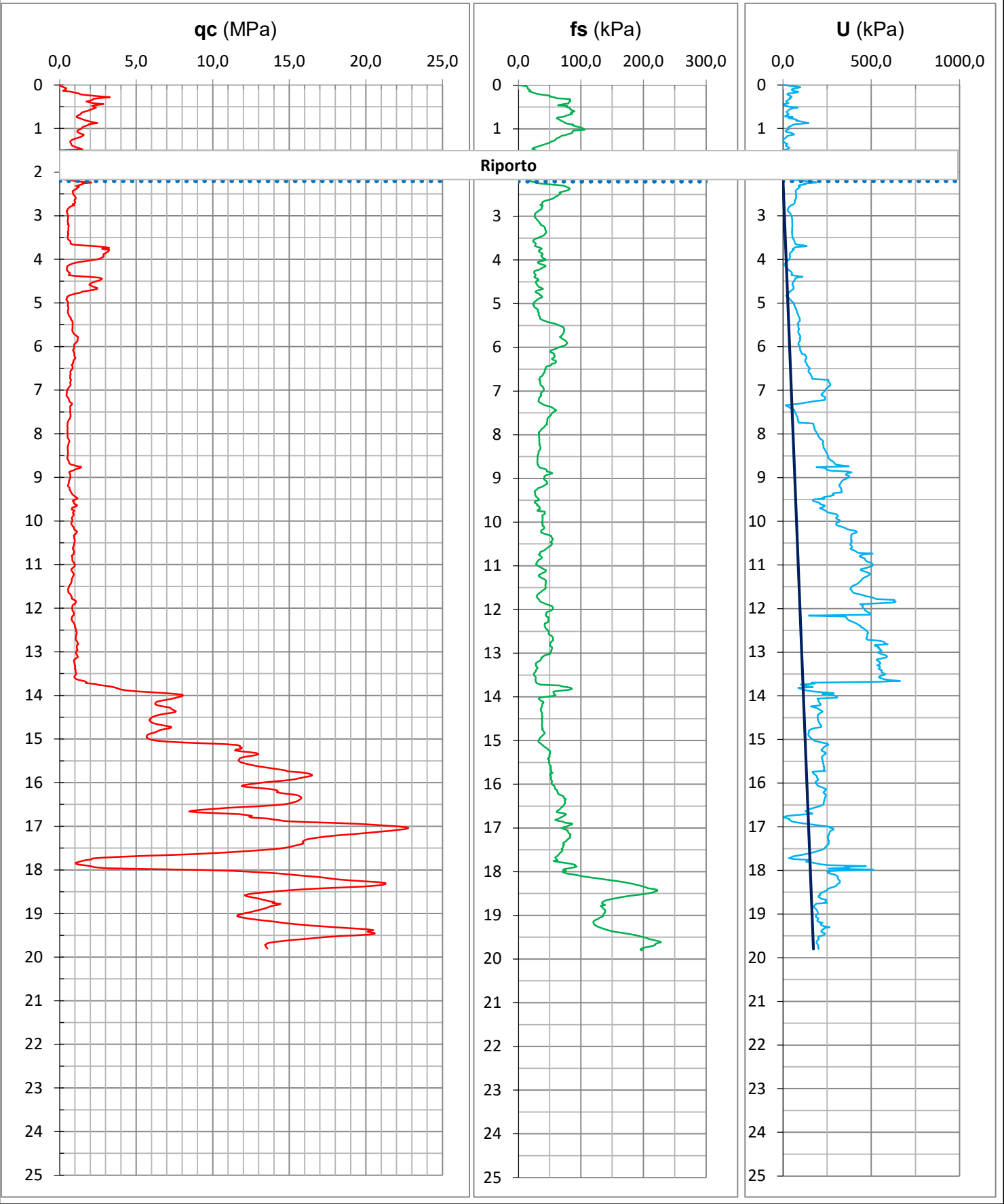


Detailed result plots over depth





PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA DIAGRAMMI DI RESISTENZA	RIF. PROVA:	CPTU n°:
	U72-24	SCPTU2
COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara CANTIERE: Via Fellini, Ferrara (FE) DATA: 29/10/2024		
PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 19,80 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,20 PREFORO (m da p.c.): 0,00		

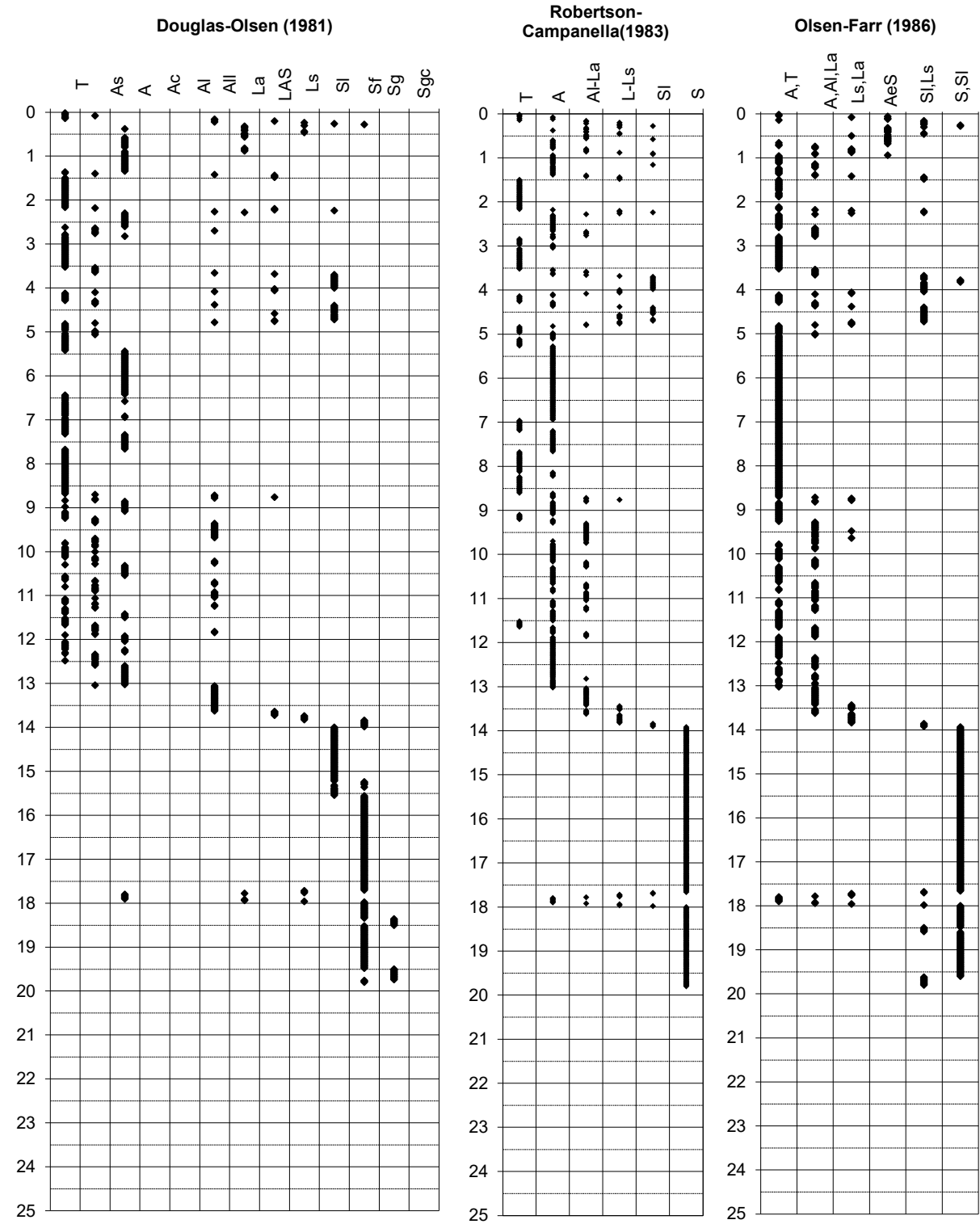


Identificativo	U72-24
Emissione	nov-24
Pagina	1 di

PROVA PENETROMETRICA STATICA

INTERPRETAZIONI LITOLOGICHE

-Committente	Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara	-Prova n°	SCPTU2
-Cantiere	Via Fellini, Ferrara (FE)	-Data prova	29/10/2024
-Quota p.c.	8,00 m s.l.m.	-Prof. preforo	m
-Livello di falda	2,20 m da p.c.	-Prof. finale	19,80 m
-Attrezzatura	Punta elettrica con piezocono		



PROVA PENETROMETRICA STATICA

Identificativo	U72-24
Emissione	nov-24
Pagina	1 di 0

PARAMETRI GEOTECNICI

-Committente	Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara	-Prova n°	SCPTU2
-Cantiere	Via Fellini, Ferrara (FE)	-Data prova	29/10/2024
-Quota p.c.	8,00 m s.l.m.	-Prof. preforo	0,00 m
-Livello di falda	2,20 m da p.c.	-Prof. finale	19,80 m

							MATERIALI COESIVI						MATERIALI GRANULARI									
DA	A	qcm	fsm	deltaU	litol.	Peso Vol.	Cu (qc)	OCR (qc)	OCR (U)	M ₀	Eu50	CR	Dr	FI' _{DM}	FI' _{Bolton}	FI'Schm.				E'25	M ₀	
m	m	MPa	MPa	MPa	(-)	kN/m3	KPa	(-)	(-)	MPa	MPa	(-)	(%)	(°)	(°)	(°)				MPa	MPa	
0,0	1,5	1,41	0,06	0,00	Al-La	18,00	80	19	-	4,60	13,54	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-		
1,5	2,2	0,10	0,02	0,00	RIP	20,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2,2	2,8	1,06	0,05	0,08	Al-La	18,00	57	9	8	4,00	12,85	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-		
2,8	3,6	0,55	0,03	0,04	A	17,50	29	4	8	1,31	5,016	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-		
3,6	4,1	2,23	0,03	0,04	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	28	33	30	32	35	37	40	6,64	10,62	
4,1	4,4	0,69	0,03	0,02	A	17,50	31	3	10	2,03	8,99	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-		
4,4	4,8	2,07	0,03	0,03	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	<20	31	28	30	33	36	39	5,47	8,74	
4,8	9,4	0,70	0,04	0,12	A	17,50	35	3	6	2,56	12,48	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-		
9,4	13,7	0,93	0,04	0,34	Al-La	18,00	44	3	4	3,75	20,76	0,28	-	-	-	-	-	-	-	-		
13,7	15,0	6,05	0,04	0,07	S	20,00	-	-	-	-	-	-	41	33	29	33	36	38	41	15,13	24,20	
15,0	17,7	13,89	0,06	0,06	S	20,00	-	-	-	-	-	-	71	36	33	38	40	42	44	34,74	47,25	
17,7	18,0	2,70	0,07	0,08	SI	19,00	-	-	-	-	-	-	24	29	26	30	33	36	39	10,56	16,89	
18,0	19,8	15,28	0,16	0,07	S	20,00	-	-	-	-	-	-	72	36	32	38	40	42	44	38,20	50,54	

SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO UBICAZIONE SONDAGGIO - FOTO PIAZZAMENTO

SONDAGGIO

S1

COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara

CANTIERE: Via Fellini, Ferrara (FE)

DATA: 06/11/2024



SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO
UBICAZIONE SONDAGGIO - FOTO PIAZZAMENTO

SONDAGGIO

S1

COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara

CANTIERE: Via Fellini, Ferrara (FE)

DATA: 06/11/2024



CASSA 1 - da p.c. a -5,0 m da p.c.



CASSA 2 - da -5,0 m da p.c. a -10,0 m da p.c.

SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO
UBICAZIONE SONDAGGIO - FOTO PIAZZAMENTO

SONDAGGIO

S1

COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara

CANTIERE: Via Fellini, Ferrara (FE)

DATA: 06/11/2024



CASSA 3 - da -10,0 m da p.c. a -15,0 m da p.c.



CASSA 4 - da -15,0 m da p.c. a -20,0 m da p.c.

SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO
UBICAZIONE SONDAGGIO - FOTO PIAZZAMENTO

SONDAGGIO

S1

COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara

CANTIERE: Via Fellini, Ferrara (FE)

DATA: 06/11/2024



CASSA 5 - da -20,0 m da p.c. a -25,0 m da p.c.



CASSA 6 - da -25,0 m da p.c. a -30,0 m da p.c.

SONDAGGIO: S1 DA METRI: 0,0 A METRI: 10,0 Responsabile: Songeo	LUNGHEZZA (m): 30,0 Sonda tipo: Operatore: Songeo	LEGENDA: PROVE S.P.T.: PA Punta aperta - PC Punta chiusa CAMPIONI: S Pareti sottili - O Osterberg - M Mazier R Rimaneggiato - Rs Rimaneggiato da S.P.T. PIEZOMETRI: A Aperto - C Casagrande - E Elettrico PERFORAZIONE: CS Carotiere semplice - CD Carotiere doppio - EC Elica continua STABILIZZAZIONE: RM Rivestimento metallico FB Fanghi bentonitici % CAROTAGGIO — R.Q.D. —
COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica CANTIERE: Idroforo Cittadino LOCALITA': Ferrara DATA INIZIO: 6-11-2024 DATA FINE: 7-11-2024 QUOTA BOCCAFORO (m s.l.m.):		

S.P.T. Prof. Tipo Valori	CAMPIONI Prof. Tipo	STRATIGRAFIA E DESCRIZIONE	Prof. (m)	Carot. (%) RQD (%) 20 40 60 80	Pocket Test kg/cmq	Vane Test	FALDA Rinv Stab	Piezo- metri	Diam. (mm)	Metodo Perf.ne	Metodo Stab.ne
1		Riporto costituito da argilla limosa sabbiosa mista a macerie con laterizi e sassi	1,3								
		Argilla limosa sabbiosa consistente	1,5								
2		OST1	2,2								
3		Limo argilloso moderatamente consistente di colore nocciola	3,0		3,6	1,7					
		OST2	3,7								
4		Limo argilloso moderatamente consistente di colore nocciola	4,1		0,8	0,2					
		Argilla limosa moderatamente consistente di colore nocciola	4,5		1,0	0,4					
5		OST3	5,2		1,3	0,7					
6		Argilla limosa moderatamente consistente di colore grigio verde	5,4								
		Limo e limo argilloso sabbioso moderatamente consistente di colore grigio verde	6,3		0,9	0,5					
7		Sabbia fine di colore grigio	6,5		0,7	0,2					
		Limo moderatamente consistente di colore grigio	6,7		0,4	0,1					
8		Argilla limosa moderatamente consistente con resti conchigliari di colore grigio verde	7,5		0,6	0,3					
		OST4	8,2		0,8	0,4					
9		Limo argilloso e argilla limosa moderatamente consistente di colore grigio	9,5		1,0	0,5					
10		Argilla limosa consistente di colore grigio	9,85		0,9	0,4					
					1,0	0,5					
					1,0	0,6					

SONDAGGIO: S1

DA METRI: 10,0 A METRI: 20,0

Responsabile: Songeo

COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica

CANTIERE: Idroforo Cittadino

LOCALITA': Ferrara

DATA INIZIO: 6-11-2024 DATA FINE: 7-11-2024

QUOTA BOCCAFORO (m s.l.m.):

LUNGHEZZA (m): 30,0

Sonda tipo:

Operatore: Songeo

LEGENDA:

PROVE S.P.T.: PA Punta aperta - PC Punta chiusa
CAMPIONI: S Pareti sottili - O Osterberg - M Mazier
R Rimaneaggiato - Rs Rimaneaggiato da S.P.T.
PIEZOMETRI: A Aperto - C Casagrande - E Elettrico
PERFORAZIONE: CS Carotiere semplice - CD Carotiere doppio - EC Elica continua
STABILIZZAZIONE: RM Rivestimento metallico
FB Fanghi bentonitici

% CAROTAGGIO — R.Q.D. —

[illegible]

SONDAGGIO: S1

DA METRI: 20,0 A METRI: 30,0

Responsabile: Songeo

COMMITTENTE: Consorzio di Bonifica

CANTIERE: Idroforo Cittadino

LOCALITA': Ferrara

DATA INIZIO: 6-11-2024 DATA FINE: 7-11-2024

QUOTA BOCCAFORO (m s.l.m.):

LUNGHEZZA (m): 30,0

Sonda tipo:

Operatore: Songeo

LEGENDA:

PROVE S.P.T.: PA Punta aperta - PC Punta chiusa
CAMPIONI: S Pareti sottili - O Osterberg - M Mazier
R Rimaneggiato - Rs Rimaneggiato da S.P.T.

PIEZOMETRI: A Aperto - C Casagrande - E Elettrico
PERFORAZIONE: CS Carotiere semplice - CD Carotiere doppio - EC Elica continua

STABILIZZAZIONE: RM Rivestimento metallico
FB Fanghi bentonitici

— R.Q.D. —

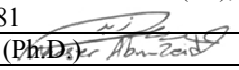
S.P.T. Prof. Tipo Valori		CAMPIONI		STRATIGRAFIA E DESCRIZIONE	Prof. (m)	Carot. (%)				Pocket Test	Vane Test	FALDA	Piezo- metri	Diam. (mm)	Metodo Perf.ne	Metodo Stab.ne		
		Prof.	Tipo			RQD (%)				kg/cmq		Rinv	Stab					
						20	40	60	80									
	21	24,0-24,6	R		Sabbia fine limosa di colore grigio													
	22																	
	23																	
	24																	
	25																	
	26																	
	27																	
	28																	
	29																	
	30																	

**Regione EMILIA-ROMAGNA
Provincia di Ferrara
Comune Ferrara**



***Indagine sismica con le tecniche della
sismica passiva 'ESAC' e dei microtremori
per la determinazione del profilo profondo di
Vs e la frequenza di risonanza dei terreni siti
nell'area di proprietà del Consorzio Pianura
Ferrara (in via Due Abete),
Comune di Ferrara (FE)***

novembre 2024

Committente:	Studio Geologo Veronese (Via Roma 10, Codigoro, FE).	t.veronese@studio-sst.it
Elaborazione dati:	TeamGeofisica.CEG - Centro Elaborazione Dati Geofisici, Ferrara. Via G. Fabbri, 342 44124 Ferrara (FE), p.iva 02065560381	nasser.abuzeid@pec.it
Redazione:	Nasser Abu Zeid (Ph.D.) 	Teamgeofisica.ceg@gmail.com
Revisione:	00	25 novembre 2024

Indagine sismica con le tecniche della sismica passiva 'ESAC' e dei microtremori per la determinazione del profilo profondo di Vs e la frequenza di risonanza dei terreni siti nell'area di proprietà del

Consorzio Pianura Ferrara (in via Due Abete),

Comune di Ferrara (FE)



- Relazione Geofisica -
novembre 2024

INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	TECNICHE D'INDAGINE	1
2.1.	Sismica passiva (<i>Enhanced Spatial autocorrelation</i> "ESAC")	1
2.2.	Rapporti spettrali (H/V)	4
2.2.1.	Il metodo HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio)	5
3.	ACQUISIZIONE DATI	7
3.1.	Dati ESAC	7
3.2.	Dati H/V	8
4.	ANALISI DATI	9
4.1.	Dati ESAC	9
4.2.	Dati rapporti spettrali (H/V)	10
5.	RISULTATI	11
5.1.	Prova ESAC	11
5.1.	Prove dei rapporti spettrali (H/V)	13
6.	CONCLUSIONI	14
7.	BIBLIOGRAFIA	16
	Appendice A: parametri del modello sismico 1D di Vs	17
	Appendice B: risultati delle singole prove H/V	19

ELENCO DELLE FIGURE E TABELLE

Figura 1: modello di sottosuolo ad un grado di libertà (SDOF).....	4
Figura 2. Esempio sismogramma sperimentale (Caab_103.dat) acquisito lungo il profilo sismico. Le linee verticali rappresentano i sismogrammi registrati utilizzando geofoni verticali con frequenza propria di 4.5 Hz....	7
Figura 3. Geometria delle antenne sismiche utilizzate. Colore blu: profilo sismico. Scala assi diversa. H/V-01: ubicazione prova dei rapporti spettrali dei microtremori.....	7
Figura 4: particolare della fase di acquisizione dei microtremori della prova "H/V-01" effettuate nell'area.....	8
Figura 5. Curva di dispersione sperimentale del profilo sismico ottenuta dall'analisi spettrale dei dati (a). In (b) si illustra il buon confronto tra i valori di VR sperimentali e teorici.....	9
Figura 6. Sismogrammi relativi alle due prove H/V (microtremori) effettuate, in campo libero (H/V-01, in alto) e (H/V-02, in basso).....	10
Figura 7. Il profilo verticale VS ottenuto per l'area indagata dal profilo sismico.....	12
Figura 8. Il profilo verticale G_{max} (μ : modulo di rigidità dinamica) dell'area indagata dal profilo sismico, ottenuto dal profilo di velocità (V_s) mediante l'equazione $\mu = \rho * V_s^2$	12
Figura 9. media dei rapporti spettrali (H/V) delle due prove effettuate in campo vicino e libero (H/V-01) e (H/V-02) nell'area. Freccia nera: frequenza di risonanza fondamentale (F0) tipica dei terreni investigati.	14
Tabella 1. Dati tecnici dei profili sismici. _____	7
Tabella 2: dettagli delle prove dei rapporti spettrali 'microtremori' (H/V) effettuate nell'area oggetto dello studio. _____	8
Tabella 3. Modello sismico (Onde S) del sottosuolo investigato. In appendice A sono riportati i valori numerici del profilo completo. _____	11
Tabella 4: picchi di frequenze di risonanza fondamentale di risonanza ottenute dalle prove HVSR. _____	13

Avvertenze

I dati forniti nella presente relazione si riferiscono esclusivamente alla situazione esistente al periodo di indagine.

La precisione dei metodi impiegati è limitata dagli errori sistematici delle procedure di indagine.

L'autore della presente relazione garantisce la riservatezza dei dati e delle informazioni contenute e si riserva, previa autorizzazione del committente dell'indagine, il diritto esclusivo della loro pubblicazione su riviste scientifiche nazionali ed internazionali.

1. PREMESSA

Su incarico dello studio Geologico Veronese di Codigoro (FE) è stata effettuata, in data 21 ottobre 2024, una campagna d'indagine geofisica nell'area sita in Via Due a Ferrara (FE) di proprietà del Consorzio di Bonifica di Ferrara. Scopo dell'indagine è quello di determinare: (1) la velocità di propagazione delle onde di taglio fino al possibile raggiungimento del substrato simico, eventualmente presente, e (2) di valutare sperimentalmente la frequenza di risonanza dei terreni nell'area oggetto di indagine. A tale fine è stata impiegata la tecnica della sismica passiva ESAC, per la determinazione della sequenza sismica delle onde di taglio lungo un profilo sismico (Tav. 1), e la tecnica dei rapporti spettrali H/V "microtremori" per la determinazione della frequenza (o periodo) di risonanza.

2. TECNICHE D'INDAGINE

2.1. SISMICA PASSIVA (*ENHANCED SPATIAL AUTOCORRELATION* "ESAC")

La risposta dinamica dei terreni sottoposti a sollecitazioni può essere ottenuta mediante l'analisi delle onde elastiche che si trasmettono nel sottosuolo. Come è noto, le sollecitazioni dinamiche generano diversi tipi di onde riconducibili a:

- a) onde di volume (P ed S) e
- b) onde superficiali (Rayleigh "R" e Love "L").

Le onde di maggiore interesse nella soluzione di molti problemi geotecnici legati al sistema sottosuolo-fondazione-struttura sono quelle comunemente indicate come onde di taglio di tipo "S", "R" e "L". Tali tipi di onde producono vibrazioni nelle particelle dei materiali costituenti il sottosuolo che al passaggio del treno d'onda risultano polarizzate lungo un piano perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione dell'onda stessa. Ciò comporta la comparsa di sforzi di taglio successivamente, trasmissibili alle strutture in superficie ed, in alcuni casi, ad un conseguente danno alle stesse.

Il D.M. del 17 gennaio 2018 dal titolo “Nuove Norme tecniche per le costruzioni”, impone di classificare i terreni, su cui saranno eseguite opere edili di una certa rilevanza, sulla base del parametro $V_{s,eq}$. La classificazione dei terreni riporta cinque categorie, definite con simbologia alfanumerica da A ad E. A queste classe può essere necessario effettuare ulteriori integrazioni dove si passa alla stima sperimentale in termini quantitativi della risposta sismica dei terreni sottoposti ad un’accelerazione sismica attesa, predefinita per ciascuna classe. A questo scopo è stato calcolato il valore del parametro V_{s30} , che rappresenta la media ponderata dei valori delle velocità dell’onda di taglio “S” nei primi 30 m di sottosuolo indagato, matematicamente espressa da (eq. 1);

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \qquad V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \qquad eq.1$$

dove,

$V_{s,eq}$: velocità media ponderata equivalente di propagazione delle onde di taglio fino alla profondità del sismo-strato sismico ($V_s \geq 800$ m/s)

$V_{s,30}$: velocità media ponderata delle onde di taglio “S” nei primi 30 metri,

H : profondità del substrato SISMICO (in m), definito come quella formazione, costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s ($H=30$ m nel caso che il substrato sismico superi tale profondità);

h_i : spessore dell’esimo sismo-strato,

v_i : velocità delle onde di taglio “S” nello strato esimo.

Questo valore però non permette di raggiungere la profondità del substrato sismico nell’area che è a profondità maggiore.

Le tecniche geofisiche comunemente utilizzate per la determinazione di tale parametro sono essenzialmente di tre tipi:

- 1) prove in foro singolo (Down-Hole) o doppio (Cross-Hole),

- 2) sismica di superficie (rifrazione e riflessione) con energizzazione di onde polarizzate (SH),
- 3) tecniche mediante onde superficiali “R” e “L” (SASW, MASW e Microtremori Re.Mi., SPAC, MSPAC ed ESAC).

Le prime richiedono l'esecuzione di un sondaggio per permettere la determinazione del parametro. Le seconde, più costose, forniscono risultati di elevata qualità ma sono facilmente influenzate da rumori antropici che ne degradano le caratteristiche. Le ultime sono realizzate, ad eccezione della tecnica SASW, con procedure operative simili a quelle impiegate nella sismica a rifrazione.

La prova geofisica adottata per questa indagine appartiene alla terza categoria ed è consistita nell'applicazione della tecnica dei microtremori (Autocorrelazione Spaziale Migliorato “ESAC”) che permette di ottenere con minor costo di processo il profilo verticale della velocità media delle onde di taglio “S” e contemporaneamente di raggiungere profondità superiori a 30 m favorendo in alcuni casi il raggiungimento del bedrock sismico - così come definito dalla normativa ($V_s \geq 800 \text{ m/s}$) - coadiuvando contemporaneamente l'interpretazione delle eventuali variazioni di rigidità sismica ($V_s^2 \times \rho$) dei terreni investigati.

Attraverso l'analisi delle onde superficiali “tipo Rayleigh R”, che costituiscono un particolare tipo di onde superficiali trasmesse sulla superficie libera di un mezzo omogeneo ed isotropo, si ricava indirettamente la velocità delle onde di taglio “S” secondo l'equazione

$$V_R = \left(\frac{0.862 + 1.14\nu}{1 + \nu} \right) \times V_S \quad eq.2,$$

$$V_R \cong 0.92 V_S$$

dove,

V_R : velocità di fase delle onde Rayleigh,

V_S : velocità di propagazione dell'onda di taglio,

ν : rapporto di Poisson.

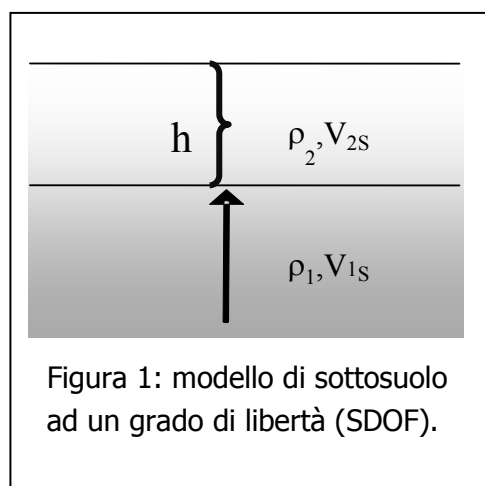
2.2. RAPPORTI SPETTRALI (H/V)

La risposta dinamica dei terreni sottoposti a sollecitazioni può essere ottenuta mediante l'analisi delle onde elastiche che si trasmettono nel sottosuolo. Come è noto, le sollecitazioni dinamiche generano diversi tipi di onde riconducibili a:

- c) onde di volume (P ed S) e
- d) onde superficiali (Rayleigh "R" e Love "L").

Le onde di maggiore interesse nella soluzione di molti problemi geotecnici legati al sistema sottosuolo-fondazione-struttura sono quelle comunemente indicate come onde di taglio di tipo "S", "R" e "L". Tali tipi di onde producono vibrazioni nelle particelle dei materiali costituenti il sottosuolo che al passaggio del treno d'onda sono polarizzate lungo un piano perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione dell'onda stessa. Ciò comporta la comparsa di sforzi di taglio successivamente trasmissibili alle strutture in superficie ed, in alcuni casi, ad un conseguente danno alle stesse.

Siccome la frequenza di risonanza propria dei terreni dipende dalla sequenza dei contrasti di impedenza elastica presenti nel sottosuolo (cioè dalla profondità) è possibile utilizzare la tecnica dei rapporti spettrali per risalire a tale parametro. Il lavoro fondamentale su questa specifica procedura fu pubblicato da Nakamura nel 1989; per questo motivo è chiamato anche "metodo di Nakamura" (Nakamura, 1989).



2.2.1. Il metodo HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio)

È ben noto che quando un'onda elastica che si propaga nel sottosuolo passando da un mezzo con impedenza acustica/elastica $Z_1 = \rho_1 \cdot v_1$ (dove ρ è la densità e v la velocità di onde di volume P/S rispettivamente) ad un mezzo con impedenza acustica/elastica $Z_2 = \rho_2 \cdot v_2$, se $Z_2 < Z_1$ l'ampiezza dell'onda trasmessa nel secondo mezzo aumenta. Questo fenomeno dipende soltanto dall'angolo d'incidenza e non dalla frequenza per le onde P, cioè tutte le singole componenti sinusoidali dell'onda vengono amplificate nella stessa misura. Per le onde S si dimostra invece che ha luogo un fenomeno di risonanza. Dato un sottosuolo formato da una copertura omogenea elastica di spessore h , poggiante su un substrato rigido (nella pratica un substrato è considerato rigido quando la sua V_{1S} supera 800 m/s), come in Figura 1, tali frequenze di risonanza sono date da (v. p. es. Lanzo e Silvestri, 1999):

$$f_n = \frac{V_{2S}(2n-1)}{4h}, n = 1, 2, \dots, \infty, \quad \text{eq. 3,}$$

Ad esempio, per una copertura elastica spessa 50 m con V_{2S} di 200 m/s (velocità tipica di un sedimento sciolto), $f_1 = 1$ Hz, $f_2 = 3$ Hz e così via. Si tratta di campi di frequenze coincidenti con quelli delle costruzioni. L'ampiezza di oscillazione alle frequenze di risonanza tende all'infinito per un mezzo puramente elastico. È da notare che ciò non avviene mai nella pratica in quanto tutti i mezzi materiali hanno un comportamento visco-elastico. Ciò comporta uno smorzamento progressivo dell'ampiezza trasmessa $A(f_n)$ alla frequenza di risonanza, al crescere di questa, secondo la relazione:

$$A(f) = \frac{2}{(2n-1)} \cdot \frac{G}{\pi^2 \eta f}, \quad \text{eq. 4,}$$

dove, G : il modulo di rigidità, η : il coefficiente di viscosità, f : la frequenza ed n : il numero del modo di vibrazione (cioè armoniche superiori).

Poiché sia le onde di Love che la componente orizzontale delle onde di Rayleigh si formano per interferenza costruttiva delle onde S, quanto detto vale con ottima approssimazione anche per tali onde, purché il sottosuolo sia tabulare, cioè a

strati piano/paralleli. Questo è un fatto particolarmente fortunato perché significa che basta registrare il rumore sismico ambientale, dove è ampiamente prevalente l'energia associata alle onde superficiali, per avere un'informazione precisa (nei limiti summenzionati) delle frequenze di risonanza. Questa, infatti, si ottiene con 3 semplici passaggi:

1. registrando in un punto per un certo tempo le 3 componenti del moto delle particelle del terreno (la verticale $V(t)$ e due orizzontali ortogonali tra loro: $NS(t)$, $EW(t)$) con un sismometro a frequenza propria inferiore al campo di frequenze di interesse;
2. calcolandone i rispettivi spettri di Fourier $V(f)$, $EW(f)$ e $NS(f)$ ¹

$$\frac{\sqrt{|NS(f)|^2 + |EW(f)|^2}}{|V(f)|}, \quad \text{eq. 5,}$$

3. facendo il rapporto detto per l'appunto HVSR, acronimo di Horizontal over Vertical Signal Ratio.

Si richiama l'attenzione del lettore su 2 fatti:

1. che non è possibile, conoscendo soltanto la frequenza di risonanza, determinare contemporaneamente la V_s dello strato elastico e la profondità h del substrato rigido: questi due parametri del sottosuolo compaiono in un prodotto, e quindi la loro determinazione è impossibile senza informazioni di altra origine;
2. trattandosi di un metodo statistico, l'ampiezza alla frequenza di risonanza può essere affetta da un ampio margine di incertezza. L'ampiezza effettiva può essere stimata solo utilizzando un segnale deterministico, come quello di un terremoto.

¹ È d'uso indicare con la stessa lettera maiuscola la trasformata di Fourier di una funzione, indicata con la lettera minuscola.

3. ACQUISIZIONE DATI

3.1.DATI ESAC

L'area oggetto di indagine è stata investigata in data 21/10/2024 mediante l'esecuzione di n.1 profilo sismico tipo "ESAC" (**Tav. 1**) della lunghezza complessiva di 172,5m (Tabella 1).

Per l'acquisizione dei dati è stato impiegato un sismografo digitale RAS 24 – Seistronix (ABEM, Svezia) con 24 geofoni verticali con frequenza naturale pari a 4,5 Hz, equidistanziati 7,5 m. La lunghezza temporale di ogni registrazione è stata pari a 32 secondi con passo di campionamento di 2 ms. In **Figura 2** è riportato uno esempi di acquisizione composto da 24 tracce sismiche seconda la geometria delle due antenne sismiche utilizzate (**fig. 3**).

Tabella 1. Dati tecnici dei profili sismici.

Sigla	Lunghezza (m)	Passo intergeofonico (m)	Orientazione
Profilo 1	177,5*	7,5	44.82683°N, 11.603982°E NNE-----+----WSW
*geometria a forma di L			

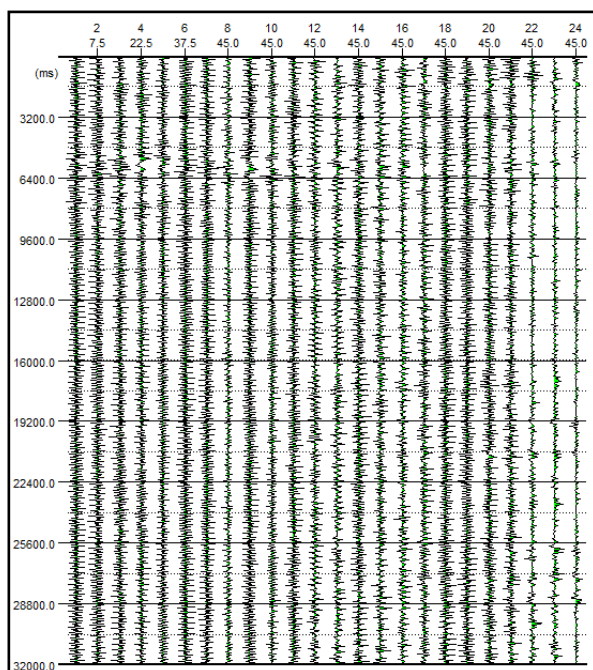


Figura 2. Esempio sismogramma sperimentale (Caab_103.dat) acquisito lungo il profilo sismico. Le linee verticali rappresentano i sismogrammi registrati utilizzando geofoni verticali con frequenza propria di 4.5 Hz.

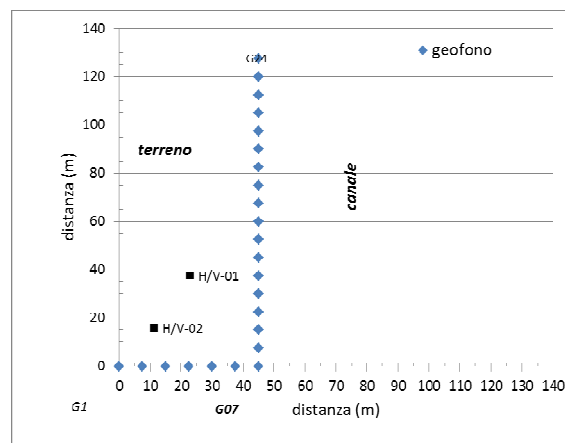


Figura 3. Geometria delle antenne sismiche utilizzate. Colore blu: profilo sismico. H/V-01: ubicazione prova dei rapporti spettrali dei microtremoni.

3.2.DATI H/V

Il sito oggetto d'indagine è stato investigato, in data 21/10/2024, mediante l'esecuzione di n.2 prove H/V (TAV-1).

Per l'acquisizione dati è stato impiegato un data logger a 24 bit collegato ad un sismometro 3D modello Sensor (S₃S₂, M.A.E. Apparecchiature Elettroniche srl. di Frosolone, Molise). La lunghezza temporale delle registrazioni è pari a 60 minuti, con passo di campionamento di 250 Hz (in **figura 4** si illustra un particolare della fase di acquisizione dei dati della prova H/V-02, mentre in **Figura 6** si riportano le serie temporali acquisiti (i sismogrammi).

Tabella 2: dettagli delle prove dei rapporti spettrali 'microtremori' (H/V) effettuate nell'area oggetto dello studio.

Sigla	Località	Comune	Durata (min.)	posizione
HV-01	Terreno incolto (campo libero quasi vicino)	Ferrara (FE)	60	vicino al Geofono n. 12 44.852453°N, 11.595700°E
HV-02	Terreno incolto (campo libero quasi vicino)		45	Vicino al Geofono n. 3 44.852369°, 11.595427°



Figura 4: particolare della fase di acquisizione dei microtremori della prova "H/V-01" effettuate nell'area. Vista verso NE.

4. ANALISI DATI

4.1. DATI ESAC

L'analisi delle tracce sismiche registrate è basata sull'impiego della tecnica di analisi denominata "autocorrelazione spaziale migliorata (ESAC)". Tale tecnica considera il rumore sismico di essere generato da una distribuzione uniforme di sorgenti (cioè non esistono sorgenti dominanti).

La procedura di analisi è basata sulla teoria elaborata da Aki (1959) secondo il quale la funzione di correlazione media fra le registrazioni di un rumore isotropo effettuate su sensori verticali distribuiti nelle diverse direzioni a parità distanza r da un sensore di riferimento, ha una forma simile a quella della funzione di Bessel di ordine 0. Egli deduce che tale forma (equazione 3) è funzione del valore della velocità di fase (V_R) per ogni copia di frequenza e distanza:

$$\rho(r, \omega_0) = J_0 \left(\frac{\omega r}{c(\omega_0)} \right) \quad eq.6$$

dove,

$\rho(r, \omega_0)$: coefficiente di autocorrelazione

J_0 : funzione di Bessel di tipo I ed ordine zero

$C(\omega_0)$: *velocità di fase delle onde Rayleigh in funzione della frequenza*

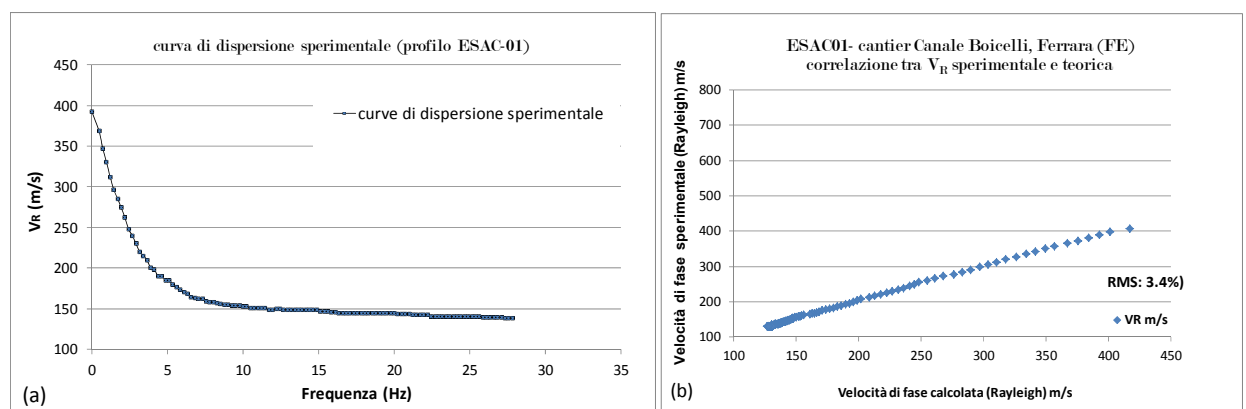


Figura 5. Curva di dispersione sperimentale del profilo sismico ottenuta dall'analisi spettrale dei dati (a). In (b) si illustra il buon confronto tra i valori di V_R sperimentali e teorici.

Il risultato di tale analisi rappresenta il cosiddetto spettro di potenza da cui si ottiene la curva di dispersione sperimentale delle onde “R” (**figura 5a**) e successivamente, attraverso una procedura di modellazione numerica, la determinazione delle velocità delle onde di taglio “S” (**figura 7**).

4.2. DATI RAPPORTI SPETTRALI (H/V)

L’analisi delle serie temporali è proceduta seguendo i punti 2 e 3 del paragrafo 2.2.1. La figura 6 illustra le tracce sismiche dei sismogrammi registrati: H/V-01 e H/V-02 (TAV. 1).

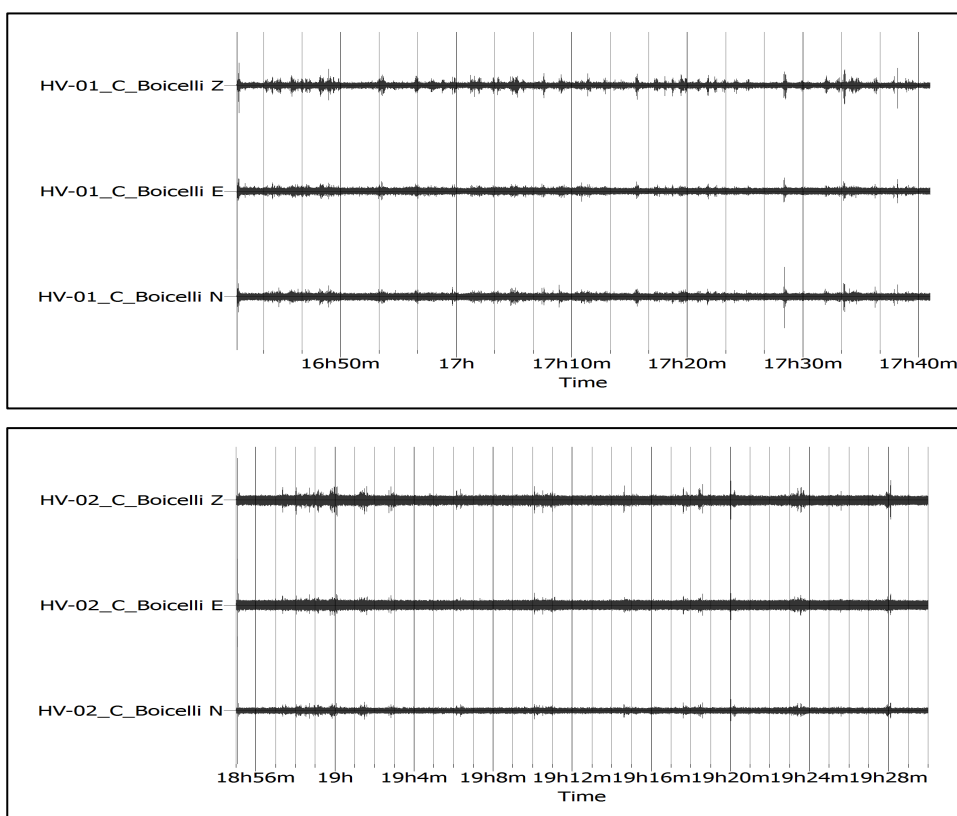


Figura 6. Sismogrammi relativi alle due prove H/V (microtremori) effettuate, in campo libero (H/V-01, in alto) e (H/V-02, in basso).

5. RISULTATI

5.1. PROVA ESAC

Il modello sismico V_s ottenuto dall'interpretazione quantitativa della curva di dispersione (figura 5a) e riportata in **Figura 7**. Il modello numerico fino a 32 metri è riportato in Tabella 3, mentre quello completo fino a 270 m è riportato in Appendice A. Il modello sismico così ottenuto non ha raggiunto valori attribuibili a substrato sismico ($V_s \geq 800$ m/s), tuttavia alla massima profondità raggiunta (270m) il valore di V_s è pari a 407 m/s.

In figura (8) si riporta l'andamento del profilo di rigidità dinamica (G_0 o G_{max}) con la profondità.

Tabella 3. Modello sismico (Onde S) del sottosuolo investigato. In appendice A sono riportati i valori numerici del profilo completo.

ESAC01	PROFILO sismico fino a 30 metri		
	(modello numerico fino a 270 metri è riportato in Appendice A)		
Sismo-strato	Velocità (m/s)	Profondità letto (m)	Spessore (m)
1	134.9	1.5	0.0
2	136.4	5.2	3.7
3	142.6	8.0	2.8
4	162.8	10.8	2.9
5	183.5	13.8	3.0
6	206.8	16.8	3.1
7	230.7	20.0	3.2
8	246.1	23.2	3.3
9	255.9	26.6	3.4
10	267.7	30.1	-

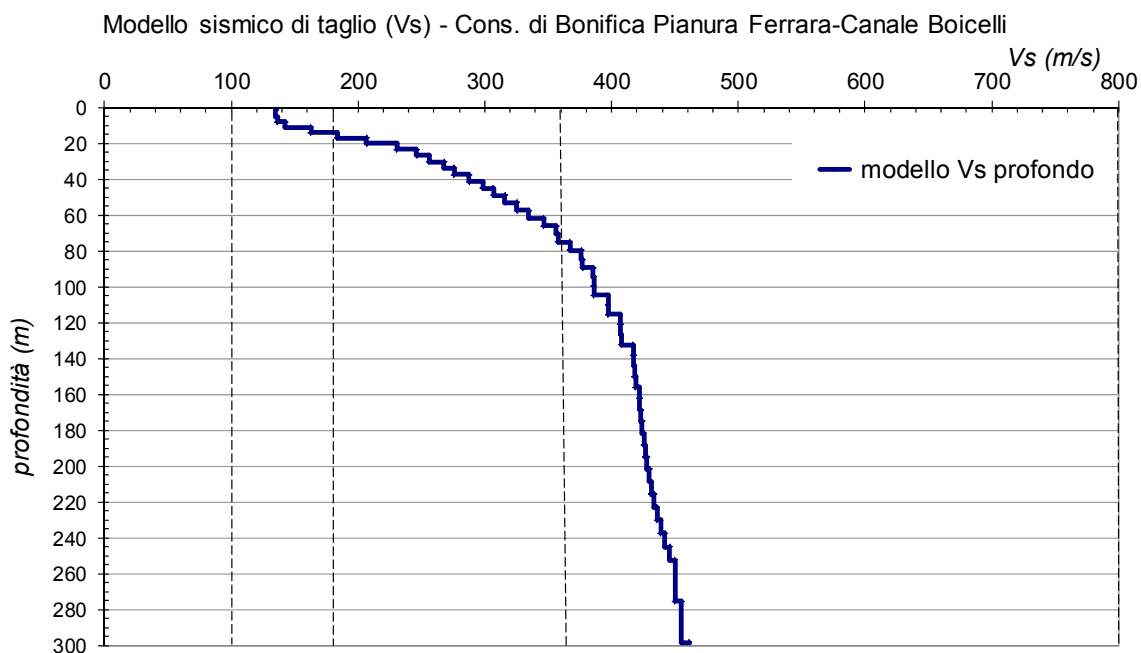


Figura 7. Il profilo verticale VS ottenuto per l'area indagata dal profilo sismico.

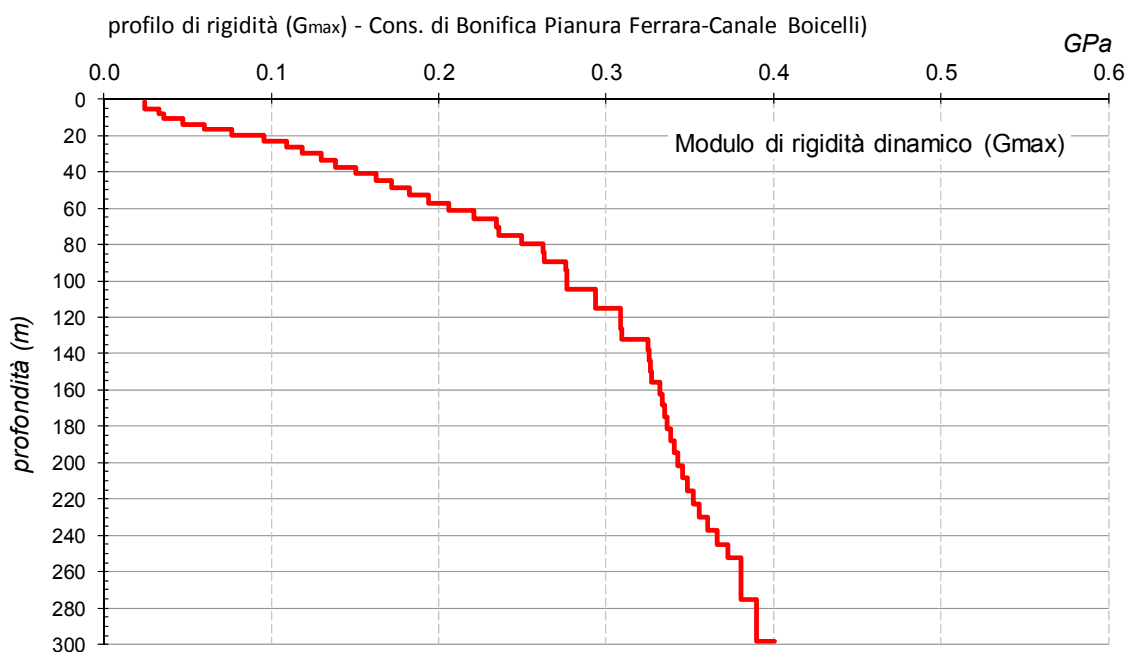


Figura 8. Il profilo verticale G_{max} (μ : modulo di rigidità dinamico) dell'area indagata dal profilo sismico, ottenuto dal profilo di velocità (Vs) mediante l'equazione $\mu = \rho \cdot Vs^2$.

5.1. PROVE DEI RAPPORTI SPETTRALI (H/V)

I risultati ottenuti, utilizzando il codice di calcolo Geopsy (ver. 2.9, 2015), sono riportati in **Figura 9**. Mentre le frequenze di risonanze ottenute sono riportate in Tabella 4. Le curve spettrali medi delle singole prove sono riportate in Appendice B.

Tabella 4: picchi di frequenze di risonanza fondamentale di risonanza ottenute dalle prove HVSr.

prova H/V	Frequenza (Hz)	Valore Frequenza	Periodo T_0 (sec)	Ampiezza (A)
Località: (Eurovo), Comune: Bagnara di Romagna (RA)				
01	F_0	$0,649 \pm 0,00362$	1,540	4,06
02	F_0	$0,677 \pm 0,02630$	1,477	3,15
media	F_0	$0,663 \pm 0,0150$	1,509	3,61
*prova effettuata in campo libero e quasi vicino.				

I risultati ottenuti permettono di formulare quanto segue:

- la frequenza di risonanza fondamentale con rapporto H/V medio di 2,1, tipica dei siti investigati è denominata **F_0** (Tabella 4), risulta essere pari a:
 **0,663 Hz** (periodo di risonanza medio: **1,509 secondi**) per il sito oggetto di studio. Questo valore suggerisce la presenza di una discontinuità elastica collocata a circa **170 ± 10 m** come risulta dal modello sismico di V_s (**Fig. 7**).

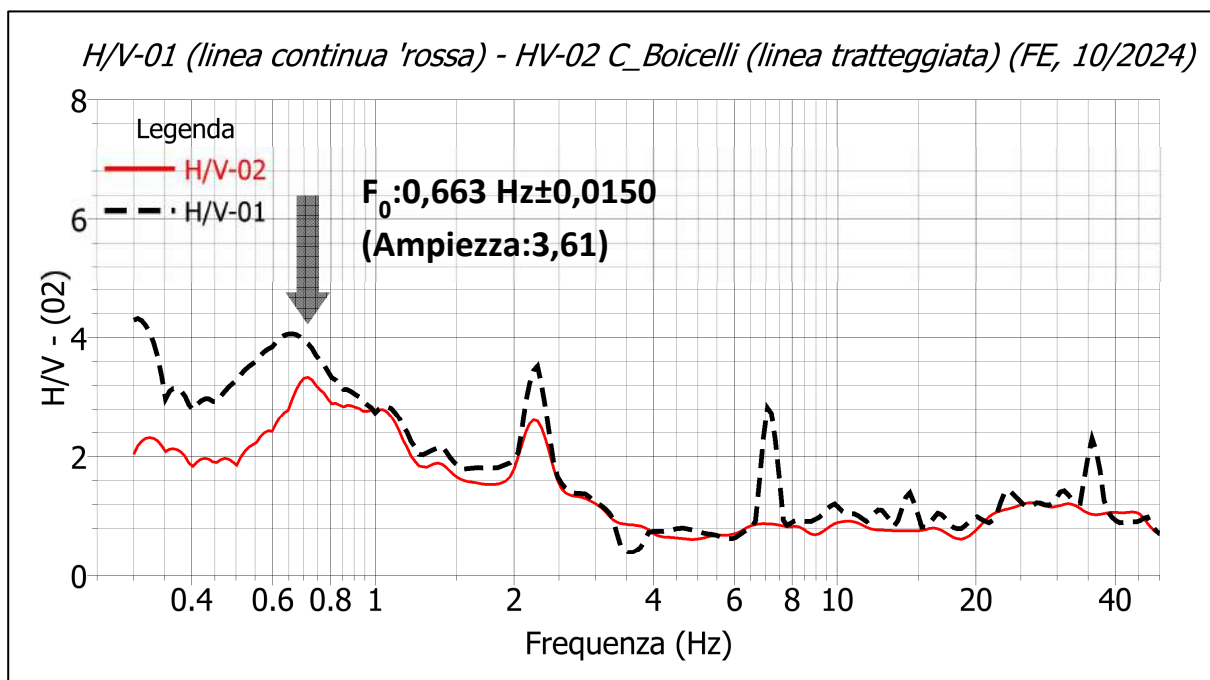


Figura 9. media dei rapporti spettrali (H/V) delle due prove effettuate in campo vicino e libero (H/V-01) e (H/V-02) nell'area. Freccia nera: frequenza di risonanza fondamentale (**F₀**) tipica dei terreni investigati.

6. CONCLUSIONI

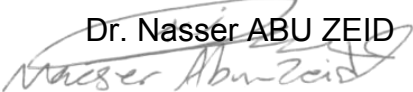
Le indagini geofisiche effettuate nel periodo **21 ottobre 2024** con le tecniche dei microtremori “ESAC” e rapporti spettrali (H/V) ha consentito di ricostruire il quadro sismico del sottosuolo dell'area indagata fino alla massima profondità d'indagine raggiunta (270m) e di determinare la frequenza di risonanza fondamentale del terreno dei siti investigati.

L'analisi del modello sismico evidenzia la presenza di numerosi sismo-strati con andamento crescenti. L'indagine sismica non ha raggiunto il substrato sismico, definito come $V_s \geq 800 \text{ m/s}$. Il valore massimo di V_s ottenuto è pari a 461 m/s in corrispondenza di 275 m di profondità.

In Figura (8) si riporta la variazione del modulo di rigidità dinamico ($G_{\max}$ o G_0) ricavato dal corrispondente profilo sismico di taglio (valori di densità utilizzate sono compresi tra 1.800,0 kg/m³ e 1.900,00 per tutti i sismo strati ad accessione del primo ove il valore è pari a 1.40,0 kg/m³).

L'indagine dei microtremori (rapporti spettrali: H/V o "Nakamura") ha consentito di determinare la frequenza (**F₀**) tipica di risonanza dei terreni investigati. Essa risultata essere pari ad un valore medio di **0,663 Hz (T=1,509 sec)**. Questo picco ha un'ampiezza comunque > 3 e d attribuire alla presenza di discontinuità elastica localizzata alle profondità di circa 170±10m.

Tecnico:

Dr. Nasser ABU ZEID


7. BIBLIOGRAFIA

Matlab, 2007b: Codice di calcolo numerico, Mathworks, USA.

Nakamura Y., 1989: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR Railway Technical Research Institute, 30, 25-33.

McMechan, G. A. e Yedlin, M. J., 1981. *In situ shear wave velocities from spectral analysis of dispersive waves by wave field transformation*. Geophysics, v. 46:869-874.

Lanzo G., Silvestri F., 1999: Risposta sismica locale. Hevelius edizioni, Benevento, pp. 159.

SeisOpt® ReMi, 2006. ReMiv4.0 user's manual. Optim, Inc., N. Virginia, USA, 85 p.

Appendice A

ESAC-01	PROFILO sismico fino a 270 metri		
Sismo-strato	Profondità letto (m)	Velocità (m/s)	Spessore (m)
1	1.5	134.9	0.0
2	5.2	136.4	3.7
3	8.0	142.6	2.8
4	10.8	162.8	2.9
5	13.8	183.5	3.0
6	16.8	206.8	3.1
7	20.0	230.7	3.2
8	23.2	246.1	3.3
9	26.6	255.9	3.4
10	30.1	267.7	3.5
11	33.6	275.9	3.6
12	37.3	287.4	3.7
13	41.1	298.5	3.8
14	45.0	306.7	3.9
15	48.9	315.7	4.0
16	53.0	325.1	4.1
17	57.2	334.5	4.2
18	61.5	346.3	4.3
19	65.9	356.2	4.4
20	70.4	357.7	4.5
21	74.9	367.1	4.6
22	79.6	376.2	4.7
23	84.4	376.8	4.8
24	89.3	385.6	4.9
25	94.3	385.9	5.0

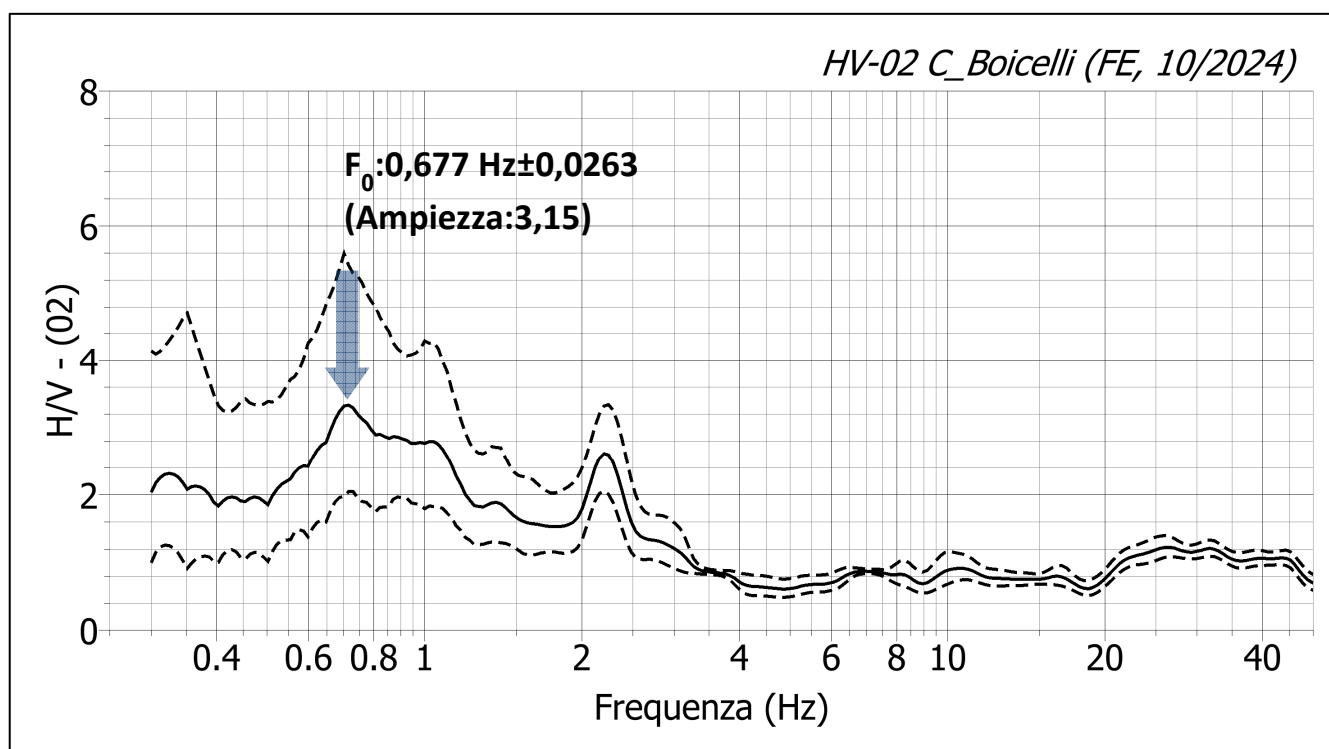
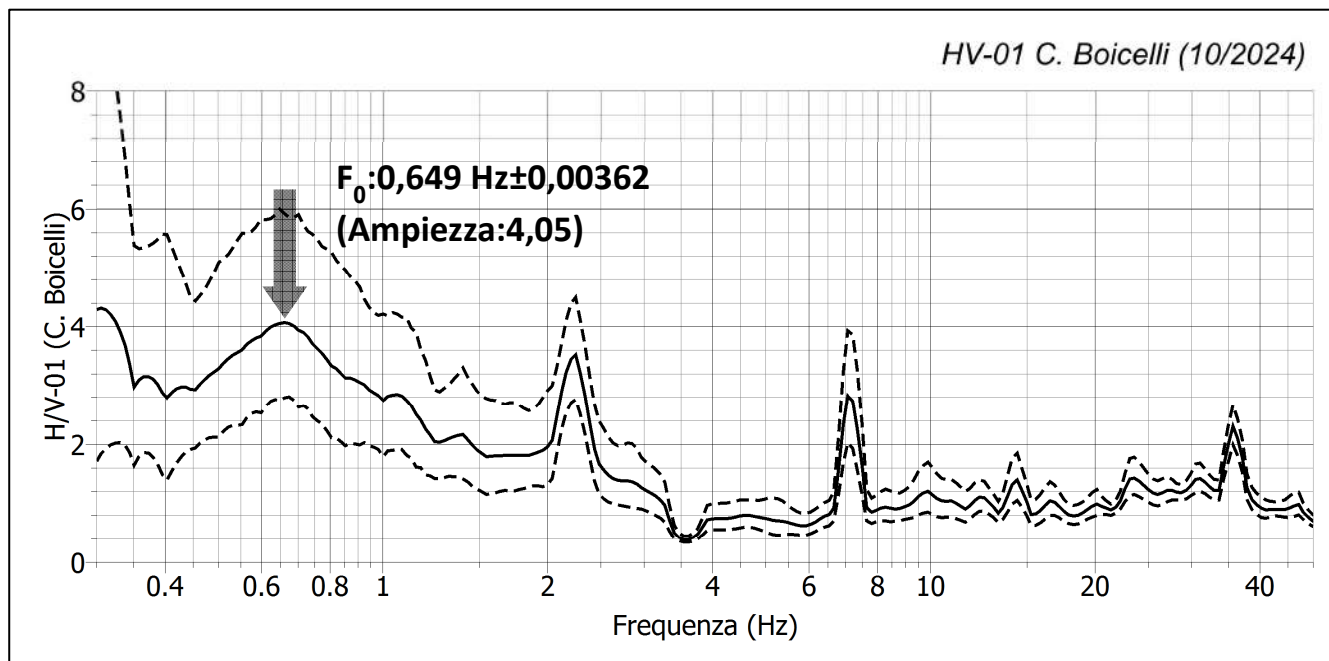
ESAC-01 Sismo-strato	Profondità letto (m)	Velocità (m/s)	Spessore (m)
26	99.4	386.2	5.1
27	104.6	397.1	5.2
28	109.9	397.4	5.3
29	115.3	406.8	5.4
30	120.8	407.1	5.5
31	126.4	407.4	5.6
32	132.1	417.1	5.7
33	138.0	417.5	5.8
34	143.9	418.1	5.9
35	149.9	418.7	6.0
36	156.0	421.6	6.1
37	162.2	422.4	6.2
38	168.5	423.3	6.3
39	175.0	424.3	6.4
40	181.5	425.4	6.5
41	188.1	426.6	6.6
42	194.8	428.0	6.7
43	201.7	429.6	6.8
44	208.6	431.4	6.9
45	215.6	433.5	7.0
46	222.8	435.8	7.1
47	230.0	438.6	7.2
48	237.4	441.8	7.3
49	244.8	445.6	7.4
50	99.4	386.2	5.1
51	104.6	397.1	5.2
52	109.9	397.4	5.3
53	115.3	406.8	5.4
54	120.8	407.1	5.5

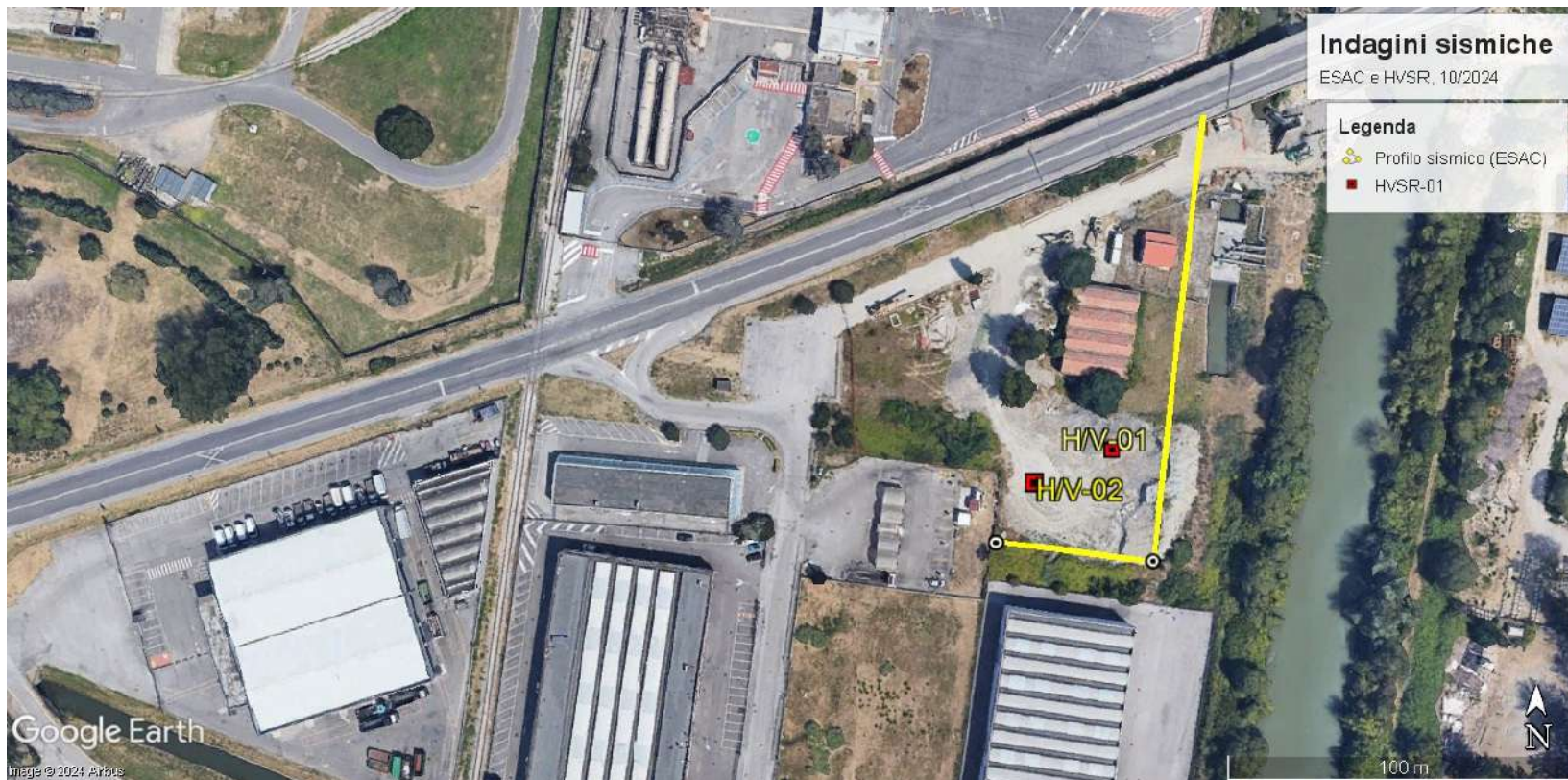


ESAC-01 Sismo-strato	Profondità letto (m)	Velocità (m/s)	Spessore (m)
26	252.4	450.1	7.5
27	275.3	455.4	22.9
28	-	461.1	-

Appendice B

Curve medie dei rapporti spettrali (H/V) delle due prove effettuate nell'area oggetto di studio.





angolo ESAC: 44.826825°N 11.603982°E



Profilo sismico ESAC



Prova H/V

Tavola 1