



**PROTEZIONE CIVILE**  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Il Livello di Approfondimento Relazione Illustrativa – Allegato 2 Rapporti di prova – Nuove Indagini

Regione Emilia–Romagna  
Comune di Lagosanto (Fe)



<p>Regione:</p> <p><b>Emilia Romagna</b></p>	<p>Soggetto realizzatore Dott. Geol. Thomas Veronese</p> <p>Collaboratori: Dott. Geol. Luca Lunghi Dott.ssa Geol. Sara Franciosi</p> <p>Indagini Geofisiche: Teamgeofisica.ceg ENVIA S.r.l.</p> <p>Cartografia: Dott.ssa Geol. Claudia Tomassoli</p>	<p>Data:</p> <p><b>Ottobre 2022</b></p>
--	--	---

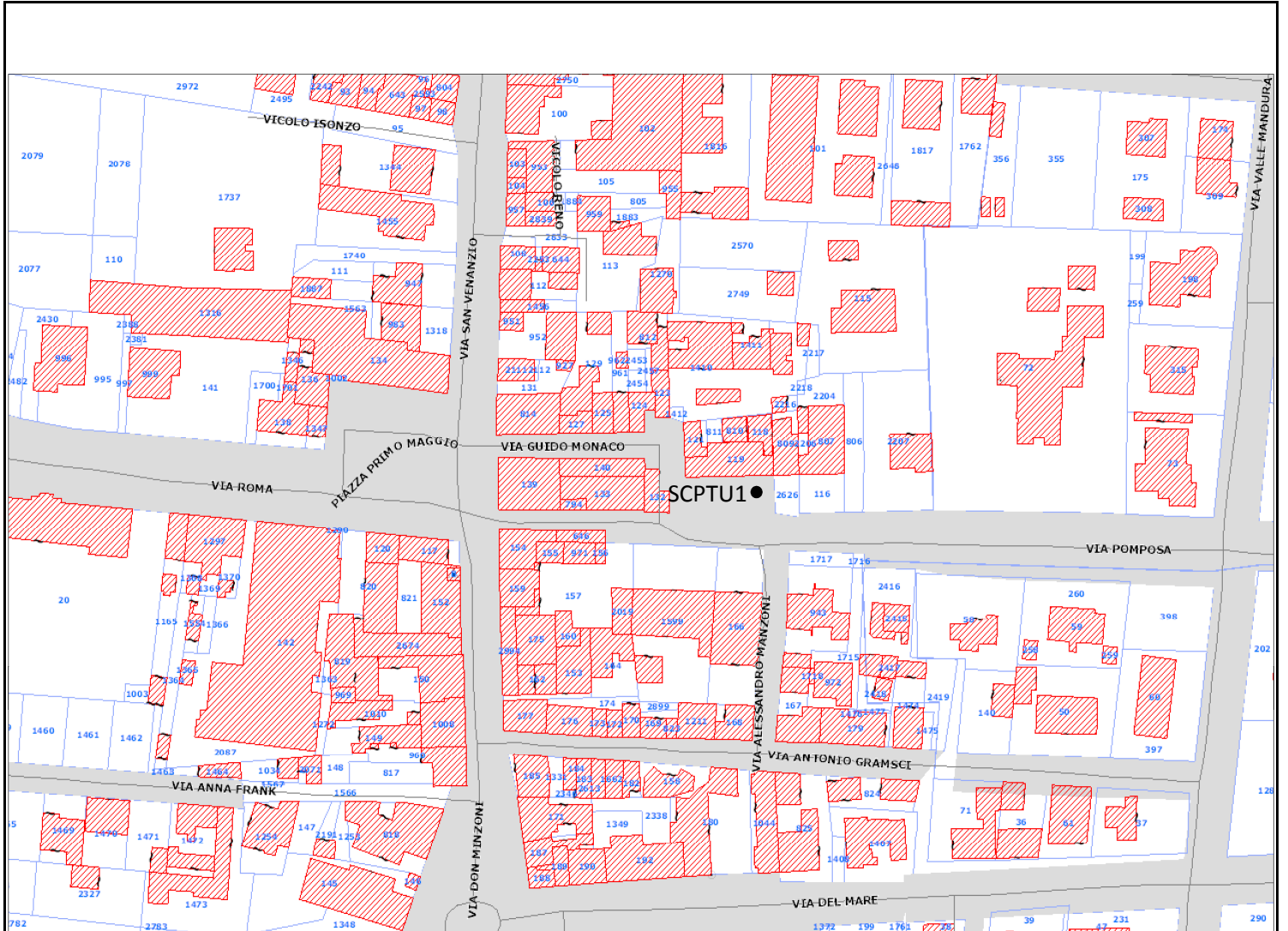
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
U94-22	SCPTU1

COMMITTENTE: Comune di Lagosanto

CANTIERE: Municipio, P.zza I Maggio, Lagosanto (Fe)

DATA: 13/07/2022

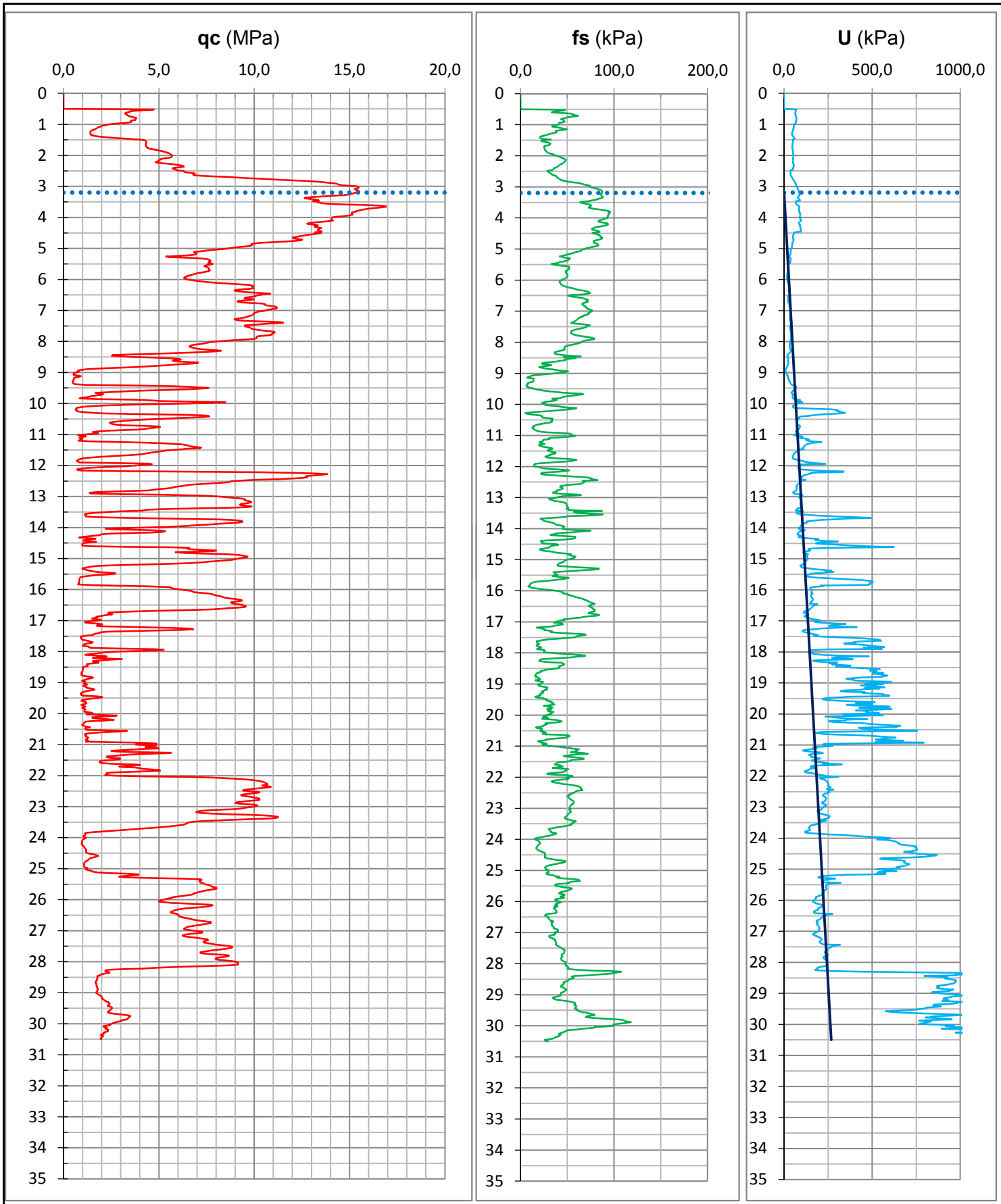


**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**DIAGRAMMI DI RESISTENZA**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
U94-22	SCPTU1

COMMITTENTE: Comune di Lagosanto  
 CANTIERE: Municipio, P.zza I Maggio, Lagosanto (Fe)  
 DATA: 13/07/2022

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,50  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 3,20  
 PREFORO (m da p.c.): 0,50



**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**PROVA DOWN HOLE SCPTU**

RIF. PROVA: CPTU n°:  
 U94-22 SCPTU1

COMMITTENTE: Comune di Lagosanto

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,50

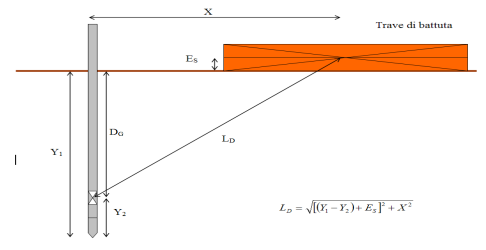
CANTIERE: Municipio, P.zza I Maggio, Lagosanto (Fe)

PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 3,20

DATA: 13/07/2022

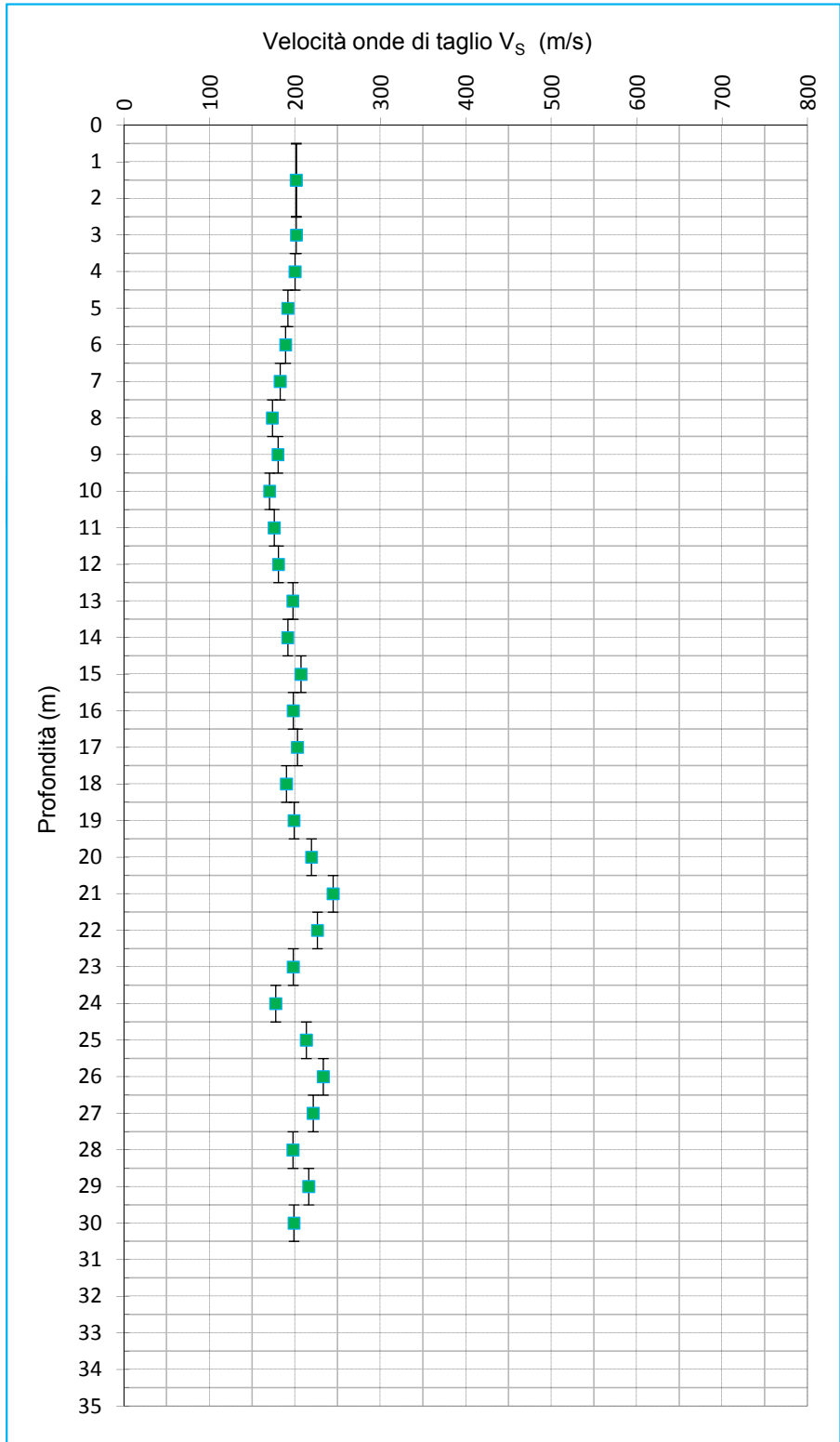
PREFORO (m da p.c.): 0,50

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 Y<sub>2</sub>: 0,20 m



**Vs<sub>30</sub> = 196 m/sec Categoria suolo di fondazione = C**

Distanza corretta L <sub>D</sub> punta elettrica	Tempo di arrivo onda S (millisecondi)	Velocità onde S dello strato (m/sec)
0,000		
1,324		202
2,314	11,475	202
3,309	16,413	200
4,307	21,391	192
5,306	26,582	189
6,305	31,847	183
7,304	37,295	174
8,304	43,033	180
9,303	48,561	170
10,303	54,408	176
11,303	60,075	181
12,303	65,584	198
13,302	70,624	192
14,302	75,820	207
15,302	80,628	198
16,302	85,656	203
17,302	90,564	190
18,302	95,802	199
19,302	100,808	219
20,302	105,347	245
21,301	109,416	226
22,301	113,815	198
23,301	118,846	177
24,301	124,459	213
25,301	129,128	233
26,301	133,397	221
27,301	137,895	198
28,301	142,933	216
29,301	147,541	199
30,301	152,549	



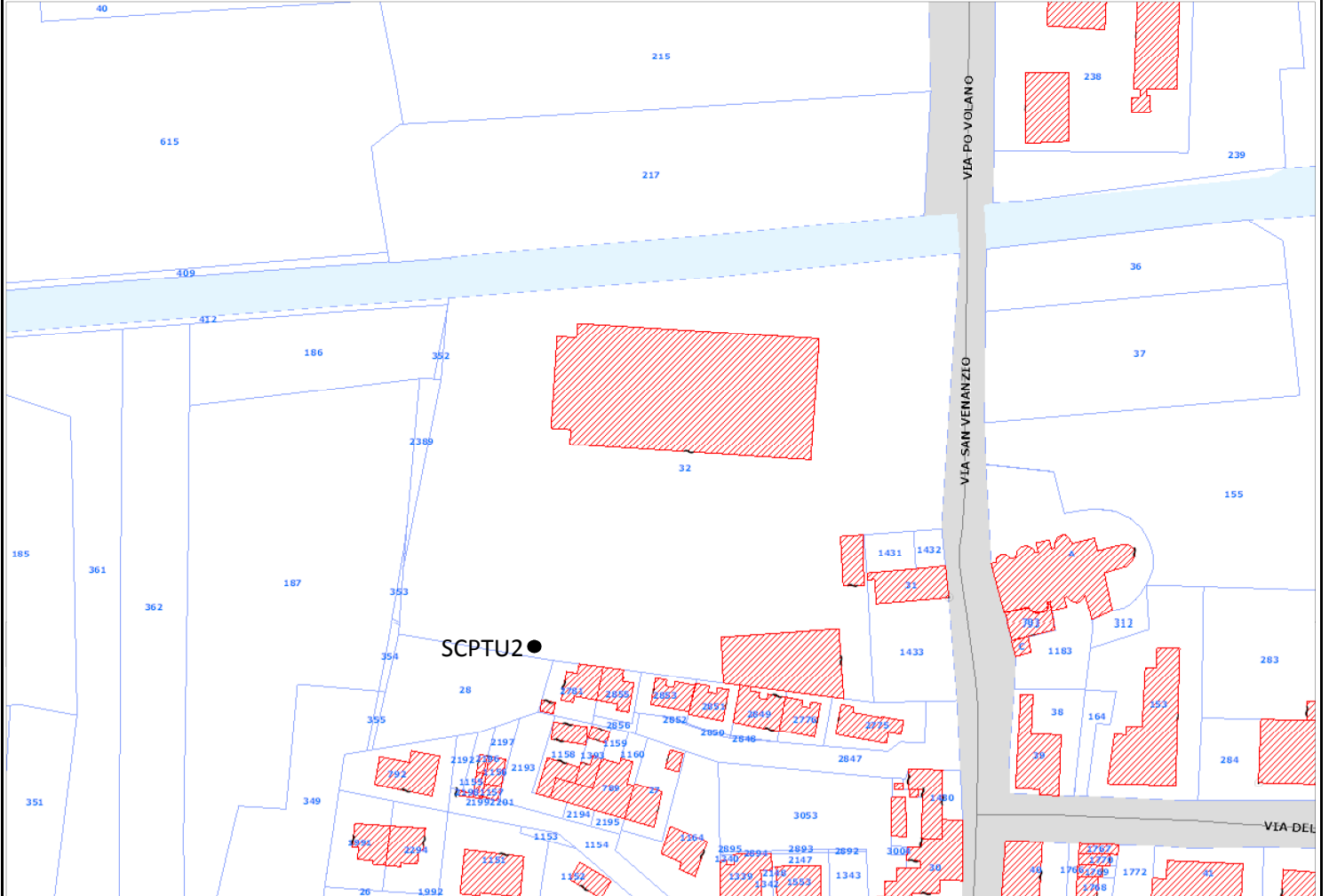
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
U94-22	SCPTU2

COMMITTENTE: Comune di Lagosanto

CANTIERE: PalaDon, via S. Venanzio, Lagosanto (Fe)

DATA: 13/07/2022

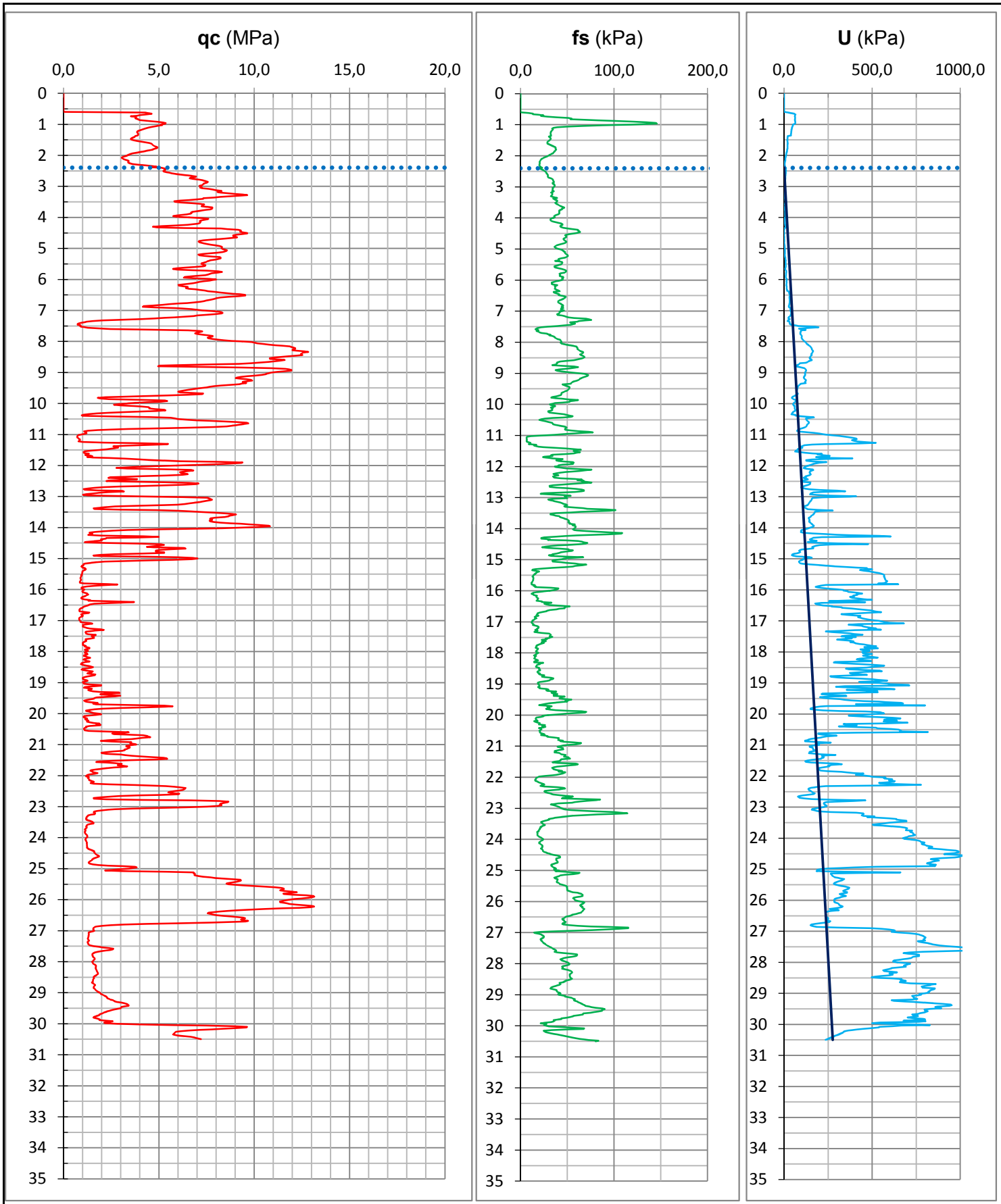


**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**DIAGRAMMI DI RESISTENZA**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
U94-22	SCPTU2

COMMITTENTE: Comune di Lagosanto  
 CANTIERE: PalaDon, via S. Venanzio, Lagosanto (Fe)  
 DATA: 13/07/2022

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,50  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,40  
 PREFORO (m da p.c.): 0,60



**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**PROVA DOWN HOLE SCPTU**

RIF. PROVA: CPTU n°:  
 U94-22 SCPTU2

COMMITTENTE: Comune di Lagosanto

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,50

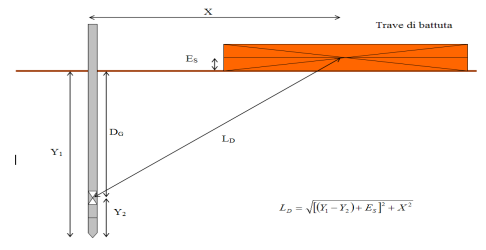
CANTIERE: PalaDon, via S. Venanzio, Lagosanto (Fe)

PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,40

DATA: 13/07/2022

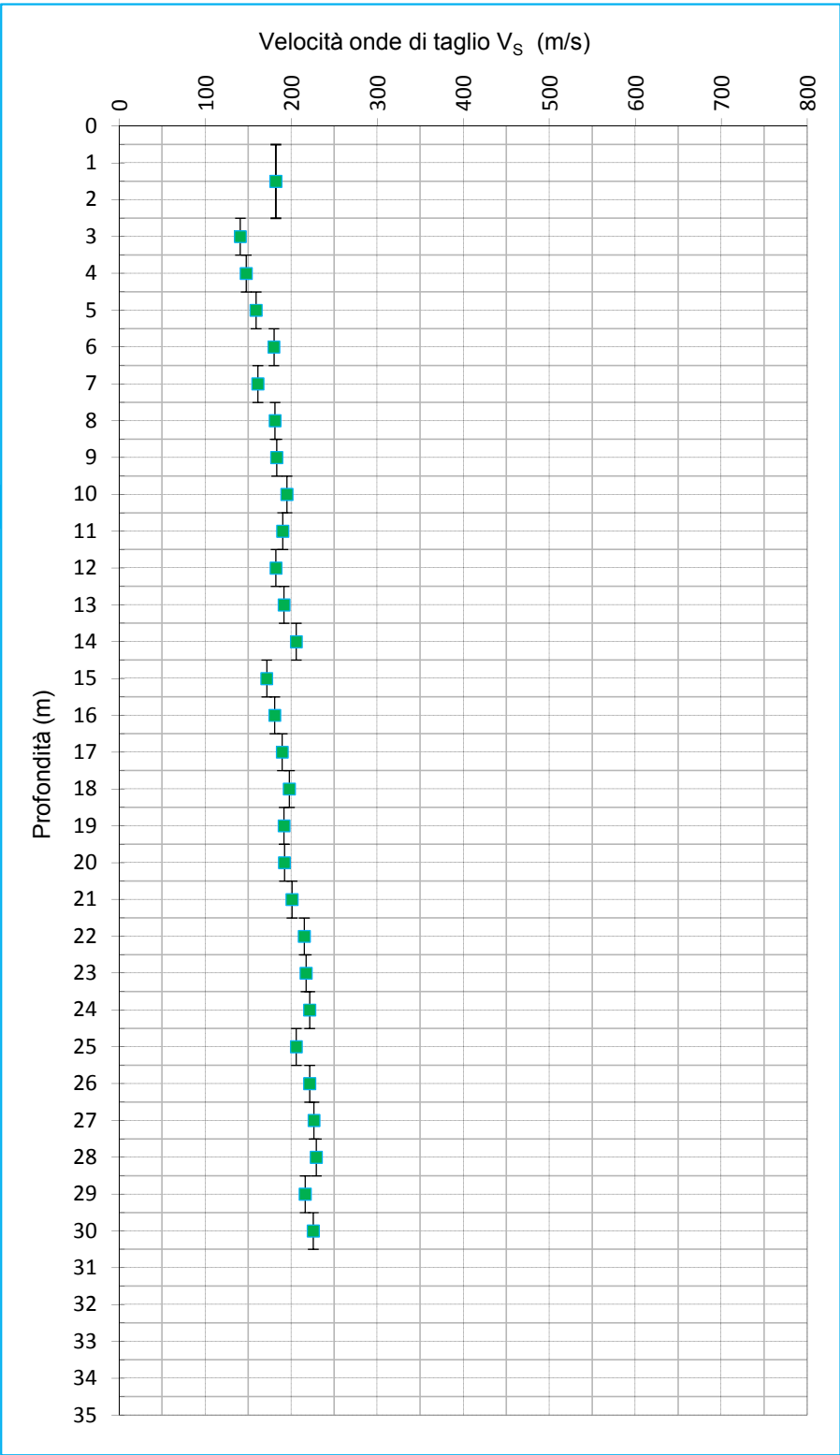
PREFORO (m da p.c.): 0,60

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 Y<sub>2</sub>: 0,20 m



**Vs<sub>30</sub> = 188 m/sec Categoria suolo di fondazione = C**

Distanza corretta L <sub>D</sub> punta elettrica	Tempo di arrivo onda S (millisecondi)	Velocità onde S dello strato (m/sec)
0,000		
1,324		182
2,314	12,705	
3,309	19,782	141
4,307	26,528	148
5,306	32,787	159
6,305	38,325	180
7,304	44,502	161
8,304	50,000	181
9,303	55,438	183
10,303	60,546	195
11,303	65,784	190
12,303	71,251	182
13,302	76,449	192
14,302	81,287	206
15,302	87,095	171
16,302	92,603	181
17,302	97,859	189
18,302	102,898	192
19,302	108,097	192
20,302	113,284	201
21,301	118,243	215
22,301	122,874	217
23,301	127,459	221
24,301	131,957	206
25,301	136,795	221
26,301	141,293	226
27,301	145,692	229
28,301	150,041	216
29,301	154,647	225
30,301	159,064	





Opera  
Indagini sismiche HVSR

Elaborato  
2022\_0072\_RET\_C\_V00  
Rev. 00 del 29/06/2022

Committente  
Dott. Geol. Thomas Veronese

---

PROVINCIA DI FERRARA  
**COMUNE DI LAGOSANTO**

INDAGINI SISMICHE HVSR  
Loc. Marozzo e Lagosanto, Comune di Lagosanto  
**RELAZIONE GEOFISICA**

0	29/06/2022	Prima Emissione	U. Grechi	P. Durante	G. Dal Forno
Rev.	Data	DESCRIZIONE	PREPARATO	VERIFICATO	APPROVATO



## Sommario

Premessa .....	2
Normativa di riferimento .....	2
Risultati delle indagini sismiche.....	4

## ELENCO ALLEGATI

### **Allegato 1** Risultati Indagine



## Premessa

Su richiesta del Dott. Geol. Thomas Veronese sono state effettuate 4 indagini sismiche di tipo HVSR. Viene di seguito riportata l'ubicazione delle prove:

- HVSR1, ubicata in vicinanza dell'impianto idrovaro di Marozzo in loc. Marozzo, nel comune di Lagosanto;
- HVSR2, ubicata nell'area cortiliva dell'Ospedale Pubblico del Delta in loc. Marozzo, nel comune di Lagosanto;
- HVSR3, ubicata in un'area verde prossima all'incrocio con via Sandro Pertini e via Donatori di Sangue, nel comune di Lagosanto;
- HVSR4, ubicata in un'area verde restrostante la Parrocchia di Santa Maria della Neve, nel comune di Lagosanto.

Le indagini sono state eseguite a supporto di uno studio di microzonazione inerente all'area indagata; è, inoltre, stato stimato il parametro  $V_{S,eq}$  per ciascuna prova, ossia la velocità equivalente di propagazione delle onde sismiche di taglio, come prescritto dall'art. 3.2.2 del D.M. 17 gennaio 2018 ed verificare le frequenze.

## Normativa di riferimento

Il D.M. 17 gennaio 2018 prevede che, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si renda necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi (art. 7.11.3). In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II del decreto, per la definizione dell'azione sismica si può far riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_S$  (cfr. Tabella 1).

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

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

con:

- $h_i$  spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$  velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- $N$  numero di strati;

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

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

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

**Tabella 1** – Classificazione dei suoli secondo il D.M. 17 gennaio 2018 (Tabella 3.2.II).

Per depositi con profondità  $H$  del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{S,eq}$  è ottenuta ponendo  $H = 30$ .

Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

### Risultati delle indagini sismiche

Allo scopo di ottenere i dati necessari al calcolo del parametro  $V_{S,eq}$  è stato utilizzato un tromografo digitale, "TROMINOENGY" (Micromed S.p.A.) dotato di 3 canali velocimetrici (N-S, E-W, Up-Down) ad alto guadagno per l'acquisizione del microtremore sismico ambientale (fino a ~1.5 mm/s); il sistema opera nell'intervallo di frequenze 0.1–1024 Hz.

Le misure di rumore sismico sono state acquisite per un tempo di registrazione pari a 20 minuti ([Allegato 1](#)). L'elaborazione dei dati di rumore sismico acquisiti è avvenuta mediante software Grilla (Micromed S.p.A.). Le curve H/V sperimentali e sintetiche ottenute mediante l'elaborazione, sono riportate in [Allegato 1](#) assieme ai modelli profondità – velocità ottenuti.

L'inversione delle curve H/V sperimentali per ottenere un profilo delle onde di taglio S è stata vincolata sulla base delle informazioni di alcune prove penetrometriche statiche, dotate di cono sismico, rese disponibili dalla Committenza.

L'elaborazione delle prove ha evidenziato (Fig.1):

- Curva H/V prova HVSR1 - frequenze principali a circa 3.9Hz, 1.5Hz, 0.6Hz, **massimo a 0.3 Hz**;
- Curva H/V prova HVSR2 - frequenze principali a circa 5.0Hz, 1.4Hz, 0.6Hz, **massimo a 0.4 Hz**;
- Curva H/V prova HVSR3, frequenze principali a circa 1.9Hz, 0.7Hz, **massimi a 0.3 Hz**;
- Curva H/V prova HVSR4, frequenze principali a circa 1.5Hz, 0.7Hz, **massimo a 0.2 Hz**.

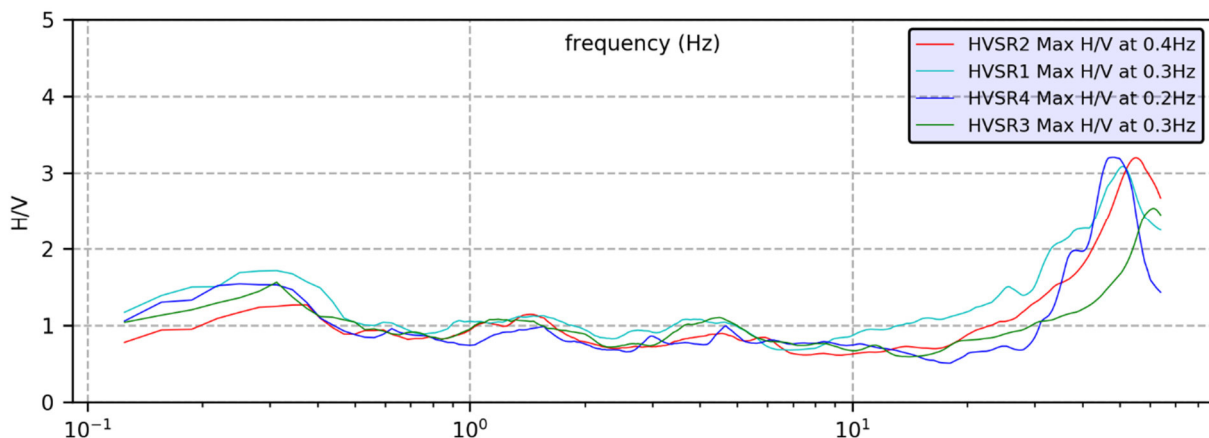


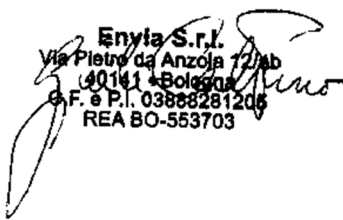
Figura 1. Curve H/V sperimentali relative alle prove HVSR1, HVSR2, HVSR3 e HVSR4

In [Allegato 1](#) sono riportati il grafico dell'andamento della velocità delle onde S in funzione della profondità, la tabella con i valori numerici e il grafico della variazione del parametro  $V_{S,eq}$  in funzione della profondità del piano di fondale della struttura in progetto.

Dal modello di velocità derivato dall'elaborazione è stato stimato il parametro  $V_{S,eq}$  rispetto all'attuale piano campagna per ciascuna prova:

- HVSR1, pari a **187.2 m/s**;
- HVSR2, pari a **189.1 m/s**;
- HVSR3, pari a **213.0 m/s**;
- HVSR4, pari a **210.0 m/s**.

Bologna, 29 giugno 2022

  
Envia S.r.l.  
Via Pietro da Anzola 12/ab  
40141 Bologna  
C.F. e P.I. 03888281206  
REA BO-553703



Servizio  
INDAGINI SISMICHE HVSR  
Località  
Marozzo e Lagosanto, Comune di Lagosanto (FE) - 29/06/2022  
Committente  
Dott. Geol. Thomas Veronese

ALLEGATO 1  
Risultati indagine  
Pag. 1 di 5



Figura 1. Ubicazione indagini



Figura 2. Indagine HVSR1



Figura 3. Indagine HVSR2



Figura 4. Indagine HVSR3



Figura 5. Indagine HVSR4

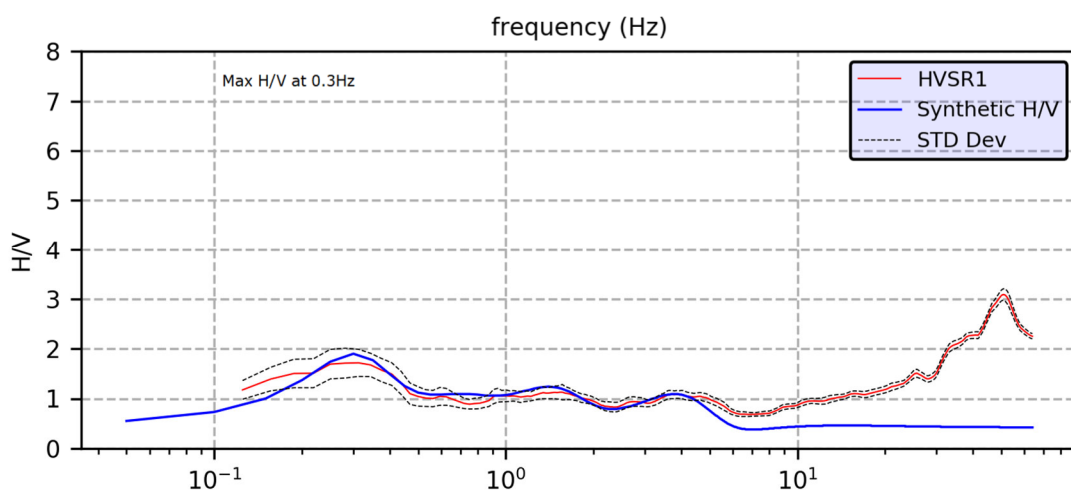


Figura 7. Curva H/V sperimentale (tracciato in rosso) e teorica (tracciato blu), prova HVSR1

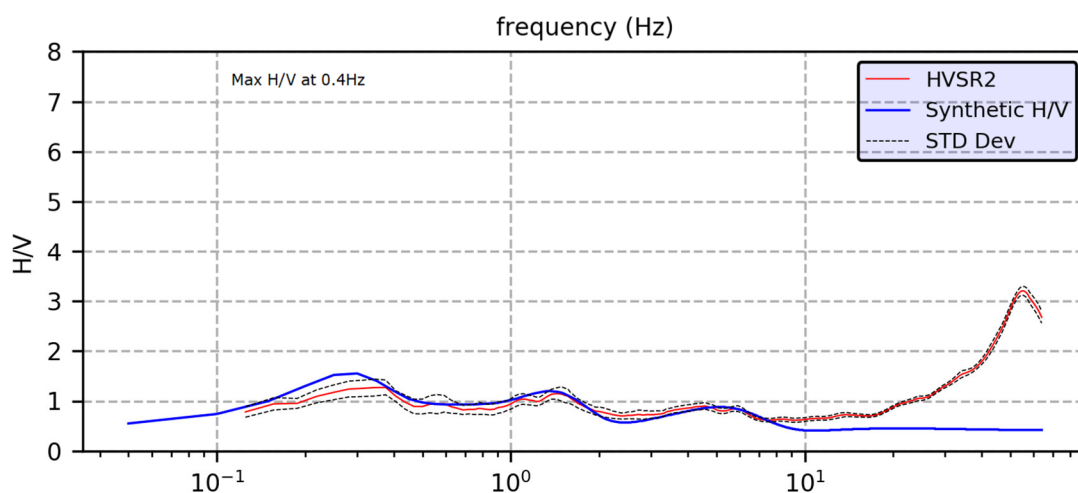


Figura 8. Curva H/V sperimentale (tracciato in rosso) e teorica (tracciato blu), HVSR2.

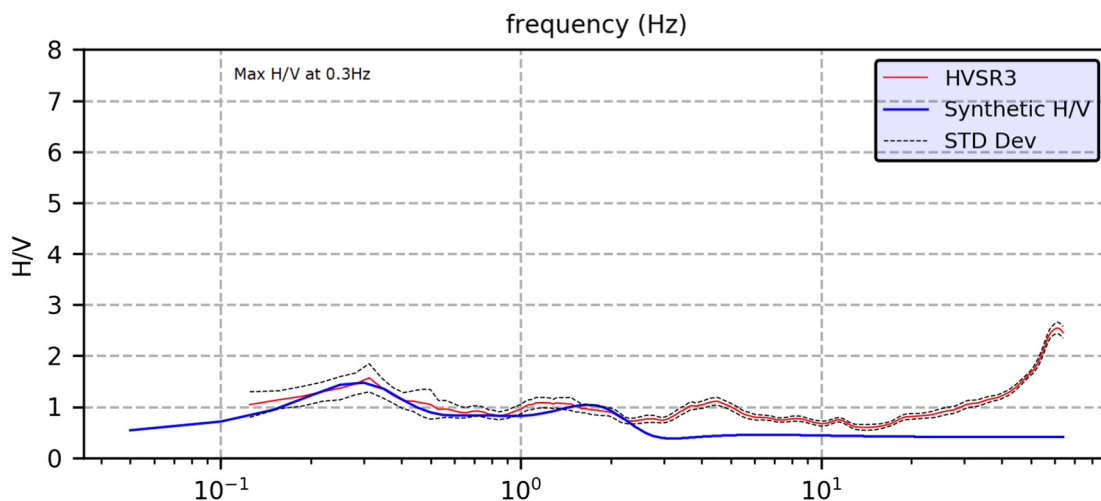


Figura 9. Curva H/V sperimentale (tracciato in rosso) e teorica (tracciato blu), HVSR3



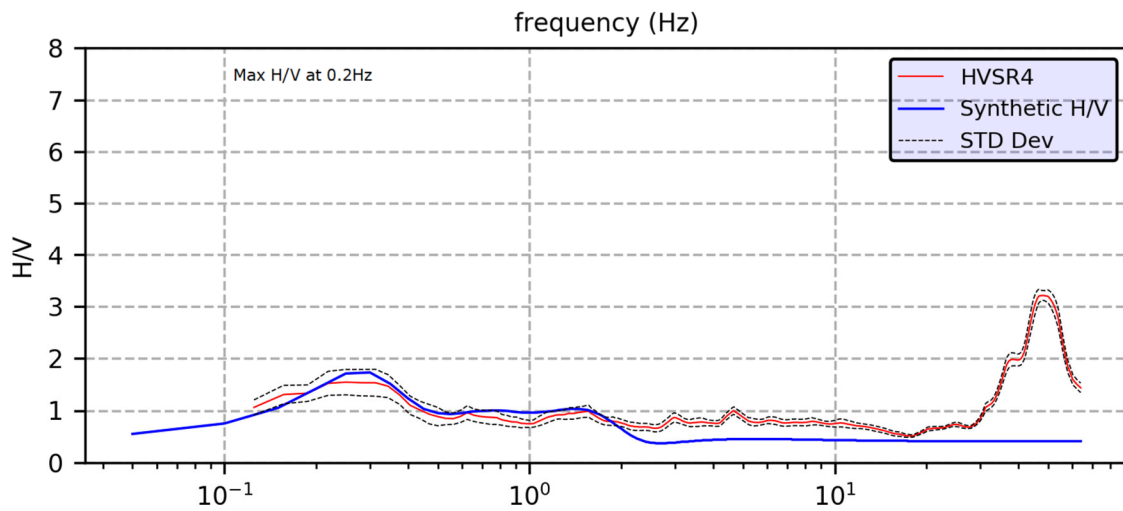


Figura 10. Curva H/V sperimentale (tracciato in rosso) e teorica (tracciato blu), HVSR4

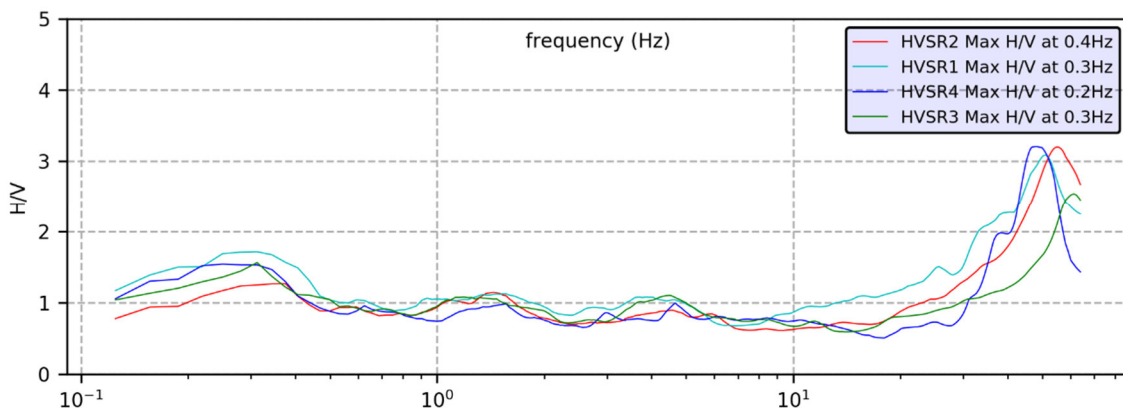


Figura 11. Curva H/V sperimentali relative alle prove HVSR 1, 2, 3 e 4



Prova	Letto (m da p.c.)	Spessore (m)	Vs (m/s)
HVSUR4	35.0	35.0	210.0
	148.0	113.0	352.0
	408.0	260.0	480.0
	inf	inf	730.0
HVSUR3	30.0	30.0	213.0
	143.0	113.0	348.0
	383.0	240.0	495.0
	inf	inf	720.0
HVSUR2	5.8	5.8	137.0
	36.8	31.0	208.0
	156.8	120.0	345.0
	396.8	240.0	500.0
	inf	inf	720.0
HVSUR1	8.0	8.0	128.0
	41.0	33.0	225.0
	151.0	110.0	355.0
	411.0	260.0	510.0
	inf	inf	720.0

Figura 12. Tabella modello delle velocità nel sottosuolo delle prove HVSR

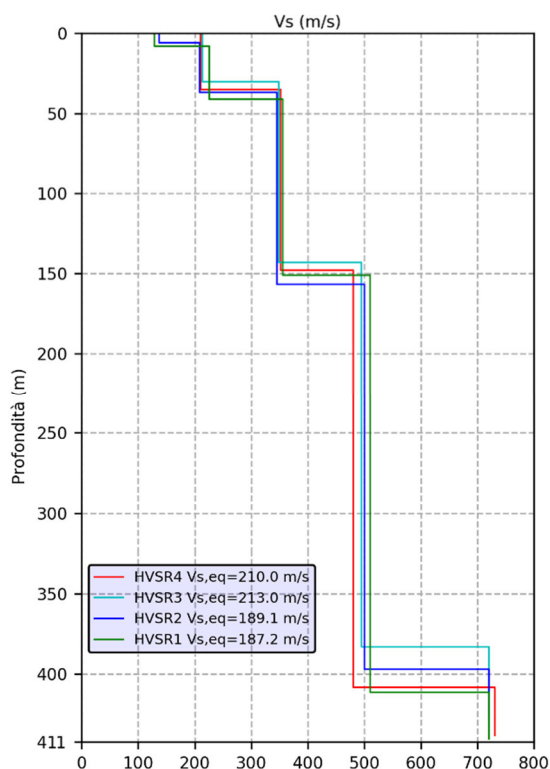


Figura 13. Andamento della velocità delle onde S in funzione della profondità.

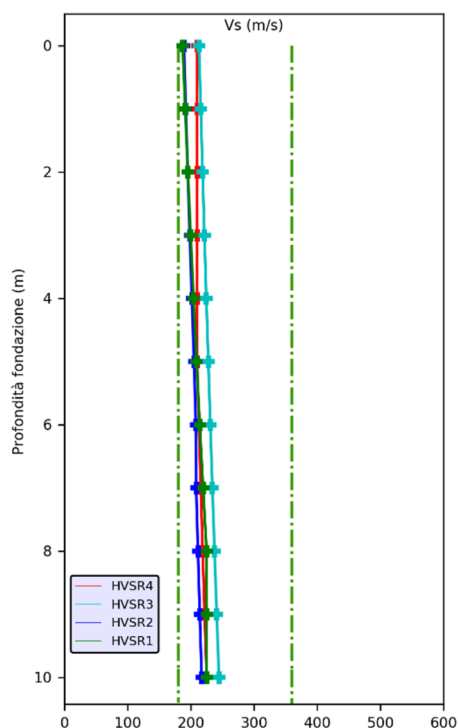


Figura 14. Andamento del parametro Vs,eq in funzione della variazione della profondità del piano fondale della struttura in progetto.

**Regione EMILIA-ROMAGNA**  
**Provincia di FERRARA**  
**Comune di Lagosanto**



***Indagine sismica con la tecnica dei  
microtremori “H/V” per la determinazione  
della frequenza di risonanza dei terreni in due  
siti in Comune di Lagosanto (FE)***

***giugno 2022***

**Committente:** Studio Geologo Veronese

**Tecnico:** Dr. Nasser Abu Zeid (Ph.D.)  
(geofisico applicato senior)



**Indagine sismica con la tecnica dei microtremori “H/V” per la  
determinazione della frequenza di risonanza dei terreni in due siti  
in Comune di Lagosanto (FE)**



- Relazione Geofisica -

Giugno 2022

---

**Teamgeofisica.ceg (centro elaborazione dati geofisici)**  
Via G. Fabbri, 342 - 44124 FERRARA (FE)  
Tel./Fax 0532-8748912  
Mail: teamgeofisica.ceg@gmail.com

---



## INDICE

<b>1.</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>TECNICHE D'INDAGINE</b>	<b>1</b>
2.1.	<b>Rapporti spettrali (H/V)</b>	<b>1</b>
2.1.1.	Il metodo HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio)	2
<b>3.</b>	<b>ACQUISIZIONE DATI</b>	<b>4</b>
3.1.	Dati H/V	4
<b>4.</b>	<b>ANALISI DATI</b>	<b>5</b>
4.1.	Dati rapporti spettrali (H/V)	5
<b>5.</b>	<b>RISULTATI</b>	<b>6</b>
5.1.	Prove dei rapporti spettrali (H/V)	6
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>8</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>9</b>
	Appendice A: risultati prove H/V	10

---

## ELENCO DELLE FIGURE E TABELLE

Figura 1: modello di sottosuolo ad un grado di libertà (SDOF) .....	2
Figura 2: particolari prove dei rapporti spettrali “H/V” effettuate nell’area. A sinistra: HVSR-05 e a destra: HVSR-06 (Lagosanto, FE).....	4
Figura 3. Sismogrammi delle due prove di rumore sismico (microtremori) acquisiti in campo libero nel territorio comunale di Lagosanto (FE). Z: componente verticale, E: componente orizzontale in direzione E-W e N: componente orizzontale in direzione N-S.....	5
Figura 4. media dei rapporti spettrali (H/V) delle cinque prove effettuate in campo libero: (a) HVSR-05 e (b) HVSR-06. Freccia: frequenza di risonanza fondamentale ( <b>F0</b> ) tipica dei terreni investigati. ....	7
Figura 5. Esempi di curve di densità spettrale (PDS) di rumore sismico ambientale acquisito nel territorio comunale di Comacchio (FE) e messo a confronto con le curva di Peterson (1993). Essi rappresentano i modelli stabiliti del rumore sismico ambientale a livello globale. Le curve sperimentali mostrano un picco intorno a 02-0.3 Hz cioè simile al picco di risonanza riscontrato nelle prove H/V acquisite. ....	8
Tabella 1: dettagli delle prove dei rapporti spettrali ‘microtremori’ (H/V) effettuate nel territorio del Comune di Lagosanto (FE). _____	5
Tabella 2: picchi di frequenze di risonanza fondamentale di risonanza ottenute dalle prove HVSR. _____	6

---

### **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 giugno 2022 una campagna d'indagine geofisica, nel territorio del Comune di Lagosanto (FE). Scopo dell'indagine è quello di determinare la frequenza di risonanza dei terreni, in campo libero, in due siti ubicati a nord e a sud della località di Vaccolino (**Appendice A**). A tale fine è stata impiegata la tecnica dei microtremiti (rapporti spettrali H/V).

## 2. TECNICHE D'INDAGINE

### 2.1. 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:

- 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.

Siccome la frequenza di risonanza propria dei terreni dipende dalla sequenza dei contrasti di impedenza elastica presenti nel sottosuolo è possibile utilizzare la tecnica dei rapporti spettrali per risalire a tale parametro. Il lavoro fondamentale su questa specifica procedura fu

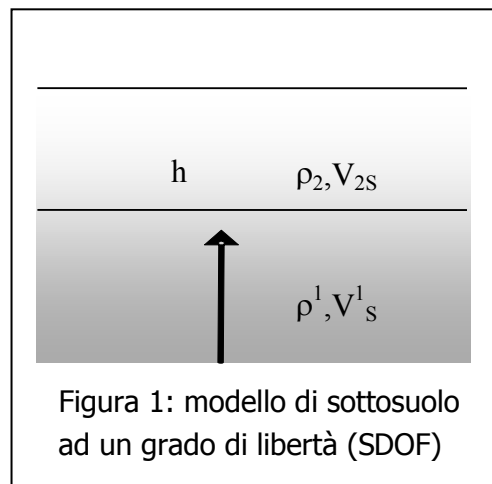
---



pubblicato da Nakamura nel 1989; per questo motivo è chiamato anche “metodo di Nakamura” (Nakamura, 1989).

### 2.1.1. 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  $Z_1 = \rho_1 v_1$  (dove  $\rho$  è la densità e  $v$  la velocità di onde di volume P/S rispettivamente) ad un mezzo con impedenza acustica/elastica  $Z_2 = \rho_2 v_2$ , 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):

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

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:

$$A(f) = \frac{2}{(2n-1)} \cdot \frac{G}{\pi^2 \eta f}$$

dove,  $G$  è il modulo di rigidità,  $\eta$  il coefficiente di viscosità,  $f$  la frequenza ed  $n$  è 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  $NS(f)$ <sup>1</sup>

$$\frac{\sqrt{|NS(f)|^2 + |EW(f)|^2}}{|V(f)|}$$

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

---

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

---

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.

### 3. ACQUISIZIONE DATI

#### 3.1. DATI H/V

I siti oggetto di indagine sono stati investigati in data 21/06/2022 mediante l'esecuzione di n.2 prove H/V (**Appendice A e Tabella 1**).

Per l'acquisizione dati è stato impiegato una data logger a 24 bit collegato ad un sismometro 3D modello Sensor (S3S2, M.A.E. Apparecchiature Elettroniche srl. di Frosolone, Molise) (**Fig. 2**). La lunghezza temporale di ogni registrazione è pari a 60 minuti con passo di campionamento di 250 Hz. In **figura 3** si riportano i sismogrammi di tutte le prove effettuate.



Figura 2: particolari prove dei rapporti spettrali "H/V" effettuate nell'area. A sinistra: HVSR-05 e a destra: HVSR-06 (Lagosanto, FE).

Tabella 1: dettagli delle prove dei rapporti spettrali 'microtremori' (H/V) effettuate nel territorio del Comune di Lagosanto (FE).



Sigla	Località	Comune	Durata (minuti)	Latitudine g.g (WGS84)	Longitudine g.g (WGS84)
HV-05	Vaccolino	Lagosanto	60	44.787337	12.165335
HV-06	Vaccolino		60	44.80094	12.173958

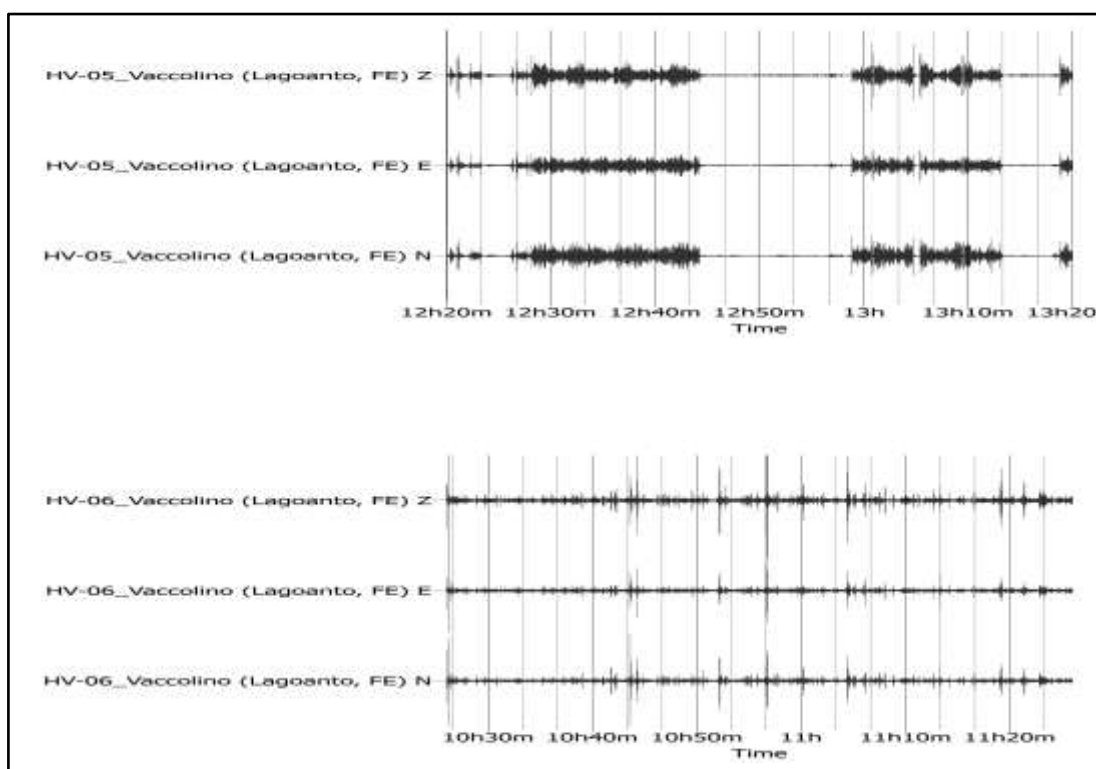


Figura 3. Sismogrammi delle due prove di rumore sismico (microtremori) acquisiti in campo libero nel territorio comunale di Lagosanto (FE). Z: componente verticale, E: componente orizzontale in direzione E-W e N: componente orizzontale in direzione N-S.

#### 4. ANALISI DATI

##### 4.1. DATI RAPPORTI SPETTRALI (H/V)

L'analisi delle serie temporali è proceduta seguendo i punti 2 e 3 del paragrafo 2.1.1. La figura 5 illustra le tracce sismiche dei sismogrammi registrati in due siti (H/V-05 e H/V-06, **Appendice A**).

## 5. RISULTATI



### 5.1. PROVE DEI RAPPORTI SPETTRALI (H/V)

I risultati ottenuti, utilizzando il codice di calcolo Geopsy (vers. 2.9, 2015), sono riportati in **figura 4**. Mentre le frequenze di risonanze ottenute sono riportate in **Tabella 2**.

Tabella 2: picchi di frequenze di risonanza fondamentale di risonanza risultati dall'analisi delle prove HVSR.

prova H/V	Frequenza (Hz)	Valore Frequenza	Periodo $T_0$ (sec)	Ampiezza (A)
<b>Comune di Lagosanto (FE)</b>				
05	$F_0$	1,02 ± 0,06	<b>0,99</b>	<b>2,05</b>
06	$F_0$	1,01 ± 0,05	<b>0,98</b>	<b>2,00</b>
<b>media</b>	<b><math>F_0</math></b>	<b>1,02 ± 0,06*</b>	<b>0,98*</b>	<b>2,03*</b>
prove effettuate in campo libero				
*migliore stima				

I risultati ottenuti permettono di formulare quanto segue:

1. la frequenza di risonanza fondamentale con rapporto H/V medio di 2.03 , tipica dei siti investigati è denominata  **$F_0$**  (**Tabella 2**), risulta essere pari a: **1,02 Hz** (periodo di risonanza medio: **0,98 secondi**) per i terreni nel Comune di Lagosanto (FE). Questo valore suggerisce la presenza di una discontinuità elastica collocata a circa **100±20 m**,
2. È stata riscontrata in quasi tutte le prove H/V la presenza di una frequenza denominata ( $F_1$ ) di valore medio pari a **0,2-0,3 Hz** (periodo pari a 3,3-5,0 secondi). Questa frequenza è tipica del rumore sismico ambientale a livello globale, come si può osservare dai modelli di rumore suggeriti da Peterson (1993). Una tipica risposta spettrale di rumore sismico ambientale acquisito nel territorio di Comacchio, con strumentazione a banda larga, e messo a confronto con le curve di Peterson (1993) è riportata in **figura 5**.

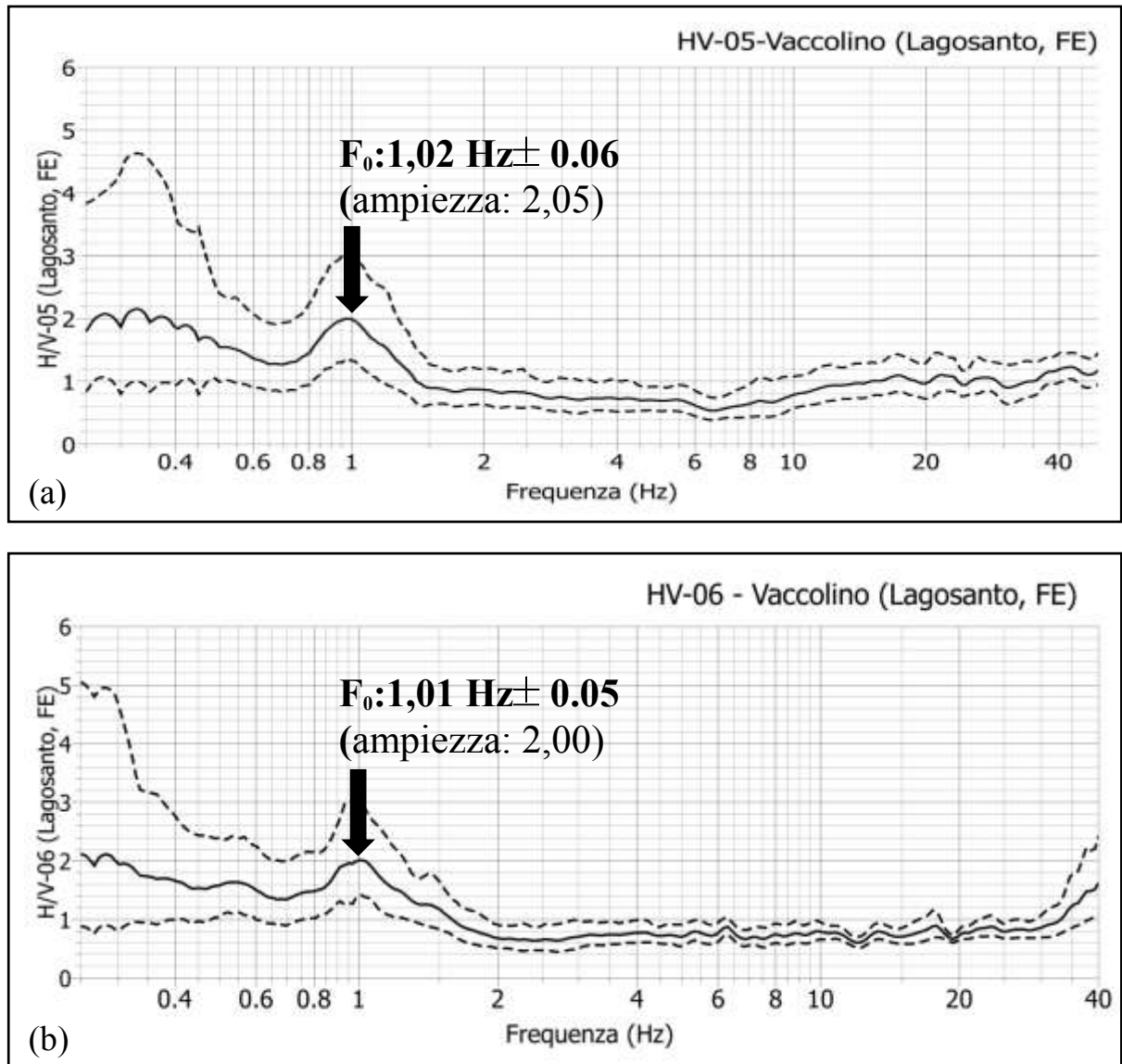


Figura 4. media dei rapporti spettrali (H/V) delle cinque prove effettuate in campo libero: (a) HVSR-05 e (b) HVSR-06. Freccia: frequenza di risonanza fondamentale ( $F_0$ ) tipica dei terreni investigati.

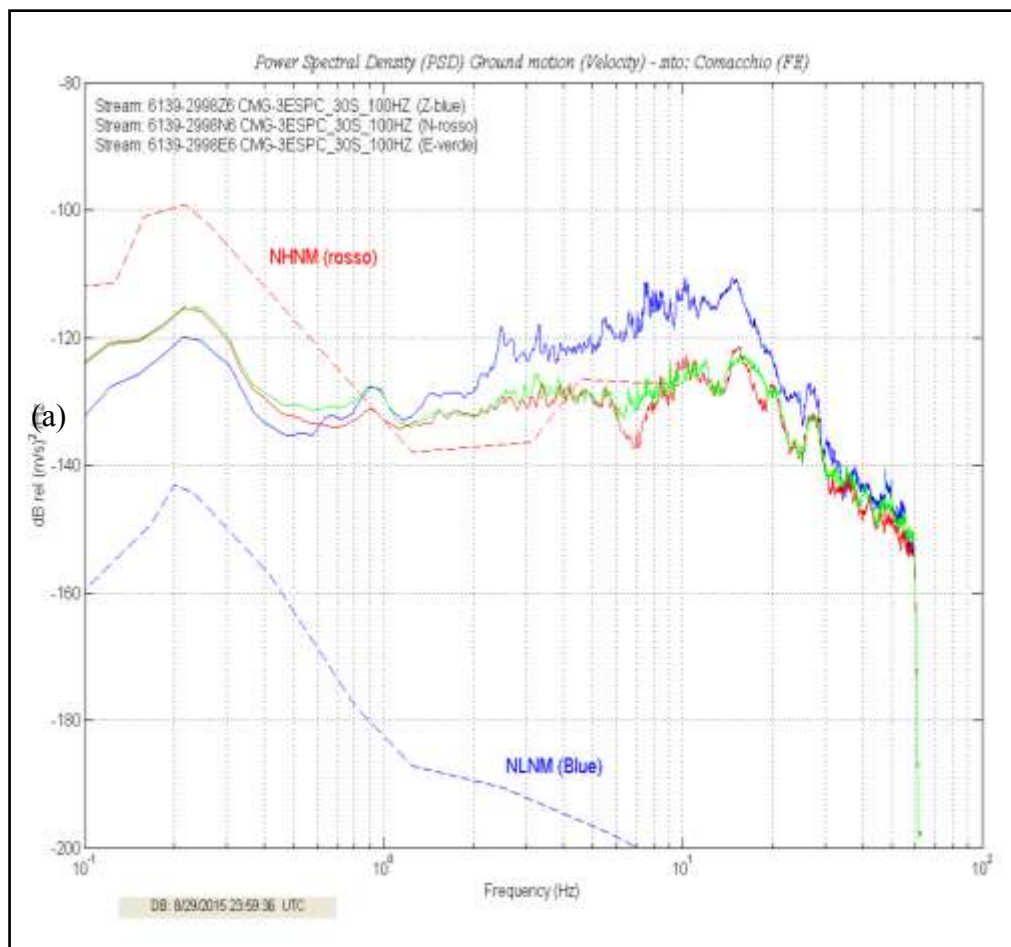



Figura 5. Esempi di curve di densità spettrale (PDS) di rumore sismico ambientale acquisito nel territorio comunale di Comacchio (FE) e messo a confronto con le curve di Peterson (1993). Essi rappresentano i modelli stabiliti del rumore sismico ambientale a livello globale. Le curve sperimentali mostrano un picco intorno a 02-0.3 Hz cioè simile al picco di risonanza riscontrato nelle prove H/V acquisite.

## 6. CONCLUSIONI

Le indagini sismiche effettuate con la tecnica dei rapporti spettrali (H/V) ha permesso di determinare la frequenza di risonanza fondamentale (**F<sub>0</sub>**) del terreno dei siti investigati che è risultata. Essa risultata essere pari ad un valore medio di **1,02 Hz±0,06 (T=0,98 sec)**.

Tecnico:

 Dr. Nasser ABU ZEID

## 7. BIBLIOGRAFIA

Matlab, 2010b: 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.

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

Peterson, J., 1993. Observations and modelling of seismic of the background seismic noise, U.S. Geol. Survey Open-file report 93–322, Albuquerque, New Mexico.

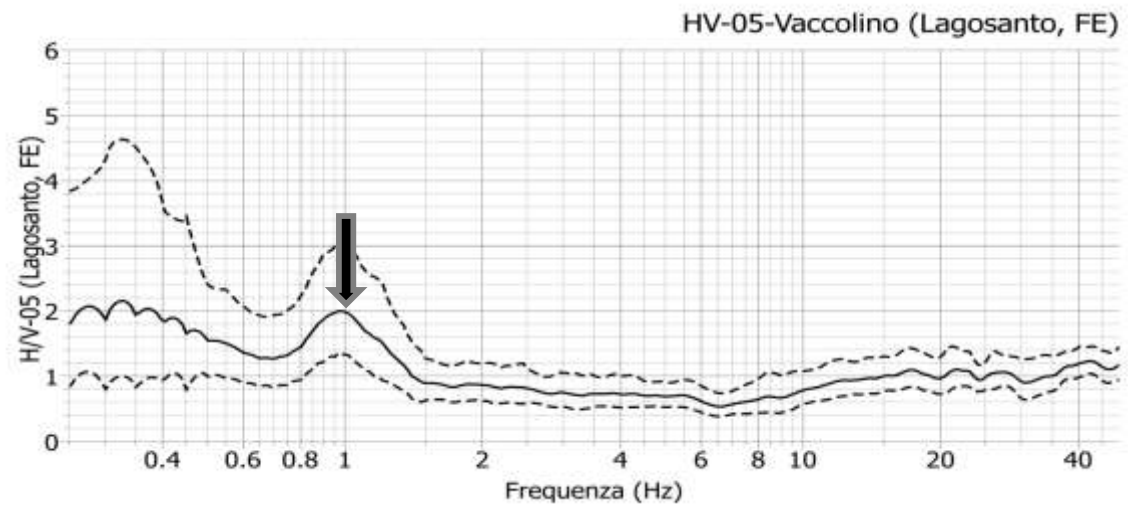
---



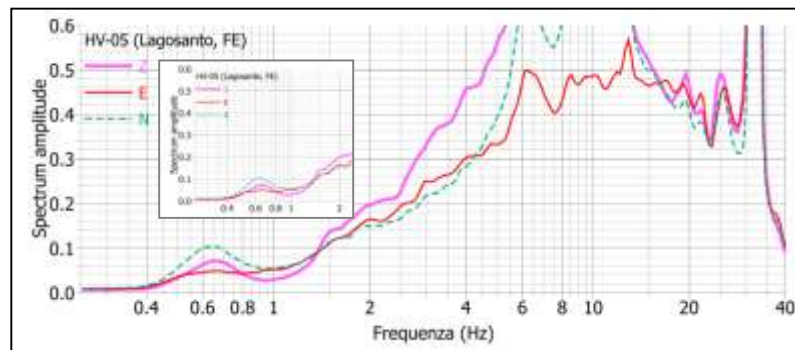
Risultati delle prove HVSR-05/06 effettuate nel territorio del Comune di Lagosanto (FE)



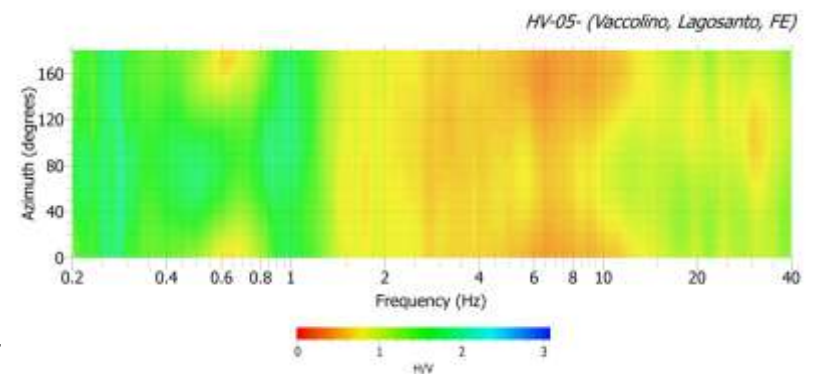
Coordinate geografiche  
 prova: HV05  
 44.787337°N  
 12.165335°E  
 n. finestre: 81  
 n. Finestre picco: 63  
 **$F_0: 1,02 \pm 0,06$  Hz**  
**Ampiezza: 2,05**



spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione



Coordinate geografiche

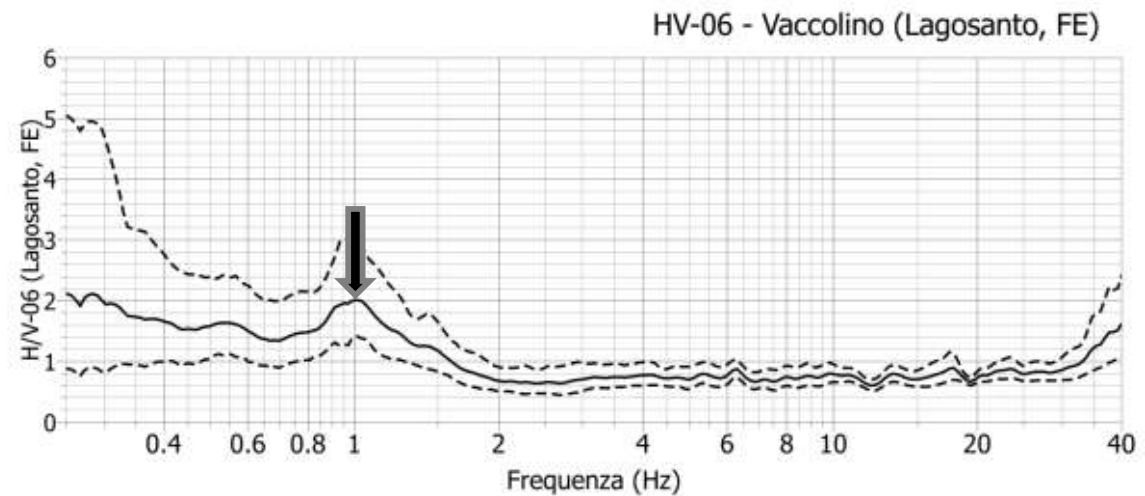
prova: **HV06**

44.80094°N

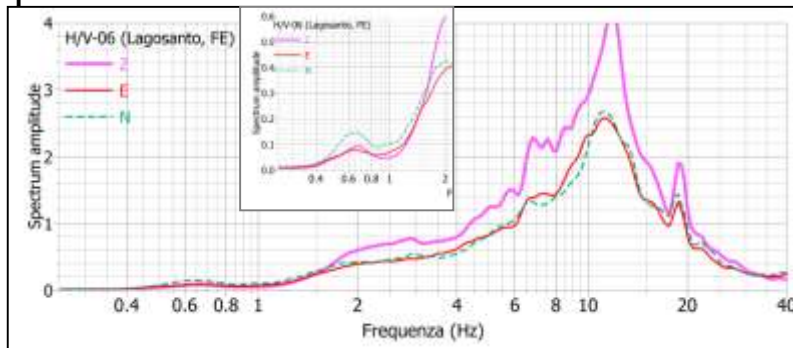
12.173958°E

**$F_0: 1,02 \pm 0,05$  Hz**

**Ampiezza: 2,00**



spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione

