



COMUNE DI FISCAGLIA  
PROVINCIA DI FERRARA

# PUG

Dott. Geol. Thomas Veronese

ELABORATO MZ – ALL 2  
SCALA

## RELAZIONE ILLUSTRATIVA FISCAGLIA – ALLEGATO 2 MICROZONAZIONE SISMICA DI II LIVELLO

DATA gennaio 2023

DATA DI APPROVAZIONE 2019

### Sindaco

Agr. Fabio Tosi

### Ufficio di Piano - Componenti interni

Geom. Ilaria Simoni - *Responsabile Settore Urbanistica ed Edilizia Privata*  
Geom. Giuliano Masina - *Funzionario del Settore Urbanistica ed Edilizia Privata*  
Arch. Antonio Molossi - *Responsabile Settore Ambiente e Protezione Civile*  
Geom. Enrico Menini - *Responsabile Settore LLPP e Patrimonio*  
Geom. Daniele Furini - *Funzionario Settore Urbanistica ed Edilizia Privata*  
Geom. Antonia Trevisani - *Funzionario Settore LLPP e Patrimonio*  
Geom. Alessandro Ferretti - *Funzionario Settore LLPP e Patrimonio*  
Geom. Simone Siviero - *Funzionario Settore Ambiente e Protezione Civile*  
Dott.ssa Rita Crivellari - *Segretario Generale*  
Dott.ssa Roberta Guietti - *Responsabile settore Finanza e Personale*

### Gruppo di lavoro

Arch. Sergio Fortini - *Coordinatore*

Urb. Raffaele Gerometta - *Direttore Tecnico*  
Urb. Lisa de Gasper - *Esperto in materia cartografica*  
Ing. Elettra Lowenthal - *ValSAT*  
Arch. Chiara Biagi  
Andrea Franceschini - *Cartografia e procedure informatiche*  
Ing. Chiara Cesarini



Arch. Francesco Vazzano  
Arch. Michele Avenali  
Arch. Anna Luciani

**Assunto**  
Del. C.C. n. del

**Adottato**  
Del. C.C. n. del

**Approvato**  
Del. C.C. n. del



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



**CONFERENZA DELLE REGIONI E  
DELLE PROVINCE AUTONOME**

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

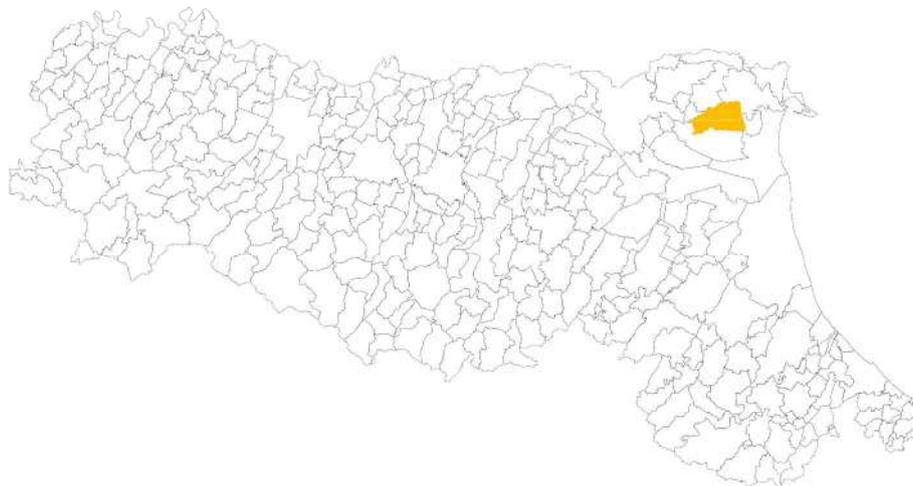
# MICROZONAZIONE SISMICA

## LIVELLO 2

### RELAZIONE ILLUSTRATIVA – ALLEGATO 2

#### Rapporti di prova

**Regione Emilia–Romagna**  
**Comune di Fiscaglia**



<p>Regione:</p> <p><b>Emilia Romagna</b></p>	<p>Soggetto realizzatore: <b>Dott. Geol. Thomas Veronese</b></p> <p>Collaboratori: Dott. Geol. Lunghi Luca Dott.ssa Geol. Franciosi Sara</p> <p>Indagini Geofisiche: Prof. Nasser Abu Zeid</p> <p>Cartografia GIS: Geotema s.r.l.</p> <p>CLE: Dott. Ing. Colombi Alessio</p>	<p>Data:</p> <p><b>16 Aprile 2018</b></p>
--	--	---

**PROVE PENETROMETRICHE  
STATICHE**

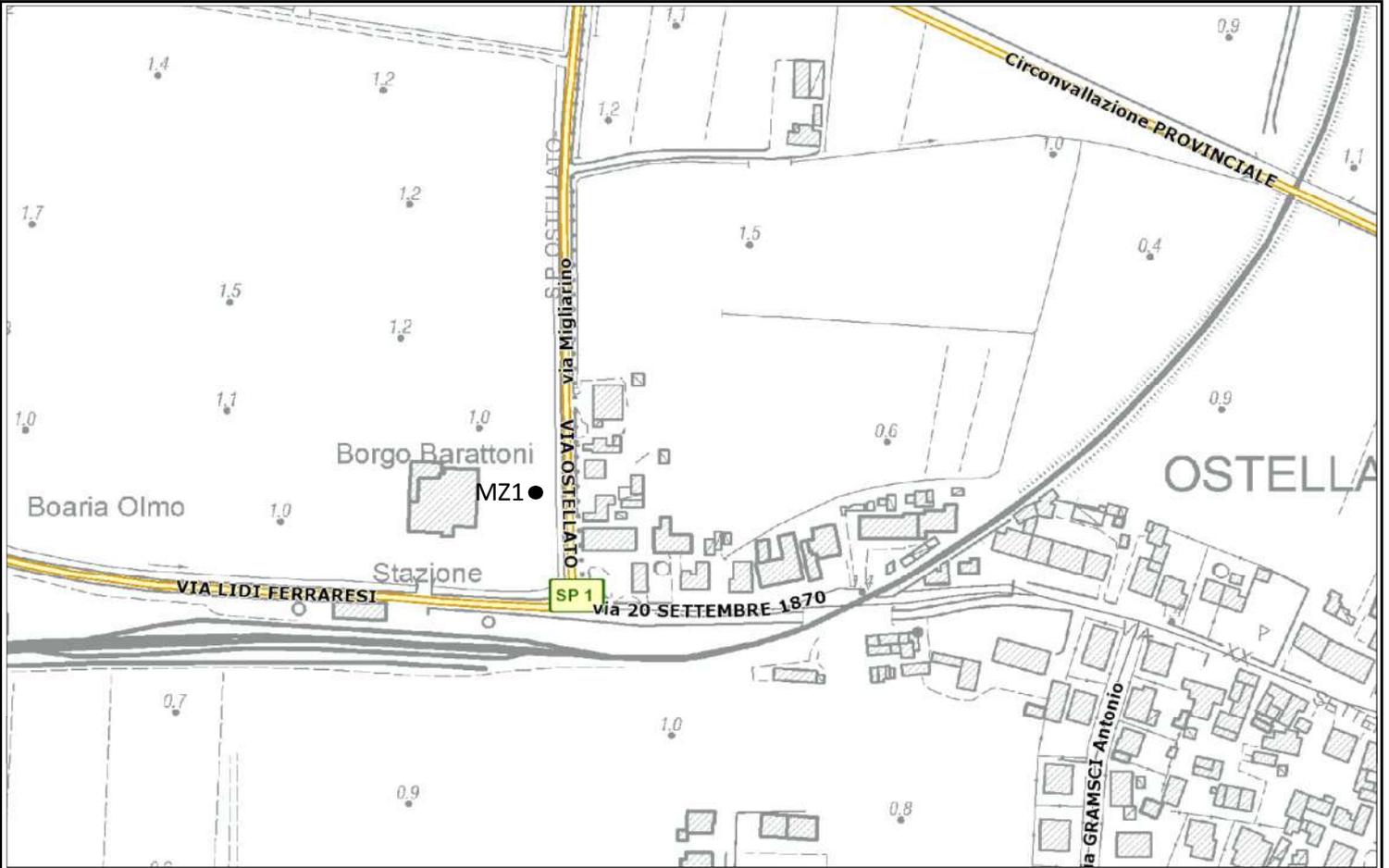
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ1

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: Asilo 06, via Lidi Ferraresi, Fiscaglia (Fe)

DATA: 03/07/2017



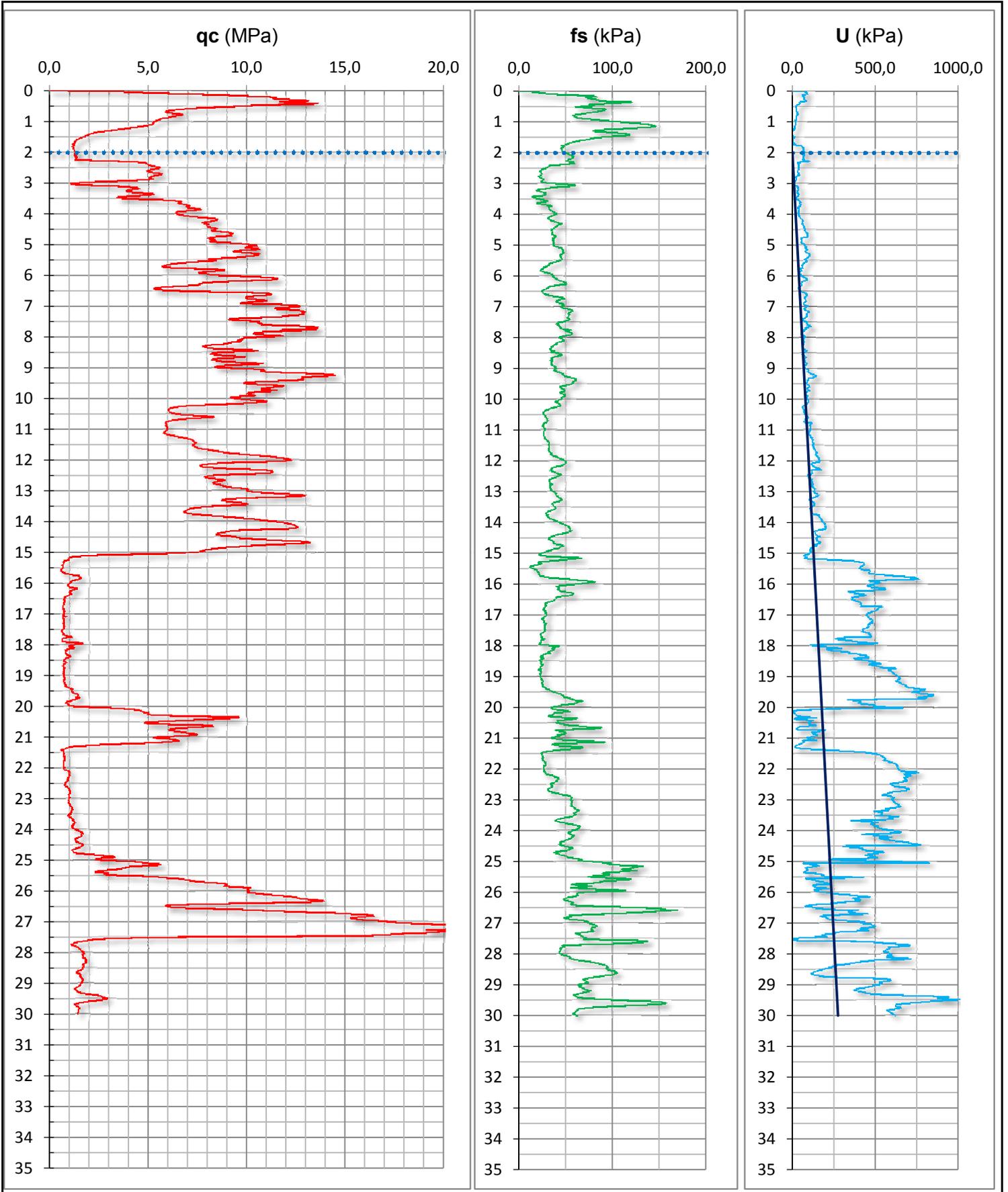
MZ1

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ1

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: Asilo 06, via Lidi Ferraresi, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 03/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,00  
 PREFORO (m da p.c.): 0,00



<b>PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA</b> <b>PROVA DOWN HOLE SCPTU</b>	RIF. PROVA:	CPTU n°:
	SCPTU U53-17	MZ1

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00

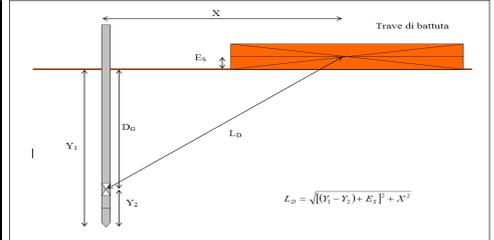
CANTIERE: Asilo 06, via Lidi Ferraresi, Fiscaglia (Fe)

PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,00

DATA: 03/07/2017

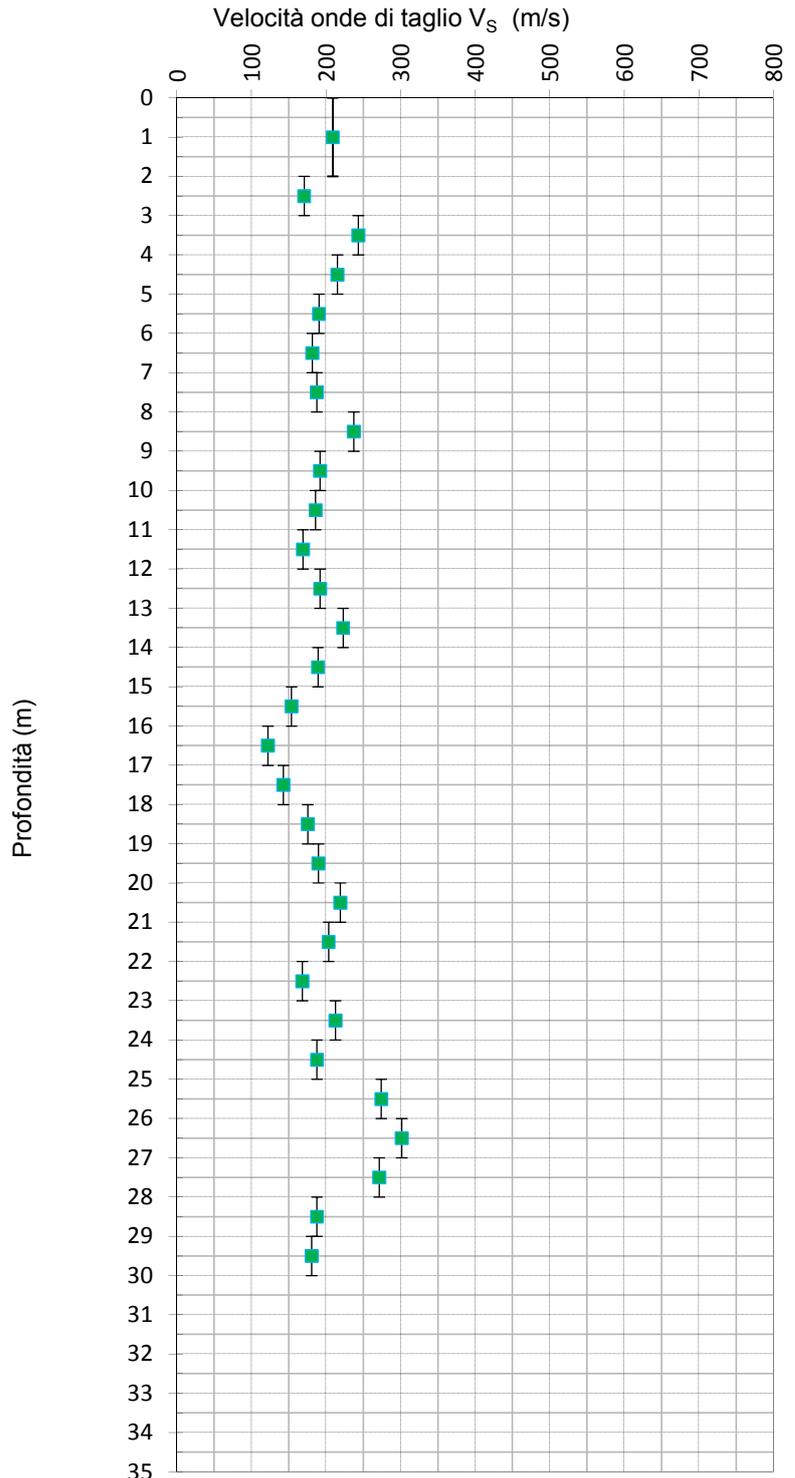
PREFORO (m da p.c.): 0,00

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> = 194 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		
0,838		209
1,817	8,697	171
2,811	14,525	243
3,808	18,623	215
4,807	23,261	190
5,805	28,508	181
6,805	34,016	188
7,804	39,344	237
8,804	43,557	192
9,803	48,770	186
10,803	54,147	169
11,803	60,066	192
12,802	65,274	223
13,802	69,762	189
14,802	75,049	154
15,802	81,557	122
16,802	89,754	143
17,802	96,761	175
18,802	102,459	190
19,802	107,728	219
20,802	112,295	203
21,801	117,213	168
22,801	123,163	212
23,801	127,869	188
24,801	133,197	274
25,801	136,846	301
26,801	140,164	271
27,801	143,852	188
28,801	149,180	181
29,801	154,718	



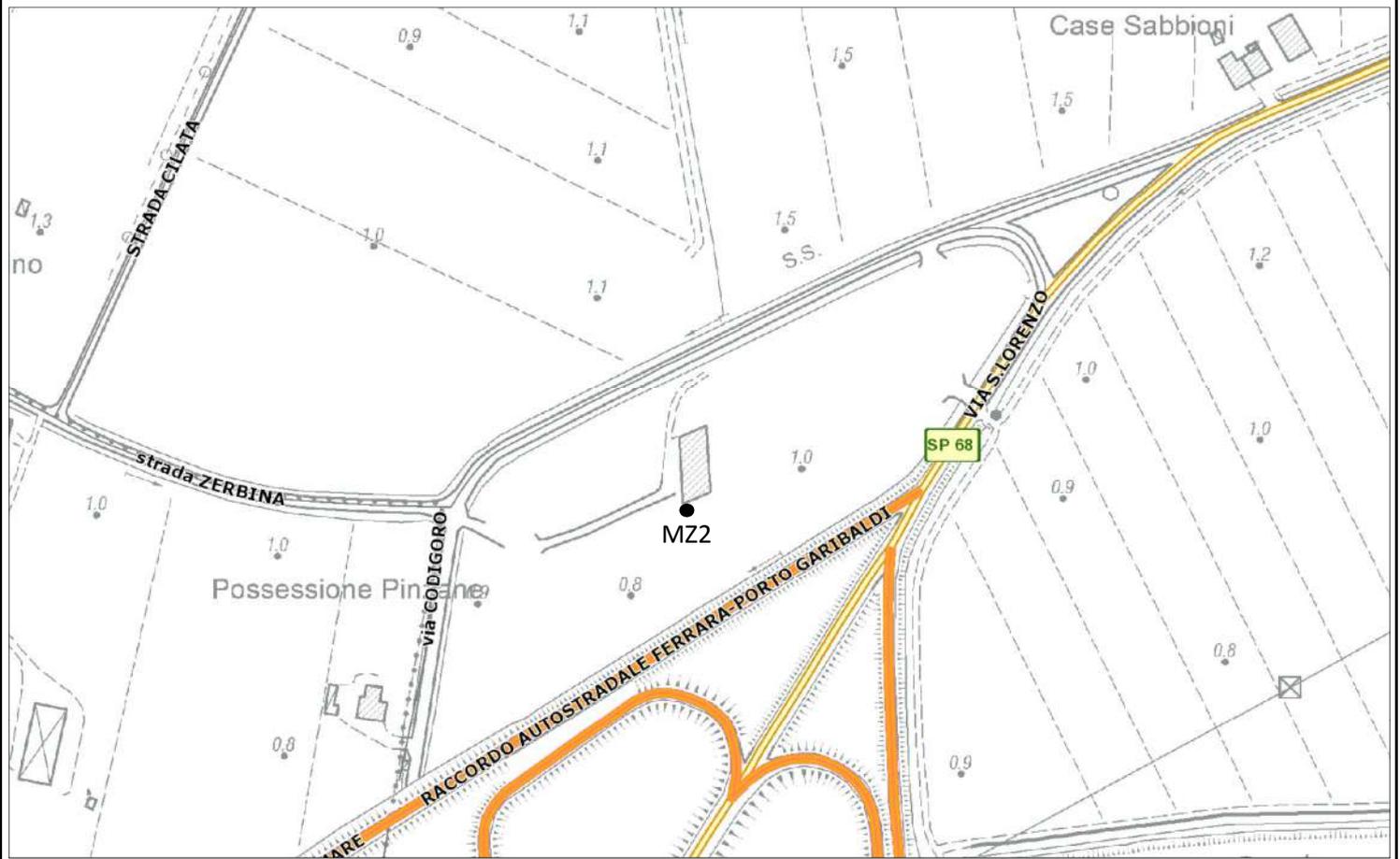
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ2

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: zona produttiva via S. Lorenzo, Fiscaglia (Fe)

DATA: 05/07/2017



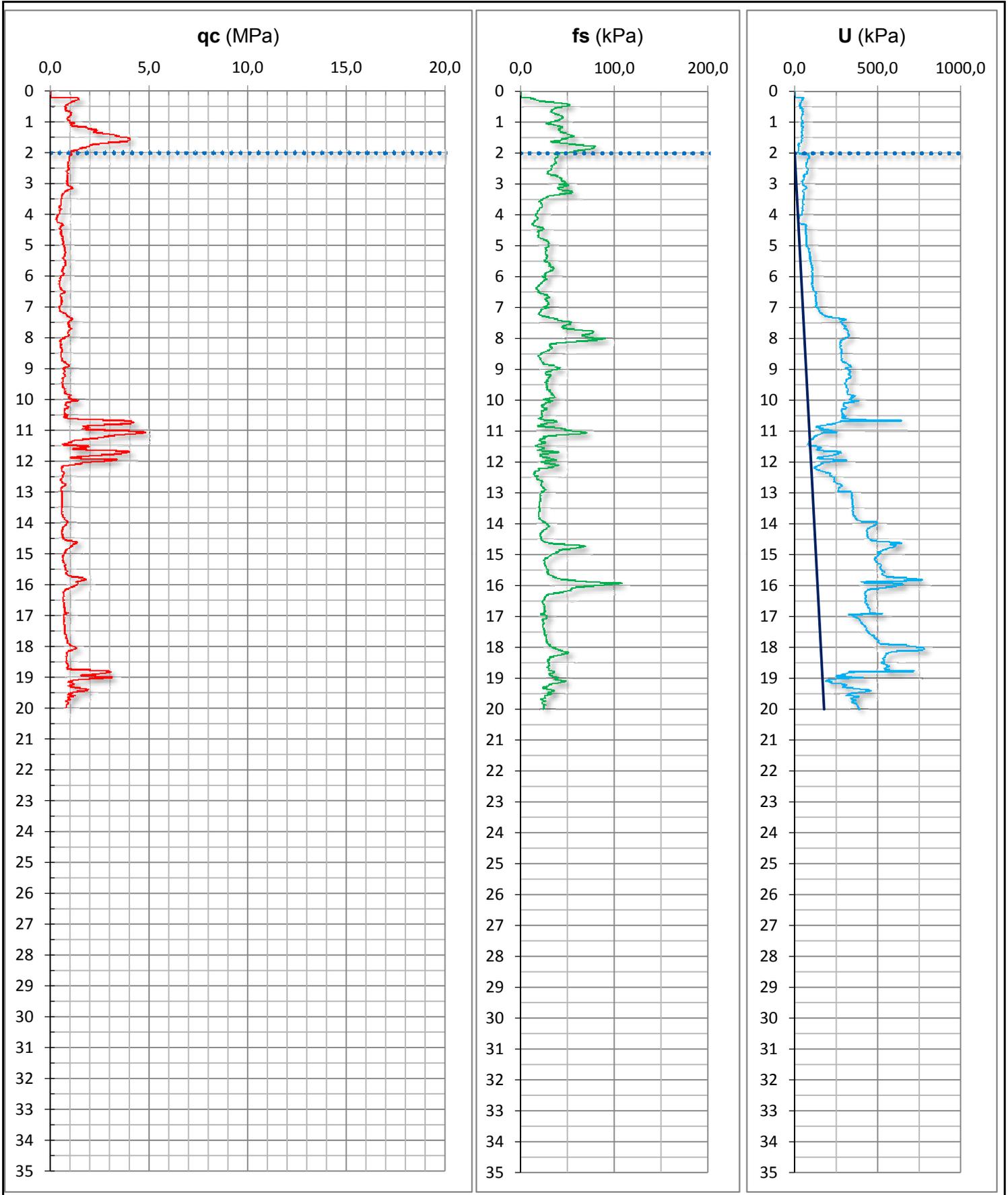
MZ2

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ2

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: zona produttiva via S. Lorenzo, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 05/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 20,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,00  
 PREFORO (m da p.c.): 0,20



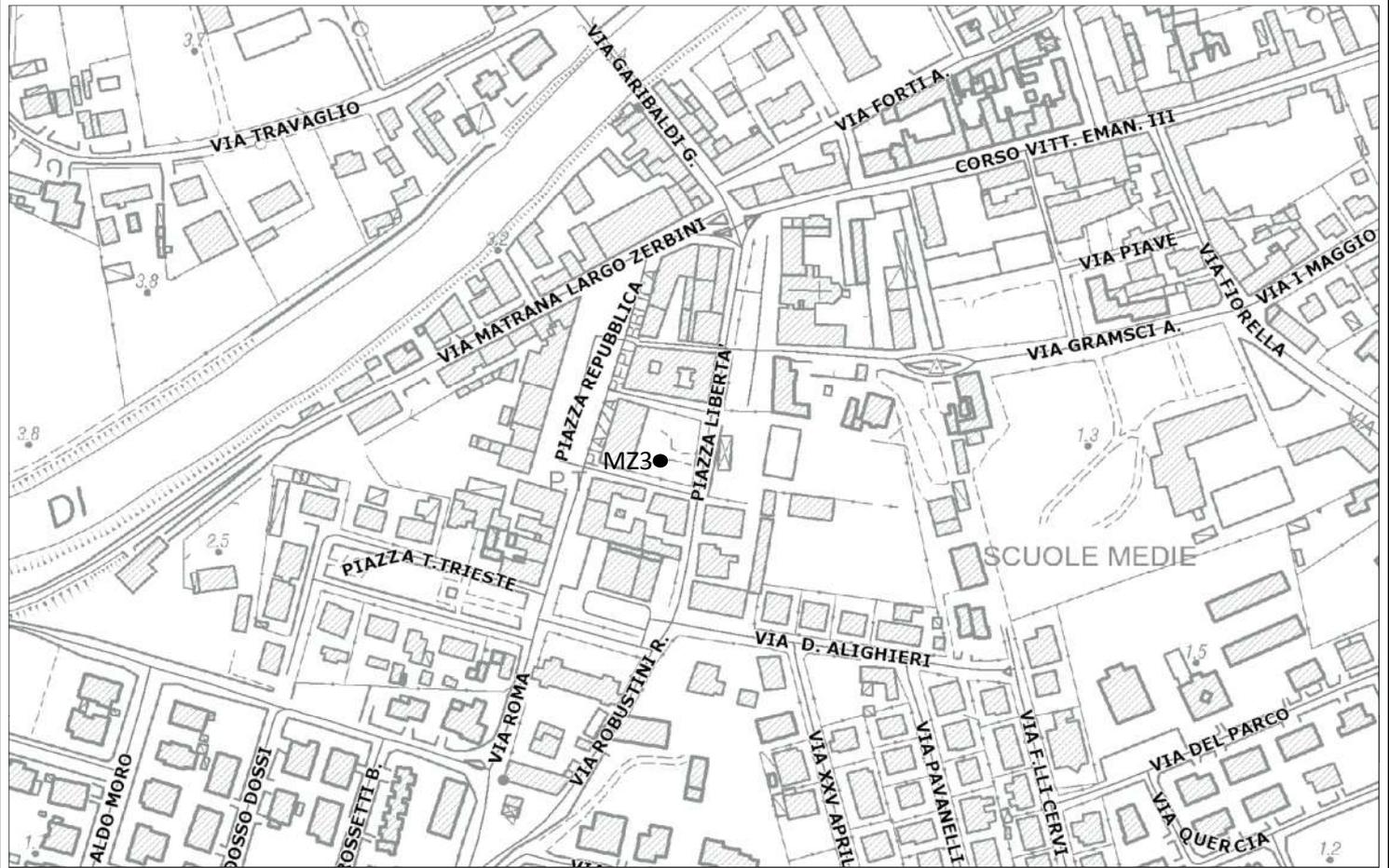
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ3

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: Municipio Migliarino, Fiscaglia (Fe)

DATA: 05/07/2017



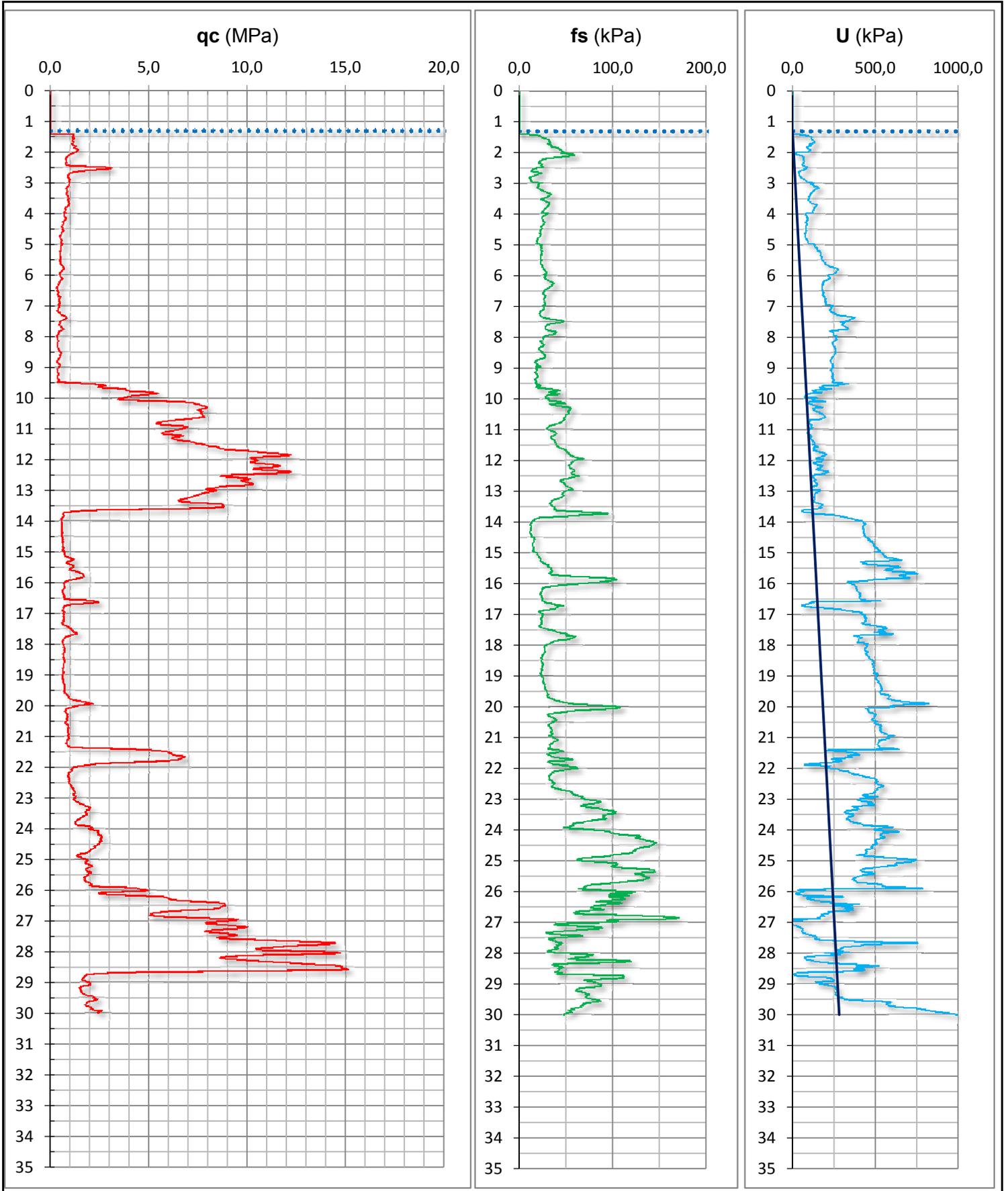
MZ3

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ3

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: Municipio Migliarino, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 05/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,30  
 PREFORO (m da p.c.): 1,40



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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ3

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00

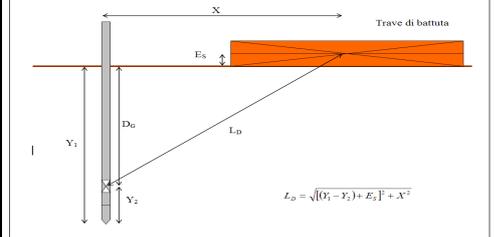
CANTIERE: Municipio Migliarino, Fiscaglia (Fe)

PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,30

DATA: 05/07/2017

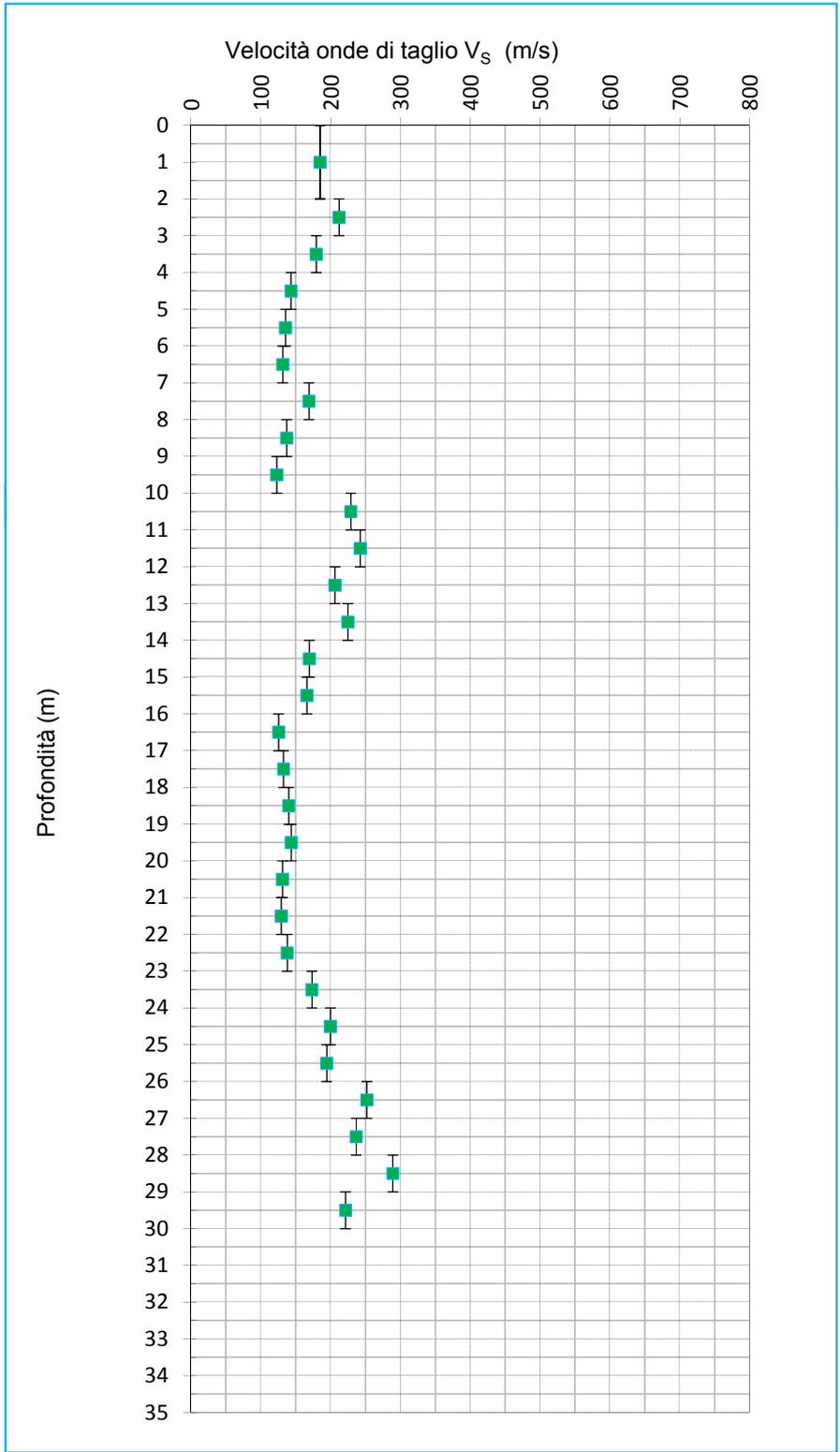
PREFORO (m da p.c.): 1,40

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> = 169 m/sec Categoria suolo di fondazione = D**

Distanza corretta L <sub>D</sub> punta elettrica	Tempo di arrivo onda S (millisecondi)	Velocità onde S dello strato (m/sec)
0,000		
0,838		185
1,817	9,836	212
2,811	14,525	179
3,808	20,082	143
4,807	27,049	135
5,805	34,426	131
6,805	42,032	169
7,804	47,951	137
8,804	55,247	123
9,803	63,385	229
10,803	67,754	242
11,803	71,879	206
12,802	76,728	225
13,802	81,180	169
14,802	87,082	166
15,802	93,109	126
16,802	101,074	132
17,802	108,623	140
18,802	115,770	144
19,802	122,738	131
20,802	130,368	129
21,801	138,103	138
22,801	145,361	173
23,801	151,136	200
24,801	156,147	194
25,801	161,295	252
26,801	165,264	237
27,801	169,492	289
28,801	172,951	221
29,801	177,469	



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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ4

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: stadio via Bassani, Migliarino, Fiscaglia (Fe)

DATA: 05/07/2017



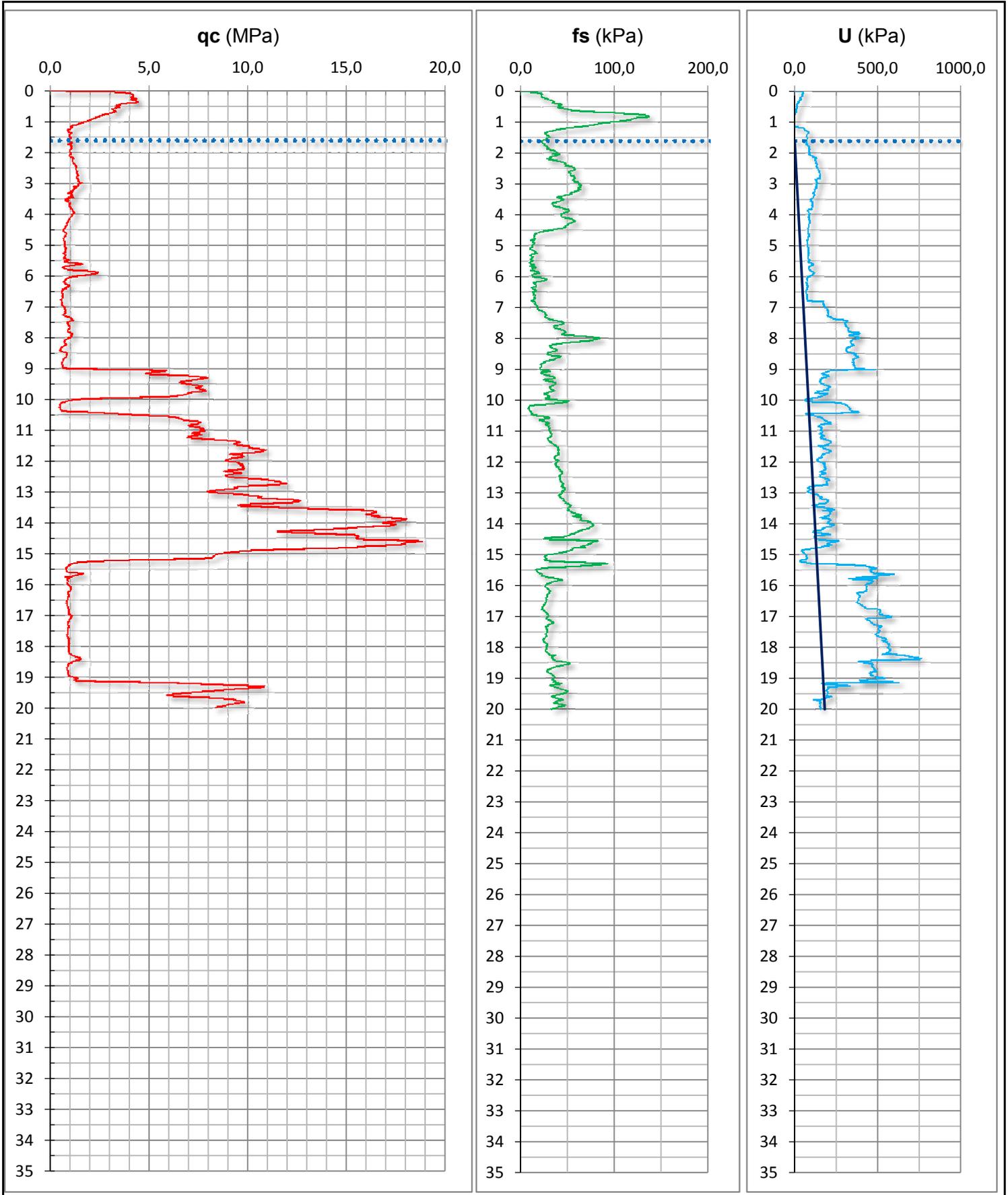
MZ4

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ4

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: stadio via Bassani, Migliarino, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 05/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 20,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,60  
 PREFORO (m da p.c.): 0,00



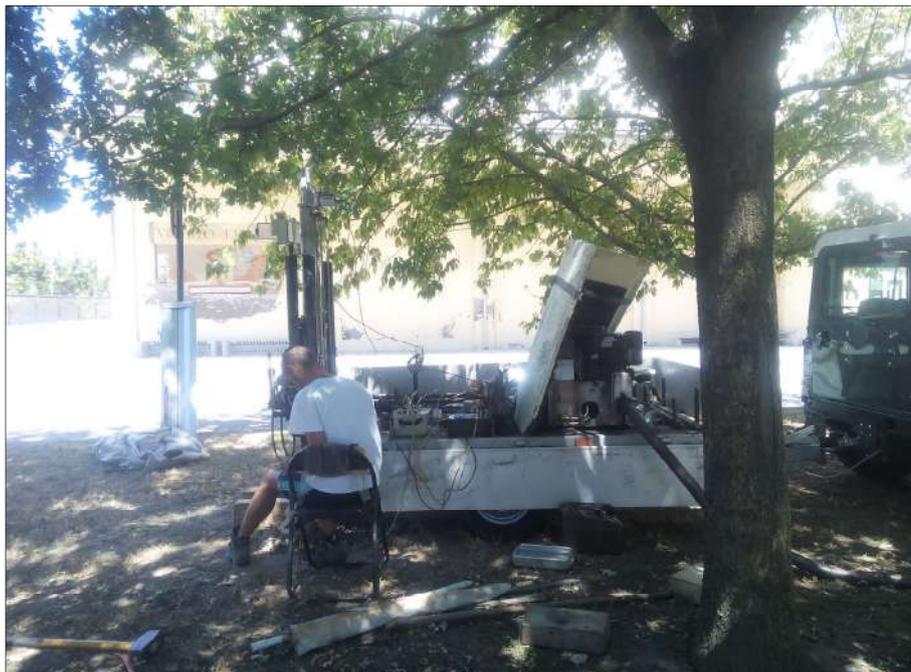
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ5

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: Centro Polifunzionale Migliarino, Fiscaglia (Fe)

DATA: 18/07/2017



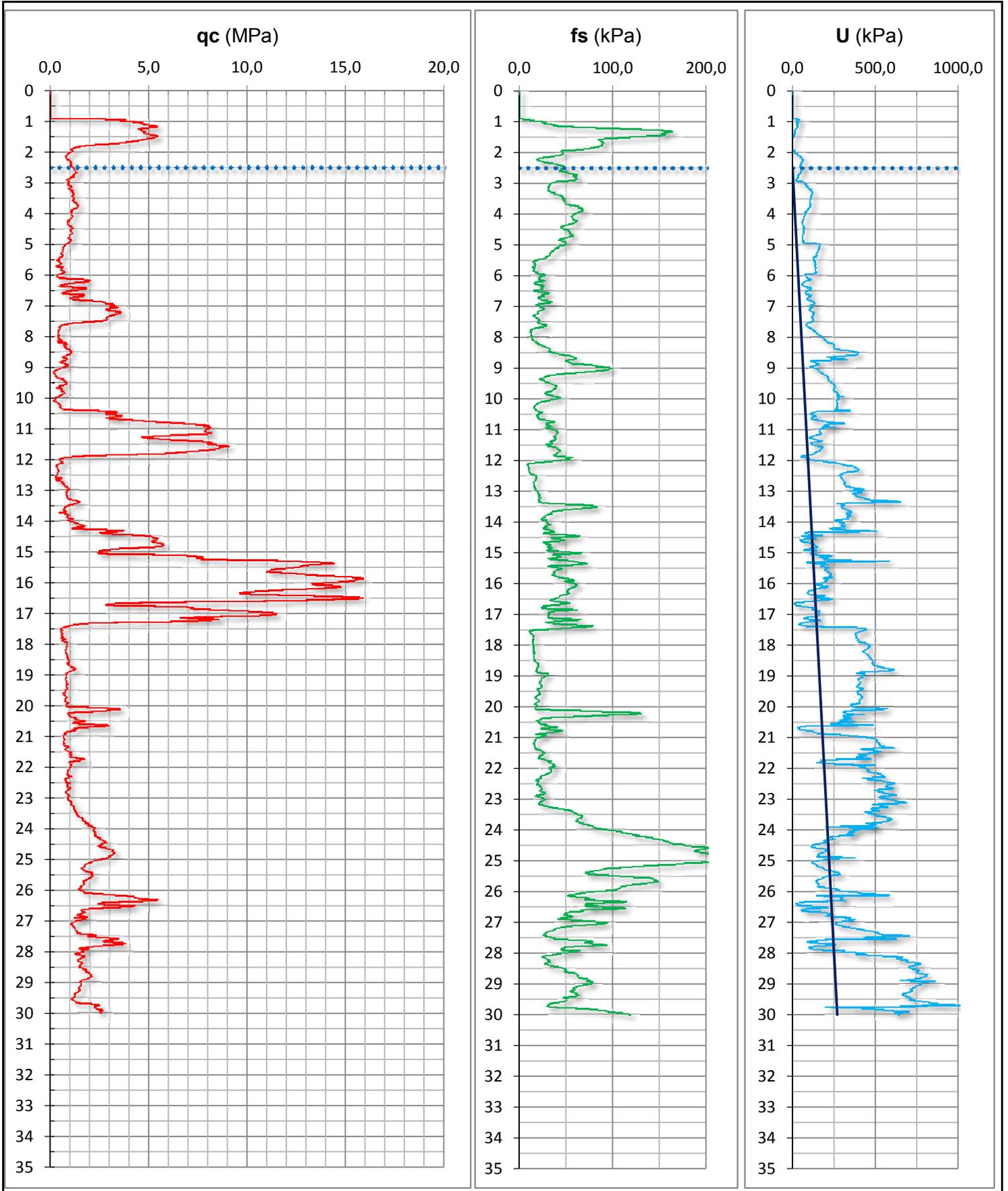
MZ5

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ5

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: Centro Polifunzionale Migliarino, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 18/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,50  
 PREFORO (m da p.c.): 0,90



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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ5

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00

CANTIERE: Centro Polifunzionale Migliarino, Fiscaglia (Fe)

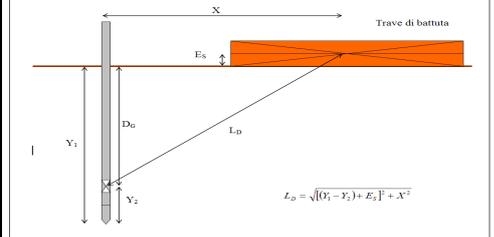
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,50

DATA: 18/07/2017

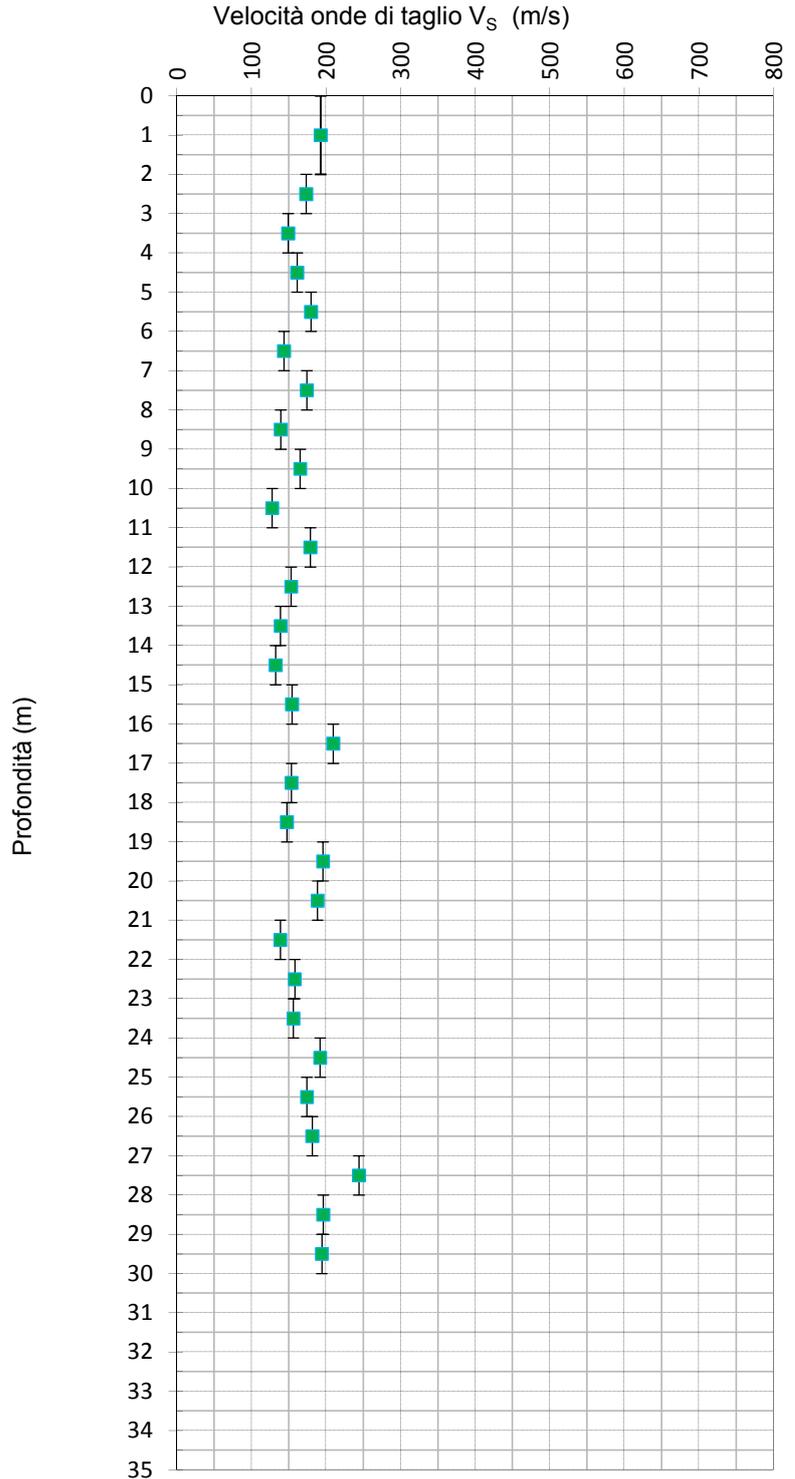
PREFORO (m da p.c.): 0,90

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> = 167 m/sec Categoria suolo di fondazione = D**



Distanza corretta L <sub>D</sub> punta elettrica	Tempo di arrivo onda S (millisecondi)	Velocità onde S dello strato (m/sec)
0,000		
0,838		193
1,817	9,426	173
2,811	15,164	149
3,808	21,852	161
4,807	28,049	180
5,805	33,607	143
6,805	40,574	174
7,804	46,311	139
8,804	53,488	165
9,803	59,536	128
10,803	67,361	179
11,803	72,947	153
12,802	79,475	139
13,802	86,672	132
14,802	94,229	154
15,802	100,705	210
16,802	105,475	154
17,802	111,984	147
18,802	118,770	196
19,802	123,875	189
20,802	129,178	139
21,801	136,393	158
22,801	142,721	156
23,801	149,121	192
24,801	154,328	174
25,801	160,065	182
26,801	165,574	244
27,801	169,672	196
28,801	174,770	194
29,801	179,918	



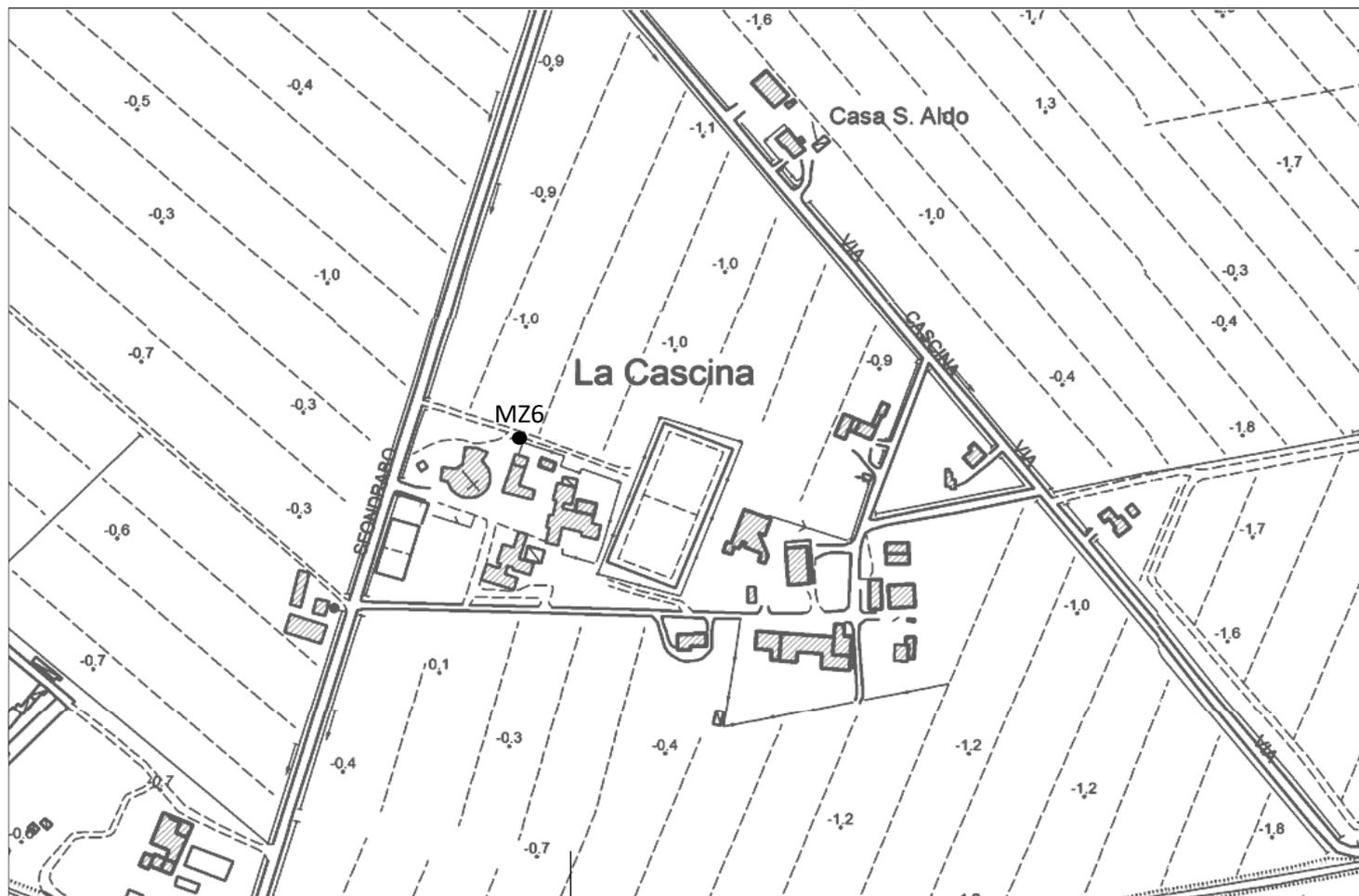
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ6

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: scuola materna, Borgo Cascina, Fiscaglia (Fe)

DATA: 18/07/2017



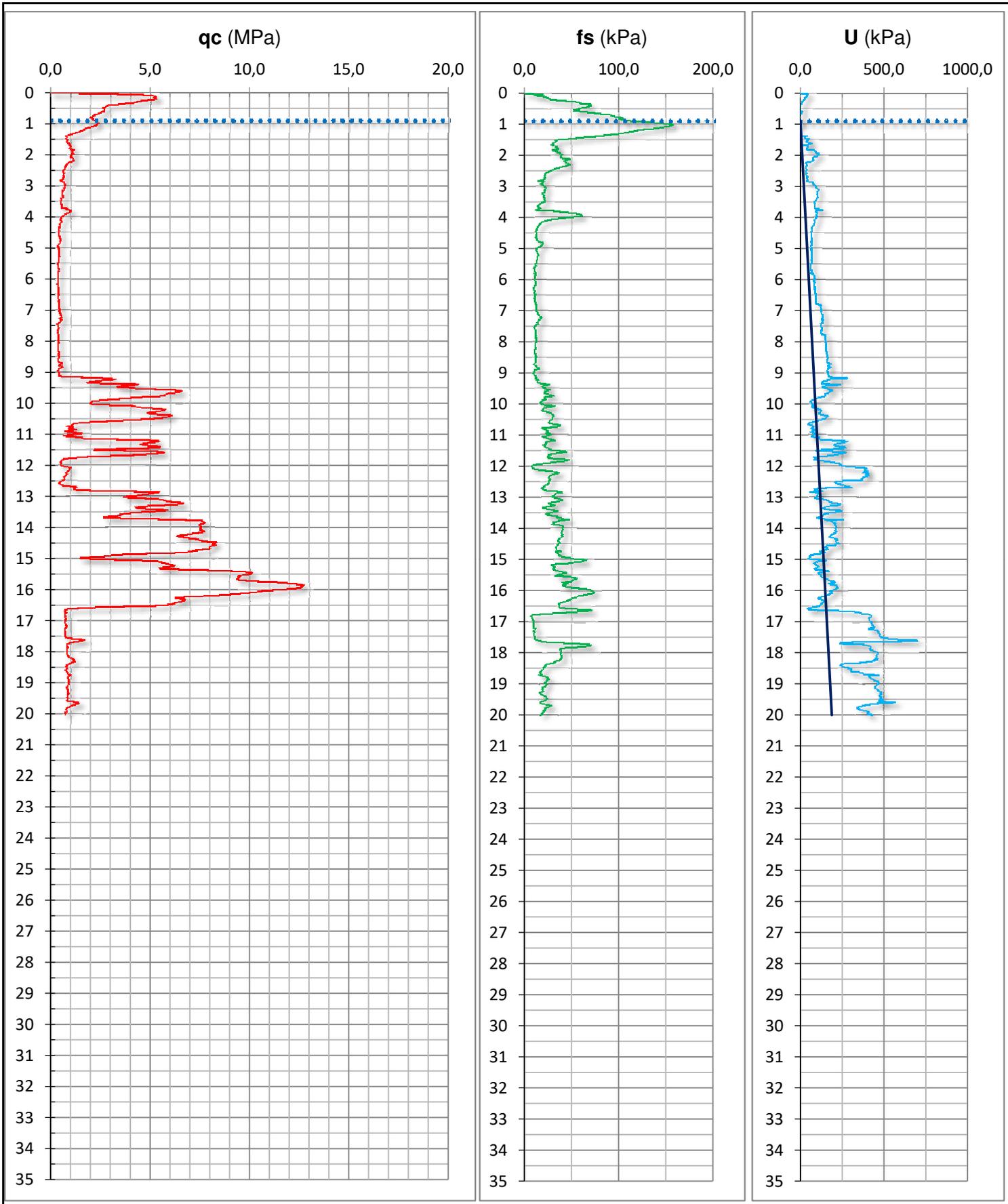
MZ6

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ6

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: scuola materna, Borgo Cascina, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 18/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 20,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 0,90  
 PREFORO (m da p.c.): 0,00



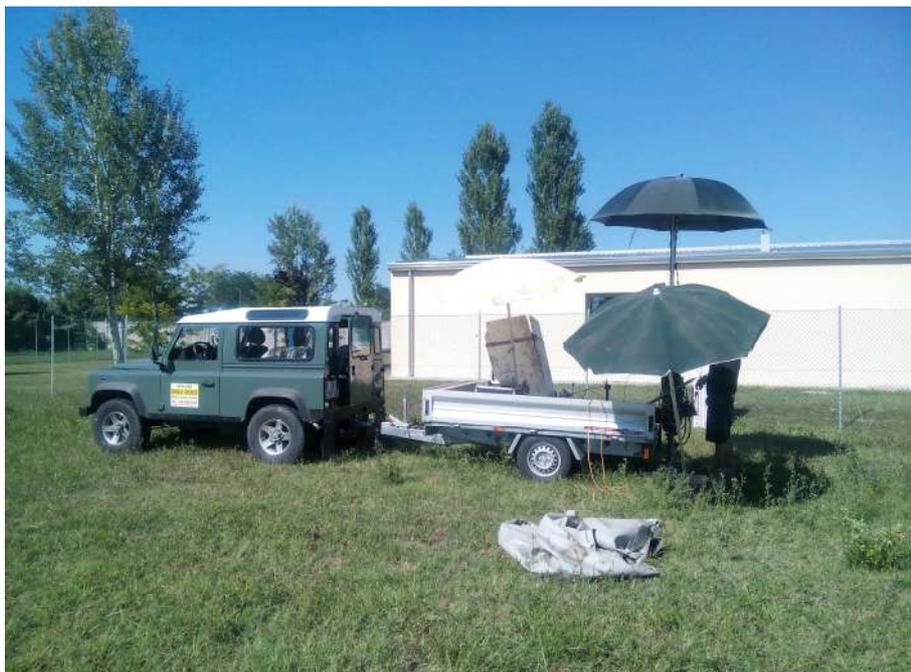
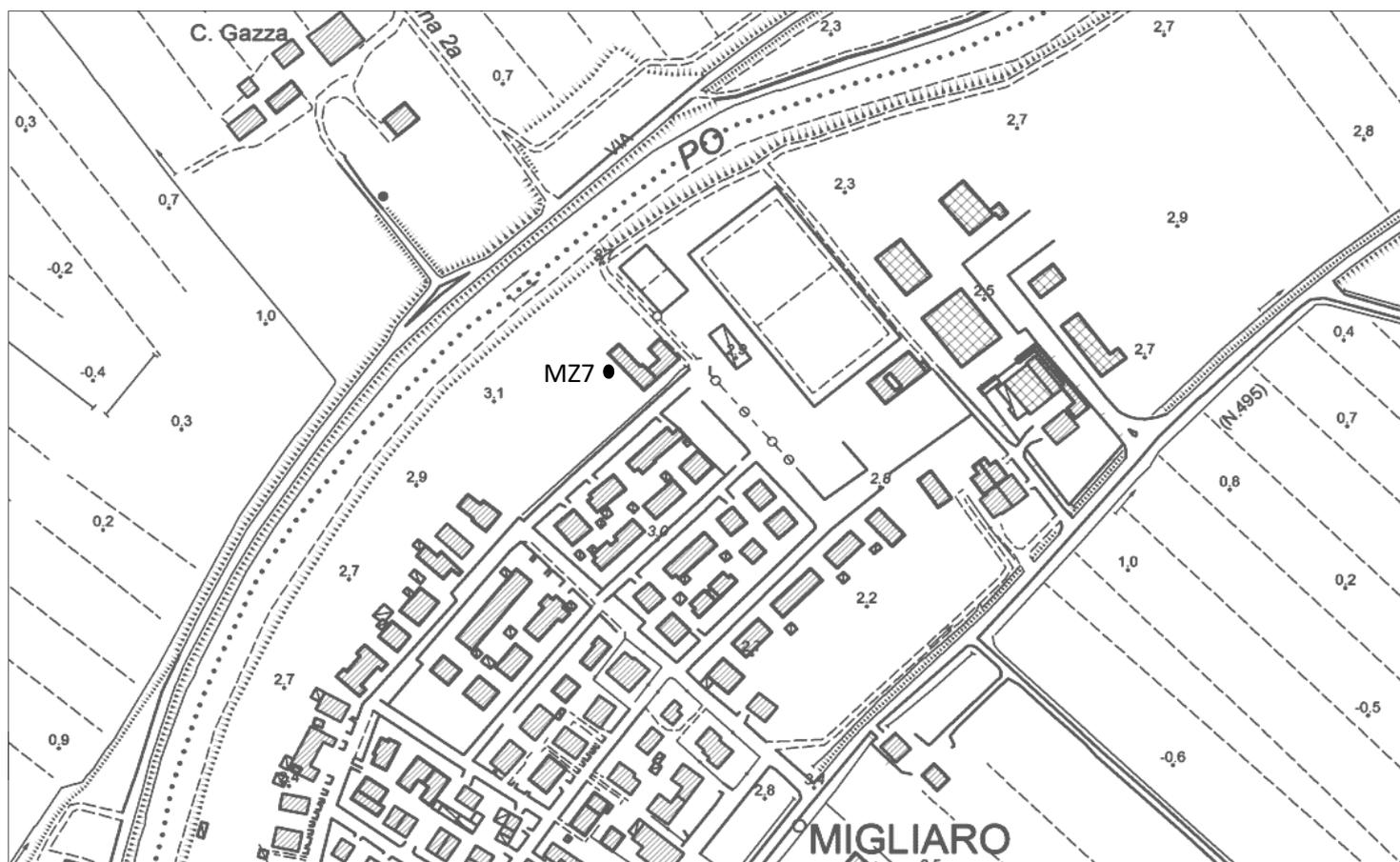
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ7

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: asilo nido, Migliaro, Fiscaglia (Fe)

DATA: 18/07/2017



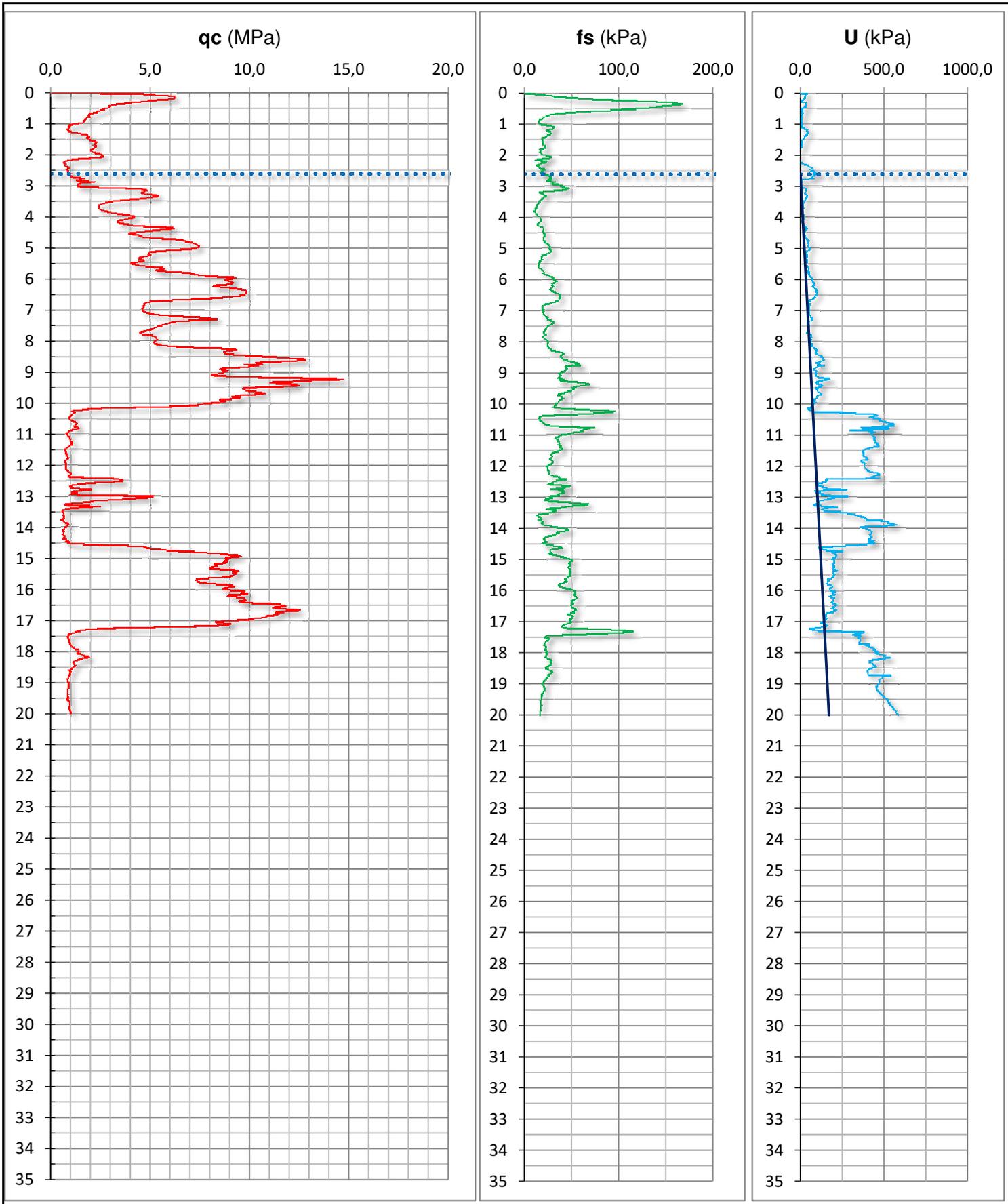
MZ7

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ7

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: asilo nido, Migliaro, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 18/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 20,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,60  
 PREFORO (m da p.c.): 0,00



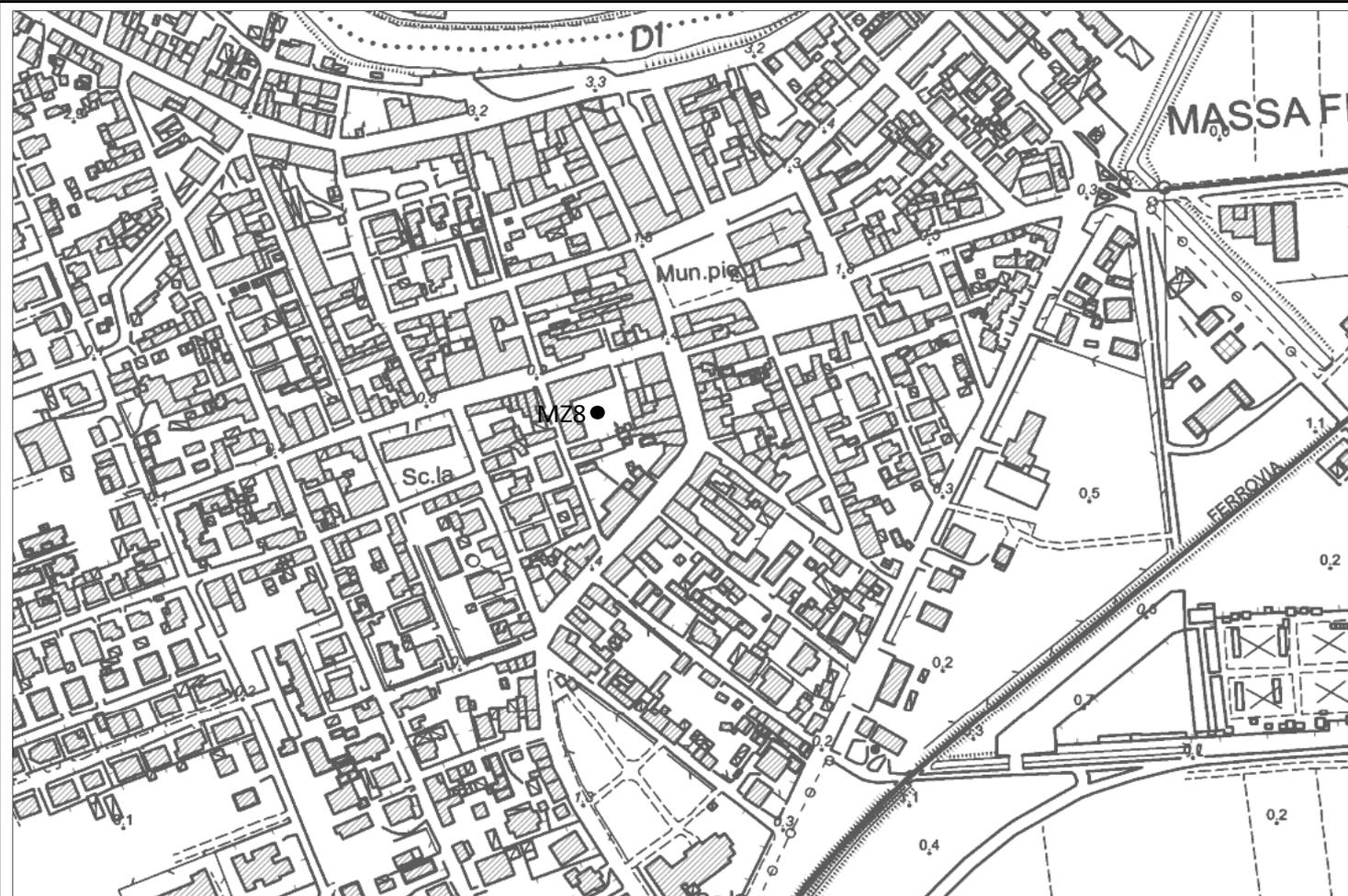
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ8

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: scuola elementare, Massa Fiscaglia, Fiscaglia (Fe)

DATA: 20/07/2017



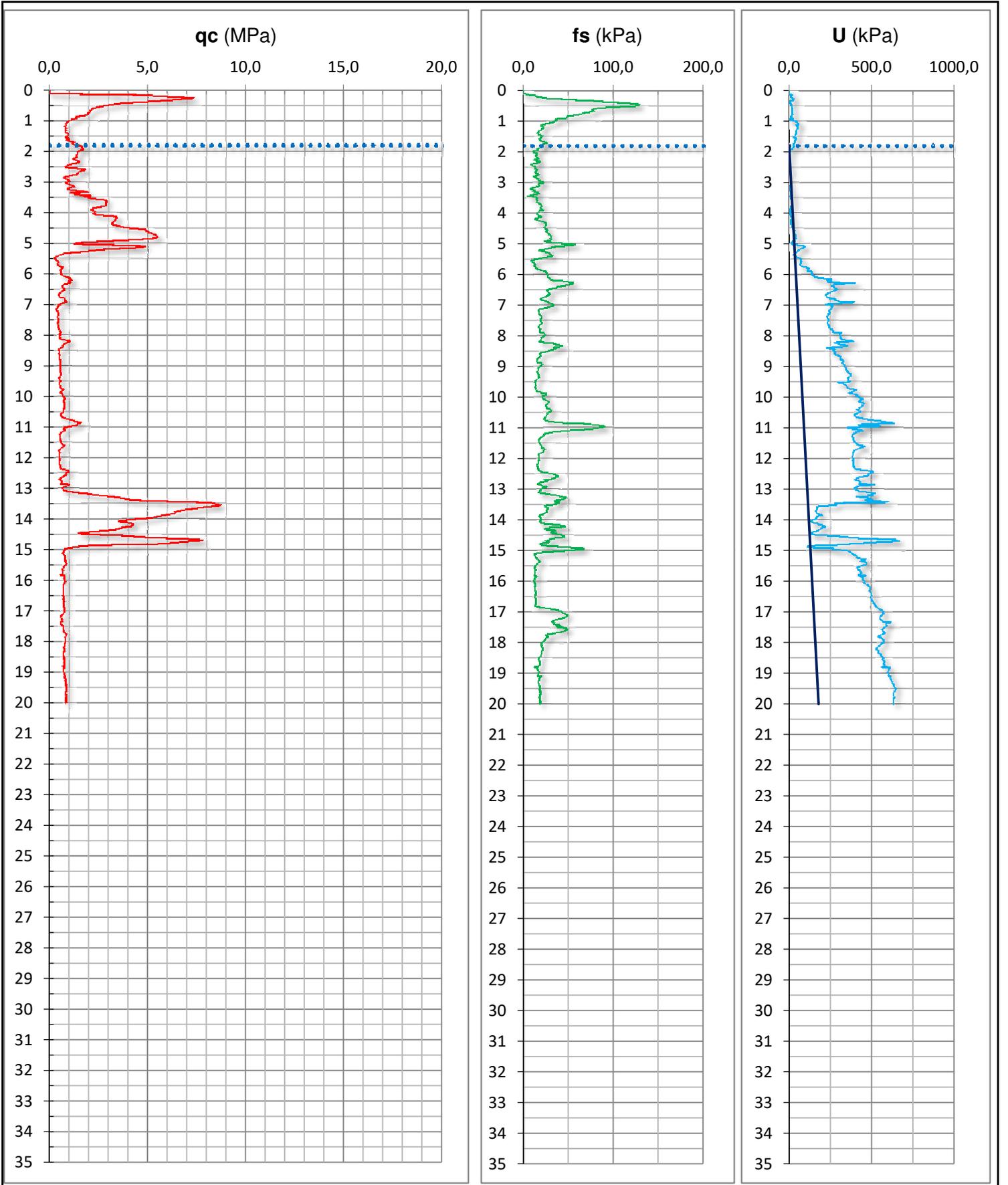
MZ8

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ8

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: scuola elementare, Massa Fiscaglia, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 20/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 20,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,80  
 PREFORO (m da p.c.): 0,10



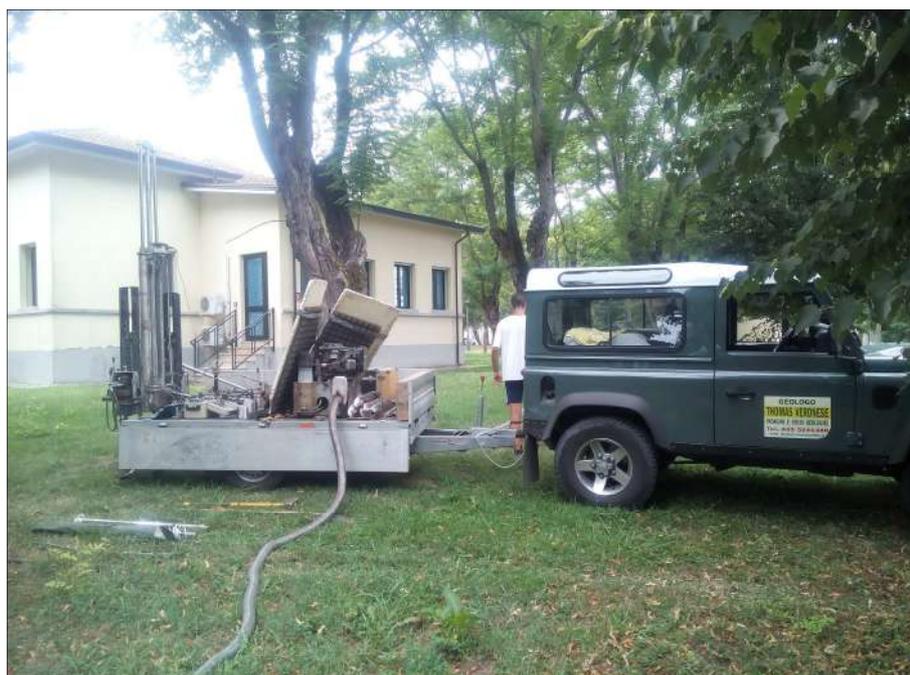
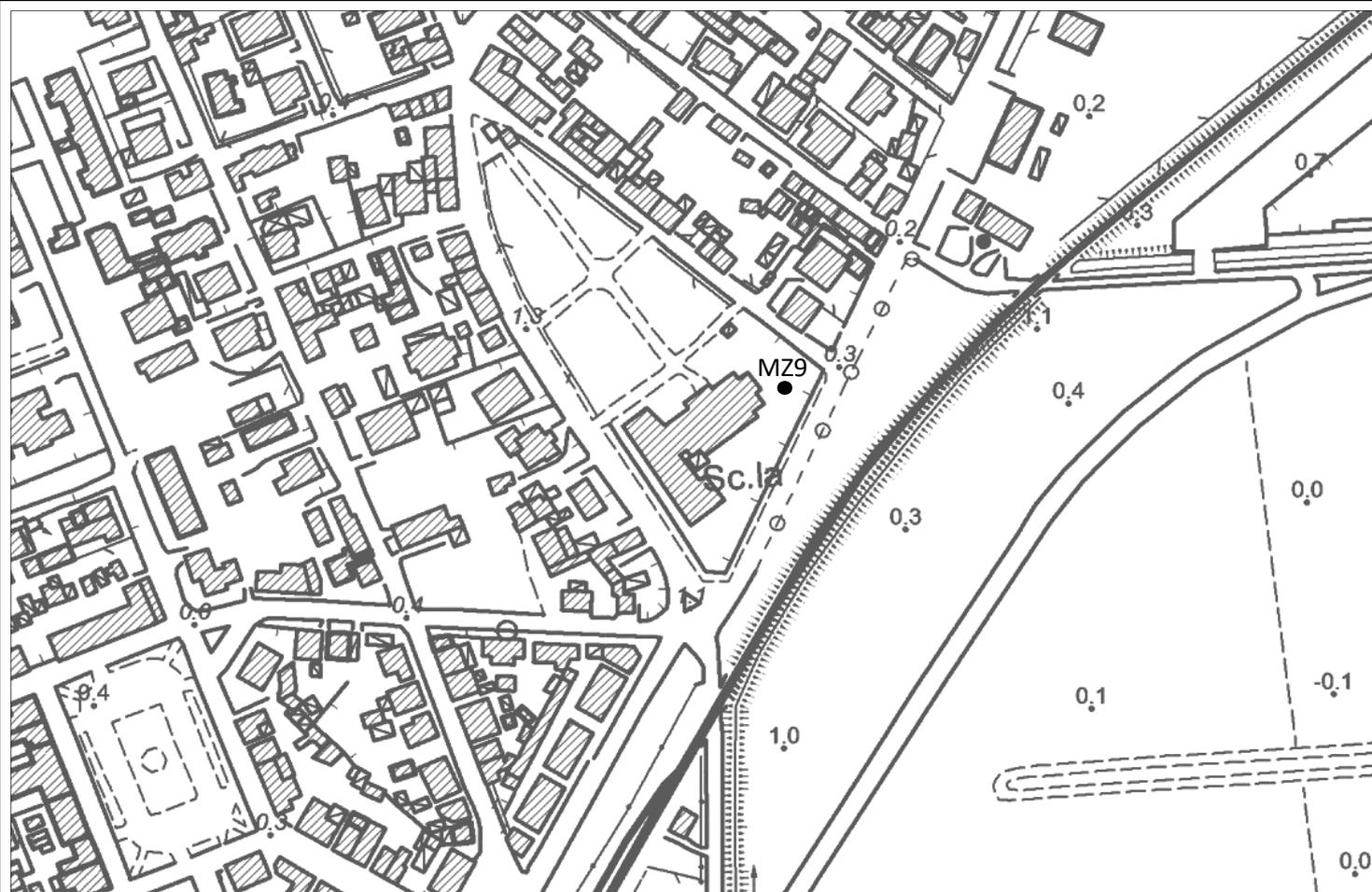
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ9

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: centro diurno, Massa Fiscaglia, Fiscaglia (Fe)

DATA: 20/07/2017



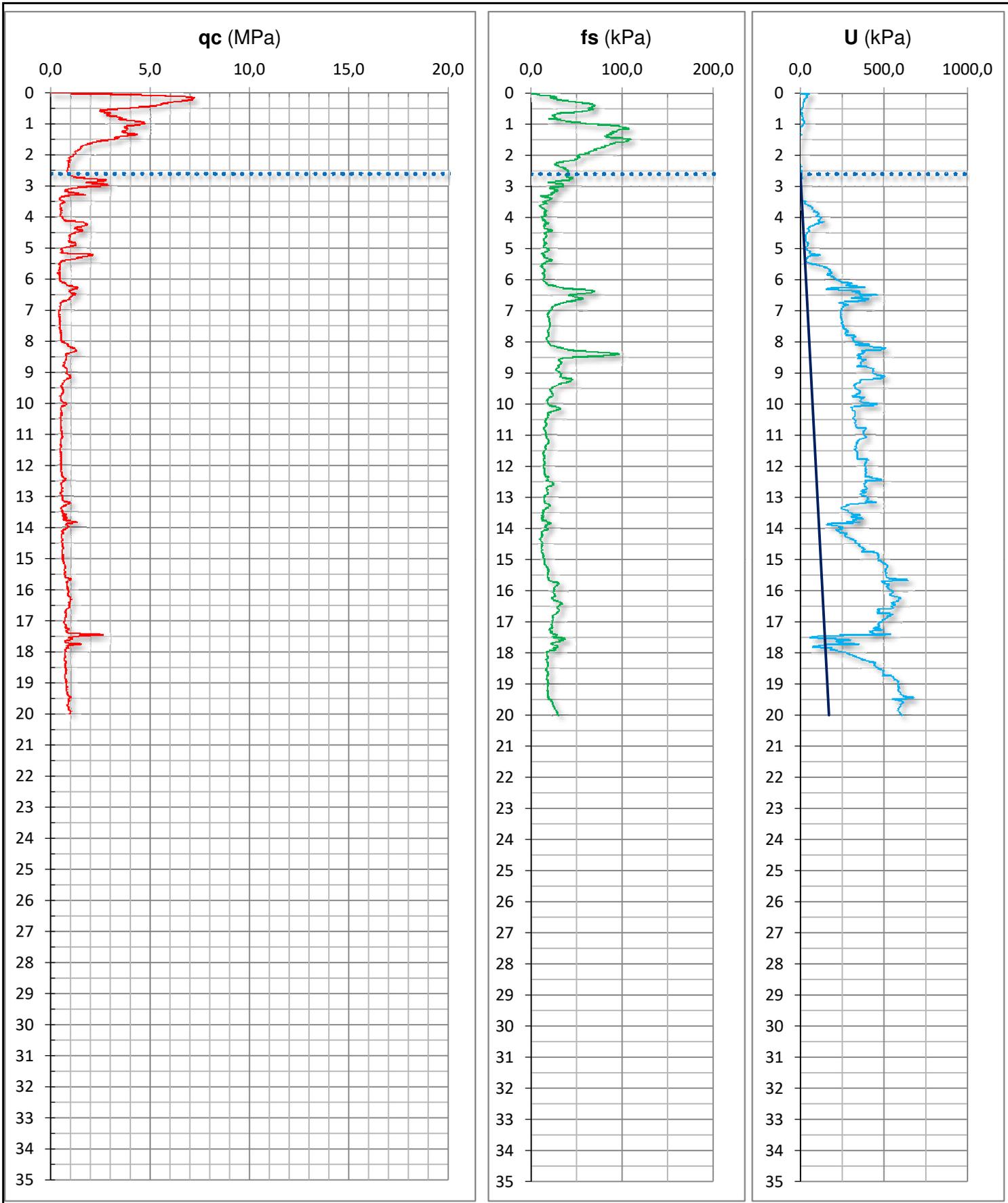
MZ9

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ9

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: centro diurno, Massa Fiscaglia, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 20/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 20,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,60  
 PREFORO (m da p.c.): 0,00



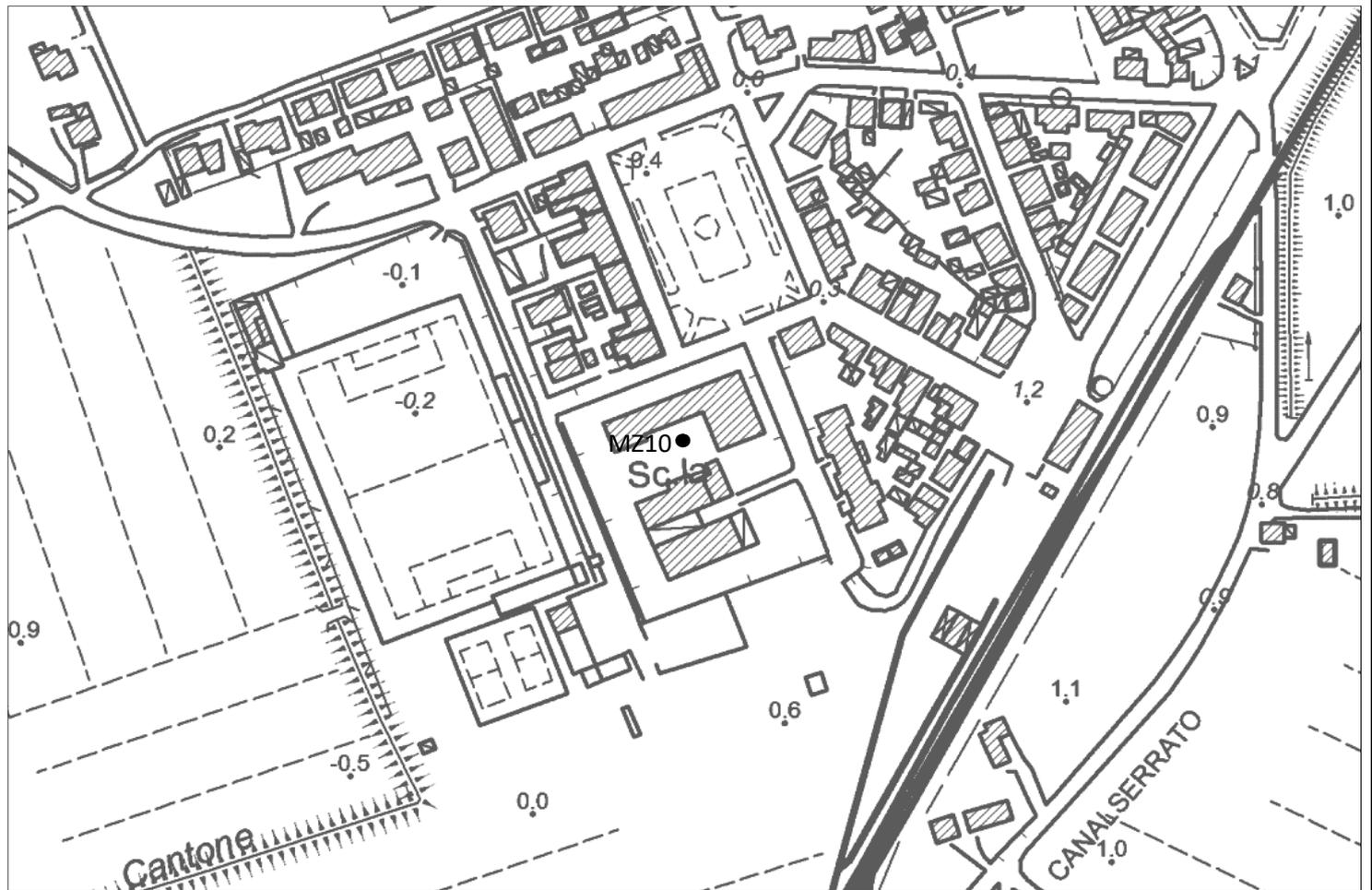
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ10

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: scuola e palestra, Massa Fiscaglia, Fiscaglia (Fe)

DATA: 21/07/2017



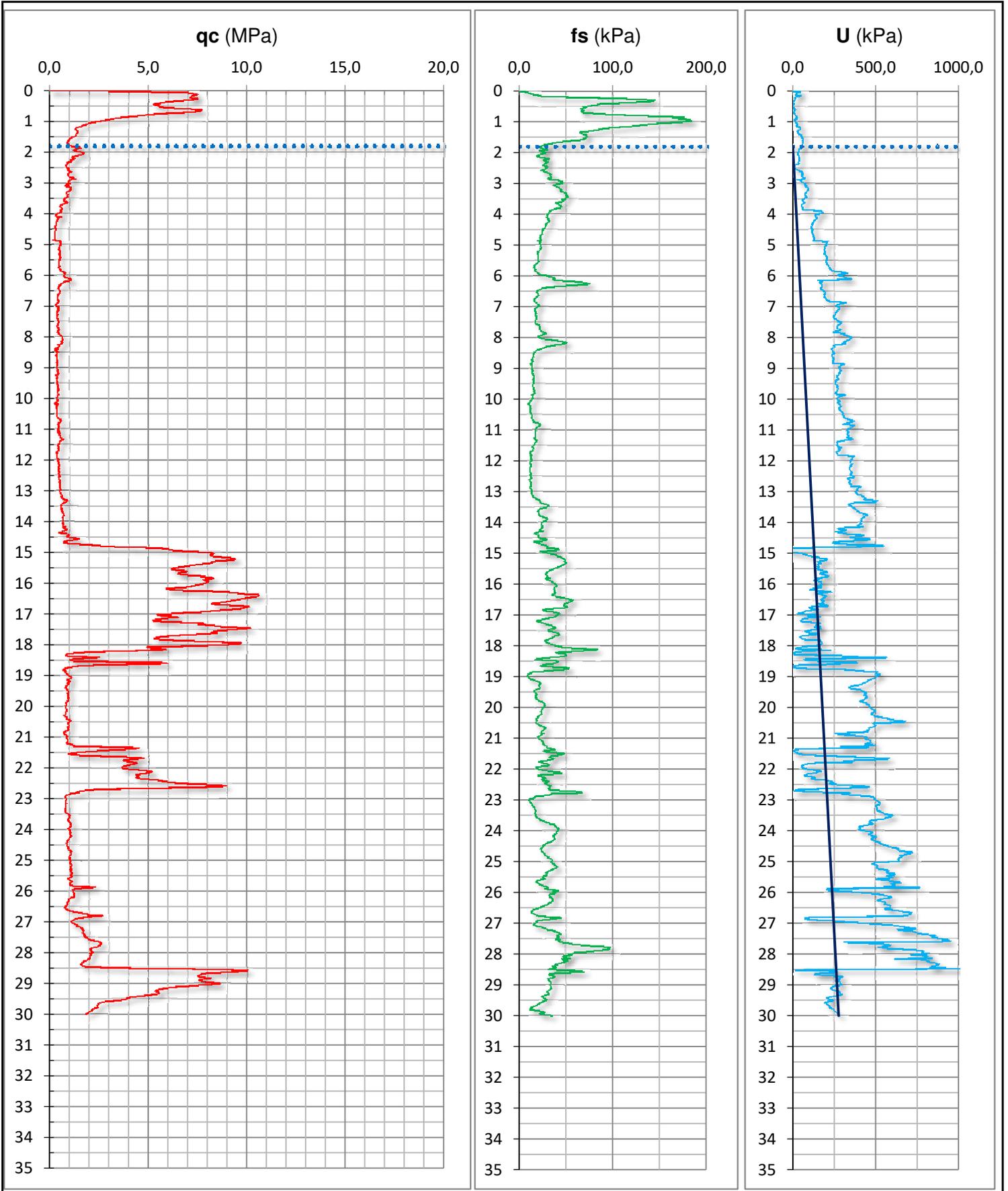
MZ10

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

RIF. PROVA:	CPTU n°:
SCPTU U53-17	MZ10

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: scuola e palestra, Massa Fiscaglia, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 21/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,80  
 PREFORO (m da p.c.): 0,00



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

RIF. PROVA: CPTU n°:  
 SCPTU U53-17 MZ10

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 30,00

CANTIERE: scuola e palestra, Massa Fiscaglia, Fiscaglia (Fe)

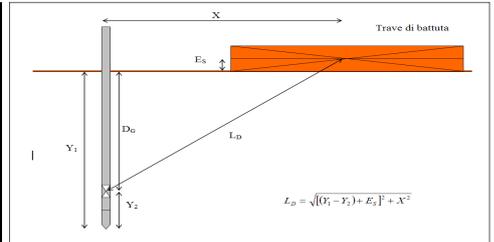
PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 1,80

DATA: 21/07/2017

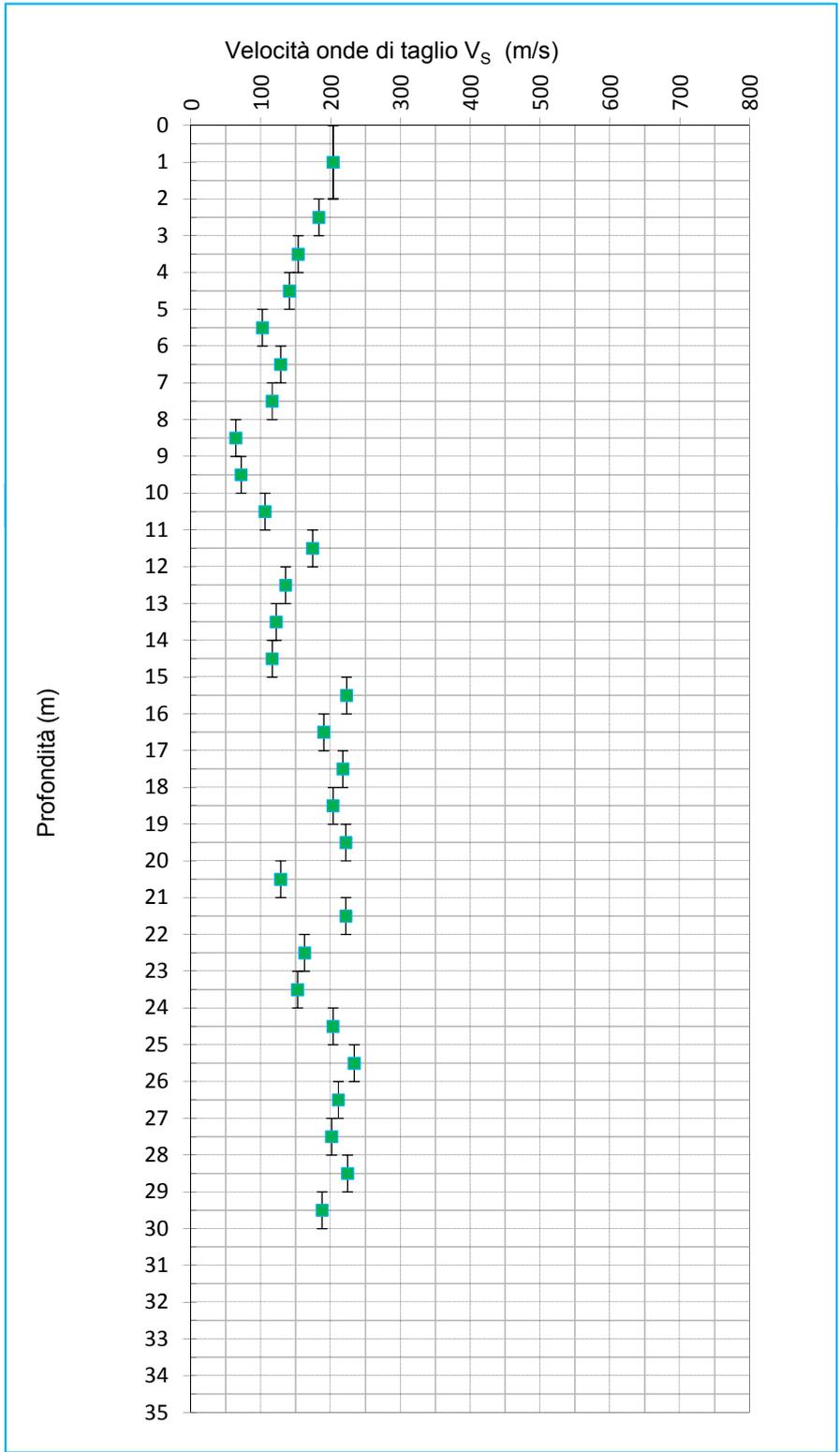
PREFORO (m da p.c.): 0,00

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> = 150 m/sec Categoria suolo di fondazione = D**



Distanza corretta L <sub>D</sub> punta elettrica	Tempo di arrivo onda S (millisecondi)	Velocità onde S dello strato (m/sec)
0,000		
0,838		204
1,817	8,926	183
2,811	14,356	153
3,808	20,852	141
4,807	27,939	102
5,805	37,705	128
6,805	45,492	116
7,804	54,098	64
8,804	69,672	72
9,803	83,606	106
10,803	93,033	174
11,803	98,770	136
12,802	106,147	122
13,802	114,344	116
14,802	122,951	223
15,802	127,439	190
16,802	132,697	217
17,802	137,295	203
18,802	142,213	222
19,802	146,721	128
20,802	154,508	222
21,801	159,016	163
22,801	165,164	152
23,801	171,721	203
24,801	176,639	234
25,801	180,918	211
26,801	185,656	201
27,801	190,623	224
28,801	195,082	188
29,801	200,410	



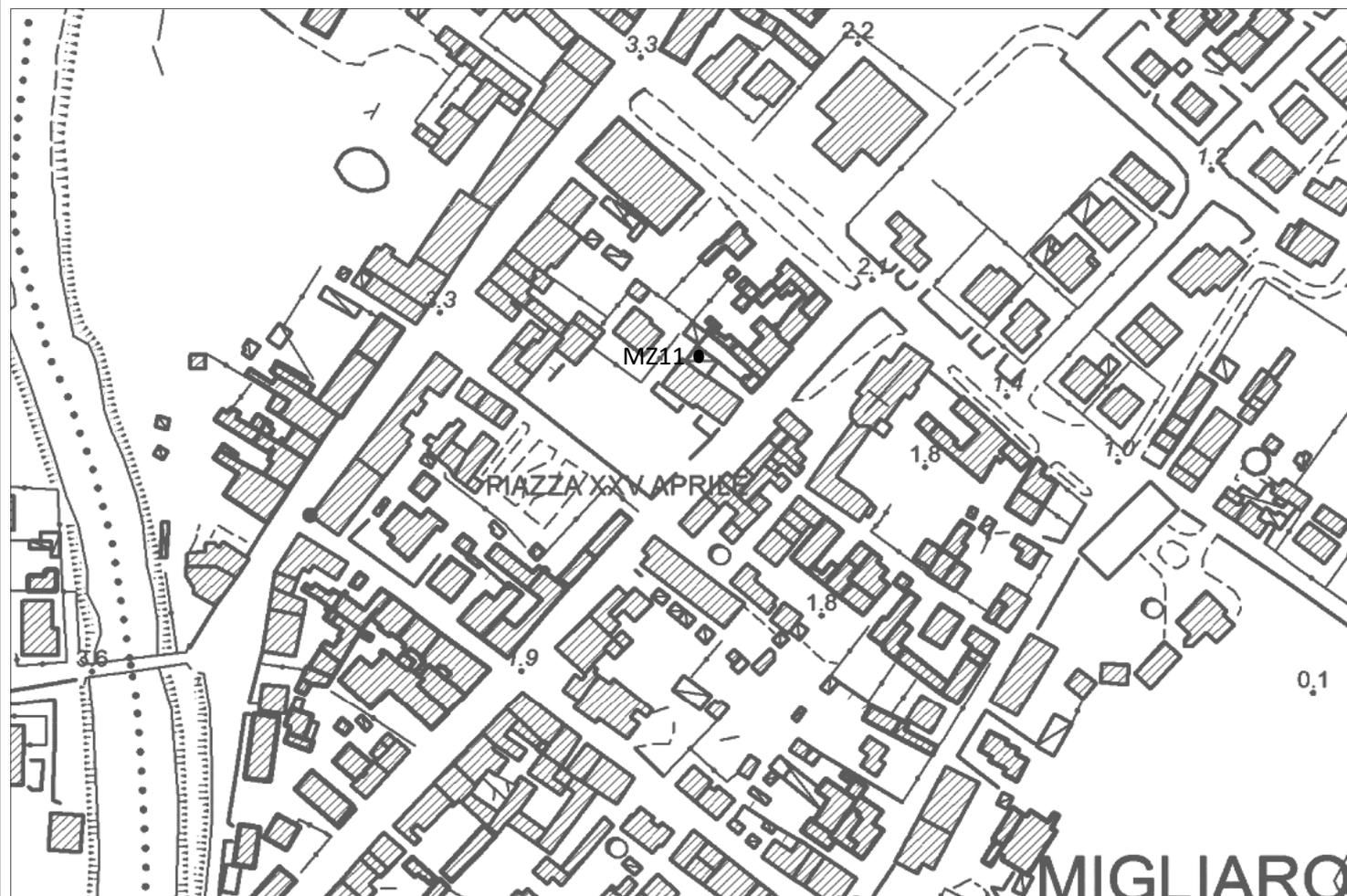
**PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PUNTA ELETTRICA**  
**UBICAZIONE DELLE PROVE SVOLTE - FOTO PIAZZAMENTI**

RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ11

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia

CANTIERE: municipio, Migliaro, Fiscaglia (Fe)

DATA: 25/07/2017



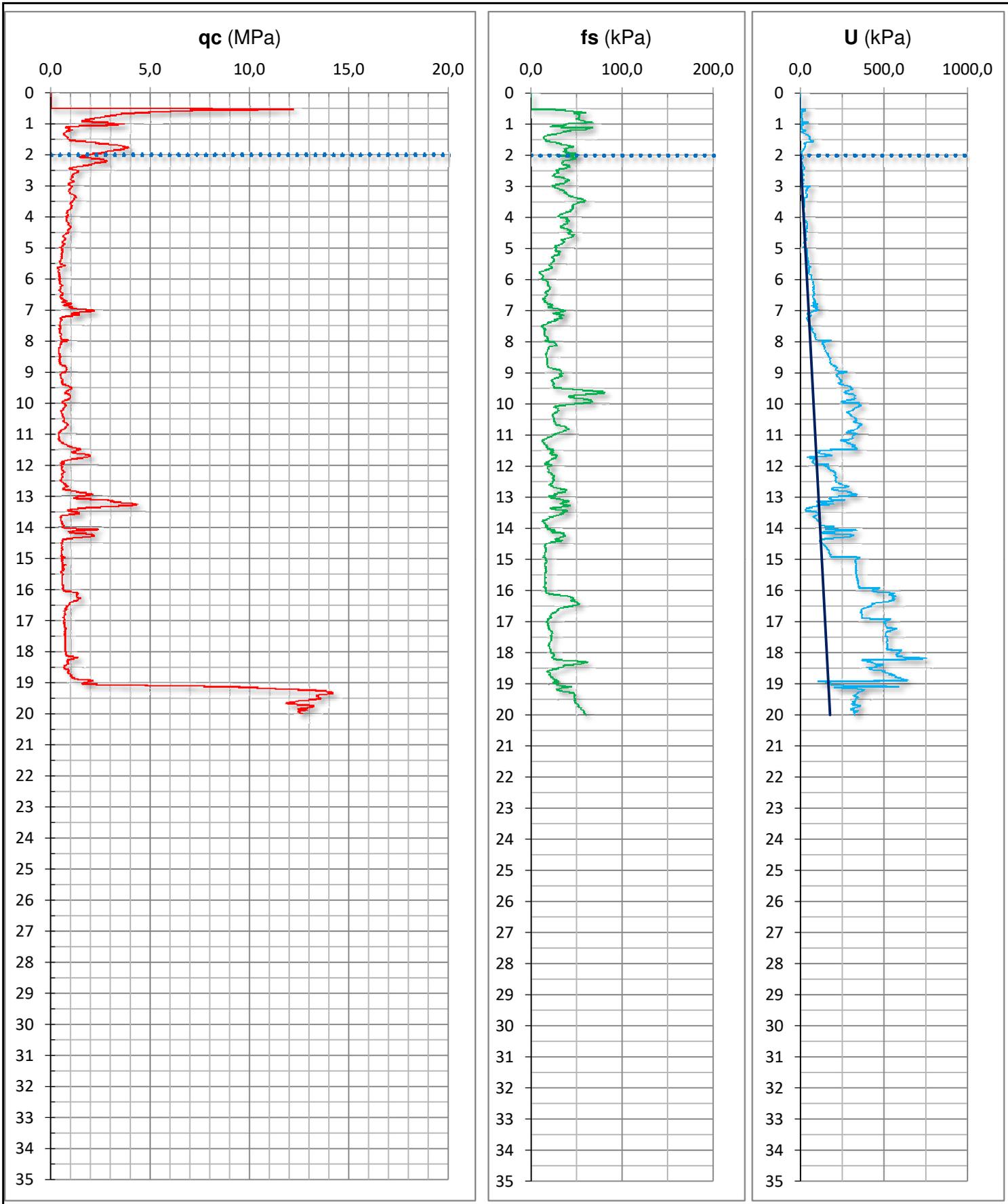
MZ11

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

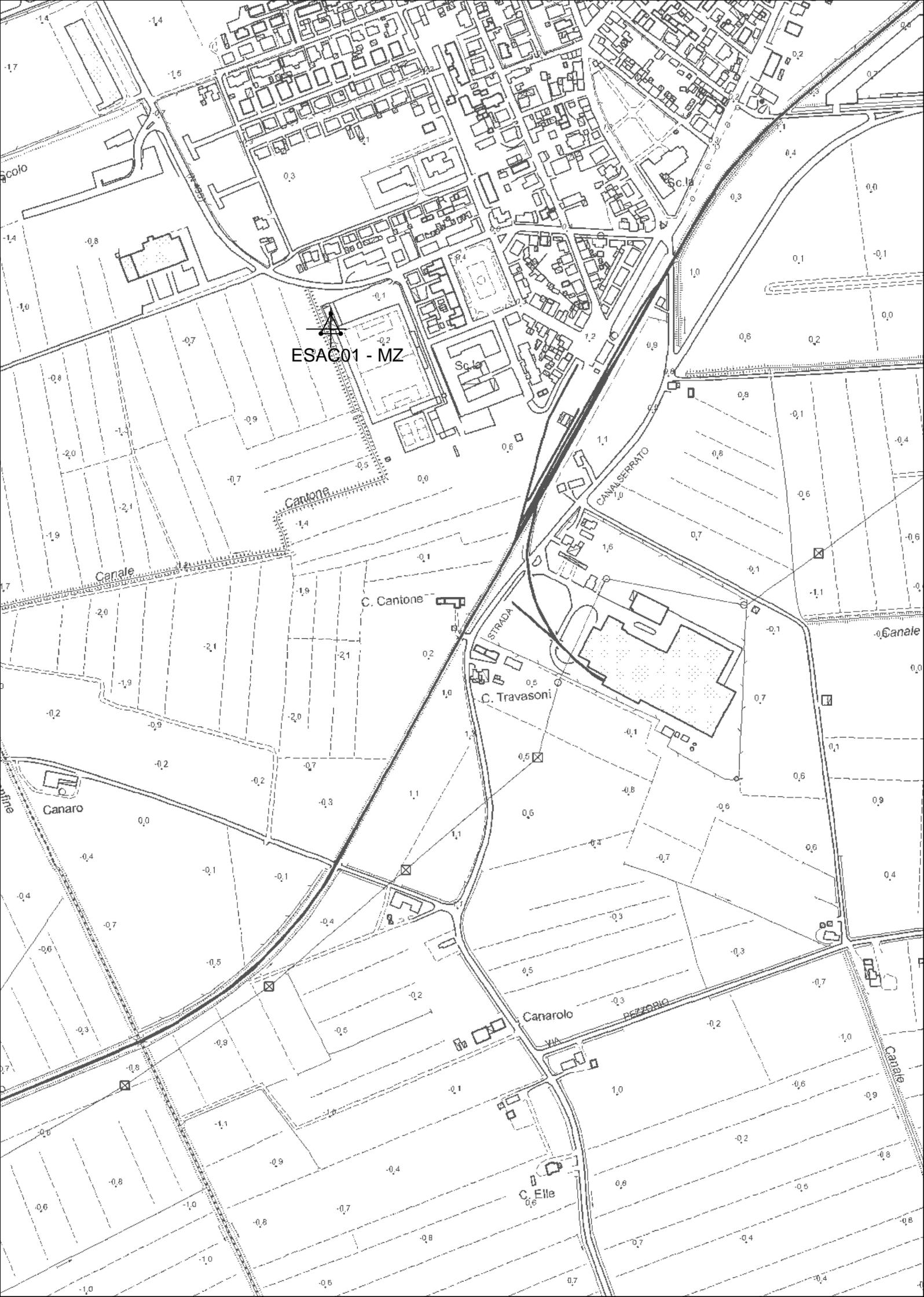
RIF. PROVA:	CPTU n°:
CPTU U53-17	MZ11

COMMITTENTE: Comune di Fiscaglia  
 CANTIERE: municipio, Migliaro, Fiscaglia (Fe)  
 DATA: 25/07/2017

PROFONDITA' MASSIMA DELLA PROVA (m da p.c.): 20,00  
 PROFONDITA' FALDA (m da p.c.): 2,00  
 PREFORO (m da p.c.): 0,50



# **INDAGINE SISMICA ESAC**



ESAC01 - MZ



Cantone

C. Cantone

STRADA

C. Travasoni

Canaro

Canarolo

C. Elle

CANAL SERRATO

VIA PESZORIO

Canale

Canale

## PROFILO ESAC01 – MZ

Il modello sismico così ottenuto non ha raggiunto valori di  $V_s \geq 800$  m/s anzi il valore massimo di  $V_s$  ottenuto alla massima profondità raggiunta risulta essere pari a 443 m/s. I valori di “VS” del profilo sismico ottenuto per l’area in oggetto sono risultati essere compresi tra 99 m/s e 443 m/s.

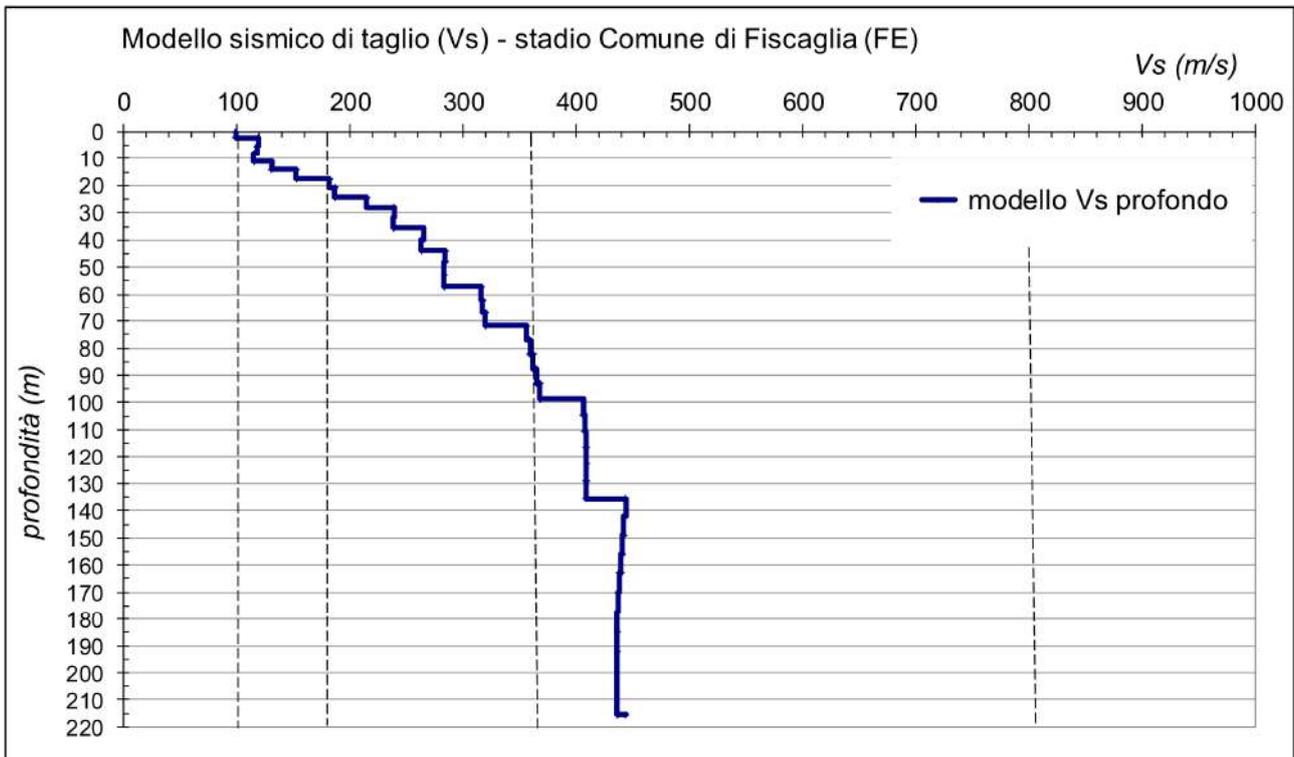


Figura 5. Il profilo verticale VS ottenuto per l’area indagata dal profilo sismico. In base al modello sismico è stata determinata la VS30 che risulta pari a  $146 \text{ m/s} \pm 4 \text{ m/s}$  (RMS=1.5%).

Tabella 2. Modello sismico di taglio semplificato

Sismo-strato	PROFILO sismico fino a 30 metri (modello numerico fino a 215 metri è riportato in Appendice A)		
	Velocità (m/s)	Profondità letto (m)	Spessore (m)
1	98.5	2.0	0.0
2	118.5	5.3	3.3
3	117.3	8.1	2.8
4	114.3	11.1	3.0
5	130.2	14.2	3.1
6	152.2	17.4	3.2
7	181.9	20.8	3.4
8	186.5	24.3	3.5
9	214.6	27.9	3.6
10	239.0	31.7	3.8

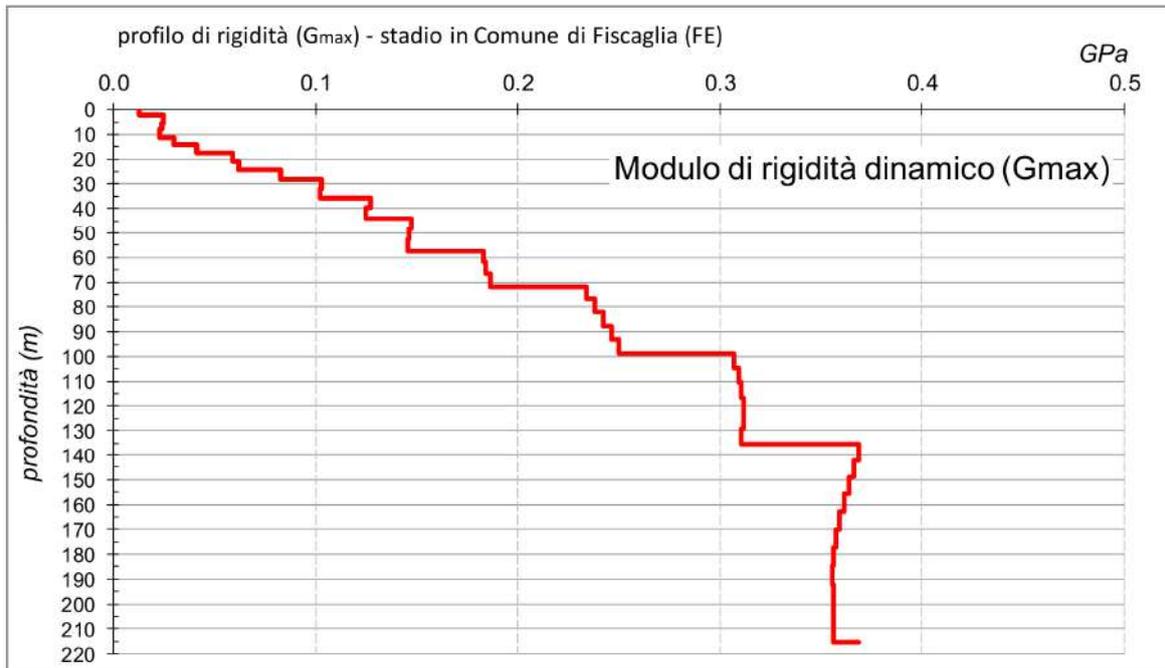


Figura 6. Il profilo verticale  $G_{max}$  ( $\mu$ : modulo di rigidità dinamico) dell'area indagata dal profilo sismico, ottenuto dal profilo di velocità ( $V_s$ ) mediante l'equazione  $\mu = \rho \cdot V_s^2$ .

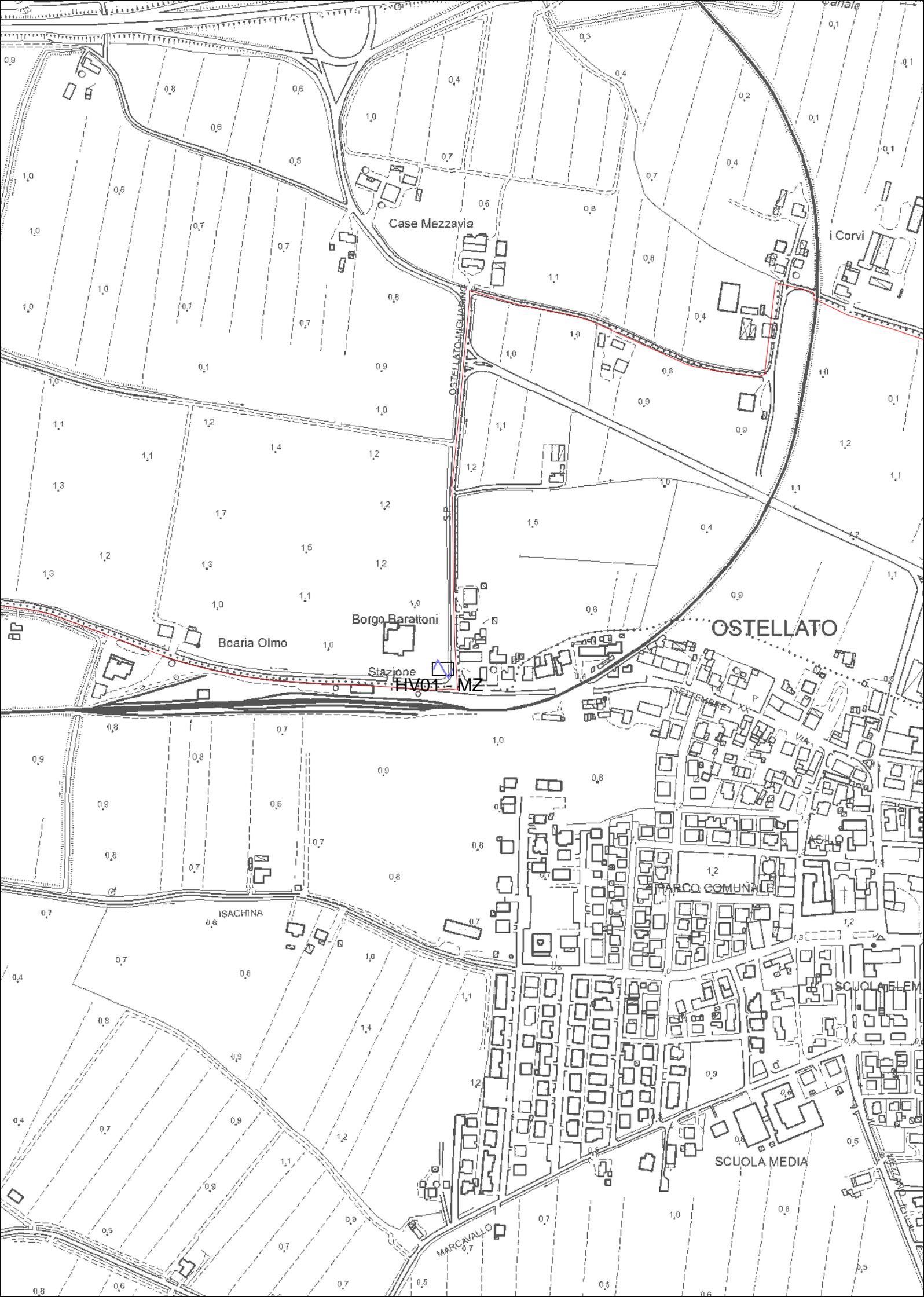
I valori  $V_{S30}$  determinati per il sito, secondo l'eq.1, risultano pari a **146 m/s**  $\pm$  4 **m/s** collocando il sottosuolo in **CLASSE D** (D.M. 14 gennaio 2008).

# Appendice A1

ESAC01	PROFILO sismico fino a 215 metri		
Sismo-strato	Profondità letto (m)	Velocità (m/s)	Spessore (m)
1	2.0	98.5	2.0
2	5.3	118.5	3.3
3	8.1	117.3	2.8
4	11.1	114.3	3.0
5	14.2	130.2	3.1
6	17.4	152.2	3.2
7	20.8	181.9	3.4
8	24.3	186.5	3.5
9	27.9	214.6	3.6
10	31.7	239.0	3.8
11	35.6	238.2	3.9
12	39.7	264.5	4.0
13	43.9	262.6	4.2
14	48.2	284.4	4.3
15	52.6	283.1	4.5
16	57.2	282.7	4.6
17	61.9	315.9	4.7
18	66.8	317.1	4.9
19	71.8	319.2	5.0
20	76.9	356.1	5.1
21	82.2	359.0	5.3
22	87.6	362.1	5.4
23	93.1	365.0	5.5
24	98.8	367.5	5.7
25	104.6	405.8	5.8
26	110.5	407.3	5.9
27	116.6	408.4	6.1
28	122.8	408.9	6.2
29	129.1	408.8	6.3

<b>30</b>	135.6	408.2	6.5
<b>31</b>	142.2	443.4	6.6
<b>32</b>	149.0	442.1	6.7
<b>33</b>	155.9	440.7	6.9
<b>34</b>	162.9	439.2	7.0
<b>35</b>	170.0	437.9	7.2
<b>36</b>	177.3	436.8	7.3
<b>37</b>	184.8	436.0	7.4
<b>38</b>	192.3	435.7	7.6
<b>39</b>	215.4	436.1	-

# **INDAGINE SISMICA HVSR**



Coordinate geografiche

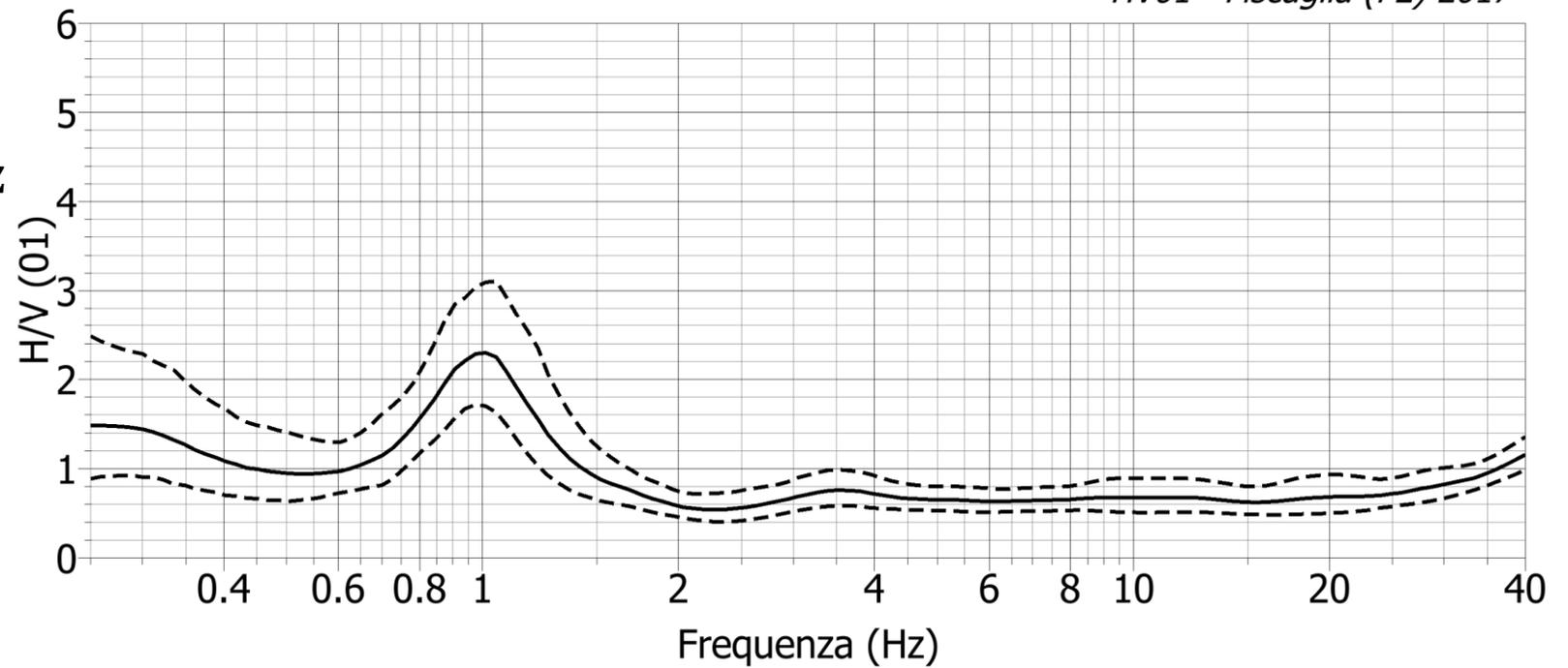
prova: HV01

44.74809°N

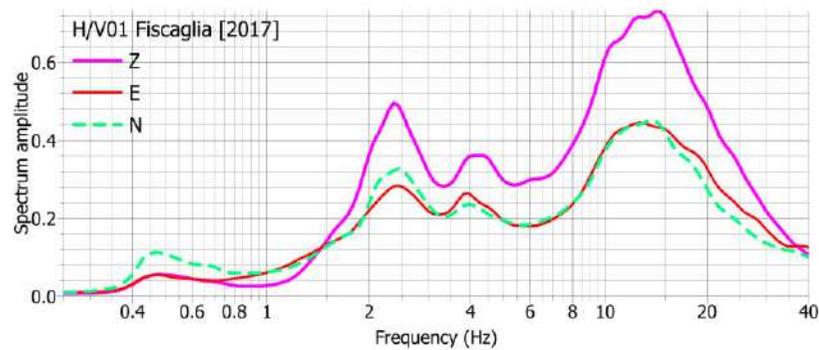
11.935750°E

**$F_0: 1,04 \pm 0,06$  Hz**

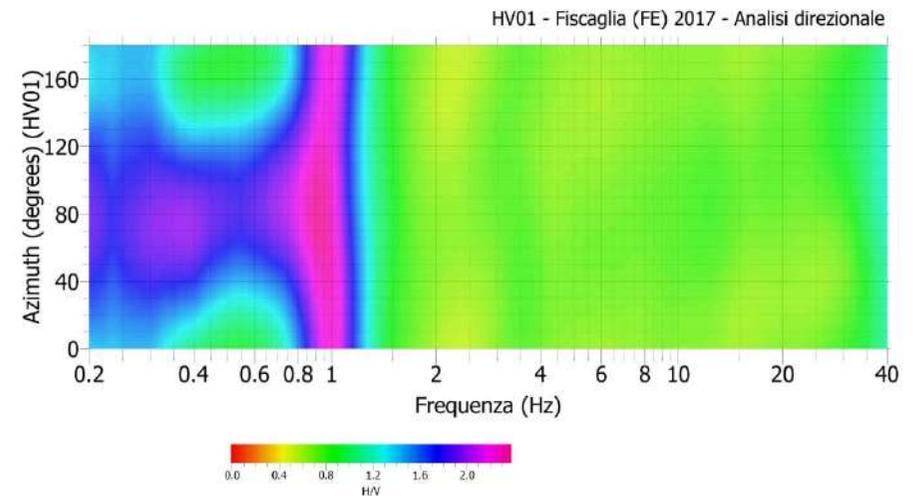
*HV01 - Fiscaglia (FE) 2017*

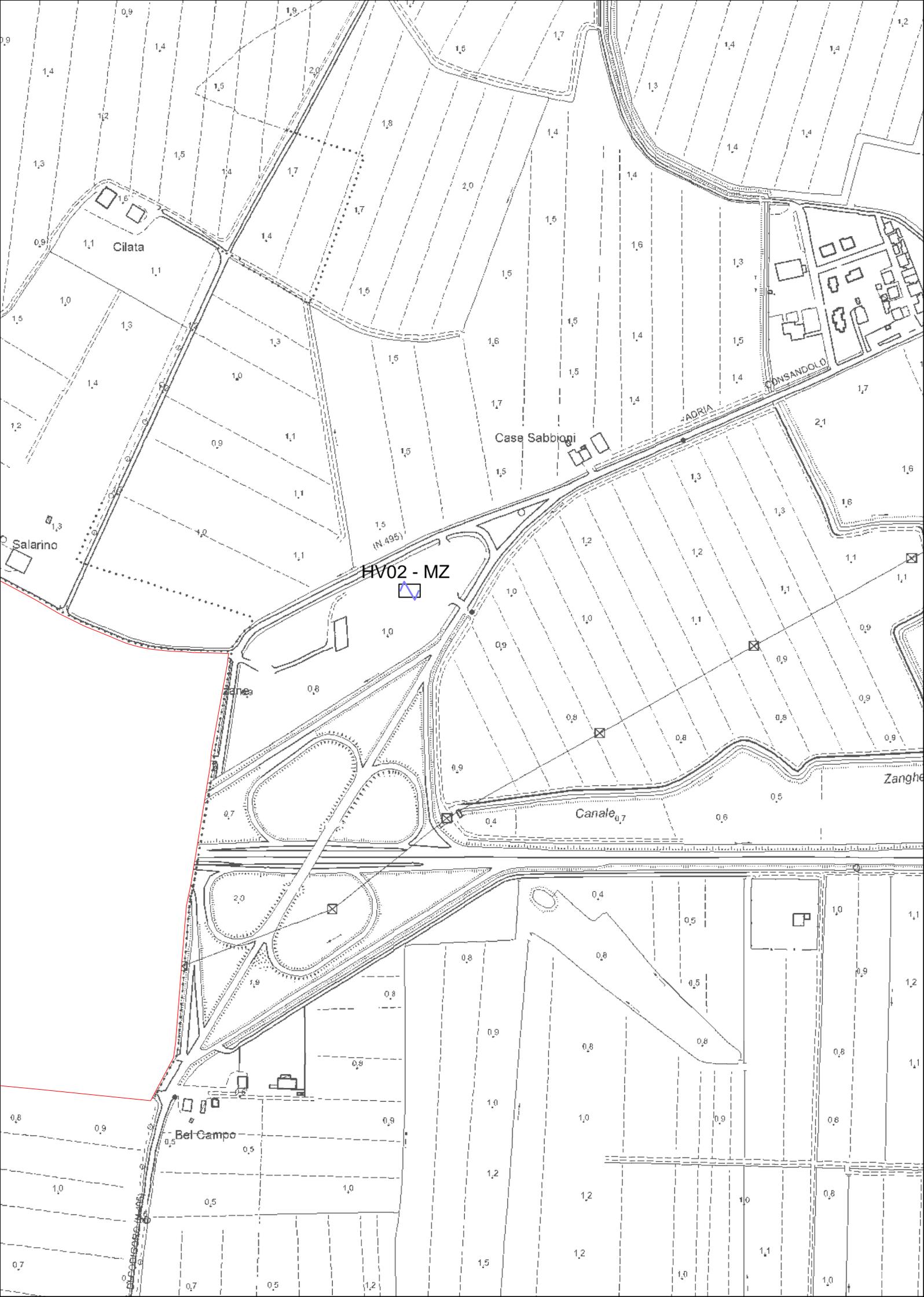


spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione





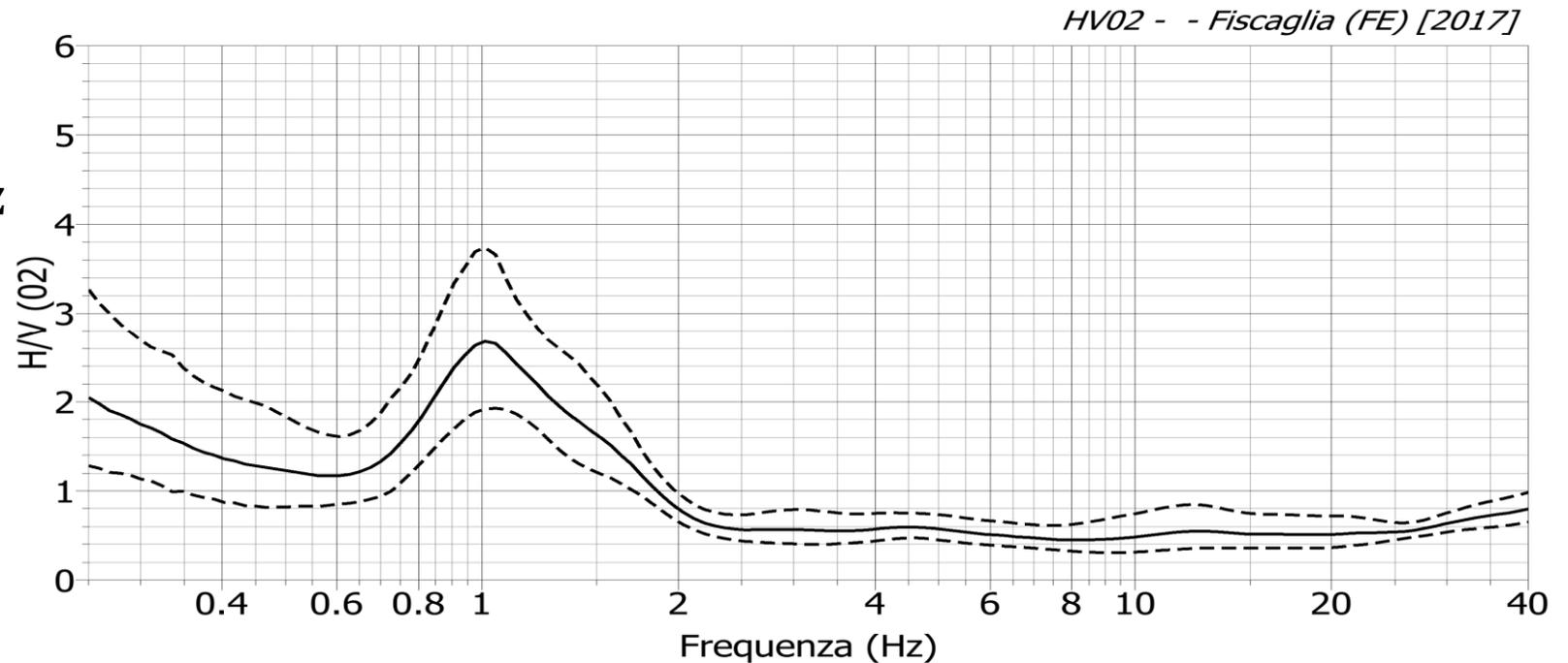
Coordinate geografiche

prova: HV02

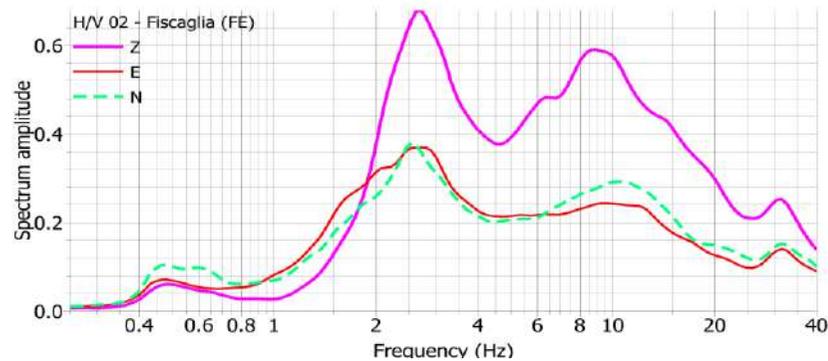
44.75871°N

11.918685°E

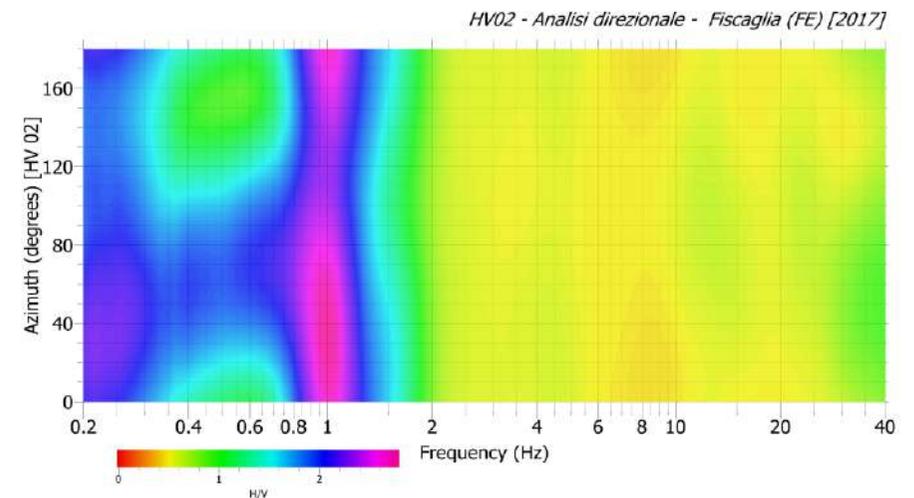
**$F_0: 1,10 \pm 0,08$  Hz**



spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione





CONSORZIO AGRARIO PROVINCIALE

MIGLIARINO

HV03 - MZ

Stazione

Case Roda

Poss. ne Reca

Coordinate geografiche

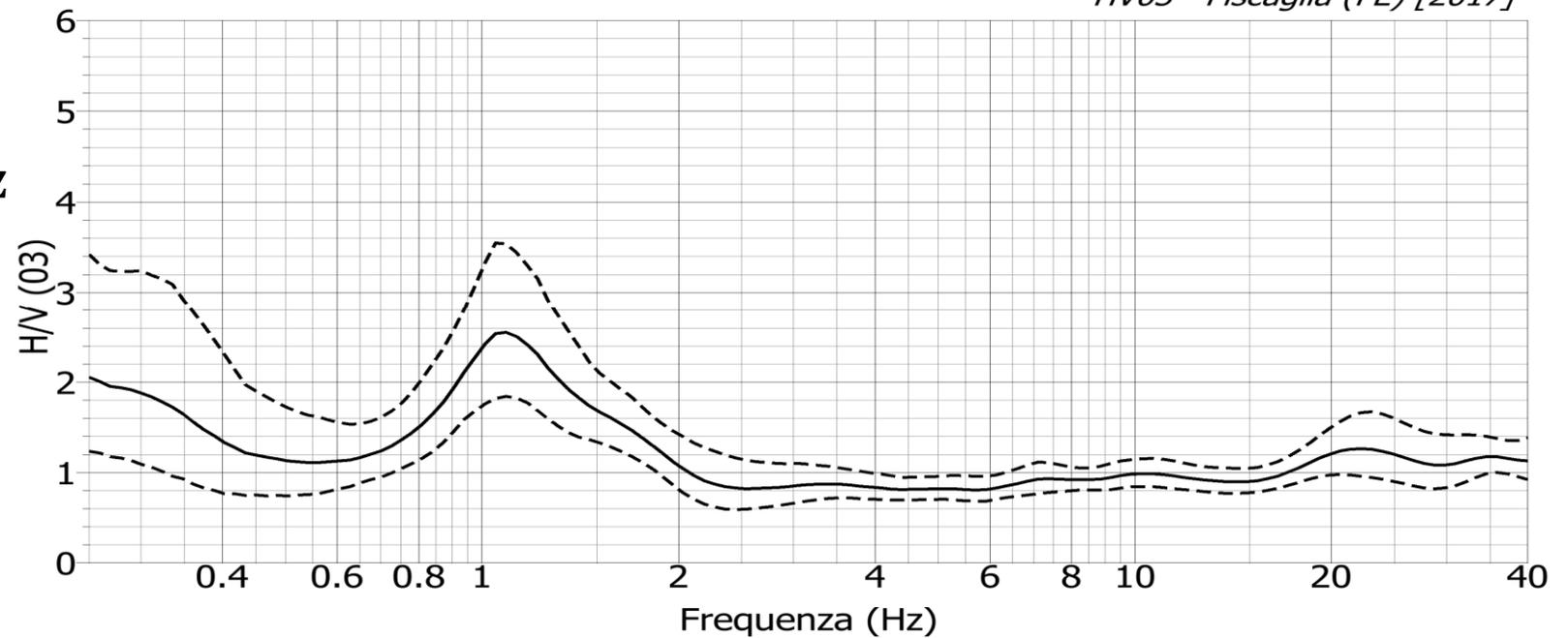
prova: HV03

44.7712944°N

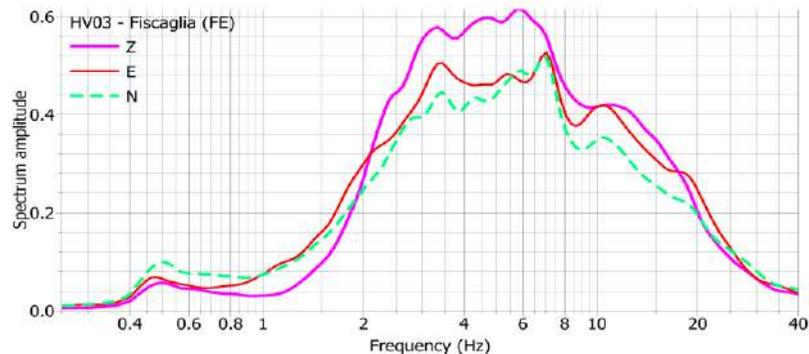
11.938884°E

**$F_0: 1,14 \pm 0,09$  Hz**

*HV03 - Fiscaglia (FE) [2017]*

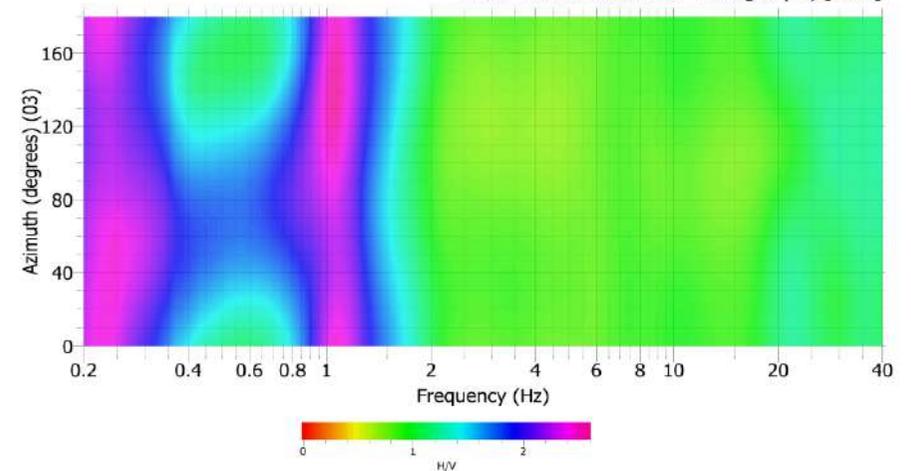


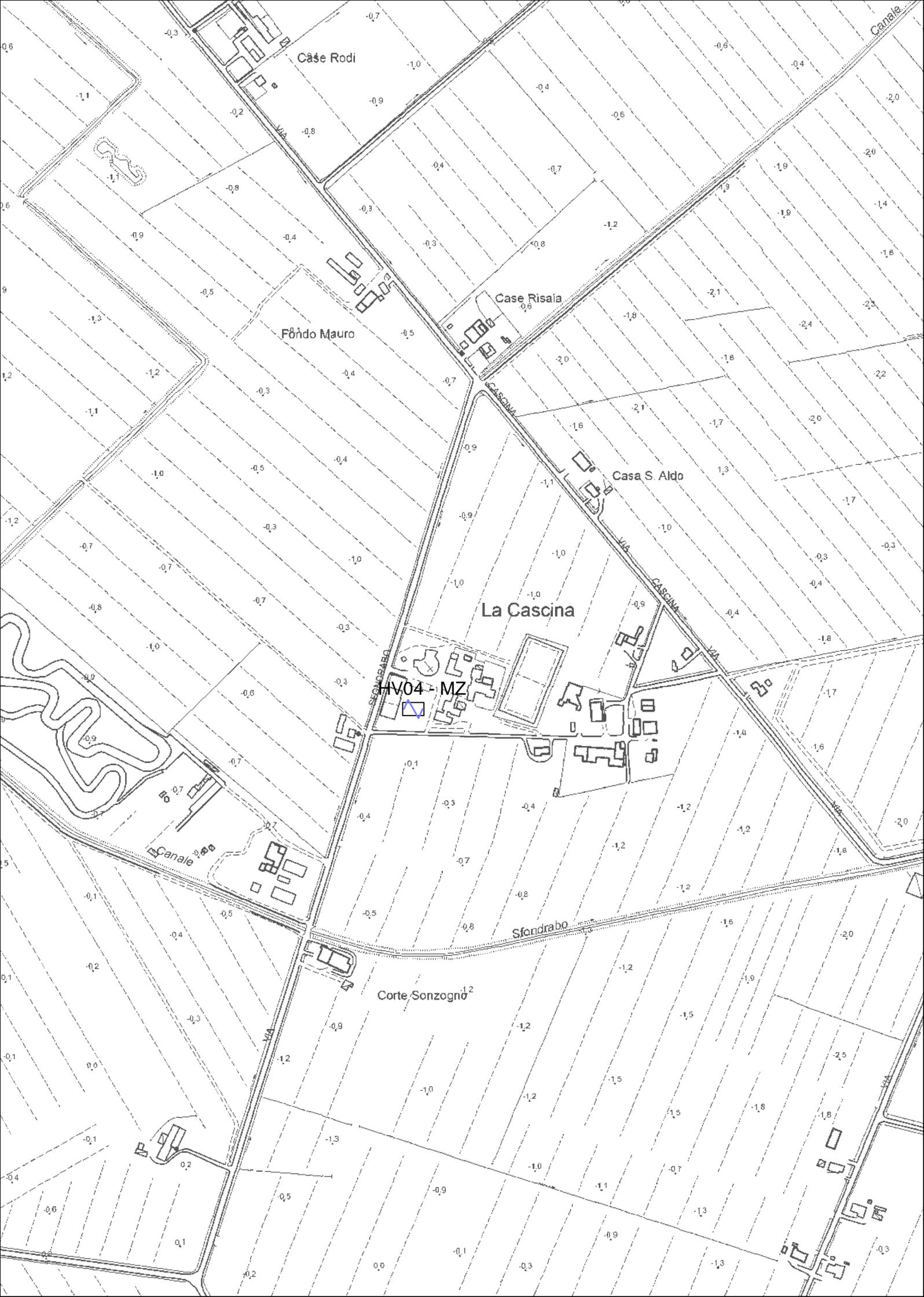
spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione

*HV03 - Analisi direzionale - Fiscaglia (FE) [2017]*





Coordinate geografiche

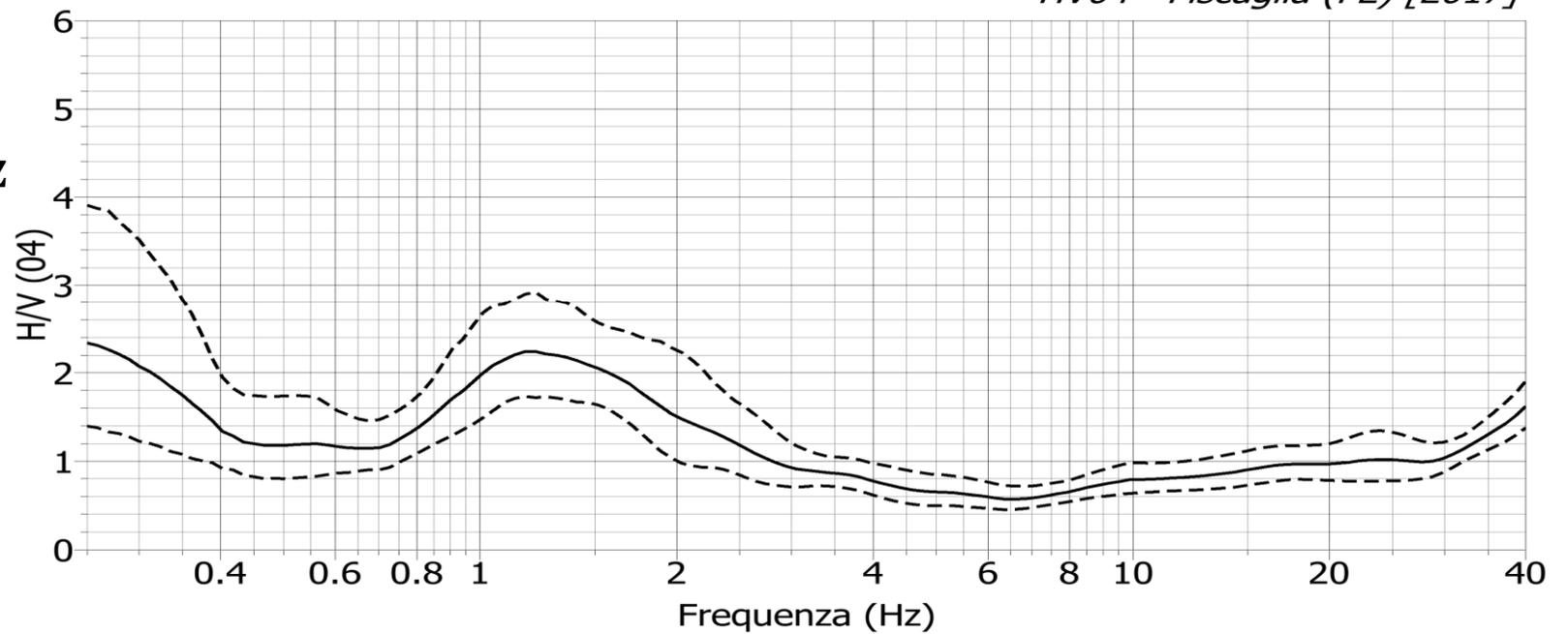
prova: HV04

44.77314°N

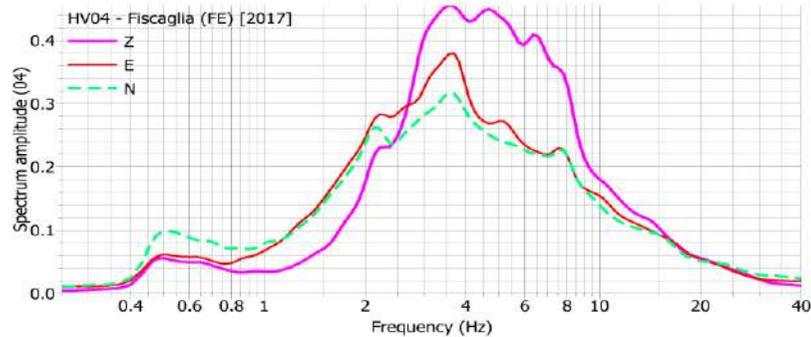
11.994959°E

**$F_0: 1,26 \pm 0,08$  Hz**

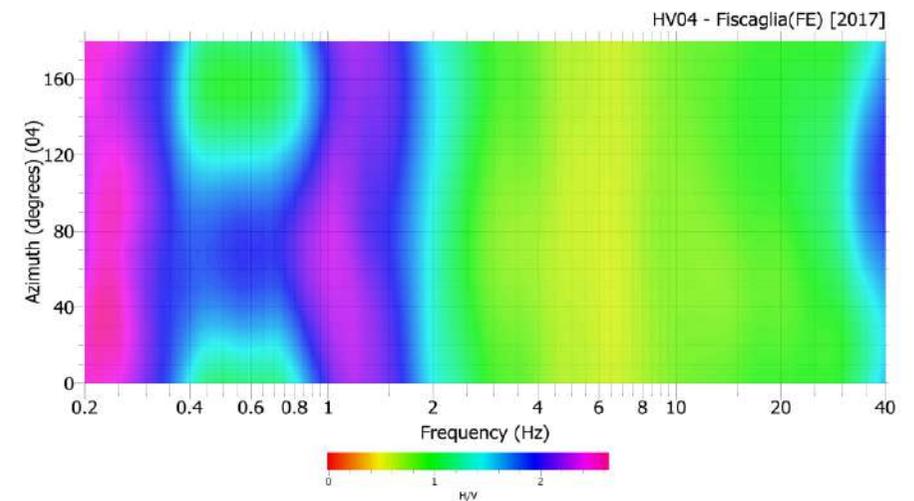
*HV04 - Fiscaglia (FE) [2017]*



spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione





Borgo Giovannelli Be

Bulgateello

Ponte Gazzo

Cordolo tubato Ceiba 2a

C. Gazza

HV05 - MZ

VIA PO

ARGONE

Case Giuriola

MIGLIARO

Casa Lovara

Coordinate geografiche

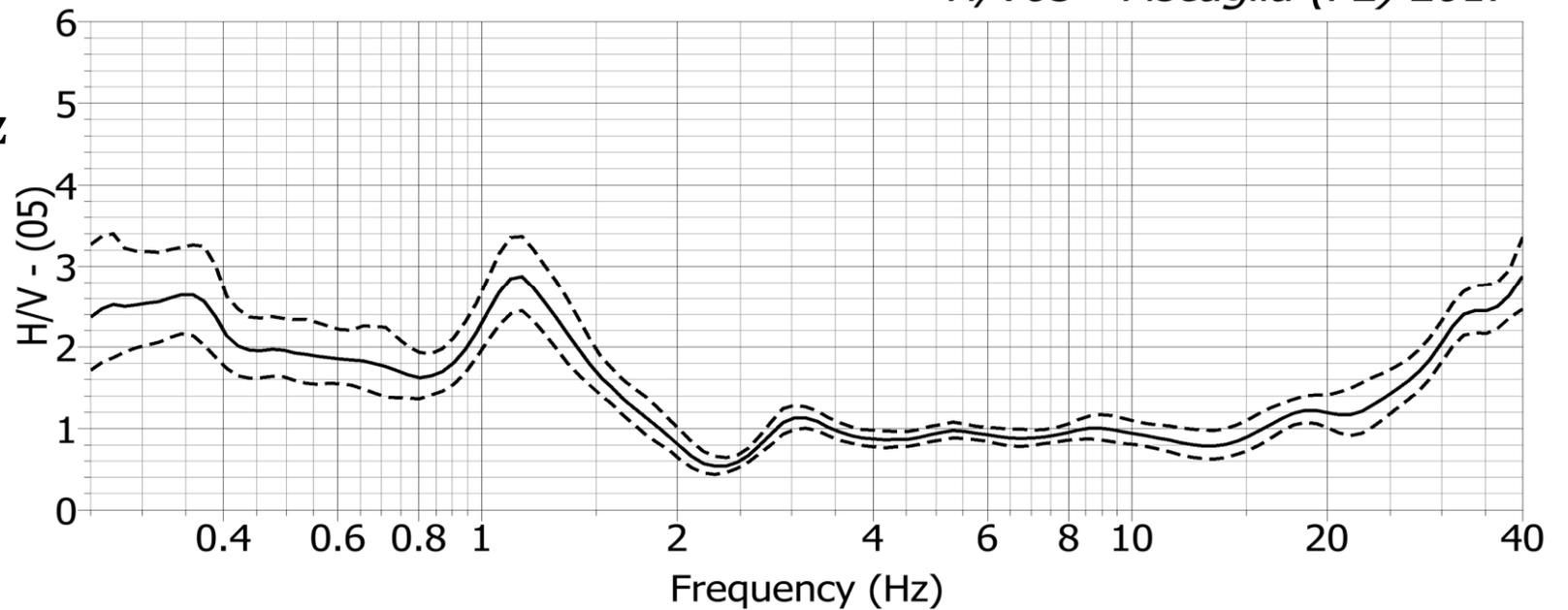
prova: HV05

44.80412°N

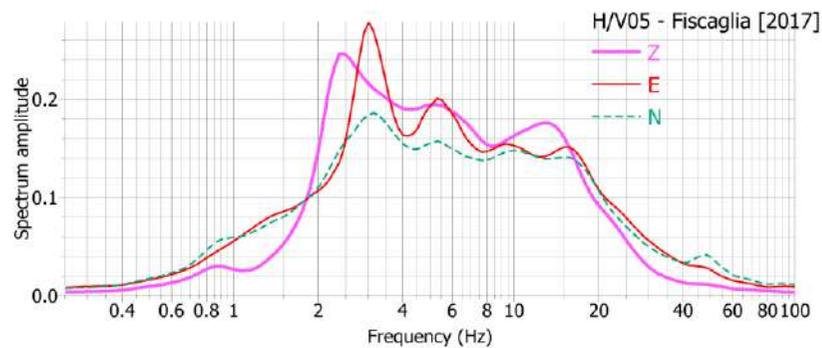
11.974240°E

**$F_0: 1,21 \pm 0,06$  Hz**

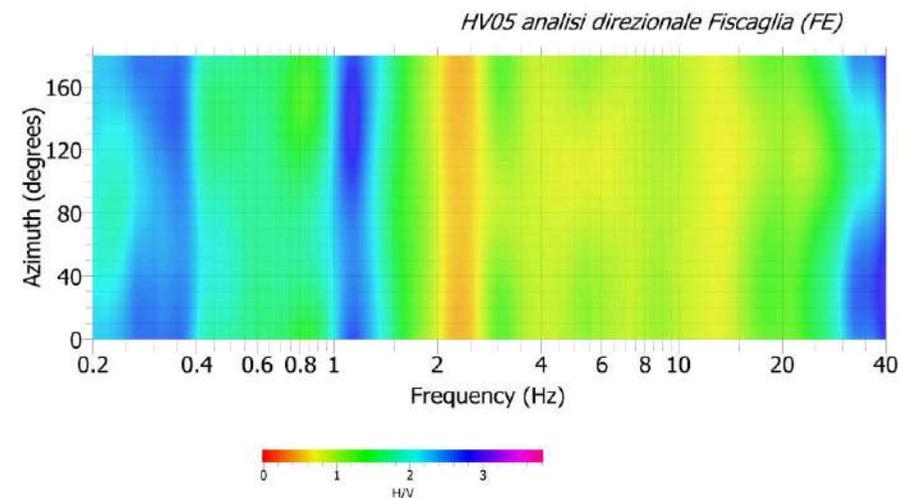
*H/V05 - Fiscaglia (FE) 2017*

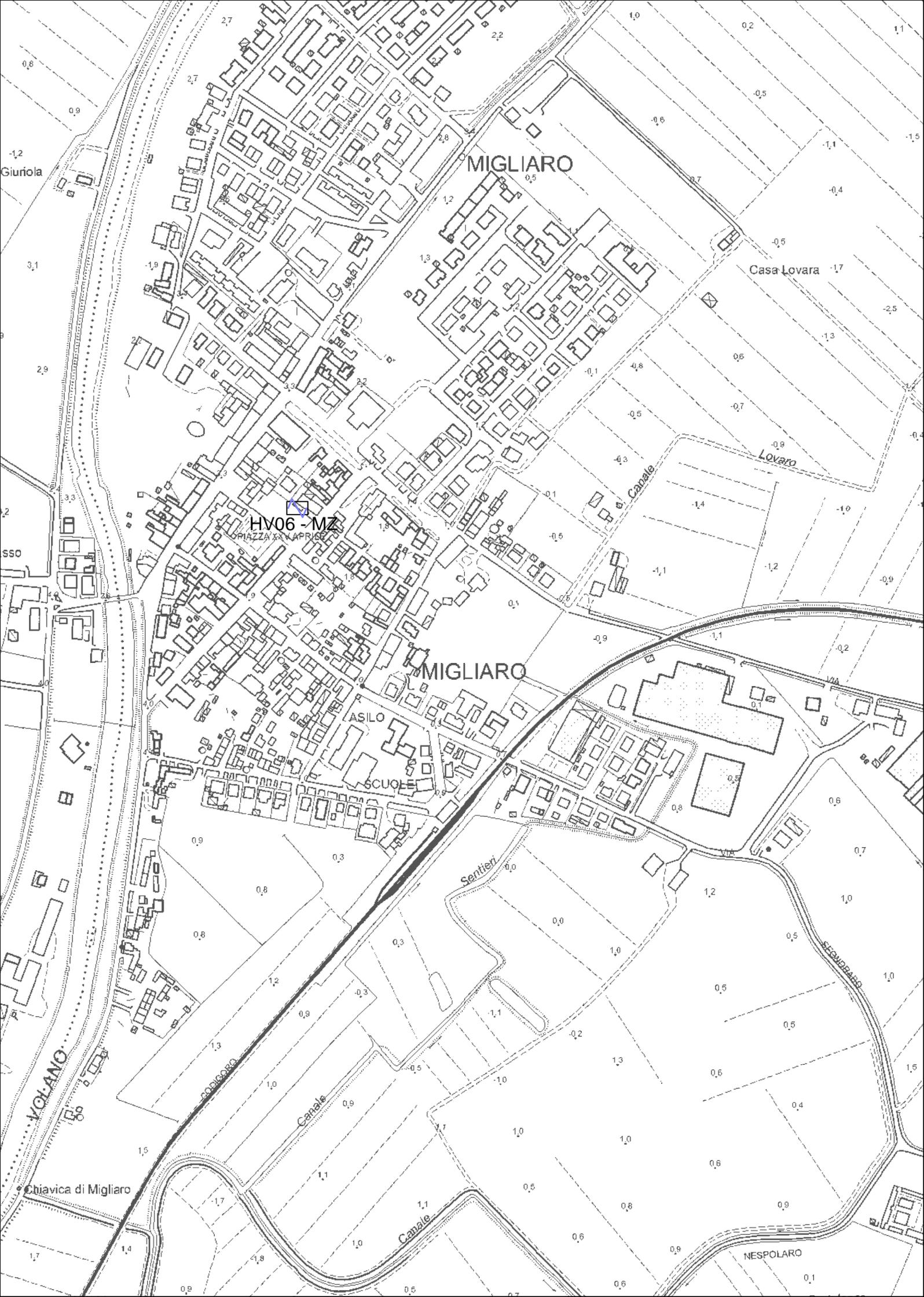


spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione





MIGLIARO

HV06 - MZ

MIGLIARO

Casa Lovara -17

ASILO

SCUOLE

Santieri

VOLANO

Chiavica di Migliaro

NESPOLARO

Canale

Canale

Lovaro

Storpiaro

Coordinate geografiche

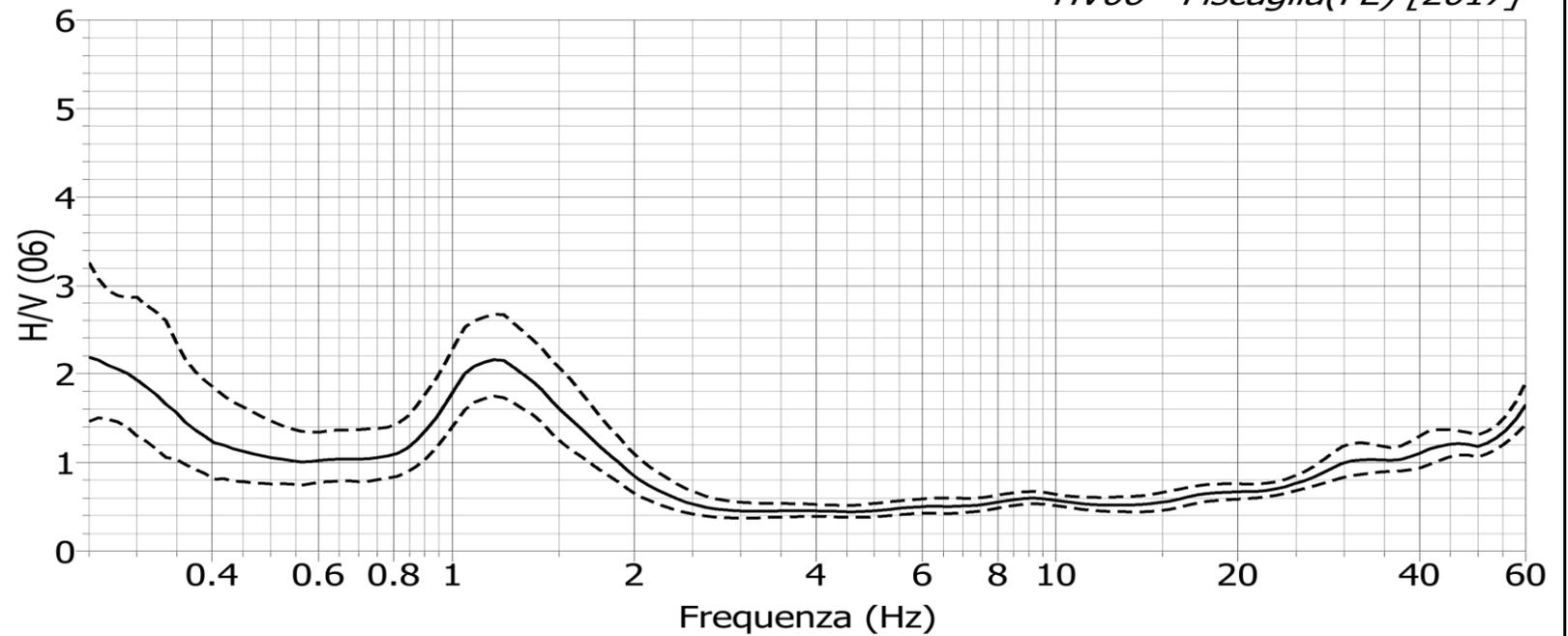
prova: HV06

44.79806°N

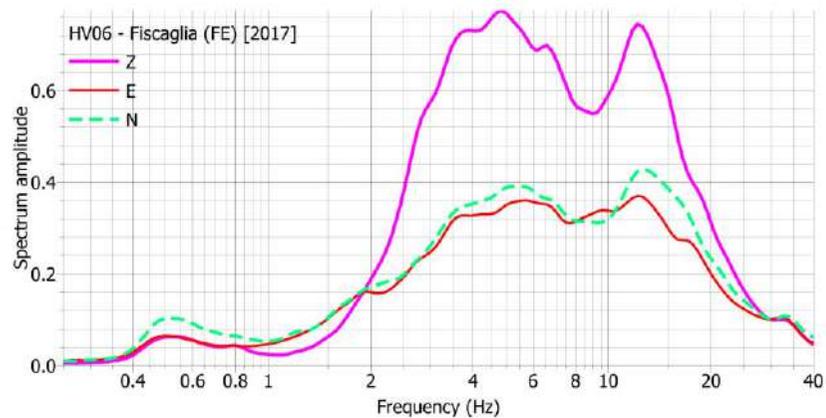
11.972433°E

**$F_0: 1,24 \pm 0,06$  Hz**

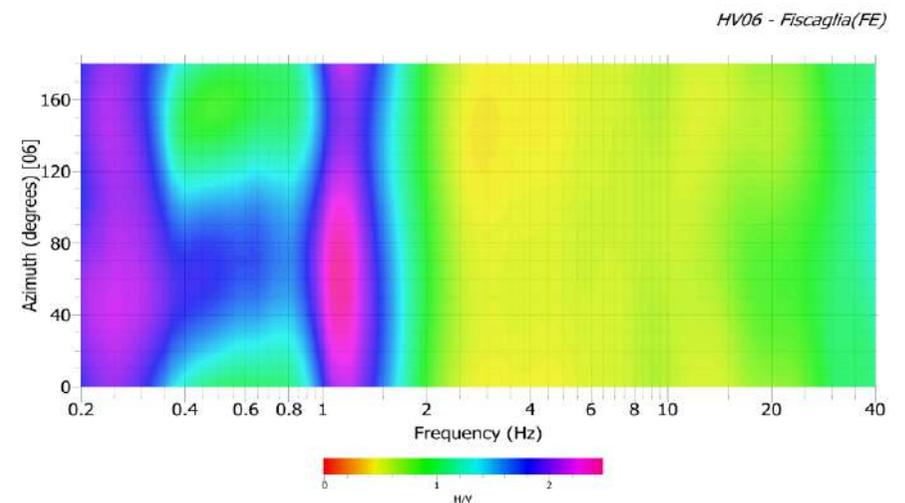
*HV06 - Fiscaglia(FE) [2017]*

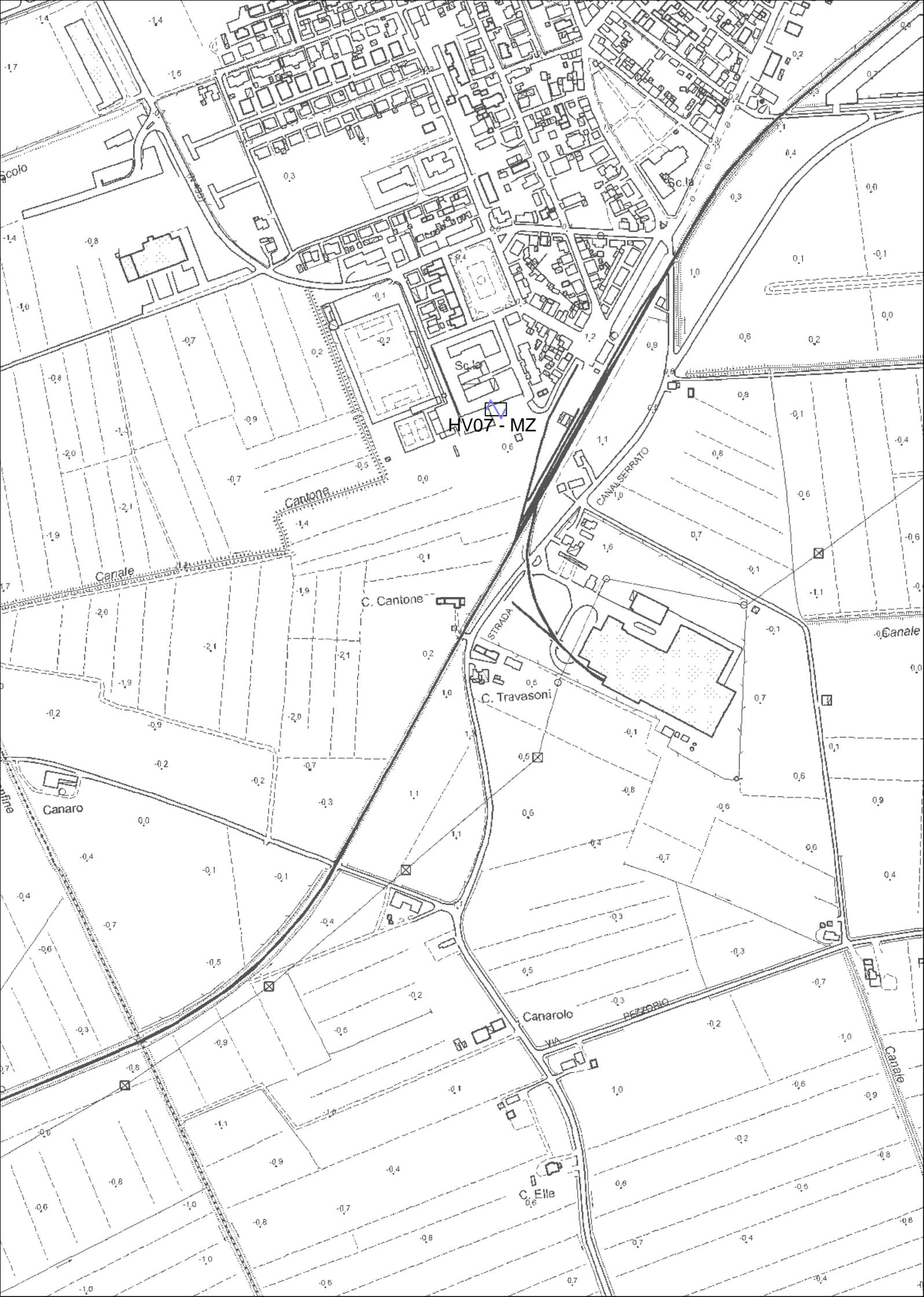


spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione





HV07 - MZ

Cantone

CANAL SERRATO

Canale

C. Cantone

STRADA

C. Travasoni

Canale

Canaro

Canarolo

PEZZORIO

C. Elle

Canale

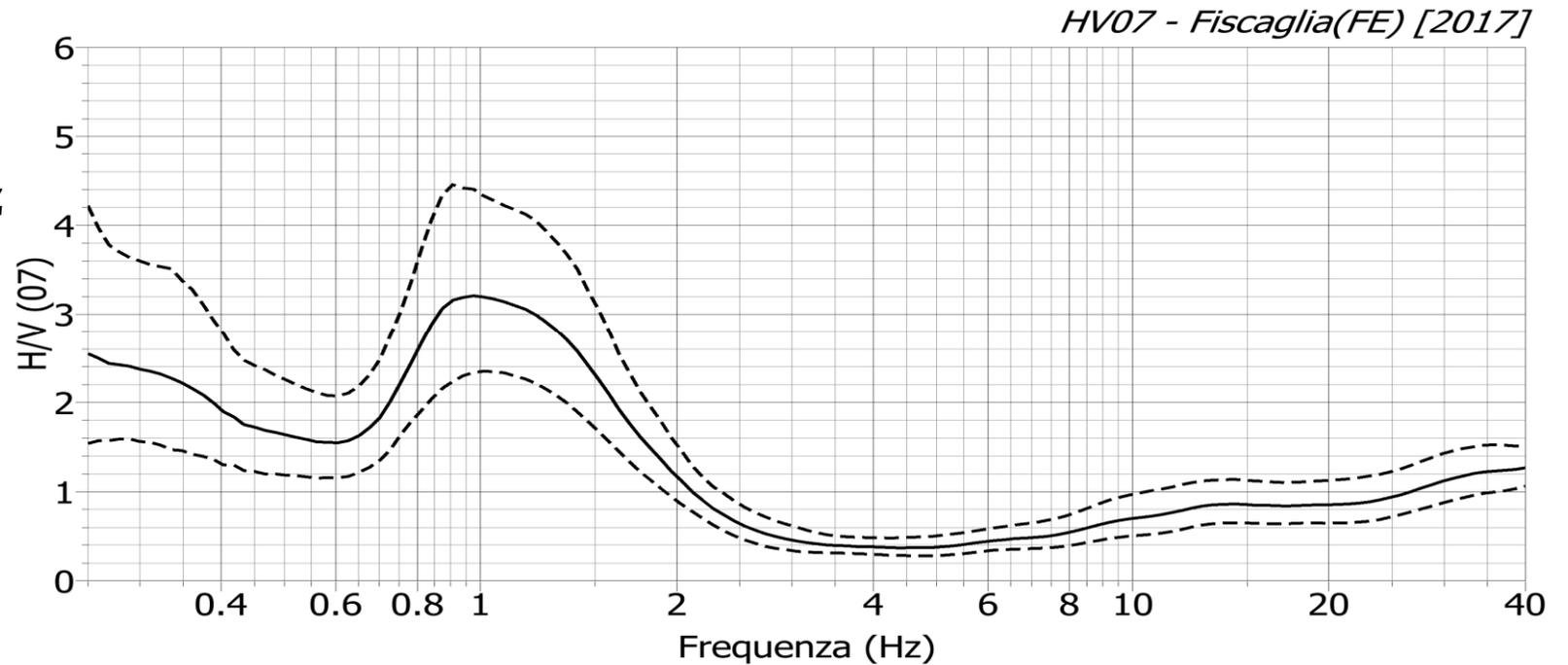
Coordinate geografiche

prova: HV07

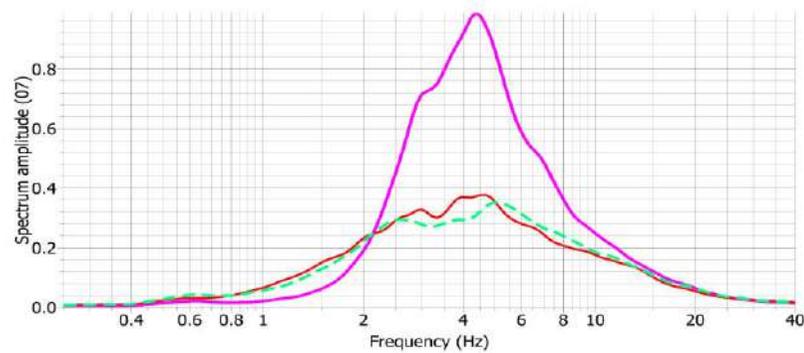
44.80359°N

12.011540°E

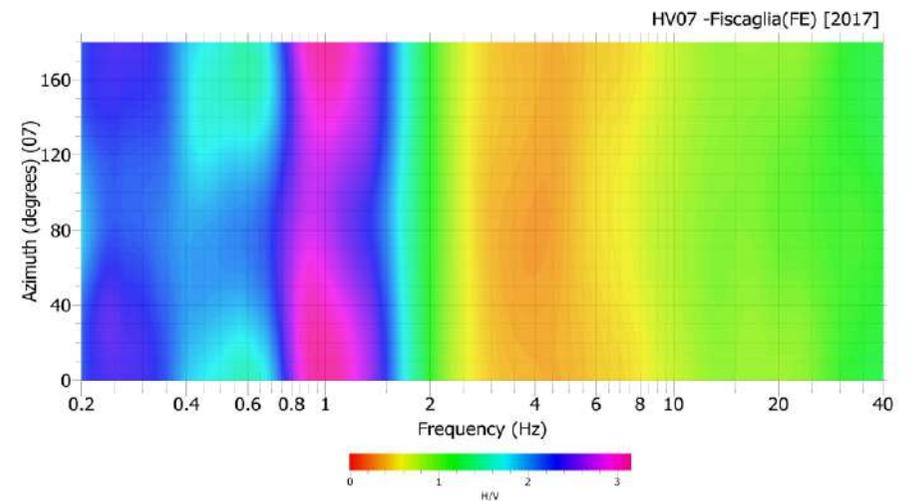
**$F_0: 1,03 \pm 0,04$  Hz**



spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione





HV08 MZ

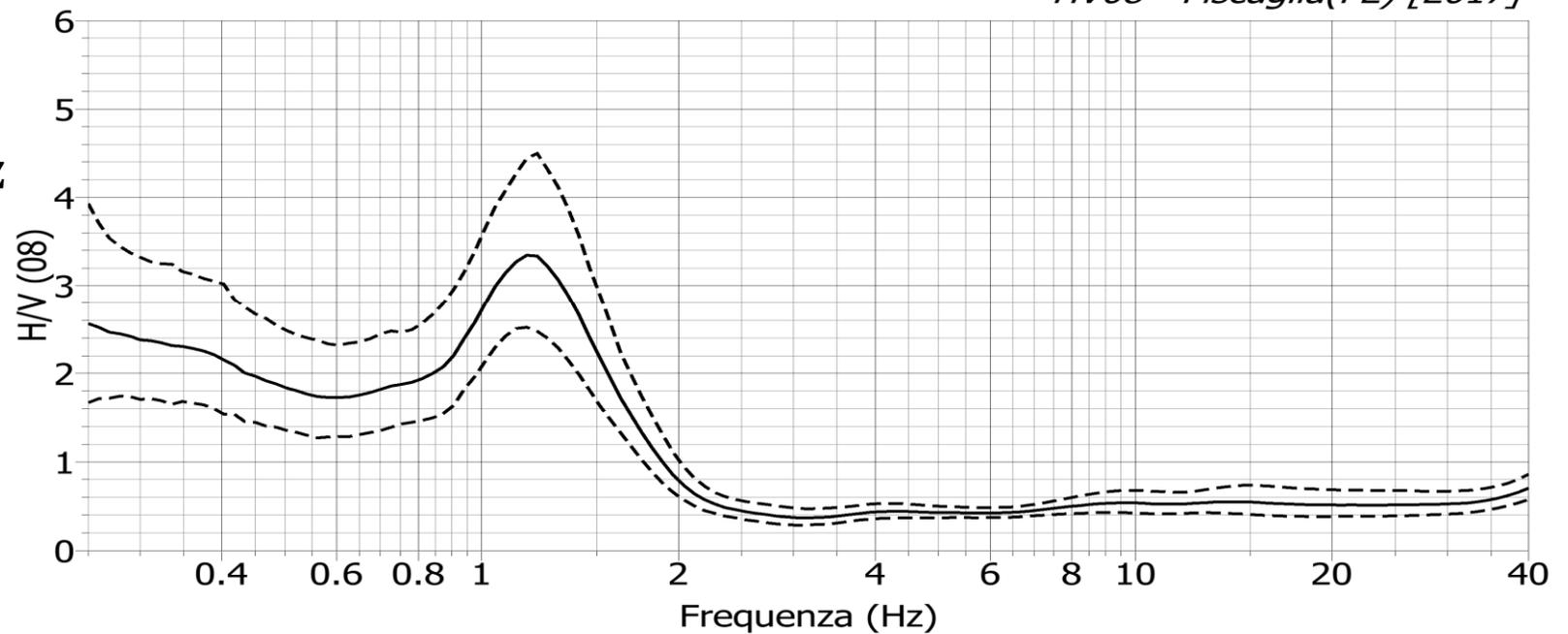
Coordinate geografiche

prova: HV08

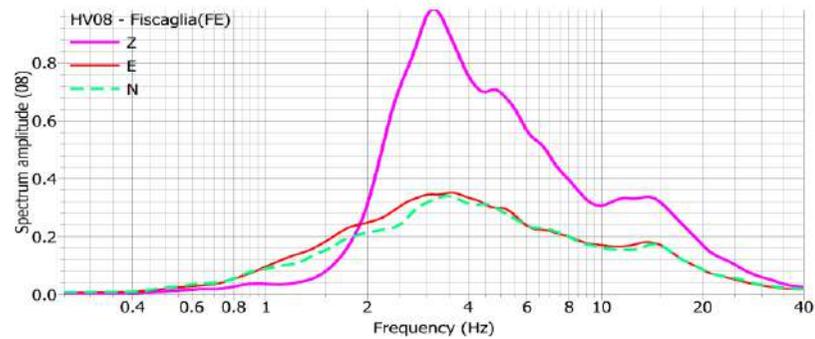
44.80856°N

12.012160°E

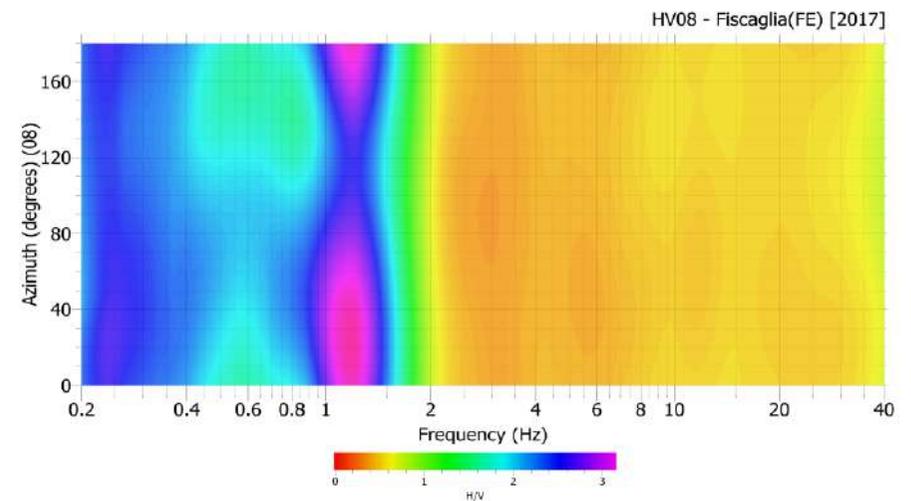
**$F_0: 1,23 \pm 0,06$  Hz**

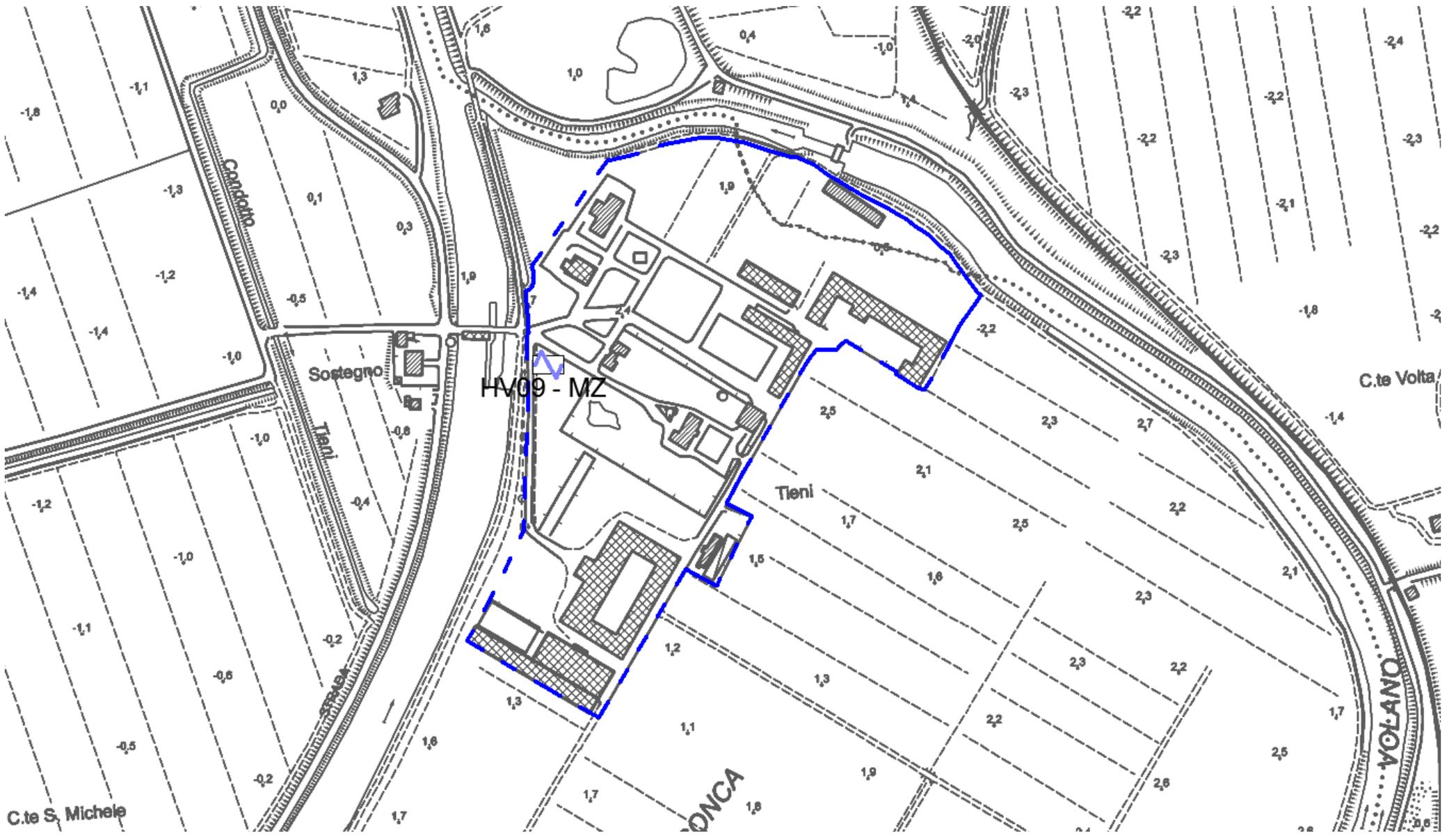


spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione





Coordinate geografiche

prova: HV09

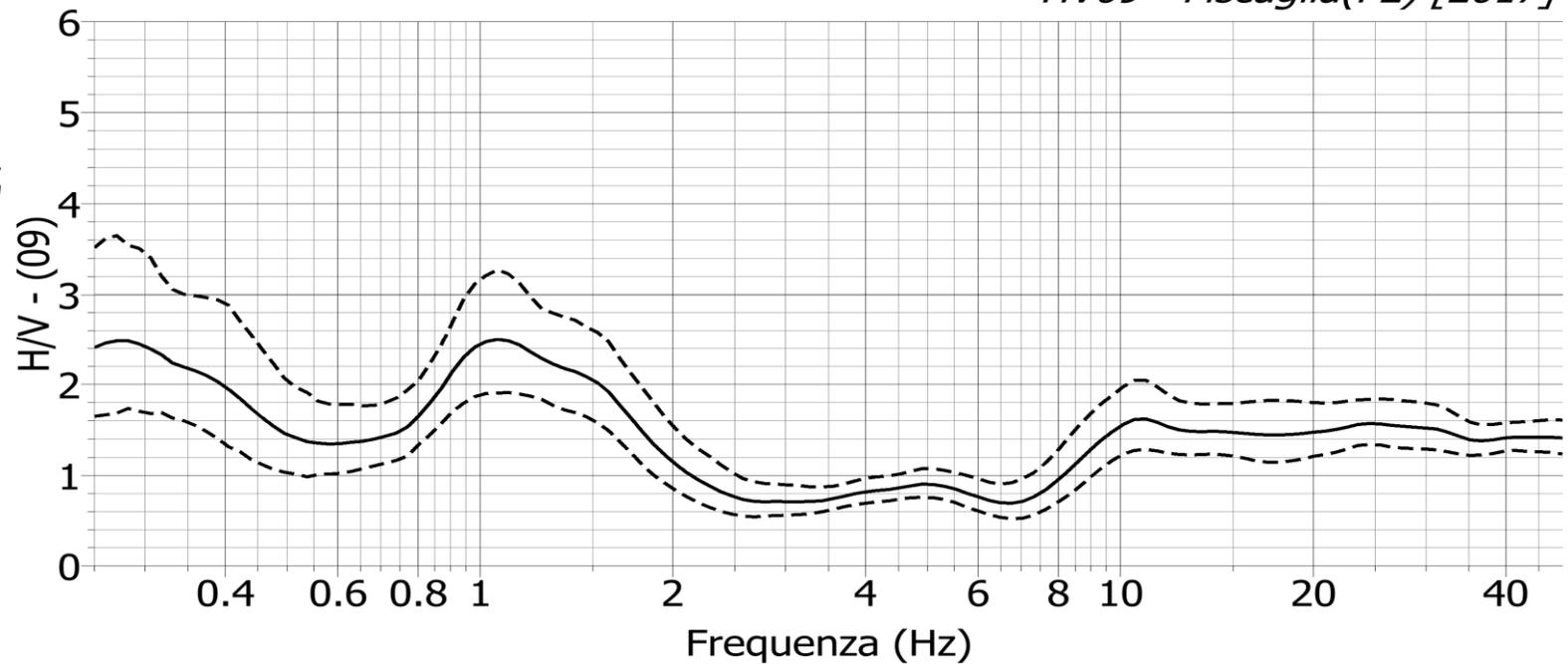
44.82292°N

12.03844°E

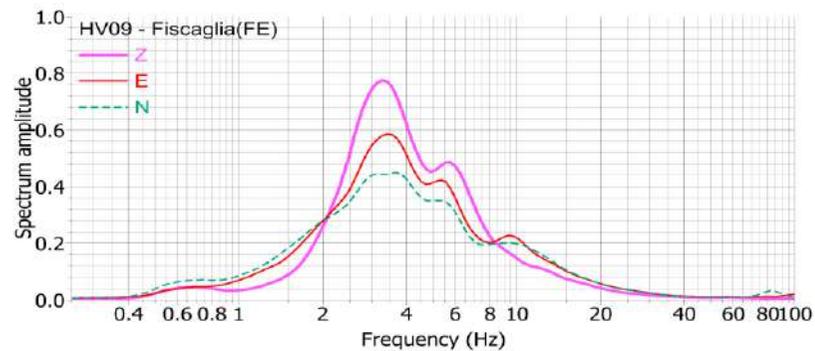
**$F_0: 1,19 \pm 0,06$  Hz**

**Ampiezza: 2,4**

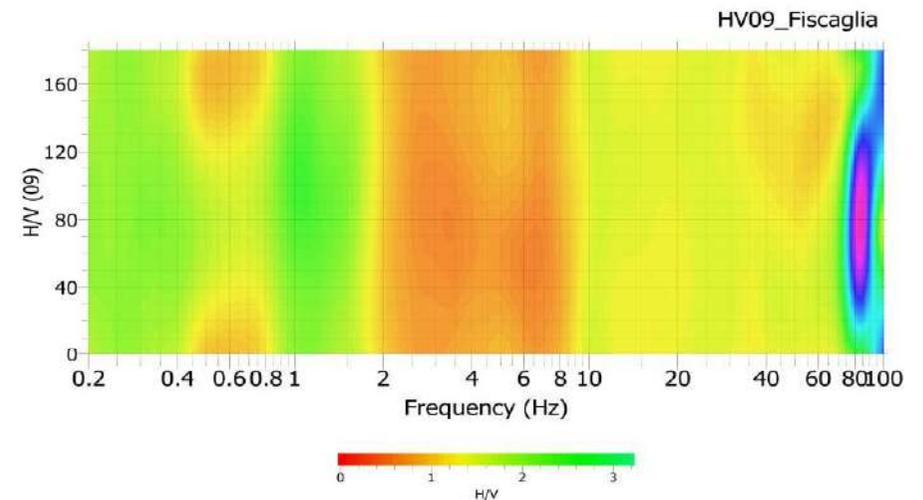
*HV09 - Fiscaglia(FE) [2017]*

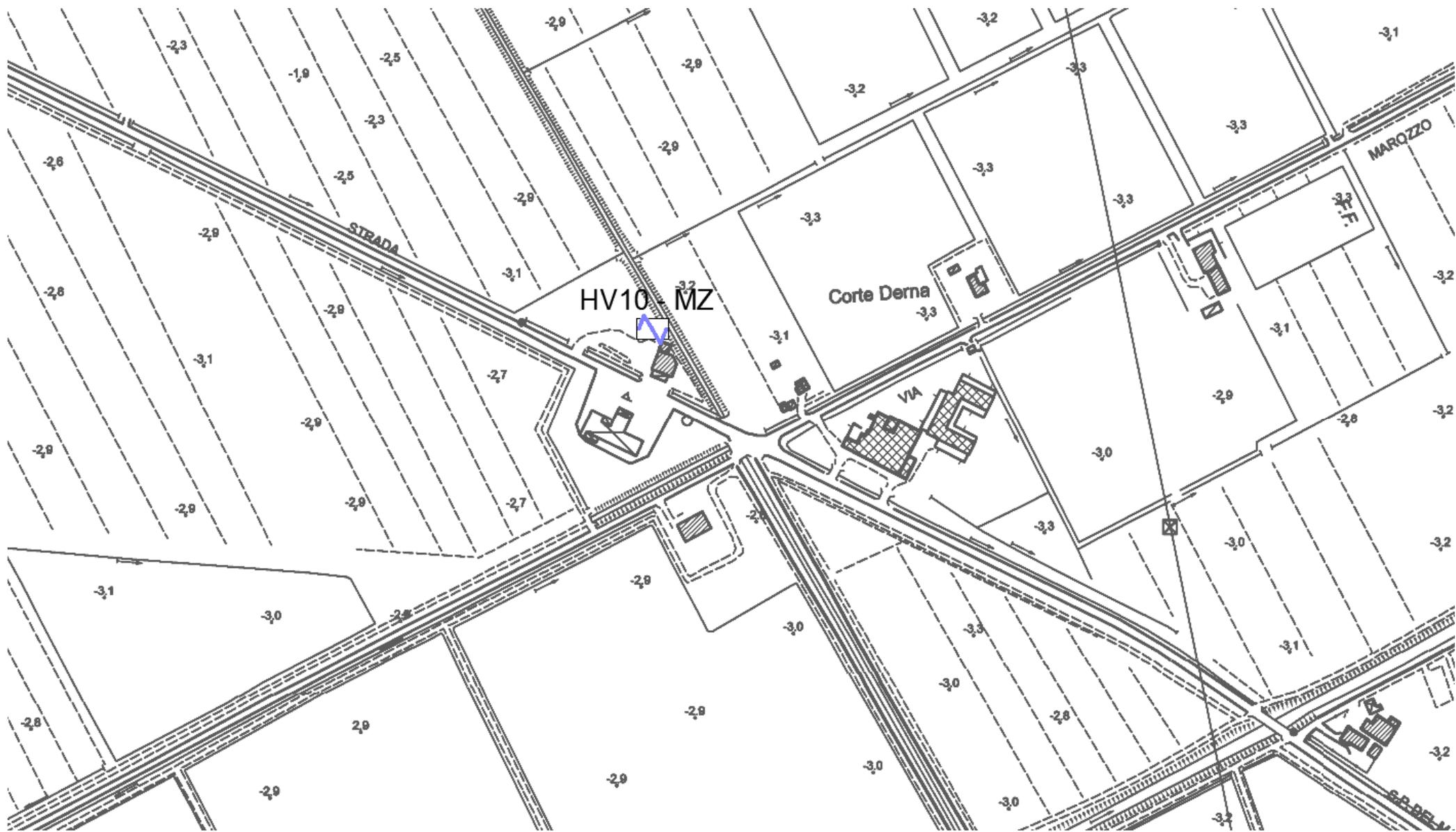


spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione





Coordinate geografiche

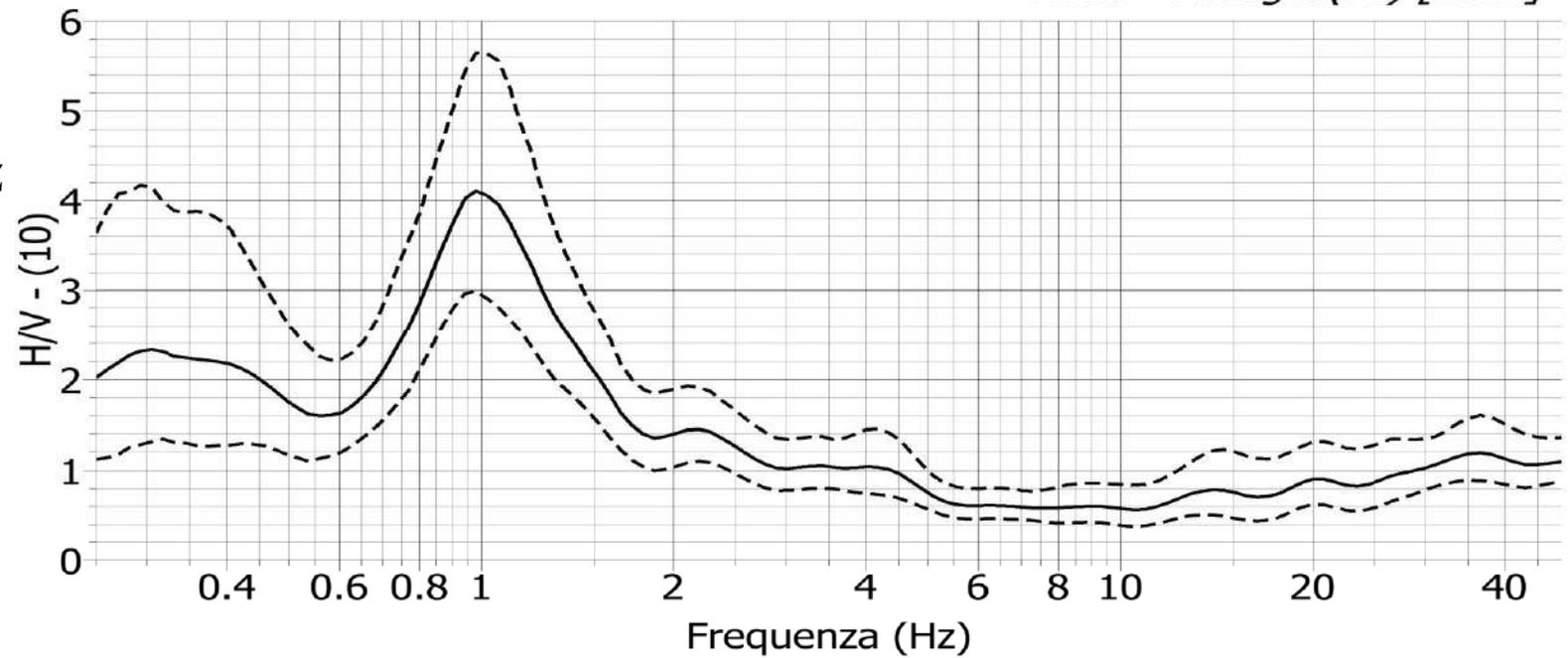
prova: HV10

44.776508°N

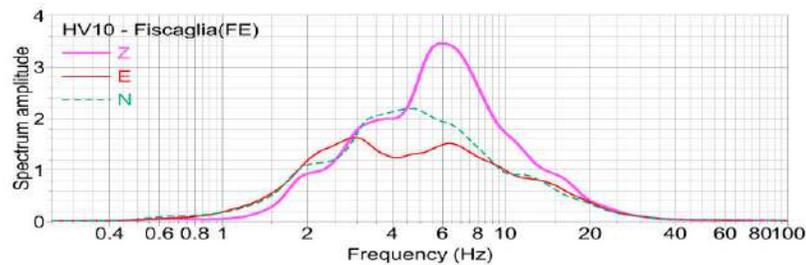
12.07421 °E

**$F_0: 1,09 \pm 0,07$  Hz**

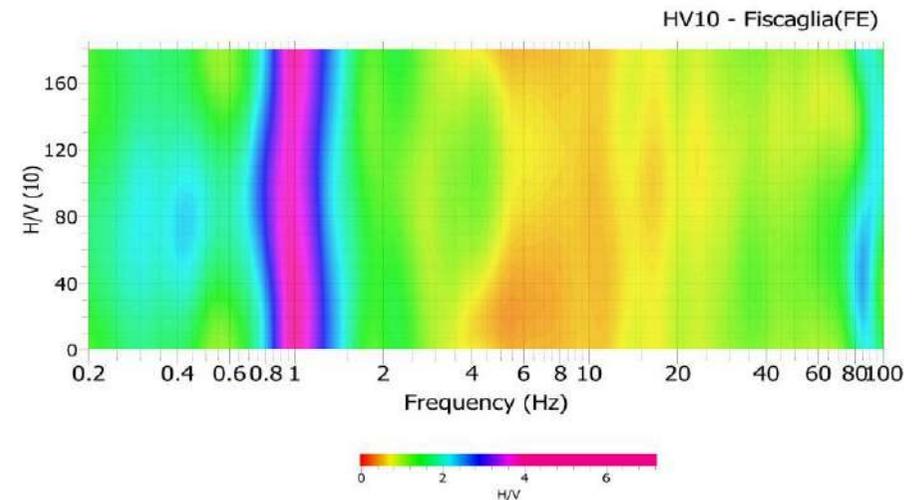
**Ampiezza: 3,8**



spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione





Coordinate geografiche

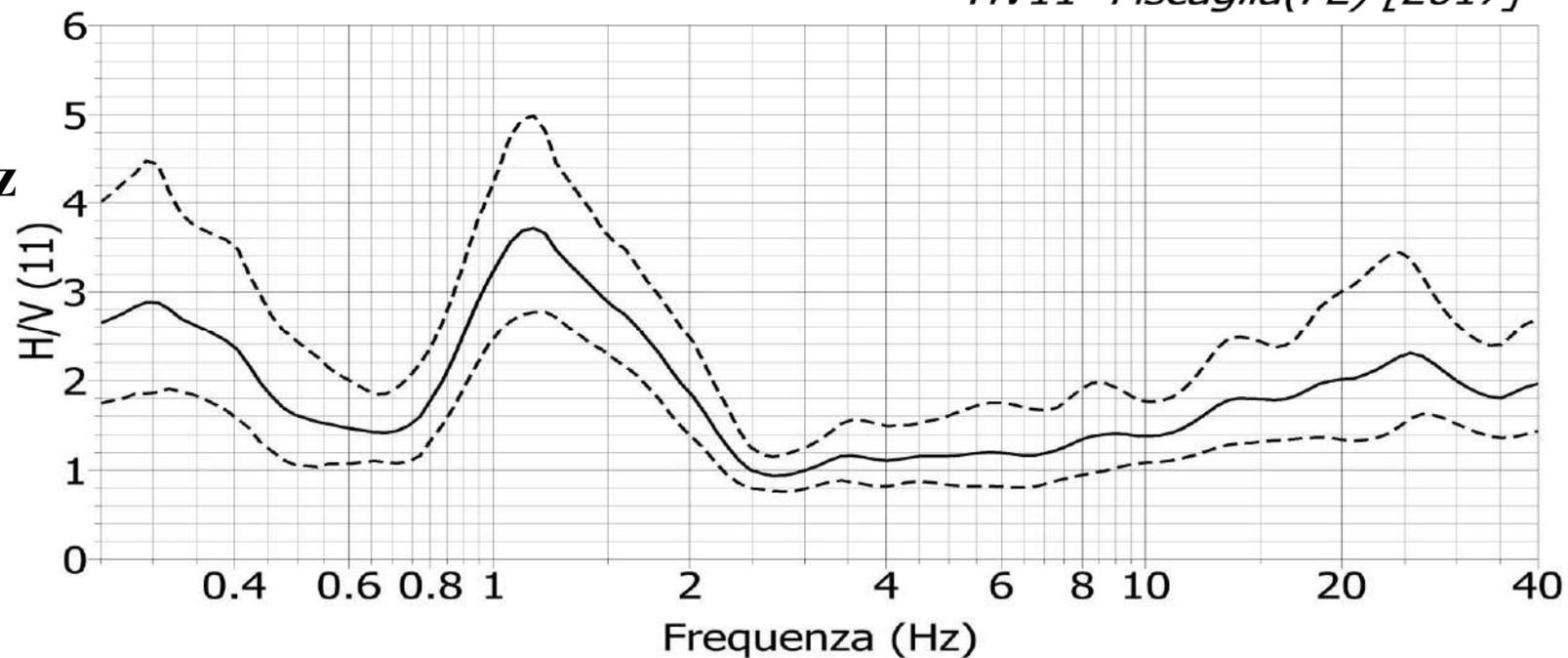
prova: HV11

44.82444°N

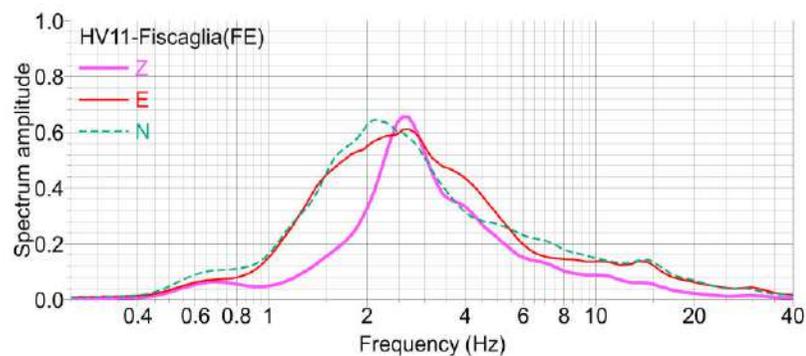
12.09584°E

**$F_0: 1,20 \pm 0,05$  Hz**

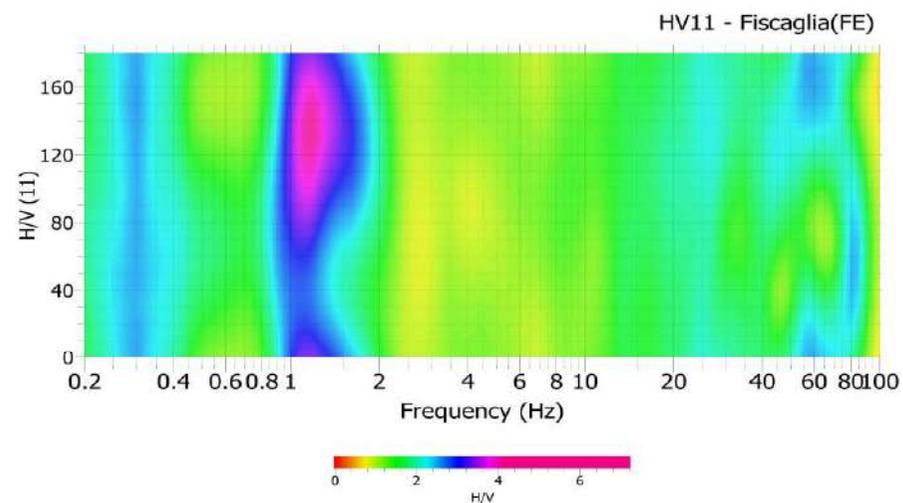
**Ampiezza: 3,6**



spettri di Fourier normalizzati



analisi direzione



**RELAZIONE SULLE INDAGINI  
SISMICHE**

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

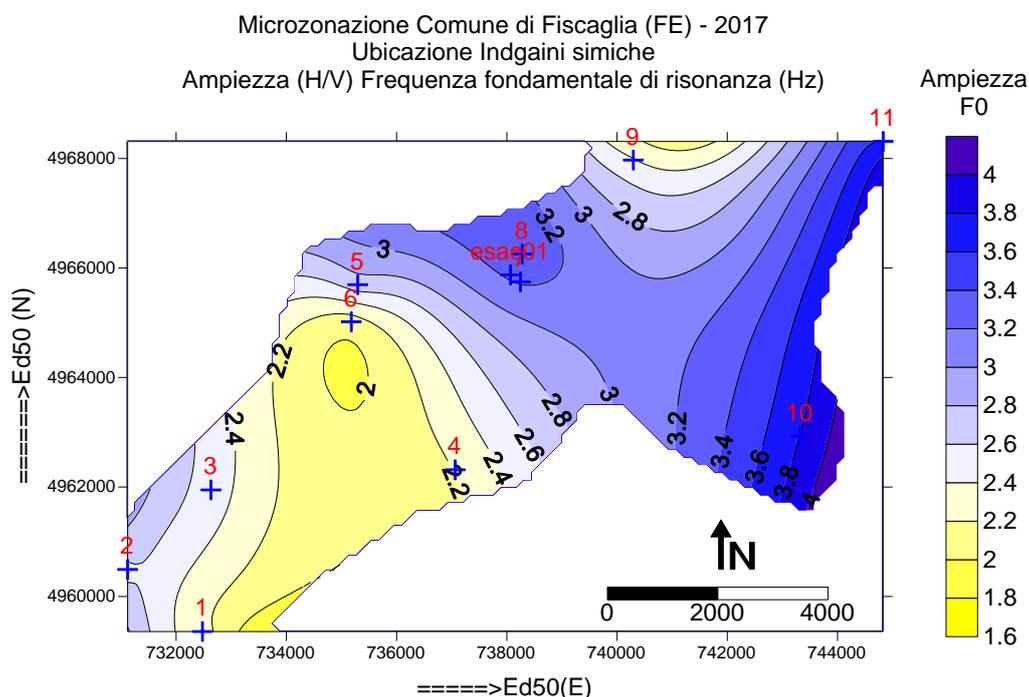
**Indagine sismica con la tecnica della sismica  
passiva: ESAC e H/V per la determinazione  
del profilo profondo di Vs e della frequenza di  
risonanza dei terreni in alcuni siti nel Comune  
di Fiscaglia (FE)**

***Luglio 2017***

**Committente:** Studio Geologo Veronese

**Tecnico:** Dr. Nasser Abu Zeid

# Indagine sismica con la tecnica della sismica passiva: ESAC e H/V per la determinazione del profilo profondo di Vs e della frequenza di risonanza dei terreni in alcuni siti nel Comune di Fiscaglia (FE)



## - Relazione Geofisica -

Luglio 2017

*Teamgeofisica.ceg (centro elaborazione dati geofisici)*

Via G. Fabbri, 342 - 44124 FERRARA (FE)

Tel./Fax 0532-8748912

Mail: teamgeofisica.ceg@gmail.com

## INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	TECNICHE D'INDAGINE	1
2.1.	Sismica passiva (Enhanced Spatial autocorrelation "ESAC")	1
2.2.	Rapporti spettrali (H/V)	3
2.2.1.	Il metodo HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio)	4
3.	ACQUISIZIONE DATI	6
3.1.	Dati ESAC	6
3.2.	Dati H/V	8
4.	ANALISI DATI	8
4.1.	Dati ESAC	8
4.2.	Dati rapporti spettrali (H/V)	10
5.	RISULTATI	10
5.1.	Prova ESAC	10
5.1.	Prove dei rapporti spettrali (H/V)	13
6.	CONCLUSIONI	16
7.	BIBLIOGRAFIA	18

## ELENCO DELLE FIGURE E TABELLE

---

Figura 1: modello di sottosuolo ad un grado di libertà (SDOF) .....	4
Figura 2a. Esempi di sismogrammi sperimentali acquisiti lungo il profilo sismico. Le linee verticali rappresentano il treno d'onda registrato da ciascun geofono.....	7
Figura 2b. Geometria delle antenne sismiche utilizzate. Colore blu: profilo sismico.....	7
Figura 3. Curva di dispersione delle onde Rayleigh del profilo sismico ESAC01.....	9
Figura 4. Sismogramma del data set di rumore sismico acquisito in campo libero a Fiscaglia (HV01). Z: componente verticale, N: componente orizzontale in direzione N-S e E: componente orizzontale in direzione E-W.....	10
Figura 5. Il profilo verticale VS ottenuto per l'area indagata dal profilo sismico. In base al modello sismico è stata determinata la VS30 che risulta pari a 146 m/s $\pm$ 4 m/s (RMS=1.5%). .....	12
Figura 6. Il profilo verticale $G_{max}$ ( $\mu$ : modulo di rigidità dinamico) dell'area indagata dal profilo sismico, ottenuto dal profilo di velocità ( $V_s$ ) mediante l'equazione $\mu = \rho * V_s^2$ .....	12
Figura 7. Spettro medio dei rapporti spettrali (H/V) effettuate in campo libero della prova n. 01 acquisita nella vicinanza dello stadio di Fiscaglia (FE). Le frecce indicano le frequenze di risonanza tipiche dei terreni investigati. F0: frequenza di risonanza dei terreni.....	14
Figura 8: mappa della distribuzione delle frequenze fondamentali di risonanza nell'area oggetto di studio. Croce: numero prova H/V .....	15
Figura 9: relazione tra frequenza di risonanza di edifici in c.a. e n. di piani degli stessi. ....	16
Tabella 1. Dati tecnici dei profili sismici.....	6
Tabella 2. Modello sismico (Onde S) del sottosuolo investigato. In appendice A sono riportati i valori numerici del profilo completo.....	11
Tabella 3: elenco delle frequenze di risonanze 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 nel periodo 20-29 luglio 2017 una campagna d'indagine geofisica nel territorio del Comune di Fiscaglia (FE). Scopo dell'indagine è quello di determinare sia la velocità di propagazione delle onde di taglio fino al substrato sismico eventualmente raggiungibile, oltre alla determinazione della frequenza di risonanza dei terreni. 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), mentre è stata impiegata la tecnica dei rapporti spettrali H/V per la determinazione della frequenza (o periodo) di risonanza dei terreni.

## 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 14 gennaio 2008 dal titolo “Norme tecniche per le costruzioni”, impone di classificare i terreni, su cui saranno eseguite opere edili di una certa rilevanza, sulla base del parametro  $V_{s30}$ . La classificazione dei terreni riporta cinque categorie, definite con simbologia alfanumerica da A ad E e successive integrazioni S1 e S2, a cui corrisponde una valutazione quantitativa della risposta sismica dei terreni sottoposti ad una accelerazione sismica attesa, predefinita per ciascuna classe. 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);

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i}} \quad eq.1$$

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.

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 ( $V_s > 800$  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

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

$$V_R \cong 0.92 V_S$$

dove,

$V_R$ : velocità di fase dell'onda Rayleigh

$V_S$ : velocità di propagazione dell'onda di taglio

$\nu$  : 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:

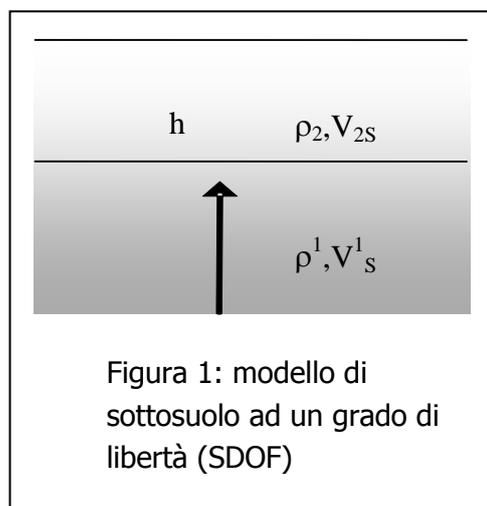
- c) onde di volume (P ed S) e
- d) onde superficiali (Rayleigh “R” e Love “L”).

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 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 acustica 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).

### 2.2.1. 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  $Z_1 = \rho_1 v_1$  (dove  $\rho$  è la densità e  $v$  la velocità di un’onda di volume -P o S-) ad un mezzo con impedenza acustica  $Z_2 = \rho_2 v_2$ , 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 e  $\eta$  il coefficiente di viscosità.

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 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 ESAC

Il sito oggetto di indagine è stato investigato in data 22/07/2017 mediante l'esecuzione di n.1 profilo sismico tipo "ESAC" (**Tav. 1**) della lunghezza complessiva di 184m (Tabella 1).

Tabella 1. Dati tecnici dei profili sismici.

Sigla	Lunghezza (m)	Passo intergeofonico (m)	Orientazione
Profilo 1	184*	8,0	44.80359°N 12.001154°E NE-----SE
*geometria a forma di L. Coordinate piane: Ed50_X 738066.423, Ed50_Y 4965872.137			

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

Per l'acquisizione dei dati è stato impiegato un sismografo digitale RAS 24 – Seistronix (ABEM) con 24 geofoni verticali con frequenza naturale pari a 4,5 Hz, equidistanziati 8.0 m. La lunghezza temporale di ogni registrazione è stata pari a 32 secondi con passo di campionamento di 2 ms. In Figura (2a) è riportato uno esempi di acquisizione composto da 24 tracce sismiche secondo la geometria delle due antenne sismiche utilizzate (Fig. 2b).

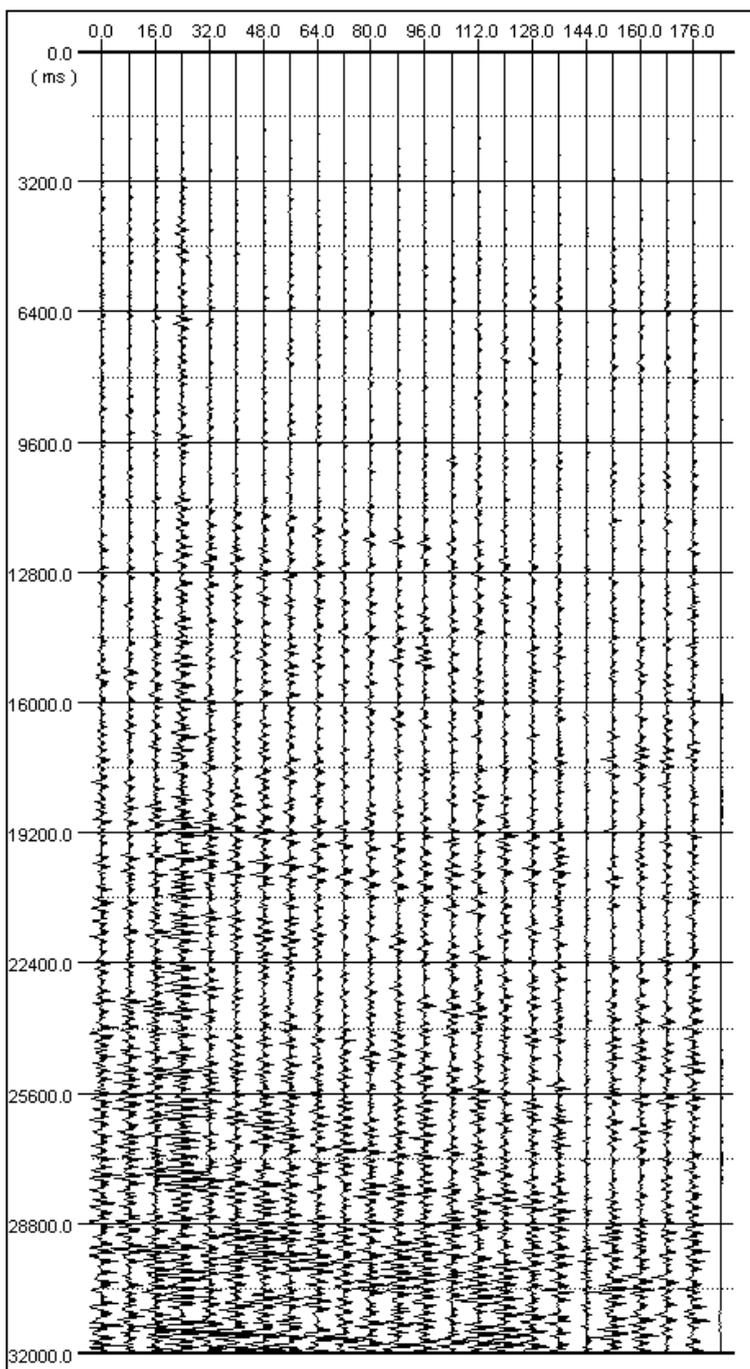


Figura 2a. Esempi di sismogrammi sperimentali acquisiti lungo il profilo sismico. Le linee verticali rappresentano il treno d'onda registrato da ciascun geofono.

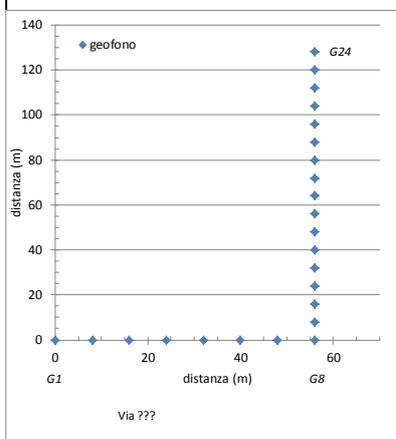


Figura 2b. Geometria delle antenne sismiche utilizzate. Colore blu: profilo sismico.

### 3.2. DATI H/V

L'area oggetto di indagine è stata investigata nel periodo 22-29 luglio 2017 mediante l'esecuzione di n.11 prove H/V (TAV-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). La lunghezza temporale di ogni registrazione è stata compresa tra 45 minuti e 60 minuti con passo di campionamento di 250 Hz (in figura 5 un esempio di acquisizione). In Tabella 2 si riportano i dettagli tecnici delle prove H/V eseguite.

*Tabella 2: elenco delle prove HVSR effettuate per la determinazione della(e) frequenza(e) di risonanza del terreno. (per l'ubicazione si rimanda alla Figura X e Tav. 1).*

ID prova HVSR	durata acq. (minuti)	Ed50_X (m)	Ed50_Y (m)	Lat. (geografica)	Long. (geografica)
<b>Loc. "Migliarino, Fiscaglia (FE)</b>					
H/V-1*	60	732477.485	4959359.672	44.74809	11.935750
H/V-2	60	731120.246	4960492.029	44.75871	11.918685
H/V-3**	50	732632.363	4961945.774	44.77129	11.938884
<b>Loc. "La Cascina", Fiscaglia (FE)</b>					
H/V-4*	45	737061.966	4962313.29	44.77314	11.994959
<b>Loc. Fiscaglia (FE)</b>					
H/V-5	60	735296.524	4965694.454	44.80412	11.974240
H/V-6	60	735178.264	4965016.053	44.79806	11.972433
H/V-7	60	738248.555	4965744.292	44.80359	12.011540
H/V-8	60	738278.796	4966252.654	44.80816	12.012160
H/V-9	45	740295.580	4967970.797	44.82292	12.03844
H/V-10	45	743318.699	4962921.628	44.77651	12.07421
H/V-11	45	744827.107	4968311.097	44.82444	12.09584
*prova effettuata nella vicinanza di edificio scolastico					
**prova effettuata nella vicinanza dello stadio di Migliarino					

## 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 (VR) per ogni copia di frequenza e distanza:

$$\rho(r, \omega_0) = J_0 \left( \frac{\omega r}{c(\omega_0)} \right) \quad eq.3$$

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

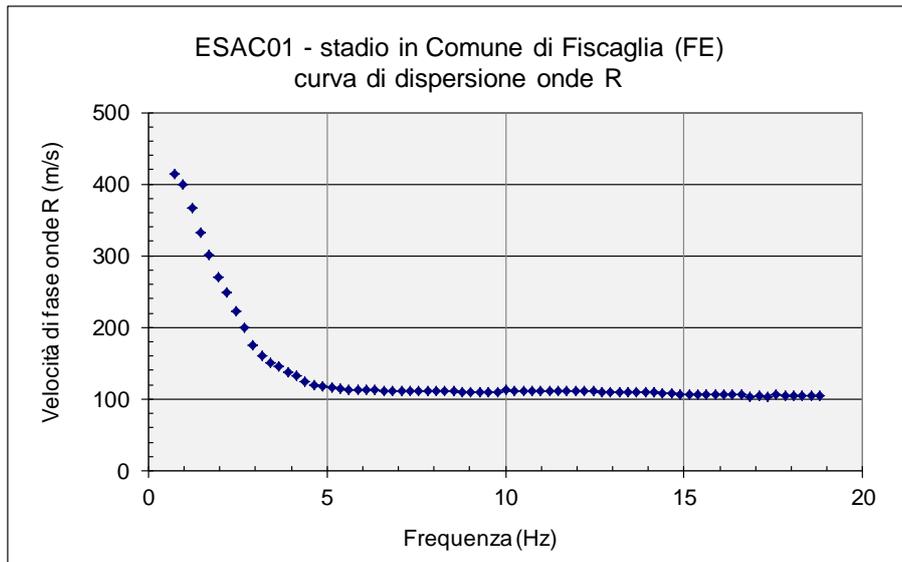


Figura 3. Curva di dispersione delle onde Rayleigh del profilo sismico ESAC01.

Il risultato di tale analisi rappresenta il cosiddetto spettro di potenza da cui si ottiene la curva di dispersione sperimentale delle onde "R" (figura 3) e successivamente, attraverso una procedura di modellazione numerica, la determinazione delle velocità delle onde di taglio "S" (figura 5).

## 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. Le figura 4 illustra esempio di sismogramma 3C registrato presso il sito n. 1 (H/V-01) registrato in campo libero. I sismogrammi delle altre prove sono riportati in Allegato 2.

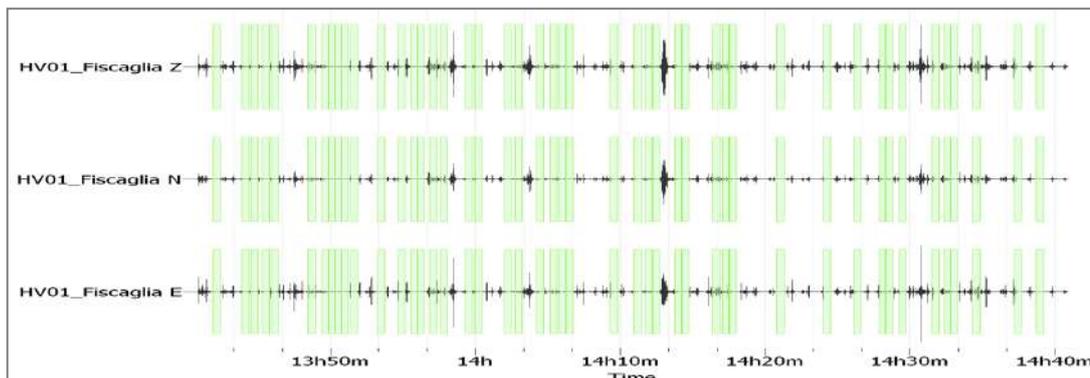


Figura 4. Sismogramma del data set di rumore sismico acquisito in campo libero a Fiscaglia (HV01). Z: componente verticale, N: componente orizzontale in direzione N-S e E: componente orizzontale in direzione E-W.

## 5. RISULTATI

### 5.1. PROVA ESAC

Il modello sismico  $V_s$  ottenuto dall'interpretazione quantitativa della curva di dispersione (figura 3) e riportata in figura 5. Il modello numerico fino a 30 metri è riportato in Tabella 2 mentre quello completo fino a 215 m è riportato in Appendice A. Il modello sismico così ottenuto non ha raggiunto valori di  $V_s \geq 800$  m/s anzi il valore massimo di  $V_s$  ottenuto alla massima profondità raggiunta risulta essere pari a 443 m/s. I valori di " $V_s$ " del profilo sismico ottenuto per l'area in oggetto sono risultati essere compresi tra 99 m/s e 443 m/s.

In figura (6) si riporta l'andamento del profilo di rigidità dinamica ( $G_0$  o  $G_{max}$ ) con la profondità.

I valori  $V_{S30}$  determinati per il sito, secondo l'eq.1, risultano pari a **146 m/s**  $\pm$  4 **m/s** collocando il sottosuolo in **CLASSE D** (D.M. 14 gennaio 2008).

Tabella 2. Modello sismico (Onde S) del sottosuolo investigato. In appendice A sono riportati i valori numerici del profilo completo.

VS30:146 m/s $\pm$ 4 m/s	PROFILO sismico fino a 30 metri (modello numerico fino a 215 metri è riportato in Appendice A)		
	Sismo-strato	Velocità (m/s)	Profondità letto (m)
1	98.5	2.0	0.0
2	118.5	5.3	3.3
3	117.3	8.1	2.8
4	114.3	11.1	3.0
5	130.2	14.2	3.1
6	152.2	17.4	3.2
7	181.9	20.8	3.4
8	186.5	24.3	3.5
9	214.6	27.9	3.6
10	239.0	31.7	3.8

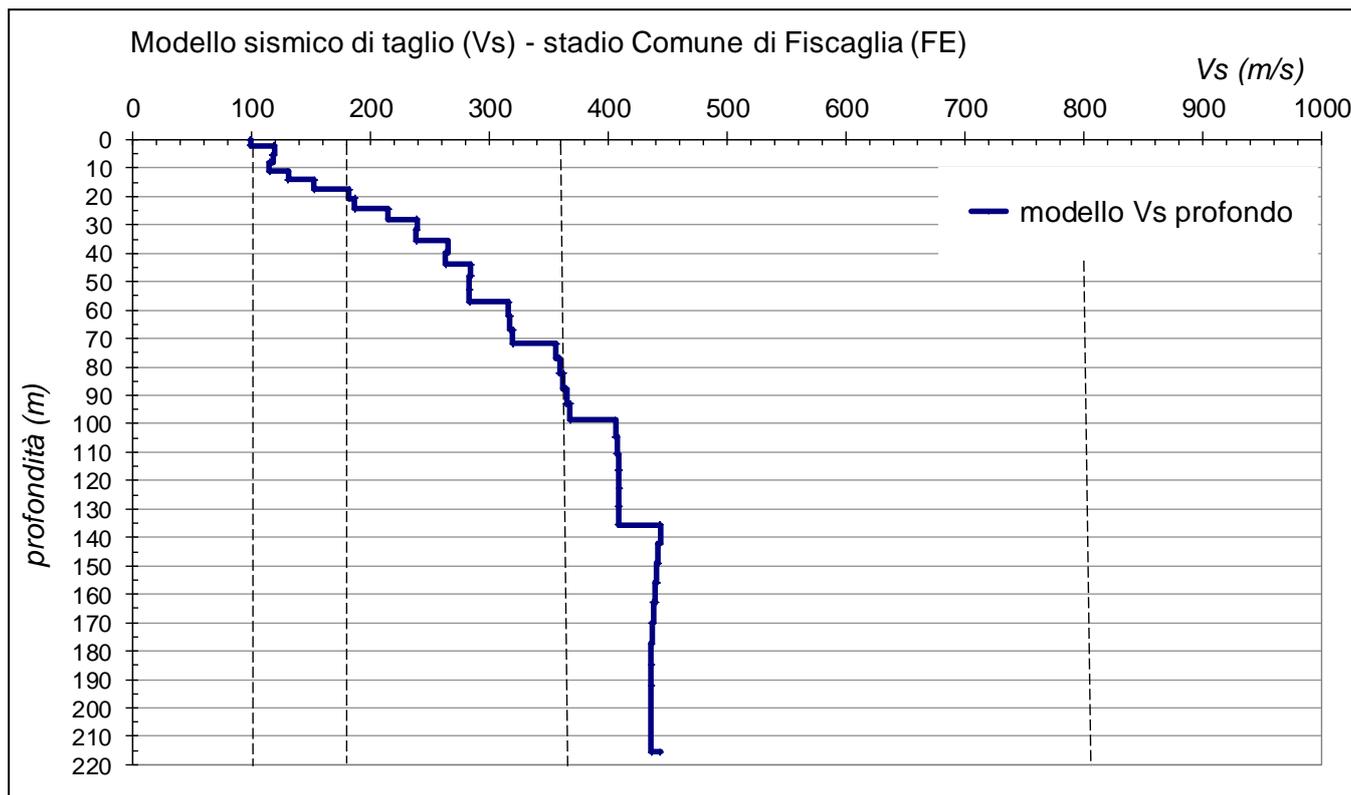


Figura 5. Il profilo verticale VS ottenuto per l'area indagata dal profilo sismico. In base al modello sismico è stata determinata la VS30 che risulta pari a 146 m/s  $\pm$  4 m/s (RMS=1.5%).

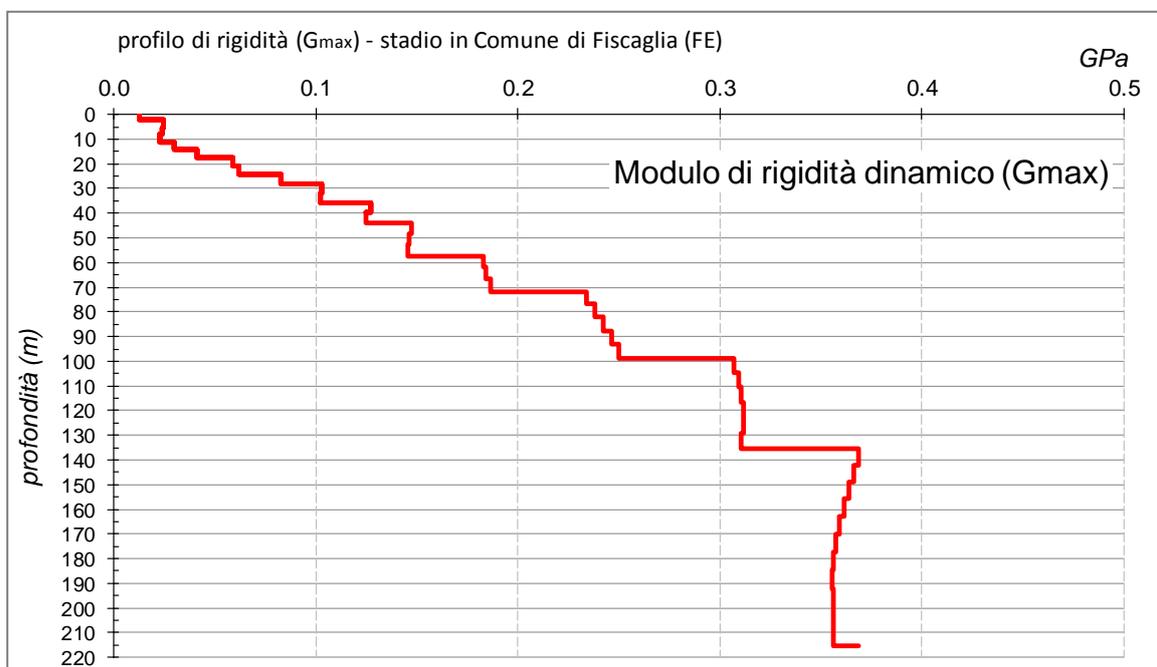


Figura 6. Il profilo verticale  $G_{max}$  ( $\mu$ : modulo di rigidità dinamico) dell'area indagata dal profilo sismico, ottenuto dal profilo di velocità (Vs) mediante l'equazione  $\mu = \rho * Vs^2$ .

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

In Figura 7 si riporta un esempio dei risultati dell'analisi spettrale delle prove H/V ottenuti utilizzando il codice di calcolo Geopsy (vers. 2.9, 2016). Il resto delle curve medie dei rapporti spettrali sono riportati nell'Allegato 3. Mentre le frequenze di risonanze ottenute sono riportate in Tabella 3.

I risultati ottenuti permettono di formulare quanto segue:

1. la frequenza di risonanza con rapporto H/V intorno/superiore a 2, denominata  $F_0$  (Tabella 3), risulta essere compresa tra 1,03 – 1.26 Hz con valore medio pari a 1,16 Hz. Questo valore corrisponde ad un periodo medio di risonanza intorno a 0,86 secondi e suggerisce la presenza di discontinuità acustica collocata a profondità compresa tra 70m e 100m come risulta dal modello sismico di  $V_s$  (Fig. 5),

Tabella 3: elenco delle frequenze di risonanze ottenute dalle prove HVSR.

prova H/V	Frequenza (Hz)	Valore Frequenza	Periodo $T_0$ (sec)	Ampiezza (A)
HV01	$F_0$	$1,04 \pm 0,06$	<b>0,85</b>	<b>2,3</b>
HV02	$F_0$	$1,10 \pm 0,08$	<b>0,91</b>	<b>2,5</b>
HV03	$F_0$	$1,14 \pm 0,09$	<b>0,88</b>	<b>2,5</b>
HV04	$F_0$	$1,26 \pm 0,08$	<b>0,79</b>	<b>2,2</b>
HV05	$F_0$	$1,21 \pm 0,06$	<b>0,83</b>	<b>2,7</b>
HV06	$F_0$	$1,24 \pm 0,06$	<b>0,81</b>	<b>2,1</b>
HV07	$F_0$	$1,03 \pm 0,04$	<b>0,97</b>	<b>3,2</b>
HV08	$F_0$	$1,23 \pm 0,06$	<b>0,81</b>	<b>3,3</b>
HV09	$F_0$	$1,19 \pm 0,06$	<b>0,84</b>	<b>2,4</b>
HV10	$F_0$	$1,09 \pm 0,07$	<b>0,92</b>	<b>3,8</b>
HV11	$F_0$	$1,20 \pm 0,05$	<b>0,83</b>	<b>3,6</b>
	<b>Media <math>F_0</math></b>	$1,16 \pm 0,06$	<b>0,86</b>	<b>2,8</b>

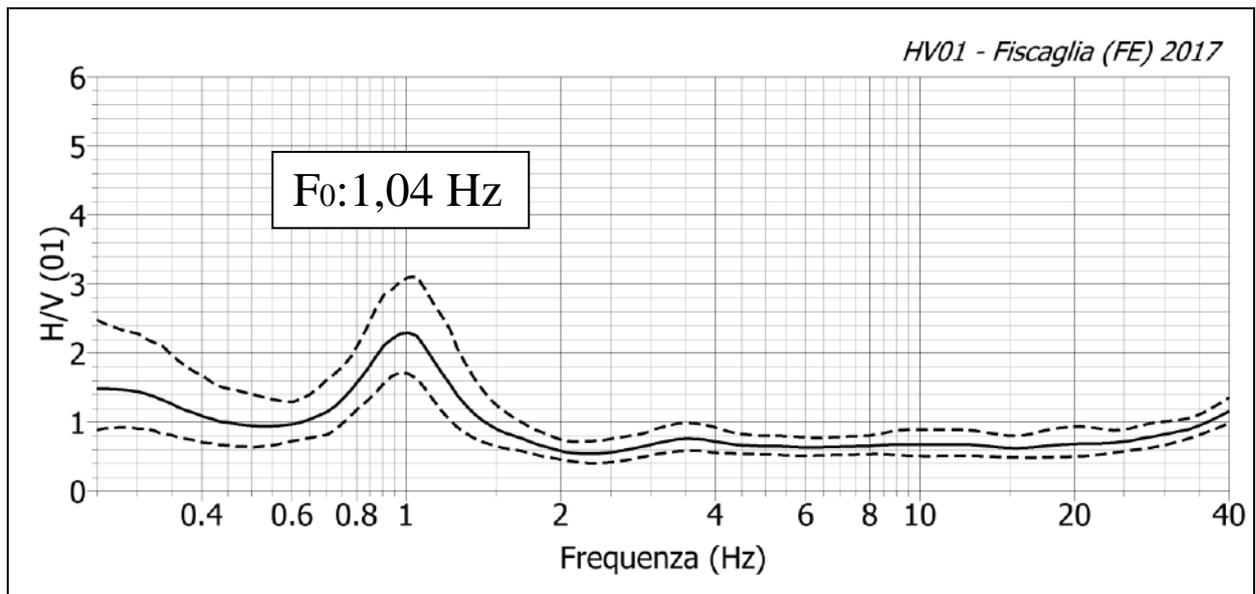


Figura 7. Spettro medio dei rapporti spettrali (H/V) effettuate in campo libero della prova n. 01 acquisita nella vicinanza dello stadio di Fiscaglia (FE). Le frecce indicano le frequenze di risonanza tipiche dei terreni investigati. F0: frequenza di risonanza dei terreni.

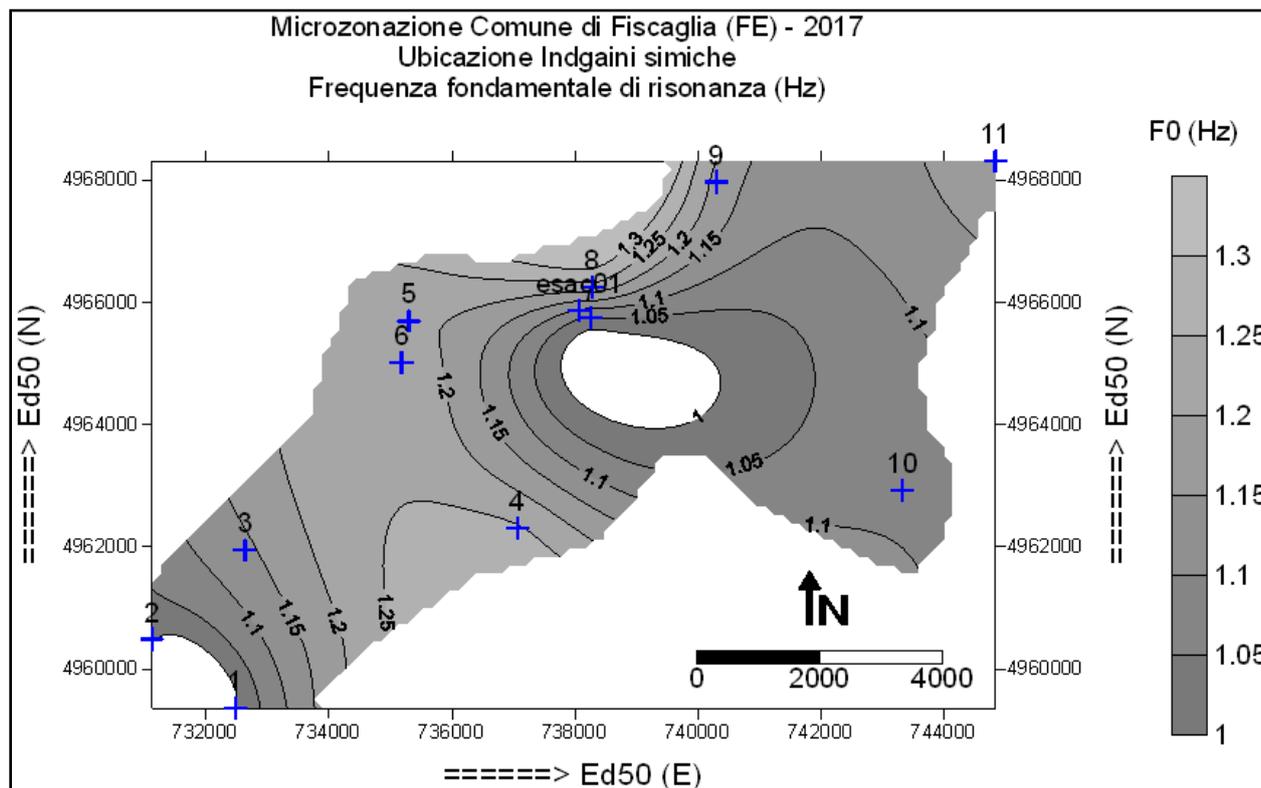


Figura 8: mappa della distribuzione delle frequenze fondamentali di risonanza nell'area oggetto di studio. Croce: numero prova H/V

Si ritiene utile ricordare il lettore dell'importanza della determinazione della frequenza di risonanza dei terreni di fondazione per la pianificazione urbanistica/progettazione. A questo proposito si riporta in Figura 9 la relazione semplificata tra il numero dei piani di edifici costruiti in C.A. e la frequenza di risonanza degli stessi. Se la frequenza di risonanza dei terreni di fondazione coincide con quella dei fabbricati avviene il fenomeno della doppia risonanza che può portare al loro collasso se non propriamente progettate.

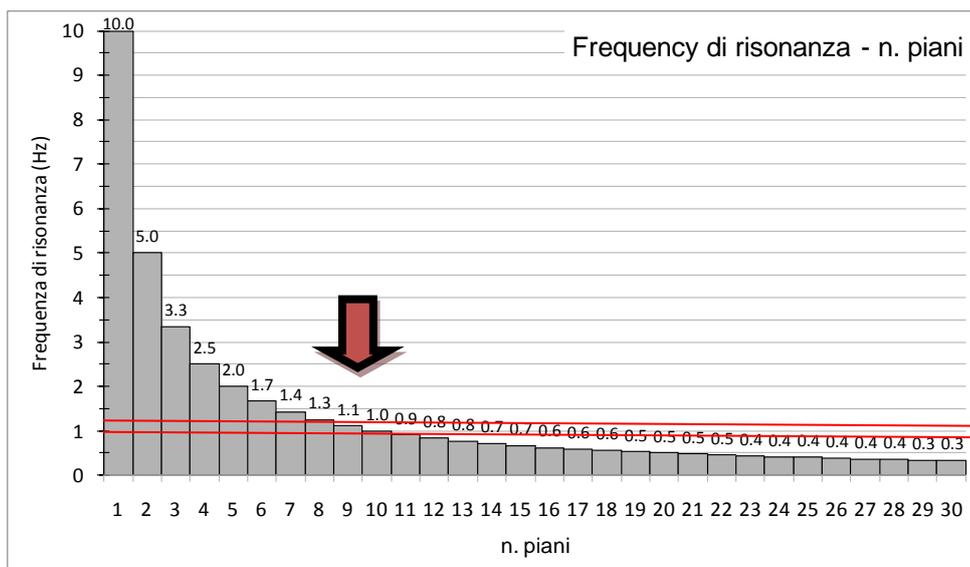


Figura 9: relazione tra frequenza di risonanza di edifici in c.a. e n. di piani degli stessi.

## 6. CONCLUSIONI

Le indagini geofisiche effettuate nel mese di luglio 2017 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 (215 m) e di determinare la frequenza di risonanza fondamentale del terreno in 8 punti di misura.

L’analisi del modello sismico evidenzia la presenza di numerosi sismo-strati con andamento crescenti dei valori di  $V_s$  che risultano essere compresi tra 99 m/s e 443 m/s. L’indagine sismica non ha raggiunto il substrato sismico, definito come  $V_s \geq 800$  m/s.

Dal modello sismico ottenuto è stata anche determinata la velocità  $V_{S30}$  risultata pari a **146 m/s  $\pm$  4,0 m/s** che colloca il sottosuolo in **classe D** dei terreni di fondazione.

In Figura (6) 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/m<sup>3</sup> e 1.900,00 per tutti i sismografi ad accessione del primo ove il valore è pari a 1.450,0 kg/m<sup>3</sup>.

L'indagine dei microtremori dei rapporti spettrali (H/V) "Nakamura" ha consentito di determinare la frequenza (F<sub>0</sub>) tipica di risonanza dei terreni investigati che risultata essere compresa tra 1,03 Hz (T=0,97 sec) e 1,26 Hz (T=0,79 sec). Il valore medio della frequenza di risonanza risulta essere pari 1,16 Hz (T=0,86 sec). I valori della frequenza di risonanza determinate per l'area in oggetto sono incompatibili con costruzioni in c.a. di 7-9 piani.

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.