

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**COLLEGAMENTO FERROVIARIO DELL'AEROPORTO DEL SALENTO  
CON LA STAZIONE DI BRINDISI**

**INDAGINI GEOFISICHE**

**PROVE DOWN-HOLE ED HVSR**

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I A 7 K 0 0 D 6 9 I G G E 0 0 0 5 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	T. Vicenzetto	Febbraio 2020	S. Giugliano	Febbraio 2020	T. Paoletti	Febbraio 2020	M. COMEDINI Febbraio 2020



File: IA7K00D69IGGE0005001A.doc

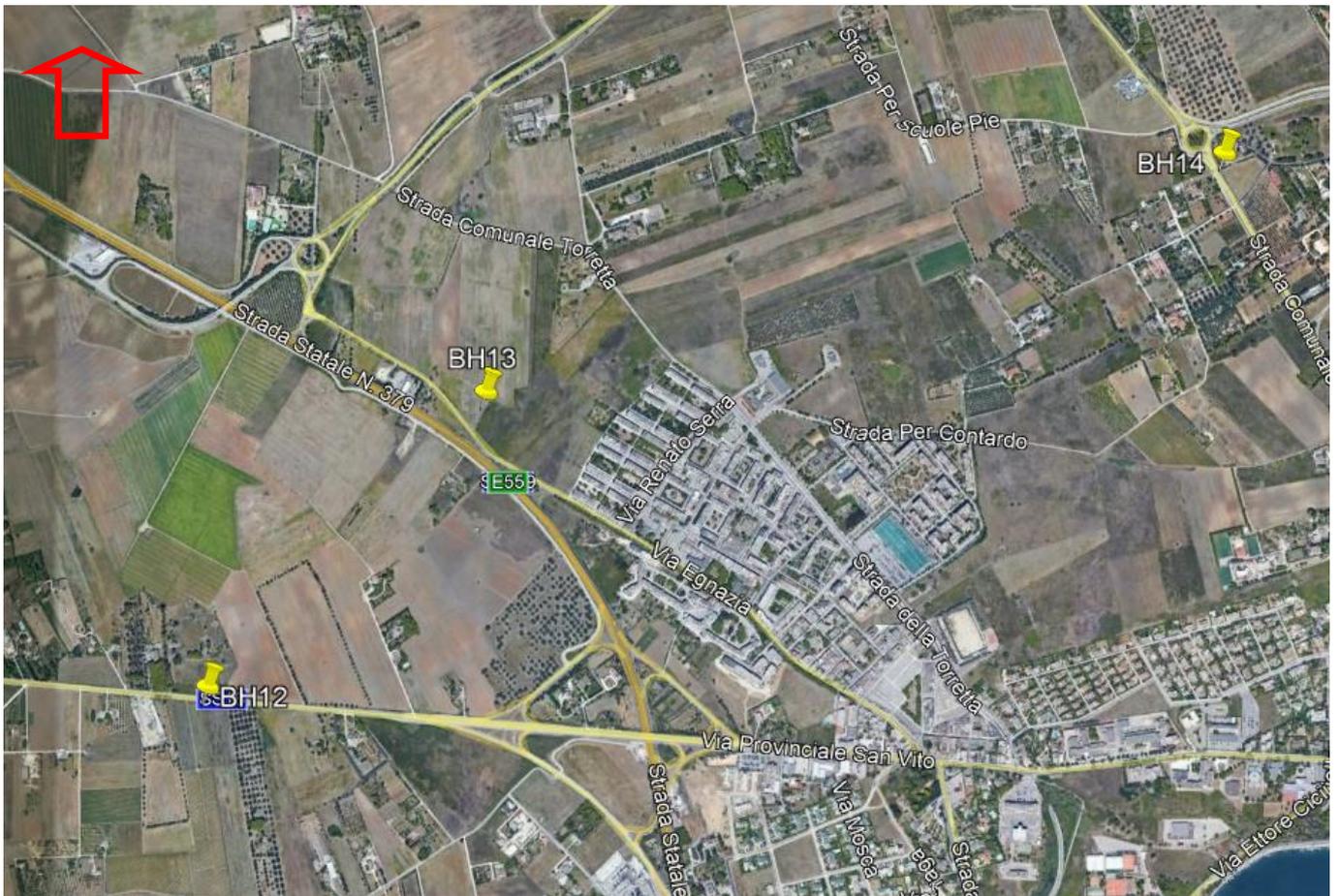
n. Elab.: X

## INDICE

1	PREMESSA .....	3
2	METODOLOGIE DI INDAGINE .....	4
3	INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA DOWNHOLE .....	5
4	ANALISI DEI RISULTATI DEI CAROTAGGI SISMICI DOWN-HOLE .....	8
5	INDAGINE SISMICA CON METODO HVS .....	36
6	RISULTATI INDAGINI SISMICA PASSIVA (HVS) .....	40
7	UBICAZIONE DELLE PROVE GEOFISICHE ESEGUITE .....	49

## 1 PREMESSA

La presente relazione illustra e riassume i risultati delle indagini geofisiche eseguite a supporto del Progetto Definitivo del “Collegamento ferroviario dell’Aeroporto del Salento con la stazione di Brindisi”.



**Fig. 1:** Ubicazione dell'area di intervento con i tre sondaggi di riferimento attrezzati con tubazione per geofisica: BH12, BH13 e BH14 (da Google Earth).

## 2 METODOLOGIE DI INDAGINE

La campagna di misure geofisiche condotta, è consistita in indagini sismiche in foro mediante metodologia Down-Hole. Di seguito si riporta una breve descrizione dei principi base della tecnica d'indagine e i relativi risultati.

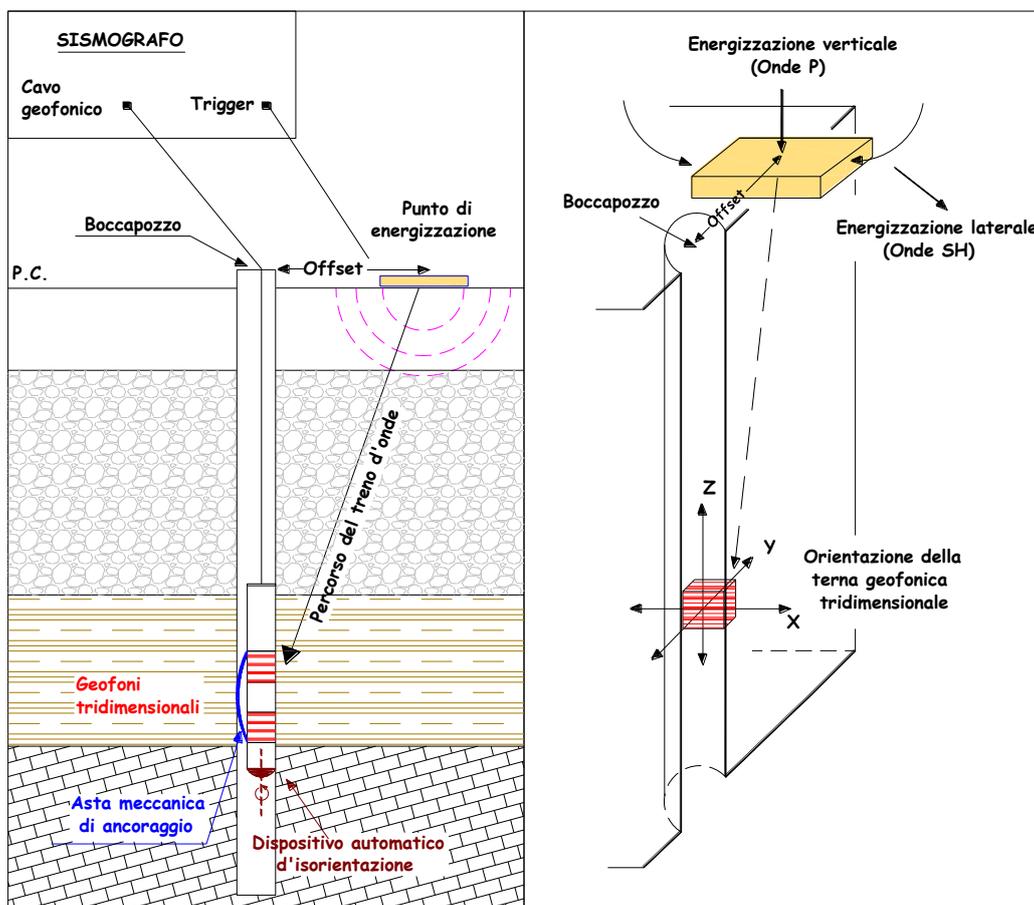


**Fig. 2:** strumentazione impiegata per le prove in foro mediante metodologia down-hole.

### 3 INDAGINE SISMICA CON METODOLOGIA DOWNHOLE

Lo scopo della prova down-hole consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) e di taglio (onde SH), calcolando il tempo ad esse necessario per raggiungere il geofono ricevitore (all'interno del foro di sondaggio) dalla zona sorgente (su piano campagna a distanza nota dal foro). Si suppone che il volume di terreno, interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno di ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo e isotropo.

La prova consiste nel produrre in superficie sollecitazioni verticali, per la generazione di onde di compressione P, e orizzontali, per la generazione di onde di taglio polarizzate orizzontalmente SH, e nel registrare l'istante di primo arrivo del treno d'onde a un sistema composto da un geofono da foro (in questo caso costituito da 5 sensori di cui uno polarizzato verticalmente e quattro polarizzati sul piano orizzontale orientati a 45° l'uno rispetto all'altro), ancorati a profondità nota nel foro di sondaggio (**Fig. 3**).



**Fig. 3:** rappresentazione schematica di un carotaggio sismico per il down-hole.

Conosciuta la distanza tra la sorgente e i ricevitori e determinato il tempo di propagazione, è possibile stimare in maniera accurata la distribuzione delle velocità sismiche (P e SH) in corrispondenza della verticale di misura.

Per generare le onde di compressione P è stata utilizzata una massa battente da 8 kg. Per le onde SH è stato invece utilizzato, come sorgente, un apposito dispositivo, la cui forma permette colpi laterali su entrambi i lati. Il sistema energizzante adottato è in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza, con forme d'onda ripetibili e direzionali, vale a dire con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione e/o di taglio polarizzate su piani orizzontali, ed eventualmente anche verticali. Come sistema di ricezione è stata utilizzata una sonda meccanizzata al cui interno sono alloggiati cinque ricevitori, ciascuno dei quali è costituito da un trasduttore di velocità. Il trasduttore verticale è orientato secondo la lunghezza della sonda, mentre i trasduttori orizzontali, sono disposti in direzioni ad essa perpendicolare e a 45° l'uno dall'altro. I trasduttori hanno una frequenza propria di 12 Hz ed una sensibilità tale da poter ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto dalla sorgente. La sonda possiede un'asta meccanica motorizzata che garantisce l'aderenza tra i ricevitori e le pareti del rivestimento. Il sistema d'acquisizione dati è di tipo multicanale ed è in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica a 24 bit.

Le quattro prove si sono sviluppate secondo le seguenti fasi:

1. Dopo ad aver predisposto un opportuno piano d'appoggio, il dispositivo sorgente è stato collocato sulla superficie in prossimità del foro ad una distanza di 2.00 (BH14), 2.80 (BH 13) e 3.0 m (BH12) e orientato con direzione perpendicolare al raggio condotto dal foro.
2. Il sistema, costituito dai cinque ricevitori, è stato calato a fondo foro.
3. Dopo aver calato il dispositivo si è provveduto ad ancorare quest'ultimo alle pareti del foro.
4. Campionamento del rumore ambientale.
5. È stato quindi attivato il dispositivo sorgente, producendo una sollecitazione che, attivando il trigger, si propaga dalla sorgente verso i ricevitori con vibrazioni di tipo compressivo; di seguito (con energizzazione separata e distinta) sono state generate vibrazioni di tipo SH, dirette perpendicolarmente alla direzione di percussione e polarizzate sul piano orizzontale. Per l'ottenimento di una buona qualità dei dati, è necessario produrre alla sorgente due onde di polarità opposta e sommare le registrazioni d'ogni singolo arrivo, così da individuare in modo migliore l'istante di primo arrivo (metodo cross-over).
6. La prova è stata quindi ripetuta con interdistanza fra le misure pari a 1,0 m per tutto il tratto di sondaggio.

Nel presente rilievo sono stati impiegati rispettivamente fondo scala di 0.2 secondi e passo di campionamento di 0,125 millisecondi. I tempi relativi alle onde P ed SH sono stati letti attraverso uno specifico programma di picking (Front End; precisione dell'ordine di 0,1 millisecondi).

Per avere un buon controllo sulla procedura di lettura dei tempi e valutare al contempo la qualità dei dati sismici acquisiti per tutto il tragitto di ogni sondaggio, i valori numerici dei primi arrivi delle onde sismiche P ed SH sono stati riportati su sezioni tempo/tracce ove le varie tracce sono scelte in funzione dell'orientamento del sistema ricevitore/sorgente.

Tale procedura consente di ottenere così delle forme d'onda più definite nelle ampiezze. In particolare, con riferimento alle onde di taglio sono state scelte le tracce riferite alla differenza tra la battuta destra e quella sinistra.

I tempi di arrivo delle onde di compressione e di taglio sono stati riportati in un diagramma profondità – tempi e successivamente, dopo la correzione rispetto alla verticale, sono state determinate le velocità puntuali in corrispondenza di ogni singola stazione (grafico velocità – profondità). In seguito, sono state calcolate anche le velocità intervallari delle onde P ed SH nel terreno metro per metro e riportate nel rispettivo grafico.

## 4 ANALISI DEI RISULTATI DEI CAROTAGGI SISMICI DOWN-HOLE

### 4.1 Down-Hole BH12



Fig. 4: ubicazione del sondaggio BH12.



Fig. 5: esecuzione della prova Down-Hole BH12.

Di seguito si riporta la tabella con i valori dei tempi d'arrivo sperimentali (in millisecondi) e delle velocità puntuali medie (in metri/secondo), ricavate dai tempi corretti in funzione della profondità di indagine (in metri da piano campagna). I grafici relativi sono riportati in **Fig. 6** e **Fig. 7**.

depth	P-time	S <sub>H</sub> -time	P-punctual velocity	S <sub>H</sub> -punctual velocity
m	ms	ms	m/s	m/s
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	9.23	18.85	342.61	167.76
2	9.84	19.69	366.42	183.12
3	10.29	20.52	412.31	206.76
4	10.62	22.20	470.81	225.23
5	11.01	23.65	529.61	246.55
6	11.28	25.55	594.70	262.55
7	11.70	28.48	650.92	267.41
8	11.98	31.20	713.19	273.85
9	12.29	33.09	771.91	286.70
10	12.68	35.60	823.37	293.27
11	13.01	37.70	876.38	302.43
12	13.35	39.79	926.54	310.86
13	13.75	42.73	970.30	312.23
14	14.14	45.24	1012.58	316.49
15	14.56	48.17	1050.62	317.56
16	15.00	51.55	1085.25	315.79
17	15.46	55.29	1116.60	312.22
18	16.02	57.80	1139.09	315.71
19	16.52	60.32	1164.37	318.89
20	17.02	63.25	1188.23	319.74
21	17.58	65.76	1206.67	322.59
22	18.22	68.70	1218.64	323.20
23	18.85	71.63	1230.49	323.81
24	19.45	74.10	1243.54	326.41
25	20.05	76.40	1255.83	329.57
26	20.80	79.10	1258.29	330.88
27	21.52	81.65	1262.37	332.71
28	22.19	84.01	1269.05	335.20
29	22.69	86.71	1284.92	336.23
30	23.19	89.61	1300.11	336.45
31	23.69	92.15	1314.68	337.98
32	24.30	95.30	1322.65	337.25
33	24.97	98.44	1327.04	336.61

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSr**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 10 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

depth	P-time	S <sub>H</sub> -time	P-punctual velocity	S <sub>H</sub> -punctual velocity
34	25.64	101.20	1331.21	337.27
35	26.03	102.95	1349.53	341.22
36	26.42	104.72	1367.33	344.97
37	26.88	106.81	1381.01	347.55
38	27.28	108.49	1397.30	351.35
39	27.68	110.16	1413.12	355.08
40	28.15	111.90	1424.95	358.47
41	28.65	113.65	1434.89	361.72
42	29.15	115.40	1444.49	364.88
43	29.62	117.05	1455.25	368.26
44	30.12	118.80	1464.21	371.23
45	30.60	120.48	1473.85	374.34
46	31.09	122.20	1482.72	377.23
47	31.60	123.99	1490.37	379.83
48	32.15	126.08	1495.91	381.45
49	32.63	127.80	1504.50	384.13
50	33.09	129.43	1513.75	387.00

Nella seguente tabella sono riportate le velocità intervallari (in metri/secondo) per ciascun metro di indagine; il grafico relativo è riportato in **Fig. 8**.

depth	P-interval velocity	S <sub>H</sub> -interval velocity
m	m/s	m/s
0	0.0	0.0
1	342.61	167.76
2	393.78	201.57
3	550.09	278.72
4	819.76	307.68
5	1058.20	396.87
6	1542.87	388.67
7	1504.08	300.78
8	2158.77	329.36
9	2261.96	459.04
10	2057.95	369.46
11	2460.99	439.95
12	2501.09	448.36
13	2239.76	329.62
14	2335.10	384.61
15	2216.66	333.47

depth	P-interval velocity	S <sub>H</sub> -interval velocity
16	2146.71	291.33
17	2076.11	264.44
18	1732.27	389.88
19	1938.69	389.36
20	1946.08	336.89
21	1749.43	392.33
22	1539.38	336.59
23	1565.58	338.03
24	1644.37	400.09
25	1646.43	429.55
26	1323.23	367.26
27	1378.41	388.81
28	1480.73	419.94
29	1976.92	367.94
30	1978.80	342.99
31	1980.47	391.20
32	1628.48	316.21
33	1484.69	317.28
34	1485.19	360.67
35	2537.21	566.40
36	2539.13	560.42
37	2158.25	475.66
38	2479.51	590.72
39	2480.86	594.52
40	2115.54	571.08
41	1990.25	568.06
42	1990.80	568.26
43	2117.51	602.62
44	1991.80	568.62
45	2074.72	592.30
46	2033.07	578.77
47	1954.15	556.41
48	1813.02	477.03
49	2076.30	579.15
50	2166.46	611.06

Il carotaggio sismico down-hole ha permesso di definire i parametri meccanici dei litotipi in merito al comportamento registrato per le onde di volume P e per le onde polarizzate S<sub>H</sub>. La seguente tabella mostra i valori dei moduli elasto-dinamici calcolati metro per metro.

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSR**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 12 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

Profondità (m da p.c.)	VP (m/s)	VS (m/s)	$\gamma$ (t/mc)	Coefficiente di Poisson	Mod. di taglio Go (MPa)	Mod. di elasticità Ed (MPa)	Mod. di Lamè $\lambda$ (MPa)	Mod. di Bulk k (MPa)
1	342.61	167.76	1.55	0.34	43.46	116.68	94.35	123.32
2	393.78	201.57	1.59	0.32	64.43	170.40	117.04	159.99
3	550.09	278.72	1.69	0.33	131.27	348.46	248.77	336.28
4	819.76	307.68	1.82	0.42	172.55	489.36	879.80	994.83
5	1058.20	396.87	1.92	0.42	301.37	854.77	1539.83	1740.75
6	1542.87	388.67	2.06	0.47	310.50	910.46	4271.94	4478.94
7	1504.08	300.78	2.05	0.48	185.06	547.48	4257.42	4380.79
8	2158.77	329.36	2.19	0.49	237.66	707.32	9734.99	9893.44
9	2261.96	459.04	2.21	0.48	465.78	1377.33	10378.11	10688.63
10	2057.95	369.46	2.17	0.48	296.35	879.18	8602.29	8799.86
11	2460.99	439.95	2.25	0.48	434.76	1289.92	12734.25	13024.09
12	2501.09	448.36	2.26	0.48	452.91	1343.71	13188.09	13490.04
13	2239.76	329.62	2.21	0.49	239.72	713.85	10588.54	10748.35
14	2335.10	384.61	2.23	0.49	328.96	977.71	11468.04	11687.35
15	2216.66	333.47	2.20	0.49	244.86	728.91	10329.84	10493.08
16	2146.71	291.33	2.19	0.49	185.76	553.79	9714.34	9838.18
17	2076.11	264.44	2.18	0.49	152.07	453.71	9069.40	9170.78
18	1732.27	389.88	2.10	0.47	319.40	941.14	5666.37	5879.30
19	1938.69	389.36	2.15	0.48	325.44	962.63	7417.17	7634.13
20	1946.08	336.89	2.15	0.48	243.80	723.87	7648.02	7810.56
21	1749.43	392.33	2.11	0.47	324.03	954.94	5794.66	6010.68
22	1539.38	336.59	2.06	0.47	232.77	686.63	4403.15	4558.33
23	1565.58	338.03	2.06	0.48	235.52	695.05	4580.97	4737.98
24	1644.37	400.09	2.08	0.47	333.03	978.12	4959.49	5181.51
25	1646.43	429.55	2.08	0.46	383.98	1123.88	4873.04	5129.02
26	1323.23	367.26	2.00	0.46	269.27	785.34	2956.97	3136.48
27	1378.41	388.81	2.01	0.46	304.15	886.14	3214.39	3417.15
28	1480.73	419.94	2.04	0.46	359.66	1047.51	3752.36	3992.13
29	1976.92	367.94	2.16	0.48	291.69	864.61	7837.25	8031.71
30	1978.80	342.99	2.16	0.48	253.51	752.69	7931.17	8100.18
31	1980.47	391.20	2.16	0.48	299.34	885.86	7073.09	7272.65
32	1628.48	316.21	2.08	0.48	172.48	510.68	4229.60	4344.59
33	1484.69	317.28	2.04	0.48	157.31	464.39	3129.91	3234.78
34	1485.19	360.67	2.04	0.47	188.57	553.88	2820.31	2946.02
35	2537.21	566.40	2.26	0.47	480.08	1415.05	8673.28	8993.33
36	2539.13	560.42	2.26	0.47	440.33	1298.44	8158.43	8451.98
37	2158.25	475.66	2.19	0.47	289.26	853.03	5376.89	5569.73
38	2479.51	590.72	2.25	0.47	432.34	1271.00	6752.52	7040.75
39	2480.86	594.52	2.25	0.47	414.68	1218.76	6391.44	6667.89
40	2115.54	571.08	2.18	0.46	352.48	1029.72	4132.14	4367.13
41	1990.25	568.06	2.16	0.46	328.18	955.42	3372.02	3590.81
42	1990.80	568.26	2.16	0.46	313.37	912.30	3219.30	3428.21
43	2117.51	602.62	2.19	0.46	340.93	992.73	3527.62	3754.90
44	1991.80	568.62	2.16	0.46	287.43	836.78	2951.98	3143.60
45	2074.72	592.30	2.18	0.46	301.63	878.13	3097.66	3298.75

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSR**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 13 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

Profondità (m da p.c.)	VP (m/s)	VS (m/s)	$\gamma$ (t/mc)	Coefficiente di Poisson	Mod. di taglio Go (MPa)	Mod. di elasticità Ed (MPa)	Mod. di Lamè $\lambda$ (MPa)	Mod. di Bulk k (MPa)
46	2033.07	578.77	2.17	0.46	275.79	803.04	2851.43	3035.29
47	1954.15	556.41	2.15	0.46	243.54	709.13	2516.91	2679.27
48	1813.02	477.03	2.12	0.46	170.13	497.75	2117.24	2230.66
49	2076.30	579.15	2.18	0.46	248.38	724.18	2695.66	2861.25
50	2166.46	611.06	2.19	0.46	269.40	784.90	2847.53	3027.12

Calcolo del  $V_{seq}$  nei primi 30 metri di suolo (**tratto 0-30m**)

$$\text{valore } V_{seq} = 336.45 \text{ m/s}$$

il carotaggio sismico down-hole evidenzia che l'area in esame può essere collocata, secondo la normativa vigente, in **classe C**.

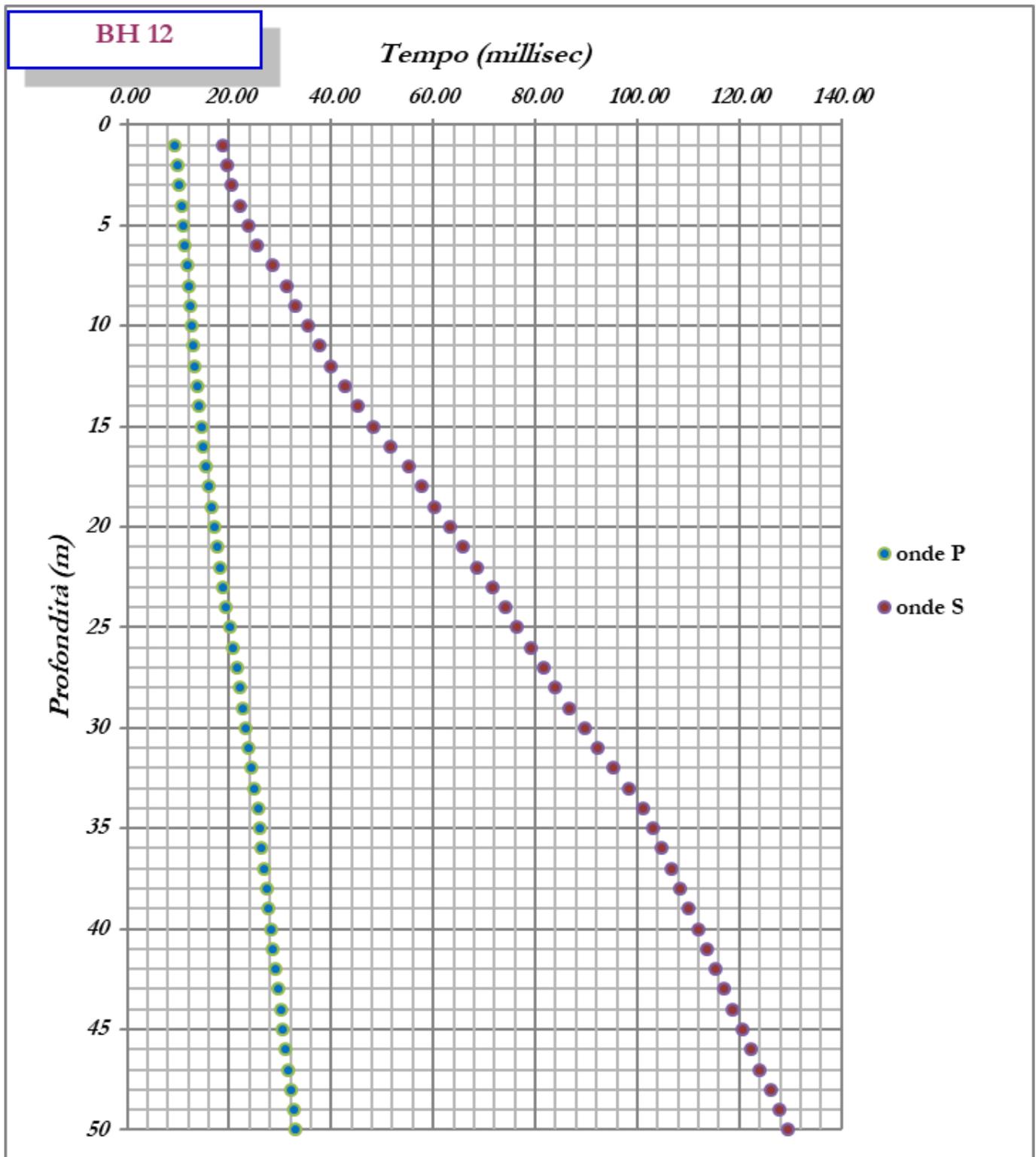


Fig. 6: andamento dei tempi-profondità per la prova down-hole BH12 metro per metro.

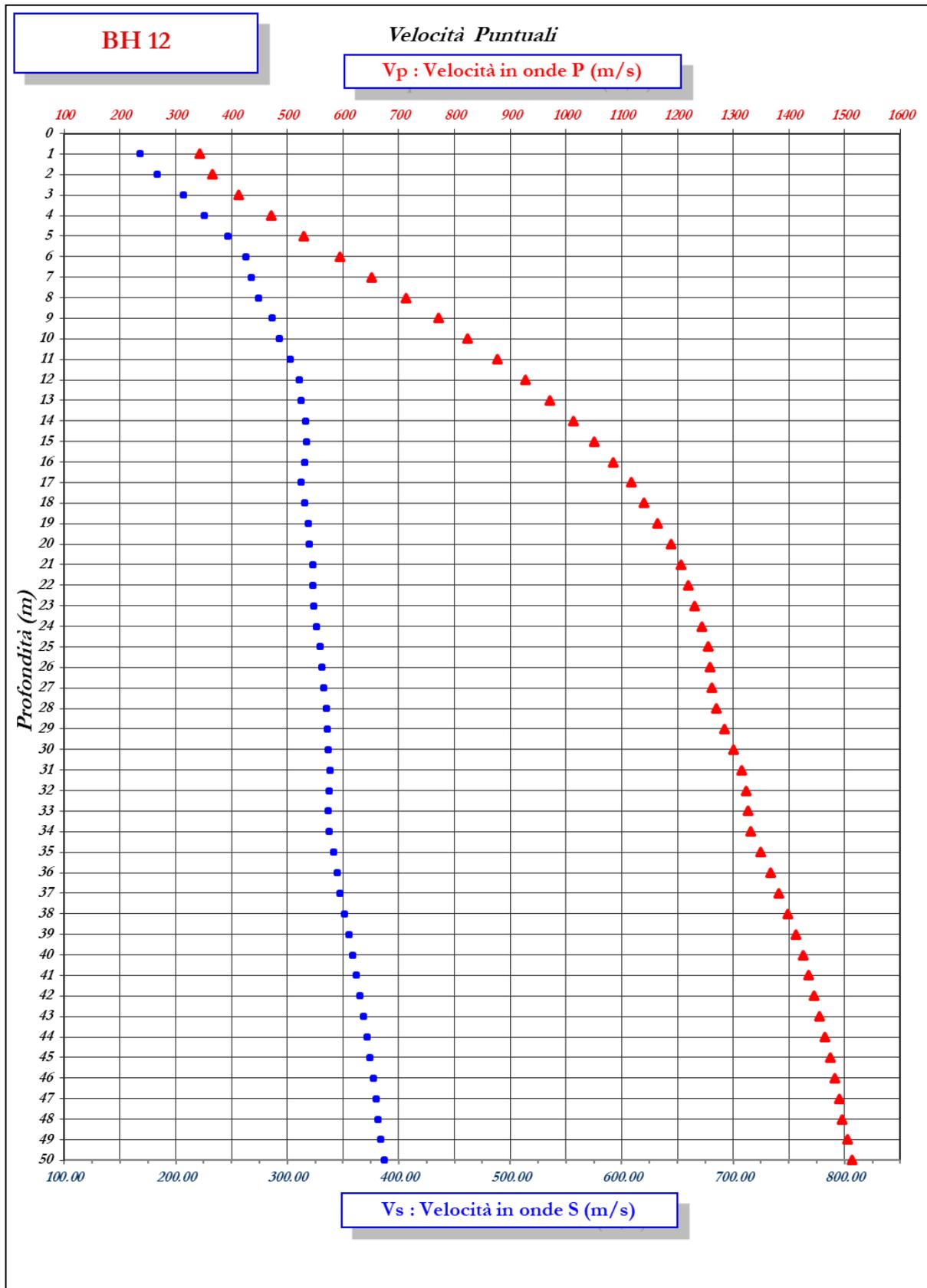


Fig. 7: andamento delle V<sub>p</sub> e V<sub>s</sub>, in metri al secondo, che rappresentano rispettivamente le velocità puntuali metro per metro.

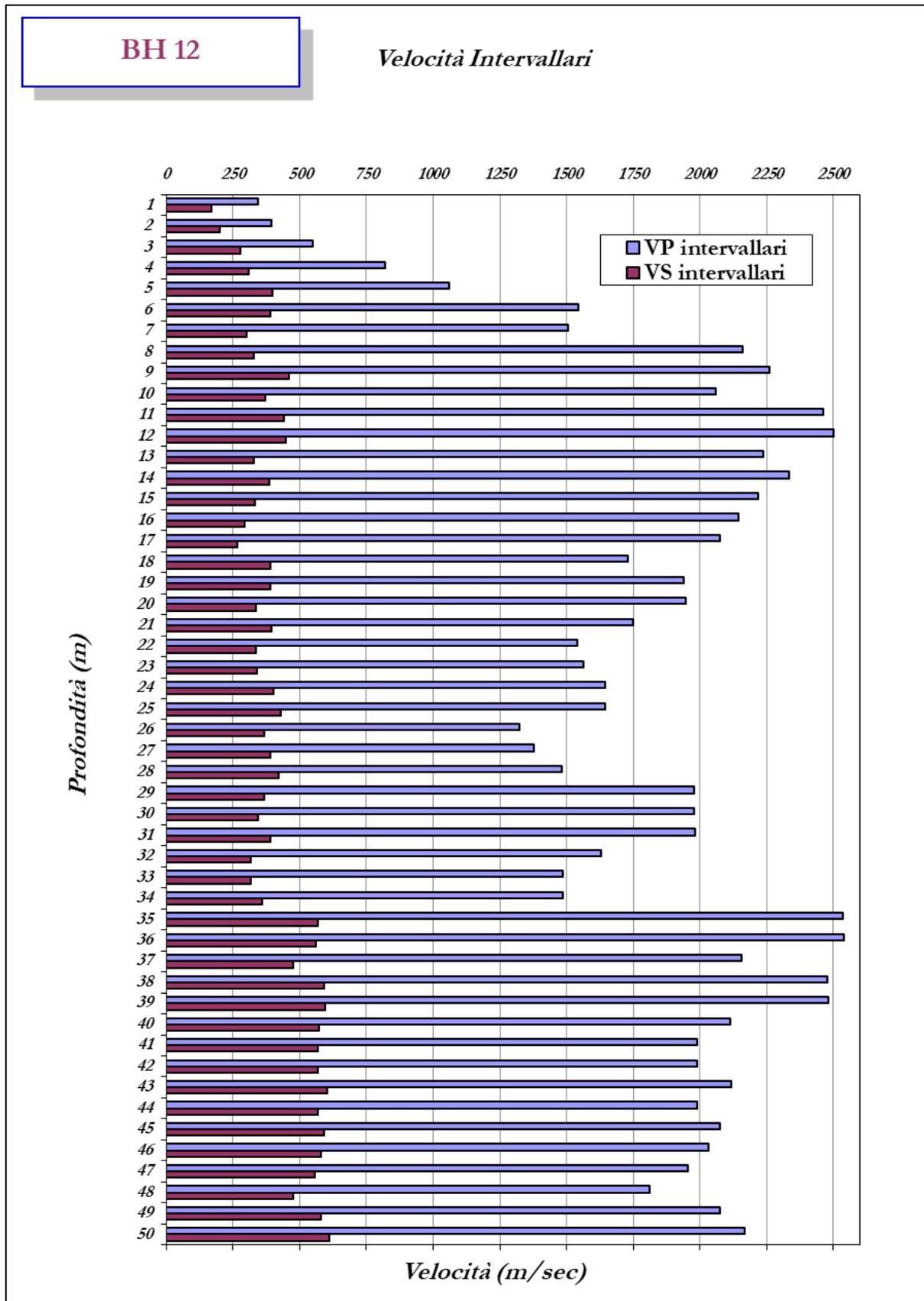


Fig. 8: andamento delle Vp e Vs, in metri al secondo, che rappresentano rispettivamente le velocità intervallari metro per metro.

#### 4.2 Down-Hole BH13



**Fig. 9:** ubicazione del sondaggio BH13.



**Fig. 10:** esecuzione della prova Down-Hole BH13.

Di seguito si riporta la tabella con i valori dei tempi d'arrivo sperimentali (in millisecondi) e delle velocità puntuali medie (in metri/secondo), ricavate dai tempi corretti in funzione della profondità di indagine (in metri da piano campagna). I grafici relativi sono riportati in Fig. 11 e Fig. 12.

depth	P-time	S <sub>H</sub> -time	P-punctual velocity	S <sub>H</sub> -punctual velocity
m	ms	ms	m/s	m/s
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	9.23	16.34	322.12	181.96
2	9.68	18.43	355.47	186.70
3	10.07	20.52	407.51	199.98
4	10.39	22.10	469.93	220.93
5	10.92	24.43	524.78	234.57
6	11.24	26.81	589.07	246.97
7	11.55	28.48	652.75	264.72
8	11.93	30.58	710.47	277.17
9	12.28	32.67	767.55	288.51
10	12.67	35.19	819.62	295.10
11	13.09	38.00	867.13	298.70
12	13.50	40.63	912.77	303.28
13	13.86	42.90	959.46	309.98
14	14.25	45.40	1001.91	314.48
15	14.68	48.66	1039.45	313.59
16	15.08	51.20	1077.13	317.25
17	15.48	53.62	1112.99	321.32
18	16.02	56.00	1137.11	325.29
19	16.54	58.22	1161.14	329.87
20	17.12	61.50	1179.62	328.37
21	17.70	64.51	1196.94	328.41
22	18.21	67.40	1217.87	329.04
23	18.71	69.79	1238.36	331.99
24	19.29	72.47	1252.61	333.42
25	19.98	74.75	1259.39	336.54
26	20.67	77.07	1265.13	339.31
27	21.39	79.89	1269.04	339.78
28	22.15	82.94	1270.41	339.28
29	22.89	85.45	1272.82	340.96
30	23.59	87.88	1277.25	342.86
31	24.20	90.00	1286.21	345.85
32	24.75	92.05	1297.87	348.97
33	25.23	93.83	1312.67	352.96

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSR**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 19 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

depth	P-time	S <sub>H</sub> -time	P-punctual velocity	S <sub>H</sub> -punctual velocity
34	25.65	95.60	1330.02	356.85
35	26.08	97.57	1346.31	359.86
36	26.50	99.27	1362.59	363.74
37	26.92	100.95	1378.37	367.57
38	27.40	102.64	1390.62	371.25
39	27.88	104.32	1402.45	374.81
40	28.36	106.00	1413.89	378.28
41	28.87	107.80	1423.47	381.22
42	29.36	109.52	1433.69	384.34
43	29.82	111.18	1445.04	387.58
44	30.31	112.98	1454.60	390.24
45	30.79	114.77	1464.34	392.85
46	31.27	116.46	1473.78	395.73
47	31.80	118.23	1480.61	398.24
48	32.40	119.81	1484.00	401.32
49	32.99	121.38	1487.72	404.35
50	33.57	122.92	1491.76	407.42

Nella seguente tabella sono riportate le velocità intervallari (in metri/secondo) per ciascun metro di indagine; il grafico relativo è riportato in Fig. 13.

depth	P-interval velocity	S <sub>H</sub> -interval velocity
m	m/s	m/s
0	0.0	0.0
1	181.96	181.96
2	186.70	191.70
3	199.98	233.15
4	220.93	322.19
5	234.57	311.50
6	246.97	335.63
7	264.72	465.50
8	277.17	413.19
9	288.51	428.82
10	295.10	371.54
11	298.70	340.25
12	303.28	364.77
13	309.98	421.75
14	314.48	387.58
15	313.59	301.62

depth	P-interval velocity	S <sub>H</sub> -interval velocity
16	317.25	384.65
17	321.32	404.27
18	325.29	411.97
19	329.87	441.81
20	328.37	302.29
21	328.41	329.15
22	329.04	342.87
23	331.99	413.59
24	333.42	369.92
25	336.54	434.07
26	339.31	427.09
27	339.78	352.50
28	339.28	326.31
29	340.96	395.87
30	342.86	408.96
31	345.85	468.30
32	348.97	484.37
33	352.96	557.28
34	356.85	560.73
35	359.86	504.59
36	363.74	584.17
37	367.57	591.34
38	371.25	589.85
39	374.81	590.09
40	378.28	592.04
41	381.22	553.02
42	384.34	578.72
43	387.58	599.66
44	390.24	553.44
45	392.85	556.63
46	395.73	591.23
47	398.24	561.52
48	401.32	630.55
49	404.35	634.66
50	407.42	649.18

Il carotaggio sismico down-hole ha permesso di definire i parametri meccanici dei litotipi in merito al comportamento registrato per le onde di volume P e per le onde polarizzate S<sub>H</sub>. La seguente tabella mostra i valori dei moduli elasto-dinamici calcolati metro per metro.

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSR**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 21 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

Profondità (m da p.c.)	VP (m/s)	VS (m/s)	$\gamma$ (t/mc)	Coefficiente di Poisson	Mod. di taglio Go (MPa)	Mod. di elasticità Ed (MPa)	Mod. di Lamè $\lambda$ (MPa)	Mod. di Bulk k (MPa)
1	322.12	181.96	1.53	0.27	50.54	127.93	57.31	91.00
2	396.51	191.70	1.59	0.35	58.35	157.25	132.94	171.84
3	576.26	233.15	1.71	0.40	92.67	259.86	380.74	442.52
4	869.49	322.19	1.85	0.42	191.34	543.57	1010.87	1138.43
5	984.30	311.50	1.89	0.44	183.12	528.97	1462.20	1584.28
6	1520.37	335.63	2.05	0.47	230.90	680.87	4276.24	4430.17
7	1857.33	465.50	2.13	0.47	461.37	1353.18	6422.31	6729.88
8	1864.54	413.19	2.13	0.47	363.78	1072.56	6680.09	6922.61
9	2148.64	428.82	2.19	0.48	402.52	1190.86	9300.63	9568.97
10	2104.76	371.54	2.18	0.48	300.98	893.26	9057.26	9257.92
11	2063.01	340.25	2.17	0.49	251.47	747.38	8741.63	8909.27
12	2167.44	364.77	2.19	0.49	291.73	866.70	9716.84	9911.33
13	2484.92	421.75	2.25	0.49	400.26	1188.90	13094.60	13361.44
14	2358.54	387.58	2.23	0.49	334.70	994.81	11724.73	11947.86
15	2185.97	301.62	2.20	0.49	199.80	595.51	10094.59	10227.78
16	2361.15	384.65	2.23	0.49	329.72	980.17	11764.76	11984.58
17	2381.25	404.27	2.23	0.49	364.80	1083.58	11927.39	12170.59
18	1800.44	411.97	2.12	0.47	359.24	1057.87	6142.84	6382.34
19	1873.91	441.81	2.13	0.47	416.32	1224.46	6656.74	6934.28
20	1690.96	302.29	2.09	0.48	191.12	567.06	5598.26	5725.68
21	1694.68	329.15	2.09	0.48	226.70	671.21	5555.95	5707.08
22	1924.75	342.87	2.15	0.48	252.01	747.78	7437.55	7605.56
23	1966.20	413.59	2.15	0.48	368.17	1087.48	7584.58	7830.03
24	1703.09	369.92	2.10	0.48	286.61	845.63	5501.65	5692.72
25	1447.52	434.07	2.03	0.45	382.63	1110.07	3489.70	3744.78
26	1427.98	427.09	2.03	0.45	369.46	1072.10	3391.28	3637.59
27	1379.83	352.50	2.01	0.47	250.04	732.65	3331.19	3497.88
28	1308.60	326.31	1.99	0.47	212.12	622.31	2987.19	3128.60
29	1344.13	395.87	2.00	0.45	313.79	911.56	2989.99	3199.18
30	1420.71	408.96	2.03	0.45	338.42	984.69	3407.45	3633.06
31	1628.75	468.30	2.08	0.45	413.30	1202.66	4172.97	4448.50
32	1805.35	484.37	2.12	0.46	412.72	1206.15	4908.02	5183.17
33	2066.65	557.28	2.18	0.46	516.77	1509.78	6073.41	6417.92
34	2359.65	560.73	2.23	0.47	497.67	1463.24	7817.94	8149.72
35	2306.90	504.59	2.22	0.47	374.19	1103.77	7072.85	7322.31
36	2362.59	584.17	2.23	0.47	471.94	1385.09	6775.51	7090.14
37	2363.85	591.34	2.23	0.47	454.87	1334.25	6358.93	6662.18
38	2071.80	589.85	2.18	0.46	416.61	1213.08	4306.43	4584.17
39	2072.52	590.09	2.18	0.46	394.80	1149.56	4080.55	4343.74
40	2073.19	592.04	2.18	0.46	377.38	1098.62	3872.78	4124.36
41	1952.59	553.02	2.15	0.46	309.90	902.69	3243.55	3450.15
42	2032.27	578.72	2.17	0.46	326.29	950.07	3371.07	3588.59
43	2164.47	599.66	2.19	0.46	339.00	988.82	3738.61	3964.61
44	2033.21	553.44	2.17	0.46	273.35	798.19	3142.67	3324.91
45	2075.74	556.63	2.18	0.46	266.42	778.60	3172.10	3349.71

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSR**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 22 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

Profondità (m da p.c.)	VP (m/s)	VS (m/s)	$\gamma$ (t/mc)	Coefficiente di Poisson	Mod. di taglio Go (MPa)	Mod. di elasticità Ed (MPa)	Mod. di Lamè $\lambda$ (MPa)	Mod. di Bulk k (MPa)
46	2076.14	591.23	2.18	0.46	288.94	841.31	2985.02	3177.64
47	1881.51	561.52	2.14	0.45	246.25	714.68	2272.33	2436.50
48	1663.07	630.55	2.09	0.42	292.42	828.16	1449.35	1644.30
49	1691.32	634.66	2.09	0.42	286.88	813.63	1463.59	1654.84
50	1720.53	649.18	2.10	0.42	291.03	824.78	1462.20	1656.22

Calcolo del  $V_{seq}$  nei primi 30 metri di suolo (**tratto 0-30m**)

$$\text{valore } V_{seq} = 342.86 \text{ m/s}$$

il carotaggio sismico down-hole evidenzia che l'area in esame può essere collocata, secondo la normativa vigente, in **classe C**.

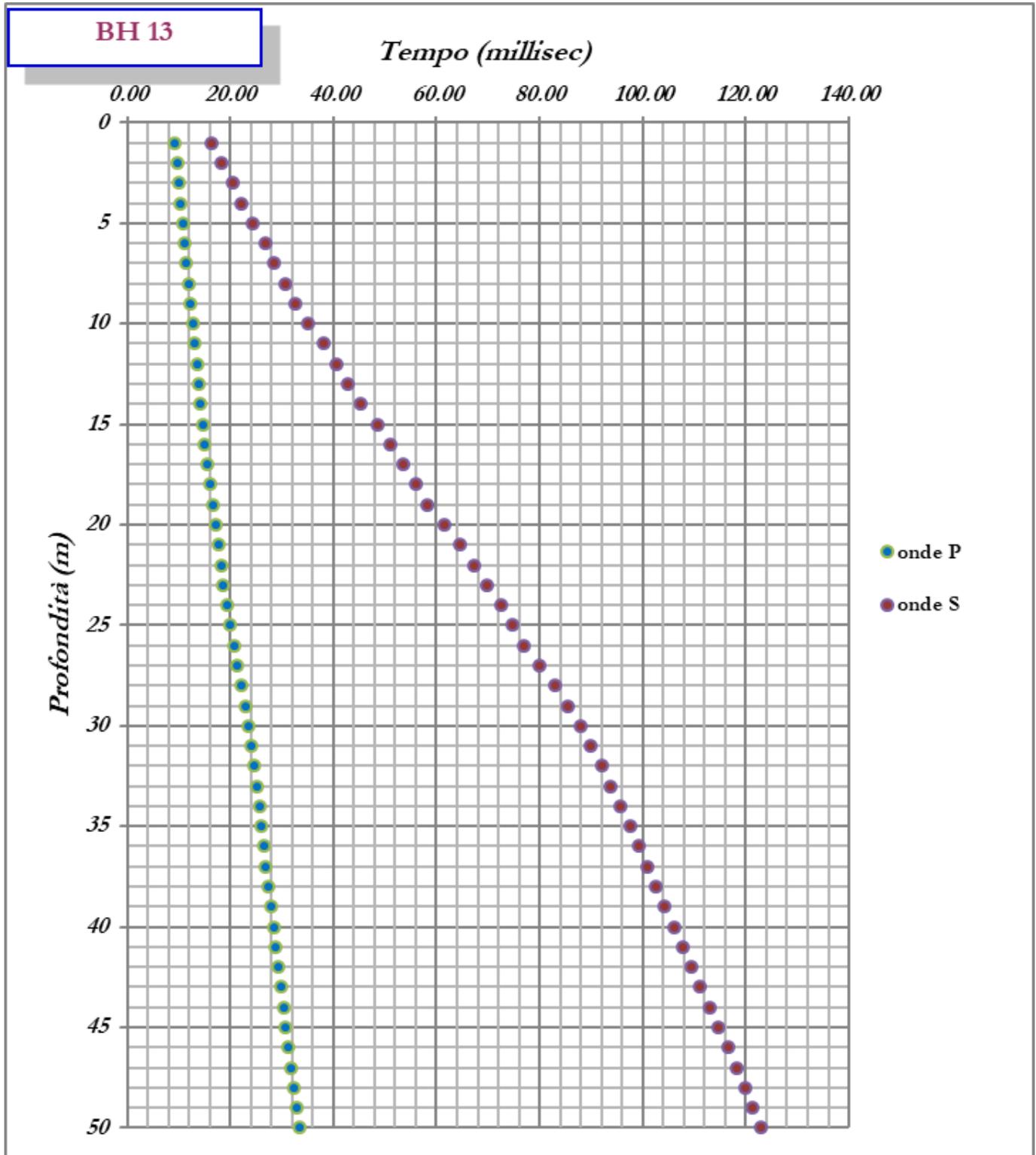


Fig. 11: andamento dei tempi-profondità per la prova down-hole BH13 metro per metro.

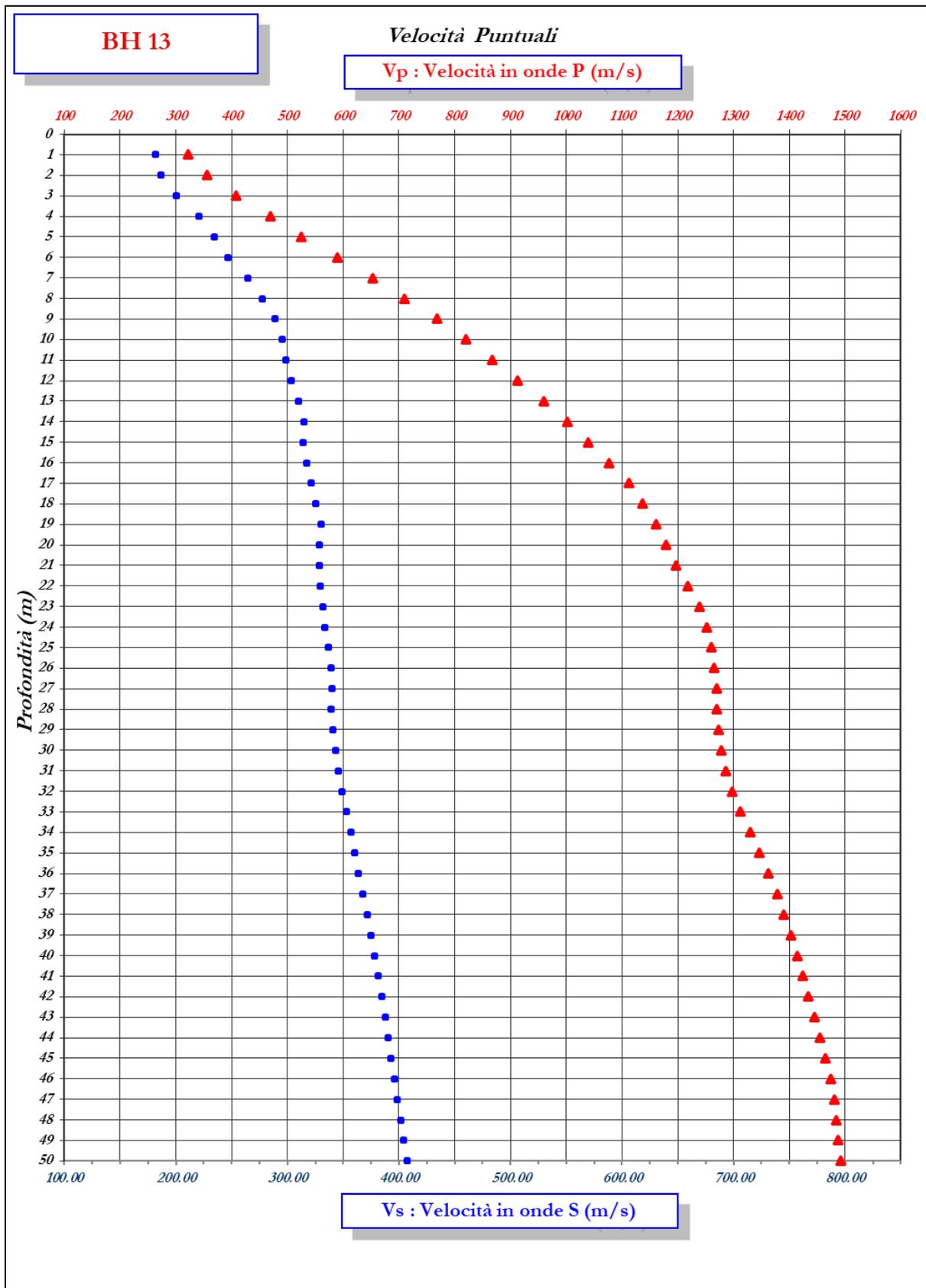


Fig. 12: andamento delle V<sub>p</sub> e V<sub>s</sub>, in metri al secondo, che rappresentano rispettivamente le velocità puntuali metro per metro.

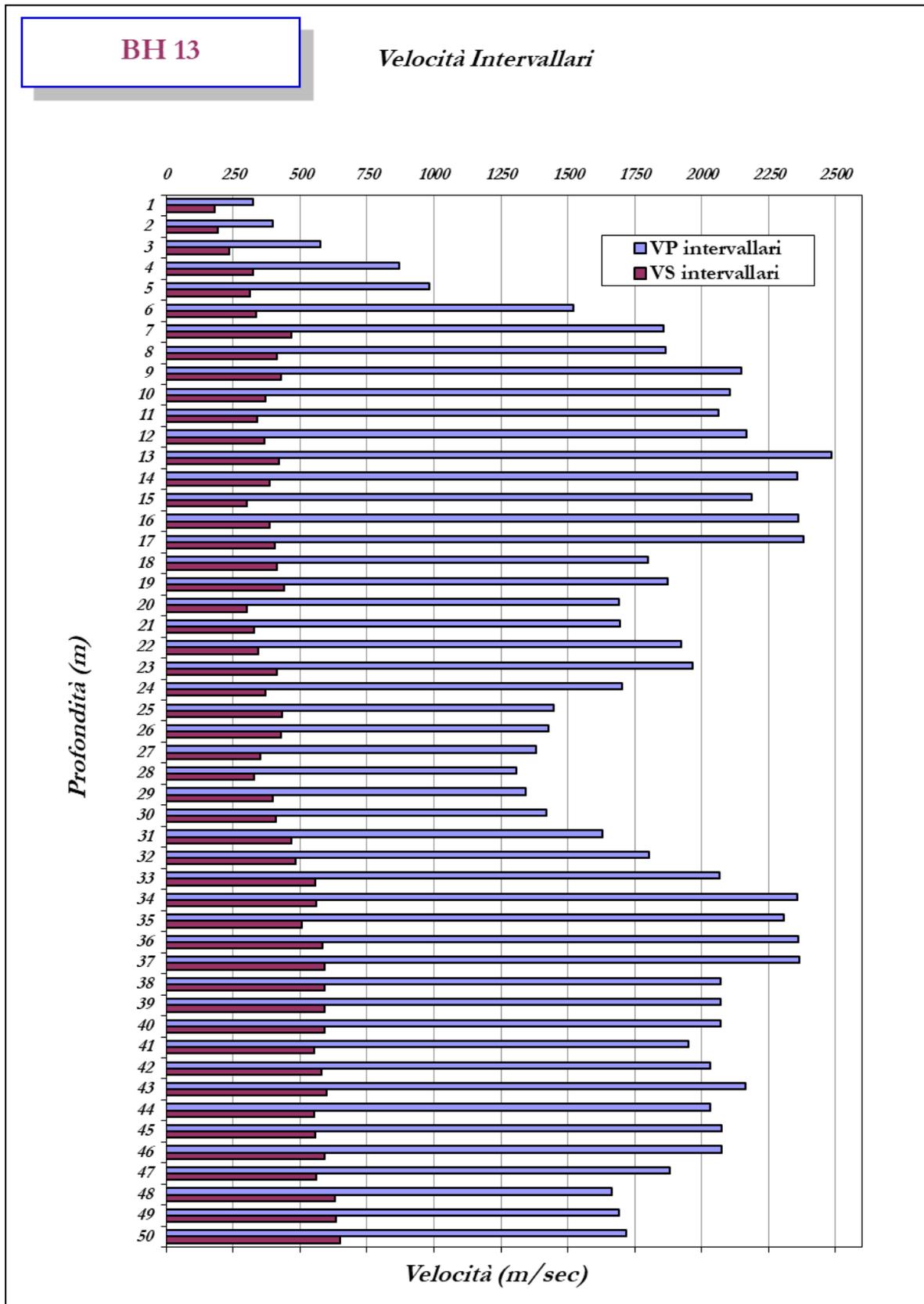


Fig. 13: andamento delle Vp e Vs, in metri al secondo, che rappresentano rispettivamente le velocità intervallari metro per metro.

### 4.3 Down-Hole BH14

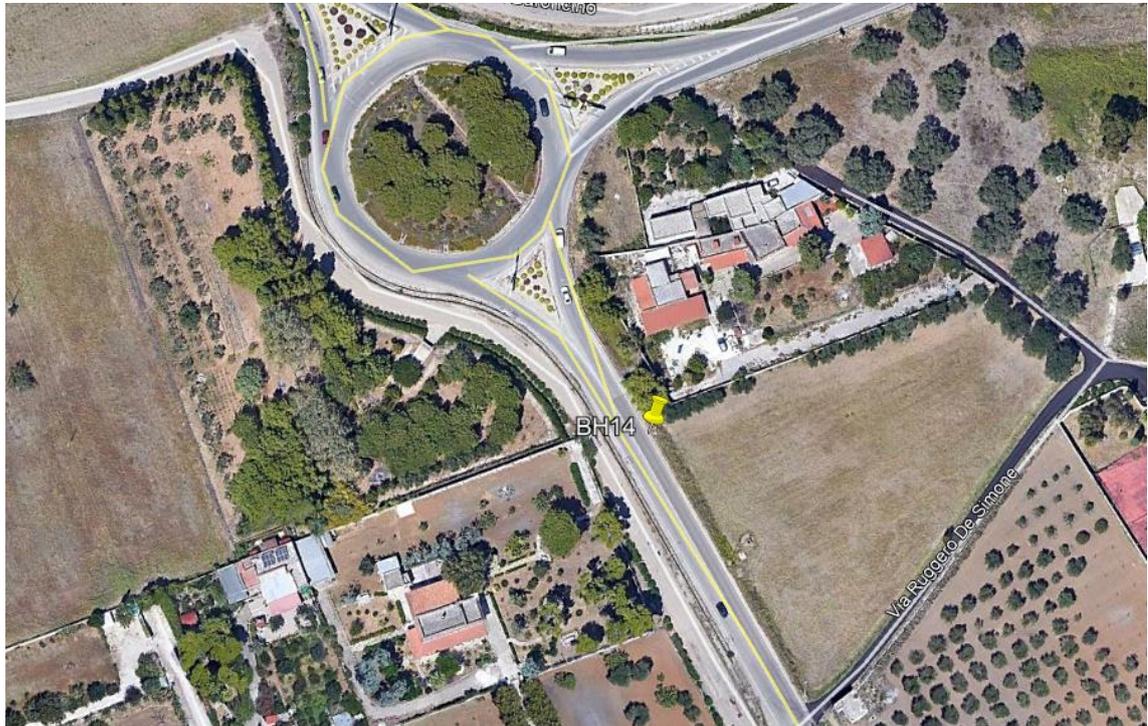


Fig. 14: ubicazione del sondaggio BH14.



Fig. 15: esecuzione della prova Down-Hole BH14.

Di seguito si riporta la tabella con i valori dei tempi d'arrivo sperimentali (in millisecondi) e delle velocità puntuali medie (in metri/secondo), ricavate dai tempi corretti in funzione della profondità di indagine (in metri da piano campagna). I grafici relativi sono riportati in **Fig. 16** e **Fig. 17**.

depth	P-time	S <sub>H</sub> -time	P-punctual velocity	S <sub>H</sub> -punctual velocity
m	ms	ms	m/s	m/s
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	3.82	7.99	585.36	279.86
2	4.3	9.71	657.77	291.29
3	4.78	12.03	754.30	299.71
4	5.26	13.96	850.22	320.35
5	5.78	16.01	931.69	336.36
6	6.21	17.69	1018.45	357.52
7	7.17	20.55	1015.36	354.26
8	7.65	22.47	1077.94	366.99
9	8.19	24.72	1125.71	372.96
10	8.6	26.29	1185.82	387.91
11	9.08	28.68	1231.31	389.83
12	9.56	31.07	1272.54	391.55
13	10	32.8	1315.29	401.00
14	10.52	35.37	1344.31	399.83
15	11.31	38.18	1338.00	396.35
16	11.86	40.63	1359.57	396.86
17	12.4	43.02	1380.42	397.89
18	12.94	45.41	1399.60	398.83
19	13.48	47.8	1417.28	399.69
20	14.13	50.67	1422.49	396.68
21	14.89	54.01	1416.72	390.58
22	15.68	57.84	1408.85	381.93
23	16.27	61.66	1418.98	374.42
24	16.77	64.53	1436.09	373.21
25	17.21	66.44	1457.28	377.48
26	17.69	68.83	1474.10	378.86
27	18.14	70.74	1492.50	382.73
28	18.64	73.13	1505.97	383.86
29	19.14	75.52	1518.75	384.92
30	19.65	77.91	1530.11	385.91
31	20.43	80.39	1520.53	386.42
32	21	82.22	1526.78	389.96
33	21.48	83.97	1539.13	393.72

depth	P-time	S <sub>H</sub> -time	P-punctual velocity	S <sub>H</sub> -punctual velocity
34	21.99	86.04	1548.83	395.85
35	22.47	87.95	1560.17	398.60
36	22.95	89.86	1571.05	401.24
37	23.58	92.25	1571.42	401.67
38	23.98	93.75	1586.85	405.89
39	24.47	95.6	1595.88	408.49
40	25.11	97.99	1594.98	408.71
41	25.81	100.78	1590.42	407.31
42	26.62	103.88	1579.55	404.77
43	27.09	105.61	1589.02	407.60
44	27.62	107.58	1594.69	409.42
45	28.33	110.22	1589.99	408.68
46	29.21	113.62	1576.29	405.24
47	29.66	115.32	1586.06	407.93
48	30.11	117.02	1595.54	410.54
49	30.62	119.45	1601.59	410.56
50	31.18	122.12	1604.87	409.76
51	31.55	123.82	1617.72	412.20
52	32.09	126.24	1621.64	412.22
53	32.74	128.91	1619.97	411.43
54	33.29	131.1	1623.22	412.18
55	33.68	132.7	1634.10	414.74
56	34.24	134.98	1636.56	415.14
57	34.79	137.17	1639.41	415.80
58	35.39	139.6	1639.86	415.72
59	36.04	142.51	1638.01	414.24
60	36.43	144.21	1647.91	416.29
61	36.89	146.52	1654.45	416.55
62	37.45	149.38	1656.40	415.26
63	37.76	151.05	1669.27	417.29
64	38.05	152.71	1682.82	419.30
65	38.34	154.4	1696.16	421.18

Nella seguente tabella sono riportate le velocità intervallari (in metri/secondo) per ciascun metro di indagine; il grafico relativo è riportato in **Fig. 18**.

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSr**
**COMMESSA**  
 IA7K

**LOTTO**  
 00

**CODIFICA**  
 D 69 IG

**DOCUMENTO**  
 GE 0005 001

**REV.**  
 A

**FOGLIO**  
 29 di 49

depth	P-interval velocity	S <sub>H</sub> -interval velocity
m	m/s	m/s
0	0.0	0.0
1	585.36	279.86
2	750.64	303.70
3	1067.64	318.11
4	1374.60	403.77
5	1510.78	420.40
6	1905.75	521.57
7	997.20	335.90
8	1895.87	490.25
9	1744.04	428.77
10	2282.99	606.75
11	1997.82	410.19
12	2014.56	411.54
13	2203.66	564.55
14	1884.83	385.22
15	1255.46	353.29
16	1793.31	404.67
17	1829.32	415.09
18	1832.21	415.47
19	1834.60	415.78
20	1529.19	347.08
21	1310.53	298.67
22	1261.55	260.71
23	1685.69	261.39
24	1987.13	347.35
25	2256.73	520.48
26	2071.67	416.87
27	2209.73	520.98
28	1991.27	417.11
29	1991.98	417.21
30	1953.76	417.29
31	1280.19	402.29
32	1749.81	544.46
33	2076.61	569.37
34	1955.44	481.85
35	2077.49	522.13
36	2077.87	522.22
37	1584.88	417.73
38	2492.34	664.50

depth	P-interval velocity	S <sub>H</sub> -interval velocity
39	2036.53	539.34
40	1560.59	417.85
41	1427.19	358.09
42	1233.77	322.36
43	2123.70	576.86
44	1884.07	506.82
45	1407.36	378.46
46	1135.89	293.99
47	2218.51	587.21
48	2218.70	587.26
49	1958.37	411.17
50	1783.93	374.28
51	2697.73	587.38
52	1850.06	412.91
53	1537.46	374.31
54	1816.61	456.23
55	2560.40	624.15
56	1784.34	438.28
57	1816.80	456.28
58	1665.63	411.28
59	1537.67	343.51
60	2561.04	587.63
61	2171.98	432.65
62	1784.62	349.52
63	3221.06	598.23
64	3442.96	601.85
65	3443.18	591.20

Il carotaggio sismico down-hole ha permesso di definire i parametri meccanici dei litotipi in merito al comportamento registrato per le onde di volume P e per le onde polarizzate S<sub>H</sub>. La seguente tabella mostra i valori dei moduli elasto-dinamici calcolati metro per metro.

Profondità (m da p.c.)	VP (m/s)	VS (m/s)	$\gamma$ (t/mc)	Coefficiente di Poisson	Mod. di taglio G <sub>0</sub> (MPa)	Mod. di elasticità E <sub>d</sub> (MPa)	Mod. di Lamè $\lambda$ (MPa)	Mod. di Bulk k (MPa)
1	585.36	279.86	1.71	0.35	133.91	362.05	318.02	407.30
2	750.64	303.70	1.79	0.40	165.32	463.61	679.34	789.56
3	1067.64	318.11	1.92	0.45	193.95	562.95	1796.75	1926.05
4	1374.60	403.77	2.01	0.45	327.83	952.55	3143.87	3362.42

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSR**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 31 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

Profondità (m da p.c.)	VP (m/s)	VS (m/s)	$\gamma$ (t/mc)	Coefficiente di Poisson	Mod. di taglio Go (MPa)	Mod. di elasticità Ed (MPa)	Mod. di Lamè $\lambda$ (MPa)	Mod. di Bulk k (MPa)
5	1510.78	420.40	2.05	0.46	361.82	1055.09	3949.19	4190.40
6	1905.75	521.57	2.14	0.46	582.05	1699.03	6606.80	6994.83
7	997.20	335.90	1.89	0.44	213.46	613.05	1454.42	1596.72
8	1895.87	490.25	2.14	0.46	513.74	1504.40	6655.44	6997.93
9	1744.04	428.77	2.11	0.47	386.79	1135.49	5625.76	5883.62
10	2282.99	606.75	2.22	0.46	815.20	2383.64	9910.82	10454.28
11	1997.82	410.19	2.16	0.48	363.24	1073.73	7890.34	8132.50
12	2014.56	411.54	2.16	0.48	366.23	1082.74	8043.21	8287.36
13	2203.66	564.55	2.20	0.46	701.01	2053.79	9279.00	9746.34
14	1884.83	385.22	2.14	0.48	316.84	936.72	6951.63	7162.86
15	1255.46	353.29	1.98	0.46	246.69	718.86	2621.98	2786.44
16	1793.31	404.67	2.12	0.47	346.35	1020.47	6109.23	6340.13
17	1829.32	415.09	2.13	0.47	365.81	1077.57	6372.99	6616.87
18	1832.21	415.47	2.13	0.47	366.58	1079.87	6396.10	6640.49
19	1834.60	415.78	2.13	0.47	367.23	1081.80	6415.17	6659.98
20	1529.19	347.08	2.05	0.47	247.19	728.15	4304.01	4468.81
21	1310.53	298.67	1.99	0.47	177.76	523.53	3066.91	3185.41
22	1261.55	260.71	1.98	0.48	134.46	397.39	2879.59	2969.23
23	1685.69	261.39	2.09	0.49	142.82	424.94	5654.14	5749.36
24	1987.13	347.35	2.16	0.48	260.22	772.45	7995.72	8169.20
25	2256.73	520.48	2.21	0.47	598.54	1762.00	10055.41	10454.43
26	2071.67	416.87	2.18	0.48	377.76	1117.35	8574.18	8826.03
27	2209.73	520.98	2.20	0.47	597.30	1756.75	9551.02	9949.22
28	1991.27	417.11	2.16	0.48	375.38	1108.91	7804.25	8054.50
29	1991.98	417.21	2.16	0.48	375.57	1109.49	7810.53	8060.91
30	1953.76	417.29	2.15	0.48	374.35	1105.15	7457.37	7706.93
31	1280.19	402.29	1.99	0.45	291.36	842.15	2367.81	2562.05
32	1749.81	544.46	2.11	0.45	518.39	1499.59	4317.46	4663.05
33	2076.61	569.37	2.18	0.46	539.93	1575.89	6102.26	6462.21
34	1955.44	481.85	2.15	0.47	354.63	1040.95	5130.95	5367.36
35	2077.49	522.13	2.18	0.47	392.76	1151.81	5432.48	5694.32
36	2077.87	522.22	2.18	0.47	368.07	1079.38	5090.94	5336.32
37	1584.88	417.73	2.07	0.46	210.39	615.46	2607.68	2747.94
38	2492.34	664.50	2.25	0.46	547.61	1600.94	6608.55	6973.63
39	2036.53	539.34	2.17	0.46	328.72	961.36	4029.38	4248.53
40	1560.59	417.85	2.06	0.46	178.11	520.56	2128.14	2246.88
41	1427.19	358.09	2.03	0.47	122.42	359.05	1699.80	1781.42
42	1233.77	322.36	1.97	0.46	92.08	269.49	1164.63	1226.02
43	2123.70	576.86	2.19	0.46	312.58	912.83	3611.34	3819.73
44	1884.07	506.82	2.14	0.46	225.95	660.23	2670.58	2821.21
45	1407.36	378.46	2.02	0.46	114.40	334.27	1353.10	1429.36
46	1135.89	293.99	1.94	0.46	63.71	186.55	823.61	866.08
47	2218.51	587.21	2.20	0.46	277.87	812.67	3410.47	3595.72
48	2218.70	587.26	2.20	0.46	267.93	783.60	3288.44	3467.06
49	1958.37	411.17	2.15	0.48	123.81	365.72	2561.06	2643.60
50	1783.93	374.28	2.12	0.48	97.41	287.74	2018.03	2082.97

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSR**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 32 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

Profondità (m da p.c.)	VP (m/s)	VS (m/s)	$\gamma$ (t/mc)	Coefficiente di Poisson	Mod. di taglio Go (MPa)	Mod. di elasticità Ed (MPa)	Mod. di Lamè $\lambda$ (MPa)	Mod. di Bulk k (MPa)
51	2697.73	587.38	2.29	0.48	251.09	740.78	4794.34	4961.74
52	1850.06	412.91	2.13	0.47	111.87	329.74	2022.05	2096.63
53	1537.46	374.31	2.06	0.47	86.05	252.72	1279.65	1337.02
54	1816.61	456.23	2.12	0.47	128.05	375.53	1774.07	1859.44
55	2560.40	624.15	2.27	0.47	248.46	729.67	3684.16	3849.80
56	1784.34	438.28	2.12	0.47	111.19	326.44	1620.64	1694.76
57	1816.80	456.28	2.12	0.47	117.64	345.00	1629.85	1708.28
58	1665.63	411.28	2.09	0.47	91.53	268.65	1318.16	1379.18
59	1537.67	343.51	2.06	0.47	61.27	180.59	1105.14	1145.99
60	2561.04	587.63	2.27	0.47	192.58	567.03	3272.77	3401.15
61	2171.98	432.65	2.20	0.48	98.70	292.01	2289.99	2355.79
62	1784.62	349.52	2.12	0.48	60.57	179.30	1457.93	1498.31
63	3221.06	598.23	2.37	0.48	193.87	574.68	5232.69	5361.93
64	3442.96	601.85	2.40	0.48	194.18	576.43	5966.47	6095.93
65	3443.18	591.20	2.40	0.48	183.19	544.02	5847.49	5969.62

Calcolo del  $V_{seq}$  nei primi 30 metri di suolo (**tratto 0-30m**)

*valore  $V_{seq} = 385.91$  m/s*

il carotaggio sismico down-hole evidenzia che l'area in esame può essere collocata, secondo la normativa vigente, in **classe B**.

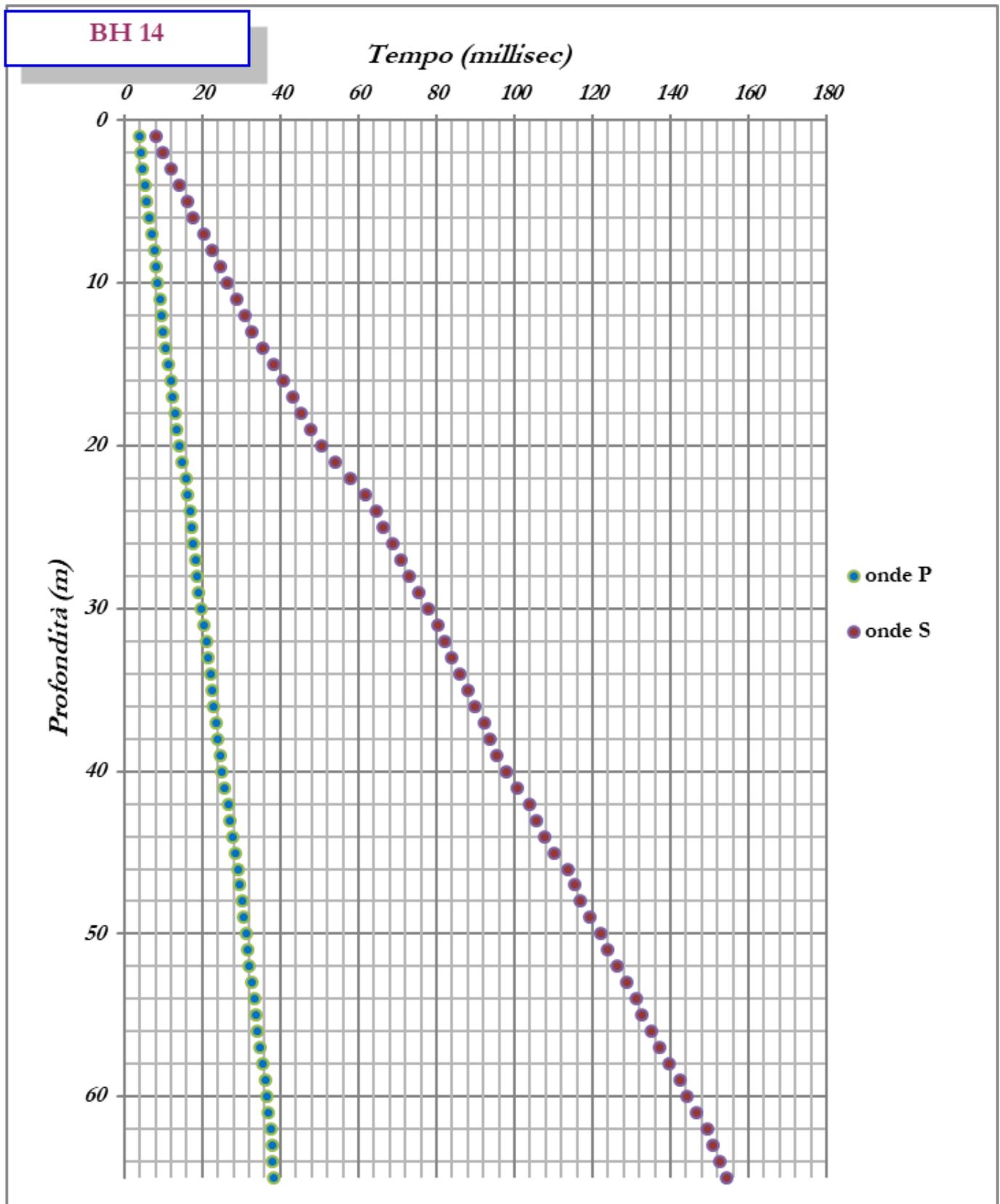


Fig. 16: andamento dei tempi-profondità per la prova down-hole BH14 metro per metro.

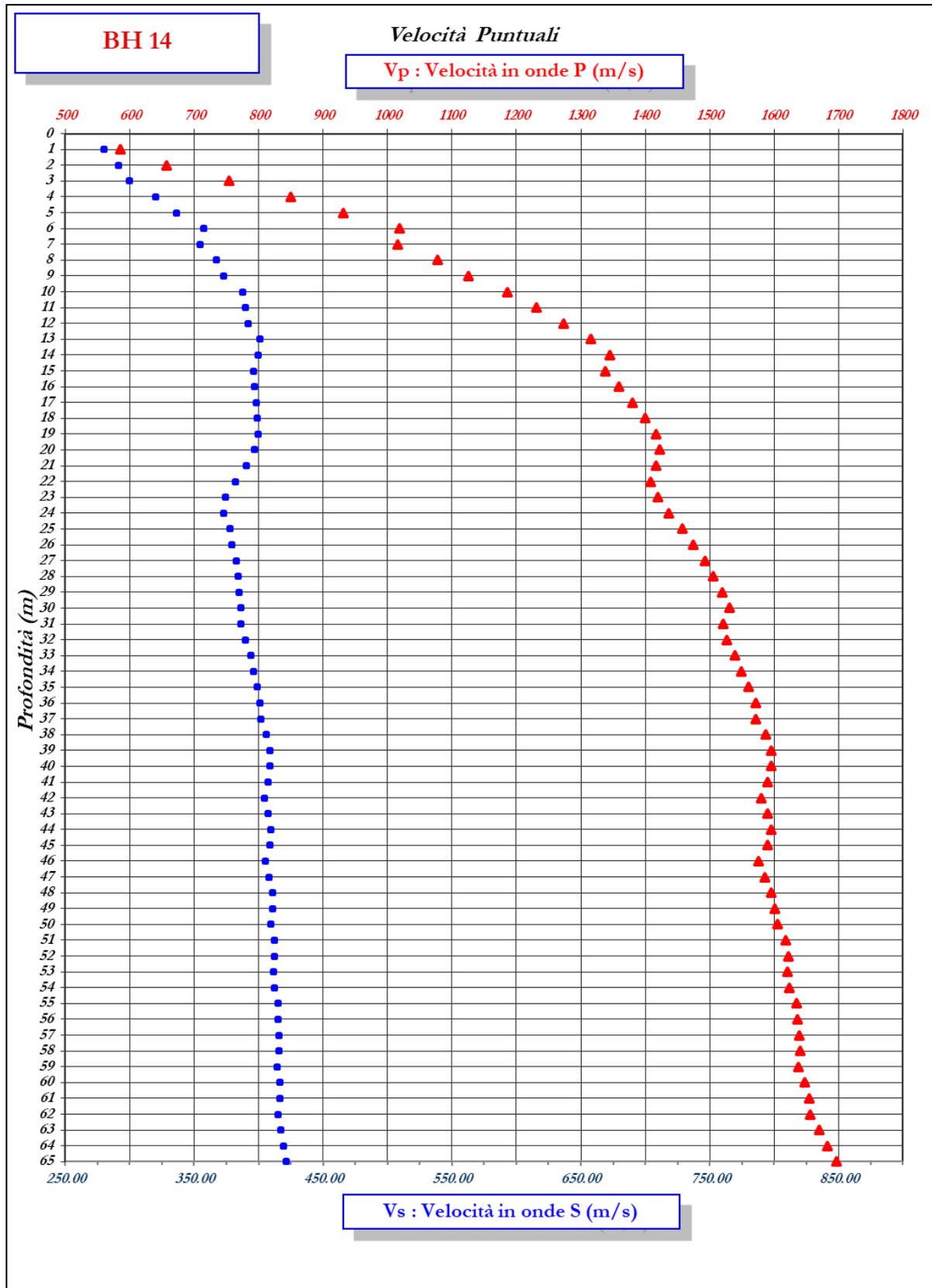


Fig. 17: andamento delle Vp e Vs, in metri al secondo, che rappresentano rispettivamente le velocità puntuali metro per metro.

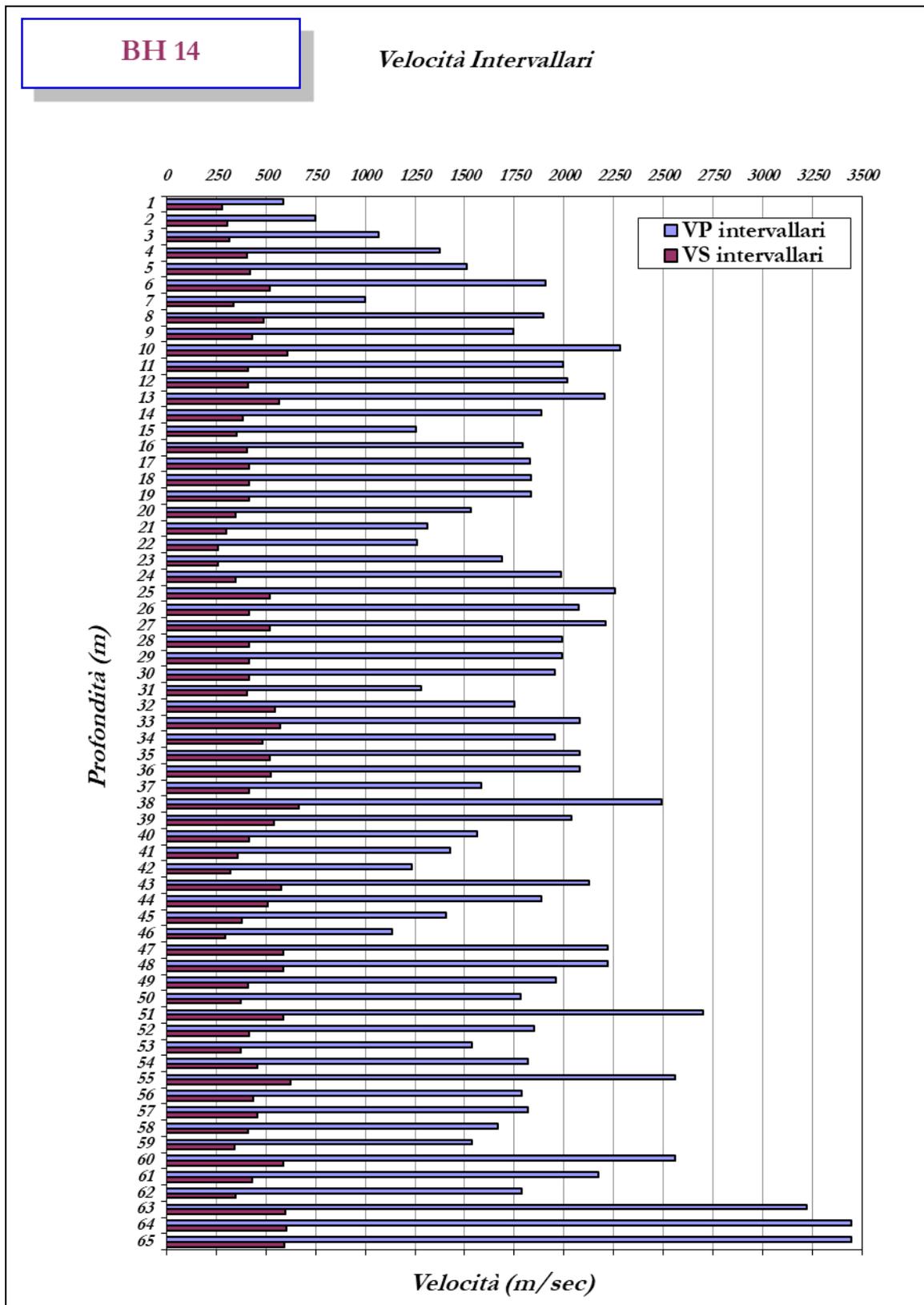


Fig. 18: andamento delle Vp e Vs, in metri al secondo, che rappresentano rispettivamente le velocità intervallari metro per metro.

## 5 INDAGINE SISMICA CON METODO HVSR

Sono state eseguite, inoltre, delle indagini geofisiche a tecnica passiva (HVSr) al fine di evidenziare le caratteristiche di risposta sismica in termini di frequenza caratteristica del sito in base ai valori d'impedenza sismica rilevata.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo rivelano principalmente la frequenza caratteristica di risonanza del sito. Essa rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nel realizzare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno, al fine di evitare effetti di "doppia risonanza", estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi.

Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremiti. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

1. dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s,
2. dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda),
3. dalla risposta dello strumento.

Possiamo esprimere questo concetto come:

segnale registrazione al sito x = sorgente \* effetti di percorso \* funzione trasferimento strumento

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

Nel tragitto dalla sorgente s al sito per le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della

sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartate dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però “sepolta” all’interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali dei sottosuoli; informazione di notevole importanza nell’ingegneria sismica.

Per l’acquisizione dei dati è stato utilizzato un Tromografo digitale "TROMINO", prodotto da Micromed S.p.a., dotato di n. 3 sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente.

L’accorgimento adottato è stato quello di verificare che i geofoni fossero posizionati in bolla e che la loro componente longitudinale fosse rivolta verso Nord. Il tempo di acquisizione è stato di 20 minuti e le finestre temporali prese in considerazione per l’acquisizione sono di 20 s ciascuna.

La relazione che si applica per il calcolo della profondità delle superfici con i maggiori contrasti di impedenza è la seguente:

$$T_s = 2\pi / \omega = 4H / V_s \quad (1)$$

dove:

- $T_s$  = periodo della vibrazione (s)
- $\omega$  = frequenza misurata (rad)
- $H$  = profondità del sismostrato (m)
- $V_s$  = velocità delle onde di taglio (m/s)

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell’onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si è potuto ricavare il valore di frequenza caratteristica di ogni sito.

**STRUMENTAZIONI UTILIZZATE**

<b>N°</b>	<b>Strumentazione per prove HVSr</b>
1	Sismografo-Tromografo digitale "TROMINO", prodotto da Micromed S.p.a.
1	2 Batterie 1.5 V
1	Bussola per corretto orientamento della stazione sismica

**CONDIZIONI DI CONGRUITA'**

La prima condizione, prima di procedere all'estrazione di qualsiasi informazione e interpretazione, riguarda la verifica di "congruità" della curva H/V; in pratica bisogna verificare l'attendibilità della curva ottenuta secondo i seguenti criteri:

- 1)  $F_0$  (freq. di picco)  $> 10 / l_w$  (lunghezza finestra temporale); questa condizione è proposta in maniera tale che, alla frequenza di interesse, in ogni finestra ci siano almeno 10 cicli significativi (tab. 1). Se i dati lo permettono è possibile verificare se la condizione  $f_0$  (freq. di picco)  $> 20 / l_w$ , il che renderebbe il picco eventuale ancora più significativo, ma questo non è d'obbligo.
- 2) C'è bisogno di un grande numero di cicli e di finestre: quando si usa la selezione automatica delle finestre temporali con i parametri di default, il n. totale di cicli significativi:  $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$  deve essere  $> 200$  (che significa che ad esempio per un picco di 1 Hz, ci siano almeno 20 finestre da 10 secondi ciascuna, o per un picco da 0.5 Hz ci siano 10 finestre da 40 s).
- 3) È necessario che ci sia un valore di scattering basso tra tutte le finestre: deviazioni standard elevate spesso sono dovute a rumore ambientale non stazionario che può perturbare il segnale e tradursi in un risultato non significativo relativamente alla determinazione del picco di frequenza H/V. Comunque si raccomanda che  $\sigma_A(f)$  sia minore di un fattore 2 (per  $f_0 > 0.5$  Hz), o un fattore 3 (per  $f_0 < 0.5$  Hz), in un range di frequenze di almeno  $[0.5f_0, 2f_0]$ .

$F_0$ [Hz]	Minimum value for $l_w$ [s]	Minimum number of significant cycles (nc)	Minimum number of windows	Minimum useful signal duration [s]	Recommended minimum record duration [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

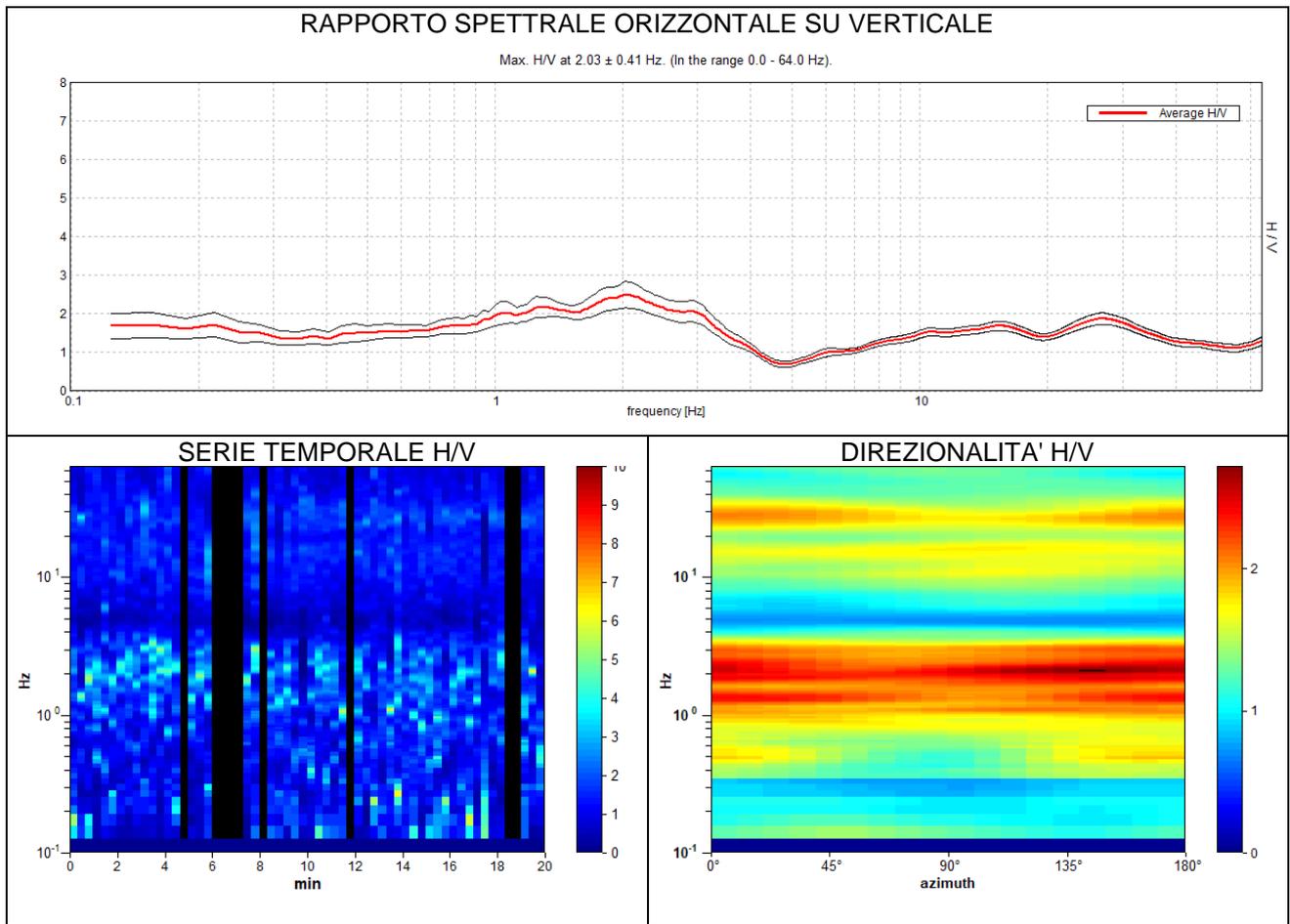
**Tab. 1:** durata della registrazione raccomandata.

Nel nostro caso specifico è sempre stata utilizzata una durata di 20' (1200 s) e un valore delle finestre temporali di 20 s. Di seguito si riportano le curve H/V ottenute.

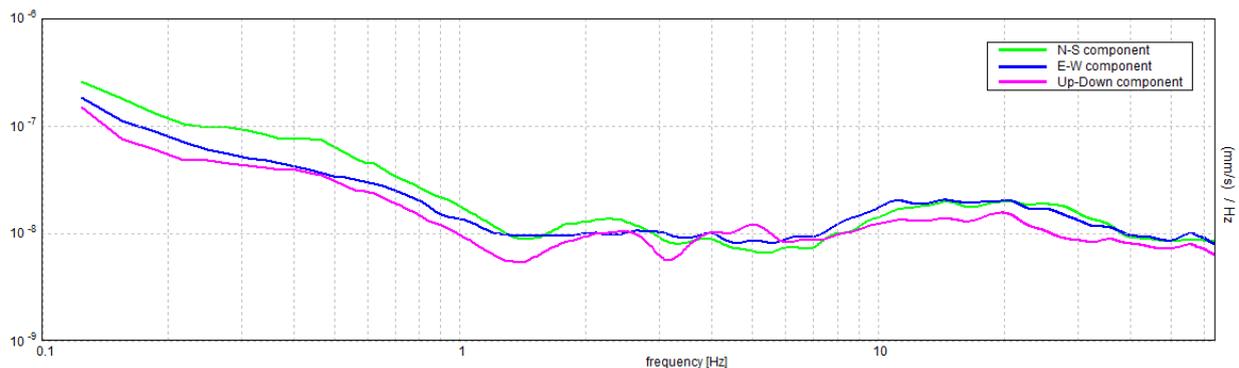
## 6 RISULTATI INDAGINI SISMICA PASSIVA (HVSR)

### 6.1 HVSR BH12

Strumento: TRZ-0017/01-09 Inizio registrazione: 06/02/20 14:48:20 Fine registrazione: 06/02/20 15:08:21  
 Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN  
 Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 85% tracciato (selezione manuale)  
 Freq. campionamento: 128 Hz Lunghezza finestre: 20 s  
 Tipo di lisciamento: Triangular window Lisciamento: 10%



### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

**Picco H/V a 2.03 ± 0.41 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	2.03 > 0.50	<b>OK</b>	
$n_c(f_0) > 200$	2071.9 > 200	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 98	<b>OK</b>	

### Criteri per un picco H/V chiaro

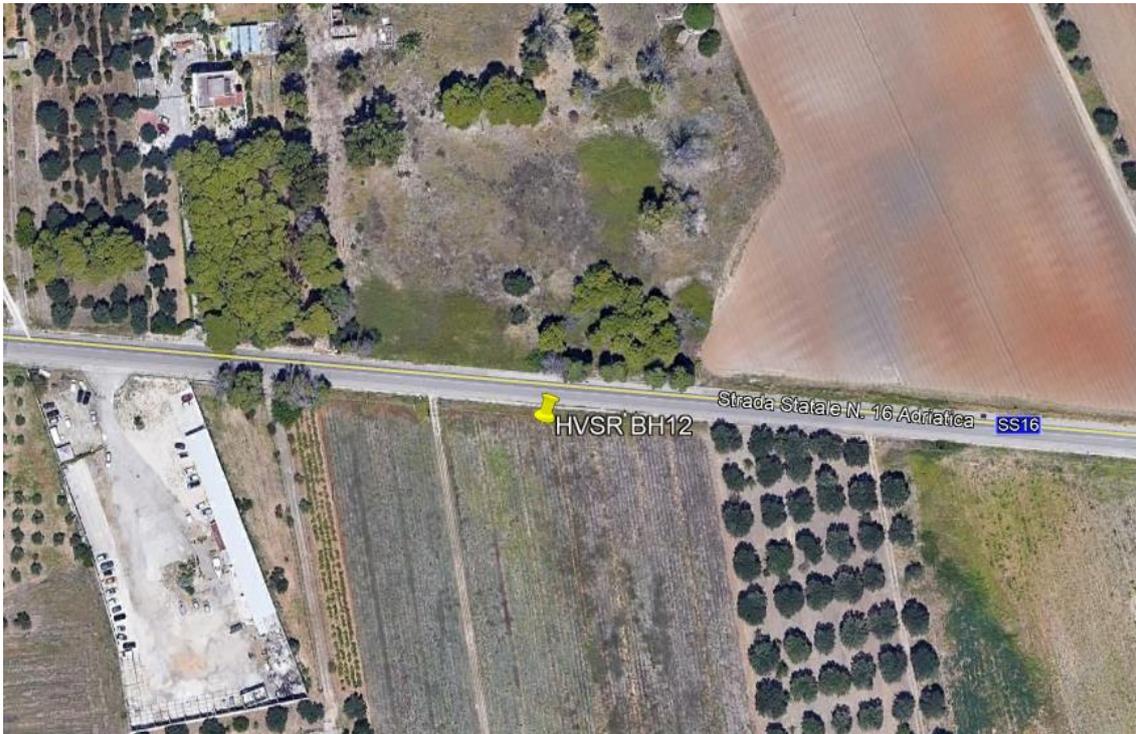
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			
Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	3.813 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	2.50 > 2	<b>OK</b>	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.20082  < 0.05$		
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.40792 < 0.10156		
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.3475 < 1.58	<b>OK</b>	

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

### Valori di soglia per $\sigma_f$ e $\sigma_A(f_0)$

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



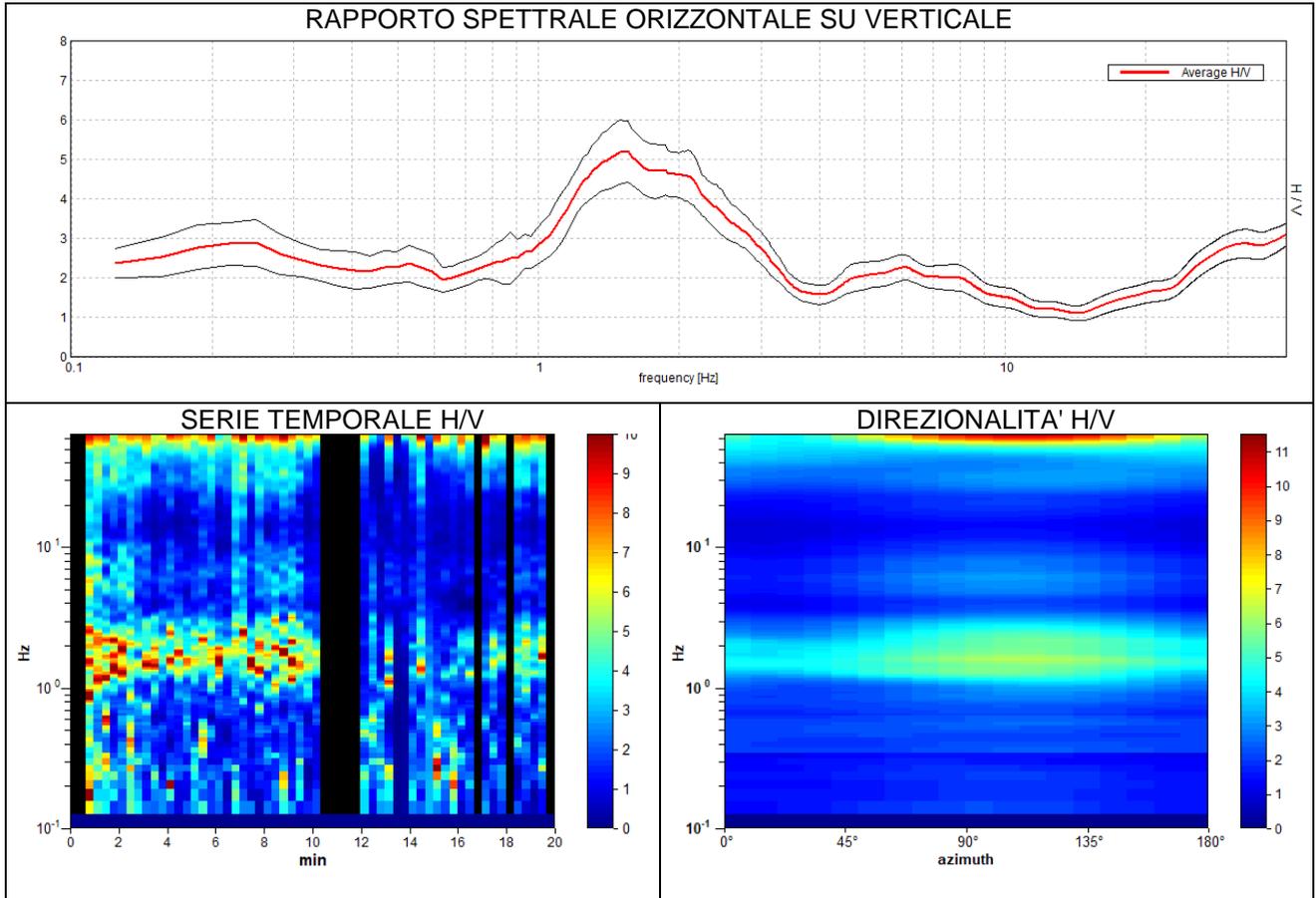
**Fig. 19:** ortofoto relativa all'ubicazione della prova HVSr BH12.



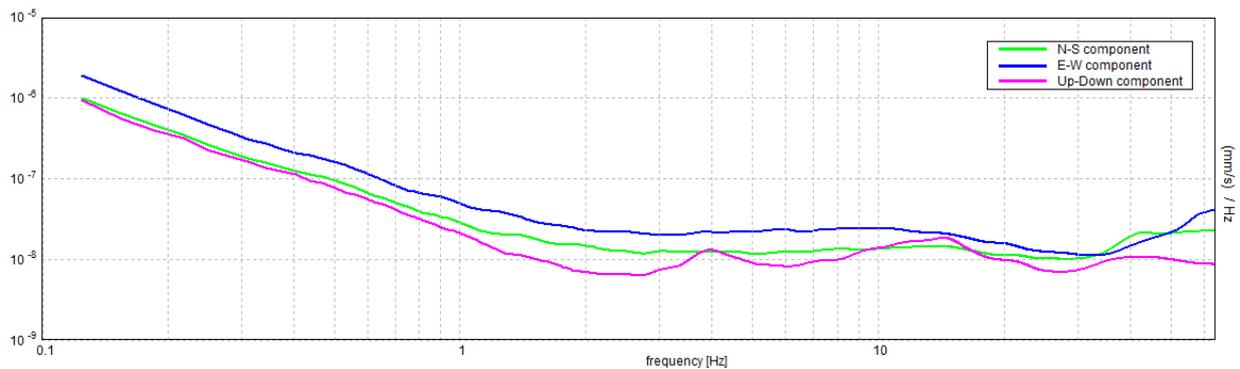
**Fig. 20:** foto relativa alla prova HVSr BH12.

## 6.2 HVSR BH13

Strumento: TRZ-0017/01-09 Inizio registrazione: 16/02/20 16:57:34 Fine registrazione: 16/02/20 17:17:35  
 Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN  
 Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 83% tracciato (selezione manuale)  
 Freq. campionamento: 128 Hz Lunghezza finestre: 20 s  
 Tipo di lisciamento: Triangular window Lisciamento: 10%



## SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

**Picco H/V a  $1.56 \pm 0.23$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.56 > 0.50$	<b>OK</b>	
$n_c(f_0) > 200$	$1562.5 > 200$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 76	<b>OK</b>	

### Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.906 Hz	<b>OK</b>	
Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	3.094 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	$5.20 > 2$	<b>OK</b>	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.14585  < 0.05$		
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.22789 < 0.15625$		
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.7669 < 1.78$	<b>OK</b>	

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

### Valori di soglia per $\sigma_f$ e $\sigma_A(f_0)$

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



**Fig. 21:** ortofoto relativa all'ubicazione della prova HVSR BH13.



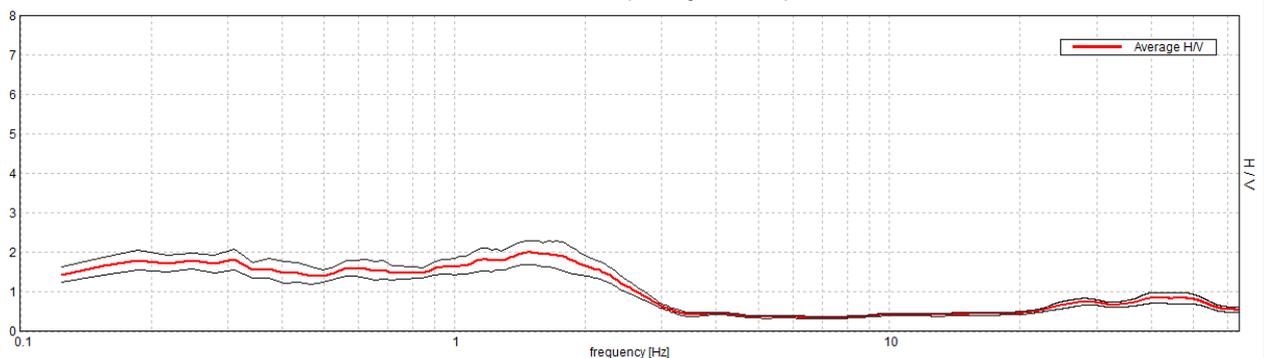
**Fig. 22:** foto relativa alla prova HVSR BH13.

### 6.3 HVSR BH14

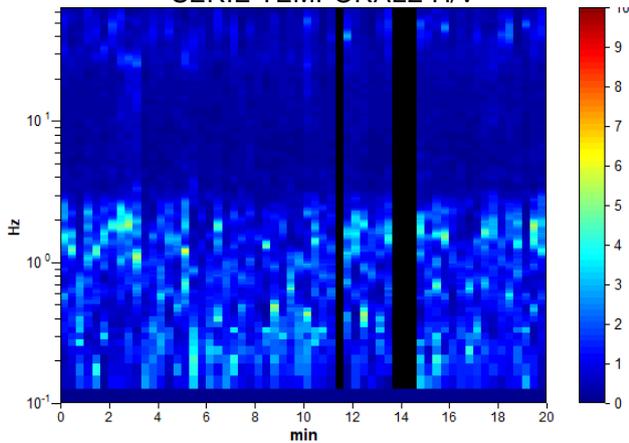
Strumento: TRZ-0017/01-09 Inizio registrazione: 07/02/20 10:03:31 Fine registrazione: 07/02/20 10:23:32  
 Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN  
 Durata registrazione: 0h20'00". Analizzato 93% tracciato (selezione manuale)  
 Freq. campionamento: 128 Hz Lunghezza finestre: 20 s  
 Tipo di lisciamento: Triangular window Lisciamento: 10%

#### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

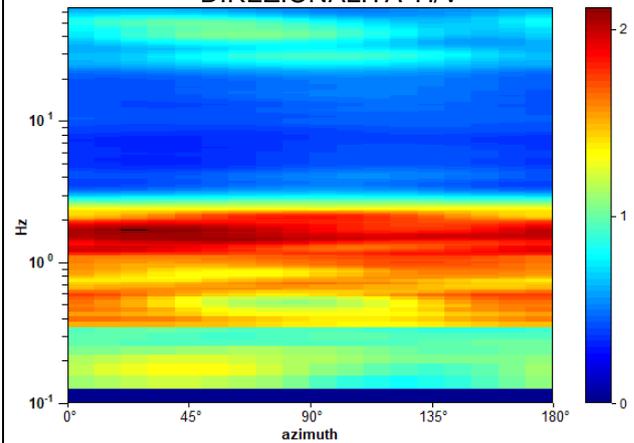
Max. H/V at 1.5 ± 0.5 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



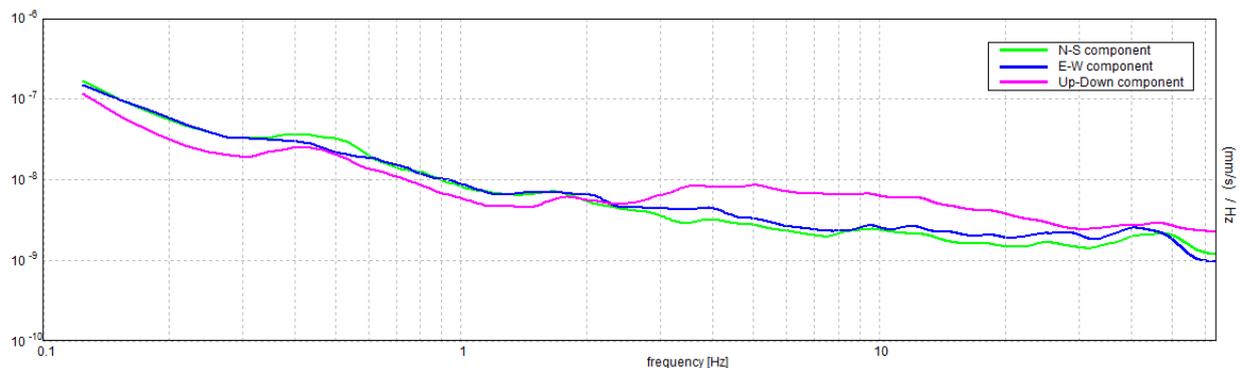
#### SERIE TEMPORALE H/V



#### DIREZIONALITA' H/V



#### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

**Picco H/V a  $1.5 \pm 0.5$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.50 > 0.50$	<b>OK</b>	
$n_c(f_0) > 200$	$1680.0 > 200$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 73	<b>OK</b>	

### Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			
Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	2.656 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	$2.00 > 2$	<b>OK</b>	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.33586  < 0.05$		
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.50379 < 0.15$		
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3014 < 1.78$	<b>OK</b>	

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

### Valori di soglia per $\sigma_f$ e $\sigma_A(f_0)$

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

Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
HVSr

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 48 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

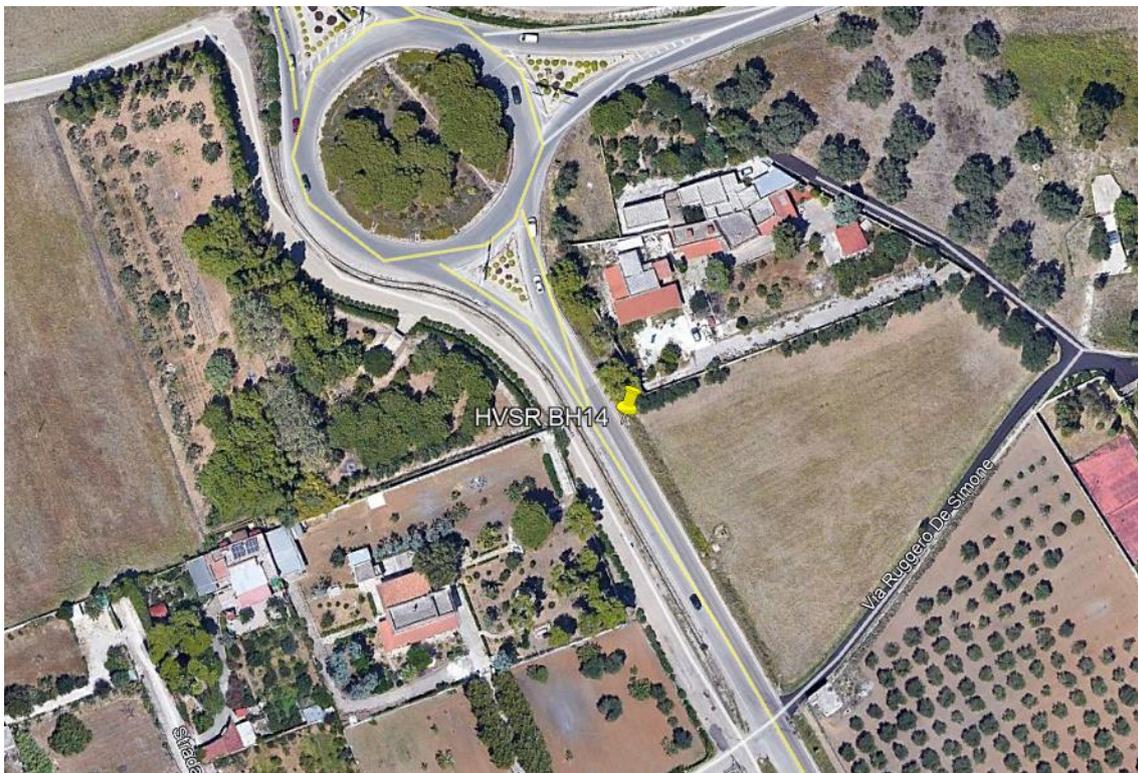


Fig. 23: ortofoto relativa all'ubicazione della prova HVSr BH14.



Fig. 24: foto relativa alla prova HVSr BH14.

**Indagini geofisiche – Prove Down-Hole ed  
 HVSR**

COMMESSA IA7K	LOTTO 00	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A	FOGLIO 49 di 49
------------------	-------------	---------------------	--------------------------	-----------	--------------------

## 7 Ubicazione delle prove geofisiche eseguite

Tecnica Geofisica utilizzata	Codice Sito	Luogo	Coordinate (WGS84 gradi decimali)		Coordinate (UTM-WGS84, fuso 33N)	
			Latitudine	Longitudine	X (est)	Y (nord)
Hvsr	HVSR BH12	Aeroporto Brindisi	40.645701	17.901684	745354.2	4503476.51
Hvsr	HVSR BH13	Aeroporto Brindisi	40.651834	17.909237	745970.41	4504178.57
Hvsr	HVSR BH14	Aeroporto Brindisi	40.656829	17.929383	747655.46	4504789.71
Down-hole	BH12	Aeroporto Brindisi	40.645701	17.901684	745354.2	4503476.51
Down-hole	BH13	Aeroporto Brindisi	40.651834	17.909237	745970.41	4504178.57
Down-hole	BH14	Aeroporto Brindisi	40.656829	17.929383	747655.46	4504789.71

Tabella riassuntiva riportante le ubicazioni delle prove eseguite