

Allegato
“Indagini MS”

Relazione

Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSR

per definizione profilo verticale Vs e parametro Vs30

MDP_SMC51

MARENO DI PIAVE (TV)

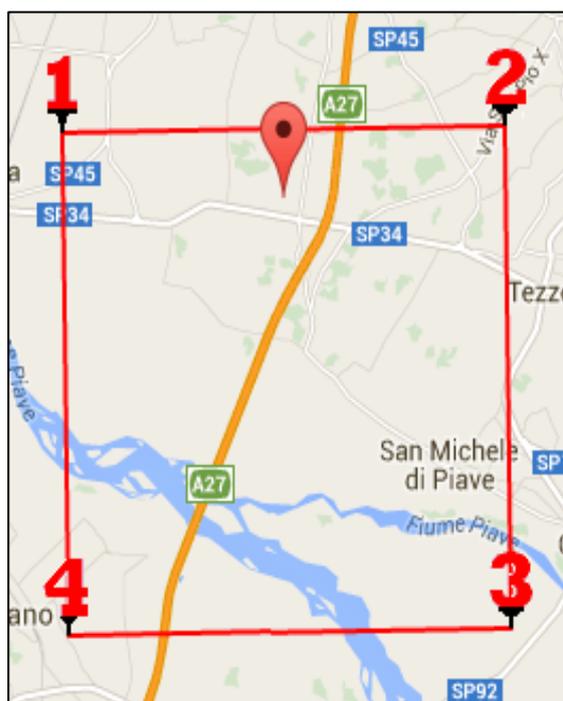
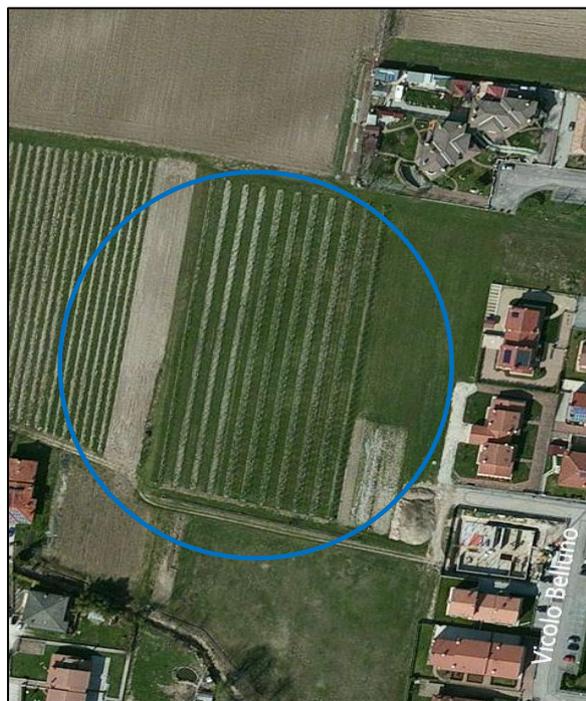
Via Venezia

Coordinate WGS84

Lat. N 45.82136057 Long. E 12.30671049

Coordinate ED50

Lat. N 45.823116 Long. E 12.307538



i geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor - Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$).

2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche

che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi) , dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai,1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

5. Strumentazione impiegata

Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMi e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

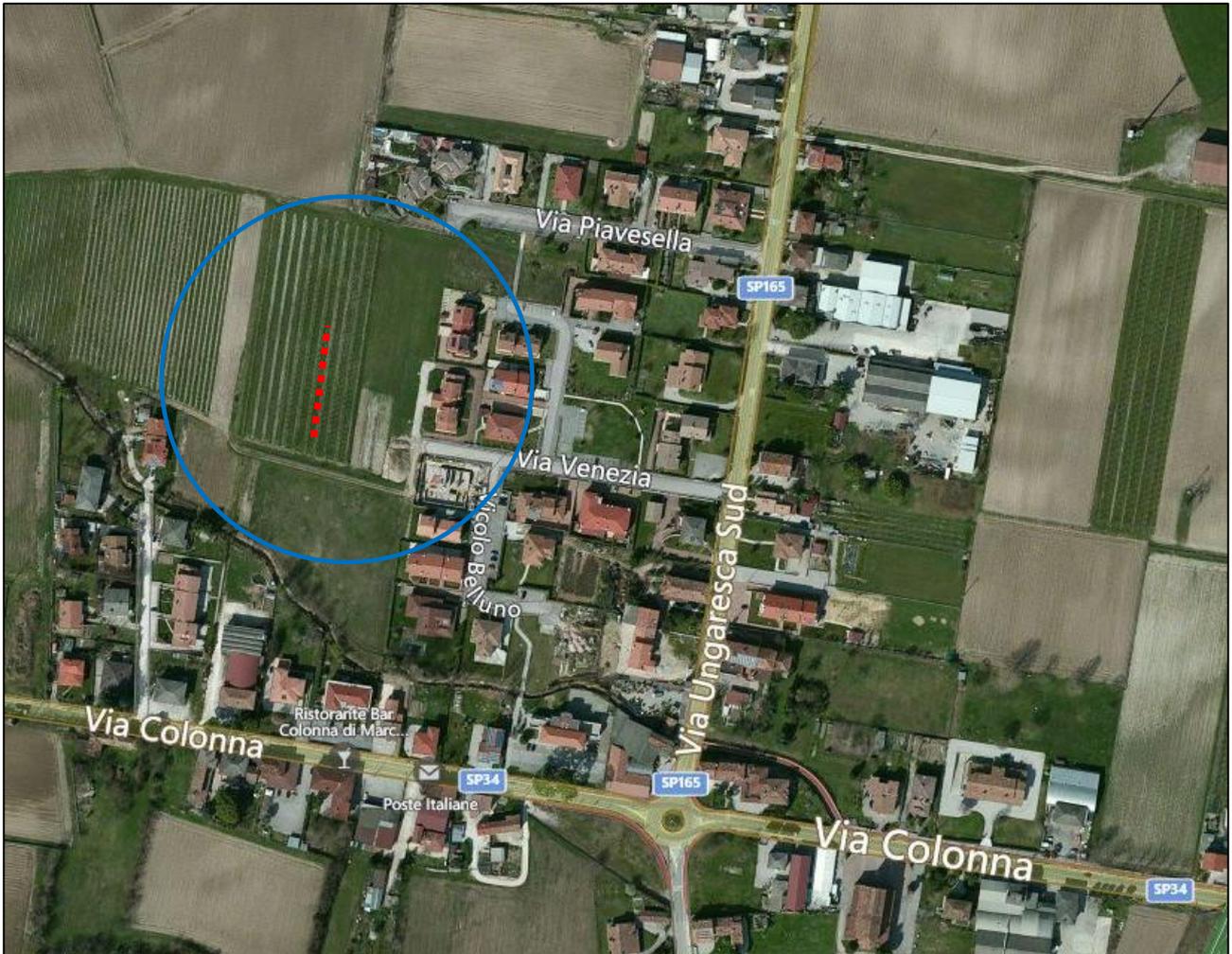
E' stato utilizzato un sismografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

Sito Stendimento Sismico St

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St' (.....) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMi (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

Dati sperimentali (St)

Numero di ricevitori	24
Distanza tra i sensori:	2 m
Numero di campioni temporali.....	2048
Passo temporale di acquisizione.....	0.6 ms
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....	24

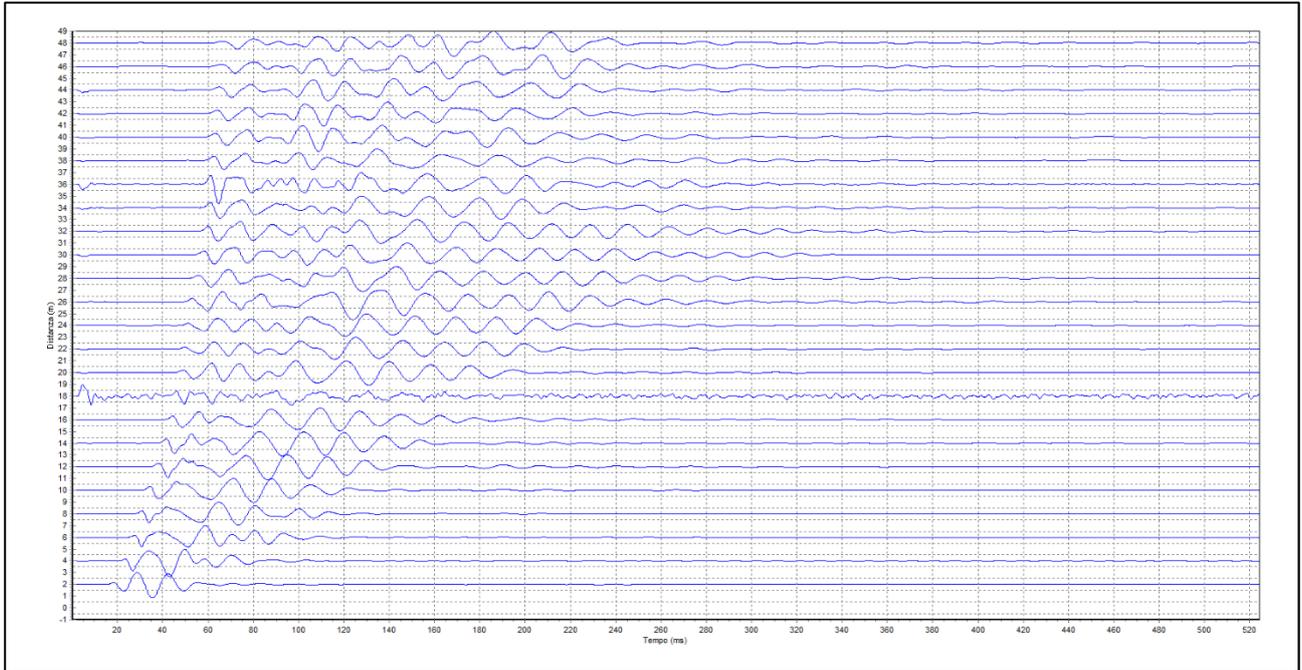


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

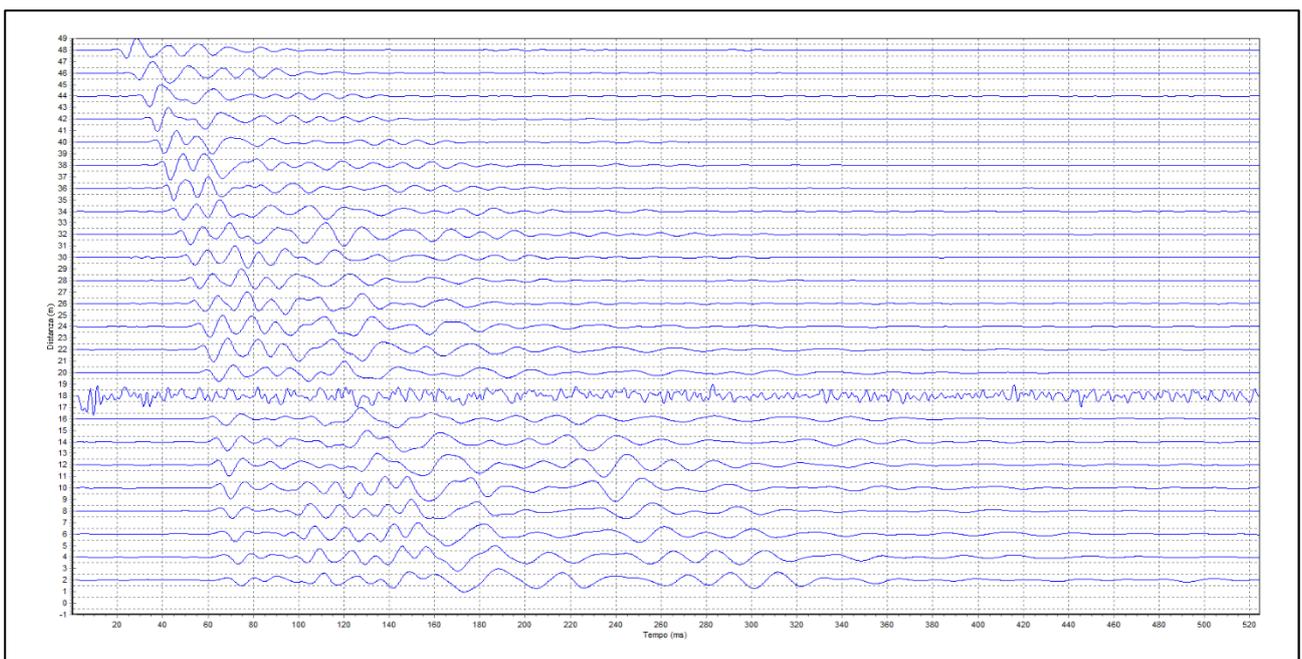


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

Sismica a rifrazione

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$), così come nel caso in esame.

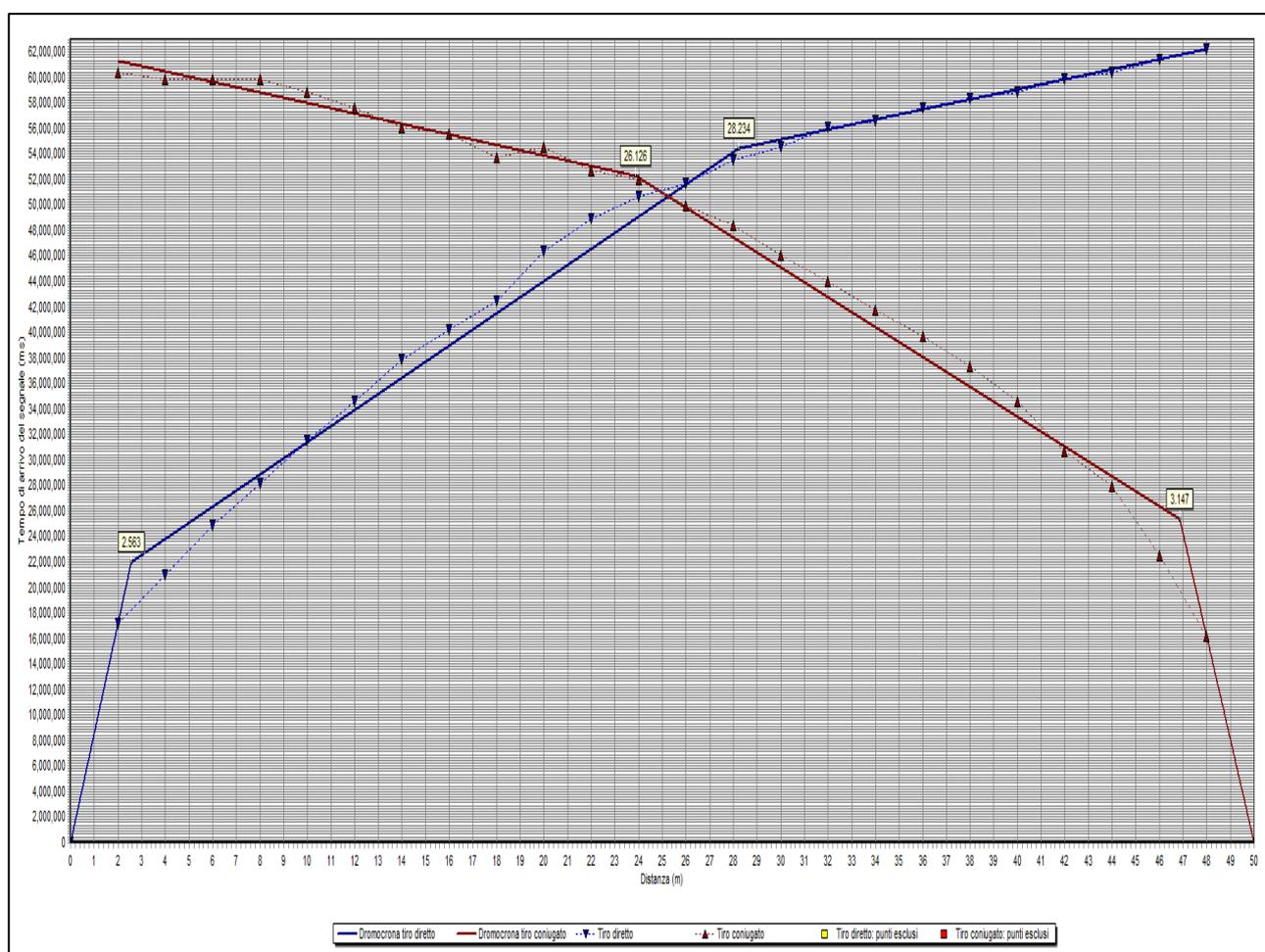


Figura 1.3: grafico generale curva distanza-tempo

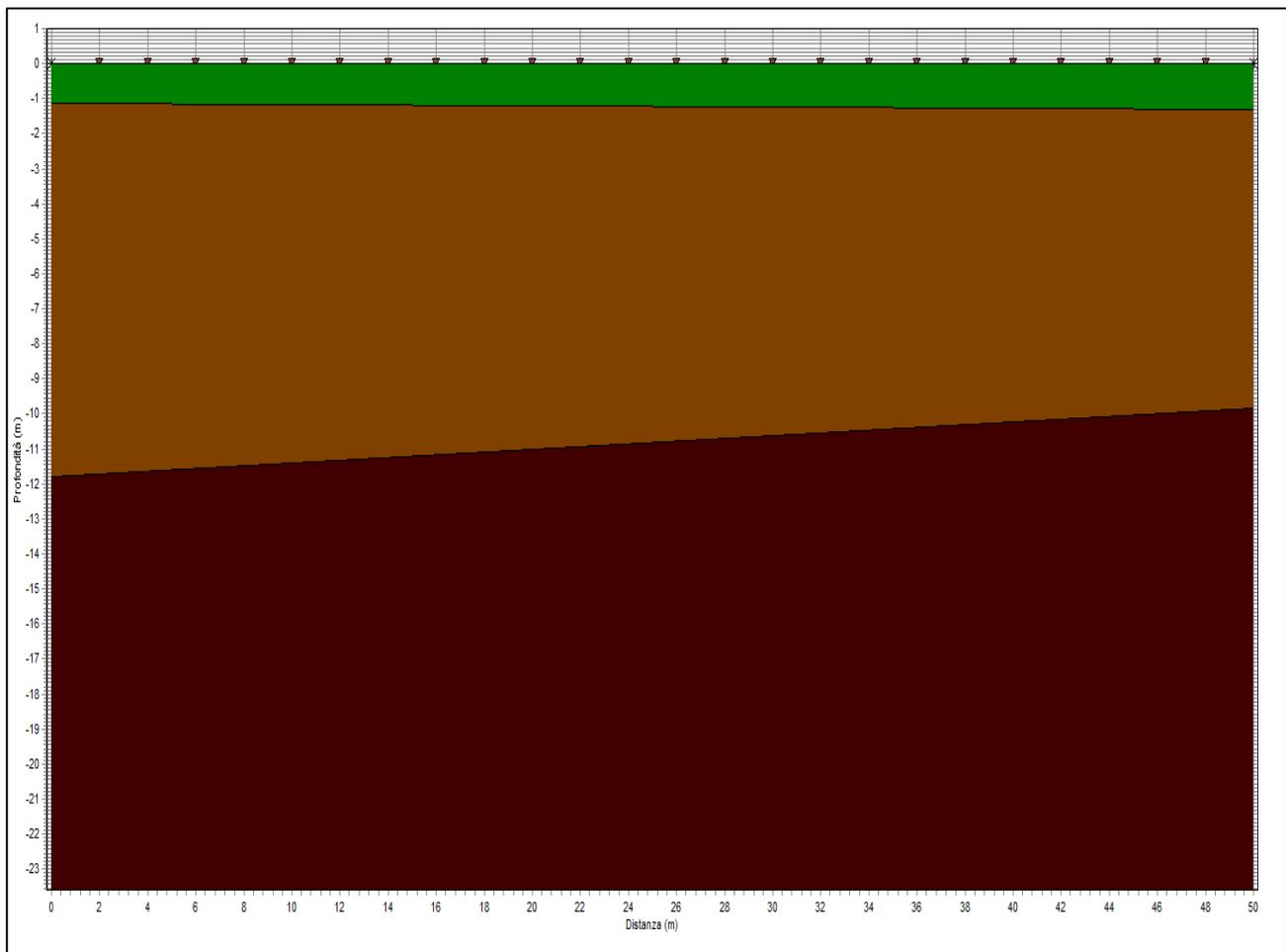


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

Strato n.	Vp (m/s)	Hs(m)	Hd(m)	rd	ri
1	352	1.139	1.319	1	1
2	768	11.798	9.836	0.988	0.986
3	947	947		0.998	0.952

LEGENDA:
Hs = spessore strato lato sinistro;
Hd = spessore strato lato destro;
Vp = velocità delle onde P.
Vs = velocità delle onde S.
rd = coefficiente correlazione tiro diretto
ri = coefficiente correlazione tiro inverso

La sezione sismostratigrafica è stata interpretata con attendibilità fino a circa 20 m di profondità, in coerenza con gli altri tipi di analisi descritte in seguito; in realtà la profondità indagata arriva a circa 25-30 m.

Conclusioni (rifrazione)

L'indagine ha evidenziato 3 sismostrati coi rispettivi valori: il primo sismostrato di 1 m con Vp 352 m/s, il secondo sismostrato di circa 11 m con Vp di 768 m/s e il terzo con Vp di circa 947 m/s.

Analisi MASW

Frequenza minima15Hz

Frequenza massima48Hz

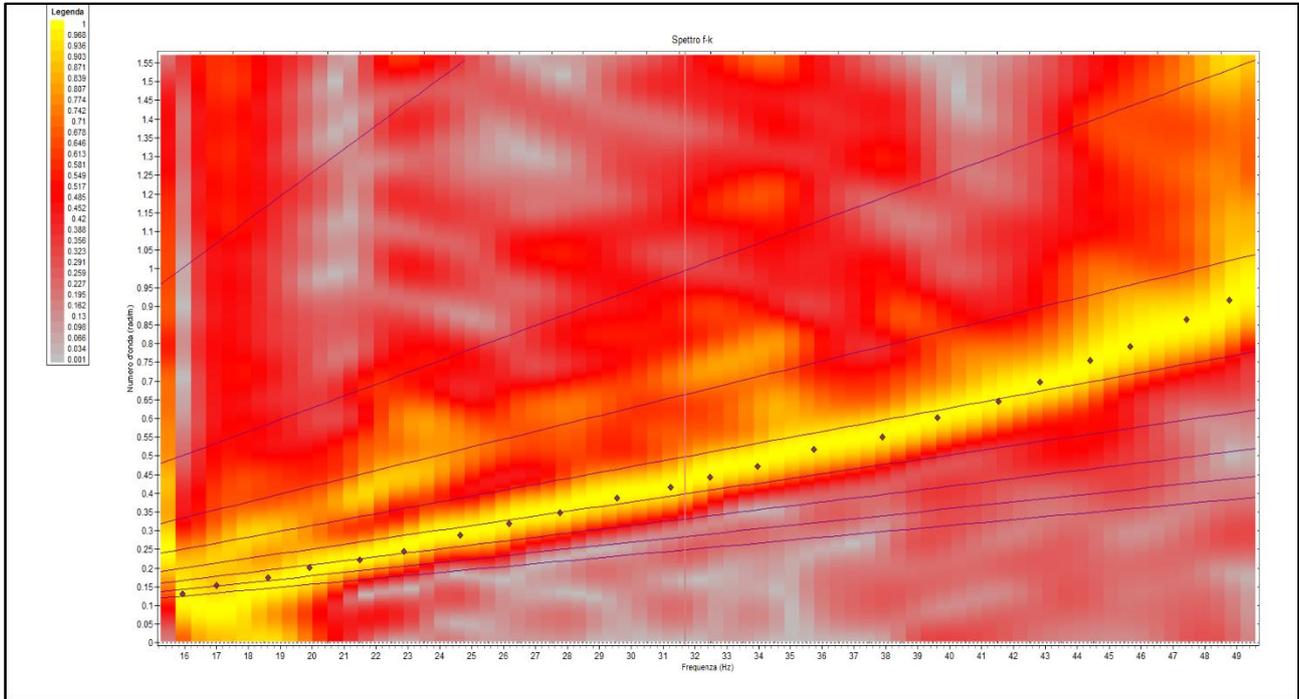


Figura 1.5: Spettro f – k

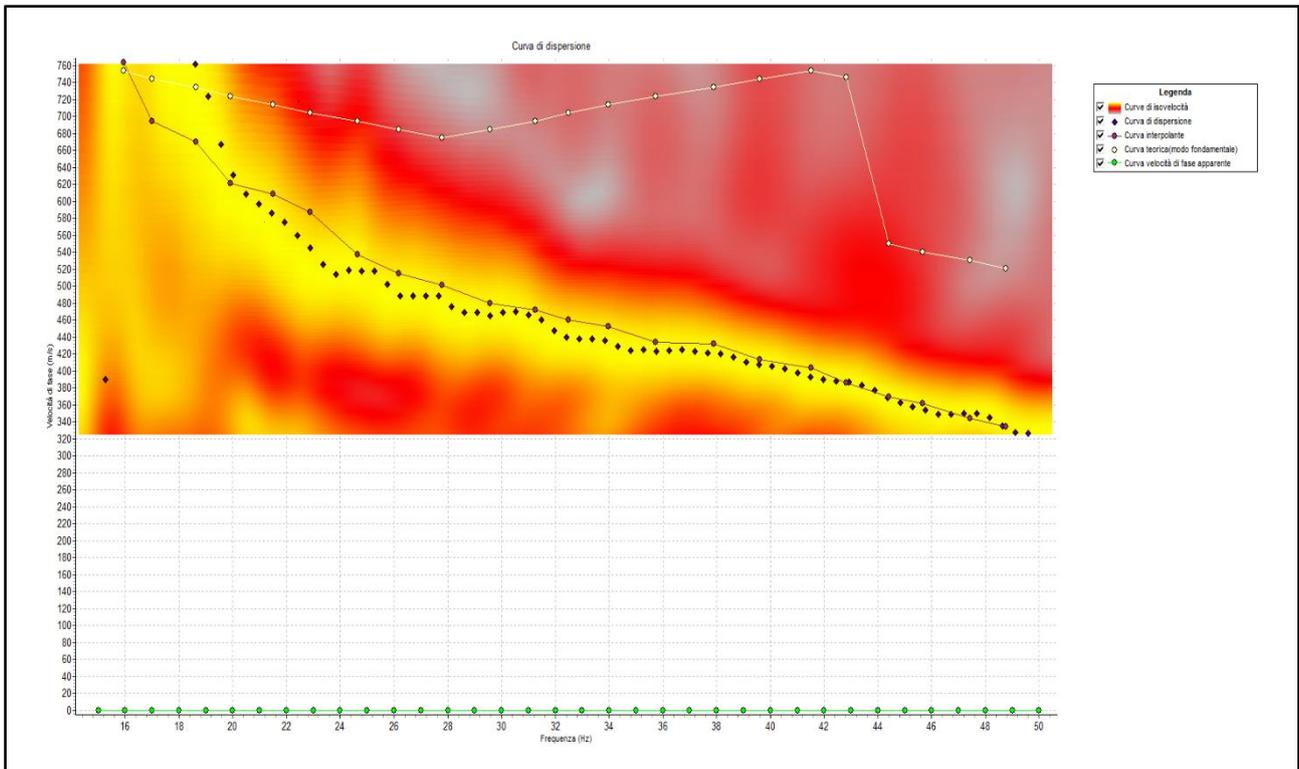


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale generando mediando i livelli con valori di Vs simili.

Numero di strati (escluso semispazio).....	4
Spaziatura ricevitori [m].....	2 m
Numero ricevitori	24

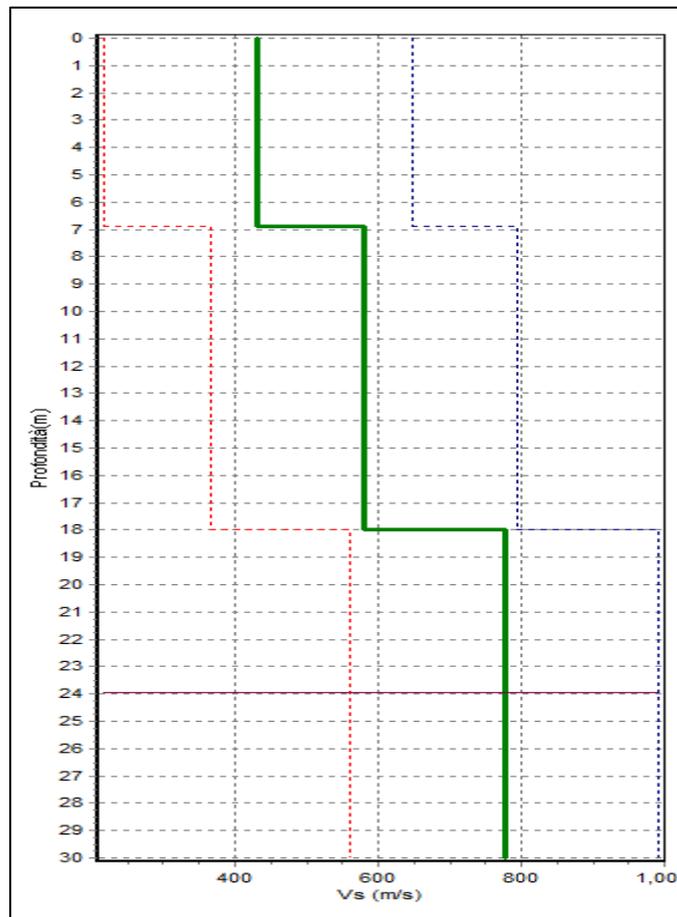


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

Conclusioni (MASW)

L'indagine ha fornito dati affidabili MASW sino ad una profondità di circa 15 m; abbiamo circa 7 m di terreni un po' più soffici, con Vs di circa 400 m/s; fino a 18 m Vs attorno a 600 m/s e oltre 18 m Vs che arrivano fino a quasi 800 m/s.

Analisi ReMi

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

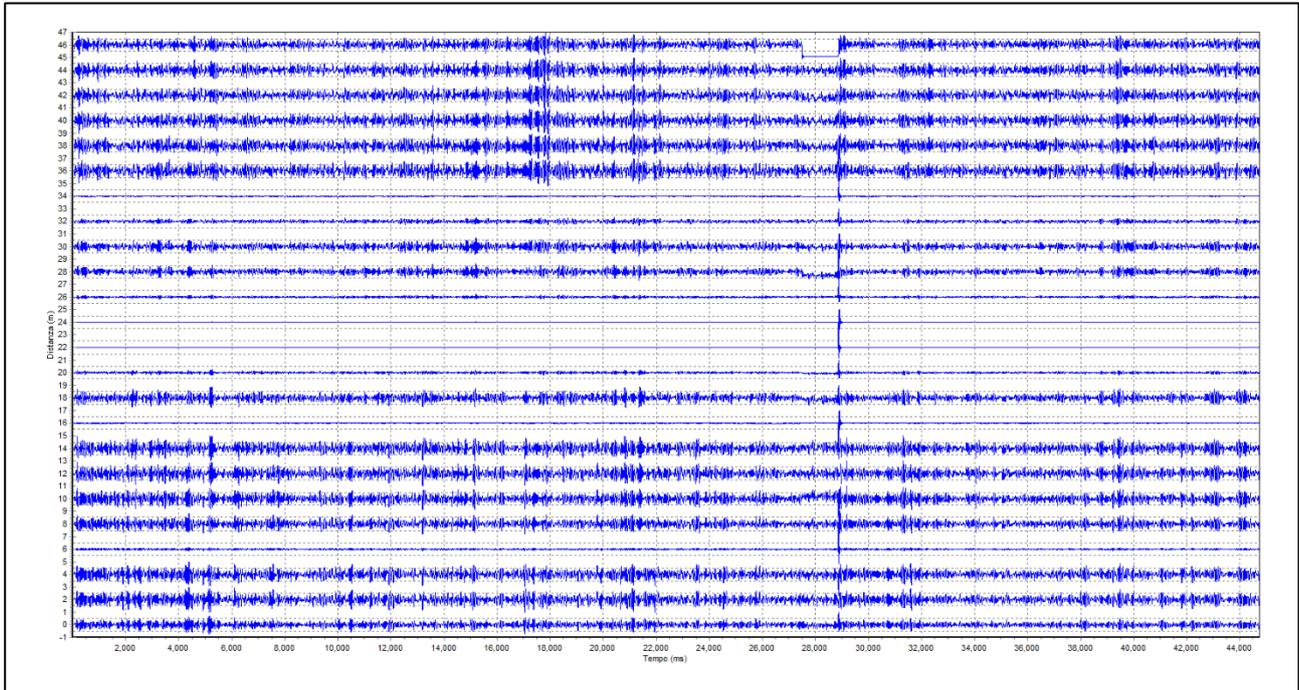


Figura 2.1: Tracce sperimentali

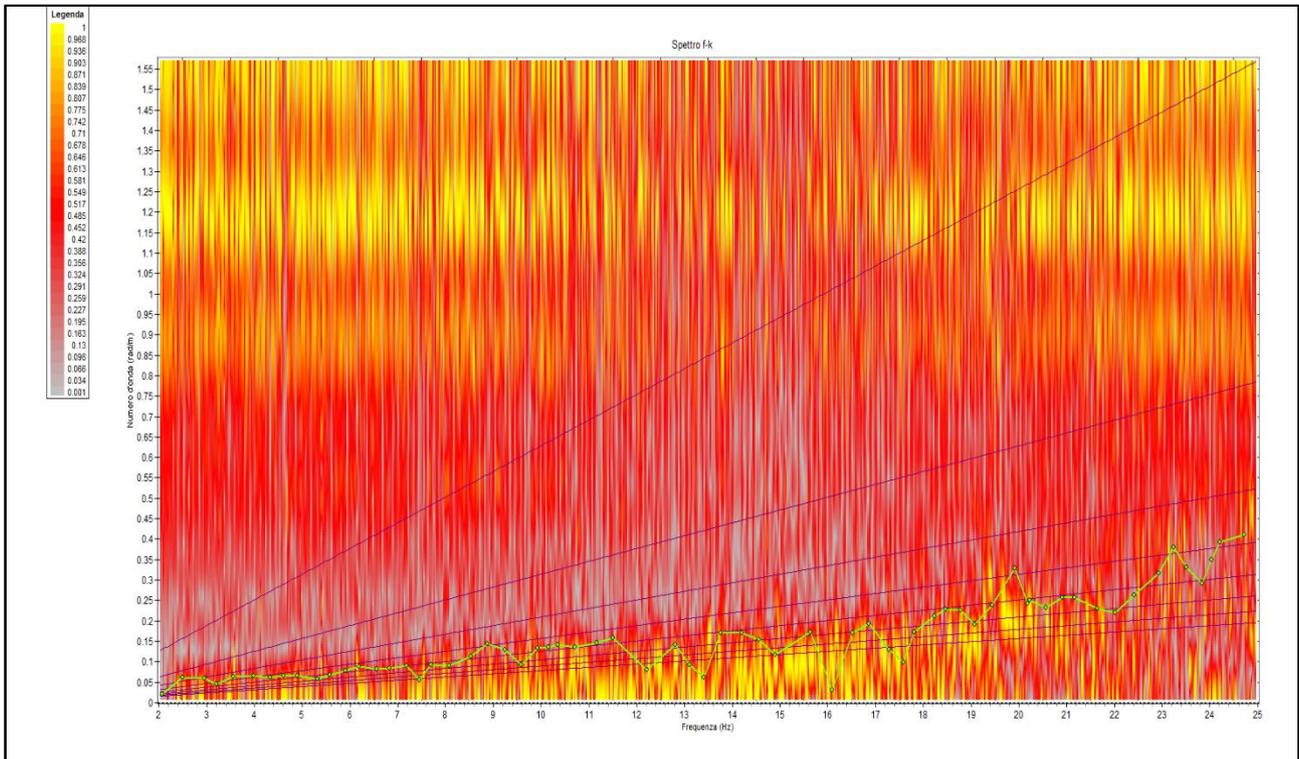


Figura 2.2: Spettro f - k

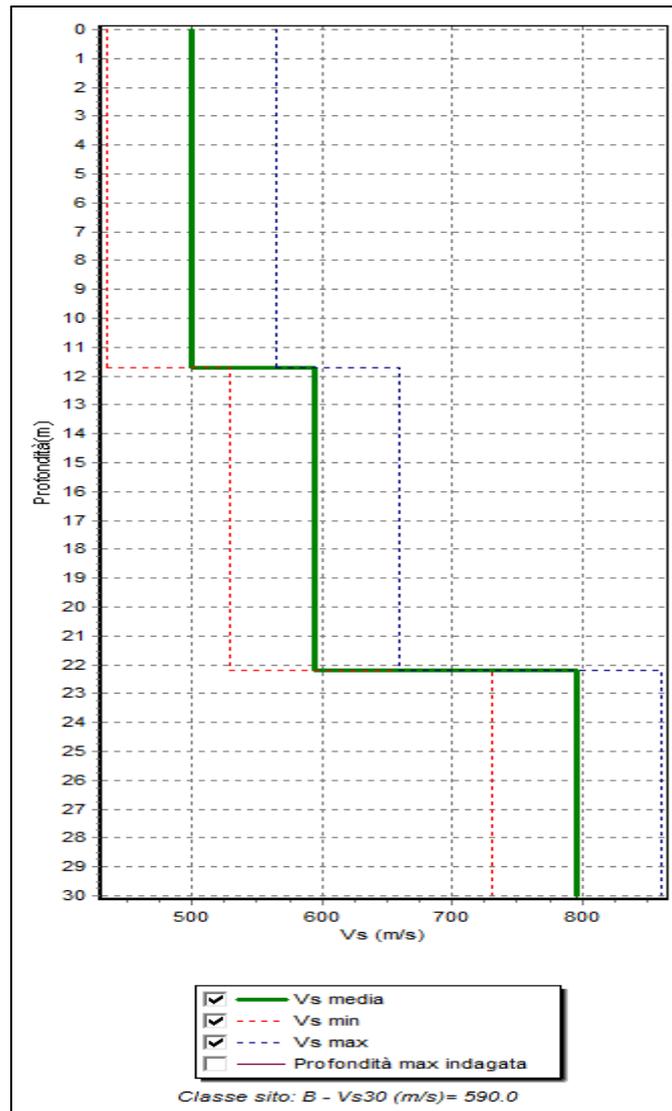


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

Conclusioni (ReMi)

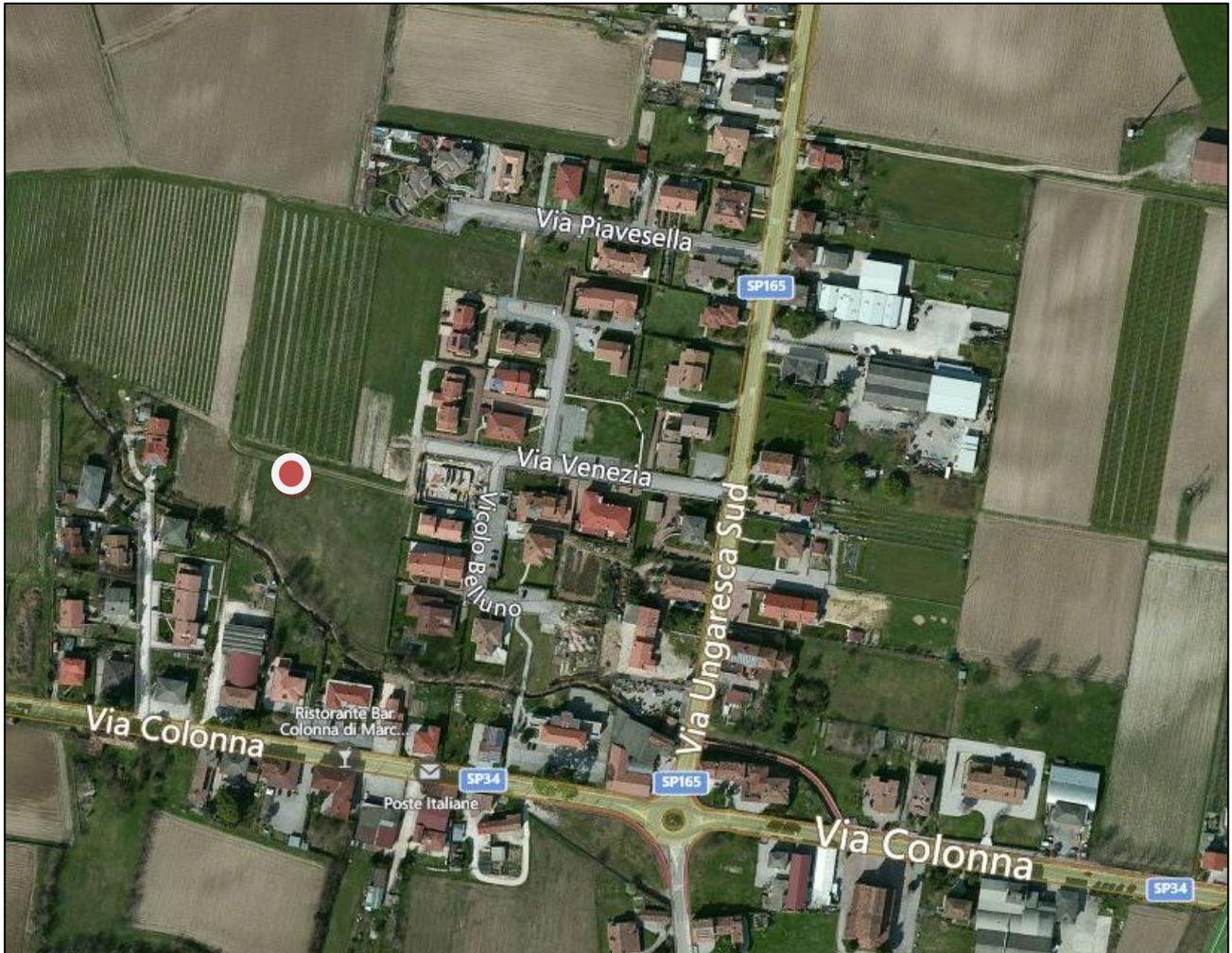
Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati, si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini fino a profondità dell'ordine dei 30 m.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

Profondità (m)	Vs (m/s)	Considerazioni
0 – 12 m	500	Ghiaie sabbiose
12 - 22 m	600	Ghiaie
22 – 30 m	790	Ghiaie

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

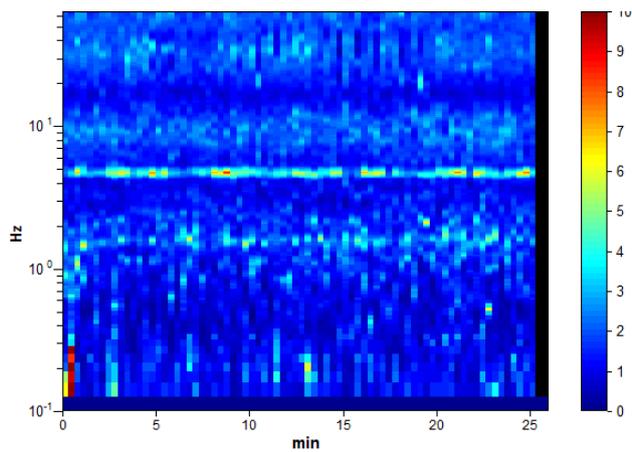


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

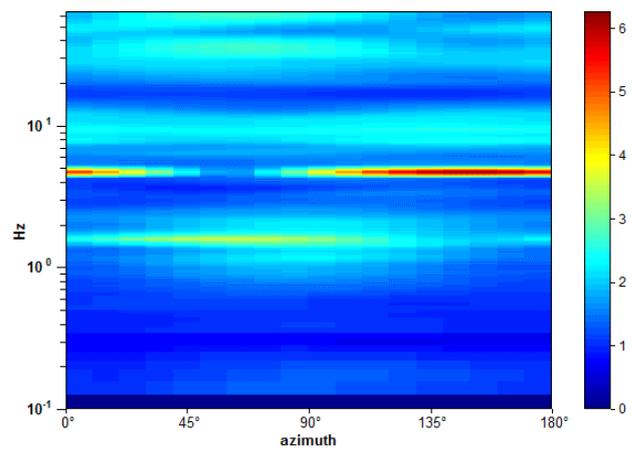


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

Analisi HV

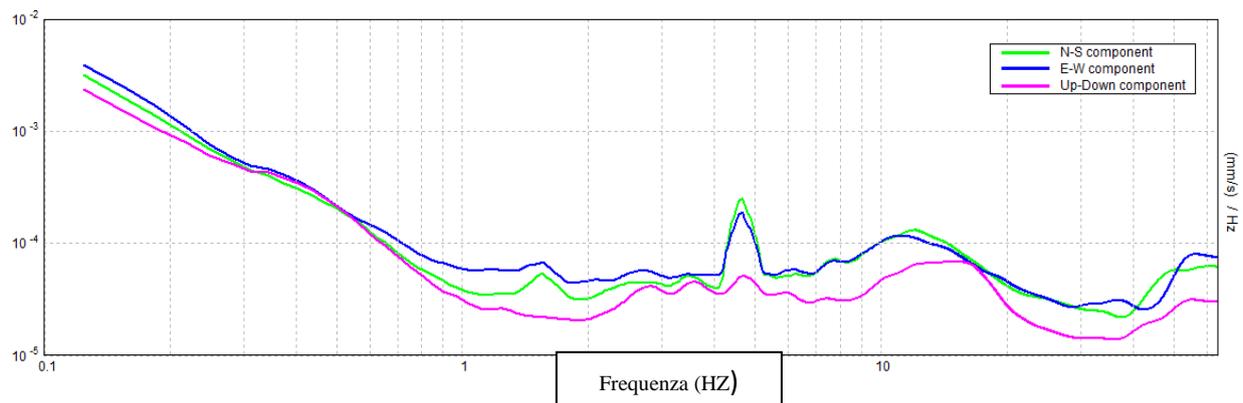


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

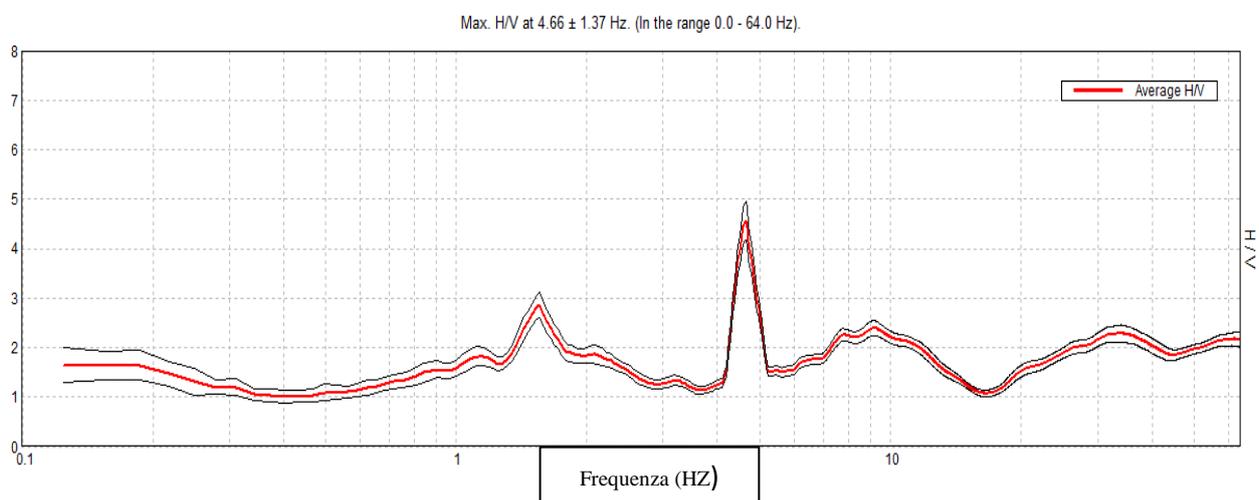
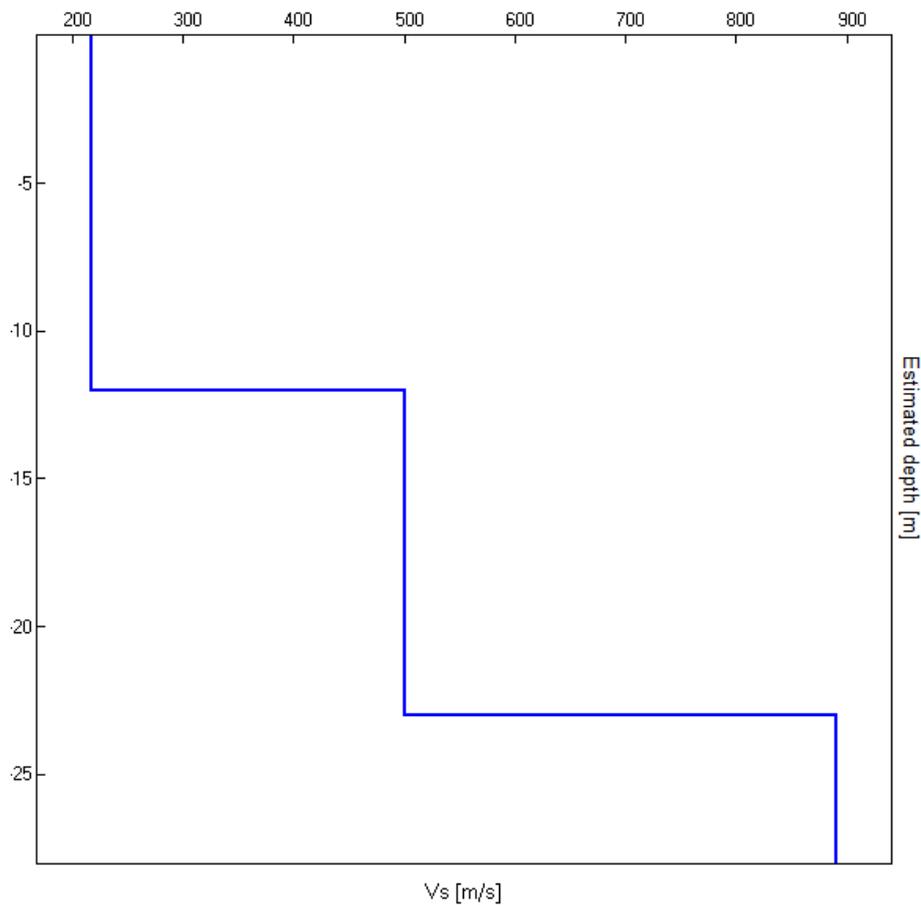
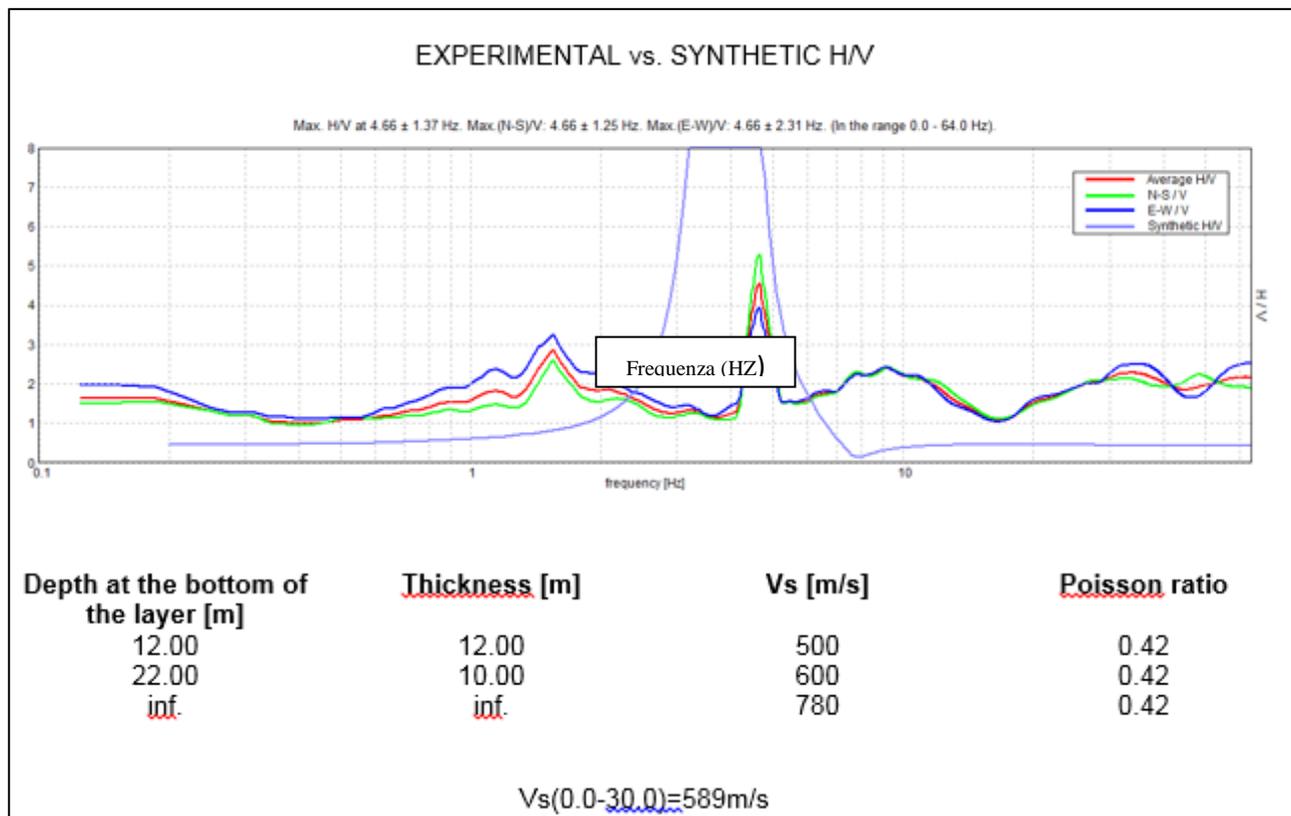


Figura 3.4: rapporto H/V



Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

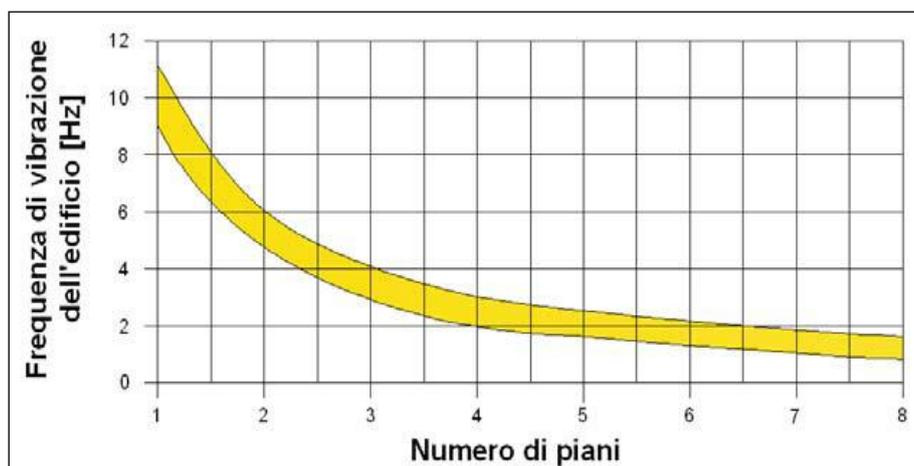


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,6 Hz e 4,6 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 4.66 ± 1.37 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	4.66 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	7263.8 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 224 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	4.25 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	5.094 Hz	OK	
$A_0 > 2$	4.56 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.29385 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	1.36824 < 0.23281		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.3873 < 1.58	OK	

L_w	window length
D_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w D_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta due picchi di risonanza riconoscibili (**1,6 Hz e 4,6 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Risultati finali

I profili di velocità, elaborati con le tre tecniche di indagine, hanno consentito di riconoscere, sulle verticali di restituzione delle informazioni sismostratigrafiche, orizzonti con caratteristiche elastiche e velocità delle onde S variabili entro i primi 30 m di sottosuolo. Tutte le indagini hanno evidenziato un incremento delle velocità con la profondità, significativo di volumi di materiale con elevato grado di addensamento e/o maturazione. Non è stato intercettato il bedrock sismico entro i primi 30 m di profondità. In sintesi:

	BEDROCK SISMICO	
	NO	SI
COPERTURA	Sciolta (ghiaie in matrice sabbiosa)	
SPESSORE	15/18 m (spessore certo registrato)	
PARAMETRO Vs da MASW PARAMETRO Vs da ReMi	Vs 30 = 590 m/s	
FREQUENZA del TERRENO	1,6 Hz e 4,6 Hz	

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

Suolo di tipo B

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s (Nspt,30>50 nei terreni a grana grossa o cu30 >250 kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ($\pm 10\%$), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.

Pieve di Soligo, 28/01/2015

il Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Relazione

Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr

per definizione profilo verticale Vs e parametro Vs30

MDP_SMC52

MARENO DI PIAVE (TV)

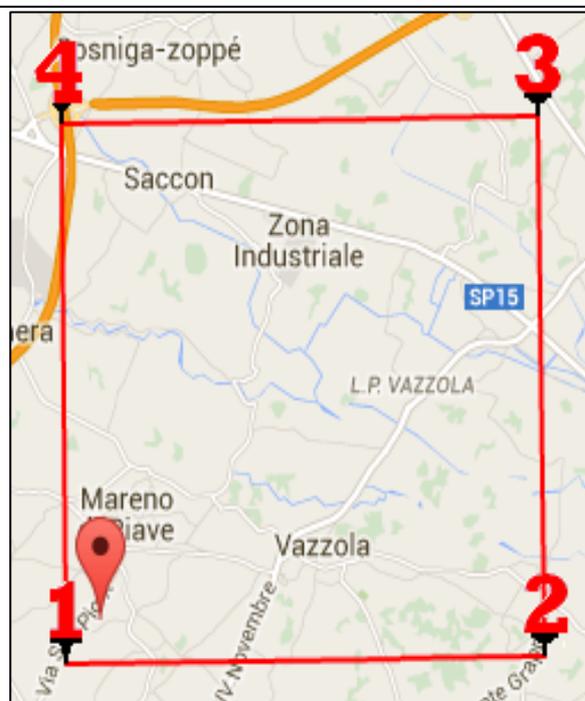
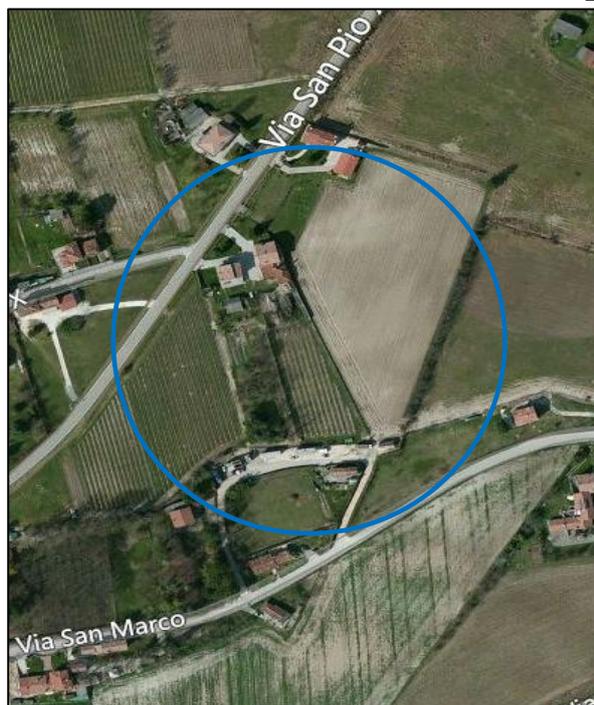
Via San Marco

Coordinate WGS84

Lat. N 45.83283283 Long. E 12.34746987

Coordinate ED50

Lat. N 45.834588 Long. E 12.348299



i geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor - Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$).

2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche

che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico è durata di 26 minuti per ogni punto di misura e è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

5. Strumentazione impiegata

Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMi e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

È stato utilizzato un sismografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW, GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

Sito Stendimento Sismico St

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St' (.....) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMi (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

Dati sperimentali (St)

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di campioni temporali..... 2048
Passo temporale di acquisizione.....0.6 ms
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

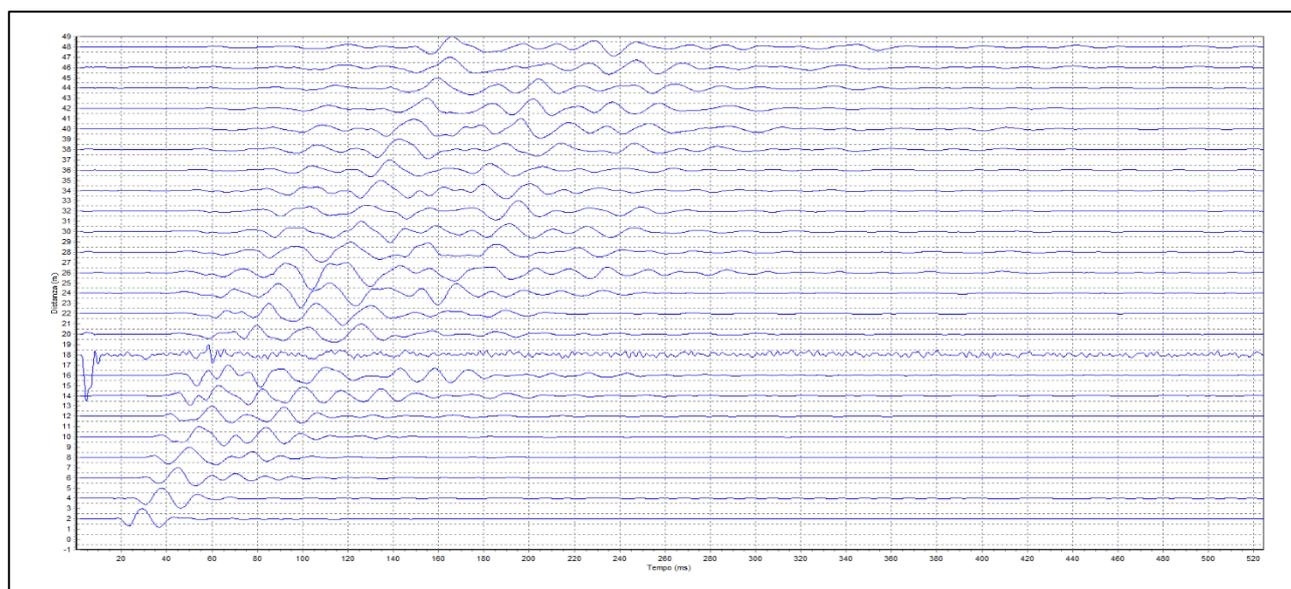


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

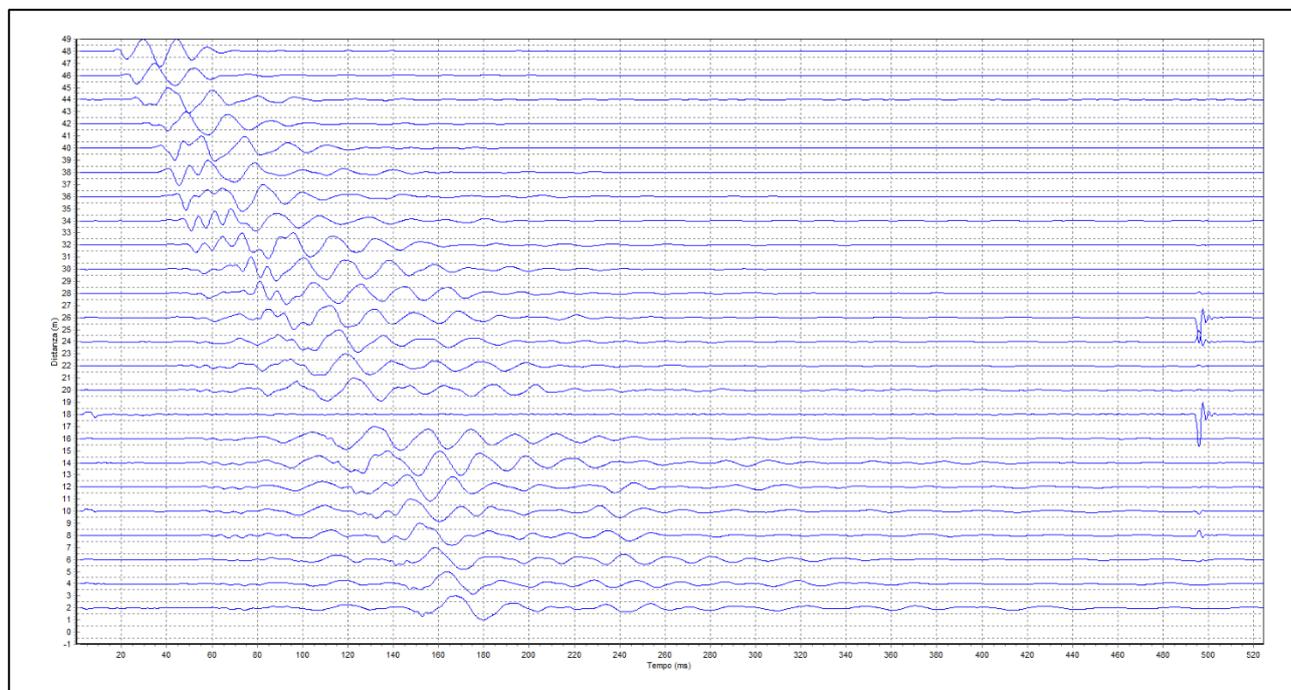


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

Sismica a rifrazione

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$), così come nel caso in esame.

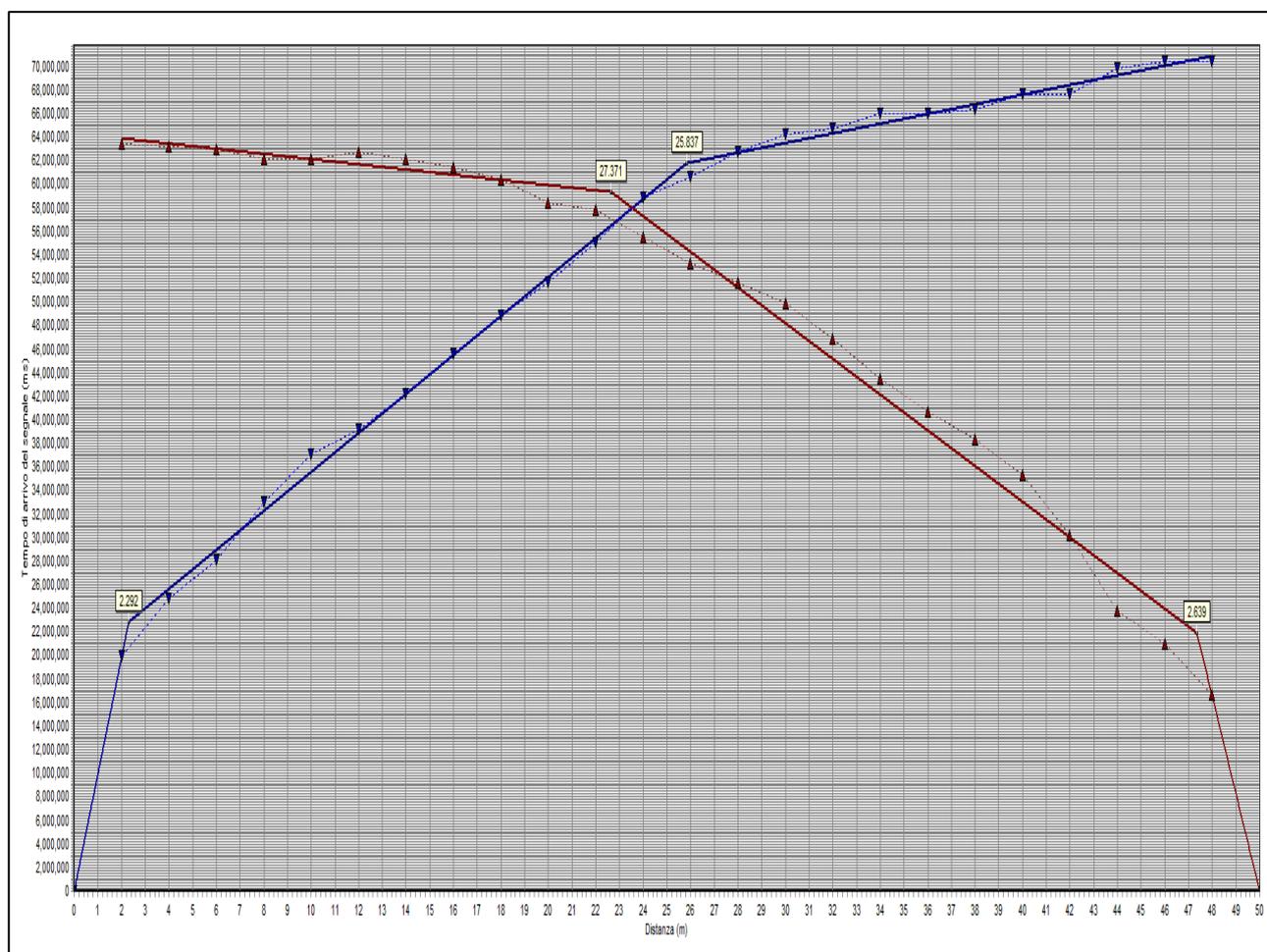


Figura 1.3: gráfico general curva distancia-tempo

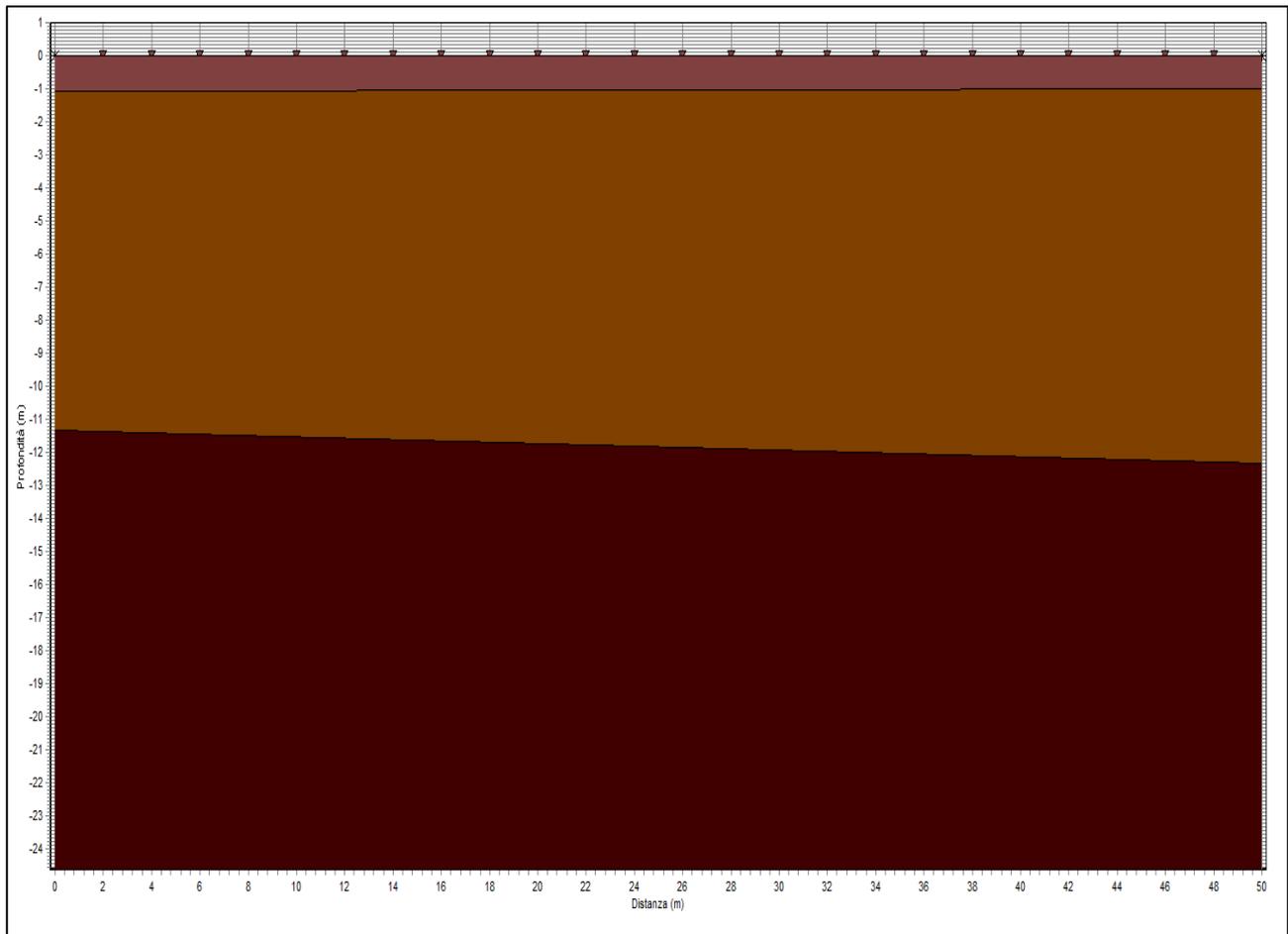


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

Strato n.	Vp (m/s)	Hs(m)	Hd(m)	rd	ri
1	312	1.068	1.005	1	1
2	768	11.336	12.312	0.998	0.985
3	866			0.976	0.87

LEGENDA:
Hs = spessore strato lato sinistro;
Hd = spessore strato lato destro;
Vp = velocità delle onde P.
Vs = velocità delle onde S.
rd = coefficiente correlazione tiro diretto
ri = coefficiente correlazione tiro inverso

La sezione sismostratigrafica è stata interpretata con attendibilità fino a circa 20 m di profondità, in coerenza con gli altri tipi di analisi descritte in seguito; in realtà la profondità indagata arriva a circa 25-30 m.

Conclusioni (rifrazione)

L'indagine ha evidenziato 3 sismostrati coi rispettivi valori: il primo sismostrato di 1 m con Vp 312 m/s, il secondo sismostrato di circa 11 m con Vp di 768 m/s e il terzo con Vp di circa 866 m/s.

Analisi MASW

Frequenza minima12Hz

Frequenza massima48Hz

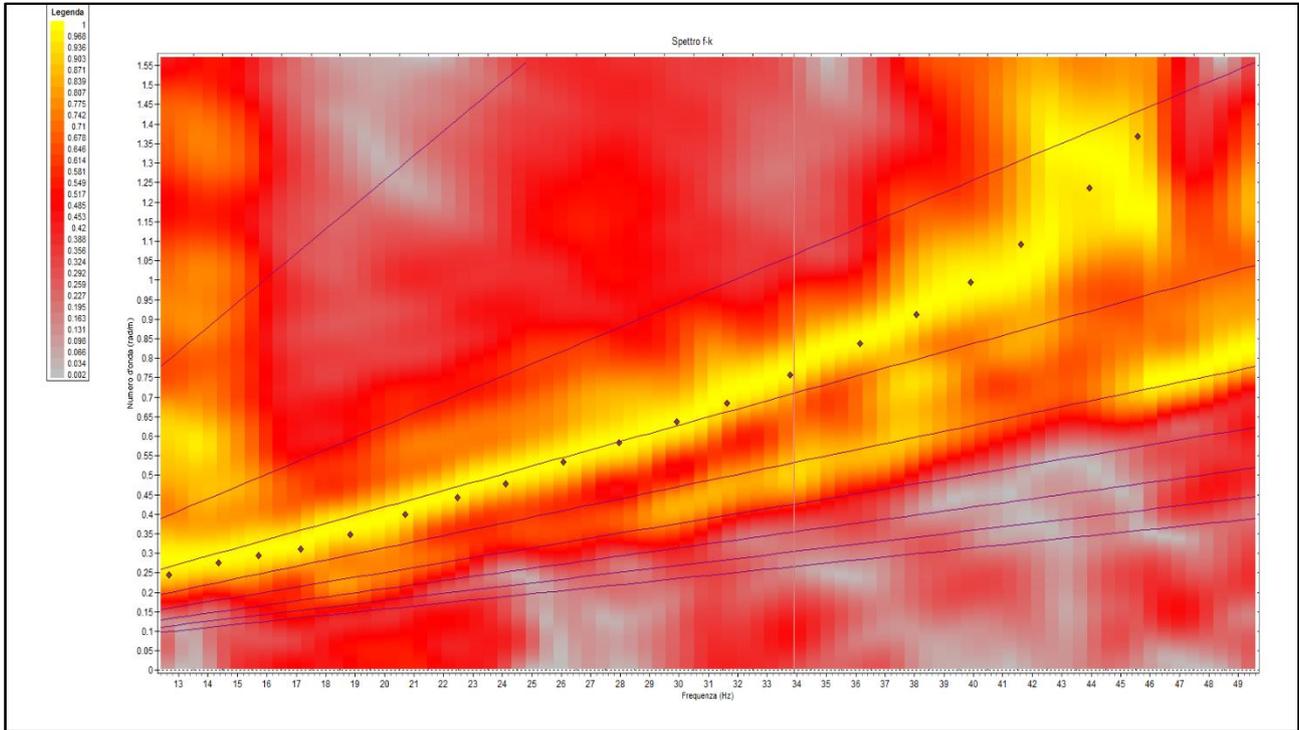


Figura 1.5: Spettro f – k

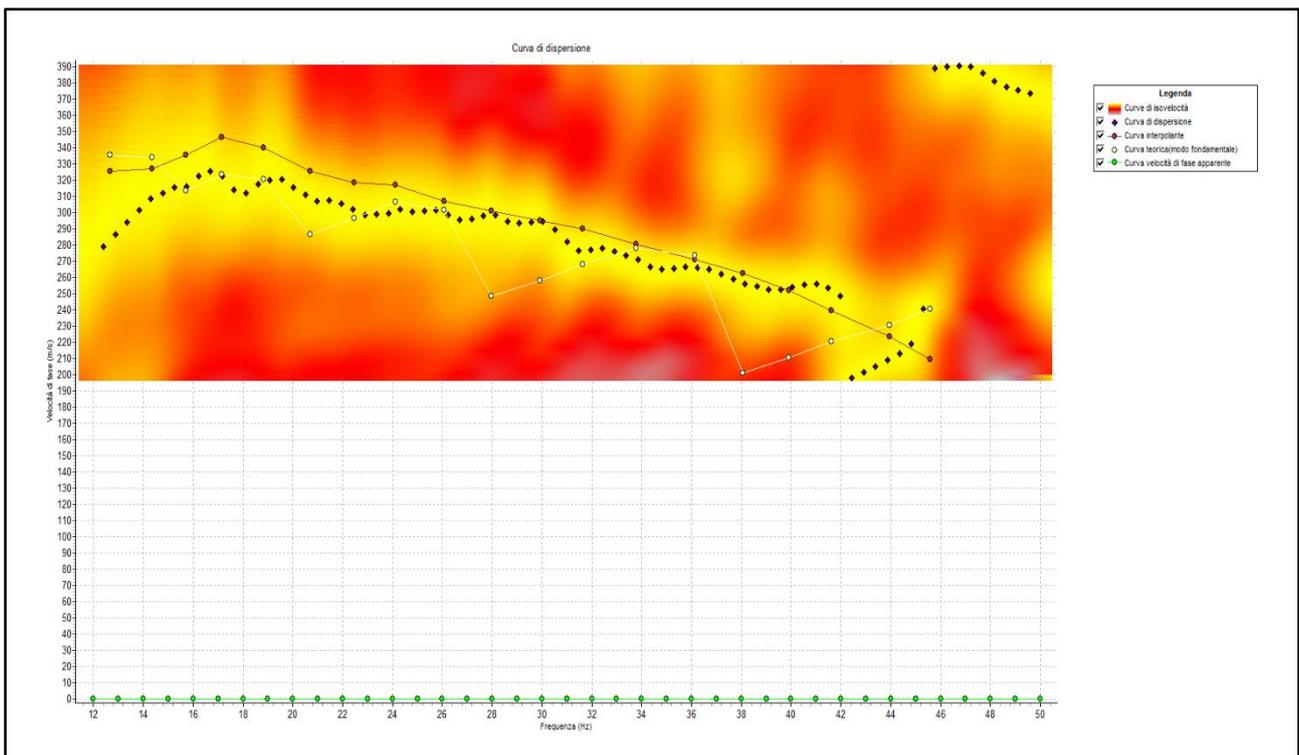


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale mediando i livelli con valori di Vs simili.

Numero di strati (escluso semispazio).....	4
Spaziatura ricevitori [m].....	2 m
Numero ricevitori	24

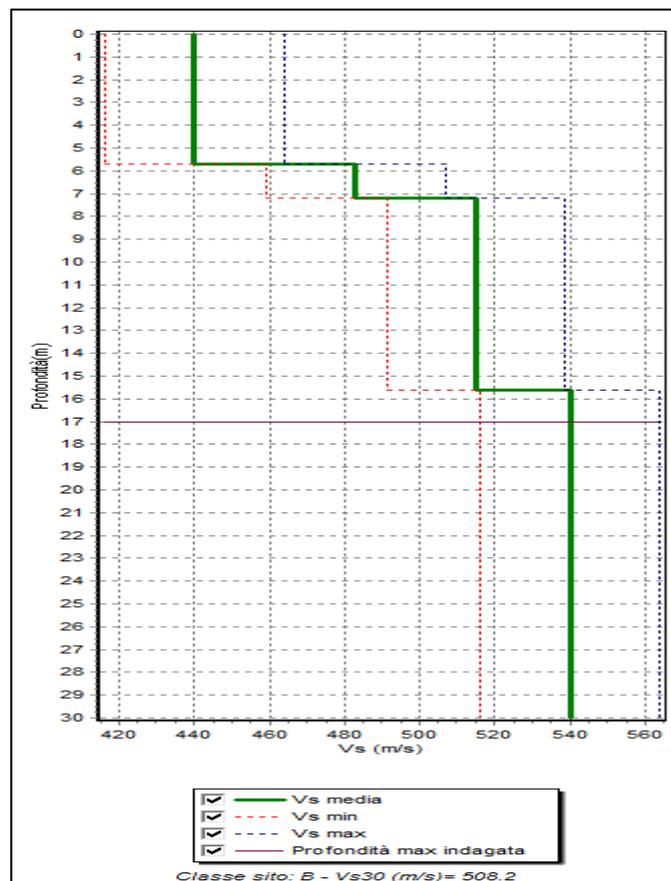


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

Conclusioni (MASW)

L'indagine ha fornito dati affidabili MASW sino ad una profondità di circa 17 m; abbiamo circa 6 m di terreni un po' più soffici, con Vs attorno ai 400 m/s; fino a 16 m Vs attorno a 520 m/s e oltre Vs fino a 540 m/s.

Analisi ReMi

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

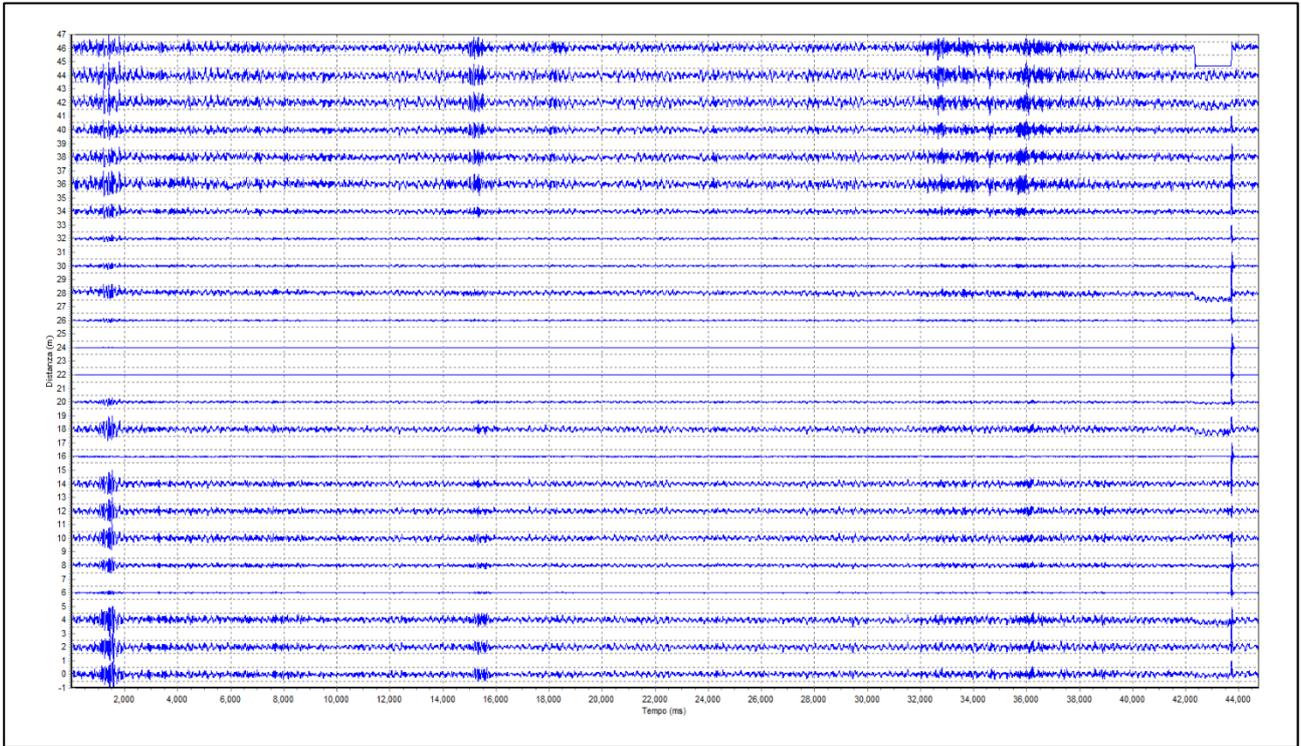


Figura 2.1: Tracce sperimentali

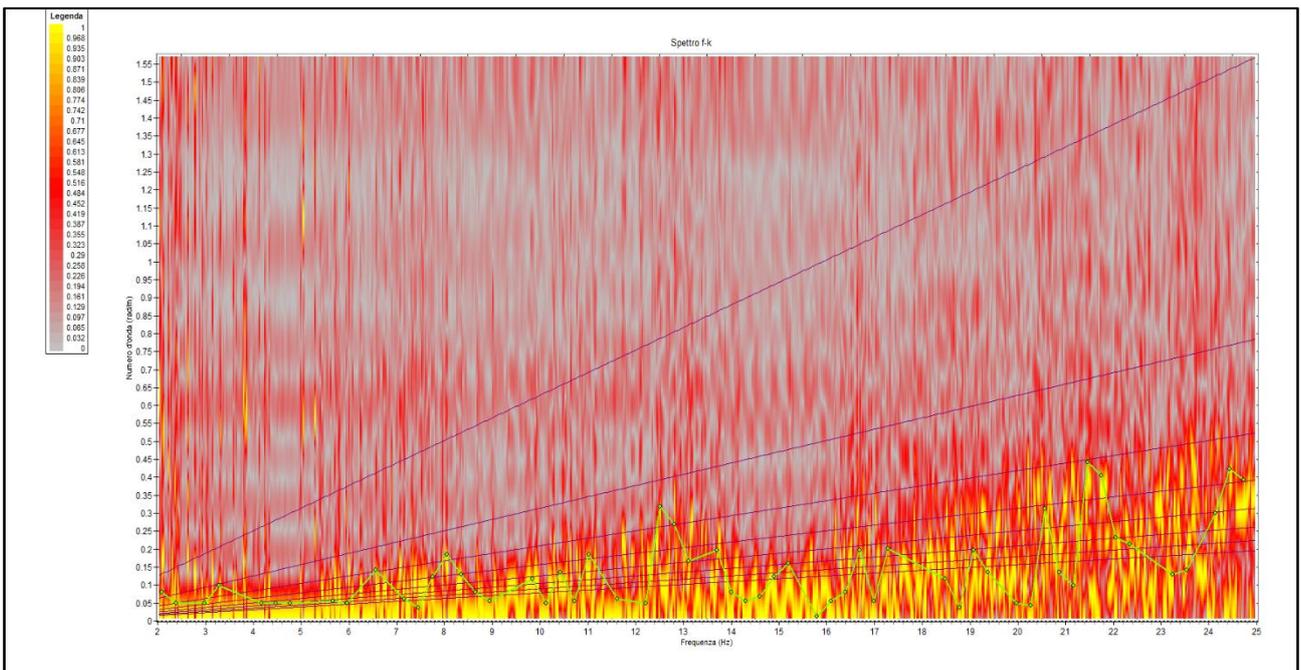


Figura 2.2: Spettro f - k

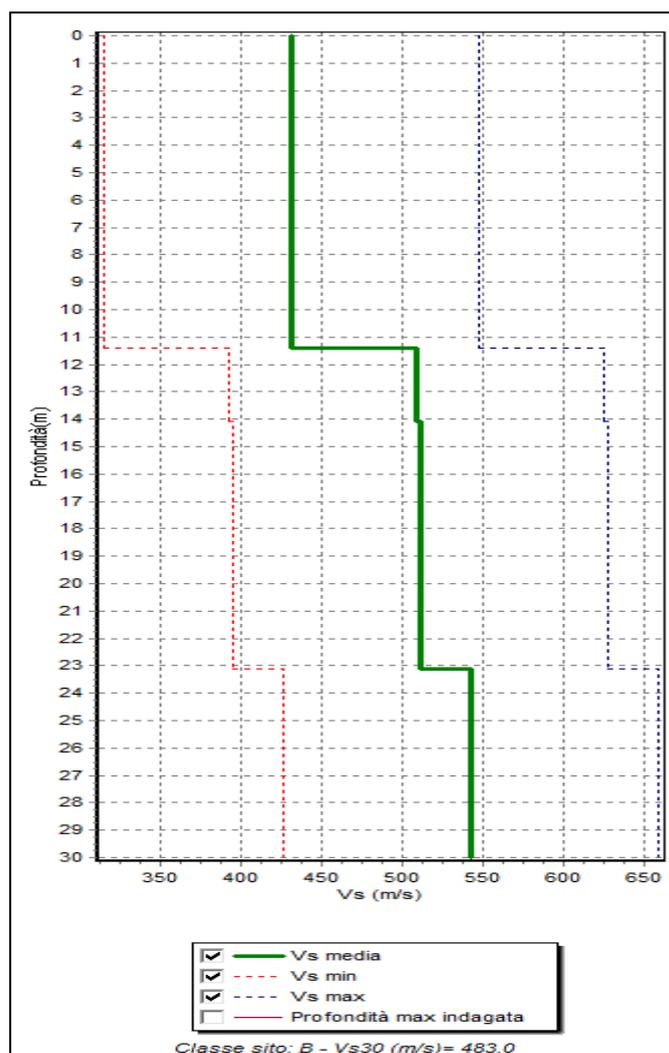


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

Conclusioni (ReMi)

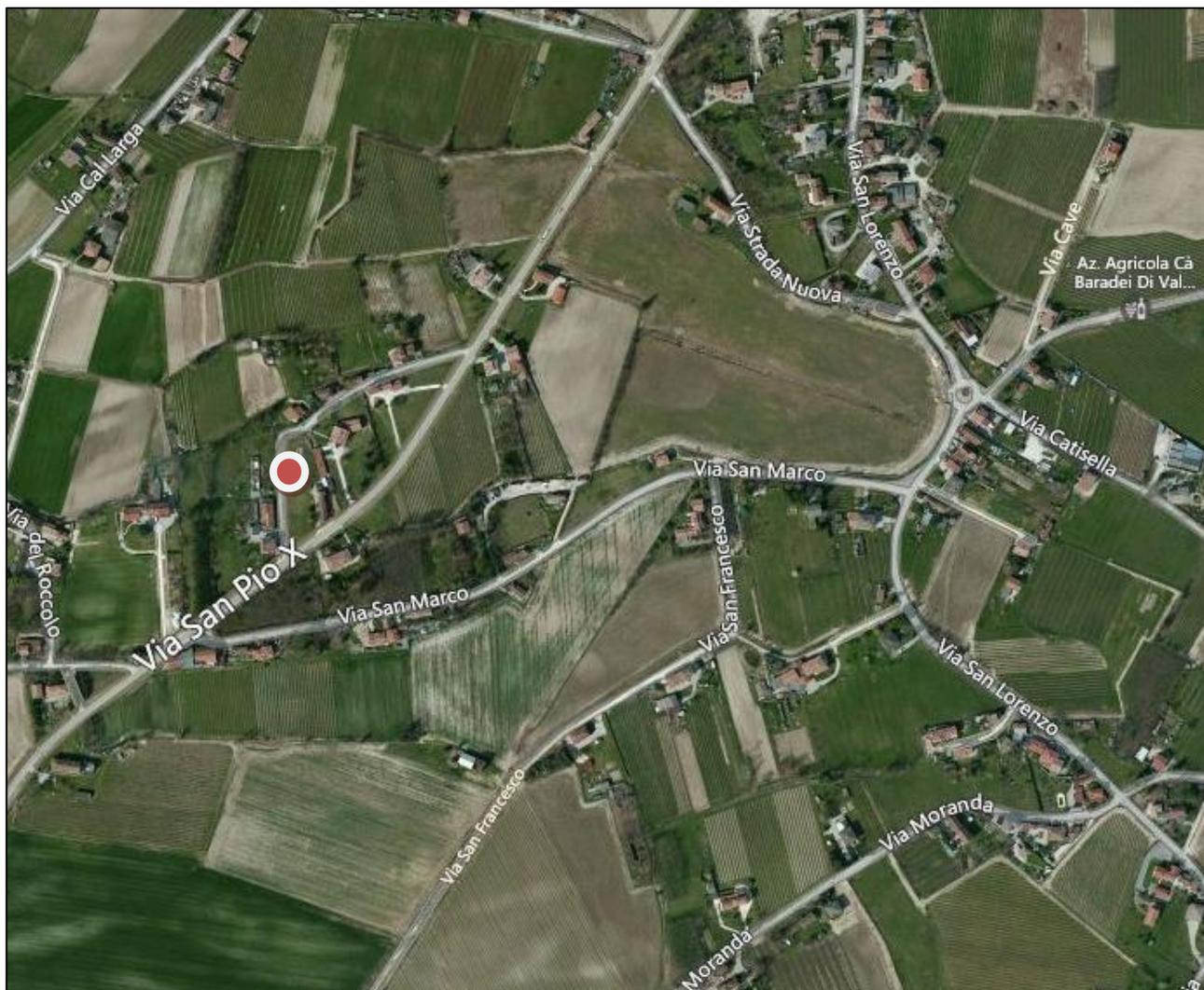
Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati, si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini fino a profondità dell'ordine dei 30 m.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

Profondità (m)	Vs (m/s)	Considerazioni
0 - 11 m	430	Ghiaie argilloso-sabbiose
11 - 23 m	510	Ghiaie sabbiose
23 - 30 m	540	Ghiaie

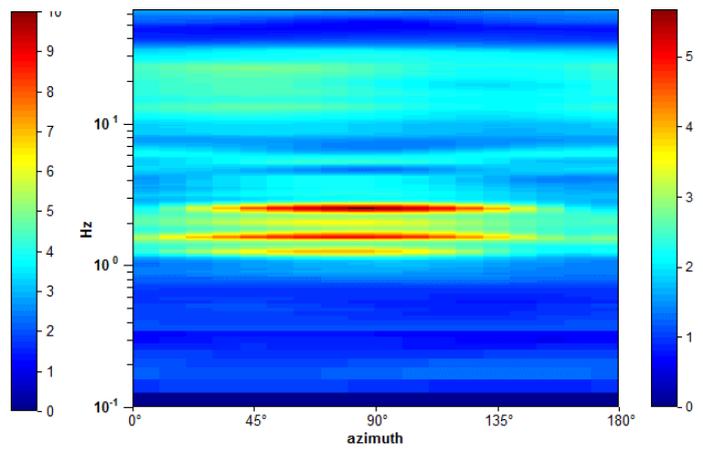
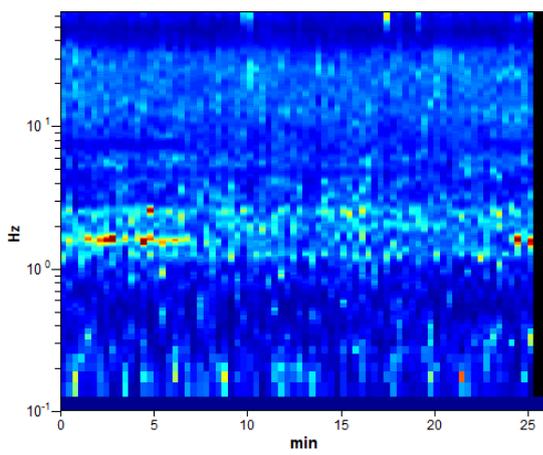
Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.



Analisi HV

Figura 3.1: analisi temporale del rumore

Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

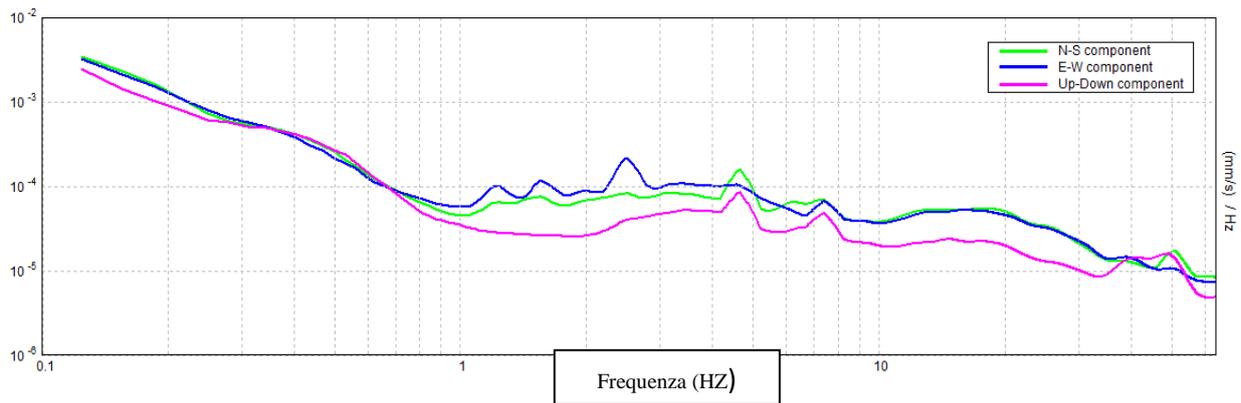


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

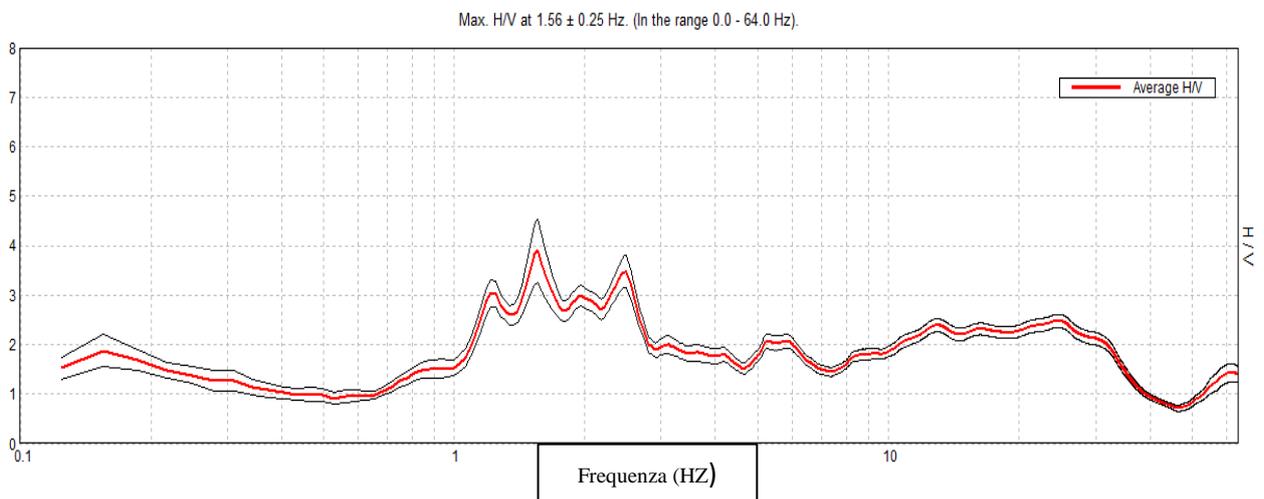
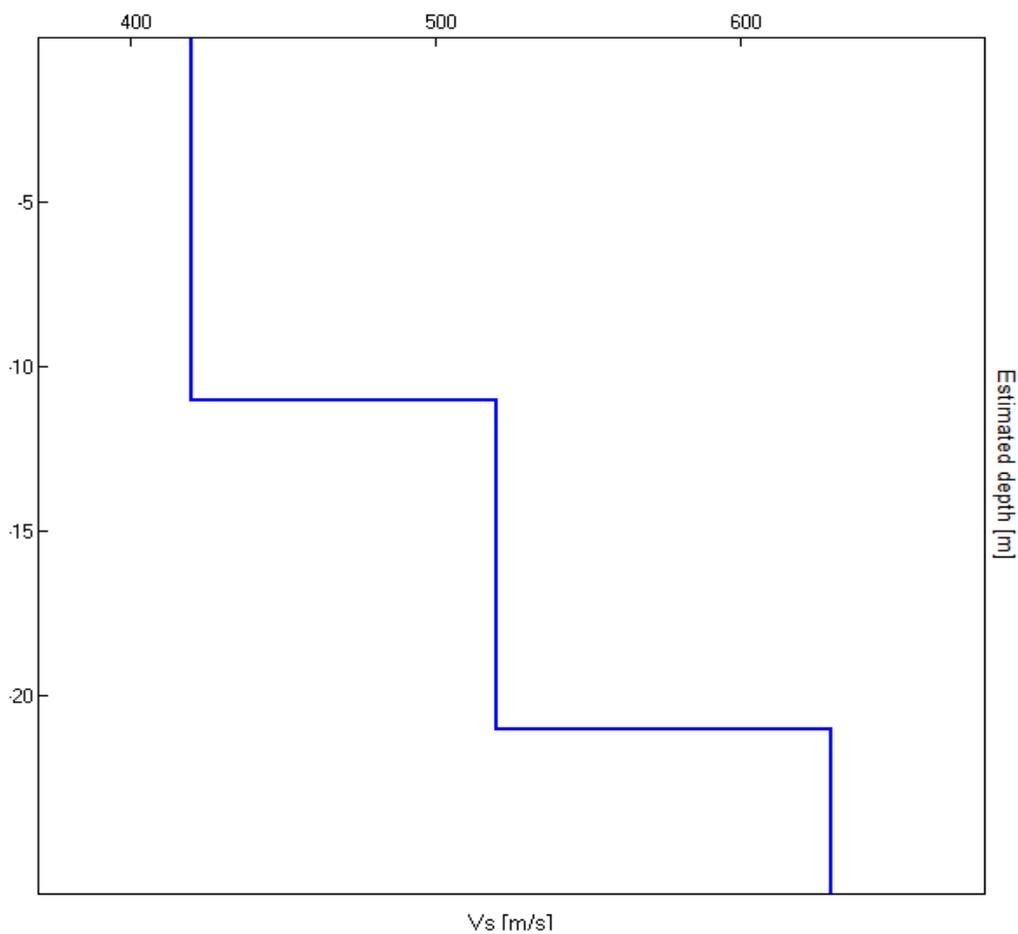
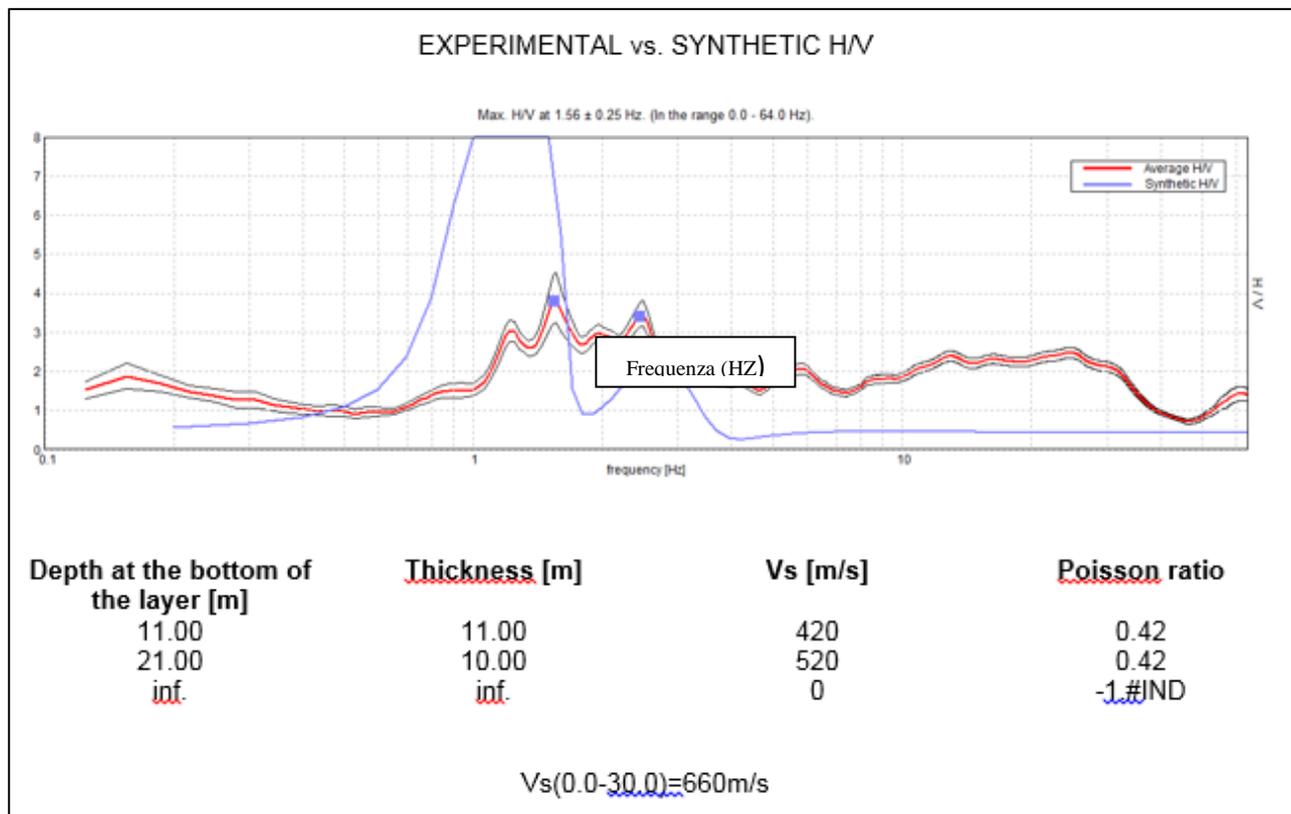


Figura 3.4: rapporto H/V



Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

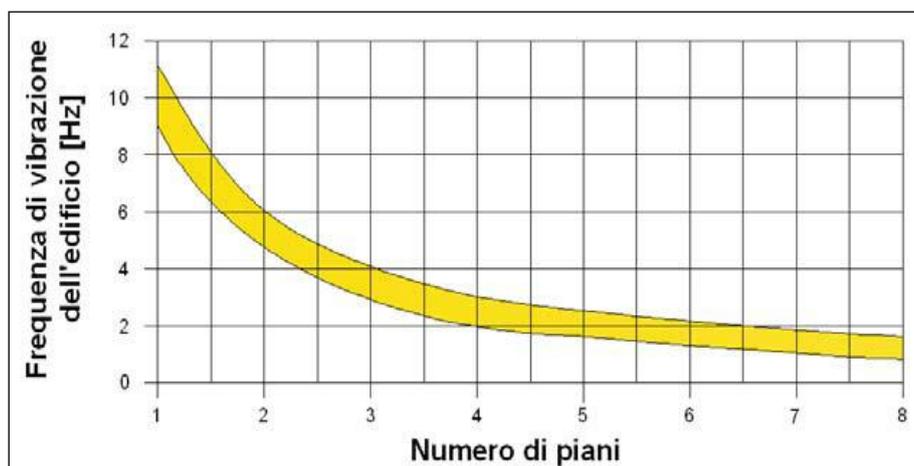


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,56 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 1.56 ± 0.25 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	1.56 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	2437.5 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 76 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	1.094 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	2.875 Hz	OK	
$A_0 > 2$	3.90 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.16243 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.2538 < 0.15625$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.6377 < 1.78$	OK	

L_w	window length
D_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w D_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,56 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Risultati finali

I profili di velocità, elaborati con le tre tecniche di indagine, hanno consentito di riconoscere, sulle verticali di restituzione delle informazioni sismostratigrafiche, orizzonti con caratteristiche elastiche e velocità delle onde S variabili entro i primi 30 m di sottosuolo. Tutte le indagini hanno evidenziato un incremento delle velocità con la profondità, significativo di volumi di materiale con elevato grado di addensamento e/o maturazione. Non è stato intercettato il bedrock sismico entro i primi 30 m di profondità. In sintesi:

	BEDROCK SISMICO	
	NO	SI
COPERTURA	Sciolta (ghiaie in matrice sabbiosa)	
SPESSORE	15/18 m (spessore certo registrato)	
PARAMETRO Vs da MASW PARAMETRO Vs da ReMi	Vs 30 = 483 m/s	
FREQUENZA del TERRENO	1,56 Hz	

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

Suolo di tipo B

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s (Nspt,30>50 nei terreni a grana grossa o cu30 >250 kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ($\pm 10\%$), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.

Pieve di Soligo, 28/01/2015

il Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Relazione

Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr

per definizione profilo verticale Vs e parametro Vs30

MDP_SMC53

MARENO DI PIAVE (TV)

Via Zanin

Coordinate WGS84

Lat. N 45.83283283 Long. E 12.34746987

Coordinate ED50

Lat. N 45.834588 Long. E 12.348299



i geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor - Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$).

2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche

che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi) , dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai,1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

5. Strumentazione impiegata

Hardware

L'acquisizione dati per l'elaborazione MASW, ReMi e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

E' stato utilizzato un sismografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

Sito Stendimento Sismico St

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St' (.....) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMi (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

Dati sperimentali (St)

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di campioni temporali..... 2048
Passo temporale di acquisizione.....0.6 ms
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

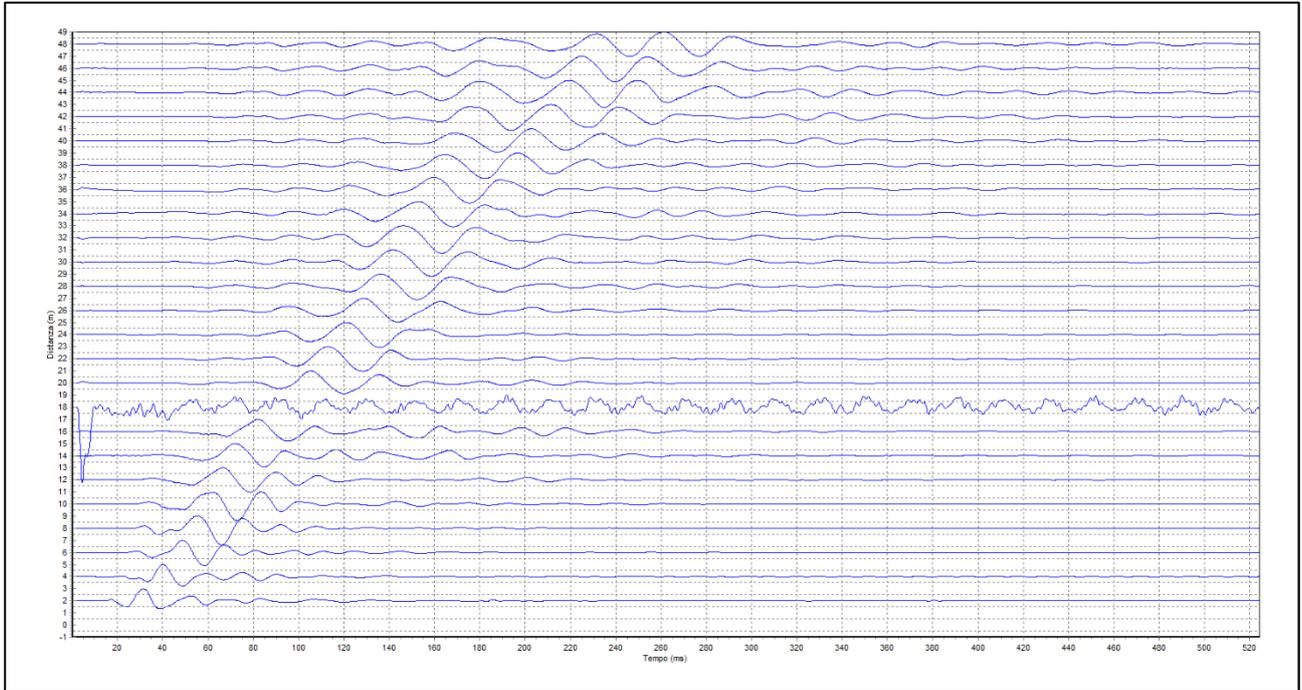


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

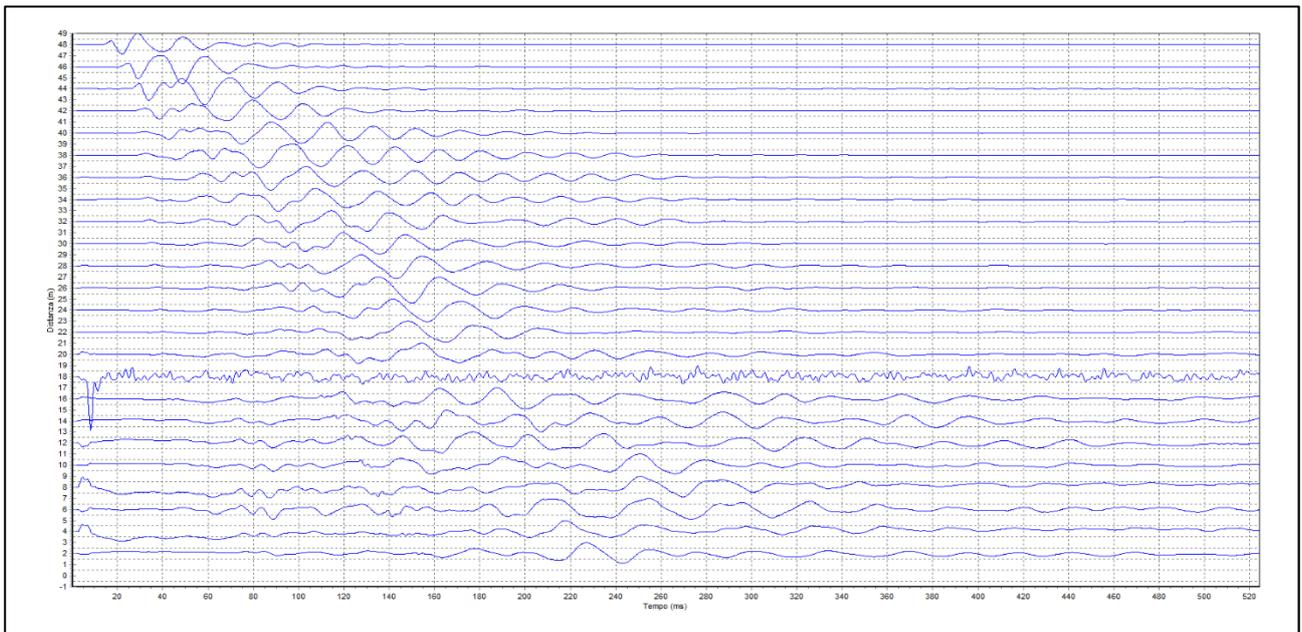


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

Sismica a rifrazione

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$), così come nel caso in esame.

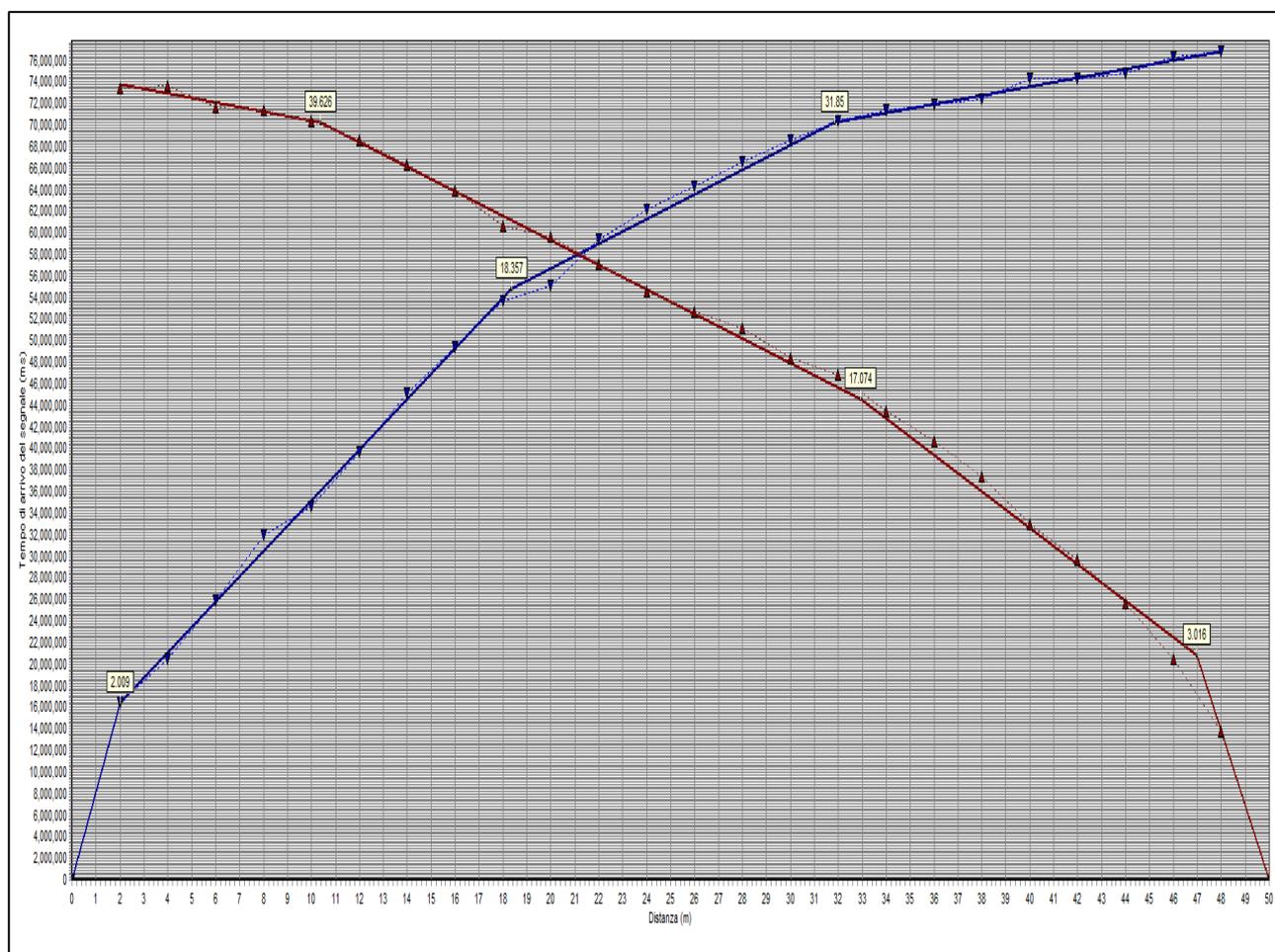


Figura 1.3: grafico generale curva distanza-tempo

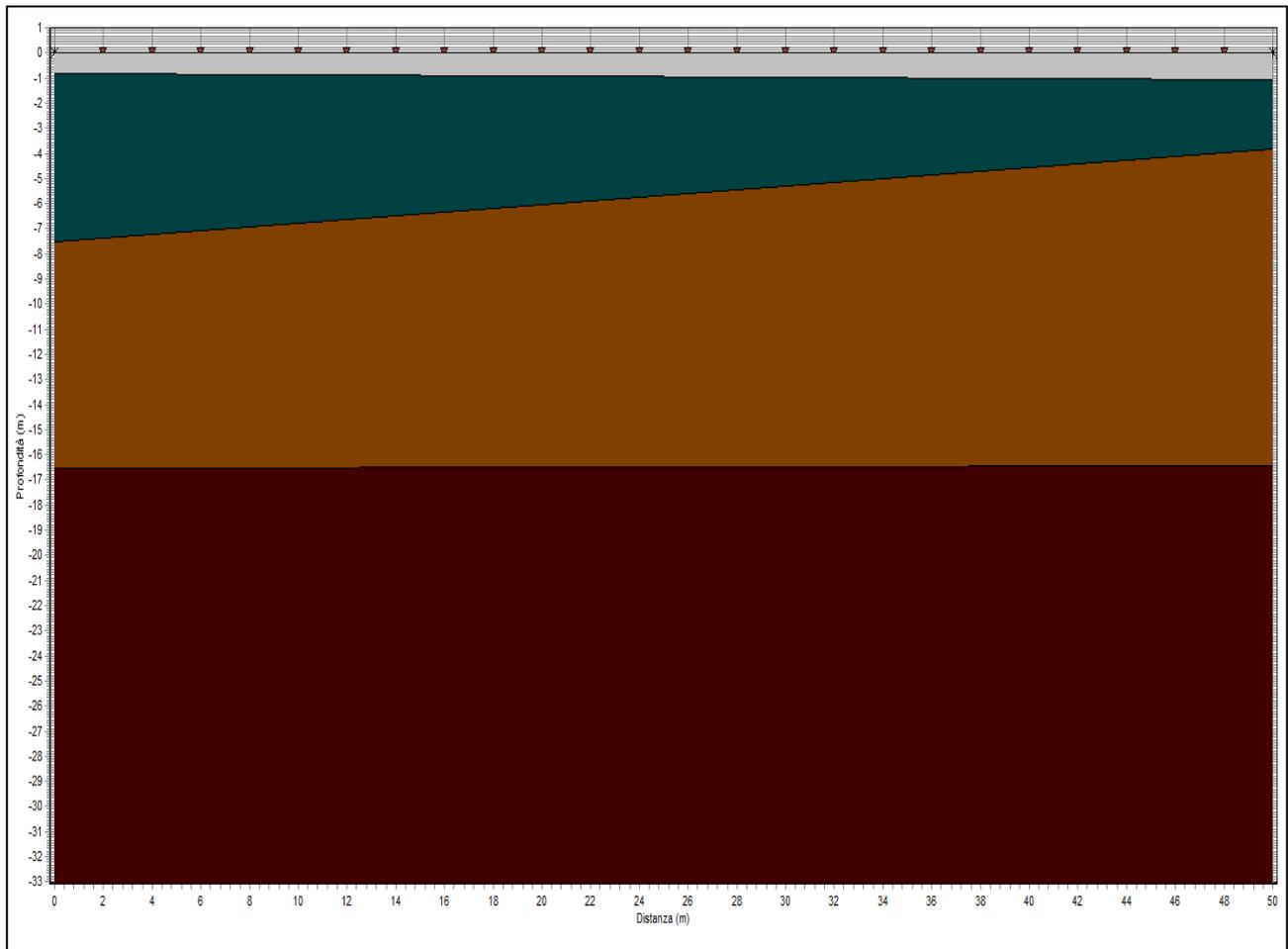


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

Strato n.	Vp (m/s)	Hs(m)	Hd(m)	rd	ri
1	286	0.814	1.092	1	1
2	612	7.543	3.814	0.998	0.993
3	735	16.54	16.44	0.985	0.997
4	864			0.978	0.942

LEGENDA:
Hs = spessore strato lato sinistro;
Hd = spessore strato lato destro;
Vp = velocità delle onde P.
Vs = velocità delle onde S.
rd = coefficiente correlazione tiro diretto
ri = coefficiente correlazione tiro inverso

La sezione sismostratigrafica è stata interpretata con attendibilità fino a circa 20 m di profondità, in coerenza con gli altri tipi di analisi descritte in seguito; in realtà la profondità indagata arriva a circa 25-30 m.

Conclusioni (rifrazione)

L'indagine ha evidenziato 4 sismostrati coi rispettivi valori: il primo sismostrato di meno di 1 m con Vp 286 m/s, il secondo sismostrato di circa 7,5 m con Vp di 612 m/s, il terzo con Vp di circa 735 m/s e il quarto con Vp di circa 864 m/s.

Analisi MASW

Frequenza minima12Hz

Frequenza massima48Hz

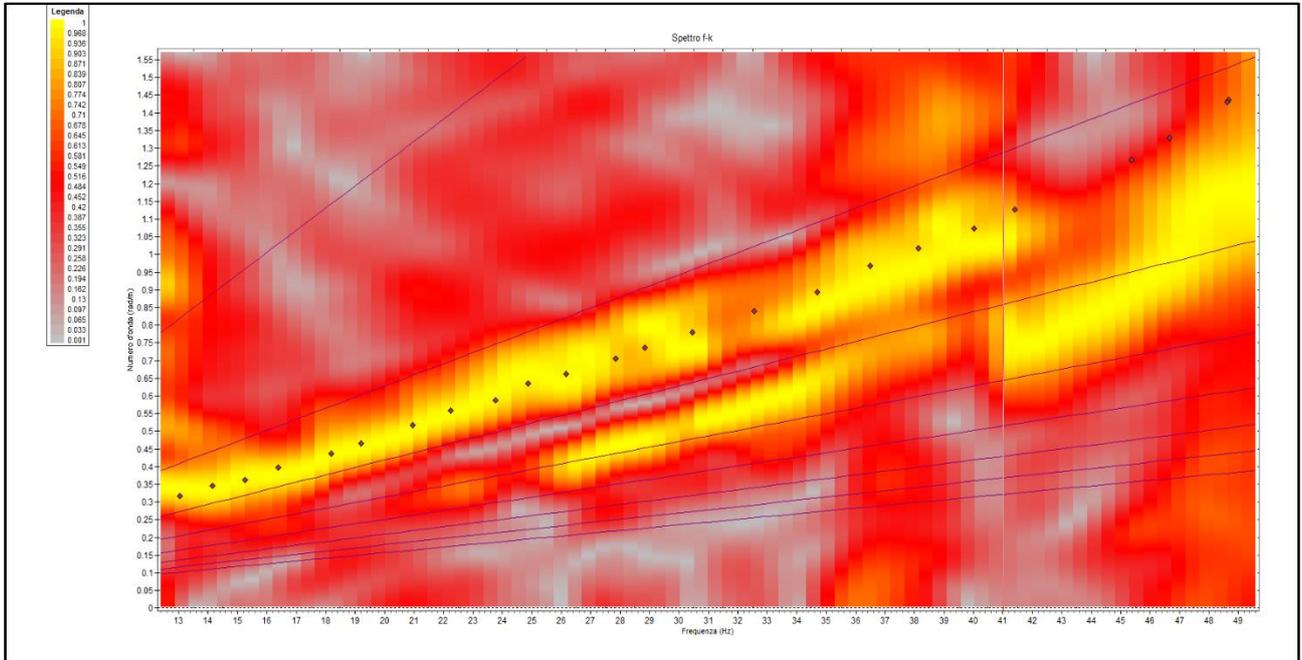


Figura 1.5: Spettro f – k

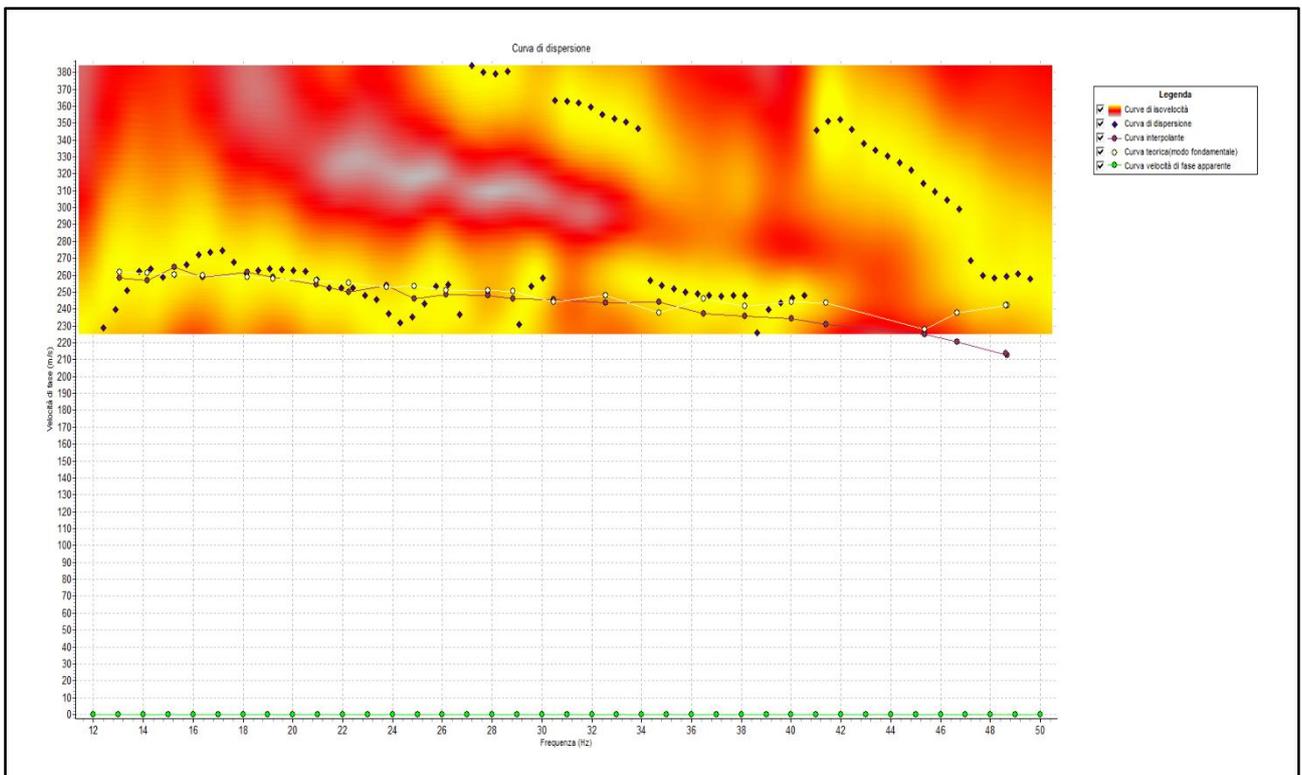


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale mediando i livelli con valori di Vs simili.

Numero di strati (escluso semispazio).....	4
Spaziatura ricevitori [m].....	2 m
Numero ricevitori	24

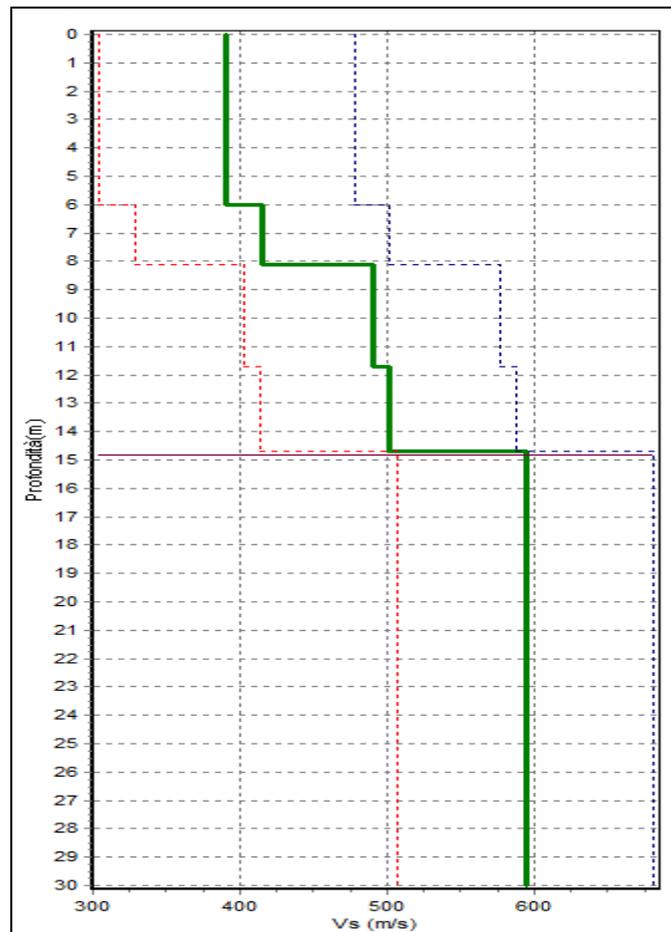


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

Conclusioni (MASW)

L'indagine ha fornito dati affidabili MASW sino ad una profondità di circa 15 m; abbiamo circa 6 m di terreni un po' più soffici, con Vs attorno a 400 m/s; fino a 15 m Vs attorno a 500 m/s e oltre con Vs di circa 600 m/s.

Analisi ReMi

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

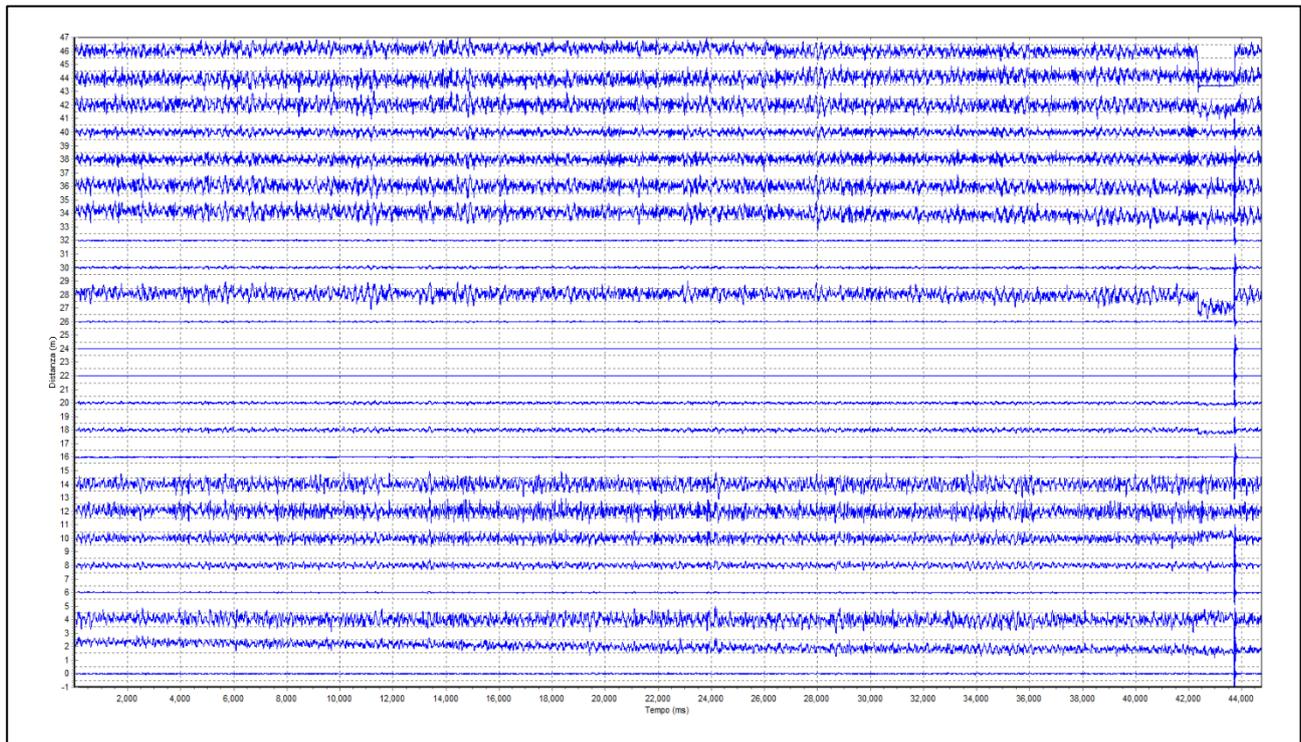


Figura 2.1: Tracce sperimentali

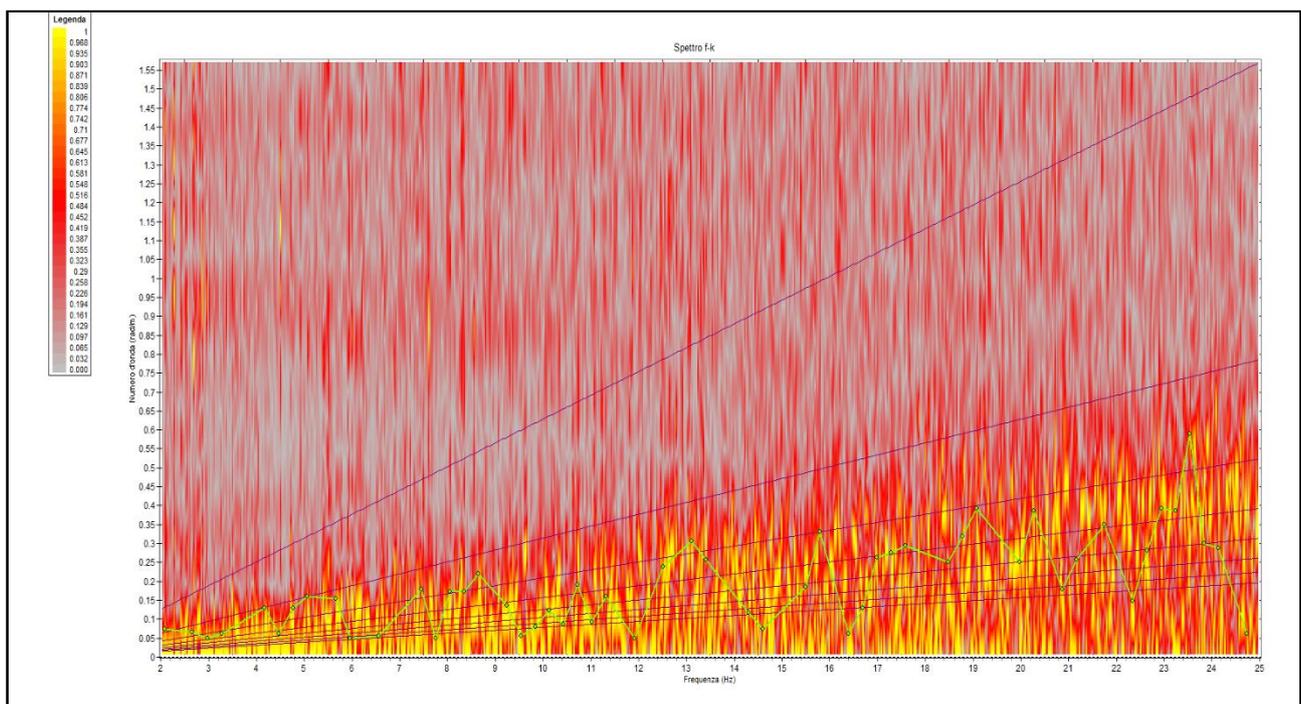


Figura 2.2: Spettro f - k

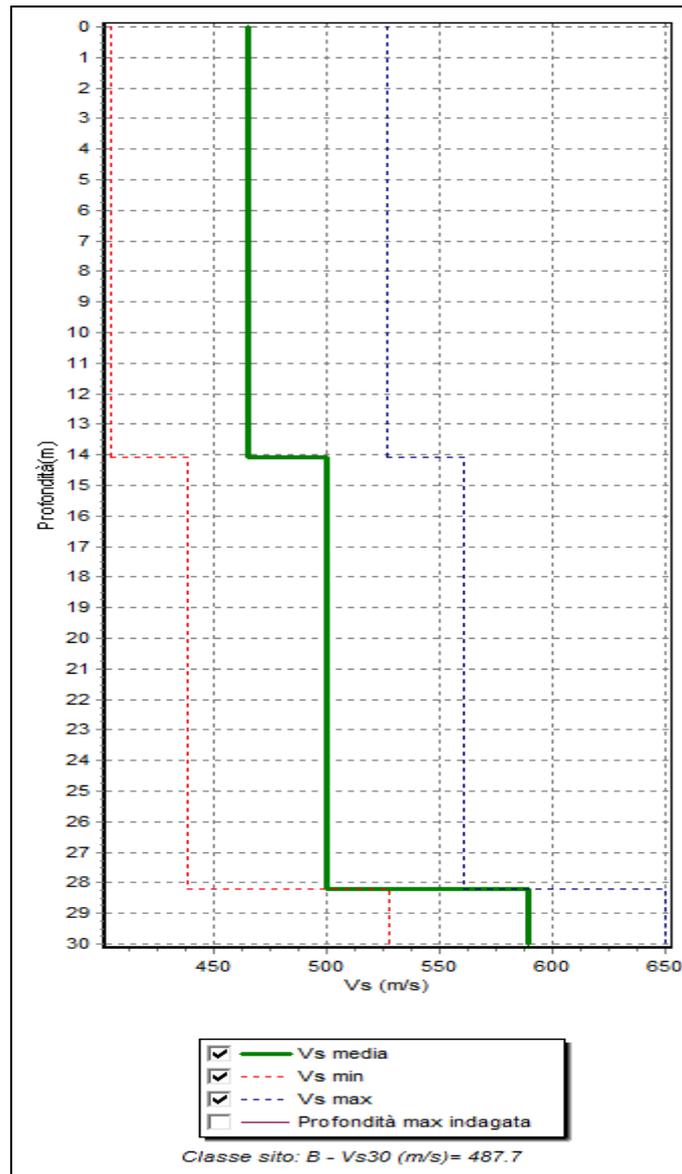


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

Conclusioni (ReMi)

Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati, si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini fino a profondità dell'ordine dei 30 m.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

Profondità (m)	Vs (m/s)	Considerazioni
0 - 14 m	460	Ghiaie Sabbiose
14 - 28 m	500	Ghiaie e sabbie
28 - 30 m	600	Ghiaie

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

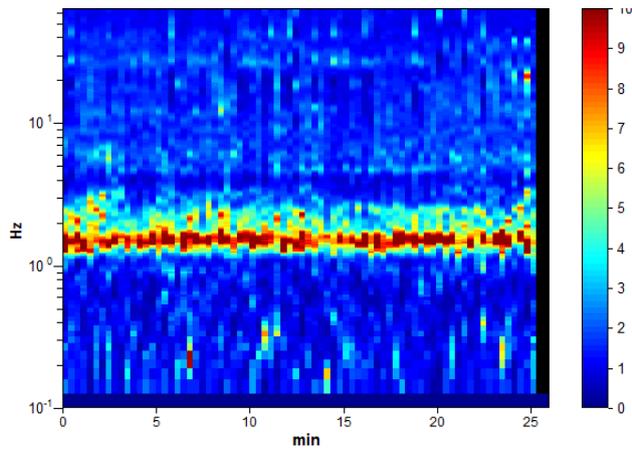


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

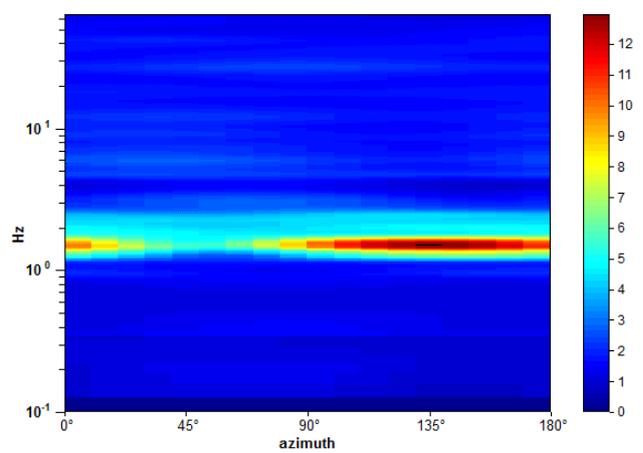


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

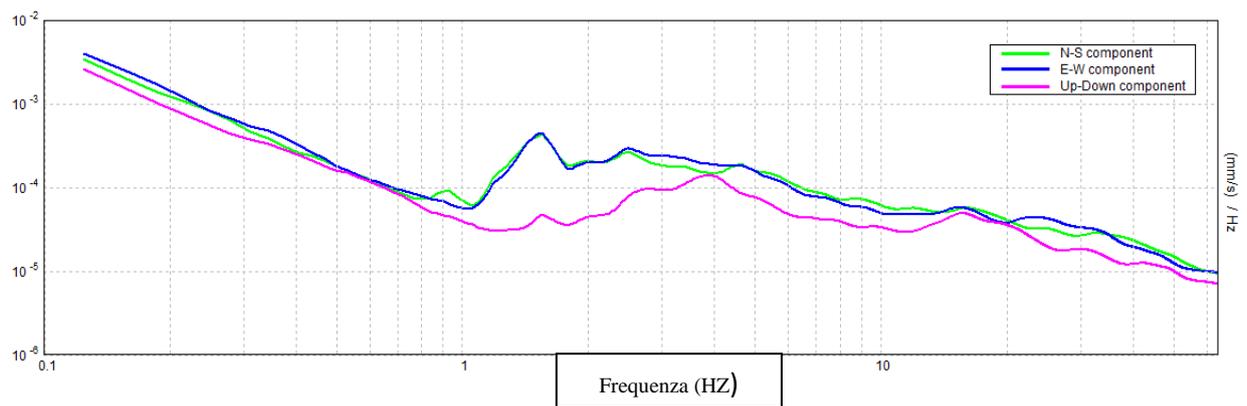


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

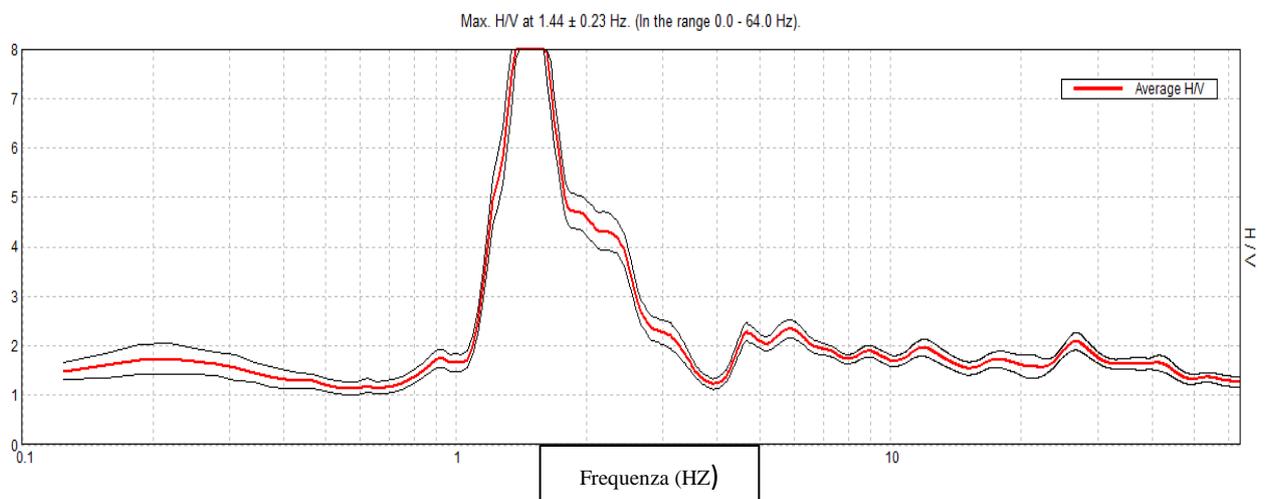
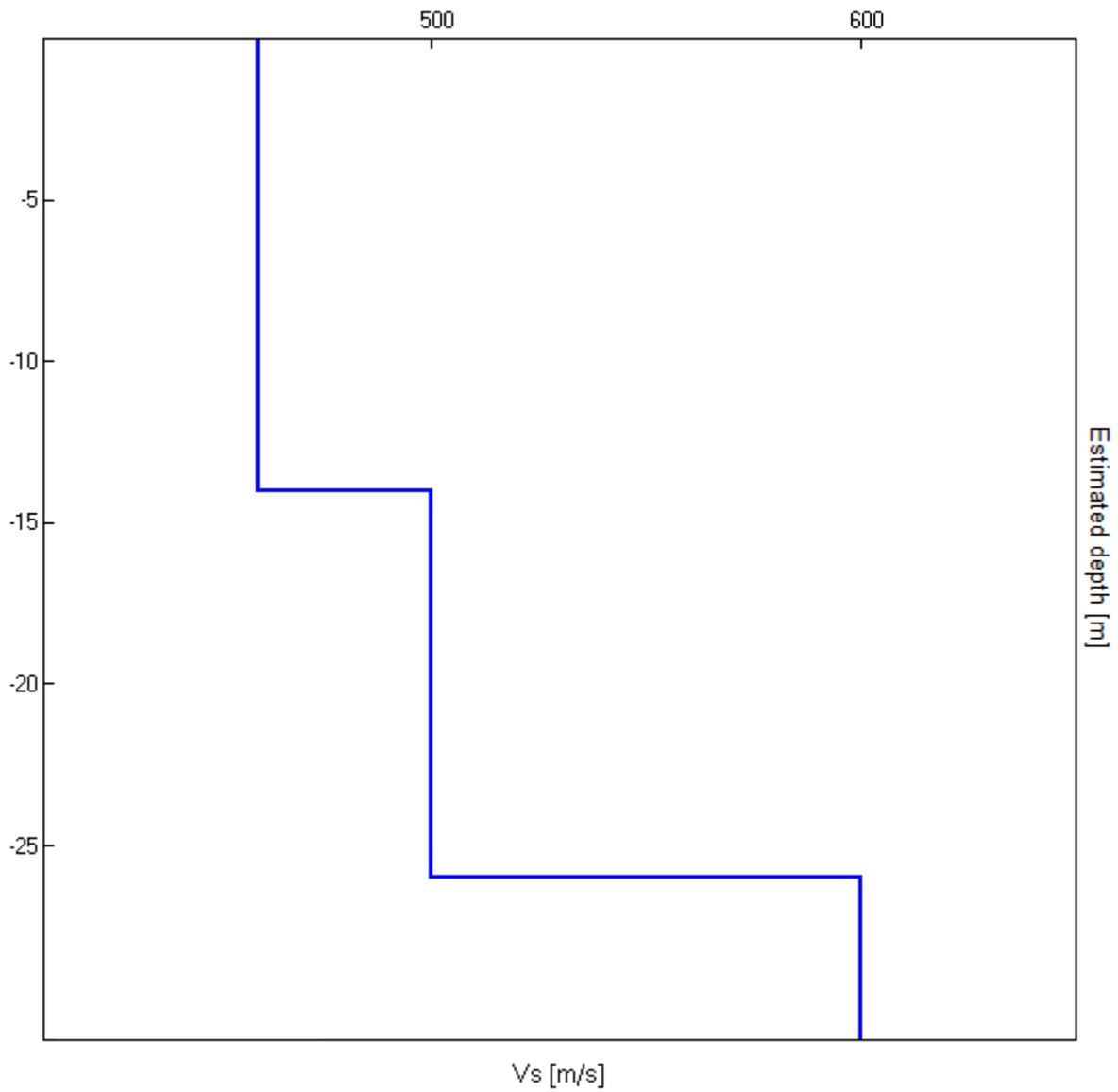
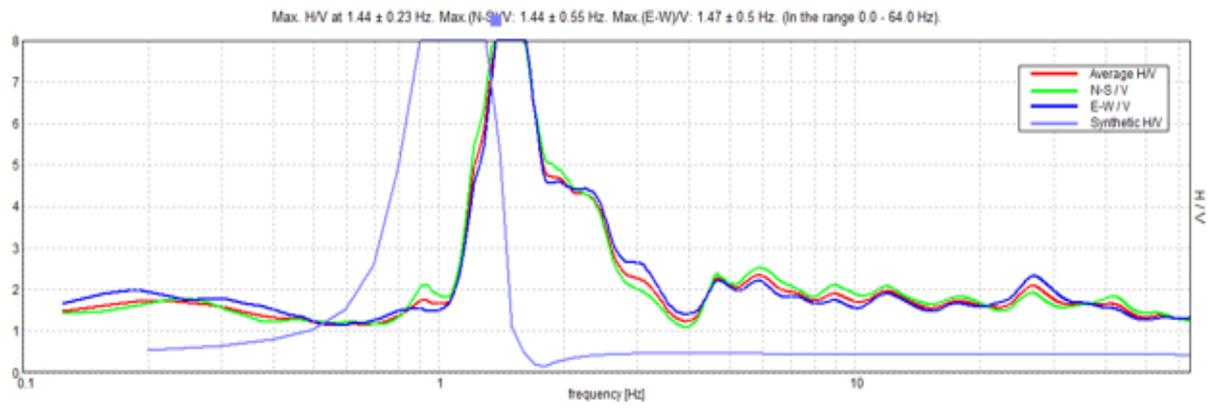


Figura 3.4: rapporto H/V

EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V



Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

Freq. naturale edificio _ 10 Hz / numero piani

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

Freq. naturale edificio - Freq. fondamentale di risonanza del sito

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

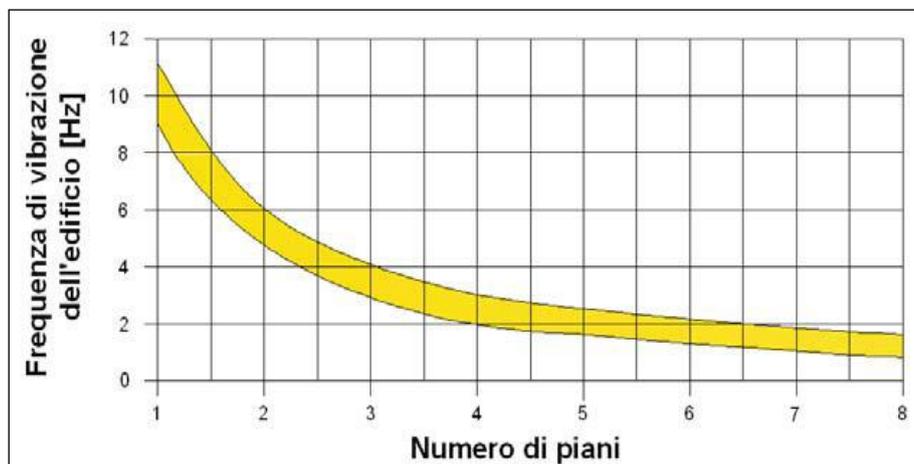


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,44 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 1.44 ± 0.23 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	1.44 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	2242.5 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 70 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	1.219 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.781 Hz	OK	
$A_0 > 2$	10.25 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.16045 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.23065 < 0.14375$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.7488 < 1.78$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,44 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Risultati finali

I profili di velocità, elaborati con le tre tecniche di indagine, hanno consentito di riconoscere, sulle verticali di restituzione delle informazioni sismostratigrafiche, orizzonti con caratteristiche elastiche e velocità delle onde S variabili entro i primi 30 m di sottosuolo. Tutte le indagini hanno evidenziato un incremento delle velocità con la profondità, significativo di volumi di materiale con elevato grado di addensamento e/o maturazione. Non è stato intercettato il bedrock sismico entro i primi 30 m di profondità. In sintesi:

	BEDROCK SISMICO	
	NO	SI
COPERTURA	Sciolta (ghiaie in matrice limosa)	
SPESSORE	18/20 m (spessore certo registrato)	
PARAMETRO Vs da MASW PARAMETRO Vs da ReMi	Vs 30 = 487 m/s	
FREQUENZA del TERRENO	1,44 Hz	

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

Suolo di tipo B

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s ($N_{spt,30} > 50$ nei terreni a grana grossa o $c_{u30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ($\pm 10\%$), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.

Pieve di Soligo, 28/01/2015

il Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Relazione

Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr

per definizione profilo verticale Vs e parametro Vs30

MDP_SMC54

MARENO DI PIAVE (TV)

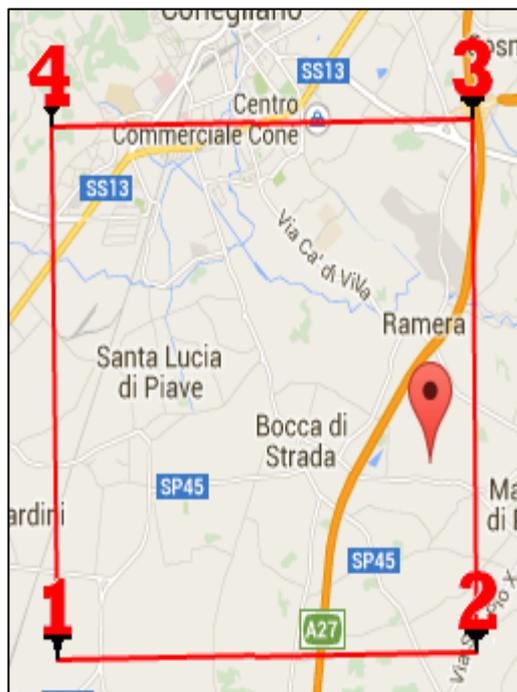
Via Bidoli

Coordinate WGS84

Lat. N 45.84660927 Long. E 12.33490935

Coordinate ED50

Lat. N 45.848365 Long. E 12.335738



i geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor - Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$).

2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche

che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi) , dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai,1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

5. Strumentazione impiegata

Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMI e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

E' stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotati di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

Sito Stendimento Sismico St

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St' (.....) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMi (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

Dati sperimentali (St)

Numero di ricevitori	24
Distanza tra i sensori:	2 m
Numero di campioni temporali.....	2048
Passo temporale di acquisizione.....	0.6 ms
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....	24

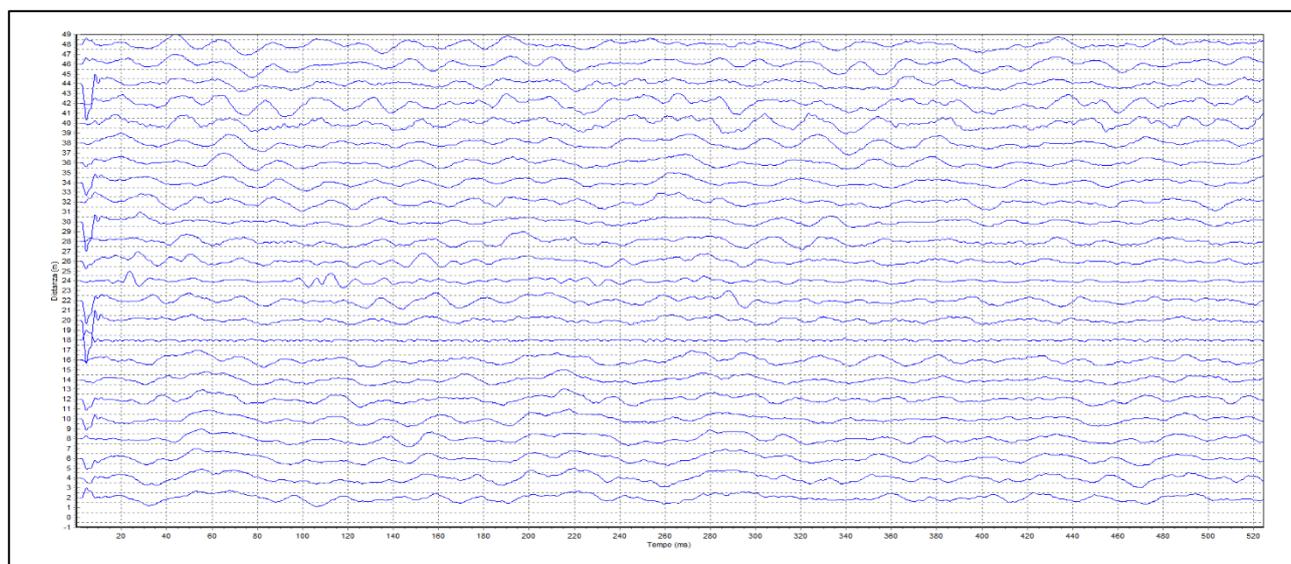


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

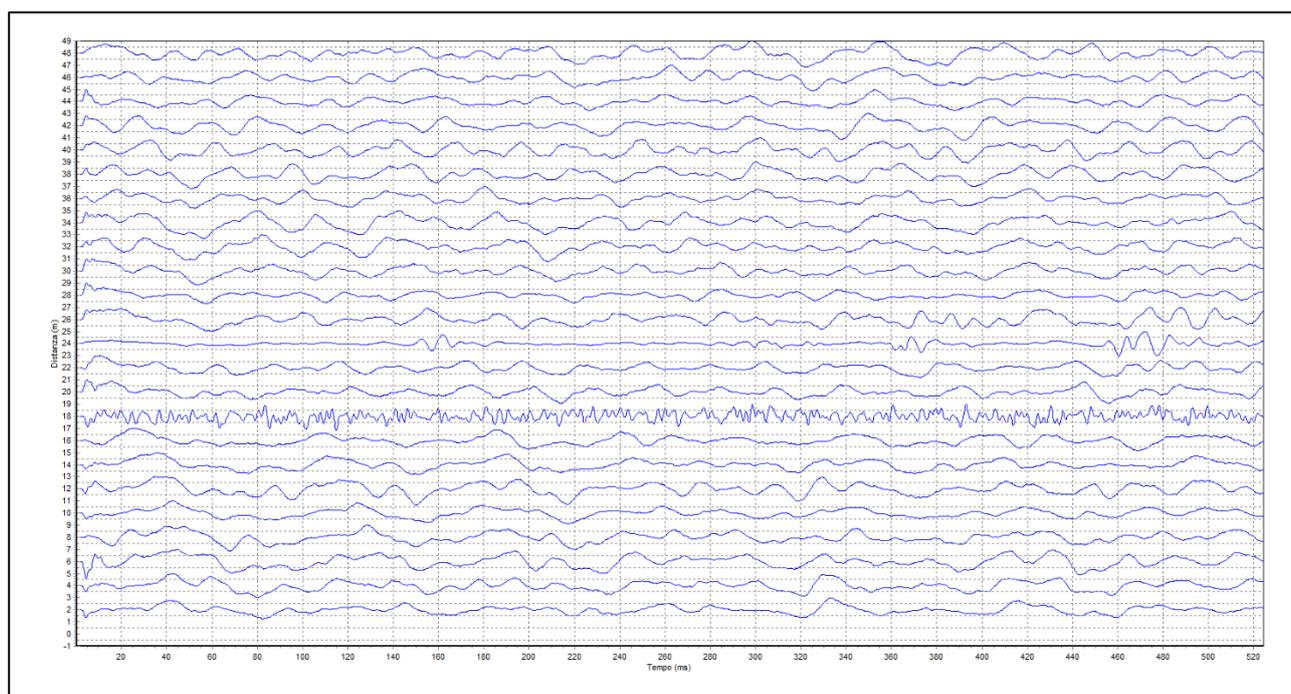


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

Sismica a rifrazione

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$), così come nel caso in esame.

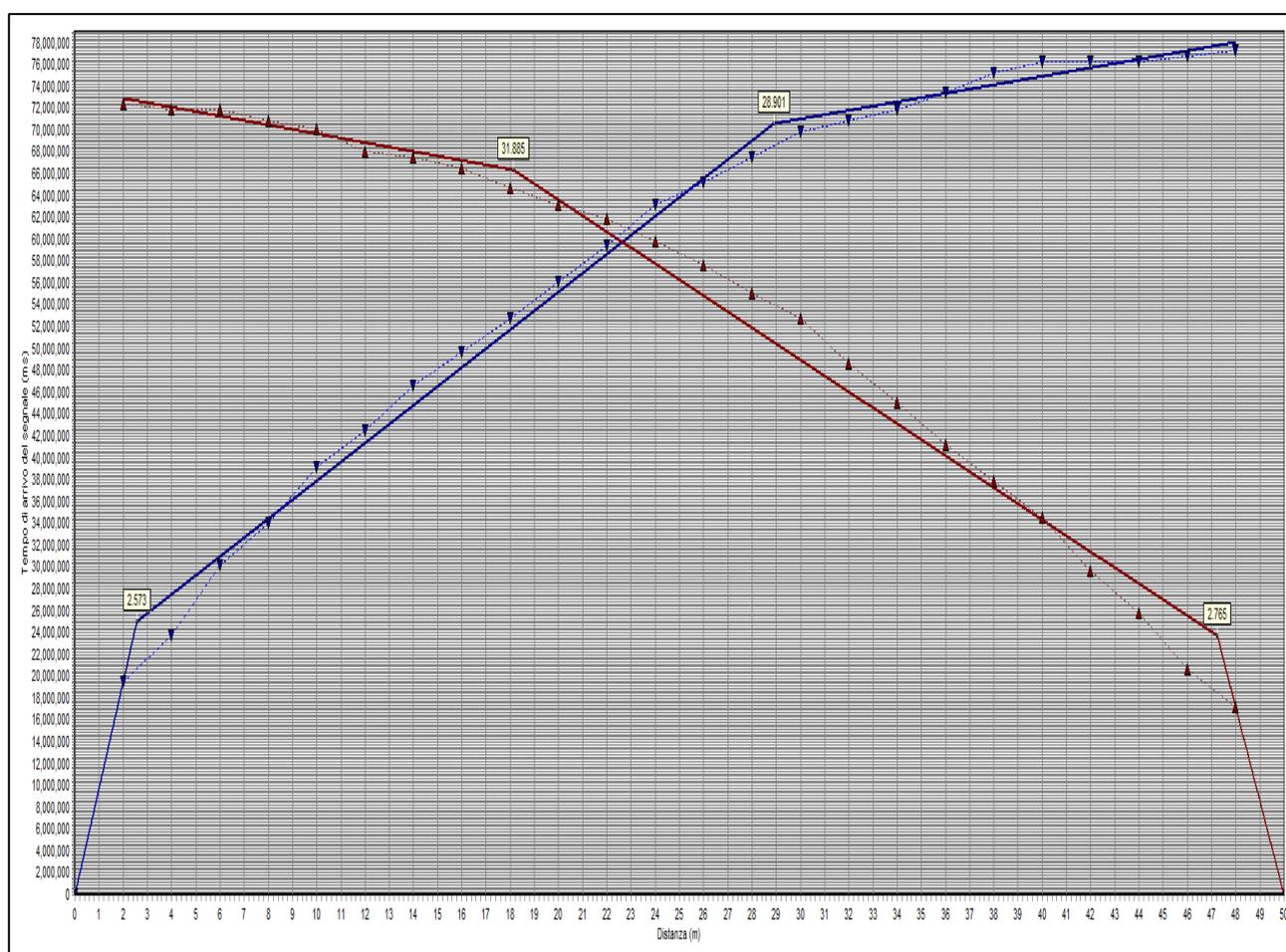


Figura 1.3: grafico generale curva distanza-tempo

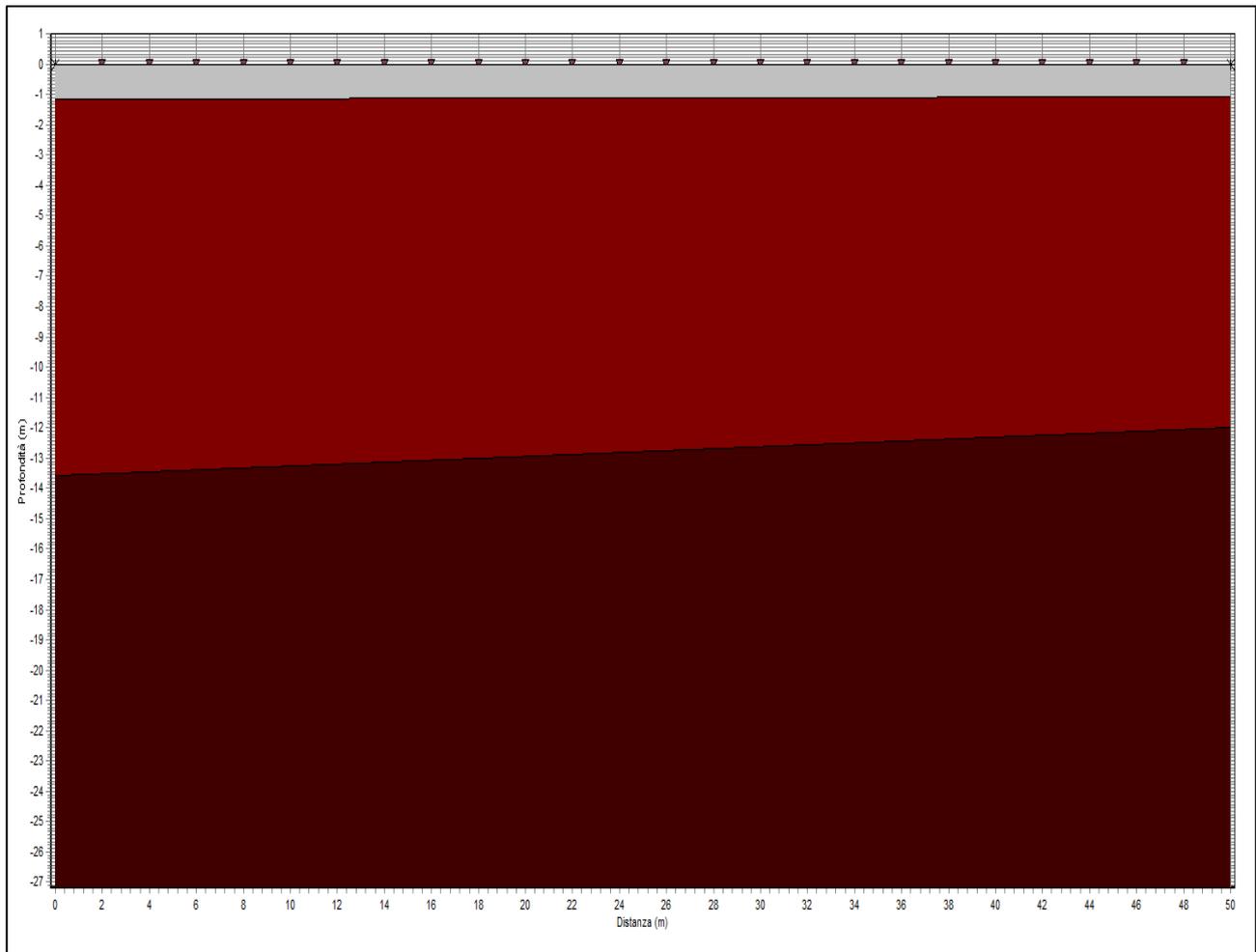


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

Strato n.	Vp (m/s)	Hs(m)	Hd(m)	rd	ri
1	326	1.146	1.095	1	1
2	833	13.592	11.991	0.994	0.984
3	1094			0.933	0.934

LEGENDA:
Hs = spessore strato lato sinistro;
Hd = spessore strato lato destro;
Vp = velocità delle onde P.
Vs = velocità delle onde S.
rd = coefficiente correlazione tiro diretto
ri = coefficiente correlazione tiro inverso

La sezione sismostratigrafica è stata interpretata con attendibilità fino a circa 20 m di profondità, in coerenza con gli altri tipi di analisi descritte in seguito; in realtà la profondità indagata arriva a circa 25-30 m.

Conclusioni (rifrazione)

L'indagine ha evidenziato 3 sismostrati coi rispettivi valori: il primo sismostrato di 1m con Vp 326 m/s, il secondo sismostrato di circa 13 m con Vp di 833 m/s e il terzo con Vp di circa 1094 m/s.

Analisi MASW

Frequenza minima12Hz

Frequenza massima48Hz

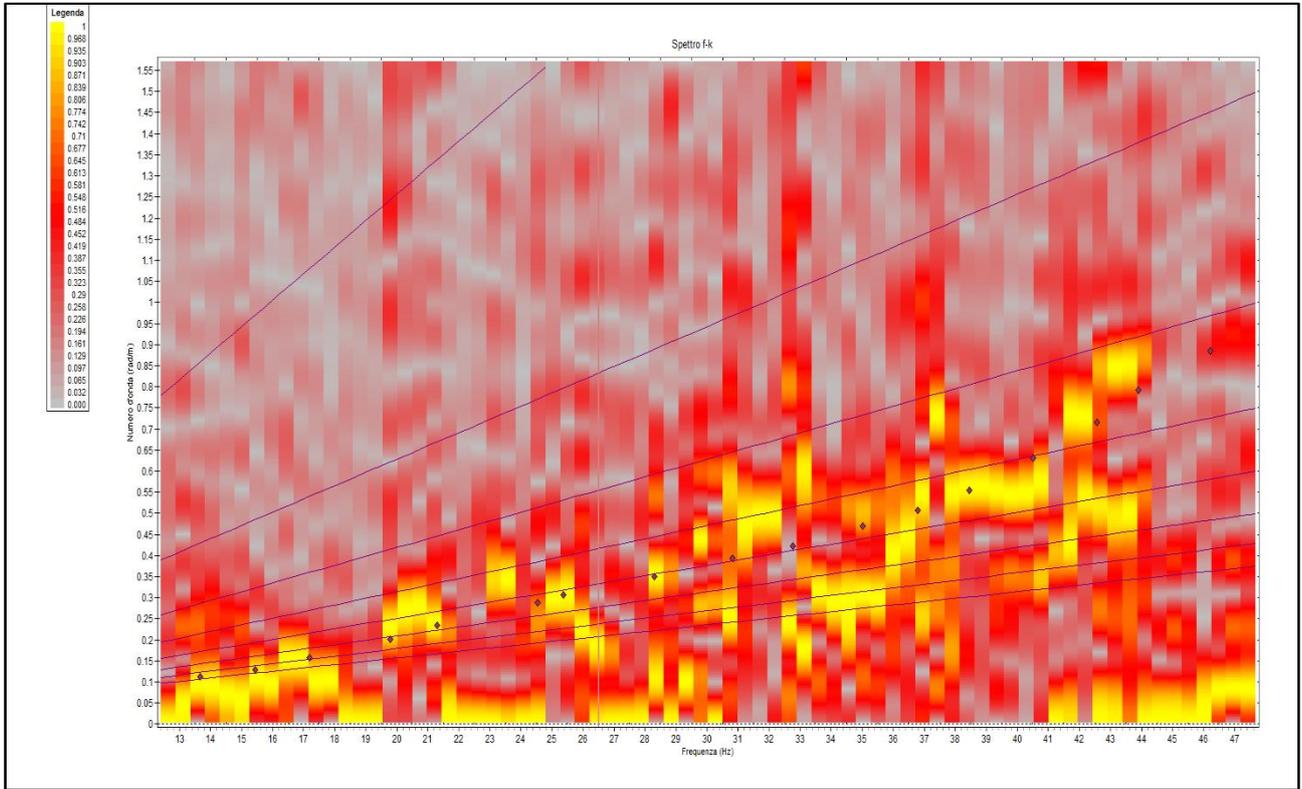


Figura 1.5: Spettro f – k

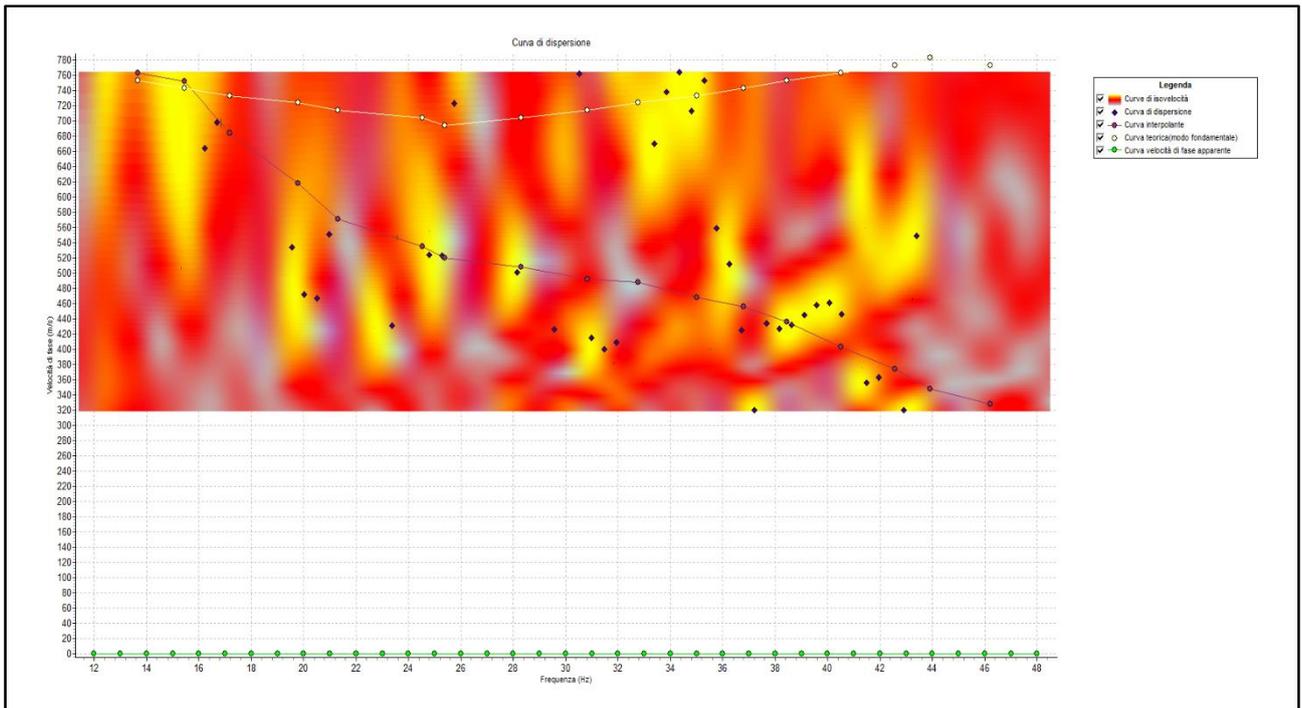


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale mediando i livelli con valori di Vs simili.

Numero di strati (escluso semispazio).....	4
Spaziatura ricevitori [m].....	2 m
Numero ricevitori	24

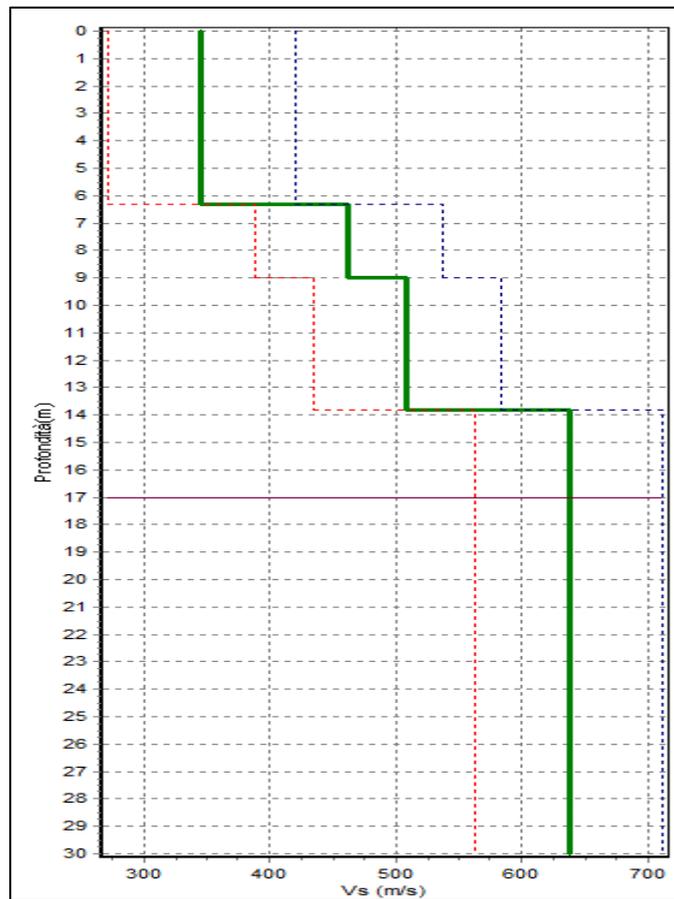


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

Conclusioni (MASW)

L'indagine ha fornito dati affidabili MASW sino ad una profondità di circa 17 m; abbiamo circa 6 m di terreni più soffici, con Vs attorno a 350 m/s, fino a 14 m Vs fino a 500 m/s e oltre Vs fino a 600 m/s.

Analisi ReMi

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

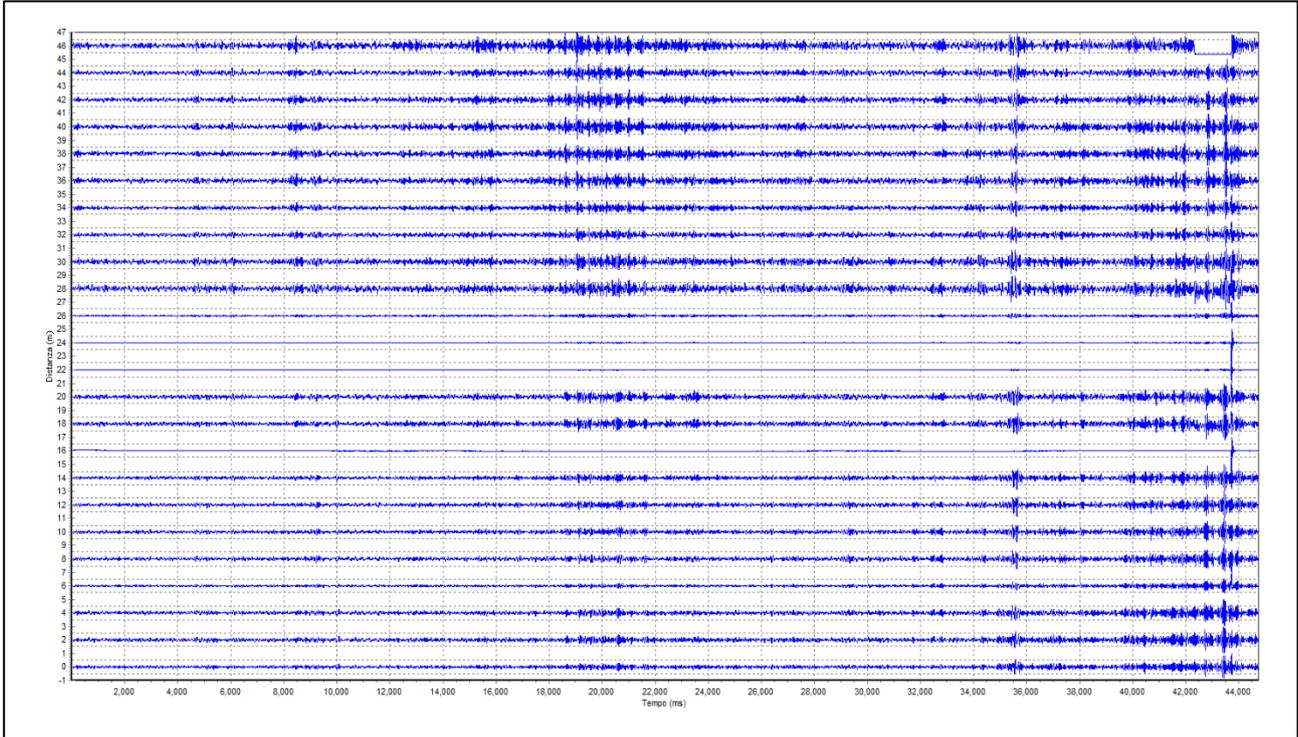


Figura 2.1: Tracce sperimentali

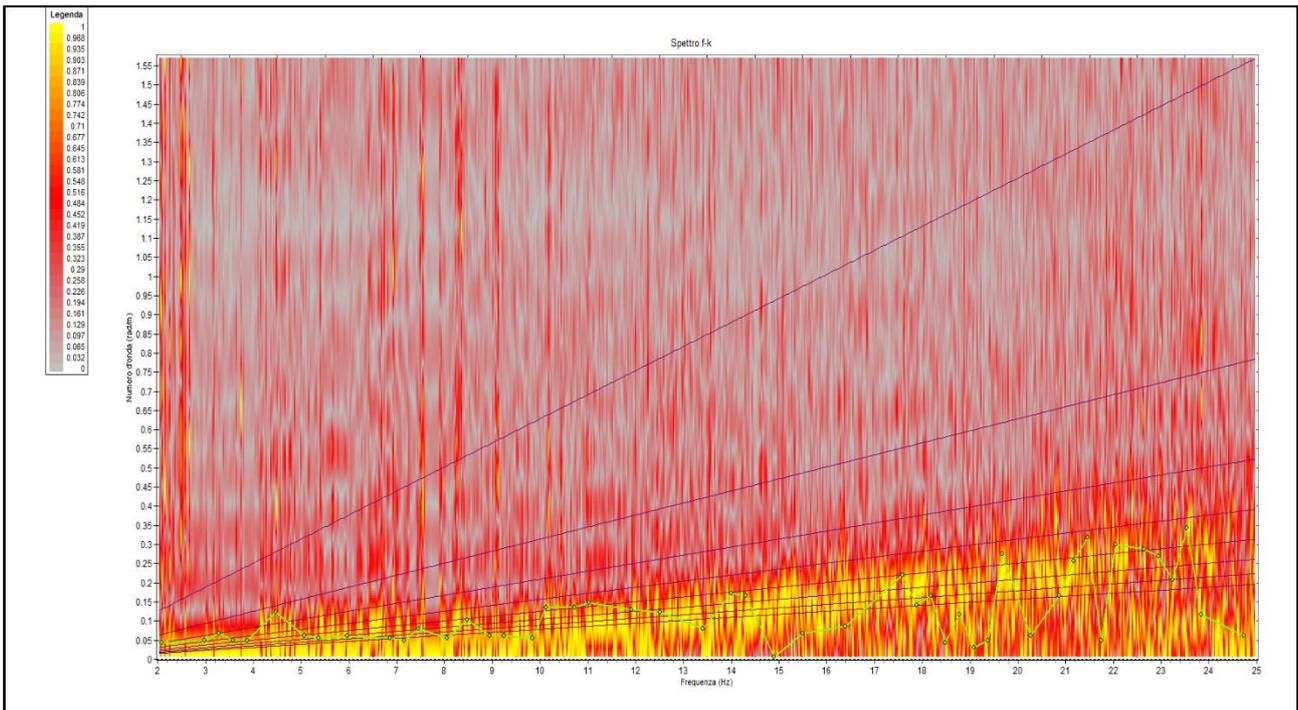


Figura 2.2: Spettro f - k

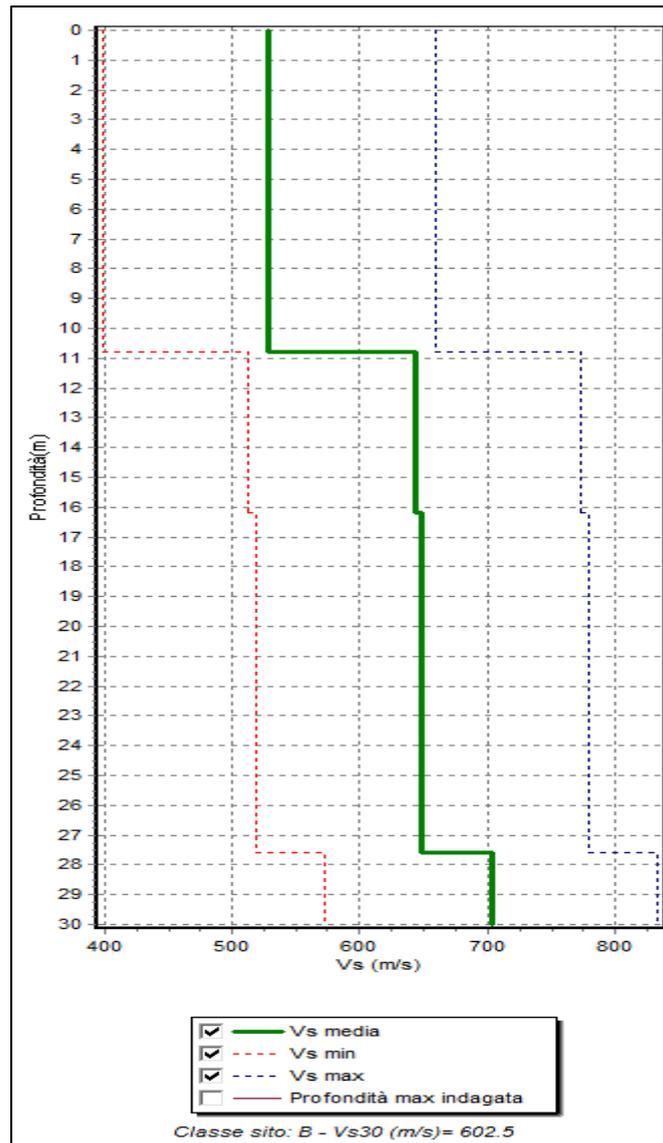


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

Conclusioni (ReMi)

Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati, si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini fino a profondità dell'ordine dei 30 m.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

Profondità (m)	Vs (m/s)	Considerazioni
0 –11 m	510	Ghiaie Argilloso-Sabbiose
11- 28 m	650	Ghiaie
28– 30 m	700	Ghiaie

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

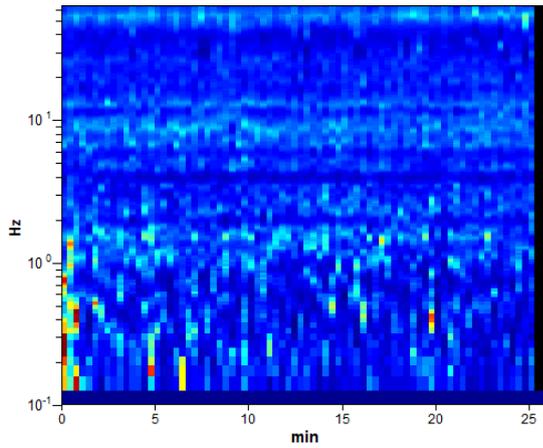


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

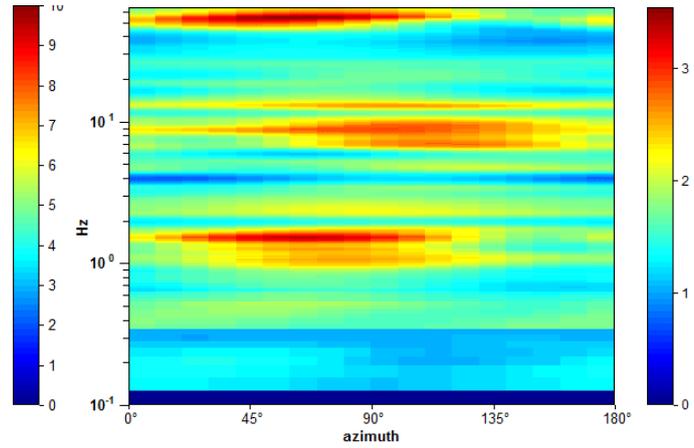


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

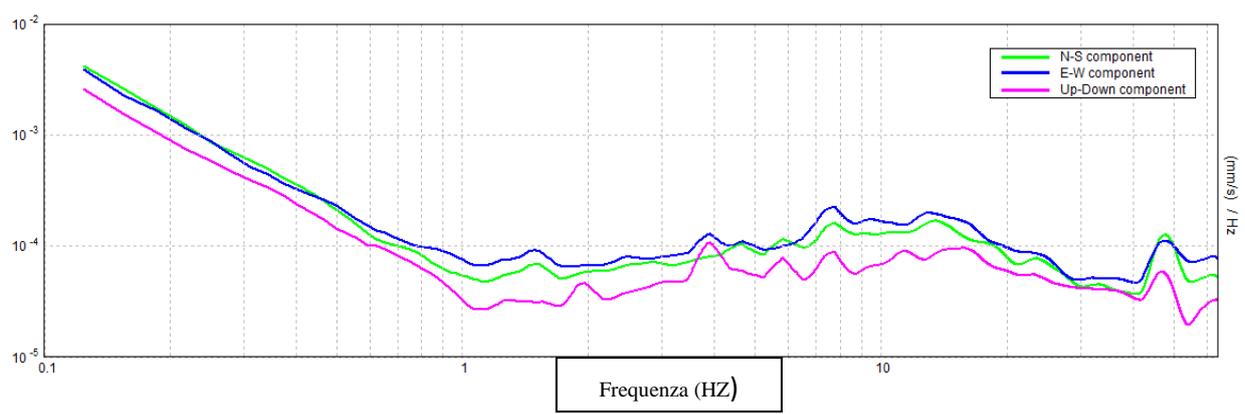


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

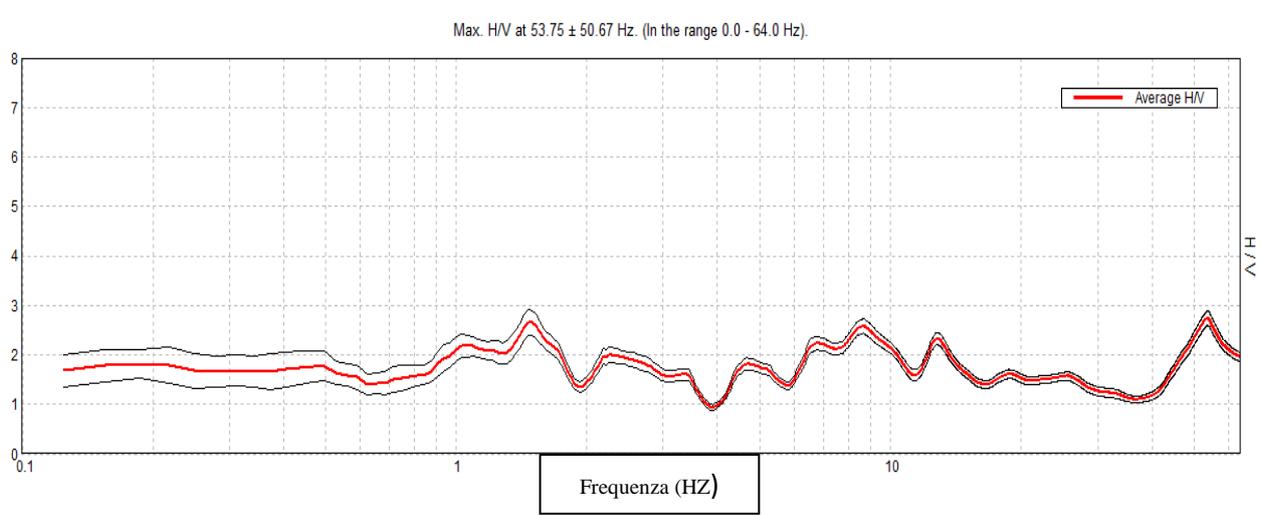
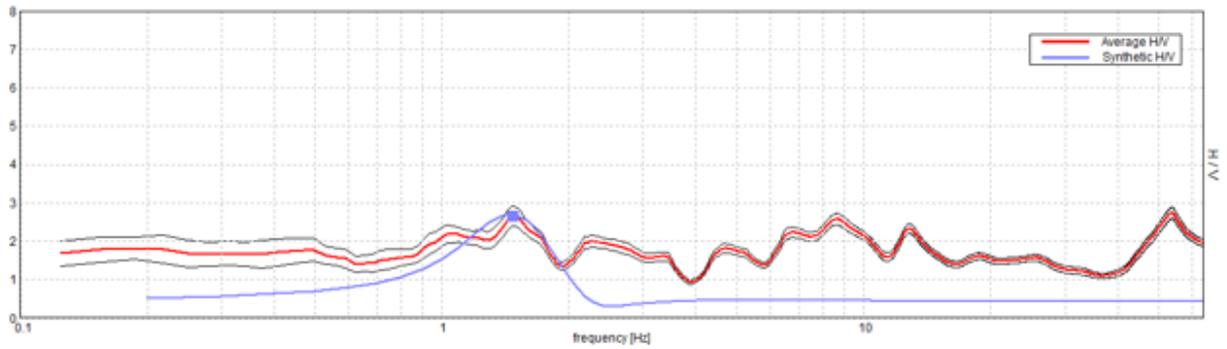


Figura 3.4: rapporto H/V

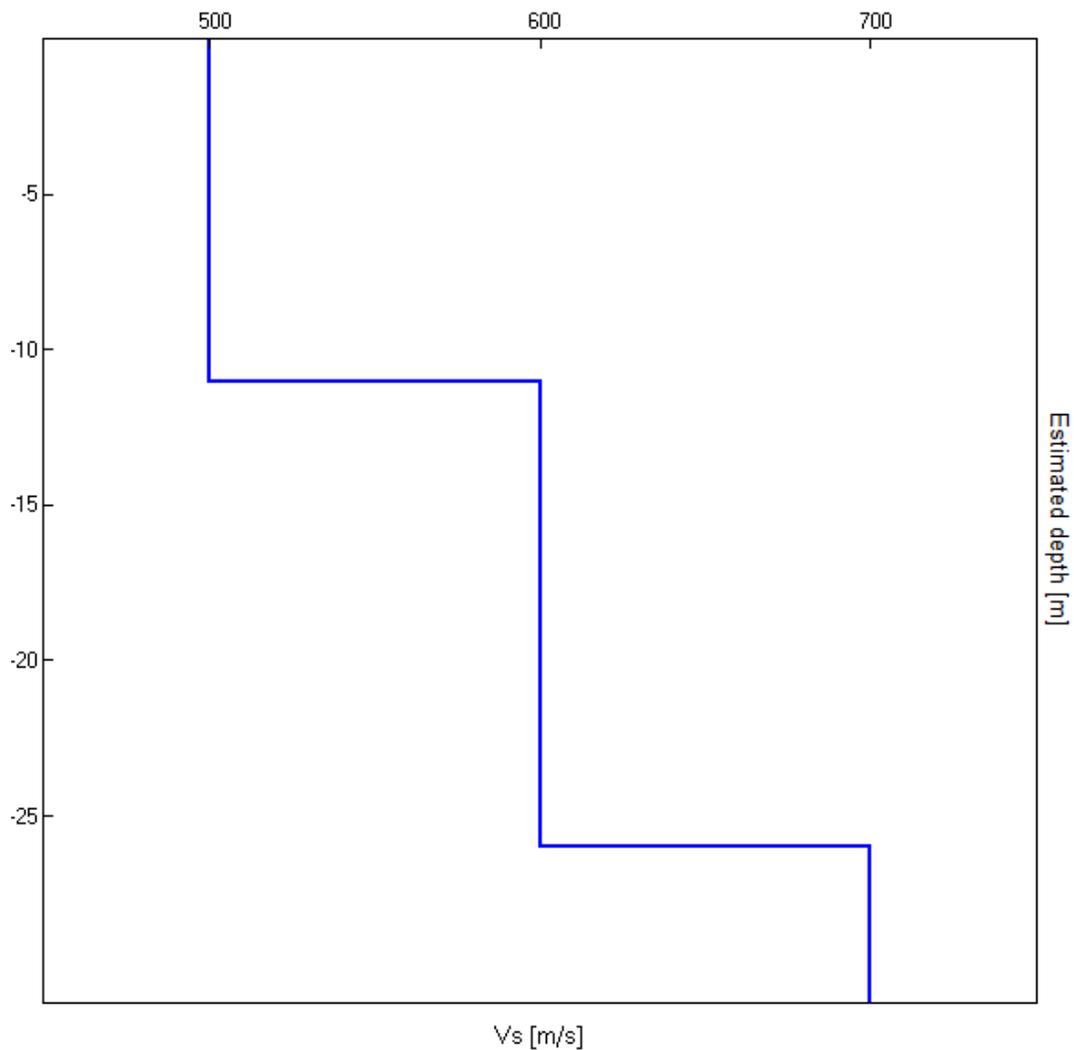
EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC H/V

Max. H/V at 53.75 ± 50.67 Hz. (in the range 0.0 - 64.0 Hz)



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
11.00	11.00	500	0.42
26.00	15.00	600	0.42
inf.	inf.	0	-1.#IND

Vs(0.0-30.0)=638m/s



Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

Freq. naturale edificio _ 10 Hz / numero piani

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

Freq. naturale edificio - Freq. fondamentale di risonanza del sito

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

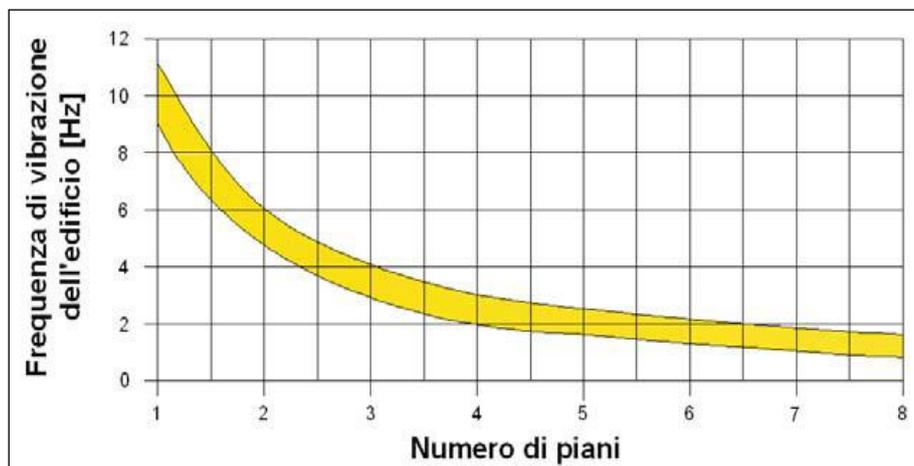


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,5 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 53.75 ± 50.67 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_{wv}$	53.75 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	83850.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 1189 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	42.5 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$			NO
$A_0 > 2$	2.74 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.94268 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	50.6689 < 2.6875		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.1465 < 1.58	OK	

L_{wv}	window length
D_{wv}	number of windows used in the analysis
$n_c = L_{wv} D_{wv} f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,5 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Risultati finali

I profili di velocità, elaborati con le tre tecniche di indagine, hanno consentito di riconoscere, sulle verticali di restituzione delle informazioni sismostratigrafiche, orizzonti con caratteristiche elastiche e velocità delle onde S variabili entro i primi 30 m di sottosuolo. Tutte le indagini hanno evidenziato un incremento delle velocità con la profondità, significativo di volumi di materiale con elevato grado di addensamento e/o maturazione. Non è stato intercettato il bedrock sismico entro i primi 30 m di profondità. In sintesi:

	BEDROCK SISMICO	
	NO	SI
COPERTURA	Sciolta (ghiaie in matrice limosa)	
SPESSORE	17-20 m (spessore certo registrato)	
PARAMETRO Vs da MASW PARAMETRO Vs da ReMi	Vs 30 = 602 m/s	
FREQUENZA del TERRENO	1,5 Hz	

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

Suolo di tipo B

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s ($N_{spt,30} > 50$ nei terreni a grana grossa o $c_{u30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ($\pm 10\%$), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.

Pieve di Soligo, 28/01/2015

il Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Relazione

Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr

per definizione profilo verticale Vs e parametro Vs30

MDP_SMC55

MARENO DI PIAVE (TV)

Via Friuli

Coordinate WGS84

Lat. N 45.85220137 Long. E 12.31432401

Coordinate ED50

Lat. N 45.853957 Long. E 12.315152



i geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor - Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$).

2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche

che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi) , dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai,1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

5. Strumentazione impiegata

Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMi e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

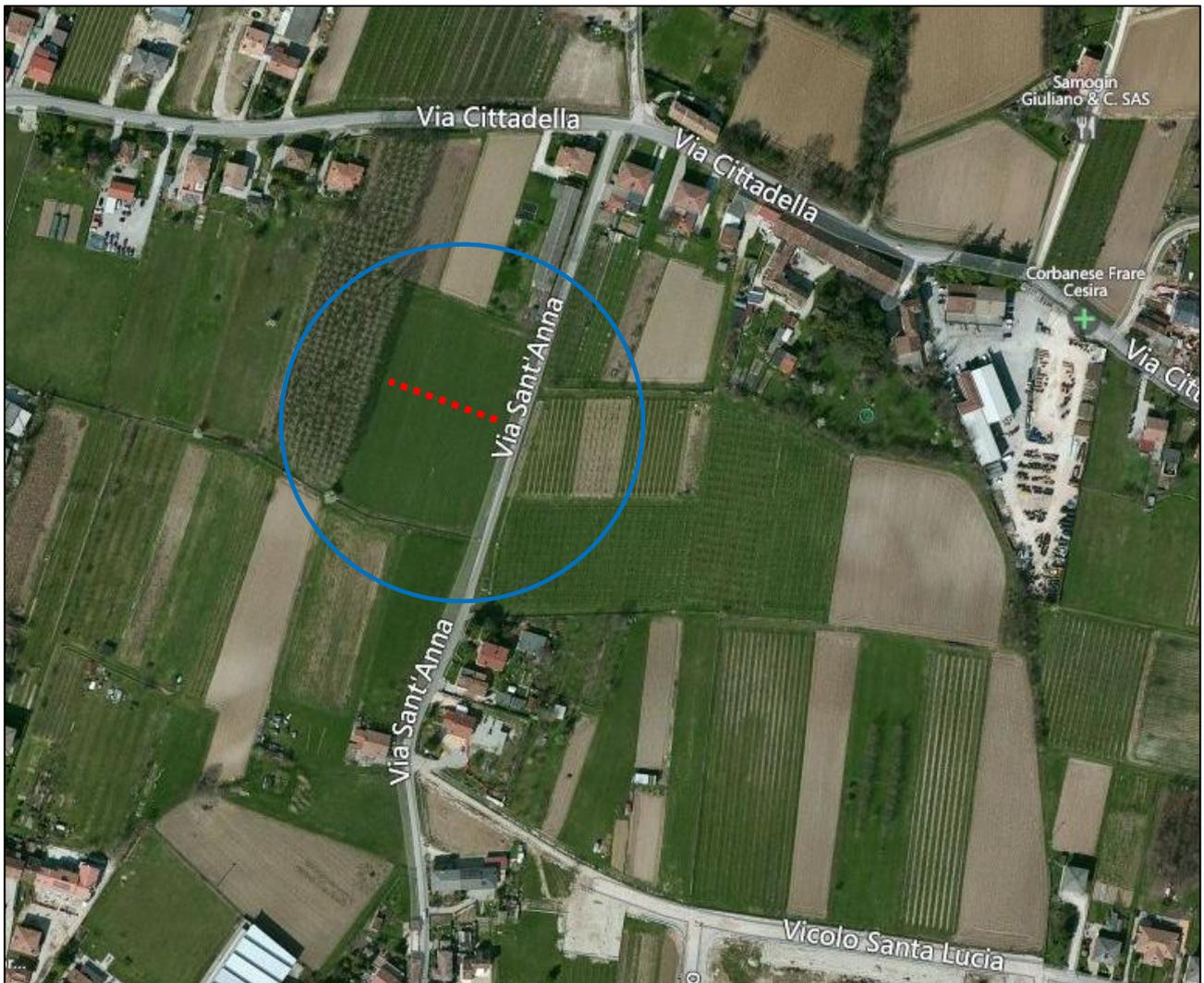
E' stato utilizzato un sismografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

Sito Stendimento Sismico St

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St' (.....) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMi (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

Dati sperimentali (St)

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di campioni temporali..... 2048
Passo temporale di acquisizione.....0.6 ms
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

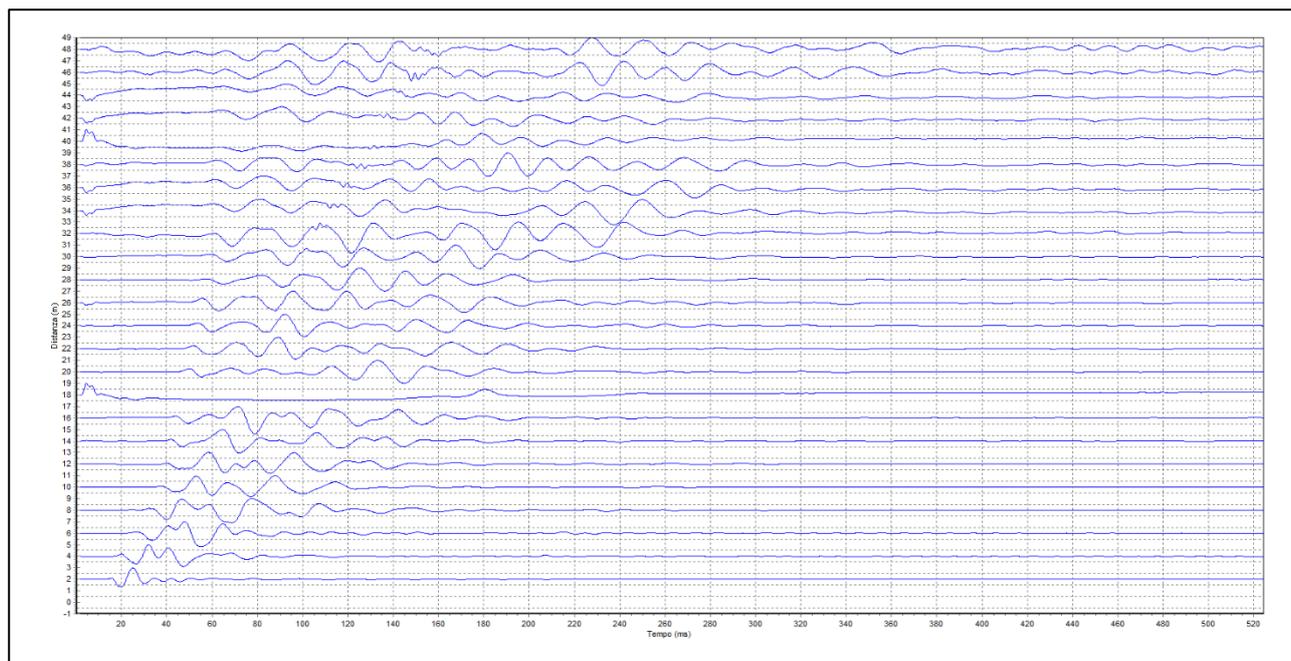


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

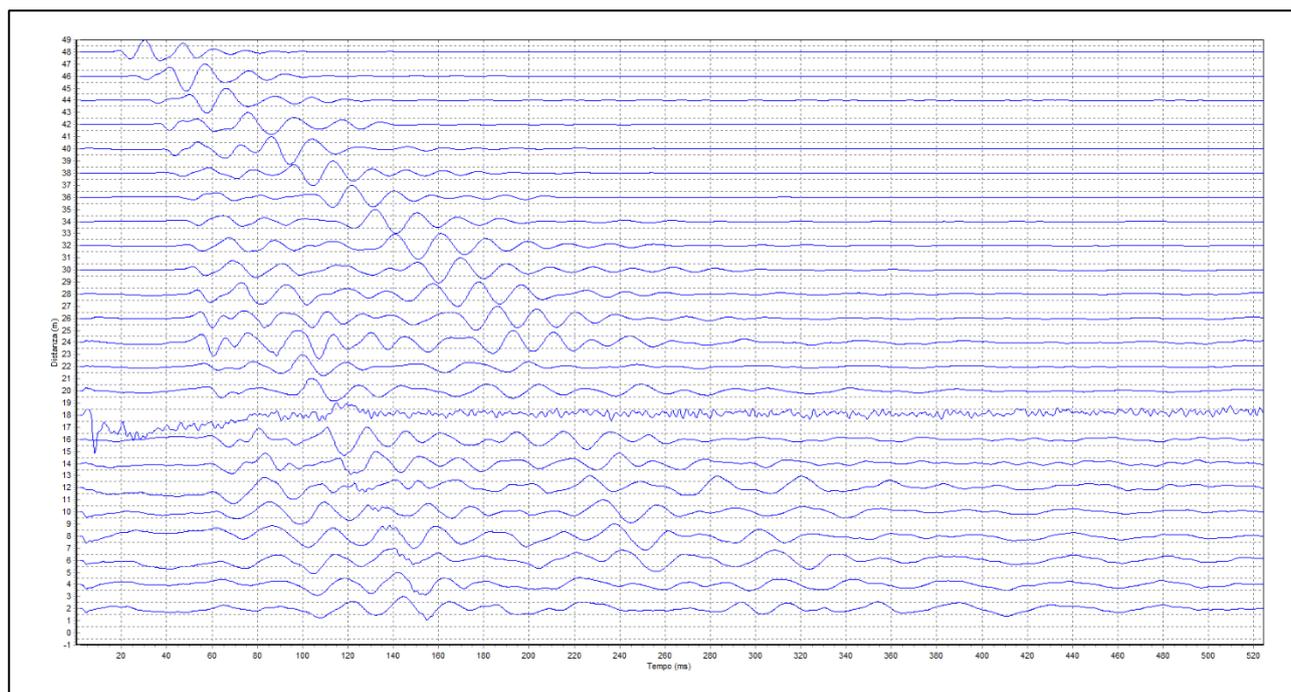


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

Sismica a rifrazione

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$), così come nel caso in esame.

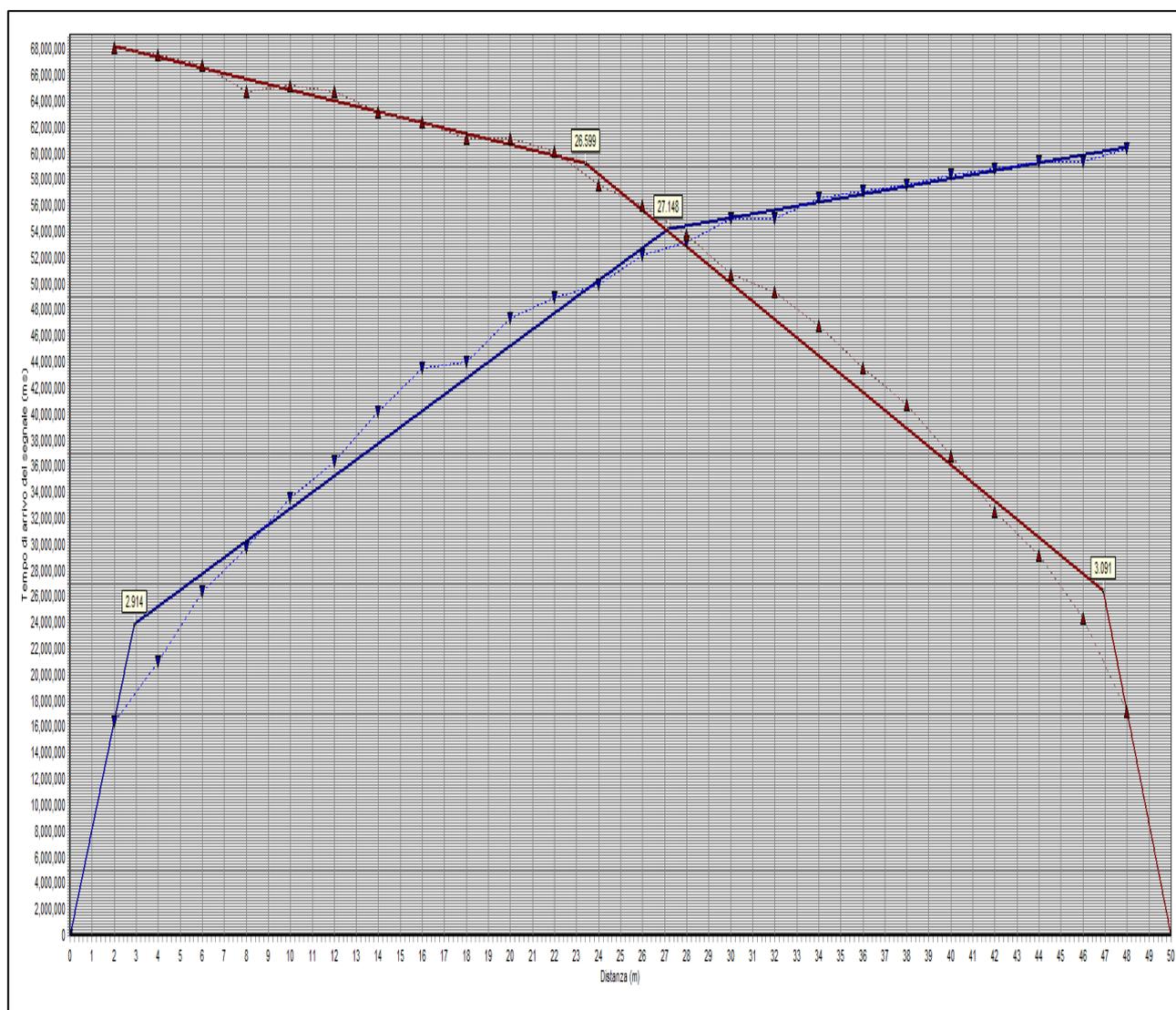


Figura 1.3: grafico generale curva distanza-tempo

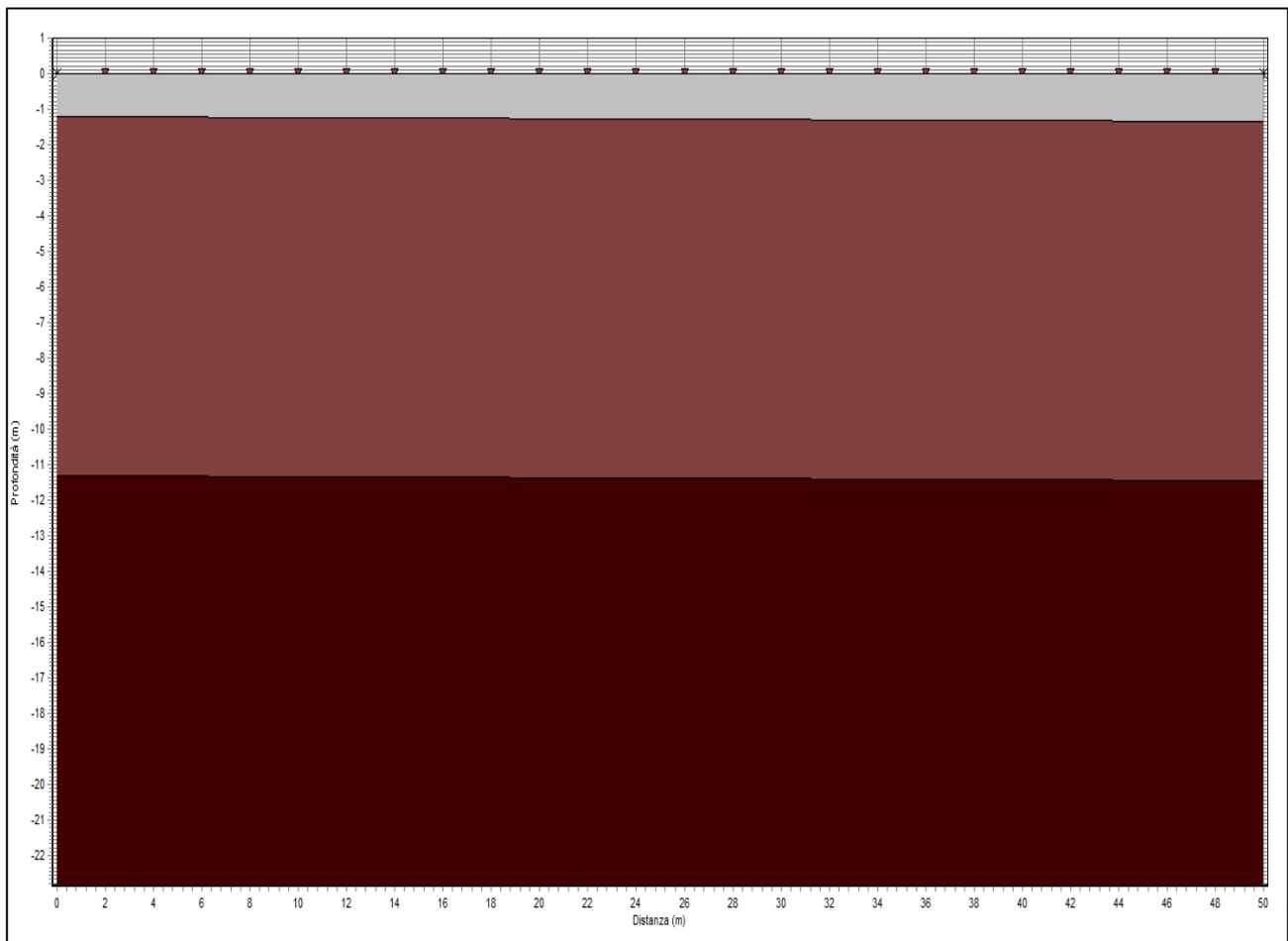


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

Strato n.	Vp (m/s)	Hs(m)	Hd(m)	rd	ri
1	324	1.222	1.342	1	1
2	812	11.293	11.431	0.98	0.988
3	1066			1066	0.979

LEGENDA:	
Hs	= spessore strato lato sinistro;
Hd	= spessore strato lato destro;
Vp	= velocità delle onde P.
Vs	= velocità delle onde S.
rd	= coefficiente correlazione tiro diretto
ri	= coefficiente correlazione tiro inverso

La sezione sismostratigrafica è stata interpretata con attendibilità fino a circa 17 m di profondità, in coerenza con gli altri tipi di analisi descritte in seguito; in realtà la profondità indagata arriva a circa 25-30 m.

Conclusioni (rifrazione)

L'indagine ha evidenziato 3 sismostrati coi rispettivi valori: il primo sismostrato di 1,2 m con Vp 324 m/s, il secondo sismostrato di circa 11 m con Vp di 812 m/s e il terzo con Vp di circa 1066 m/s.

Analisi MASW

Frequenza minima12Hz

Frequenza massima48Hz

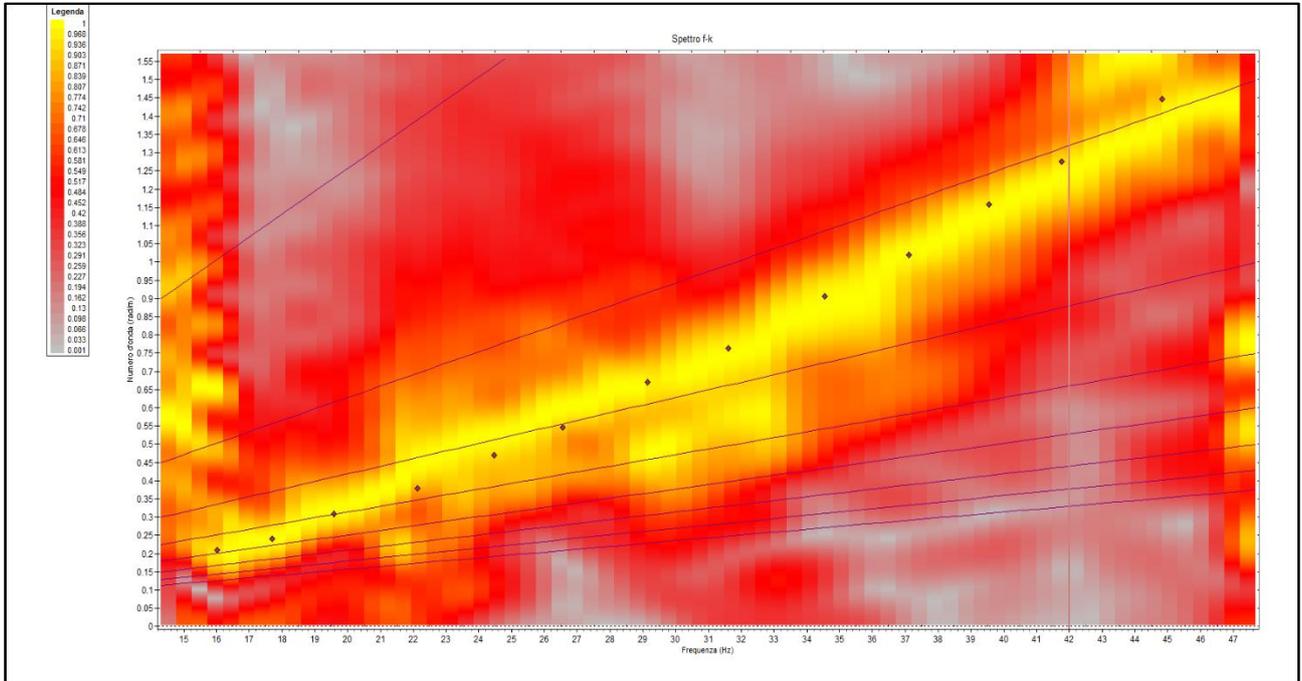


Figura 1.5: Spettro f – k

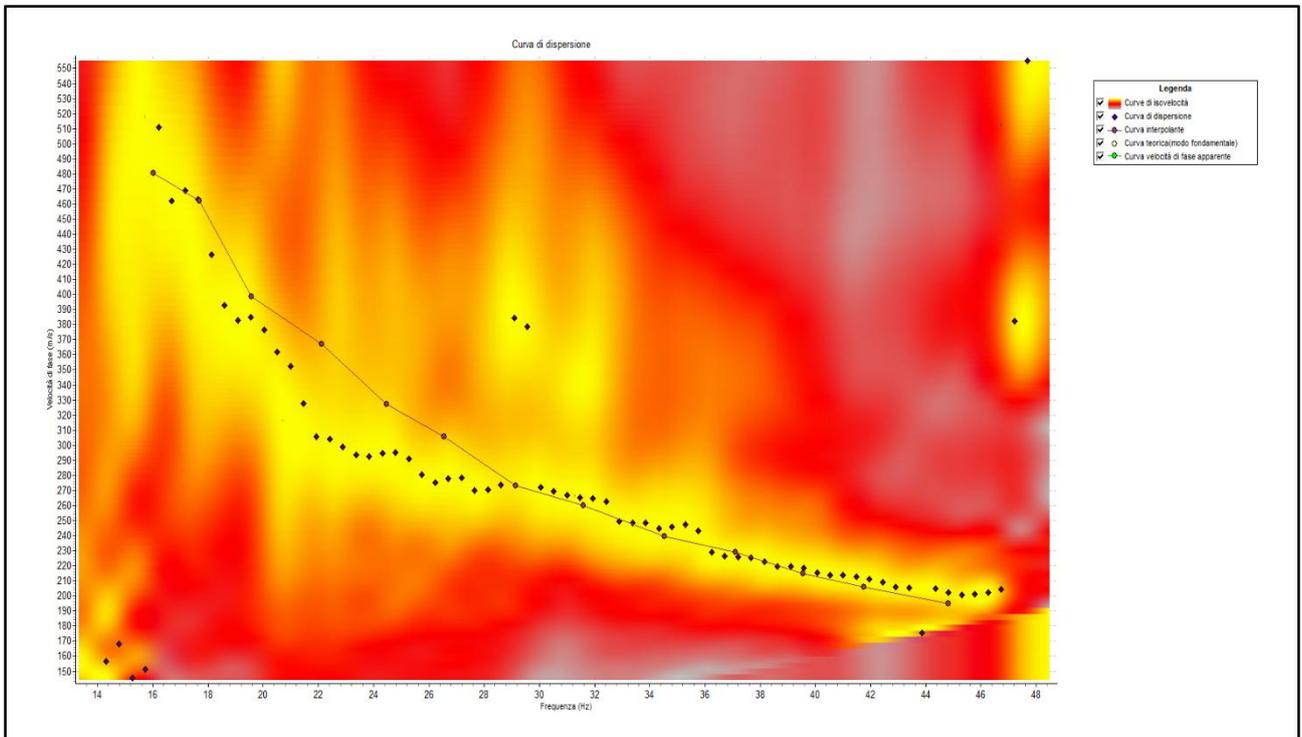


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale mediando i livelli con valori di Vs simili.

Numero di strati (escluso semispazio).....	4
Spaziatura ricevitori [m].....	2 m
Numero ricevitori	24

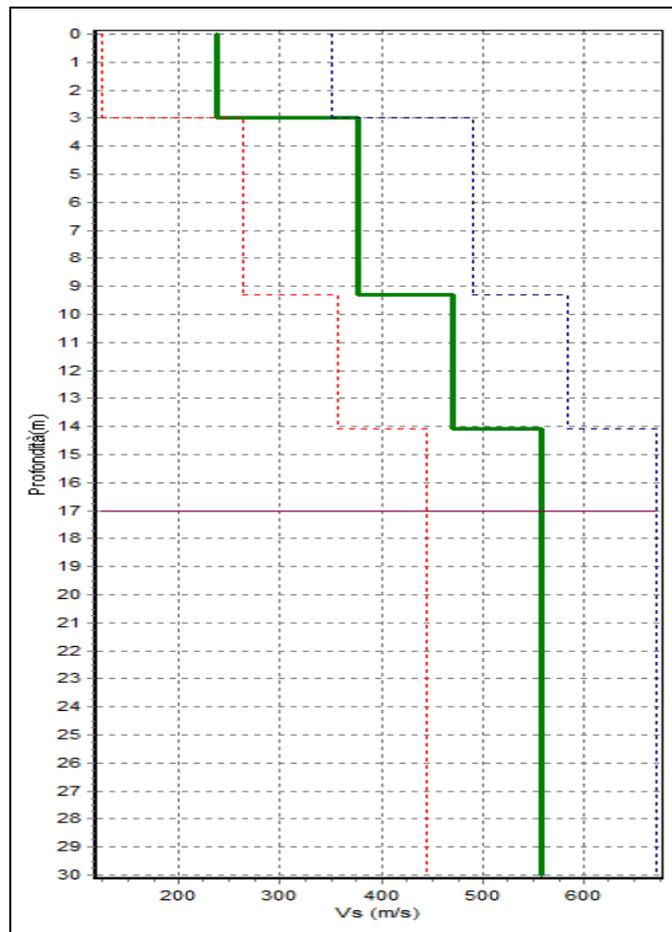


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

Conclusioni (MASW)

L'indagine ha fornito dati affidabili MASW sino ad una profondità di circa 17 m; abbiamo circa 9 m di terreni soffici, con Vs attorno a 300 m/s, fino a 14 m Vs attorno a 460 m/s e oltre i 14 m Vs costati di 550 m/s.

Analisi ReMi

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

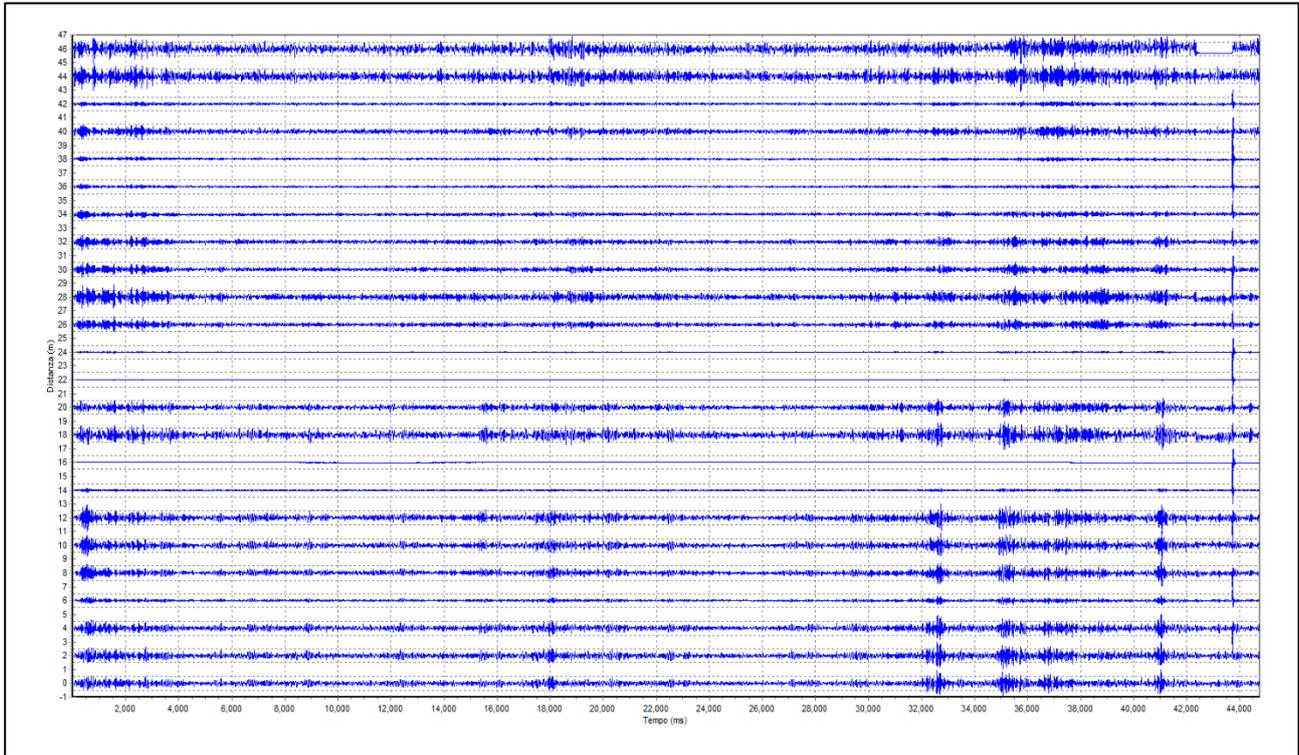


Figura 2.1: Tracce sperimentali

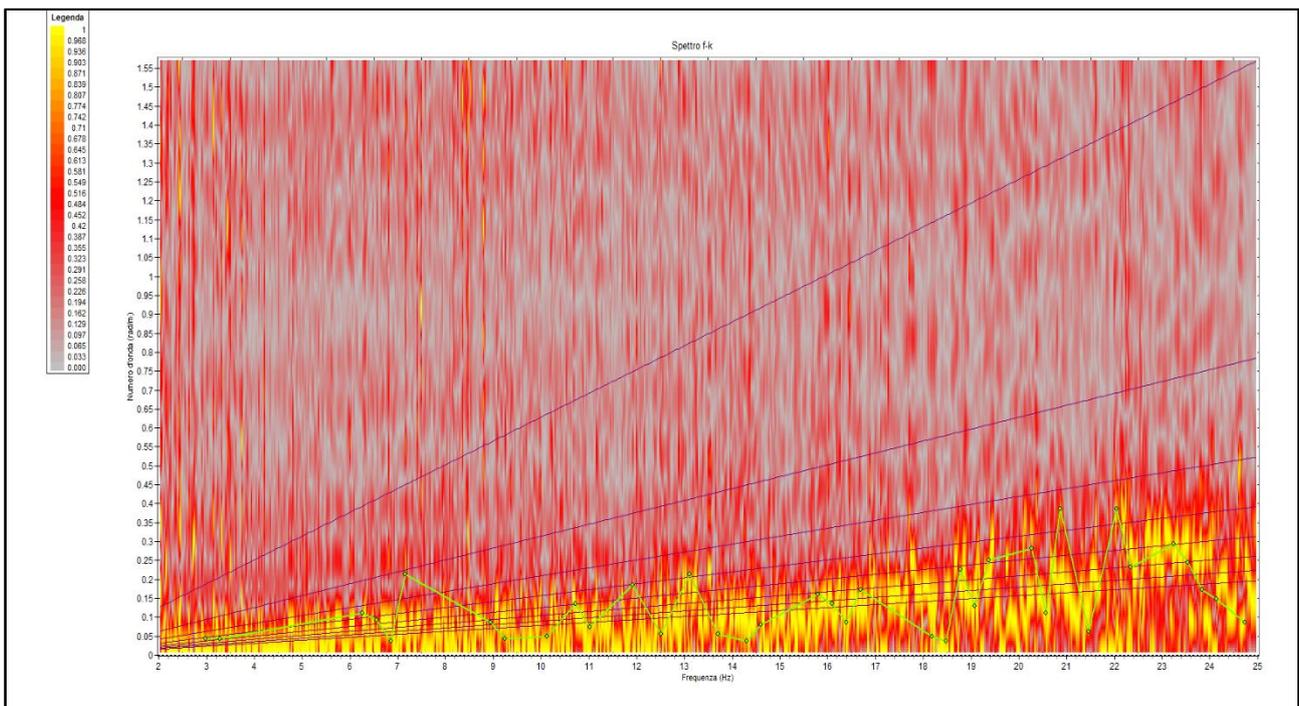


Figura 2.2: Spettro f - k

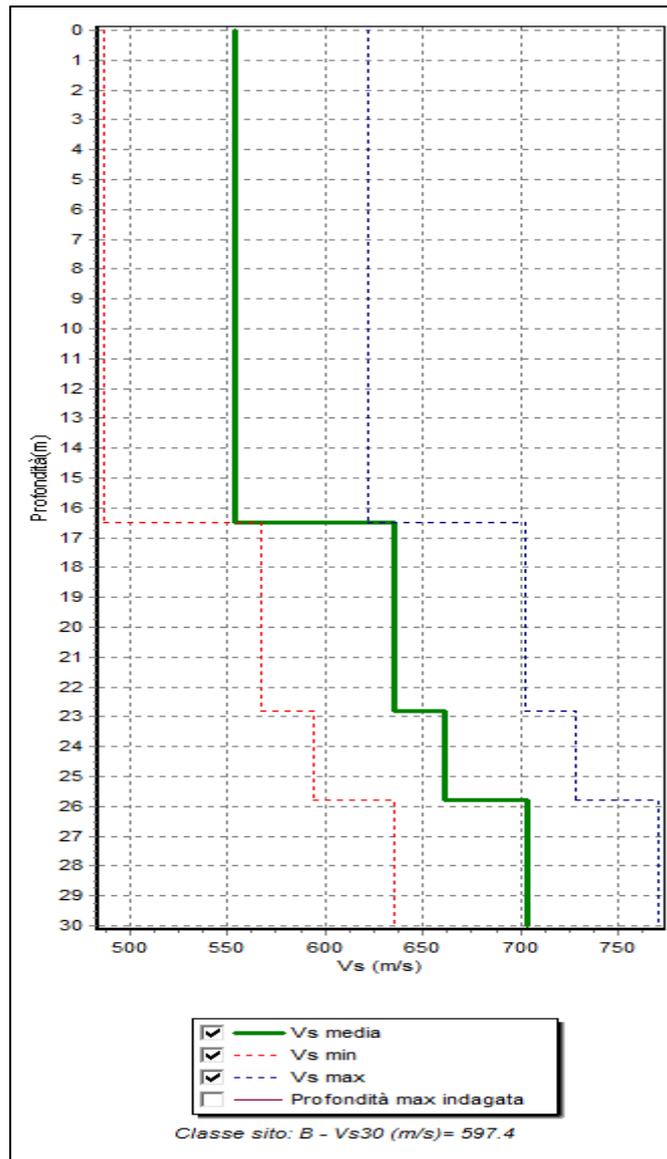


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

Conclusioni (ReMi)

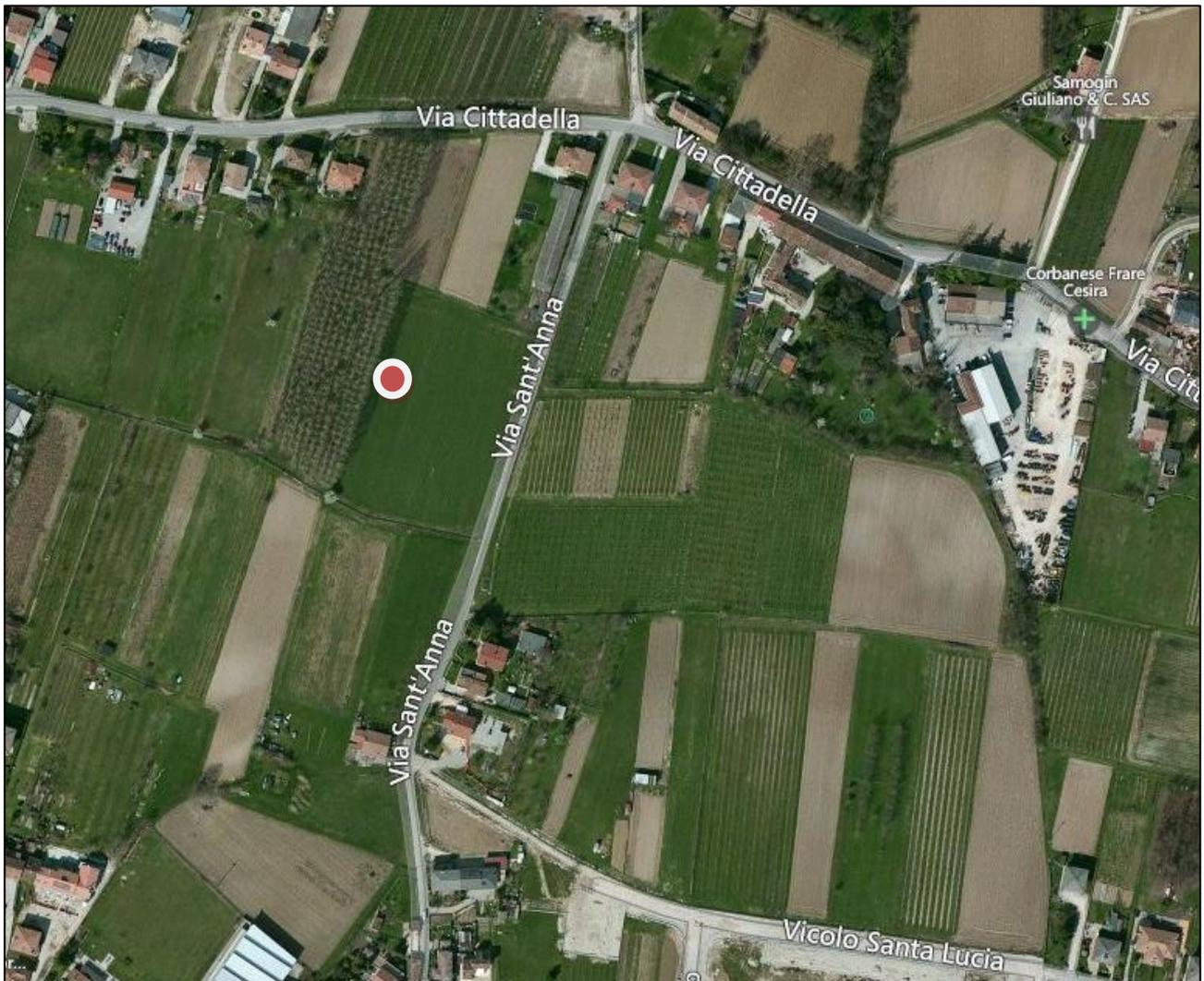
Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati, si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini fino a profondità dell'ordine dei 30 m.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

Profondità (m)	Vs (m/s)	Considerazioni
0 - 16 m	550	Ghiaie Sabbiose
16 - 26 m	650	Ghiaie
26 - 30 m	700	Ghiaie

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

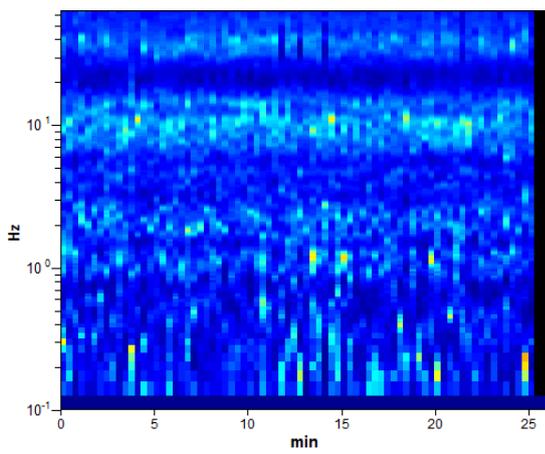


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

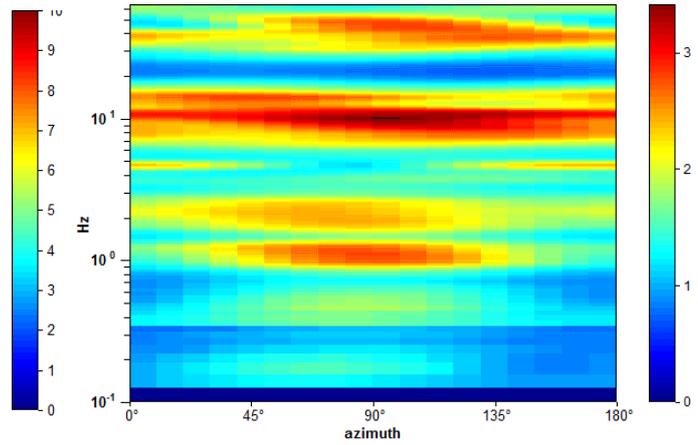


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

Analisi HV

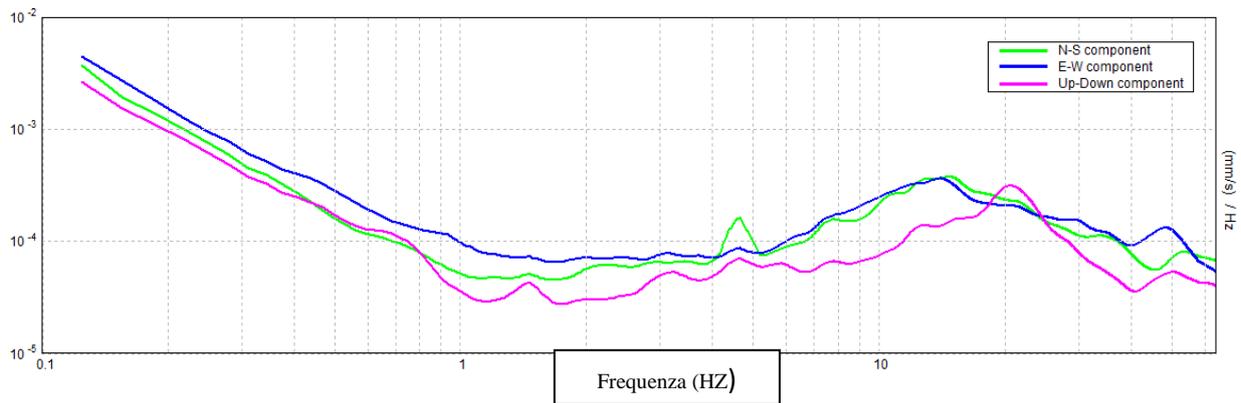


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

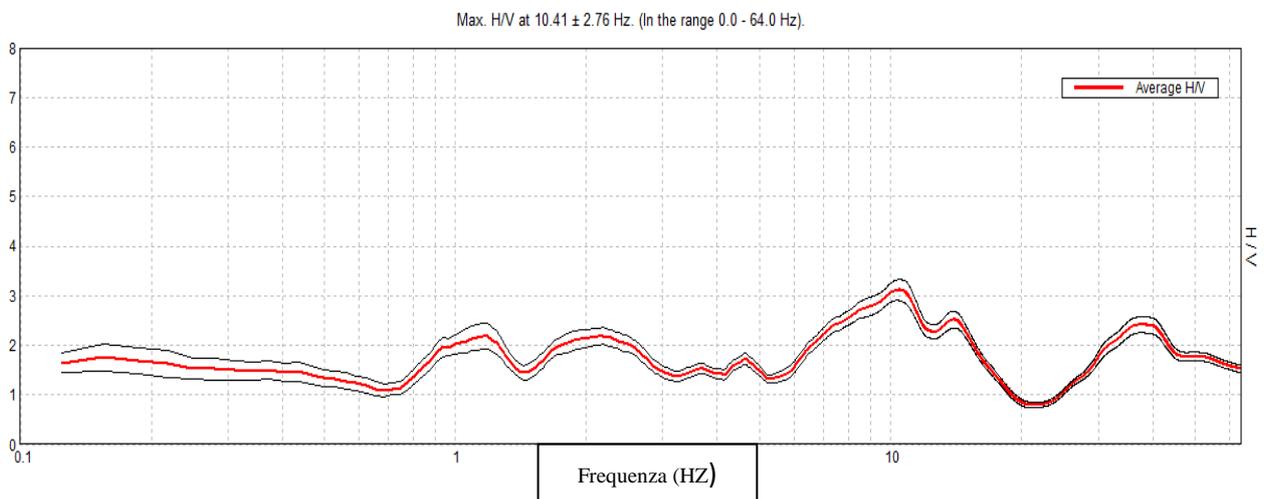
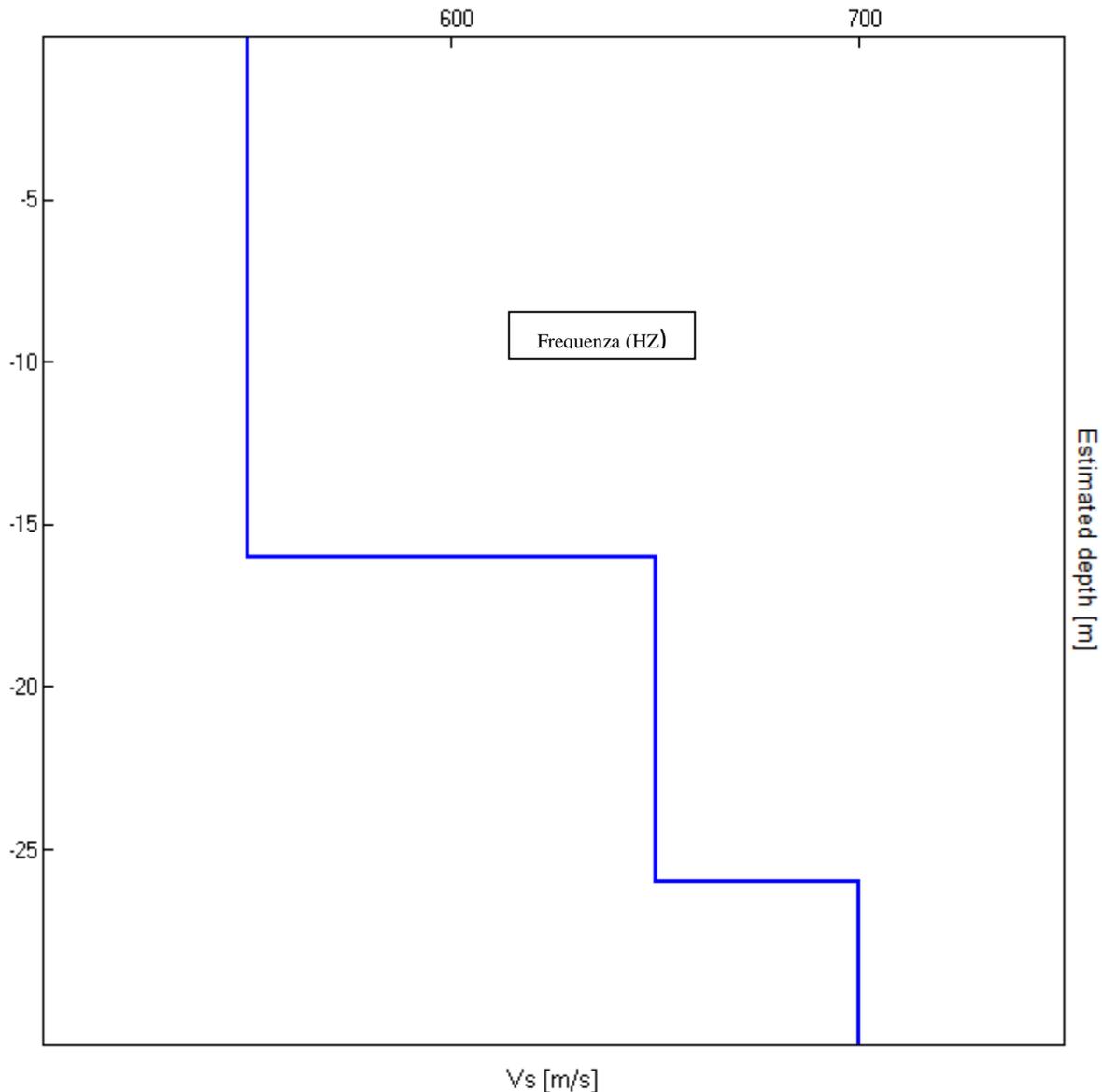


Figura 3.4: rapporto H/V



Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/Vs)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (Vs/4H)$$

con H profondità del rifrattore e Vs velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

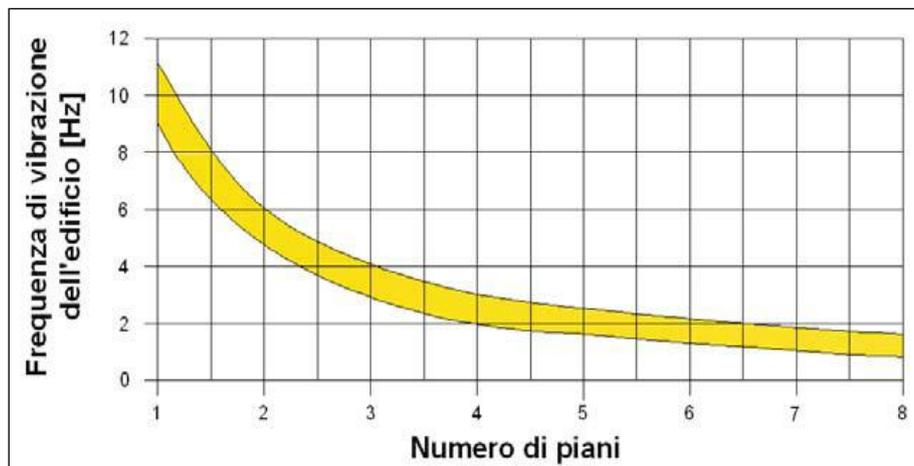


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,3 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 10.41 ± 2.76 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	10.41 > 0.50	OK	
$N_c(f_0) > 200$	16233.8 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 500 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	6.0 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	16.813 Hz	OK	
$A_0 > 2$	3.11 > 2	OK	
$f_{\text{peak}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.26502 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$2.75786 < 0.52031$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2096 < 1.58$	OK	

L_w	window length
N_w	number of windows used in the analysis
$N_c = L_w N_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartarla o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri

successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,3 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Risultati finali

I profili di velocità, elaborati con le tre tecniche di indagine, hanno consentito di riconoscere, sulle verticali di restituzione delle informazioni sismostratigrafiche, orizzonti con caratteristiche elastiche e velocità delle onde S variabili entro i primi 30 m di sottosuolo. Tutte le indagini hanno evidenziato un incremento delle velocità con la profondità, significativo di volumi di materiale con elevato grado di addensamento e/o maturazione. Non è stato intercettato il bedrock sismico entro i primi 30 m di profondità. In sintesi:

	BEDROCK SISMICO	
	NO	SI
COPERTURA	Sciolta (ghiaie in matrice limosa)	
SPESSORE	17 m (spessore certo registrato)	
PARAMETRO Vs da MASW PARAMETRO Vs da ReMi	Vs 30 = 597 m/s	
FREQUENZA del TERRENO	1,3 Hz	

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

Suolo di tipo B

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s ($N_{spt,30} > 50$ nei terreni a grana grossa o $cu_{30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ($\pm 10\%$), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.

Pieve di Soligo, 28/01/2015

il Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Relazione

Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr

per definizione profilo verticale Vs e parametro Vs30

MDP_SMC56

MARENO DI PIAVE (TV)

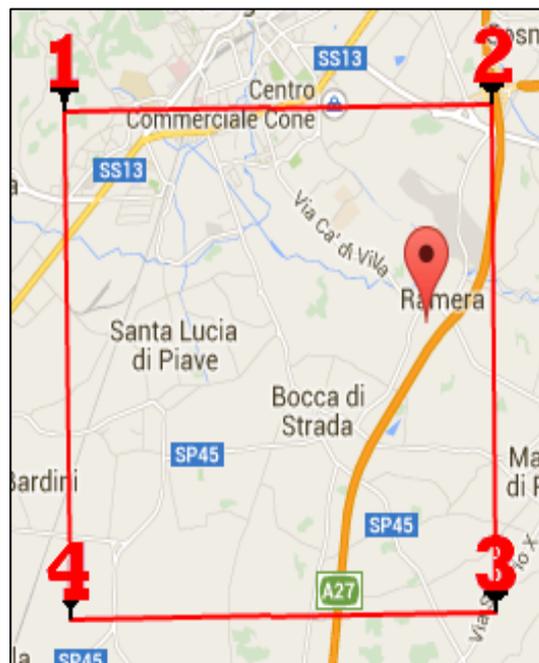
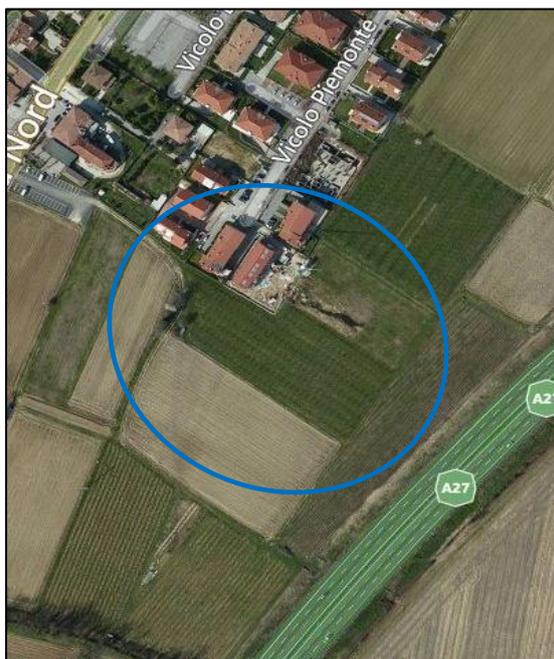
Vicolo Piemonte

Coordinate WGS84

Lat. N 45.85640556 Long. E 12.32983157

Coordinate ED50

Lat. N 45.858161 Long. E 12.33066



i geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor - Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$).

2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche

che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi) , dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai,1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

5. Strumentazione impiegata

Hardware

L'acquisizione dati per l'elaborazione MASW, ReMi e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

E' stato utilizzato un sismografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

Sito Stendimento Sismico St

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St' (.....) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMi (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

Dati sperimentali (St)

Numero di ricevitori	24
Distanza tra i sensori:	2 m
Numero di campioni temporali.....	2048
Passo temporale di acquisizione.....	0.6 ms
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....	24

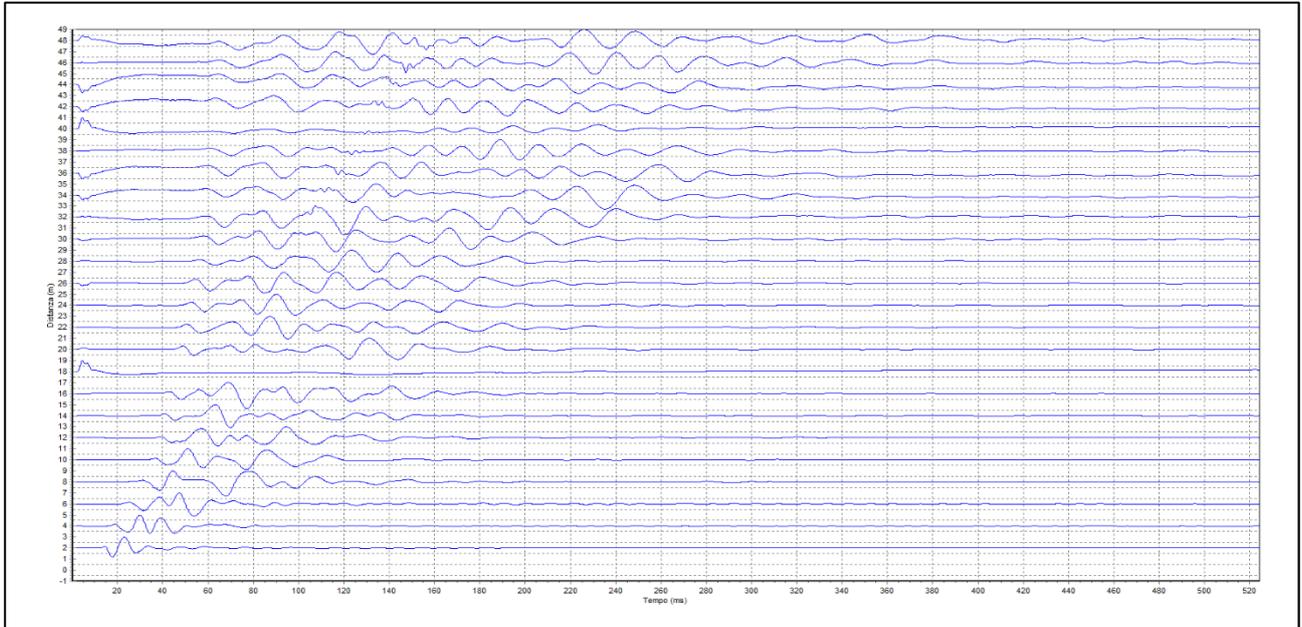


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

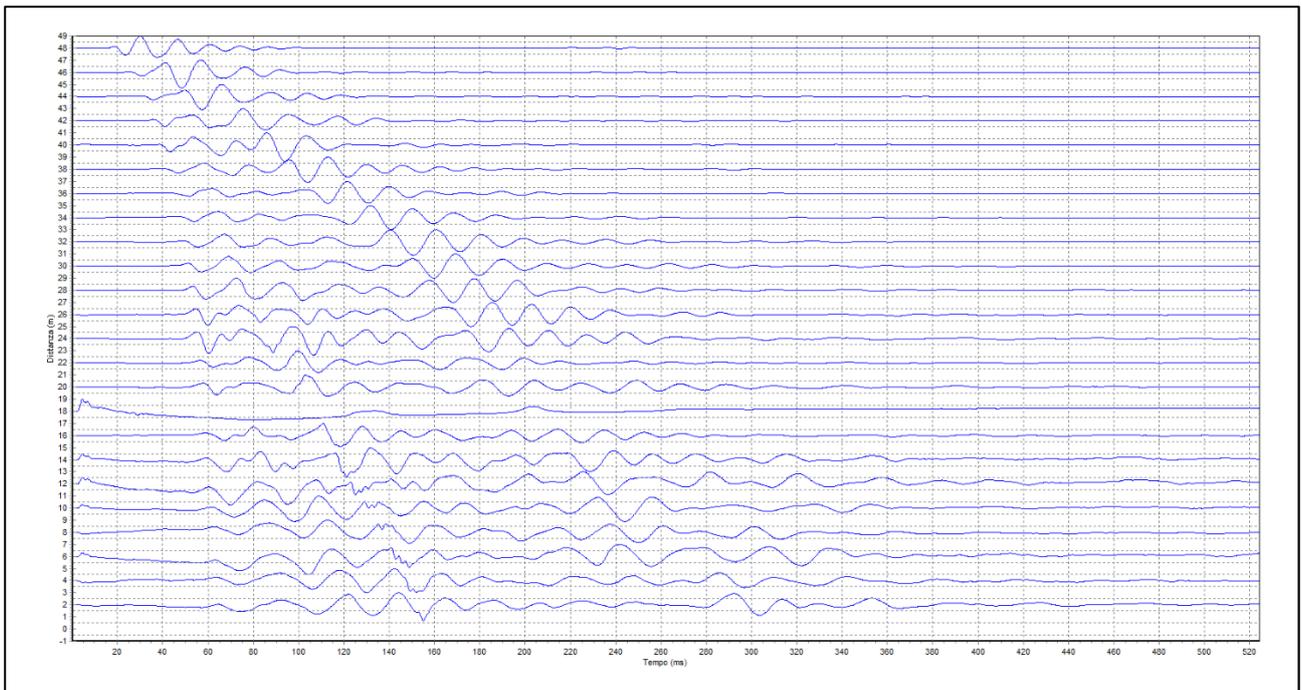


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

Sismica a rifrazione

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$), così come nel caso in esame.

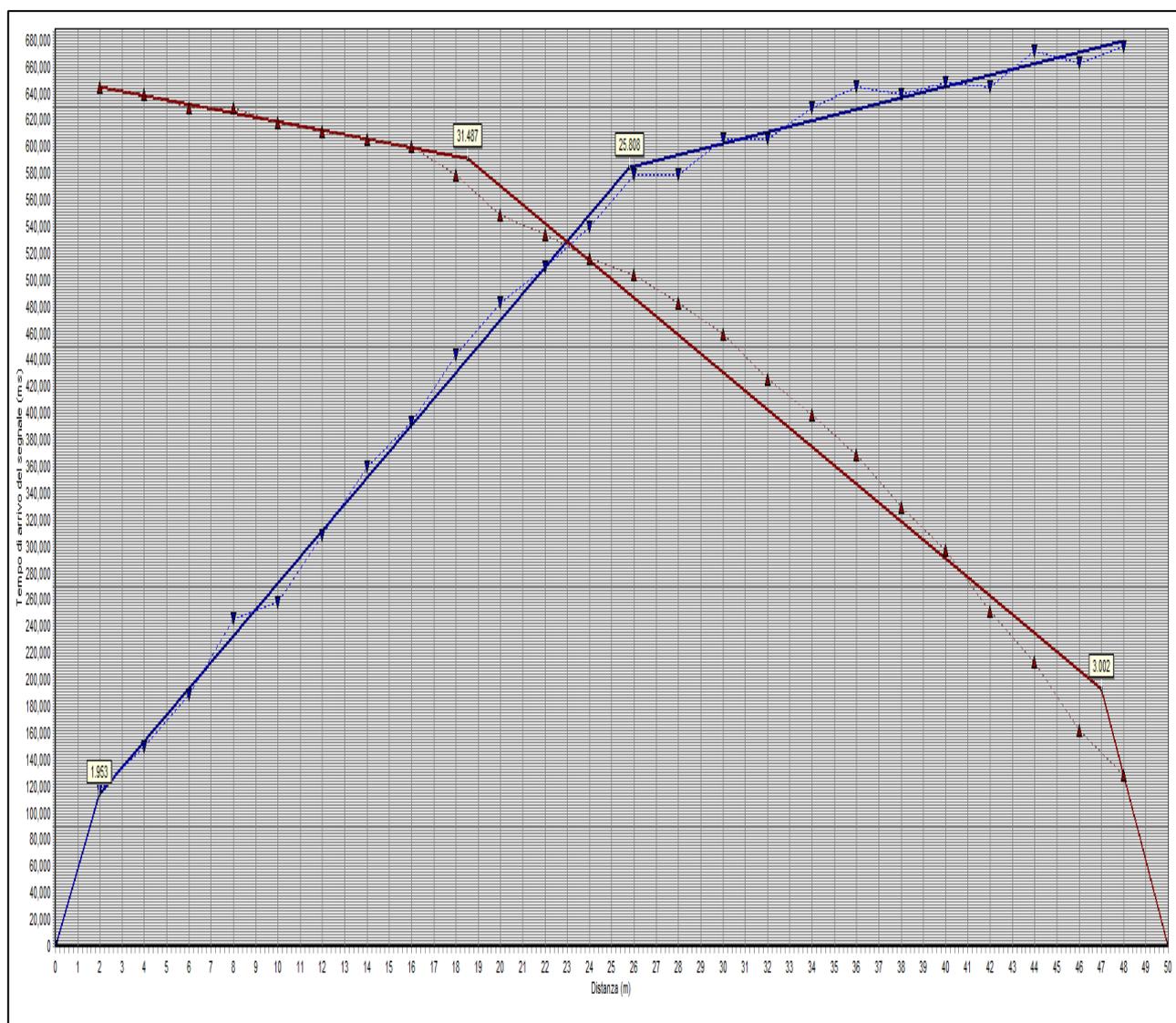


Figura 1.3: gráfico geral curva distancia-tempo

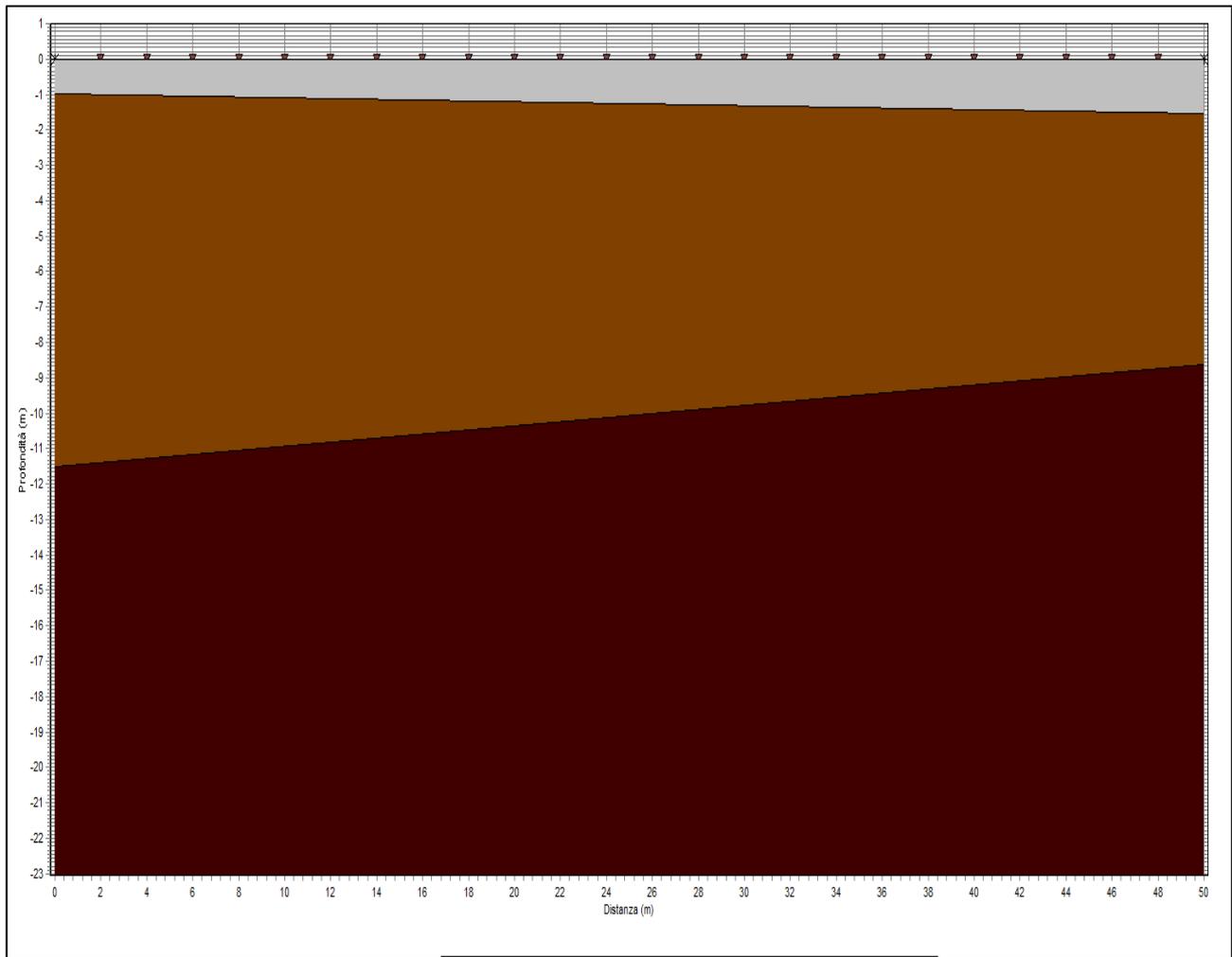


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

Strato n.	Vp (m/s)	Hs(m)	Hd(m)	rd	ri
1	304	0.642	1.287	1	1
2	510	12.762	11.406	0.998	0.986
3	652			0.947	0.99

LEGENDA:
 Hs = spessore strato lato sinistro;
 Hd = spessore strato lato destro;
 Vp = velocità delle onde P.
 Vs = velocità delle onde S.
 rd = coefficiente correlazione tiro diretto
 ri = coefficiente correlazione tiro inverso

La sezione sismostratigrafica è stata interpretata con attendibilità fino a circa 15-17 m di profondità, in coerenza con gli altri tipi di analisi descritte in seguito; in realtà la profondità indagata arriva a circa 25-30 m.

Conclusioni (rifrazione)

L'indagine ha evidenziato 3 sismostrati coi rispettivi valori: il primo sismostrato di 1 m con Vp 326 m/s, il secondo sismostrato di circa 11 m con Vp di 510 m/s e il terzo con Vp di circa 652 m/s.

Analisi MASW

Frequenza minima08Hz

Frequenza massima48Hz

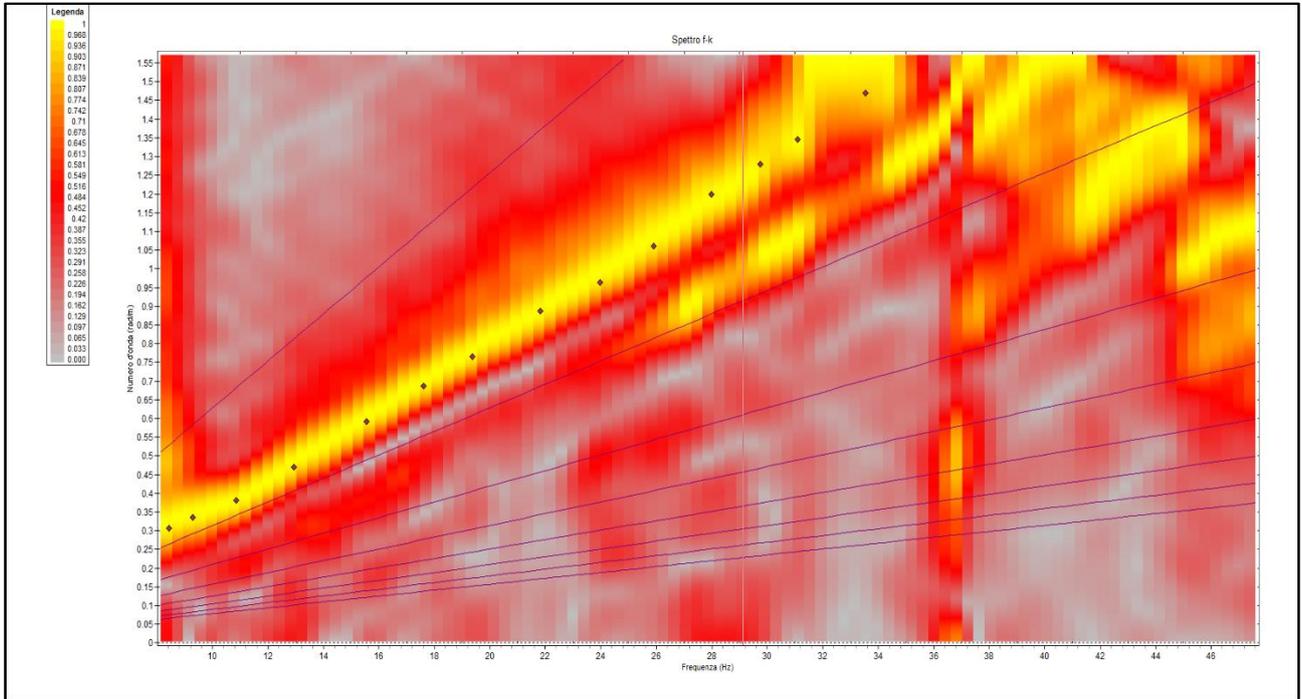


Figura 1.5: Spettro f – k

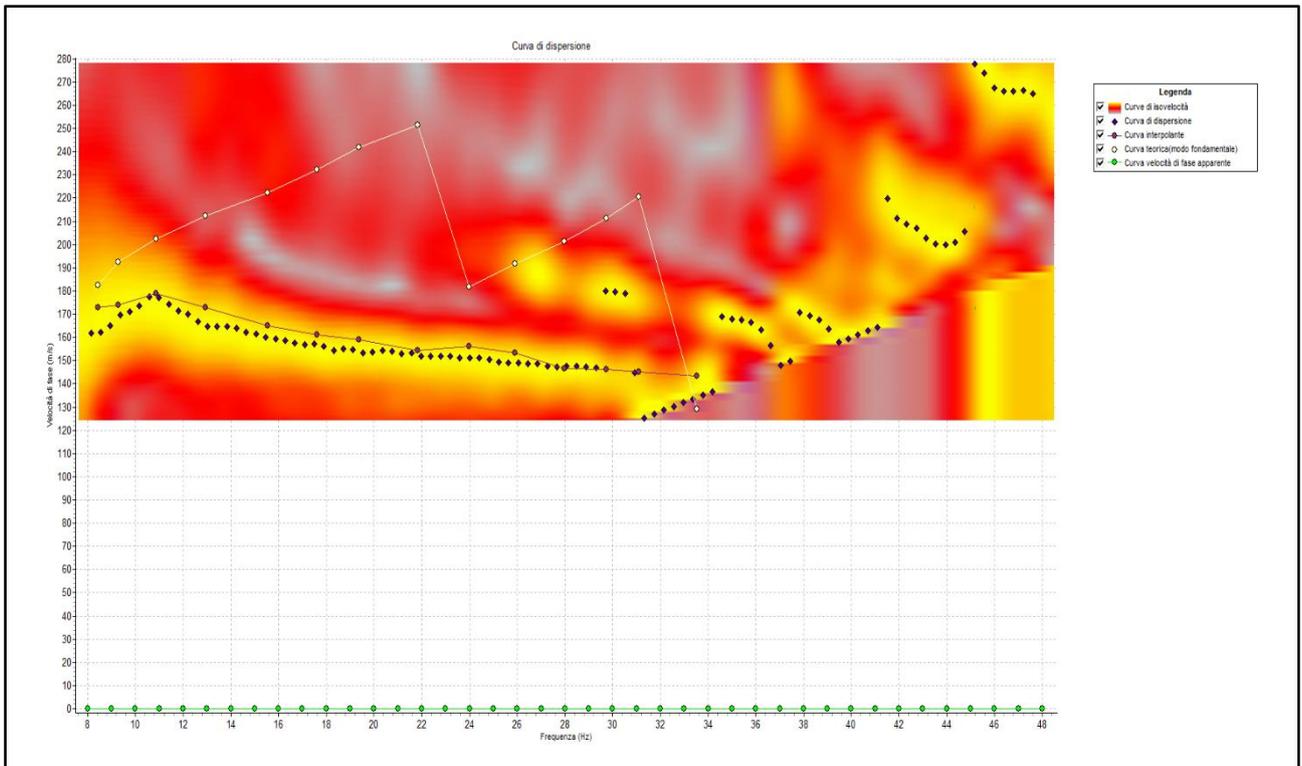


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale generando mediando i livelli con valori di Vs simili.

Numero di strati (escluso semispazio).....	4
Spaziatura ricevitori [m].....	2 m
Numero ricevitori	24

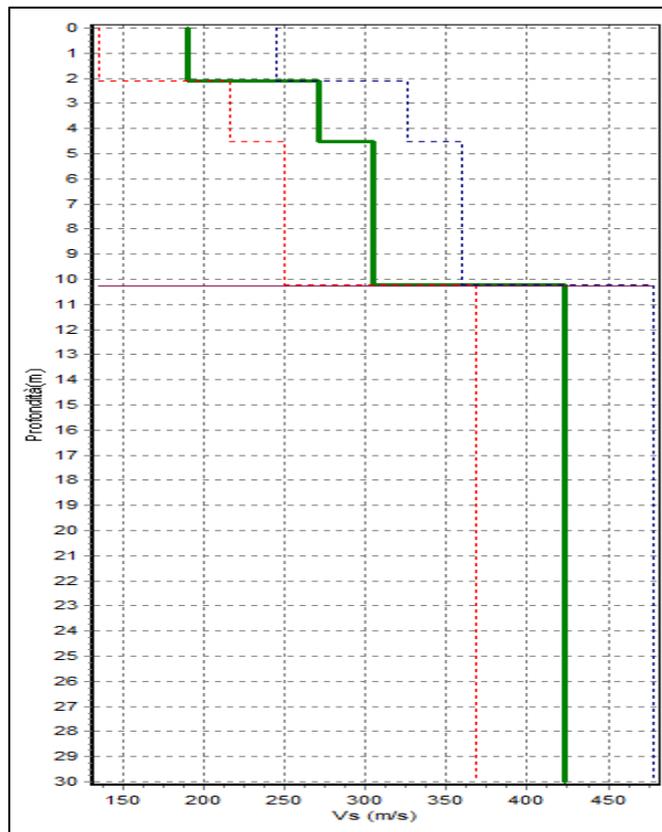


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

Conclusioni (MASW)

L'indagine ha fornito dati affidabili MASW sino ad una profondità di circa 14 m; abbiamo circa 10 m di terreni più soffici, con Vs inferiore a 300 m/s, oltre Vs di fino a 430 m/s.

Analisi ReMi

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

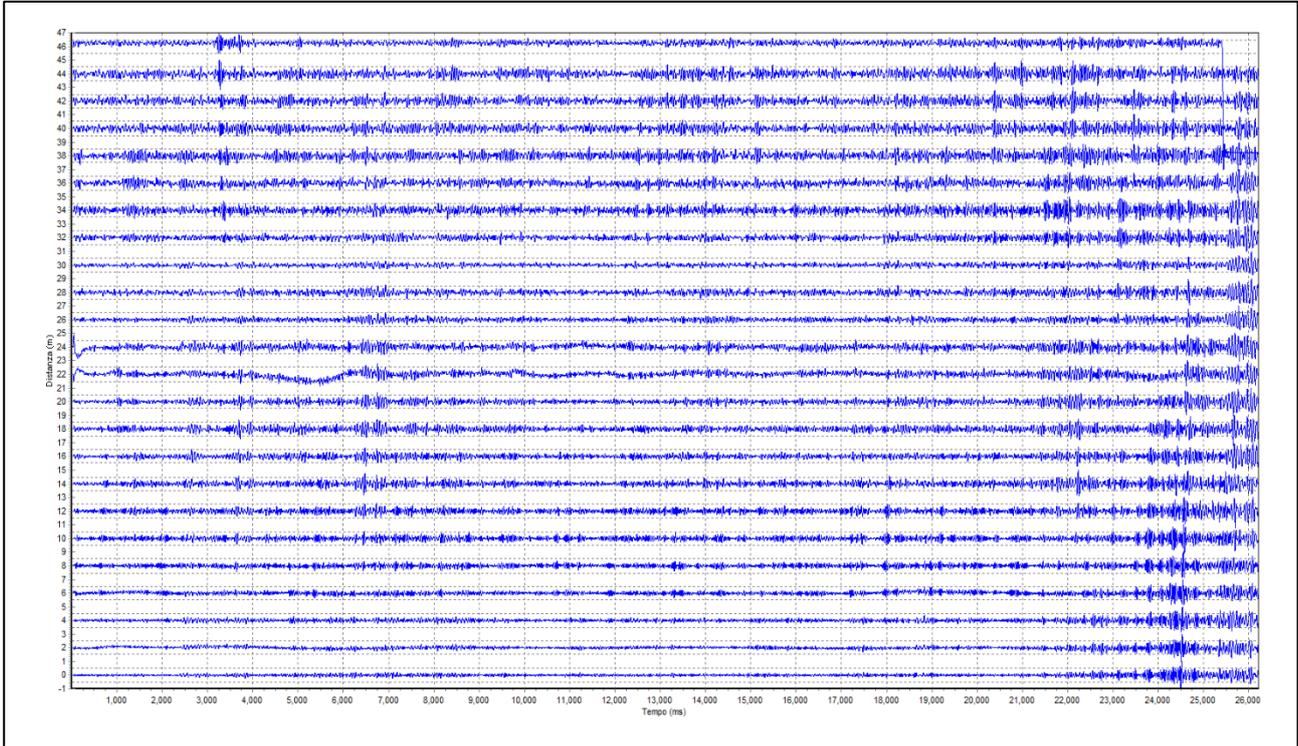


Figura 2.1: Tracce sperimentali

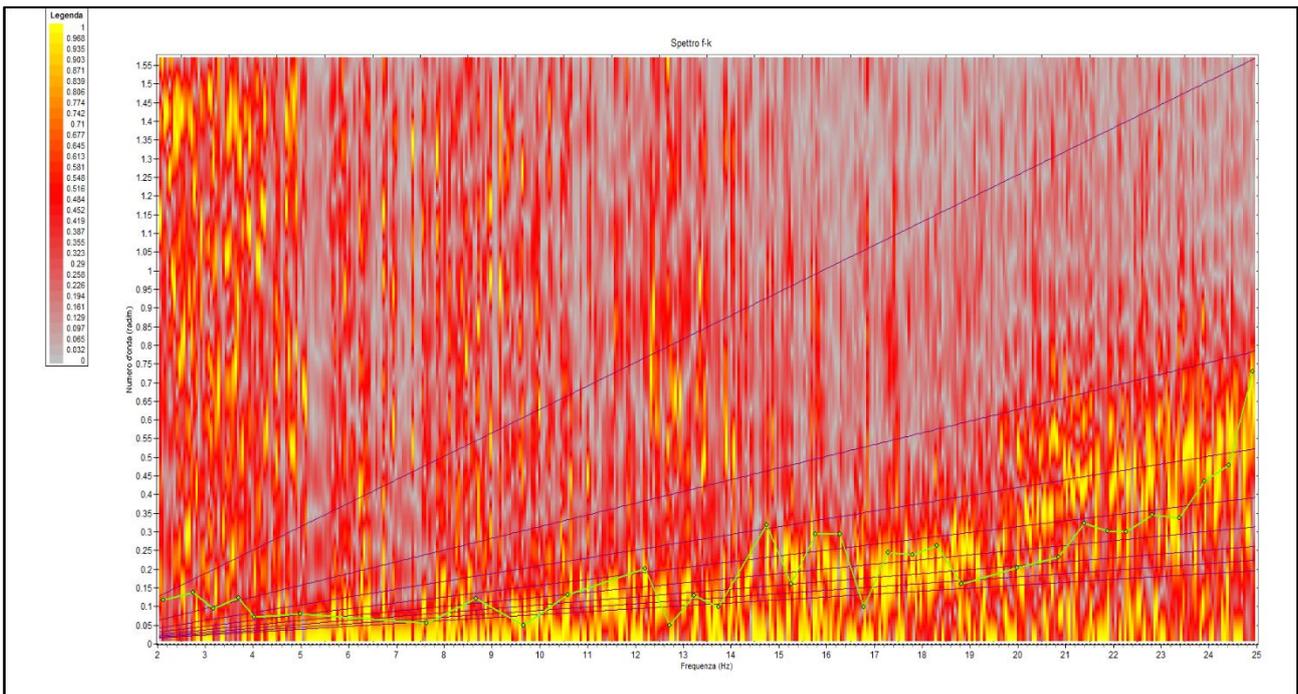


Figura 2.2: Spettro f - k

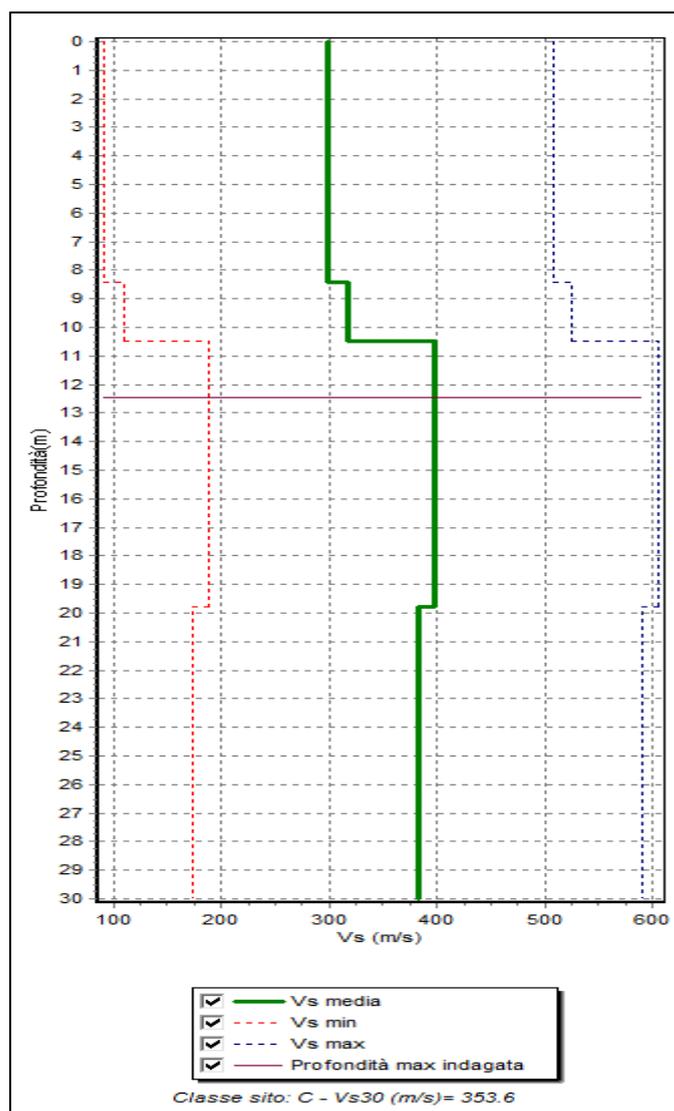


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

Conclusioni (ReMi)

Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati, si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini fino a profondità dell'ordine dei 30 m.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

Profondità (m)	Vs (m/s)	Considerazioni
0 – 10 m	300	Argille sabbioso limose
10 - 20 m	400	Ghiaie Sabbiose
20 – 30 m	400	Ghiaie sabbiose

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

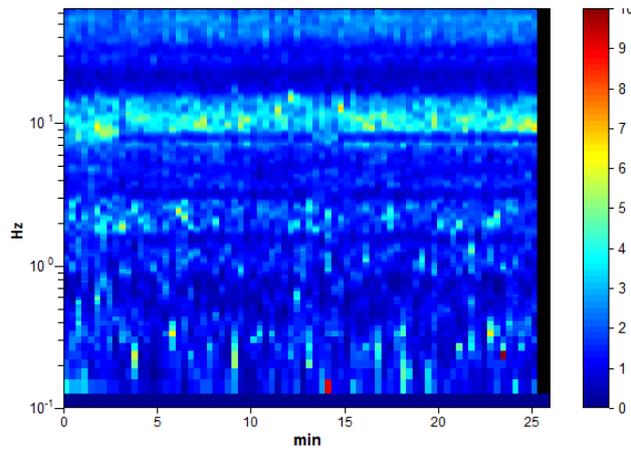


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

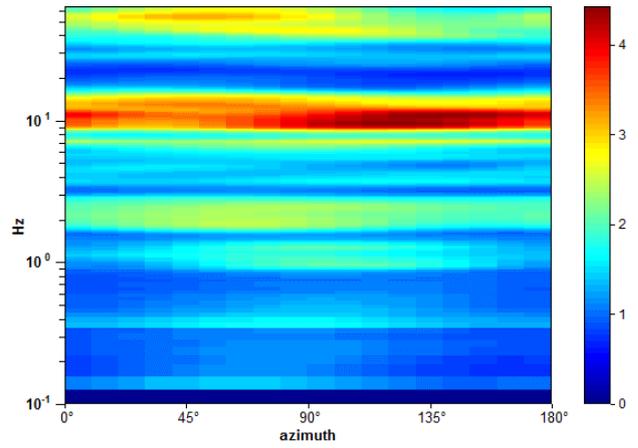


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

Analisi HV

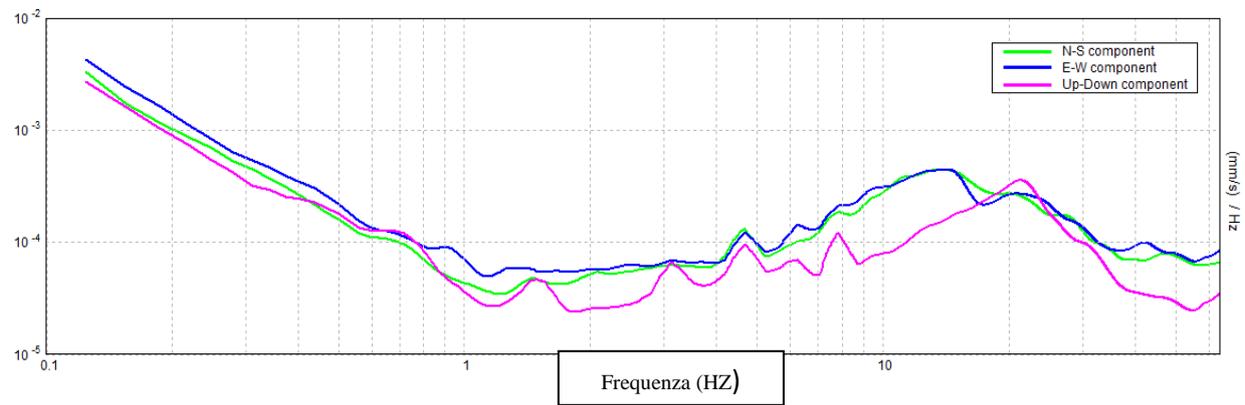


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

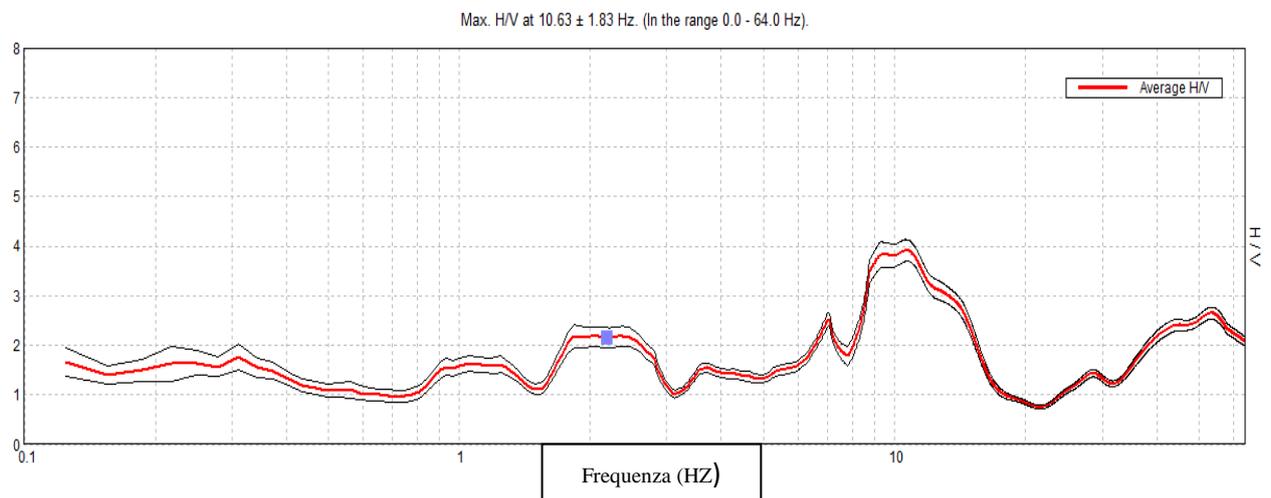
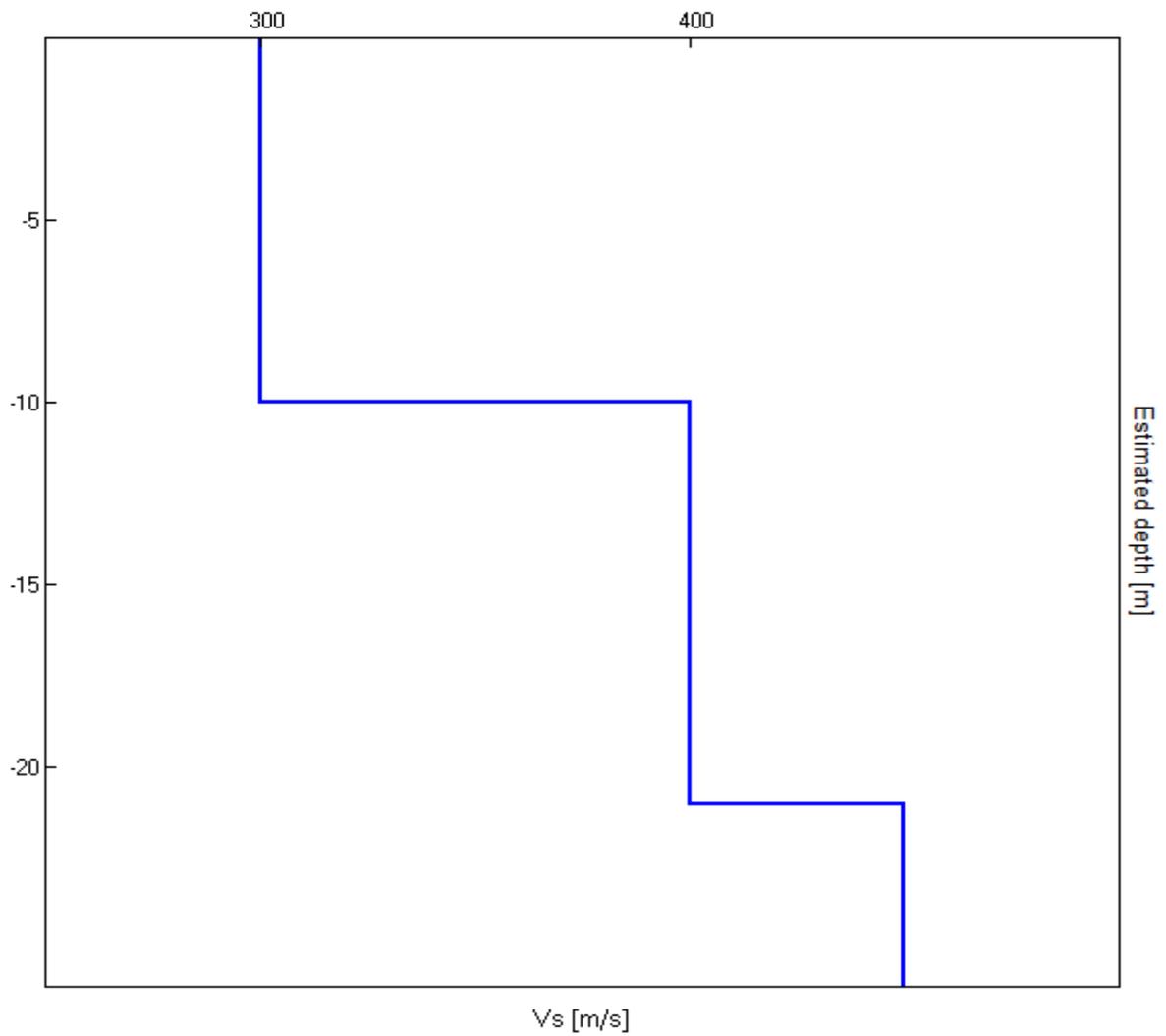
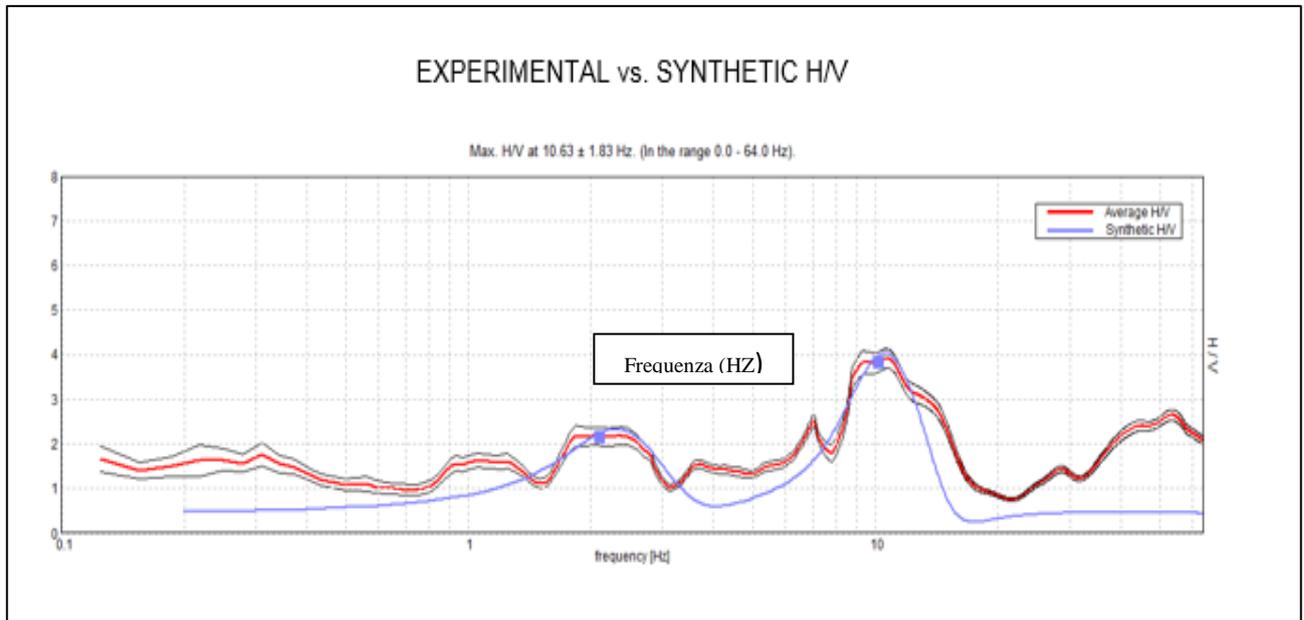


Figura 3.4: rapporto H/V



Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

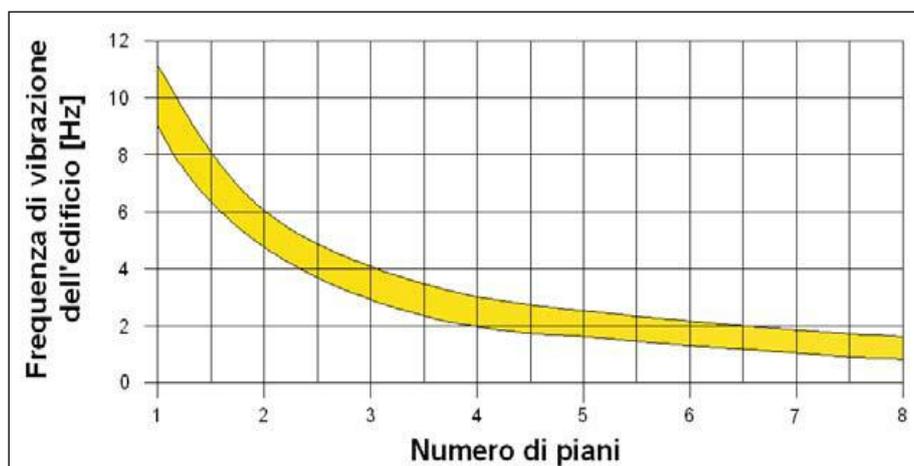


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	2,4 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 10.63 ± 1.83 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	10.63 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	16575.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 511 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^-) < A_0/2$	8.0 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^+) < A_0/2$	15.531 Hz	OK	
$A_0 > 2$	3.91 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.17217 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	1.82925 < 0.53125		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.2224 < 1.58	OK	

L_w	window length
N_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w N_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{HV}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{HV}(f)}$	standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**2,44 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Risultati finali

I profili di velocità, elaborati con le tre tecniche di indagine, hanno consentito di riconoscere, sulle verticali di restituzione delle informazioni sismostratigrafiche, orizzonti con caratteristiche elastiche e velocità delle onde S variabili entro i primi 30 m di sottosuolo. Tutte le indagini hanno evidenziato un incremento delle velocità con la profondità, significativo di volumi di materiale con elevato grado di addensamento e/o maturazione. Non è stato intercettato il bedrock sismico entro i primi 30 m di profondità. In sintesi:

	BEDROCK SISMICO	
	NO	SI
COPERTURA	Sciolta (ghiaie in matrice limosa)	
SPESSORE	18/20 m (spessore certo registrato)	
PARAMETRO Vs da MASW PARAMETRO Vs da ReMi	Vs 30 = 354 m/s	
FREQUENZA del TERRENO	2,44 Hz	

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria C**

Suolo di tipo C

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT30 < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu30 < 250$ kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ($\pm 10\%$), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.

Pieve di Soligo, 28/10/2014

il Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA

dott. geol. GINO LUCCHETTA via Rivette, 9/2 Pieve di Soligo (TV)

tel./fax 0438.842312

Relazione
Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSR

per definizione profilo verticale Vs e parametro Vs30

MDP_SMC57

MARENO DI PIAVE (TV)

Vicolo Cansiglio

Coordinate WGS84

Lat. N 45.86332438 Long. E 12.33920858

Coordinate ED50

Lat. N 45.86508 Long. E 12.340038



i geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor - Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$).

2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche

che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi) , dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai,1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

5. Strumentazione impiegata

Hardware

L'acquisizione dati per l'elaborazione MASW, ReMi e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

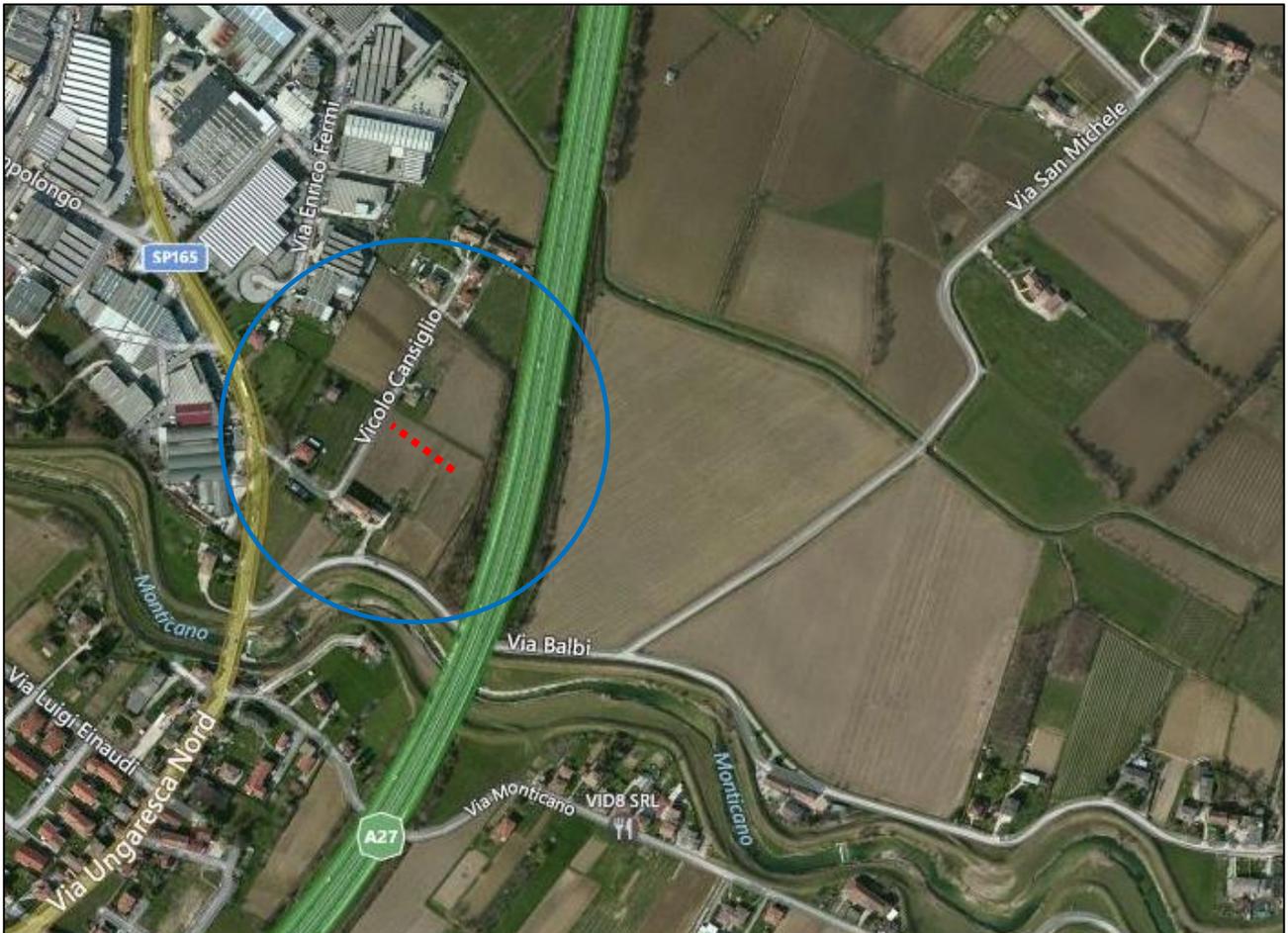
E' stato utilizzato un sismografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

Sito Stendimento Sismico St

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St' (.....) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMi (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

Dati sperimentali (St)

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di campioni temporali..... 2048
Passo temporale di acquisizione.....0.6 ms
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

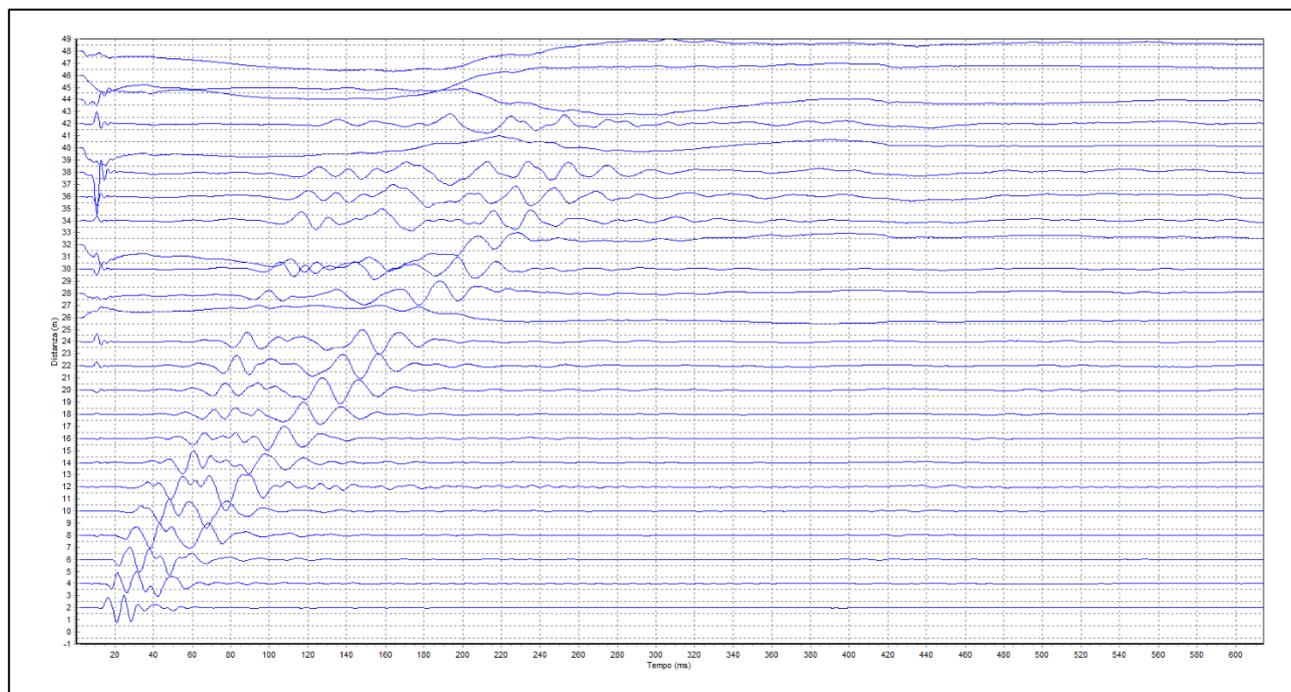


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

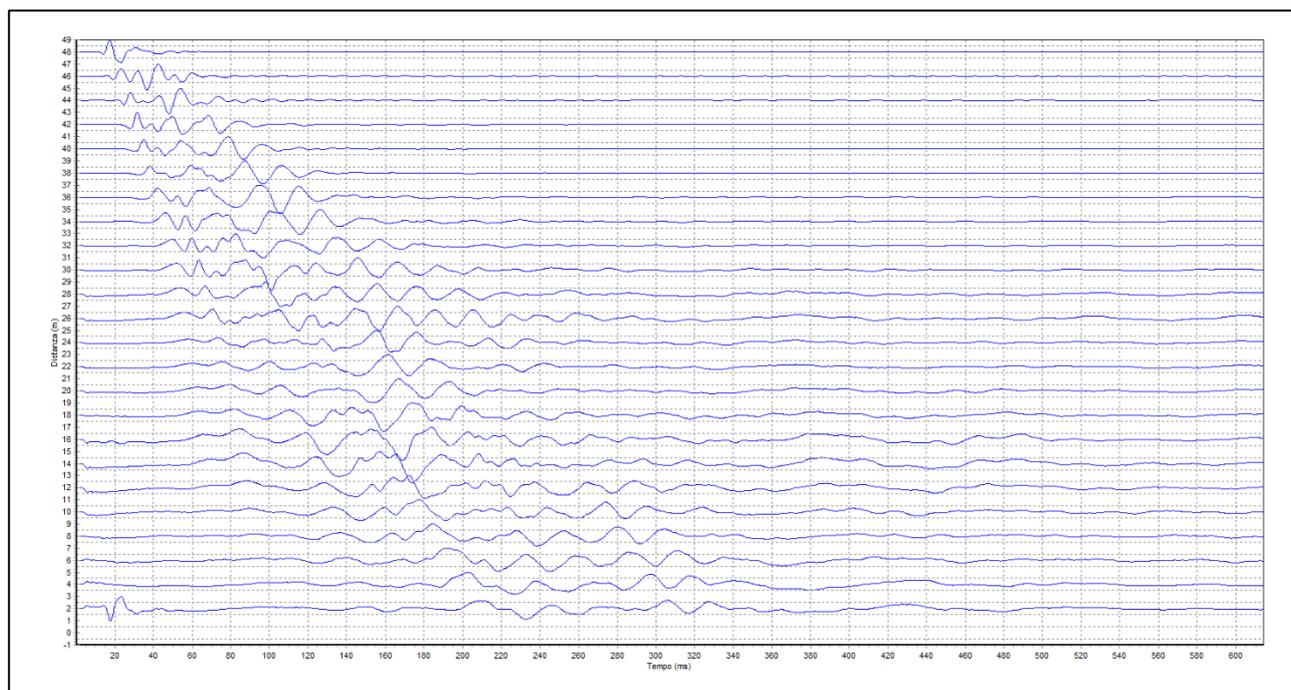


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

Sismica a rifrazione

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ($V_1 < V_2 < V_3$), così come nel caso in esame.

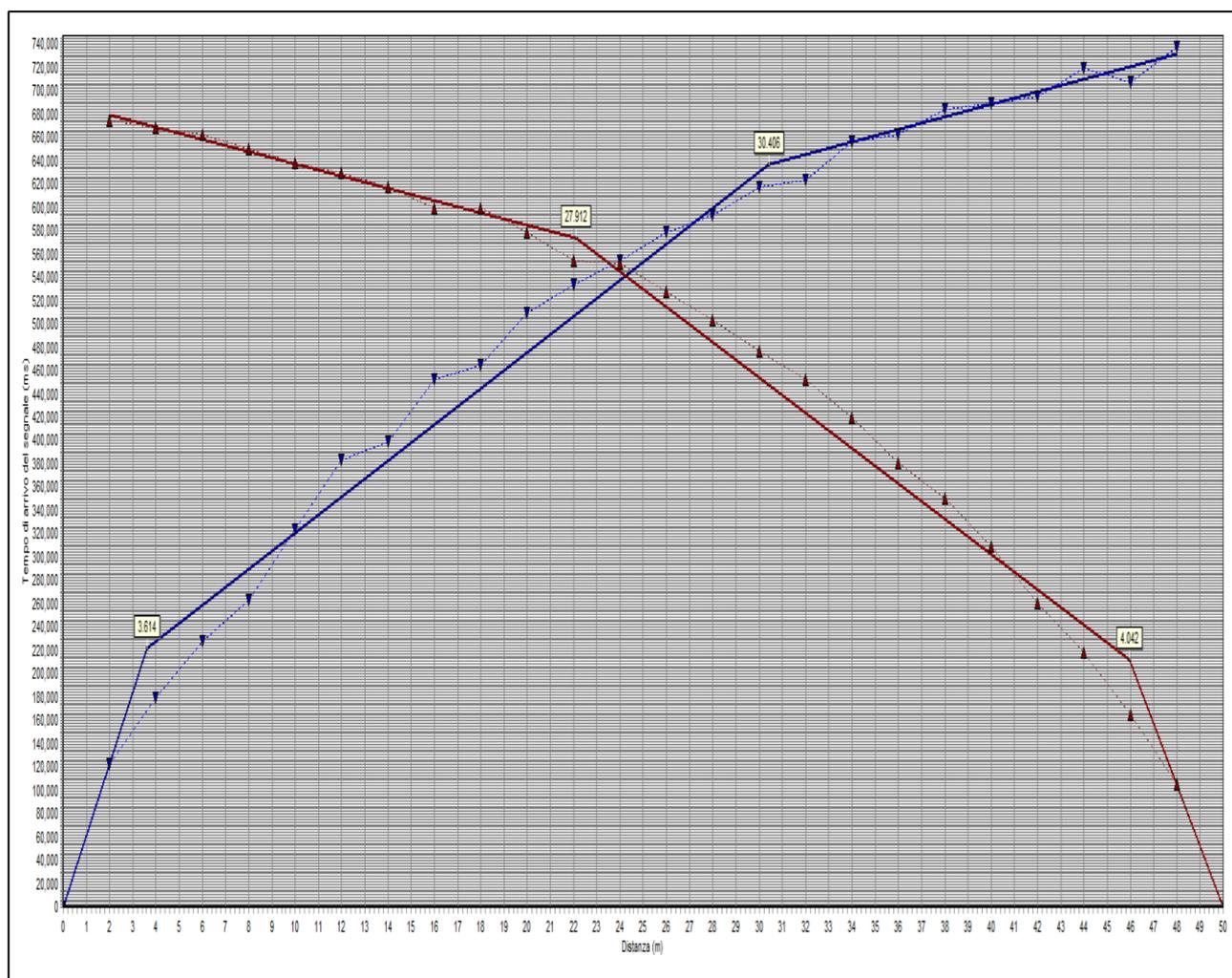


Figura 1.3: gráfico geral curva distância-tempo

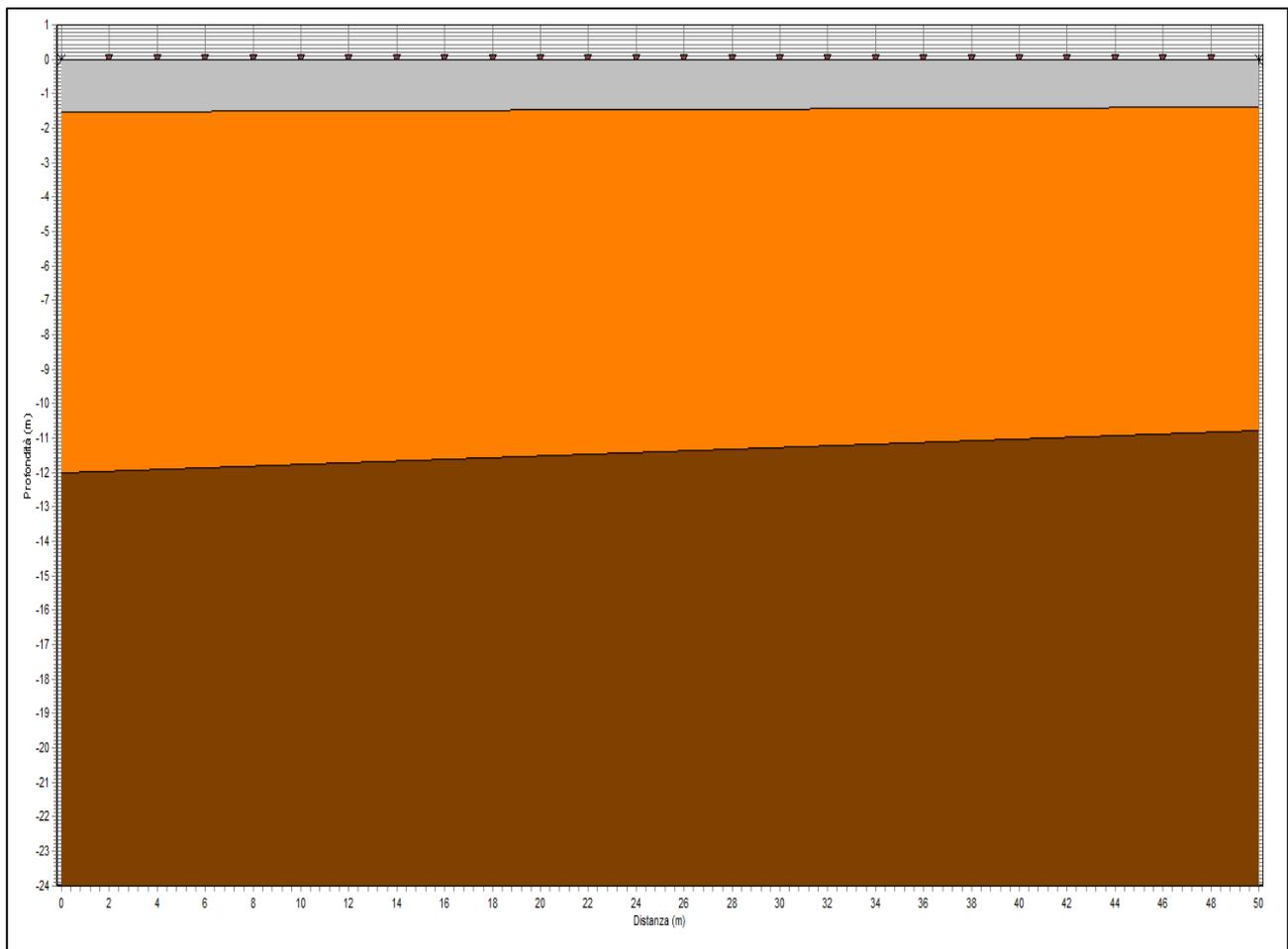


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

Strato n.	Vp (m/s)	Hs(m)	Hd(m)	rd	ri
1	206	1.525	1.384	1	1
2	492	12.003	10.778	0.982	0.984
3	632			0.948	0.99

LEGENDA:
Hs = spessore strato lato sinistro;
Hd = spessore strato lato destro;
Vp = velocità delle onde P.
Vs = velocità delle onde S.
rd = coefficiente correlazione tiro diretto
ri = coefficiente correlazione tiro inverso

La sezione sismostratigrafica è stata interpretata con attendibilità fino a circa 18 m di profondità, in coerenza con gli altri tipi di analisi descritte in seguito; in realtà la profondità indagata arriva a circa 25-30 m.

Conclusioni (rifrazione)

L'indagine ha evidenziato 3 sismostrati coi rispettivi valori: il primo sismostrato di 1,5 m con Vp 206 m/s, il secondo sismostrato di circa 12 m con Vp di 492 m/s e il terzo con Vp di circa 632 m/s.

Analisi MASW

Frequenza minima12Hz

Frequenza massima50Hz

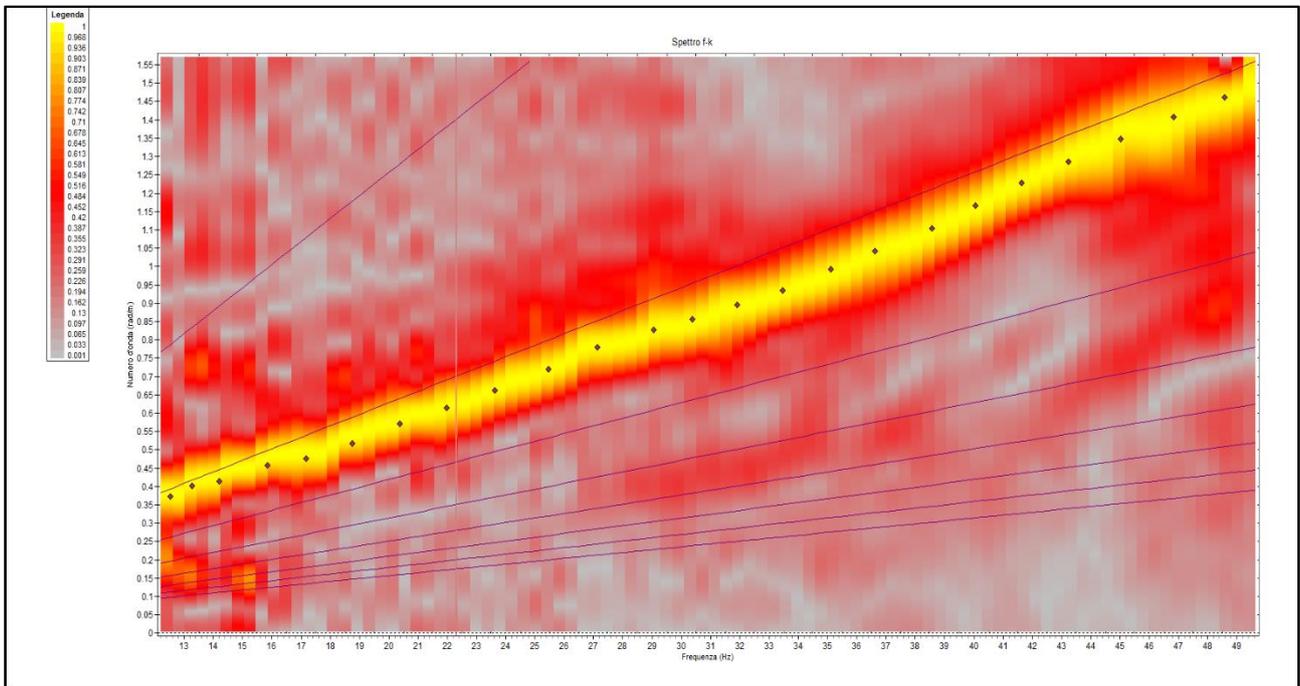


Figura 1.5: Spettro f – k

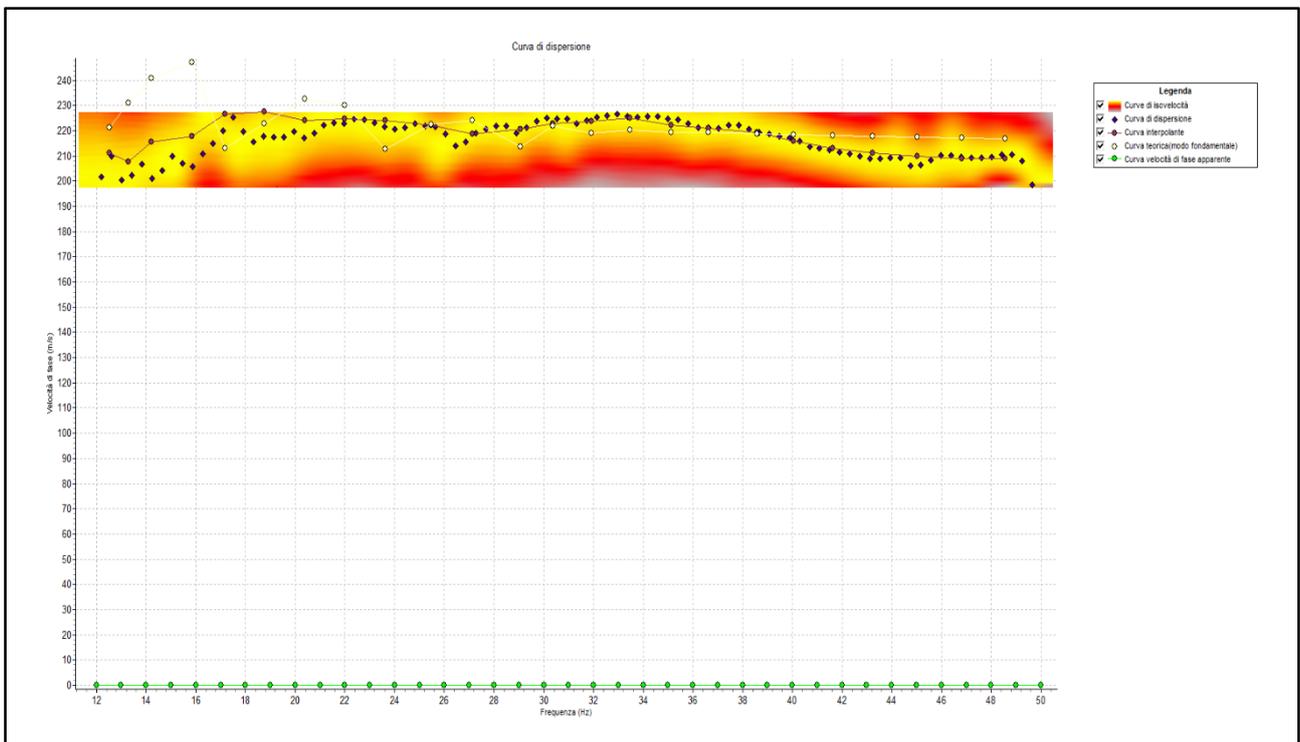


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale mediando i livelli con valori di Vs simili.

Numero di strati (escluso semispazio).....	4
Spaziatura ricevitori [m].....	2 m
Numero ricevitori	24

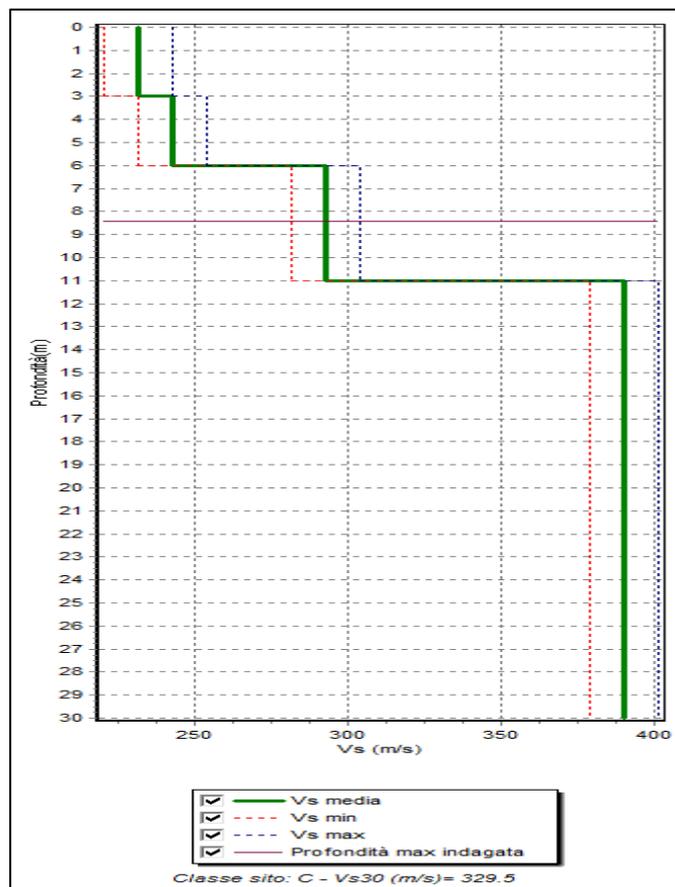


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

Conclusioni (MASW)

L'indagine ha fornito dati affidabili MASW sino ad una profondità di circa 10-12 m; abbiamo circa 6 m di terreni soffici, con Vs inferiore a 250 m/s; fino a 11 m Vs di circa 290 m/s e oltre Vs fino a 390 m/s.

Analisi ReMi

Numero di ricevitori 24
Distanza tra i sensori: 2 m
Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

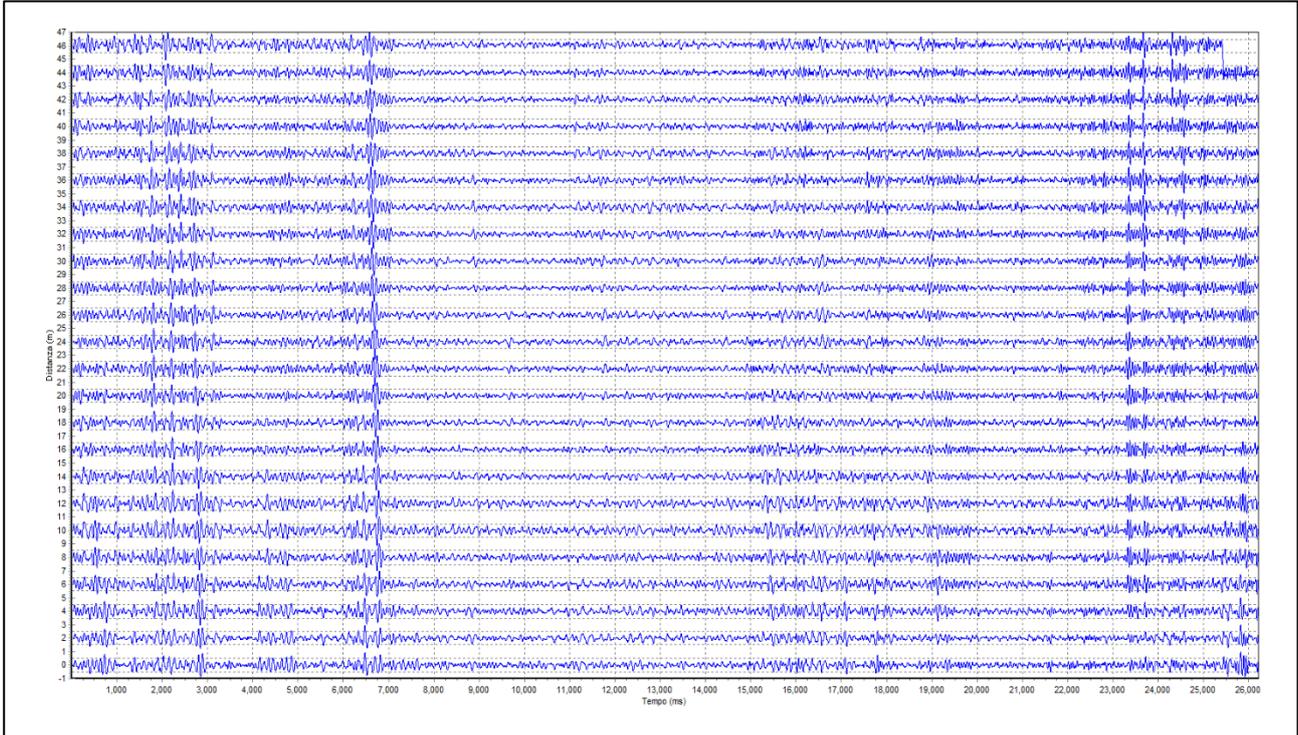


Figura 2.1: Tracce sperimentali

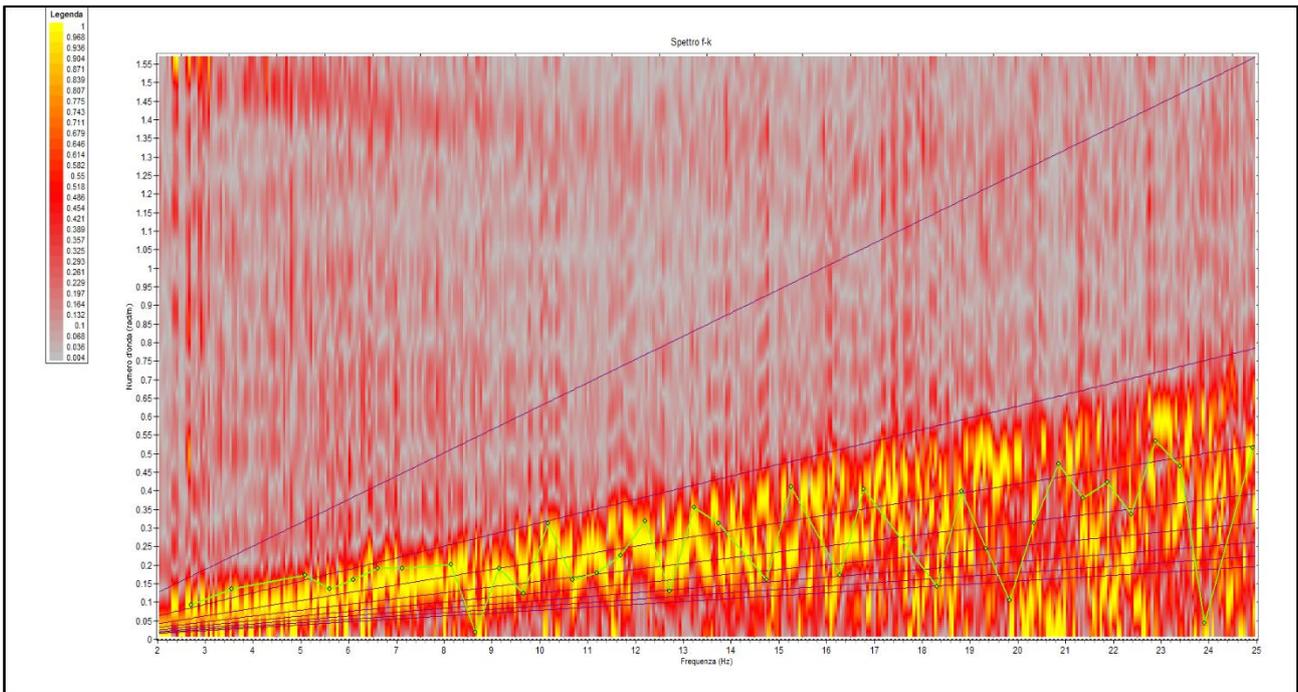


Figura 2.2: Spettro f - k

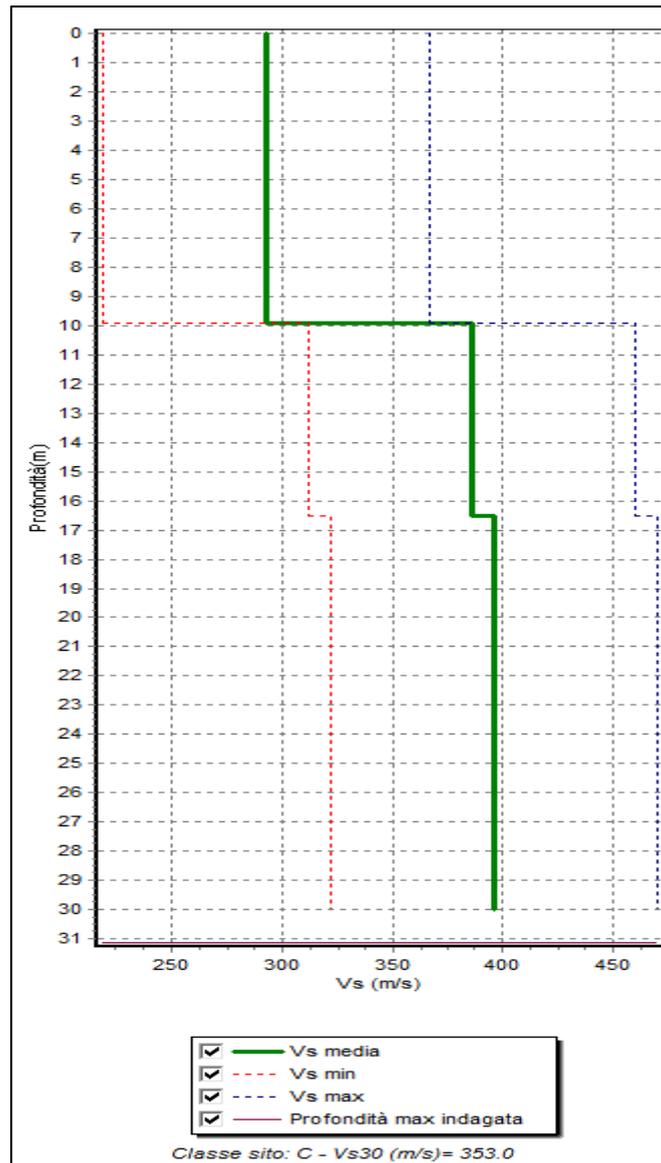


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

Conclusioni (ReMi)

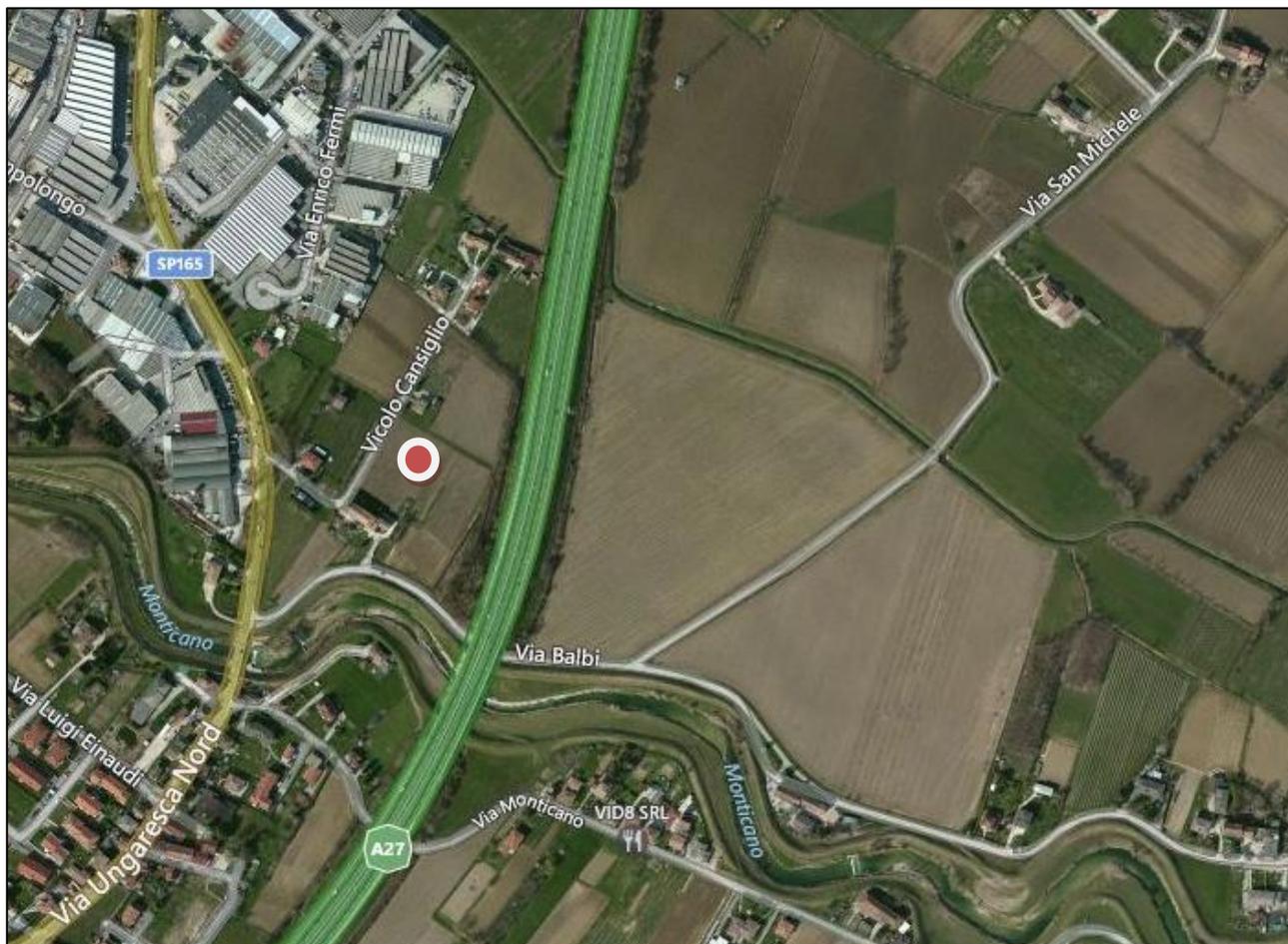
Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati, si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini fino a profondità dell'ordine dei 30 m.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

Profondità (m)	Vs (m/s)	Considerazioni
0 – 10 m	290	Argilloso sabbioso limose
11 – 30 m	400	Ghiaie argilloso- sabbiose

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV (●) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

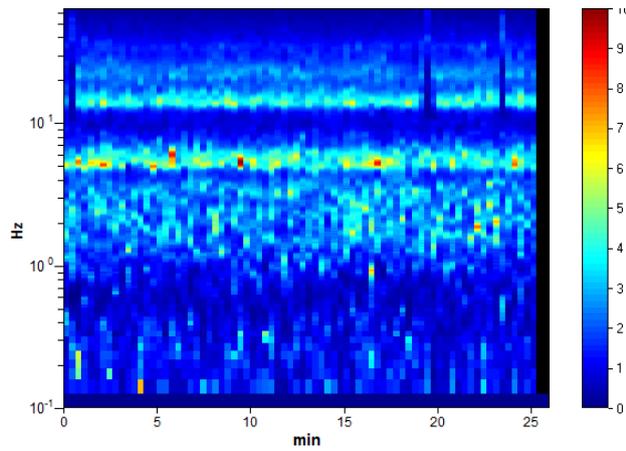


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

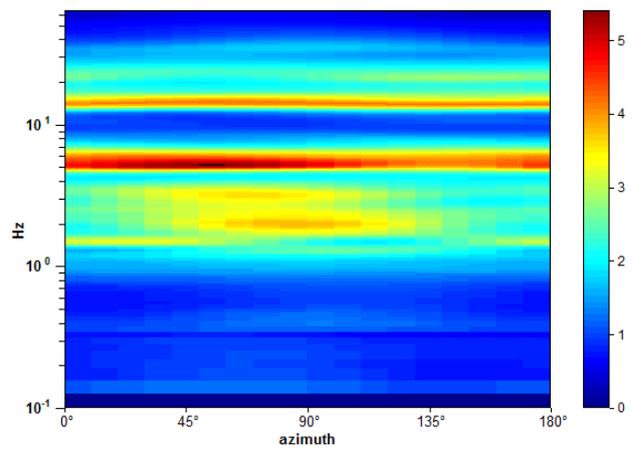


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

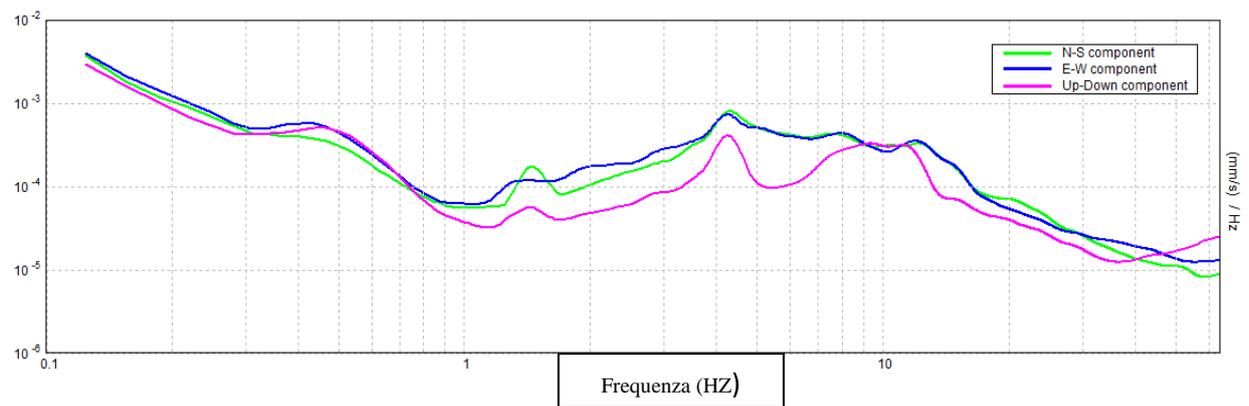


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

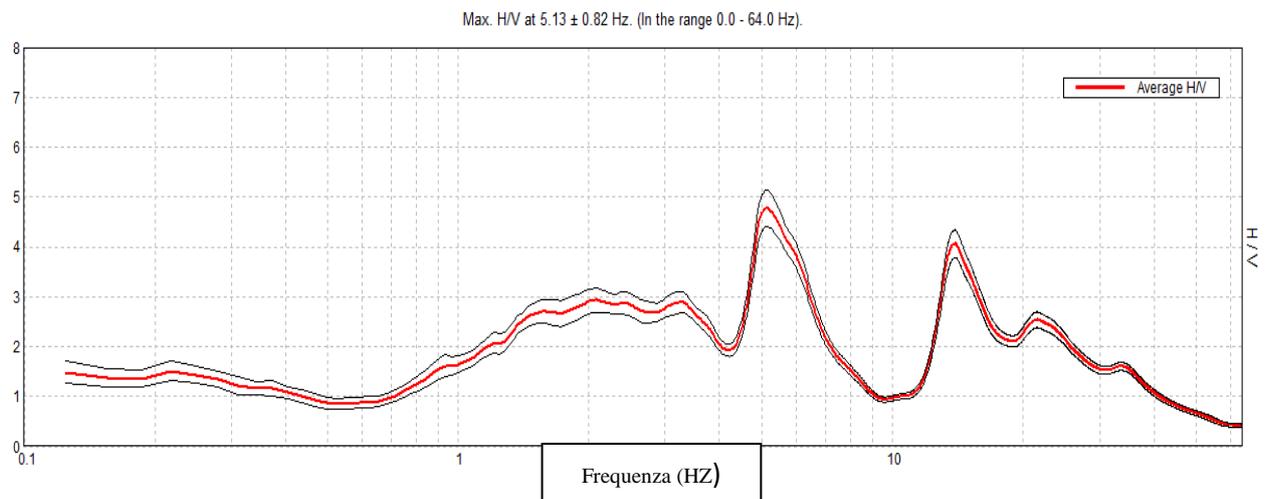
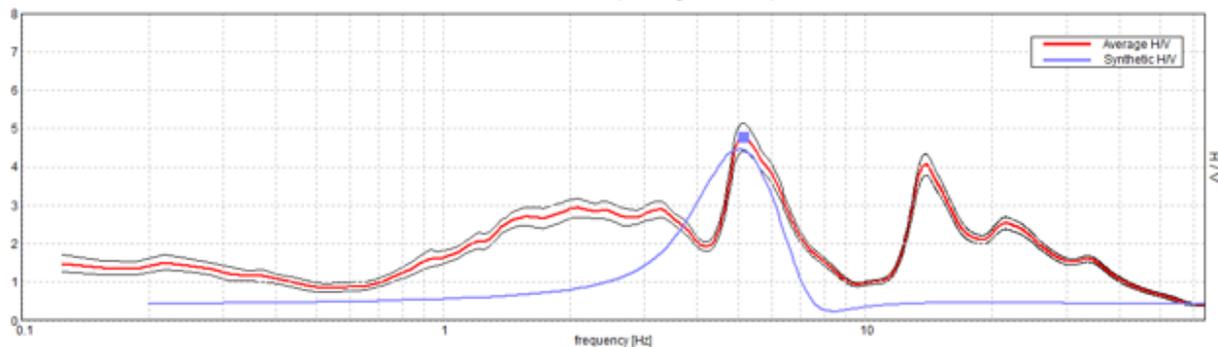


Figura 3.4: rapporto H/V

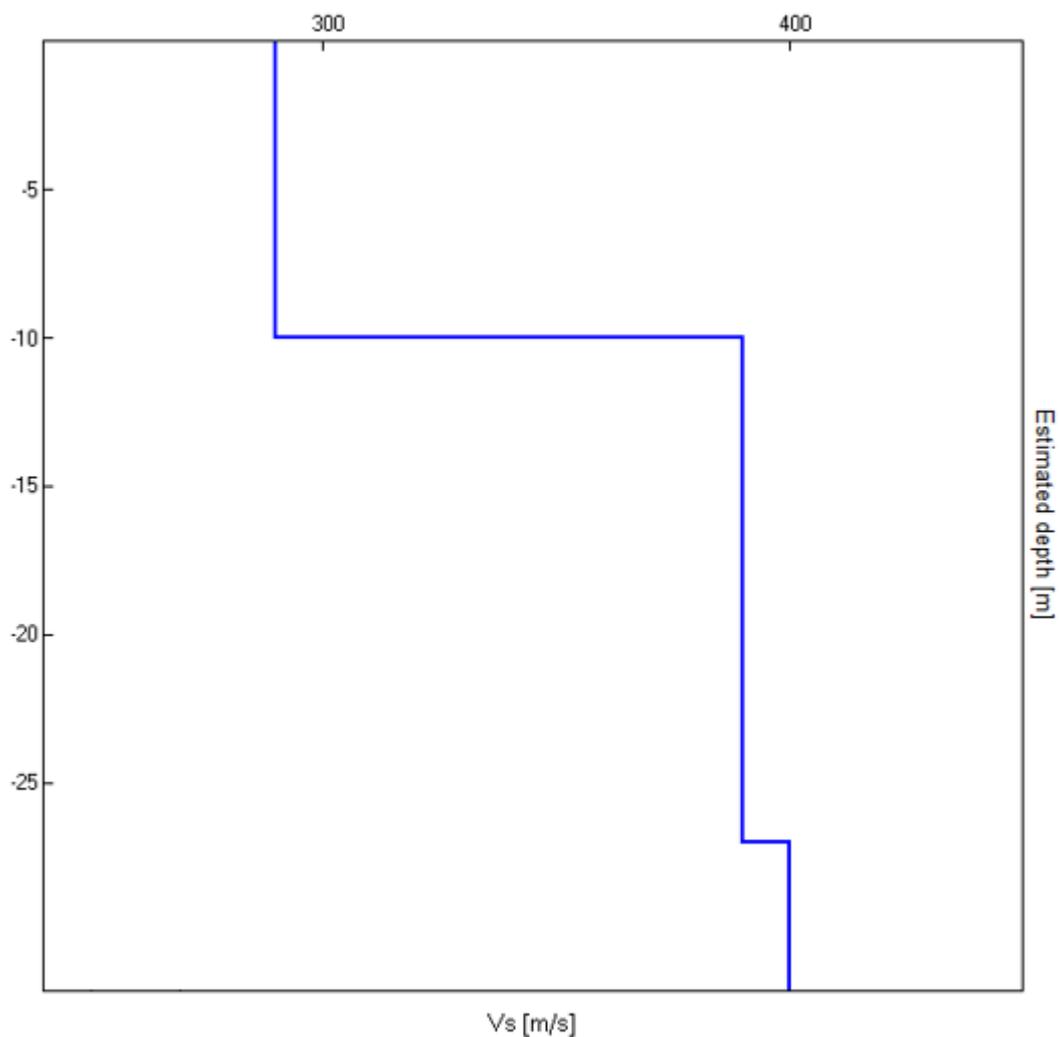
EXPERIMENTAL vs. SYNTHETIC HV

Max. HV at 5.13 ± 0.82 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz)



Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Poisson ratio
10.00	10.00	290	0.42
27.00	17.00	390	0.42
inf.	inf.	400	0.42

Vs(0.0-30.0)=351m/s



Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

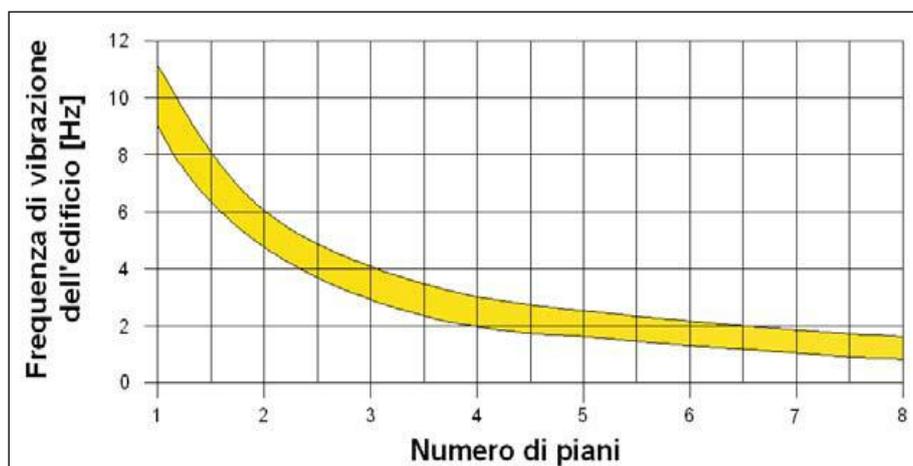


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	5,13 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 5.13 ± 0.82 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	5.13 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	7995.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 247 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	4.5 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$	6.875 Hz	OK	
$A_0 > 2$	4.78 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.16028 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.82143 < 0.25625$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3657 < 1.58$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{HV}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log HV}(f)$	standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log HV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartarla o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**5,13 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Risultati finali

I profili di velocità, elaborati con le tre tecniche di indagine, hanno consentito di riconoscere, sulle verticali di restituzione delle informazioni sismostratigrafiche, orizzonti con caratteristiche elastiche e velocità delle onde S variabili entro i primi 30 m di sottosuolo. Tutte le indagini hanno evidenziato un incremento delle velocità con la profondità, significativo di volumi di materiale con elevato grado di addensamento e/o maturazione. Non è stato intercettato il bedrock sismico entro i primi 30 m di profondità. In sintesi:

	BEDROCK SISMICO	
	NO	SI
COPERTURA	Sciolta (ghiaie in matrice limosa)	
SPESSORE	15/18 m (spessore certo registrato)	
PARAMETRO Vs da MASW PARAMETRO Vs da ReMi	Vs 30 = 353 m/s	
FREQUENZA del TERRENO	5,13 Hz	

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria C**

Suolo di tipo C

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT30 < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu30 < 250$ kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ($\pm 10\%$), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.

Pieve di Soligo, 28/10/2014

il Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Simone Bortolini

Relazione

Indagine sismica passiva HVSr

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

MDP_HVSR 58

MARENO DI PIAVE (TV)

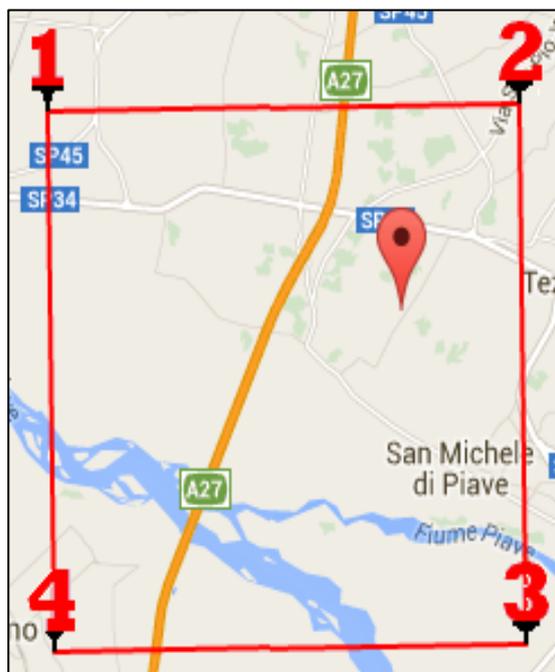
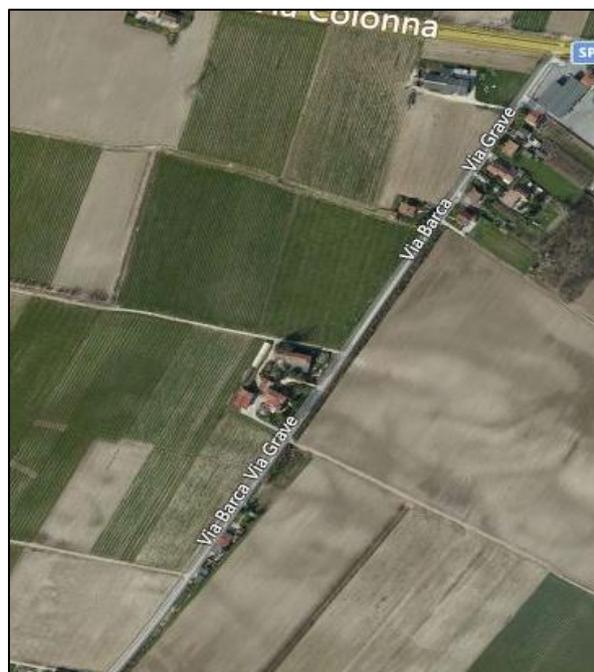
Via Barca

Coordinate WGS84

Lat. N 45.81162037 Long. E 12.32717157

Coordinate ED50

Lat. N 45.813376 Long. E 12.328



i Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Bortolini Simone

TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios”) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Hardware

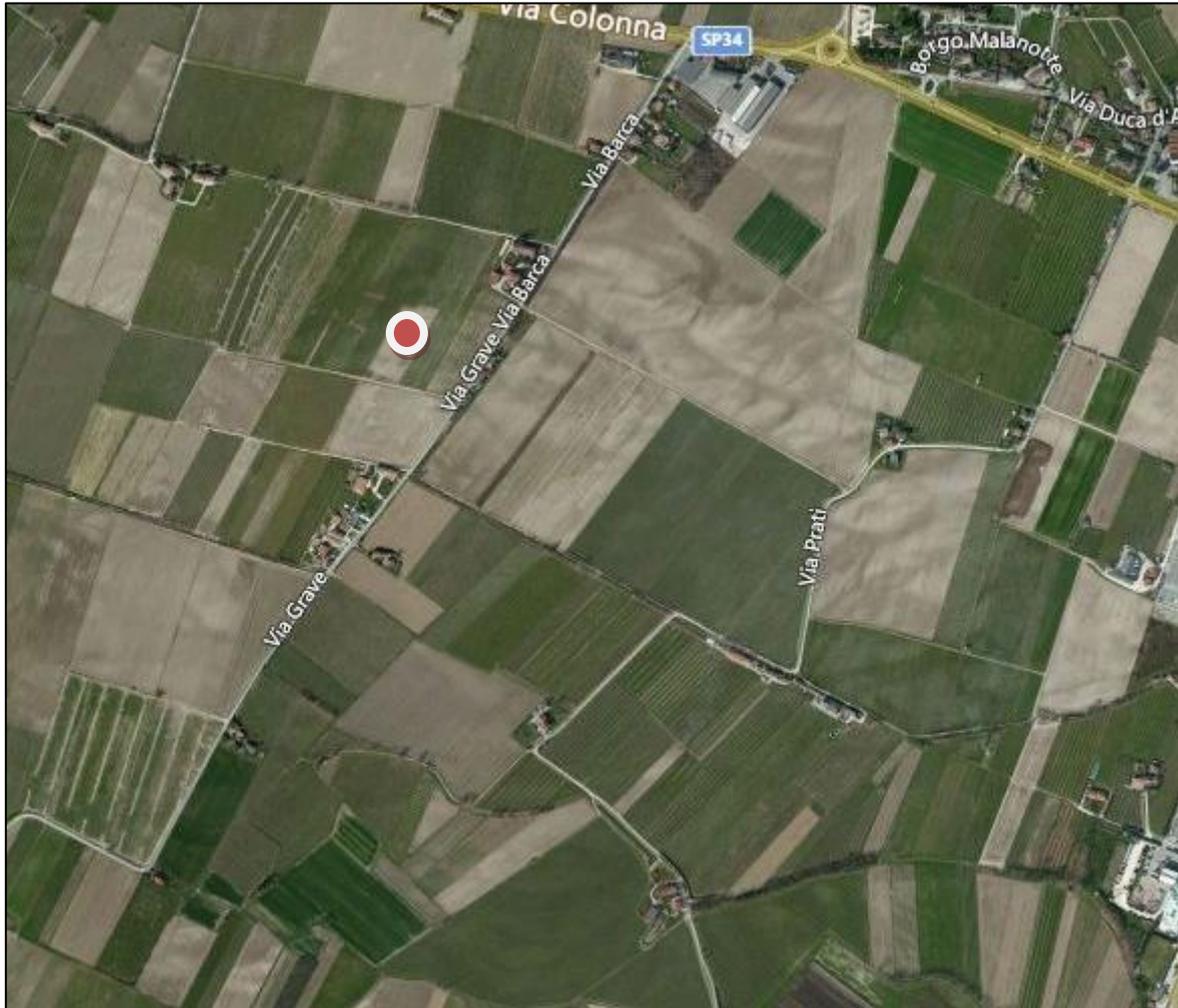
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

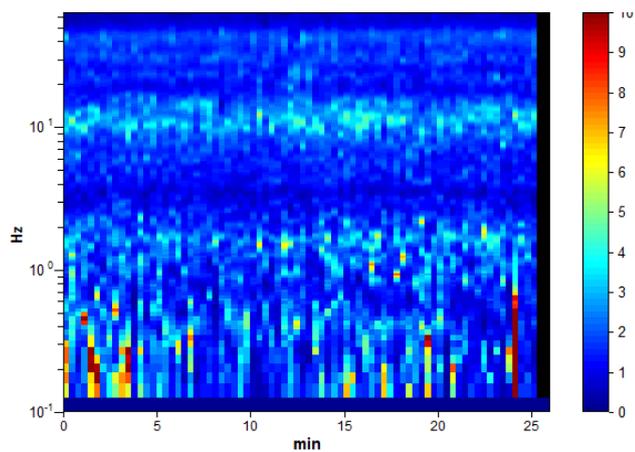


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

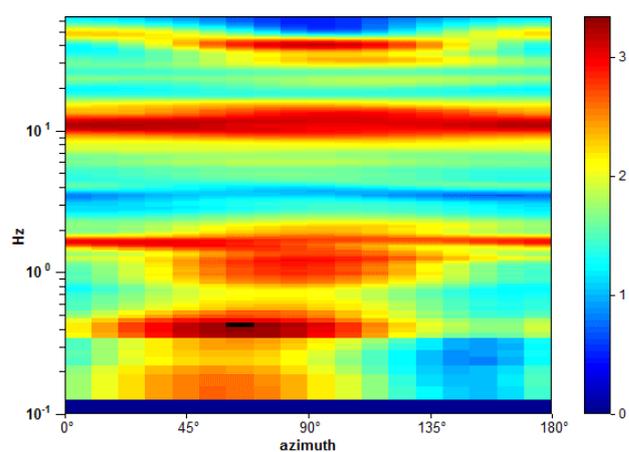


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

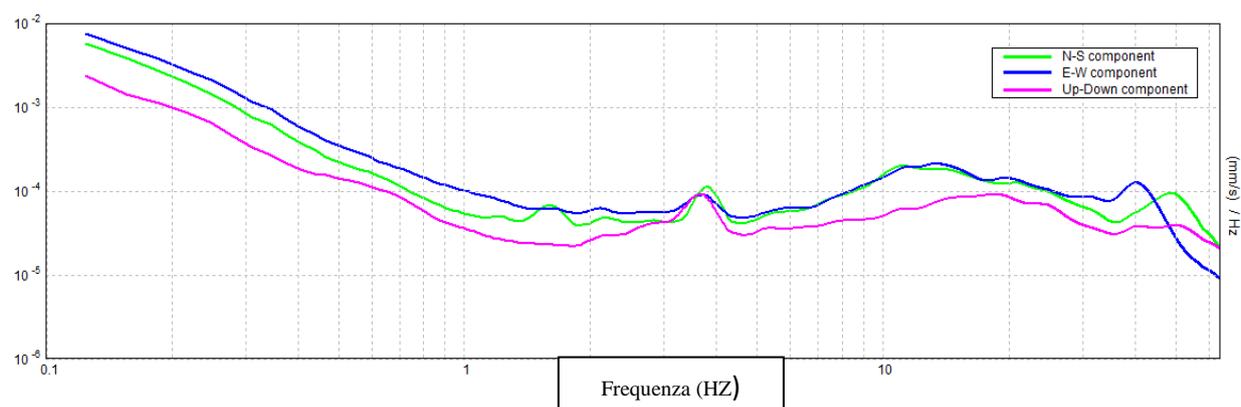


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

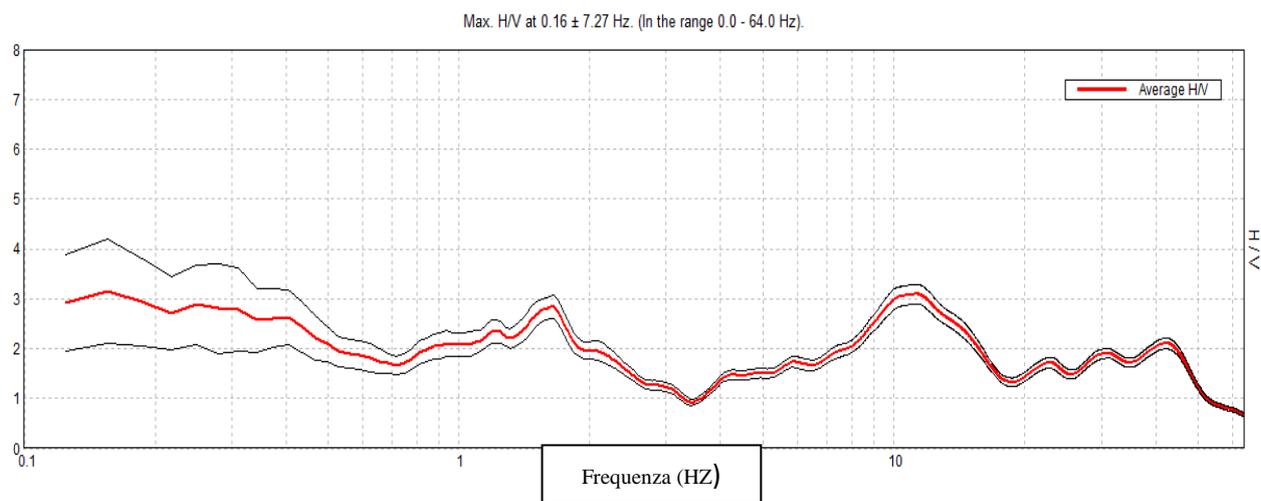


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda / 4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

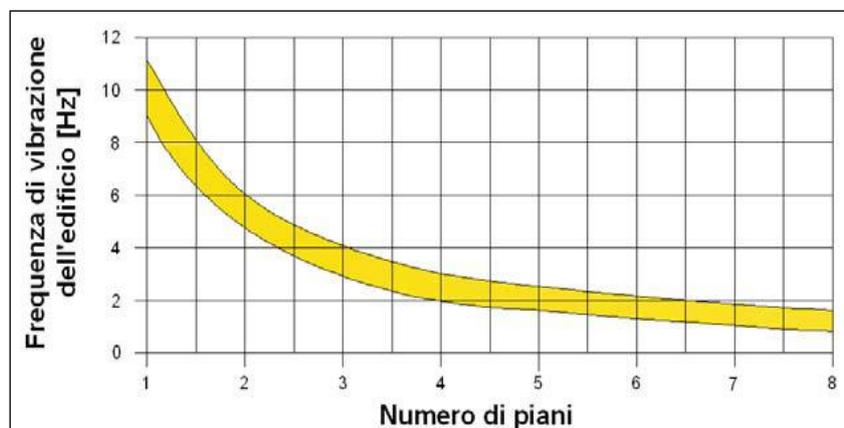


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,7 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 0.16 ± 7.27 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	0.16 > 0.50		NO
$n_c(f_0) > 200$	243.8 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 8 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.094 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	3.15 > 2	OK	
$f_{\text{peak}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	46.50959 < 0.05		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	7.26712 < 0.03906		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.052 < 3.0	OK	

L_w	window length
N_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w N_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,7 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Relazione

Indagine sismica passiva HVSR

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

MDP_HVSR 59

MARENO DI PIAVE (TV)

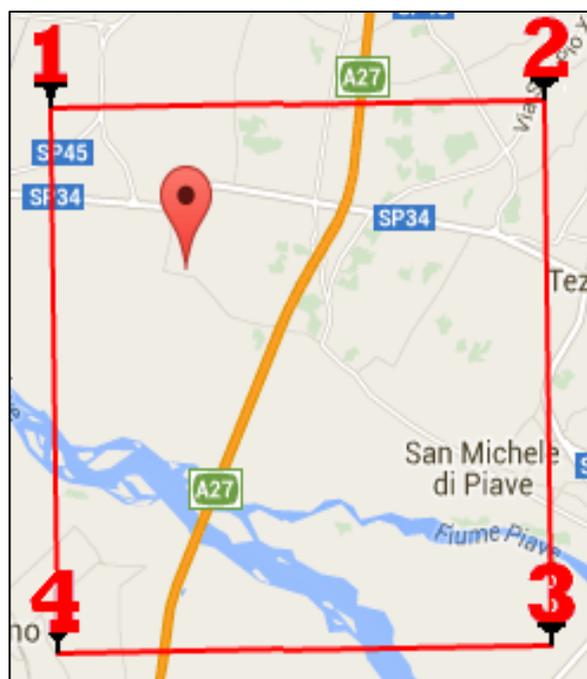
Via Grave

Coordinate WGS84

Lat. N 45,813116 Long. E 12,290674

Coordinate ED50

Lat. N 45,814014 Long. E 12,291668



i Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Bortolini Simone

TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios”) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Hardware

È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

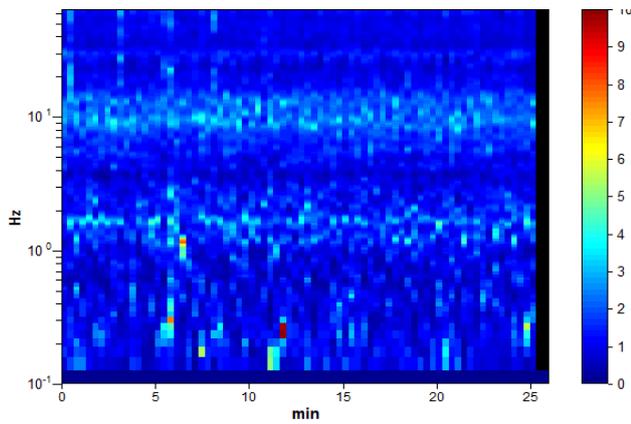


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

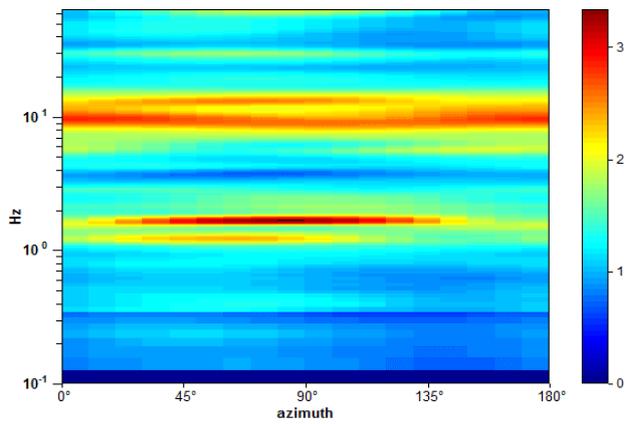


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

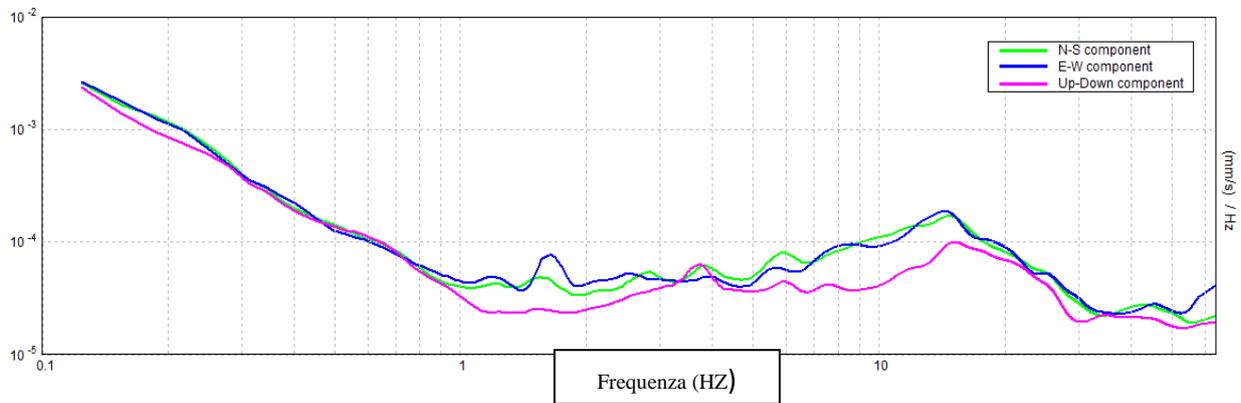


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

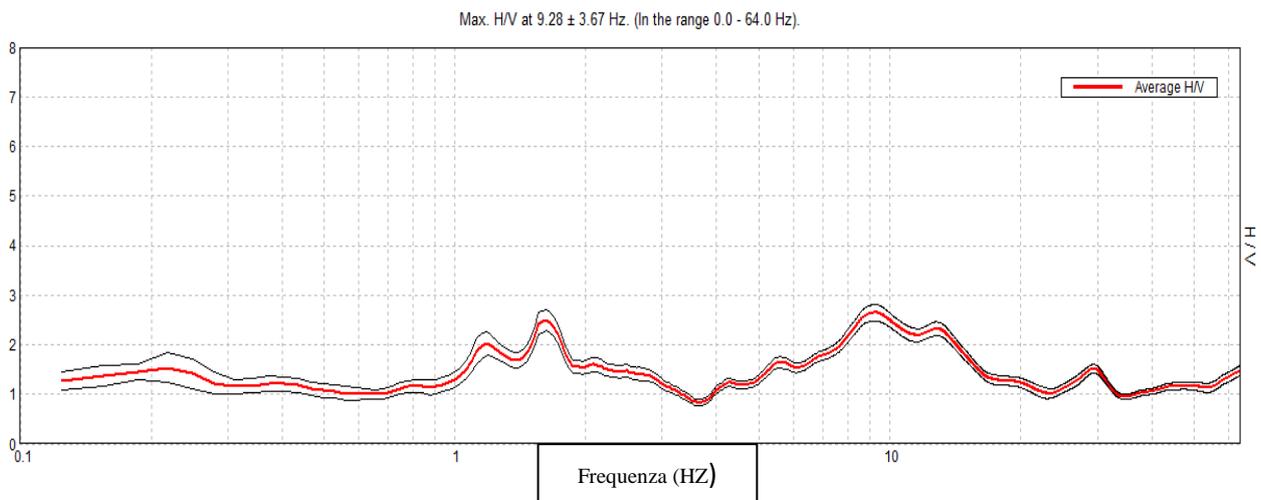


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

Freq. naturale edificio _ 10 Hz / numero piani

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

Freq. naturale edificio - Freq. fondamentale di risonanza del sito

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

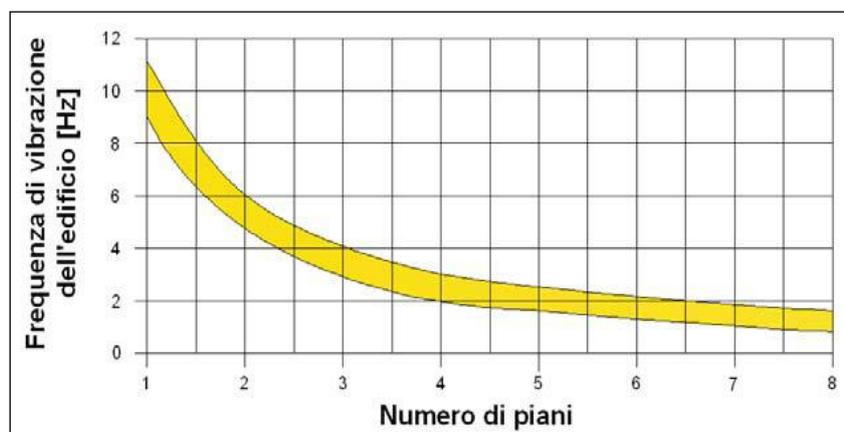


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,7 Hz e 9,2 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 9.28 ± 3.67 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	9.28 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	14478.8 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 446 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	5.0 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$	16.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.65 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.39588 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$3.67427 < 0.46406$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.1695 < 1.58$	OK	

L_w	window length
N_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w N_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{HV}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{HV}(f)}$	standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,7 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA

dott. geol. GINO LUCCHETTA via Rivette, 9/2 Pieve di Soligo (TV)

tel./fax 0438.842312

Relazione
Indagine sismica passiva HVSR

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

MDP_HVSR 60
MARENO DI PIAVE (TV)

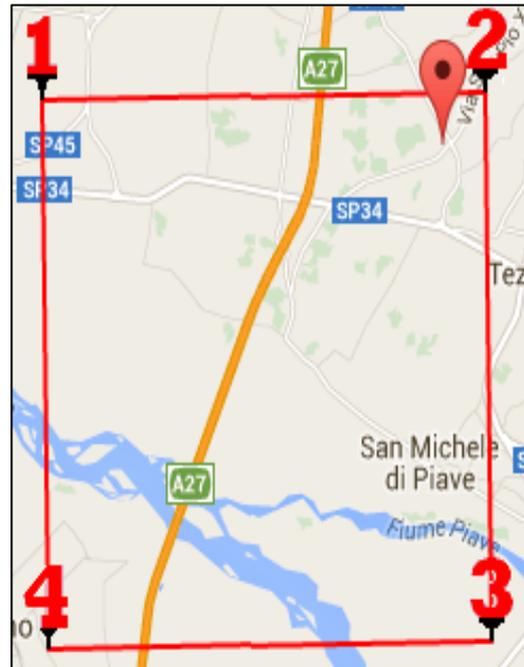
Via Mantese

Coordinate WGS84

Lat. N 45,823808 Long. E 12,335684

Coordinate ED50

Lat. N 45,824705 Long. E 12,336677



i Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Bortolini Simone

TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios”) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Hardware

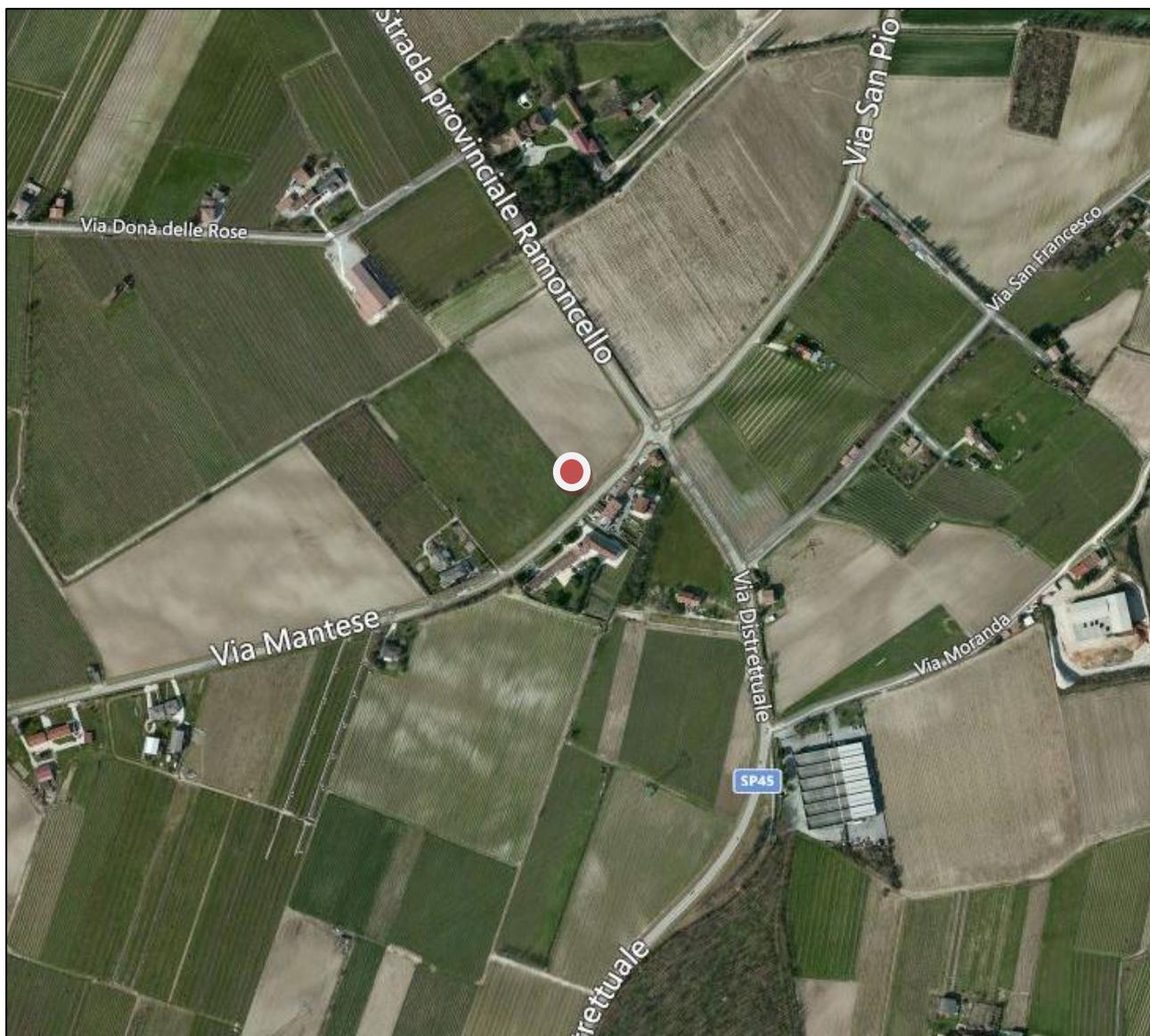
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

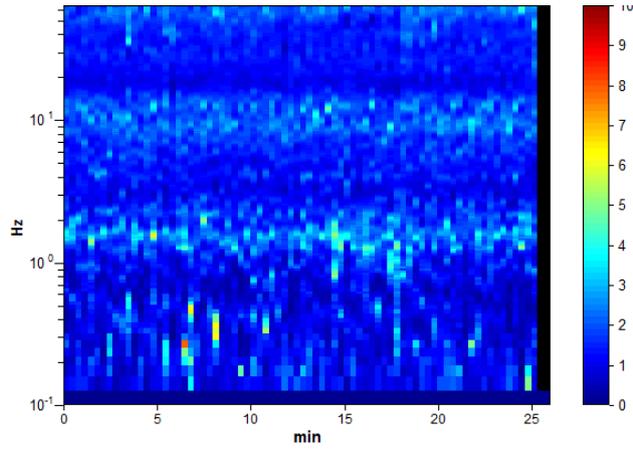


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

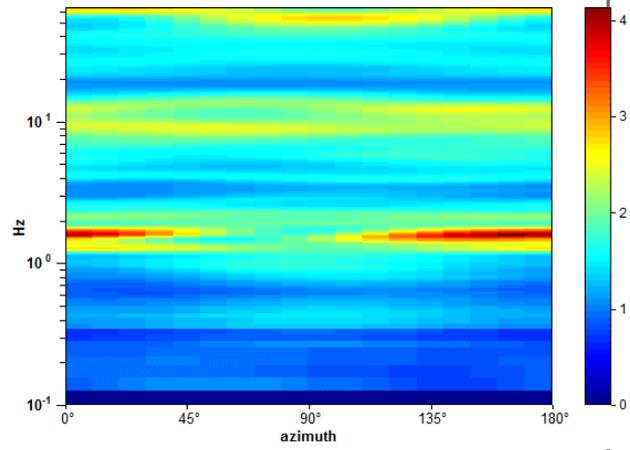


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

ale del rumore

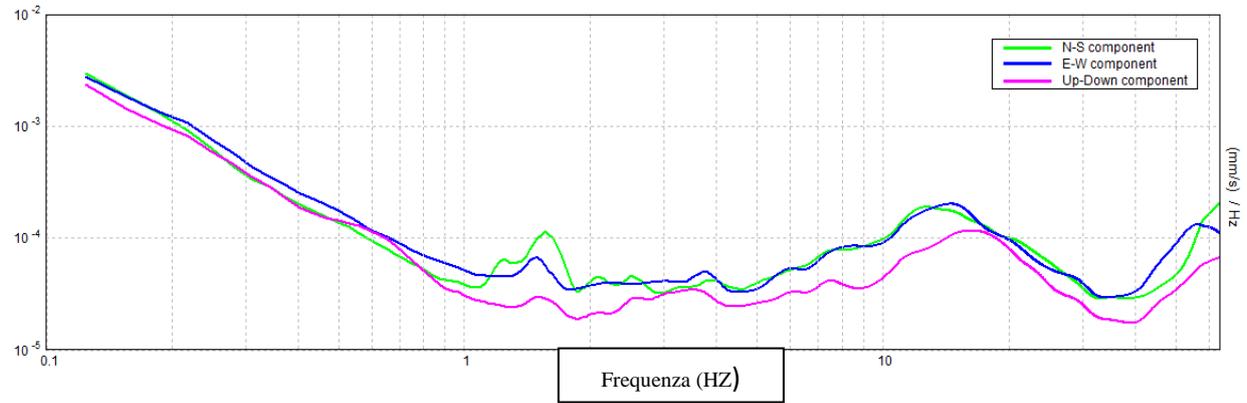


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

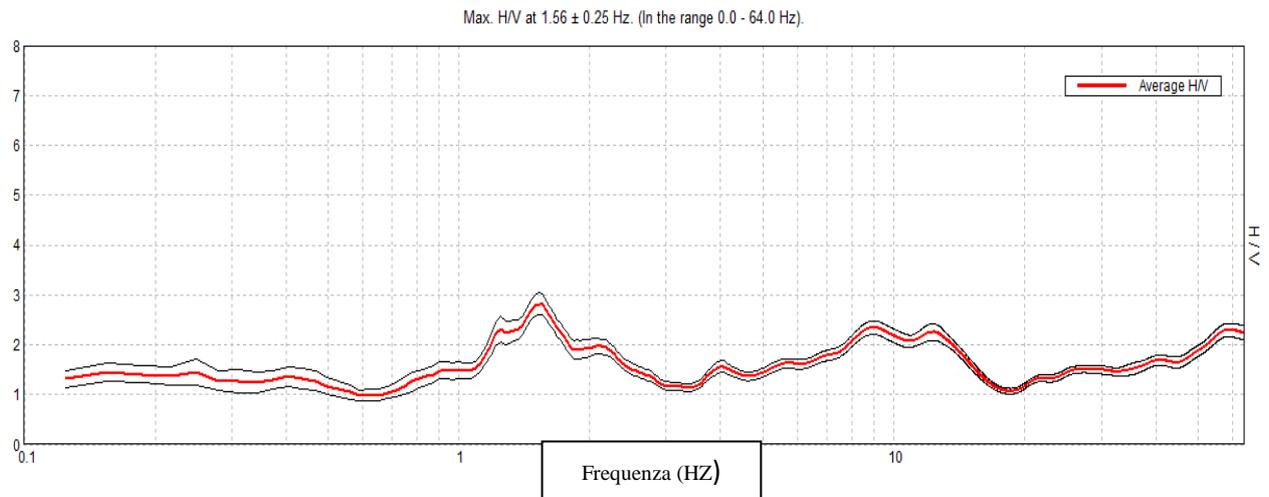


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

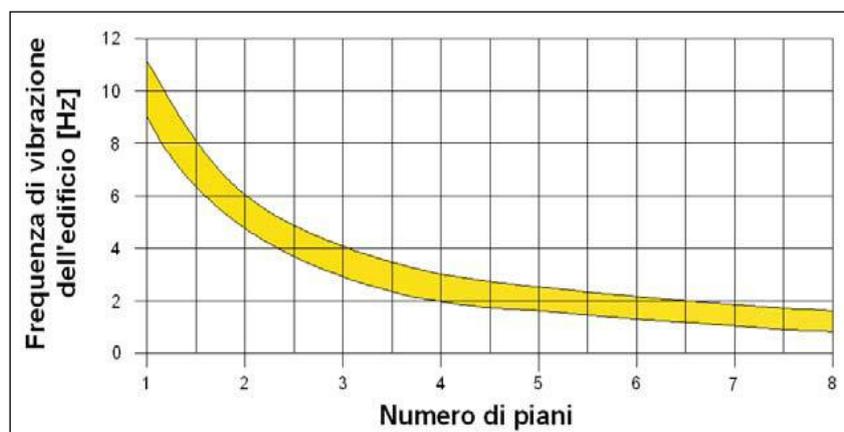


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,56 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 1.56 ± 0.25 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	1.56 > 0.50	OK	
$\Omega_c(f_0) > 200$	2437.5 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 76 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	0.875 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$	2.688 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.82 > 2	OK	
$f_{\text{peak}} [A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.16153 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.25239 < 0.15625$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2128 < 1.78$	OK	

L_w	window length
Ω_w	number of windows used in the analysis
$\Omega_c = L_w \Omega_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{HV}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log HV}(f)$	standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log HV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,56 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA

dott. geol. GINO LUCCHETTA via Rivette, 9/2 Pieve di Soligo (TV)

tel./fax 0438.842312

Relazione Indagine sismica passiva HVSr

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

MDP_HVSR 61 MARENO DI PIAVE (TV)

Via Castaldia

Coordinate WGS84

Lat. N 45,830225 Long. E 12,321049

Coordinate ED50

Lat. N 45,831122 Long. E 12,322042



i Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Bortolini Simone

TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios”) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Hardware

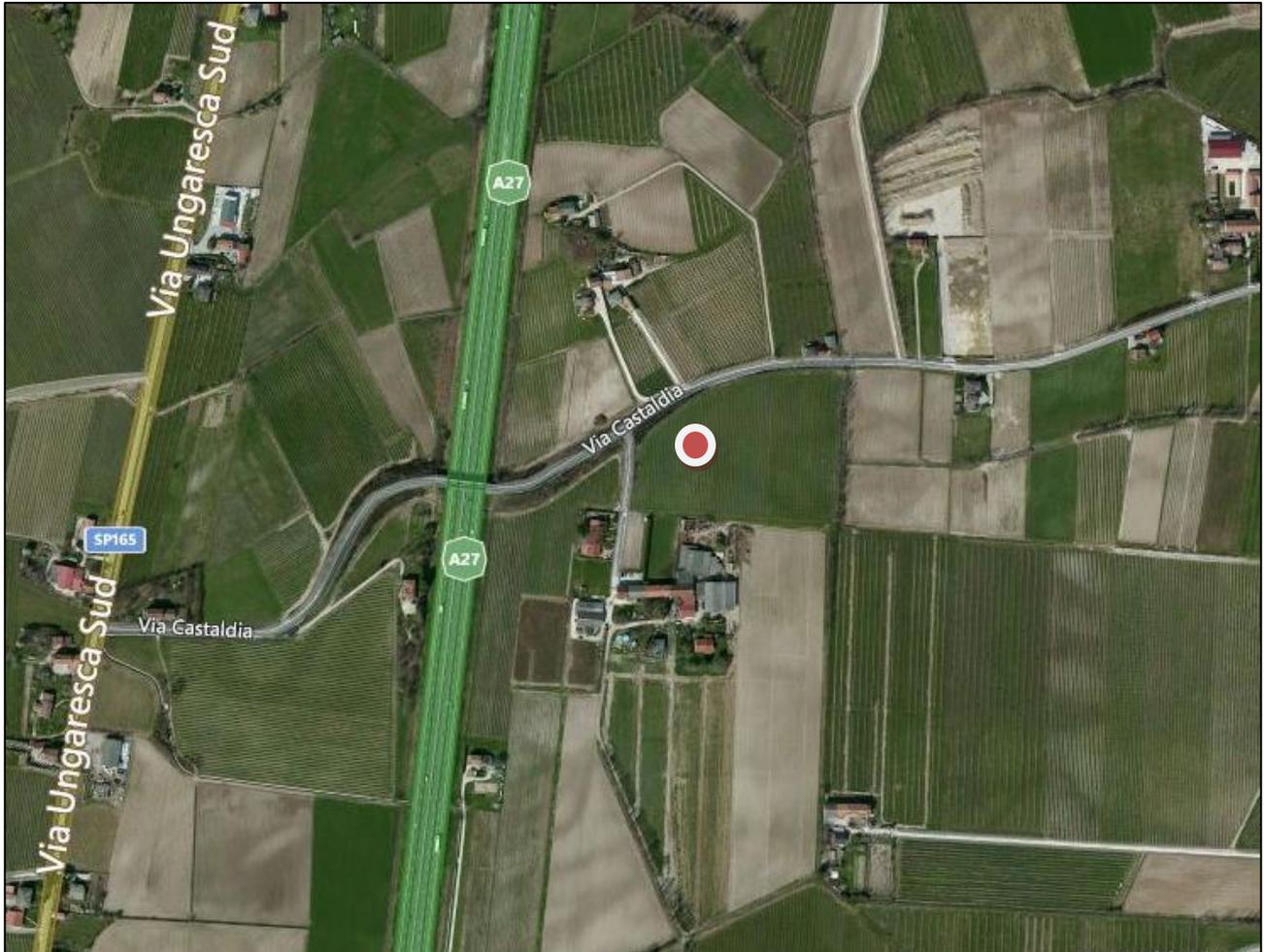
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

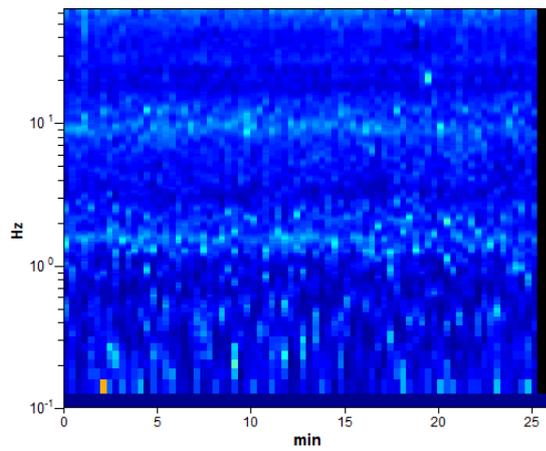


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

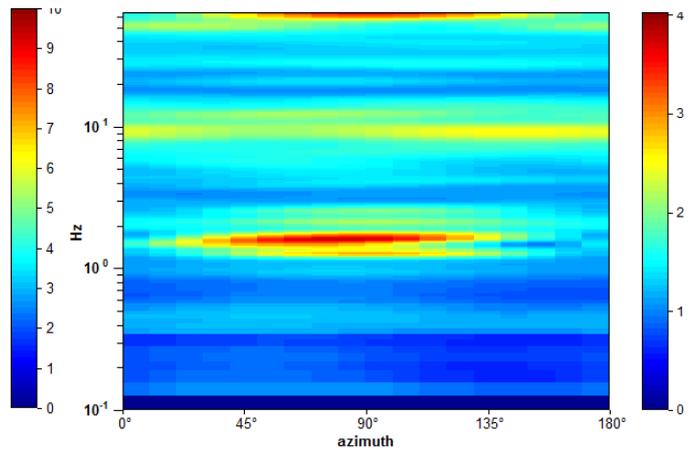


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

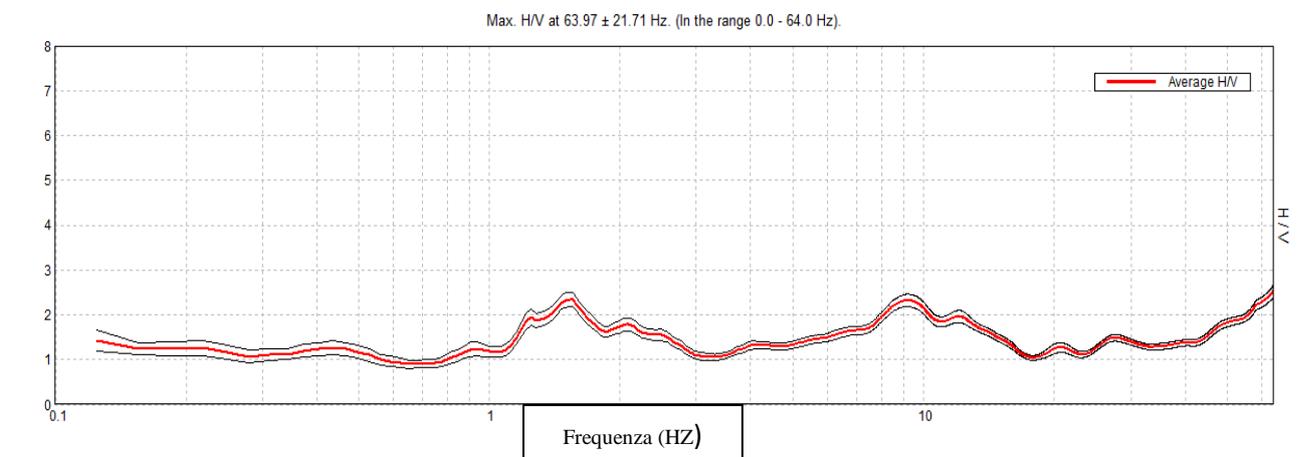
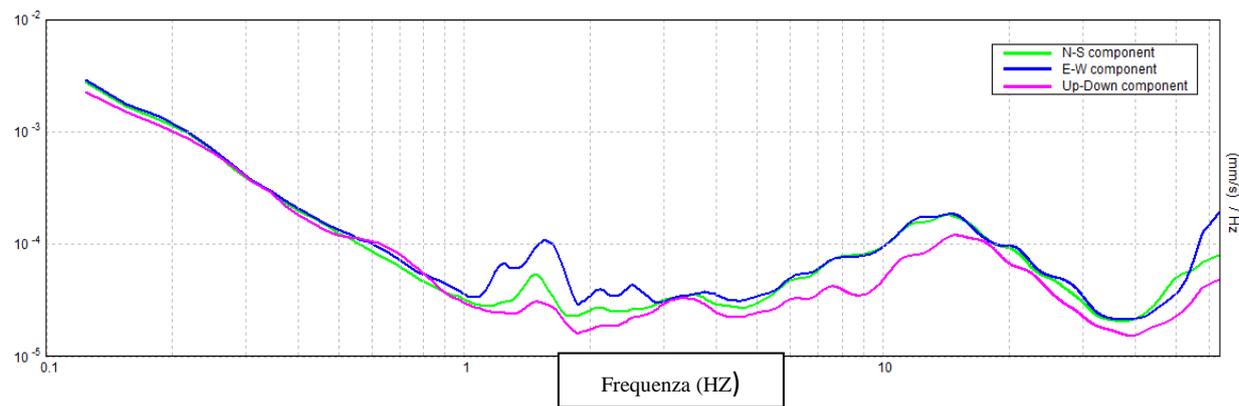


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

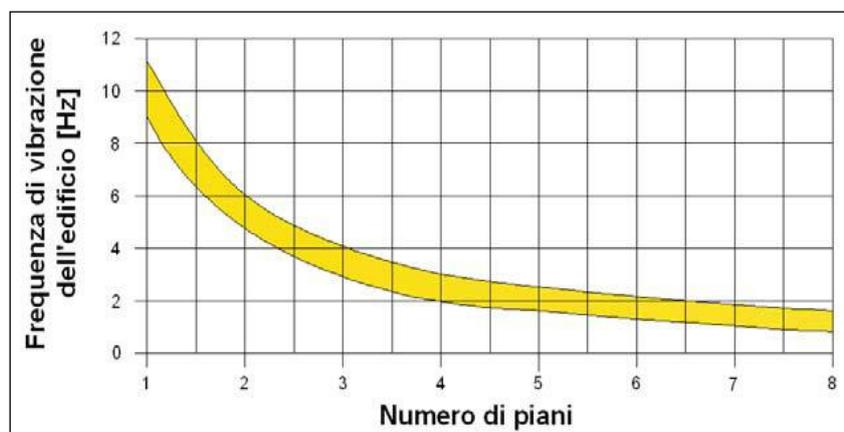


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,6 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 63.97 ± 21.71 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	63.97 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	99791.3 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 1026 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	25.063 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	2.54 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.33934 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	21.70727 < 3.19844		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.1352 < 1.58	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{HV}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{HV}}(f)$	standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{HV}}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,6 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA

dott. geol. GINO LUCCHETTA via Rivette, 9/2 Pieve di Soligo (TV)

tel./fax 0438.842312

Relazione Indagine sismica passiva HVSr

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

MDP_HVSR 62

MARENO DI PIAVE (TV)

Via Campana

Coordinate WGS84

Lat. N 45,835712 Long. E 12,305605

Coordinate ED50

Lat. N 45,836609 Long. E 12,306599



i Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Bortolini Simone

TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios”) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Hardware

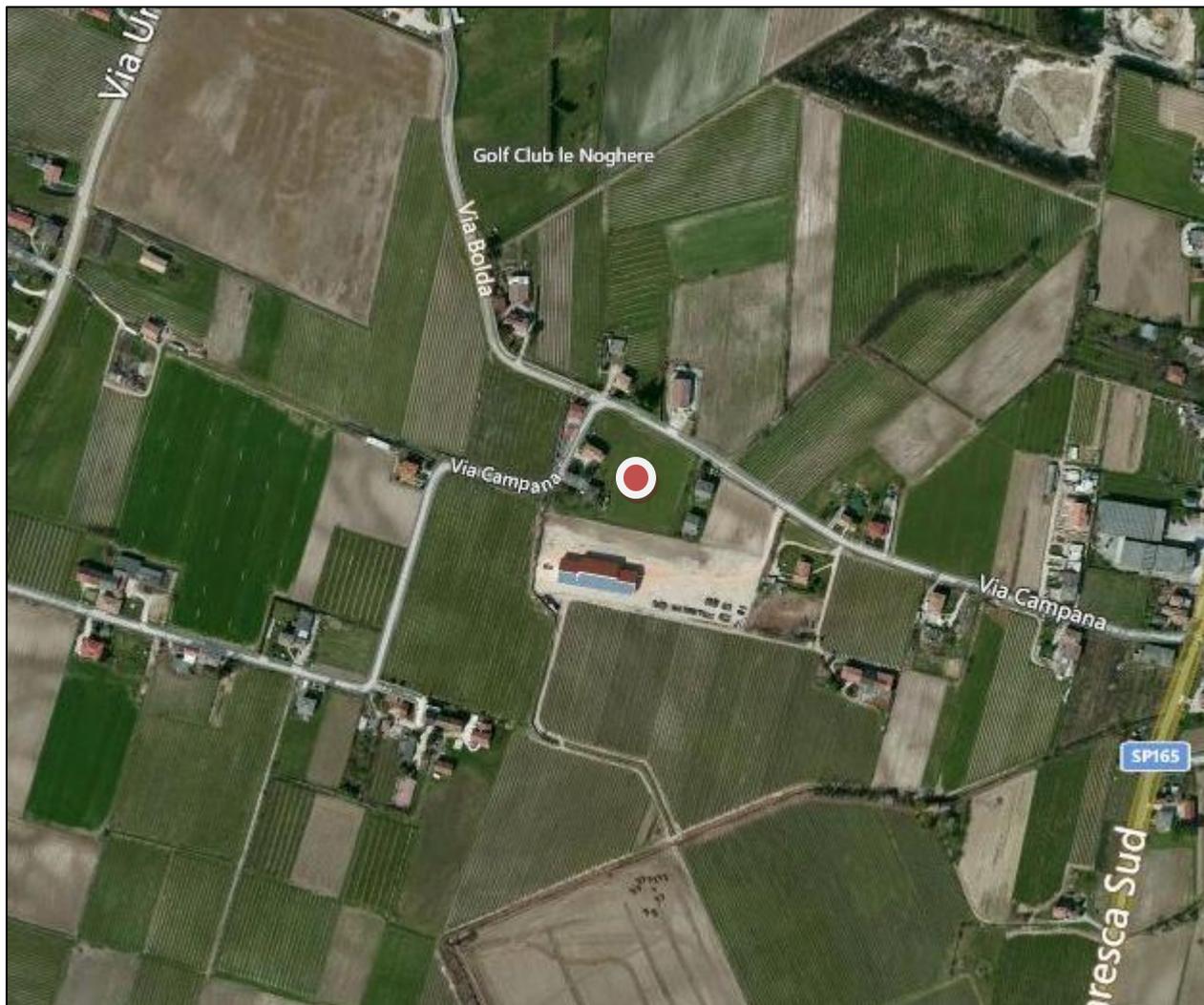
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

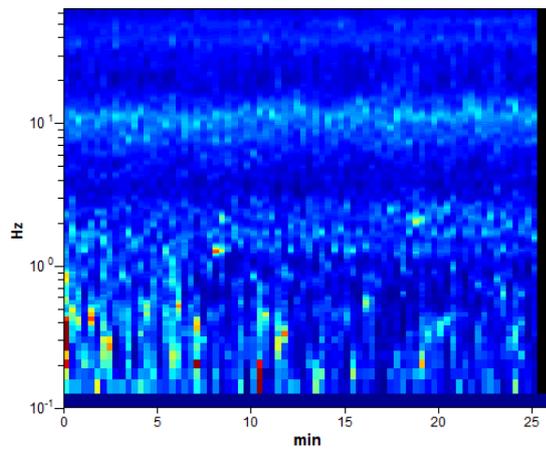


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

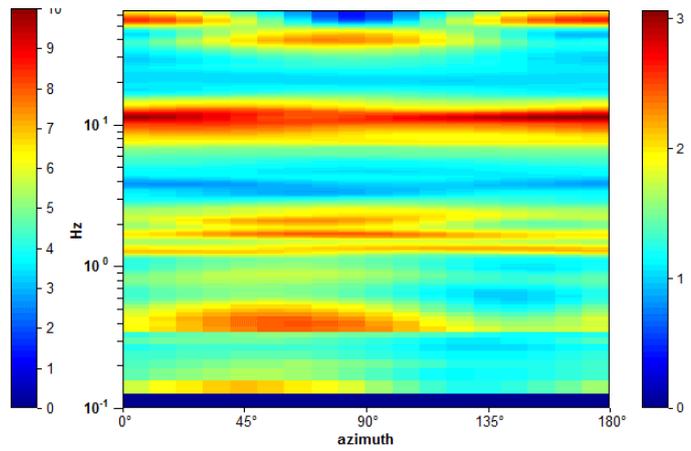


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

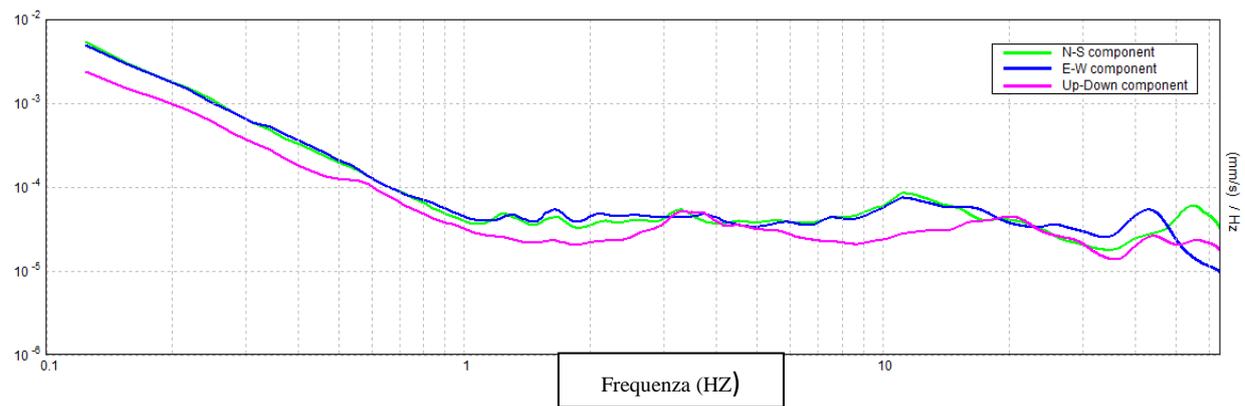


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

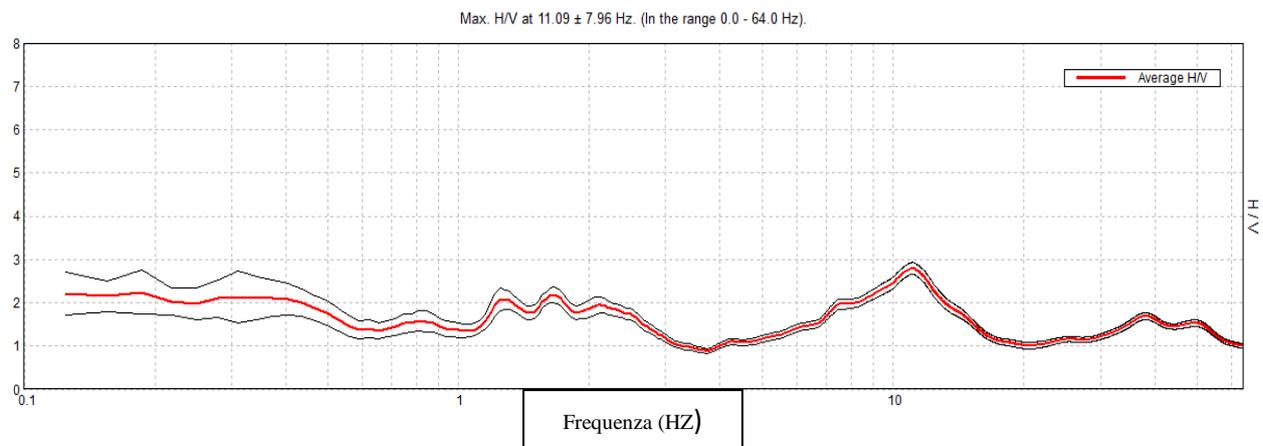


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

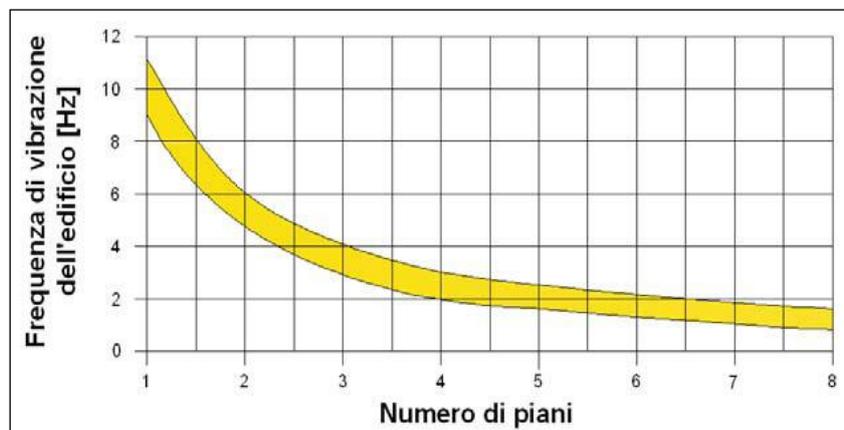


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	11 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 11.09 ± 7.96 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	11.09 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	17306.3 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 534 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	5.969 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	15.719 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.80 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.71729 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$7.95749 < 0.55469$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.1347 < 1.58$	OK	

L_w	window length
N_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w N_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartarla o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**11 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Relazione

Indagine sismica passiva HVSR

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

MDP_HVSR 63

MARENO DI PIAVE (TV)

Via Sant'Antonio

Coordinate WGS84

Lat. N 45,841645 Long. E 12,327066

Coordinate ED50

Lat. N 45,842541 Long. E 12,328059



i Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Bortolini Simone

TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios”) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Hardware

È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

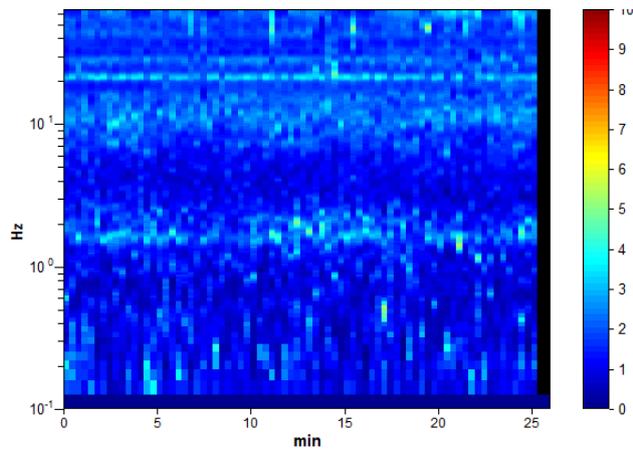


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

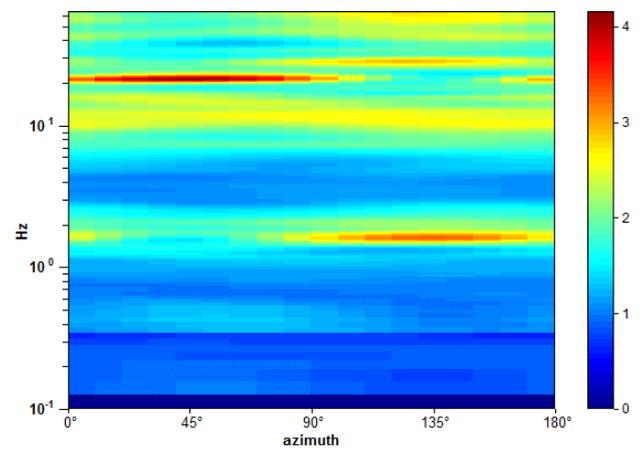


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

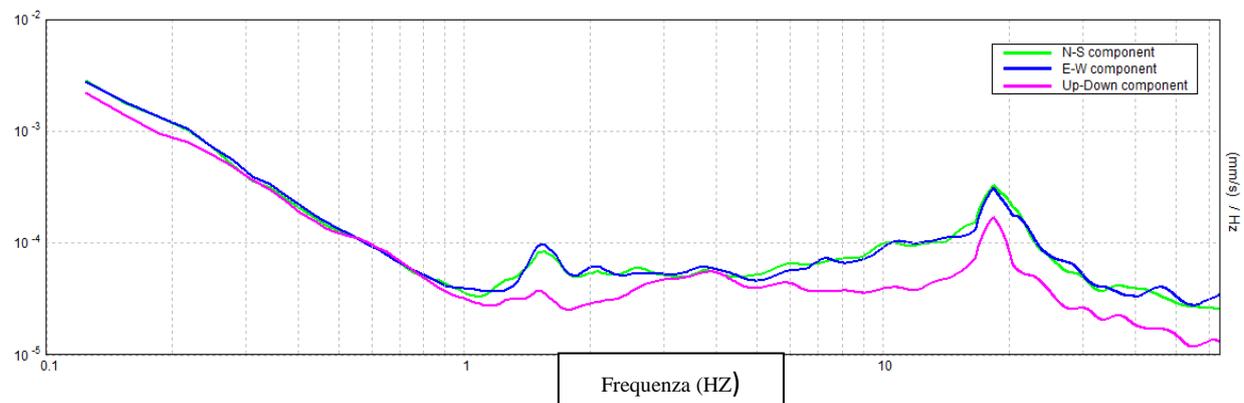


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

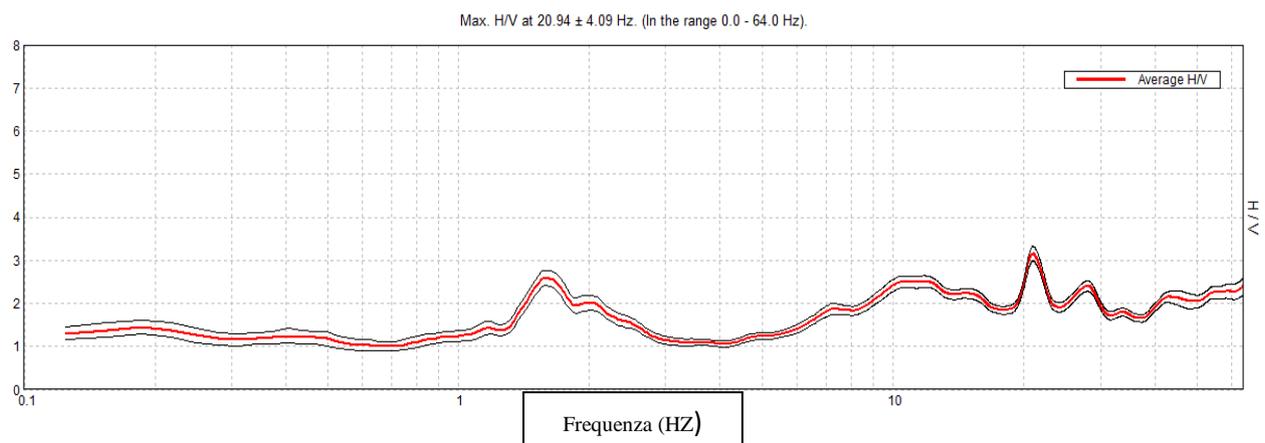


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda / 4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

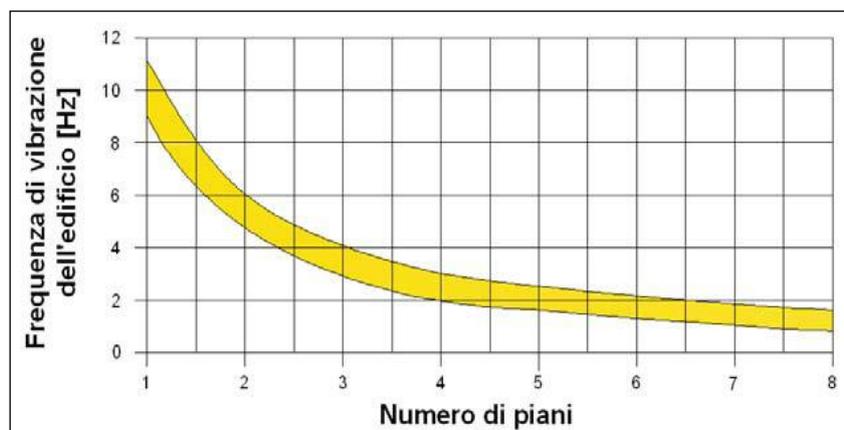


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,6 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 20.94 ± 4.09 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	20.94 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	32662.5 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 1006 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	6.438 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	3.16 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.19553 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	4.09396 < 1.04688		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.1674 < 1.58	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{HV}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log A_{HV}(f)}$	standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,6 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Relazione

Indagine sismica passiva HVSr

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

MDP_HVSR 64

MARENO DI PIAVE (TV)

Via Della Vittoria

Coordinate WGS84

Lat. N 45,846414 Long. E 12,357587

Coordinate ED50

Lat. N 45,847310 Long. E 12,358580



i Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Bortolini Simone

TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios”) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Hardware

È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

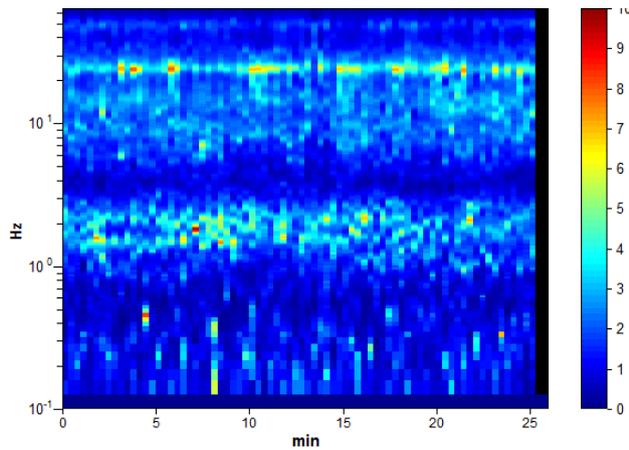


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

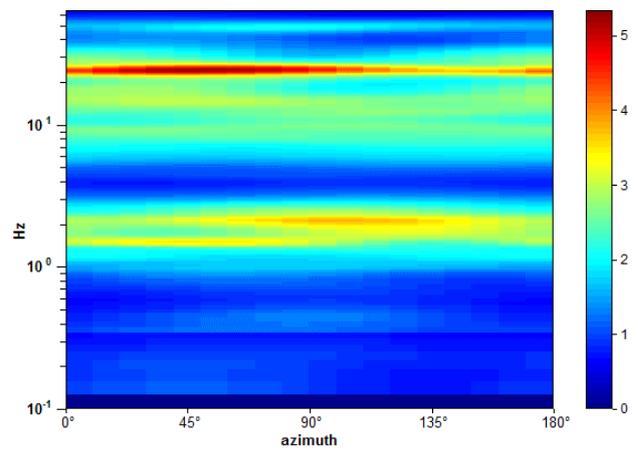


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

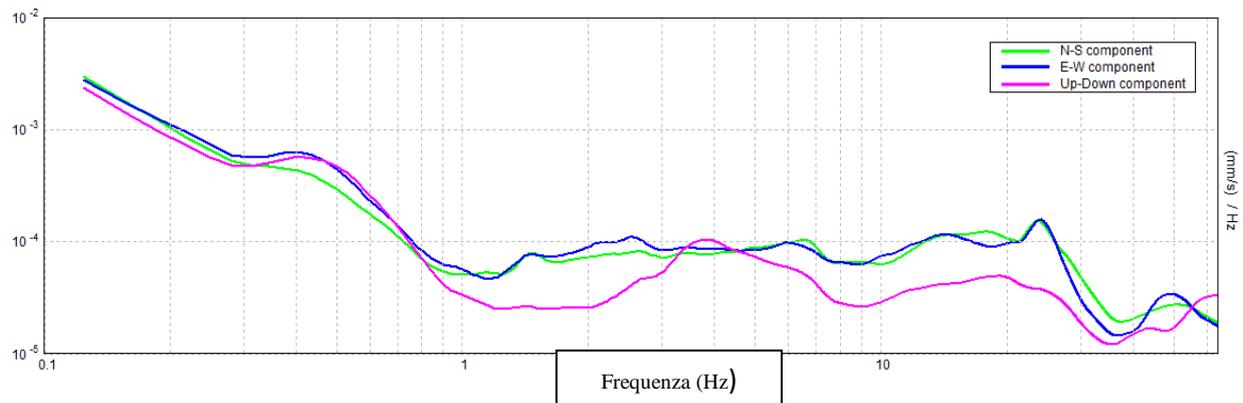


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

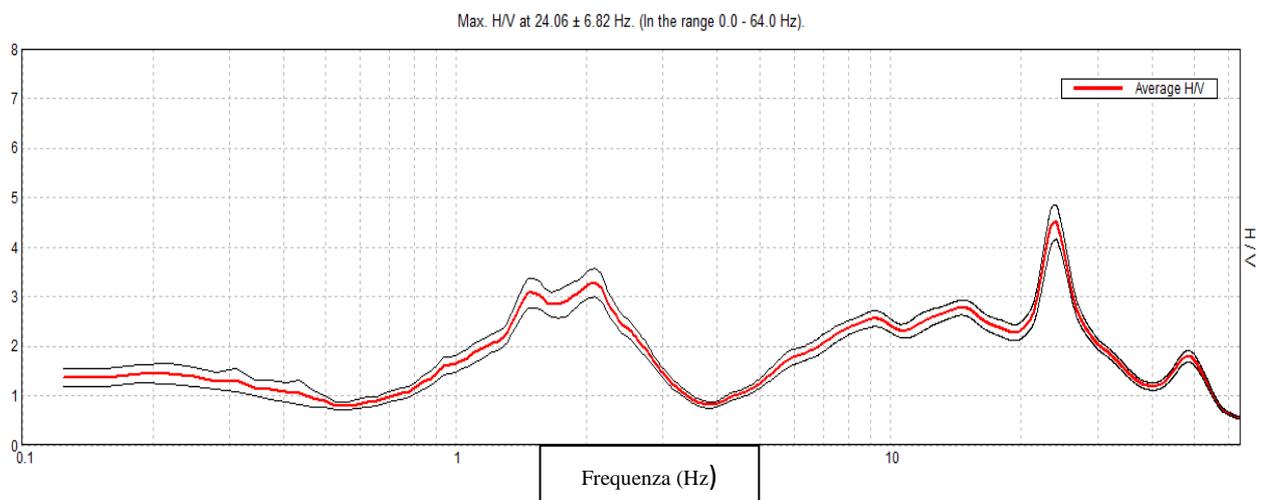


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda / 4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

Freq. naturale edificio _ 10 Hz / numero piani

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

Freq. naturale edificio - Freq. fondamentale di risonanza del sito

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

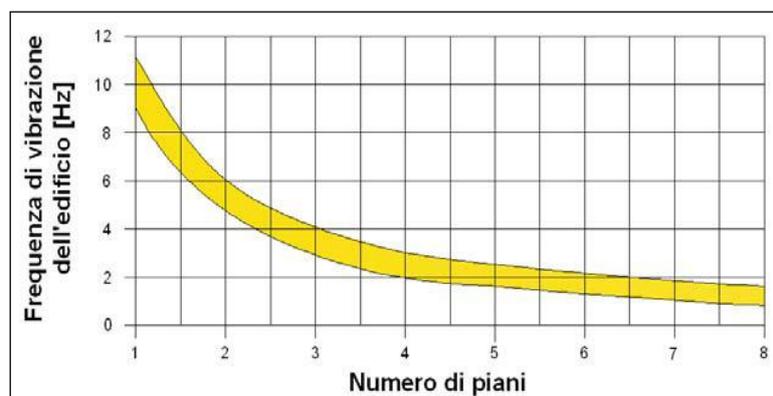


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	2 Hz e 24 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 24.06 ± 6.82 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	24.06 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	37537.5 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 1156 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	7.563 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$	28.75 Hz	OK	
$A_0 > 2$	4.51 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.28363 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	6.82495 < 1.20313		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.3504 < 1.58	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{HV}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log HV}(f)$	standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log HV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta due solo picchi di risonanza riconoscibili (**2 Hz e 24 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

Relazione

Indagine sismica passiva HVSr

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

MDP_HVSR 65

MARENO DI PIAVE (TV)

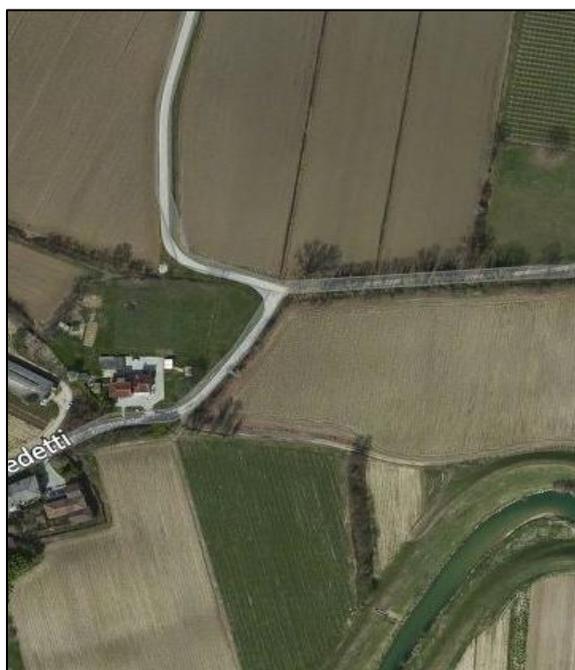
Via san Felice Benedetti

Coordinate WGS84

Lat. N 45,855507 Long. E 12,371387

Coordinate ED50

Lat. N 45,856403 Long. E 12,372380



i Geologi

dott. Gino Lucchetta

dott. Bortolini Simone

TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios”) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (f) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media (V_s) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Hardware

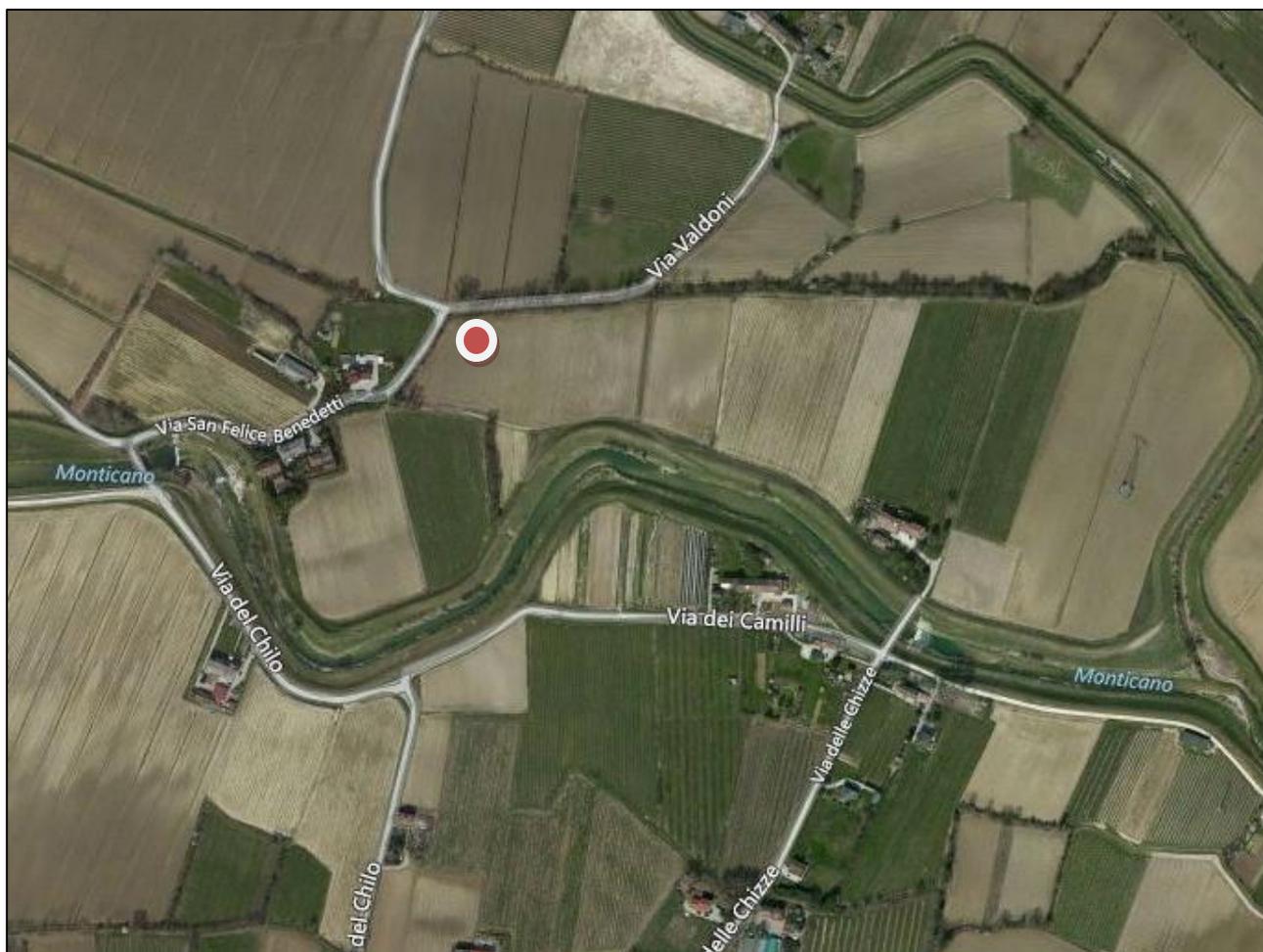
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

Periodo proprio di risonanza del suolo (HV)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV () indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

Analisi HV

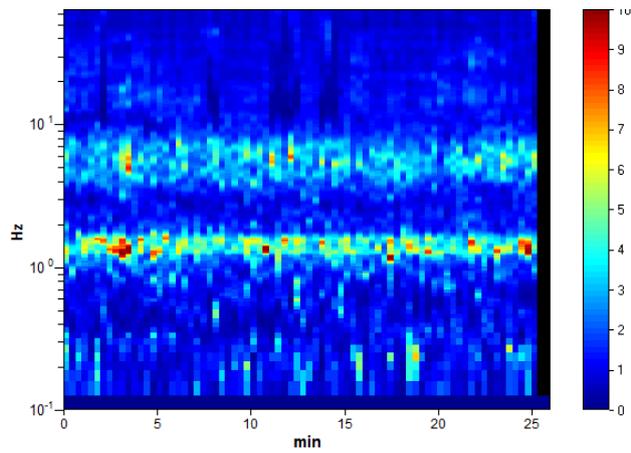


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

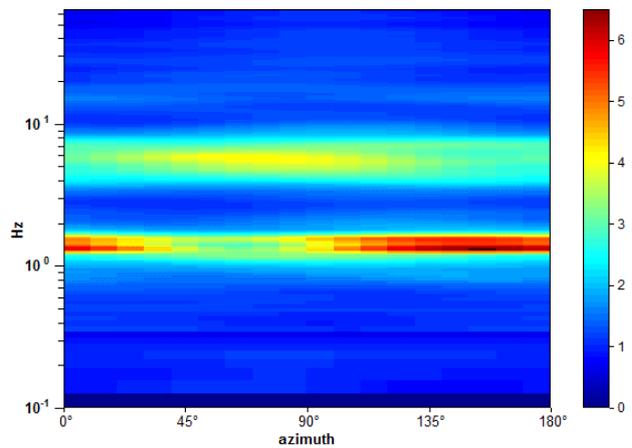


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

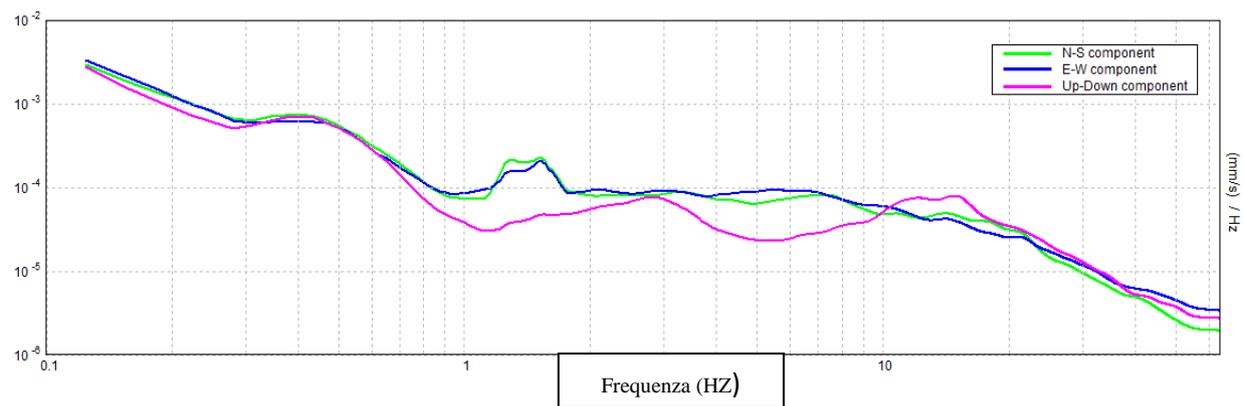


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

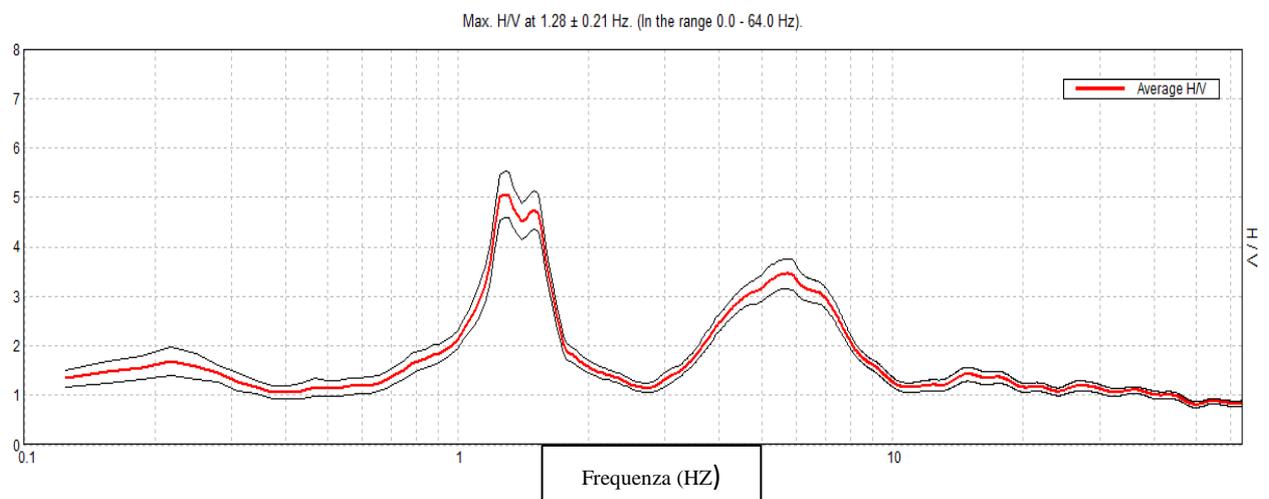


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito un certo disturbo da rumore antropico (traffico stradale). Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza di particolare entità.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi $\lambda/4$ una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale (F_n) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e V_s velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica (ω) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato (ω_n). Quando si verifica tale condizione ($\omega = \omega_n$) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} - \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

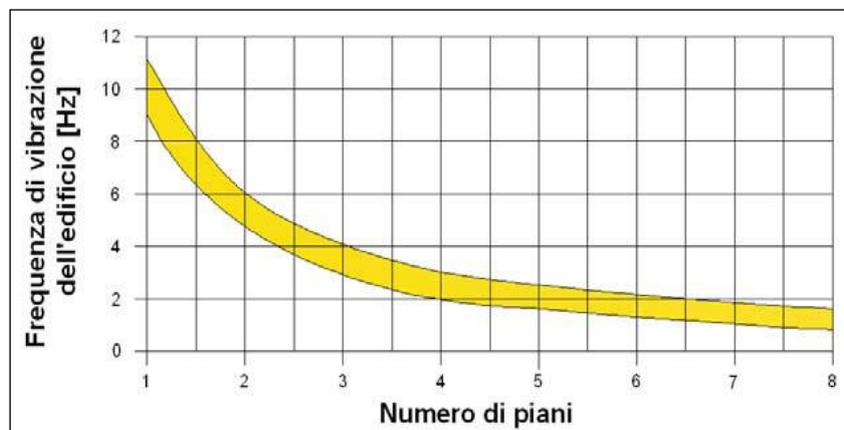


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

Sito di indagine	Frequenza max H/V	Considerazioni
HV	1,28 Hz	Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

Max. H/V at 1.28 ± 0.21 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve
[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	1.28 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	1998.8 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 62 times	OK	

Criteria for a clear H/V peak
[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	1.063 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$	1.719 Hz	OK	
$A_0 > 2$	5.06 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.16207 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.20765 < 0.12813$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.4609 < 1.78$	OK	

L_w	window length
n_w	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
f	current frequency
f_0	H/V peak frequency
σ_f	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	H/V peak amplitude at frequency f_0
$A_{HV}(f)$	H/V curve amplitude at frequency f
f^-	frequency between $f_0/4$ and f_0 for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequency between f_0 and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{HV}(f)$, $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log HV}(f)$	standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [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
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log HV}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartala o mantenerla. Nel nostro caso la prova è stata ugualmente ritenuta valida in quanto congruente con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

Conclusioni (HV)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un solo picco di risonanza riconoscibile (**1,28 Hz**); i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.