

G.M.C Spa

Via Fossone Basso, 8 - 19034 Luni (SP)



**CAVA 37 – FOSSAGRANDE – BACINO di TORANO
COMUNE DI CARRARA**

**OTTEMPERANZA A 1) PRESCRIZIONI DI CUI ALL'AUTORIZZAZIONE ALLA
COLTIVAZIONE CAVA n.37 FOSSA GRANDE DD. n.20 DEL 19/02/2015 2)
ORDINANZA DIRIGENZIALE n.810 DEL 13/09/2022 E STUDIO DI CUI
ALL'ART. 32 NTA PABE BACINO DI TORANO SCHEDA n.15 CARRARA**



Novembre 2022

ALLEGATO n°1

**INDAGINI GEOFISICHE RAVALUNGA e FOSSAGRANDE
RELAZIONE SPECIALISTICHE P3 snc**



OGGETTO:		INDAGINI GEOFISICHE PER LA STIMA DELLO SPESSORE DEL DETRITO DI CAVA SOVRASTANTE L'AMMASSO ROCCIOSO	
TIPOLOGIA:	MASW HVSR	DATA INDAGINE:	
		Ottobre 2022	
LOCALITA':		COMUNE DI CARRARA (MS) BACINO MARMIFERO DI TORANO CAVA n.37 FOSSAGRANDE – Ravaneto di Ravalunga	
COMMITTENTE:		GMC S.P.A.	

codice documento:	j22111.10.11_crr.doc
versione	01
stato documento:	definitivo
autore:	a.benvenuti
revisione:	v.carnicelli
approvazione:	v.carnicelli
data:	Ottobre 2022

SOMMARIO

1	PREMESSA	2
2	TIPO D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	2
2.1	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	3
2.2	INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE	3
2.3	INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE	5
3	ANALISI DEI RISULTATI	7

1 PREMESSA

Su incarico della Ditta GMC S.P.A. è stata eseguita, nel mese di Ottobre 2022, una campagna di indagini geofisiche nel Comune di Carrara (MS), nel bacino marmifero di Torano, presso la Cava n.37 denominata Fossagrande, finalizzata a valutare lo spessore dell'ammasso detritico sovrastante l'ammasso roccioso in corrispondenza del ravaneto situato a valle della cava e denominato "Ravalunga".

Per la corretta ubicazione delle indagini è stato effettuato un rilievo plano-altimetrico ad hoc realizzato con GPS Leica RX1250, l'indicazione delle stesse è riportata nelle tavole allegate in cui sono state posizionate su base cartografica fornita dalla Committenza e su base CTR - Fonte dei dati Regione Toscana: dataset "Ortofotocarte scala 1:2.000" OFC2K: Fogli 22D12 e 22D13. L'ubicazione riportata sulla cartografia è da ritenersi indicativa in quanto le ortofoto della Regione Toscana risalgono all'anno 2017 mentre, attualmente, lo stato dei luoghi è leggermente mutato; a tale scopo, per avere un quadro visivo d'insieme è stata effettuata una foto da drone sulla quale è riportata la posizione delle indagini al momento dell'esecuzione delle stesse; nella foto sono comprese le indagini ubicate nella parte centrale e basale del ravaneto. Per la corretta ubicazione dei sensori e dei punti di misura sono riportate, nelle apposite tabelle, le coordinate dei punti di indagine (sistema Gauss Boaga).

2 TIPO D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Per la ricostruzione del profilo verticale di velocità delle onde S sono state eseguite due prospezioni in sismica attiva mediante la tecnica MASW ("Multichannel Analysis of Surface Waves") in onde di Rayleigh.

Gli stendimenti MASW, visto l'estensione areale del corpo detritico da analizzare, sono stati effettuate rispettivamente a monte (MASW1) e a valle (MASW2) dello stesso; In prossimità delle indagini lineari sono state eseguite due misure in sismica passiva a stazione singola denominate in seguito, rispettivamente, HVSR1 e HVSR5.

In questo modo è stato possibile, correlando i risultati delle indagini in sismica attiva con quelli ottenuti con le acquisizioni in sismica passiva, ottenere profili sufficientemente robusti e vincolati di V_s (Dal Moro, 2012; 2014; 2015b).

Le analisi in sismica attiva effettuate hanno permesso di ricavare un valore di V_s caratteristico dei primi livelli di sottosuolo e attribuibile al detrito di cava.

Per il calcolo degli spessori e per valutare la profondità dell'ammasso roccioso sono state eseguite ulteriori 3 acquisizioni in sismica passiva a stazione singola elaborate attraverso la metodologia basata sulla tecnica di Nakamura e sul rapporto spettrale H/V (HVSR) al fine di individuare, sulle singole verticali di misura, il picco del rapporto H/V generato dal passaggio tra il detrito e il substrato roccioso corrispondente alla frequenza di risonanza sito specifica.

Le misure sono state eseguite in funzione dello stato dei luoghi e dell'accessibilità agli stessi. Nella parte più alta del ravaneto è stato possibile effettuare un'indagine MASW e un'acquisizione in sismica passiva (HVSR1); nel resto del ravaneto, accessibile solo dal basso, è stata effettuata, alla base, la seconda MASW con relativa acquisizione HVSR.

Le altre misure sono state eseguite tenendo una distanza grossomodo costante tra loro e seguendo il più possibile un allineamento secondo la linea di massima pendenza dell'ammasso detritico fino a raggiungere il punto più alto con la misura HVSR2 effettuata poco al di sotto della metà del ravaneto.

Il calcolo degli spessori è stato poi eseguito utilizzando la relazione semplificata che lega la frequenza di risonanza f alla velocità medie delle onde di taglio (V_s) che caratterizzano lo strato che risona e allo spessore dello strato stesso:

$$f = V_s / 4H$$

I successivi calcoli effettuati sulle singole verticali di misura sono stati effettuati attraverso l'assunzione, seppur semplicistica, che il valore di V_s dei primi livelli di sottosuolo, ricavato attraverso le indagini MASW1 / HVSR1 e MASW2 / HVSR5, rappresentasse il valore medio caratteristico del corpo detritico nel suo insieme.

La metodologia HVSR è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazioni esterne diverse dal microtremore ambientale che in natura esiste ovunque.

2.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per l'indagine MASW è costituita da:

- un sistema di acquisizione dati: costituito da un sismografo P.A.S.I. modello GEA24; un notebook PC Windows 7 con software di acquisizione P.A.S.I.;
- un sistema di energizzazione ad impatto verticale ed orizzontale: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 kg battente verticalmente su piastra quadrata in teflon®, ovvero battente orizzontalmente su traversina in legno, posta direttamente sul piano di campagna per la generazione di onde sismiche compressionali e di taglio, in grado di produrre onde superficiali ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali;
- un sistema di trigger: consistente in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta.
- un sistema di ricezione costituito da 12/24 geofoni verticali monocomponente con frequenza propria di 4.5 Hz

La strumentazione utilizzata per le misure dei microtremori ambientali, elaborate attraverso la tecnica HVSR, è costituita da un tromografo digitale (Tromino® di MoHo srl) dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e UP-DOWN.

2.2 INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio V_s , sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o, detto in maniera equivalente, la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo; onde a bassa frequenza si propagano negli

strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente allineata all'array geofonico) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°, sia della topografia sia delle diverse discontinuità elastiche.

La metodologia utilizzata consiste in quattro fasi:

- acquisizione dei dati di campagna energizzando a più riprese e alternativamente ai due estremi dello stendimento geofonico;
- determinazione dello spettro di velocità sperimentale dal campo di moto acquisito nel dominio spazio-tempo lungo lo stendimento;
- calcolo della curva di dispersione attraverso il picking o la modellazione diretta;
- inversione della curva di dispersione per l'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s .

Nel sito in esame sono state eseguiti due stendimenti MASW impostati in modo da utilizzare al meglio lo spazio a disposizione. Lo stendimento **MASW1** è stato effettuato sulla parte alta dell'accumulo detritico mentre lo stendimento **MASW2** alla base dello stesso.

Per quest'ultimo, sebbene fosse stato impostato con 24 geofoni, in fase di elaborazione dati è stato ritenuto opportuno utilizzare i dati acquisiti lungo il tratto compreso tra i geofoni G10 ÷ G24 in quanto lo spettro di dispersione relativo a questa porzione di stendimento è risultato meglio interpretabile rispetto a quello generato considerando l'intero allineamento.

Le acquisizioni sono state eseguite secondo le seguenti configurazioni spaziali e temporali:

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA MASW1			
Orientazione	N197 (NE-SW)		
Coordinate GB geofono G1	1591404.1	4884275.4	918.79
Coordinate GB geofono G12	1591397.6	4884254.5	918.47
Lunghezza stendimento	22 m		
Numero Geofoni	12		
Distanza intergeofonica	2 m		
Numero punti di energizzazione da ciascun estremo	2		
Sorgenti	2 m, 3 m		
Durata acquisizione	1 s		
Intervallo di campionamento	0.5 ms		

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA MASW2			
Orientazione	N158 (NW-SE)		
Coordinate GB geofono G10	1591157.6	4884235.8	748.99
Coordinate GB geofono G24	1591168.2	4884210.1	749.89
Lunghezza stendimento	28 m		
Numero Geofoni	14		
Distanza intergeofonica	2 m		
Numero punti di energizzazione da ciascun estremo	G10: 1; G24: 3		
Sorgenti	G10: 1 m; G24: 2 m, 3 m, 5 m		
Durata acquisizione	1 s		
Intervallo di campionamento	0.5 ms		

Per valutare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) sono state eseguite acquisizioni coniugate agli estremi di ogni stendimento.

Durante il processo di elaborazione, al fine di minimizzare le possibili soluzioni e cercare la più sensata coerenza tra lo spettro di velocità sperimentale e le curve di dispersione teoriche che possono generare tale spettro, ci si è avvalsi dei dati acquisiti con le acquisizioni in sismica passiva eseguite in prossimità dei relativi stendimenti MASW (HVSR1 su MASW1 e HVSR5 su MASW2).

L'elaborazione è stata eseguita tramite il software winMASW 2019 Academy (Eliosoft).

2.3 INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il rumore sismico, generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, è presente ovunque sulla superficie terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma un ruolo fondamentale nella produzione dei microtremori è rivestito dalle onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970). La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

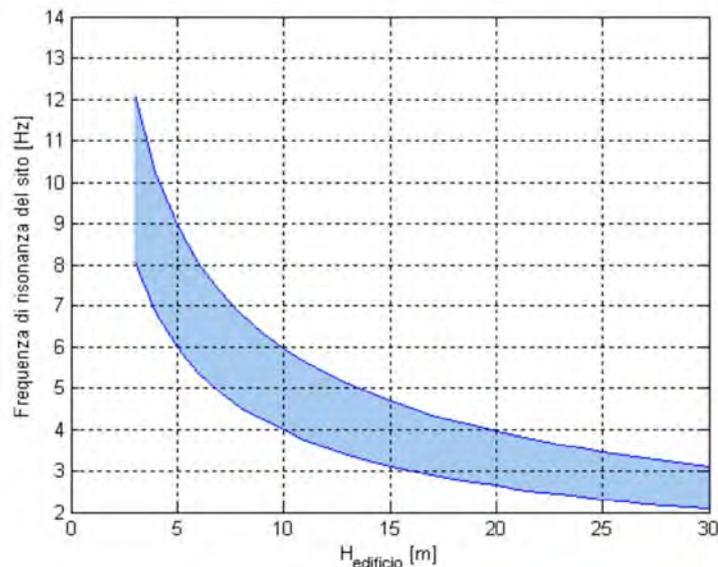
- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;

- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;

- la velocità media delle onde di taglio V_s
- la stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri.

Per quanto concerne il fenomeno della “doppia risonanza” (cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico, così come trasmesso in superficie, e quelle dei manufatti ivi edificati) è noto che, dal punto di vista empirico, la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza.

Nella figura seguente (tratta da Masi et al., 2007) si riporta, a titolo esemplificativo, una possibile relazione tra altezza di un edificio in c.a. e frequenza di risonanza di sito. La fascia azzurra indica l'area più vulnerabile dal punto di vista dei fenomeni di doppia risonanza.



La quantificazione della frequenza caratteristica di sito attraverso misure dirette di microtremore sismico può quindi essere di estremo aiuto nella fase di progettazione.

Durante questa campagna geofisica sono state eseguite 6 misure di microtremore ambientale (acquisizioni in sismica passiva a stazione singola) secondo la seguente configurazione spaziale e temporale:

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINI HVSR					
denominazione	Coordinate GB			Durata acquisizione	Frequenza di campionamento
HVSR1	1591404.0	4884270.6	918.78	20 min	128 Hz
HVSR2	1591249.7	4884258.3	803.14	20 min	128 Hz
HVSR3	1591219.2	4884245.7	785.28	20 min	128 Hz
HVSR4	1591203.3	4884238.9	776.00	20 min	128 Hz
HVSR5	1591158.8	4884233.1	749.05	20 min	128 Hz

Le misure dei microtremori ambientali, orientate secondo il Nord sono state effettuate con il tromografo digitale Tromino® di MoHo srl.

I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

I risultati ottenuti dall'esecuzione dall'indagine tromografica sono stati elaborati attraverso il software Grilla 8.0 (MoHo srl).

3 ANALISI DEI RISULTATI

Le prospezioni geofisiche eseguite, per mezzo dell'analisi delle indagini MASW e delle registrazioni H/V eseguite in prossimità degli stendimenti stessi (HVS1 e HVS5), ha permesso di ricavare il modello medio di distribuzione della velocità delle onde "S" nel sottosuolo del sito indagato: il modello di sottosuolo in termini di V_s è stato ottenuto dal fit congiunto delle curve H/V relative a HVS1 e delle curve di dispersione ricavate dall'indagine MASW1 e dalle curve relative a HVS5 e delle curve di dispersione ricavate dall'indagine MASW2.

Queste, in buona misura, fanno risalire la stima dell'effetto di sito alle caratteristiche del profilo di velocità delle onde di taglio (V_s).

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

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

in cui

- h_i spessore dell' i -esimo strato;
- $V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Relativamente alle indagini MASW, nelle Figg. 2 e 4 sono riportati i sismogrammi gli spettri di velocità e i modelli di dispersione dei singoli stendimenti.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i profili verticali delle Onde S (rif. Fig.3 e Fig.5) in corrispondenza delle acquisizioni MASW, ricavati mediante elaborazione dei dati di campagna:

MASW1		
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	V_s [m/s]
2.00	2.00	350
19.00	17.00	420
inf.	inf.	1200
$V_{s,eq}(0.0-19.0)=411\text{m/s}$		

MASW2		
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	V_s [m/s]
2.00	2.00	350
20.00	18.00	420
inf.	inf.	1150
$V_{s,eq}(0.0-20.0)=412\text{m/s}$		

I profili MASW individuano una $V_{s,eq}$, riferita al piano di campagna, pari a **411 m/s** relativamente a **MASW1** e pari a **412 m/s** relativamente a **MASW2**.

Dai risultati ottenuti, evidenziati nelle schede relative, è stata calcolata la profondità del bedrock relativamente ad ogni singola indagine HVSR; il modello di sottosuolo (come ricavato dalle elaborazioni MASW) è stato semplificato in pochi sismostrati principali in modo da permettere una più immediata visualizzazione del passaggio tra la copertura e la roccia sottostante.

La copertura detritica è risultata costituita da uno spessore variabile compreso tra 15 e 20 metri circa con velocità comprese tra 350 e 420 m/s.

L'ammasso roccioso sottostante è invece caratterizzato da valori di V_s compresi tra 1100 e 1200 m/s.

Un'ulteriore semplificazione è stata fatta assumendo che le velocità rilevate dal fit congiunto delle indagini MASW e delle relative acquisizioni in sismica passiva (MASW1/HVSR1 e MASW2/HVSR5), fossero caratteristiche anche degli altri punti di misura effettuati esclusivamente con la stazione singola.

In particolare, relativamente alla copertura detritica, l'assunzione di una V_s comune su più verticali porta a considerare il detrito come omogeneo su tutte queste verticali quando invece, a causa delle differenti modalità di formazione dell'accumulo detritico, la copertura nei singoli punti potrebbe essere costituita da materiale a granulometria, stato di addensamento e, quindi, velocità sismiche differenti.

A conferma di quanto sopra, in fase di elaborazione dati, il modello di sottosuolo ottenuto dal fit congiunto delle MASW e delle relative acquisizioni HVSR ha consentito di discretizzare ulteriormente, all'interno della copertura, un livello iniziale dello spessore costante di 2 metri caratterizzato da una V_s di 350 m/s rispetto al corpo detritico sottostante a cui è stato attribuito il valore di V_s pari a 420 m/s. Tale discretizzazione è stata applicata anche sulle altre verticali di misura in sismica passiva sebbene non supportate da indagini MASW nelle immediate vicinanze.

Le acquisizioni in sismica passiva individuano un picco evidente del rapporto H/V compreso tra le frequenze di 3 – 10 Hz con massimi del rapporto H/V intorno a 5 attribuibile al contrasto di impedenza generato dal passaggio copertura - ammasso roccioso.

La sola misura HVSR2 presenta un massimo ben più ampio (circa 8) ma la forma del picco principale (molto stretta e allungata) è presumibilmente dovuta a disturbi ambientali (attività di cava) che eccitando le tre componenti del moto portano ad esaltare la curva del rapporto H/V aumentando il valore del rapporto H/V rispetto a quello che avrebbe presumibilmente avuto il picco naturale.

La variabilità della frequenza in corrispondenza della quale il picco mostra il suo massimo è funzione della profondità del contrasto di impedenza generato dal passaggio copertura / substrato roccioso.

La modellazione del picco della curva H/V relativo a ogni singola indagine ha consentito di ricostruire i singoli profili di V_s .

A fronte delle precedenti considerazioni, dai risultati ottenuti, evidenziati nelle schede relative ad ogni singola indagine effettuata, le profondità del bedrock, ricostruita per ogni singola indagine HVSR, sono risultate le seguenti:

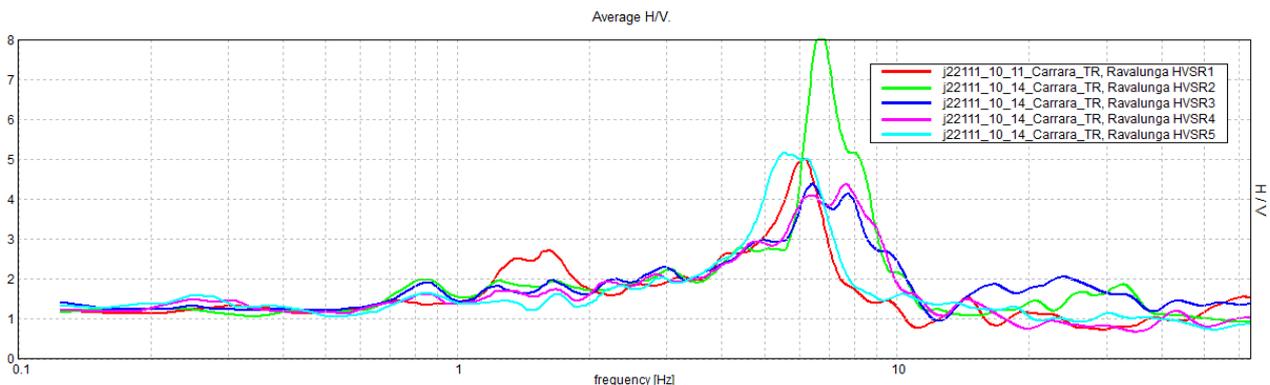
Indagine	Stima profondità bedrock
HVSR1	19 m
HVSR2	16 m
HVSR3	16 m
HVSR4	15.5 m
HVSR5	20 m

Per quanto detto in precedenza riguardo alle assunzioni fatte circa la costituzione dell'ammasso detritico, la ricostruzione dei profili di V_s ricavata per ogni singola acquisizione in sismica passiva, rappresenta una possibile soluzione della curva sperimentale misurata su quella verticale d'indagine.

È necessario inoltre precisare che, trattandosi di misure indirette, come per tutte le indagini geofisiche, i risultati ottenuti possono variare all'interno di un range pari a circa il 20%.

Nella figura sottostante è riportato il confronto tra le curve H/V sperimentali relative alle cinque misure eseguite.

H/V SPERIMENTALE -CONFRONTO MISURE



Dal confronto tra le curve H/V è possibile evidenziare meglio come le curve relative alle misure HVSR1 e HVSR5 (rosso e ciano in figura) abbiano un picco spostato a frequenze più basse rispetto alle altre misure indicando come, su queste verticali lo spessore della copertura sia maggiore.

Pisa, Ottobre 2022

P3 s.n.c.
 Piazza Martiri della Libertà, 22/23
 56127 PISA
 C.F./P.IVA 01923910507
Alto Benvenuti

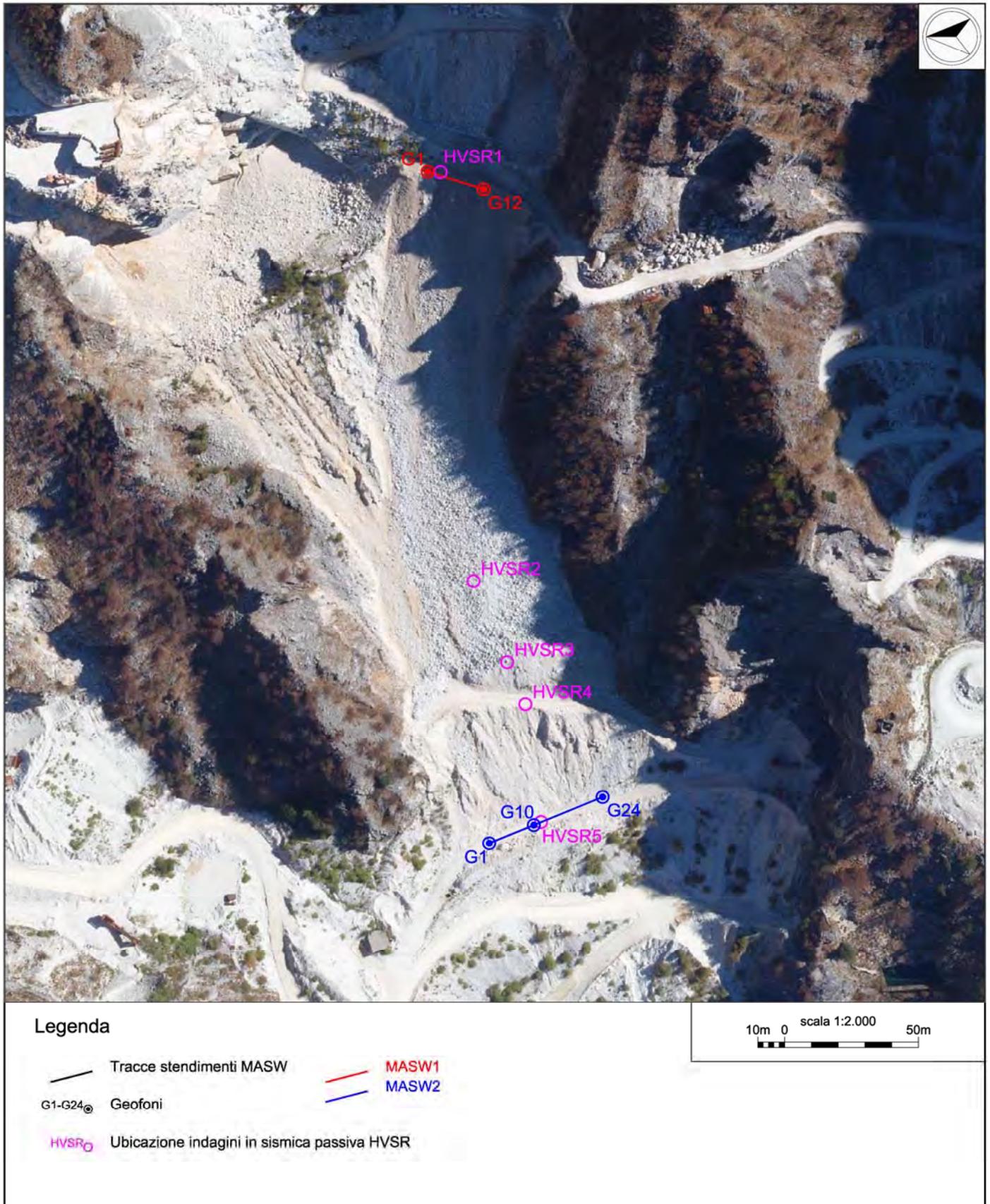
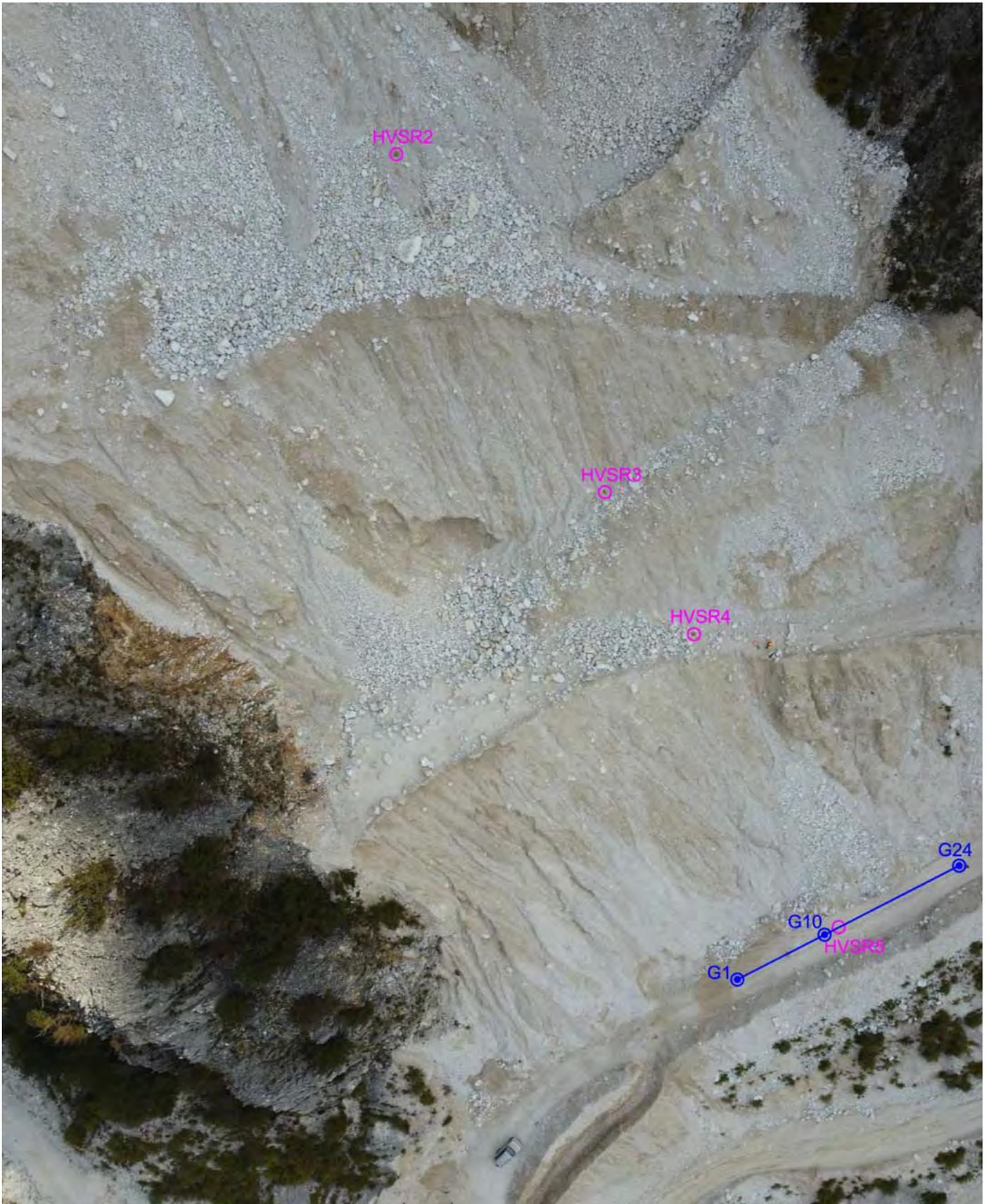


Figura 1. Ubicazione indagini. Inquadramento generale su base ortofoto Regione Toscana.



Ubicazione indagini. Documentazione fotografica.

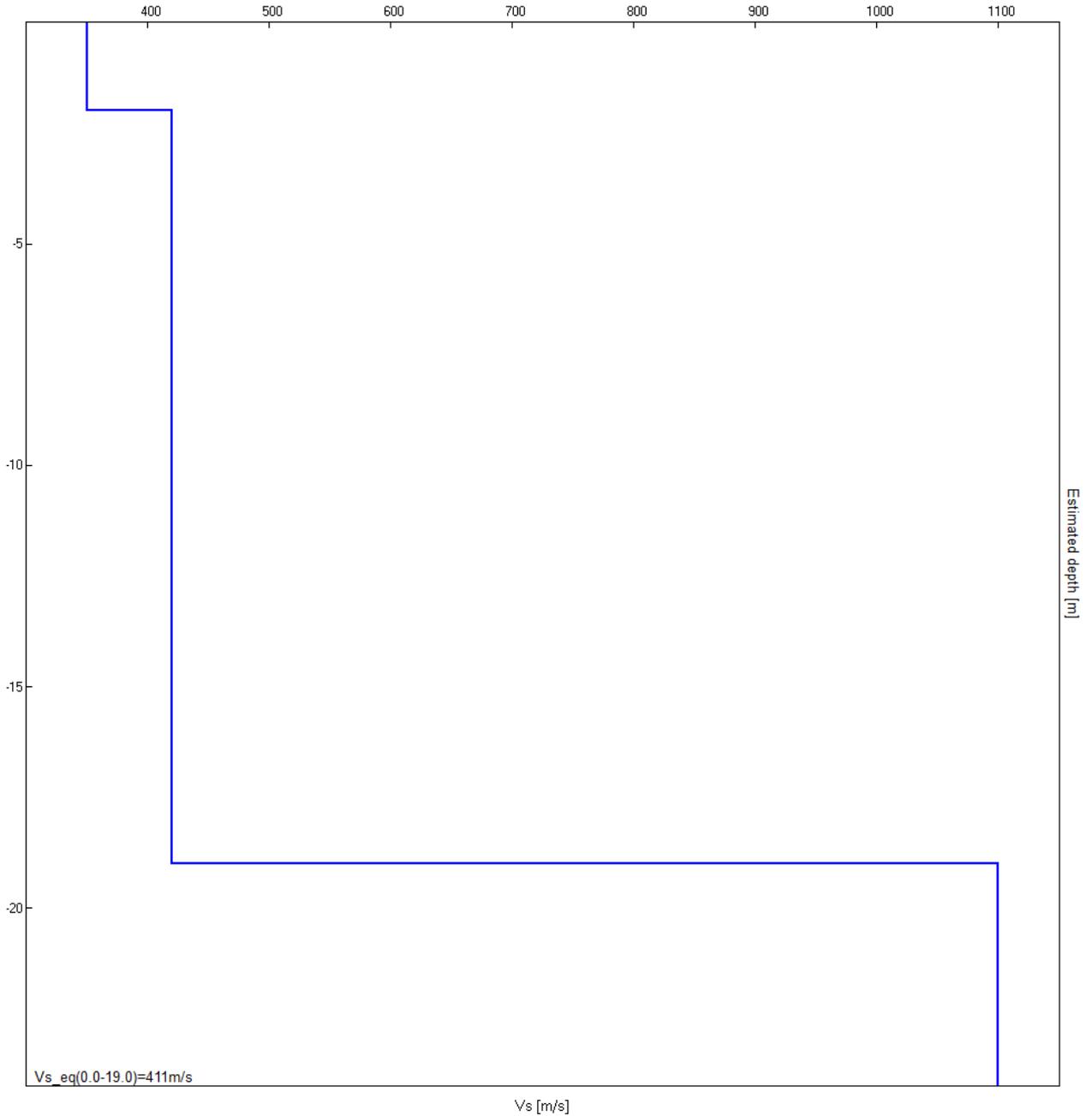


Figura 3 - Indagine **MASW1**: Profilo verticale delle Vs.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.00	2.00	350
19.00	17.00	420
inf.	inf.	1200

Vs_eq(0.0-19.0)=411m/s

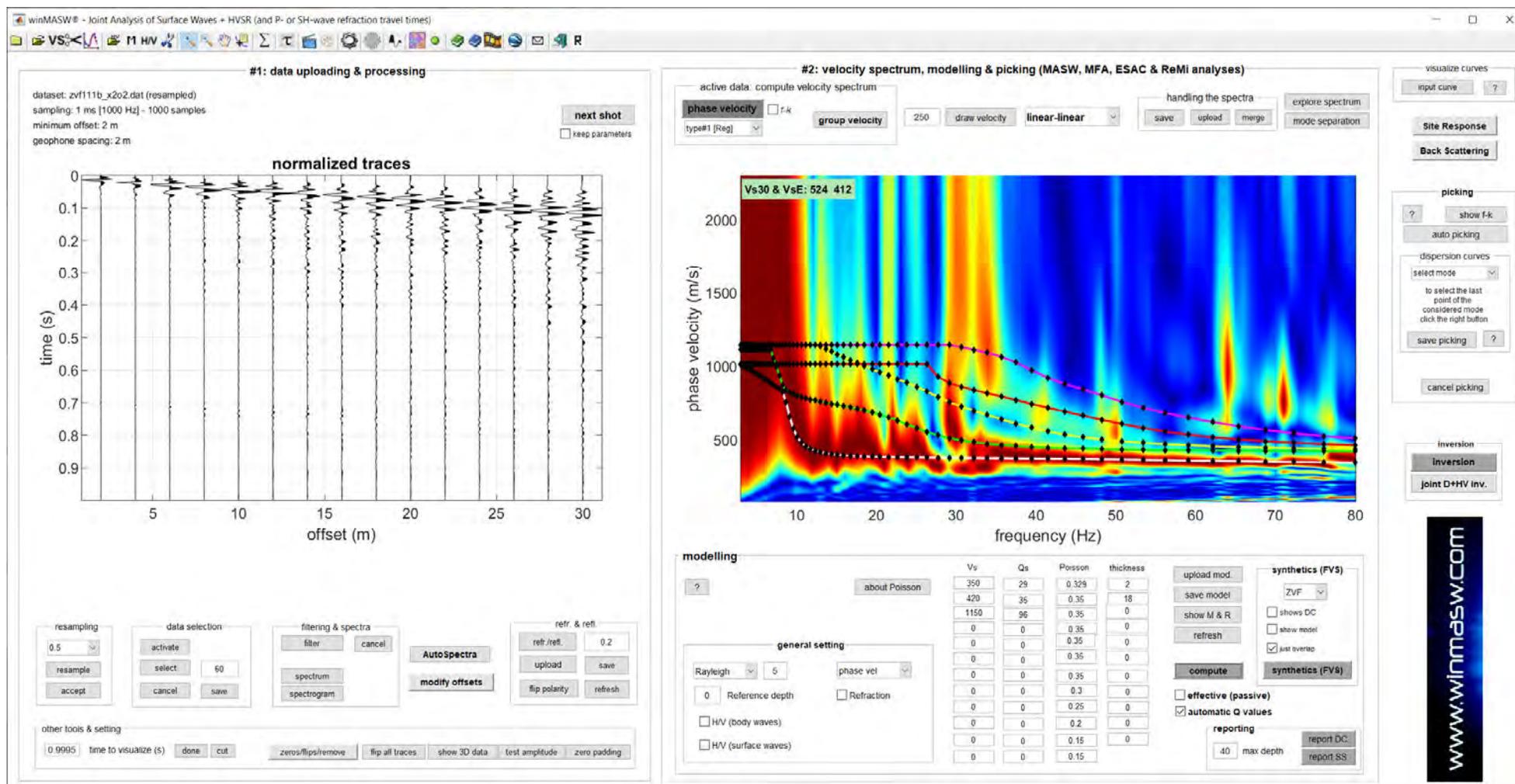


Figura 4 - Indagine MASW2: sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione.

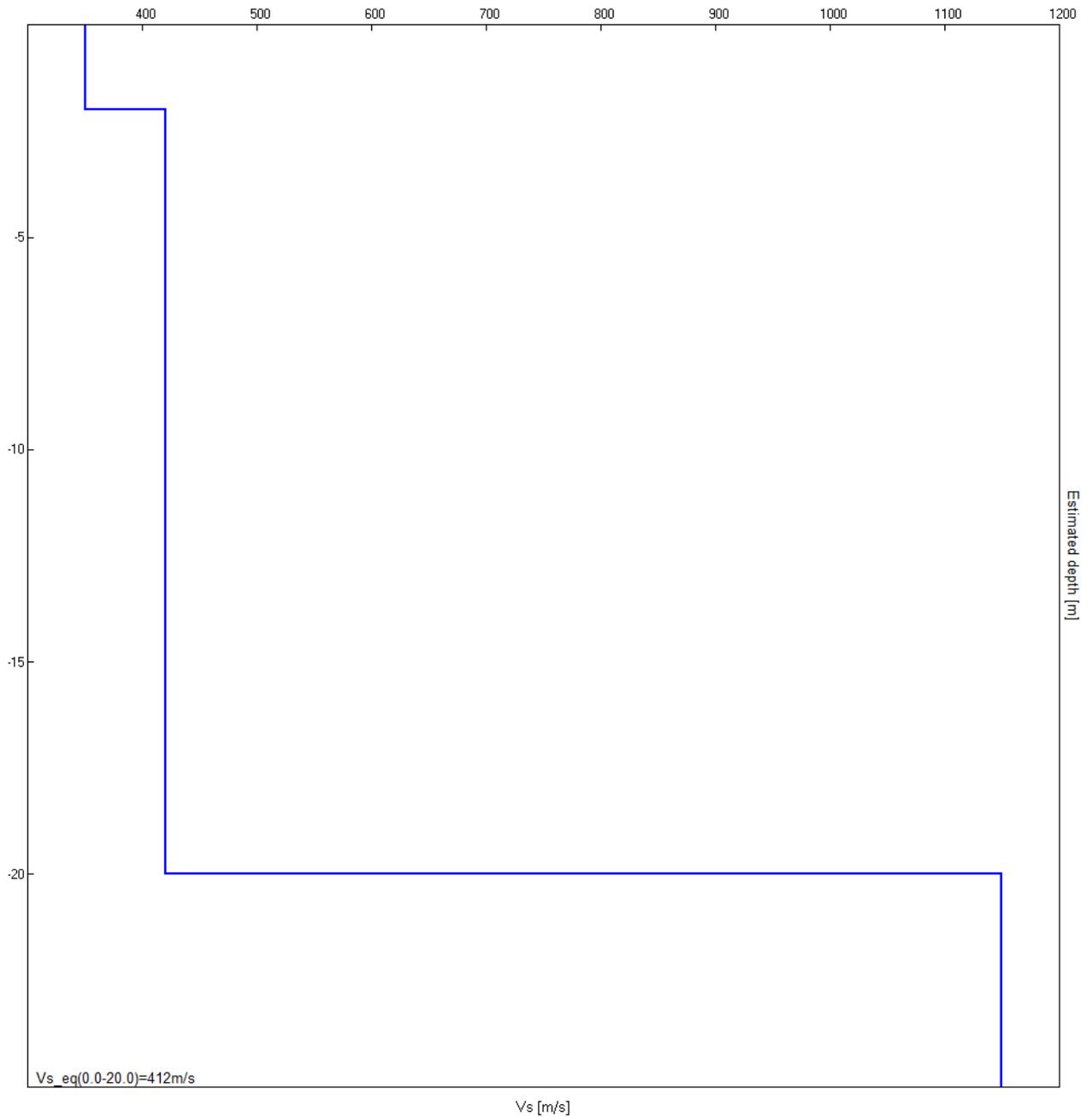


Figura 5 - Indagini MASW2: Profilo verticale delle Vs.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.00	2.00	350
20.00	18.00	420
inf.	inf.	1150

Vs_eq(0.0-20.0)=412m/s

Seguono: schede indagini HVSR – Oltre al grafico della curva sperimentale H/V e agli spettri delle tre componenti del moto in velocità, si riportano, per ogni verticale di misura, a titolo esplicativo, il confronto fra curva sperimentale H/V e curva teorica relative al modello di sottosuolo proposto (e, conseguentemente, il profilo delle Vs calcolato su ciascuna verticale).

J22111_10_11_CARRARA_TR, RAVALUNGA HVSR1

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 11/10/22 13:25:13 Fine registrazione: 11/10/22 13:45:12

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

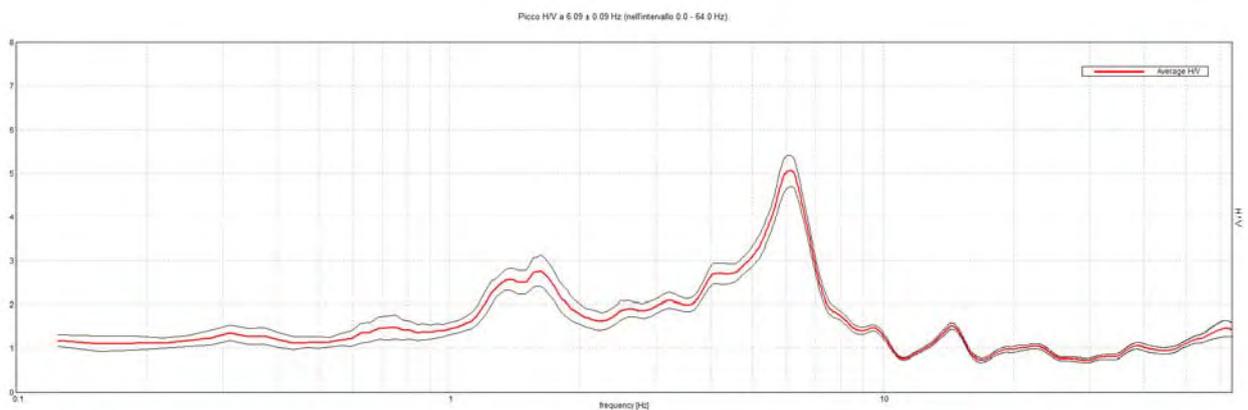
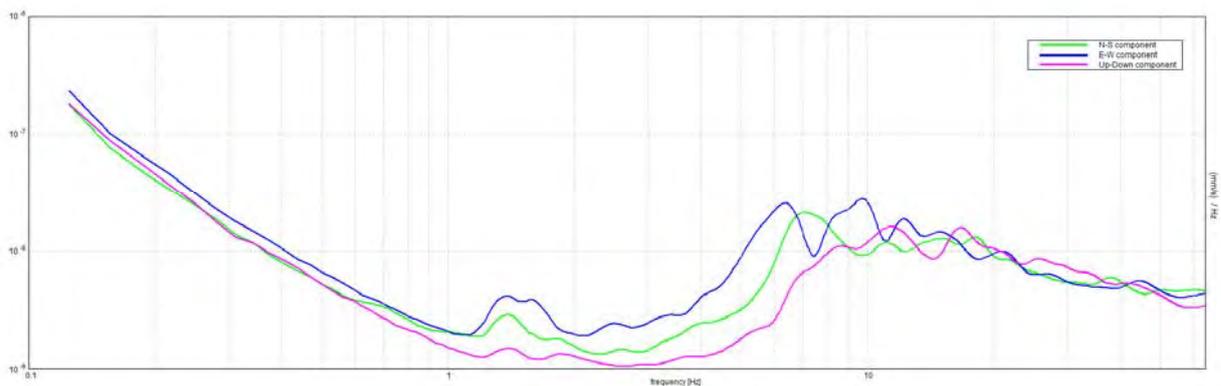
Analizzato 95% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

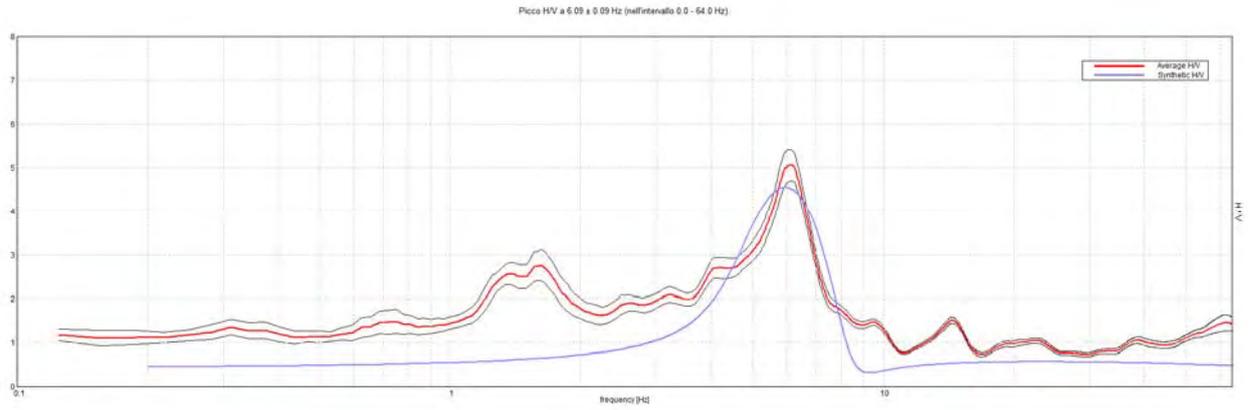
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.00	2.00	350
19.00	17.00	420
inf.	inf.	1100

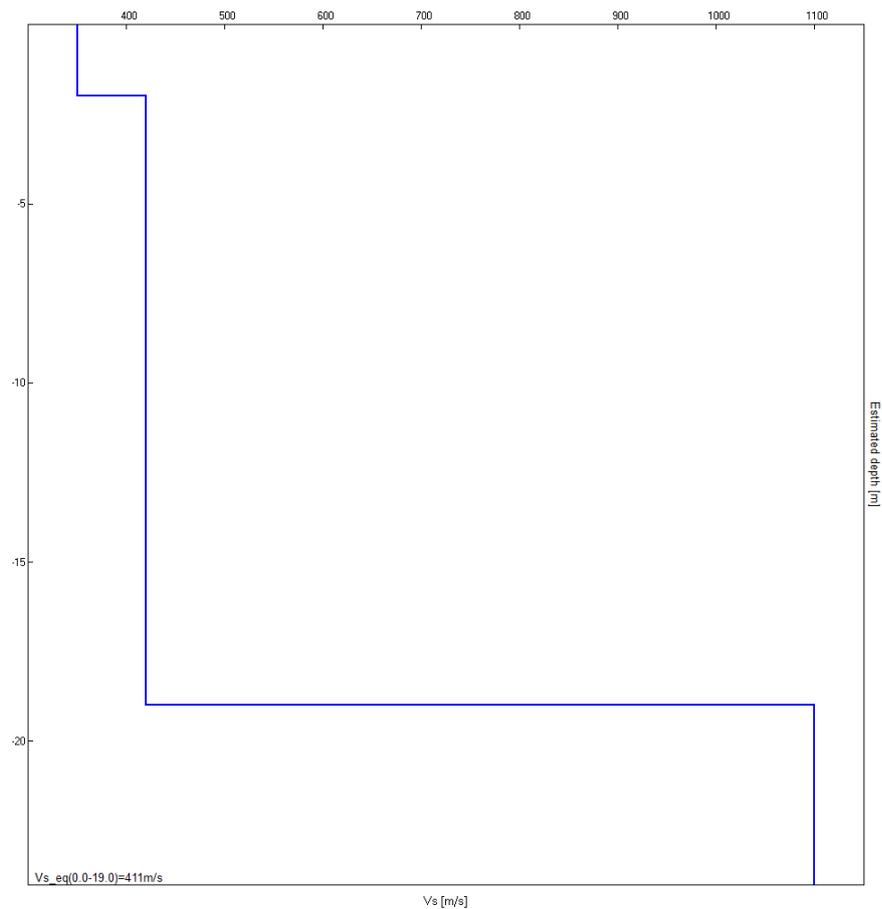


Figura 6 - Indagine HVSr1: Profilo verticale delle Vs.

J22111_10_14_CARRARA_TR, RAVALUNGA HVSR2

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 14/10/22 09:03:41 Fine registrazione: 14/10/22 09:23:40

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

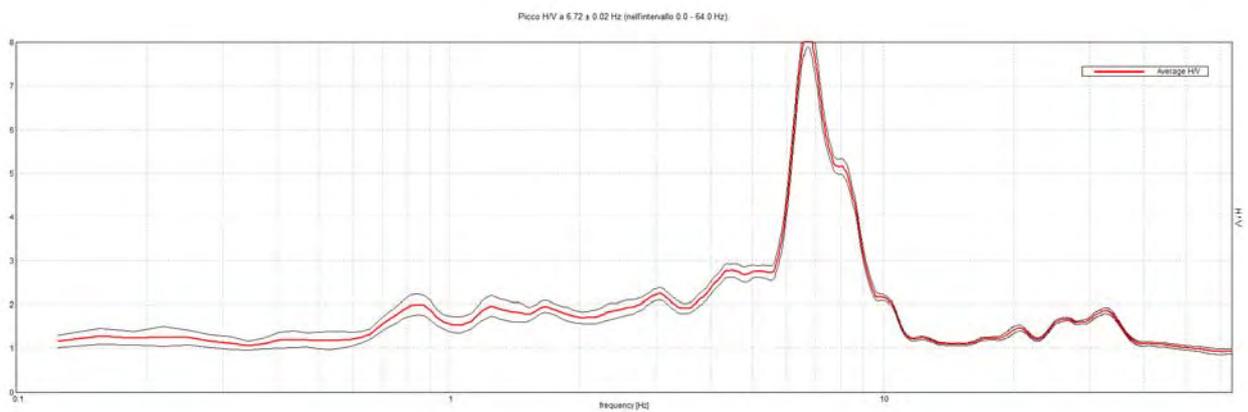
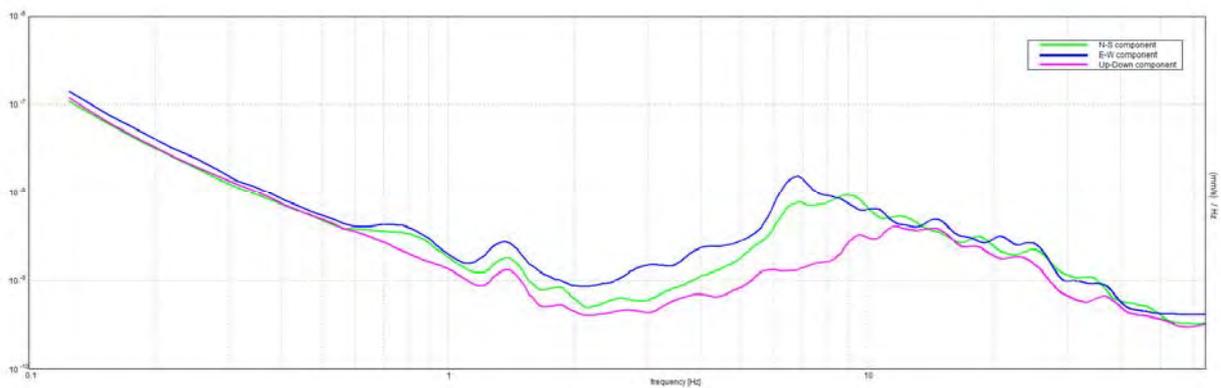
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

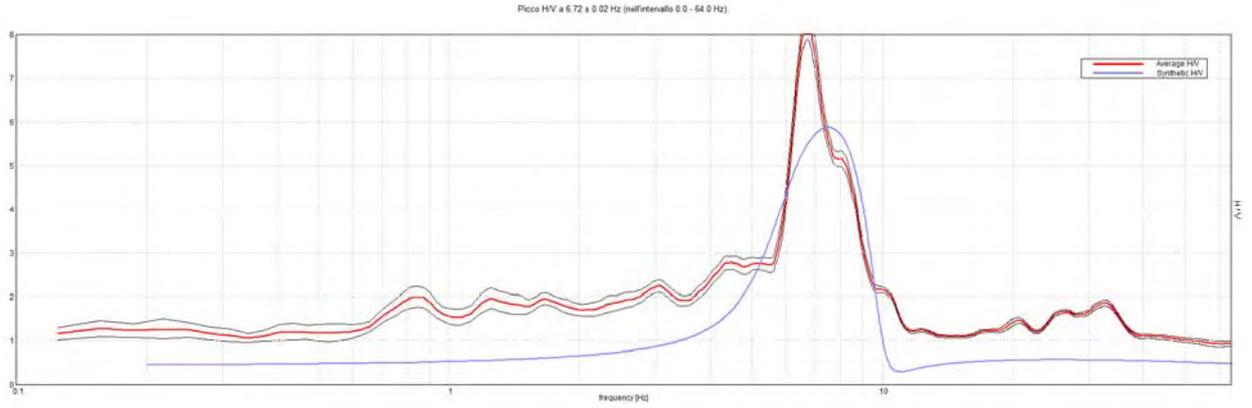
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.00	2.00	350
16.00	14.00	420
inf.	inf.	1150

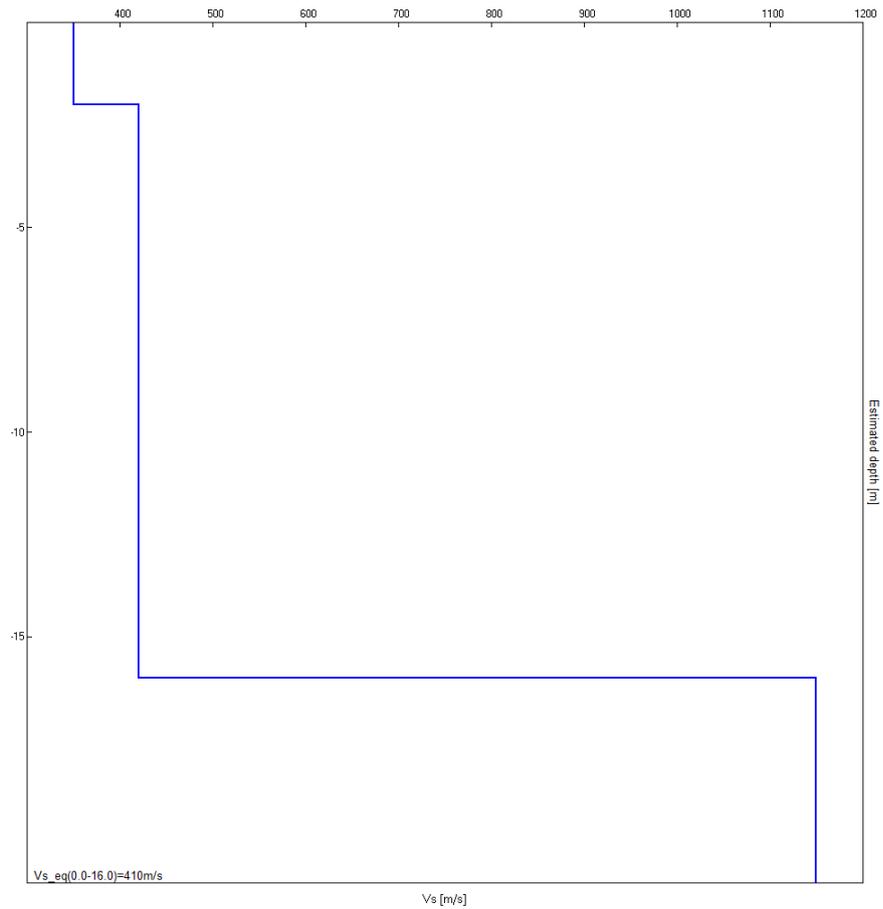


Figura 7 - Indagine HVSR2: Profilo verticale delle Vs.

J22111_10_14_CARRARA_TR, RAVALUNGA HVSR3

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 14/10/22 09:49:34 Fine registrazione: 14/10/22 10:09:33

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

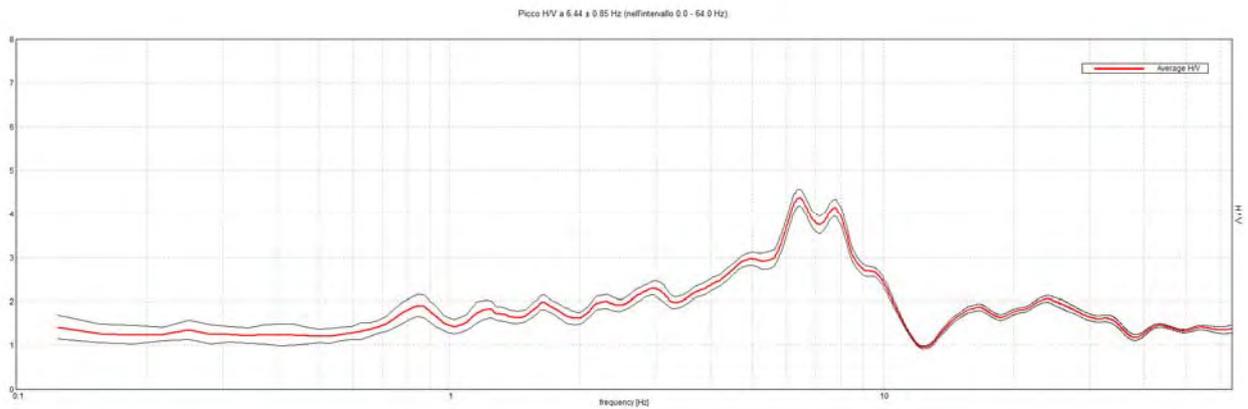
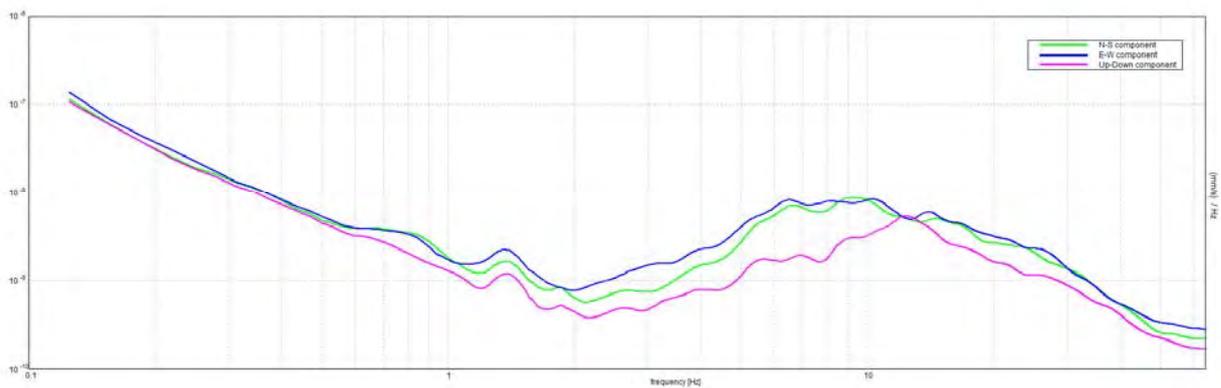
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

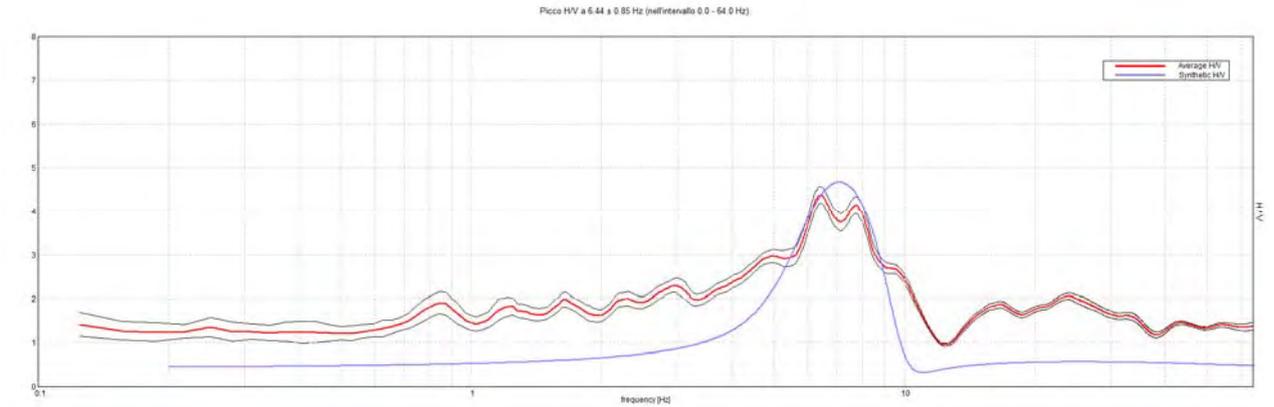
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.00	2.00	350
16.00	14.00	420
inf.	inf.	1100

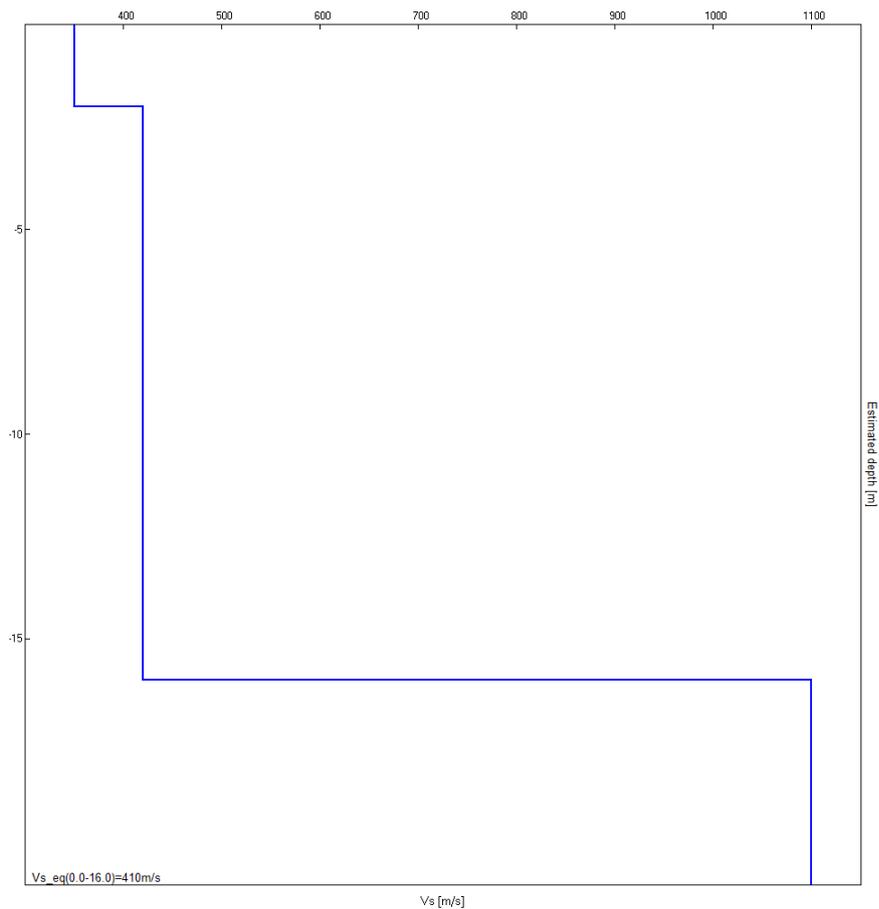


Figura 8 - Indagine HVSR3: Profilo verticale delle Vs.

J22111_10_14_CARRARA_TR, RAVALUNGA HVSR4

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 14/10/22 10:16:11 Fine registrazione: 14/10/22 10:36:10

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

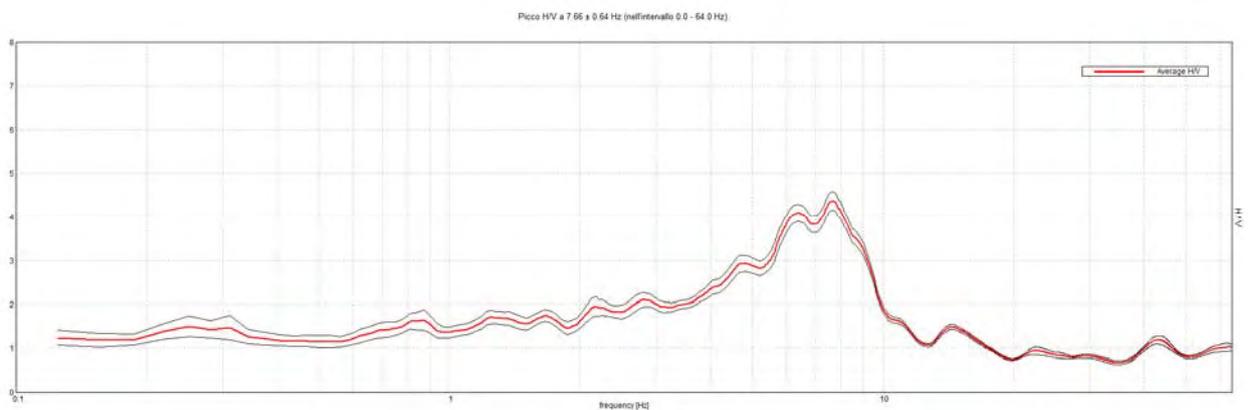
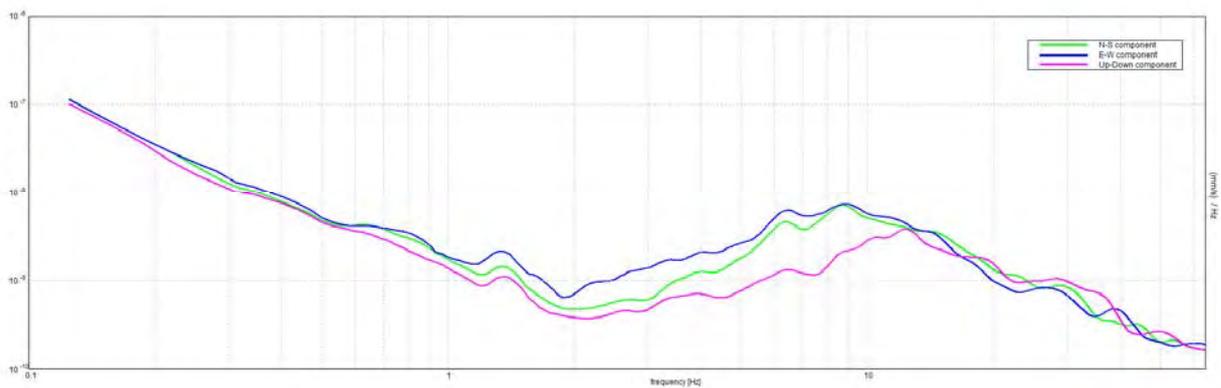
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

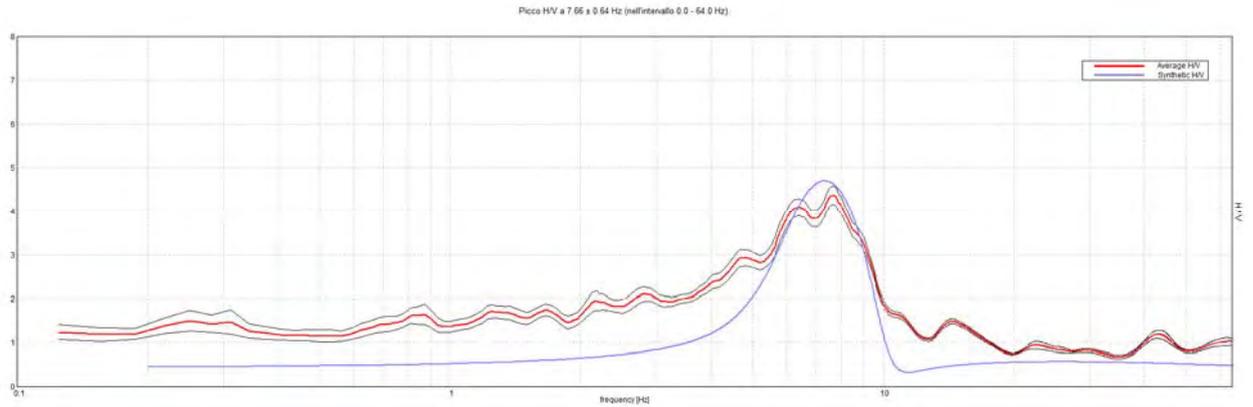
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.00	2.00	350
15.50	13.50	420
inf.	inf.	1100

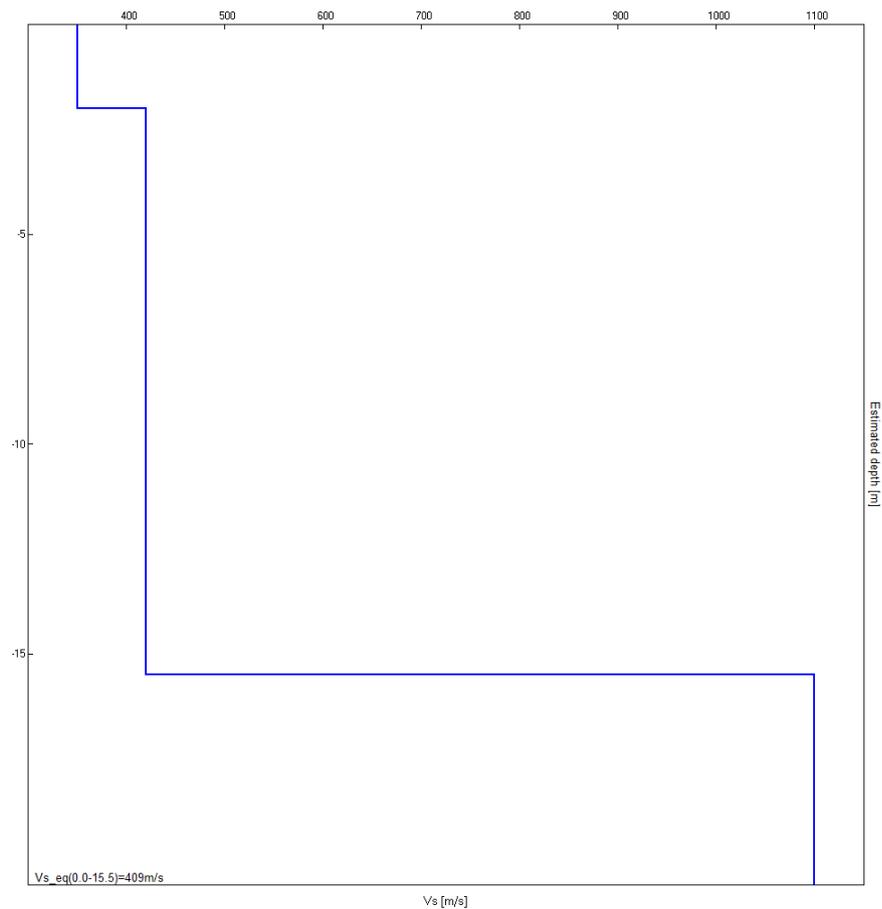


Figura 9 - Indagine HVSR4: Profilo verticale delle Vs.

J22111_10_14_CARRARA_TR, RAVALUNGA HVSR5

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 14/10/22 11:01:06 Fine registrazione: 14/10/22 11:21:05

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

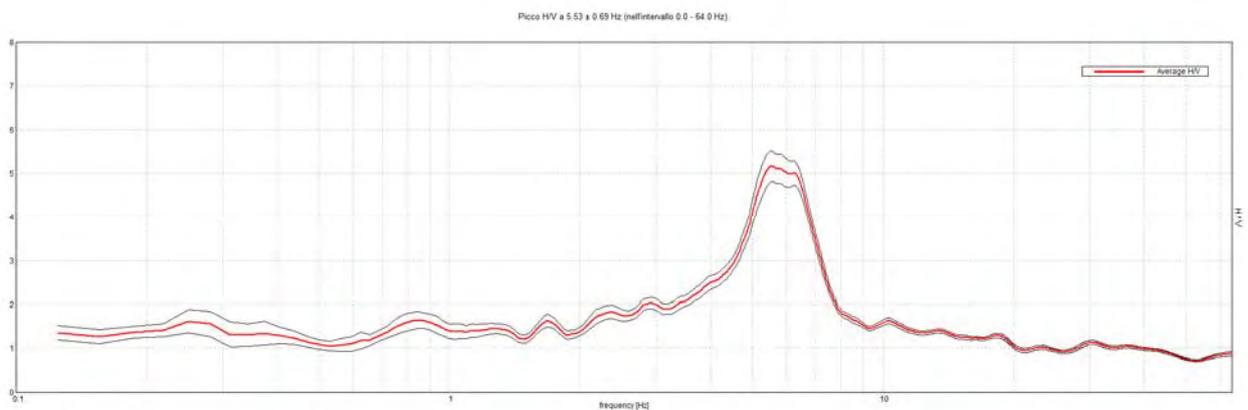
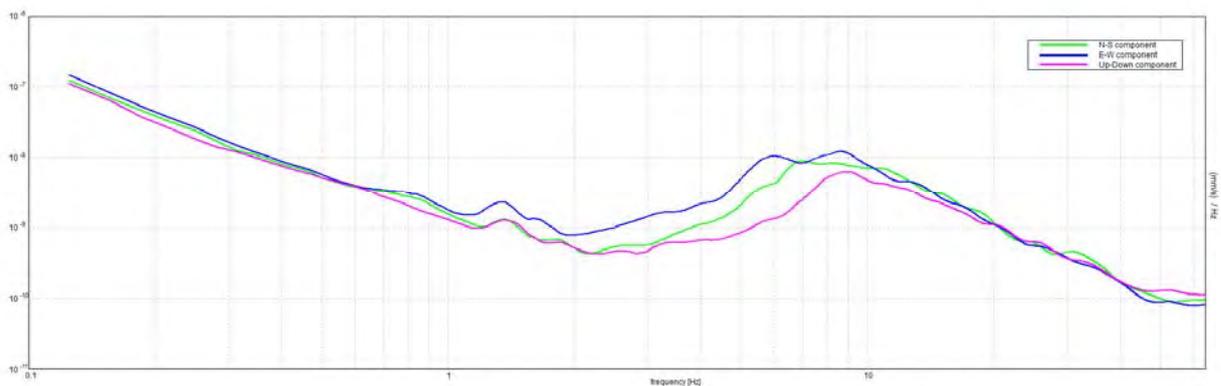
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

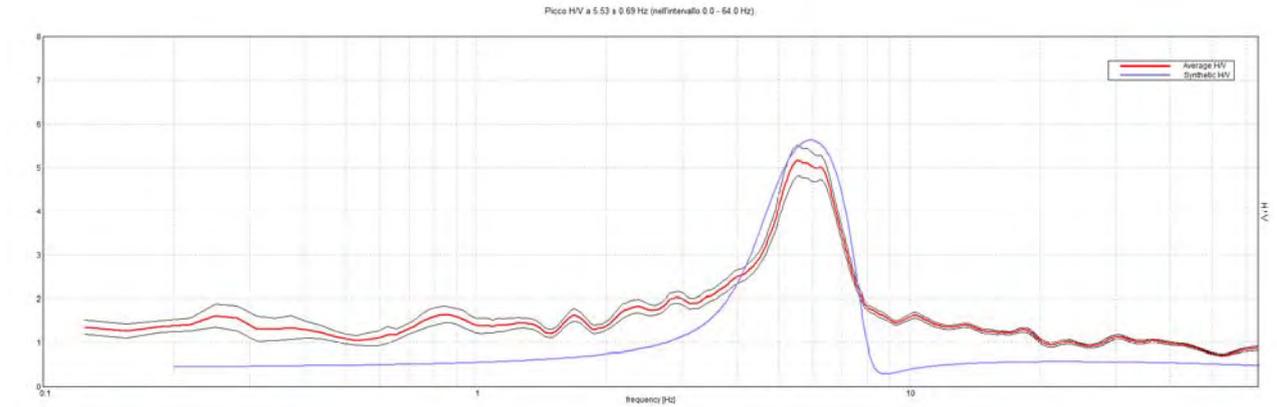
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.00	2.00	350
20.00	18.00	420
inf.	inf.	1150

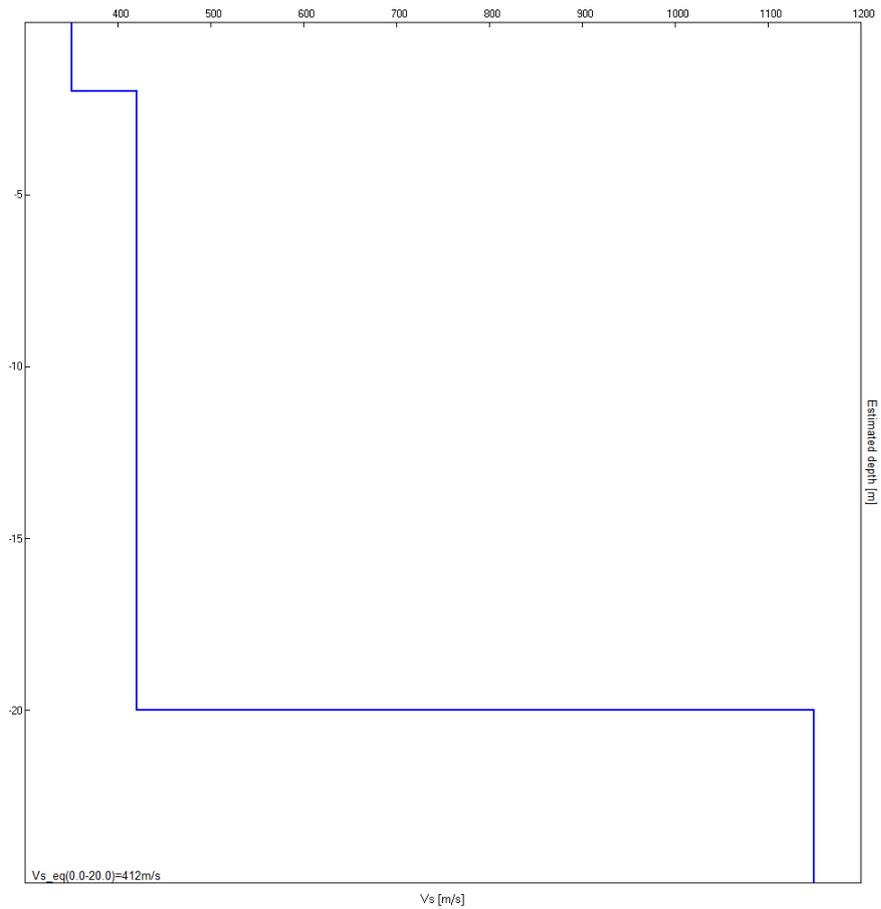
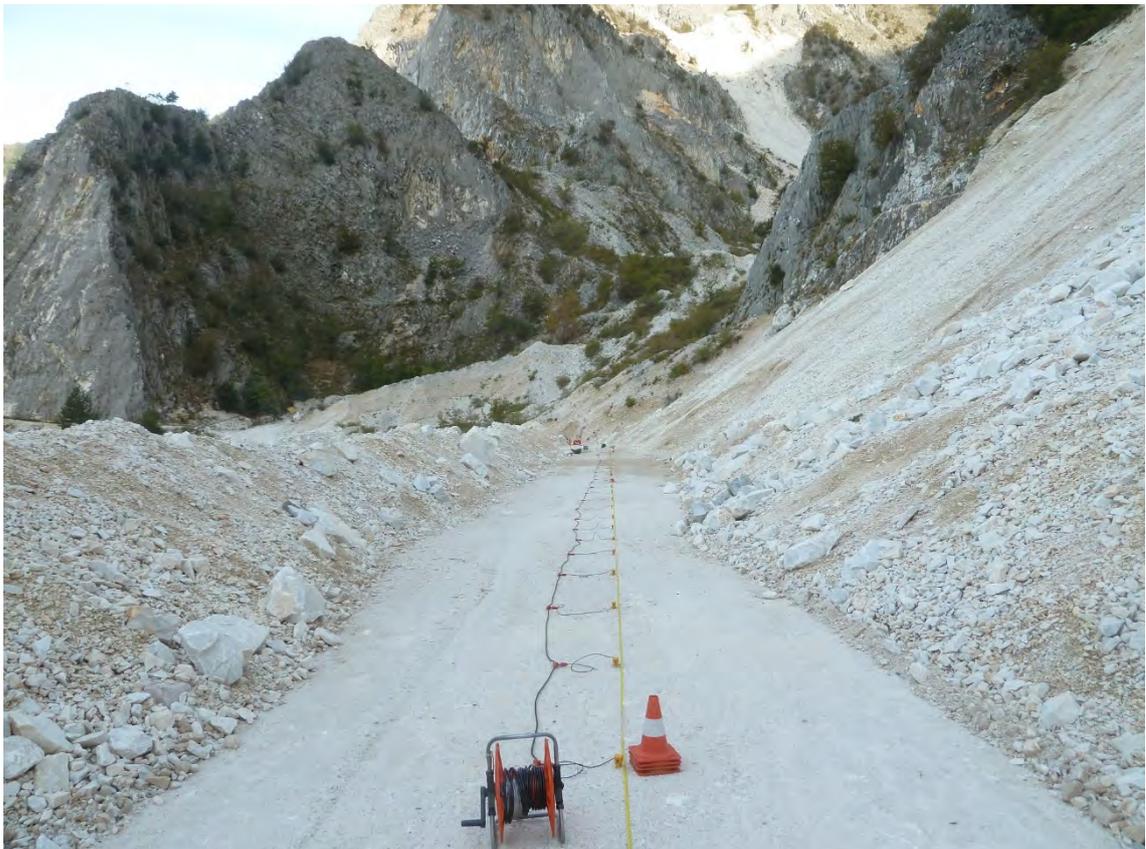


Figura 10 - Indagine HVSR5: Profilo verticale delle Vs.



Indagine **MASW1** - Documentazione fotografica



Indagine **MASW2** - Documentazione fotografica



Indagine HVS1 - Documentazione fotografica



Indagine HVS2 - Documentazione fotografica



Indagine HVS3 - Documentazione fotografica



Indagine HVS4 - Documentazione fotografica



Indagine HVSr5 - Documentazione fotografica



OGGETTO:		INDAGINI GEOFISICHE PER LA STIMA DELLO SPESSORE DEL DETRITO DI CAVA SOVRASTANTE L'AMMASSO ROCCIOSO	
TIPOLOGIA:	MASW HVS	DATA INDAGINE:	
		Ottobre 2022	
LOCALITA':			
COMUNE DI CARRARA (MS) BACINO MARMIFERO DI TORANO CAVA n.37 FOSSAGRANDE			
COMMITTENTE:			
GMC S.P.A.			

codice documento:	j22110.10.11_crr.doc
versione	01
stato documento:	definitivo
autore:	a.benvenuti
revisione:	v.carnicelli
approvazione:	v.carnicelli
data:	Ottobre 2022

SOMMARIO

1	PREMESSA	2
2	TIPO D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	2
2.1	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	3
2.2	INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE	3
2.3	INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE	4
3	ANALISI DEI RISULTATI	6

1 PREMESSA

Su incarico della Ditta GMC S.P.A. è stata eseguita, nel mese di Ottobre 2022, una campagna di indagini geofisiche nel Comune di Carrara (MS), nel bacino marmifero di Torano, presso la Cava n.37 denominata Fossagrande, finalizzata a valutare lo spessore dell'ammasso detritico sovrastante l'ammasso roccioso in corrispondenza del ravaneto situato a monte dell'area attualmente in coltivazione.

Per la corretta ubicazione delle indagini è stato effettuato un rilievo plano-altimetrico ad hoc realizzato con GPS Leica RX1250, l'indicazione delle stesse è riportata nelle tavole allegate in cui sono state posizionate su base cartografica fornita dalla Committenza e su base CTR - Fonte dei dati Regione Toscana: dataset "Ortofotocarte scala 1:2.000" OFC2K: Foglio 22D13.

2 TIPO D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Per la ricostruzione del profilo verticale di velocità delle onde S è stata eseguita una prospezione in sismica attiva mediante la tecnica MASW ("Multichannel Analysis of Surface Waves") in onde di Rayleigh.

In prossimità dell'indagine MASW è stata eseguita una misura in sismica passiva a stazione singola denominata in seguito HVSR1.

In questo modo è stato possibile, correlando i risultati delle indagini in sismica attiva con quelli ottenuti con le acquisizioni in sismica passiva, ottenere profili sufficientemente robusti e vincolati di V_s (Dal Moro, 2012; 2014; 2015b).

L'analisi in sismica attiva effettuata ha permesso di ricavare un valore di V_s caratteristico dei primi livelli di sottosuolo e attribuibile al detrito di cava.

Per il calcolo degli spessori e per valutare la profondità dell'ammasso roccioso sono state eseguite ulteriori 5 acquisizioni in sismica passiva a stazione singola elaborate attraverso la metodologia basata sulla tecnica di Nakamura e sul rapporto spettrale H/V (HVSR) al fine di individuare, sulle singole verticali di misura, il picco del rapporto H/V generato dal passaggio tra il detrito e il substrato roccioso corrispondente alla frequenza di risonanza sito specifica.

Le misure sono state eseguite tenendo una distanza grossomodo costante tra loro e seguendo il più possibile un allineamento secondo la linea di massima pendenza dell'ammasso detritico, fino a raggiungere i punti morfologicamente più alti in funzione dello stato dei luoghi e dell'accessibilità agli stessi.

Il calcolo degli spessori è stato poi eseguito utilizzando la relazione semplificata che lega la frequenza di risonanza f alla velocità medie delle onde di taglio (V_s) che caratterizzano lo strato che risuona e allo spessore dello strato stesso:

$$f = V_s / 4H$$

I successivi calcoli effettuati sulle singole verticali di misura sono stati effettuati attraverso l'assunzione, seppur semplicistica, che il valore di V_s dei primi livelli di sottosuolo, ricavato attraverso le indagini MASW / HVSR4, rappresentasse il valore medio caratteristico del corpo detritico nel suo insieme.

La metodologia HVSR è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazioni esterne diverse dal microtremore ambientale che in natura esiste ovunque.

2.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per l'indagine MASW è costituita da:

- un sistema di acquisizione dati: costituito da un sismografo P.A.S.I. modello GEA24; un notebook PC Windows 7 con software di acquisizione P.A.S.I.;
- un sistema di energizzazione ad impatto verticale ed orizzontale: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 kg battente verticalmente su piastra quadrata in teflon®, ovvero battente orizzontalmente su traversina in legno, posta direttamente sul piano di campagna per la generazione di onde sismiche compressionali e di taglio, in grado di produrre onde superficiali ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali;
- un sistema di trigger: consistente in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta.
- un sistema di ricezione costituito da 12 geofoni verticali monocomponente con frequenza propria di 4.5 Hz

La strumentazione utilizzata per le misure dei microtremori ambientali, elaborate attraverso la tecnica HVSR, è costituita da un tromografo digitale (Tromino® di MoHo srl) dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e UP-DOWN.

2.2 INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio V_s , sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o, detto in maniera equivalente, la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo; onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente allineata all'array geofonico) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°, sia della topografia sia

delle diverse discontinuità elastiche.

La metodologia utilizzata consiste in quattro fasi:

- acquisizione dei dati di campagna energizzando a più riprese e alternativamente ai due estremi dello stendimento geofonico;
- determinazione dello spettro di velocità sperimentale dal campo di moto acquisito nel dominio spazio-tempo lungo lo stendimento;
- calcolo della curva di dispersione attraverso il picking o la modellazione diretta;
- inversione della curva di dispersione per l'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s .

L'elaborazione è stata eseguita tramite il software winMASW 2019 Academy (Eliosoft).

Le acquisizioni sono state eseguite secondo le seguenti configurazioni spaziali e temporali:

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA MASW			
Orientazione	N180 (N-S)		
Coordinate GB geofono G1	1591458.4	4884263.9	952.41
Coordinate GB geofono G12	1591458.4	4884242.2	953.91
Lunghezza stendimento	22 m		
Numero Geofoni	12		
Distanza intergeofonica	2 m		
Numero punti di energizzazione da ciascun estremo	G1:2; G12: 3		
Sorgenti	G1: 1 m, 2 m; G12: 2 m, 3 m, 5 m		
Durata acquisizione	1 s		
Intervallo di campionamento	0.5 ms		

Per valutare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) sono state eseguite acquisizioni coniugate agli estremi dello stendimento.

Durante il processo di elaborazione, al fine di minimizzare le possibili soluzioni e cercare la più sensata coerenza tra lo spettro di velocità sperimentale e le curve di dispersione teoriche che possono generare tale spettro, ci si è avvalsi dei dati acquisiti con l'acquisizione in sismica passiva eseguita in prossimità dello stendimento MASW (HVS1).

2.3 INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il rumore sismico, generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, è presente ovunque sulla superficie terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma un ruolo fondamentale nella produzione dei microtremori è rivestito dalle onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la

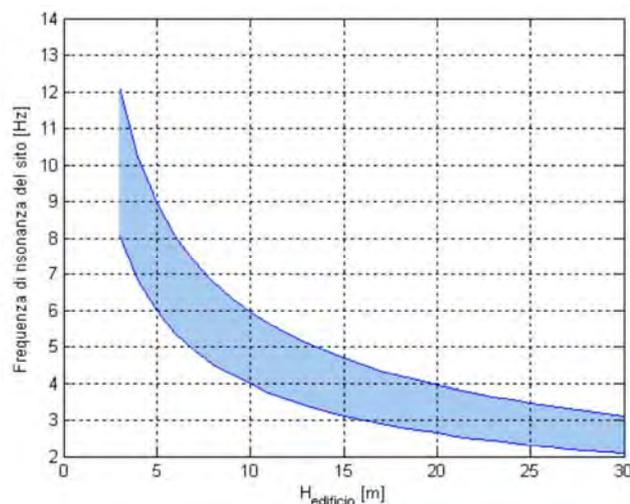
tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970). La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la velocità media delle onde di taglio V_s
- la stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri.

Per quanto concerne il fenomeno della "doppia risonanza" (cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico, così come trasmesso in superficie, e quelle dei manufatti ivi edificati) è noto che, dal punto di vista empirico, la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza.

Nella figura seguente (tratta da Masi et al., 2007) si riporta, a titolo esemplificativo, una possibile relazione tra altezza di un edificio in c.a. e frequenza di risonanza di sito. La fascia azzurra indica l'area più vulnerabile dal punto di vista dei fenomeni di doppia risonanza.



La quantificazione della frequenza caratteristica di sito attraverso misure dirette di microtremore sismico può quindi essere di estremo aiuto nella fase di progettazione.

Durante questa campagna geofisica sono state eseguite 6 misure di microtremore ambientale (acquisizioni in sismica passiva a stazione singola) secondo configurazione spaziale e temporale indicata nella tabella di pagina seguente.

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINI HVSR					
denominazione	Coordinate GB			Durata acquisizione	Frequenza di campionamento
HVSR1	1591459.8	4884253.8	952.87	20 min	128 Hz
HVSR2	1591481.5	4884256.4	964.65	20 min	128 Hz
HVSR3	1591494.4	4884257.2	971.06	20 min	128 Hz
HVSR4	1591519.4	4884256.1	987.55	20 min	128 Hz
HVSR5	1591537.3	4884248.9	1000.76	20 min	128 Hz
HVSR6	1591556.7	4884252.8	1012.14	20 min	128 Hz

Le misure dei microtremori ambientali, orientate secondo il Nord sono state effettuate con il tromografo digitale Tromino® di MoHo srl.

I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

I risultati ottenuti dall'esecuzione dall'indagine tromografica sono stati elaborati attraverso il software Grilla 8.0 (MoHo srl).

3 ANALISI DEI RISULTATI

Le prospezioni geofisiche eseguite per mezzo dell'analisi dell'indagine MASW e dell'acquisizione in sismica passiva ad essa limitrofa, hanno permesso di ricavare sia il modello medio di distribuzione della velocità delle onde "S" nel sottosuolo del sito indagato sia il parametro $V_{S,eq}$: il modello di sottosuolo in termini di V_s è stato ottenuto dal fit congiunto delle curve H/V dell'acquisizione HVSR1 e delle curve di dispersione ricavate dall'indagine MASW.

Queste, in buona misura, fanno risalire la stima dell'effetto di sito alle caratteristiche del profilo di velocità delle onde di taglio (V_s).

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

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

in cui

- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il profilo verticale delle Onde S, in corrispondenza dell'indagine MASW, ricavato mediante elaborazione dei dati di campagna è risultato il seguente:

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.50	2.50	300
23.50	21.00	460
inf.	inf.	1200

$$V_{s,eq}(0.0-23.5)=435\text{m/s}$$

Il profilo MASW individua una $V_{s,eq}$, riferita al piano di campagna, pari a **435 m/s**.

Relativamente all'indagine MASW, nella Fig. 2 sono riportati il sismogramma, lo spettro di velocità e il modello di dispersione mentre nella Fig.3 è riportato il profilo di V_s calcolato.

Dai risultati ottenuti, evidenziati nelle schede relative alle singole acquisizioni HVSR, è stata calcolata la profondità del bedrock relativamente ad ogni singola indagine HVSR; il modello di sottosuolo (come ricavato dall'elaborazione MASW) è stato semplificato in pochi sismostrati principali in modo da permettere una più immediata visualizzazione del passaggio tra la copertura e la roccia sottostante.

La copertura detritica è risultata costituita da uno spessore, quasi costante su tutte le verticali, compreso tra 21 e 24 metri circa con un livello iniziale dello spessore di circa 1 metro caratterizzato da una V_s di 300 m/s rispetto al corpo detritico sottostante a cui è stato attribuito il valore di V_s pari a 460 m/s. L'ammasso roccioso sottostante è invece caratterizzato da valori di V_s compresi tra 1150 e 1200 m/s.

Un'ulteriore semplificazione è stata fatta assumendo che le velocità rilevate dal fit congiunto dell'indagine MASW e della relativa acquisizione in sismica passiva, fossero caratteristiche anche di altri punti di misura effettuati esclusivamente con la stazione singola e a essi più vicini.

In particolare, relativamente alla copertura detritica, l'assunzione di una V_s comune su più verticali porta a considerare il detrito come omogeneo su tutte queste verticali quando invece, a causa delle differenti modalità di formazione dell'accumulo detritico, la copertura nei singoli punti potrebbe essere costituita da materiale a granulometria, stato di addensamento e, quindi, velocità sismiche differenti.

Le acquisizioni in sismica passiva individuano un picco più o meno evidente del rapporto H/V compreso tra le frequenze di 4.5 – 10 Hz con massimo a circa 6 Hz; questo picco, attribuibile al contrasto di impedenza generato dal passaggio copertura - ammasso roccioso, è stato utilizzato per modellare ogni singola indagine e per ricostruire il relativo profilo di V_s .

Il confronto tra le misure HVSR evidenzia come le verticali di misura presentino curve H/V simili come forma ma caratterizzate da rapporti H/V differenti; ad esempio la misura HVSR5 ha un rapporto H/V superiore a 7 mentre la misura HVSR4 ha un rapporto pari a 4.

La diversa altezza dei picchi può essere spiegata con il fatto che su alcune verticali vengono risentiti maggiormente i disturbi antropici (attività di cava) che eccitando le tre componenti del moto portano ad esaltare le curve del rapporto H/V. Questo fattore, unitamente alla costituzione stessa dell'ammasso detritico che, come detto, è stata necessariamente approssimata a costante (stessa V_s) su tutti i punti di misura, localmente, può essere invece formato da detrito disomogeneo con una componente granulometrica variabile che va da

elementi decimetrici a blocchi di marmo di grosse dimensioni può comportare un aumento del valore del rapporto H/V rispetto a quello che avrebbe presumibilmente avuto il picco naturale.

Le misure, benché effettuate in un'area di cava relativamente lontana dalle lavorazioni, sono affette da disturbi di carattere antropico che, pur non pregiudicandone il loro utilizzo ai fini dello scopo prefissato, portano alla visualizzazione di ulteriori picchi del rapporto H/V anche a frequenze maggiori.

A fronte delle precedenti considerazioni, dai risultati ottenuti, evidenziati nelle schede relative ad ogni singola indagine effettuata, le profondità del bedrock, ricostruita per ogni singola indagine HVSR, sono risultate le seguenti:

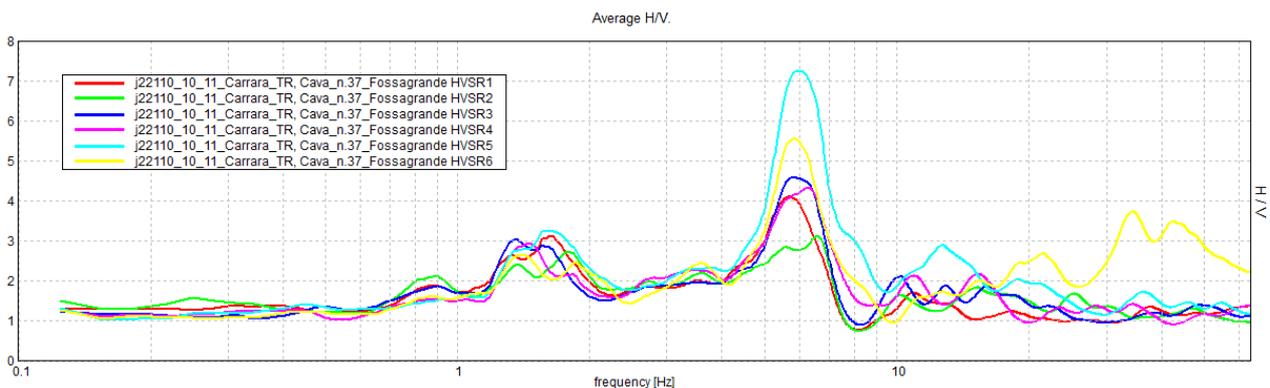
Indagine	Stima profondità bedrock
HVSR1	22 m
HVSR2	21 m
HVSR3	22 m
HVSR4	21 m
HVSR5	21 m
HVSR6	21.2 m

Per quanto detto in precedenza riguardo alle assunzioni fatte circa la costituzione dell'ammasso detritico, la ricostruzione dei profili di V_s ricavata per ogni singola acquisizione in sismica passiva, rappresenta una possibile soluzione della curva sperimentale misurata su quella verticale d'indagine.

È necessario inoltre precisare che, trattandosi di misure indirette, come per tutte le indagini geofisiche, i risultati ottenuti possono variare all'interno di un range pari a circa il 20%.

Nella figura sottostante è riportato il confronto tra le curve H/V sperimentali relative alle sei misure eseguite.

H/V SPERIMENTALE -CONFRONTO MISURE



Dal confronto tra le curve H/V è possibile evidenziare meglio come tutte le curve H/V presentino un picco in corrispondenza della frequenza di circa 6 Hz indicando come lo spessore della copertura sia pressoché costante.

Pisa, Ottobre 2022

P3 s.n.c.
P3 s.n.c.
 Piazza Martiri della Libertà, 22/23
 56127 PISA
 C.F./P.IVA 01923910507

Alto Benvenuti

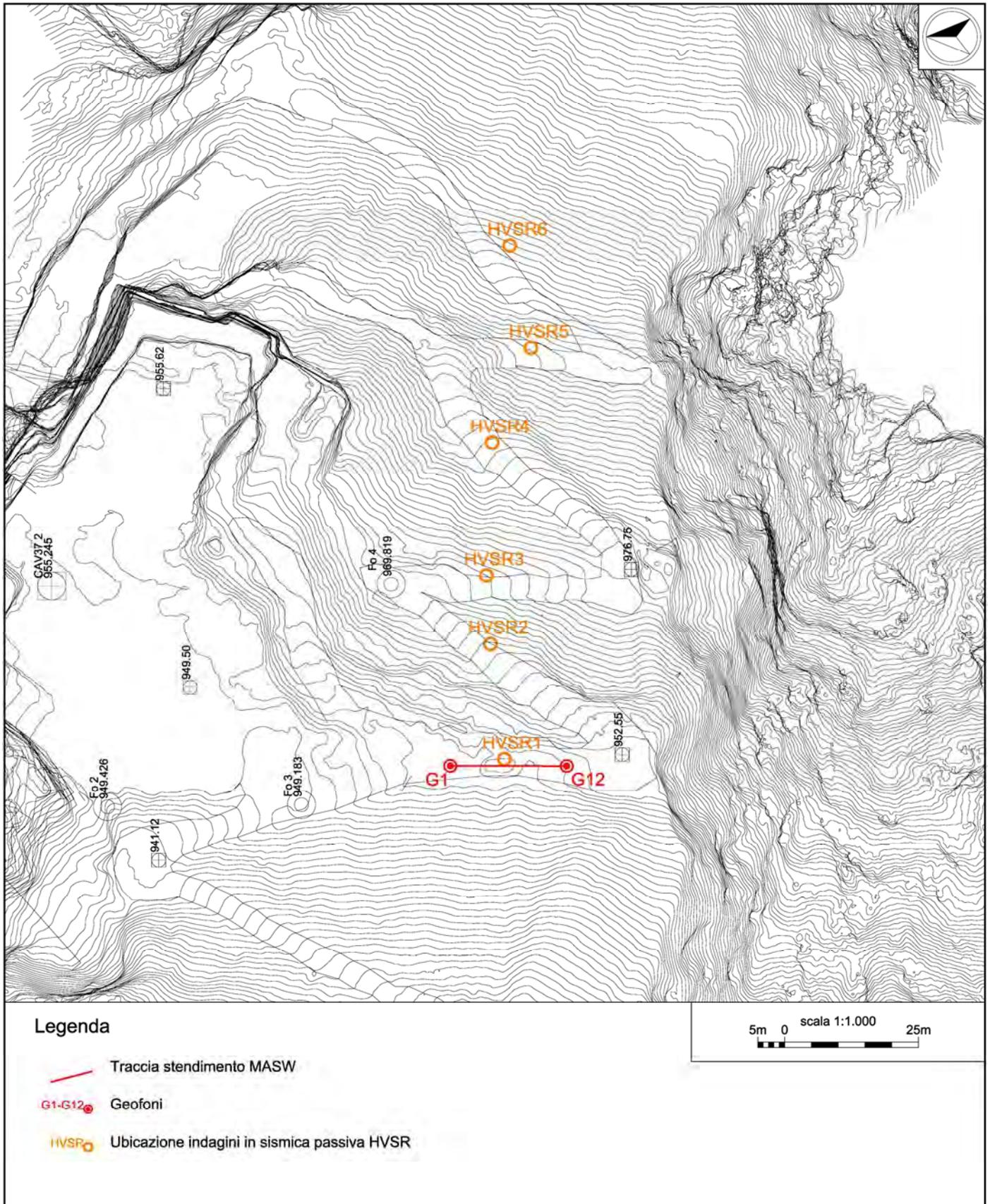


Figura 1a. Ubicazione indagini. Inquadramento generale su rilievo fornito dalla Committenza.

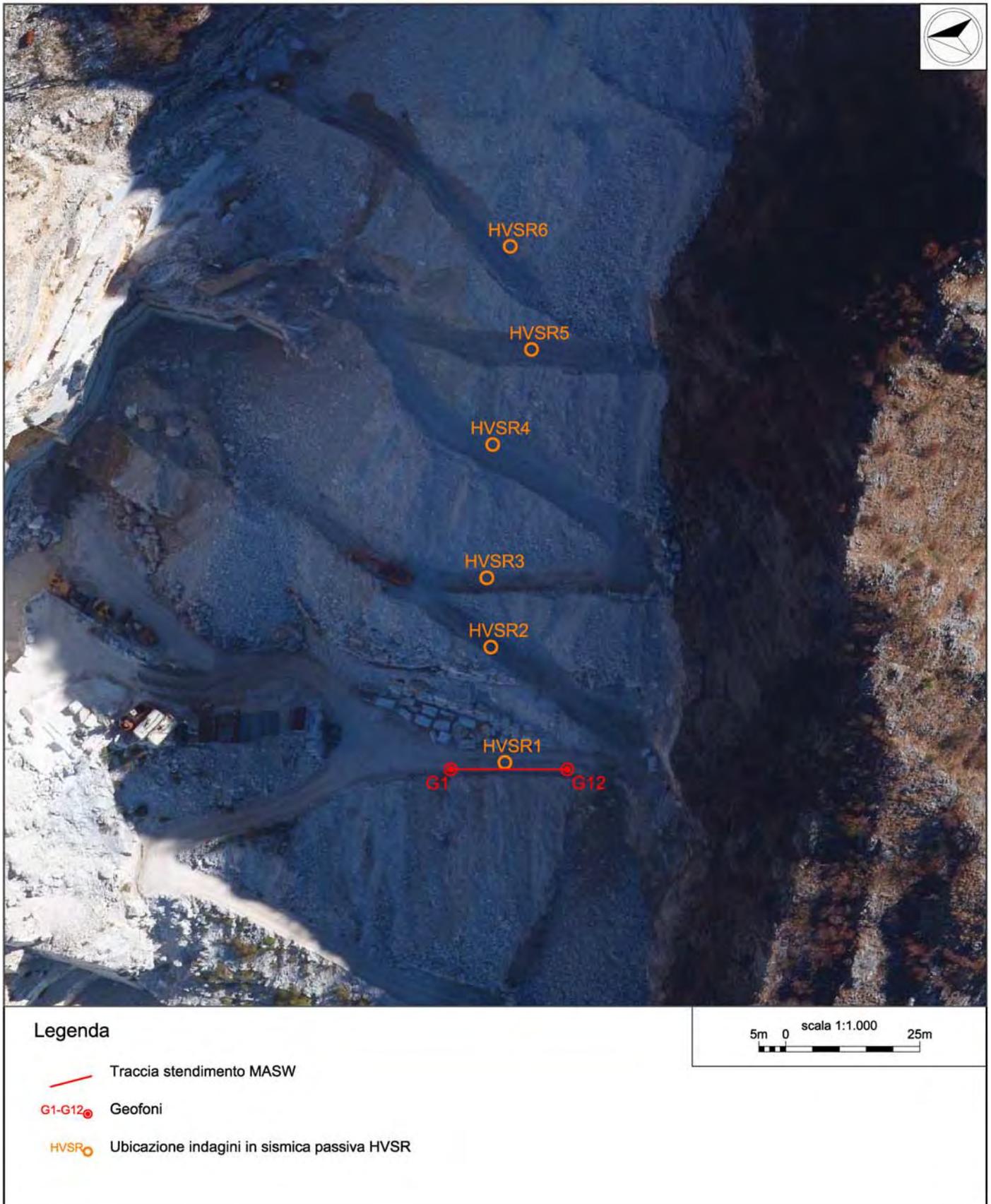


Figura 1b. Ubicazione indagini. Inquadramento generale su base ortofoto Regione Toscana.

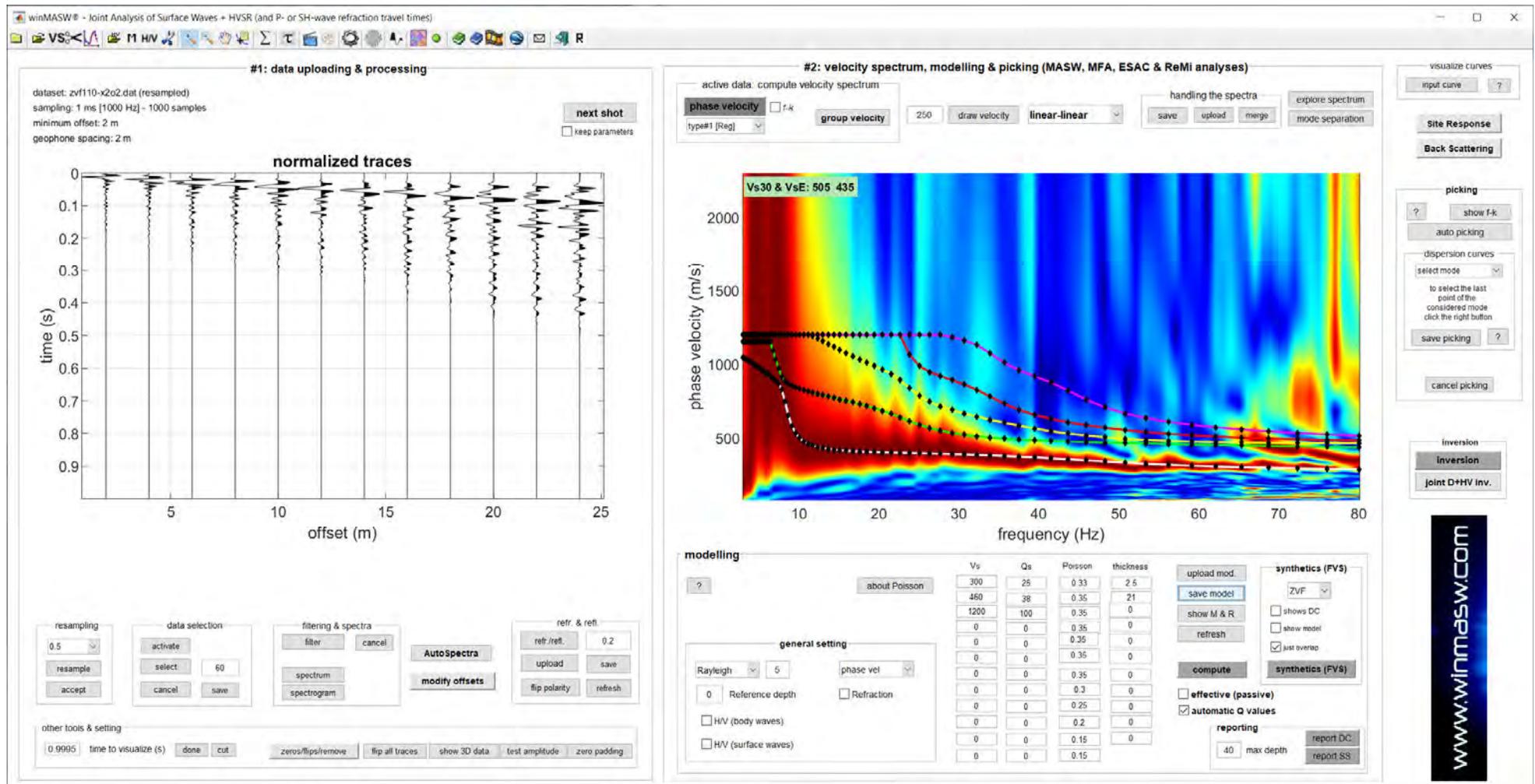


Figura 2 - Indagine MASW: sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione

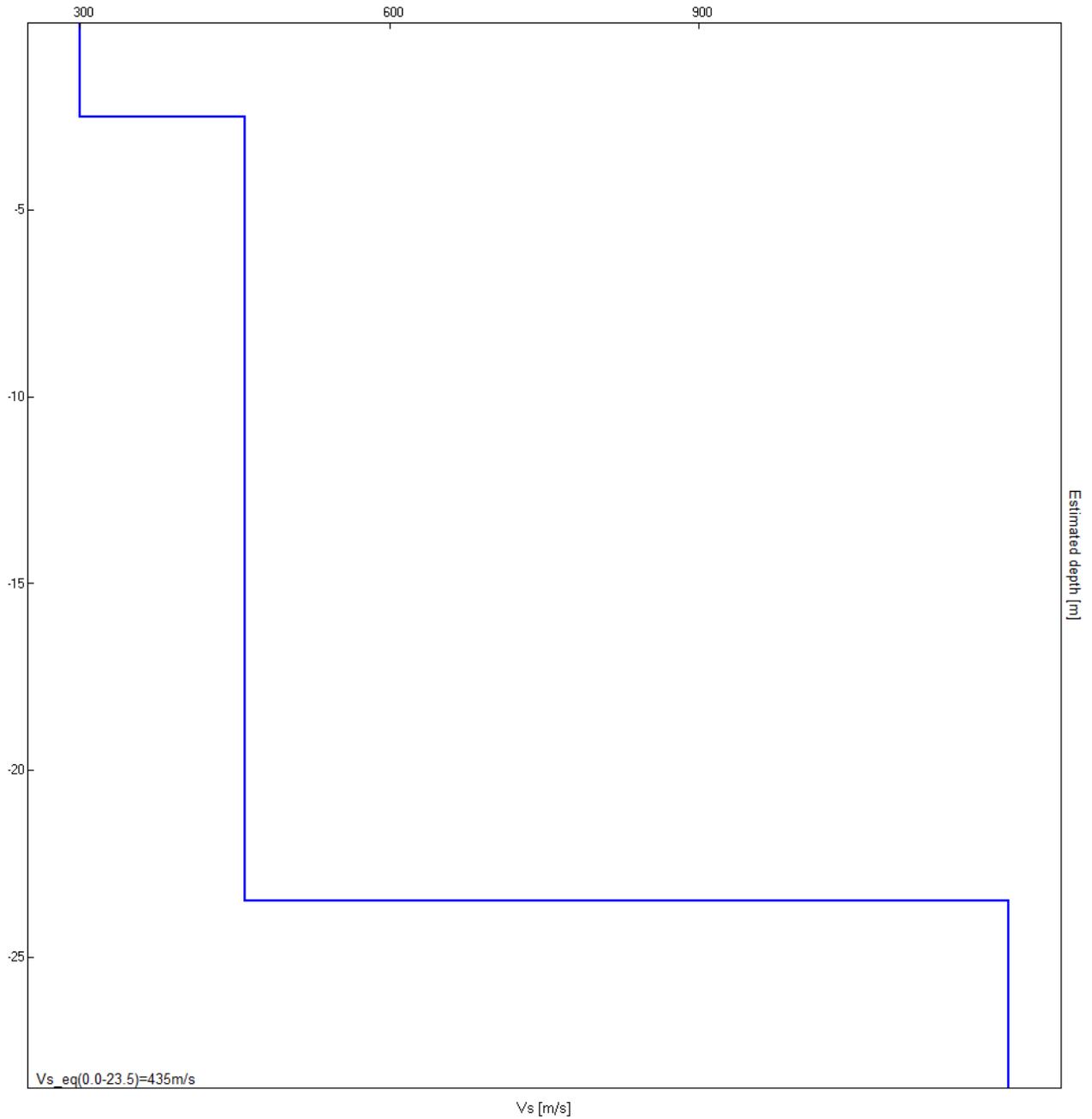


Figura 3 - Indagini MASW: Profilo verticale delle Vs.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.50	2.50	300
23.50	21.00	460
inf.	inf.	1200

$$Vs_{eq}(0.0-23.5)=435\text{m/s}$$

Seguono: schede indagini HVSR – Oltre al grafico della curva sperimentale H/V e agli spettri delle tre componenti del moto in velocità, si riportano, per ogni verticale di misura, a titolo esplicativo, il confronto fra curva sperimentale H/V e curva teorica relative al modello di sottosuolo proposto (e, conseguentemente, il profilo delle Vs calcolato su ciascuna verticale).

J22110_10_11_CARRARA_TR, CAVA_N.37_FOSSAGRANDE HVSR1

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 11/10/22 10:21:10 Fine registrazione: 11/10/22 10:41:09

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

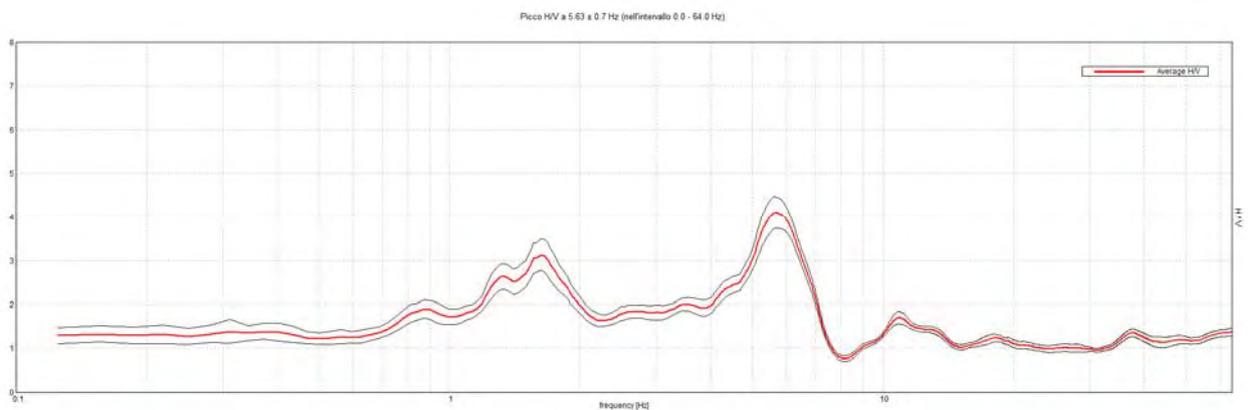
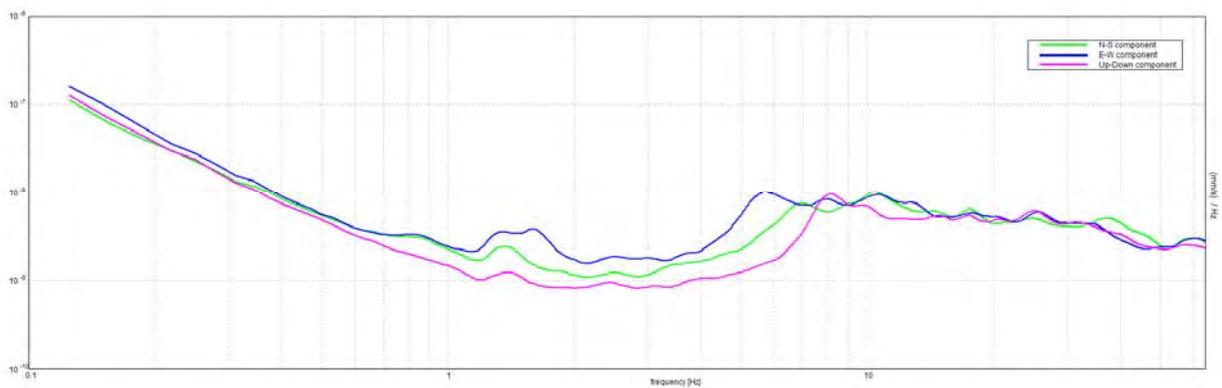
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

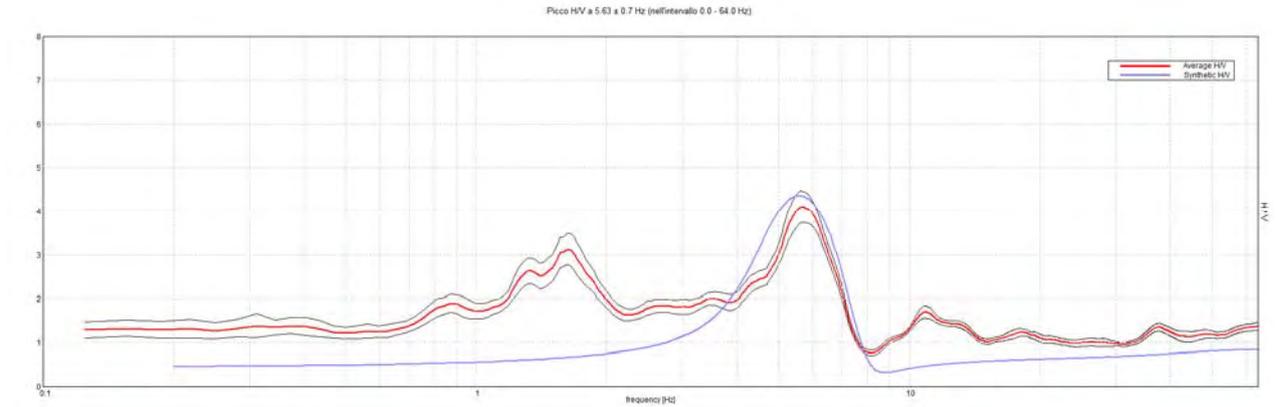
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1.00	1.00	300
22.00	21.00	460
inf.	inf.	1200

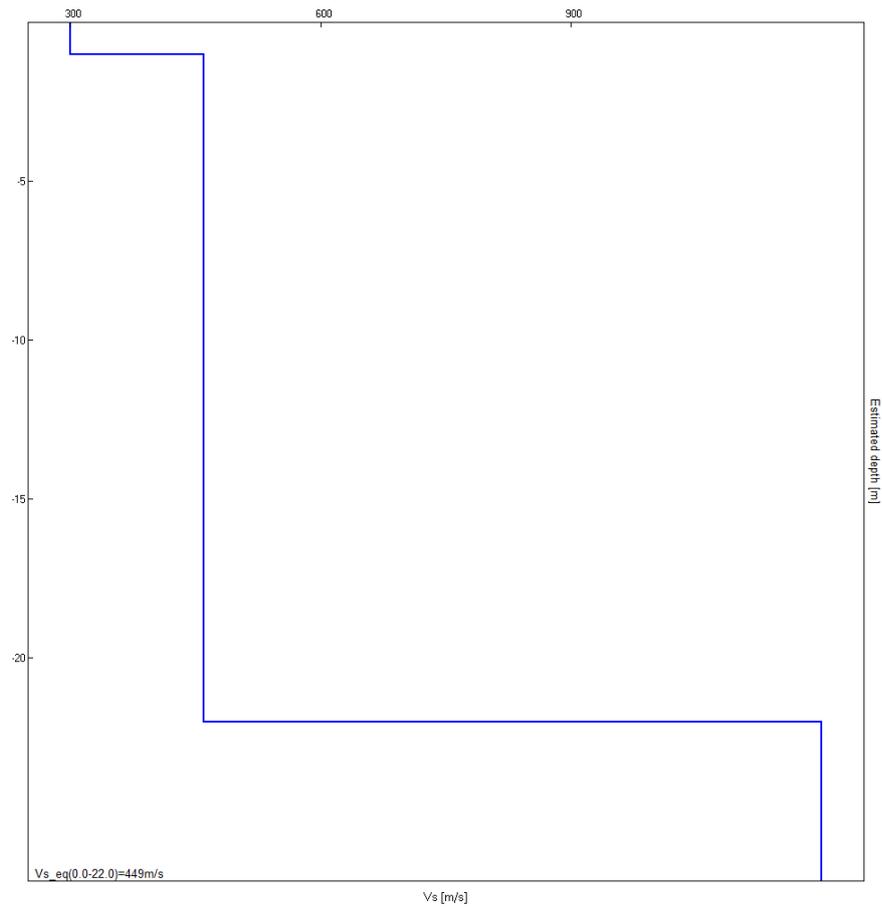


Figura 4 - Indagine HVSr1: Profilo verticale delle Vs.

J22110_10_14_CARRARA_TR, CAVA_N.37_FOSSAGRANDE HVSR2

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 14/10/22 08:18:23 Fine registrazione: 14/10/22 08:38:23

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

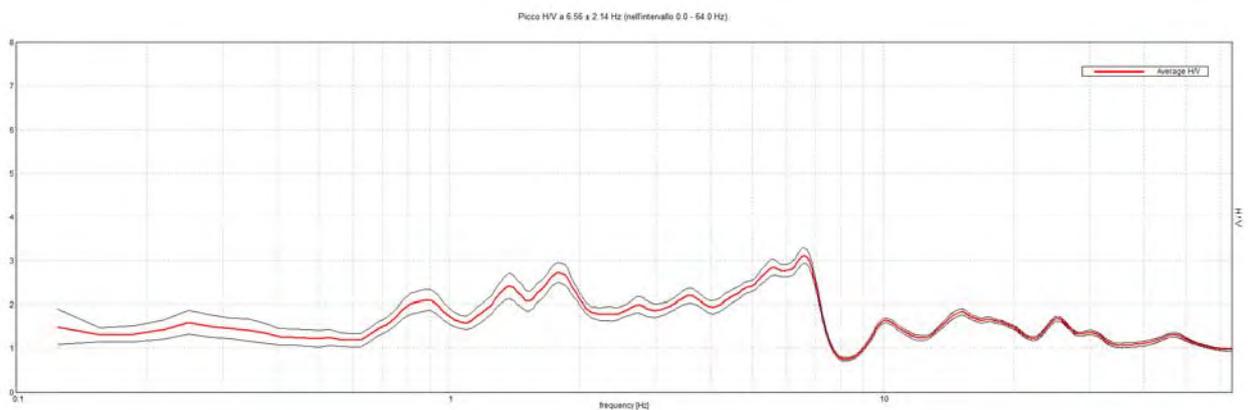
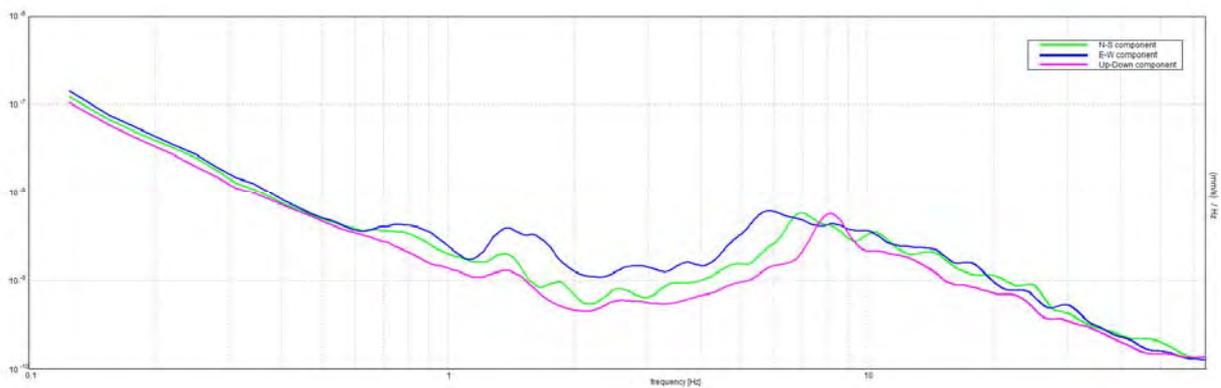
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

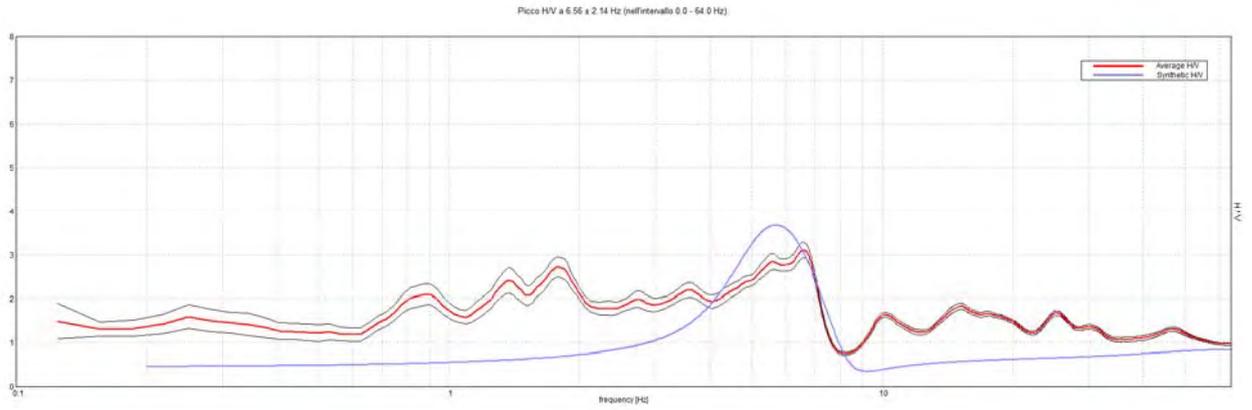
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1.00	1.00	300
21.00	20.00	460
inf.	inf.	1150

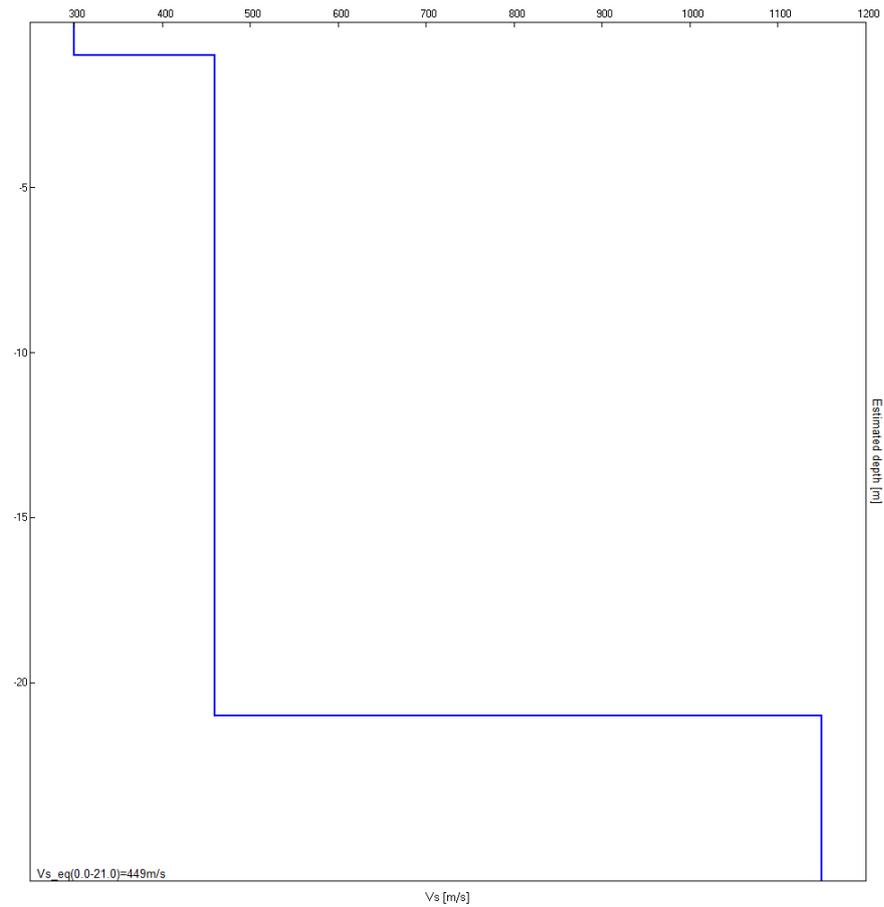


Figura 5 - Indagine HVSr2: Profilo verticale delle Vs.

J22110_10_11_CARRARA_TR, CAVA_N.37_FOSSAGRANDE HVSR3

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 11/10/22 11:17:27 Fine registrazione: 11/10/22 11:37:27

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

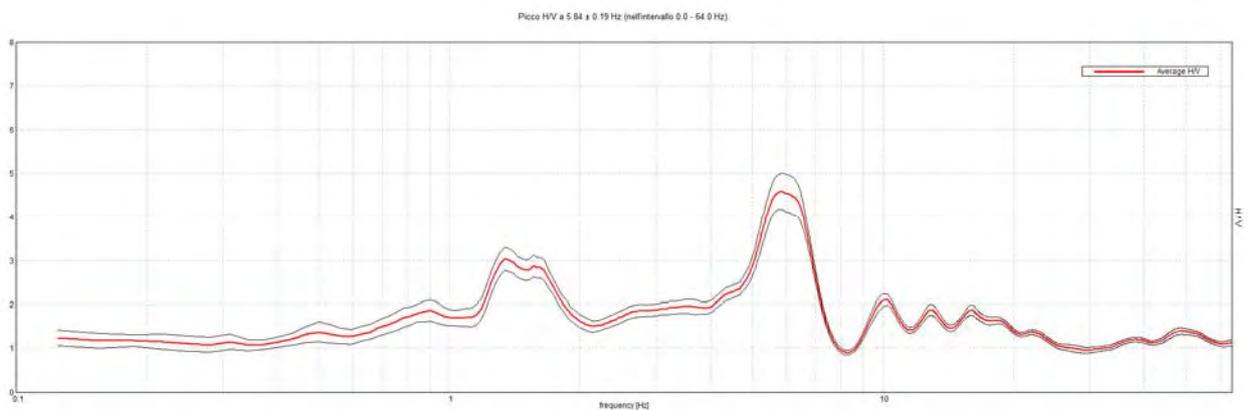
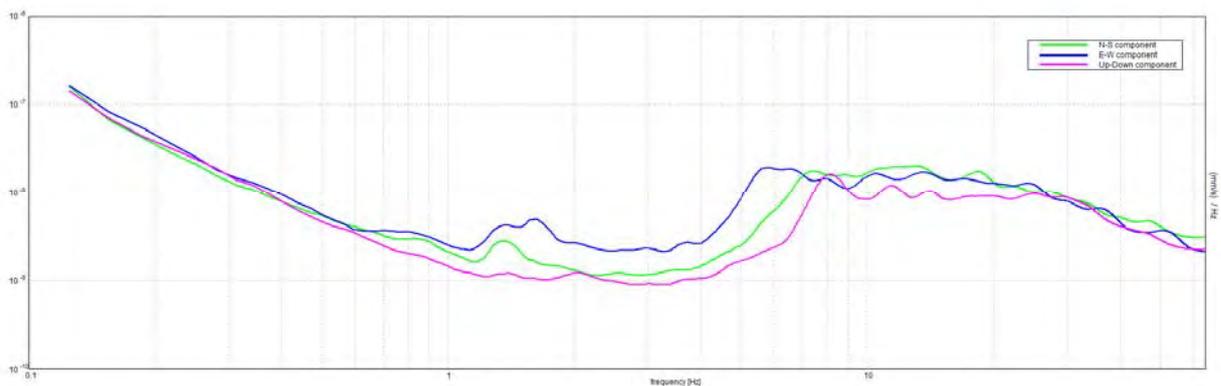
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

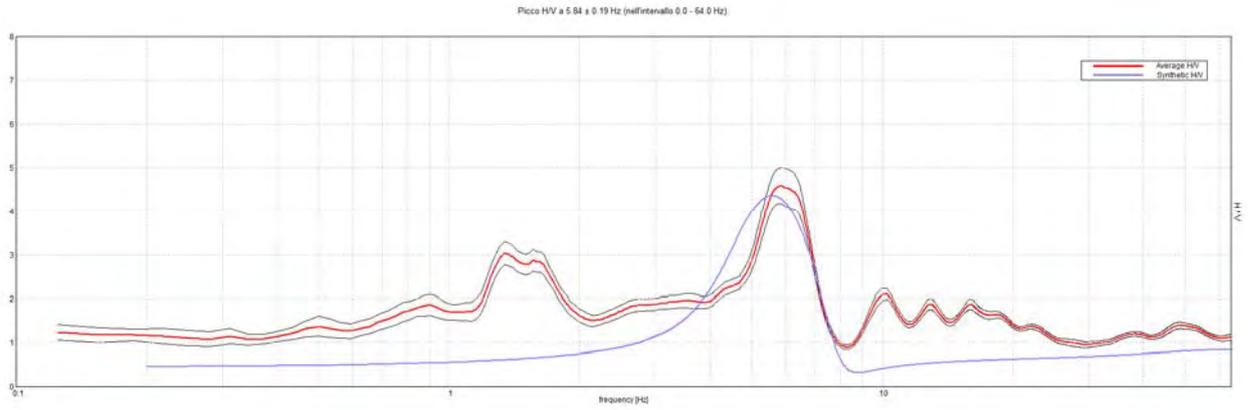
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1.00	1.00	300
22.00	21.00	460
inf.	inf.	1200

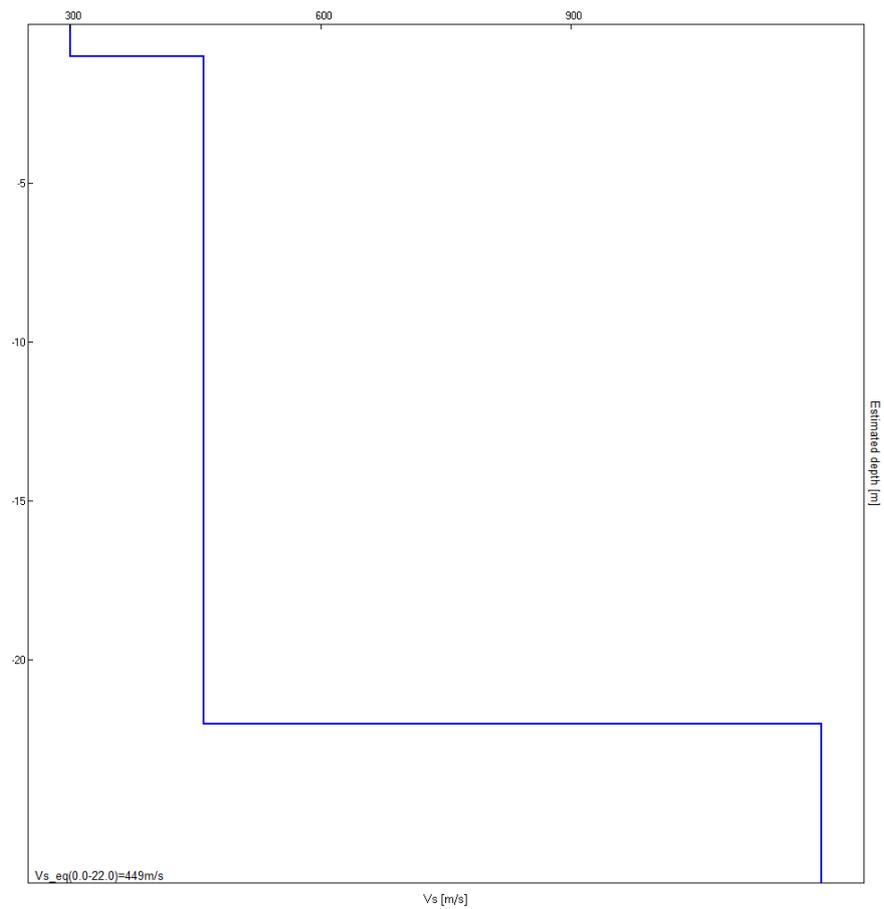


Figura 6 - Indagine HVSR3: Profilo verticale delle Vs.

J22110_10_11_CARRARA_TR, CAVA_N.37_FOSSAGRANDE HVSR4

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 11/10/22 11:45:31 Fine registrazione: 11/10/22 12:05:30

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

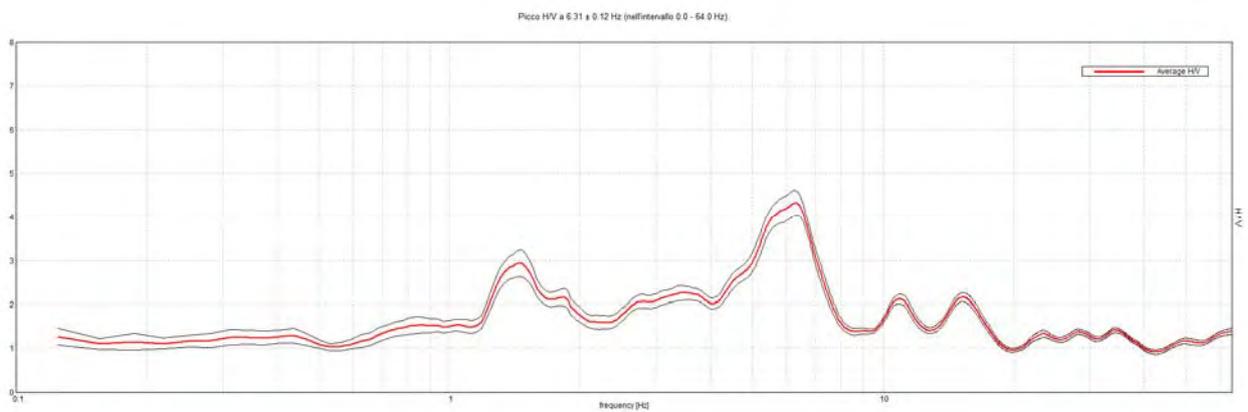
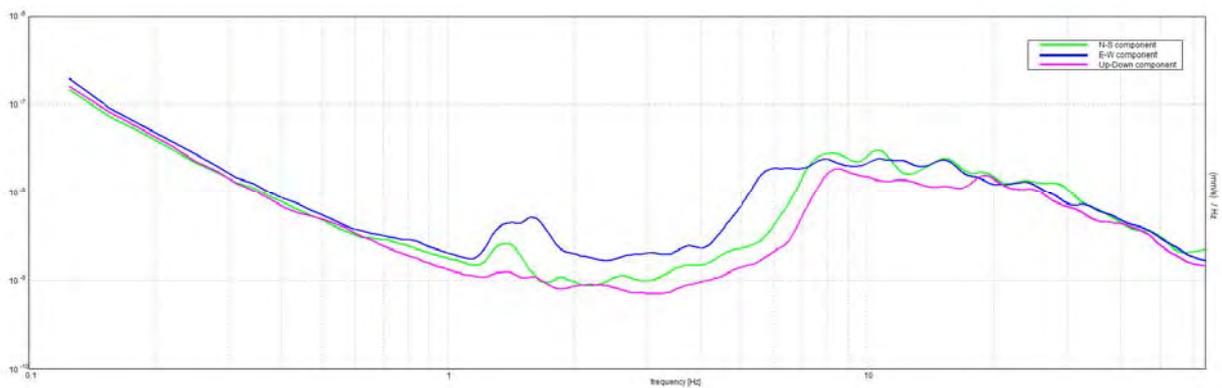
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

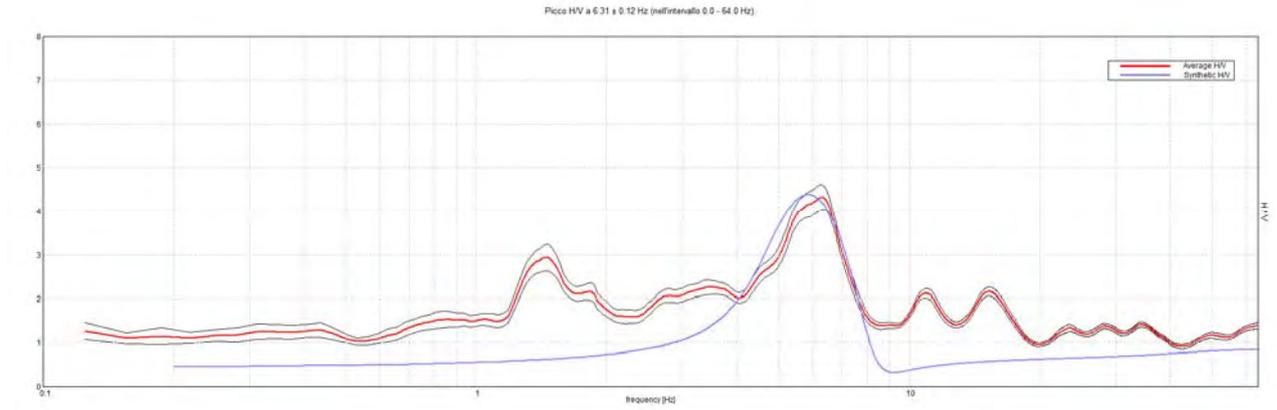
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1.00	1.00	300
21.00	20.00	460
inf.	inf.	1200

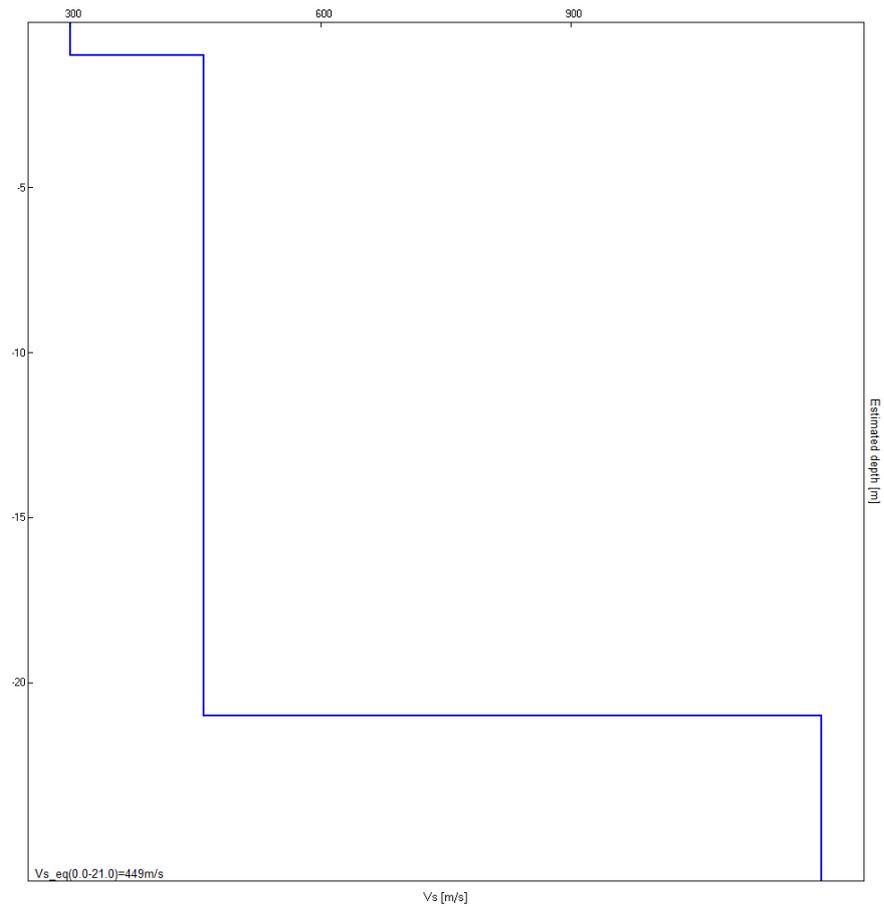


Figura 7 - Indagine HVSR4: Profilo verticale delle Vs.

J22110_10_11_CARRARA_TR, CAVA_N.37_FOSSAGRANDE HVSR5

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 11/10/22 12:12:44 Fine registrazione: 11/10/22 12:32:43

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

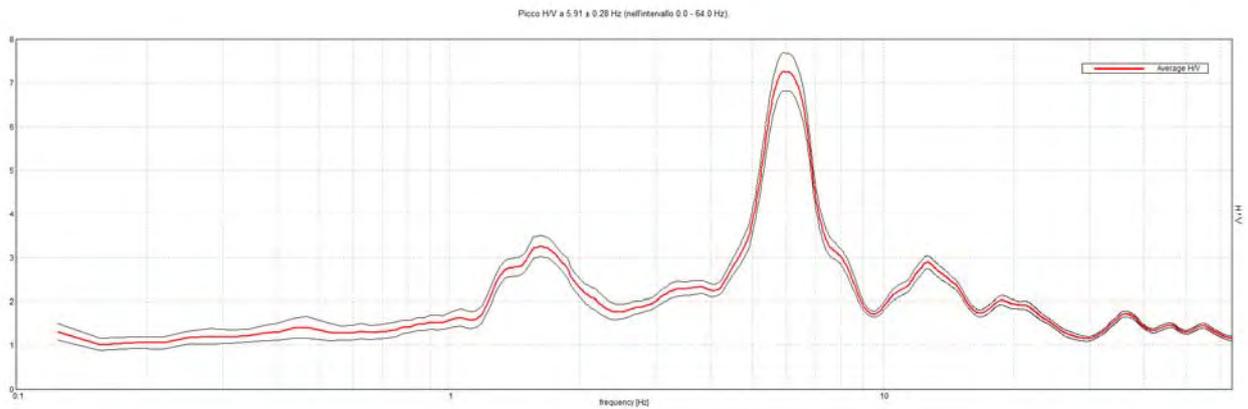
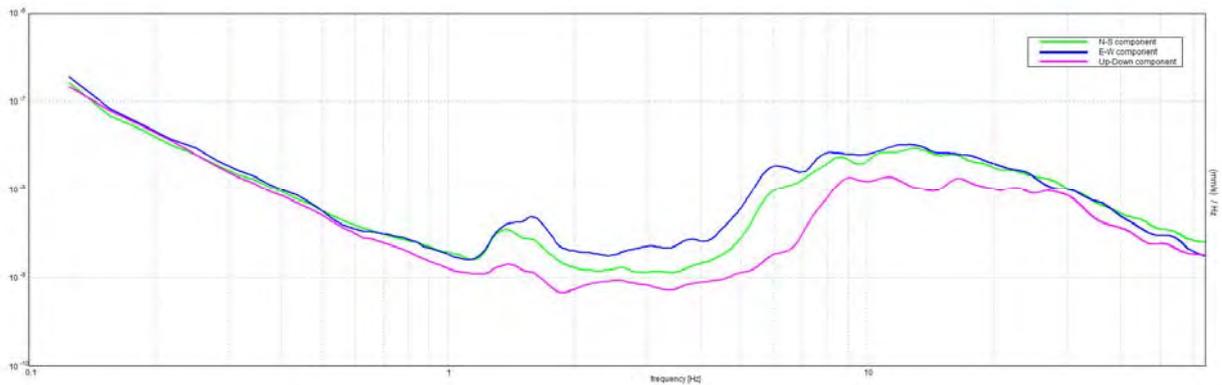
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

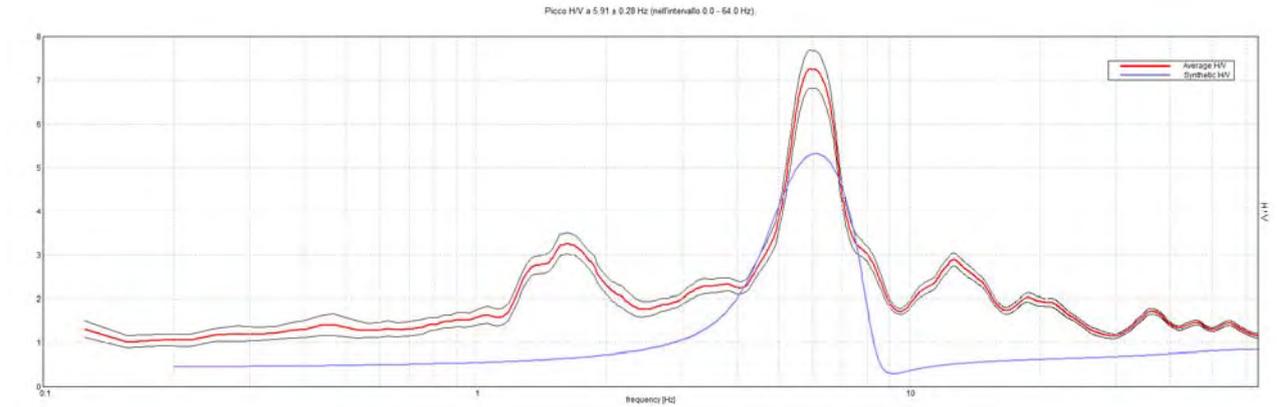
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1.00	1.00	300
21.00	20.00	460
inf.	inf.	1250

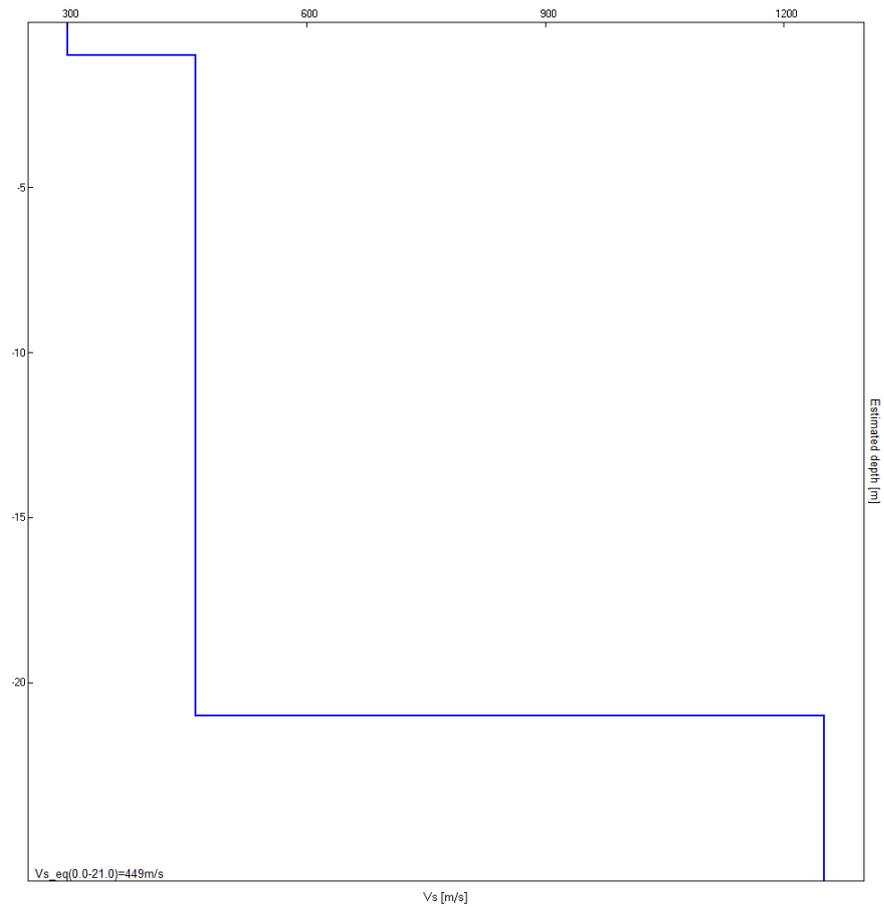


Figura 8 - Indagine HVSR5: Profilo verticale delle Vs.

J22110_10_11_CARRARA_TR, CAVA_N.37_FOSSAGRANDE HVSR6

Strumento: TEP-0085/01-10

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 11/10/22 12:37:34 Fine registrazione: 11/10/22 12:57:33

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

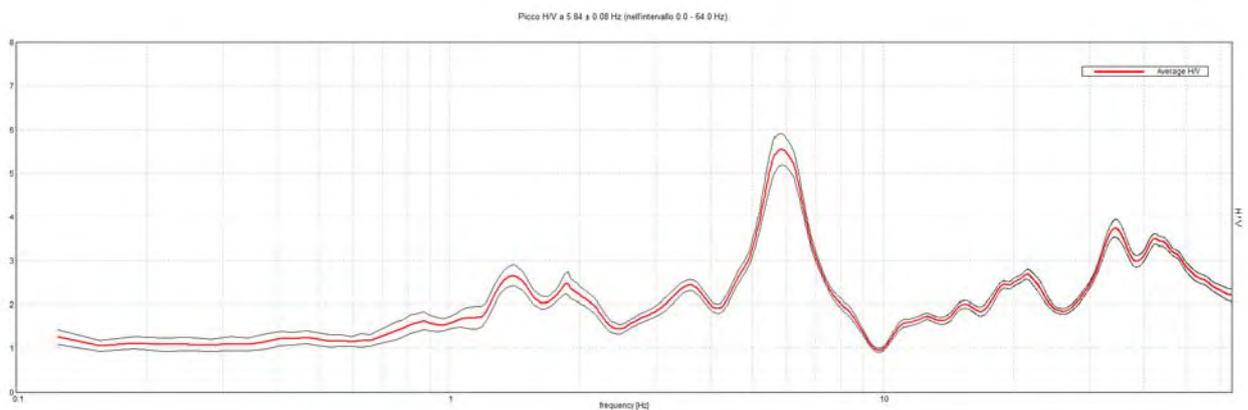
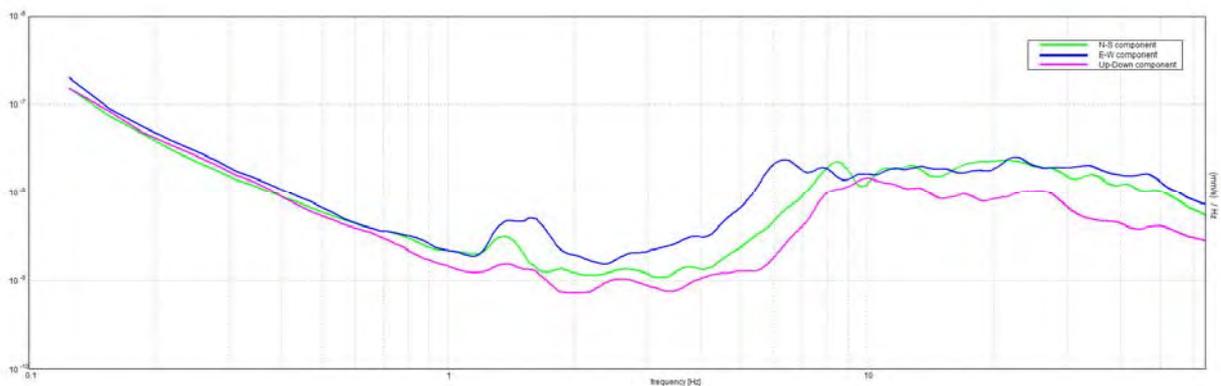
Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 128 Hz

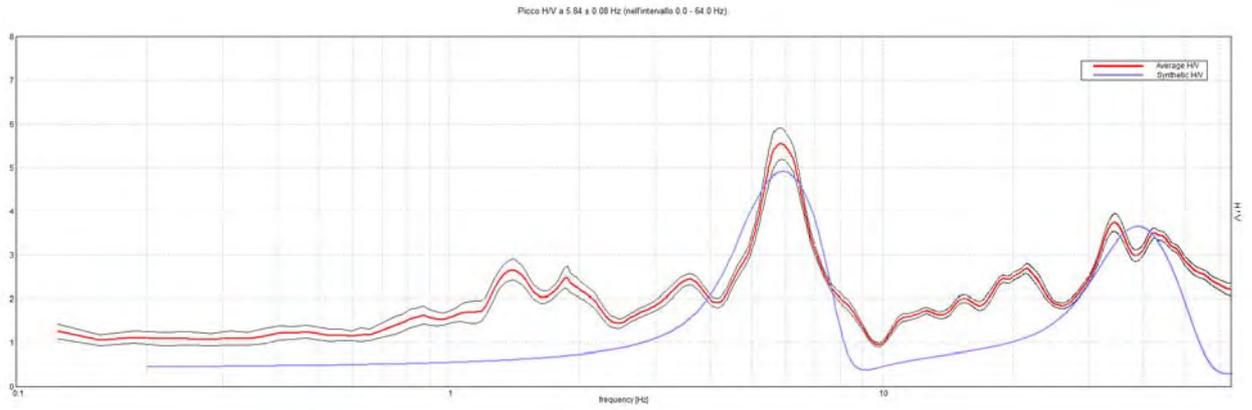
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
1.20	1.20	180
21.20	20.00	460
inf.	inf.	1200

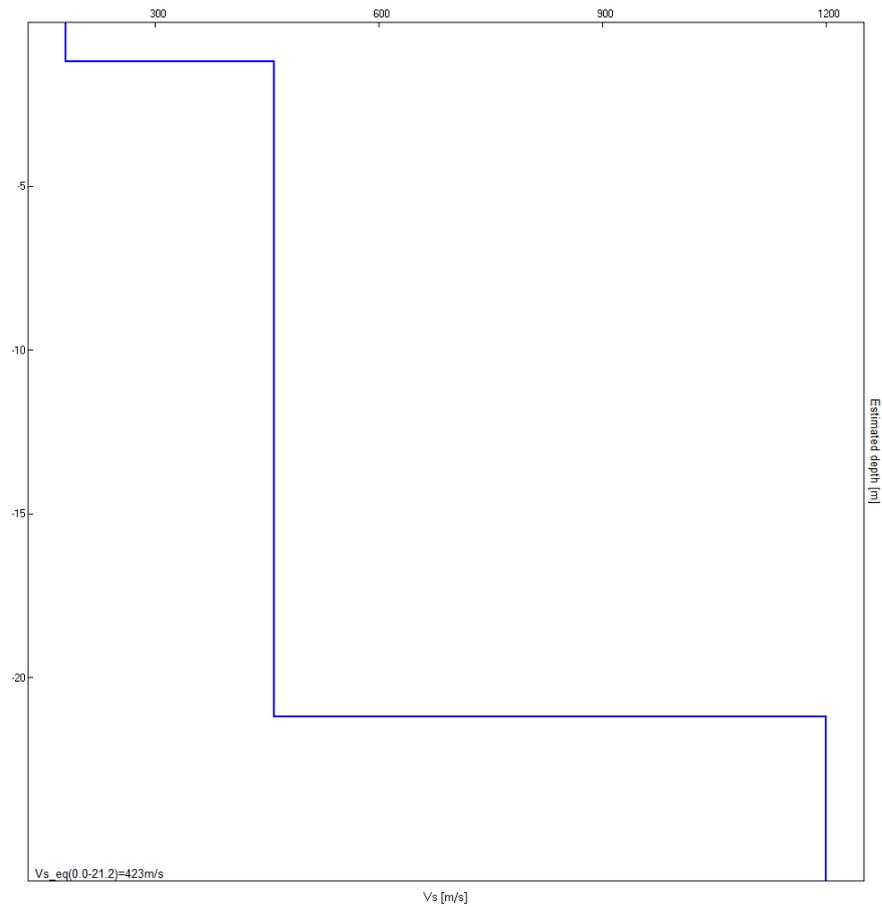


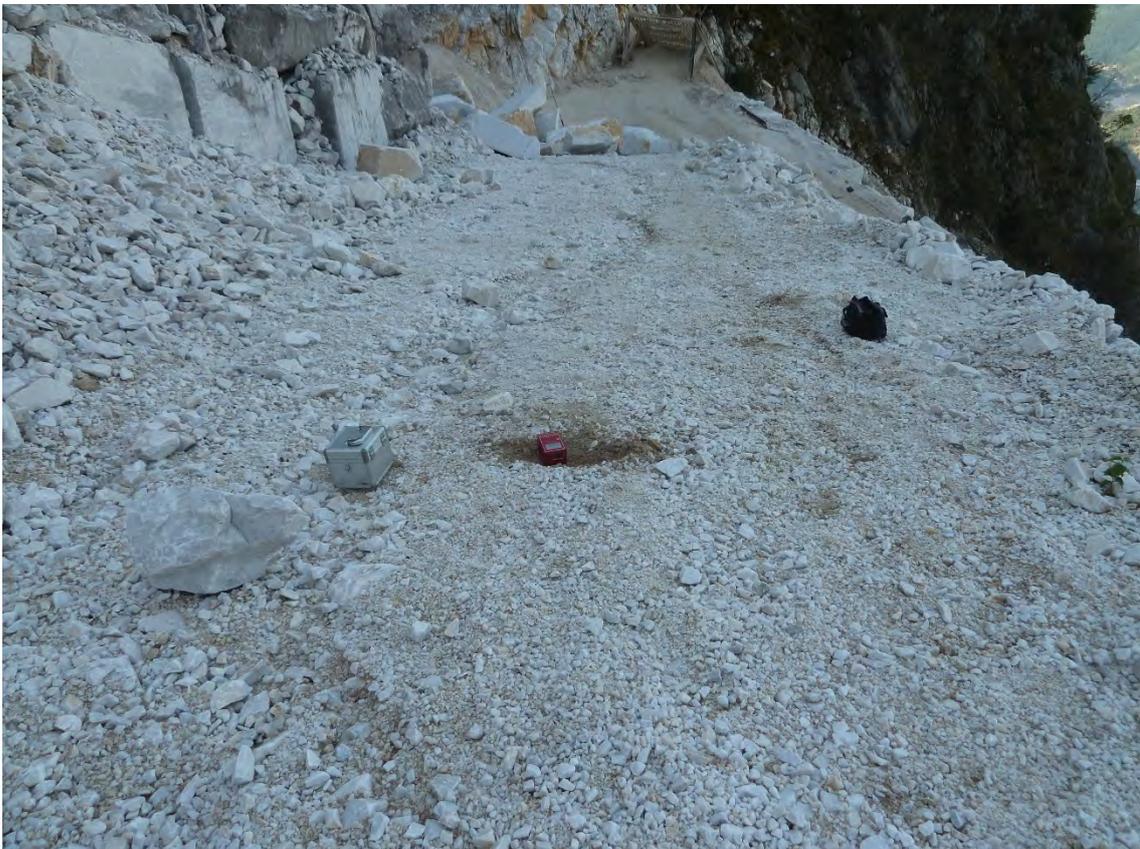
Figura 9 - Indagine HVSR6: Profilo verticale delle Vs.



Indagine MASW - Documentazione fotografica



Indagine HVSR1 - Documentazione fotografica



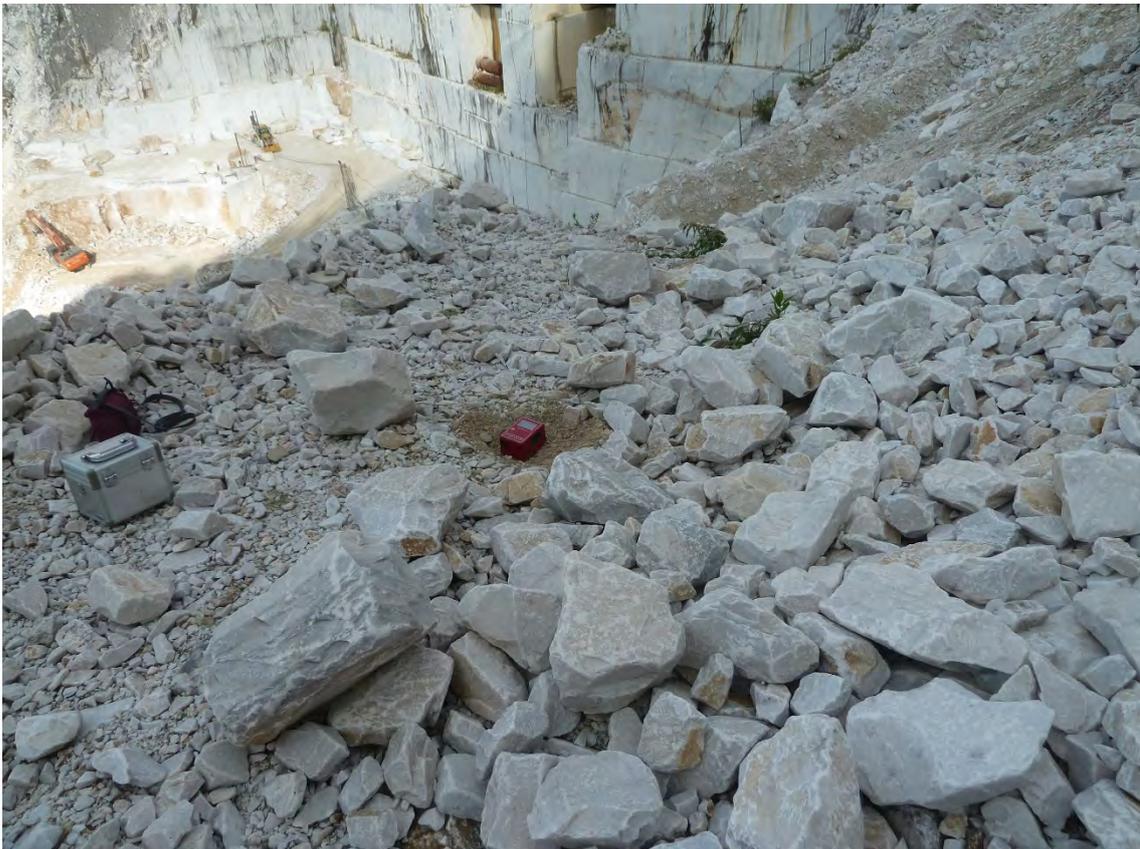
Indagine HVSR2 - Documentazione fotografica



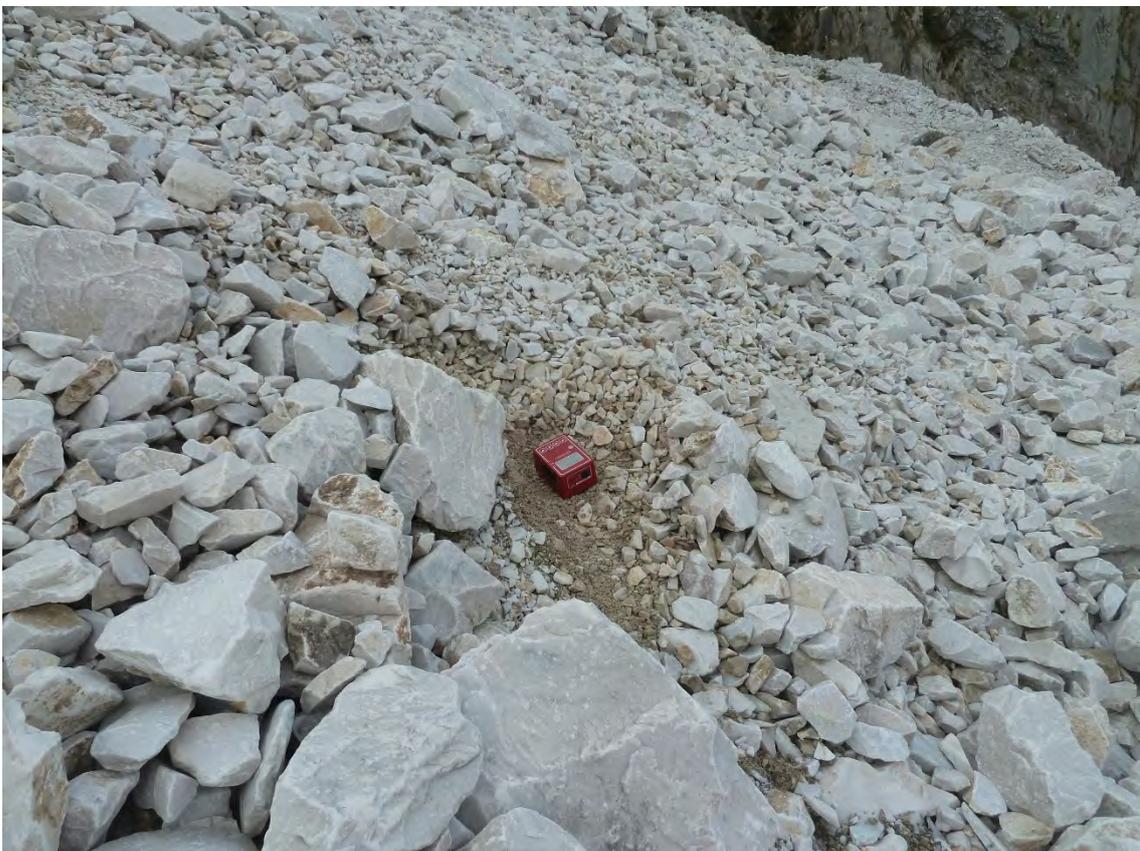
Indagine HVSR3 - Documentazione fotografica



Indagine HVSR4 - Documentazione fotografica



Indagine HVSR5 - Documentazione fotografica



Indagine HVSR6 - Documentazione fotografica