

Comune di Firenze

Città Metropolitana di Firenze

CAMPAGNA GEOGNOSTICA ED INDAGINI GEOFISICHE  
CONCORSO DI PROGETTAZIONE RIQUALIFICAZIONE  
STADIO ARTEMIO FRANCHI - Servizio n.334/2021

CIG Z8C30D8025

Committente: Comune di Firenze

Borgo San Lorenzo, 21/04/21

IGeA sas  
Dott. Geol. Guglielmo Braccesi

## INDICE

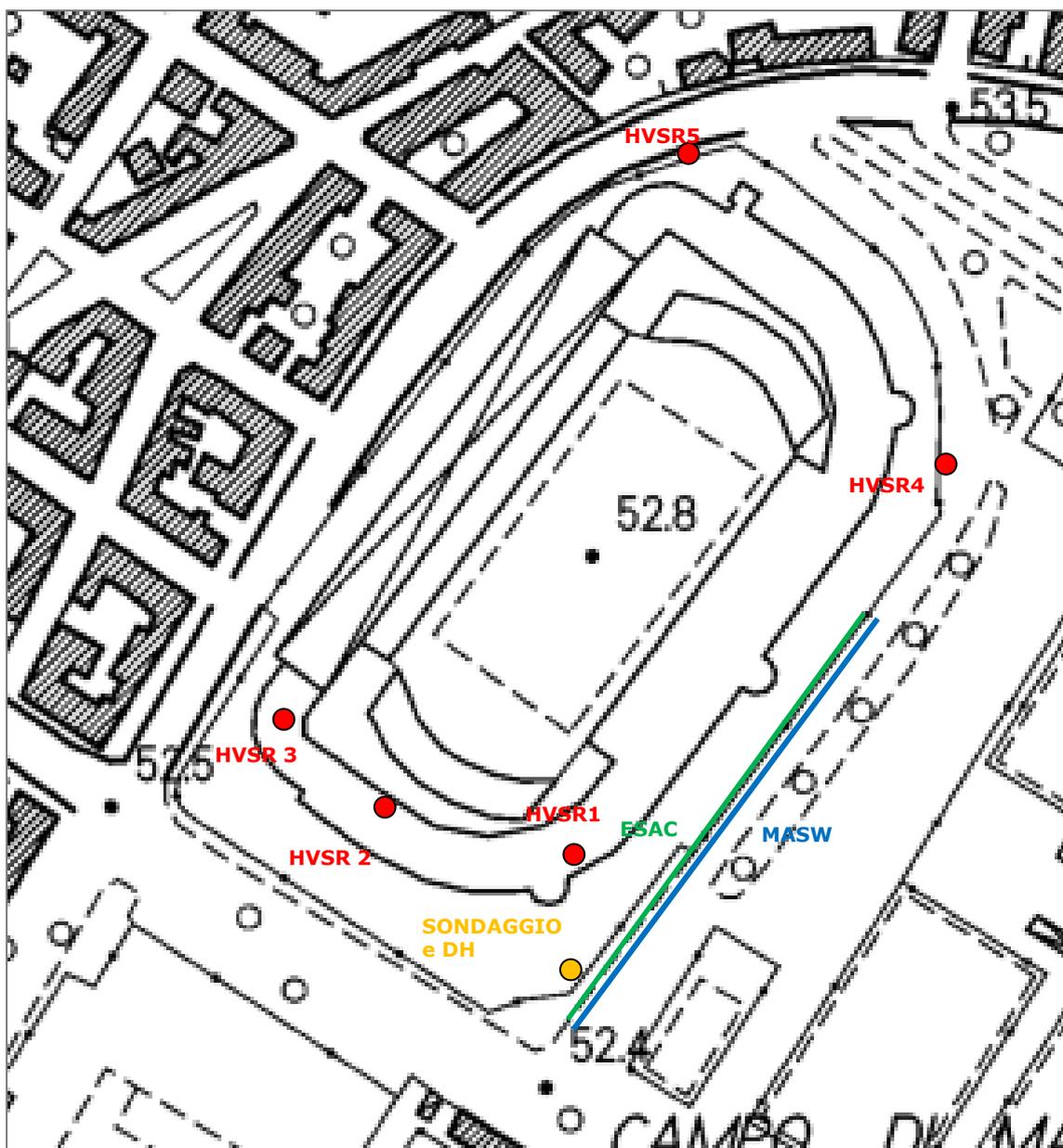
1	PREMESSA .....	2
2	INDAGINI SVOLTE .....	3
2.1	Indagini MASW-ESAC.....	4
2.2	Indagini HVSr.....	16
2.3	Sondaggi.....	49
2.4	Indagine sismica Down Hole .....	51
3	PARAMETRIZZAZIONE MECCANICA .....	65
	ALLEGATO 1 DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA .....	66



## 2 INDAGINI SVOLTE

Per la redazione della presente relazione, come da capitolato di gara, sono state svolte le seguenti indagini:

- Una prova sismica MASW;
- Una prova sismica ESAC;
- Cinque misure di rumore sismico HVSr
- Un sondaggi a rotazione con carotaggio
- Una prova sismica in foro down hole



Estratto carta tecnica regionale - Ubicazione delle indagini

## 2.1 Indagini MASW-ESAC

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è classificabile come tecnica di indagine sismica simile alla sismica a rifrazione e alla sismica a riflessione, perché il principio alla base della prova sperimentale in sito è analogo e consiste nel misurare le onde superficiali sul suolo. Rispetto alla sismica a rifrazione il metodo MASW presenta i vantaggi di superare i problemi legati alla presenza di strati soffici compresi tra strati più rigidi o di strati più rigidi compresi tra strati più soffici; o nel caso di sismica a rifrazione con onde P alla presenza della falda superficiale, che nasconde gli strati di terreno con velocità delle onde P inferiore alla velocità delle onde nell'acqua.

Il metodo MASW consente di individuare il profilo di velocità  $V_s$  anche in presenza di contrasti di rigidità tra gli strati del suolo. La presenza della falda è modellata assegnando un valore del coefficiente di Poisson prossimo a 0.5, tra 0.4 e 0.5, in funzione del grado di saturazione. 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°. Nella pratica è stato osservato che, se si esegue la prova con lo stendimento dei sensori lungo la direzione di massima pendenza, la presenza di forti acclività comporta una traslazione della curva di dispersione sperimentale. Il problema è mitigato disponendo lo stendimento dei sensori lungo una curva di livello in direzione perpendicolare alla direzione di massima pendenza.

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori 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 la velocità di fase (o di gruppo) apparente 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, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW si distingue in metodo attivo e metodo passivo (REMI), o in una combinazione di entrambi. Nel metodo attivo le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Nel metodo passivo lo stendimento dei sensori può essere sia lineare, sia circolare e si misura il rumore ambientale di fondo esistente.

Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 30-50 m, in funzione della rigidità del suolo. Il metodo passivo in genere consente di tracciare una velocità di fase apparente sperimentale compresa tra 0 Hz e 10Hz, quindi dà informazioni sugli strati più profondi del suolo, generalmente al di sotto dei 50 m, in funzione della rigidità del suolo. Dopo aver determinato il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  è possibile procedere al calcolo della velocità equivalente e quindi individuare la categoria sismica del suolo.

Il metodo ESAC è una estensione del metodo SAC (Spatial Auto-Correlation) proposto da AKI nel 1957. Nel metodo SAC i sensori sono disposti in circolo, nel metodo ESAC la configurazione può essere qualunque, anche se nella pratica si usano le seguenti forme: L, T, +, X, triangolo, rettangolo.

Il metodo ESAC può essere utilizzato per determinare la velocità di fase apparente o effettiva delle onde di Rayleigh a partire dalla misura del rumore ambientale. Dato che il rumore ambientale è in genere caratterizzato da onde a basse frequenze (<10-15Hz), la velocità di fase apparente fornita dal metodo riguarda le basse frequenze e quindi gli strati di terreno o roccia più profondi. In tal senso il metodo ESAC, così come il metodo ReMi, è complementare al metodo MASW attivo eseguito con sorgenti attive comuni (mazza o tripiede con grave).

## **MASW**

La linea acquisita ha una lunghezza di 94 metri. La sorgente è costituita da una mazza dal peso di 10 kg battente una piastra metallica adagiata a terra.

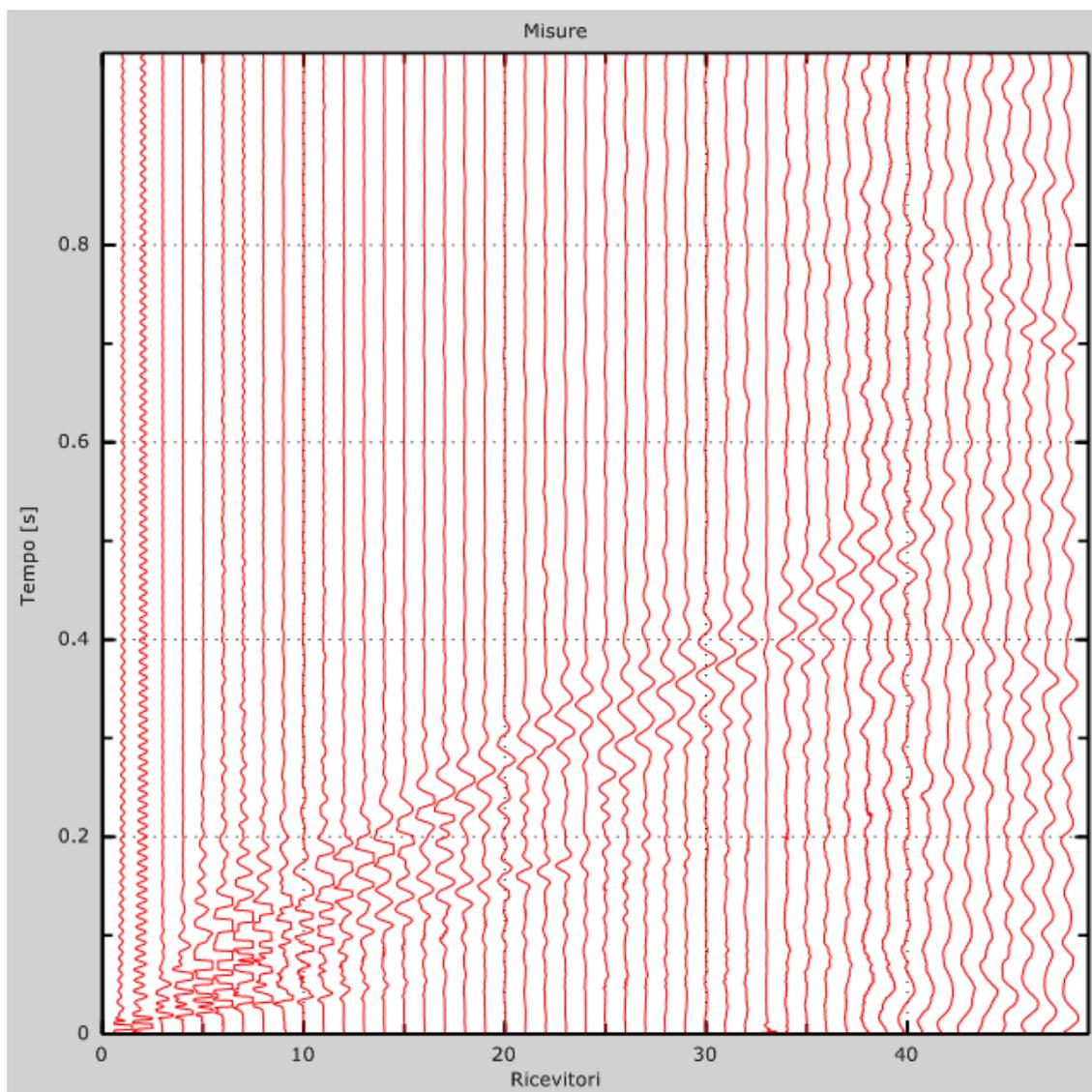
Il sistema di ricezione è costituito da 48 geofoni posizionati ad una distanza intergeofonica pari a 2,0 metri. Il trigger consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e la produzione di un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica.

Il sistema di acquisizione dati è un sismografo marca AMBROGEO, modello ECHO 12/24/48, sistema multicanale (48 canali) in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica a 16 bit. Esso è collegato a ciascuno dei trasduttori di velocità al trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger.

I dati acquisiti sono stati elaborati con il software **MASW 4.0.0.2 V. Roma.**

Di seguito si riportano alcuni stralci dell'elaborazione.

TRACCE SISMICHE METODO ATTIVO

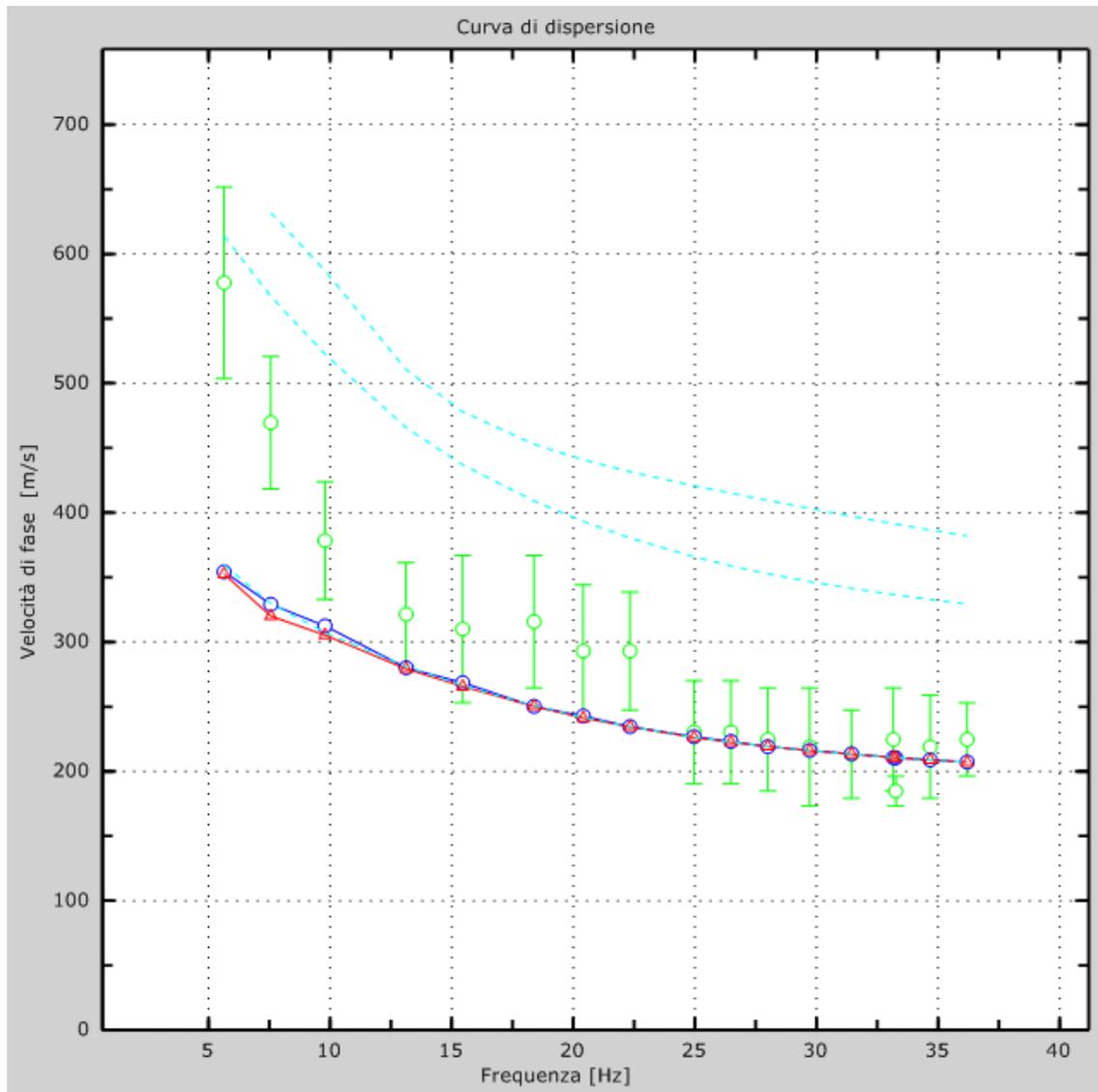


*Numero di ricevitori .....48*  
*Distanza tra i sensori: .....1m*  
*Numero di campioni temporali..... 7651*  
*Passo temporale di acquisizione.....0.13ms*  
*Numero di ricevitori usati per l'analisi.....48*  
*L'intervallo considerato per l'analisi comincia a ..... 0ms*  
*L'intervallo considerato per l'analisi termina a ..... 3000ms*  
*I ricevitori non sono invertiti (l'ultimo ricevitore è l'ultimo per l'analisi)*

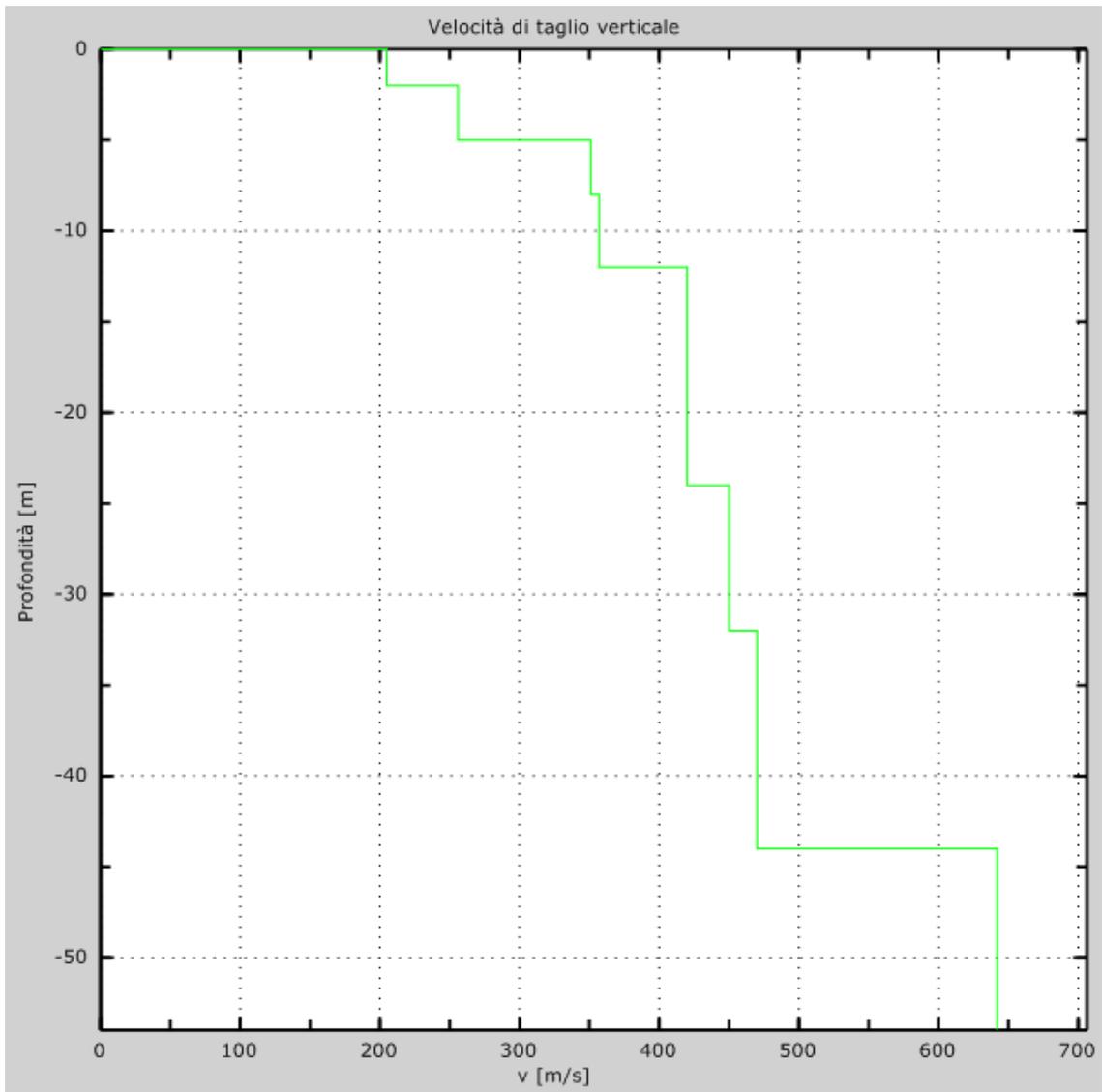
PROFILO IN SITO

Numero di strati (escluso semispazio) .....	9
Spaziatura ricevitori .....	2m
Numero ricevitori .....	48
Numero modi .....	3
<b>Strato 1</b>	
h [m] .....	2
z [m] .....	-2
Vs fin.[m/s] .....	205
<b>Strato 2</b>	
h [m] .....	3
z [m] .....	-5
Vs fin.[m/s] .....	256
<b>Strato 3</b>	
h [m] .....	3
z [m] .....	-8
Vs fin.[m/s] .....	351
<b>Strato 4</b>	
h [m] .....	4
z [m] .....	-12
Vs fin.[m/s] .....	357
<b>Strato 5</b>	
h [m] .....	4
z [m] .....	-16
Vs fin.[m/s] .....	420
<b>Strato 6</b>	
h [m] .....	8
z [m] .....	-24
Vs fin.[m/s] .....	420
<b>Strato 7</b>	
h [m] .....	8
z [m] .....	-32
Vs fin.[m/s] .....	450
<b>Strato 8</b>	
h [m] .....	12
z [m] .....	-44
Vs fin.[m/s] .....	470
<b>Strato 9</b>	
h [m] .....	0
z [m] .....	-00
Vs fin.[m/s] .....	642

VELOCITÀ NUMERICHE - PUNTI SPERIMENTALI (VERDE), MODI DI RAYLEIGH (CIANO), CURVA APPARENTE (BLU), CURVA NUMERICA (ROSSO)



### PROFILO DI VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO VERTICALI



CALCOLO DELLE  $V_{s,eq}$ 

I valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), è definita dall'espressione:

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

dove  $h_i$  e  $V_{si}$  indicano lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato;  $N$  è il numero degli strati e  $H$  è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da  $V_s$  non inferiori 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. La nuova normativa italiana (D.M. 17.01.2018), che sostituisce il D.M 14.01.2008, coerentemente con quanto indicato nell'Eurocodice 8, prevede una classificazione del sito in funzione sia della velocità delle onde S nella copertura che dello spessore della stessa. Vengono identificate 5 classi, A, B, C, D e E ad ognuna delle quali è associato uno spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:

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

Considerando le velocità degli strati e gli spessori rilevati, si ottiene dal piano di campagna, un valore della  $V_{s,eq}$  pari a **360 m/s**.

**ESAC1**

La linea acquisita ha una lunghezza di 94 metri. Per il metodo passivo, che sfrutta il rumore naturale senza bisogno di eseguire energizzazioni, il sismografo è stato lasciato in acquisizione per un periodo di tempo pari a 30 minuti.

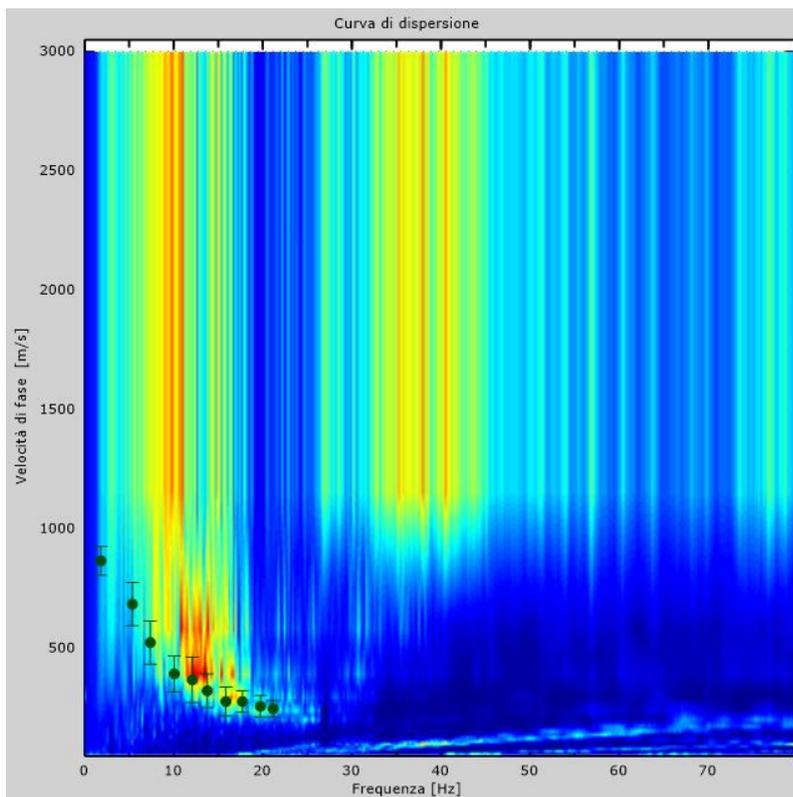
Il sistema di ricezione è costituito da 48 geofoni posizionati ad una distanza intergeofonica pari a 2,0 metri.

Il sistema di acquisizione dati è un sismografo marca AMBROGEO, modello ECHO 12/24/48, sistema multicanale (48 canali) in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica a 16 bit. Esso è collegato a ciascuno dei trasduttori di velocità al trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger. Di seguito si riportano alcuni stralci dell'elaborazione.

TABELLA CURVA DI DISPERSIONE

· Freq. · [Hz] □	V. fase · [m/s] □	V. fase min · [m/s] □	V. fase Max · [m/s] □
1.82585 □	868.205 □	807.771 □	928.639 □
5.35462 □	686.904 □	596.253 □	777.554 □
7.37105 □	525.747 □	435.097 □	616.398 □
10.0596 □	394.808 □	319.266 □	470.35 □
12.0761 □	369.627 □	273.94 □	465.314 □
13.7564 □	324.302 □	253.796 □	394.808 □
15.8569 □	278.976 □	218.543 □	339.41 □
17.7053 □	278.976 □	233.651 □	324.302 □
19.7217 □	258.832 □	213.507 □	304.157 □
21.15 □	248.76 □	213.507 □	284.013 □

CURVA DI DISPERSIONE

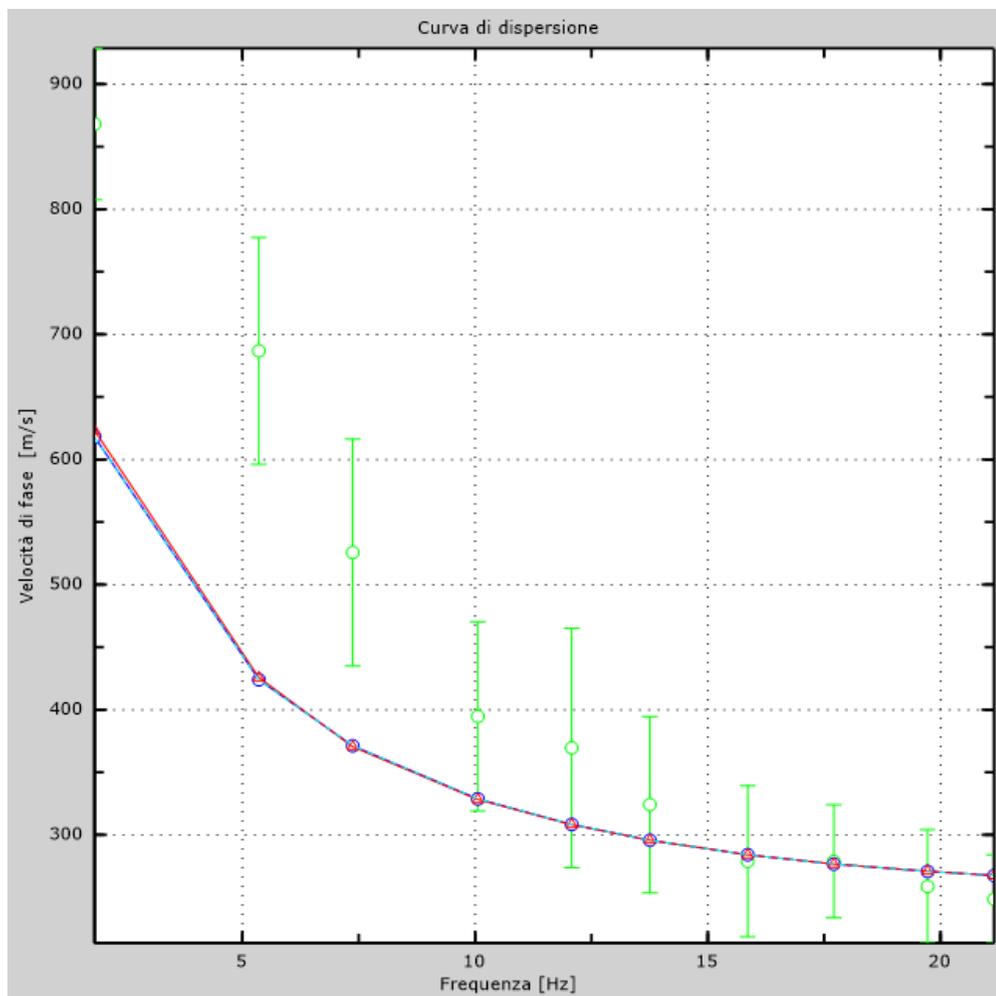


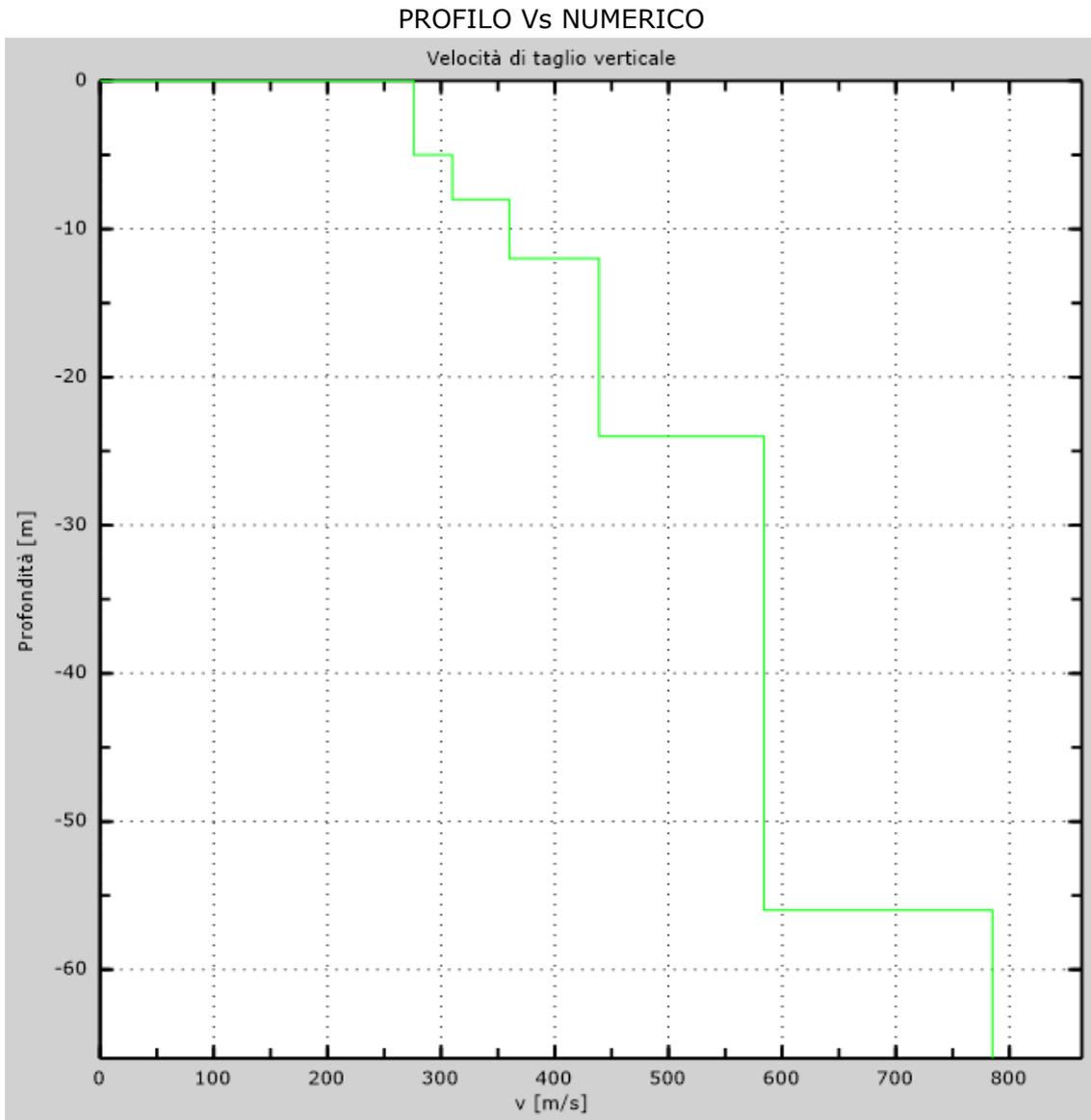
PROFILO IN SITO

Numero di strati (escluso semispazio) .....	9
Spaziatura ricevitori .....	1m
Numero ricevitori .....	20
Numero modi .....	1
<b>Strato 1</b>	
h [m] .....	2
z [m] .....	-2
Vs fin.[m/s] .....	276
<b>Strato 2</b>	
h [m] .....	3
z [m] .....	-5
Vs fin.[m/s] .....	276
<b>Strato 3</b>	
h [m] .....	3
z [m] .....	-8
Vs fin.[m/s] .....	310
<b>Strato 4</b>	
h [m] .....	4
z [m] .....	-12
Vs fin.[m/s] .....	360
<b>Strato 5</b>	
h [m] .....	4
z [m] .....	-16
Vs fin.[m/s] .....	439
<b>Strato 6</b>	

h [m].....	8
z [m].....	-24
Vs fin.[m/s].....	439
<b>Strato 7</b>	
h [m].....	20
z [m].....	-44
Vs fin.[m/s].....	584
<b>Strato 8</b>	
h [m].....	12
z [m].....	-56
Vs fin.[m/s].....	584
<b>Strato 9</b>	
h [m].....	0
z [m].....	-00
Vs fin.[m/s].....	785

VELOCITÀ NUMERICHE - PUNTI SPERIMENTALI (VERDE), MODI DI RAYLEIGH (CIANO), CURVA APPARENTE (BLU), CURVA NUMERICA (ROSSO)





## 2.2 Indagini HVSr

La tecnica dei rapporti spettrali o HVSr (Nakamura, 1989) è completamente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimento di cavi, né di energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale.

Tale tecnica costituisce una parte importante nella valutazione del rischio sismico di un determinato sito perché permette di calcolarne la frequenza fondamentale o frequenza di risonanza.

La frequenza caratteristica di risonanza di un sito rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale. Si dovranno quindi adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la medesima frequenza di vibrazione del terreno per evitare effetti di "doppia risonanza", estremamente pericolosi.

La frequenza fondamentale di risonanza di un edificio può essere misurata eseguendo le misurazioni all'interno dello stesso ed è possibile confrontarla con quella del terreno su cui sorge, per comprendere al meglio il rischio sismico a cui è sottoposto l'edificio in caso di sisma.

La pericolosità è dovuta all'effetto della doppia risonanza terreno-struttura (esistente o di progetto) laddove risultino coerenti i valori della frequenza di sito e quelli della struttura in analisi, per la quale il periodo fondamentale, se non direttamente misurato, può essere preliminarmente stimato dalla relazione:

$$T_{ed} \approx Ch^{3/4} \approx n/10$$

dove:  $T_{ed}$  è il periodo dell'edificio,  $h$  è la sua altezza ed  $n$  è il numero di piani; mentre il parametro  $C = 0,050$  (edifici in muratura,  $C = 0.075$  (edifici in muratura e calcestruzzo,  $C = 0.085$  (edifici a telaio in calcestruzzo).

Le vibrazioni sismiche ambientali (rumore sismico) sono onde sismiche di bassa energia con ampiezze dell'ordine di  $10^{-4} - 10^{-2}$  mm (Okada, 2003). In riferimento al contenuto in frequenza, il rumore sismico è anche chiamato microtremore se contiene alte frequenze (in genere maggiori di 0.5 Hz) e microsisma per basse frequenze. Per quanto riguarda l'origine del rumore sismico, è certo che le sorgenti dei microsismi sono le perturbazioni atmosferiche sugli oceani che si propagano come onde superficiali sui continenti, mentre le sorgenti dei microtremori sono le attività antropiche come il traffico veicolare, le attività industriali etc. e si

propagano come onde superficiali di Rayleigh. Le misure puntuali di rumore sismico possono essere utilizzate per la stima sia degli effetti di sito (funzione di amplificazione), sia degli effetti sulle costruzioni nel rispetto della normativa che ne stabilisce la soglia massima (UNI9916).

In relazione agli effetti di sito, l'analisi delle misure di rumore sismico può essere condotta con tre metodi:

- Spettri di Fourier
- Rapporti spettrali
- Rapporti spettrali H/V

Tra questi quello che sembra fornire i risultati migliori è quello dei Rapporti spettrali H/V noto anche come metodo HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) o metodo di Nakamura.

La tecnica dei rapporti spettrali H/V consiste nel calcolo del rapporto degli spettri di Fourier del rumore nel piano orizzontale H (generalmente lo spettro H viene calcolato come media degli spettri di Fourier delle componenti orizzontali NS ed EW) e della componente verticale V. Il metodo è applicabile alle misure di rumore registrate in una singola stazione posta su sedimenti. Il metodo è stato introdotto da scienziati giapponesi agli inizi degli anni '70, tra i quali Nogoshi e Igarashi (1971) e Shiono et al. (1979), che indagarono sul significato fisico del rapporto H/V e mostrarono la sua relazione diretta con la curva di ellitticità delle onde di Rayleigh. Essi conclusero che il picco massimo di ampiezza si verifica alla frequenza di risonanza fondamentale della copertura di terreni. Nel 1989, Nakamura propose in inglese il rapporto H/V come stima affidabile della funzione di trasferimento delle onde S per un dato sito.

Le argomentazioni usate da Nakamura sono estremamente qualitative e si basano sull'ipotesi che i microtremori siano originati da sorgenti molto locali, come il traffico vicino al sismometro, e siano onde di Rayleigh che si propagano in un solo strato su un semispazio. Tale tecnica, ampiamente utilizzata da anni nel settore sismologico, di recente viene sempre più impiegata in campo geotecnico/ingegneristico per derivare i seguenti parametri:

- la frequenza fondamentale di risonanza  $F_0$  dei terreni presenti nel sottosuolo;

- la stima del profilo del terreno in termini delle velocità  $V_s$  e  $V_p$  e della densità e quindi delle velocità  $V_{s30}$  nei primi 30 m dal piano campagna, attraverso opportuni metodi di inversione;
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio e i relativi modi di vibrare.

Il grafico HVSR è generalmente un grafico frequenza (x) – ampiezza del rapporto HV (y). Poiché la frequenza è relazionata alla profondità, il grafico HVSR può tramutarsi in un grafico ampiezza del rapporto HV (x) – profondità (y), dove l'ampiezza del rapporto HV (x) descrive in modo relativo l'ampiezza del contrasto di impedenza tra i mezzi sopra e sotto quella determinata profondità (y).

Ciascun picco nel grafico HV corrisponde ad un livello stratigrafico che presenta un contrasto di impedenza rispetto al livello sottostante. Maggiore è il contrasto di impedenza, maggiore è l'ampiezza attesa del picco HV sebbene la relazione tra le due variabili non sia lineare.

È ovvio che il numero di picchi visibili in un grafico HVSR dipende dal contrasto, dalla distanza tra le due discontinuità e dalla funzione di lisciamiento impiegata. Un contrasto basso tra due discontinuità vicine le renderà difficilmente individuabili singolarmente ed allo stesso tempo un lisciamiento ampio, agendo da filtro passa basso, renderà coalescenti le discontinuità minori.

Va notato che per le stesse ragioni l'aumento del lisciamiento porta anche ad una diminuzione dell'ampiezza assoluta di ciascun picco, pertanto, per ovviare a questi problemi, è sufficiente adottare la stessa procedura di analisi dei dati durante tutta la campagna di misura in modo da rendere confrontabili i risultati ottenuti.

Le misure di microtremore ambientale, della durata di 20 minuti ciascuna, sono state effettuate con un tromografo **AMBROGEO, modello Echo Tromo HVSR3**, le cui dimensioni sono 10 x 14 x 7.7 (altezza) cm e 1.1 kg di peso e le ulteriori caratteristiche sono le seguenti:

3 velocimetri elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione

Numero di canali 3+1 analogici

Amplificatori tutti canali con input differenziali

Rumore < 0.5  $\mu$ V r.m.s. @128 Hz sampling

Impedenza dell'input 106 Ohm

Range di frequenze DC - 360 Hz

Frequenza di campionamento 16384 Hz per canale

Frequenze di sovracampionamento 32x, 64x, 128x

Conversione A/D equivalente a 24 bit

Massimo input analogico 51.2 mV (781 nV/digit)

Livella a bolla d'aria, elevata precisione orizzontale, sensibilità 5' d'arco (0.083°)

Alimentazione 2 batterie alcaline x 1.5 VDC AA

Le elaborazioni sono state effettuate con il software **SARA electronic instruments GEOEXPLORER HVSr 2.4.0** che fornisce anche la rispondenza ai criteri definiti dal progetto SESAME 2005, in merito all'affidabilità della registrazione.

Per ogni sito vengono fornite le informazioni "di campagna" (come da indicazioni al paragrafo 1 delle linee guida del SESAME 2005), i parametri di acquisizione e quelli per l'elaborazione della registrazione, i grafici elaborati ed il report dei criteri SESAME.

operatore	Bartolozzi		data	14/04/2021	ora	08:58			
Località	Firenze - Stadio A. Franchi								
latitudine	4849961.34		longitudine	1683706.25	quota (m s.l.m.)	52			
nome stazione				orientamento stazione rispetto al Nord asse X a 0°					
tipo stazione	Echo Tromo HVSR3		tipo sensori	velocimetri 2Hz					
nome file	FRANCHI1								
gain			freq. Campion. (Hz)	141	durata (s)	1200			
condizioni meteo	vento	assente	debole	(5m/s)	medio	forte			
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
	pioggia	assente	debole	(5m/s)	medio	forte			
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
temperatura approx	7° C								
natura terreno	terra dura	terra soffice	ghiaia	sabbia	roccia	asfalto	cemento	calcestruzzo	altro
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	erba bassa	erba alta	suolo asciutto		suolo umido				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
accoppiamento artificiale al suolo	no			si, tipologia:					
	<input checked="" type="checkbox"/>								
densità edifici	nessuno	dispersi	addensati	altro					
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
<b>transienti</b>									
		nessuno	pochi	moderati	molti	distanza (m)			
automobili			X			50			
camion		X							
pedoni		X							
altro:									
<u>persone a lavoro</u>									
<b>fonti di rumore</b> (fabbriche, cantieri, pompe, corsi d'acqua, ecc.)		no <input type="checkbox"/> si, tipologia: carrello elevatore in movimento; martellate per esecuzione prova DH. Pompe di aerazione							
<b>strutture nelle vicinanze</b> (alberi, edifici, ponti, strutture sotterranee, ecc.)		ALBERI a 35m. PROVA ESEGUITA SOTTO LE GRADINATE DELLO STADIO. FERROVIA A 500m. PISCINA/PALESTRA SOTTERRANEA							

### STATION INFORMATION

Station code: -

Model: Ambrogeo

Sensor: Echo Tromo 2Hz

### PLACE INFORMATION

Place ID: FRANCHI1

Address: STADIO A. FRANCHI - FIRENZE

Latitude: 4849961.34

Longitude: 1683706.25

Coordinate system: EPSG 3003

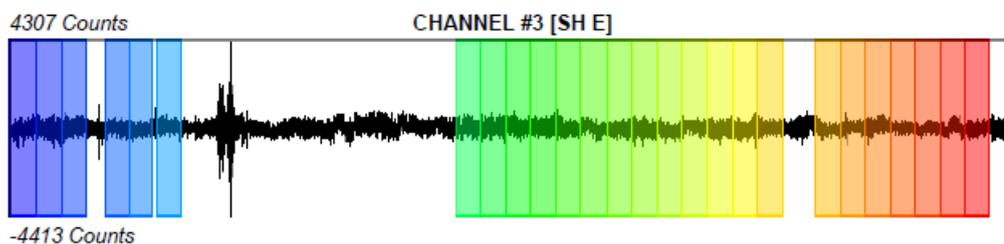
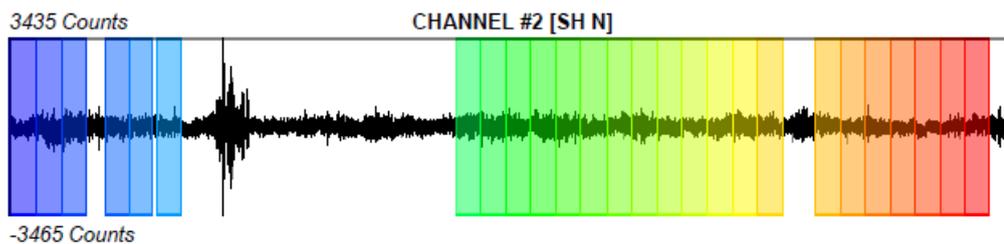
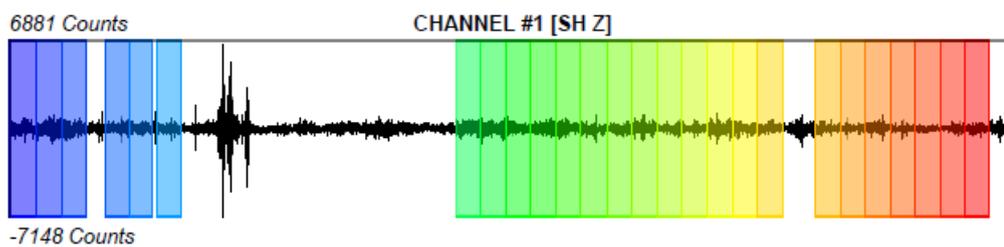
Elevation: 52 m s.l.m.

## PHOTOGRAPHIC REFERENCES



### SIGNAL AND WINDOWING

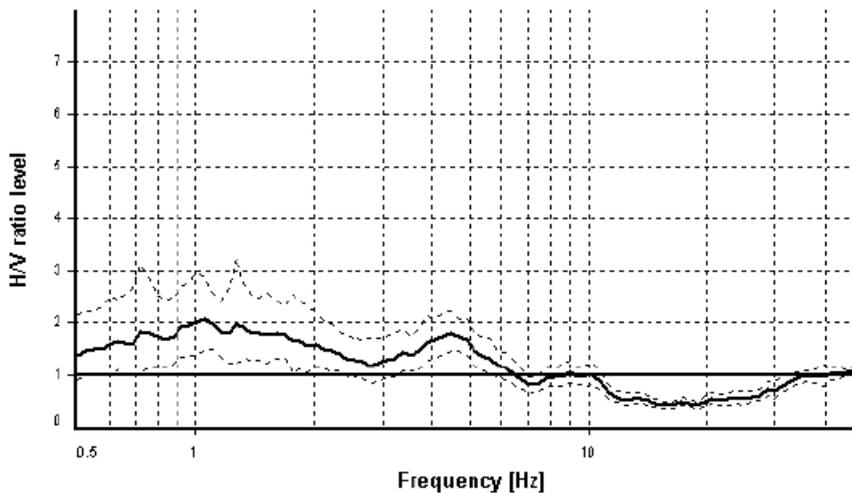
Sampling frequency: 141 Hz  
Recording start time: 2021/04/14 08:58:59  
Recording length: 20 min  
Windows count: 26  
Average windows length: 29.81  
Signal coverage: 64.59%



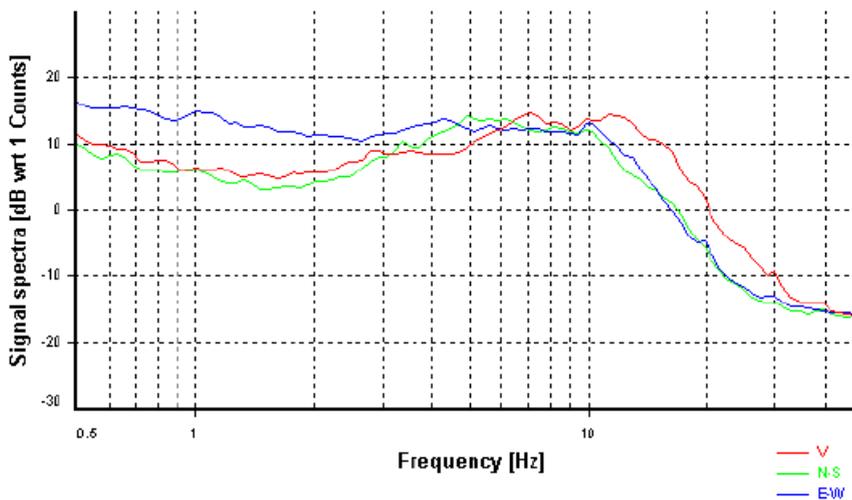
### HVSR ANALYSIS

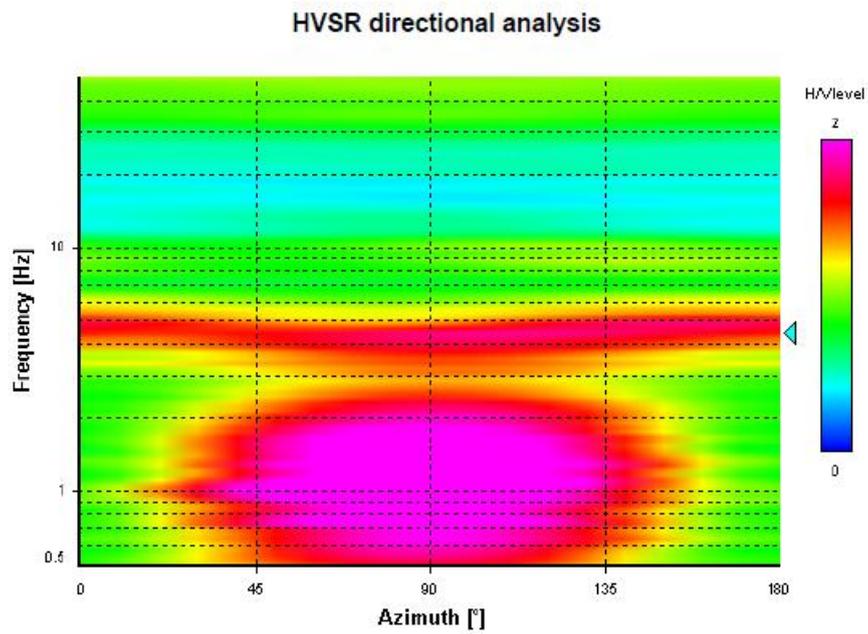
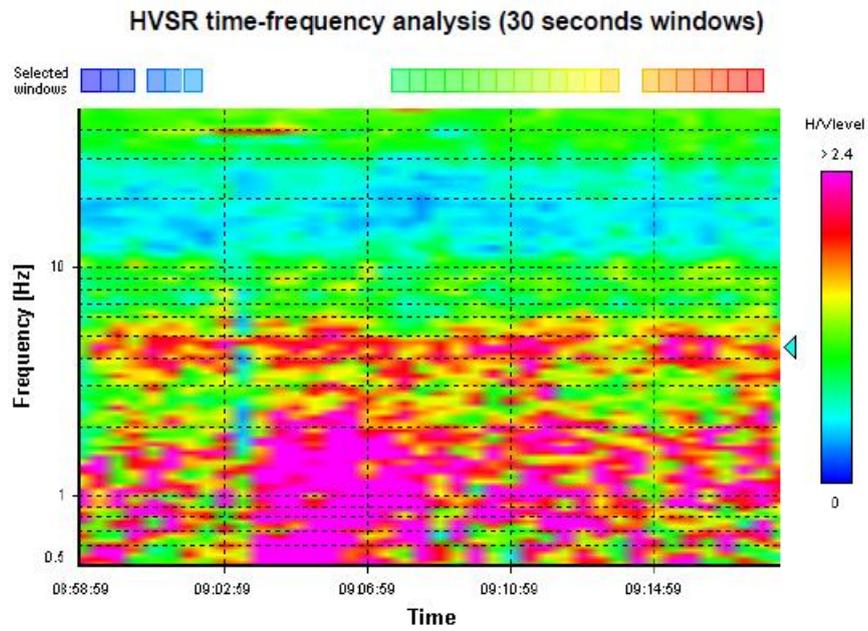
Tapering: Disabled  
Smoothing: Proportional triangular (Bandwidth coefficient = 6)  
Instrumental correction: Disabled

#### HVSR average



#### Signal spectra average





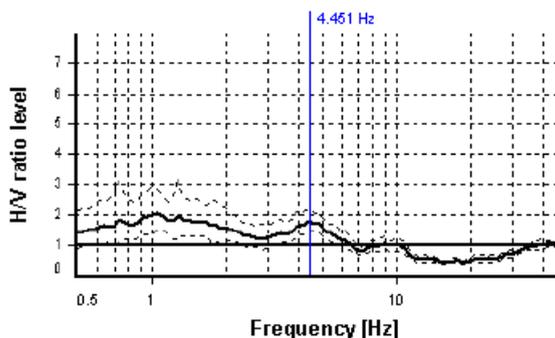
### SESAME CRITERIA

**Selected  $f_0$  frequency**

4.451 Hz

$A_0$  amplitude = 1.811

Average  $f_0 = 4.246 \pm 0.600$



HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	26 valid windows (length > 2.25 s) out of 26	OK
$n_c(f_0) > 200$	3450.15 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 29	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f^*$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$	6.76524 Hz	OK
$A_0 > 2$	1.81 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.59955 >= 0.22255	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.22847 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

operatore	Bartolozzi		data	14/04/2021	ora	09:29			
Località	Firenze - Stadio A. Franchi								
latitudine	4849979.58		longitudine	1683639.92	quota (m s.l.m.)	52			
nome stazione				orientamento stazione rispetto al Nord asse X a 0°					
tipo stazione	Echo Tromo HVSR3		tipo sensori		velocimetri 2Hz				
nome file	FRANCHI2								
gain				freq. Campion. (Hz)	141	durata (s)	1200		
condizioni meteo	vento	assente	debole	(5m/s)	medio	forte			
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
	pioggia	assente	debole	(5m/s)	medio	forte			
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
	temperatura approx	7° C							
natura terreno	terra dura	terra soffice	ghiaia	sabbia	roccia	asfalto	cemento	calcestruzzo	altro
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	erba bassa	erba alta	suolo asciutto		suolo umido				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
accoppiamento artificiale al suolo	no			si, tipologia:					
	<input checked="" type="checkbox"/>								
densità edifici	nessuno	dispersi	addensati	altro					
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
<b>transienti</b>									
		nessuno	pochi	moderati	molti	distanza (m)			
automobili			X			50			
camion		X							
pedoni		X							
altro:									
<u>persone a lavoro</u>									
<b>fonti di rumore</b> (fabbriche, cantieri, pompe, corsi d'acqua, ecc.)		no <input type="checkbox"/> si, tipologia: carrello elevatore in movimento; martellate per esecuzione prova DH							
<b>strutture nelle vicinanze</b> (alberi, edifici, ponti, strutture sotterranee, ecc.)		ALBERI a 35m. PROVA ESEGUITA SOTTO LE GRADINATE DELLO STADIO. FERROVIA A 500m. Non è nota la presenza di strutture sotterranee nelle vicinanze							

### STATION INFORMATION

Station code: -

Model: Ambrogeo

Sensor: Echo Tromo 2Hz

### PLACE INFORMATION

Place ID: FRANCHI2

Address: STADIO A. FRANCHI - FIRENZE

Latitude: 4849979.58

Longitude: 1683639.92

Coordinate system: EPSG3003

Elevation: 52 m s.l.m.

## PHOTOGRAPHIC REFERENCES



## SIGNAL AND WINDOWING

Sampling frequency: 141 Hz

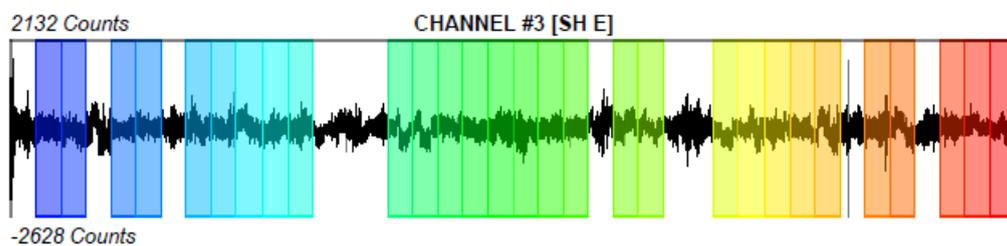
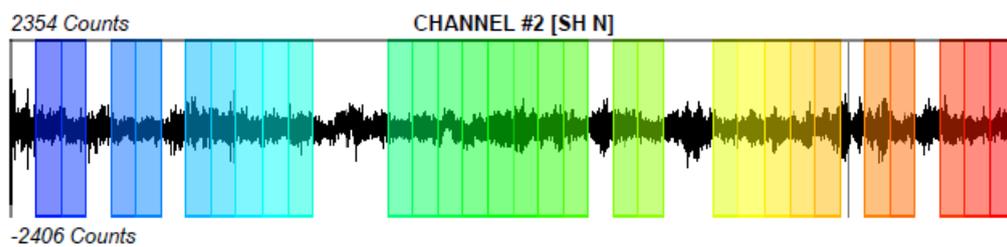
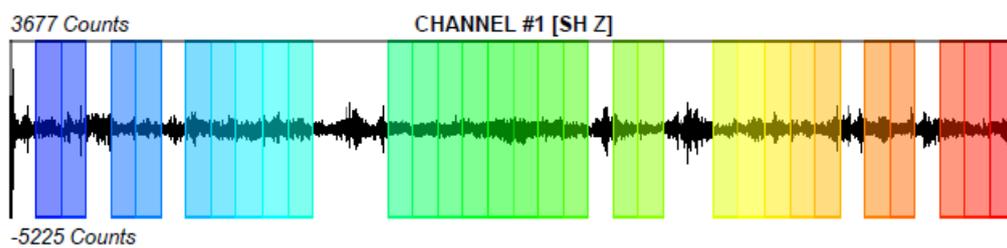
Recording start time: 2021/04/14 09:29:40

Recording length: 20 min

Windows count: 29

Average windows length: 30

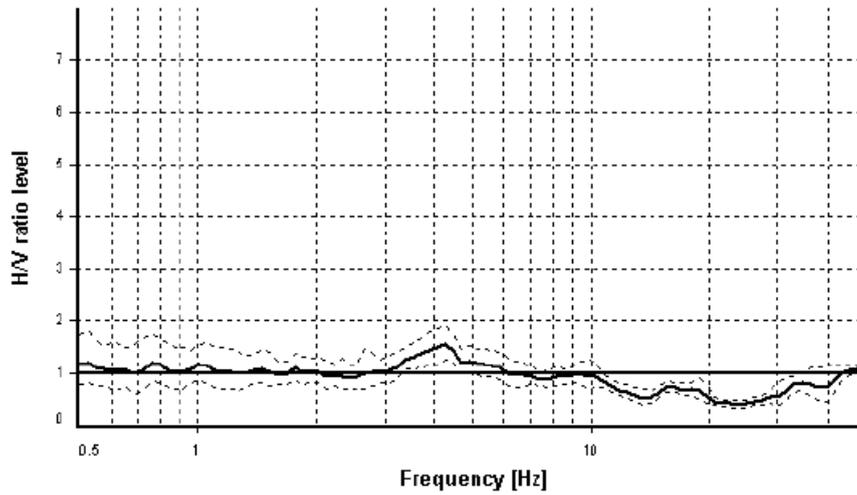
Signal coverage: 72.5%



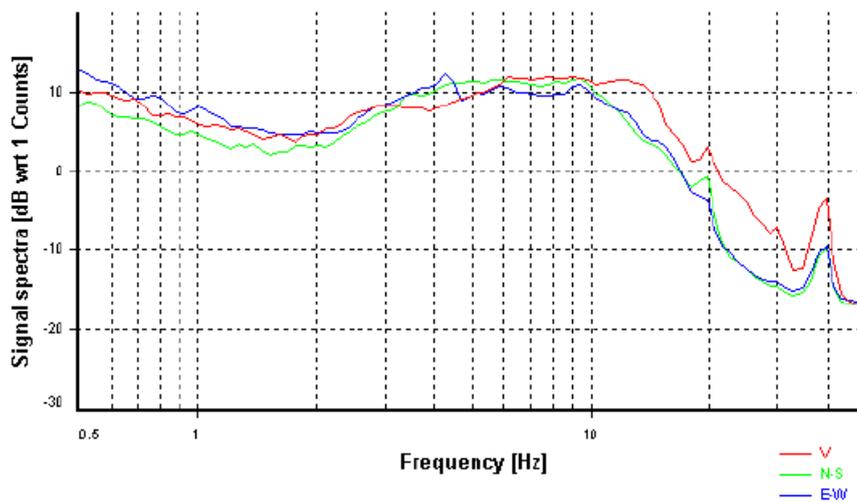
### HVSR ANALYSIS

*Tapering:* Disabled  
*Smoothing:* Proportional triangular (Bandwidth coefficient = 6)  
*Instrumental correction:* Disabled

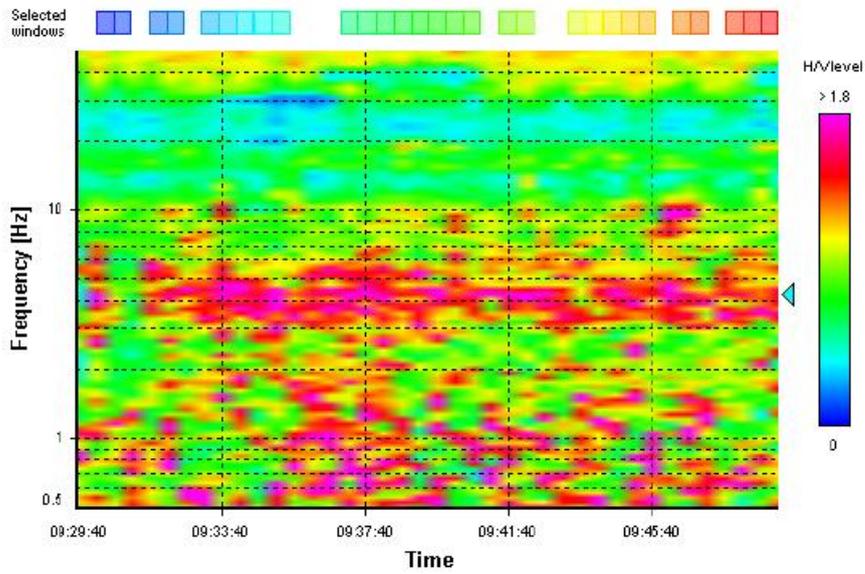
#### HVSR average



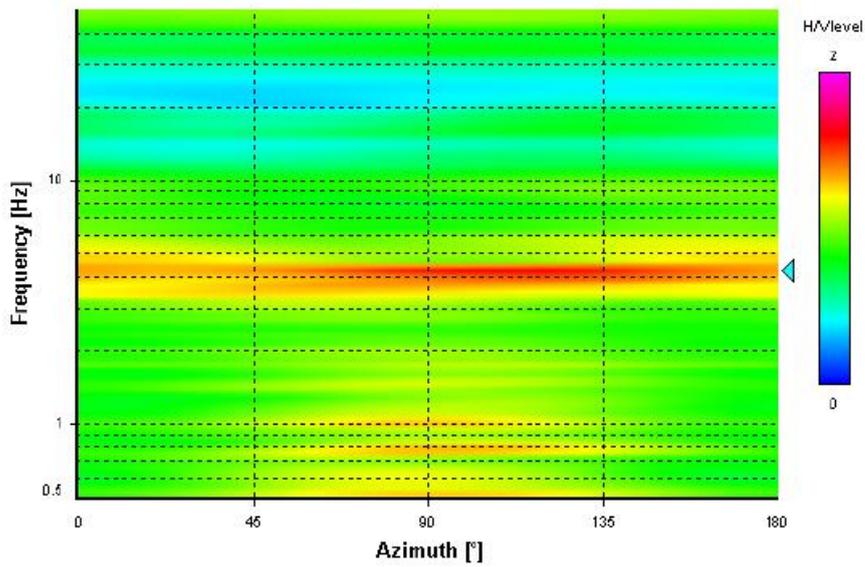
#### Signal spectra average



**HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)**



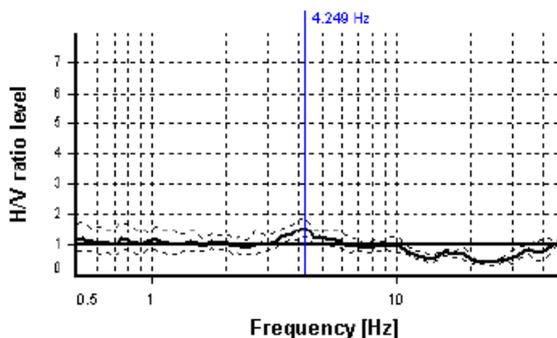
**HVSR directional analysis**



### SESAME CRITERIA

**Selected  $f_0$  frequency**  
**4.249 Hz**

**$A_0$  amplitude = 1.561**  
**Average  $f_0 = 4.317 \pm 0.683$**



HVSR curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	29 valid windows (length > 2.35 s) out of 29	OK
$n_c(f_0) > 200$	3696.43 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 29	OK
HVSR peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f'$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f') < A_0/2$	11.2851 Hz	OK
$A_0 > 2$	1.56 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.68313 >= 0.21244	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.23272 < 1.58	OK
<b>Overall criteria fulfillment</b>		<b>NO</b>

operatore	Bartolozzi	data	14/04/2021	ora	09:54				
Località	Firenze - Stadio A. Franchi								
latitudine	4850015.18	longitudine	1683608.86	quota (m s.l.m.)	52				
nome stazione		orientamento stazione rispetto al Nord	asse X a 0°						
tipo stazione	Echo Tromo HVS3	tipo sensori	velocimetri 2Hz						
nome file	FRANCHI3								
gain		freq. Campion. (Hz)	141	durata (s)	1200				
condizioni meteo	vento	assente	debole	(5m/s)	medio	forte			
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
	pioggia	assente	debole	(5m/s)	medio	forte			
		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
	temperatura approx	8° C							
natura terreno	terra dura	terra soffice	ghiaia	sabbia	roccia	asfalto	cemento	calcestruzzo	altro
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	erba bassa	erba alta	suolo asciutto		suolo umido				
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>				
accoppiamento artificiale al suolo	no	si, tipologia:							
	<input checked="" type="checkbox"/>								
densità edifici	nessuno	dispersi	addensati	altro					
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
transienti		nessuno	pochi	moderati	molti	distanza (m)			
	automobili		X			30-60			
	camion	X							
	pedoni	X							
	altro:								
	<u>persone a lavoro</u>								
fonti di rumore (fabbriche, cantieri, pompe, corsi d'acqua, ecc.)	no	<input type="checkbox"/>							
	si, tipologia: carrello elevatore in movimento; martellate per esecuzione prova DH								
strutture nelle vicinanze (alberi, edifici, ponti, strutture sotterranee, ecc.)	ALBERI a 35m. PROVA ESEGUITA SOTTO LE GRADINATE DELLO STADIO. FERROVIA A 500m. Non è nota la presenza di strutture sotterranee nelle vicinanze								

### STATION INFORMATION

Station code: -

Model: Ambrogeo

Sensor: Echo Tromo 2Hz

### PLACE INFORMATION

Place ID: FRANCHI3

Address: STADIO A. FRANCHI - FIRENZE

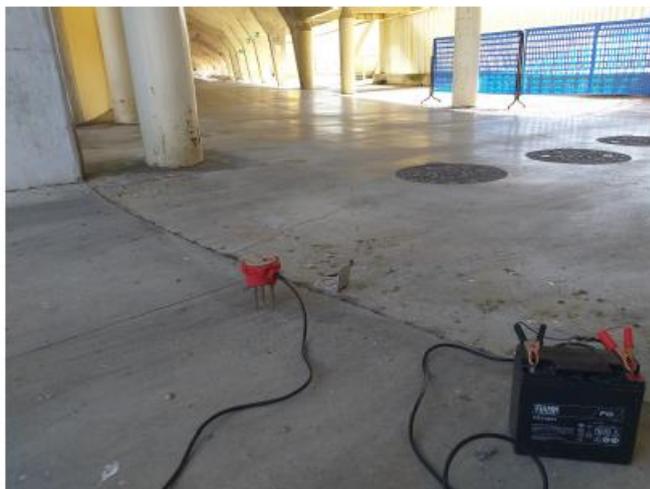
Latitude: 4850015.18

Longitude: 1683608.86

Coordinate system: EPSG3003

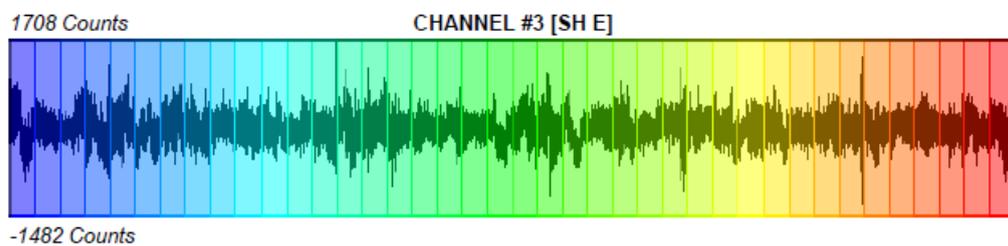
Elevation: 52 m s.l.m.

## PHOTOGRAPHIC REFERENCES



**SIGNAL AND WINDOWING**

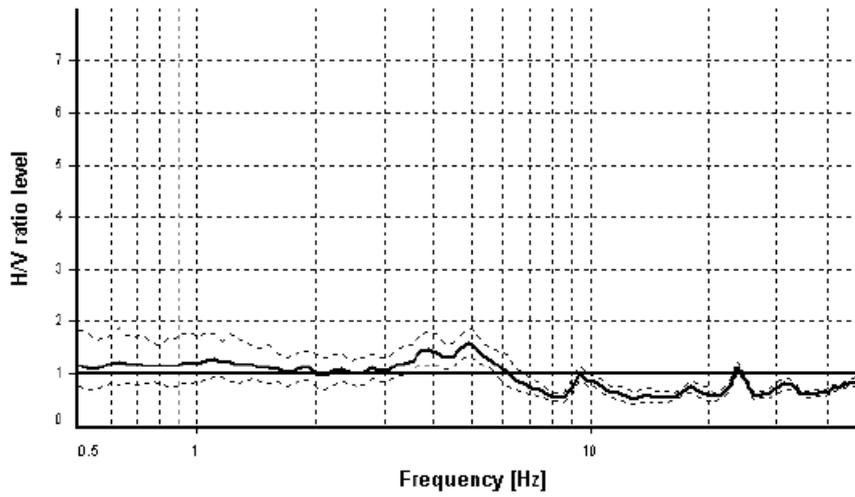
Sampling frequency: 141 Hz  
Recording start time: 2021/04/14 09:54:13  
Recording length: 20 min  
Windows count: 40  
Average windows length: 30  
Signal coverage: 100%



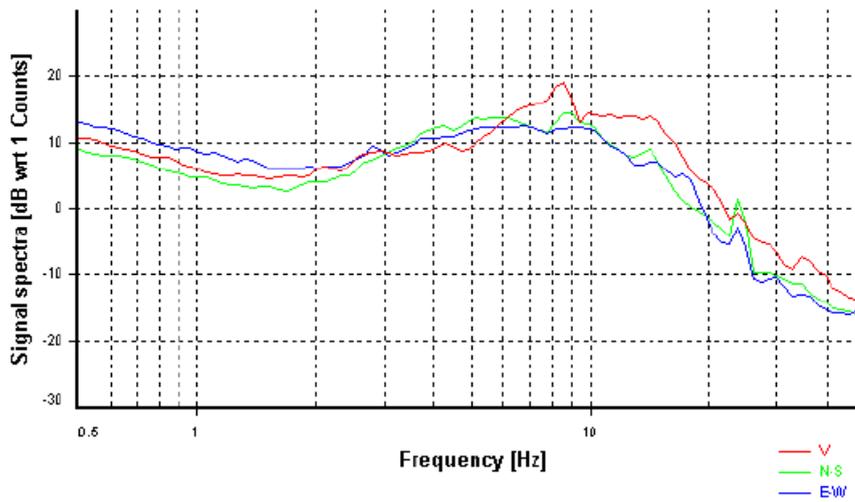
### HVSR ANALYSIS

Tapering: Disabled  
 Smoothing: Proportional triangular (Bandwidth coefficient = 6)  
 Instrumental correction: Disabled

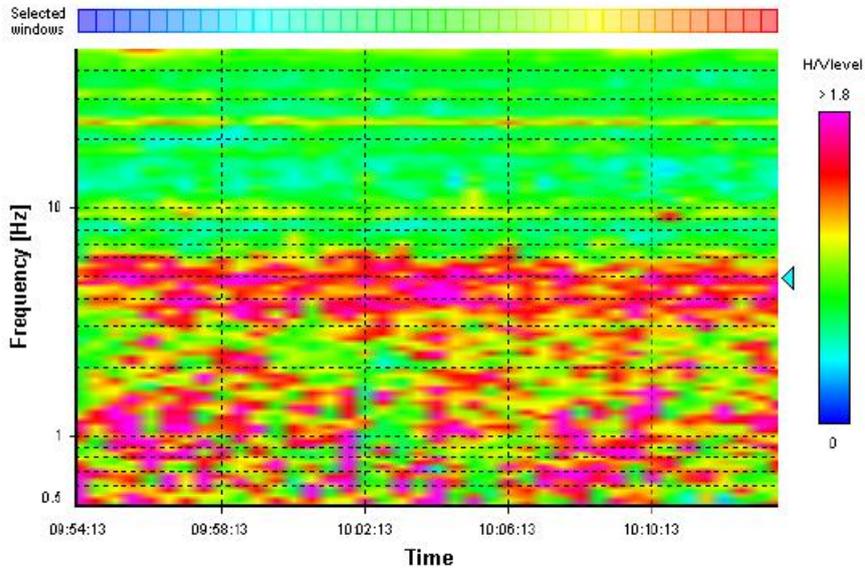
HVSR average



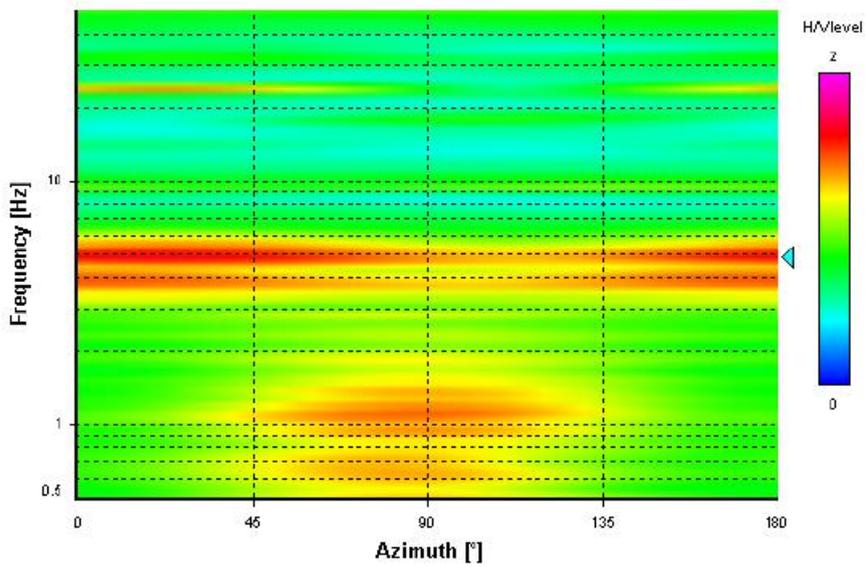
Signal spectra average



### HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



### HVSR directional analysis



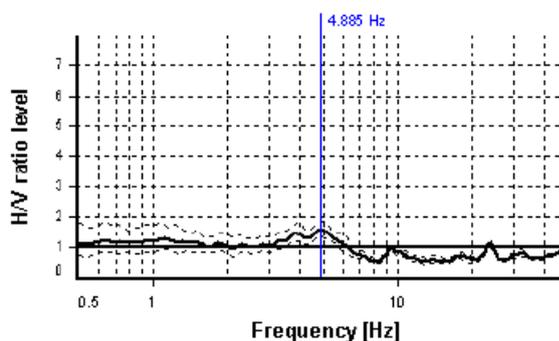
### SESAME CRITERIA

**Selected  $f_0$  frequency**

**4.885 Hz**

**$A_0$  amplitude = 1.590**

**Average  $f_0$  =  $4.439 \pm 0.597$**



HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	40 valid windows (length > 2.05 s) out of 40	OK
$n_c(f_0) > 200$	5862.06 > 200	OK
$\sigma_\Lambda(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 29	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	0 Hz	NO
$\exists f^*$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$	7.08737 Hz	OK
$A_0 > 2$	1.59 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_\Lambda(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.59707 >= 0.24425	NO
$\sigma_\Lambda(f_0) < \theta(f_0)$	1.19121 < 1.58	OK
<b>Overall criteria fulfillment</b>		<b>NO</b>

operatore	Bartolozzi	data	16/04/2021	ora	10:55																														
Località	Firenze - Stadio A. Franchi																																		
latitudine	4850099.79	longitudine	1683845.49	quota (m s.l.m.)	52																														
nome stazione		orientamento stazione rispetto al Nord	asse X a 0°																																
tipo stazione	Echo Tromo HVS3	tipo sensori	velocimetri 2Hz																																
nome file	FRANCHI3																																		
gain		freq. Campion. (Hz)	141	durata (s)	1200																														
condizioni meteo	vento	assente <input checked="" type="checkbox"/>	debole <input type="checkbox"/>	(5m/s) <input type="checkbox"/>	medio <input type="checkbox"/>	forte <input type="checkbox"/>																													
	pioggia	assente <input checked="" type="checkbox"/>	debole <input type="checkbox"/>	(5m/s) <input type="checkbox"/>	medio <input type="checkbox"/>	forte <input type="checkbox"/>																													
	temperatura approx	12° C																																	
natura terreno	terra dura <input type="checkbox"/>	terra soffice <input type="checkbox"/>	ghiaia <input type="checkbox"/>	sabbia <input type="checkbox"/>	roccia <input type="checkbox"/>	asfalto <input type="checkbox"/>	cemento <input type="checkbox"/>	calcestruzzo <input type="checkbox"/>	altro <input type="checkbox"/>																										
	AUTOBLOCCANTI																																		
accoppiamento artificiale al suolo	no <input checked="" type="checkbox"/>	si, tipologia: _____																																	
densità edifici	nessuno <input type="checkbox"/>	dispersi <input type="checkbox"/>	addensati <input checked="" type="checkbox"/>	altro _____																															
<b>transienti</b>																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>nessuno</th> <th>pochi</th> <th>moderati</th> <th>molti</th> <th>distanza (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>automobili</td> <td></td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td>10 - 15</td> </tr> <tr> <td>camion</td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>pedoni</td> <td></td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>altro: CICLISTI</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							nessuno	pochi	moderati	molti	distanza (m)	automobili		X			10 - 15	camion	X					pedoni		X			4	altro: CICLISTI					
	nessuno	pochi	moderati	molti	distanza (m)																														
automobili		X			10 - 15																														
camion	X																																		
pedoni		X			4																														
altro: CICLISTI																																			
<table border="1"> <tr> <td><b>fonti di rumore</b> (fabbriche, cantieri, pompe, corsi d'acqua, ecc.)</td> <td>no <input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td></td> <td>si, tipologia: POMPE DI AERAZIONE</td> </tr> <tr> <td><b>strutture nelle vicinanze</b> (alberi, edifici, ponti, strutture sotterranee, ecc.)</td> <td>ALBERI, PISCINA/PALESTRA SOTTERRANEA</td> </tr> </table>						<b>fonti di rumore</b> (fabbriche, cantieri, pompe, corsi d'acqua, ecc.)	no <input type="checkbox"/>		si, tipologia: POMPE DI AERAZIONE	<b>strutture nelle vicinanze</b> (alberi, edifici, ponti, strutture sotterranee, ecc.)	ALBERI, PISCINA/PALESTRA SOTTERRANEA																								
<b>fonti di rumore</b> (fabbriche, cantieri, pompe, corsi d'acqua, ecc.)	no <input type="checkbox"/>																																		
	si, tipologia: POMPE DI AERAZIONE																																		
<b>strutture nelle vicinanze</b> (alberi, edifici, ponti, strutture sotterranee, ecc.)	ALBERI, PISCINA/PALESTRA SOTTERRANEA																																		

### STATION INFORMATION

Station code: -

Model: Ambrogeo

Sensor: Echo Tromo 2Hz

### PLACE INFORMATION

Place ID: FRANCHI4

Address: STADIO A. FRANCHI - FIRENZE

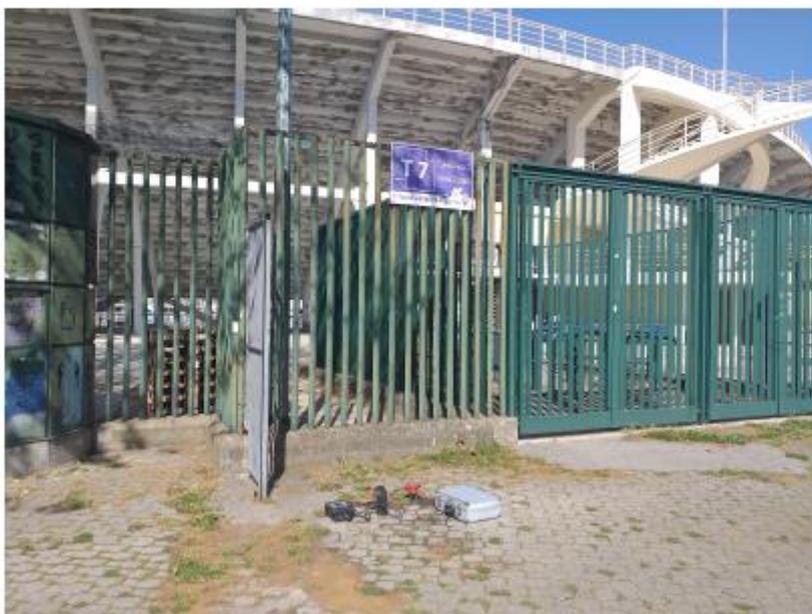
Latitude: 4850099.79

Longitude: 1683845.49

Coordinate system: EPSG 3003

Elevation: 52 m s.l.m.

## PHOTOGRAPHIC REFERENCES



### SIGNAL AND WINDOWING

Sampling frequency: 141 Hz

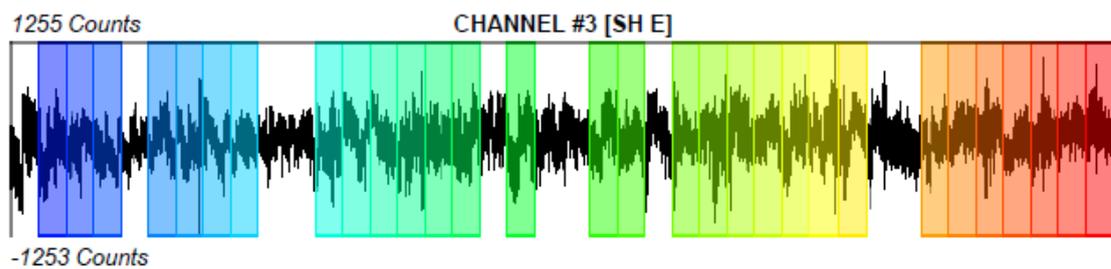
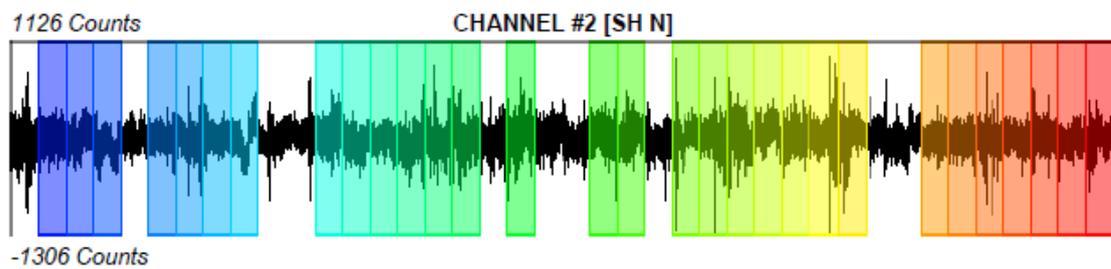
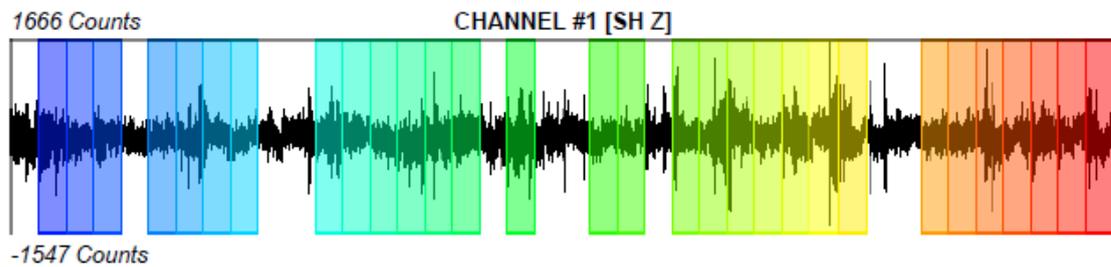
Recording start time: 2021/04/16 10:55:00

Recording length: 20 min

Windows count: 30

Average windows length: 30

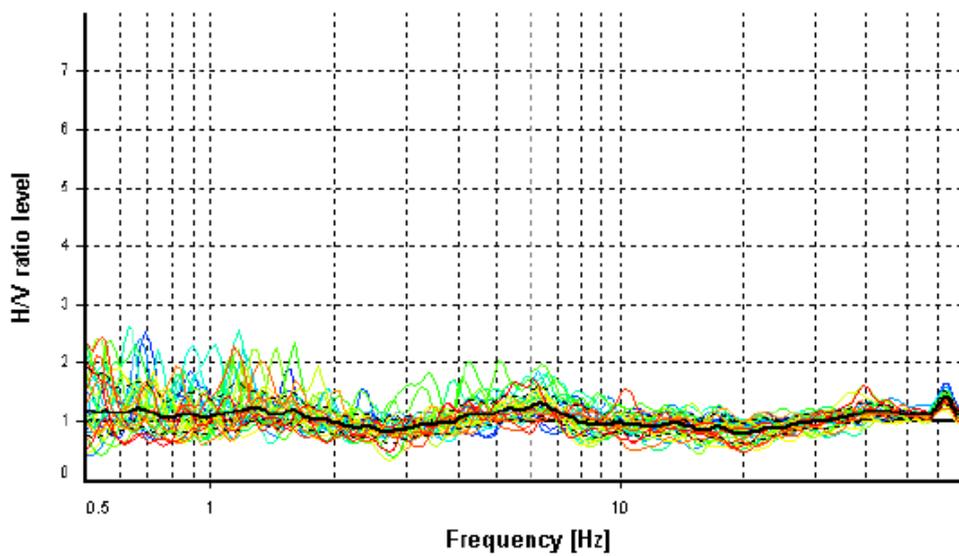
Signal coverage: 75%



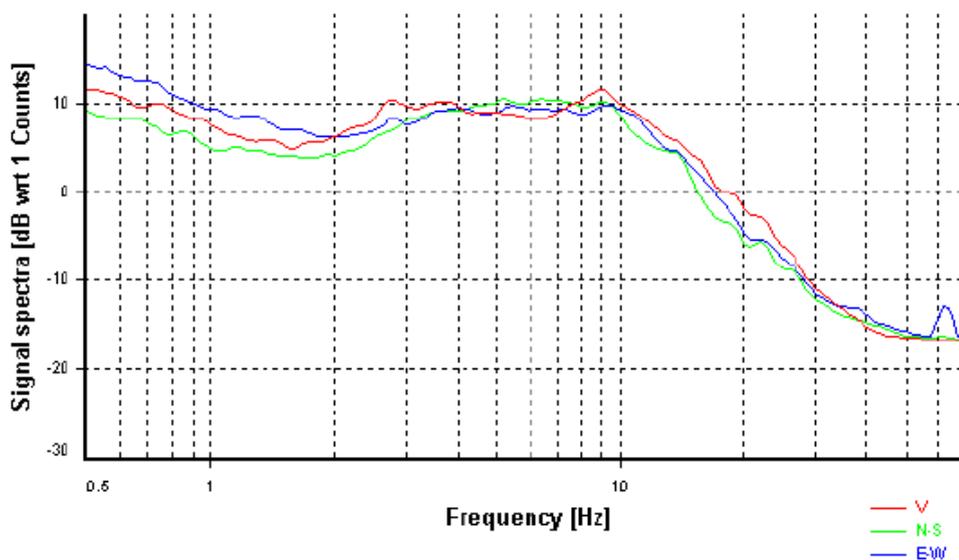
### HVSR ANALYSIS

Tapering: Disabled  
 Smoothing: Proportional triangular (Bandwidth coefficient = 8)  
 Instrumental correction: Disabled

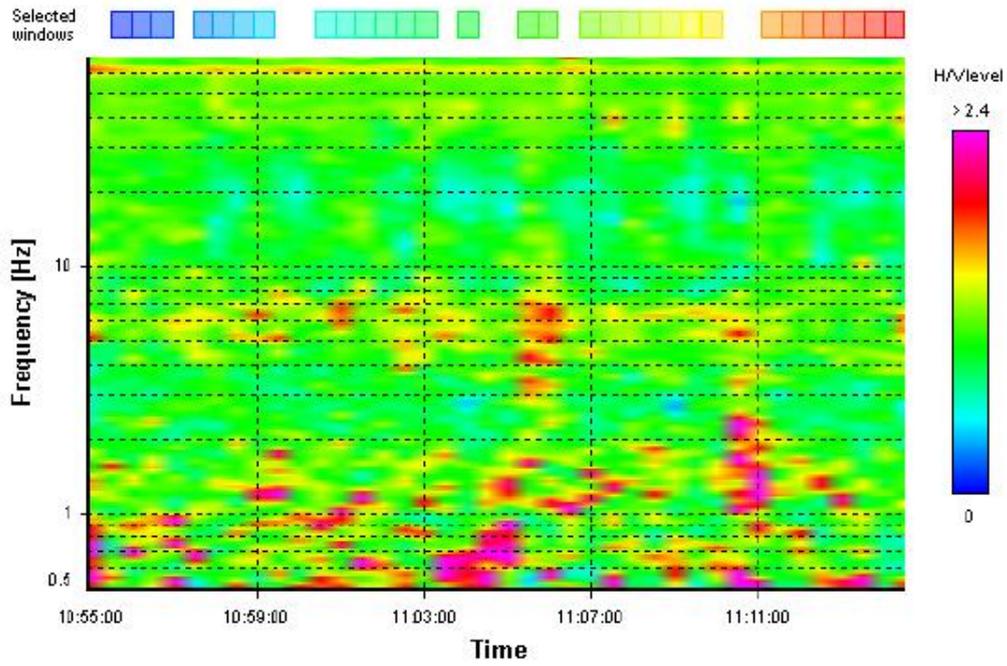
#### HVSR average



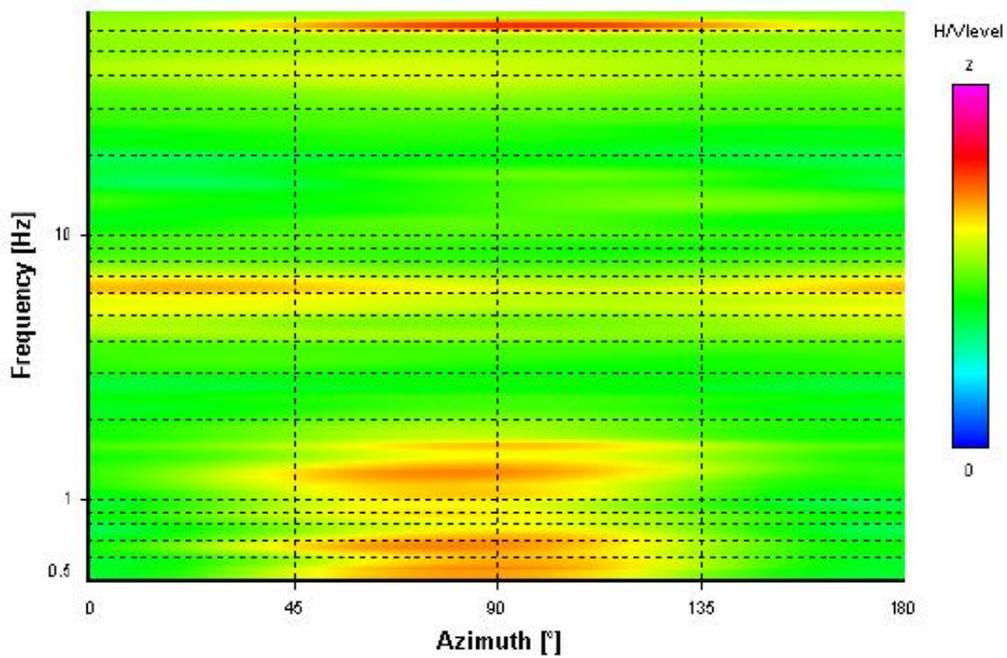
#### Signal spectra average



### HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



### HVSR directional analysis



operatore	Bartolozzi	data	16/04/2021	ora	11:20																														
Località	Firenze - Stadio A. Franchi																																		
latitudine	4850218.64	longitudine	1683758.64	quota (m s.l.m.)	53																														
nome stazione		orientamento stazione rispetto al Nord	asse X a 0°																																
tipo stazione	Echo Tromo HVSR3	tipo sensori	velocimetri 2Hz																																
nome file	FRANCHI3																																		
gain		freq. Campion. (Hz)	141	durata (s)	1200																														
condizioni meteo	vento	assente <input checked="" type="checkbox"/>	debole <input type="checkbox"/>	(5m/s) <input type="checkbox"/>	medio <input type="checkbox"/>	forte <input type="checkbox"/>																													
	pioggia	assente <input checked="" type="checkbox"/>	debole <input type="checkbox"/>	(5m/s) <input type="checkbox"/>	medio <input type="checkbox"/>	forte <input type="checkbox"/>																													
	temperatura approx	12° C																																	
natura terreno	terra dura <input checked="" type="checkbox"/>	terra soffice <input type="checkbox"/>	ghiaia <input type="checkbox"/>	sabbia <input type="checkbox"/>	roccia <input type="checkbox"/>	asfalto <input type="checkbox"/>	cemento <input type="checkbox"/>	calcestruzzo <input type="checkbox"/>	altro _____																										
	erba bassa <input checked="" type="checkbox"/>	erba alta <input type="checkbox"/>	suolo asciutto <input checked="" type="checkbox"/>		suolo umido <input type="checkbox"/>																														
accoppiamento artificiale al suolo	no <input checked="" type="checkbox"/>		si, tipologia: _____																																
densità edifici	nessuno <input type="checkbox"/>	dispersi <input type="checkbox"/>	addensati <input checked="" type="checkbox"/>	altro _____																															
<b>transienti</b>																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>nessuno</th> <th>pochi</th> <th>moderati</th> <th>molti</th> <th>distanza (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>automobili</td> <td></td> <td></td> <td>X</td> <td></td> <td>10 - 15</td> </tr> <tr> <td>camion</td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>pedoni</td> <td></td> <td></td> <td>X</td> <td></td> <td>2 - 5</td> </tr> <tr> <td>altro:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							nessuno	pochi	moderati	molti	distanza (m)	automobili			X		10 - 15	camion	X					pedoni			X		2 - 5	altro:					
	nessuno	pochi	moderati	molti	distanza (m)																														
automobili			X		10 - 15																														
camion	X																																		
pedoni			X		2 - 5																														
altro:																																			
<table border="1"> <tr> <td>fonti di rumore (fabbriche, cantieri, pompe, corsi d'acqua, ecc.)</td> <td>no <input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>strutture nelle vicinanze (alberi, edifici, ponti, strutture sotterranee, ecc.)</td> <td>ALBERI, RECINZIONE METALLICA</td> </tr> </table>						fonti di rumore (fabbriche, cantieri, pompe, corsi d'acqua, ecc.)	no <input checked="" type="checkbox"/>	strutture nelle vicinanze (alberi, edifici, ponti, strutture sotterranee, ecc.)	ALBERI, RECINZIONE METALLICA																										
fonti di rumore (fabbriche, cantieri, pompe, corsi d'acqua, ecc.)	no <input checked="" type="checkbox"/>																																		
strutture nelle vicinanze (alberi, edifici, ponti, strutture sotterranee, ecc.)	ALBERI, RECINZIONE METALLICA																																		

### STATION INFORMATION

Station code: -

Model: Ambrogeo

Sensor: Echo Tromo 2Hz

### PLACE INFORMATION

Place ID: FRANCHI 5

Address: STADIO A. FRANCHI - FIRENZE

Latitude: 4850218.64

Longitude: 1683758.64

Coordinate system: EPSG 3003

Elevation: 53 m s.l.m.

## PHOTOGRAPHIC REFERENCES



### SIGNAL AND WINDOWING

Sampling frequency: 141 Hz

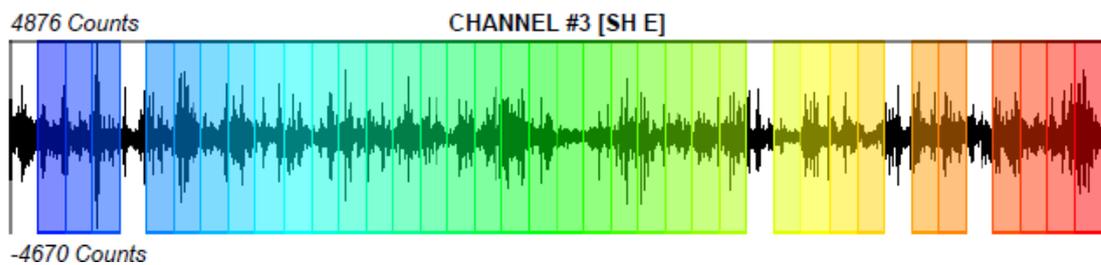
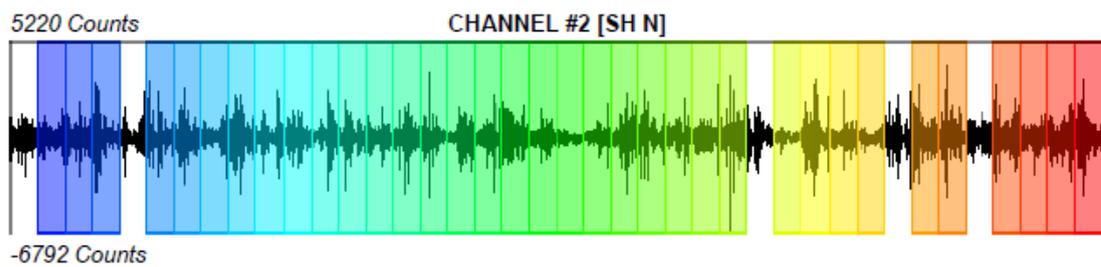
Recording start time: 2021/04/16 11:20:34

Recording length: 20 min

Windows count: 35

Average windows length: 30

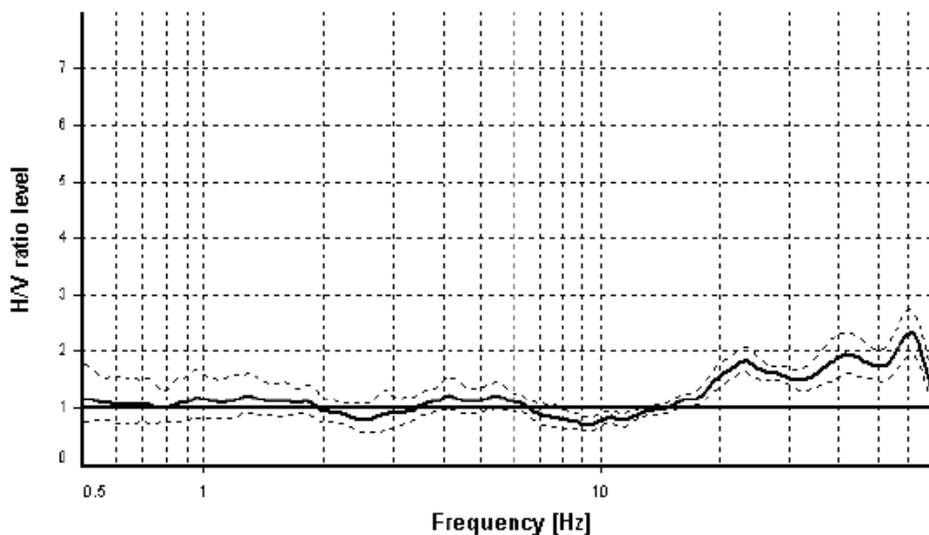
Signal coverage: 87.5%



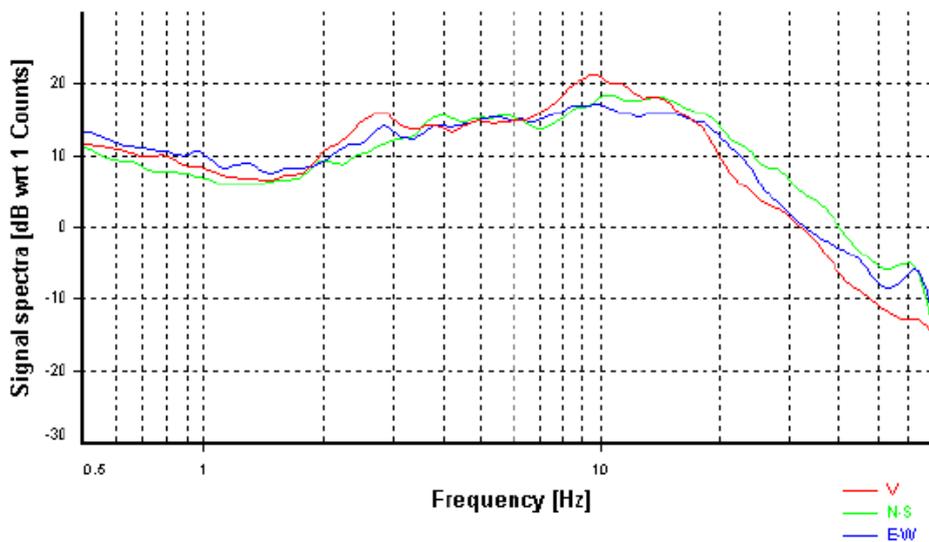
### HVSR ANALYSIS

*Tapering:* Disabled  
*Smoothing:* Proportional triangular (Bandwidth coefficient = 8)  
*Instrumental correction:* Disabled

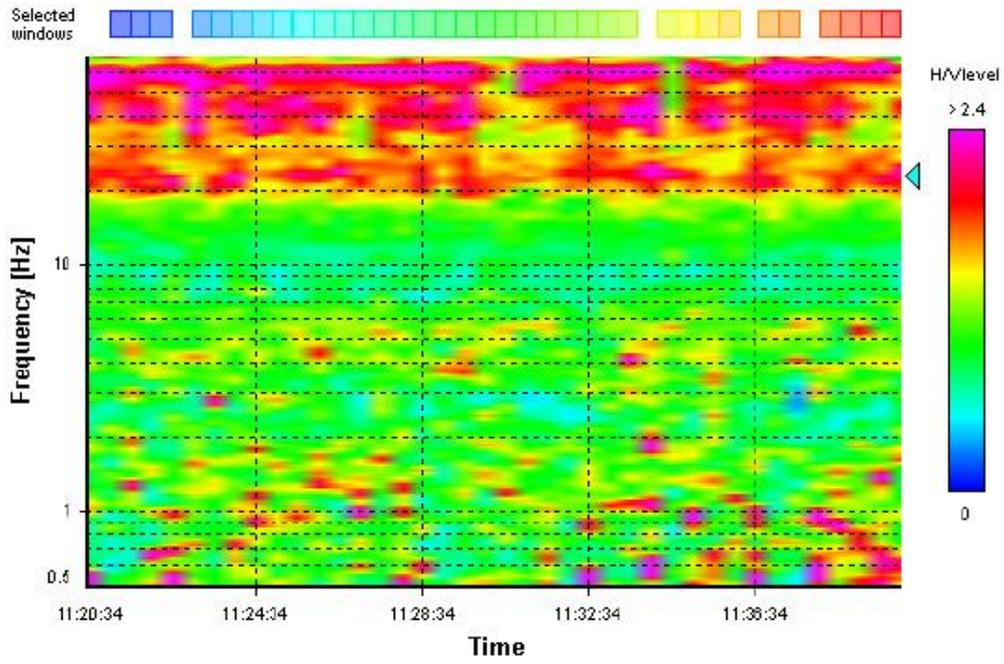
#### HVSR average



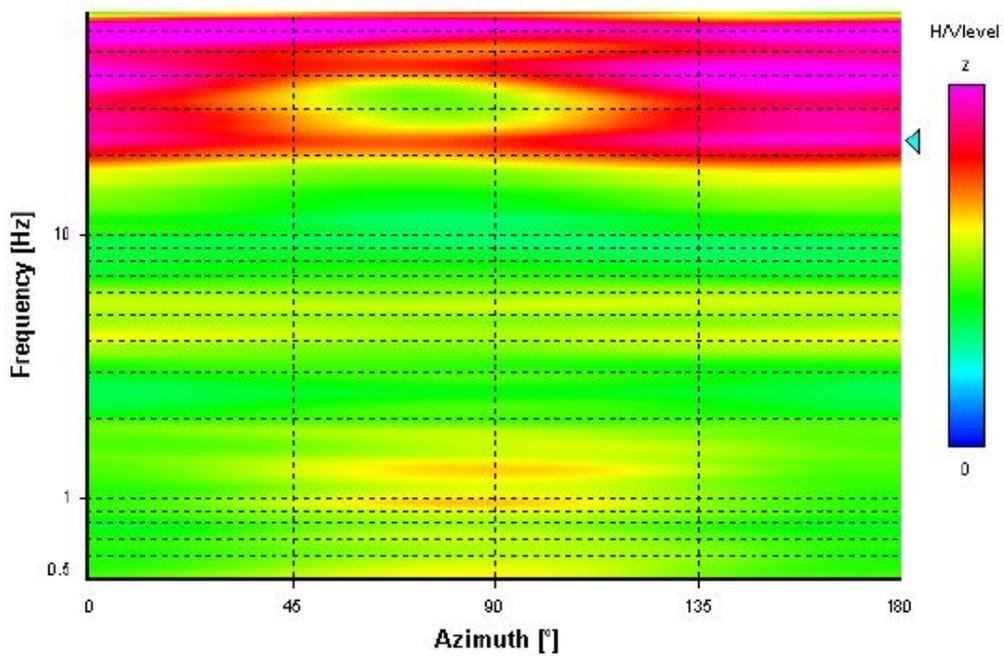
#### Signal spectra average



### HVSR time-frequency analysis (30 seconds windows)



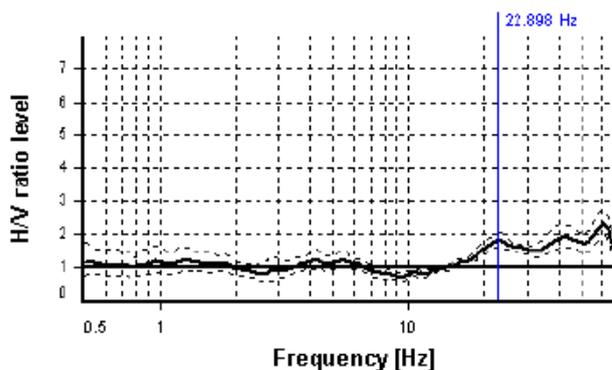
### HVSR directional analysis



### SESAME CRITERIA

**Selected  $f_0$  frequency**  
**22.898 Hz**

**$A_0$  amplitude = 1.838**  
**Average  $f_0 = 23.895 \pm 3.199$**



HVSr curve reliability criteria		
$f_0 > 10 / L_w$	35 valid windows (length > 0.44 s) out of 35	OK
$n_c(f_0) > 200$	24042.63 > 200	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$	Exceeded 0 times in 55	OK
HVSr peak clarity criteria		
$\exists f$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f) < A_0/2$	12.61721 Hz	OK
$\exists f^*$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^*) < A_0/2$	0 Hz	NO
$A_0 > 2$	1.84 <= 2	NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0% <= 5%	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	3.19881 >= 1.14489	NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	1.12156 < 1.58	OK
Overall criteria fulfillment		NO

## 2.3 Sondaggi



**IGeA sas**

IGeA sas  
Via Sagginalese 126-128  
50032 Borgo San Lorenzo (FI)

Committente: Comune di Firenze  
Località: Stadio Franchi

Data inizio/fine: 24/26-03-21  
Attrezzatura: FD3 EGT  
Profondità perforazione (m): 30

Sondaggio SD						
	Spessore (m)	Profondità (m)	Stratigrafia	S.P.T. CAMPION.	Descrizione	Documentazione fotografica
1	3	3			Riporto eterogeneo costituito da alternanza di litologie limoso sabbiose e da materiali antropici	
2						
3						
4	2.8	5.8		4;8;12	Limi sabbiosi beige con rari inclusi ghiaiosi centimetrici	
5						
6	8.7			8;9;12	Ghiaie centimetriche mediamente arrotondate e sabbie in matrice limosa	
7						
8						
9						
10						
11	14.5			17;21;19		
12						
13						
14				15;18;23		
15						



IGeA sas  
Via Sagginalese 126-128  
50032 Borgo San Lorenzo (FI)

Committente: Comune di Firenze  
Località: Stadio Franchi

Data inizio/fine: 24/26-03-21  
Attrezzatura: FD3 EGT  
Profondità perforazione (m): 30

Sondaggio SD						
	Spessore (m)	Profondità (m)	Stratigrafia	S.P.T.	Descrizione	Documentazione fotografica
16	4.9	19.4		6,11,15	Sabbie limose con ghiaia centimetrica angolosa	
17						
18						
19						
20	10.6	30			Limi sabbiosi beige e grigi con ghiaia centimetrica angolosa	
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						

## 2.4 Indagine sismica Down Hole

Lo scopo della prova consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di volume, di compressione (onde P) e di taglio (onde S), calcolando il tempo ad esse necessario per spostarsi tra due o più punti (sorgente e ricevitori) di cui è nota la distanza.

La prova down-hole dovrebbe essere effettuata quando la profondità delle coperture da esplorare sono superiori a qualche metro e si rende necessaria soprattutto quando non si voglia ricorrere a delle indagini eccessivamente costose, ma si richiedano dei risultati di qualità e precisione da media a buona.

Teoricamente sarebbe opportuno spingere la prova fino ad incontrare il bedrock attraversandolo per uno spessore significativo, tenendo comunque presente che in alcuni contesti geologici l'affidabilità della prova con tecniche di interpretazione convenzionali oltre i 40 m di profondità è generalmente scarsa e l'energia generata dalla sorgente potrebbe non essere sufficiente all'univoca individuazione dei primi arrivi.

Si suppone che il volume di terreno interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno di ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo. Qualora queste caratteristiche non siano verificate è necessario operare con più punti di energizzazione.

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno una sollecitazione orizzontale mediante una sorgente meccanica, e nello studiare il treno d'onde, P e S, che si propagano all'interno del terreno alle varie profondità in direzione verticale, con vibrazioni polarizzate nella direzione di propagazione (onde P), e dirette perpendicolarmente alla direzione di propagazione, polarizzate su un piano orizzontale (onde SH). L'istante di arrivo del treno di onde P e di onde S rispetto all'istante in cui vengono indotte le sollecitazioni alla sorgente viene valutato mediante due ricevitori (geofoni tridimensionali) disposti nel terreno a profondità note; dividendo quindi per tali valori la distanza (nota) tra sorgente e ricevitori, si può ricavare la velocità delle onde P e S.

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prove si compone delle seguenti parti:

- sistema sorgente
- sistema di ricezione
- sistema di acquisizione dati
- trigger

### *Sistema sorgente.*

La sorgente è in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali, cioè con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione e/o di taglio polarizzate su piani orizzontali (ed eventualmente anche verticali). Per generare le onde di compressione P, si utilizzeranno i metodi classici quali caduta di un grave, cannoncino, mazza, etc.. Per generare le onde SH la sorgente è generalmente costituita da un parallelepipedo di legno e di forma tale da potere essere colpito lateralmente ad entrambe le estremità con una massa. E' importante che il parallelepipedo venga gravato di un carico statico addizionale in modo che possa rimanere aderente al terreno sia al momento in cui viene colpita sia successivamente, affinché l'energia prodotta non venga in parte dispersa.

Con questo dispositivo è possibile generare essenzialmente delle onde elastiche di taglio polarizzate orizzontalmente, con uniformità nella polarizzazione e con una generazione di onde P trascurabile. Inoltre, data l'entità di energia generalmente prodotta, le deformazioni indotte nel terreno in prossimità della superficie sono inferiori a  $10^{-2}$  % e decrescono con la profondità.

È necessario un buon accoppiamento fra parallelepipedo e terreno, cosa che si ottiene facilmente in terreni a granulometria fine; nel caso viceversa di terreni a granulometria più grossolana sarà necessario approntare delle piazzole realizzando uno strato di materiale fine al contatto con il parallelepipedo energizzante. Sono da evitare come punti di energizzazione zone in cui affiorano rocce compatte e superfici bitumate.

Va tenuto conto che minore è la superficie di accoppiamento parallelepipedo - terreno, più pulito e ricco in alte frequenze sarà il segnale, d'altra parte soprattutto con superfici di contatto ridotte è necessario verificare che il parallelepipedo non si infossi nel terreno poiché in tal caso si produrrebbero onde di compressione.

### *Sistema di ricezione.*

Tale sistema si deve comporre di due (o più) ricevitori, ciascuno dei quali è costituito da un trasduttore di velocità orientato secondo le componenti di una terna cartesiana ortonormale e collocati all'interno di un unico contenitore di lunghezza circa 450 mm, in modo che uno dei tre trasduttori sia orientato secondo la lunghezza del contenitore (trasduttore verticale) e gli altri ad esso perpendicolari (trasduttori orizzontali).

I trasduttori hanno appropriate caratteristiche di frequenza e sensibilità tali da potere ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto dalla sorgente. La risposta in frequenza dei trasduttori non deve variare più del 5% su un campo di frequenze compreso tra metà e due volte la frequenza predominante del treno d'onde che si propaga all'interno del mezzo.

I ricevitori sono collegati secondo la loro lunghezza, in modo di fissarne la distanza verticale pari ad 1 metro e l'orientazione relativa (in modo che i trasduttori orizzontali siano paralleli e concordi a due a due) e in modo tale da potere anche controllare dalla superficie l'orientazione assoluta.

Il sistema di ancoraggio, per garantire un buon accoppiamento in foro tra i ricevitori e le pareti di rivestimento, è stato realizzato mediante quattro pistoncini pneumatici collegati ad un compressore d'aria.

Il sistema ricezione è un geofono da foro AMBROGEO costituito da una doppia terna geofonica spaziata 1 metro l'una dall'altra.

### *Trigger.*

Il trigger consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la sorgente viene attivata, consentendo a un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato ad un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica.

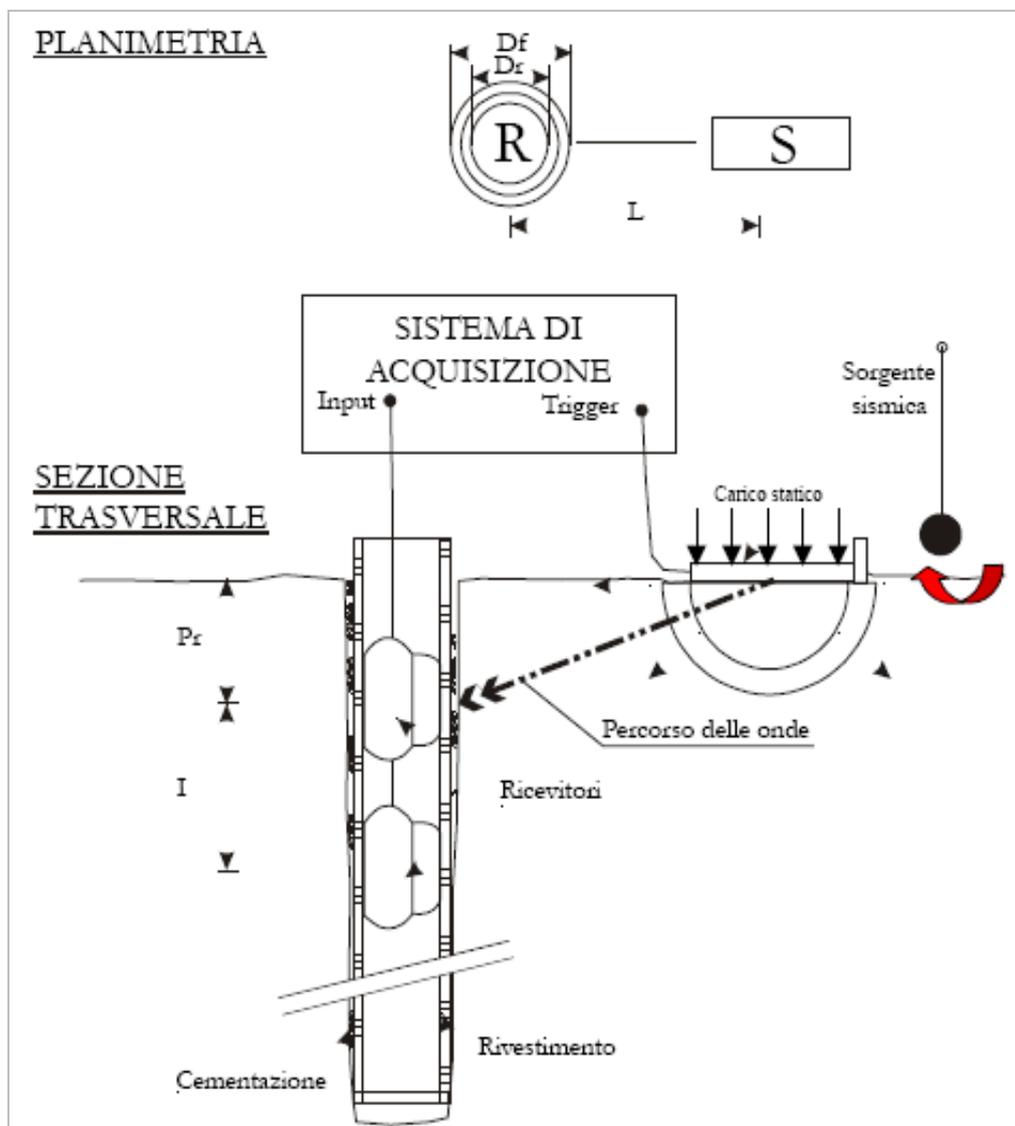
### *Sistema di acquisizione dati.*

Si tratta di un sistema multicanale in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica a 16 bit. Il sistema è un sismografo marca AMBROGEO 12/24/48.

Esso è collegato a ciascuno dei trasduttori di velocità ed al sensore del trigger e consente quindi di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un

apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger. Poiché è necessario eseguire la differenza tra traccia relativa alla battuta destra e quella alla battuta sinistra, è auspicabile una strumentazione che preveda la funzione "inversione di polarità".

L'esecuzione della prova down-hole deve essere preceduta da una fase preparatoria durante la quale viene realizzato il foro in cui alloggiare i ricevitori e vengono preparati gli strumenti di registrazione.



La prova si sviluppa secondo le seguenti fasi:

1. Dopo avere predisposto un opportuno piano d'appoggio la sorgente viene collocata sulla superficie in prossimità del foro ad una distanza dal centro in genere compresa tra 1m e 5 m (da concordare con la direzione lavori) e orientata perpendicolarmente al raggio uscente dal foro.

Per la produzione di onde P si energizza con massa battente ed impatto verticale; per la produzione di onde SH la sorgente (parallelepipedo, trave) viene fissata al terreno applicando sulla sua superficie un carico statico.

2. Il sistema, costituito dai due ricevitori (geofoni tridimensionali), equidistanti e con costante orientamento relativo, viene calato alla profondità desiderata collegandolo alla superficie mediante un sistema che ne consente l'orientamento assoluto dalla superficie.

3. Il sistema dei ricevitori viene orientato dalla superficie in modo tale che uno dei trasduttori orizzontali di ciascun ricevitore sia orientato parallelamente all'asse della sorgente e quindi alla direzione di polarizzazione delle onde S, in modo da massimizzarne l'ampiezza di ricezione ai ricevitori. Quindi i ricevitori vengono fissati alle pareti del tubo.

4. Viene attivata la registrazione (pre-trigger) delle vibrazioni rilevate e dai trasduttori che costituiscono i ricevitori con un opportuno anticipo rispetto all'attivazione della sorgente. Tale fase può essere evitata nel caso che la strumentazione consenta la registrazione del segnale all'istante di time-break cioè all'attivazione del segnale.

5. Viene attivata la sorgente, producendo una sollecitazione che, attivando il trigger, si propaga dalla sorgente verso i ricevitori con vibrazioni di tipo P; in seguito si generano vibrazioni di tipo S, dirette perpendicolarmente alla direzione di percussione e polarizzate sul piano orizzontale. Il tempo di registrazione deve essere tale da consentire la rappresentazione dei treni d'onda nella loro interezza. Poiché si debbono ricavare le onde SH, per la buona qualità dei dati si debbono produrre alla sorgente due onde di polarità opposta e sommare le registrazioni di ogni singolo ricevitore, in modo da individuare meglio l'istante di primo arrivo (metodo cross-over). Detta operazione deve essere eseguita in campagna, in fase di acquisizione, se lo strumento prevede l'inversione di polarità. Può essere eseguita registrando separatamente i files battuta destra - battuta sinistra, ma in questo caso sarà necessario un bilanciamento spettrale prima di procedere alla differenza delle tracce.

In ogni caso la lunghezza di registrazione deve essere non limitata al primo arrivo ma a tutto il segnale fino ad un decadimento dell'ampiezza del 90% rispetto all'ampiezza massima.

Per quanto riguarda l'interpretazione dei tracciati registrati durante la prova per la determinazione della velocità di propagazione delle onde sismiche, esistono varie tecniche nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza.

Per determinare il tempo di arrivo delle onde  $P$  e  $S$  ai ricevitori, si procede ad un'analisi visuale delle registrazioni delle vibrazioni rilevate dai trasduttori del ricevitore confrontate con il segnale di trigger ( $t_0$ ) o inizio registrazione.

Pur essendo possibile operare con il sistema di pre-triggering si deve operare con il doppio sistema di energizzazione, percussione verticale per le onde  $P$ , percussione orizzontale per le  $SH$ , nelle registrazioni energizzate in verticale si valuterà il primo arrivo in  $P$ ; nelle registrazioni energizzate con percussione orizzontale, sottratte le registrazioni "battuta destra-battuta sinistra", il primo arrivo sarà costituito dalle onde di taglio  $SH$  poiché eventuali onde di compressione provocate durante l'energizzazione tenderanno, con la differenza "battuta destra-battuta sinistra" a ridursi in ampiezza laddove le  $SH$  (che invertono in polarità a seconda della direzione di battuta) tenderanno a sommarsi aumentando così d'ampiezza.

Si ipotizza che il percorso delle onde tra sorgente e ricevitori sia rettilineo, trascurando i fenomeni di rifrazione che ne modificano il percorso. Poiché le onde sismiche prodotte dalla sorgente non si propagano esattamente in direzione verticale rispetto ai ricevitori, data la posizione della sorgente, è necessario correggere i tempi di arrivo stimati per tenere conto dell'inclinazione del percorso effettivo.

Indicata con  $z$  la profondità del ricevitore, con  $d$  la distanza effettiva tra sorgente e ricevitore e con  $R$  la distanza superficiale tra sorgente e centro del foro, con  $t$  il tempo determinato dalle tracce di registrazione, il tempo corretto risulta:

$$t^* = \frac{z}{d} t = \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} t$$

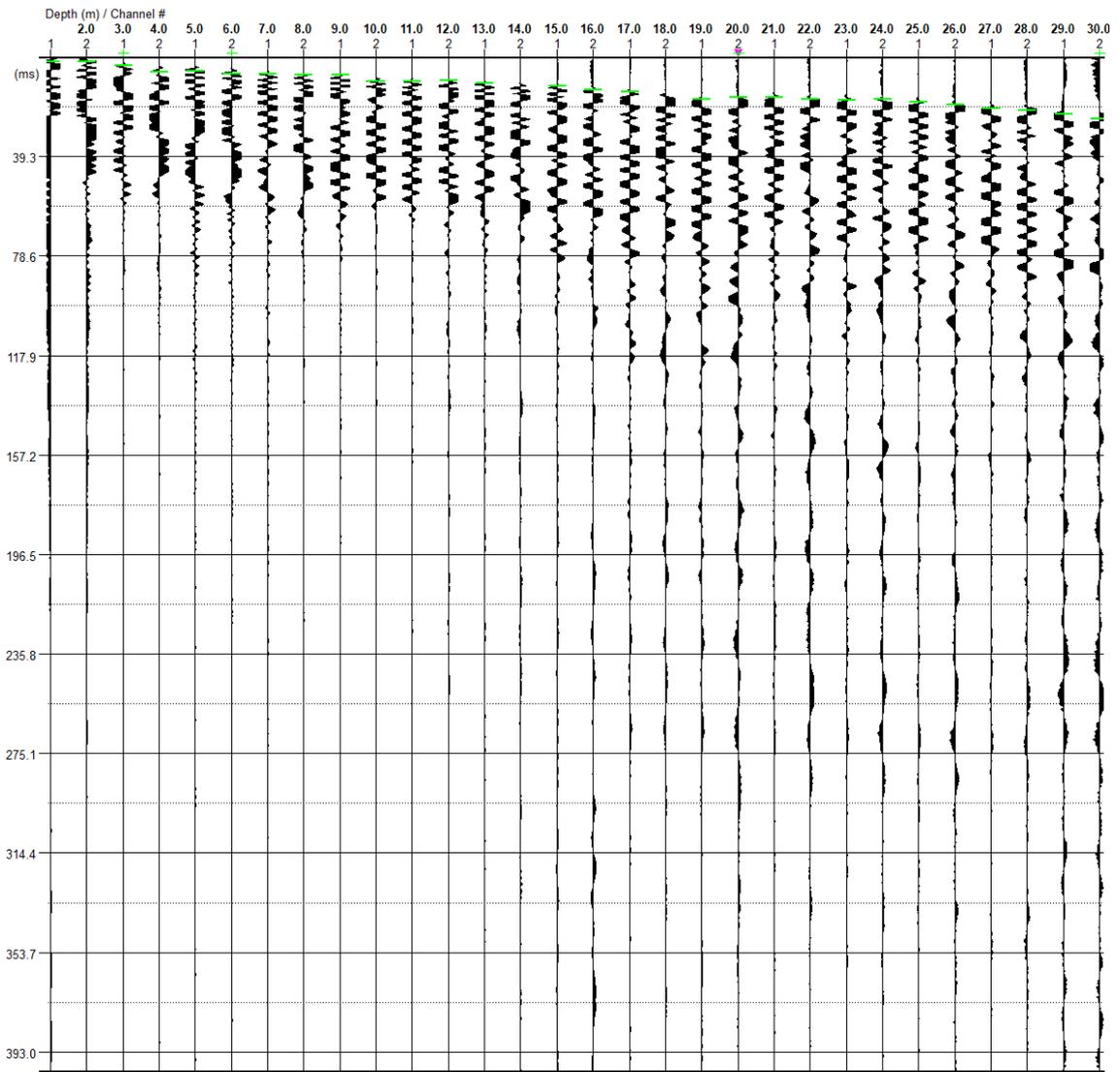
Dividendo la profondità a cui viene collocato il ricevitore per il tempo corretto si ricavano i valori di velocità per ciascuno dei ricevitori, in corrispondenza di ciascuna delle profondità considerate.

È anche possibile ricavare le velocità dividendo la differenza tra due profondità successive per la differenza tra i tempi determinati in corrispondenza di ciascuna delle profondità considerate e possono corrispondere allo stesso impulso (in tal caso le profondità corrispondono a quelle dei due o più ricevitori rigidamente collegati tra di loro e le velocità si definiscono velocità d'intervallo) o a due impulsi successivi (per cui le profondità sono quelle d'avanzamento della prova e le velocità calcolate si definiscono velocità di pseudo-intervallo).

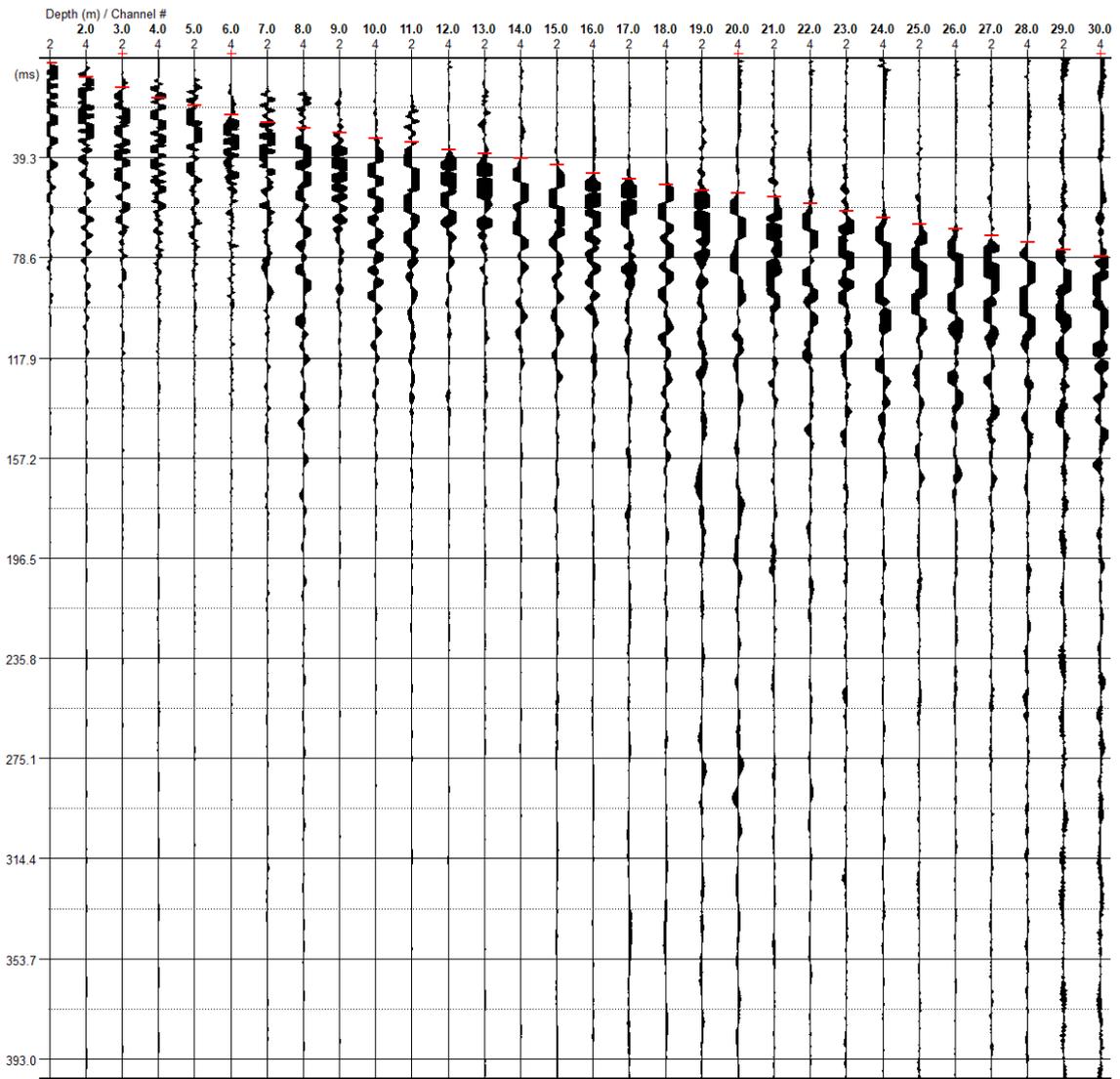
Va rilevato che non sempre i tracciati registrati dai ricevitori sono chiari e univocamente interpretabili sia per l'eventuale presenza di onde rifratte di ampiezze non trascurabili che precedendo le onde dirette ingannano sui reali tempi d'arrivo indicando velocità intervallari anomale.

Va rilevato che talora, in profondità, l'istante di primo arrivo delle onde non è facilmente individuabile, ma sfruttando il fatto di disporre di più ricevitori, si può far riferimento ai tracciati registrati da ciascuno di essi ricercando dei punti caratteristici (picchi o flessi) successivi al primo arrivo ritrovabili in entrambi i segnali e stimandone il ritardo ricavandone la velocità d'intervallo (in tal caso affinché ad ogni picco dell'una registrazione corrispondano rispettivamente i picchi o i flessi dell'altra è necessario che sia stata precedentemente stimato l'effetto dell'orientazione dei trasduttori rispetto alla direzione di propagazione delle onde e che sia noto se i trasduttori siano orientati in maniera concorde o discorde).

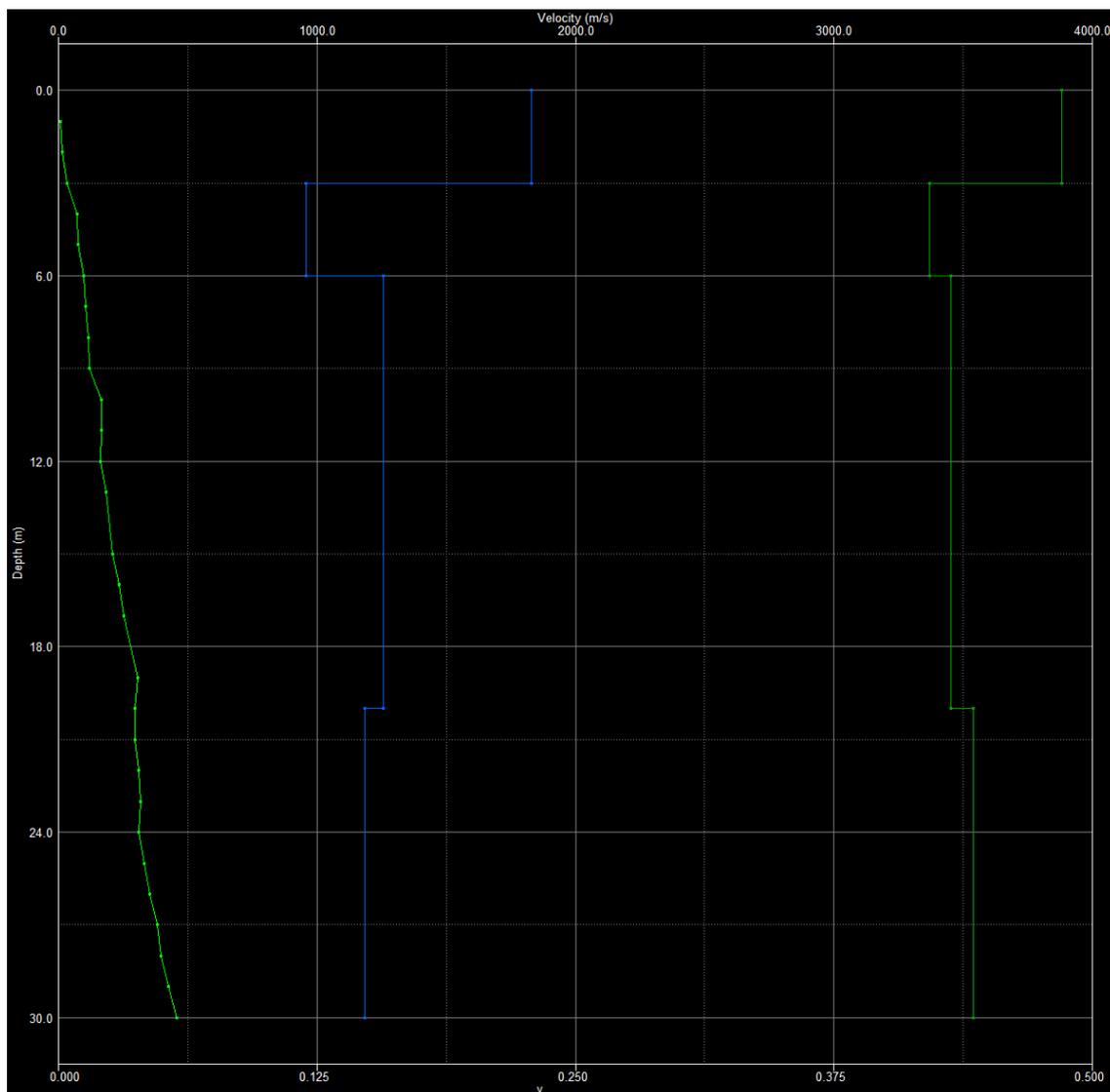
Per l'elaborazione dati è stato usato il software Geogiga Seismic Pro 9.02 – PS Log. Si riportano di seguito alcuni stralci dell'elaborazione.



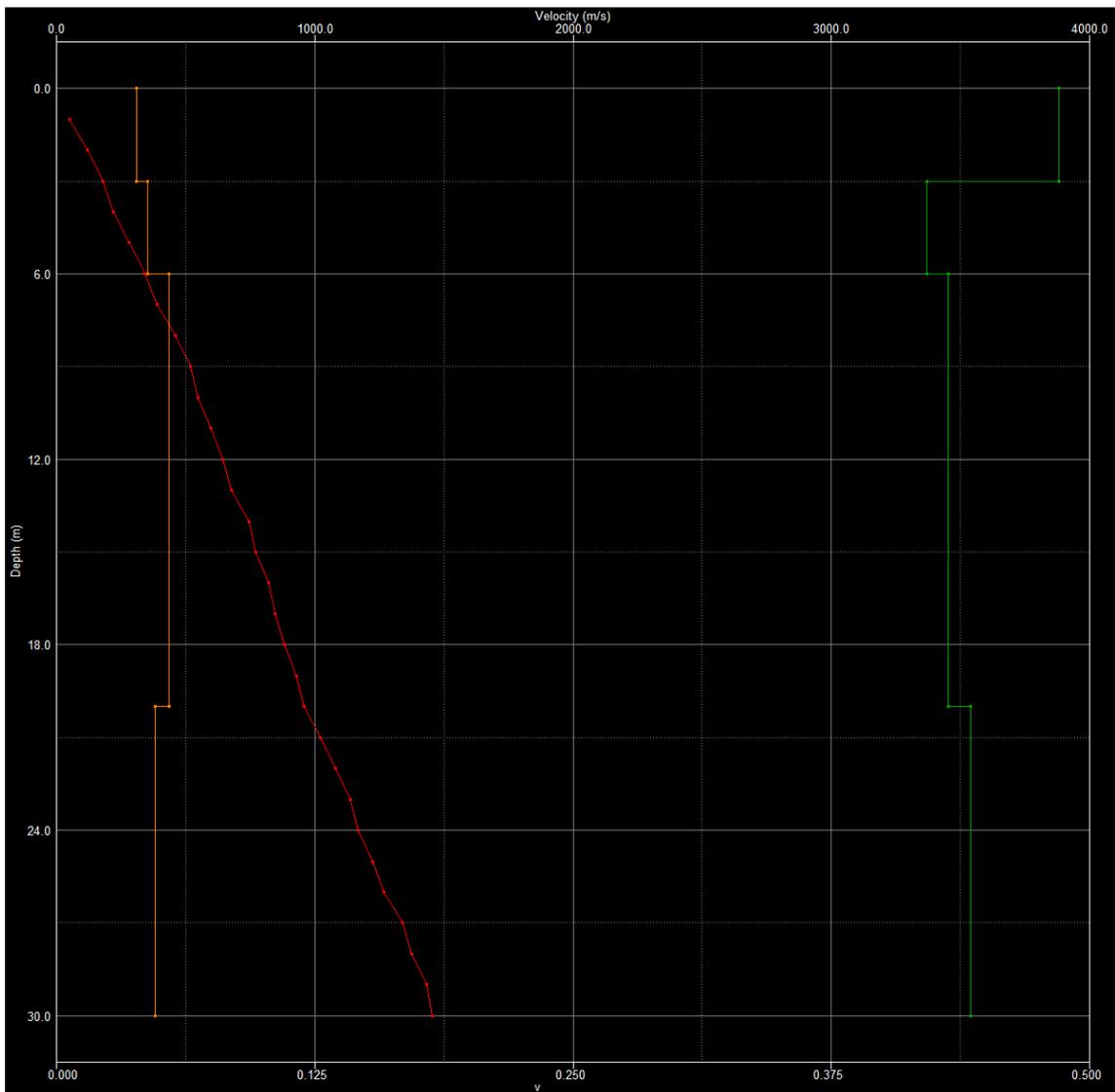
Tracce onde P



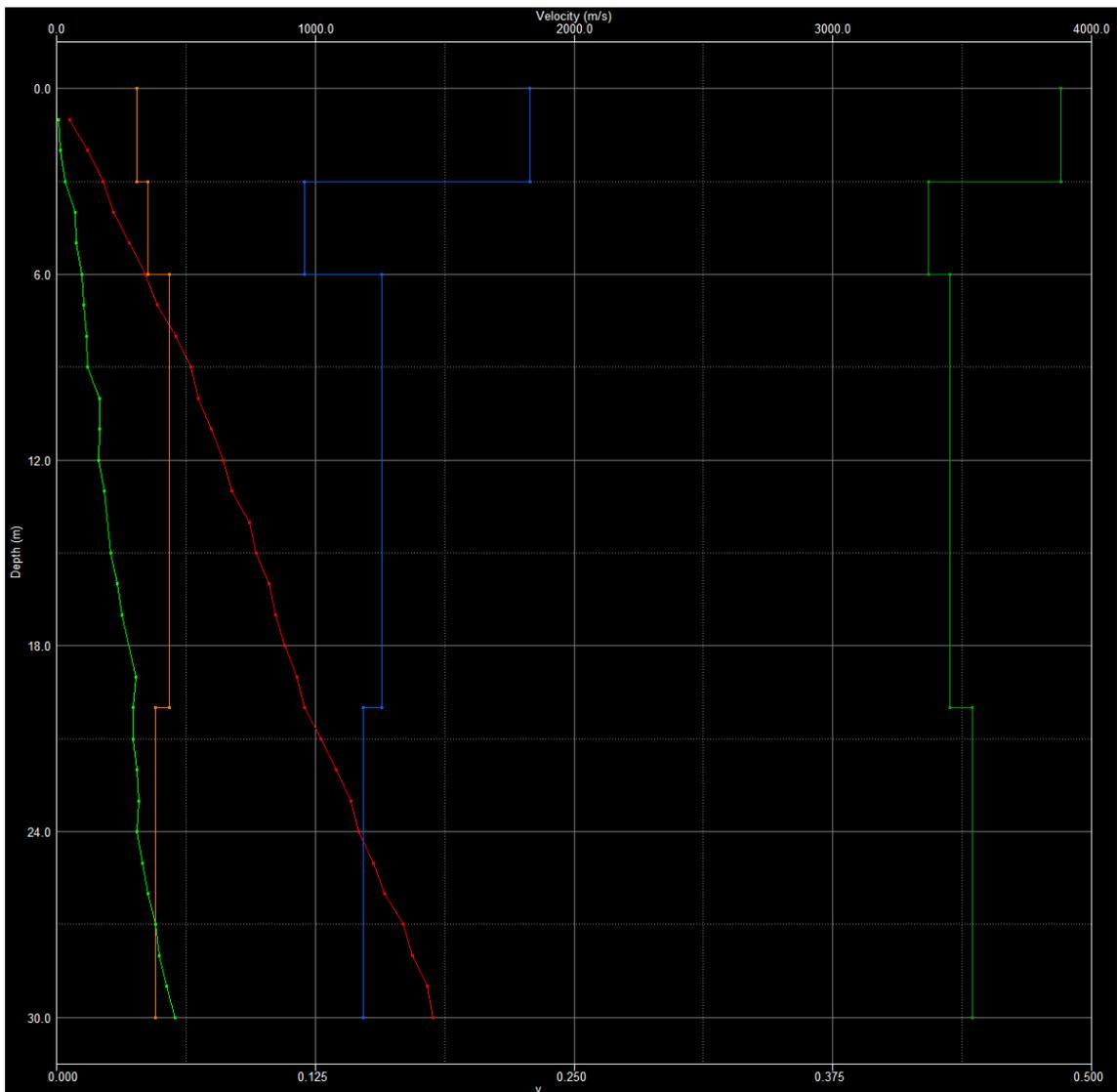
Tracce onde Sh



*Dromocrona e velocità onde P*



*Dromocrona e velocità onde Sh*



*Dromocrona e velocità onde P, Sh e modulo Young*

Unit: Depth -- m, Velocity -- m/s

Shot Location ( X: 5, Z: 0 )

Average Velocity Type: Vertical Travel Time

Average Velocity Above 30 m ---- Vs:392.2, Vp:1232.1

Depth	Ts Pick	Ts Vertical	Vs Interval	Vs Average	Tp Pick	Tp Vertical	Vp Interval	Vp Average	Nu
1.00	13.695	2.686	---	---	1.851	0.363	---	---	---
2.00	17.026	6.323	---	---	1.851	0.687	---	---	---
3.00	18.507	9.522	310.5	310.5	3.331	1.714	1829.5	1829.5	0.485
4.00	18.507	11.561	---	---	5.922	3.700	---	---	---
5.00	20.728	14.657	---	---	5.552	3.926	---	---	---
6.00	23.319	17.914	353.7	330.7	6.662	5.118	957.9	1257.4	0.421
7.00	25.169	20.481	---	---	6.662	5.421	---	---	---
8.00	28.501	24.169	---	---	7.033	5.964	---	---	---
9.00	31.092	27.179	---	---	7.033	6.148	---	---	---
10.00	32.202	28.802	---	---	9.624	8.608	---	---	---
11.00	34.423	31.337	---	---	9.624	8.761	---	---	---
12.00	36.644	33.825	---	---	9.253	8.542	---	---	---
13.00	38.124	35.583	---	---	10.364	9.673	---	---	---
14.00	41.456	39.040	---	---	---	---	---	---	---
15.00	42.566	40.382	---	---	11.474	10.885	---	---	---
16.00	45.157	43.101	---	---	12.955	12.365	---	---	---
17.00	46.267	44.387	---	---	13.695	13.139	---	---	---
18.00	48.118	46.363	---	---	---	---	---	---	---
19.00	50.339	48.681	---	---	16.656	16.108	---	---	---
20.00	51.819	50.272	436.3	398.2	15.916	15.441	1257.8	1257.7	0.432
21.00	55.151	53.651	---	---	15.916	15.483	---	---	---
22.00	58.112	56.667	---	---	16.656	16.242	---	---	---
23.00	61.073	59.679	---	---	17.026	16.638	---	---	---
24.00	62.553	61.239	---	---	16.656	16.306	---	---	---
25.00	65.515	64.242	---	---	17.767	17.422	---	---	---
26.00	67.735	66.517	---	---	18.877	18.537	---	---	---
27.00	71.437	70.242	---	---	20.358	20.017	---	---	---
28.00	73.287	72.146	---	---	21.098	20.769	---	---	---
29.00	76.249	75.140	---	---	22.578	22.250	---	---	---
30.00	77.359	76.306	380.7	392.2	24.429	24.097	1183.8	1232.1	0.442

*Tabella dei tempi e velocità onde P ed Sh*

Parametri	da	a	$\rho$	E	$\nu$	k	$\mu$	$\lambda$	Vp	Vs	Vp/Vs
	m	m	densità	Young	Poisson	Bulk	Rigidità	Lamè-1	Longitudinale	Taglio	rapporto
Vp, Vs	0	3	1900	5.42E+08	0.49	6.11E+09	1.83E+08	5.99E+09	1829	310	5.900
Vp, Vs	3	6	1900	6.73E+08	0.42	1.42E+09	2.37E+08	1.27E+09	957	353	2.711
Vp, Vs	6	20	1900	1.03E+09	0.43	2.52E+09	3.61E+08	2.28E+09	1257	436	2.883
Vp, Vs	20	30	1900	7.92E+08	0.44	2.29E+09	2.74E+08	2.11E+09	1183	380	3.113

*Calcolo moduli dinamici da VP, VSh e Densità*

Vp	m/s
Vs	m/s
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>
k, $\mu$	Pa
E	Pa
$\lambda$	Pa

I parametri di densità in rosso sono estrapolati da dati bibliografici.

### 3 PARAMETRIZZAZIONE MECCANICA

Sulla base delle prove SPT svolte durante le perforazioni, è stato possibile realizzare uno schema dei rapporti litologico stratigrafici presenti, come di seguito riportato.

	SPT1	SPT2	SPT3	SPT4	SPT5	SPT6	SPT7	SPT8	SPT9	SPT10
<b>quota dal p.c. (m)</b>	4.50	6.00	9.00	12.00	15.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>falda</b>	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	No	No
<b>Nspt</b>	20	21	40	41	26					
<b>ANGOLO DI RESISTENZA ALTAGLIO (°)</b>										
<b>Meyerhof</b>	32.9	32.7	36.1	35.8	32.4					
<b>DENSITA' RELATIVA (%)</b>										
<b>Gibbs &amp; Holtz</b>	78	75	87	81	62					
<b>MODULO ELASTICO [Young] (MPa)</b>										
<b>Schmertmann</b>	15.2	40.6	78.4	80.4	20.4					
<b>MODULO DI TAGLIO (MPa)</b>										
<b>Ohsaki &amp; Iwasaki</b>	110.2	110.1	204.2	209.0	137.8					
<b>MODULO EDOMETRICO (MPa)</b>										
<b>Farrent</b>	13.5	14.4	27.8	28.5	18.1					

Borgo San Lorenzo, 21/04/21

IGeA sas  
Dott. Geol. Guglielmo Braccesi

ALLEGATO 1 DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA





