

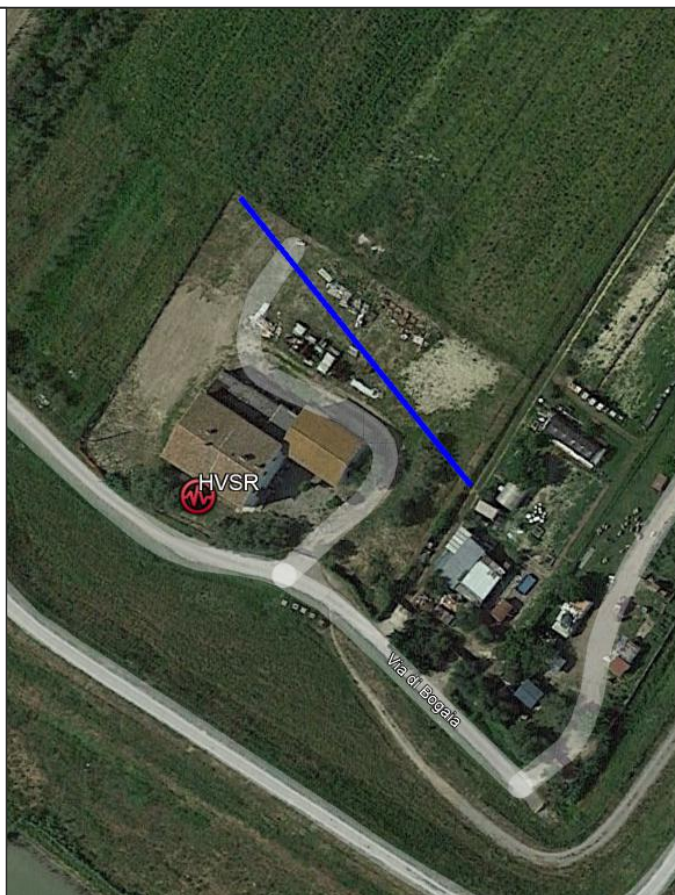
COMUNE DI PRATO (PO)

RELAZIONE TECNICA

Indagine geofisica di superficie mediante
metodologia sismica a rifrazione con onde P accoppiata con indagine MASW e HVSr

Committenti: sigg. Ni Chaole,
Ciottoli Marco e Yang Liang

Cantiere: via di Bogaia




13 Luglio 2023

SISMOELETTRICA S.r.l.
Via La Marmora 51
50121 Firenze
www.sismoelettrica.it
info@sismoelettrica.it
3290723618

Il Tecnico:

Geol. Francesco Cintelli
Ordine dei Geologi della Toscana n° 1460


	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

Sommario:

1 - PREMESSA.....	2
2 - CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	5
3 - METODO HVSr (HORIZONTAL VERTICAL SPECTRAL RATIO)	7
3.1 - Note teoriche in merito alla metodologia d'indagine	7
4 - INDAGINE MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).....	14
4.1 - NOTE TEORICHE SULLA METODOLOGIA D'INDAGINE.....	14
4.2 - RISULTATI DELL'ANALISI CONGIUNTA MASW - HVSr	16
5 - INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE.....	18
5.1 - Metodo di elaborazione dati e loro interpretazione	18
5.2 - Schema Operativo	21
5.3 - Risultati dell'indagine sismica a rifrazione	27
6 - CONCLUSIONI	28

1 - PREMESSA

Su incarico della Committenza, è stata realizzata una campagna d'indagine mediante metodologia sismica a rifrazione con onde P accoppiata con indagine MASW e misura HVSR in via di Bogaia nel Comune di Prato in data 27/06/2023. Nel dettaglio sono stati eseguiti n. 1 stendimento sismico MASW e a rifrazione e n. 1 misura di rumore HVSR.

Di seguito è riportata l'ubicazione delle indagini sismiche e la documentazione fotografica.

UBICAZIONE INDAGINI SISMICHE




DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



STENDIMENTO SISMICO MASW e A RIFRAZIONE



MISURA HVSr

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

Dopo aver preso visione della zona, delle problematiche ad essa connesse e degli spazi a disposizione, è stata programmata una campagna di prospezioni geofisiche con lo scopo di fornire, una caratterizzazione delle litologie presenti nell'area d'indagine nonché determinare le geometrie dei terreni (spessori e superfici di contatto) nel sottosuolo in funzione dell'andamento in profondità delle velocità delle onde sismiche.

In particolare, le prove realizzate sono state finalizzate alla valutazione di:

- *profilo delle velocità di propagazione delle onde di taglio S (Vs) nel sottosuolo;*
- *presenza di contrasti di impedenza sismica ed ubicazione del bedrock sismico;*
- *periodo di oscillazione fondamentale di sito;*
- *categoria di sottosuolo di fondazione ai sensi del D.M. 14/01/2018 (al fine di applicare un approccio di tipo semplificato nella valutazione della Risposta Sismica Locale 'RSL').*

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, VS. I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità VS per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.

La categoria di suolo di fondazione, da normativa vigente (D.M. 17/01/2018), si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori di velocità equivalente (Vs,eq) (in m/s) definita dall'espressione:

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

Dove:


Hi e Vs,i: lo spessore e la velocità delle onde di taglio nell'iesimo strato;

N: rappresenta il numero di strati

H: la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio Vseq è definita dal parametro Vs30, ottenuto ponendo H=30 m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

In considerazione di quanto sopra riportato, pertanto, dato che H (ovvero la profondità alla quale si incontra una Vs = 800 m/s, corrispondente al substrato) è superiore a 30 m, la categoria di suolo di fondazione si determina in funzione delle Vs30, ovvero attribuendo ad H il valore di 30 m.

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

2 - CARATTERISTICHE TECNICHE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

MASW: Un sistema digitale di acquisizione dati in sismica, è costituito sostanzialmente da geofoni, amplificatori, filtri, convertitori A/D e supporti per la memorizzazione dei dati digitali. Nel nostro caso è stato utilizzato un sismografo costituito da un sistema a più canali a conversione digitale tra loro in catena, ciascuno con un proprio ID, e pilotati da PC. Il modello è denominato DOREMI (SARA electronic instruments), con risoluzione di acquisizione pari a 24 bit. Per quel che riguarda i sensori, sono stati utilizzati 24 geofoni del tipo elettromagnetico a bobina mobile, con frequenza caratteristica di 4.5 Hz. Come sorgente di energia sismica per le onde di superficie si è fatto uso di una mazza con maglio da 8 kg battente su una piastra di alluminio posta sul suolo in linea con lo stendimento.

L'inizio della registrazione è stato dato tramite un trigger che consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la massa battente colpisce la piastra e l'impulso generato (nel nostro caso si è usato quello proveniente da un geofono starter), inviato al sistema di acquisizione, consente di fissare il tempo zero di riferimento per il calcolo dei tempi di percorso delle onde generate.

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati di campagna è la seguente (Tabella 1):


Energizzatore	massa da 8 Kg su piattello in alluminio	generazione segnale
Geofoni verticali (frequenza 4,5 Hz)	4kOhm 4.5Hz	conversione segnale sismico in elettrico
Sismografo SARA Do.Re.Mi.	digitalizzatori - 24 bit	conversione segnale e registrazione
Interfaccia Do.Re.Mi. master	-	alimentazione, collegamento PC,
Computer	Notebook Lenovo	visualizzazione, memorizzazione dati

Tabella 1 -Strumentazione utilizzata per le acquisizioni geofisiche.



Foto 1 - Strumentazione d'acquisizione.

L'acquisizione delle analisi del rapporto spettrale H/V è stata eseguita mediante la seguente strumentazione (Tabella 2):

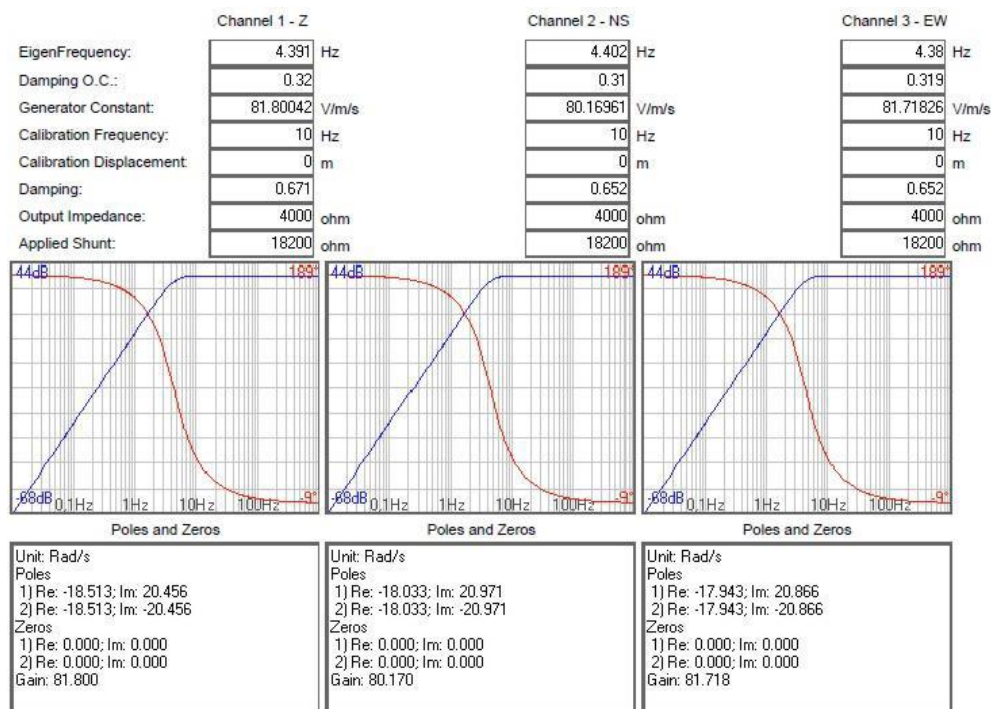
	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSR)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	---	----------------------------	--


Strumento	modello PF S SR04 GBX-45-NNG	
3 Sensori (4,5 Hz)	Numero canali: 3 Non ortogonalità: < 0.01% Frequenza naturale: 4.5Hz (+/-5%) Banda utilizzabile: 0.2-1000Hz Damping: 0.707 Massa inerziale: 24 g Sensibilità nominale: 80 V/m/s Movimento massa: 0.2mm Certificazioni:CE(EN55022, N55011)	campionamento simultaneo sui 3 canali
Interfaccia Do.Re.Mi. master		download dei dati su PC,
Computer	Notebook Lenovo	visualizzazione,

Tabella 2 - Strumentazione di acquisizione per analisi HVSR.

Il dispositivo sismico utilizzato in questa sede per le misure di vibrazione ambientale consiste in un digitalizzatore a 24 bit 3 canali ad altissima risoluzione collegato a un personal computer per il controllo dello strumento e la registrazione dei dati. Tre supporti a vite regolabili e una livella consentono il posizionamento dello strumento secondo il piano orizzontale; l'alimentazione è garantita da una piccola batteria interna ricaricabile. I dati acquisiti dai sensori sono trasferiti al PC mediante un cavo elettrico collegato a una porta seriale (RS232) e registrati in digitale da un software dedicato (modulo SEISMOLOG-MT della suite SEISMOWIN) per mezzo di un convertitore con frequenza di campionamento fino a 600 Hz.

Attraverso la specifica funzione di trasferimento è possibile, nel dominio delle frequenze, una correzione strumentale del dato. Di seguito si riporta quella specifica dello strumento utilizzato:



	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

Measurement uncertainties		
EigenFrequency:	+/-	0.1 Hz
Damping O.C.:	+/-	5 %
Generator Constant:	+/-	1 %
Calibration Frequency:	+/-	0.1 Hz
Calibration Displacement:	+/-	0.000002 m
Damping:	+/-	5 %
Output Impedance:	+/-	5 %
Applied Shunt:	+/-	1 %



Fig. 1 - Funzione di trasferimento dei sensori del tromografo digitale.

3 - METODO HVSr (HORIZONTAL VERTICAL SPECTRAL RATIO)

3.1 - Note teoriche in merito alla metodologia d'indagine

Lo scopo di questa particolare tecnica è l'individuazione, attraverso il metodo proposto da Nakamura sul rapporto spettrale H/V, delle discontinuità sismiche nel sottosuolo e la ricerca dell'eventuale *bedrock* geofisico. La tecnica dei rapporti spettrali o HVSr (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) è totalmente non invasiva, rapida e può essere applicata ovunque non necessitando di alcun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza di un sito;
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio;
- la velocità media delle onde di taglio Vs (solo se già noti gli spessori dei sismostrati);
- gli spessori della coltre di copertura del substrato litoide (solo se già note le Vs dei sismostrati).

Le basi teoriche della tecnica HVSr si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremiti. La forma di un'onda registrata in un determinato sito dallo strumento dipende: dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente *s*; dal percorso dell'onda dalla sorgente *s* al sito *x* (attenuazioni, riflessioni); dalle rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda; dalla risposta dello strumento; ovvero:

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

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento etc..) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Il rumore sismico viene denominato microtremore poiché riguarda oscillazioni molto piccole, sensibilmente inferiori a quelle prodotte dai terremoti. I microtremiti sono movimenti del terreno caratterizzati da ampiezze impercettibili all'uomo (10⁻⁴ - 10⁻² mm) la cui origine è conseguenza dell'effetto di una molteplicità di sorgenti agenti a diverse frequenze come, ad esempio, onde marine e perturbazioni atmosferiche (campo d'onda compreso in genere < 0,5 Hz),

vento, traffico veicolare e attività industriale (campo d'onda compreso in genere > 0,5 Hz). I metodi che si basano sull'acquisizione delle vibrazioni ambientali vengono detti di tipo passivo, in quanto il segnale non è appositamente generato (come avviene per esempio con le energizzazioni della sismica attiva).

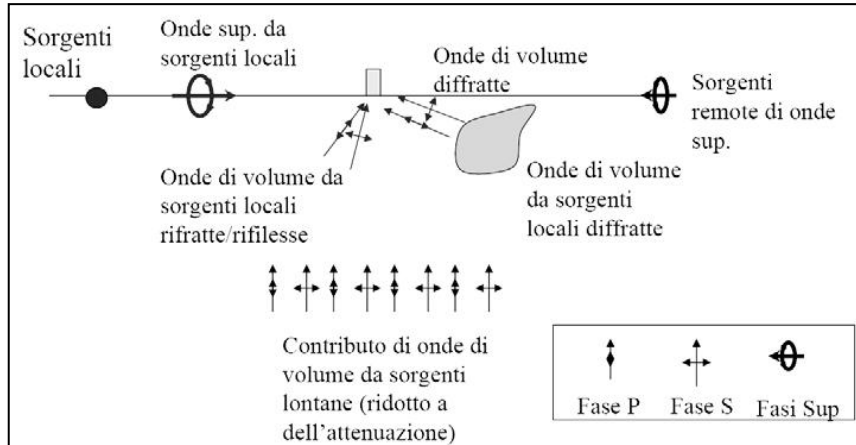


Fig. 2 - Percorsi e tipi di sorgenti dei microtremori.

Nel tragitto dalla sorgente S al sito X le onde elastiche subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda e attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Di conseguenza l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica. L'esito della prova è una curva sperimentale che rappresenta il valore del rapporto fra le ampiezze spettrali medie delle vibrazioni ambientali in funzione della frequenza di vibrazione. Le frequenze alle quali la curva H/V mostra dei massimi (in attinenza all'andamento delle singole componenti EW, NS e UD) sono legate alla frequenza di risonanza del terreno sotto il punto di misura; la presenza o meno di un picco indica la presenza o meno di contrasti di impedenza ed eventuale frequenza di risonanza del sito.

Gli spettri verticali e orizzontali variano in funzione dell'anisotropia del mezzo attraversato e dei gradienti di impedenza presenti nel sottosuolo:

$$\text{Rapporto di impedenza sismica } I = \rho_1 V_1 / \rho_2 V_2$$

Dove ρ_1 è la densità del substrato e ρ_2 del terreno soprastante; V_1 la velocità delle onde di taglio del substrato e V_2 del terreno. Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene (parzialmente) riflessa dall'interfaccia che separa i due strati.

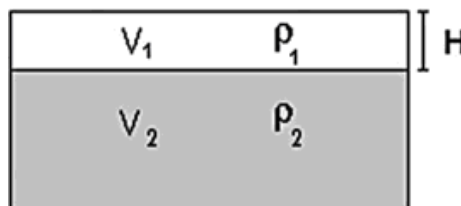


Fig. 3 - Schema di sottosuolo a 2 strati con differenti parametri geomeccanici.

Gli effetti stratigrafici di amplificazione sismica sono influenzati dal rapporto d'impedenza, e le frequenze corrispondenti ai massimi della funzione di amplificazione si chiamano frequenze (periodi) naturali di vibrazioni del deposito. Il periodo proprio di sito è indicato dalla seguente formula:

$$T_0 = 4H/V_s \quad (1)$$

Dove: V_s è la velocità delle onde di taglio fino al bedrock (inteso come un orizzonte con forte contrasto di V_s che dà origine ad un picco dell'H/V); H lo spessore dei sedimenti sovrastanti il bedrock. Di fondamentale importanza risulta la conoscenza della frequenza di sito per il fenomeno della "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra la frequenza fondamentale del segnale sismico trasmesso in superficie e la frequenza delle strutture in progetto o dei manufatti già esistenti. I fenomeni di "doppia risonanza" causano infatti un'ulteriore amplificazione sismica con conseguente aumento delle sollecitazioni sulle strutture.

Lo studio delle frequenze fondamentali dei depositi può fornire anche indicazioni di supporto ingegneristico per la progettazione e la salvaguardia dell'edificato. Infatti, la frequenza caratteristica di risonanza del sito rappresenta un parametro fondamentale per un corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale; confrontando infatti la frequenza naturale del terreno con la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio è possibile capire se, in caso di sisma, la struttura possa essere a rischio o meno. Qualora venga riscontrata la condizione per cui la frequenza di risonanza di un edificio sia pari o analoga alla frequenza naturale del terreno sottostante, può verificarsi una situazione potenzialmente pericolosa, conosciuta come fenomeno della 'doppia risonanza', per il quale si ha la massima amplificazione in caso di sisma, con aumento considerevole delle sollecitazioni sull'edificio. Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio sia governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. es. Pratt) (nel caso degli edifici l'H/V coincide con la risposta delle componenti orizzontali, in quanto si assume, per lo meno negli edifici moderni, che la risposta spettrale alle sollecitazioni verticali sia pressoché piatta).

$$F_r \text{ naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero di piani. (2)}$$

È la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura

$$F_r \text{ naturale edificio} \approx F_r \text{ naturale coperture (3)}$$

ad essere particolarmente pericolosa, perché dà luogo alla massima amplificazione.

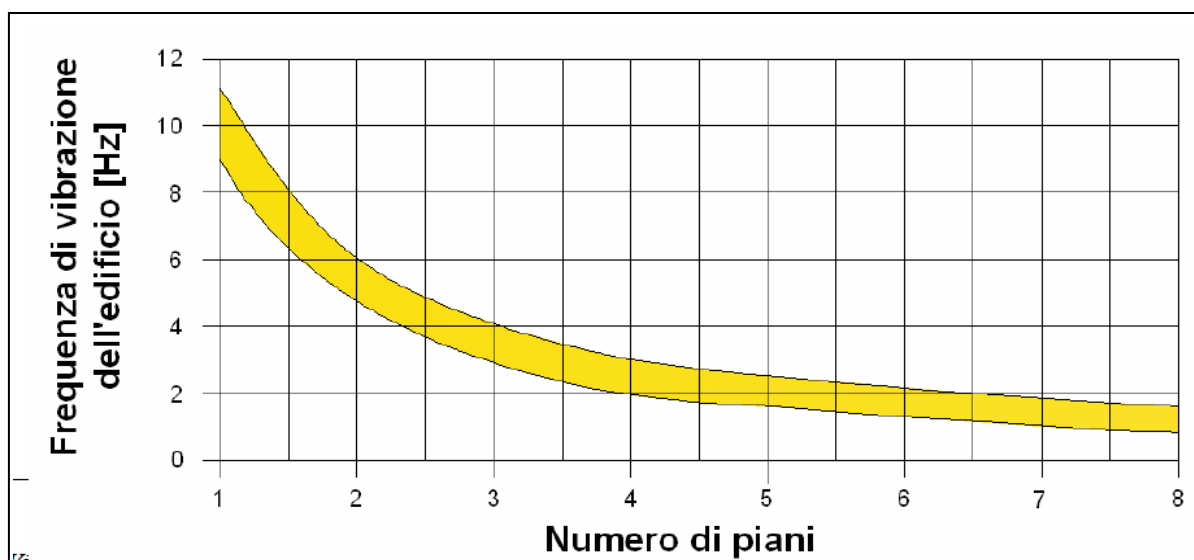



Grafico 1 - Rapporti indicativi fra numero dei piani di un edificio in c.a. e sua frequenza di vibrazione.

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

La combinazione della [1], [2] e della [3] porta alla

$$10 \text{ Hz/numero di piani} \approx V_s/4H \text{ (4)}$$

da cui si può ricavare una relazione di prima approssimazione tra il numero di piani dell'edificio e lo spessore delle coperture nel sito dell'edificio stesso che possono determinare situazioni pericolose e devono quindi essere oggetto di studi approfonditi (Grafico 1).

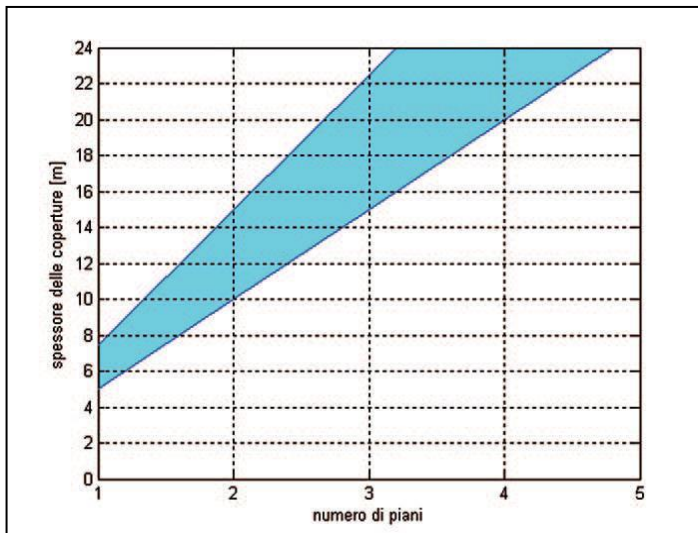


Grafico 2 - La fascia azzurra del grafico illustra la relazione tra il numero di piani dell'edificio e lo spessore delle coperture nel sito dell'edificio stesso per cui; per una zona con V_s caratteristiche delle coperture di 200-300 m/s, sarebbero possibili fenomeni di doppia risonanza.

Se si considera come nei casi in studio, una fascia di velocità delle onde di taglio tipica dei terreni di copertura medio-fini (200-300 m/s), è possibile riscrivere la [4] come:


$$10 \text{ Hz/numero di piani} \approx 200-300 \text{ (m/s)} / 4H$$

ottenendo la relazione illustrata in Grafico 2.

La misurazione diretta HVSr fornisce dati precisi ed attendibili sulle frequenze di vibrazione. Ai sensi della normativa vigente (§7.3.3.2) delle Norme Tecniche per le Costruzioni 2008), si riportano valutazioni in merito, nel caso di un'analisi lineare statica, ovvero una analisi lineare dinamica semplificata in cui non si effettua l'analisi dinamica della costruzione per determinare i modi di vibrare 'naturali' della stessa, e si ipotizza un modo di vibrare principale caratterizzato da un periodo T_1 calcolato in maniera approssimata e da spostamenti linearmente crescenti con l'altezza dal piano di fondazione, ai quali corrisponde la distribuzione di forze statiche da applicare alla costruzione. Per costruzioni civili e industriali che non superino 40 m di altezza e la cui massa sia approssimativamente uniformemente distribuita lungo l'altezza, T_1 può essere stimato, in assenza di calcoli più dettagliati, con la formula seguente:

$$T_1 = C_1 * H^{3/4}$$

dove H è l'altezza della costruzione in metri dal piano di fondazione e C_1 è un coefficiente funzione del tipo di struttura. Nel caso di edifici in fase di progettazione o di realizzazione la frequenza di

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

risonanza fondamentale dell'edificio può essere valutata con formule semplificate, quale quella indicata nel D.M. 14.01.2008:

$$(5) \quad f_s = \frac{1}{C_1 Z^{\frac{3}{4}}}$$

in cui C_1 è un fattore che dipende dalla tipologia costruttiva.

Tipologia C1

- Costruzioni con struttura a telaio in acciaio 0,085;
- Costruzioni con struttura a telaio in calcestruzzo armato 0,075;
- Costruzioni con qualsiasi altro tipo di struttura 0,050.

La relazione è valida per edifici con altezza Z non superiore ai 40 metri e massa distribuita, approssimativamente, in maniera uniforme lungo l'altezza.

A titolo indicativo tra le varie formule per la misura del periodo di risonanza, si riportano le due estreme entro le quali si collocano le altre. Tali formule sono quelle proposte da Chopra e Goel (2000) e Hong e Hwang (2000) per strutture in cemento armato:

$$T = 0,0294 A^{0,804}$$

$$T = 0,067 * A^{0,9}$$

Dove A è la struttura in metri.

Una volta definite le condizioni di risonanza del suolo e quelle della struttura si possono stimare le condizioni in cui si potrà sviluppare la doppia risonanza, suolo-struttura, e la profondità d'indagine significativa come risposta sismica di sito. Pertanto, se una struttura ha frequenza propria, bisognerà investigare se nel sottosuolo esistono amplificazioni per risonanza vicine alla frequenza propria della struttura. Quindi, ciò che interessa sapere è la profondità corrispondente a questa frequenza critica. Uguagliando i termini di entrambe le frequenze di risonanza, suolo-struttura, ed esplicitando la profondità H del riflettore che genera la risonanza delle coperture, si trova che per una fissata V_s delle coperture le soluzioni sono quelle riportate di seguito. Queste curve rappresentano la profondità dell'indagine minima entro la quale vanno escluse risonanze del sottosuolo potenzialmente critiche per le strutture (Grafico 3).

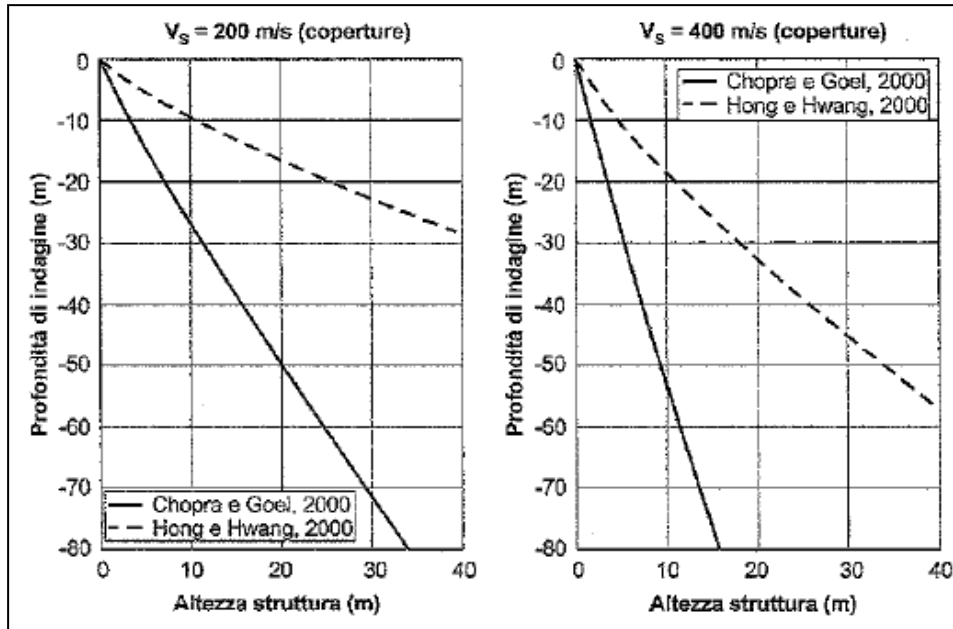


Grafico 3 - Relazione tra altezza di una struttura e la profondità di sottosuolo minima da indagare per escludere la possibilità di dare doppia-risonanza in funzione delle V_s dello strato risonante.

La **registrazione dei dati** è stata effettuata alla frequenza di campionamento di 300 Hz per una durata di 30 minuti nel punto. Lo strumento è stato posizionato su suolo naturale di basso taglio con orientamento asse y strumentale in direzione Nord accoppiandolo al suolo attraverso viti micrometri che utilizzate anche per la messa in bolla. Al momento della misura le condizioni meteorologiche erano: temperatura di circa 26°C, soleggiato, senza vento. Il **computo della curva H/V** è stato effettuato con il software Winmasw Academy definitive edition 2018 prodotto dalla ditta Eliosoft, il file MT_20230627_104833.SAF, adottando finestre di lunghezza 20 sec, un 'tapering' del 5% e uno 'spectral smoothing (triangular window)' del 15%. I risultati della elaborazione dati sono sintetizzati in figura 4, 5 e 6 dove sono indicati rispettivamente l'andamento della curva HVSr sperimentale in funzione della frequenza e delle singole componenti del moto, la persistenza del segnale e la sua direttività.

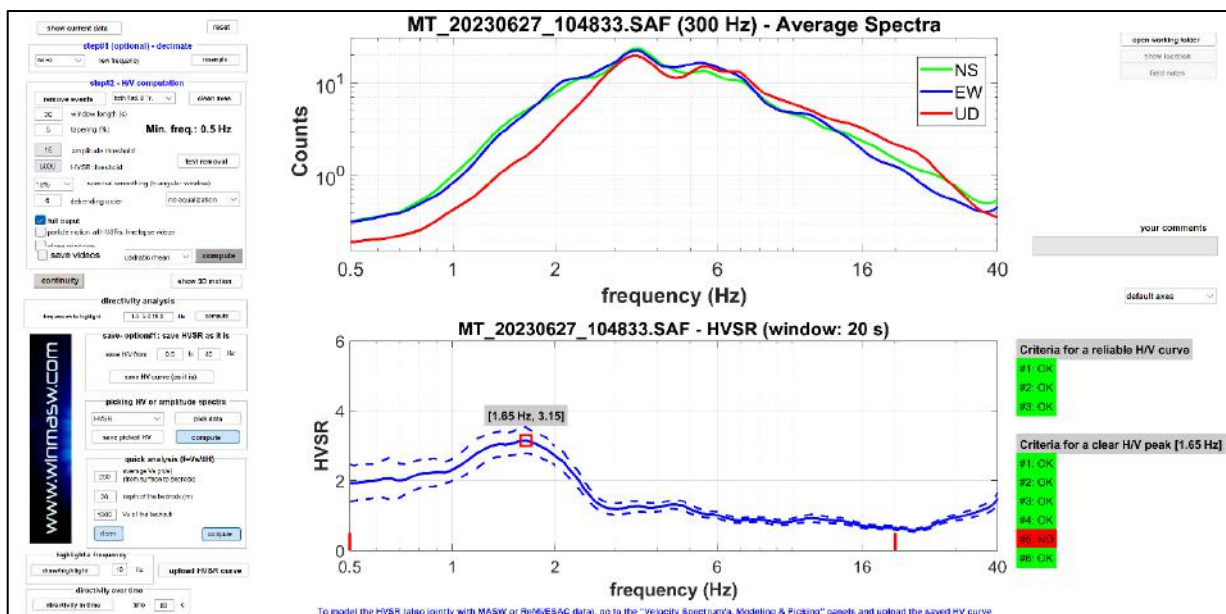


Fig. 4 - Spettri delle singole componenti del moto (X=EW, Y=NS e Z=UD) e curva HVSr sperimentale con deviazione standard.

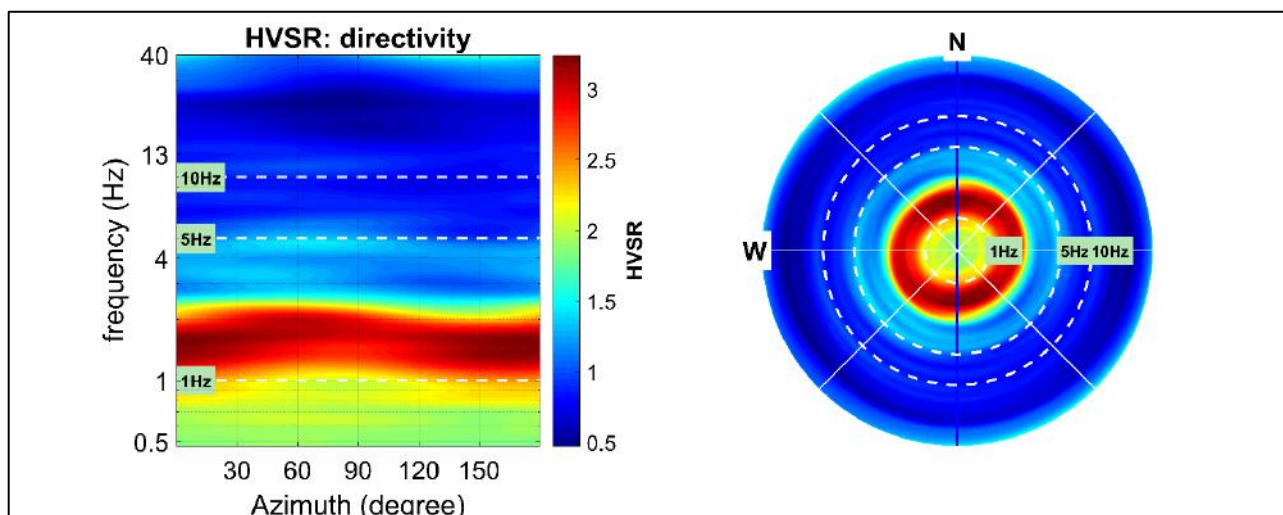


Fig. 5 - Direzionalità del segnale registrato.

E' presente un picco fondamentale f_0 , persistente e leggermente direzionale, di massima amplificazione in corrispondenza della frequenza **1,65 Hz** ed ampiezza A_0 pari a 3,15 che indica un alto contrasto di impedenza tra 50 m e 100 m di profondità da p.c. (tab. 3).

In Tab. 3 (tratta da Albarello D. & Castellaro S. (2011) - Tecniche sismiche passive indagini a stazione singola. Supplemento alla rivista Ingegneria sismica Anno XXVIII, n. 2-2011) è riportata una correlazione fra il valore della frequenza di risonanza misurata e lo spessore delle coperture. Sulla base di questa tabella è possibile ottenere una indicazione di larga massima sulla profondità dello strato risonante.

Per quanto riguarda le linee guida del progetto europeo SESAME (Site Effects assessment using Ambient Excitations), che definiscono la robustezza statistica della curva HVSr e degli eventuali picchi presenti, sono risultati soddisfatti tutti e tre i "criteri per una curva H/V affidabile"; e cinque su sei dei "criteri per un picco H/V chiaro".

F0 (Hz)	H (m)	H/V > 3 Alto contrasto 2 < H/V < 3 Basso contrasto
< 1	>100	
1-2	50-100	
2-3	30-50	
3-5	20-30	
5-8	10-20	
8-20	5-10	
>20	<5	

Tab. 3 - Abaco per la stima dello spessore delle coperture (h) a partire dai valori delle frequenze di risonanza (f_0) determinate dalle misure H/V.

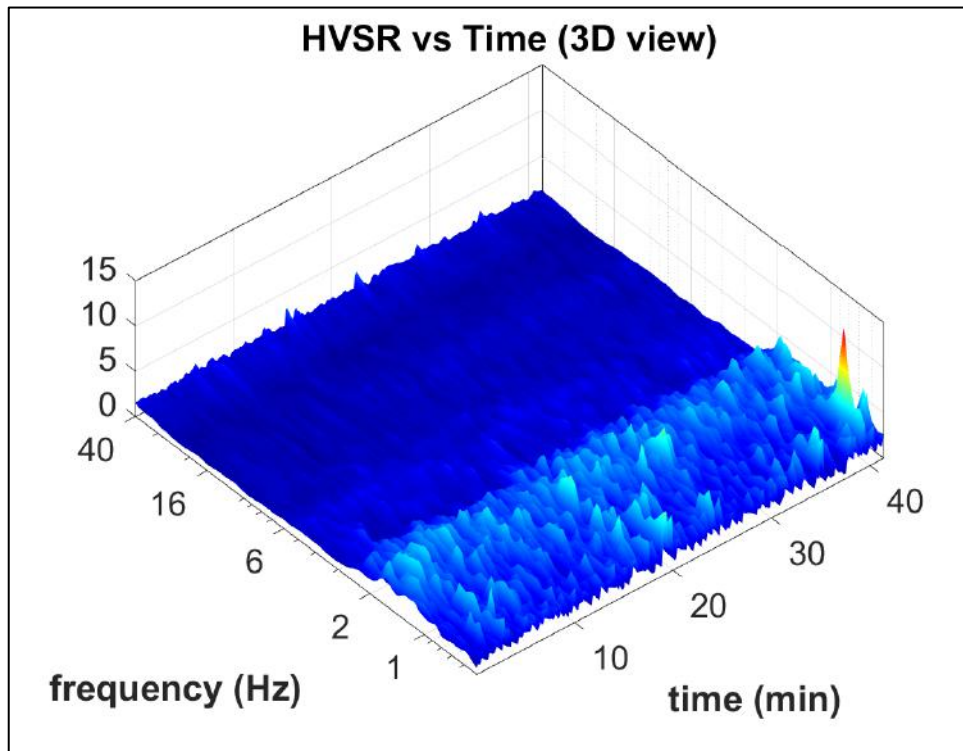
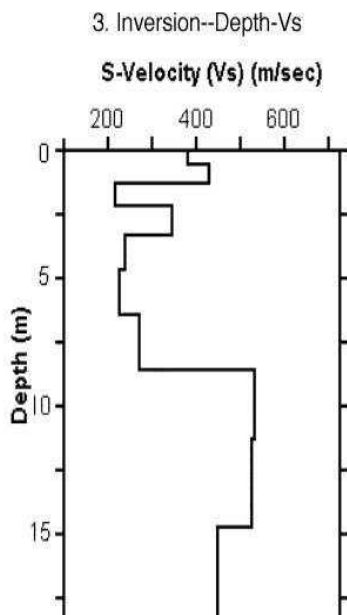


Fig. 6 - Persistenza del segnale registrato.

4 - INDAGINE MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

4.1 - NOTE TEORICHE SULLA METODOLOGIA D'INDAGINE

La velocità di propagazione nel sottosuolo delle onde 'S' è stata definita tramite la **metodologia di indagine geofisica MASW**. La metodologia MASW è un metodo di analisi che studia la propagazione di onde di superficie (onde di Rayleigh e Love) attraverso misure di sismica attiva in un semispazio (sottosuolo); di seguito sono riportate alcune brevi considerazioni di carattere teorico:



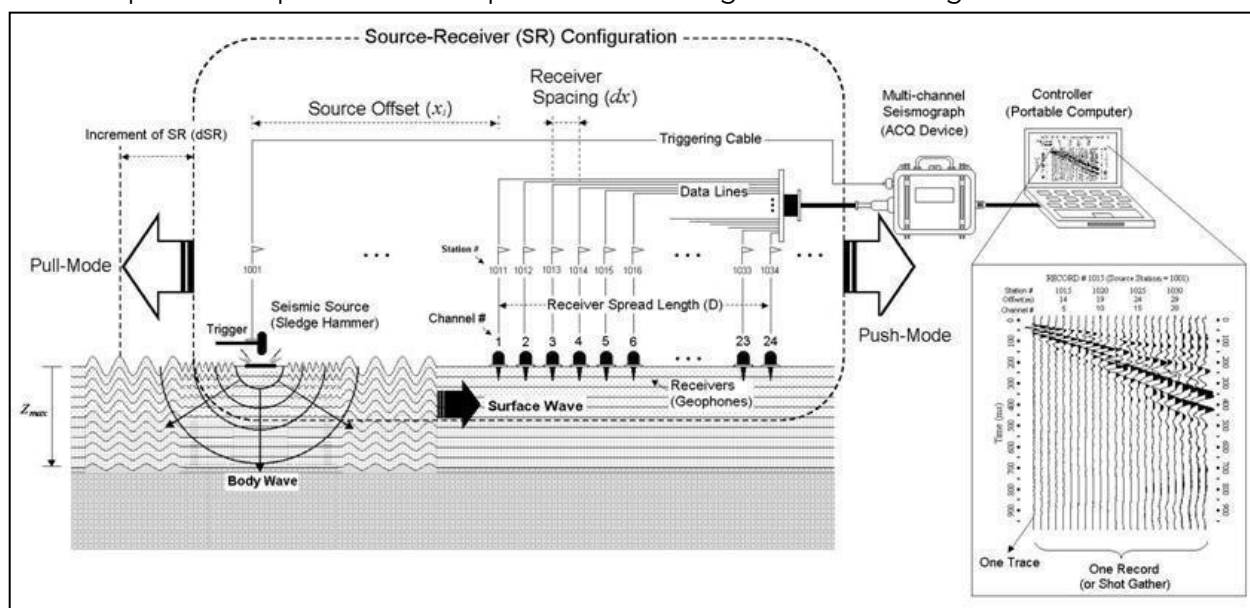
- le varie componenti (frequenze) del segnale sismico si propagano ad una velocità che dipende dalle proprietà elastiche del mezzo e caratteristiche litostratigrafiche (spessore h_i , coefficiente di Poisson ν_i e densità ρ_i dello strato);
- in un mezzo stratificato le onde sismiche sono sottoposte al fenomeno della dispersione;
- le onde di superficie con lunghezze d'onda più ampie (frequenze più basse) sono controllate dalla parte più profonda del sottosuolo, mentre le lunghezze d'onda più piccole (frequenze più alte) dalla parte più superficiale;
- in genere (ad eccezione dei casi in cui sono presenti inversioni di velocità) la velocità delle onde sismiche aumenta con la profondità, quindi le frequenze più basse delle onde di superficie viaggeranno ad una velocità maggiore rispetto alle frequenze più alte;
- attraverso lo studio della propagazione delle onde di Rayleigh e

Love è possibile risalire alla velocità delle onde di taglio "S" in quanto le velocità nel terreno di

queste ultime corrisponde a circa il 90% delle velocità delle onde di superficie (correlazione di tipo lineare). La fase di elaborazione consiste nell'ottenere la curva di dispersione relativa ad ogni registrazione, ovvero la trasformazione delle serie temporali nel dominio della frequenza F e del numero d'onda K . Sullo spettro Frequenza (Hz) - Velocità di Fase (m/s) vengono individuati i punti di massimo spettrale di energia che consentono di risalire alla curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh e Love (una per ogni acquisizione).

La velocità delle onde S viene stimata su un modello di strati del terreno che viene implementato con un processo iterativo fino a trovare la combinazione finale di velocità delle onde di taglio e spessori degli strati, tale da minimizzare gli scarti fra la curva di dispersione calcolata sul modello e quella misurata sullo spettro della dispersione delle onde superficiali.


La velocità delle onde di taglio è approssimativamente pari a $1,1 V_r$ (V_r = velocità delle Onde di Rayleigh e/o Love) e la profondità è pari a $0,4\lambda$ (λ lunghezza d'onda). Il profilo verticale per ogni curva di dispersione è posizionato nel punto medio di ogni stendimento geofonico.



Durante la registrazione è stato adottato un tempo di acquisizione di 2 secondi, una frequenza di 1000 Hz e di conseguenza un periodo di 1 ms. Nella seguente tabella sono descritte le specifiche tecniche di acquisizione del segnale sismico:

Tipologia di indagine	MASW	-
Spaziatura fra geofoni	3	[m]
Numero geofoni	24	
Tracce interlacciate	no	-
Lunghezza stendimento	69	[m]
Distanza shot N.1 dal primo geofono	-5	[m]
Intervallo di campionamento	1	[ms]
Frequenza di campionamento	1000	[Hz]
Tempo di registrazione	2	[s]
Metodo di energizzazione	Massa battente da 8 kg su piastra in alluminio	-
Tipologia geofoni	Orizzontali frequenza 4.5 Hz	-
Posizionamento geofoni	su suolo naturale coperto da manto erboso	-

Tab. 4 - Specifiche tecniche di acquisizione.

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSR)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	---	----------------------------	--

L'analisi dei dati acquisiti dalla metodologia **MASW**, con onde di Rayleigh e Love, avviene attraverso le seguenti fasi:

1. Calcolo dello spettro di velocità; 2. Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori; 3. Calcolo della curva di dispersione mediante modellazione diretta, cioè attribuzione degli spessori e delle velocità relative, sulla base di dati riguardanti il sito acquisiti precedentemente tramite indagini dirette o bibliografia; 4. Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità vs.

Si è infine generato dei sismogrammi sintetici secondo il metodo della "Modal Summation" (Herrmann, 2003) (fig. 7). Il metodo di analisi è indicato con l'acronimo FVS (inversione Full Velocity Spectrum). Tramite questo approccio vengono invertiti gli spettri di velocità. I colori in sottofondo sono relativi agli spettri di velocità dei dati di campagna mentre le curve di contours nere si riferiscono al dato sintetico (si noti la buona sovrapposizione fra le due).

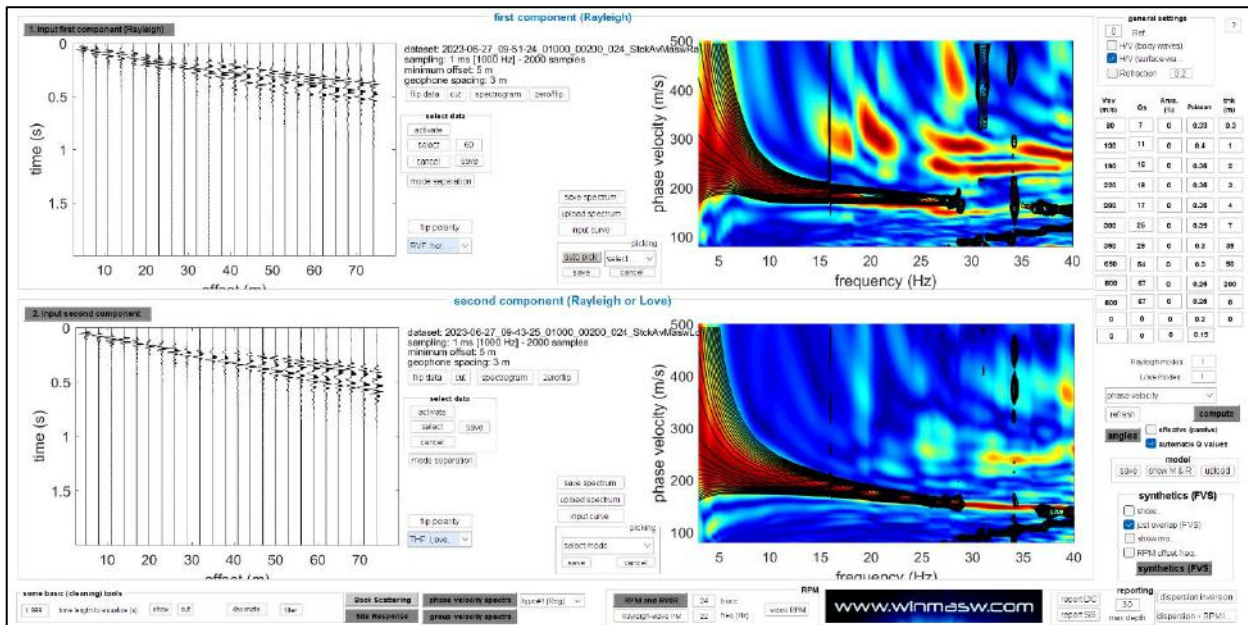



Fig. 7 - A sinistra: sismogrammi originali; a destra, sismogrammi sintetici. Spettro di campagna a colori con sovrapposte le contourlines dei sismogrammi sintetici. In alto onde di Rayleigh, in basso onde di Love.

4.2 - RISULTATI DELL'ANALISI CONGIUNTA MASW - HVSR

Attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti è stato definito lo spettro di velocità (dominio f-V) da cui attraverso un procedimento di 'modellazione diretta' (esaminando il modo fondamentale e i modi superiori) è stata individuata la curva di dispersione ritenuta più appropriata per ciascuna stesa sismica. Per analisi congiunta si intende l'utilizzo di tutti i dati a disposizione all'interno dello stesso strumento di analisi. Questo tipo di analisi offre numerosi vantaggi, primo fra tutti quello di diminuire il numero dei possibili modelli sismostratigrafici (spessori/velocità) determinati dal problema della non-univocità (cioè dell'equivalenza di modelli diversi per una data curva di dispersione) che in effetti tocca tutti i metodi geofisici di superficie. Dai dati acquisiti mediante MASW si è effettuato il calcolo della curva di dispersione (con attribuzione degli spessori e delle velocità relative), ed a partire da questo la creazione, mediante il software utilizzato, di una "curva teorica" H/V. Infine

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

confrontando tale curva con quella misurata empiricamente, si è cercato di affinare il modello sismostratigrafico in modo da ottenerne uno che rappresenti al meglio la curva di dispersione e che faccia sovrapporre le curve H/V ed in particolare la frequenza del principale picco, tipicamente legato al più profondo contatto litologico "significativo". Tale operazione consente di vincolare il modello Vs specialmente in profondità dove il margine di incertezza è maggiore.

Nella Tabella 5 vengono riportati gli spessori e le relative velocità Vs ricordando che, come in tutti i metodi geofisici, può essere ottenuta solo una stima del modello sismostratigrafico a causa del problema della non univocità.

Dal modello sismostratigrafico in tab. 5 si nota che il principale contrasto di rigidità (maggiore salto di velocità delle Onde S) è a profondità di 52,3 m da p.c. corrispondente al passaggio al substrato roccioso alterato.

L'analisi della dispersione delle onde superficiali ha consentito di stimare il profilo verticale della Vs e di conseguenza del parametro $V_{s,eq}$ che risulta essere pari a **260 m/s**, considerando come riferimento il piano di campagna.

Orizzonti	Velocità (m/s)	Spessori (m)	Profondità (m)
1	80	0,30	0,30
2	130	1	1,30
3	190	2	3,30
4	220	3	6,30
5	200	4	10,3
6	300	7	17,3
7	350	35	52,3
8	650	50	102,3
9	800	200	302,3
10	800	Semi-spazio	Semi-spazio

Tab. 5 - Modello sismo-stratigrafico medio stimato.

Sulla base del profilo sismostratigrafico ottenuto, il sito risulta compatibile con la **categoria di sottosuolo C** secondo le NTC 2018 - Tabella 3.2.II. Sarà comunque cura del progettista, in base alle caratteristiche dell'opera da realizzare, alla effettiva profondità di imposta delle fondazioni, al modello sismostratigrafico riportato con il conseguente profilo verticale della Vs, ed a tutte le considerazioni del caso che riterrà opportune, attribuire il definitivo valore di $V_{s,eq}$ e conseguentemente la categoria di suolo.

Categorie di sottosuolo (NTC 2018 - Tabella 3.2.II)	
Categoria	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un

	miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

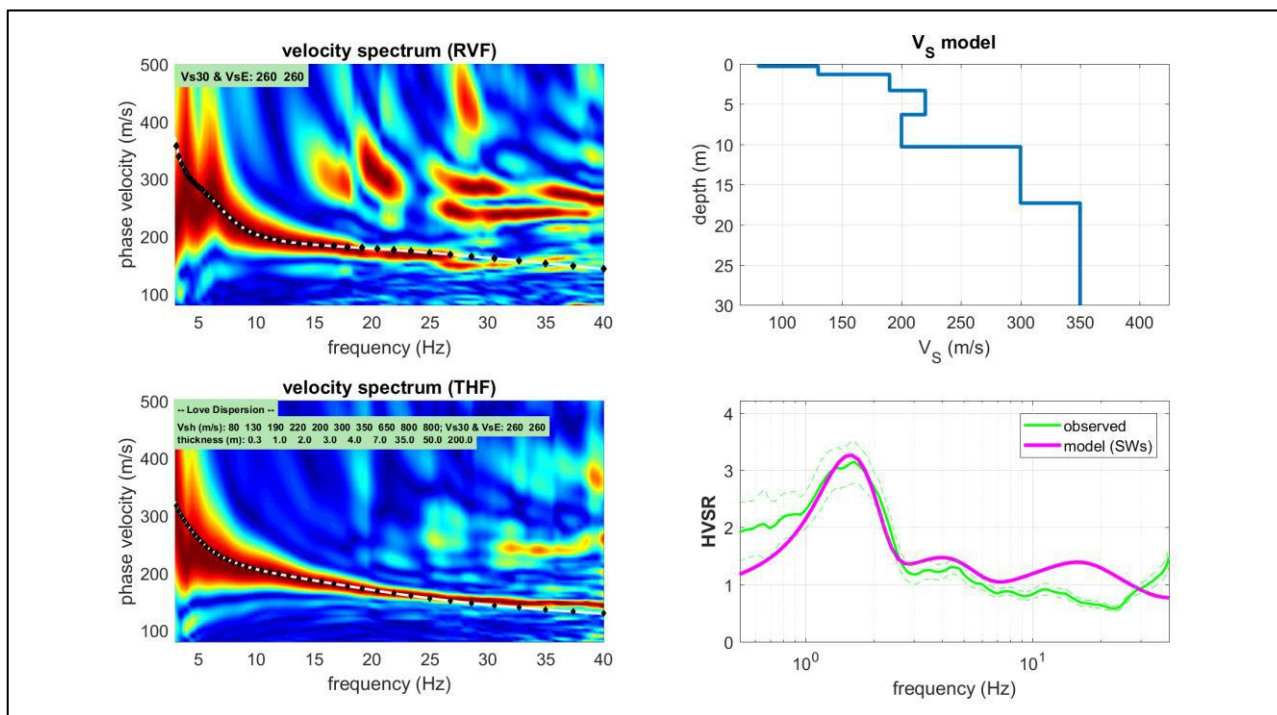


Fig. 8 - Risultati dell'inversione della curva di dispersione determinata tramite analisi congiunta di dati MASW - HVSr: in alto a destra: profilo verticale V_s identificato dall'inversione; in basso a sinistra: spettro di velocità osservato con sovrapposte le curve di dispersione (componente di Love); in alto a sinistra: spettro di velocità osservato con sovrapposte le curve di dispersione (componente di Rayleigh); in basso a destra: Risultati dell'analisi congiunta MASW - HVSr a partire dal modello di V_s utilizzato per la dispersione delle onde di superficie, secondo la formulazione basata sulle onde di superficie (Albarello & Lunedei, 2009), la curva magenta ottenuta dalla modellazione manuale approssima quella misurata empiricamente (curva verde).

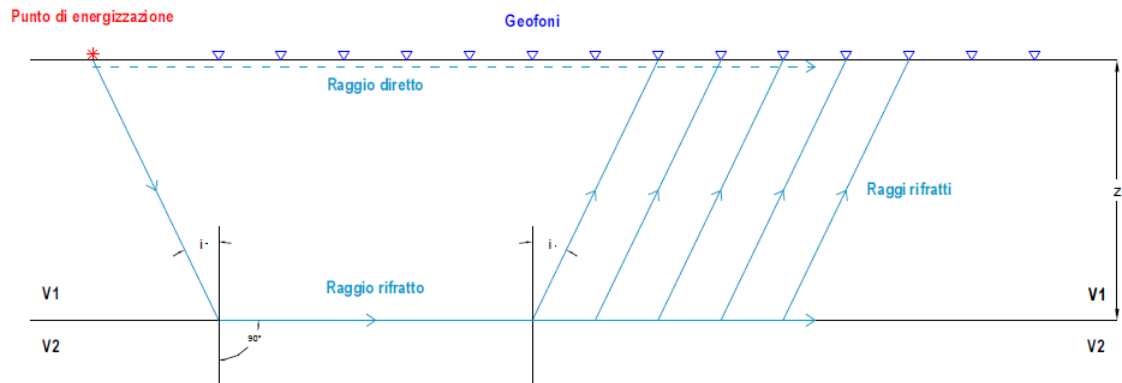
5 - INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE

5.1 - Metodo di elaborazione dati e loro interpretazione

Il metodo sismico a rifrazione utilizza le onde sismiche che vengono rifratte dalle discontinuità presenti nel sottosuolo ad es. l'interfaccia tra due mezzi a differente velocità (si ipotizza che la velocità aumenti con la profondità).

La condizione fondamentale per eseguire studi di sismica a rifrazione è quella per cui la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

Il principio di Fermat stabilisce che il raggio sismico percorre la distanza tra sorgente e rilevatore seguendo il percorso per cui il tempo di tragitto è minimo. Per tale principio, dato un piano che separa due mezzi con caratteristiche elastiche diverse, il raggio sismico è quello che si estende lungo un piano perpendicolare alla discontinuità contenente sia la sorgente che il ricevitore.



La legge di Snell è una formula che descrive le modalità di rifrazione di un raggio sismico nella transizione tra due mezzi caratterizzati da diversa velocità di propagazione delle onde o, equivalentemente, da diversi indici di rifrazione. L'angolo formato tra la superficie di discontinuità e il raggio sismico è chiamato angolo di incidenza θ_i mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione θ_r . La formulazione matematica è:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due mezzi separati dalla superficie di discontinuità. Per $v_1 > v_2$ si ha che $\theta_i > \theta_r$ e la sismica a rifrazione non è attuabile poiché il raggio rifratto andrebbe ad inclinarsi verso il basso. Per $v_1 < v_2$ si ha che $\theta_i < \theta_r$ ed esiste un angolo limite di incidenza per cui $\theta_r = 90^\circ$ ed il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di discontinuità. L'espressione che definisce l'angolo limite è:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

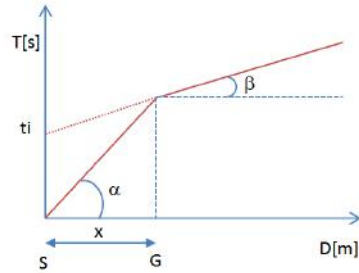
Il modo più semplice per analizzare i dati di rifrazione è quello di costruire un diagramma tempi-distanze in cui l'origine del sistema di riferimento è posto in corrispondenza della sorgente di generazione delle onde elastiche. In ascissa sono rappresentate le posizioni dei geofoni ed in ordinata i tempi dei primi arrivi. Ai geofoni più vicini alla sorgente giungono per primi gli impulsi che hanno seguito il percorso diretto in un tempo T dato dalla relazione

$$T = x_i / V_1$$

dove x_i è la distanza tra il punto di energizzazione e il punto di rilevazione. L'equazione precedente rappresenta una retta che passa per l'origine degli assi tempi-distanze e il suo coefficiente angolare consente di calcolare la velocità V_1 del primo mezzo come

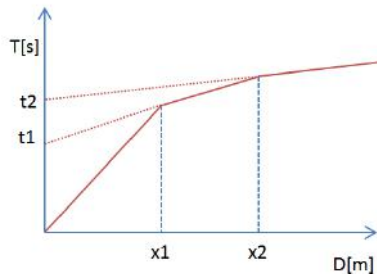
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

I tempi di arrivo dei raggi rifratti, nel diagramma tempi-distanze, si dispongono secondo una retta che avrà pendenza minore di quella delle onde dirette.



La curva tempi-distanze tende ad avere un andamento regolare secondo una spezzata i cui vertici sono i chiamati punti di ginocchio e rappresentano, fisicamente, la condizione in cui si verifica l'arrivo contemporaneo delle onde dirette e rifratte. Per ciascuno di segmenti individuati si determina, dunque, il tempo di ritardo t_i che rappresenta la differenza tra il tempo che il raggio sismico impiega a percorrere un tratto alla velocità propria dello strato in cui si trasmette ed il tempo che impiegherebbe a viaggiare lungo la componente orizzontale di quel tratto alla massima velocità raggiunta in tutto il percorso di rifrazione.

Graficamente il tempo di ritardo è dato dall'intersezione della retta che comprende un segmento della curva tempi-distanze con l'asse dei tempi.




Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}} \right)$$

Il metodo della tomografia sismica è una tecnica di indagine che permette l'individuazione di anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche con un alto potere risolutivo, in funzione delle modalità di acquisizione, offrendo la possibilità di ricostruire anomalie e discontinuità stratigrafiche anche particolarmente complesse.

Il processing dei dataset di sismica a rifrazione in onda P è stato condotto mediante il Software RAYFRACT (Intelligent Resources Inc., Canada), studiato per l'elaborazione di dati relativi ad indagini sismiche eseguite in superficie, realizzate sia con onde P che SH, per scopi geotecnico-ingegneristici, ambientali, nonché per l'esplorazione nel campo delle georisorse. Rayfract consente sia la ricostruzione della geometria dei rifrattori con la sismica a rifrazione tradizionale, che la realizzazione di dettagliati modelli di velocità del sottosuolo con le più evolute tecniche tomografiche.

Lo schema di processing tomografico utilizzato nel presente lavoro è basato sulla creazione di un

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

modello iniziale ottenuto mediante interpretazione con una tecnica sofisticata di processo dei tempi di primo arrivo basata sui metodi dei "Fronti d'onda" (Brückl 1987; Jones and Jovanovich 1985) e del Plus-minus (Hagedoorn 1959), fondata su una regressione del campo dei tempi di primo arrivo (Brückl 1987). A partire dal modello sopraccitato è stato quindi utilizzato il codice di calcolo per la modellazione tomografica che utilizza, nell'algoritmo d'inversione, un "raytracing" con raggi curvilinei e metodi di calcolo ai minimi quadrati attraverso il metodo Delta t-v (Gebrande and Miller 1985), al fine di migliorare il riconoscimento e la localizzazione di strutture di forma anomala, stabilizzando la soluzione dell'algoritmo d'iterazione.

Materiale	Velocità sismiche in sito (a piccole deformazioni) (m/s)		Coefficiente di Poisson ν	Densità ρ (g/cm ³)	Modulo di elasticità tangenziale G (MN/m ²)
	V_p	V_s			
Sabbia Sciolta (in prossimità della superficie)	1450-1550 (180-450)	100-250	0.48-0.50 (0.3-0.35)	1.5-1.8	15-110
	1500-1750 (320-650)	200-350	0.47-0.49 (0.2-0.3)	1.7-2.1	70-250
	1700-2000 (550-1300)	350-700	0.45-0.48 (0.15-0.3)	1.9-2.2	230-1000
Argilla	Moder. consist. 1450-1550	80-180	0.47-0.5	1.6-2.0	10-65
	Consistente 1500-1700	180-300	0.47-0.5	1.7-2.1	55-190
	Molto consist. 1600-1900	300-500	0.47-0.5	1.8-2.3	160-450
Arenaria e scisti non alterati	1500-4000	800-2000	0.25-0.35	2.0-2.4	1300-9500
Calcere	2000-6000	1200-3000	0.25-0.35	1.8-2.5	2600-20000
Roccia cristallina o metamorfica non alterata	3500-7000	2000-3500	0.25-0.30	2.2-2.6	8500-32000

Tab. 6 - Velocità sismiche e moduli elastici in terreni e rocce. I valori tra parentesi si riferiscono al materiale non saturo (Head e Jardine, 1992).


In Tabella 6 sono riportate le relazioni tra le velocità medie delle onde sismiche di taglio e compressione (esprese in m/sec) e le principali litologie, desunte da letteratura.

5.2 - Schema Operativo

Dopo una prima analisi dell'area con il tecnico incaricato, stabilite le finalità delle indagini da eseguire, ed in considerazione degli spazi a disposizione, è stata adottata la configurazione schematizzata in tabella 7. In corrispondenza dell'area d'intervento sono stati pertanto stesi i cavi sismici lungo la zona d'interesse e ad essi sono stati collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite (tab. 7).

nome	Lungh. profilo (m)	Tomografia sismica	Shots
Profilo sismico St1	69 m (G1-G24)	Onde P	9

Tab. 7 - Schema operativo stesa sismica a rifrazione.

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

Al fine di ottenere una migliore risoluzione della sismo-stratigrafia, i punti di energizzazione, detti punti di scoppio (shot points), sono stati disposti simmetricamente rispetto al profilo: ai suoi estremi (end), esternamente (offset) ed a distanze variabili entro il profilo stesso (punti di scoppio centrali). Le tracce acquisite sono state opportunamente filtrate utilizzando un filtraggio passa basso (140 Hz) per eliminare le componenti in alta frequenza; quindi, sono state inserite le coordinate di ogni geofono rispetto all'origine di riferimento. Visualizzate le tracce dei 24 geofoni abbiamo effettuato, il *picking* dei primi arrivi delle onde P per i 9 scoppi eseguiti per St1. I dati relativi ai tempi dei primi arrivi delle onde a ciascun geofono e le relative distanze dei geofoni dai punti di scoppio sono poi stati utilizzati per tracciare le traveltimes su grafici distanza/tempo (tabb. 8 e 9).

GEOFONI N.	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.0
2	3.0	0.0
3	6.0	0.0
4	9.0	0.0
5	12.0	0.0
6	15.0	0.0
7	18.0	0.0
8	21.0	0.0
9	24.0	0.0
10	27.0	0.0
11	30.0	0.0
12	33.0	0.0
13	36.0	0.0
14	39.0	0.0
15	42.0	0.0
16	45.0	0.0
17	48.0	0.0
18	51.0	0.0
19	54.0	0.0
20	57.0	0.0
21	60.0	0.0
22	63.0	0.0
23	66.0	0.0
24	69.0	0.0

Tab. 8 - Geometria geofoni per stendimento sismico a rifrazione.


Shot Nr.	Posizione Shot	Stazione ricevente	First Break (secondi)
1	0.5	1	0.0128
1	0.5	2	0.0081
1	0.5	3	0.02
1	0.5	4	0.022
1	0.5	5	0.02
1	0.5	6	0.02
1	0.5	7	0.0276
1	0.5	8	0.025
1	0.5	9	0.0252
1	0.5	10	0.026
1	0.5	11	0.0326
1	0.5	12	0.0342

1	0.5	13	0.0318
1	0.5	14	0.035
1	0.5	15	0.0418
1	0.5	16	0.0436
1	0.5	17	0.043
1	0.5	18	0.0454
1	0.5	19	0.0468
1	0.5	20	0.0492
1	0.5	21	0.0523
1	0.5	22	0.05
1	0.5	23	0.052
1	0.5	24	0.0582
2	3.5	1	0.0214
2	3.5	2	0.0186
2	3.5	3	0.0081
2	3.5	4	0.007
2	3.5	5	0.02
2	3.5	6	0.0206
2	3.5	7	0.0234
2	3.5	8	0.0262
2	3.5	9	0.0268
2	3.5	10	0.0274
2	3.5	11	0.029
2	3.5	12	0.0316
2	3.5	13	0.0349
2	3.5	14	0.037
2	3.5	15	0.0392
2	3.5	16	0.0416
2	3.5	17	0.0424
2	3.5	18	0.0448
2	3.5	19	0.05
2	3.5	20	0.0488
2	3.5	21	0.0523
2	3.5	22	0.0523
2	3.5	23	0.0534
2	3.5	24	0.0512
3	6.5	1	0.026
3	6.5	2	0.0236
3	6.5	3	0.0216
3	6.5	4	0.02
3	6.5	5	0.02
3	6.5	6	0.0081
3	6.5	7	0.007
3	6.5	8	0.0151
3	6.5	9	0.02
3	6.5	10	0.0204
3	6.5	11	0.0218
3	6.5	12	0.0246

3	6.5	13	0.0258
3	6.5	14	0.0296
3	6.5	15	0.0314
3	6.5	16	0.033
3	6.5	17	0.0342
3	6.5	18	0.0364
3	6.5	19	0.0388
3	6.5	20	0.0406
3	6.5	21	0.043
3	6.5	22	0.0438
3	6.5	23	0.0458
3	6.5	24	0.0474
4	9.5	1	0.031
4	9.5	2	0.028
4	9.5	3	0.0274
4	9.5	4	0.0258
4	9.5	5	0.0224
4	9.5	6	0.02
4	9.5	7	0.02
4	9.5	8	0.02
4	9.5	9	0.0116
4	9.5	10	0.0105
4	9.5	11	0.0186
4	9.5	12	0.02
4	9.5	13	0.02
4	9.5	14	0.0228
4	9.5	15	0.0262
4	9.5	16	0.0284
4	9.5	17	0.0282
4	9.5	18	0.03
4	9.5	19	0.032
4	9.5	20	0.0316
4	9.5	21	0.0374
4	9.5	22	0.0382
4	9.5	23	0.0378
4	9.5	24	0.038
5	12.5	1	0.0314
5	12.5	2	0.0326
5	12.5	3	0.0316
5	12.5	4	0.0274
5	12.5	5	0.026
5	12.5	6	0.0254
5	12.5	7	0.0244
5	12.5	8	0.022
5	12.5	9	0.02
5	12.5	10	0.02
5	12.5	11	0.014
5	12.5	12	0.0081

5	12.5	13	0.0105
5	12.5	14	0.02
5	12.5	15	0.02
5	12.5	16	0.0208
5	12.5	17	0.0218
5	12.5	18	0.0238
5	12.5	19	0.026
5	12.5	20	0.028
5	12.5	21	0.0308
5	12.5	22	0.032
5	12.5	23	0.034
5	12.5	24	0.035
6	15.5	1	0.0438
6	15.5	2	0.0407
6	15.5	3	0.0419
6	15.5	4	0.0372
6	15.5	5	0.0372
6	15.5	6	0.0336
6	15.5	7	0.034
6	15.5	8	0.0337
6	15.5	9	0.0326
6	15.5	10	0.0291
6	15.5	11	0.0268
6	15.5	12	0.0233
6	15.5	13	0.0209
6	15.5	14	0.02
6	15.5	15	0.0081
6	15.5	16	0.007
6	15.5	17	0.02
6	15.5	18	0.02
6	15.5	19	0.023
6	15.5	20	0.0246
6	15.5	21	0.0286
6	15.5	22	0.0291
6	15.5	23	0.0326
6	15.5	24	0.0361
7	18.5	1	0.0477
7	18.5	2	0.0442
7	18.5	3	0.0465
7	18.5	4	0.0428
7	18.5	5	0.04
7	18.5	6	0.0376
7	18.5	7	0.0362
7	18.5	8	0.0326
7	18.5	9	0.0292
7	18.5	10	0.028
7	18.5	11	0.0258
7	18.5	12	0.025

7	18.5	13	0.0256
7	18.5	14	0.0216
7	18.5	15	0.0214
7	18.5	16	0.02
7	18.5	17	0.0186
7	18.5	18	0.0093
7	18.5	19	0.007
7	18.5	20	0.02
7	18.5	21	0.02
7	18.5	22	0.02
7	18.5	23	0.0222
7	18.5	24	0.024
8	21.5	1	0.0484
8	21.5	2	0.0512
8	21.5	3	0.05
8	21.5	4	0.0477
8	21.5	5	0.0465
8	21.5	6	0.045
8	21.5	7	0.0444
8	21.5	8	0.0414
8	21.5	9	0.0374
8	21.5	10	0.0362
8	21.5	11	0.033
8	21.5	12	0.0324
8	21.5	13	0.0304
8	21.5	14	0.0279
8	21.5	15	0.0292
8	21.5	16	0.0248
8	21.5	17	0.0226
8	21.5	18	0.0202
8	21.5	19	0.02
8	21.5	20	0.02
8	21.5	21	0.0105
8	21.5	22	0.0105
8	21.5	23	0.0151
8	21.5	24	0.02
9	24.5	1	0.0605
9	24.5	2	0.057
9	24.5	3	0.0558
9	24.5	4	0.0552
9	24.5	5	0.0526
9	24.5	6	0.0504
9	24.5	7	0.0488
9	24.5	8	0.046
9	24.5	9	0.043
9	24.5	10	0.0422
9	24.5	11	0.0396
9	24.5	12	0.0384

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

9	24.5	13	0.0354
9	24.5	14	0.0354
9	24.5	15	0.0348
9	24.5	16	0.0318
9	24.5	17	0.0286
9	24.5	18	0.0254
9	24.5	19	0.024
9	24.5	20	0.0228
9	24.5	21	0.0208
9	24.5	22	0.02
9	24.5	23	0.0163
9	24.5	24	0.014

Tab. 9 - Geometria shots per stendimento sismico a rifrazione.


Infine, si è inserito i dati topografici del profilo investigato; dopodiché è stata avviata la procedura tomografica in automatico, mediante l'ausilio di software Rayfract, scegliendo le condizioni al contorno più attinenti possibili al contesto geologico e stratigrafico dell'area. Nello specifico le operazioni di elaborazione hanno previsto:

1. determinazione dei tempi di primo arrivo, operata prima in automatico e successivamente con aggiustamenti manuali, con particolare attenzione alle fasi d'onda ed alla loro evoluzione.
2. formazione di un database contenente la geometria della linea sismica (posizione altimetrica e planimetrica dei geofoni e degli scoppi) ed i tempi di primo arrivo per ciascun scoppio.
3. Conversione dei dati in formato ASCII.
4. Inversione Delta t-V che permette di ottenere profili monodimensionali (1D) di tipo profondità/velocità.
5. Ottimizzazione del profilo, per iterazioni successive, mediante inversione tomografica WET (Wavepath Eikonal Traveltime), che permette il calcolo delle traiettorie d'onda (wavepath) attraverso le soluzioni alle differenze finite dell'equazione che esprime le modalità di propagazione di un'onda in un mezzo isotropo.
6. Controllo del "fitting" tra tempi misurati e tempi calcolati ed eventuale reiterazione del processo di inversione.
7. Output grafico della sezione tomografica in formato Sfr.

5.3 - Risultati dell'indagine sismica a rifrazione

Nella Tavola 1 è riportata la sezione tomografica elaborata sulla stesa sismica St1, realizzata mediante la "WET Tomography" con le relative curve di isovelocità delle onde P, distribuite regolarmente ogni 200 m/s. Sotto la sezione bidimensionale (quote/lunghezza dello stendimento) viene riportata una scala in falsi colori che esprime i valori di velocità all'interno della sezione. Gli andamenti cromatici rispecchiano essenzialmente la variazione di materiale litologico e/o del contenuto d'acqua. Le velocità delle onde P sono infatti influenzate dalla presenza di sedimenti saturi. A partire dall'indagine tomografica St1 si possono individuare i seguenti orizzonti:

- dalla superficie fino a profondità di 3-4 m (onde P) un primo strato a velocità V_p minori di 1200 m/s correlabile al terreno di riporto e ai depositi alluvionali sciolti (Orizzonte A);
- il secondo sismostrato è caratterizzato da velocità V_p comprese tra 1200 e 2600 m/s formato

	Indagine geofisica di superficie (sismica a rifrazione, MASW e HVSr)	Località: via di Bogaia	Committenti: sigg. Ni Chaole, Ciottoli Marco e Yang Liang
--	--	----------------------------	--

dai depositi alluvionali saturi costituiti in prevalenza da sedimenti a granulometria da media a grossolana come sabbie limose e/o ghiaie (Orizzonte B) alla profondità compresa tra 3-4 m e 12 m da p.c..

Dall'indagine sismica a rifrazione è stata, pertanto, individuata la presenza della falda freatica superficiale a profondità di circa 3-4 m da p.c..

6 - CONCLUSIONI

Su incarico della Committenza, è stata realizzata una campagna d'indagine mediante metodologia sismica a rifrazione con onde P accoppiata con indagine MASW e misura HVSr in via di Bogaia nel Comune di Prato in data 27/06/2023. Nel dettaglio sono stati eseguiti uno stendimento sismico MASW e a rifrazione e una misura di rumore HVSr.

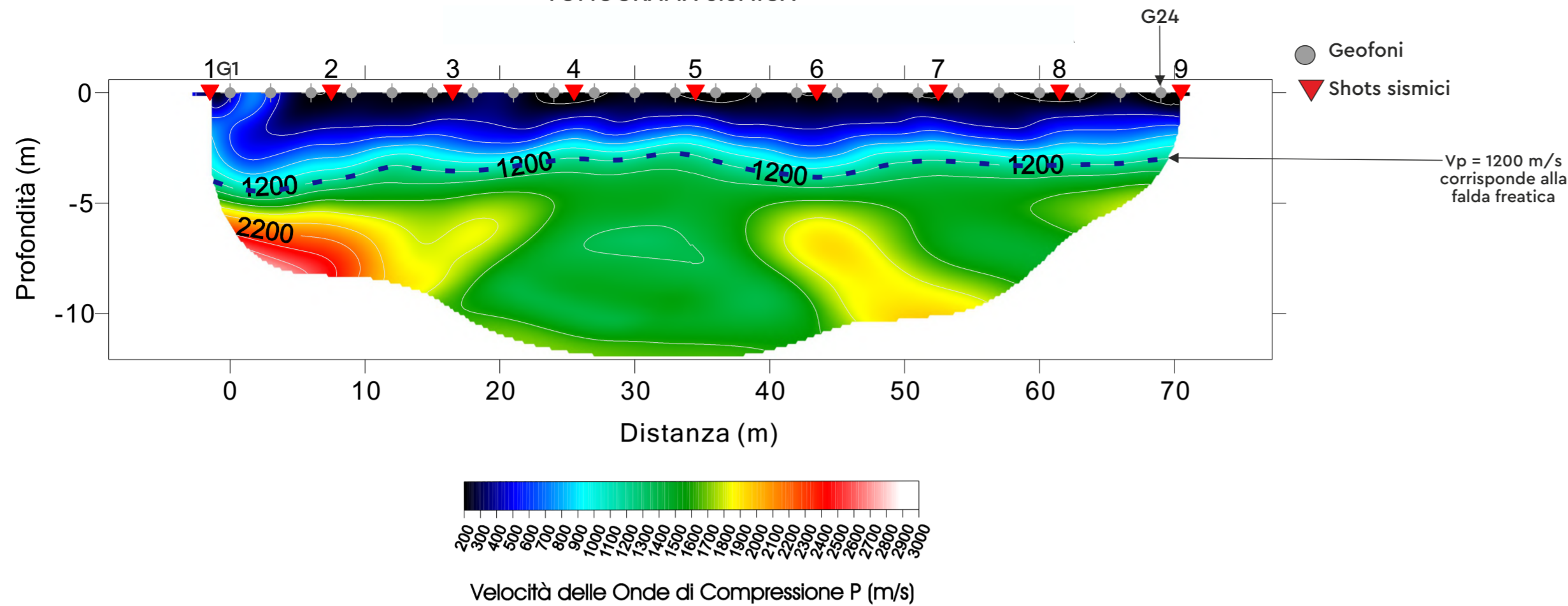
A partire dai risultati dell'indagine sismica MASW, si è potuto stimare il profilo verticale della V_s e di conseguenza del parametro $V_{s_{eq}}$ che risulta essere pari a **260 m/s**, considerando come riferimento il piano di campagna. Sulla base del profilo sismostratigrafico ottenuto, il sito risulta compatibile con la **categoria di sottosuolo C** secondo le NTC 2018 - Tabella 3.2.II. Dal modello sismostratigrafico in tab. 5 si nota che il principale contrasto di rigidità (maggiore salto di velocità delle Onde S) è a profondità di 52,3 m da p.c. corrispondente al passaggio al substrato roccioso alterato. Ciò viene confermato anche dalla misura di rumore HVSr che individua un picco fondamentale alla frequenza di 1,65 Hz che indica un alto contrasto di impedenza tra 50 m e 100 m di profondità da p.c. (tab. 3).

Dai dati ottenuti dallo stendimento sismico a rifrazione è stata elaborata una sezione tomografica, riportata nella Tavola 1, realizzata mediante la "WET Tomography" con le relative curve di isovelocità delle onde P. L'analisi tomografica eseguita con onde P evidenzia chiaramente la presenza di acqua (falda freatica) alla profondità di circa 3-4 m da p.c..

Firenze, lì 13/07/2023


 Via La Marmora 51 - 50121 Firenze (FI)
 P.IVA: 07015800480 Codice SDI: W7YVJK9

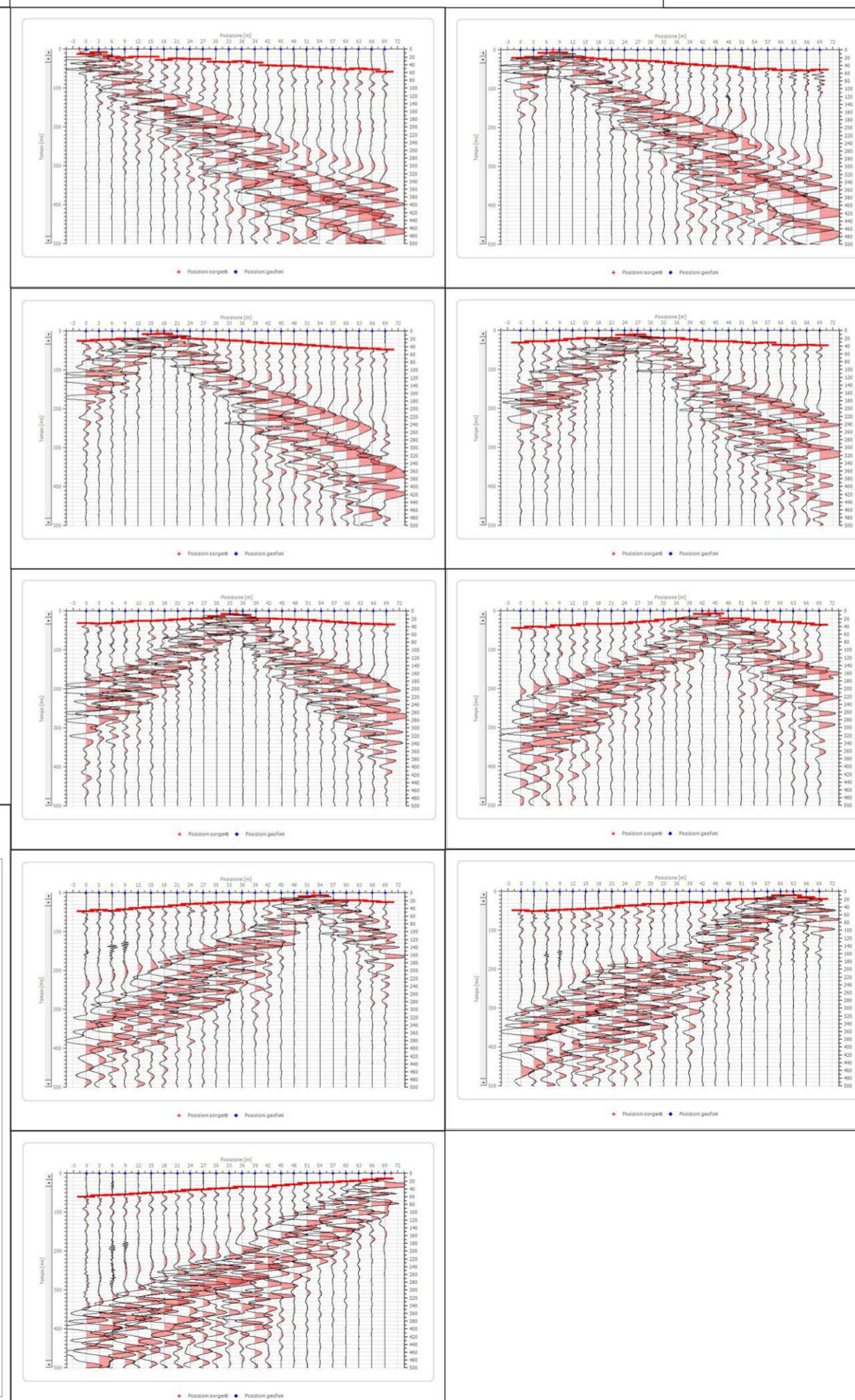

TOMOGRAFIA SISMICA



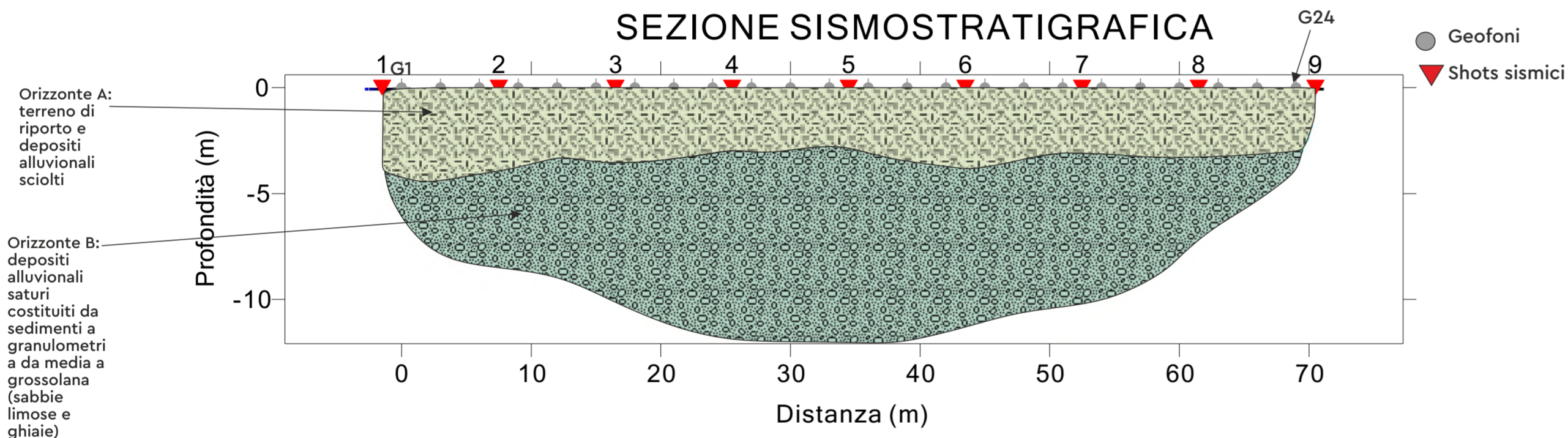
STESA SISMICA A RIFRAZIONE St1 CON ONDE P

Registrazione tracce

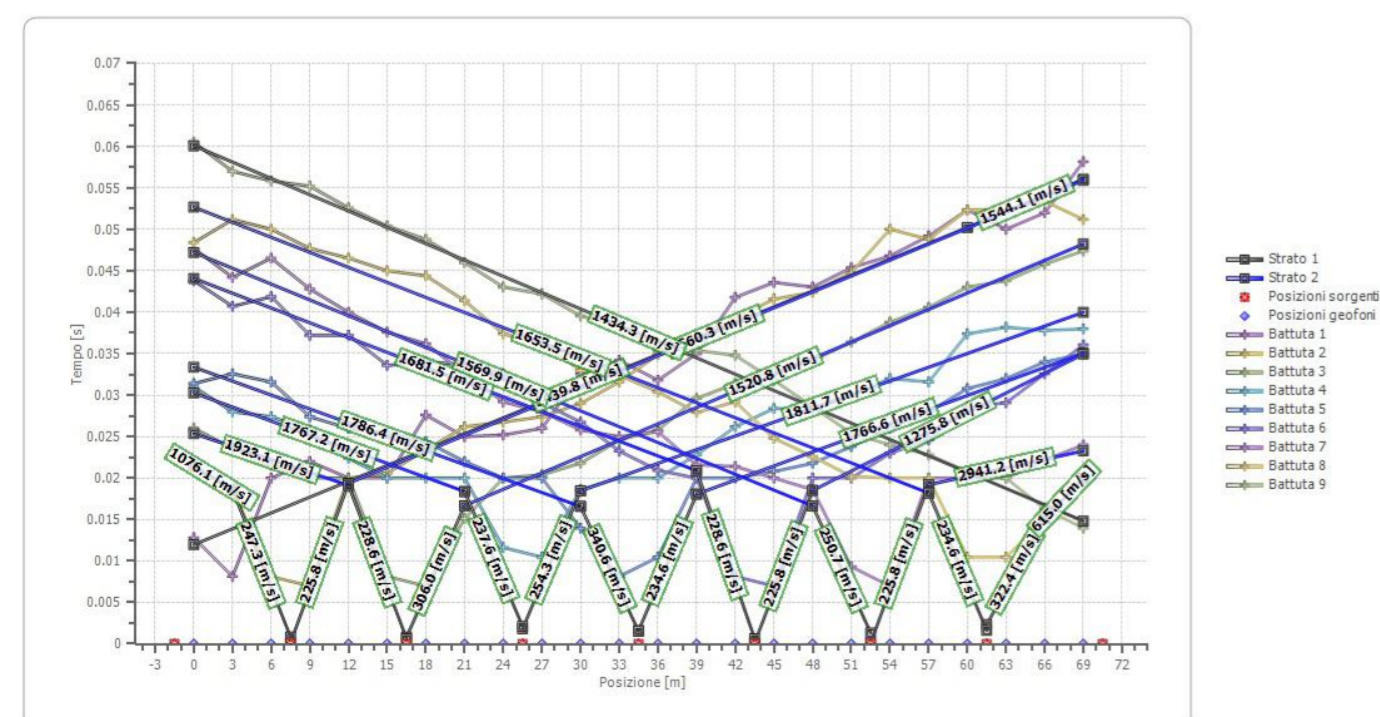
TAVOLA 1



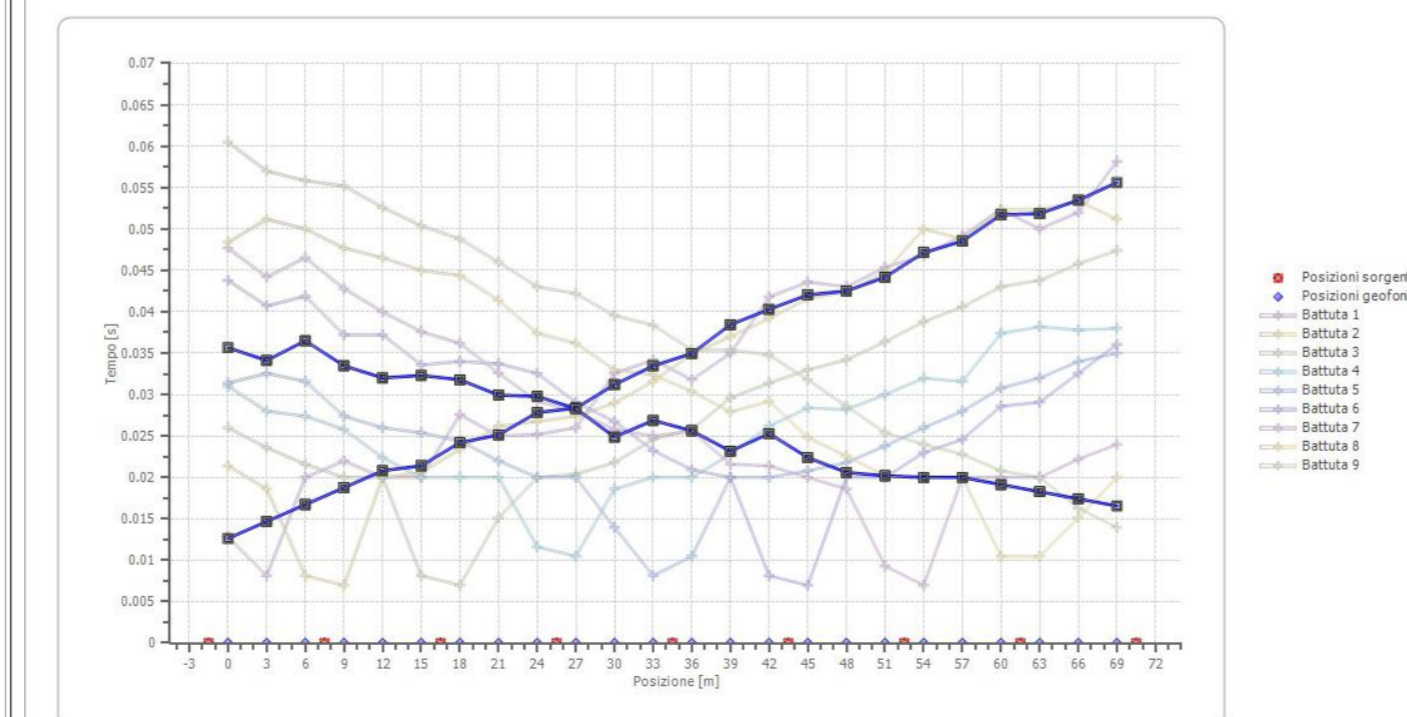
SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA



Dromocrone

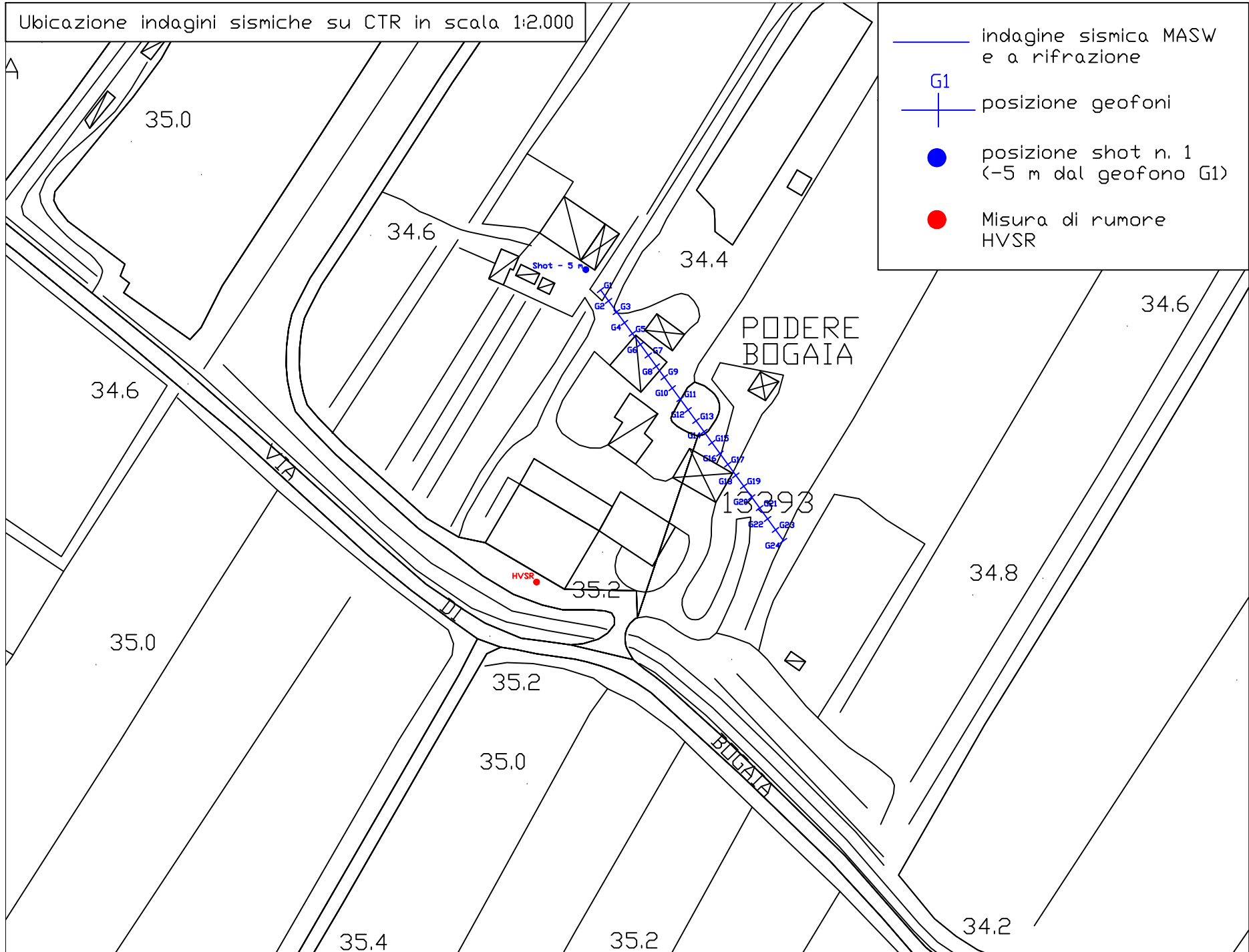


Dromocrone traslate



Ubicazione indagini sismiche su CTR in scala 1:2.000

- indagine sismica MASW e a rifrazione
- G1
— posizione geofoni
- posizione shot n. 1 (-5 m dal geofono G1)
- Misura di rumore HVSR



Firmato da:

FRANCESCO CINTELLI

codice fiscale CNTFNC78S25D403A

num.serie: 5710189961448249418

emesso da: ArubaPEC EU Qualified Certificates CA G1

valido dal 31/07/2022 al 04/08/2025