

COMMITTENTE:

COMUNE DI ARCIDOSO

P.zza Indipendenza, 30



PROVINCIA:

GROSSETO

COMUNE:

ARCIDOSO

PROGETTO GENERALE:

ESTENSIONE RETE DI
TELERISCALDAMENTO GEOTERMICO A
SERVIZIO DEL COMUNE DI ARCIDOSO

FASE PROGETTUALE:

PROGETTO FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

4					
3					
2					
1	-	-	-	-	-

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	CONTROLLATO
TAVOLA:		OGGETTO:		DATA:	
PFTE.GE.07		RELAZIONE SISMICA		SETTEMBRE 2025	
				SCALA:	

PROGETTISTA:



Dott. Ing. Gabriele Ghilardi

via G. Falcone n.12/14/16 - 24048 Treviolo (Bg)
Tel: 035.335813 - e-mail: info@ingsrl.it

Studio di consulenza, ingegneria, progettazione e certificazione

FILE:

REDATTO:

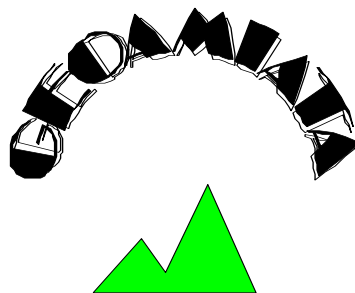
Dott. Alessandro Nenci

VERIFICATO:

Dott. Alessandro Nenci

APPROVATO:

Dott. Alessandro Nenci



*Corso Toscana, 3 - 58031 ARCIDOSSO
Tel. 0564/967404- Cell. 393/9478667
a.nenci@geoamiata.it*

**RELAZIONE SISMICA PER IL PROGETTO DI
AMPLIAMENTO DELLA RETE DI
Teleriscaldamento del Comune di
Arcidosso comprendente la
realizzazione di una sottostazione
di scambio termico**

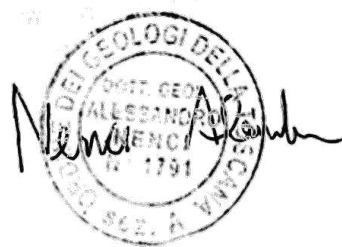
Committente: **ING Solutions s.r.l.**

Località: **Pian Perugino**

Comune: **Arcidosso (GR)**

Incarico n.: **27/25**

Data: **Agosto 2025**



SOMMARIO

1. PREMESSA.....	2
2. MODELLAZIONE SISMICA	4
2.1 PARAMETRI SISMICI E CATEGORIA DI SUOLO	4
3. CONCLUSIONI	6

FIGURE

FIG.1: PLANIMETRIA CON UBICAZIONE DELLE INDAGINI

ALLEGATI

ALLEGATO 1: RELAZIONE GEOFISICA;

ALLEGATO 2: PARAMETRI SISMICI DI SITO PER STABILITÀ DEI PENDII NATURALI;

RELAZIONE SISMICA

1. PREMESSA

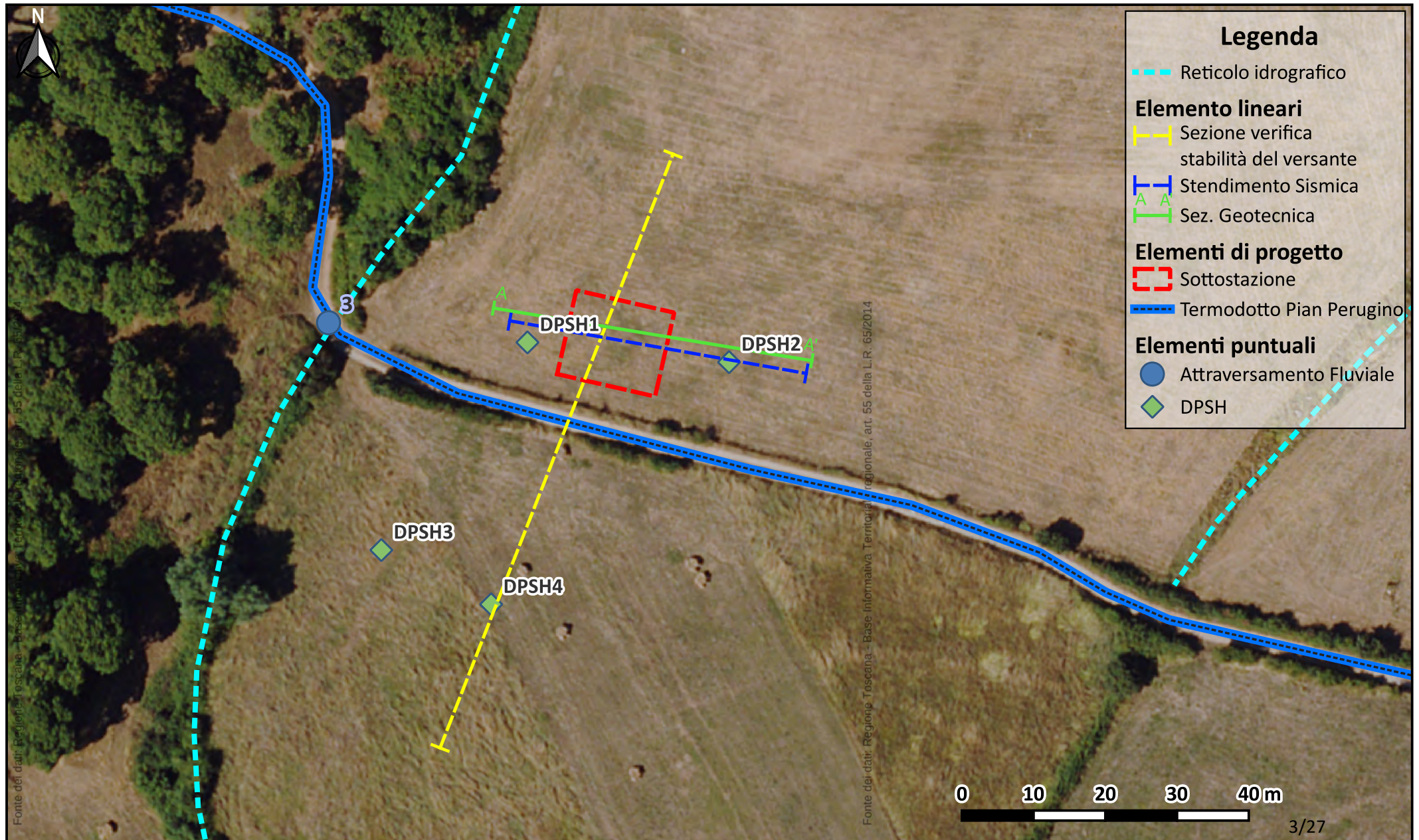
Il presente elaborato riporta i risultati di un'indagine geotecnica condotta su incarico della ING Solutions S.r.l., finalizzata alla redazione del progetto di fattibilità tecnico-economica (PFTE) per l'ampliamento della rete di teleriscaldamento del Comune di Arcidosso (GR). Attualmente, la rete di teleriscaldamento è in fase di realizzazione nell'ambito di un progetto finanziato dal PNRR – Missione 2, Componente 3, Investimento 3 (M2C3 I.3), con risorse provenienti dai fondi NextGenerationEU. I dettagli del progetto sono sintetizzati nella relazione geologica e nella documentazione di progetto. Per la sottostazione sono state fornite in una prima fase due ubicazioni alternative situate una a monte della strada vicinale della crocina e una a valle della stessa. In seguito di queste due ubicazioni è stata scelta quella a Nord della strada vicinale della Crocina (vedi planimetria figura 1).

Per quanto riguarda la sottostazione di scambio termico in ottemperanza al D.P.G.R. 19/01/2022, n. 1/R – *“Regolamento di attuazione dell'articolo 181 della legge regionale 10 novembre 2014, n. 65 (Norme per il governo del territorio). Disciplina sulle modalità di svolgimento dell'attività di vigilanza e verifica delle opere e delle costruzioni in zone soggette a rischio sismico”*, si specifica che l'opera da progetto che ci è stato consegnato ha volumetria di poco inferiore ai 1500 m³ e dunque ricade in una classe d'indagine II e per la sua caratterizzazione sono state realizzate due prove penetrometriche dinamiche super pesanti e un'indagine sismica MASW per la caratterizzazione sismica.

I sopralluoghi e le indagini per l'accertamento delle condizioni a base della presente relazione sono stati compiuti nei mesi di **luglio – agosto 2025**. Lo studio, onde consentire la definizione di un quadro geologico e geomorfologico attendibile, è stato esteso alle zone limitrofe.

Planimetria dell'area della sottostazione

Fig.1
Scala 1:700



2. MODELLAZIONE SISMICA

2.1 PARAMETRI SISMICI E CATEGORIA DI SUOLO

Con l'entrata in vigore delle **NTC18 (D.M. 17/01/2018)**, le azioni sismiche di progetto si definiscono a partire da una **“pericolosità sismica di base”** del sito di costruzione che costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche. Una volta definita la pericolosità sismica di base, ai fini della vigente normativa devono essere definiti i seguenti parametri:

a_g accelerazione orizzontale massima del sito

F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accel. orizz.

T_c periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accel. orizz.

Tali valori devono essere espressi in funzione del **periodo di riferimento V_R** per l'azione sismica della costruzione in oggetto; nel caso specifico si è ipotizzato che la **classe dell'opera fosse II, $V_R \geq 50$ anni; tuttavia, si specifica che se la classe dell'opera e la V_R fossero diverse si dovrebbe ricalcolare i coefficienti sismici k_h e k_v .**

Per la definizione del tipo di sottosuolo è stata realizzata una prospezione sismica con metodologia MASW in onde di Rayleigh. L'ubicazione e i metodi di esecuzione dell'analisi sono riportati in allegato alla presente relazione. È stato eseguito uno shot da entrambi i lati dello stendimento per verificare la condizione di piano parallelità dei sismostrati. Il valore del parametro $V_{s_{eq}}$, cautelativamente calcolato a partire da piano campagna, secondo la formula prevista dalla normativa vigente riguardo al rischio sismico è di **349 m/s** per il profilo derivante dallo shot A mentre è di **351 m/s** per quanto riguarda lo shot B e in nessuno dei due shot è stato individuato un substrato sismico. Si assegna al sito la **categoria di sottosuolo C.**

È stata eseguita una sismica a rifrazione (vedi allegati a relazione geofisica) parallela alle curve di livello e in corrispondenza dell'ingombro della sottostazione di scambio termico. Dall'elaborazione tomografica della rifrazione emerge che la coltre superficiale tende ad aumentare di spessore procedendo da Ovest verso Est. Tale tendenza è stata confermata dalle due prove penetrometriche dinamiche eseguite: la DPSH 1 ha raggiunto il rifiuto a circa 2 m di profondità, mentre la DPSH 2 ha raggiunto i 7 m con valori di

resistenza non elevati prima di andare a rifiuto. La sezione del gradiente di velocità mostra che il contrasto tra coltre e substrato è più superficiale nella porzione occidentale della sezione, mentre tende ad approfondirsi verso Est, raggiungendo circa 5-6 m

Categoria	Descrizione sottosuolo
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreno a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 e 800 m/s (ovvero $NSPT_{30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 e 360 m/s (ovvero $15 < NSPT_{30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} inferiori a 180 m/s (ovvero $NSPT_{30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 30 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s)

Infine, deve essere presa in considerazione la **situazione topografica locale**; per condizioni superficiali semplici può essere adottata la tabella 3.2.IV che di seguito viene riportata.

Nell'area di studio, il versante ha un'inclinazione media minore di 15° e si assegna la **categoria topografica T1**.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

In allegato si riportano i parametri sismici relativi al sito in esame.

3. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si riferisce su un'indagine sismica effettuata su richiesta e per conto della ING Solutions s.r.l. per la progettazione di una sottostazione di scambio termico necessaria all'ampliamento della rete del teleriscaldamento geotermico del comune di Arcidosso. Da un punto di vista sismico si è potuto concludere quanto segue:

- da un'indagine sismica MASW in onde di Rayleigh è stato desunto il parametro V_{seq} che per l'area d'indagine è **circa 350 m/s e non è presente un substrato sismico nei primi 30 m**;
- per quanto riguarda gli aspetti sismici, in ossequio al D.M. 17.01.18, sono state individuate la pericolosità sismica di base e le **categorie di sottosuolo (C)** e **topografica (T1)** del sito, dalle quali sono stati determinati i relativi parametri e coefficienti sismici, riportati in allegato.
- I parametri sismici del sito ed in particolare K_h e k_v sono stati calcolati tenendo conto del versante senza opere di sostegno con β di 0.24. Se si dovesse variare il tipo di opere andrebbero ricalcolati i parametri sismici del sito.

ARCIDOSSO, 14 agosto 2025



ALLEGATI

ALLEGATO 1: RELAZIONE GEOFISICA;

ALLEGATO 2: PARAMETRI SISMICI DI SITO PER STABILITÀ DEI PENDII NATURALI;

Allegato 1

RELAZIONE GEOFISICA

1 PREMESSA

La presente indagine geofisica è stata eseguita in loc. Pian Perugino comune di Arcidosso (GR). Le coordinate geografiche del centro dell'area d'indagine 42.8592°N, 11.5368°E (WGS84). In questa area sono state effettuate un'indagine sismica in tecnica MASW con acquisizione di onde di Rayleigh al fine di dedurre il parametro V_{SEQ} utile nella definizione delle azioni sismiche attese e una indagine sismica a rifrazione in onde P attraverso la quale si è cercato di definire le geometrie sepolte dei vari strati e la V_P .

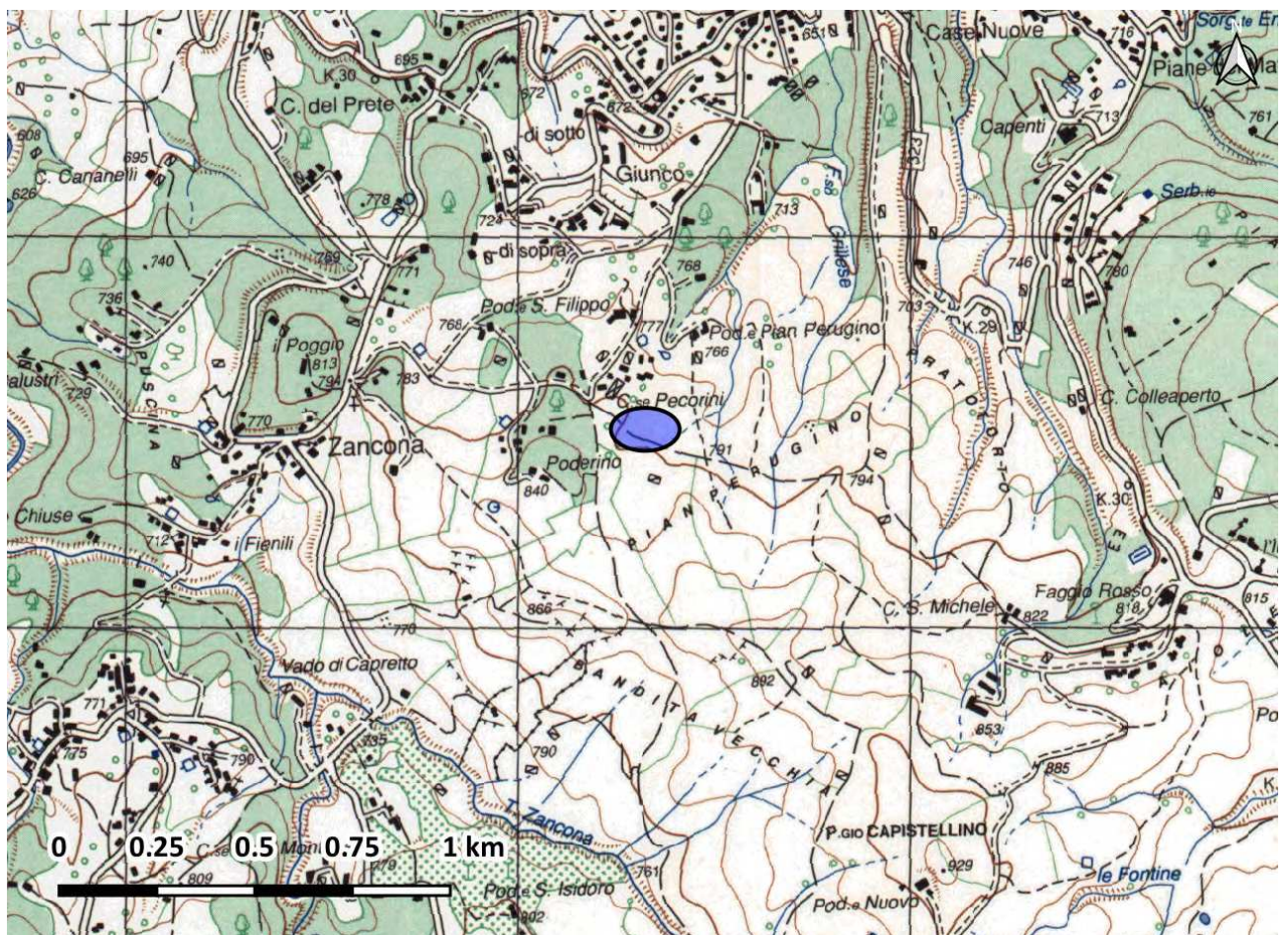


Fig. 1: Inquadramento generale dell'area

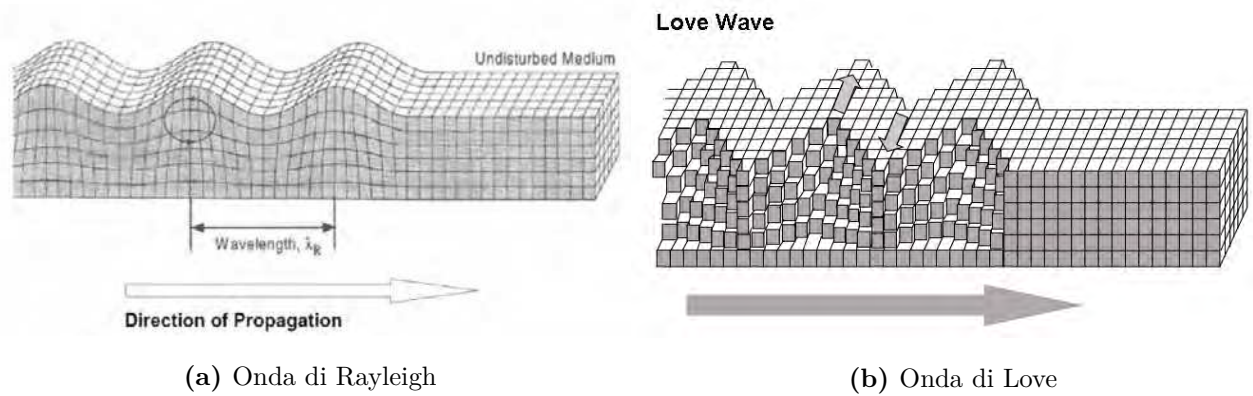


Fig. 2: Cinematica onde superficiali

2 CENNI TEORICI SUI METODI UTILIZZATI

2.1 Multichannel Analysis of Surface Waves

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è un metodo d'indagine geofisica che si è sviluppato e diffuso nella seconda metà degli anni '90 e prevede, come le più comuni tecniche sismiche di indagine del sottosuolo (rifrazione P e S), l'energizzazione del terreno e la successiva registrazione delle onde generate con un array lineare di geofoni. La particolarità di questa indagine è che utilizza le onde superficiali, sia di Rayleigh che di Love, per definire il profilo della V_s nel sottosuolo. Le onde di Rayleigh hanno un moto ellittico retrogrado (Fig.2) ed hanno velocità di poco inferiore a quelle delle onde S infatti in mezzi omogenei ed elasticamente lineari:

$$V_R = 0.9 \cdot V_s$$

Le onde di Love si propagano con un movimento oscillatorio che si sviluppa sul piano orizzontale e non ha componenti verticali, con una velocità prossima alla velocità delle onde di taglio.

La caratteristica fondamentale delle onde superficiali è che, in terreni disomogenei, sono soggette al fenomeno della dispersione ovvero la loro velocità di propagazione varia con la frequenza di oscillazione.

Sapendo inoltre che le frequenze di oscillazione più basse esplorano porzioni più profonde di terreno (Fig 3) si può, tramite un opportuno formalismo matematico, trasformare la curva di dispersione estrapolata dai sismogrammi misurati, in un profilo di V_s attendibile. Questo rende la tecnica MASW uno strumento d'indagine molto potente per definire il profilo delle V_s e quindi la V_{sEQ} .

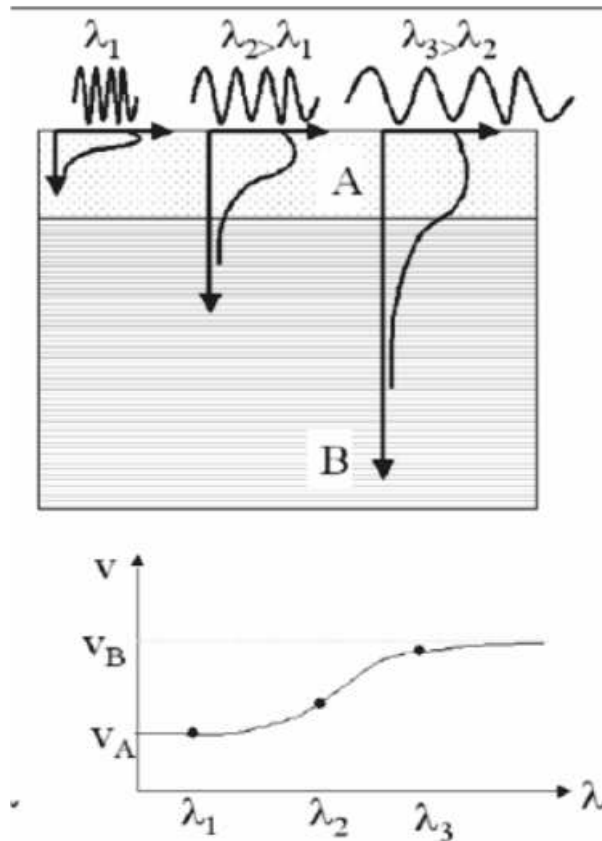


Fig. 3: Rapporto fra lunghezza d'onda e profondità investigata

I vantaggi di questa tecnica sono la possibilità di individuare le inversioni di velocità, la maggiore sensibilità alle proprietà meccaniche dei terreni, il più alto rapporto tra profondità raggiunta e la lunghezza dello stendimento e l'applicabilità in contesti con alto rumore ambientale ed antropico. Gli svantaggi sono invece la mono-dimensionalità del risultato e la presenza di alcune assunzioni che ne restringono il campo di applicazione. Infatti la metodologia sarebbe applicabile solo in situazioni geologiche con geometrie piano-parallele; in realtà piccole inclinazioni sono tollerate, in quanto gli errori indotti ricadono all'interno dell'errore strumentale ed interpretativo.

L'obiettivo dell'elaborazione di un segnale acquisito con la tecnica MASW è essenzialmente quello di ricavare la curva di dispersione delle velocità di fase delle onde di Rayleigh. Il grafico frequenza-velocità di fase si ottiene, partendo dal sismogramma di campagna, attraverso l'applicazione di una doppia trasformata di Fourier alle tracce acquisite, prima nel dominio del tempo (tempo di campionamento-frequenza(f)) e quindi in quello dello spazio (spaziatura dei geofoni-numero d'onda(k)). Si ottiene così un diagramma, detto spettro f - k , nel quale è evidenziato il modo in cui si distribuisce la densità di energia associata al segnale. Poiché già a una piccola distanza dalla sorgente superficiale il contributo delle onde di volume all'energia

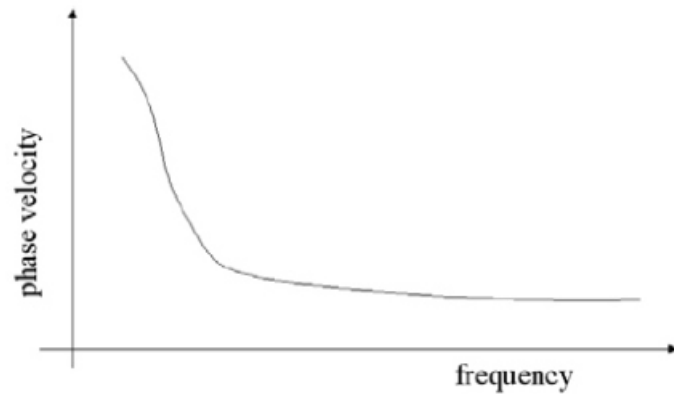


Fig. 4: esempio di curva di dispersione

totale diventa trascurabile, lo spettro f-k consente di far emergere la curva di dispersione delle onde di superficie (fig.4). Essendo il numero d'onda k legato alla velocità di fase dalla relazione:

$$v_{\Phi} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{k}$$

si può facilmente passare dallo spettro f-k al dominio f-v.

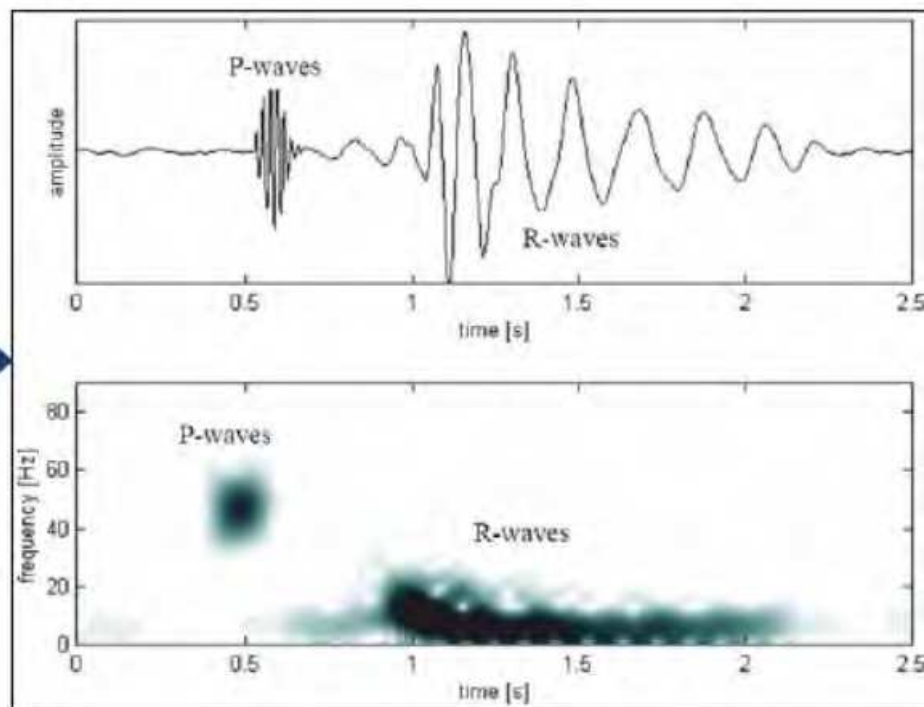


Fig. 5: schema di un sismogramma con relativo spettro f-k

Nel caso di un terreno stratificato ricavare il profilo V_s dalla curva di dispersione è un problema fortemente non lineare, che non permette l'uso dei metodi classici d'inversione e deve essere quindi affrontato con i così detti metodi Montecarlo. Quest'ultimi in linea generale prevedono la selezione di un profilo V_s iniziale da cui, risolvendo il problema diretto, viene

ricavata la curva di dispersione che viene poi confrontata con la curva misurata. A questo punto si modifica leggermente il modello iniziale e si prosegue con questo schema fino a trovare la curva di dispersione che meglio interpola la curva misurata.

2.2 Sismica a rifrazione

La prospezione sismica a rifrazione è un metodo geofisico che prevede la registrazione, lungo uno stendimento di geofoni, della forma d'onda generata da una sorgente impulsiva (maglio, fucile sismico ecc.). Dalla forma d'onda registrata si definisce i primi arrivi ai vari geofoni disposti con una geometria nota e utilizzando le leggi di Huygens e Snell, si ricava gli andamenti dei rifrattori e le velocità della porzione di terreno sottostante lo stendimento (fig.6). Il metodo della rifrazione è affidabile e collaudato essendo uno dei metodi più utilizzati nella geofisica applicata all'ingegneria.

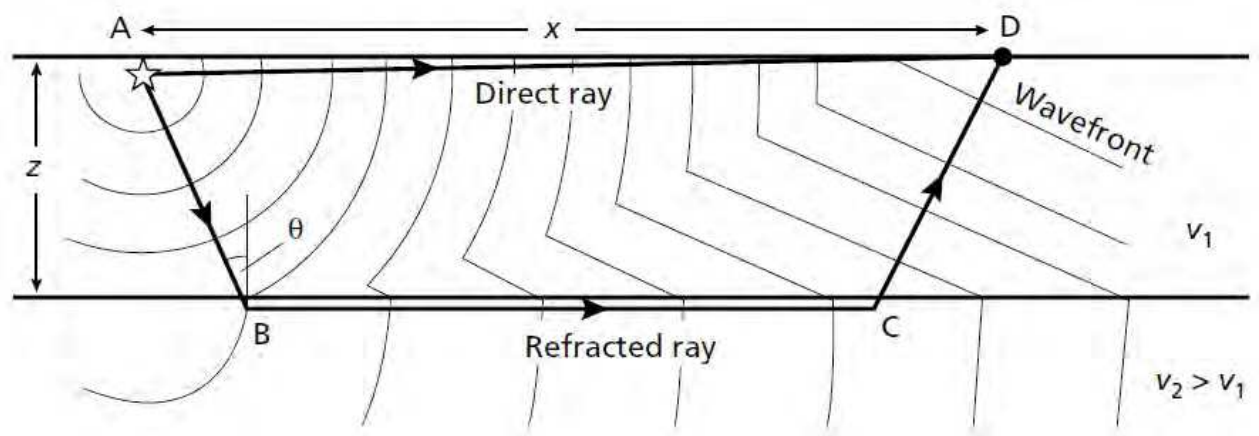


Fig. 6: schema della propagazione di un'onda diretta e di un'onda rifratta

I risultati di questo metodo vanno comunque analizzati ed utilizzati con molta attenzione in quanto presenta le seguenti limitazioni:

- è possibile individuare un orizzonte solo se esso ha una velocità delle onde P maggiore di quello sovrastante ovvero non si possono individuare le cosiddette inversioni di velocità;
- come in molte altre metodologie geofisiche esiste un trade-off tra velocità e spessore dello strato, ovvero si può avere più modelli validi variando queste due incognite in maniera proporzionale;
- la profondità massima di investigazione è circa un quarto della lunghezza dello stendimento

- non è sempre possibile individuare spessori piccoli rispetto all'asse intergeofonico.

Si consiglia quindi di tener ben presente questi quattro punti durante l'interpretazione delle sezioni derivanti dalla sismica a rifrazione.

3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Il sistema usato per l'acquisizione è quello prodotto dalla SARA Electronic Instruments s.r.l ed è composto da:

- un sismografo a 12 canali
- 12 geofoni verticali
- 1 geofono starter
- 1 unità di testa

I geofoni verticali e orizzontali hanno una frequenza naturale di 4.5 hz e una sensibilità di 28 V/m/s .Il sismografo è costituito da 12 unità poste lungo il cavo sismico a distanze regolari; queste unità sono essenzialmente dei convertitori analogico-digitali a 16 bit, con filtro passa basso con 200 hz di frequenza di taglio e un filtro passa alto con frequenza di taglio posta a 2 hz. Il trigger, ovvero lo start della registrazione, viene dato attraverso il geofono starter. L'unità di testa, infine, è un'interfaccia tra i vari digitalizzatori posti lungo il cavo e il computer. Le onde di Rayleigh sono state generate con un colpo di maglio da 6 kg su una piastra battente in PVC.

4 PROCEDURE INDAGINE MASW

In questa sezione verranno descritte esaurientemente le metodologie utilizzate per l'acquisizione, il processing e l'inversione dei sismogrammi.

4.1 Acquisizione MASW

Nell'area di indagine è stata eseguita una prova sismica in tecnica MASW in onde di Rayleigh il giorno 07/07/2025 e per realizzarla si è posizionato 12 geofoni verticali con un interasse di 2,0 m e sono state eseguite tre energizzazioni su ogni lato dello stendimento e sono state selezionate quelle poste alla distanza di 10 m dal primo geofono e dall'ultimo geofono.

4.2 Processing MASW

In questa sezione verrà brevemente descritta la sequenza di processing applicata al sismogramma registrato per la MASW; il software usato per il processing è GEOPSY (GEOPhysical Signal processing). Per questo sismogramma la sequenza utilizzata è composta da due passi:

- Normalizzazione dell'energia delle tracce secondo l'inverso del quadrato della distanza
- Normalizzazione dell'energia dell'onda

il primo step serve per dare più valore alle tracce registrate ad una distanza maggiore rispetto al punto di energizzazione, affinché esse non vengano coperte del tutto dal segnale relativo alle tracce prossime al punto di battuta. Inoltre le tracce più lontane sono quelle che, in linea di massima, ci restituiscono i segnali più affidabili, in quanto quasi sicuramente soddisfano l'assunzione di fronte d'onda piano necessaria per la definizione di una curva di dispersione corretta. Il secondo passaggio normalizza lo spettro frequenza/velocità con il massimo dell'energia dello stesso, questo serve ad avere una visualizzazione nitida della curva di dispersione. Il passo finale del processing è quello di fare il picking della curva di dispersione che poi sarà esportata nel programma Dinver per poter essere invertita.

4.3 Inversione MASW

L'inversione della MASW è stata effettuata attraverso il software Dinver presente nel pacchetto software Geopsy. Questo software utilizza il metodo del Neighbourhood Algorithm, che minimizza la funzione di errore tra la curva calcolata e quella misurata, attraverso una ricerca diretta nello spazio dei modelli. In pratica questo algoritmo genera un numero N_{s0} di modelli di V_s iniziali, risolvendo il problema diretto da questi modelli ricava una curva di dispersione che confronta con quella misurata e ne deduce un valore di misfit; di questi modelli seleziona quelli che hanno restituito il minor misfit e li varia minimamente generando nuovi N_s modelli di cui genera la curva di dispersione; calcola nuovamente i misfit rispetto alla curva misurata, seleziona quelli con il misfit minore e continua seguendo questo schema fino a trovare la curva di dispersione che più si avvicina a quella misurata. La peculiarità di questo algoritmo è che non cerca casualmente nello spazio dei modelli quello che meglio interpola i dati misurati, ma lo cerca seguendo uno schema, basato sulle celle di Voronoi, che velocizza molto la ricerca e diminuisce la possibilità di cadere in minimi locali.

5 PROCEDURE INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P

5.1 Acquisizione Rifrazione

Le sismiche a rifrazione sono state realizzate lo stesso giorno della MASW e per la rifrazione 1 è stato utilizzato uno stendimento lungo 42 m con geofoni posti ad interasse 2 m da 10 a 32 m, con otto punti sorgente di cui due estremi, due esterni e quattro interni acquisendo con energizzazione verticale (Fase P) . I parametri utilizzati nell'acquisizione dei sismogrammi sono stati selezionati sulla base delle velocità e delle geometrie attese sul sito studiato ed è stato selezionato un tempo di registrazione di 0,200 s. Nell'allegato 1 e 2 sono riportate l'ubicazione e geometria dettagliata degli stendimenti utilizzati.

5.2 Processing ed inversione della sismica a rifrazione

L'elaborazione della sismica a rifrazione è stata fatta con il software SMARTTOMO che prevede il primo fondamentale passaggio del picking dei primi arrivi, in cui si cerca di definire i tempi di primo arrivo dell'onda rifratta per ogni traccia misurata. Si costruisce così una dromocrona (curva che mostra la variazione dei tempi di arrivo in base alla distanza dalla sorgente) per ogni energizzazione. Il metodo utilizzato per ottenere la sezione di velocità delle onde P e S partendo dalle dromocrone e dalla geometria dello stendimento utilizzato in questo studio è quello della **Tomografia sismica**: tale metodo è ottimale per ricostruire le variazioni laterali di velocità delle onde P nel sottosuolo; in questo caso si deve prima di tutto definire un modello iniziale rispetto al quale si calcola il percorso dei raggi sismici con un algoritmo di ray-tracing; una volta trovato il percorso dei raggi si calcola i tempi di arrivo per quel particolare modello, i quali sono confrontati con i tempi di arrivo misurati sul terreno. A questo punto inizia una procedura iterativa che prevede di modificare leggermente il modello iniziale e sulla base di questo calcolare il percorso dei raggi sismici e le nuove dromocrone. Questo processo è ripetuto per un certo numero di volte fino a che l'errore tra le dromocrone calcolate e quelle misurate sia minimo e stabile



Fig. 7: Documentazione fotografica dello stendimento 2

6 MODELLAZIONE SISMICA E CATEGORIA DI SUOLO

I risultati dell'indagine sismica sono riassunti negli allegati in calce alla presente relazione. Gli allegati sono organizzati come segue:

- **Allegato 1:** ubicazione dettagliata su ortofotopiano;
- **Allegato 2:** geometrie degli stendimenti;
- **Allegato 3:** picking della curva di dispersione, confronto tra curva misurata e invertita e profilo di velocità risultante dallo Shot A;
- **Allegato 4:** picking della curva di dispersione, confronto tra curva misurata e invertita e profilo di velocità risultante dallo Shot B;
- **Allegato 5:** analisi dello spazio dei parametri;
- **Allegato 6:** dromocrone della rifrazione 1 (onde P);
- **Allegato 7:** sezione tomografica della rifrazione 1 (onde P).

L'indagine MASW è stata effettuata lungo uno stendimento di 22 m con direzione N101. I geofoni sono stati infissi direttamente nel terreno tramite la punta in acciaio di cui sono dotati. Tra i vari shot eseguiti, sono stati selezionati quelli con offset di 10 m dal primo e dall'ultimo geofono. Le curve di dispersione, l'inversione dei dati e i profili di velocità risultanti sono sintetizzati negli allegati 3 e 4 e nella tabella 1.

Il grafico di dispersione risultante da entrambi gli shot mostra chiaramente il modo fondamentale e lo shot eseguito alla progressiva di 42 m (shot B) anche il primo modo superiore di vibrazione.

MASW	MASW Shot A		MASW Shot B	
	Spessore (m)	Vs (m/s)	Spessore (m)	Vs (m/s)
Livello 1	1.28	152	1.00	143
Livello 2	6.96	274	4.71	248
Livello 3	21.23	420	1.76	296
Livello 4	> 0.52	455	15.07	358
Livello 5			> 7.46	613
	VsEq:	351	VsEq:	349

Tab. 1: Risultati dell'indagine sismica MASW

I profili ricavati dai due shot risultano tra loro coerenti e descrivono un sottosuolo costituito da:

- una coltre superficiale di circa 1 m con bassa velocità (140-150 m/s);
- un livello intermedio di 6-7 m con velocità Vs compresa tra 250 e 290 m/s;
- uno strato successivo con spessore di 10-20 m e Vs tra 360 e 420 m/s;
- un substrato ($V_s < 800$ m/s) intercettato appena entro i 30 m.

Dalla ricostruzione dello spazio dei parametri (Allegato 5), si osserva che per entrambi gli shot l'algoritmo di inversione è riuscito a far convergere i valori di Vs e spessore degli strati verso soluzioni ben definite, indicando un'elaborazione stabile e attendibile.

L'indagine sismica a rifrazione (onde P) è stata eseguita come descritto nel capitolo 5 (vedi geometria in Allegato 2), con una profondità investigata massima di circa 10-12 m.

Dall'elaborazione tomografica della rifrazione 1 (Allegati 6 e 7) emerge che la coltre superficiale tende ad aumentare di spessore procedendo da Ovest verso Est. Tale tendenza è stata confermata dalle due prove penetrometriche dinamiche eseguite: la DPSH 1 ha raggiunto il rifiuto a circa 2 m di profondità, mentre la DPSH 2 ha raggiunto i 7 m con valori di resistenza non elevati prima di andare a rifiuto. La sezione del gradiente di velocità mostra che il contrasto

tra coltre e substrato è più superficiale nella porzione occidentale della sezione, mentre tende ad approfondirsi verso Est, raggiungendo circa 5-6 m.

Il D.M. 17.01.2018 propone una classificazione del sottosuolo basata sul parametro V_{sEQ} , calcolato mediante la seguente espressione:

$$V_{sEQ} = \frac{H}{\sum_1^N \left(\frac{h(i)}{V_s(i)} \right)}$$

Dove:

- h_i e $V_s(i)$ sono rispettivamente lo spessore e la velocità del singolo strato,
- N è il numero di strati,
- H è la profondità del substrato (terreno molto rigido o roccia con $V_s > 800$ m/s). Se lo spessore delle coperture supera i 30 m, H deve essere assunto pari a 30 m.

Le velocità V_{sEQ} derivate dagli shot A e B risultano inferiori a 360 m/s e, in nessuno dei due profili, è stato identificato un substrato sismico entro 30 m di profondità. Pertanto, si assegna al sito la categoria di sottosuolo C.

Arcidosso, 07 Luglio 2025

Firma

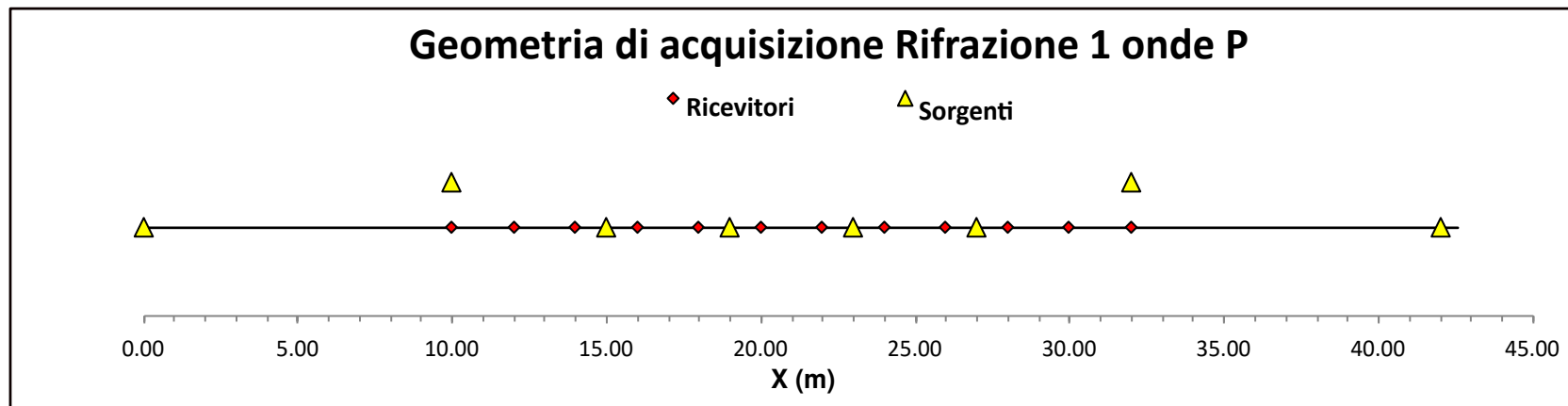
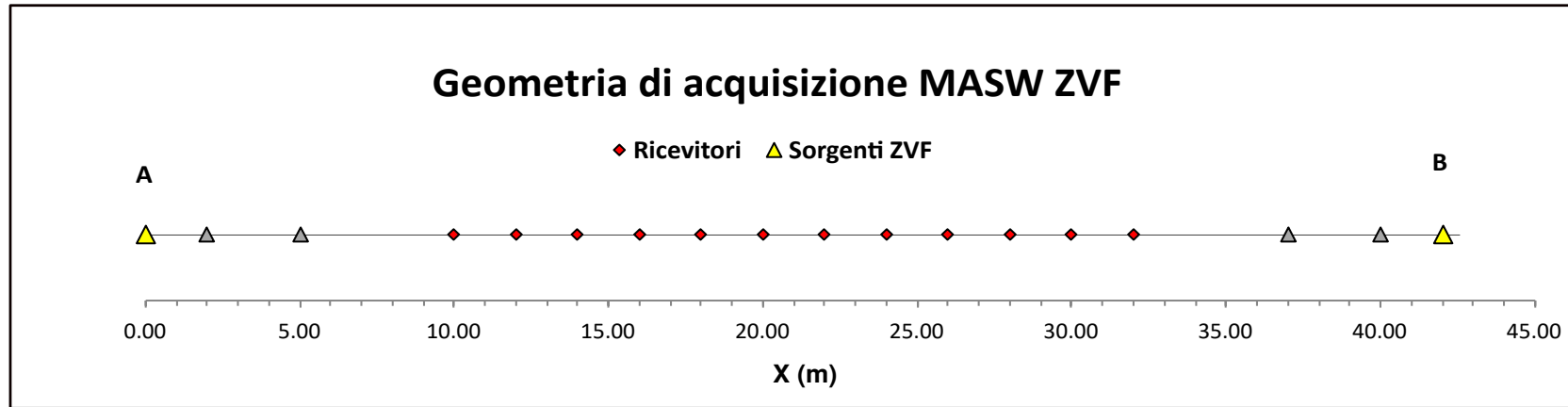

Indagine geofisica : Località Pian Perugino Arcidosso (GR)

Allegato 1: Ubicazione dello stendimento



Indagine geofisica : Località Pian Perugino Arcidosso (GR)

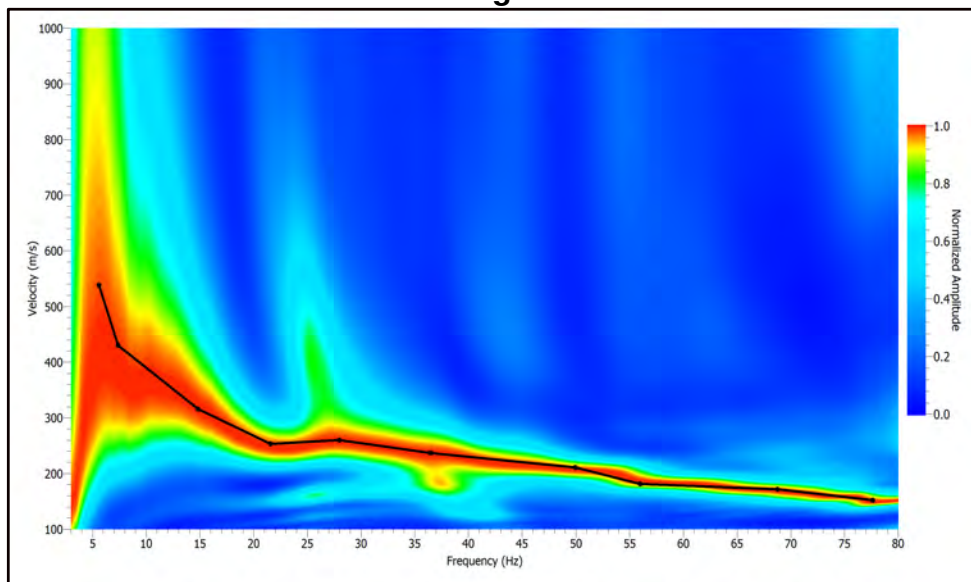
Allegato 2: Geometria dello stendimento



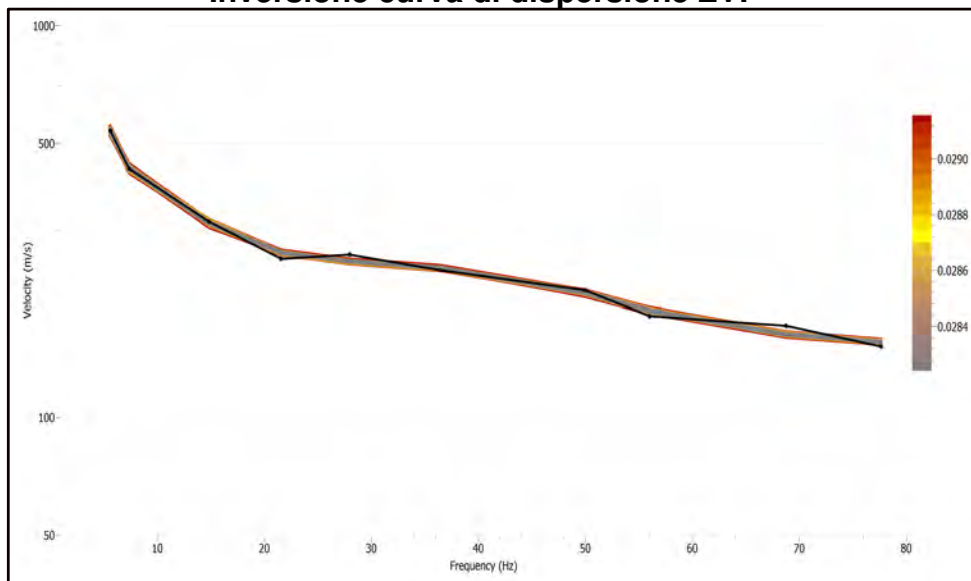
Indagine geofisica : Località Pian Perugino Arcidosso (GR)

Allegato 3: MASW Rayleigh Shot A

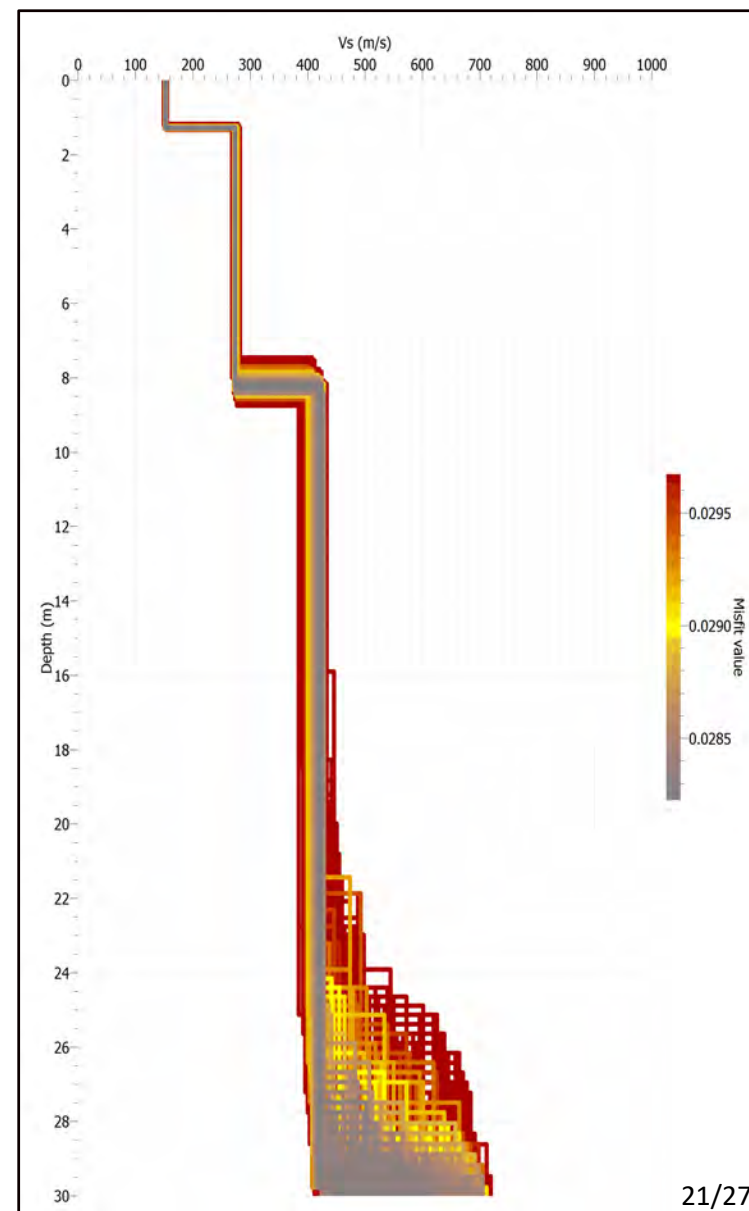
Picking ZVF



Inversione curva di dispersione ZVF



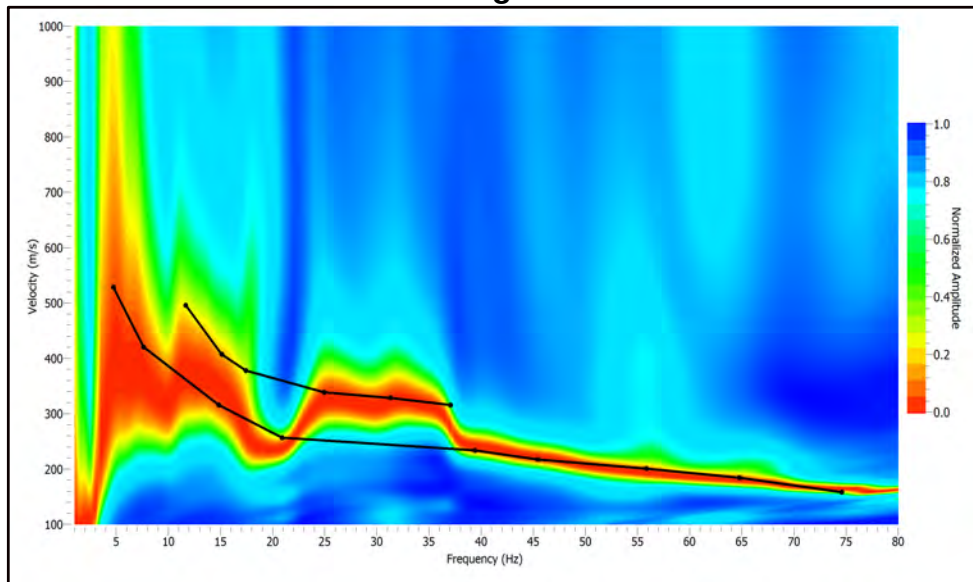
Profilo di velocità



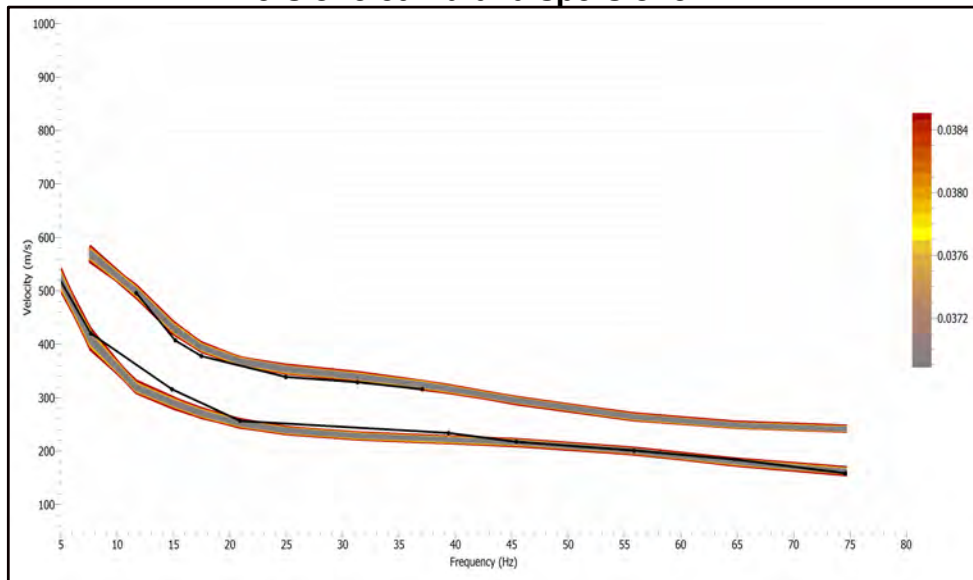
Indagine geofisica : Località Pian Perugino Arcidosso (GR)

Allegato 4: MASW Rayleigh Shot B

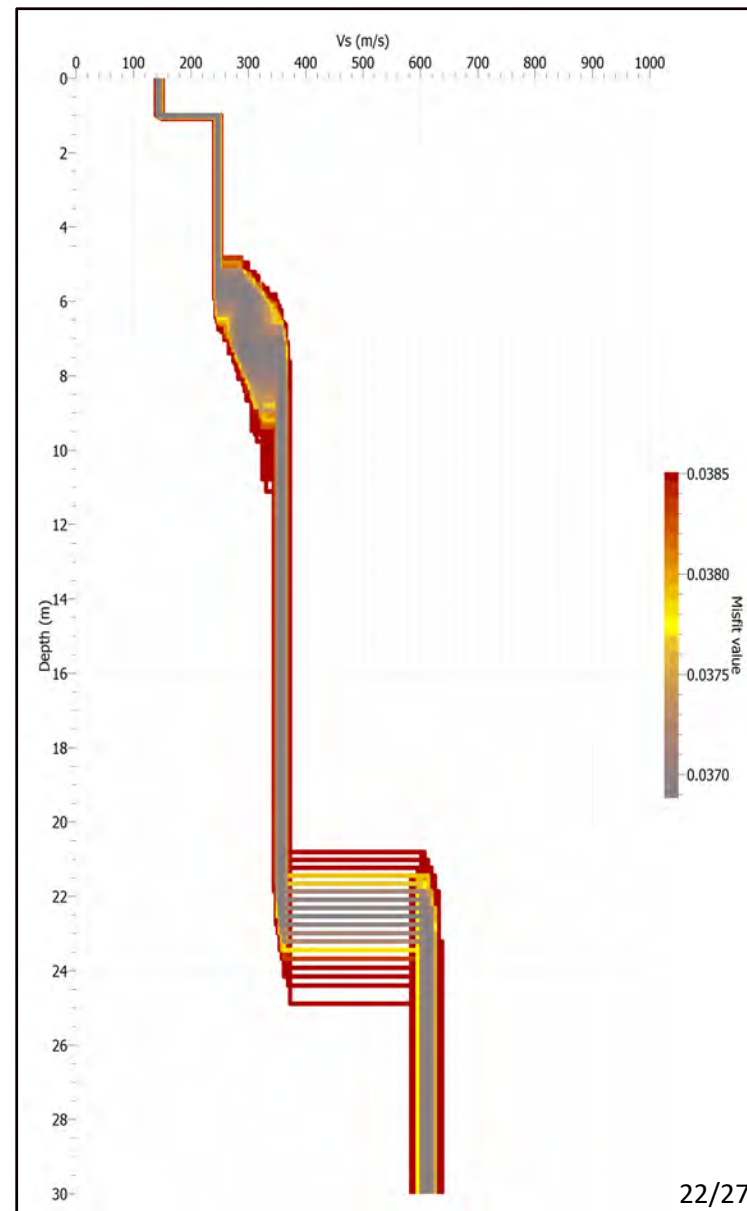
Picking ZVF



Inversione curva di dispersione ZVF



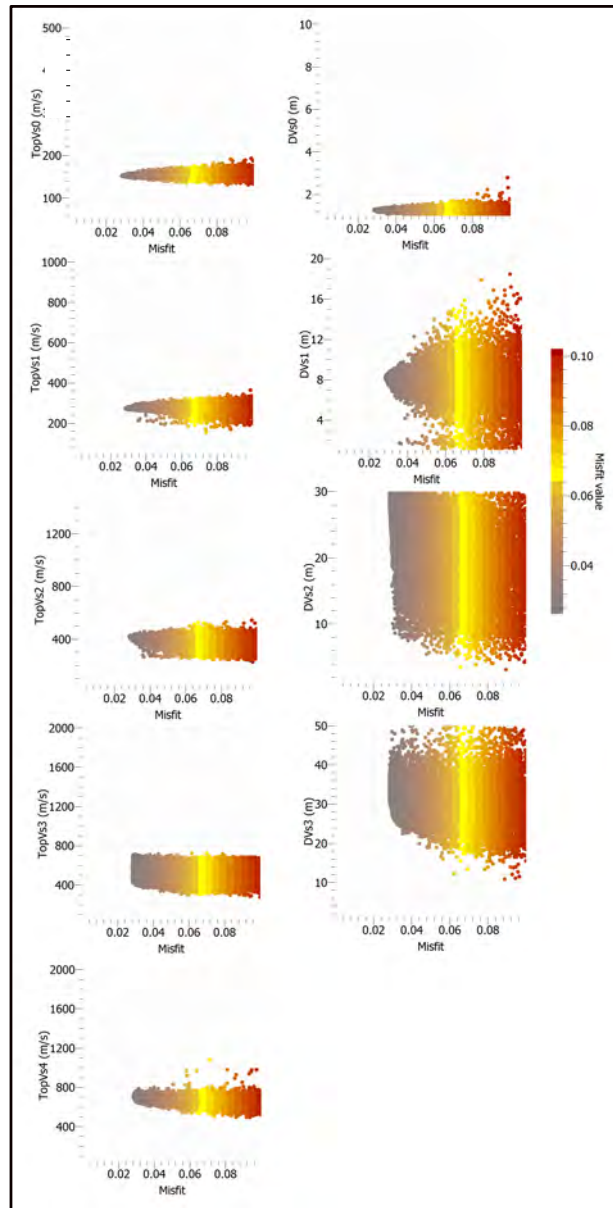
Profilo di velocità



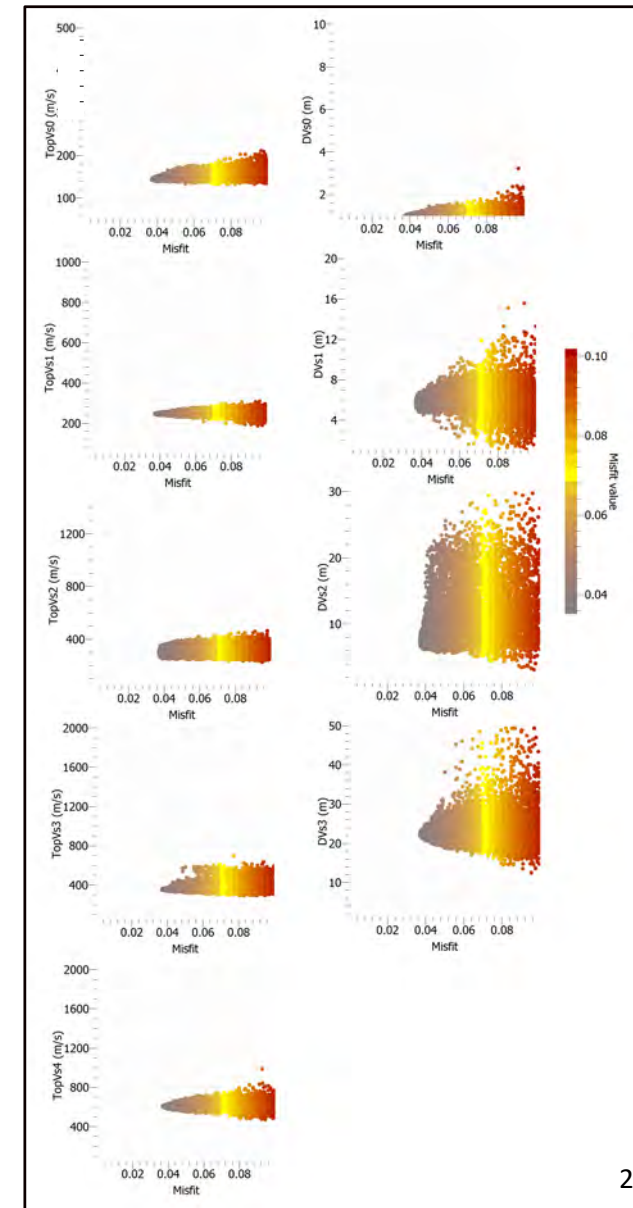
Indagine geofisica : Località Pian Perugino Arcidosso (GR)

Allegato 5: Spazio dei parametri

SHOT A



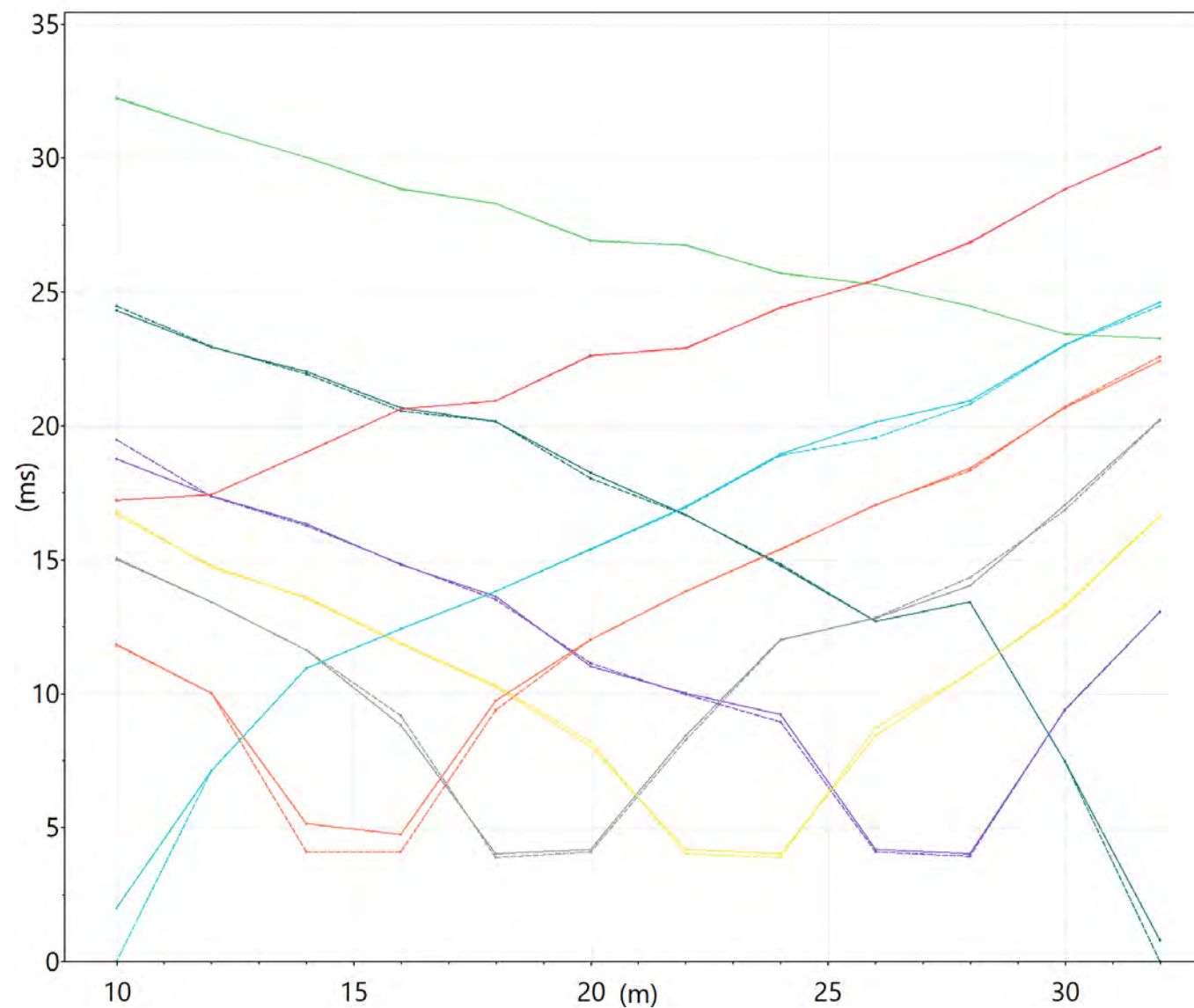
SHOT B



Indagine geofisica : Località Pian Perugino Arcidosso (GR)

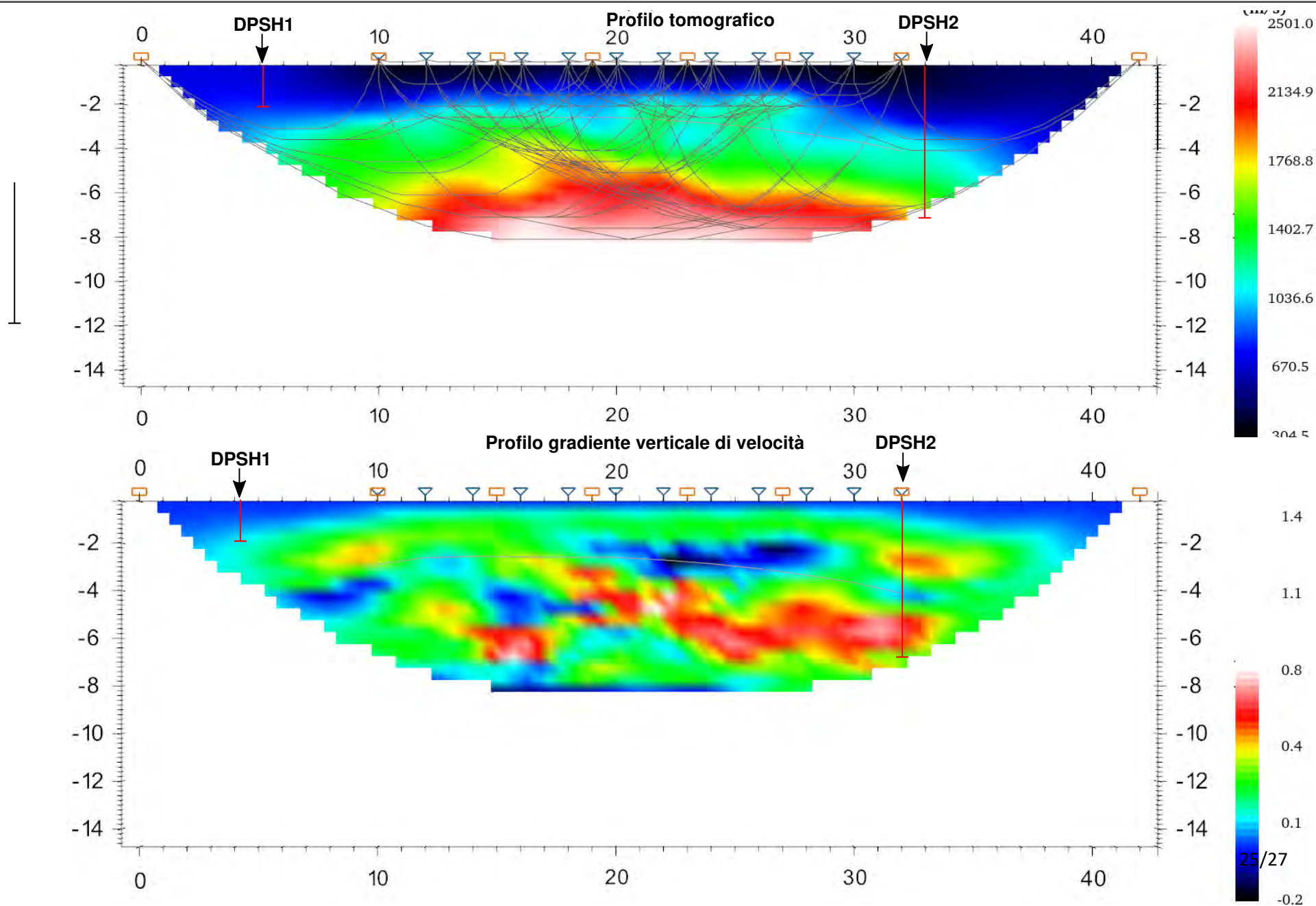
Allegato 6: Dromocrone stendimento 1

Dromocrone misurate (linee continue) e calcolate (linee tratteggiate)



Indagine geofisica : Località Pian Perugino Arcidosso (GR)

Allegato 7: Sezione tomografica stendimento 1



Allegato 2

Parametri sismici di sito

Progetto:	Realizzazione di una sottostazione di scambio termico
Tipo	Stabilità pendii senza opere
Località:	Pian Perugino
Comune:	Arcidosso
Provincia:	Grosseto

Caratteristiche progetto

Classe d'uso:	2
Vita Nominale:	50
Categoria di suolo:	C
Categoria topografica:	T1

Coordinate

ED50	Lat:	42.8603
	Long:	11.5379
WGS84	Lat:	42.859289
	Long	11.536936

Siti di riferimento

	ID	Lat (°)	Long (°)	Distanza (m)
Sito 1	24058	42.8679	11.5117	2302
Sito 2	24059	42.8691	11.5798	3555
Sito 3	24281	42.8191	11.5813	5788
Sito 4	24280	42.8180	11.5132	5117

Parametri sismici

	Tr (anni)	ag(g)	F0	Tc* (s)
SLO	30	0.047	2.481	0.243
SLD	50	0.059	2.518	0.251
SLV	475	0.139	2.494	0.278
SLC	975	0.174	2.522	0.283

Coefficienti sismici

	Ss	Cc	St	Amax(m/s2)
SLO	1.50	1.67	1.00	0.690
SLD	1.50	1.66	1.00	0.862
SLV	1.49	1.60	1.00	2.036
SLC	1.44	1.59	1.00	2.461

	kh	kv	Beta
SLO	0.014	0.007	0.200
SLD	0.018	0.009	0.200
SLV	0.050	0.025	0.240
SLC	0.060	0.030	0.240