

COMUNE DI ARCIDOSO

Provincia di Grosseto

Interventi di riqualificazione e valorizzazione dell'area "La Fratta" sottostante le Mura del Centro Storico "Lavori di consolidamento statico del versante occidentale"

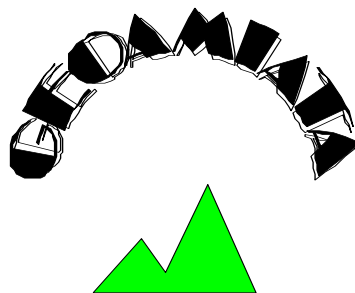
(Determina n° 87 del 17/09/2025)

Progetto Esecutivo



2.RILIEVI SPECIALISTICI E DIAGNOSTICA 2.3 GEOLOGIA/GEOTECNICA/SISMICA

OGGETTO: Relazione sismica di fattibilità di alcuni interventi di riqualificazione nell'area sottostante le mura del Centro storico di Arcidosso		Elaborato: 16
Committente: Comune di Arcidosso (GR)		Scala: A4
Il Sindaco : Dott. Jacopo Marini		Data: Novembre 2025
Responsabile Unico del Procedimento: Ing. Simone Savelli		Aggiornamento:
Ingegneria strutturale: Ing. Giousè Gifuni		Revisione:
Geologia e Geotecnica - Geoamiata : Geol. Alessandro Nenci - Geol.Massimo Fanti		
Rilievi specialistici :	Progettazione e valutazioni economiche:	File :Elab16_GEO.SIS.01.pdf
 Via Siria, 102 58100 Grosseto	 Ing. Arch. Maurizio Di Stefano Via Medina 5 80133 Napoli maurizio.distefano@ordingna.it	



Corso Toscana, 3 - 58031 ARCIDOSO

Tel. 0564/967404- Cell. 393/9478667

a.nenci@geoamiata.it

CF: NNCLSN87E08C085W

P.I.: IT02188730507

**RELAZIONE SISMICA PER IL PROGETTO DI
FATTIBILITÀ TECNICO EDECONOMICA DI
INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO DI UN
AMMASSO ROCCIOSO**

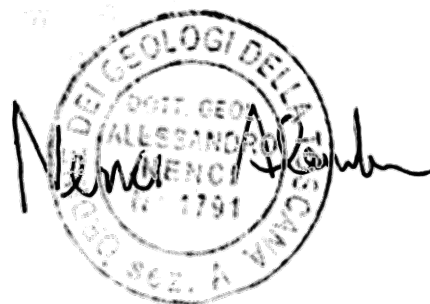
Committente: Amm. Comunale di Arcidosso

Località: Piazza della Riconciliazione

Comune: ARCIDOSO (GR)

Incarico n.: 36/25

Data: OTTOBRE 2025



Sommario

1. PREMESSA.....	2
2. MODELLAZIONE SISMICA.....	5
2.1 INDAGINI REALIZZATE	5
2.2 PARAMETRI SISMICI E CATEGORIA DI SUOLO	5
3. CONCLUSIONI.....	9

FIGURE

PLANIMETRIA CON UBICAZIONE DELLE INDAGINI EFFETTUATE IN SCALA 1:600.

ALLEGATI

RELAZIONE GEOFISICA 2025

RELAZIONE GEOFISICA 2021

PARAMETRI SISMICI DI SITO

RELAZIONE SISMICA

1. PREMESSA

Nel presente lavoro si riferisce su un'indagine sismica effettuata, su richiesta e per conto della Amministrazione comunale di Arcidosso per il progetto di fattibilità tecnico ed economica di interventi di riqualificazione e valorizzazione dell'area compresa tra via Talassese e piazza della Riconciliazione ubicata nell'area sottostante la parte SW delle mura del centro storico del capoluogo del comune di Arcidosso. Quanto in progetto si concretizza nella realizzazione dei seguenti interventi:

1. Intervento 1: Passerella di accesso al camminamento presente intorno alle mura del centro storico di Arcidosso
2. Intervento 2: Muro di controscarpa con la funzione di sostegno degli elementi strapiombanti dell'affioramento roccioso;
3. Intervento 3: Realizzazione di una trincea necessaria all'arresto di alcuni blocchi disaggiati dal fronte roccioso;
4. Intervento 4: Consolidamento strutturale dello sperone di arenaria Pietraforte presente sotto il muro del ristorante *Bastarda Rossa*;

Si specifica che l'intervento 1 e 2 sono rappresentati dalla stessa opera che da progetto si prevede sia un muro di controscarpa che avrà l'obiettivo di sostenere le parti strapiombanti dell'ammasso roccioso e contemporaneamente fungere da passerella di collegamento tra il camminamento che passa intorno alle mura del centro storico e piazza della Riconciliazione. Per quanto riguarda l'intervento 4 si specifica che si prevede di realizzarlo per fasi successive: la prima prevede il disaggio di alcuni blocchi già ormai separati dall'ammasso roccioso principale e la seconda prevede il consolidamento della parte rimanente dell'ammasso roccioso con tecniche tipiche dell'ingegneria di consolidamento degli ammassi rocciosi (chiodi, tiranti e Reti).

Fa parte del progetto anche il consolidamento del muro di sostegno in pietra che delimita il giardino del ristorante “Bastarda Rossa”; questo intervento sarà oggetto di una specifica relazione redatta da un altro professionista, incaricato della relazione geologica a supporto del progetto delle opere di rinforzo del muro stesso. Pertanto, nella presente relazione non vengono fornite indicazioni in merito a tale intervento. Per i dettagli del progetto si rimanda alla prassi progettuale.

L'area all'interno della quale si prevede di intervenire è distinta catastalmente alla particella 301 e 302 foglio 30 del comune di Arcidosso.

Le indagini sui terreni e le relative elaborazioni di carattere geologico e geotecnico vengono condotte sulla base della normativa vigente in materia, facendo riferimento alle norme e prescrizioni di cui **D.M. 17/01/2018** (N.T.C. - 2018).

L'area studiata è ubicata al margine SW del centro storico di Arcidosso dove la morfologia è caratterizzata da uno sperone di Arenaria Pietraforte che digrada con pendenza maggiore di 40° verso il fosso del Giunco che in questo tratto è parzialmente Tombato. L'area si trova ad una quota tra 618 e 640 metri s.l.m., e ricade nella sezione 320210 della carta tecnica regionale della regione Toscana.

I sopralluoghi per l'accertamento delle condizioni a base della presente relazione sono stati compiuti febbraio **settembre e ottobre 2025**. Lo studio, onde consentire la definizione di un quadro geologico e geomorfologico attendibile, è stato esteso alle zone limitrofe.

Planimetria su Ortofotocarta

Fig.1
Scala 1:600



2. MODELLAZIONE SISMICA

2.1 INDAGINI REALIZZATE

Da questi primi elementi descrittivi del sito, tenuto conto dell'importanza dell'opera da realizzare, è maturata la necessità di eseguire una campagna d'indagine sismica articolata come segue al fine di determinare un quadro completo dell'assetto geotecnico locale e contestualmente ottemperare alle normative vigenti in materia di realizzazione di nuove strutture. La campagna ha previsto le seguenti indagini sismiche:

- Esecuzione di uno stendimento di sismica a rifrazione in onde P;
- Esecuzione di una indagine MASW.

Nel 2021, in corrispondenza dell'area in esame, è stata eseguita un'ulteriore campagna di indagini geognostiche finalizzata alla progettazione di alcuni interventi di riqualificazione di piazza della Riconciliazione.

Da un punto di vista sismico, furono realizzate un'indagine sismica a rifrazione e una prova MASW in corrispondenza del piazzale situato a valle dell'affioramento roccioso.

Le risultanze di tali indagini hanno consentito di determinare la categoria di suolo, ritenuta rappresentativa dell'area di realizzazione degli interventi 1 e 2.

Per quanto riguarda, invece, le opere previste direttamente sull'affioramento roccioso (intervento n. 4), si precisa che è stata eseguita una prova MASW lungo lo stesso stendimento utilizzato per l'indagine sismica a rifrazione (vedi planimetria in fig.1).

2.2 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

F₀ 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, **classe dell'edificio II, V_R ≥ 50 anni**. Inoltre, deve essere individuata la **categoria di sottosuolo** di riferimento tra quelle descritte nelle tabelle 3.2.II e 3.2.III della normativa citata.

In questa relazione vengono individuate due diverse tipologie di sottosuolo, distinte in funzione dell'intervento di riferimento.

1. Interventi 1 e 2: si fa riferimento alla prova MASW eseguita nel 2021;
2. Intervento 4: si fa riferimento alla prova MASW eseguita nel 2025, condotta trasversalmente all'affioramento roccioso.

Dalla prova MASW del 2021 risulta la presenza di una coltre superficiale dello spessore di circa 12–13 m, caratterizzata da $V_s \approx 250$ m/s, poggianti su un substrato con $V_s > 800$ m/s. Al di sotto di tale livello, la velocità delle onde di taglio mostra un'anomala diminuzione a $V_s = 400\text{--}500$ m/s, verosimilmente attribuibile a un artefatto d'inversione e non a una reale variazione sismostratigrafica.

Il confronto tra il profilo MASW 2021 e la stratigrafia del sondaggio S1_2021 suggerisce che:

1. il primo strato rappresenti il riporto antropico,
2. il secondo strato corrisponda all'arenaria di Pietraforte intercettata nel sondaggio.

Il valore del parametro V_{seq} calcolato sulla base dei primi 30 m dal piano campagna risulta compreso tra 250 e 270 m/s, con un substrato avente $V_s > 800$ m/s. In base a tali valori, e secondo quanto previsto dalla normativa sismica vigente (NTC 2018), **il sottosuolo relativo all'area degli interventi 1 e 2 è classificabile come categoria di suolo E** (vedi Tabella 1). Per ulteriori dettagli sull'esecuzione e l'elaborazione dell'indagine, si rimanda alla relazione geofisica del 2021 allegata.

Per l'intervento 4 si fa riferimento alla MASW realizzata nel 2025, eseguita trasversalmente all'affioramento roccioso. La prova evidenzia la presenza di coltri superficiali spesse fino a circa 7 m, poggianti su un substrato tenero con $V_s < 800$ m/s. **Il valore del parametro V_{seq} , calcolato a partire dal piano campagna, risulta pari a circa 400 m/s, corrispondente alla categoria di suolo B (Tabella1).** Si rimanda alla relazione geofisica 2025 per i dettagli tecnici dell'indagine.

Il risultato della MASW 2025 deve essere interpretato come media delle differenti condizioni sismiche presenti lungo lo stendimento, in quanto una parte dei geofoni è stata infissa nel riporto superficiale, mentre un'altra parte è stata posizionata direttamente sul substrato roccioso.

Questa configurazione non rappresenta la condizione ottimale per la stima del parametro V_{seq} , tuttavia, risulta comunque rappresentativa per la finalità del progetto. Poiché gli interventi di consolidamento previsti (quali chiodi o tiranti) saranno verosimilmente ancorati direttamente nel substrato roccioso, risulta corretto — e cautelativo — attribuire all'intervento 4 la categoria di suolo B, considerato che non sono presenti coltri significative in corrispondenza dell'area di intervento. Viceversa, qualora in fase esecutiva gli elementi strutturali di consolidamento dovessero appoggiarsi su riporti e non direttamente sul substrato roccioso, dovrà essere assunta la categoria di suolo E, coerente con le condizioni geotecniche più superficiali.

Categoria	Descrizione sottosuolo
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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	Rocce tenere e depositi di terreno a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti 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 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	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di 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	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti 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)

Tabella 1: Categoria stratigrafica, in giallo quella dell'intervento 1 e 2 e in blu quella dell'interventi 4

Infine, deve essere presa in considerazione la situazione topografica locale. Per condizioni superficiali semplici può essere adottata la Tabella 3.2.IV che viene riportata di seguito (Tabella 2). L'area degli interventi 1 e 2 si trova sul piazzale e dunque da un punto di vista morfologico può essere considerata pianeggiante mentre l'area dell'interventi 4 si trova invece sul versante con pendenza sicuramente superiore di 15° .

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 $i > 30^\circ$

Tabella 2: Categorie topografica, in giallo quella dell'intervento 1 e 2 e in blu quella dell'intervento 4

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

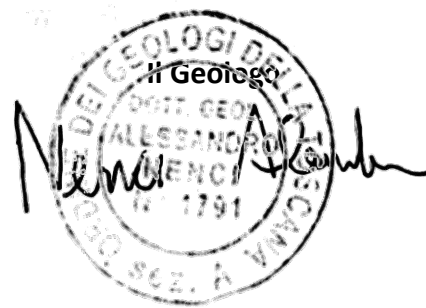
3. CONCLUSIONI

Nella presente indagine è stato analizzato l'assetto geotecnico di un'area in cui sono previsti interventi di consolidamento, già interessata in passato da un importante intervento di riqualificazione. L'area d'indagine è ubicata nella porzione Nord di piazza della Riconciliazione proprio a valle dell'affioramento roccioso di Arenaria Pietraforte su cui è edificato il centro storico di Arcidosso. In particolare, dalle analisi effettuate è stato possibile concludere che:

- da un'indagine sismica MASW in onde di Rayleigh è stato desunto il parametro V_{seq} che:
 - per l'area di realizzazione dell'intervento 1 e 2 è compreso tra 250 m/s e 270 m/s ed è presente un substrato sismico alla profondità di circa 12-13 m e dunque si assegna la categoria di sottosuolo (E) e topografica(T1)
 - per l'area di realizzazione dell'intervento 4 è di 400 m/s e non è presente un substrato sismico entro i 30 m di profondità e dunque si assegna la categoria di sottosuolo (B) e topografica(T2)
- Dunque, 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 e topografiche** del sito, dalle quali sono stati determinati i relativi parametri e coefficienti sismici, riportati in allegato.

ARCIDOSSO, ottobre 2025

Il Geologo



Elenco allegati

Relazione geofisica 2025

Relazione geofisica 2021

Parametri sismici di sito

ALLEGATO 1



COMUNE DI ARCIDOSO



REPORT SULLE INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE A SUPPORTO DEGLI INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE VALORIZZAZIONE DELL'AREA LA FRATTA SOTTOSTANTE LE MURA CENTRO STORICO - LAVORI DI CONSOLIDAMENTO STATICO DEL VERSANTE

COMMITTENTE: AMM.NE COMUNALE DI ARCIDOSO

CONSULENTE GEOLOGO: DOTT. GEOL. MASSIMO FANTI

REPORT INDAGINI GEOFISICHE

NOME FILE: 7215_Report indagini geofisiche.doc

Prat. 7215

ELABORATO:

01

AGG.:	DATA:	DESCRIZIONE:	AGG.:	DATA:	DESCRIZIONE:
00	17/10/2025				

INDICE

1. PREMESSA	2
2. INDAGINI GEOFISICHE.....	3
2.1. INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE ONDE P ELABORATO CON TECNICA TOMOGRAFICA.....	3
2.1.1. RISULTATI INDAGINE SISMICA TOMOGRAFICA IN ONDE P.....	4
2.1.2. INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE R ELABORATA CON TECNICA MASW	4
2.1.3. RISULTATI INDAGINE SISMICA MASW.....	8
3. CONCLUSIONI	9

ALLEGATO 1 - INDAGINE SISMICA



1. PREMESSA

Su incarico e per conto del Comune di Arcidosso, è stata eseguita una campagna di indagine geofisica a supporto degli “Interventi di riqualificazione e valorizzazione dell'area La Fratta sottostante le mura centro del storico - lavori di consolidamento statico del versante occidentale”.

È stata eseguita un profilo sismico a rifrazione in onde P elaborato con tecnica tomografica e restituzione 2D. Lungo lo stesso stendimento è stata effettuata anche una prova MASW necessaria a definire, mediante il valore delle VSeq, la categoria sismica del sottosuolo.

Il profilo sismico è stato eseguito sulle mura occidentali del centro storico, i geofoni sono stati disposti partendo dal terrazzo del ristorante la Bastarda Rossa, da qui lungo la parete verticale delle mura per poi svilupparsi, nel tratto terminale, lungo il prato antistante il parcheggio.



Figura 1 - Immagine aerea della zona in esame

Per una migliore rappresentazione geometrica e spaziale dell'area è stato eseguito un rilievo laser scanner dal quale è stato possibile generare un modello tridimensionale dettagliato. Questo modello ha permesso di riprodurre, con estrema precisione, la planimetria e la sezione del profilo sismico eseguito.

Mediante l'interpretazione e l'analisi delle risultanze delle indagini eseguite è stato ricostruito il modello geofisico del sottosuolo oggetto d'intervento.

2. INDAGINI GEOFISICHE

Per la determinazione delle caratteristiche sismiche delle formazioni geologiche presenti nell'area, è stato deciso di eseguire un'indagine sismica che hanno permesso di fornire un adeguato supporto conoscitivo per ciò che concerne la valutazione della stabilità presente in sito.

Le presenti indagini sono state eseguite, come si evince dalla Carta Geologica del database della Regione Toscana, sul contesto geologico rappresentato dalla formazione della Pietraforte.

La formazione rocciosa, nell'area di indagine, in parte risulta ricoperta da terreni di riempimento antropico e da depositi superficiali.

Le indagini sismiche in situ hanno lo scopo di analizzare i seguenti fattori:

- successione e disposizione dei terreni nel sottosuolo;
- rappresentazione del sottosuolo con un modello di distribuzione della velocità delle onde di compressione "P".

2.1. INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE ONDE P ELABORATO CON TECNICA TOMOGRAFICA

Lo scopo della prova consiste nel determinare il profilo di rigidità del sito attraverso la misura della velocità di propagazione delle onde di compressione (V_p), secondo fasi d'acquisizione differenti e determinare le geometrie sepolte (spessori e superfici di contatto) dei sismo-strati individuati.

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, lungo il profilo da indagare, delle sollecitazioni dinamiche verticali per la generazione delle onde P, a distanze note e prefissate mediante sensori a componente verticale (geofoni).

Le indagini sono state condotte con strumentazione apposita per rilievi sismici e possono essere riassunte con le seguenti caratteristiche tecniche:

- sismografo *Geometrics Geode* 24 canali 24 bit;
- numero geofoni attivi: 24;
- spaziatura dei geofoni: 2.5 metri;
- frequenza geofoni: 4.5 Hz;
- spaziatura dei tiri: 10 metri;
- sorgente: massa battente da 6.0 kg.
- Numero di energizzazioni 7 (5 interne e 2 esterne)

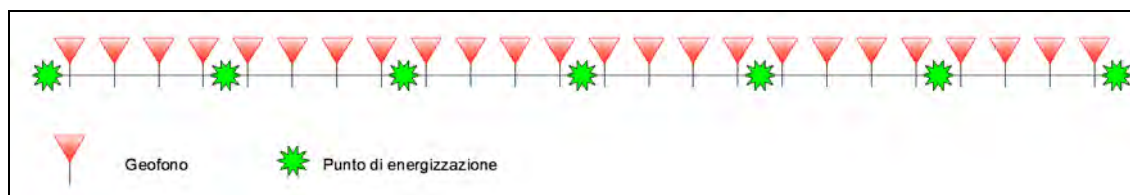


Figura 2 - Rappresentazione schematica di array sismico a rifrazione

Dai sismogrammi registrati con il rilievo sismico eseguito con le caratteristiche sopra citate si ricavano i tempi di “primo arrivo” dell’onda sismica.

I tempi sismici delle onde P sono stati elaborati con metodologia tomografica che prevede la suddivisione dello spazio bidimensionale in celle quadrate o rettangolari secondo una maglia prefissata, con l’attribuzione ad ognuna di un determinato valore di velocità sismica.

Nell’elaborazione il programma di calcolo determina il tempo di transito ipotizzando dei valori di velocità sismica per ogni cella, tale processo cessa quando si raggiunge la minore discordanza tra i tempi calcolati e i tempi sismici sperimentali misurati sui sismogrammi.

Il modello sismico derivato da tale processo, detto inverso, permette di ottenere una sezione in due dimensioni che ci consente di poter effettuare un’interpretazione per definire un assetto stratigrafico in base alla velocità sismica e al gradiente di velocità.

2.1.1. RISULTATI INDAGINE SISMICA TOMOGRAFICA IN ONDE P

L’indagine sismica tomografica in onde P ha permesso di ricostruire il gradiente di velocità delle onde di compressione delle formazioni geologiche presenti lungo l’allineamento dei geofoni.

Lungo i profili sono stati riconosciuti n. 3 sismo-strati distinti nel modo seguente:

- 1° sismo-strato = $400 < V_p \text{ (m/s)} < 800$ con V_p medio = 600 m/s corrispondente al terreno superficiale probabilmente di riporto e/o alle aree più allentate del versante con spessore massimo di circa 6 m;
- 2° sismo-strato = $800 < V_p \text{ (m/s)} < 1200$ con V_p medio = 1000 m/s probabilmente corrispondente, da un punto di vista litologico, alla porzione fratturata e disgregata dell’ammasso roccioso.
- 3° sismo-strato = $V_p > 1200 \text{ (m/s)}$ corrispondente da un punto di vista litologico al substrato roccioso della Formazione della Pietraforte.

2.1.2. INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE R ELABORATA CON TECNICA MASW

Il metodo d’indagine attivo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) è basato sullo studio spettrale delle onde superficiali presenti in un sismogramma realizzato per mezzo di un’energizzazione sismica artificiale (Nazarian e Stokoe, 1984; Park et al., 1999).

Lo scopo della prova MASW è quello di ricostruire il profilo di rigidezza del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di Rayleigh con un successivo processo d'inversione, attraverso il quale è fornita una stima indiretta della distribuzione delle onde V_s (velocità di propagazione delle onde di taglio).

La prova consiste nel produrre in un punto sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione dinamica verticale e nel registrare tramite uno stendimento lineare di sensori le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

L'indagine è stata condotta con strumentazione apposita per rilievi sismici e può essere riassunta con le seguenti caratteristiche tecniche:

- sismografo *Geometrics Geode* 24 canali 24 bit;
- numero geofoni attivi: 24;
- spaziatura dei geofoni: m 2.5;
- lunghezza stesa sismica: m 60;
- frequenza geofoni: 4.5 Hz;
- sorgente: massa battente da 6.0 kg.



Figura 3 - Rappresentazione schematica di array per acquisizione di MASW su stesa PS4

La metodologia MASW consente di eseguire un'analisi dei dati sismici in modo tale da poter ricavare il profilo verticale della velocità delle onde S e di definire il parametro V_{Seq} , utile per la classificazione dei terreni nelle categorie di suolo con metodo semplificato da utilizzare per la descrizione dell'azione sismica in sito.

Il profilo verticale delle velocità sismiche delle onde S è ottenuto tramite l'inversione (considerando tanto il modo fondamentale che quelli superiori) delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh. Ottenuto il sismogramma si determina lo spettro di velocità sul quale si identifica la curva di dispersione.

Il profilo verticale di V_s si ottiene con l'inversione della curva di dispersione precedentemente "piccata". Tale inversione è eseguita tramite l'utilizzo di algoritmi genetici che consentono di ottenere soluzioni affidabili ed una stima dell'attendibilità del modello ricavato in termini di deviazione standard.

L'operazione d'inversione è ottimizzata definendo uno spazio di ricerca i cui confini sono definiti da valori di Vs e spessori all'interno dei quali si cerca la soluzione. Tali assunzioni sono fatte sulla base delle conoscenze geologiche del sito e delle informazioni derivate dalla sismica a rifrazione.

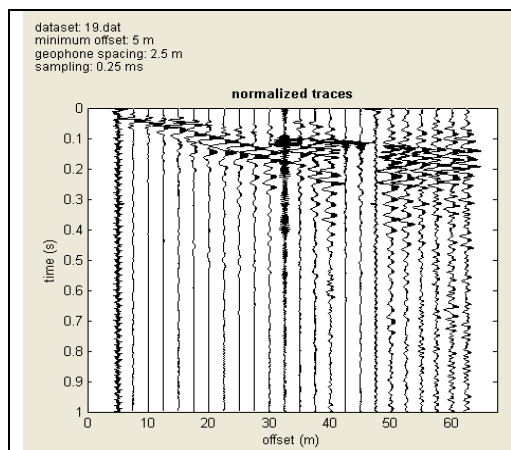


Figura 4 - sismogramma

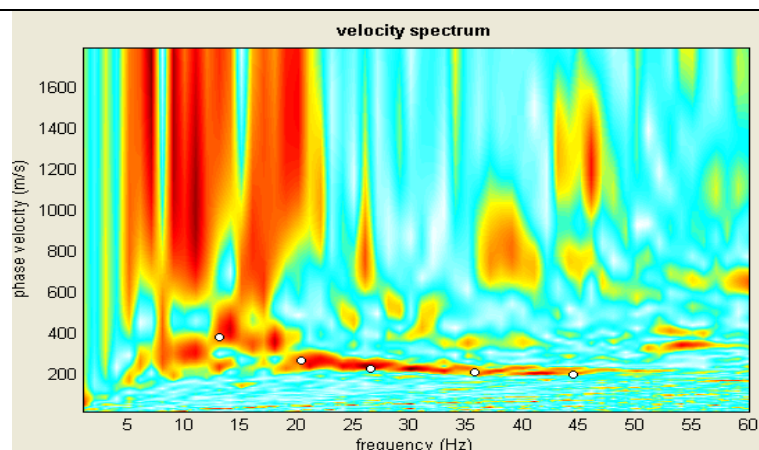


Figura 5 - Spettro di velocità e picking

Una volta fissati i limiti minimi e massimi dello spazio di ricerca, sono quindi impostati i parametri genetici che definiscono sia il numero di individui (ossia il numero di modelli che costituiscono la popolazione che si evolverà verso soluzioni sempre migliori), sia il numero di generazioni al passare delle quali sono esplorati modelli sempre migliori.

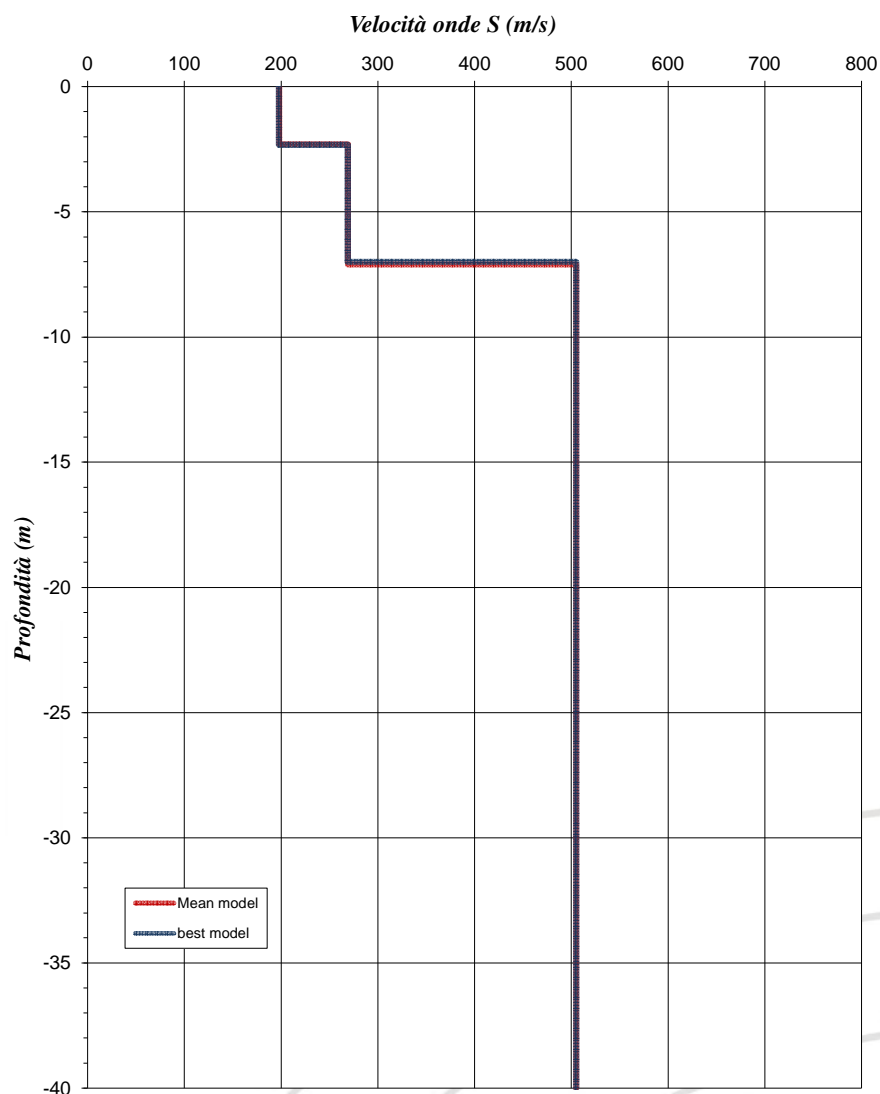


Figura 6 - Modello interpretativo ottenuto dalla prova MASW effettuata in situ

2.1.3. RISULTATI INDAGINE SISMICA MASW

L'interpretazione delle prove MASW, relativa alle onde S, ha reso evidente le seguenti successioni:

PROVA MASW					
Best model			Mean model		
Profondità da P.C (m)		Velocità Onde S (m/s)	Profondità da P.C (m)		Velocità Onde S (m/s)
0	2.3	198	0	2.3	198
2.3	6.9	269	2.3	7.1	269
6.9	40	505	7.1	40	505
V_{seq} = 402 m/s			V_{seq} = 401 m/s		

Tabella 1 - Modello sismostratigrafico elaborazione MASW

La prova MASW realizzata evidenzia che l'area in esame può essere collocata, secondo la normativa italiana, in **classe B**.



3. CONCLUSIONI

Su incarico e per conto del Comune di Arcidosso, è stata eseguita una campagna di indagine geofisica a supporto degli "Interventi di riqualificazione e valorizzazione dell'area La Fratta sottostante le mura centro del storico - lavori di consolidamento statico del versante occidentale".

L'area in esame è impostata sulla formazione litoide della Pietraforte (PTF).

Per la ricostruzione delle geometrie del sottosuolo è stata eseguita un'indagine geofisica caratterizzata da n. 1 profilo sismico a rifrazione in onde P.

Osservando il profilo tomografico sismico, eseguito in parete verticale sulle mura del paese di Arcidosso, possiamo osservare che nella parte più superficiale, sia a valle sia a monte della parete, sono presenti delle aree caratterizzate da basse velocità e larga interdistanza tra le isolinee di velocità che sono riconducibili a zone allentate (probabile terreno di riporto).

Dalla prova MASW risulta una categoria di sottosuolo B.

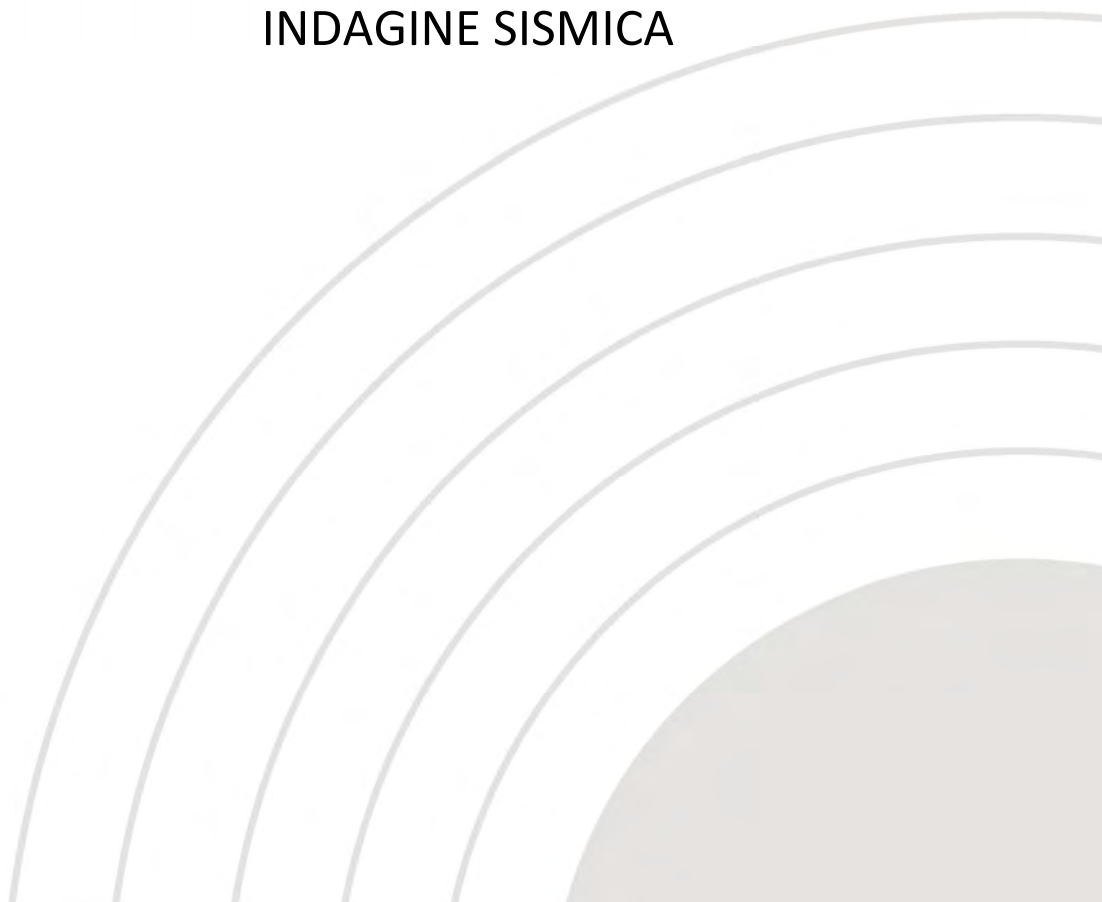
Grosseto 17/10/2025

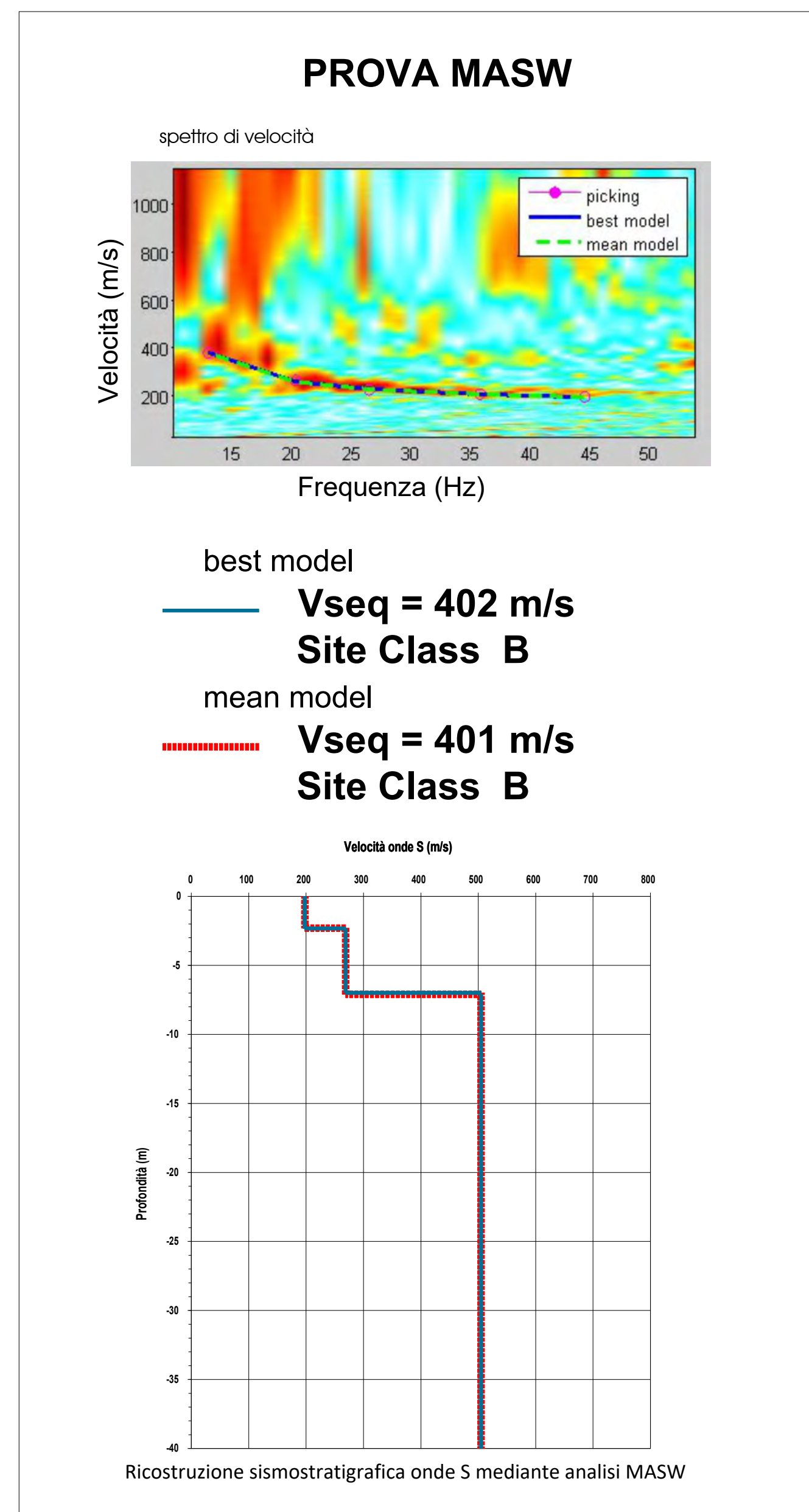
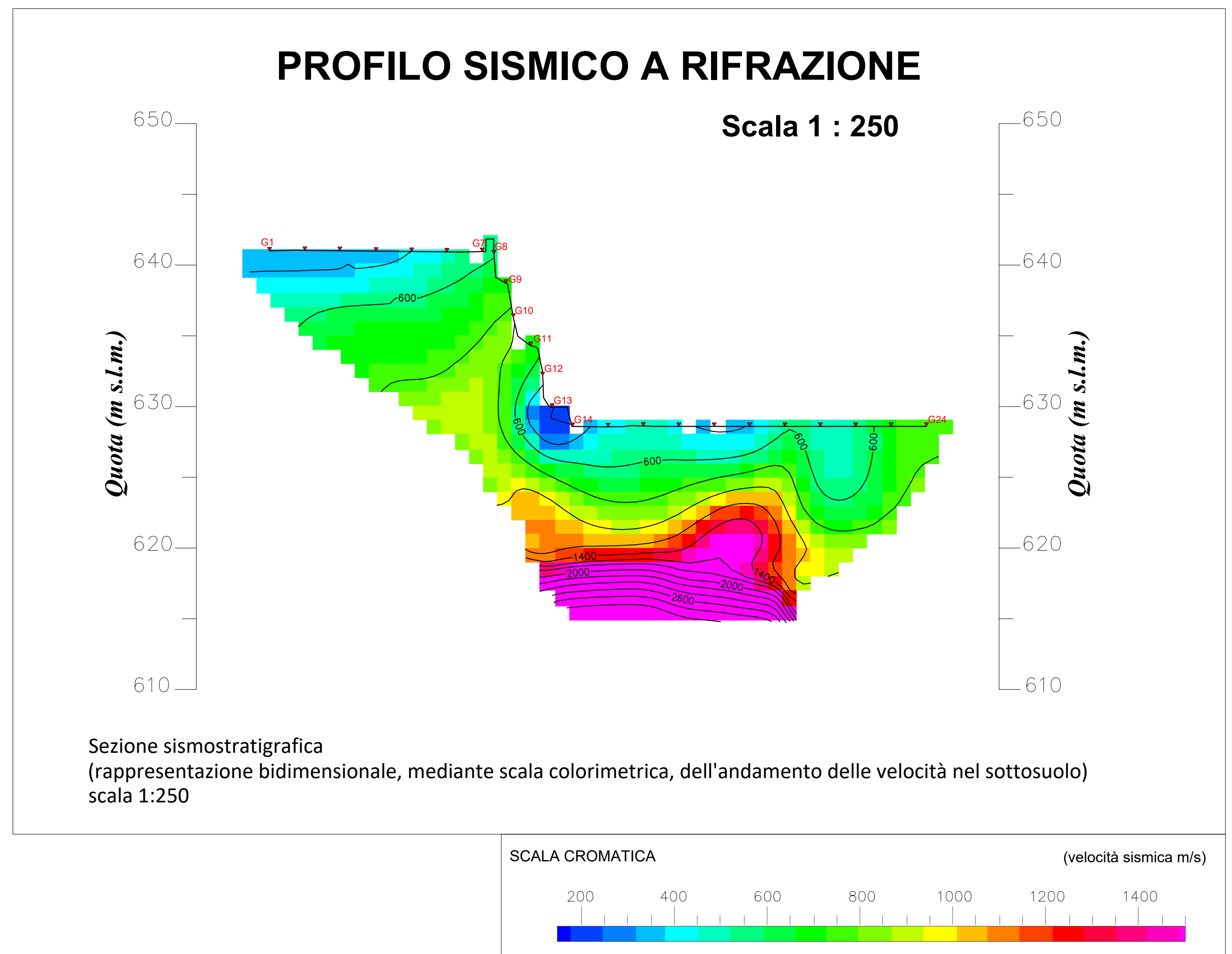
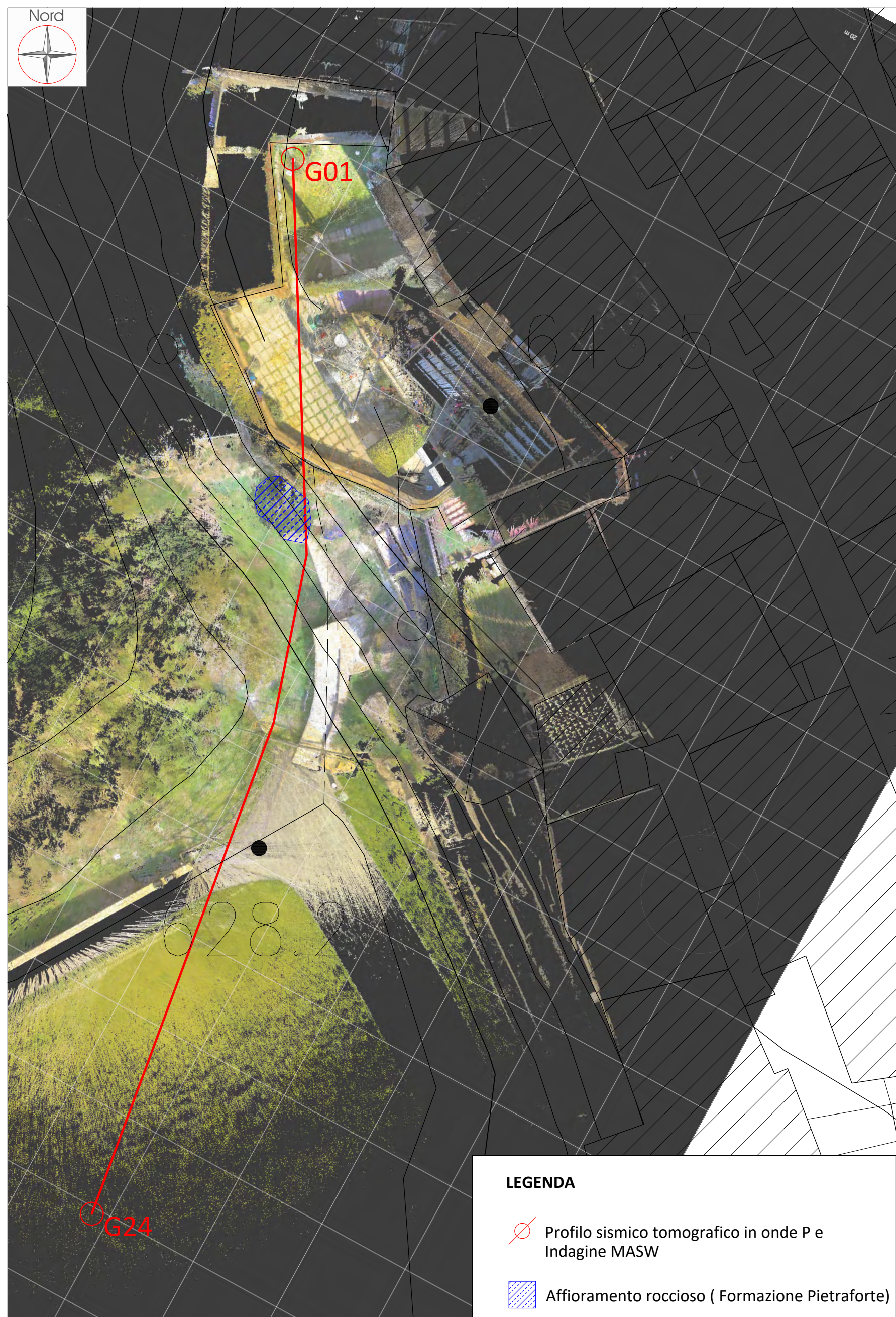
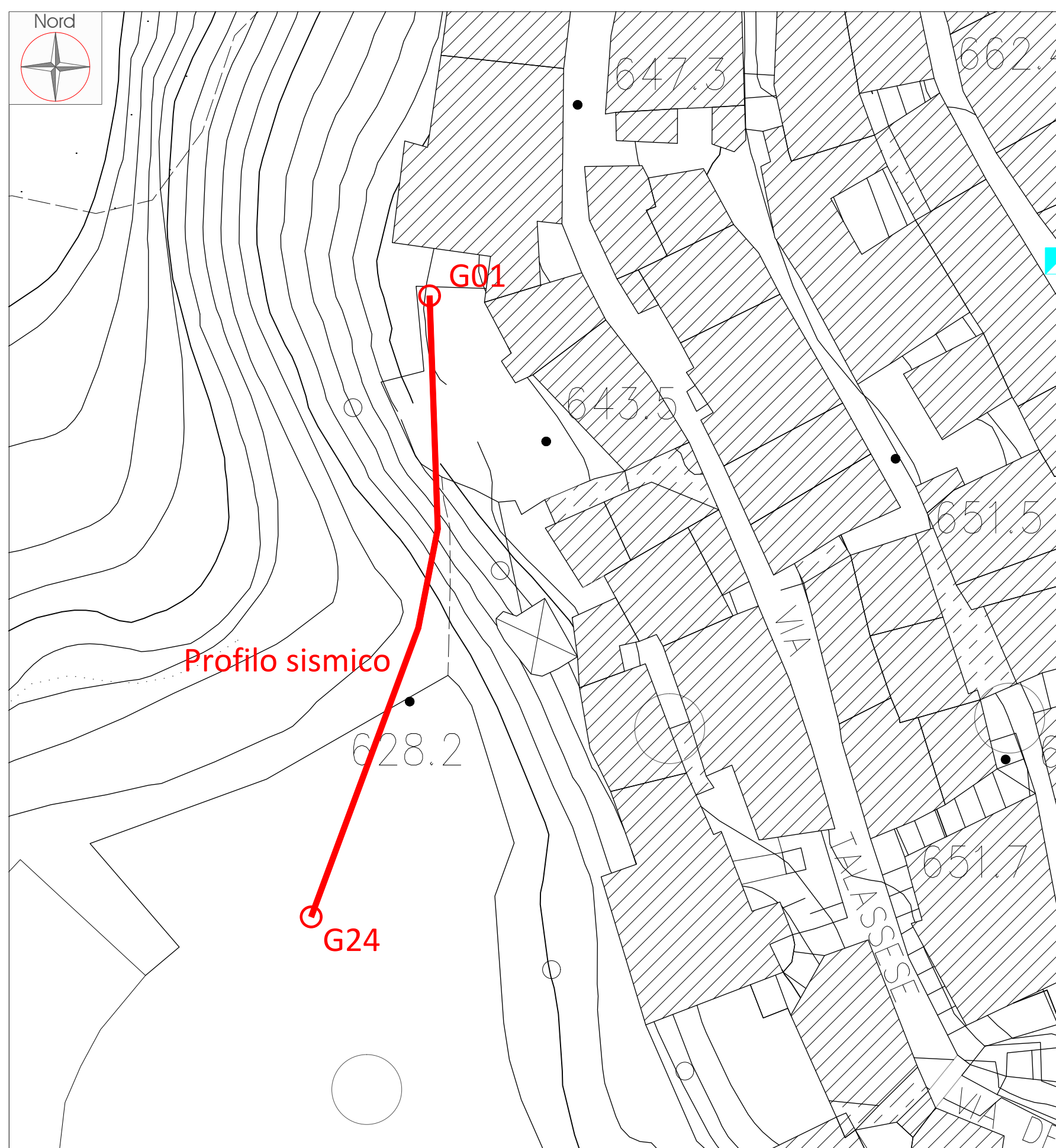
Dott. Geol. Massimo Fanti



ALLEGATO 1

INDAGINE SISMICA





ALLEGATO 2

RELAZIONE GEOFISICA

1 PREMESSA

La presente indagine geofisica è stata eseguita, nei pressi di Via della Fratta nel piazzale posto sotto al centro storico del capoluogo del comune di Arcidosso (GR). La latitudine e longitudine del centro dell'area di indagine sono rispettivamente 42.871255 e 11.534625 (WGS84-EPGS 4326). In questa area è stata effettuata un'indagine sismica in tecnica MA-SW con acquisizione di onde di Rayleigh al fine di dedurre il parametro V_{Seq} utile nella definizione delle azioni sismiche attese in quest'area e una sismica a rifrazione in onde P per la ricostruzione dell'andamento degli strati superficiali.



Fig. 1: Inquadramento generale dell'area

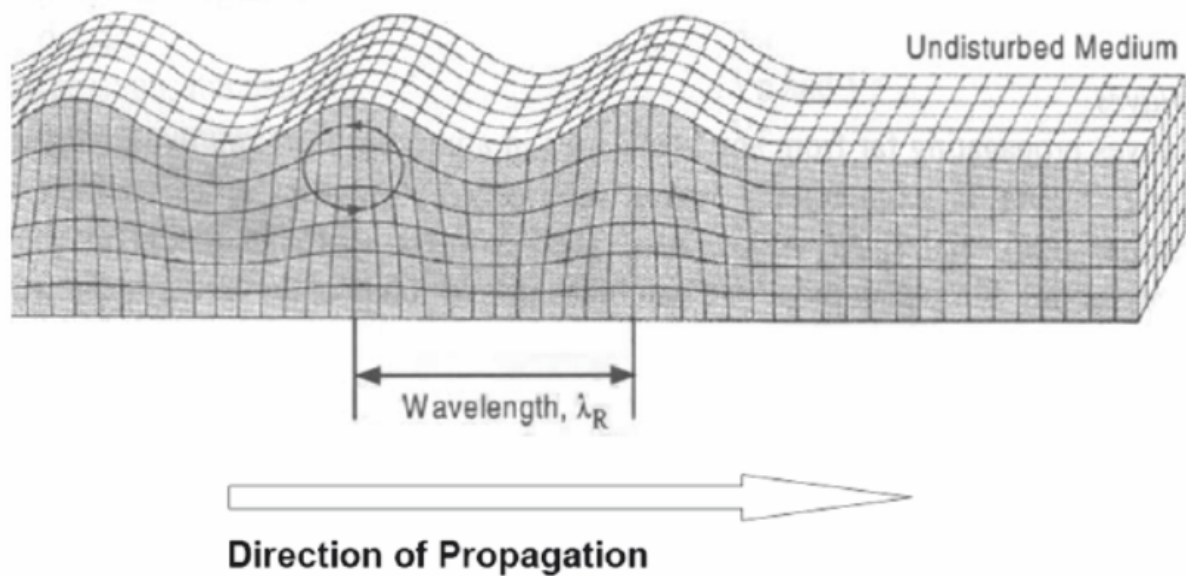


Fig. 2: Onda di Rayleigh

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. 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

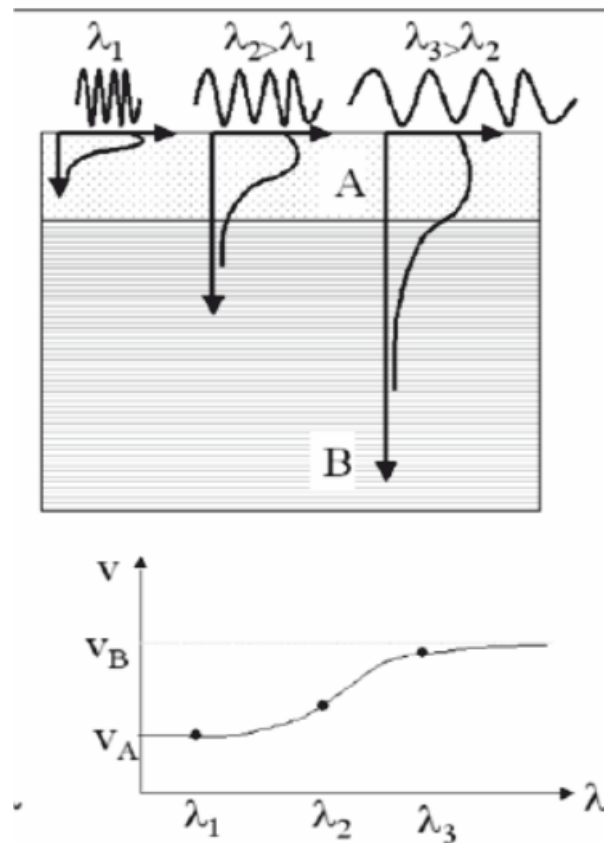


Fig. 3: Rapporto fra lunghezza d'onda e profondità investigata

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} .

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

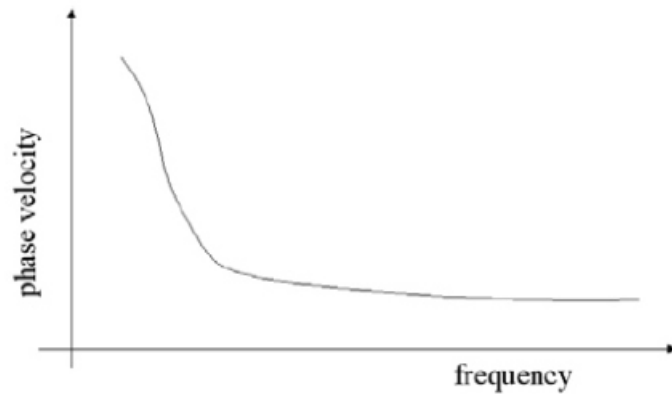


Fig. 4: esempio di curva di dispersione

(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 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.

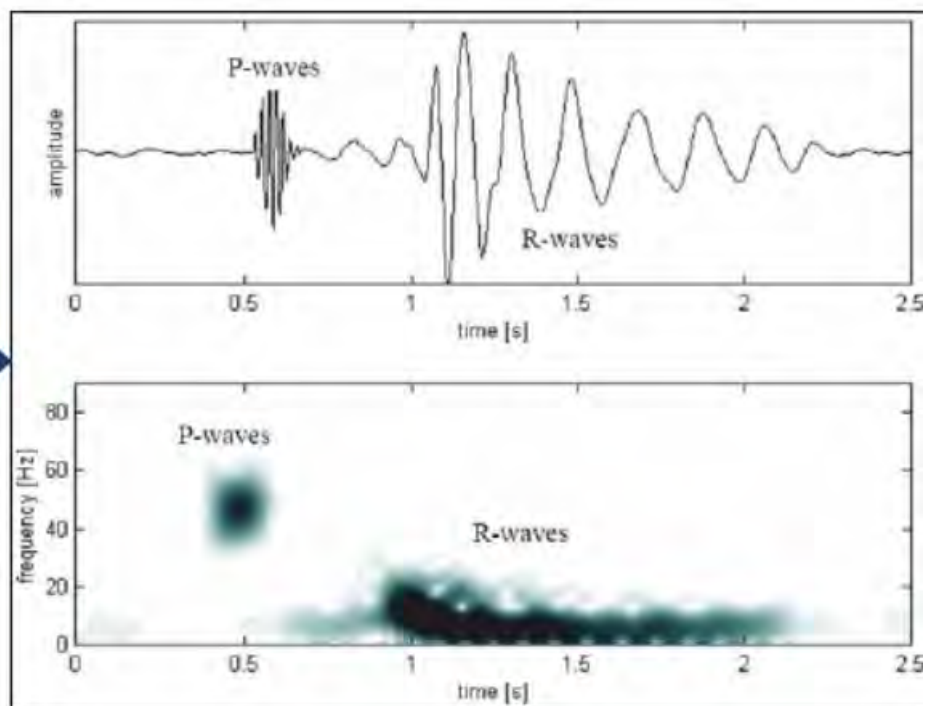


Fig. 5: schema di un sismogramma con relativo spettro f-k

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 in onde P

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.

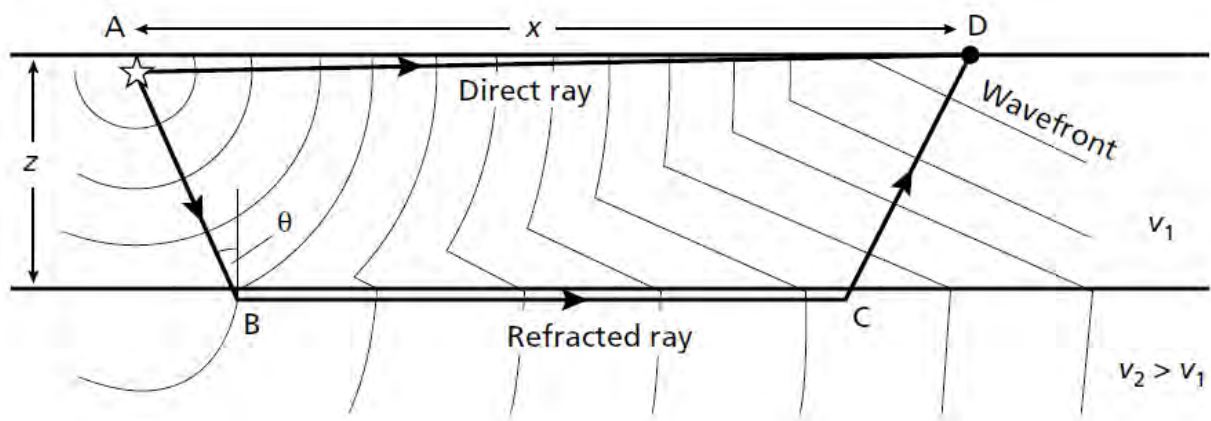


Fig. 6: schema della propagazione di un'onda diretta e di un'onda rifratta

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 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 regolare; questa 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 esaustivamente le metodologie utilizzate per l'acquisizione, il processing e l'inversione dei sismogrammi.

4.1 Acquisizione MASW

Nell'area di indagine sono state eseguite una prova sismica in tecnica MASW il giorno 30/06/2021 disponendo 12 geofoni verticali con un interasse di 2 m. Per le onde di Rayley-



Fig. 7: documentazione fotografica

gh sono state eseguite due energizzazioni su ogni lato e si è poi selezionato la migliore; le energizzazioni selezionate sono state eseguite ad una distanza di 6 m dai geofoni esterni.

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

L'acquisizione dello stendimento di sismica a rifrazione è stata eseguita il giorno 30/06/2021 seguendo uno stendimento con direzione NE - SW di lunghezza 70 m con 11 punti di scoppio e un interasse geofonico di 2 m.

In fase di pianificazione si è deciso di utilizzare la tecnica della traslazione dello stendimento la quale prevede di:

1. Disporre tutti i geofoni sulla prima metà dello stendimento ;
2. Energizzare in tutti i punti sorgente previsti in fase di pianificazione della misura;

3. Traslare la catena geofonica in maniera tale che il canale 1 coincida con il canale 12;
4. Energizzare nuovamente in tutti i punti sorgente.

Con questo metodo è possibile eseguire stendimenti lunghi nonostante il numero limitato di canali. La durata della singola registrazione è stata di 0.25 s e la frequenza di campionamento di 5000 Hz; al fine di definire in maniera precisa il primo arrivo su ogni traccia si è eseguito lo stacking (somma) di più energizzazioni su ogni punto sorgente. Le molteplici tracce registrate sono state poi arrangiate in maniera tale da ottenere un numero di sismogrammi, corrispondenti al numero di punti sorgente, ognuno di 23 canali. Nell'allegato 1 è possibile trovare l'ubicazione e la geometria dettagliata degli stendimenti utilizzati. La scelta della lunghezza degli stendimenti è stata fatta ottimizzando il rapporto tra risoluzione e profondità di indagine.

5.2 Processing ed inversione della sismica a rifrazione

L'elaborazione della sismica a rifrazione 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 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

6 MODELLAZIONE SISMICA E CATEGORIA DI SUOLO

I risultati dell'indagine MASW sono riassunti negli allegati in calce alla presente relazione. Gli allegati sono organizzati così:

- **allegato 1:** ubicazione dettagliata su ortofotopiano e geometria dello stendimento;
- **allegato 2:** picking curva di dispersione e confronto tra curva invertita e misurata;
- **allegato 3:** profilo di Vs derivante dallo shot A e dallo shot B;
- **allegato 4:** analisi dello spazio dei parametri;
- **allegato 5:** dromocrone;
- **allegato 6:** Sezione tomografica;
- **allegato 7:** interpretazione stratigrafica.

La MASW è stata effettuata lungo uno stendimento di 22 m con direzione N148, i geofoni sono stati appoggiati in un terreno con copertura ghiaiosa attraverso un supporto in PVC. Tra i vari shot effettuati sono stati scelti quelli eseguiti ad un offset di 14 dai geofoni esterni. Le curve di dispersione e l'inversione dei dati sono sintetizzati nell'allegato 2 mentre i profili di velocità risultanti sono nell'allegato 3 ed in tabella 1.

MASW	MASW Shot A		MASW Shot B	
	Spessore (m)	Vs (m/s)	Spessore (m)	Vs (m/s)
Livello 1	13,16	266	11,56	249
Livello 2	0,81	552	7,84	1994
Livello 3	2,75	1994	2,91	1700
Livello 4	13,28	520	7,69	360
	VsEq:	274	VsEq:	249

Tab. 1: Risultati indagine sismica MASW

Entrambe le curve di dispersione hanno mostrato solo modo di vibrazione fondamentale. Dalla ricostruzione dello spazio parametri (allegato 4) si vede che lo spessore e la velocità del livello 1 convergono nettamente verso valori definiti di Vs e profondità; il livello 2 e livello 3 convergono nettamente verso valori di profondità ben definiti mentre la Vs non converge verso un valore preciso.

La sismica a rifrazione in onde P è stata eseguita con uno stendimento geofonico lungo 70 m con undici punti sorgente di cui sette interni, due estremi e due esterni ad offset rispettivamente di 12 e 14 m dai geofoni esterni (vedi geometria nell'allegato 1). La massima profondità investigata è di circa 14-16 m. La sezione interpretativa ha evidenziato tre sismostrati (allegato 6-7):

1. sismostrato 1 : **Vp di 600- 800 m/s** e spessore di 1.0-1,50 m che rappresenta probabilmente il riporto antropico compattato dal passaggio di mezzi pesanti e la posa di stabilizzato;
2. sismostrato 1 : **Vp di 300 - 400 m/s** e spessore variabile tra 4 e 8,5 m in aumento verso la parte NE dello stendimento;
3. sismostrato 2 : **Vp di 2200 m/s** substrato dell'area d'indagine.

L'interpretazione è stata eseguita tarando lo stendimento tomografico con le prove geognostiche eseguite.

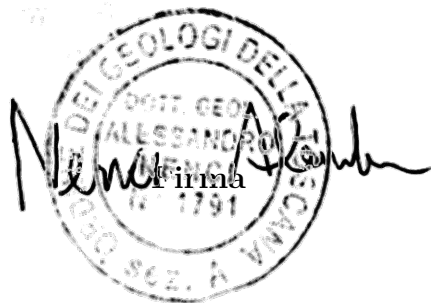
Il D.M. 17.01.2018 propone una classificazione del sottosuolo basata sul parametro V_{sEQ} , definito dall'espressione:

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

h_i e V_i sono lo spessore e la velocità dell' i-esimo strato, N è il numero di strati e H è la profondità del substrato definito come terreno molto rigido o roccia con V_s superiore agli 800 m/s. Nel caso in cui le coperture superino lo spessore di 30 m allora H deve essere posto uguale a 30.

La V_{sEQ} dell'area di studio calcolata con la MASW è di **274 m/s** per il profilo derivante dallo shot A e di **249 m/s** per quello derivante dallo shot B; in entrambi i profili è stato individuato un substrato sismico (substrato con V_s di circa 1500-2000 m/s). Si assegna al sito **la categoria di sottosuolo E**. Questa categoria di suolo è stata calcolata a partire da piano campagna se dovessero essere eseguiti scavi andrebbe ricalcolata alla profondità di fondazione dell'opera.

Arcidosso, 13 Luglio 2021

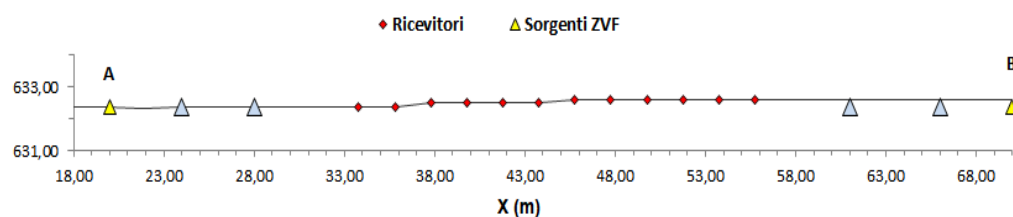

Firma

Indagine geofisica : Via della Fratta Arcidosso (GR)

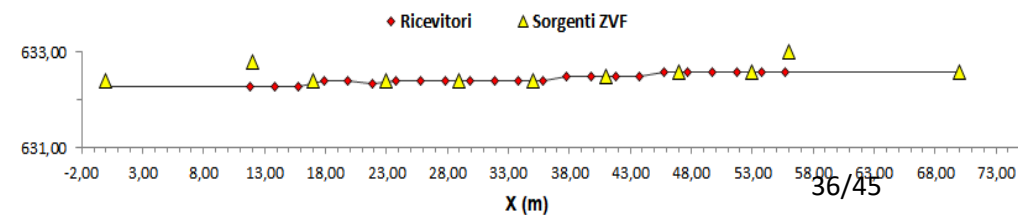
Allegato 1: ubicazione su ortofotopiano e geometria dettagliata dello stendimento;



Geometria di acquisizione MASW

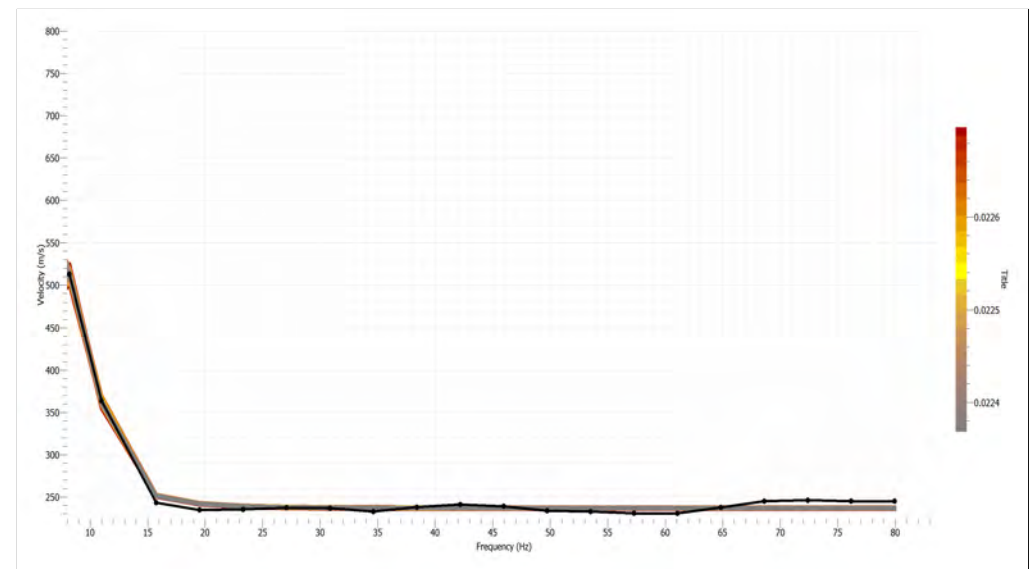
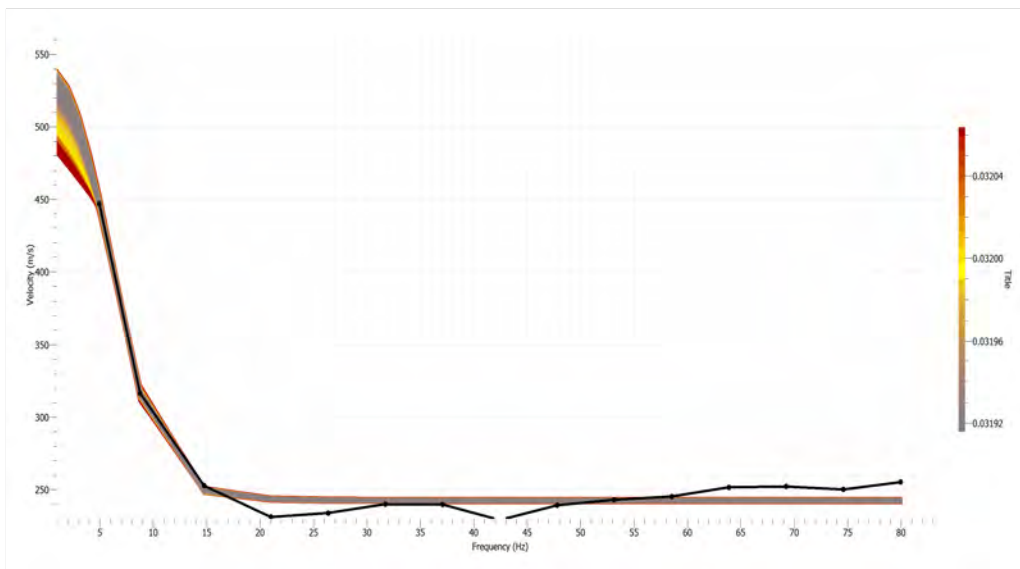
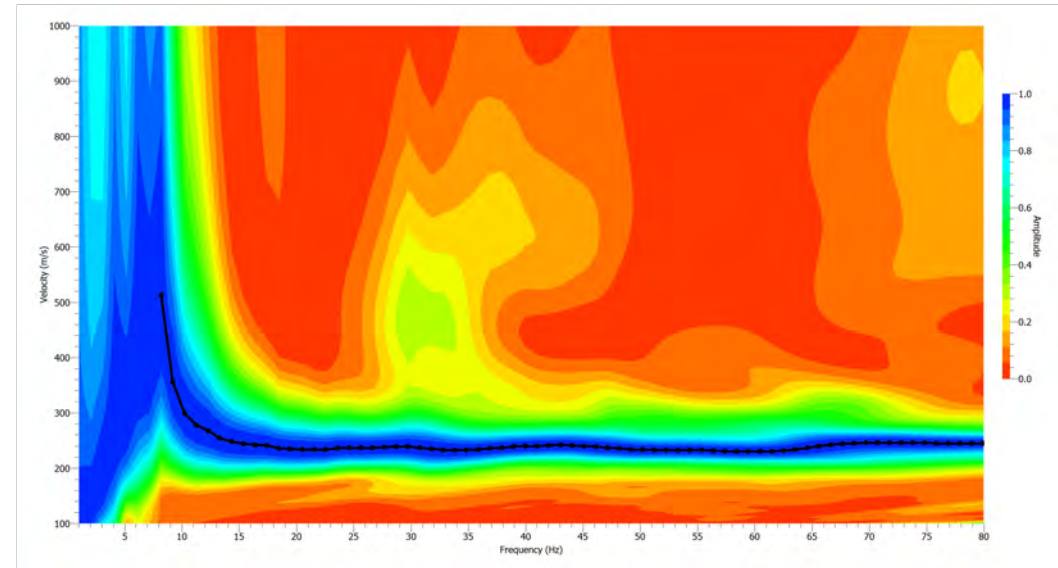
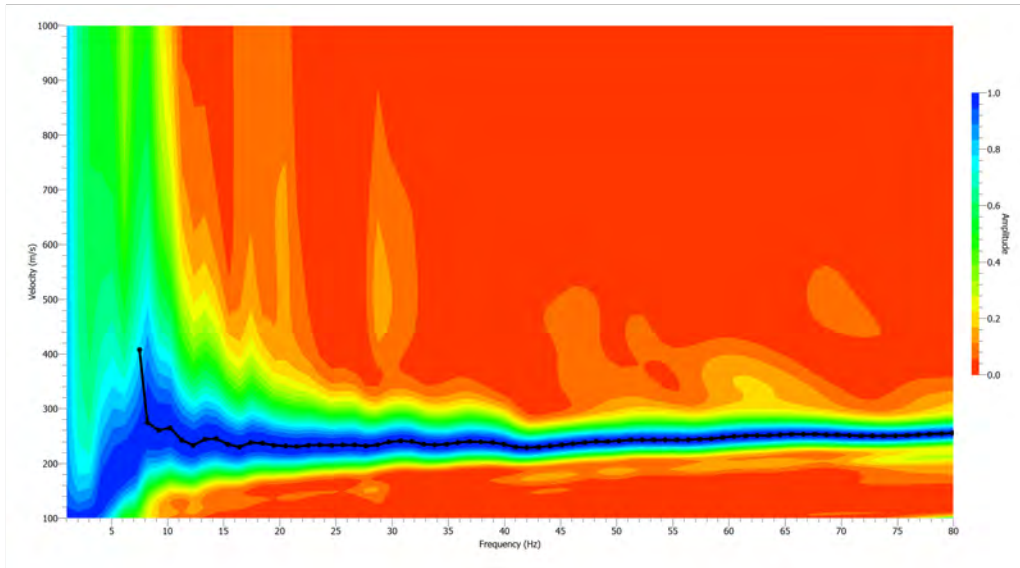


Geometria di acquisizione Rifrazione onde P



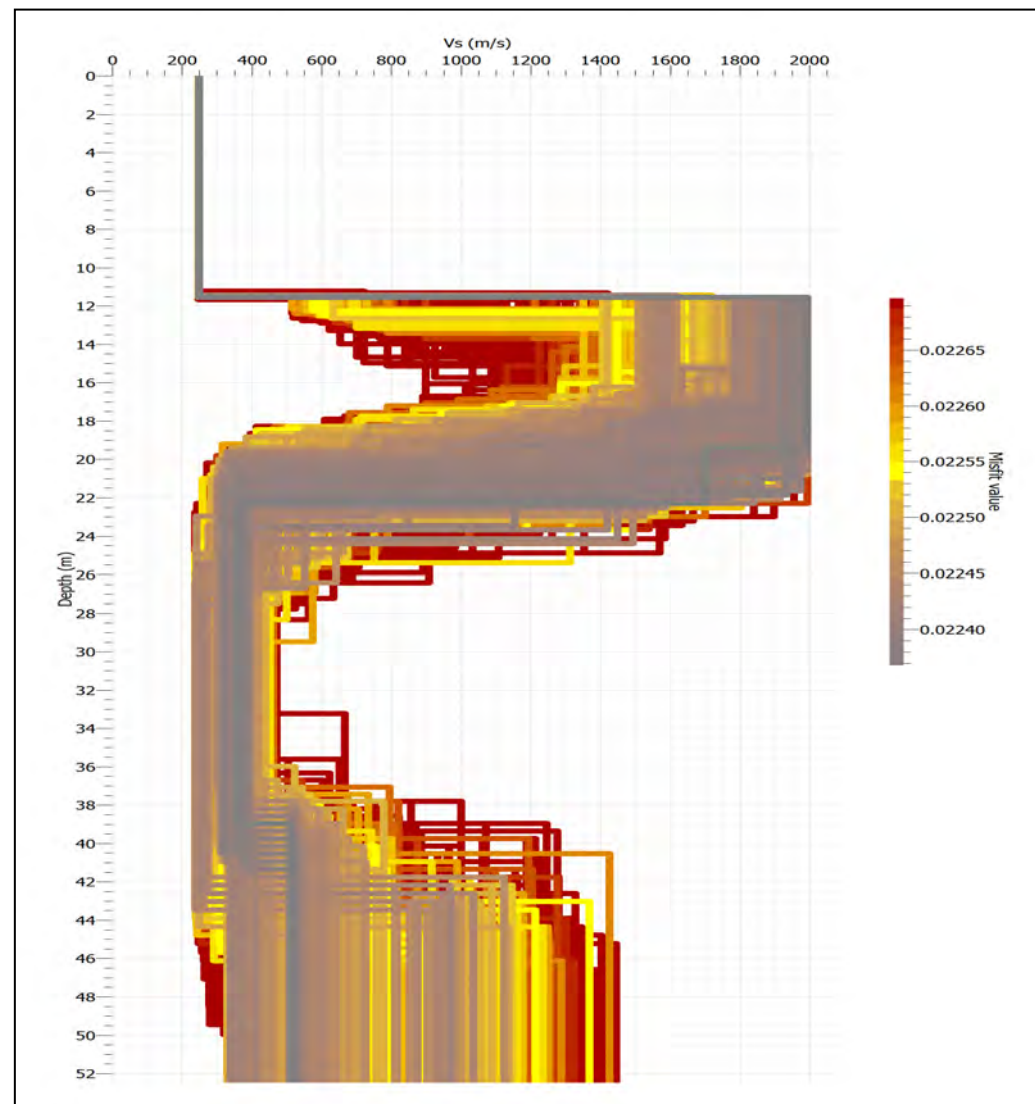
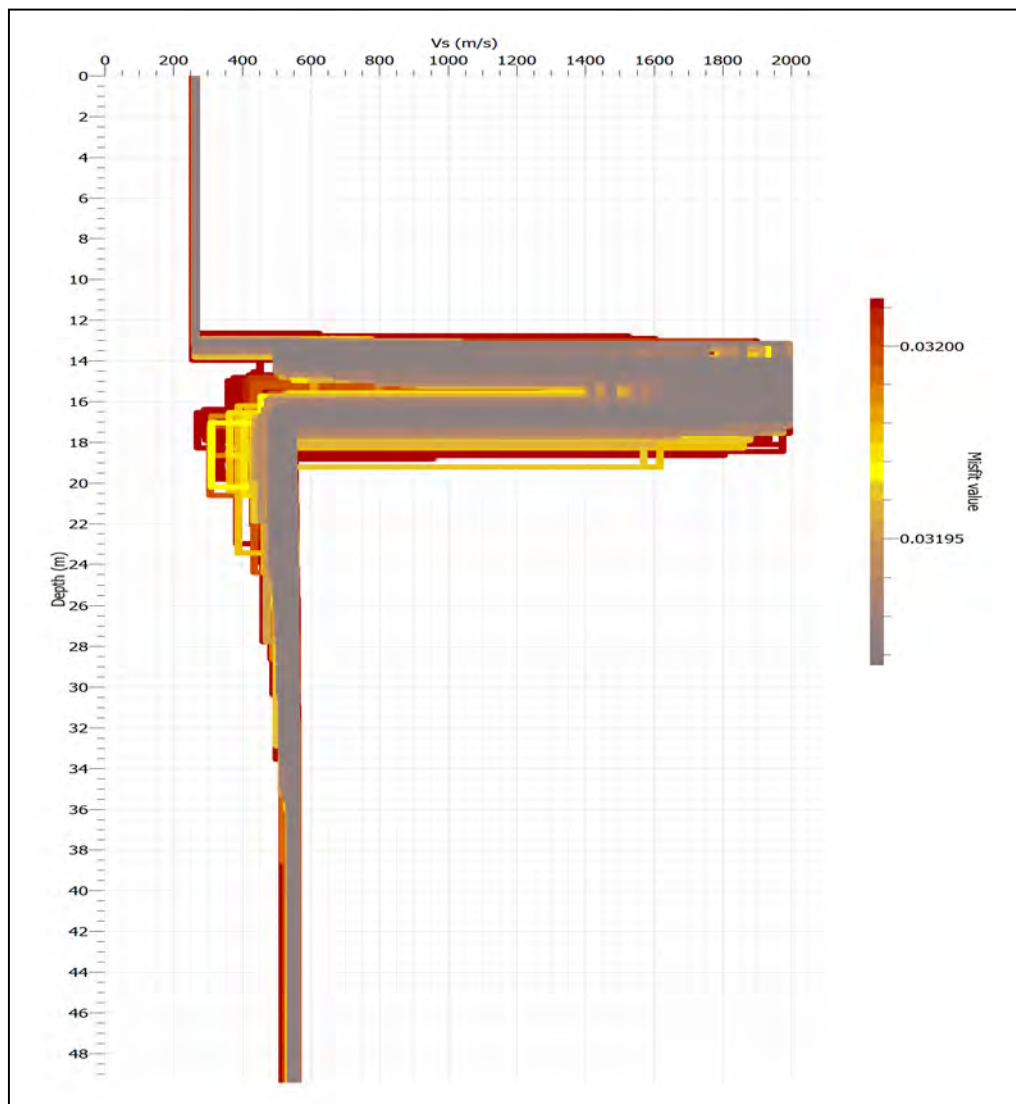
Indagine geofisica : Via della Fratta Arcidosso (GR)

Allegato 2: picking curva di dispersione e confronto tra curva invertita e misurata per lo shot A e B



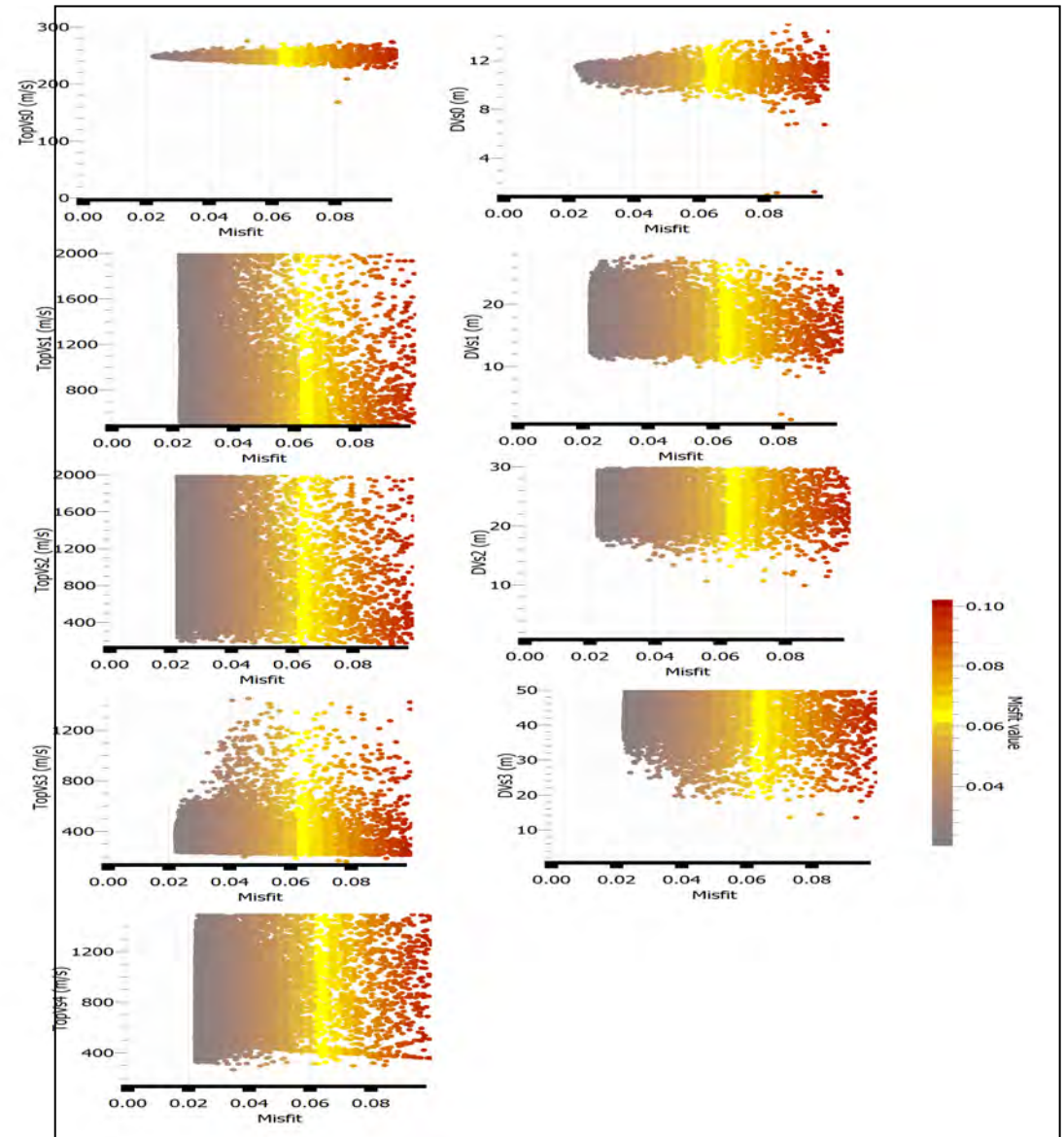
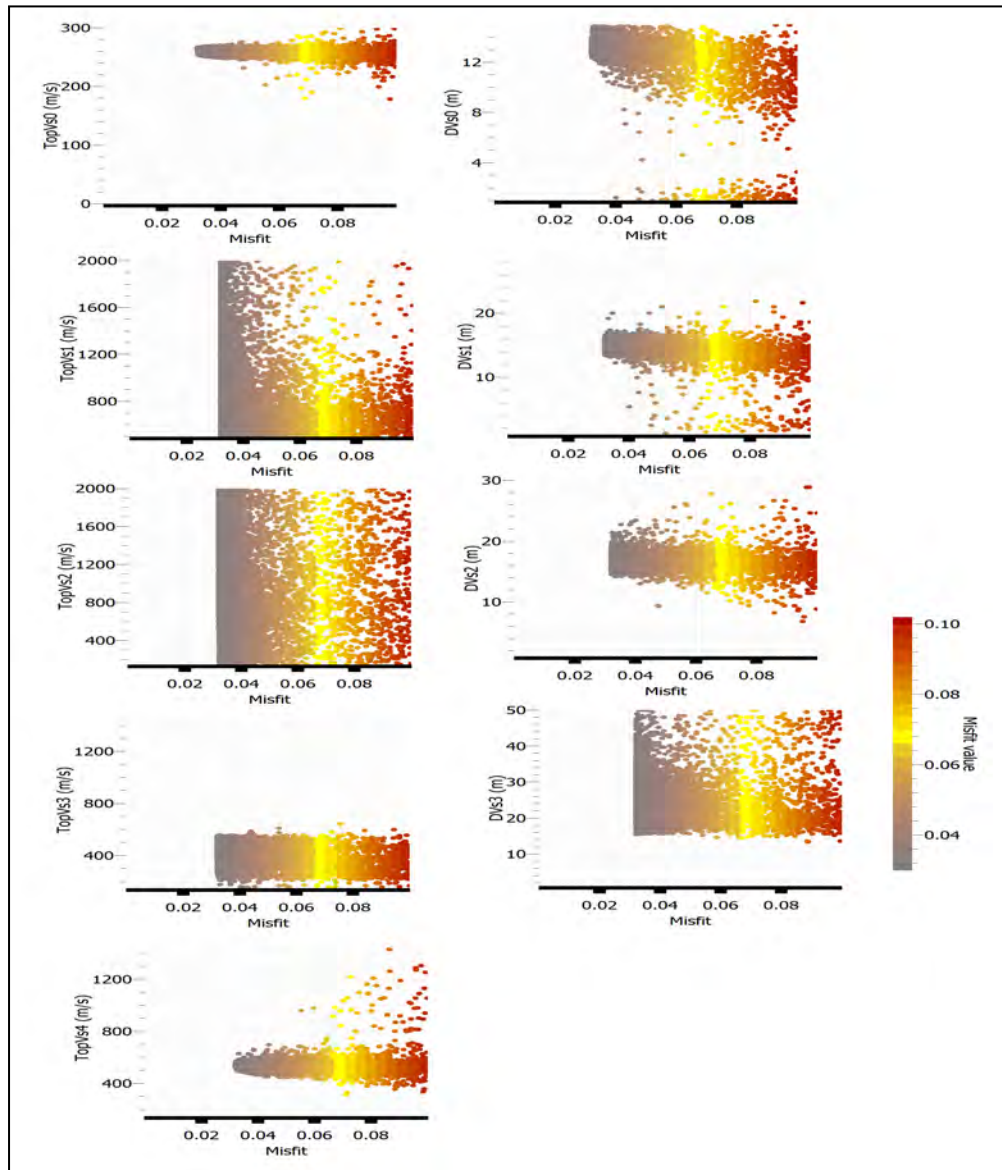
Indagine geofisica : Via della Fratta Arcidosso (GR)

Allegato 3: profilo Vs derivante dallo shot A e dallo shot B



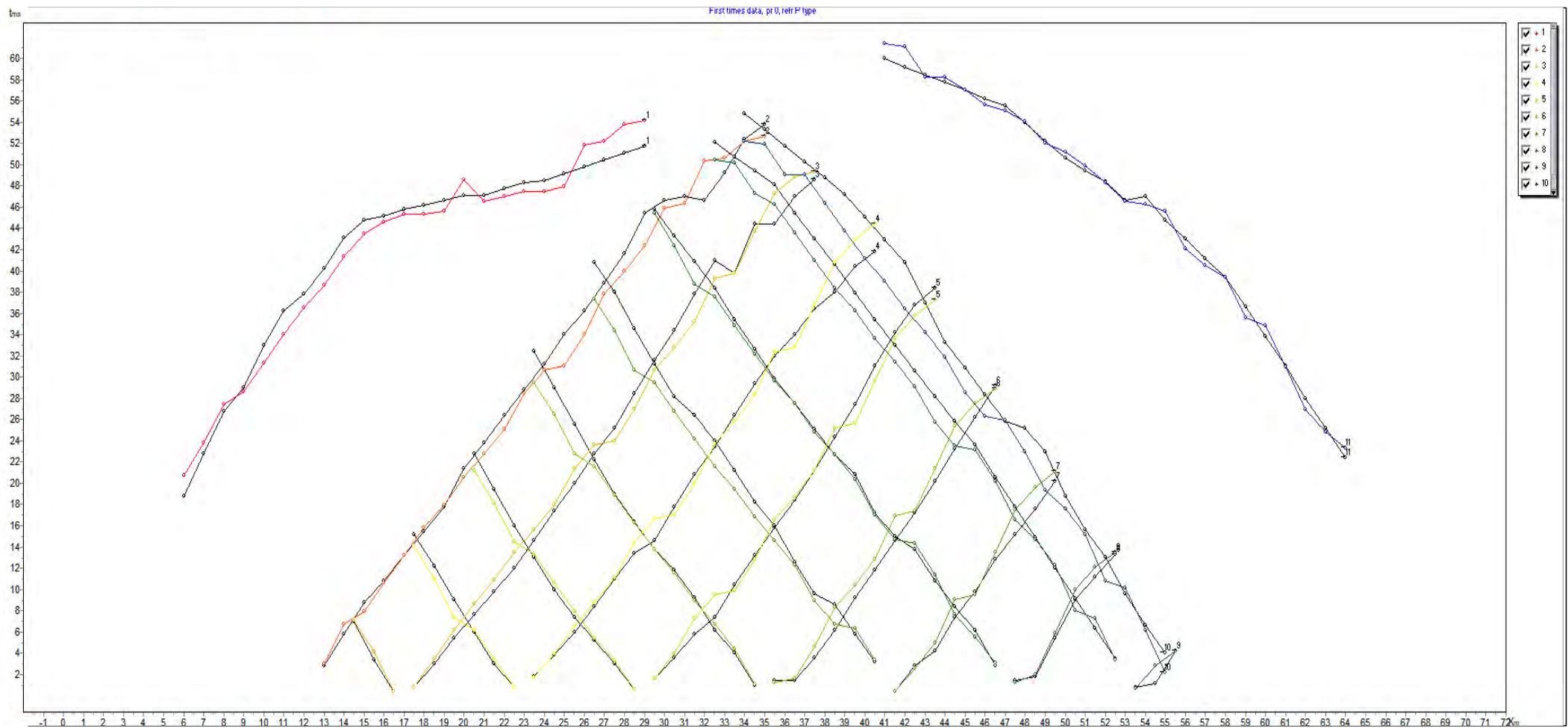
Indagine geofisica : Via della Fratta Arcidosso (GR)

Allegato 4: Analisi dello spazio dei parametri



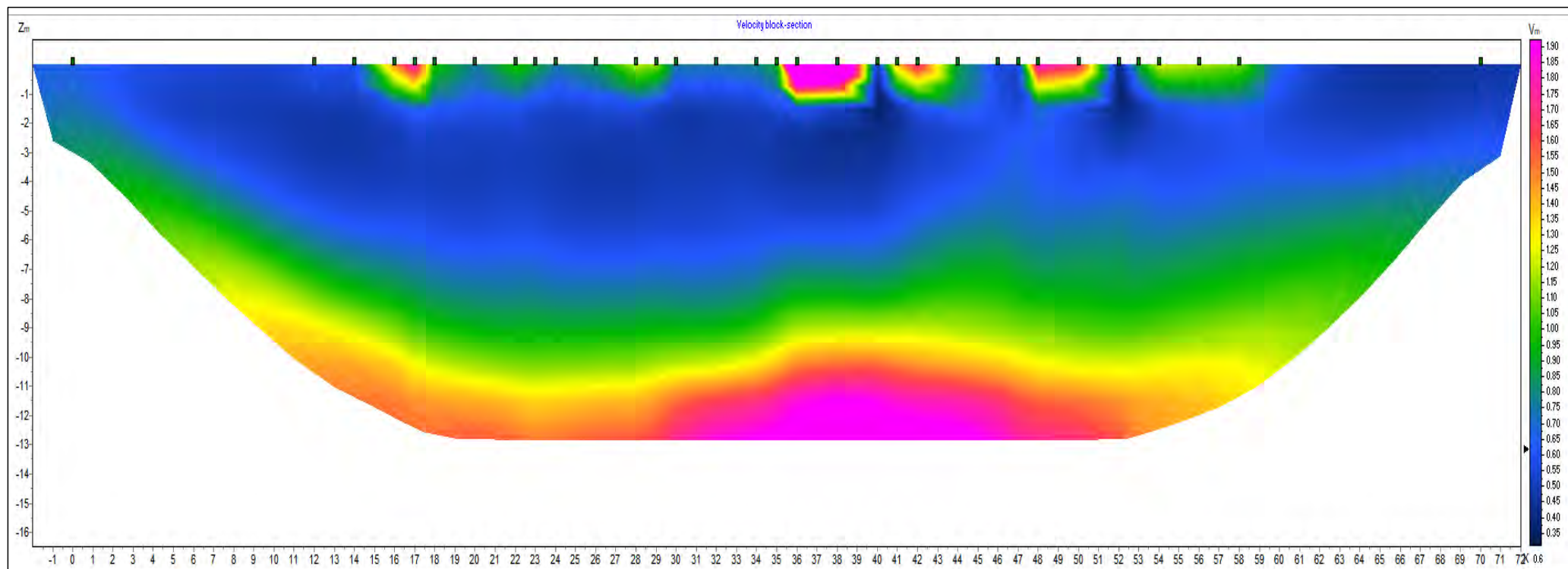
Indagine geofisica : Via della Fratta Arcidosso (GR)

Allegato 5: Dromocrone



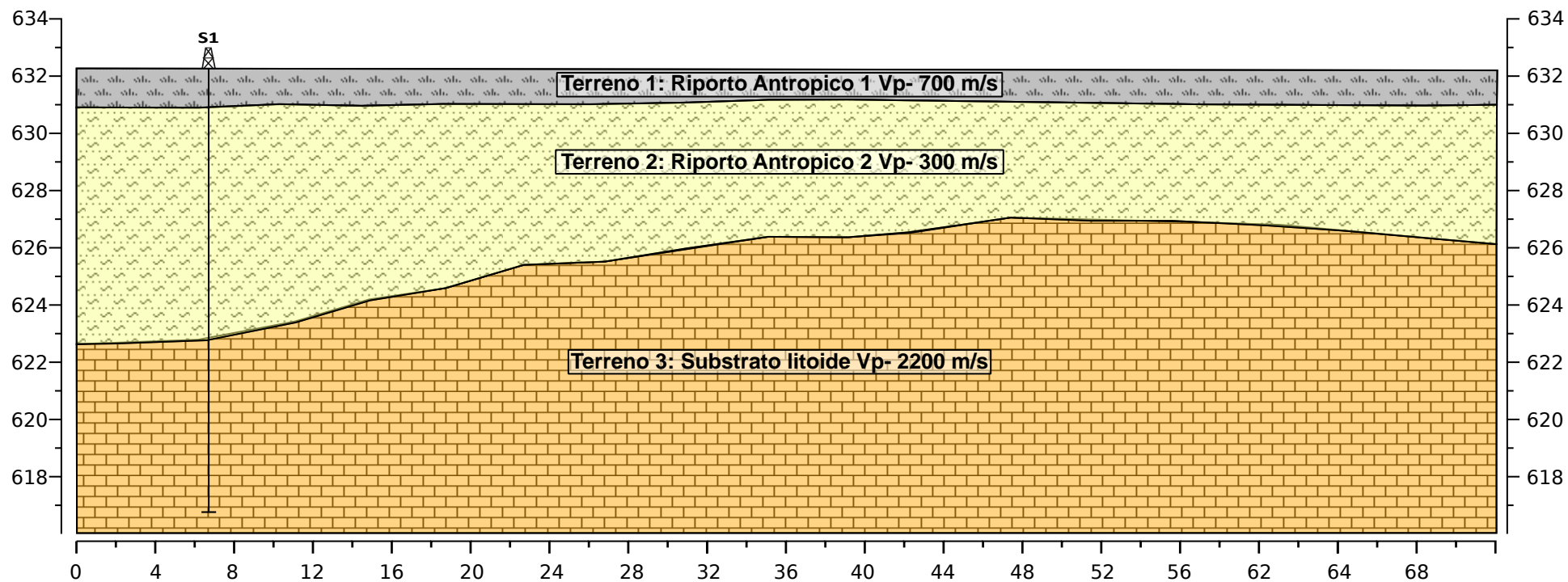
Indagine geofisica : Via della Fratta Arcidosso (GR)

Allegato 6: Elaborazione Tomografica



Indagine geofisica : Via della Fratta Arcidosso (GR)

Allegato 7: Interpretazione stratigrafica della sezione



ALLEGATO 3

Parametri sismici di sito

Progetto:	Realizzazione di muro di sostegno con funzione di passerella
Tipo	Muri di Sostegno NTC18
Località:	Piazza della Riconciliazione
Comune:	Arcidosso
Provincia:	Grosseto

Caratteristiche progetto

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

Coordinate

ED50	Lat:	42.8725
	Long:	11.5358
WGS84	Lat:	42.871521
	Long	11.534876

Siti di riferimento

	ID	Lat (°)	Long (°)	Distanza (m)
Sito 1	24058	42.8679	11.5117	2035
Sito 2	24059	42.8691	11.5798	3605
Sito 3	23837	42.9191	11.5783	6228
Sito 4	23836	42.9179	11.5100	5471

Parametri sismici

	Tr (anni)	ag(g)	F0	Tc* (s)
SLO	30	0.047	2.485	0.244
SLD	50	0.059	2.524	0.252
SLV	475	0.140	2.498	0.278
SLC	975	0.175	2.525	0.284

Coefficienti sismici

	Ss	Cc	St	Amax(m/s2)
SLO	1.60	2.02	1.00	0.745
SLD	1.60	2.00	1.00	0.926
SLV	1.60	1.92	1.00	2.193
SLC	1.51	1.90	1.00	2.586

	kh	kv	Beta
SLO	0.000	0.000	0.000
SLD	0.044	0.022	0.470
SLV	0.085	0.042	0.380
SLC	0.000	0.000	0.000

Parametri sismici di sito

Progetto:	Consolidamento affioramento roccioso
Tipo	Stabilità pendii e fondazione
Località:	Piazza della Riconciliazione
Comune:	Arcidosso
Provincia:	Grosseto

Caratteristiche progetto

Classe d'uso:	2
Vita Nominale:	50
Categoria di suolo:	B
Categoria topografica:	T2

Coordinate

ED50	Lat:	42.8725
	Long:	11.5358
WGS84	Lat:	42.871521
	Long	11.534876

Siti di riferimento

	ID	Lat (°)	Long (°)	Distanza (m)
Sito 1	24058	42.8679	11.5117	2035
Sito 2	24059	42.8691	11.5798	3605
Sito 3	23837	42.9191	11.5783	6228
Sito 4	23836	42.9179	11.5100	5471

Parametri sismici

	Tr (anni)	ag(g)	F0	Tc* (s)
SLO	30	0.047	2.485	0.244
SLD	50	0.059	2.524	0.252
SLV	475	0.140	2.498	0.278
SLC	975	0.175	2.525	0.284

Coefficienti sismici

	Ss	Cc	St	Amax(m/s2)
SLO	1.20	1.46	1.20	0.670
SLD	1.20	1.45	1.20	0.834
SLV	1.20	1.42	1.20	1.974
SLC	1.20	1.42	1.20	2.466

	kh	kv	Beta
SLO	0.014	0.007	0.200
SLD	0.017	0.009	0.200
SLV	0.048	0.024	0.240
SLC	0.060	0.030	0.240