

## 7. SISMICA A RIFRAZIONE

### 7.1- Metodo

Il metodo sismico a rifrazione è un metodo non invasivo che si basa sulla misura dei tempi di arrivo delle onde elastiche (P ed S), generate in superficie da una "sorgente" e captate da un array di ricevitori (geofoni), anch'essi disposti in superficie, con spaziatura regolare e a distanza variabile dalla sorgente, lungo allineamenti.

I tempi di arrivo, correlati alle distanze sorgente-ricevitore, permettono la ricostruzione delle geometrie del sottosuolo (morfologia e profondità delle interfacce) e del campo di velocità di propagazione delle onde sismiche. La generazione delle onde elastiche viene registrata presso una base sismica (Fig. 7.1), operando su più punti di energizzazione distribuiti lungo ed esternamente alla base stessa, mediante impatti (shot) ripetuti in modo da ottenere un'onda caratterizzata da un rapporto segnale-rumore soddisfacente. Tale geometria è necessaria per l'utilizzo successivo dell'algoritmo tomografico.

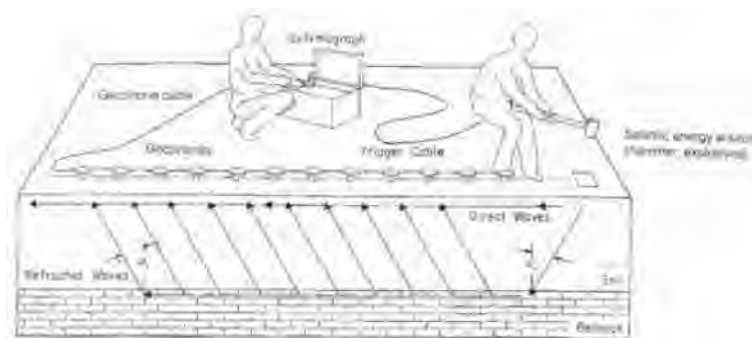


Fig. 7.1 – Schema di acquisizione di indagini sismiche a rifrazione (fonte norma ASTM D 5777 – 00).

L'indagine sismica con elaborazione tomografica, necessita di un numero di tiri, eseguiti sia internamente che esternamente allo stendimento, in numero sufficiente da consentire una ricostruzione dettagliata della geometria dei rifrattori.

Nel caso in oggetto, sono stati eseguiti un numero di tiri pari a sette, come si riporta nello schema di seguito, per una base sismica di lunghezza pari a 117.5 metri per SRT1 e per una base sismica di lunghezza pari a 86 metri per SRT2 (Fig. 7.2).



Fig. 7.2 – Tomografia sismica. Disposizione dei siti di energizzazione.

## 7.2- Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione delle indagini sismiche a rifrazione, è stata adoperata la strumentazione di cui si descrivono di seguito le caratteristiche principali:

- Sismografo a 48 canali **MAE X-610S**, munito di convertitore A/D a 24 bits con tecnologia sigma-delta, impostato con una frequenza di campionamento variabile tra  $0,067 \div 0,267$  millisecondi ed una durata della registrazione (periodo di acquisizione) variabile tra circa  $0,5 \div 1,0$  secondo.
- Geofoni OYO GEOSPACE, a componente verticale da 10 Hz e orizzontale da 14 Hz.
- Trigger costituito da un dispositivo, collegato al sistema di acquisizione, che permette di avviare la registrazione del segnale sismico acquisito dai geofoni nell'istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica. Il sistema di "innesco" è realizzato mediante un geofono di superficie posizionato in prossimità della sorgente e attivato dall'impatto, nell'istante in cui la massa battente colpisce la sorgente.
- Sistema di energizzazione in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza, ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali. Per la generazione delle onde P, è stata adoperata una sorgente impattiva, costituita da un martello da 10 kg ed un piattello metallico posto al suolo (mazza sismica). La sorgente per le onde SH è, invece, costituita da un parallelepipedo in PEAD di forma tale da poter essere colpito lateralmente ad entrambe le estremità con una massa battente. In fase d'installazione, il parallelepipedo è gravato di un carico statico aggiuntivo in modo che possa rimanere aderente al terreno sia al momento in cui viene colpito sia successivamente, affinché l'energia prodotta non venga in parte dispersa. Attraverso questo dispositivo è possibile generare onde elastiche di taglio, polarizzate orizzontalmente, con uniformità sia nella direzione di propagazione che nella polarizzazione e con una generazione di onde P trascurabile.

### 7.3- Elaborazione dati

I dati acquisiti in campo sono stati sottoposti ad una fase di pre-processing avvalendosi del software **IXSeg2Segy** della **INTERPEX**. Tale fase è consistita nell'applicazione del DC removal, di un filtraggio passa-banda e nell'ottimizzazione del guadagno.

Ultimata questa fase, si è proceduto con la determinazione dei tempi di primo arrivo (*first break peak - F.B.P.*) sia delle onde P che delle onde SH. Per ciascun file dati acquisito in campo, è stato creato un file testo contenente i tempi d'arrivo espressi in millisecondi (ms). Tutti i file relativi ai tempi d'arrivo sono confluiti in un foglio di calcolo al fine di poter restituire le cosiddette *dromocrone* ovvero la rappresentazione dei diagrammi *tempi-distanze* della sezione sismica.

Al fine di eseguire l'elaborazione, in termini di velocità di propagazione delle onde elastiche, sono stati ricavati tre file ascii relativi, rispettivamente, al numero e disposizione delle sorgenti (file *source*), al numero e disposizione dei geofoni (file *receiver*) ed ai tempi d'arrivo (file *observations*). Tali file costituiscono l'input per il software tomografico utilizzato **SeisOpt@2D** della **Optim<sup>TM</sup> software & data solutions**.

Il metodo tomografico utilizzato, si basa su un approccio di ottimizzazione non-lineare, noto come metodo di ottimizzazione numerica simulata (*simulated annealing*), utilizzato per ricavare un modello di velocità delle onde sismiche, ad elevata risoluzione, dalla misurazione dei tempi di arrivo delle onde P ed SH.

Il processing citato è basato sul metodo di Monte-Carlo che può combinare i tempi di arrivo delle onde in un modello di velocità. Tale modello può essere considerato superiore ai più sofisticati metodi d'inversione non-lineare. L'algoritmo compie un'elaborazione impostando un modello con una variazione casuale del parametro d'interesse, sino a che il modello sismico sintetico dei tempi di arrivo delle onde sismiche calcolate non collima con i tempi di arrivo osservati.

Processi iterativi fanno in modo di far convergere la soluzione riducendo, ad ogni iterazione, lo scarto eliminando quelle soluzioni i cui errori oltrepassano l'errore totale ammesso dall'algoritmo di calcolo.

In definitiva, il processo di ottimizzazione adottato troverà la soluzione testando diverse migliaia di soluzioni possibili prima di arrivare alla soluzione ottimale proposta che è quella, come detto in precedenza, in cui i tempi di arrivo calcolati coincidono, a meno di uno scarto ridotto, con quelli osservati.

In pratica, i software adottati, che si basano sul principio del *simulated annealing*, pervengono ad un modello ottimizzato delle velocità utilizzando, in input, i soli tempi di primo arrivo delle onde sismiche e la geometria dell'array (distanze e variazioni di quota) non richiedendo informazioni preliminari sulla geometria della struttura sotterranea. L'algoritmo, come già accennato in precedenza, esegue ripetute modellizzazioni dirette laddove un nuovo modello proposto è accettato o rigettato in base ad un criterio di probabilità tenendo in considerazione l'andamento globale dei tempi di arrivo.

#### 7.4- Attività di campo

Come detto in premessa, sono stati eseguiti **n.2 stendimenti di sismica a rifrazione** in onde P ed SH, di cui si riporta di seguito il dettaglio relativo alle lunghezze, al numero di geofoni utilizzati e alla distanza intergeofonica.

#	Id. profilo	Id. sito	Lunghezza (m.l.)	N° canali	Spaziatura (m)
1	SRT1	Postazione Padule 2	117,5	48	2,5
2	SRT2	Postazione Padule 2	86,0	44	2,0

L'ubicazione delle indagini, di concerto con la Committente, è stata rimodulata in modo da fornire una posizione in grado di coprire in maniera omogenea, in base alla logistica, le aree oggetto di indagine.



*Fig. 7.3 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Ubicazione della prospezione sismica a rifrazione (in arancione il punto iniziale, in celeste il punto finale del profilo sismico).*

Terminata la fase di acquisizione, si è proceduto al rilievo topografico di precisione di tutti i punti dello stendimento. La georeferenziazione delle indagini è stata eseguita utilizzando una sola antenna GPS Leica Geosystems GX 1200 collegata, mediante modem GSM/GPRS, ad una rete di stazioni permanenti (servizio SmartNet ItalPoS), distribuite sul territorio nazionale. I dati, opportunamente combinati, vengono utilizzati per erogare servizi di correzione RTK, all'antenna in campo (modalità NRTK, Net Real Time Kinematic).

A seguire, vengono riportate alcune foto eseguite durante le fasi di acquisizione in campo e l'elenco coordinate dei punti rilevati, nel sistema di riferimento UTM-WGS84.



*Fig. 7.4 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Foto del profilo sismico a rifrazione SRT1.*



*Fig. 7.5 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Foto del profilo sismico a rifrazione SRT2.*



N° punto	Sigla profilo_Id. geofono (Postazione Padule 2)	Sistema di riferimento UTM-WGS84 - Fuso 32.		
		Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	SRT1_ch.01	645351,080	4785310,512	397,60
02	SRT1_ch.02	645352,535	4785308,490	397,67
03	SRT1_ch.03	645353,962	4785306,463	397,65
04	SRT1_ch.04	645355,340	4785304,421	397,64
05	SRT1_ch.05	645356,807	4785302,305	397,61
06	SRT1_ch.06	645358,305	4785300,230	397,55
07	SRT1_ch.07	645359,710	4785298,174	397,63
08	SRT1_ch.08	645361,078	4785296,269	397,63
09	SRT1_ch.09	645362,618	4785294,210	397,64
10	SRT1_ch.10	645364,048	4785292,239	397,68
11	SRT1_ch.11	645365,280	4785290,274	397,63
12	SRT1_ch.12	645366,800	4785288,204	397,61
13	SRT1_ch.13	645368,154	4785286,179	397,67
14	SRT1_ch.14	645369,683	4785284,145	397,64
15	SRT1_ch.15	645370,820	4785282,392	397,59
16	SRT1_ch.16	645372,351	4785280,438	397,70
17	SRT1_ch.17	645374,133	4785277,765	397,65
18	SRT1_ch.18	645375,748	4785275,756	397,74
19	SRT1_ch.19	645377,215	4785273,740	397,80
20	SRT1_ch.20	645378,607	4785271,715	397,76
21	SRT1_ch.21	645380,210	4785269,788	397,89
22	SRT1_ch.22	645381,777	4785267,808	397,92
23	SRT1_ch.23	645383,235	4785265,801	397,89
24	SRT1_ch.24	645385,659	4785262,697	397,87
25	SRT1_ch.25	645386,501	4785261,440	397,81
26	SRT1_ch.26	645387,747	4785260,207	397,89
27	SRT1_ch.27	645390,047	4785256,600	397,79
28	SRT1_ch.28	645391,111	4785255,333	397,54
29	SRT1_ch.29	645392,093	4785253,836	397,29
30	SRT1_ch.30	645393,957	4785251,613	397,42
31	SRT1_ch.31	645395,087	4785250,035	397,53
32	SRT1_ch.32	645396,596	4785247,237	397,41
33	SRT1_ch.33	645397,987	4785245,403	397,89
34	SRT1_ch.34	645399,174	4785243,771	397,87
35	SRT1_ch.35	645400,568	4785241,691	397,82
36	SRT1_ch.36	645402,034	4785239,458	397,93
37	SRT1_ch.37	645404,074	4785237,125	397,96
38	SRT1_ch.38	645405,147	4785235,116	397,93
39	SRT1_ch.39	645406,552	4785233,066	397,91
40	SRT1_ch.40	645407,763	4785231,141	397,88
41	SRT1_ch.41	645409,011	4785228,818	397,80
42	SRT1_ch.42	645411,316	4785226,713	397,91
43	SRT1_ch.43	645412,620	4785224,579	397,86

N° punto	Sigla profilo_Id. geofono	Sistema di riferimento UTM-WGS84 - Fuso 32.		
	(Postazione Padule 2)	Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
44	SRT1_ch.44	645414,030	4785222,686	397,85
45	SRT1_ch.45	645415,328	4785220,804	397,87
46	SRT1_ch.46	645416,752	4785218,789	397,88
47	SRT1_ch.47	645418,189	4785216,533	397,82
48	SRT1_ch.48	645419,587	4785214,616	397,85

N° punto	Sigla profilo_Id. geofono	Sistema di riferimento UTM-WGS84 - Fuso 32.		
	(Postazione Padule 2)	Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	SRT2_ch.01	645373,018	4785186,215	386,25
02	SRT2_ch.02	645372,166	4785187,811	386,28
03	SRT2_ch.03	645371,139	4785189,368	386,31
04	SRT2_ch.04	645369,784	4785191,032	386,31
05	SRT2_ch.05	645368,528	4785192,516	386,34
06	SRT2_ch.06	645367,442	4785194,256	386,36
07	SRT2_ch.07	645366,131	4785195,637	386,36
08	SRT2_ch.08	645364,833	4785197,262	386,35
09	SRT2_ch.09	645363,649	4785198,944	386,31
10	SRT2_ch.10	645362,321	4785200,536	386,24
11	SRT2_ch.11	645361,130	4785201,711	386,19
12	SRT2_ch.12	645359,758	4785203,326	386,16
13	SRT2_ch.13	645358,475	4785204,988	386,19
14	SRT2_ch.14	645357,037	4785206,498	386,22
15	SRT2_ch.15	645355,833	4785207,929	386,22
16	SRT2_ch.16	645354,788	4785209,298	386,23
17	SRT2_ch.17	645353,547	4785210,939	386,21
18	SRT2_ch.18	645352,183	4785212,668	386,15
19	SRT2_ch.19	645350,952	4785214,252	386,19
20	SRT2_ch.20	645349,412	4785215,639	386,19
21	SRT2_ch.21	645348,006	4785217,081	386,18
22	SRT2_ch.22	645346,338	4785218,982	386,18
23	SRT2_ch.23	645345,227	4785219,895	386,20
24	SRT2_ch.24	645343,856	4785221,370	386,20
25	SRT2_ch.25	645342,631	4785222,748	386,19
26	SRT2_ch.26	645341,049	4785224,281	386,14
27	SRT2_ch.27	645339,733	4785225,852	386,14
28	SRT2_ch.28	645338,368	4785227,388	386,12
29	SRT2_ch.29	645337,117	4785228,815	386,02
30	SRT2_ch.30	645335,633	4785230,629	385,87
31	SRT2_ch.31	645334,821	4785231,760	385,54
32	SRT2_ch.32	645333,480	4785233,431	386,57
33	SRT2_ch.33	645332,198	4785234,977	387,53

N° punto	Sigla profilo_Id. geofono	Sistema di riferimento UTM-WGS84 - Fuso 32.		
	(Postazione Padule 2)	Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
34	SRT2_ch.34	645330,950	4785236,477	387,59
35	SRT2_ch.35	645329,594	4785237,996	387,46
36	SRT2_ch.36	645328,303	4785239,564	387,39
37	SRT2_ch.37	645327,011	4785241,075	387,34
38	SRT2_ch.38	645325,620	4785242,599	387,29
39	SRT2_ch.39	645324,352	4785244,071	387,26
40	SRT2_ch.40	645322,996	4785245,582	387,31
41	SRT2_ch.41	645321,685	4785247,049	387,30
42	SRT2_ch.42	645320,391	4785248,632	387,34
43	SRT2_ch.43	645319,322	4785249,954	387,37
44	SRT2_ch.44	645317,930	4785251,478	387,34

#### 7.5- Risultati dell' indagine sismica a rifrazione

Come accennato nelle pagine sulla descrizione del metodo/elaborazione dati, i tempi di arrivo delle onde P ed SH sono stati adoperati quale input, assieme alla geometria dei tiri di energizzazione e dei geofoni, nel software di elaborazione tomografica per ottenere le relative pseudo sezioni 2D sismiche.

Queste sono riportate esprimendo i dati dei campi di velocità delle onde di compressione e di taglio, mediante isolinee e campiture a falsi colori.

Di seguito, per il profilo eseguito, si riportano le seguenti informazioni / elaborazioni:

- dromocrone ottenute dalla lettura dei tempi d'arrivo delle onde P ed SH;
- pseudosezioni sismiche in onde P e in onde S;
- analisi dei dati di velocità di propagazione delle onde elastiche, in termini di gradiente geosismico per l'individuazione dei sismostrati.

Alle sezioni sismiche sono stati sovrapposti, inoltre, i grafici relativi al numero di colpi alla punta, in funzione dalla profondità, risultanti dalle prove penetrometriche DPSH eseguite.



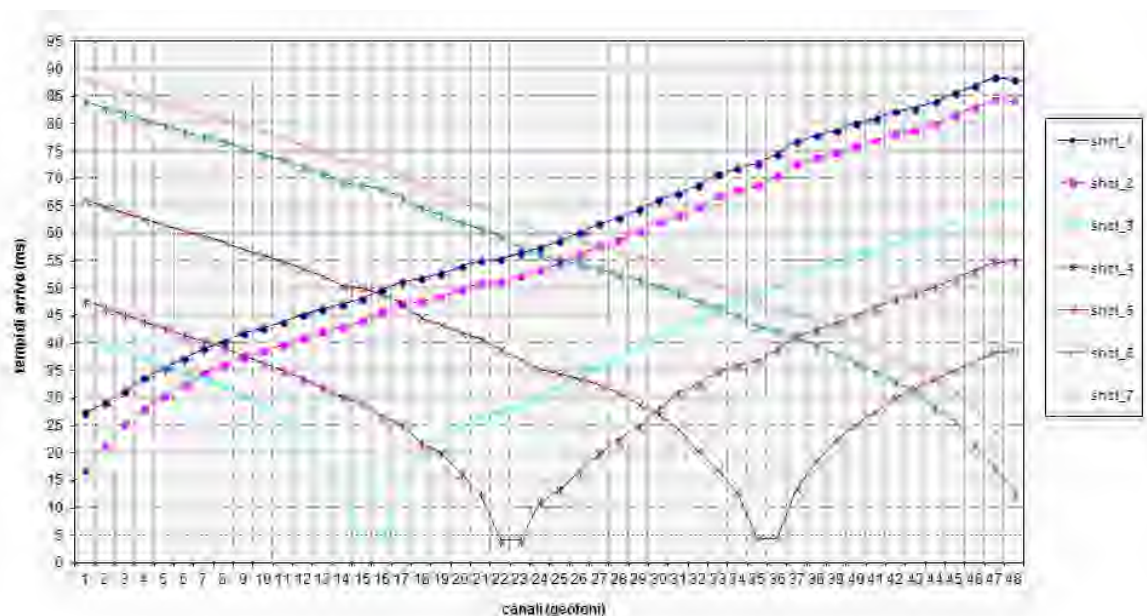


Fig. 7.6 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Tomografia sismica in onde P. Profilo SRT1. Dromocrone.

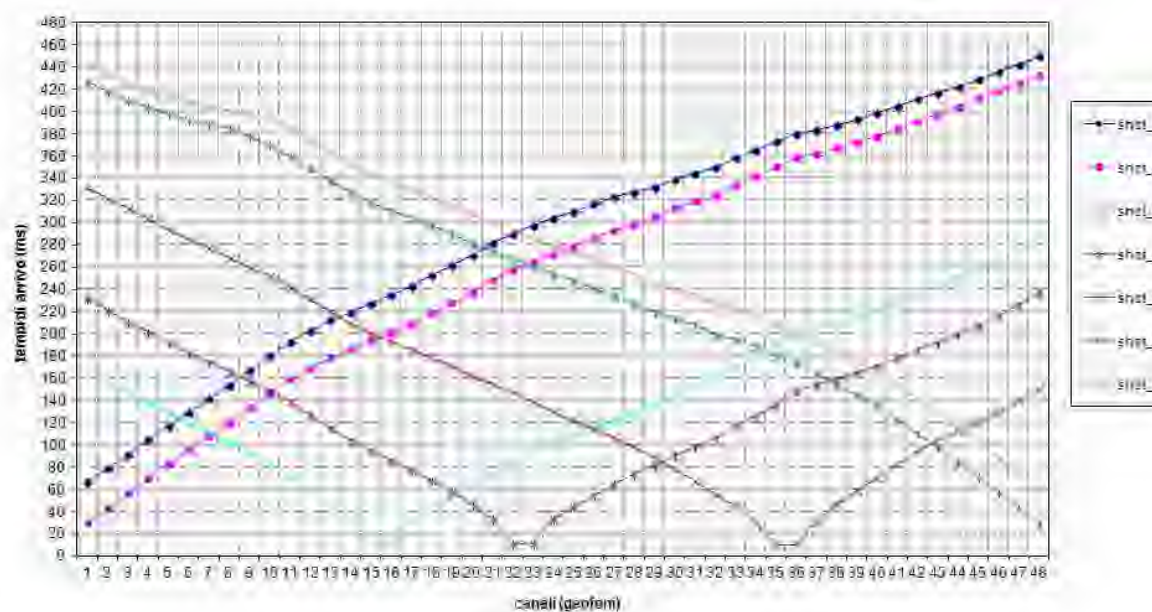
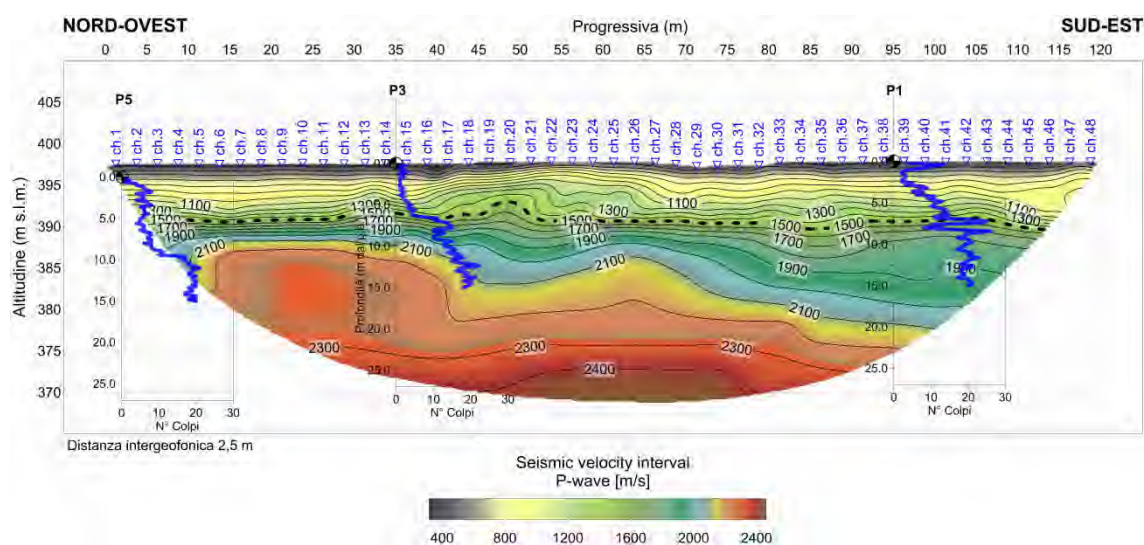


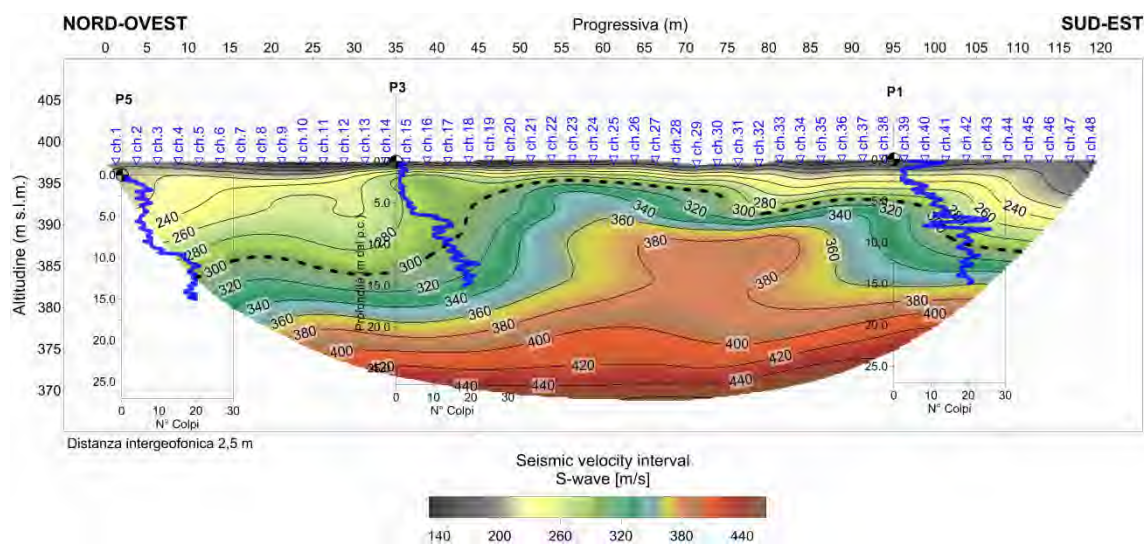
Fig. 7.7 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Tomografia sismica in onde SH. Profilo SRT1. Dromocrone.

Le pseudo sezioni elaborate per il profilo sismico SRT<sub>1</sub>, sulla base del gradiente geosismico e dei risultati delle prove dirette (penetrometrie DPSH), hanno permesso di evidenziare due sismostrati (*Fig. 7.8* e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Il primo sismostrato si attesta tra il piano campagna e l'isolinea di 1.500 m/s (valori minimi di circa 300 m/s), per le onde P, mentre per le onde S si attesta attorno all'isolinea di 300 m/s (con valori minimi di circa 130 m/s). Il secondo sismostrato è compreso tra la precedente interfaccia e la massima profondità raggiunta dall'indagine e presenta velocità delle onde di compressione superiori a 1.500 e fino a 2.400 m/s, mentre per le onde S, risultano superiori a 300 e fino a 450 m/s.



*Fig. 7.8 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Tomografia sismica in onde P. Profilo SRT<sub>1</sub>. Pseudo sezione in onde P.*



*Fig. 7.9 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Tomografia sismica in onde SH. Profilo SRT1. Pseudo sezione in onde SH.*



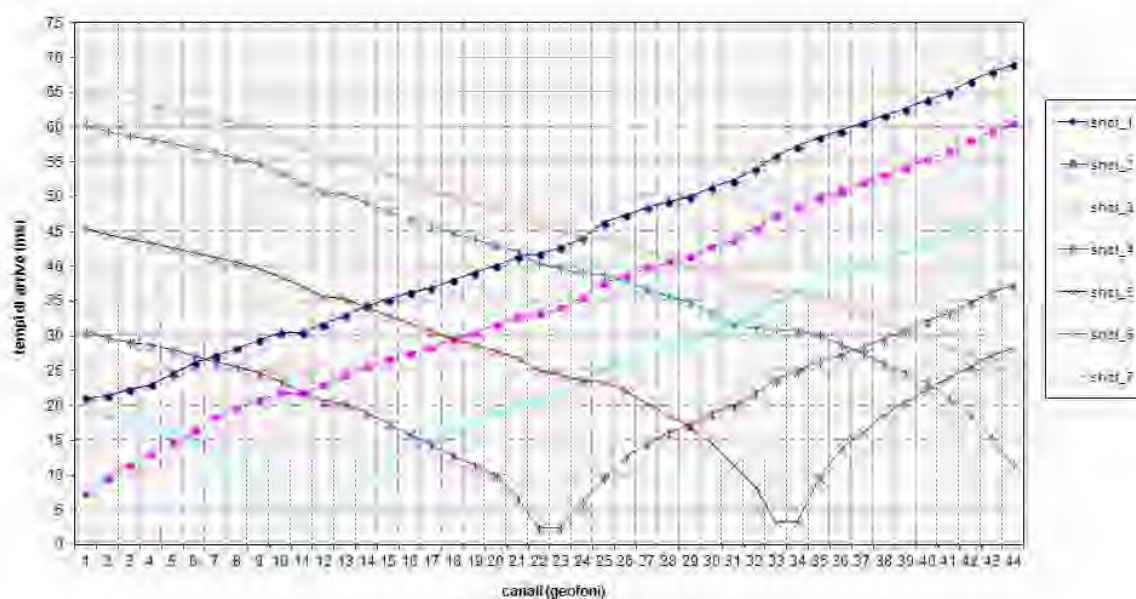


Fig. 7.10 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Tomografia sismica in onde P. Profilo SRT2. Dromocrone.

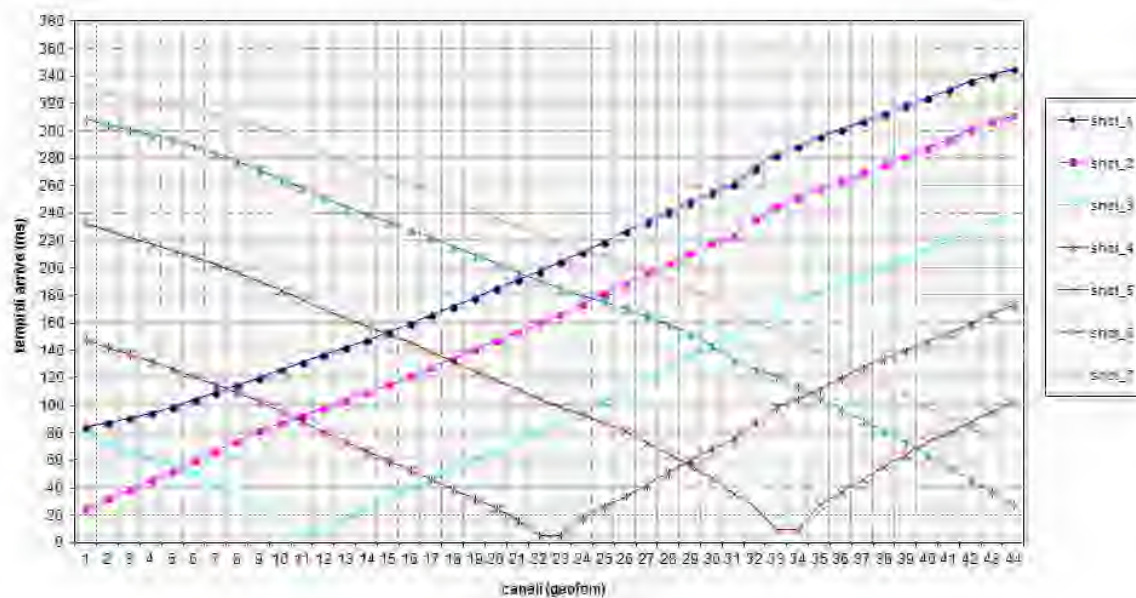


Fig. 7.11 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Tomografia sismica in onde SH. Profilo SRT2. Dromocrone.

Le pseudo sezioni elaborate per il profilo sismico SRT2, sulla base del gradiente geosismico e dei risultati delle prove dirette (penetrometrie DPSH), hanno permesso di evidenziare tre sismostrati (Fig. 7.12 e Fig. 9.7).

Il primo sismostrato si attesta tra il piano campagna e l'isolinea di 800 m/s (valori minimi di 250 m/s), per le onde P, mentre per le onde S si attesta attorno all'isolinea di 240 m/s (con valori minimi di circa 100 m/s), e presenta uno spessore massimo di circa 2 m. Il secondo sismostrato è compreso tra la precedente interfaccia e l'isolinea di 1.900 m/s per le onde P, mentre per le onde S si attesta attorno all'isolinea di 350 m/s. Infine, l'ultimo sismostrato è compreso tra la precedente interfaccia e la massima profondità raggiunta dall'indagine e presenta velocità delle onde di compressione superiori a 1.900 e fino a 2.600 m/s, mentre per le onde S, risultano superiori a 350 e fino a 560 m/s.

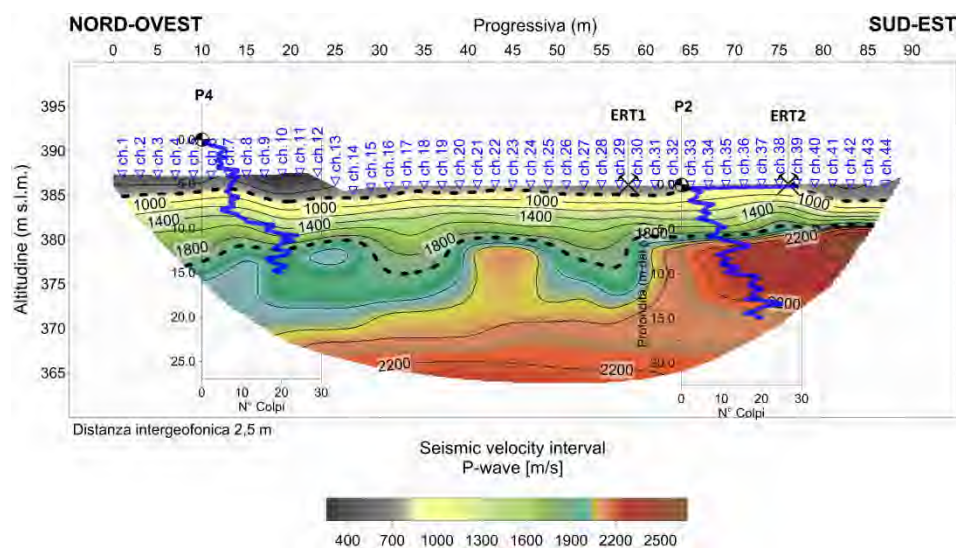


Fig. 7.12 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Tomografia sismica in onde P. Profilo SRT2. Pseudo sezione in onde P.

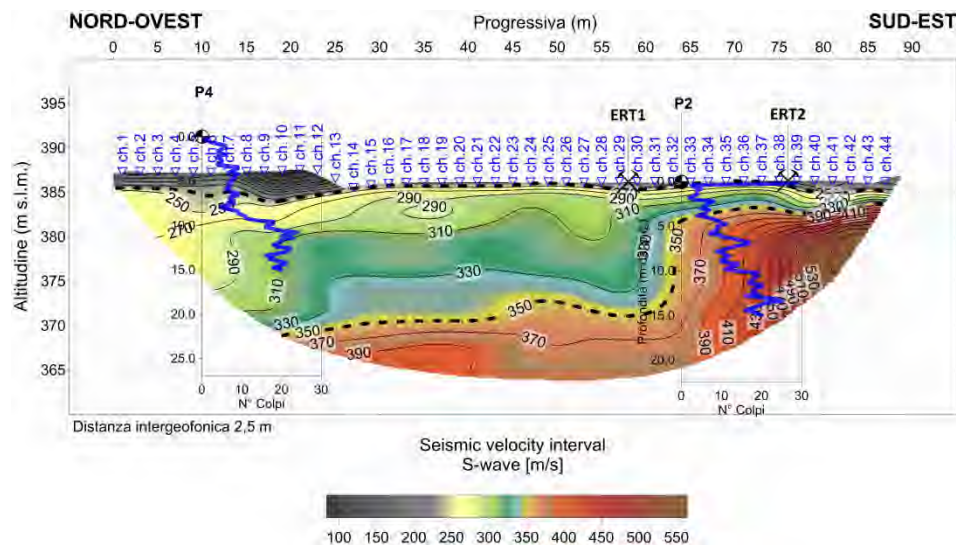


Fig. 7.13 – Postazione Padule 2. Pomarance (PI). Tomografia sismica in onde SH. Profilo SRT2. Pseudo sezione in onde SH.