

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.

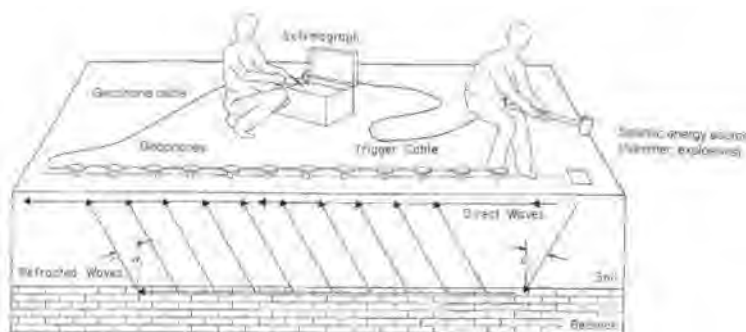


Fig. 7.1 – Schema di acquisizione di indagini sismiche a rifrazione (fonte norma ASTM D 5777 – 00).

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 86 metri (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 addizionale 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 **OptimTM 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, è stato eseguito **n.1 stendimento 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	Frana vapordotto S. Paolo	86	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.

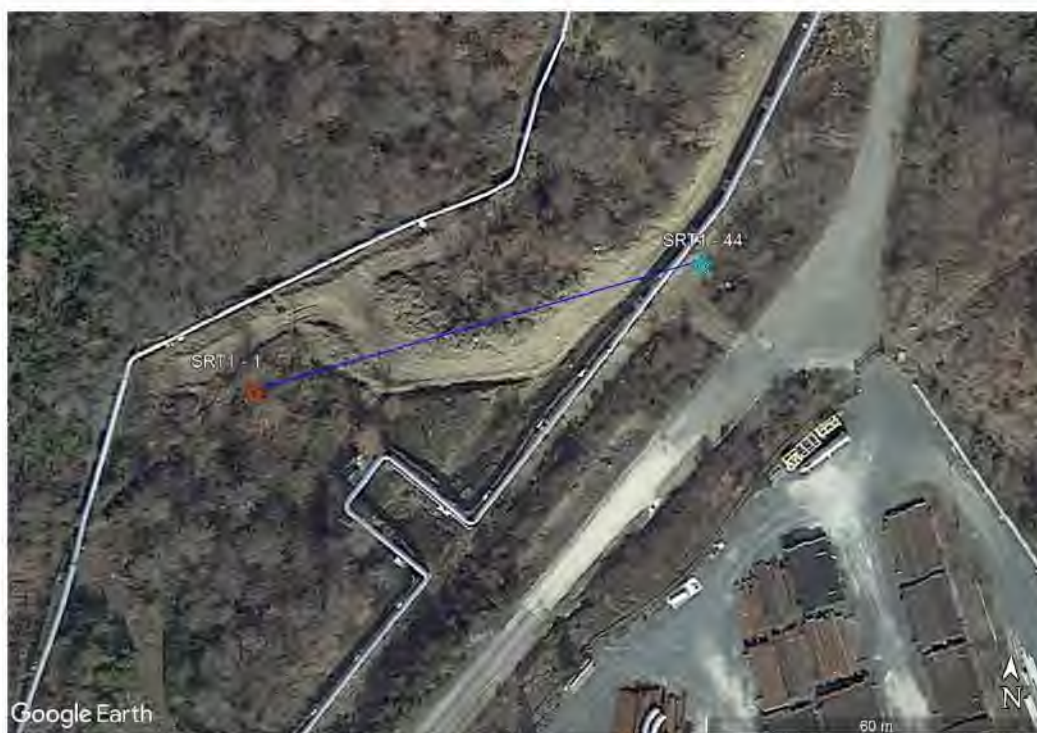


Fig. 7.3 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Ubicazione della prospezione sismica a rifrazione (in arancione il punto iniziale, in celeste il punto finale del profilo sismico).

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 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Foto del profilo sismico a rifrazione SRT1.



Fig. 7.5 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Foto del profilo sismico a rifrazione SRT1.

N° punto	Sigla profilo_Id. geofono (vapordotto S. Paolo)	Sistema di riferimento UTM WGS84 - Fuso 32.		
		Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	SRT1_ch.01	654260,067	4789049,431	506,18
02	SRT1_ch.02	654261,981	4789049,520	506,48
03	SRT1_ch.03	654263,660	4789049,613	506,77
04	SRT1_ch.04	654265,673	4789050,163	507,13
05	SRT1_ch.05	654267,521	4789050,645	507,53
06	SRT1_ch.06	654269,573	4789050,930	507,89
07	SRT1_ch.07	654271,310	4789051,149	508,23
08	SRT1_ch.08	654273,346	4789051,603	508,70
09	SRT1_ch.09	654275,188	4789051,865	509,04
10	SRT1_ch.10	654277,083	4789052,309	509,36
11	SRT1_ch.11	654279,031	4789052,544	509,70
12	SRT1_ch.12	654281,118	4789053,018	510,00
13	SRT1_ch.13	654282,868	4789053,307	510,32
14	SRT1_ch.14	654284,888	4789053,841	510,62
15	SRT1_ch.15	654286,802	4789054,580	510,69
16	SRT1_ch.16	654289,049	4789055,114	511,19
17	SRT1_ch.17	654290,604	4789055,384	511,52
18	SRT1_ch.18	654292,362	4789055,960	511,86
19	SRT1_ch.19	654293,917	4789056,539	512,17
20	SRT1_ch.20	654296,267	4789056,929	512,72
21	SRT1_ch.21	654298,141	4789057,501	513,18
22	SRT1_ch.22	654300,137	4789058,326	513,62
23	SRT1_ch.23	654302,206	4789059,049	514,26
24	SRT1_ch.24	654303,796	4789059,662	514,77
25	SRT1_ch.25	654305,537	4789060,311	515,39
26	SRT1_ch.26	654307,321	4789060,925	515,98
27	SRT1_ch.27	654309,079	4789061,727	516,53
28	SRT1_ch.28	654310,862	4789062,499	517,03
29	SRT1_ch.29	654312,646	4789063,460	517,55
30	SRT1_ch.30	654314,406	4789064,213	518,09
31	SRT1_ch.31	654316,187	4789065,001	518,58
32	SRT1_ch.32	654317,890	4789065,802	519,03
33	SRT1_ch.33	654319,608	4789066,595	519,51
34	SRT1_ch.34	654321,456	4789067,298	519,82
35	SRT1_ch.35	654323,310	4789068,039	520,56
36	SRT1_ch.36	654324,945	4789068,734	521,32
37	SRT1_ch.37	654326,631	4789069,509	522,06
38	SRT1_ch.38	654328,085	4789070,040	521,32
39	SRT1_ch.39	654331,794	4789071,574	522,52
40	SRT1_ch.40	654333,394	4789072,797	523,16
41	SRT1_ch.41	654334,990	4789073,827	523,77
42	SRT1_ch.42	654336,693	4789074,980	524,14
43	SRT1_ch.43	654338,122	4789075,877	524,45
44	SRT1_ch.44	654340,071	4789075,943	524,60

7.5- Risultati dell' indagine sismica a rifrazione STRo1

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.

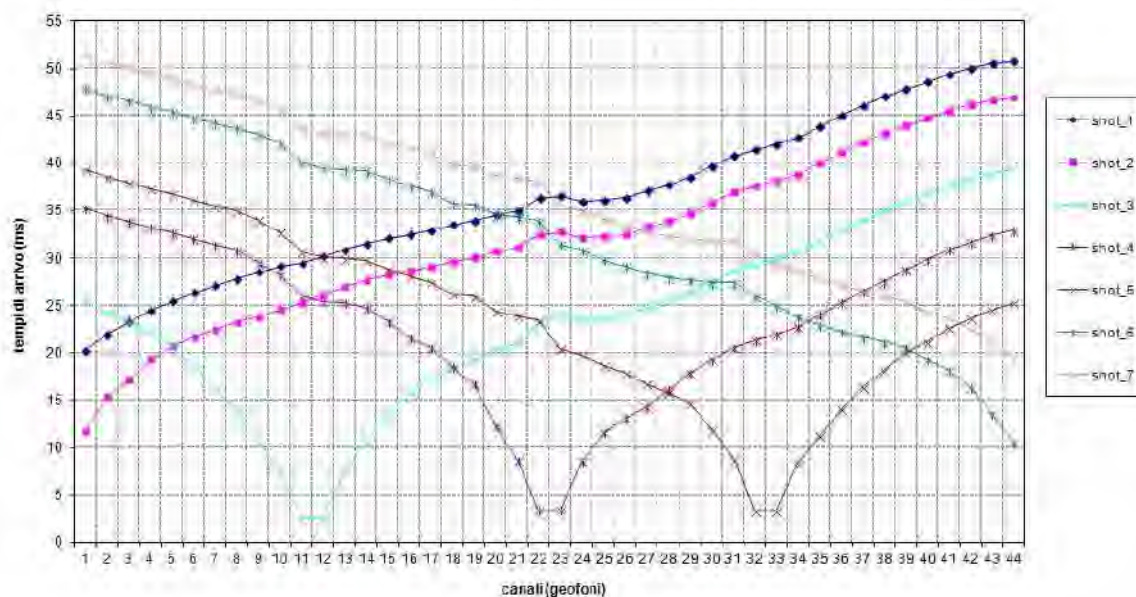


Fig. 7.6 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Tomografia sismica in onde P. Profilo SRT1. Dromocrone.

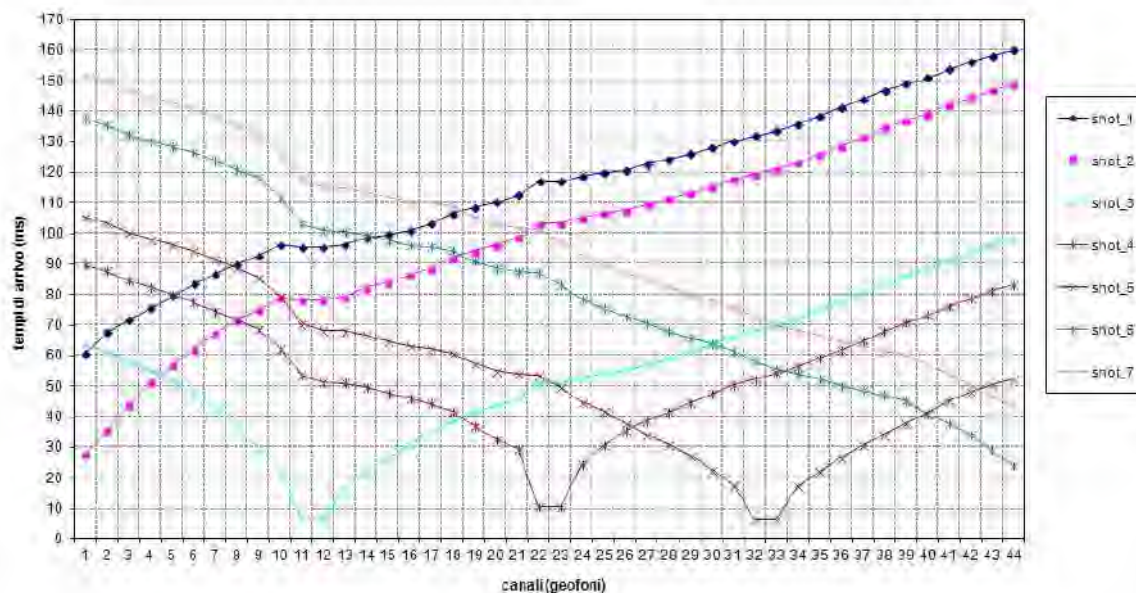


Fig. 7.7 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Tomografia sismica in onde SH. Profilo SRT1. Dromocrone.

Le pseudosezioni elaborate per il profilo sismico SRT₁, sulla base del gradiente geosismico, hanno permesso di evidenziare due sismostrati (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Il primo sismostrato si attesta tra il piano campagna e l'isolinea di 2.600 m/s (valori minimi di 400 m/s), per le onde P, mentre per le onde S si attesta attorno all'isolinea di 800 m/s (con valori minimi di circa 280 m/s), e presenta uno spessore di circa 7,5 m. 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 2.600 e fino a 3.800 m/s, mentre per le onde S, risultano superiori a 800 e fino a 1.150 m/s.

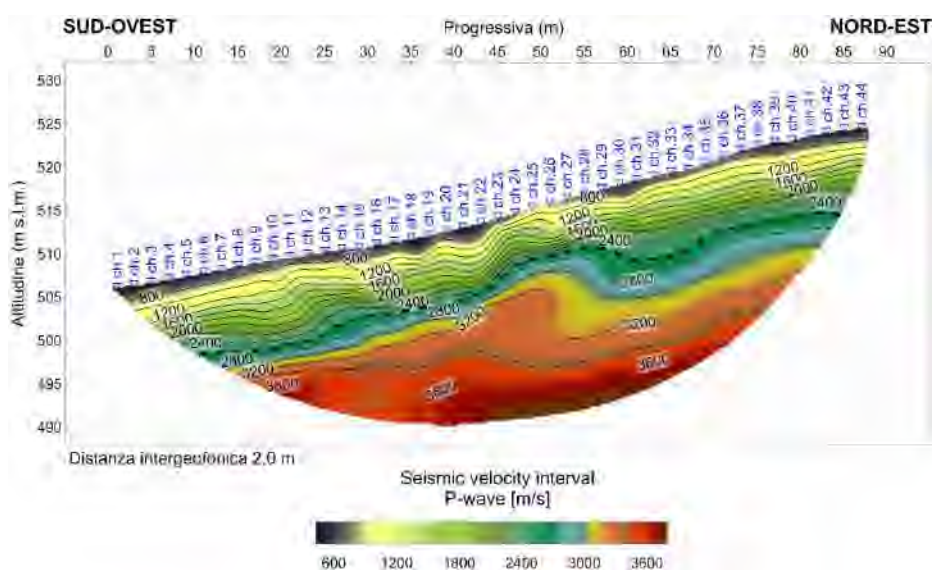


Fig. 7.8 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Tomografia sismica in onde P. Profilo SRT1. Pseudo sezione in onde P.

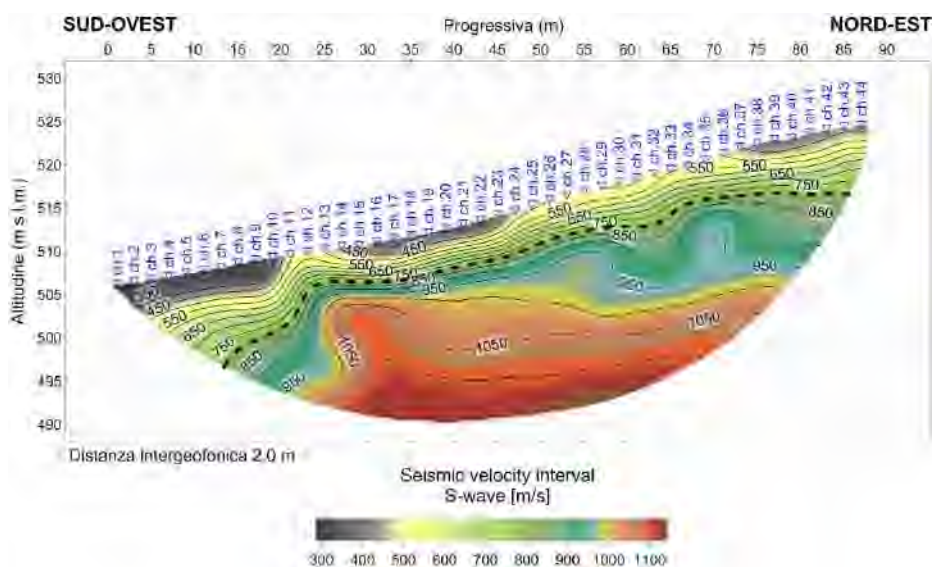


Fig. 7.9 – Frana vapordotto San Paolo. Larderello (PI). Tomografia sismica in onde SH. Profilo SRT1. Pseudo sezione in onde SH.