

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE EDILE E AMBIENTALE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

**“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)**

RELAZIONE FINALE

Responsabile Scientifico: prof.ing.Michele Cercato

**Team scientifico:
prof.ing. Michele Cercato,
ing. Francesco Saverio Desideri, sig. Francesco Pugliese**

Realizzata per:



INGV

**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma**

23 gennaio 2018

**Università degli Studi di Roma “La Sapienza”
CF 80209930587 PI 02133771002
D.I.C.E.A. – Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Via Eudossiana 18, 00184 Roma
T (+39) 06 44585089 F (+39) 06 44585091
<http://www.dicea.uniroma1.it>**



*“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)*

| | |
|---|----|
| PREMESSA | 3 |
| 1. MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLA PROVA | 3 |
| Strumentazione | 3 |
| Misure preliminari ed impostazione dei parametri di acquisizione | 4 |
| Geometria del rilievo e modalità d’interpretazione dei risultati | 5 |
| 2. ANALISI e INTERPRETAZIONEDATI | 6 |
| Processing dei sismogrammi | 6 |
| Individuazione dei tempi di arrivo delle onde P e delle onde S | 7 |
| Determinazione delle velocità sismiche (P ed S)degli strati | 9 |
| 4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | 12 |
| Allegato A. Risultati della prova downhole | 13 |



PREMESSA

La campagna d'indagine geofisica oggetto della presente relazione consiste in un'indagine sismica downhole per la determinazione dei profili di velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P) e delle onde di taglio (onde S). La prova è eseguita in foro di sondaggio opportunamente condizionato, ovvero attrezzato con tubo di rivestimento in PVC. La cementazione dell'intercapedine foro-tubo garantisce la continuità del contatto terreno-tubazione su tutta la verticale di sondaggio.

1. MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLA PROVA

In questa sezione, si forniscono sinteticamente le caratteristiche della strumentazione utilizzata, nonché la geometria e i parametri di acquisizione impiegati per il rilievo downhole.

Strumentazione

La strumentazione utilizzata è costituita da tre componenti principali: la sorgente, i ricevitori e l'acquisitore digitale (sismografo).

Le caratteristiche delle sorgenti da impiegare sono principalmente legate al tipo di perturbazione sismica che si vuole generare. Generalmente, è necessario impiegare tipologie differenti a seconda che si vogliono generare principalmente onde P (longitudinali) o onde S (onde di taglio).

Per la generazione prevalente di onde SH (onde S polarizzate in direzione orizzontale) si è impiegata una sorgente in Alluminio costruita dall'Area di Geofisica del DICEA.

Tale sorgente (Fig. 1a) permette la generazione di onde SH tramite l'impatto di una massa battente su una piastra di battuta sub verticale. La reversibilità del verso di battuta consente di eseguire una lettura dell'onda S per opposizione di fase sui sismogrammi registrati. Per quanto riguarda le onde P, esse vengono ricavate da una prova che impiega battute verticali su piastra metallica (Fig. 1b), quindi utilizzando una energizzazione separata.

Per l'acquisizione, la digitalizzazione e la registrazione dei dati su supporto informatico si è impiegato il sismografo digitale a 24 canali ES-3000 Geode[®] di Geometrics Inc., il quale permette una conversione A/D a 24bit, intervallo di campionamento minimo pari a 20.125 μ s ed un numero di campioni registrabili pari a 16.384.

Il sismografo si interfaccia con un laptop su cui è possibile visualizzare in tempo reale il dato acquisito e nello stesso tempo monitorare il livello del rumore ambientale.

Per garantire un'elevata precisione (dell'ordine dell'intervallo di campionamento) dell'istante iniziale di registrazione, si è utilizzato un sistema di *trigger* a chiusura di circuito, con collegamento elettrico monopolare alla piastra di battuta ed alla massa battente.



*“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)*

Completa la strumentazione il Geofono tridirezionale BHG-2 Geostuff® (frequenza nominale pari a 14 Hz), il quale viene ancorato alla parete del foro per mezzo di un meccanismo di serraggio elettrico in metallo, controllato tramite un'unità remota. Tale geofono, a tre componenti (una verticale e due orizzontali ortogonali), è dotato di bussola per l'orientamento in foro. La lunghezza del corpo del geofono (che garantisce l'alloggio della bussola e del meccanismo di serraggio), è pari circa ad 80 cm.



Figura 1: a) Sorgente a impatto per la generazione di onde SH. b) Generazione di onde P tramite colpo vibrato in verticale su piastra metallica.

Misure preliminari ed impostazione dei parametri di acquisizione

Quando viene utilizzata la sorgente in alluminio per la generazione delle onde SH, per massimizzare la generazione delle stesse si dispone la sorgente in maniera tale che l'asse di simmetria passante per le due piastre di battuta della sorgente sia perpendicolare alla congiungente tra il foro e la sorgente (Fig. 1a e Fig. 2).

A seguito di alcune misure preliminari, sono stati selezionati i parametri di acquisizione (mantenuti costanti per tutta la durata della prova downhole oggetto del presente rapporto) riportati in Tab. 1.



“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)

- Intervallo di campionamento: $\Delta t = 31.25\mu s$
- Lunghezza della traccia: $T_l = 0.512 s$
- Filtri in acquisizione: NO
- Salvataggio: manuale
- Energizzazione: azionamento manuale
- Stacking: SI
- Formato file: SEG2 (Pullan 1990)
- Acquisizione separata rilievi onde P ed onde S.

Tabella 1. Parametri di acquisizione indagine downhole.

Geometria del rilievo e modalità d'interpretazione dei risultati

Per la geometria di acquisizione il riferimento è lo standard ASTM D7400-08 e successive revisioni.

I dati vengono acquisiti posizionando la sorgente ad una distanza fissa dal foro di sondaggio, e spostando successivamente il geofono tridirezionale a diverse profondità. Le stazioni di misura sono poste ad intervalli di un metro lungo la verticale del foro.

Nel caso del rilievo ad onde S, per ogni stazione di misura sono eseguite un minimo di due registrazioni, invertendo almeno una volta l'orientazione della sorgente.

Per ciascuna stazione di misura il numero di energizzazioni ripetute (*stacking*) ed il numero di registrazioni è stato scelto sulla base della stima in tempo reale del rapporto segnale-rumore.

In linea di principio, le letture sono da effettuarsi individuando i tempi di primo arrivo dal verso opposto della partenza dell'onda S sulla componente trasversale di sismogrammi registrati alla stessa profondità e relativi alle due direzioni di energizzazione (disposte a 180°), come mostrato in Fig.2.



“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)

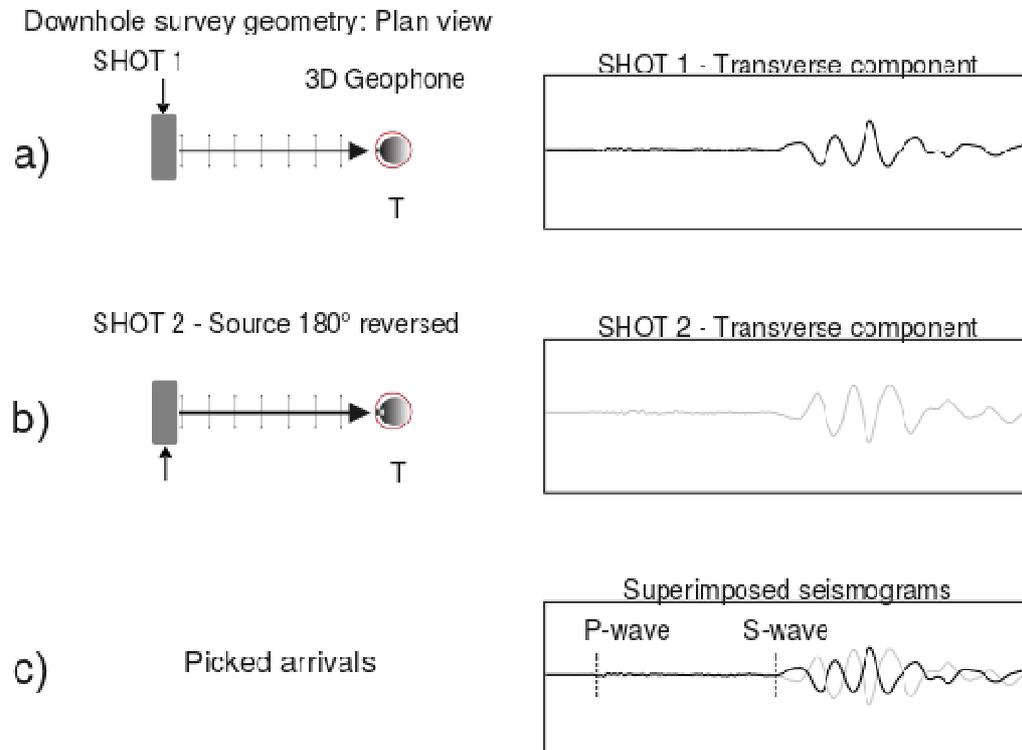


Figura 2: Identificazione dell'arrivo dell'onda di taglio sul sismogramma relativo alla componente trasversale del geofono da foro. La direzione di battuta è normale alla congiungente i due fori. a) Viene eseguita la prima energizzazione (Shot 1). b) La direzione di battuta viene ruotata di 180° rispetto alla direzione del primo scoppio e viene eseguita una nuova energizzazione. c) Identificazione del tempo di arrivo dell'onda S per opposizione di fase sovrapponendo i sismogrammi registrati per ciascun verso di scoppio (da Cercato et al. 2010, modificato).

2. ANALISI e INTERPRETAZIONEDATI

Processing dei sismogrammi

Pur mantenendo la prova downhole la caratteristica di misura sismica semi-diretta, che non dovrebbe dunque richiedere un particolare tipo di processing del segnale, alcune operazioni possono rendersi necessarie ai fini della restituzione dei sismogrammi per l'individuazione dei tempi di arrivo, in particolare dell'onda S.

In primo luogo, tutti i sismogrammi registrati vengono ispezionati visivamente.

Alcune analisi possono essere d'aiuto per le operazioni successive, come il calcolo dello spettro di Ampiezza (*Amplitude Fourier spectrum*) o lo spettro frequenza-tempo (*Gabor spectrum*) al fine di individuare le frequenze caratteristiche dei segnali presenti sul sismogramma, nonché per guidare eventuali operazioni di filtraggio in frequenza.



**“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)**

Nel caso in cui si riconosca la presenza di rumore al di fuori della banda di frequenza del segnale, le tracce sismiche possono essere filtrate.

Nelle indagini oggetto della presente relazione, si è applicato un filtro “taglia alto”, con frequenza di taglio pari a 400 Hz, per eliminare il rumore ad alta frequenza di natura elettrica. Altre operazioni accessorie hanno riguardato l’operazione di *muting* della parte iniziale di alcuni sismogrammi, dove era troppo evidente il disturbo elettrico indotto dall’apertura del circuito di registrazione.

Nel caso in cui siano presenti più sismogrammi per assegnati profondità e verso di energizzazione, si decide, in dipendenza dal rapporto segnale rumore, se eseguire la somma delle singole registrazioni (*stacking*), ovvero si individua un solo file da utilizzare per la successiva operazione di lettura dei tempi (*picking*).

La prima operazione che è necessario compiere per impostare la fase di *processing* consiste nell’inserimento su ciascun file delle informazioni sulla geometria, quali profondità di sorgente e ricevitore, direzione dei canali etc.

Si procede quindi ad estrarre, per ogni file, la sola componente d’interesse ai fini del rilievo.

Per indagini ad onde P viene estratta la componente verticale, mentre per le onde S viene generalmente estratta la componente trasversale, sulla quale, data la geometria del rilievo, è massimizzata l’ampiezza in ricezione dell’onda SH generata in superficie. La precisione dell’orientazione stimata con bussola magnetica è dell’ordine dei 10-15 gradi per cui, nel caso di non perfetto allineamento delle due componenti orizzontali con la congiungente sorgente-ricevitore, è possibile ricorrere alla somma vettoriale delle componenti orizzontali o alla scelta della componente meglio allineata con la sorgente, dove siano più evidenti gli arrivi delle onde di taglio.

Individuazione dei tempi di arrivo delle onde P e delle onde S

Per ciascun verso di energizzazione, si compone un pannello sismico costituito dalla componente d’interesse per tutte le profondità di misura.

Per le onde P si ha a disposizione una traccia per ciascuna profondità. Su ciascuna traccia, il primo arrivo costituisce il tempo individuato per l’arrivo dell’onda P (Fig. 3). Per le onde P viene in genere impiegata la componente verticale, relativa ad una energizzazione con massa battente verticale.



“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)

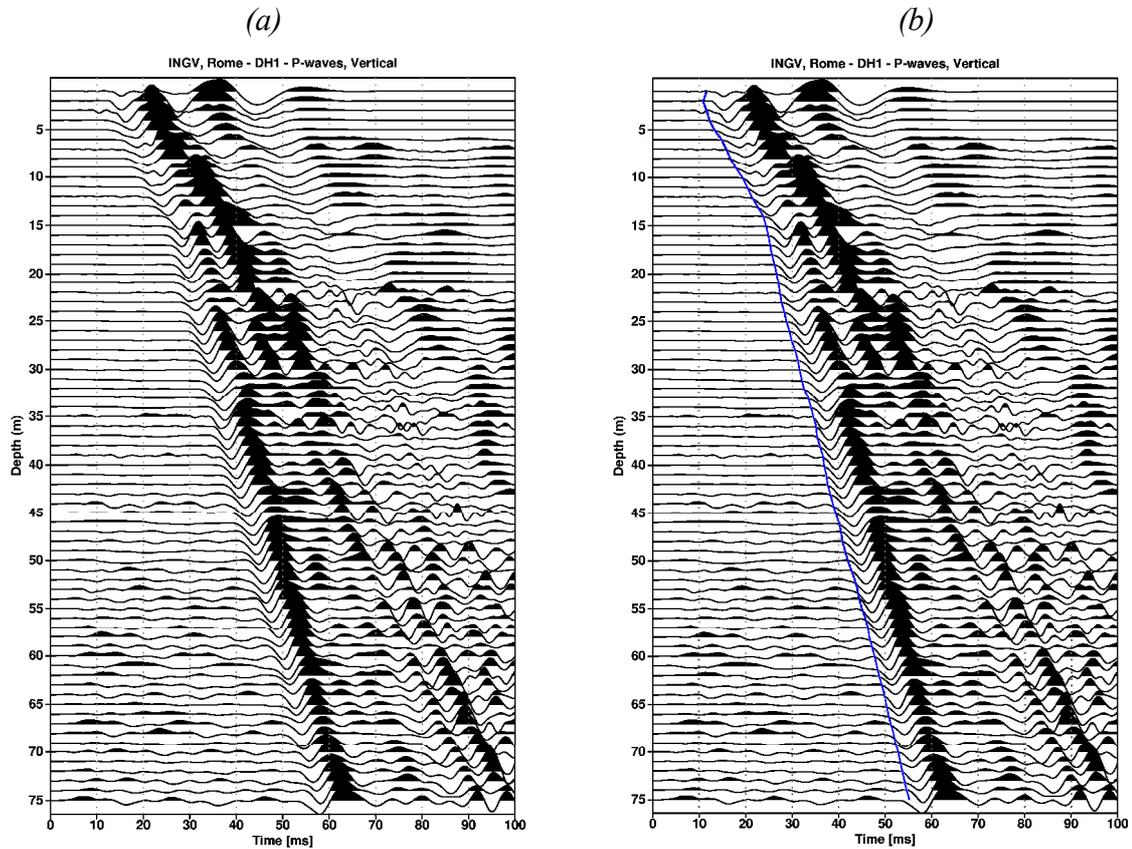


Figura 3: Esempio di picking dei tempi di arrivo delle onde P. (a) Pannello riportante le registrazioni della componente verticale di un'indagine downhole. (b) Lo stesso pannello riportato in (a), con evidenziati in blu i tempi di arrivo dell'onda P (primi arrivi).

Nei rilievi ad onde S (Fig.4), al termine di questa prima fase il set di dati è costituito da due file sismici (Fig. 4a e Fig. 4b), relativi alle due direzioni di energizzazione opposte della sorgente ad onde S, riportanti le tracce (componente trasversale) registrate per ciascuna profondità di misura (ogni metro, lungo la verticale di sondaggio).

Tali file vengono generalmente rappresentati come sovrapposti (Fig. 4c) per evidenziare l'arrivo dell'onda S.



“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)

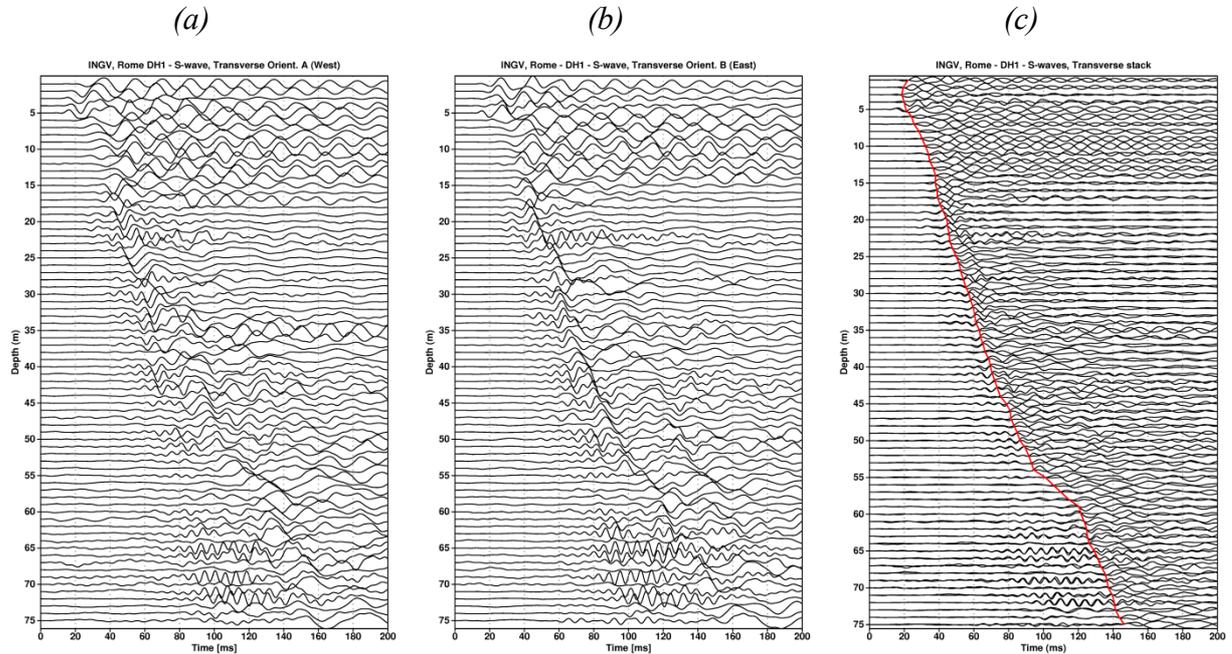


Figura 4: Esempio di picking dei tempi di arrivo delle onde S sulle registrazioni relative alla componente trasversale per le diverse profondità di registrazione di un'indagine downhole. (a) e (b) Pannelli relativi a due versi opposti di energizzazione. (c) Pannello ottenuto dalla sovrapposizione dei pannelli (a) e (b), con evidenziati in rosso i tempi di arrivo dell'onda S, individuati dall'opposizione di fase dei sismogrammi relativi ai due versi di energizzazione.

L'arrivo del segnale viene individuato sulla base delle seguenti osservazioni:

- presenza di impulsi speculari nelle componenti orizzontali delle registrazioni effettuate con energizzazioni di verso opposto.
- variazione di frequenza del treno d'onda.

Il picking degli arrivi delle onde S è effettuato manualmente confrontando, per ogni profondità di stazione, le due polarizzazioni opposte dell'onda di taglio SH (realizzate in campagna tramite energizzazioni in direzione opposta (180°)).

In caso di problemi di lettura, che rendono difficile l'individuazione del tempo di arrivo, si integra l'analisi con le letture dei primi massimi.

Determinazione delle velocità sismiche (P ed S) degli strati

I tempi di arrivo delle onde (P ed S) individuati sui relativi sismogrammi secondo quanto descritto in precedenza, vengono sottoposti ad un processo di inversione euristica per la determinazione del profilo a miglior misfit.

L'algoritmo utilizzato per la ricerca globale è il Very Fast Simulated Annealing (VFSA) (Ingber 1989), mentre per il calcolo del problema diretto, cioè la determinazione dei tempi di



*“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)*

viaggio e del percorso dei raggi sismici in un modello di sottosuolo a strati piano-paralleli, si utilizza un algoritmo di ray-tracing a due punti così come descritto in Tian e Chen (2005).

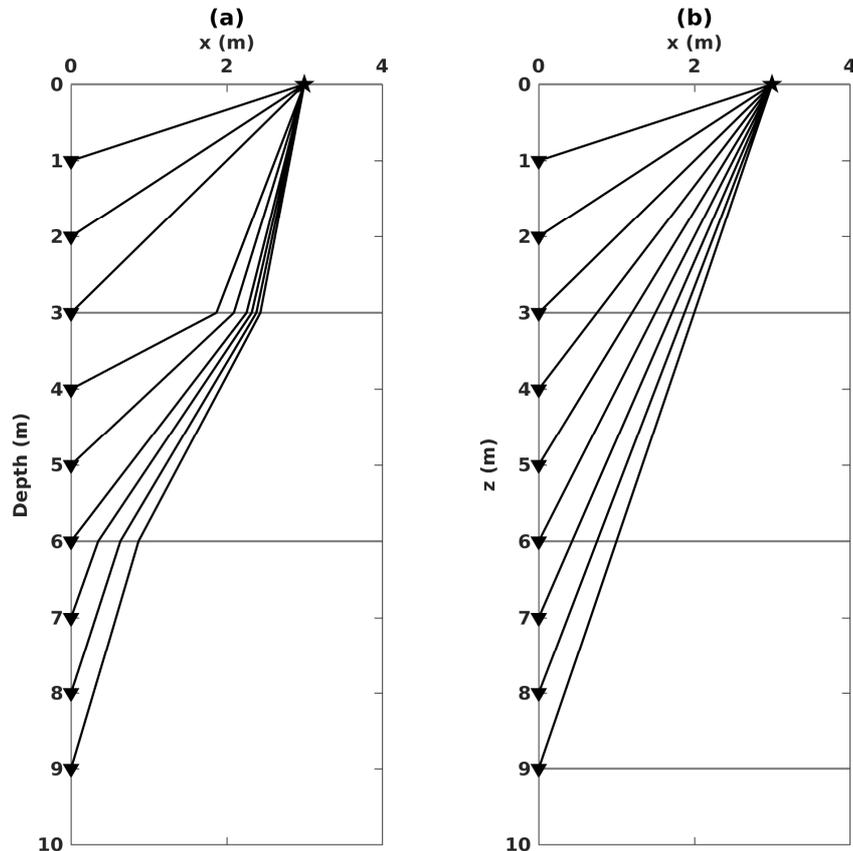


Figura 5: Confronto tra (a) raggi rifratti e (b) raggi rettilinei che non tengono conto delle modifiche di traiettoria dovute alle variazioni di velocità con la profondità.

Tale algoritmo permette di calcolare l'effettivo percorso dei raggi limitando al minimo il giudizio dell'operatore sulla regolarizzazione ed interpolazione delle curve profondità-tempo, senza dover assumere forzatamente un'ipotesi di propagazione rettilinea dei raggi sismici, la quale potrebbe essere giustificata nei casi in esame per le ridotte distanze di offset tra sorgente e boccaforo (Fig.5).

La procedura di inversione tramite VFSA ha impiegato 20 cicli completi da 10000 estrazioni casuali, per totale di modelli esaminati pari a 800000. Tra tutti i modelli analizzati viene estratto il modello a minor misfit. Si sono condotte inversioni separate per la restituzione dei profili ad onde S ed onde P, rispettivamente.



*“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)*

Per quanto riguarda la discretizzazione del modello, a partire dalla ricostruzione stratigrafica, sono stati inseriti ulteriori strati all'interno della stessa unità litologica lì dove venivano evidenziate delle eterogeneità rilevanti in termini di velocità.

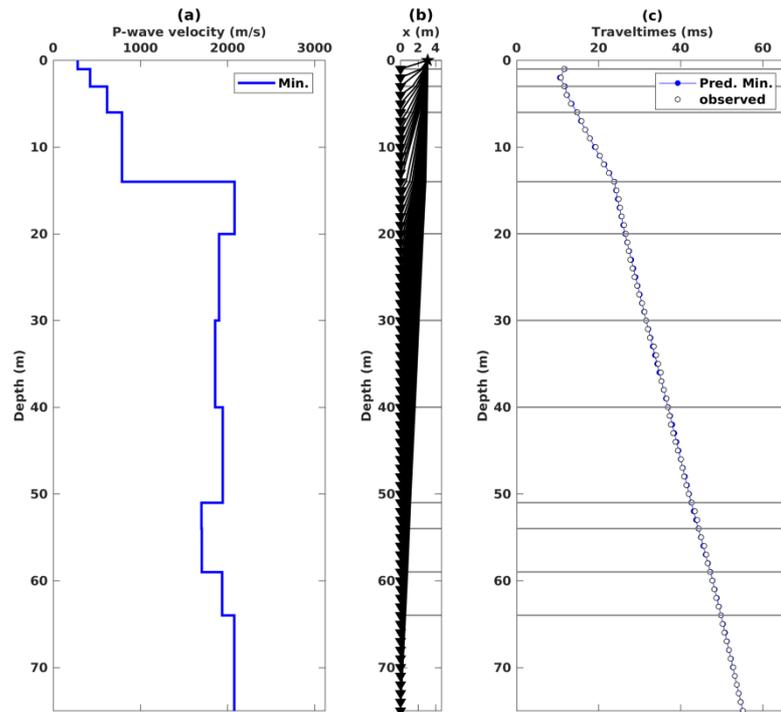


Figura 6: Esempio di restituzione dei risultati dell'inversione.. a) Profilo di velocità. b) Traiettorie dei raggi sismici (ray-tracing). c) Confronto tra tempi osservati e tempi teorici relativi al modello inverso.

Per quanto riguarda il campo di variabilità dei parametri, si è cercato di esplorare uno spazio delle soluzioni piuttosto ampio, considerando intervalli compresi tra 100 m/s e 2000 m/s per le onde S e tra 200 m/s e 4000 m/s per le onde P.

Per ciascuna inversione (P e/o S) viene restituito il modello a minimum misfit, completo di raytracing e di confronto tra tempi osservati e tempi teorici relativi al modello inverso (Fig.6).

I profili sono poi messi a confronto con la stratigrafia del sito per evidenziare la corrispondenza delle velocità con i litotipi individuati.



*“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)*

3. ELENCO DEGLI ALLEGATI

I risultati della provasono riportati e sinteticamente commentati nell'allegato A alla presente relazione.

Il Responsabile Scientifico
ing. Michele Cercato

4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

ASTM D7400-08, 2008. Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing. ASTM International.

Cercato M., Cara F., Cardarelli E., Di Filippo G., Di Giulio G and Milana G. 2010. Shear-wave velocity profiling at sites with high stiffness contrasts: a comparison between invasive and non-invasive methods. *Near Surface Geophysics* 8, 75-94.

Ingber L. 1989. Very fast simulated re-annealing. *Mathematical and Computer Modelling* 12, 967-973.

Pullan, S. E., 1990. Recommended standard for seismic/radar files in the personal computer environment: *Geophysics* 55, 1260-1271.

Tian Y. And Chen X., 2005. A rapid and accurate two-point ray tracing method in horizontally layered velocity model. *Acta Sismologica Sinica* 18, 154-161.



*“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)*

Allegato A. Risultati della prova downhole

(a)

(b)



Località:
INGV – Sede di Roma
*Via di Vigna Murata 605
00143 Roma*

Ubicazione ED50:
N 41,82970 ; E 12,51565

Profondità di perforazione: 80 m

**Profondità raggiunta dall'indagine
downhole:** 75 m (fondo foro)

Figura A.1: a) Layout della strumentazione durante il rilievo. b) Informazioni sulla prova downhole.

Nella Fig.A.2 e nella Fig.A.3 sono rappresentati i pannelli di sintesi con i tempi di picking, rispettivamente per le onde P e per le onde S.

Nella Fig.A.4 sono rappresentati i risultati dell'inversione dei tempi di arrivo delle onde P.

Nella Fig.A.5 sono rappresentati i risultati dell'inversione dei tempi di arrivo delle onde S e La Tab.A.1 riporta i valori numerici del modello risultante dal processo di inversione.

La Fig. A.6 riporta i profili di velocità (sia per le onde P che per le onde S), messi a confronto con una stratigrafia semplificata del sito d'indagine.

L'andamento delle velocità ben si rapporta alle variazioni stratigrafiche. Si osserva in generale una buona corrispondenza tra litotipi e variazioni di velocità, anche se l'indagine ha evidenziato una marcata eterogeneità in termini di velocità delle onde sismiche all'interno delle piroclastiti, come per esempio il sismostrato compreso tra 14m e 20m di profondità dal p.c., caratterizzato da elevati valori di velocità (superiori a 1000 m/s per le V_S).

Le alluvioni alla base delle piroclastiti (sabbie e ghiaie) denunciano una marcata inversione di velocità sia in termini di onde P che di onde S.

I valori delle argille marnose a profondità maggiori di 64m dal p.c. sono dell'ordine dei 620 m/s.



“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)

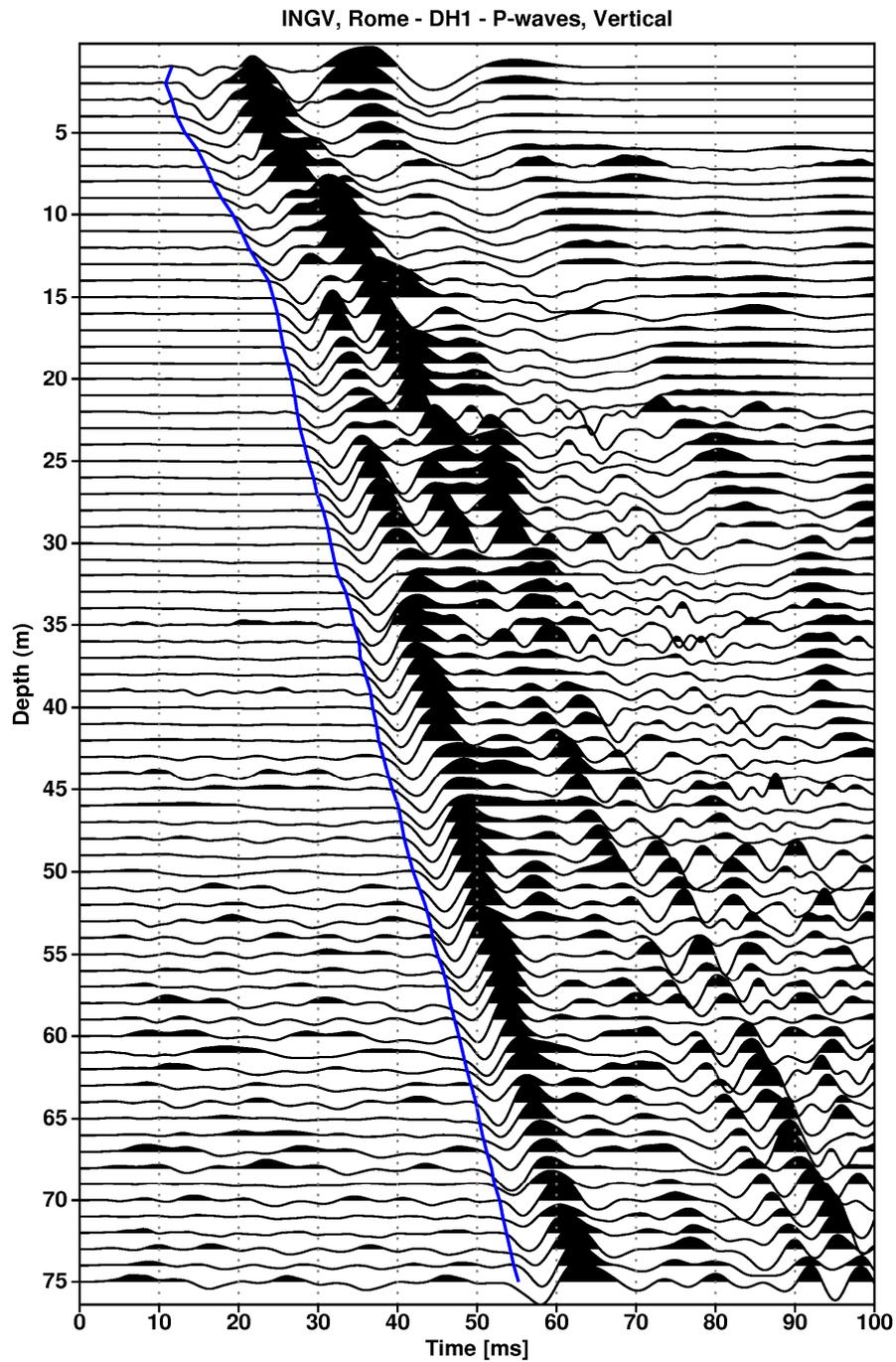


Figura A.2. Onde P, componente verticale. La linea blu individua i tempi di primo arrivo.



“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)

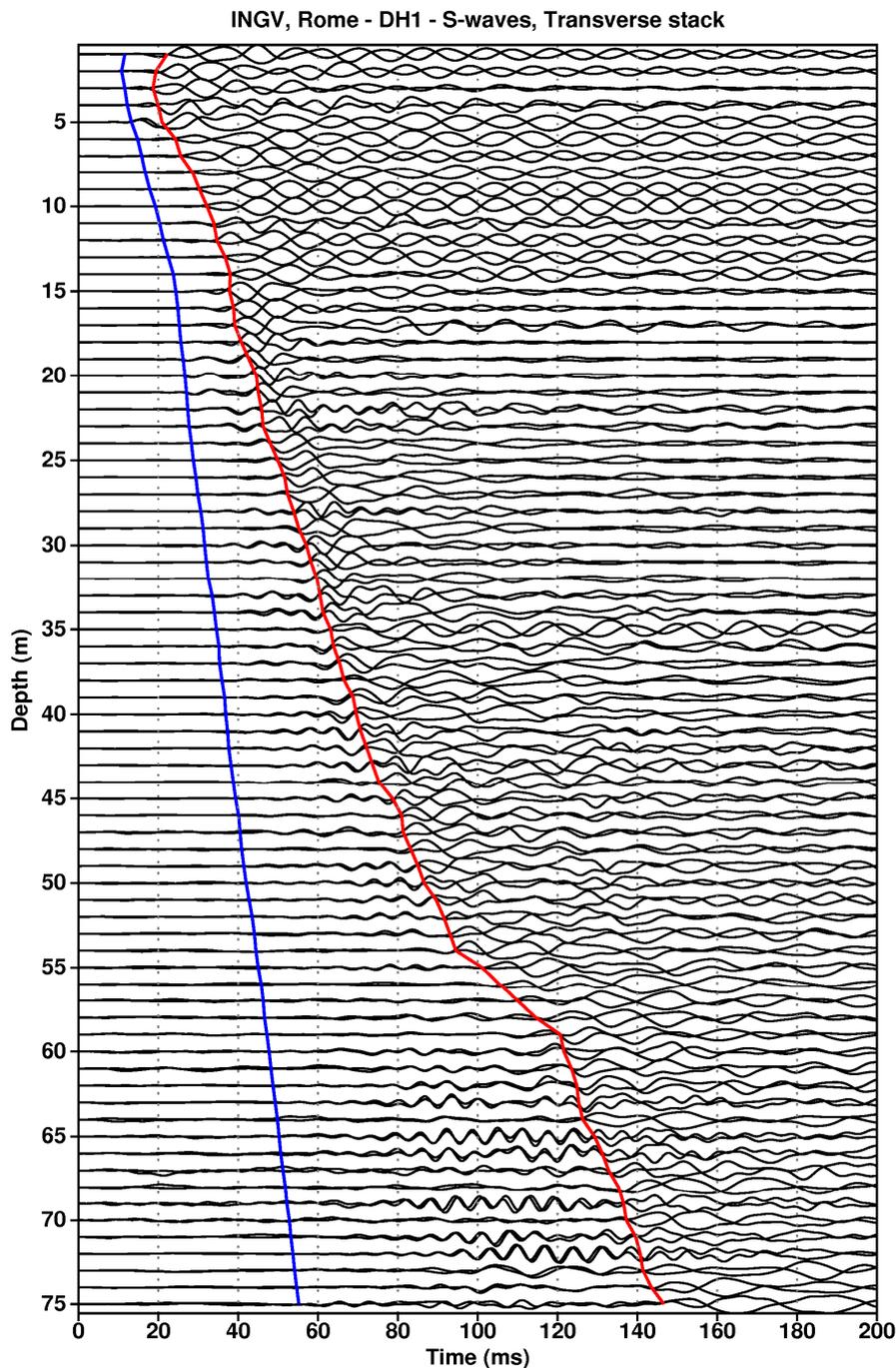


Figura A.3. Onde S, pannello della componente trasversale relativa ai due versi opposti di energizzazione. La linea rossa individua i tempi di arrivo dell'onda S, mentre la linea blu riporta i tempi di primo arrivo individuati in per le onde P (vedi figura precedente).



“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)

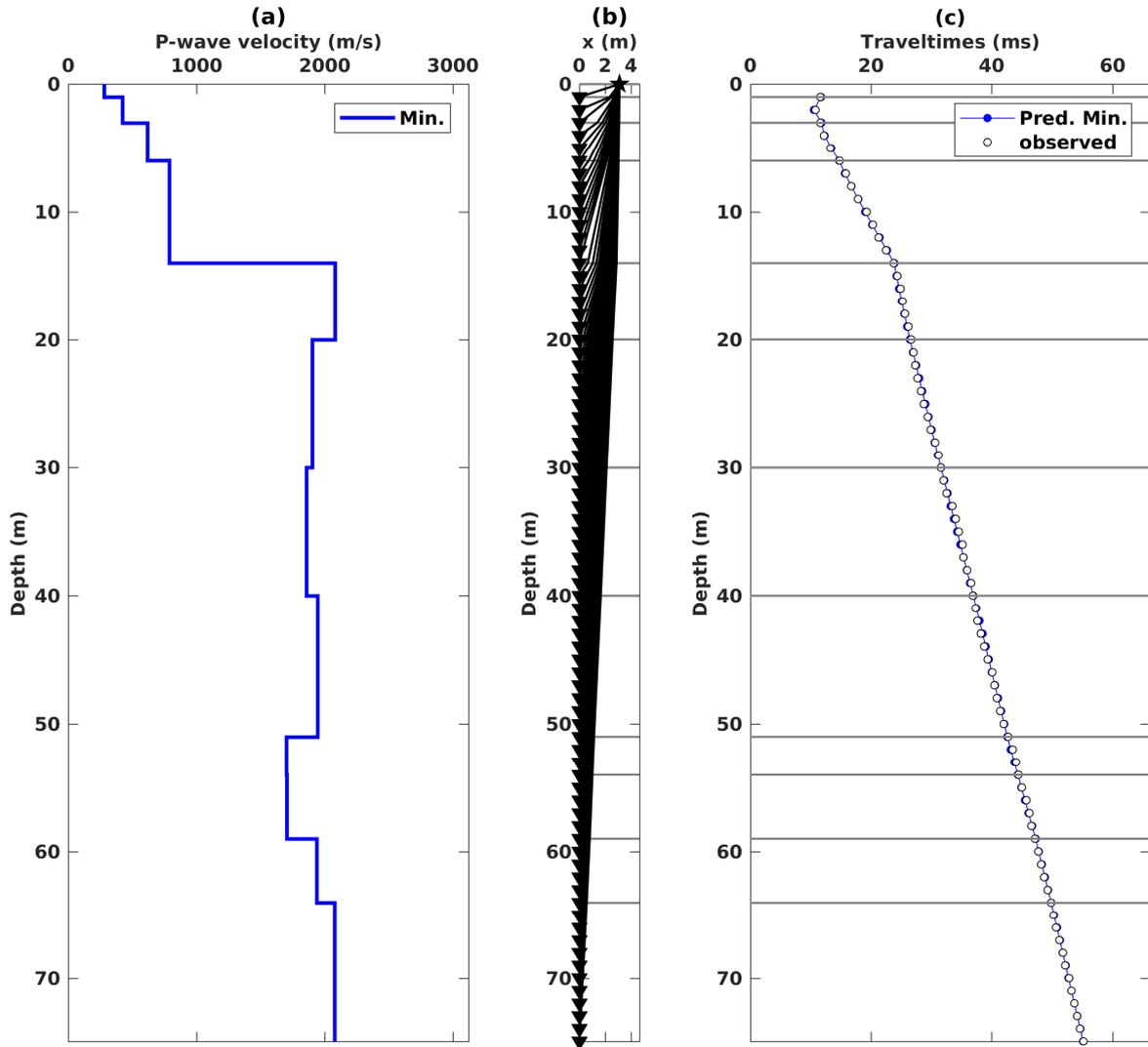


Figura A.4. Onde P. risultato del processo di inversione. a) Profilo di velocità. b) Traiettorie dei raggi sismici (ray-tracing). c) Confronto tra tempi osservati e tempi teorici relativi al modello inverso.



“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)

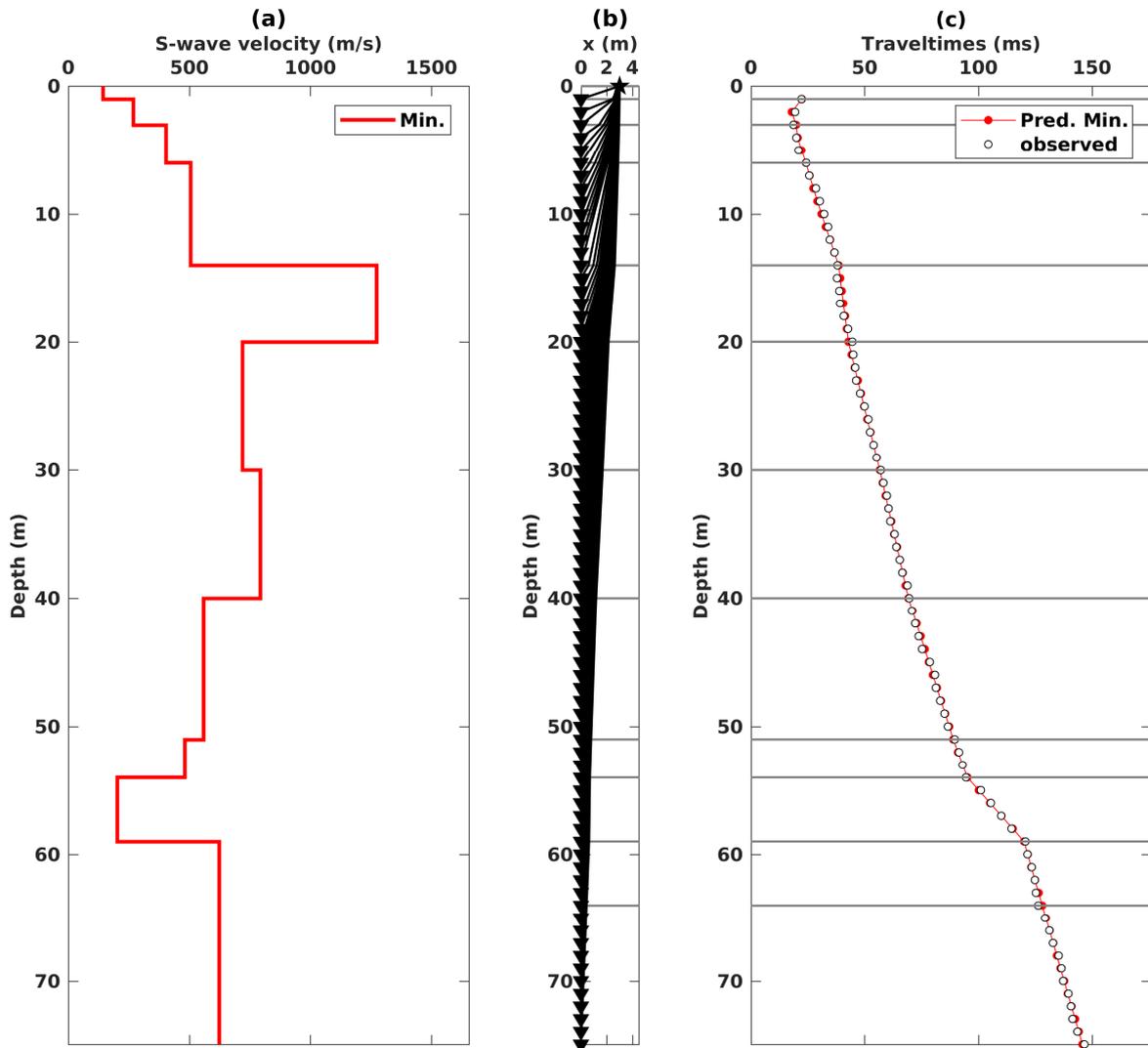


Figura A.5. Onde S. risultato del processo di inversione. a) Profilo di velocità. b) Traiettorie dei raggi sismici (ray-tracing). c) Confronto tra tempi osservati e tempi teorici relativi al modello inverso.



“Risultati delle prove geofisiche in foro di tipo Down-Hole (DH)”
Sede INGV - Via di Vigna Murata 605 (RM)

| Strato | h (m) | V_P (m/s) | V_S (m/s) | ν |
|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1 | 1.0 | 279 | 142 | 0.33 |
| 2 | 2.0 | 422 | 268 | 0.16 |
| 3 | 3.0 | 616 | 403 | 0.13 |
| 4 | 8.0 | 789 | 505 | 0.15 |
| 5 | 6.0 | 2082 | 1274 | 0.20 |
| 6 | 10.0 | 1904 | 718 | 0.42 |
| 7 | 10.0 | 1856 | 793 | 0.39 |
| 8 | 11.0 | 1945 | 558 | 0.46 |
| 9 | 3.0 | 1699 | 480 | 0.46 |
| 10 | 5.0 | 1703 | 201 | 0.49 |
| 11 | 5.0 | 1937 | 622 | 0.44 |
| 12 | ∞ | 2076 | 624 | 0.45 |

Tabella A.1. Modello sismo-stratigrafico risultante dall'indagine downhole. Con h è indicato lo spessore dello strato mentre ν è il coefficiente di Poisson.

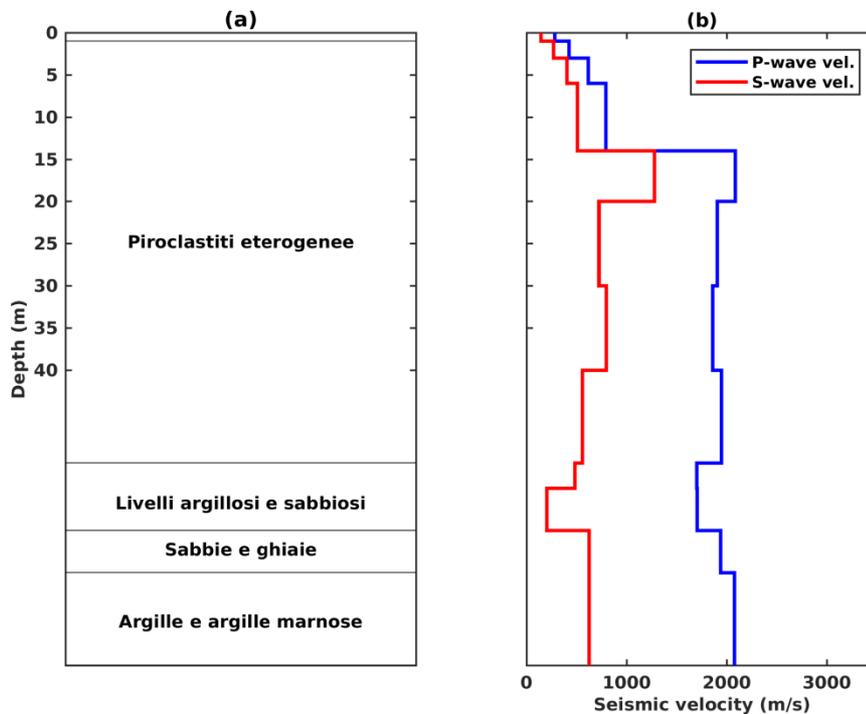


Figura A.6. (a) Colonna stratigrafica semplificata. (b) Andamento delle velocità con la profondità, come da Tabella precedente.