

Attuazione dell'articolo 11 dalla legge 24 giugno 2009. n.77

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Tomografie sismiche in onde P

Regione Emilia-Romagna

Comune di Traversetolo



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Dott. Geol. Emiliano Occhi	Maggio 2018

## A. METODOLOGIA

La prospezione consiste nel generare un'onda sismica di compressione o di taglio nel terreno attraverso una determinata sorgente di energia (colpo di mazza o di maglio, esplosivo etc.) e nel misurare il tempo impiegato da questa a compiere il percorso nel sottosuolo dal punto di energizzazione (shot) fino agli apparecchi di ricezione (geofoni) seguendo le leggi di rifrazione dell'ottica (Legge di Snell), cioè rifrangendosi sulle superfici di separazione tra due strati sovrapposti di densità (o meglio di modulo elastico) crescente.

La strumentazione necessaria per le prospezioni comprende una serie di geofoni che vengono spazati lungo un determinato allineamento (base sismica) e un sismografo che registra l'istante di inizio della perturbazione elastica ed i tempi di primo arrivo delle onde a ciascun geofono (Figura 1). Così, osservando i primi arrivi su punti posti a distanze diverse dalla sorgente energizzante, è possibile costruire una curva tempo-distanza (dromocrona) rappresentante la variazione del minimo percorso in funzione del tempo. Attraverso metodi analitici si ricavano quindi le velocità delle onde elastiche longitudinali ( $V_p$ ) o trasversali ( $V_s$ ) dei mezzi attraversati ed il loro spessore.

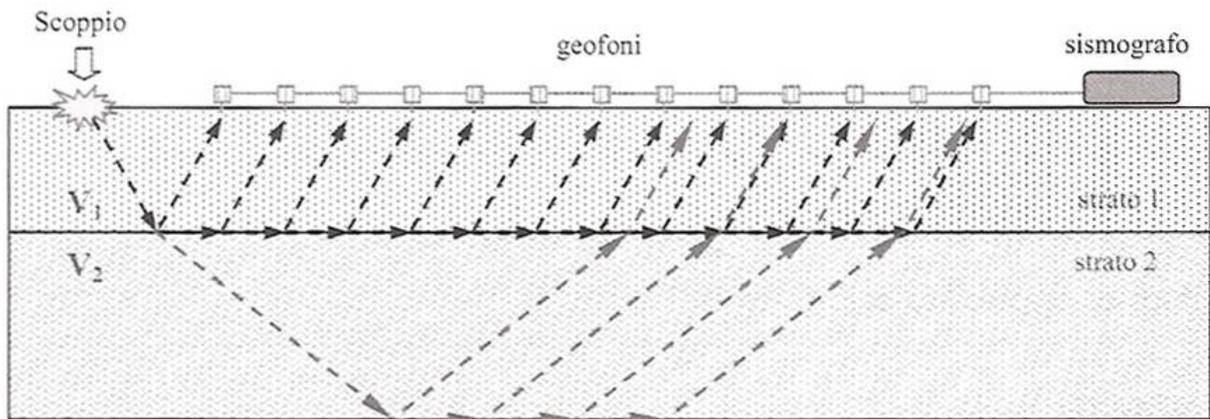


Figura 1. Metodo sismico a rifrazione.

La velocità di propagazione delle onde elastiche nel suolo è compresa tra larghi limiti; per lo stesso tipo di roccia essa diminuisce col grado di alterazione, di fessurazione e/o di fratturazione; aumenta per contro con la profondità e l'età geologica. Sensibili differenze si possono avere, in rocce stratificate, tra le velocità rilevate lungo i piani di strato e quelle rilevate perpendicolarmente a questi. La velocità delle onde compressionali, diversamente da quelle trasversali che non si trasmettono nell'acqua, è fortemente influenzata dalla presenza della falda acquifera e dal grado di saturazione. Questo comporta che anche litotipi differenti possano avere uguali velocità delle onde sismiche compressionali per cui non necessariamente l'interpretazione sismostratigrafica corrisponderà con la reale situazione geologico-stratigrafica.

I dati acquisiti sono stati elaborati secondo il metodo sismico-tomografico. L'elaborazione tomografica è una tecnica di indagine con un alto potere risolutivo che permette l'individuazione di anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche, offrendo la possibilità di ricostruire anomalie e discontinuità stratigrafiche anche particolarmente

complesse. Questa tecnica fornisce l'immagine della distribuzione delle onde sismiche sotto la superficie, basate sui tempi di primo arrivo (come nella normale sismica a rifrazione) e sulla geometria di acquisizione. Si ricostruisce in tal modo un modello di velocità, che può essere migliorato attraverso successive iterazioni: la fase di calcolo si conclude quando si ha la migliore sovrapposizione fra i tempi di primo arrivo calcolati e quelli misurati.

Le tomografie offrono comunque una maggiore discretizzazione delle velocità rispetto alla sismica a rifrazione tradizionale: è doveroso inoltre tener conto che il metodo topografico individua generalmente, per la caratteristica intrinseca dell'algoritmo di calcolo (basato sui gradienti di velocità), spessori diversi, di solito maggiori, di quelli valutati dalla sismica a rifrazione.

## B. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

### *STRUMENTAZIONE*

L'acquisizione dei dati è stata eseguita tramite l'utilizzo di un sismografo 24 canali (modello Echo 2002) collegato a 24 geofoni verticali aventi frequenza propria di 4.5 Hz. Come sorgente energizzante per le onde P è stata utilizzata una mazza da 8 Kg ad impatto verticale su piastra metallica.

È stato realizzato uno stendimento sismico lineare di lunghezza di 115 m, spaziatura tra i geofoni di 5 m e tempo di acquisizione pari a 200 ms.



*Figura 2. Stendimento sismico.*

L'energizzazione è stata effettuata in 7 punti lungo ciascun stendimento e precisamente nelle seguenti posizioni:

- due punti esterni a 2.5 m dai geofoni g1 e g24;
- cinque punti ubicati all'interno dello stendimento e precisamente in posizione intermedia tra i geofoni g4-g5, g8-g9, g12-g13, g16-g17, g20-g21.

<b>Geofono</b>	<b>Distanza da G1 (m)</b>	<b>Quota (m s.l.m.)</b>	<b>Geofono</b>	<b>Distanza da G1 (m)</b>	<b>Quota (m s.l.m.)</b>
G1	0,0	250,0	G13	60,0	241,2
G2	5,0	249,4	G14	65,0	240,3
G3	10,0	248,8	G15	70,0	239,7
G4	15,0	248,1	G16	75,0	239,3
G5	20,0	247,5	G17	80,0	238,9
G6	25,0	246,9	G18	85,0	238,5
G7	30,0	246,3	G19	90,0	238,1
G8	35,0	245,6	G20	95,0	237,7
G9	40,0	245,0	G21	100,0	235,5
G10	45,0	244,1	G22	105,0	235,0
G11	50,0	243,1	G23	110,0	234,3
G12	55,0	242,2	G24	115,0	233,5

<b>Shot</b>	<b>Distanza da G1 (m)</b>	<b>Quota (m s.l.m.)</b>	<b>Shot</b>	<b>Distanza da G1 (m)</b>	<b>Quota (m s.l.m.)</b>
1	-2,50	250,3	5	77,5	239,1
2	17,50	247,8	6	97,5	236,6
3	37,50	245,3	7	117,5	233,1
4	57,5	241,7			

Tabella 1. Posizione e quote dei geofoni e degli spari (shots) nello stendimento.

## ELABORAZIONE

I dati acquisiti sono stati processati con il software RAYFRACT versione 3.18 (Rowdewahl, 2003) per ricostruire sezioni tomografiche che rappresentano l'evoluzione della velocità sismica delle onde P o delle onde SH nel sottosuolo.

La prima fase prevede l'introduzione delle informazioni topografiche relative ai vari punti di posizionamento dei geofoni e dei tiri e il picking dei primi arrivi. Nelle figure successive si riportano le dromocrone misurate e calcolate, mentre in allegato si riportano tutti i sismogrammi acquisiti con i relativi picking dei primi arrivi.

Successivamente si procede ad una prima elaborazione che porta alla ricostruzione delle stratigrafie di velocità sismica con la tecnica Delta-t-V, cioè si ricompongono con cadenza pari alla metà della cadenza dei geofoni (CMP = *Common Mid Point*) le successioni di velocità compatibili con l'andamento di tutte le possibili dromocrone nei punti intermedi tra punto di tiro e geofono. Dal modello ricostruito come successione di stratigrafie di resistività viene elaborato un modello ad elementi finiti di piccolissime dimensioni (ordine di grandezza di qualche decimetro di lato) che può già rappresentare un attendibile modello del sottosuolo. Tuttavia questo rappresenta una prima approssimazione alla soluzione.

Il passo successivo è quello di ottimizzare, in maniera iterativa, il suddetto modello di partenza mediante la tecnica WET (*Wavepath Eikonal Traveltime*). In pratica si effettua il calcolo delle differenze dei tempi di arrivo dai vari punti di tiro ai vari geofoni, tra i valori sperimentali misurati nei sismogrammi ed i tempi calcolati sul modello di partenza. In base alle differenze riscontrate, per ciascun percorso delle onde sismiche, si apportano modifiche, in aumento o in diminuzione, delle velocità che caratterizzano i vari elementi che sono stati interessati dal passaggio del fronte d'onda considerato. Ad ogni iterazione, dopo avere apportato le modifiche alle velocità dei vari elementi, il nuovo modello viene sottoposto ad una operazione di "smoothing" che porta ad una migliore omogeneità dei valori di velocità entro aree di dimensioni maggiori. In genere sono sufficienti da 10 a 20 iterazioni per giungere ad un modello che porta a scarti medi tra i tempi (*Traveltime*) dei vari percorsi dell'ordine di qualche millisecondo (Schuster & Quintus-Bosz, 1999).

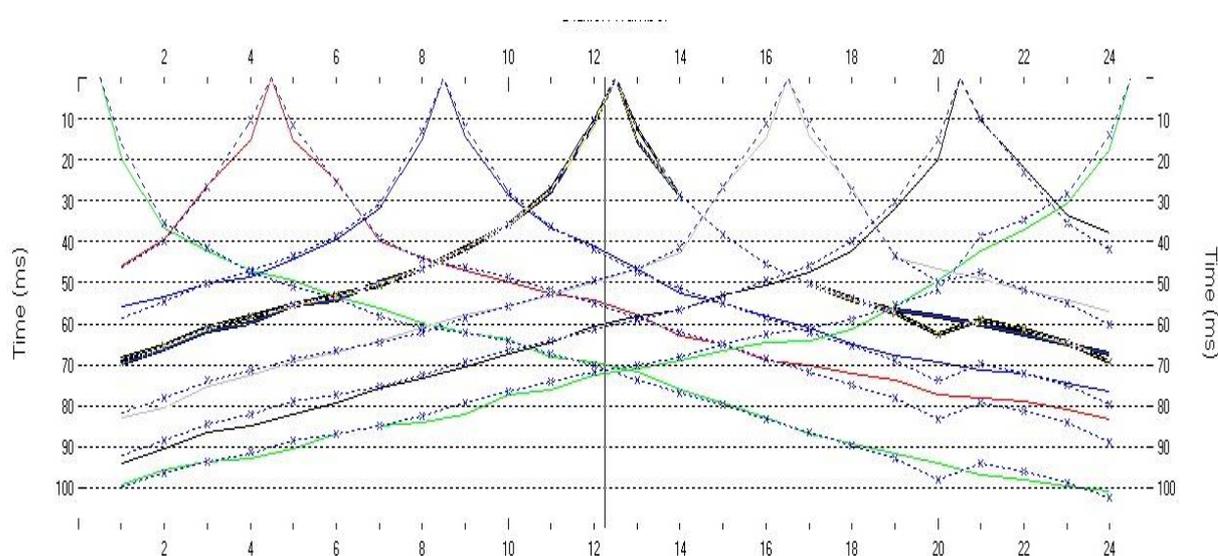


Figura 3. Dromocrone calcolate per i 7 shots. In ascissa i geofoni e in ordinata il tempo in millisecondi.

## C. RISULTATI

Con le modalità suddette è stata ottenuta la sezione tomografica relativa alla velocità delle onde P riportate nella figura seguente.

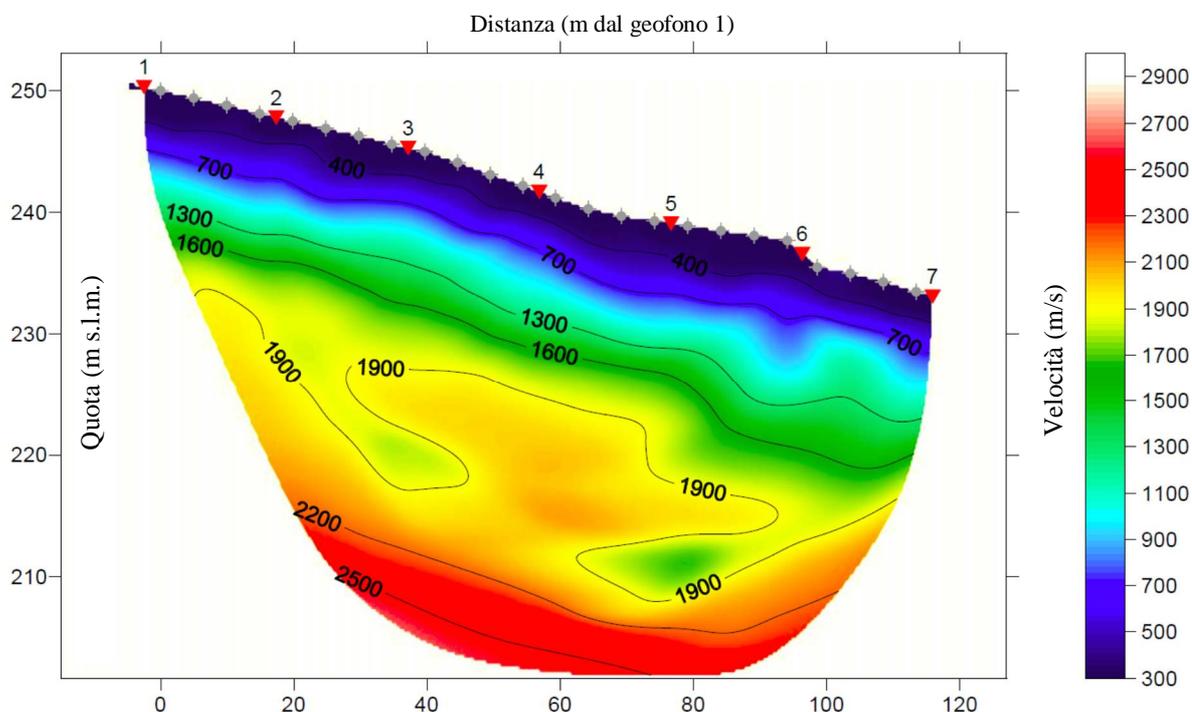


Figura 4. Sezione tomografica relativa allo stendimento sismico. G1 a sinistra e G24 a destra.

Sulla base delle velocità sismiche rilevate e in buon accordo con l'elaborazione Masw + HVSr è possibile individuare il seguente modello di sottosuolo:

- ✓ *Unità superficiale a bassa velocità:* velocità sismiche inferiori a 1300 m/sec e spessore medio di circa 10 metri. Dovrebbe trattarsi di depositi di natura gravitativa con caratteristiche geomeccaniche piuttosto scadenti;
- ✓ *Unità superficiale a velocità medio-alta:* velocità sismiche comprese tra 1300 e 2200 m/sec e spessore medio di circa 25 metri. Si tratta probabilmente di depositi di natura gravitativa con caratteristiche geomeccaniche migliori rispetto alla parte più superficiale (velocità fino a 1900 m/sec) e della porzione maggiormente alterata del substrato roccioso (velocità comprese tra 1900 e 2200 m/sec);
- ✓ *Unità di fondo:* velocità sismiche maggiori di 2200 m/sec. Dovrebbe trattarsi del substrato roccioso di natura argillitica.

**ALLEGATO A**  
**PICKING PRIMI ARRIVI**

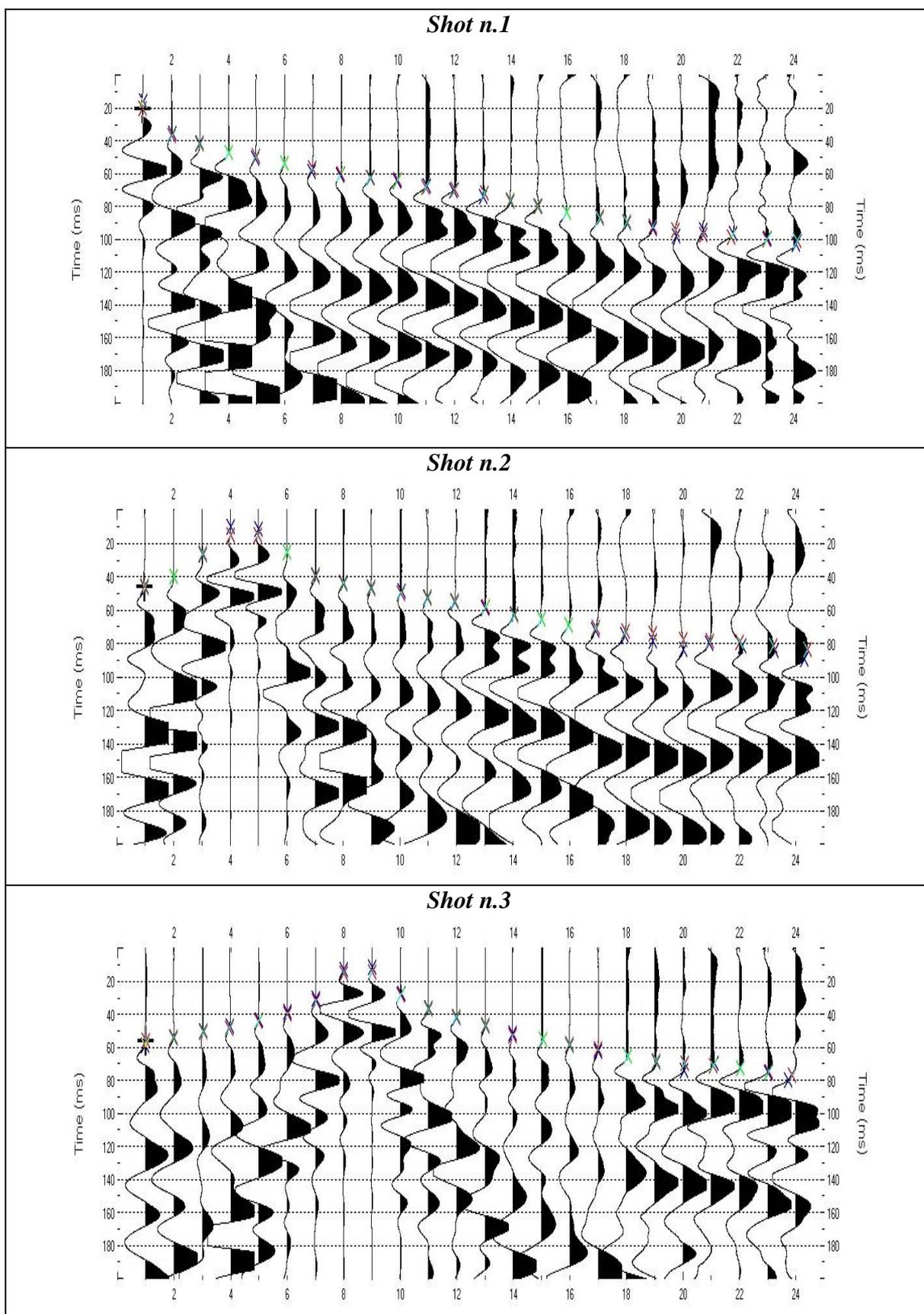


Figura 5. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per gli shots 1, 2, 3.

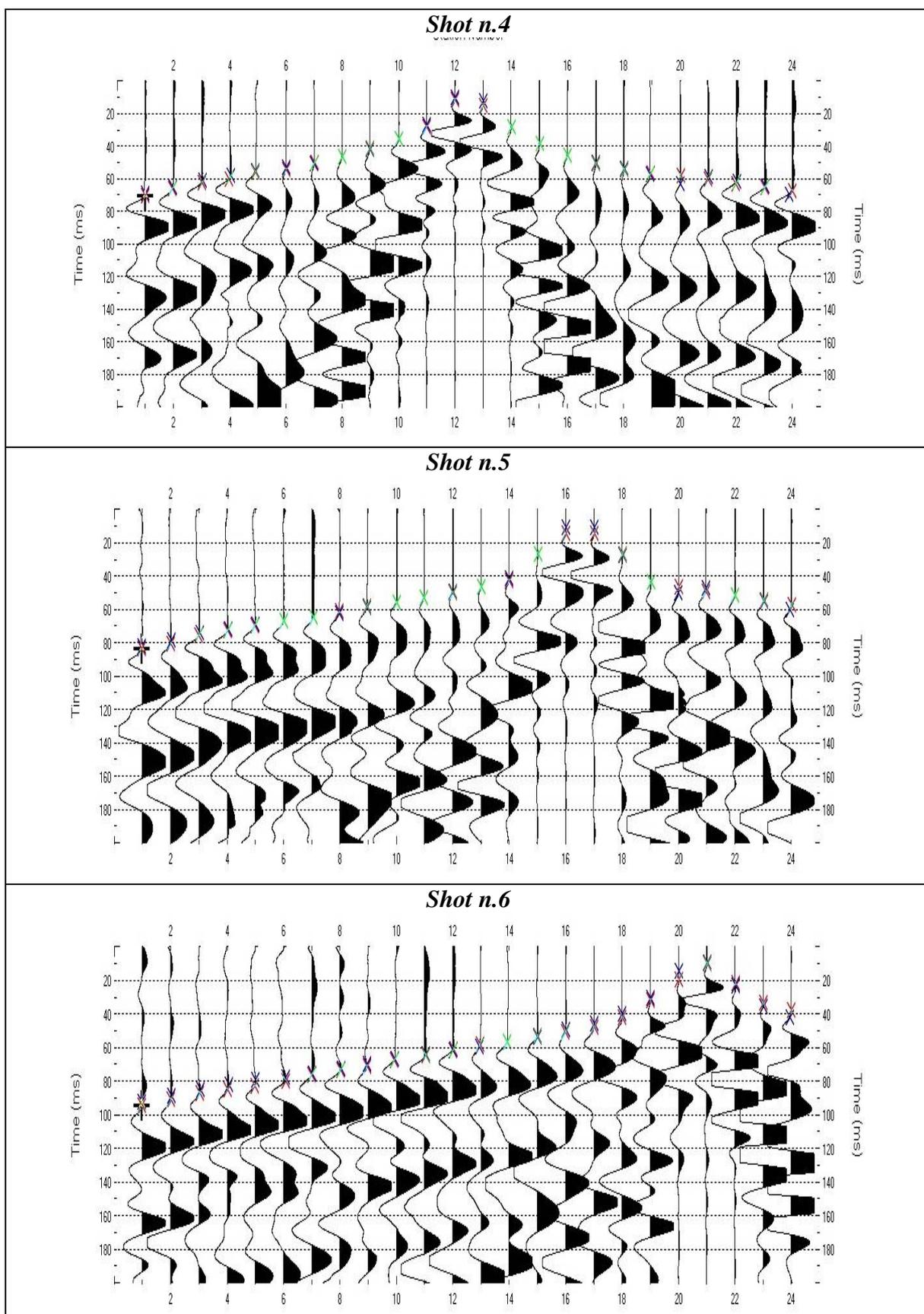


Figura 6. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per gli shots 4, 5, 6.

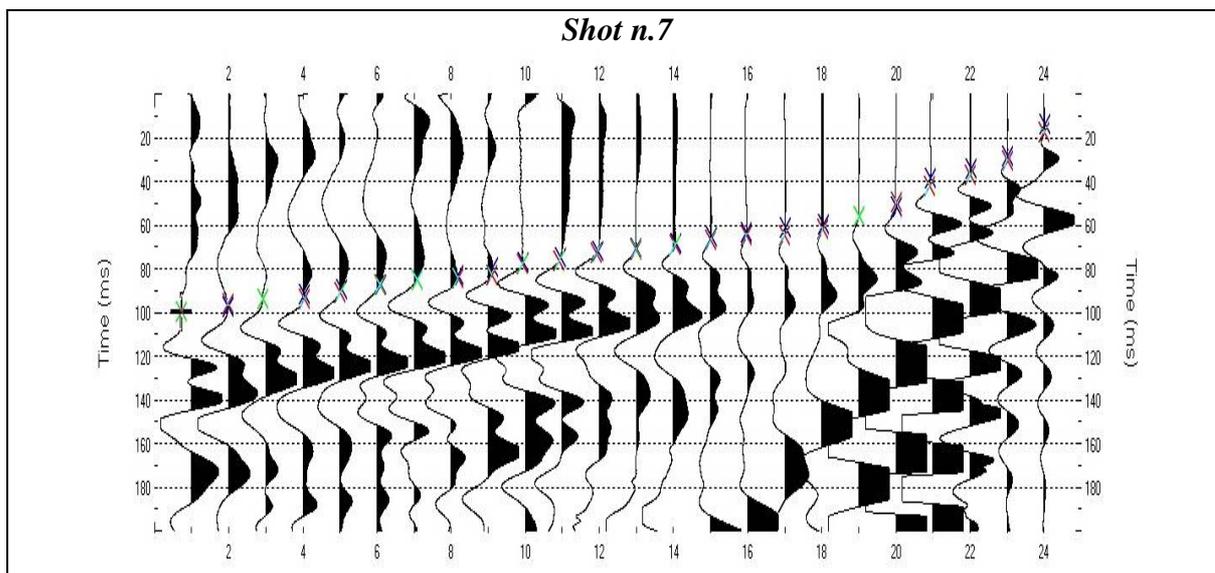


Figura 7. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per lo shot 7.

Geofono	Distanza da g1 (m)	Quota (m s.l.m.)	Shot	Distanza da g1 (m)	Quota (m s.l.m.)	PRIMI ARRIVI E PUNTI DI ENERGIZZAZIONE						
						1 (s)	2 (s)	3 (s)	4 (s)	5 (s)	6 (s)	7 (s)
g1	0,0	250,0	1	-2,50	250,3	0,01635	0,04607	0,05844	0,06878	0,08162	0,09210	0,09955
g2	5,0	249,4				0,03551	0,03967	0,05471	0,06520	0,07811	0,08859	0,09670
g3	10,0	248,8	2	17,50	247,8	0,04160	0,02648	0,05018	0,06096	0,07397	0,08446	0,09357
g4	15,0	248,1				0,04738	0,01040	0,04703	0,05829	0,07147	0,08198	0,09154
g5	20,0	247,5				0,05088	0,01147	0,04336	0,05527	0,06860	0,07914	0,08871
g6	25,0	246,9				0,05387	0,02534	0,03855	0,05315	0,06676	0,07734	0,08696
g7	30,0	246,3	3	37,5	245,3	0,05831	0,03921	0,03070	0,05045	0,06472	0,07537	0,08506
g8	35,0	245,6				0,06095	0,04422	0,01289	0,04675	0,06202	0,07275	0,08251
g9	40,0	245,0				0,06222	0,04606	0,01184	0,04180	0,05856	0,06940	0,07924
g10	45,0	244,1				0,06432	0,04855	0,02768	0,03586	0,05562	0,06663	0,07662
g11	50,0	243,1	4	57,50	241,7	0,06724	0,05181	0,03621	0,02719	0,05273	0,06404	0,07431
g12	55,0	242,2				0,07031	0,05506	0,04194	0,01046	0,04957	0,06133	0,07195
g13	60,0	241,2				0,07386	0,05876	0,04723	0,01245	0,04664	0,05909	0,07001
g14	65,0	240,3				0,07696	0,06203	0,05148	0,02848	0,04159	0,05675	0,06802
g15	70,0	239,7	5	77,50	239,1	0,07983	0,06500	0,05494	0,03838	0,02678	0,05320	0,06515
g16	75,0	239,3				0,08322	0,06844	0,05867	0,04539	0,01100	0,04955	0,06278
g17	80,0	238,9				0,08652	0,07178	0,06216	0,05014	0,01091	0,04585	0,06104
g18	85,0	238,5				0,08957	0,07485	0,06532	0,05367	0,02752	0,04000	0,05910
g19	90,0	238,1	6	97,50	236,6	0,09301	0,07830	0,06884	0,05744	0,04349	0,03029	0,05549
g20	95,0	237,7				0,09812	0,08341	0,07397	0,06273	0,04999	0,01493	0,05166
g21	100,0	235,5				0,09398	0,07929	0,06990	0,05891	0,04728	0,00978	0,03876
g22	105,0	235,0				0,09610	0,08143	0,07217	0,06135	0,05168	0,02320	0,03444
g23	110,0	234,3	7	117,50	233,1	0,09890	0,08429	0,07507	0,06447	0,05502	0,03533	0,02839
g24	115,0	233,5				0,10270	0,08891	0,07971	0,06937	0,06006	0,04194	0,01377

Tabella 2. Primi arrivi per ogni punto di energizzazione (shot).

**RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

Rowdewahl S., 2003. *Manual for the software RAYFRACT*, Intelligent Resources Inc.

Schuster, G. T., Quintus-Bosz A., 1999. *Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. Geophysics* v. 58, 1314-1323.

Lecomte I., Gjøystdal H., Dahle A., Pedersen O. C., 2000. *Improving modelling and inversion in refraction seismics with a first-order Eikonal solver. Geophysical Prospecting, Vol. 48 Issue 3.*