



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile




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

MICROZONAZIONE SISMICA

Tomografie sismiche in onde P

Regione Emilia–Romagna
Comune di Solignano



Regione	Soggetto Realizzatore	Data
 Regione Emilia–Romagna	Dott. Geol. Fabio Francesco Picinotti Via Silvio Pellico, 4 43125 Parma (Pr)	Novembre 2018

A. METODOLOGIA “Solignano campo sportivo”

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.

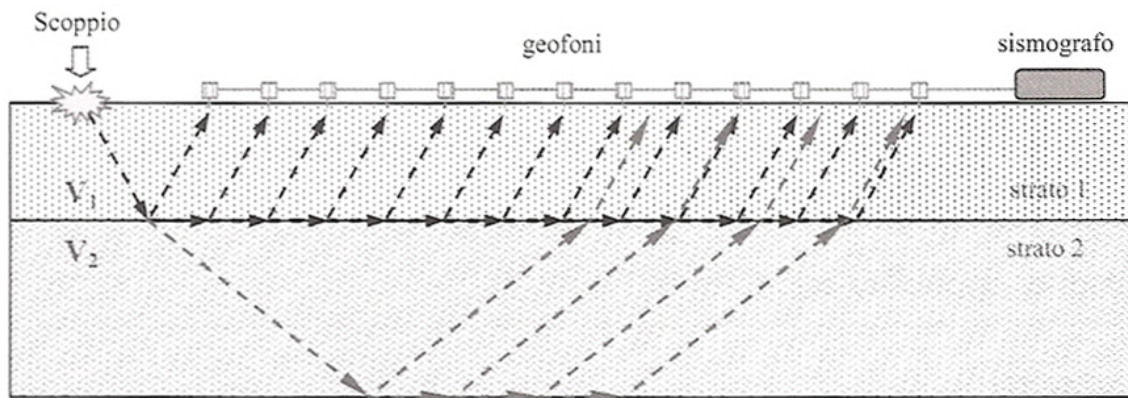
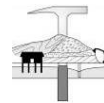


Figura 1. Metodo sismico a rifrazione.

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.

A.1. 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.

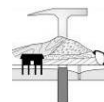
È stato realizzato uno stendimento sismico lineare di lunghezza di 115 m, spaziatura tra i geofoni di 5 m e tempo di acquisizione pari a 200 ms.



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 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.



Geofono	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)	Geofono	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)
G1	0,0	298,0	G13	60,0	293,8
G2	5,0	297,7	G14	65,0	293,5
G3	10,0	297,3	G15	70,0	293,1
G4	15,0	297,0	G16	75,0	292,8
G5	20,0	296,6	G17	80,0	292,4
G6	25,0	296,3	G18	85,0	292,1
G7	30,0	295,9	G19	90,0	291,7
G8	35,0	295,6	G20	95,0	291,4
G9	40,0	295,2	G21	100,0	291,0
G10	45,0	294,9	G22	105,0	290,7
G11	50,0	294,5	G23	110,0	290,3
G12	55,0	294,2	G24	115,0	290,0

Shot	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)	Shot	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)
1	-2,50	298,2	5	77,50	292,6
2	17,50	296,8	6	97,50	291,2
3	37,50	295,4	7	117,50	289,8
4	57,50	294,0			

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

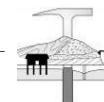
ELABORAZIONE

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).

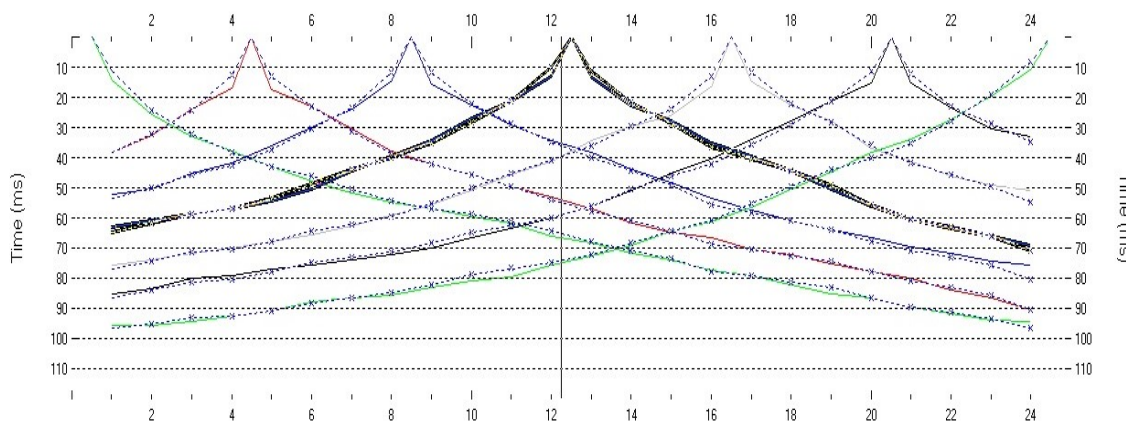


Figura 3. Dromocrone calcolate per i 7 shots. In ascissa i geofoni e in ordinata il tempo in millisecondi.

A.2. RISULTATI

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

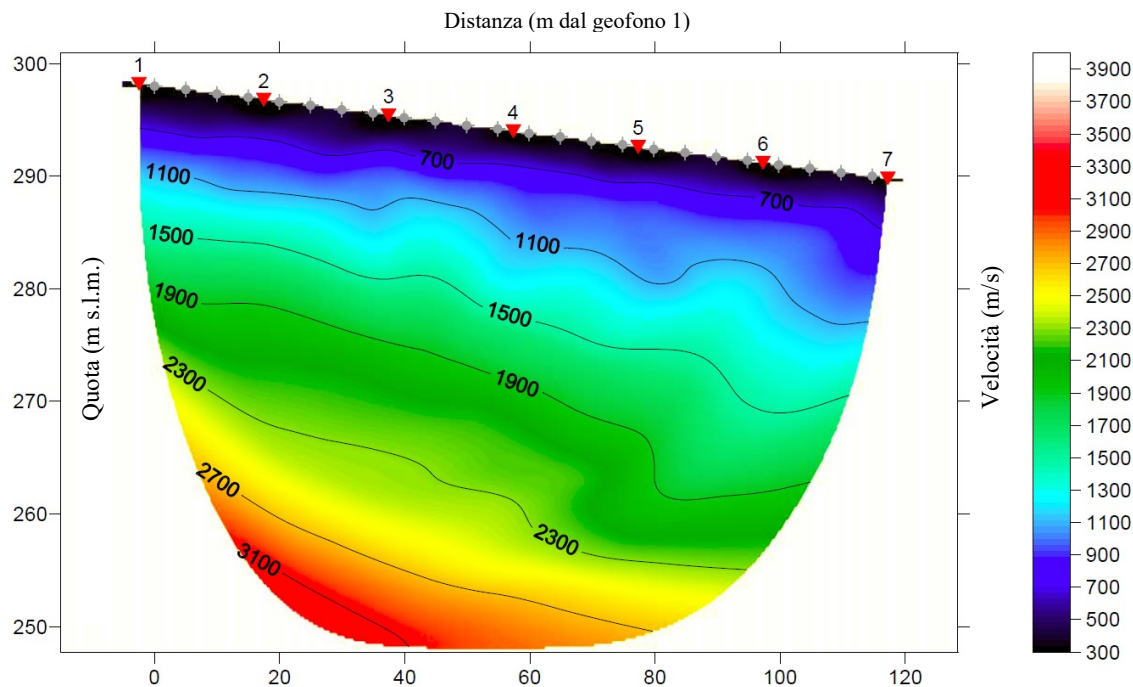
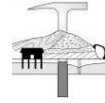


Figura 4. Sezione tomografica relativa alla stendimento sismico. G1 a sinistra e G24 a destra.

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 da 10 a 15 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 con base variabile da circa 25 a 34 metri (circa 30 metri a metà stendimento). Si tratta probabilmente di depositi di natura gravitativa con caratteristiche geomeccaniche migliori rispetto alla parte più superficiale;
- ✓ *Unità di fondo:* velocità sismiche maggiori di 2200 m/sec. Dovrebbe trattarsi del substrato roccioso di natura fliscioide.

Di seguito il picking dei primi arrivi.

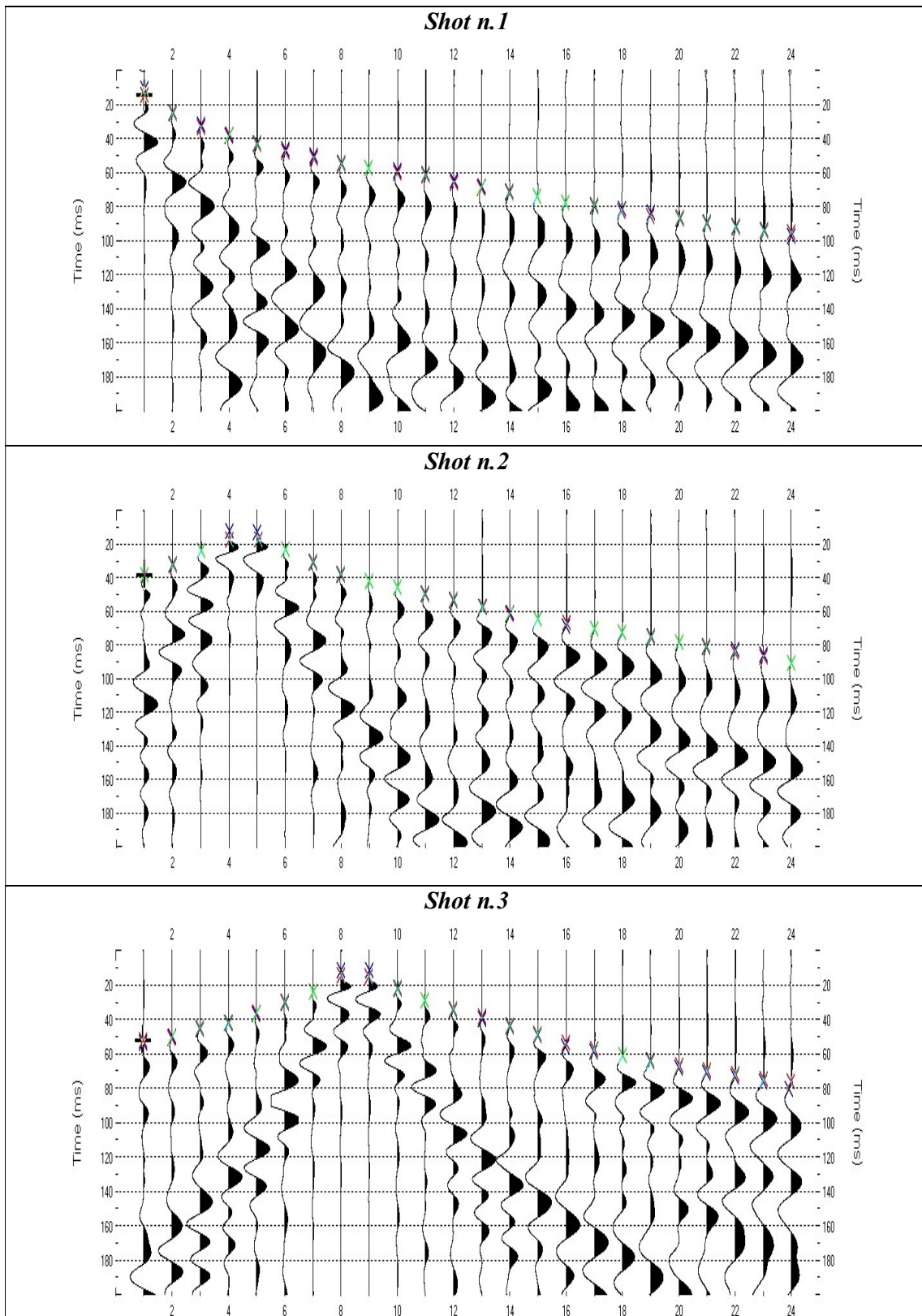
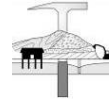


Figura 5. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per gli shots 1, 2, 3.

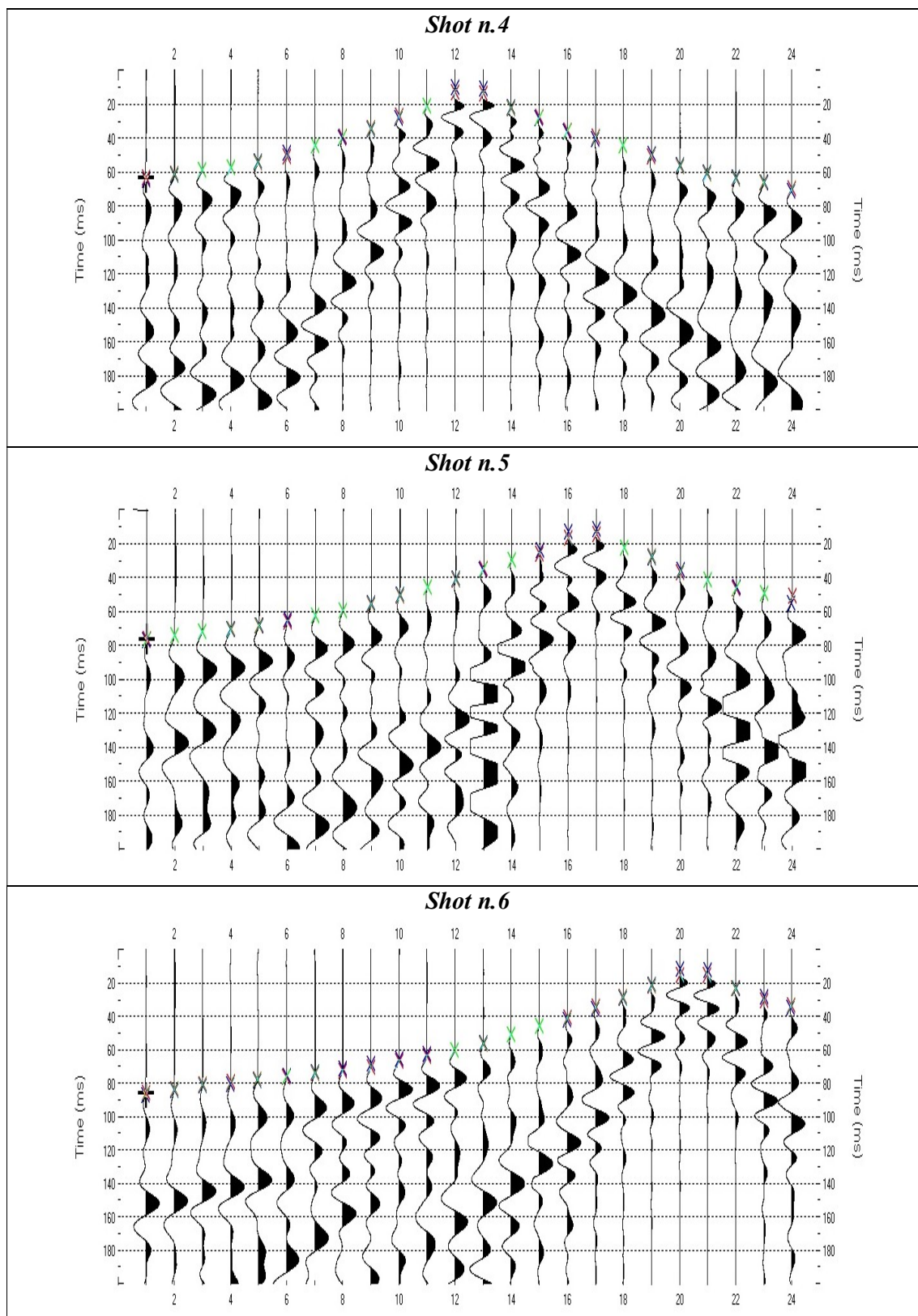
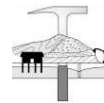


Figura 6. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per gli shots 4, 5, 6.

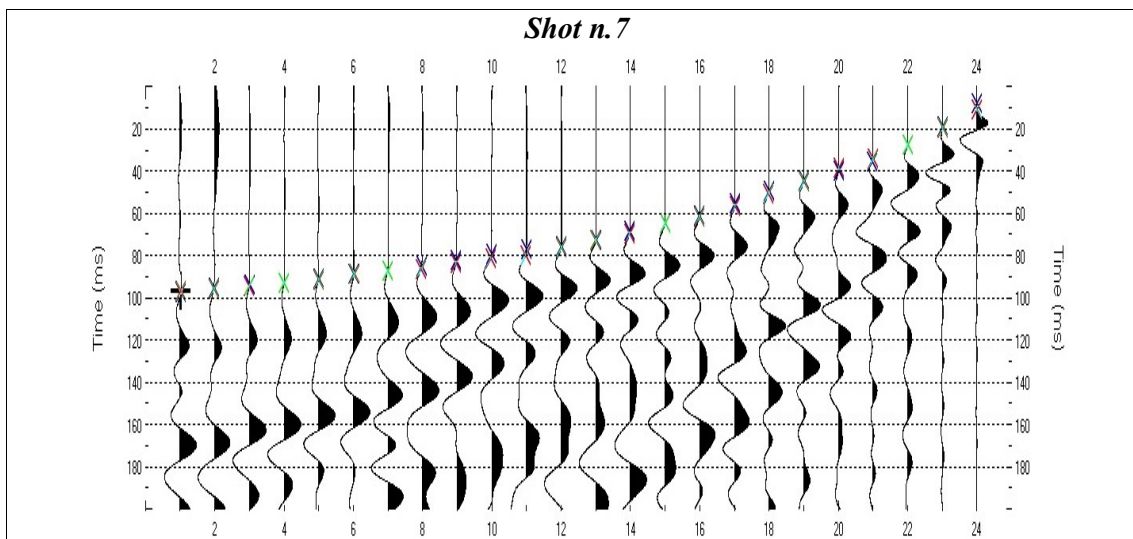
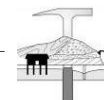


Figura 7. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per lo shot 7.

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	298,0	1	-2,50	298,2	0,01111	0,03835	0,05363	0,06472	0,07703	0,08671	0,09676
g2	5,0	297,7				0,02440	0,03215	0,04990	0,06167	0,07423	0,08399	0,09517
g3	10,0	297,3				0,03192	0,02409	0,04547	0,05857	0,07149	0,08134	0,09318
g4	15,0	297,0	2	17,50	296,8	0,03834	0,01257	0,04242	0,05703	0,07044	0,08041	0,09277
g5	20,0	296,6				0,04290	0,01304	0,03714	0,05362	0,06777	0,07795	0,09073
g6	25,0	296,3				0,04599	0,02306	0,03034	0,04861	0,06446	0,07500	0,08819
g7	30,0	295,9	3	37,5	295,4	0,05022	0,03121	0,02359	0,04402	0,06197	0,07324	0,08667
g8	35,0	295,6				0,05453	0,03863	0,01153	0,04015	0,05940	0,07137	0,08498
g9	40,0	295,2				0,05702	0,04225	0,01177	0,03504	0,05538	0,06825	0,08204
g10	45,0	294,9	4	57,50	294,0	0,05873	0,04552	0,02203	0,02833	0,05014	0,06494	0,07894
g11	50,0	294,5				0,06113	0,04955	0,02873	0,02119	0,04536	0,06255	0,07678
g12	55,0	294,2				0,06450	0,05371	0,03467	0,00984	0,04100	0,06013	0,07495
g13	60,0	293,8	5	77,50	292,6	0,06802	0,05763	0,03979	0,01098	0,03586	0,05595	0,07229
g14	65,0	293,5				0,07091	0,06093	0,04416	0,02178	0,02956	0,05033	0,06813
g15	70,0	293,1				0,07361	0,06424	0,04913	0,02859	0,02377	0,04586	0,06429
g16	75,0	292,8	6	97,50	291,2	0,07774	0,06859	0,05556	0,03630	0,01288	0,04205	0,06087
g17	80,0	292,4				0,07937	0,07040	0,05838	0,04053	0,01182	0,03565	0,05504
g18	85,0	292,1				0,08129	0,07245	0,06096	0,04444	0,02214	0,02888	0,04946
g19	90,0	291,7	7	117,50	289,8	0,08320	0,07449	0,06404	0,04913	0,02838	0,02129	0,04396
g20	95,0	291,4				0,08661	0,07796	0,06776	0,05564	0,03581	0,01140	0,04017
g21	100,0	291,0				0,08947	0,08086	0,07086	0,06045	0,04162	0,01219	0,03517
g22	105,0	290,7	7	117,50	289,8	0,09148	0,08290	0,07303	0,06299	0,04559	0,02288	0,02776
g23	110,0	290,3				0,09375	0,08551	0,07572	0,06594	0,04936	0,02859	0,01915
g24	115,0	290,0				0,09673	0,09032	0,08059	0,07106	0,05493	0,03475	0,00832

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

A. METODOLOGIA “Solignano vasca”

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.

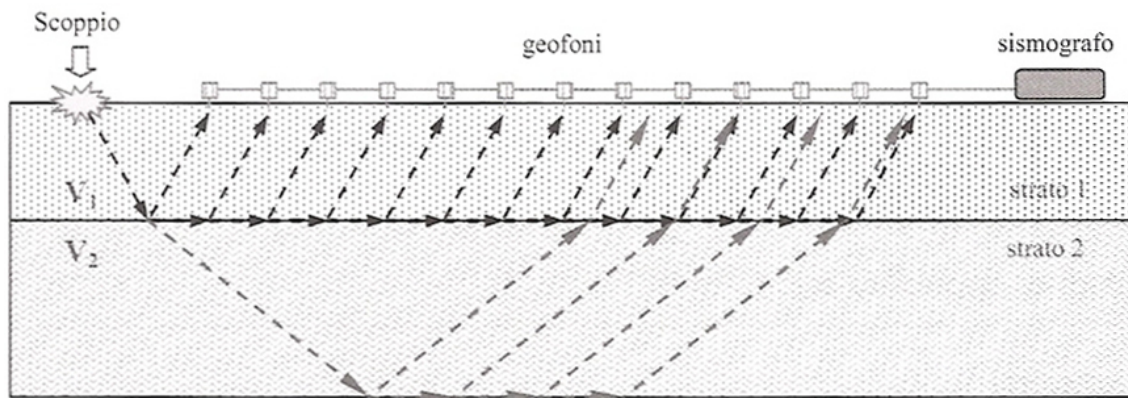
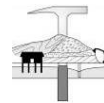


Figura 1. Metodo sismico a rifrazione.

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.

A.1. 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.

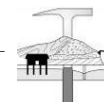
È stato realizzato uno stendimento sismico lineare di lunghezza di 115 m, spaziatura tra i geofoni di 5 m e tempo di acquisizione pari a 200 ms.



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 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.



Geofono	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)	Geofono	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)
G1	0,0	272,0	G13	60,0	280,2
G2	5,0	272,2	G14	65,0	281,1
G3	10,0	272,4	G15	70,0	282,0
G4	15,0	272,6	G16	75,0	283,0
G5	20,0	272,8	G17	80,0	283,2
G6	25,0	273,0	G18	85,0	283,4
G7	30,0	274,0	G19	90,0	283,6
G8	35,0	275,0	G20	95,0	284,9
G9	40,0	276,0	G21	100,0	286,2
G10	45,0	277,1	G22	105,0	287,4
G11	50,0	278,1	G23	110,0	288,7
G12	55,0	279,2	G24	115,0	290,0

Shot	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)	Shot	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)
1	-2,50	271,9	5	77,50	283,1
2	17,50	272,7	6	97,50	285,5
3	37,50	275,5	7	117,50	290,6
4	57,50	279,7			

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

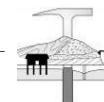
ELABORAZIONE

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).

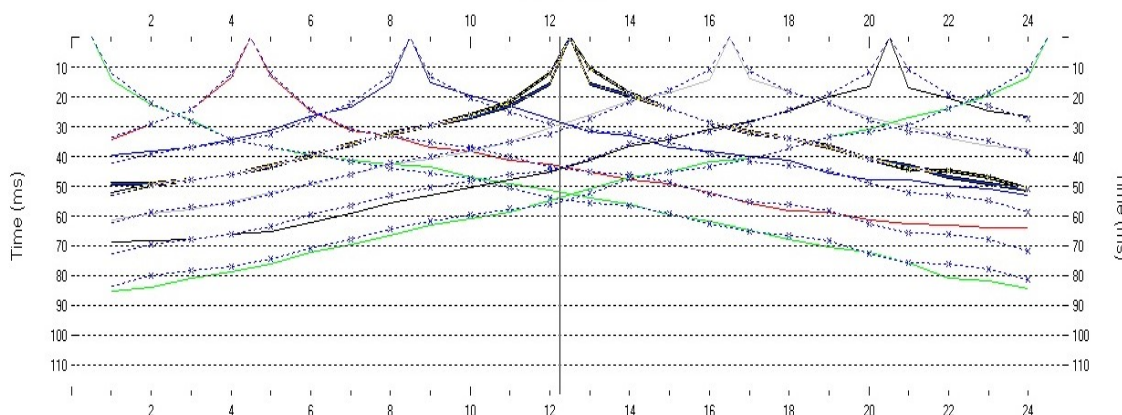


Figura 3. Dromocrone calcolate per i 7 shots. In ascissa i geofoni e in ordinata il tempo in millisecondi.

A.2. RISULTATI

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

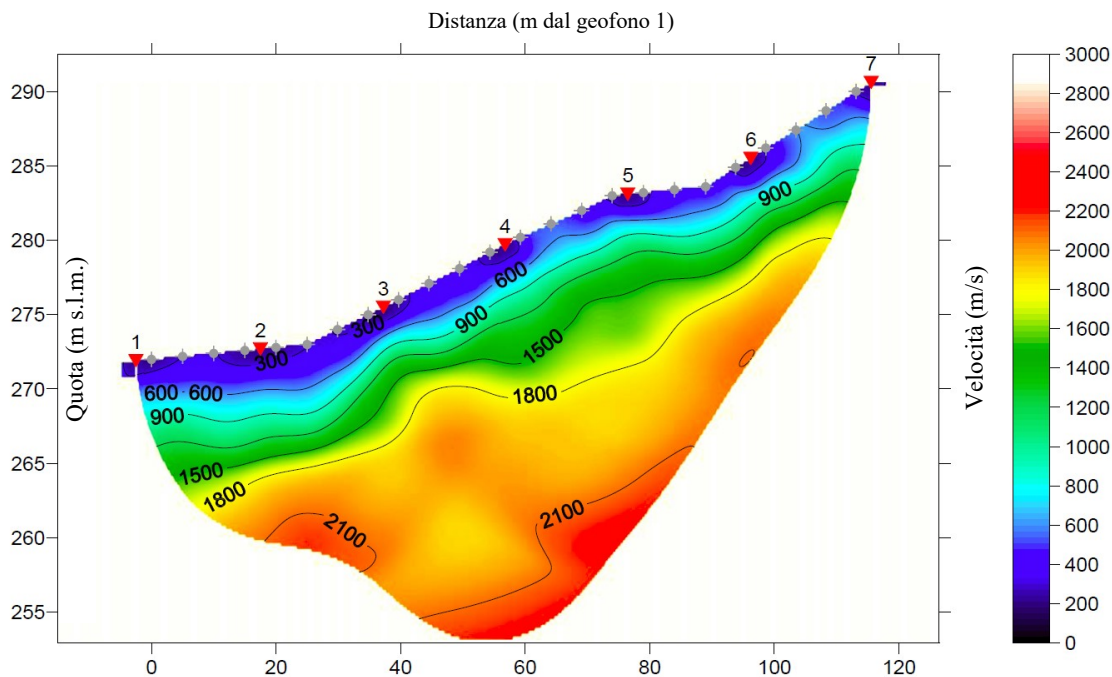
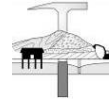


Figura 4. Sezione tomografica relativa alla stendimento sismico. G1 a sinistra e G24 a destra.

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 da 4,5 a 6,5 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 con base a circa 22-24 metri. Si tratta probabilmente di depositi di natura gravitativa con caratteristiche geomeccaniche migliori rispetto alla parte più superficiale;
- ✓ *Unità di fondo:* velocità sismiche maggiori di 2200 m/sec. Dovrebbe trattarsi del substrato roccioso di natura argillitica.

Di seguito il picking dei primi arrivi.

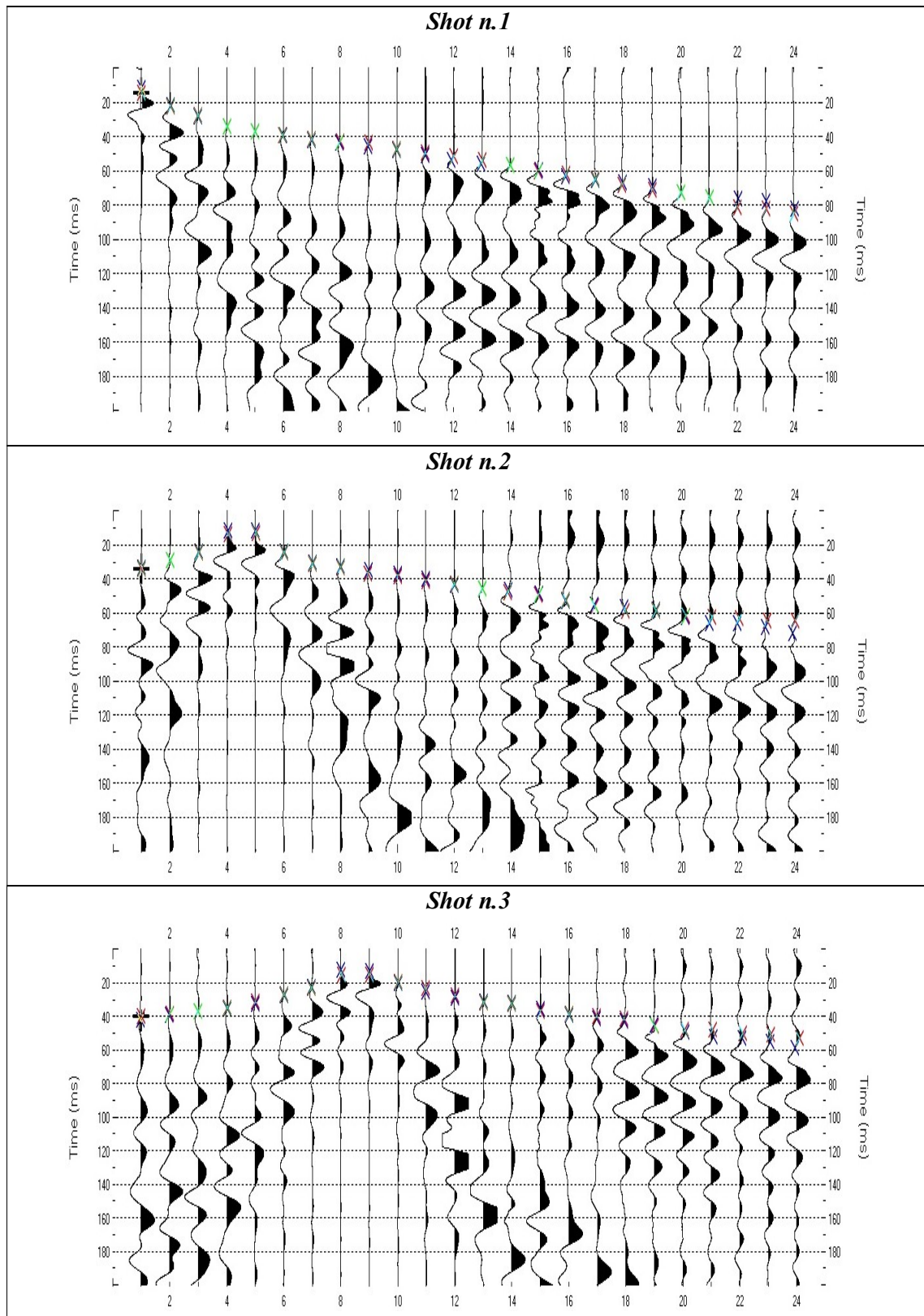
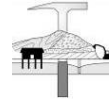


Figura 5. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per gli shots 1, 2, 3.

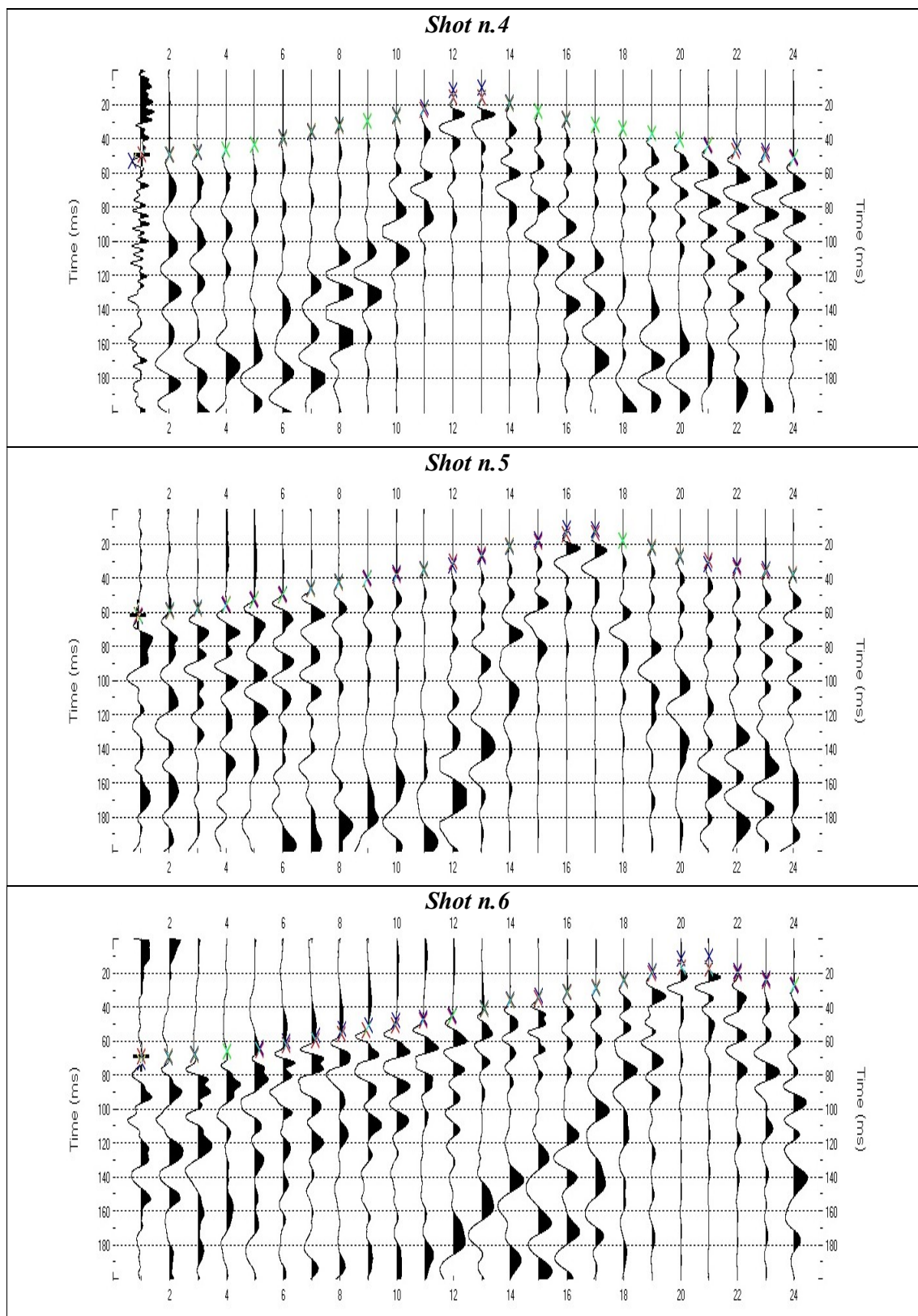
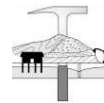


Figura 6. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per gli shots 4, 5, 6.

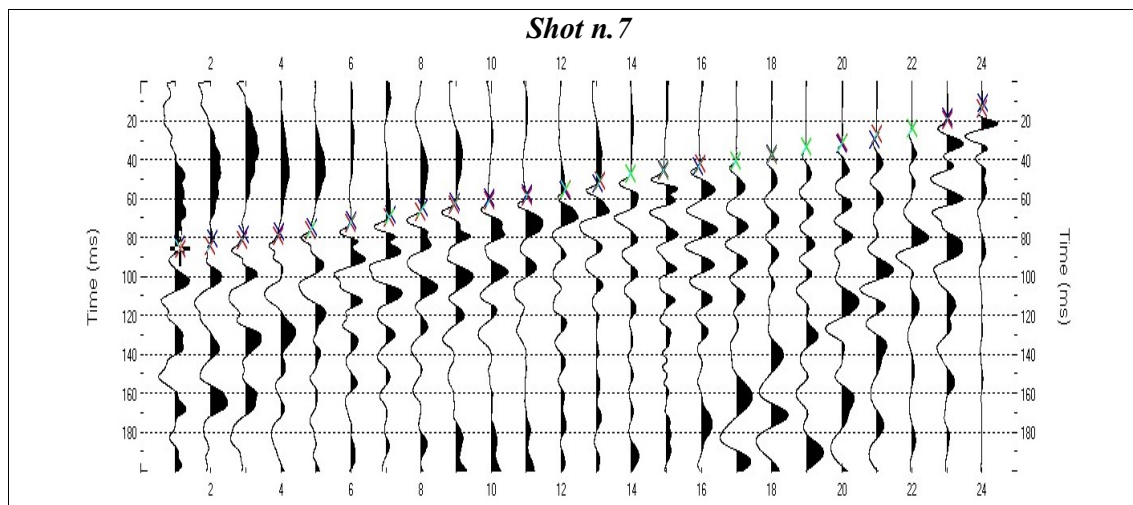
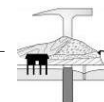


Figura 7. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per lo shot 7.

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	272,0	1	-2,50	271,9	0,01192	0,03346	0,04233	0,05281	0,06215	0,07273	0,08334
g2	5,0	272,2				0,02203	0,02927	0,03890	0,04946	0,05883	0,06942	0,08006
g3	10,0	272,4	2	17,50	272,7	0,02798	0,02408	0,03700	0,04763	0,05708	0,06770	0,07838
g4	15,0	272,6				0,03429	0,01189	0,03536	0,04607	0,05557	0,06626	0,07701
g5	20,0	272,8				0,03695	0,01186	0,03241	0,04323	0,05276	0,06347	0,07432
g6	25,0	273,0				0,03888	0,02431	0,02749	0,03946	0,04903	0,05975	0,07072
g7	30,0	274,0	3	37,5	275,5	0,04186	0,03072	0,02222	0,03607	0,04592	0,05667	0,06776
g8	35,0	275,0				0,04374	0,03297	0,01264	0,03201	0,04215	0,05295	0,06421
g9	40,0	276,0				0,04571	0,03508	0,01296	0,02944	0,03979	0,05062	0,06195
g10	45,0	277,1				0,04744	0,03690	0,02029	0,02613	0,03720	0,04811	0,05945
g11	50,0	278,1	4	57,50	279,7	0,05038	0,03991	0,02506	0,02155	0,03508	0,04624	0,05760
g12	55,0	279,2				0,05375	0,04332	0,02901	0,01198	0,03252	0,04477	0,05618
g13	60,0	280,2				0,05573	0,04535	0,03131	0,01049	0,02750	0,04089	0,05237
g14	65,0	281,1				0,05630	0,04598	0,03221	0,01874	0,02153	0,03561	0,04727
g15	70,0	282,0	5	77,50	283,1	0,05910	0,04883	0,03525	0,02381	0,01775	0,03327	0,04507
g16	75,0	283,0				0,06279	0,05255	0,03906	0,02873	0,01091	0,03154	0,04350
g17	80,0	283,2				0,06526	0,05505	0,04160	0,03192	0,01131	0,02881	0,04099
g18	85,0	283,4				0,06642	0,05624	0,04283	0,03378	0,01814	0,02429	0,03711
g19	90,0	283,6	6	97,50	285,5	0,06844	0,05828	0,04490	0,03664	0,02222	0,01884	0,03351
g20	95,0	284,9				0,07255	0,06241	0,04905	0,04094	0,02766	0,01143	0,03188
g21	100,0	286,2				0,07558	0,06562	0,05232	0,04427	0,03160	0,01060	0,02970
g22	105,0	287,4				0,07593	0,06600	0,05295	0,04494	0,03247	0,01918	0,02377
g23	110,0	288,7	7	117,50	290,6	0,07771	0,06780	0,05490	0,04691	0,03456	0,02287	0,01843
g24	115,0	290,0				0,08149	0,07158	0,05872	0,05077	0,03848	0,02729	0,01061

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

A. METODOLOGIA TOMOGRAFIA SISMICA "Bottione"

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.

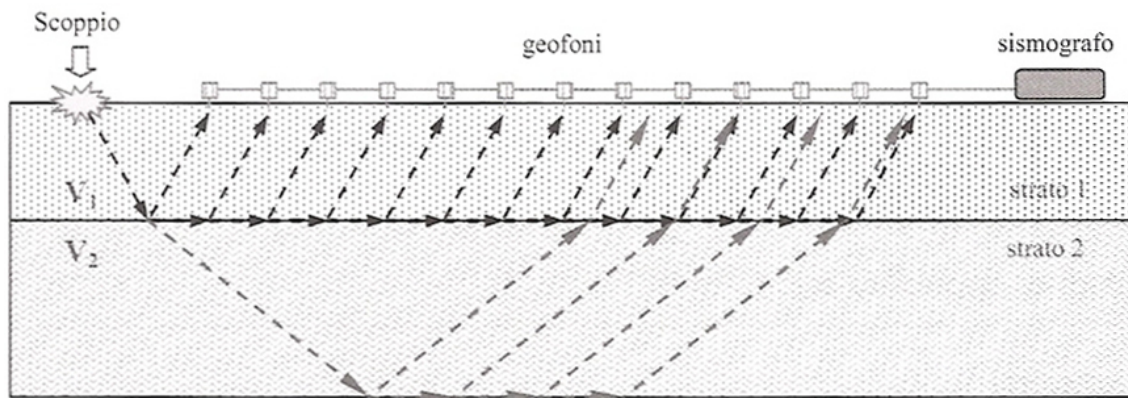
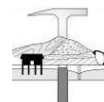


Figura 1. Metodo sismico a rifrazione.

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.

A.1. 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.

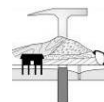
È stato realizzato uno stendimento sismico lineare di lunghezza di 92 m, spaziatura tra i geofoni di 4 m e tempo di acquisizione pari a 200 ms.



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 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.



Geofono	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)	Geofono	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)
G1	0,0	774,0	G13	48,0	785,3
G2	4,0	775,1	G14	52,0	785,5
G3	8,0	776,2	G15	56,0	785,6
G4	12,0	777,3	G16	60,0	785,8
G5	16,0	778,4	G17	64,0	785,9
G6	20,0	779,5	G18	68,0	786,1
G7	24,0	780,6	G19	72,0	786,2
G8	28,0	781,7	G20	76,0	786,4
G9	32,0	782,8	G21	80,0	786,5
G10	36,0	783,9	G22	84,0	786,7
G11	40,0	785,0	G23	88,0	786,8
G12	44,0	785,2	G24	92,0	787,0

Shot	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)	Shot	Distanza da G1 (m)	Quota (m s.l.m.)
1	-2,00	773,5	5	62,00	785,8
2	14,00	777,9	6	78,00	786,5
3	30,0	782,3	7	94,00	787,1
4	46,00	785,2			

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

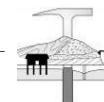
ELABORAZIONE

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).

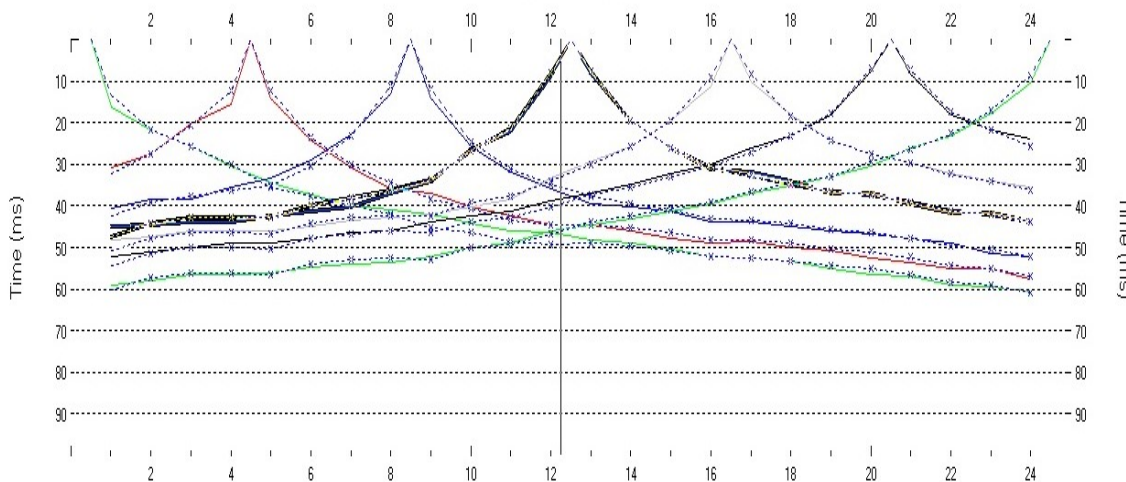


Figura 3. Dromocrone calcolate per i 7 shots. In ascissa i geofoni e in ordinata il tempo in millisecondi.

A.2. RISULTATI

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

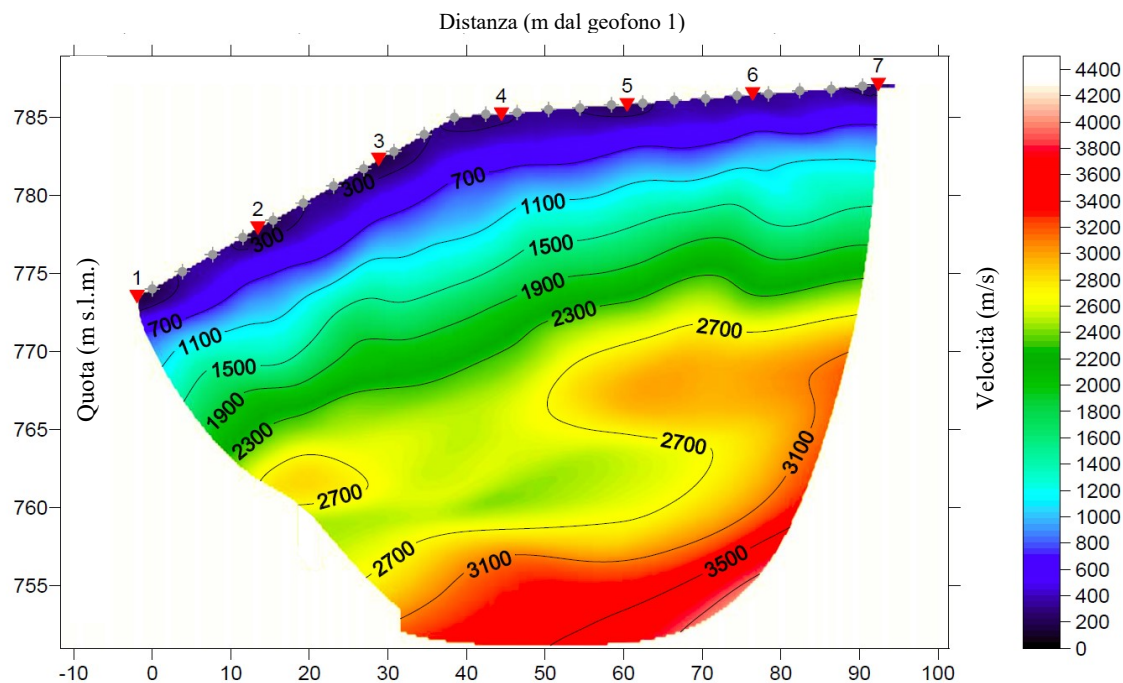
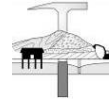


Figura 4. Sezione tomografica relativa alla stendimento sismico. G1 a sinistra e G24 a destra.



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 6 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 2300 m/sec e spessore medio di circa 13-14 metri. Si tratta probabilmente di depositi di natura gravitativa con caratteristiche geomeccaniche migliori rispetto alla parte più superficiale;
- ✓ *Unità di fondo*: velocità sismiche maggiori di 2300 m/sec. Dovrebbe trattarsi del substrato roccioso di natura argillitica.

Di seguito il picking dei primi arrivi.

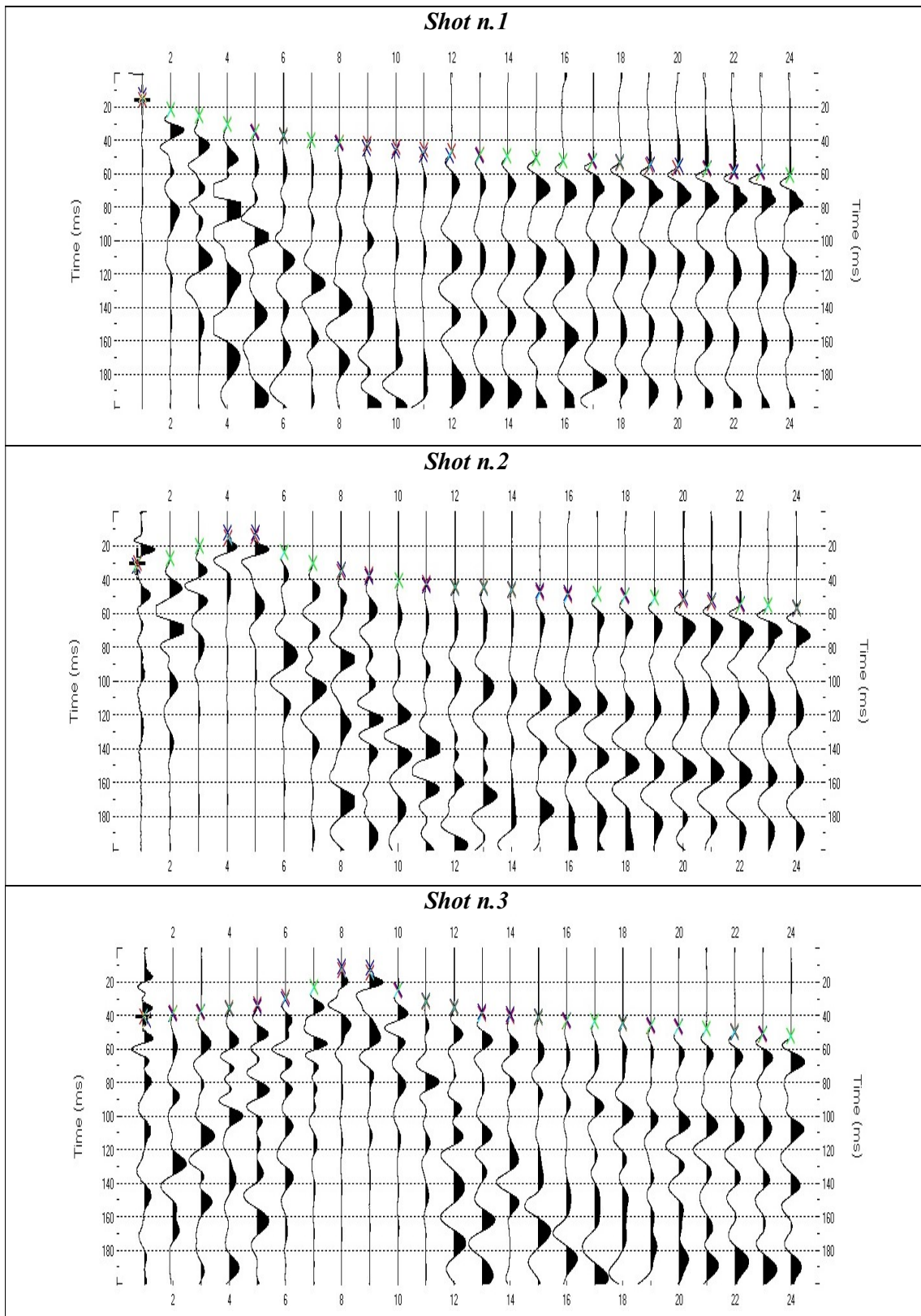
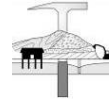


Figura 5. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per gli shots 1, 2, 3.

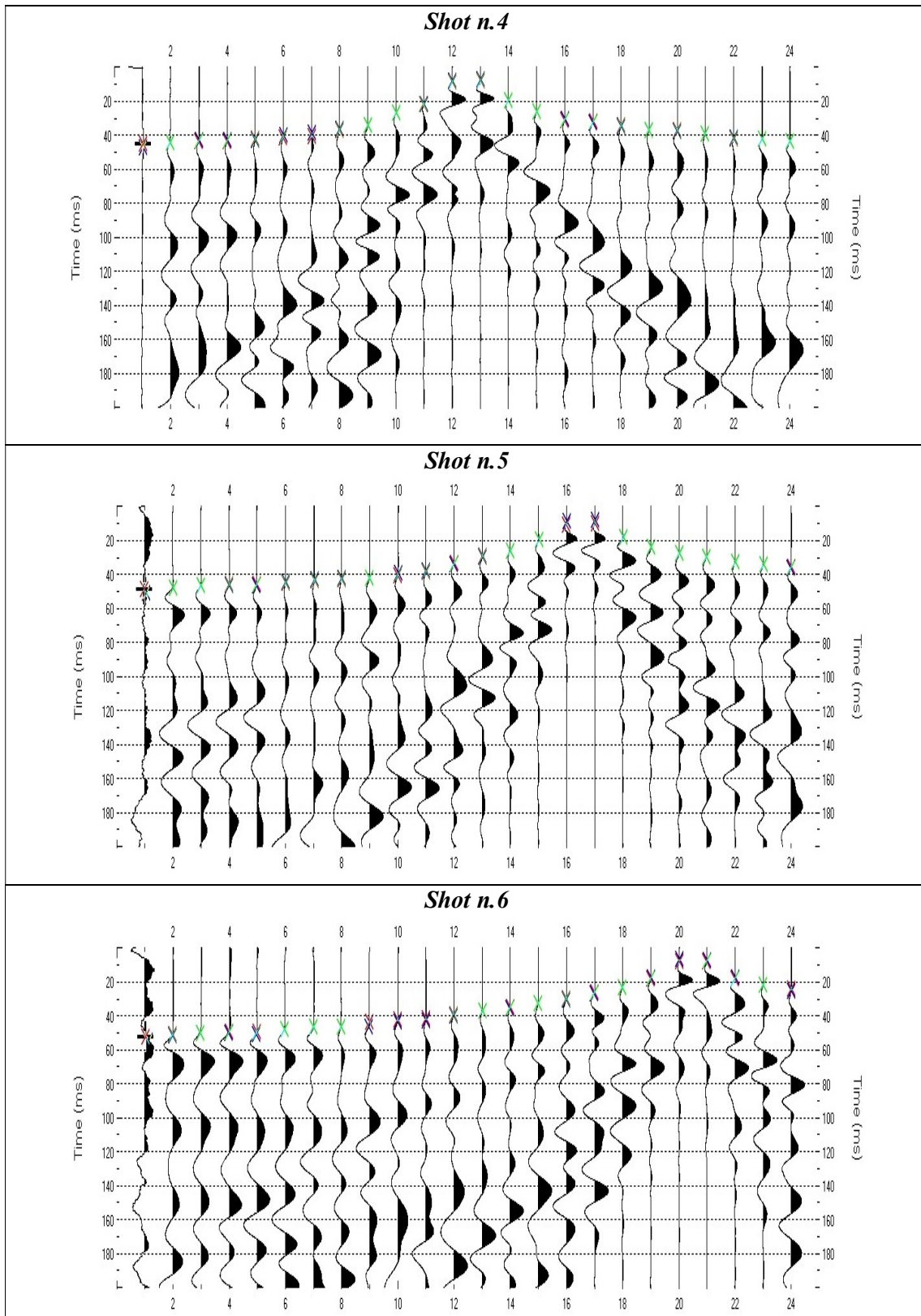
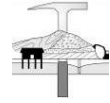


Figura 6. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per gli shots 4, 5, 6.

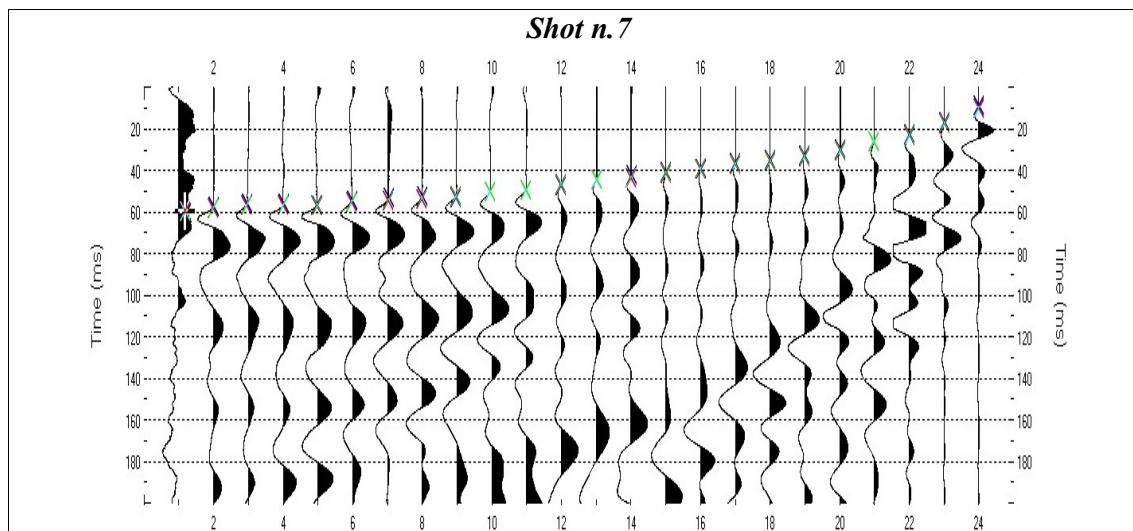
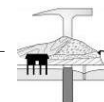
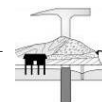


Figura 7. Sismogrammi acquisiti e picking dei primi arrivi per lo shot 7.

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	774,0	1	-2,00	773,5	0,01624	0,03065	0,04061	0,04506	0,04821	0,05201	0,05921
g2	4,0	775,1				0,02175	0,02751	0,03851	0,04441	0,04755	0,05096	0,05790
g3	8,0	776,2	2	14,00	777,9	0,02555	0,02031	0,03825	0,04375	0,04611	0,04991	0,05646
g4	12,0	777,3				0,03026	0,01546	0,03550	0,04375	0,04585	0,04886	0,05646
g5	16,0	778,4				0,03445	0,01415	0,03341	0,04231	0,04585	0,04886	0,05620
g6	20,0	779,5				0,03720	0,02410	0,02895	0,04127	0,04480	0,04782	0,05476
g7	24,0	780,6	3	30,0	782,3	0,03996	0,03065	0,02279	0,04035	0,04336	0,04651	0,05410
g8	28,0	781,7				0,04100	0,03576	0,01310	0,03681	0,04271	0,04611	0,05371
g9	32,0	782,8				0,04205	0,03681	0,01415	0,03406	0,04205	0,04375	0,05201
g10	36,0	783,9				0,04402	0,04035	0,02555	0,02646	0,04035	0,04231	0,04991
g11	40,0	785,0	4	46,00	785,2	0,04585	0,04231	0,03196	0,02201	0,03851	0,04127	0,04886
g12	44,0	785,2				0,04651	0,04441	0,03576	0,00891	0,03341	0,03891	0,04611
g13	48,0	785,3				0,04821	0,04441	0,03930	0,00825	0,02921	0,03681	0,04441
g14	52,0	785,5				0,04886	0,04611	0,04035	0,01965	0,02581	0,03485	0,04310
g15	56,0	785,6	5	62,00	785,8	0,05030	0,04782	0,04127	0,02620	0,01965	0,03236	0,04127
g16	60,0	785,8				0,05201	0,04886	0,04375	0,03105	0,01100	0,03000	0,03930
g17	64,0	785,9				0,05266	0,04860	0,04375	0,03196	0,00996	0,02620	0,03681
g18	68,0	786,1				0,05332	0,04991	0,04506	0,03406	0,01821	0,02306	0,03511
g19	72,0	786,2	6	78,00	786,5	0,05515	0,05057	0,04611	0,03681	0,02410	0,01821	0,03301
g20	76,0	786,4				0,05646	0,05240	0,04690	0,03681	0,02751	0,00760	0,03026
g21	80,0	786,5				0,05685	0,05371	0,04782	0,03930	0,02961	0,00825	0,02620
g22	84,0	786,7				0,05895	0,05515	0,04886	0,04166	0,03236	0,01795	0,02306
g23	88,0	786,8	7	94,00	787,1	0,05961	0,05515	0,05135	0,04166	0,03406	0,02175	0,01755
g24	92,0	787,0				0,06065	0,05751	0,05201	0,04375	0,03550	0,02371	0,01035

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



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Rowdewahl S., 2003. *Manual for the software RAYFRAC*T, Intelligent Resources Inc.
- Schuster, G. T., Quintus-Bosz A., 1999. *Wavepath eikonal travelt ime inversion: Theory*. *Geophysics* v. 58, 1314-1323.
- Lecomte I., Gjystdal 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.
- Dziewonski A., Bloch S., and Landisman M., 1969. *A technique for the analysis of transient seismic signals*. Bulletin of the Seismological Society of America, 59, No. 1, 427-444
- Levshin A.L., Pisarenko V., Pogrebinsky G., 1972 . *On a frequency-time analysis of oscillations*. *Annales Geophys.*; 28, 211-218.
- Aki K. and Richards P.G., 1980. *Quantitative Seismology, Theory and Methods*, Vol. 1-2, W.H. Freeman & Co., New York.
- Tokimatsu K., Tamura S., Kojima H., 1992. *Effects of Multiple Modes on Rayleigh Wave Dispersion Characteristics*. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 118 (10), 1529-1543.
- Achenbach J.D., 1999. *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland, Amsterdam, Netherlands.
- Park C. B., Miller R. D. & Xia J., 1999. *Multichannel analysis of surface waves*, *Geophysics*, 64, 3; 800-808.
- Zywicki D.J., 1999. *Advanced Signal Processing Methods Applied to Engineering Analysis of Seismic Surface Waves*, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.
- Herrmann R.B. 2003. *Computer Programs in Seismology*.
- O'Neill A., Dentith M., List R., 2003. *Full-waveform P-SV reflectivity inversion of surface waves for shallow engineering applications*, *Exploration Geophysics*, 34, 158-173.
- Arai H., Tokimatsu K., 2004, *S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum*, *Bull. Seism. Soc. Am.*: 94, 53-63.
- Safari J., O'Neill A., Matsuoka T., Sanada Y. (2005). *Applications of Love Wave Dispersion for Improved Shear-wave Velocity Imaging*, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 10, 135-150.
- Dal Moro G., Pipan M. & Gabrielli P., 2007. *Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion via Genetic Algorithms and Posterior Probability Density Evaluation*, *J. Appl. Geophysics*, 61, 39-55.
- Herak M., 2008. *Model HVSR - A Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise*, *Computers & Geosciences*, 34, 1514-1526.
- Lunedei E. and Albarello D.; 2009. *On the seismic noise wavefield in a weakly dissipative layered Earth*, *Geophys. J. Int.*, 177, 1001-1014.
- Software *Microtremor* (<http://nato.gfz.hr/SW.zip>) di Albarello D. & Lunedei E. (vedi Lunedei E., Albarello D., 2009, *On the seismic noise wavefield in a weakly dissipative layered Earth*, *Geophys. J. Int.*, 177, 1001-1014).
- Dal Moro G., 2010. *Insights on Surface-Wave Dispersion Curves and HVSR: Joint Analysis via Pareto Optimality*, *J. Appl. Geophysics*, 72, 29-140.
- Dal Moro G. & Ferigo F., 2011. *Joint Analysis of Rayleigh - and Love-Wave Dispersion for Near-Surface Studies: Issues, Criteria and Improvements*, *J. Appl. Geophysics*, in stampa.
- Dal Moro G., 2011. *Some Aspects about Surface Wave and HVSR Analyses: an Short Overview and a Case Study*, *BGTA (Bollettino Geofisica Teorica e Applicata)*, Vol. 52, in stampa.
- Luo Y., Xia J., Xu Y. & Zeng C., 2011, *Analysis of group-velocity dispersion of high-frequency Rayleigh waves for near-surface applications*. *Journal of Applied Geophysics*, 74, 157-165.

RIFERIMENTI NORMATIVI

- D.M. 14 Gennaio 2008. *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*.
- CIRCOLARE 2 Febbraio 2009 n. 617 C.S.LL.PP. *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008*.
- D.M. 17 Gennaio 2018 *Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*.