
INDAGINE GEOFISICA DI SISMICA A RIFRAZIONE

RAPPORTO INTERPRETATIVO

COMUNE DI MANERBIO

INDICE

1. Premessa	2
2. Indagine e strumentazione utilizzata	2
2.1. <i>Strumentazione utilizzata</i>	2
2.2. <i>Indagine di sismica a rifrazione: metodologia ed acquisizione</i>	3
3. Interpretazione e risultati	6
3.1. <i>SITO n. 1 (adiacente al Fiume Mella)</i>	6
3.1.1. Acquisizione ed analisi onde P	6
3.1.2. Acquisizione ed analisi onde S	9
3.2. <i>SITO n. 2 (adiacente all'oratorio)</i>	13
3.2.1. Acquisizione ed analisi onde P	13
3.2.2. Acquisizione ed analisi onde S	16
4. Modello geofisico sismico interpretativo	19

ALLEGATI

1. Ubicazione stendimenti sismici
2. Rumore ambientale – stendimento n. 1
3. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde P – stendimento n. 1
4. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde SH – stendimento n. 1
5. Rumore ambientale – stendimento n. 2
6. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde P – stendimento n. 2
7. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde SH – stendimento n. 2

Brescia, 2 settembre 2008

1. Premessa

Su incarico e per conto della Dr. L. Ziliani si è eseguita un'indagine geofisica sismica in n. 2 siti (allegato n. 1) posti nel Comune di Manerbio, nell'ambito dell'aggiornamento dello studio geologico a supporto nel nuovo PGT comunale.

Lo scopo dell'indagine è la caratterizzazione dinamica del sottosuolo nelle prime decine di metri con l'individuazione delle principali unità geofisiche e delle relative proprietà meccaniche elastiche, quali velocità delle onde longitudinali P (V_P), velocità delle onde trasversali S (V_S) e i relativi parametri elastici (E, G, K e ν).

Sulla base dei valori di V_S e del modulo di taglio (G) sarà possibile valutare la rigidità del suolo e fornire delle prime indicazioni sul comportamento dinamico della parte superficiale del sottosuolo, in applicazione alla normativa nazionale e regionale (D.G.R. 22 dicembre 2005, n. VIII/1566 "Criteri e indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del P.G.T., in attuazione dell'art. 57, comma 1, della l.r. 12/2005" aggiornata con DGR 28 maggio 2008 n. VIII/7374).

2. Indagine e strumentazione utilizzata

Per la ricostruzione del modello geofisico dei 2 siti scelti è stata eseguita un'indagine di sismica superficiale con tecnica di sismica a rifrazione ad onde di volume (longitudinali P e trasversali SH).

2.1. *Strumentazione utilizzata*

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata è costituita da:

- un sistema di energizzazione per le onde P: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 10 Kg battente verticalmente su piastra circolare in acciaio del diametro di 25 cm posta direttamente sul p.c. per la generazione prevalentemente di onde P e secondariamente di onde SV, in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali;
- un sistema di energizzazione per le onde SH: la sorgente è costituita da una mazza di 10 Kg battente orizzontalmente su parallelepipedo in legno rivestito di metallo disposto ortogonalmente allo stendimento (e parallelamente alla componente di registrazione dei geofoni orizzontali per massimizzarne l'acquisizione) e gravato da 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. Con questo dispositivo è possibile generare essenzialmente delle onde elastiche di taglio

polarizzate orizzontalmente, con uniformità sia nella direzione di propagazione che nella polarizzazione e con una generazione di onde P trascurabile;

- un sistema di ricezione: costituito da 24+24 geofoni verticali ed orizzontali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa (peso della massa 12.2 gr) con frequenza propria 10 Hz, ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali e trasversali prodotte da una specifica sorgente;
- sistema di acquisizione dati: con memoria dinamica a 24 bit composto da 12 dataloggers a 2 canali ciascuno per un totale di 24 canali, cavo sismico telemetrico di 130 m, MOM power con interfaccia USB 1.1 24 V, notebook PC Windows XP con software Panel Acquisition a 24 canali; il sistema è in grado di convertire in digitale e registrare su memoria il segnale proveniente da ciascun canale dal sistema di ricezione; la conversione A/D avviene già dal primo metro di cavo: il sistema permette pertanto di eliminare molte fonti di disturbo dovute al trasferimento del segnale lungo centinaia di metri di cavo sismico ed è inoltre dotato di un sistema di filtraggio in tempo reale, da un hardware complesso, che comporta un anello di regolazione con diversi passaggi di digital signal processing;
- un sistema di trigger: consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione.

2.2. Indagine di sismica a rifrazione: metodologia ed acquisizione

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche a seguito del fronte d'onda conico. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde coniche o bi-rifratte (head wave): le onde analizzate sono quelle birifratte, cioè quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza.

I contrasti di proprietà possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche; il modello interpretativo del mezzo investigato è di tipo elastico, omogeneo, continuo ed isotropo, mentre la profondità totale di indagine è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori.

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde P ed SH è articolata nelle seguenti fasi fondamentali:

- Individuazione dei primi arrivi attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking, previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro digitale;
- Ricostruzione delle dromocrone in P ed SH e scelta del modello di sottosuolo da utilizzare nell'interpretazione;
- Linearizzazione delle dromocrone e calcolo delle velocità di propagazione delle onde elastiche analizzate e dei relativi tempi di intercetta;
- Ricostruzione del modello del sottosuolo con calcolo della profondità di ciascun strato omogeneo, continuo ed isotropo tramite il metodo del tempo di intercetta applicabile a ciascun punto di scoppio (metodo a griglia shot-point); questo metodo è applicabile in situazioni litostratigrafiche approssimabili a modelli stratificati a strati piani orizzontali e/o inclinati.

Per le analisi interpretative è stato utilizzato il software WinSism versione 10 – Seismic Refraction Processing Software (2004) della W-GeoSoft, associato ad altri software autocostruiti.

Non si è ritenuto necessario, date le finalità dell'indagine, applicare metodi interpretativi più complessi che peraltro necessitano di maggior onere economico nell'acquisizione dei dati e rendono più difficile l'individuazione di aree adatte all'indagine.

L'indagine in ciascun sito è consistita in uno stendimento singolo di sismica a rifrazione di lunghezza variabile in funzione delle disponibilità logistiche, lungo il quale sono stati disposti alternativamente e collegati in serie i geofoni monocomponente (verticali ed orizzontali in numero di 24 per il sito n. 1 e in numero di 22 per il sito n. 2) del tipo elettromagnetico a bobina mobile, con distanza intergeofonica variabile in relazione alla lunghezza totale disponibile: il collegamento dei ricevitori avviene attraverso un cavo telemetrico su cui sono disposti 12 gruppi data loggers in grado di convertire il segnale elettrico proveniente dai geofoni in segnale digitale già dal primo metro di cavo: il sistema permette pertanto di eliminare molte fonti di disturbo dovute al trasferimento del segnale lungo centinaia di metri di cavo sismico ed è inoltre dotato di un sistema di filtraggio in tempo reale, da un hardware complesso, che comporta un anello di regolazione con diversi passaggi di digital signal processing.

E' stata adottata un'unica configurazione a 5 shots per l'energizzazione in onde P e in onde SH così organizzata lungo lo stendimento:

configurazione stendimento n. 1:

- 2 end-shots esterni allo stendimento di geofoni (S1 e S5)
- 2 intermedi posti rispettivamente tra il 6° e il 7° geofono e tra il 18° e 19° geofono (S2 e S4)
- 1 centrale tra il 12° e il 13° geofono (S3)

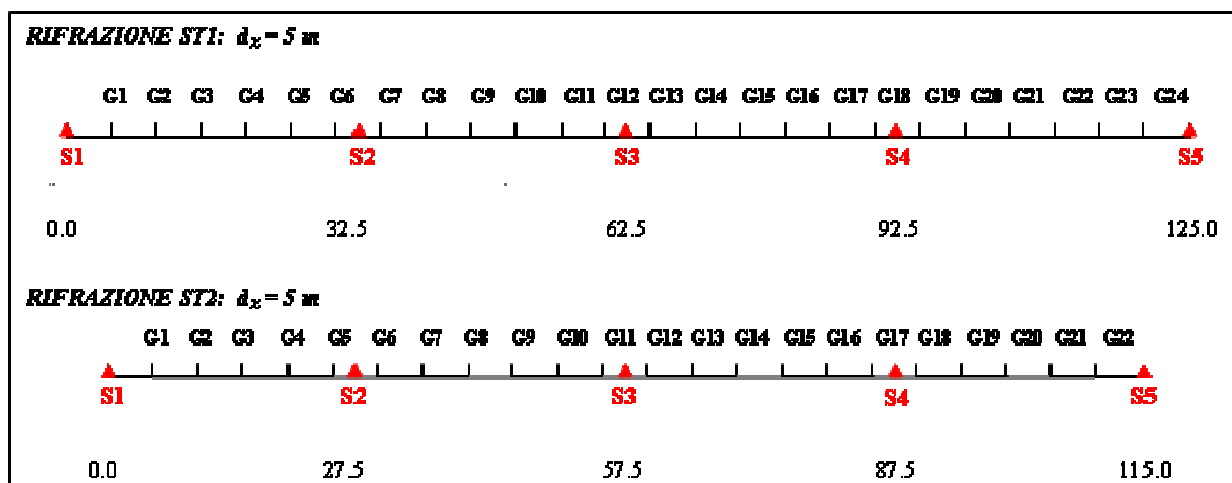
configurazione stendimento n. 2:

- 2 end-shots esterni allo stendimento di geofoni (S1 e S5)
- 2 intermedi posti rispettivamente tra il 5° e il 6° geofono e tra il 17° e 18° geofono (S2 e S4)
- 1 centrale tra il 11° e il 12° geofono (S3)

Di seguito si riportano in modo sintetico i parametri configurazionali (spaziali e temporali) dell'acquisizione in onde P ed SH per ciascun sito:

PARAMETRI CONFIGURAZIONALI SISMICA A RIFRAZIONE		
	SITO n. 1	SITO n. 2
Orientazione	NEE-SSW (20-200)	W-E (280-100)
Dislivello altimetrico tra gli end-shots	0.0 m	0.0 m
Lunghezza stendimento compresi end-shots	125.0 m	115.0 m
Lunghezza stendimento ricevitori	115.0 m	105.0 m
Numero Geofoni	24	22
Distanza intergeofonica	5.0 m	5.0 m
Numero punti di energizzazione (shots)	5	5
End-shots	5.0 m	5.0 m
Distanza shots interni	30.0 m	30.0 m
Durata acquisizione	256 ms (P) - 512 ms (SH)	
Intervallo di campionamento	0.250 ms (P) - 0.500 ms (SH)	
Numero di campioni per traccia	1024	
Massima frequenza campionabile	2 kHz (P) - 1 kHz (SH)	

Di seguito si riporta una configurazione geometricaschematica dell'**indagine sismica combinata**:



Sulla base di valutazioni incrociate sull'attendibilità dei risultati ottenuti dalle ricostruzioni sismiche è possibile scegliere il modello ritenuto più conforme alla situazione litostratigrafica presente nell'area e di cui è sempre preferibile avere a disposizione informazioni dirette di tipo geologico, geotecnico e/o idrogeologico.

In funzione del modello scelto viene individuato l'insieme di situazioni monodimensionali in grado di rappresentare l'area di studio: tali modelli sono utilizzabili ai fini di valutazioni semiquantitative della risposta sismica locale, ricordando che gli andamenti dei rifrattori individuati possono non essere coincidenti con quelli reali in quanto valutati tramite un solo stendimento lineare; al fine di individuare le reali geometrie dei sismostrati sarebbe necessario eseguire più stendimenti disposti tra loro ortogonalmente.

3. Interpretazione e risultati

La topografia della superficie dei 2 siti investigati è subpianeggiante sul tratto investigato; il rumore ambientale è risultato mediamente rilevante; negli allegati n. 2 e n. 5 si riporta, per ciascun stendimento e distinto per le onde P e per le onde S, la rappresentazione relativizzata in autoranging dei rumori ambientali acquisiti dai geofoni prima delle energizzazioni (una linea perfettamente rettilinea corrisponde alla situazione ideale di assenza totale di rumore ambientale e strumentale).

Per ogni stendimento si è utilizzato un sistema di riferimento relativo, il cui origine è posto in corrispondenza dell'end shot esterno al 1° geofono.

3.1. SITO n. 1 (adiacente al Fiume Mella)

3.1.1. Acquisizione ed analisi onde P

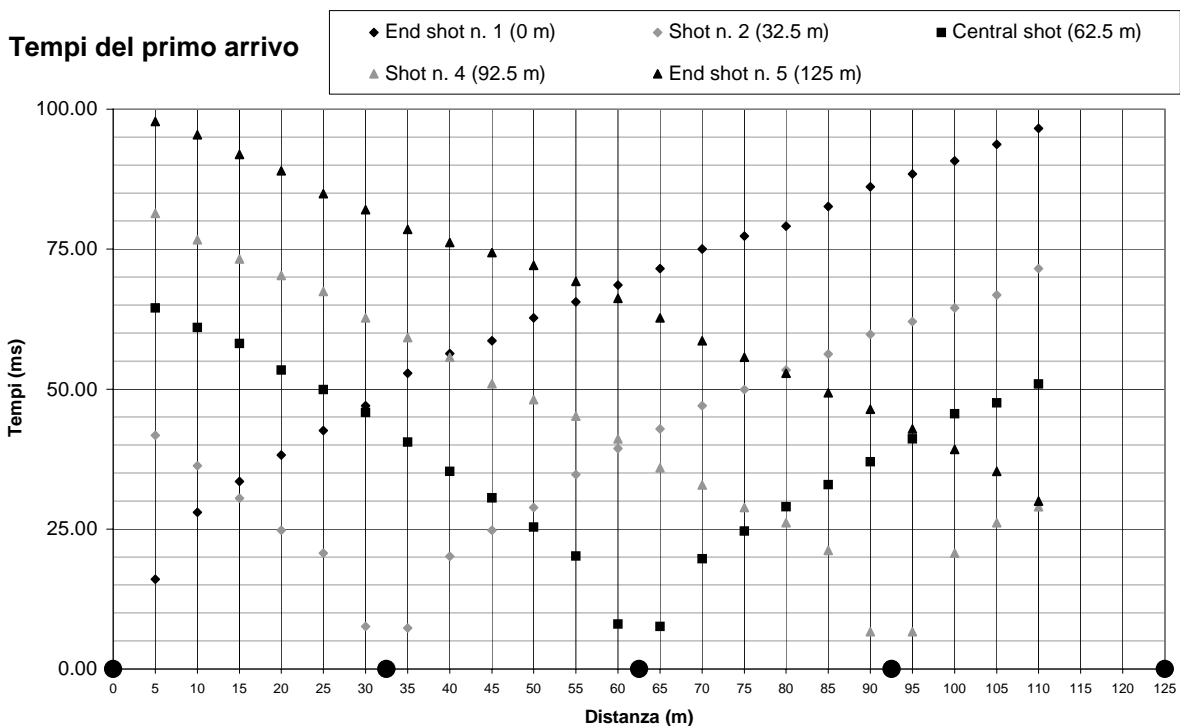
In allegato n. 3 si riporta il sismogramma multishot acquisito, da cui tramite amplificazione ed equalizzazione delle tracce si è estratto il sismogramma elaborato da sottoporre ad eventuali procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto, taglia basso e passa banda.

Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio:

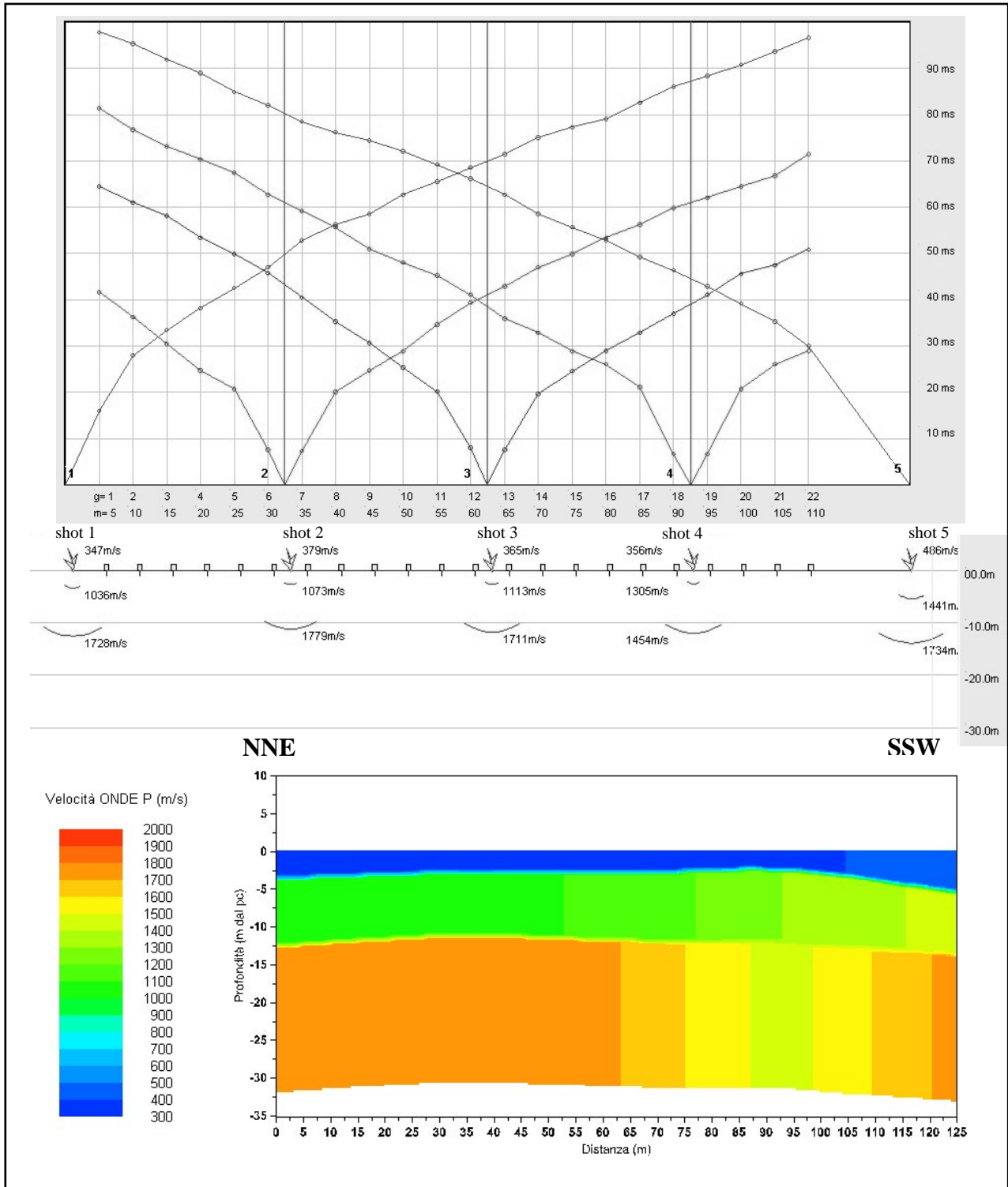
<i>N° shot</i>			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Distanza relativa (m)</i>			0.0	32.5	62.5	92.5	125.0
<i>Quota relativa (m)</i>			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Geofono</i>	<i>Distanza relativa (m)</i>	<i>Quota relativa (m)</i>	<i>Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)</i>				
			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>1</i>	5	0.0	16.00	41.70	64.50	81.40	97.80
<i>2</i>	10	0.0	28.00	36.29	61.00	76.70	95.40
<i>3</i>	15	0.0	33.50	30.50	58.09	73.20	91.90
<i>4</i>	20	0.0	38.20	24.79	53.40	70.30	89.00
<i>5</i>	25	0.0	42.59	20.70	49.90	67.40	84.90
<i>6</i>	30	0.0	47.00	7.59	45.79	62.70	82.00

7	35	0.0	52.80	7.30	40.50	59.20	78.50
8	40	0.0	56.30	20.10	35.29	55.70	76.19
9	45	0.0	58.59	24.79	30.60	51.00	74.40
10	50	0.0	62.70	28.87	25.37	48.09	72.10
11	55	0.0	65.60	34.70	20.19	45.20	69.20
12	60	0.0	68.60	39.40	8.00	41.09	66.20
13	65	0.0	71.50	42.90	7.59	35.90	62.70
14	70	0.0	75.00	47.00	19.69	32.88	58.60
15	75	0.0	77.30	49.90	24.60	28.87	55.70
16	80	0.0	79.09	53.40	29.00	26.10	52.80
17	85	0.0	82.59	56.29	32.90	21.19	49.30
18	90	0.0	86.09	59.79	37.00	6.69	46.40
19	95	0.0	88.40	62.09	41.09	6.69	42.90
20	100	0.0	90.80	64.50	45.59	20.69	39.20
21	105	0.0	93.69	66.80	47.50	26.10	35.29
22	110	0.0	96.59	71.50	50.88	29.00	30.00
23	115	0.0	-	-	-	-	-
24	120	0.0	-	-	-	-	-

Nel grafico distanza-tempo sono riportati i tempi del primo arrivo da cui si individuano le dromocrone e tramite linearizzazione si individuano i principali rifrattori al di sotto di ciascun shot:



Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo a 3 strati ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (griglia shot-point):



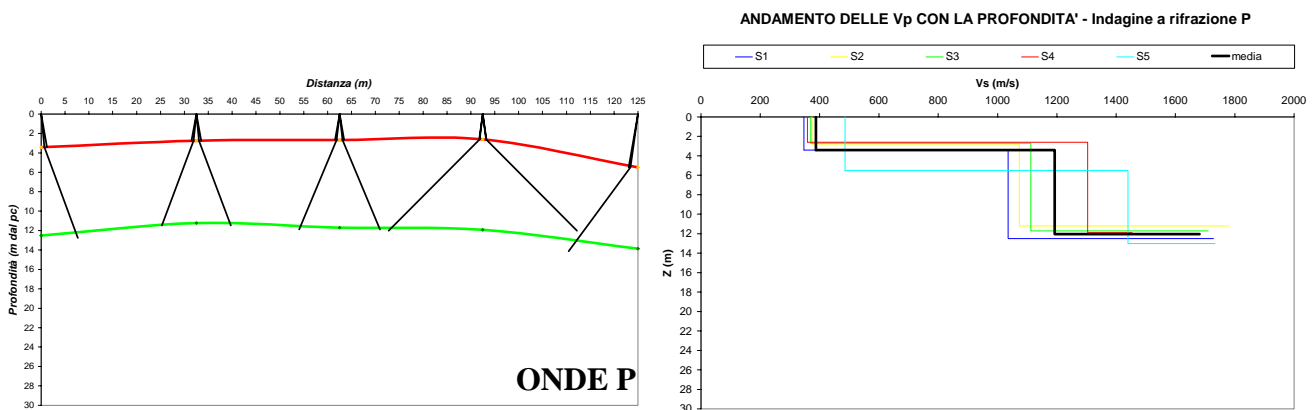
Si evidenziano pertanto 2 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità variabile da 2.5-5.5 m da pc che separa il sismostrato superficiale caratterizzato da valori di V_P compresi tra 350 e 500 m/s da quello sottostante con V_P compresi tra 1000 e 1400 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 11.0 a 14.0 m da pc, che separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 1500 e 1800 m/s.

Nell'ipotesi di propagazione di onde di volume di tipo piano il cui percorso è modellizzato attraverso raggi rettilinei (al fine di rendere valide le leggi dell'ottica geometrica), è possibile tracciare le ipotetiche traiettorie dei raggi delle onde elastiche generate nei 5 shots di ciascun stendimento, che si propagano nel sottosuolo, considerato elastico lineare isotropo.

L'indagine con onde P fornisce per tutti i 5 shots e per i 2 rifrattori valori medi dell'angolo critico compresi tra 19-46°:

	ONDE P	
	1° rifrattore	2° rifrattore
Angolo di trasmissione medio 1-2 (°)	-	13
Angolo critico medio (°)	19	46

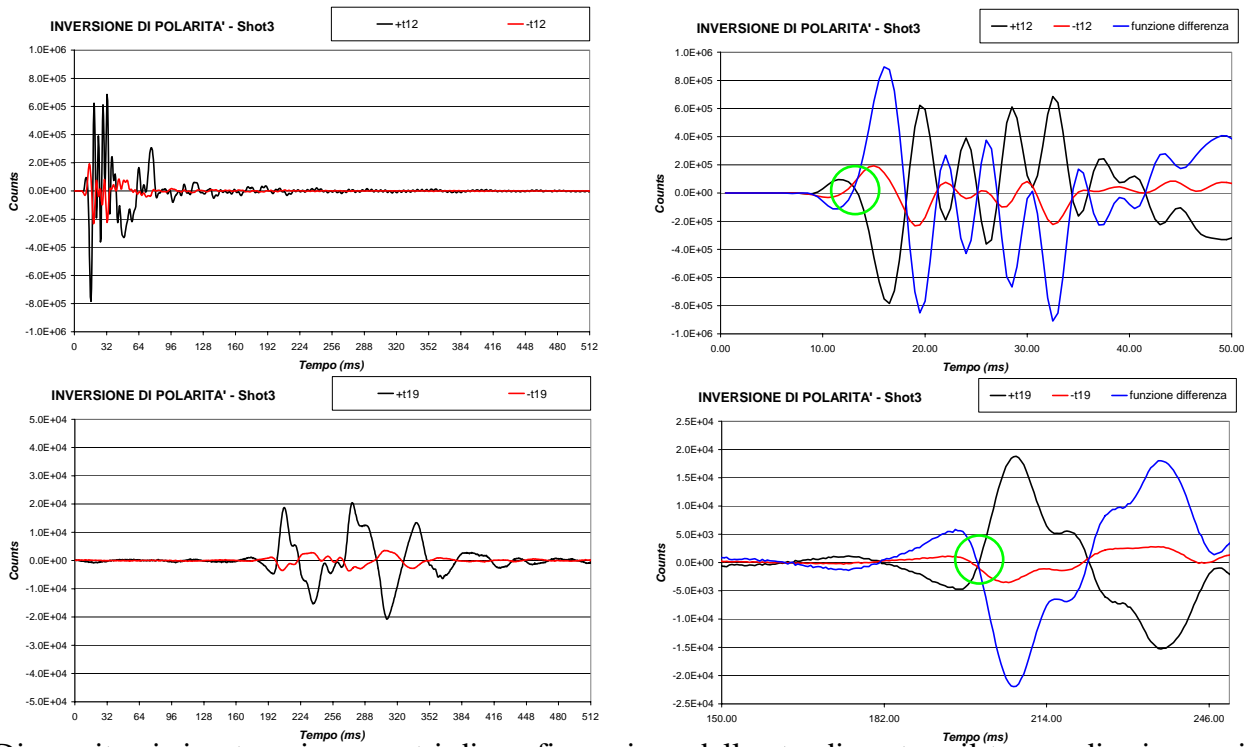


3.1.2. Acquisizione ed analisi onde S

In allegato n. 4 si riporta il sismogramma multishot acquisito, da cui tramite amplificazione ed equalizzazione delle tracce si è estratto il sismogramma elaborato da sottoporre ad eventuali procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto, taglia basso e passa banda.

Per l'individuazione del primo arrivo dell'onda SH si è operato tramite inversione di polarità, energizzando la sorgente SH sia con polarizzazione diretta (S+) sia con polarizzazione inversa (S-), in modo da valutare con precisione il primo arrivo dell'onda di taglio, depurandolo dall'eventuale influenza dell'arrivo di onde longitudinali più veloci; queste ultime possono essere più o meno evidenti a seconda dell'efficienza della sorgente SH, in quanto legata, oltre che alla distanza dalla sorgente, anche all'aliquota energetica assegnata alle onde di compressione durante l'energizzazione della sorgente stessa.

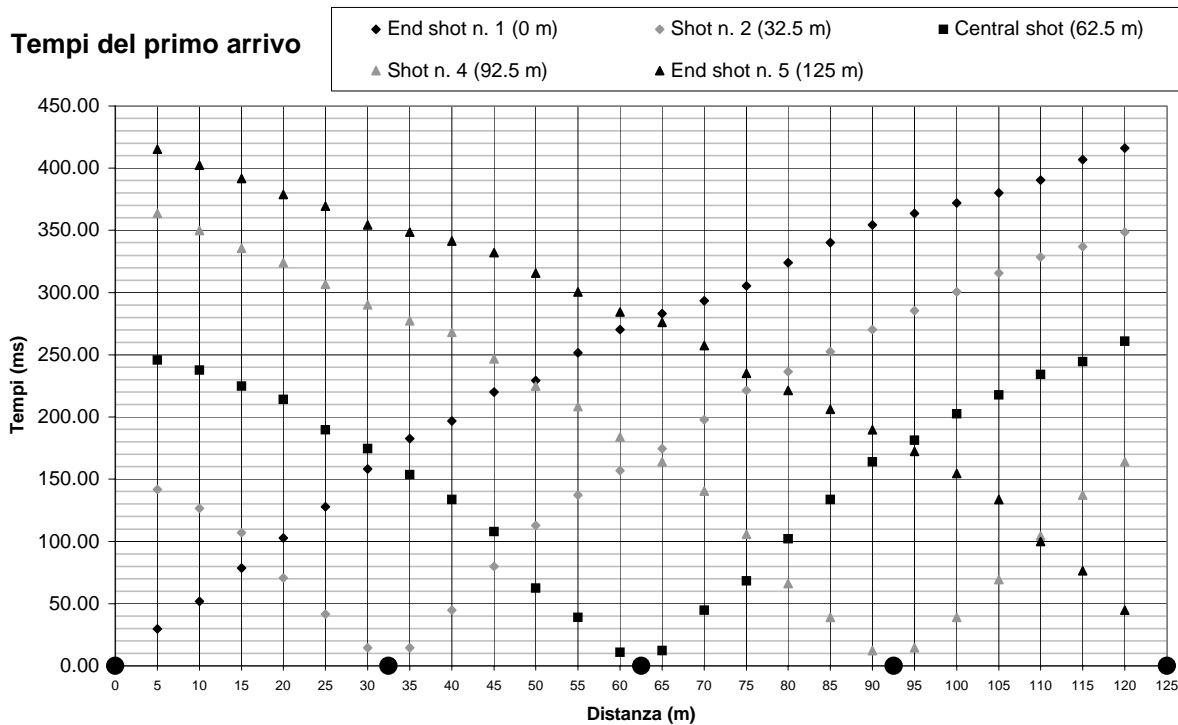
Di seguito si riporta un esempio di analisi eseguita su coppie di segnali acquisiti con polarità inversa, mediante sottrazione, osservazione della forma d'onda e dei punti caratteristici e filtrazione delle componenti di più alta frequenza rispetto a quella di interesse:



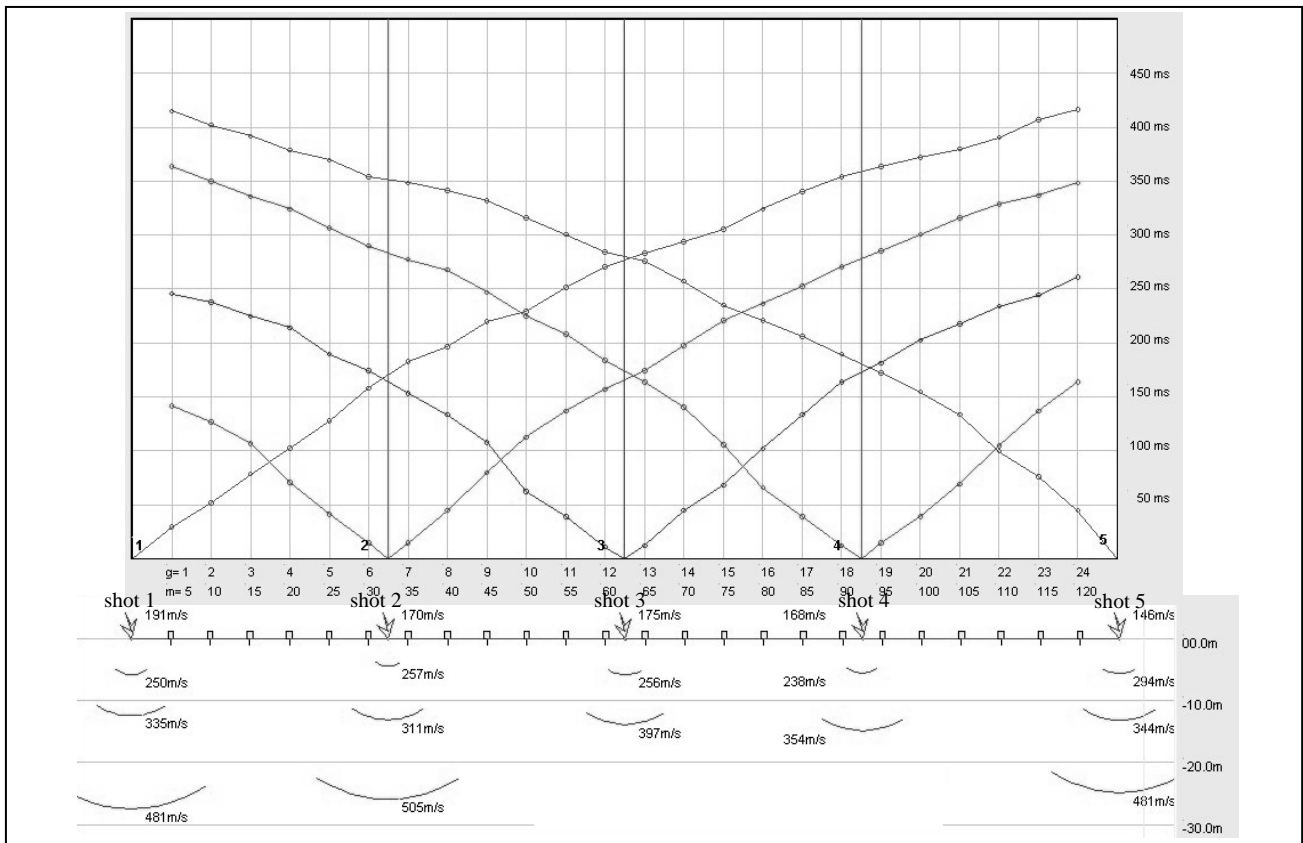
Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio:

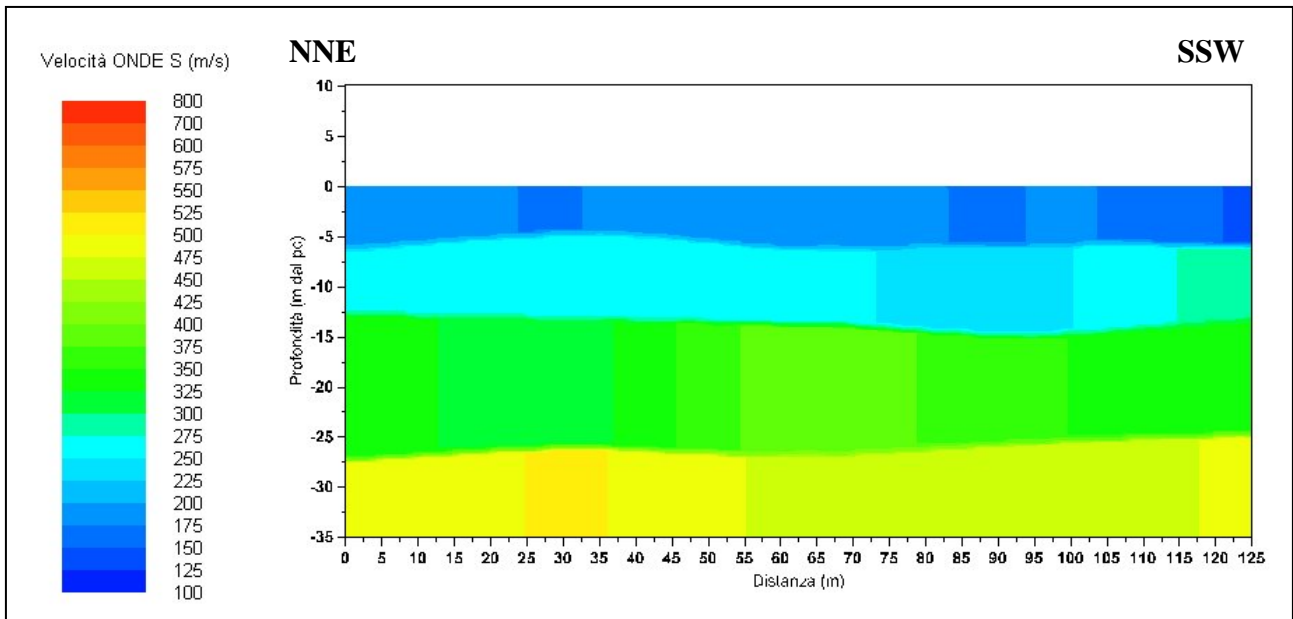
<i>N° shot</i>			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Distanza relativa (m)</i>			0.0	32.5	62.5	92.5	125.0
<i>Quota relativa (m)</i>			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Geofono</i>	<i>Distanza relativa (m)</i>	<i>Quota relativa (m)</i>	<i>Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)</i>				
			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>1</i>	5	0.0	29.70	141.80	245.70	363.70	415.10
<i>2</i>	10	0.0	51.90	126.60	237.60	349.70	402.20
<i>3</i>	15	0.0	78.70	106.80	224.69	335.70	391.70
<i>4</i>	20	0.0	102.79	70.60	214.20	324.00	378.90
<i>5</i>	25	0.0	127.80	41.40	189.70	306.50	369.50
<i>6</i>	30	0.0	158.20	14.50	174.50	290.10	354.30
<i>7</i>	35	0.0	182.70	14.50	153.50	277.30	348.50
<i>8</i>	40	0.0	196.70	44.90	133.60	267.90	341.50
<i>9</i>	45	0.0	220.00	79.90	107.90	246.90	332.20
<i>10</i>	50	0.0	229.40	112.59	62.40	224.70	315.80
<i>11</i>	55	0.0	251.60	137.10	39.00	208.39	300.60
<i>12</i>	60	0.0	270.30	157.00	11.00	183.80	284.29
<i>13</i>	65	0.0	283.10	174.50	12.19	164.00	276.10
<i>14</i>	70	0.0	293.60	197.90	44.90	140.60	257.39
<i>15</i>	75	0.0	305.30	221.19	68.19	105.60	235.19
<i>16</i>	80	0.0	324.00	236.39	102.09	65.90	221.20
<i>17</i>	85	0.0	340.29	252.70	133.60	39.00	206.00
<i>18</i>	90	0.0	354.29	270.30	164.00	12.18	189.69
<i>19</i>	95	0.0	363.70	285.40	181.50	14.50	172.19
<i>20</i>	100	0.0	371.89	300.60	202.50	39.00	154.69
<i>21</i>	105	0.0	380.00	315.80	217.69	69.40	133.60
<i>22</i>	110	0.0	390.50	328.70	234.10	104.40	99.80
<i>23</i>	115	0.0	406.89	336.80	244.60	137.10	76.40
<i>24</i>	120	0.0	416.20	348.50	260.90	164.00	44.90

Nel grafico distanza-tempo sono riportati i tempi del primo arrivo da cui si individuano le dromocrone e tramite linearizzazione si individuano i principali rifrattori al di sotto di ciascun shot:



Di seguito si riporta lo schema interpretativo ottenuto scegliendo un modello a 4 strati ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (griglia shot point):





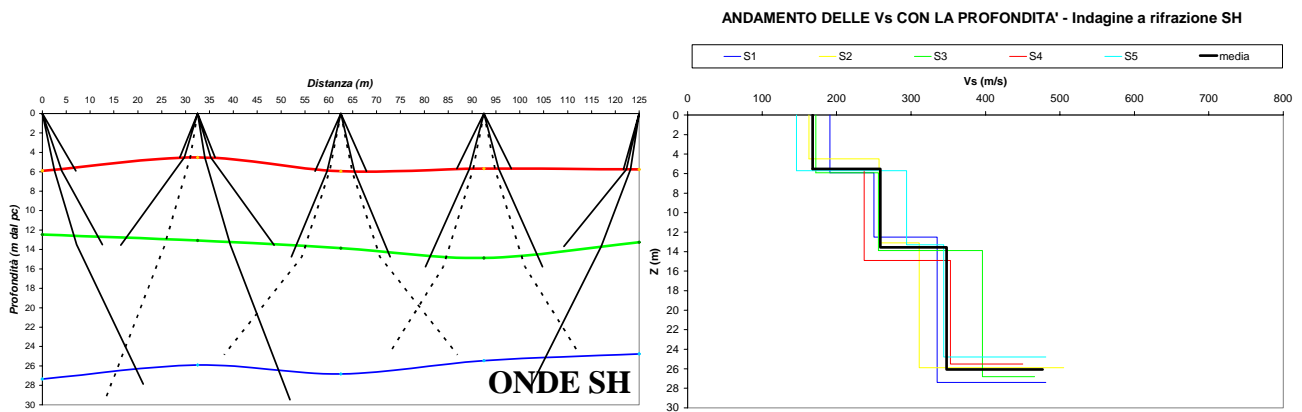
Si evidenziano pertanto 3 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità variabile da 4.5 a 6.0 m da pc che separa il sismostrato superficiale con valori di V_S compresi tra 150 e 190 m/s da quello sottostante con valori di V_S compresi tra 230 e 290 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 12.5 a 14.5 m da pc che separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato con valori di V_S compresi tra 300 e 400 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 25.0 a 27.5 m da pc che separa il terzo sismostrato dal quarto sismostrato con valori di V_S compresi tra 450 e 500 m/s.

Nell'ipotesi di propagazione di onde di volume di tipo piano il cui percorso è modellizzato attraverso raggi rettilinei (al fine di rendere valide le leggi dell'ottica geometrica), è possibile tracciare le ipotetiche traiettorie dei raggi delle onde elastiche generate nei 5 shots di ciascun stendimento che si propagano nel sottosuolo, considerato elastico lineare isotropo.

L'indagine con onde SH fornisce per tutti i 5 shots e per i 3 rifrattori valori medi dell'angolo critico compresi tra 41-49°:

	ONDE SH		
	1° rifrattore	2° rifrattore	3° rifrattore
Angolo di trasmissione medio 1-2 (°)	-	29	21
Angolo di trasmissione medio 2-3 (°)	-	-	33
Angolo critico medio (°)	41	48	49



3.2. SITO n. 2 (adiacente all'oratorio)

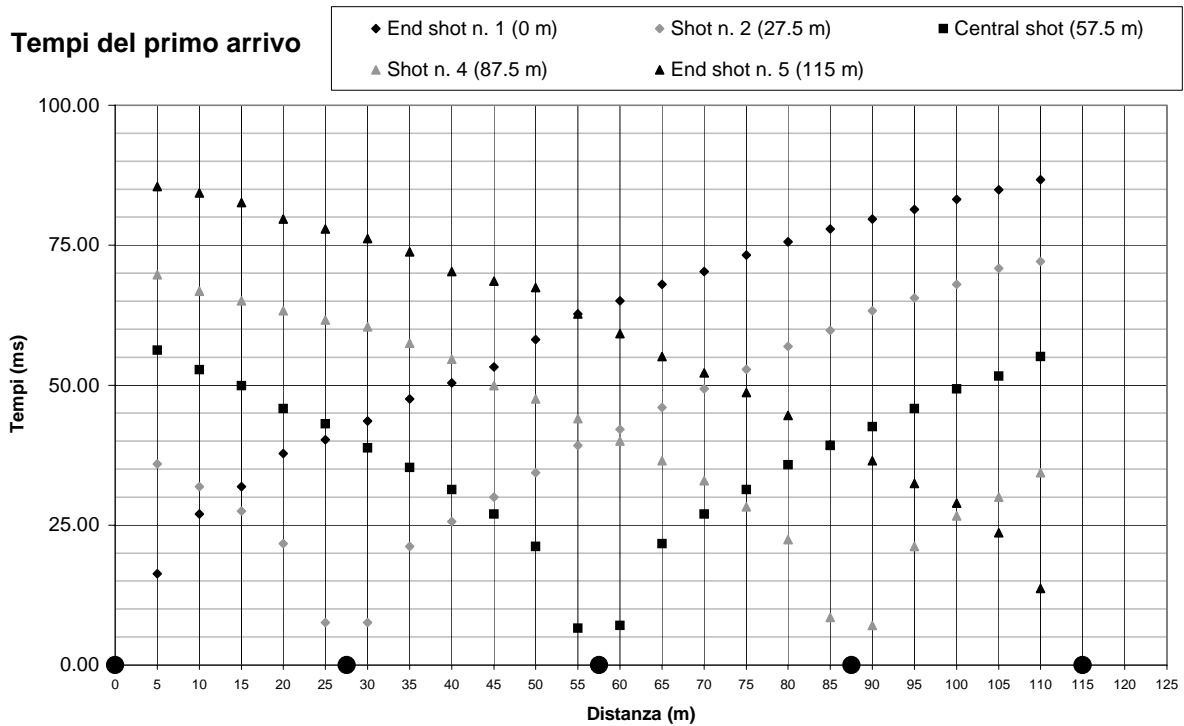
3.2.1. Acquisizione ed analisi onde P

In allegato n. 6 si riporta il sismogramma multishot acquisito, da cui tramite amplificazione ed equalizzazione delle tracce si è estratto il sismogramma elaborato da sottoporre ad eventuali procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto, taglia basso e passa banda.

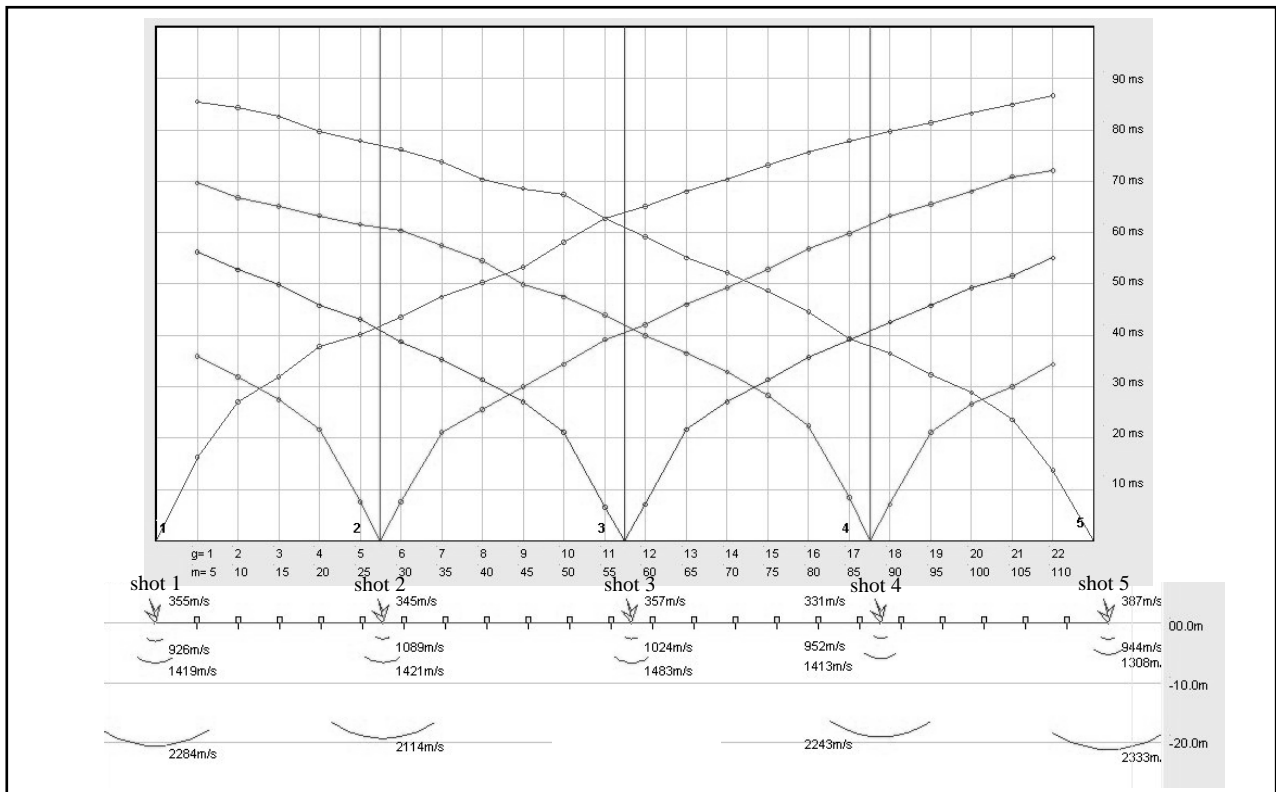
Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio:

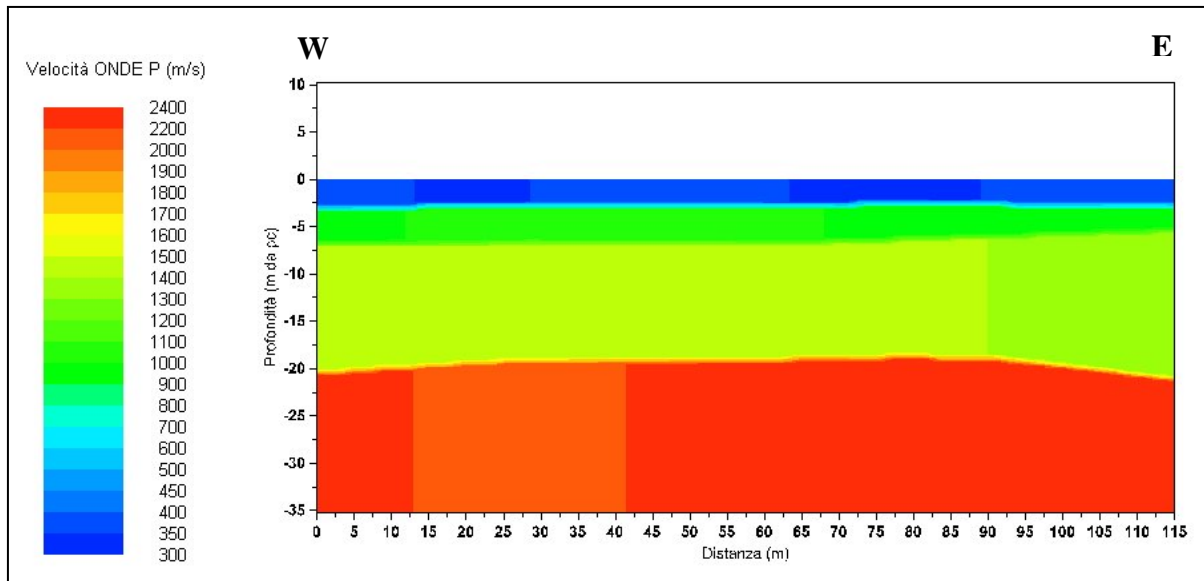
<i>N° shot</i>			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Distanza relativa (m)</i>			0.0	27.5	57.5	87.5	115
<i>Quota relativa (m)</i>			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Geofono</i>	<i>Distanza relativa (m)</i>	<i>Quota relativa (m)</i>	<i>Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)</i>				
			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>1</i>	5	0.0	16.29	35.90	56.29	69.70	85.50
<i>2</i>	10	0.0	27.00	31.87	52.79	66.80	84.30
<i>3</i>	15	0.0	31.87	27.50	49.90	65.10	82.59
<i>4</i>	20	0.0	37.79	21.69	45.79	63.30	79.69
<i>5</i>	25	0.0	40.20	7.59	43.09	61.60	77.90
<i>6</i>	30	0.0	43.59	7.59	38.79	60.40	76.19
<i>7</i>	35	0.0	47.50	21.19	35.29	57.50	73.80
<i>8</i>	40	0.0	50.38	25.60	31.37	54.60	70.30
<i>9</i>	45	0.0	53.29	30.00	27.00	49.90	68.59
<i>10</i>	50	0.0	58.09	34.38	21.19	47.50	67.40
<i>11</i>	55	0.0	62.70	39.20	6.59	44.00	62.70
<i>12</i>	60	0.0	65.10	42.09	7.09	40.00	59.20
<i>13</i>	65	0.0	68.00	46.00	21.69	36.50	55.09
<i>14</i>	70	0.0	70.30	49.30	27.00	32.90	52.20
<i>15</i>	75	0.0	73.20	52.80	31.37	28.29	48.70
<i>16</i>	80	0.0	75.60	56.90	35.79	22.39	44.59
<i>17</i>	85	0.0	77.90	59.80	39.20	8.50	39.40
<i>18</i>	90	0.0	79.70	63.30	42.59	7.09	36.50
<i>19</i>	95	0.0	81.40	65.60	45.79	21.19	32.40
<i>20</i>	100	0.0	83.20	68.00	49.29	26.60	28.89
<i>21</i>	105	0.0	84.90	70.90	51.59	30.00	23.60
<i>22</i>	110	0.0	86.70	72.10	55.09	34.38	13.69

Nel grafico distanza-tempo sono riportati i tempi del primo arrivo da cui si individuano le dromocrone e tramite linearizzazione si individuano i principali rifrattori al di sotto di ciascun shot:



Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo a 4 strati ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (griglia shot-point):





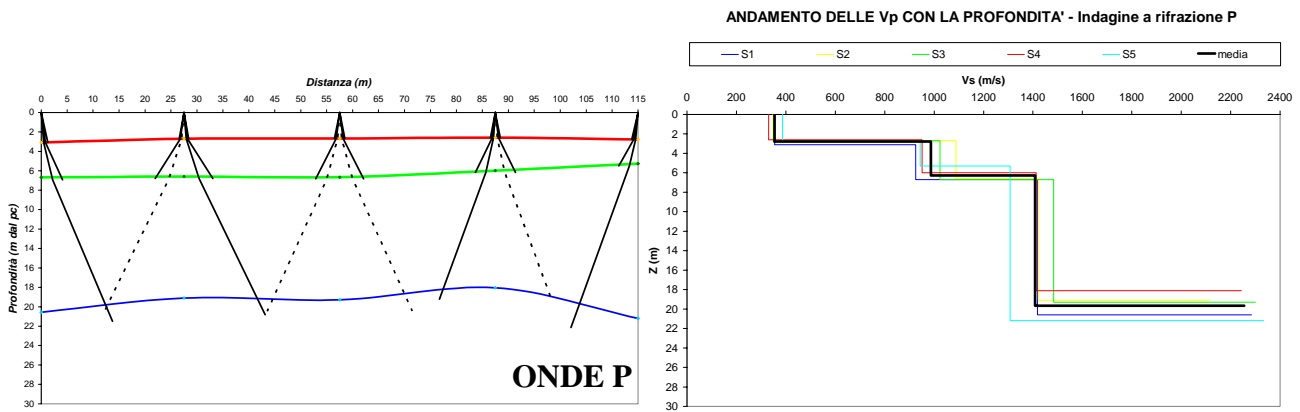
Si evidenziano pertanto 3 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità variabile da 2.5-3.0 m da pc che separa il sismostrato superficiale caratterizzato da valori di V_P compresi tra 330 e 380 m/s da quello sottostante con V_P compresi tra 900 e 1100 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 5.0 a 7.0 m da pc, che separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 1300 e 1500 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 19.0 a 21.0 m da pc, che separa il terzo sismostrato dal quarto sismostrato caratterizzato da valori di V_P compresi tra 2150 e 2350 m/s.

Nell'ipotesi di propagazione di onde di volume di tipo piano il cui percorso è modellizzato attraverso raggi rettilinei (al fine di rendere valide le leggi dell'ottica geometrica), è possibile tracciare le ipotetiche traiettorie dei raggi delle onde elastiche generate nei 5 shots di ciascun stendimento, che si propagano nel sottosuolo, considerato elastico lineare isotropo.

L'indagine con onde SH fornisce per tutti i 5 shots e per i 3 rifrattori valori medi dell'angolo critico compresi tra 21-44°:

	ONDE P		
	1° rifrattore	2° rifrattore	3° rifrattore
Angolo di trasmissione medio 1-2 (°)	-	14	9
Angolo di trasmissione medio 2-3 (°)	-	-	26
Angolo critico medio (°)	21	44	38

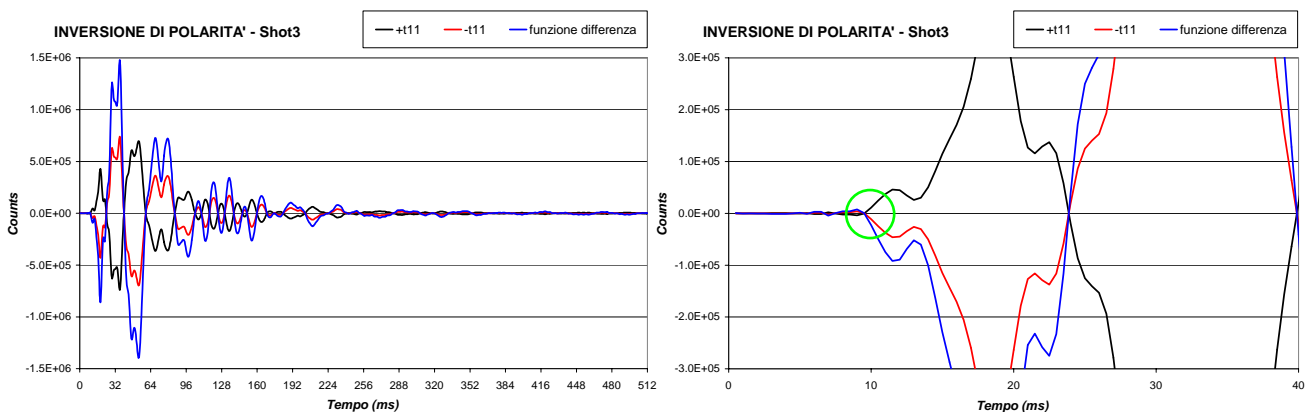


3.2.2. Acquisizione ed analisi onde S

In allegato n. 7 si riporta il sismogramma multishot acquisito, da cui tramite amplificazione ed equalizzazione delle tracce si è estratto il sismogramma elaborato da sottoporre ad eventuali procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto, taglia basso e passa banda.

Per l'individuazione del primo arrivo dell'onda SH si è operato tramite inversione di polarità, energizzando la sorgente SH sia con polarizzazione diretta (S+) sia con polarizzazione inversa (S-), in modo da valutare con precisione il primo arrivo dell'onda di taglio, depurandolo dall'eventuale influenza dell'arrivo di onde longitudinali più veloci; queste ultime possono essere più o meno evidenti a seconda dell'efficienza della sorgente SH, in quanto legata, oltre che alla distanza dalla sorgente, anche all'aliquota energetica assegnata alle onde di compressione durante l'energizzazione della sorgente stessa.

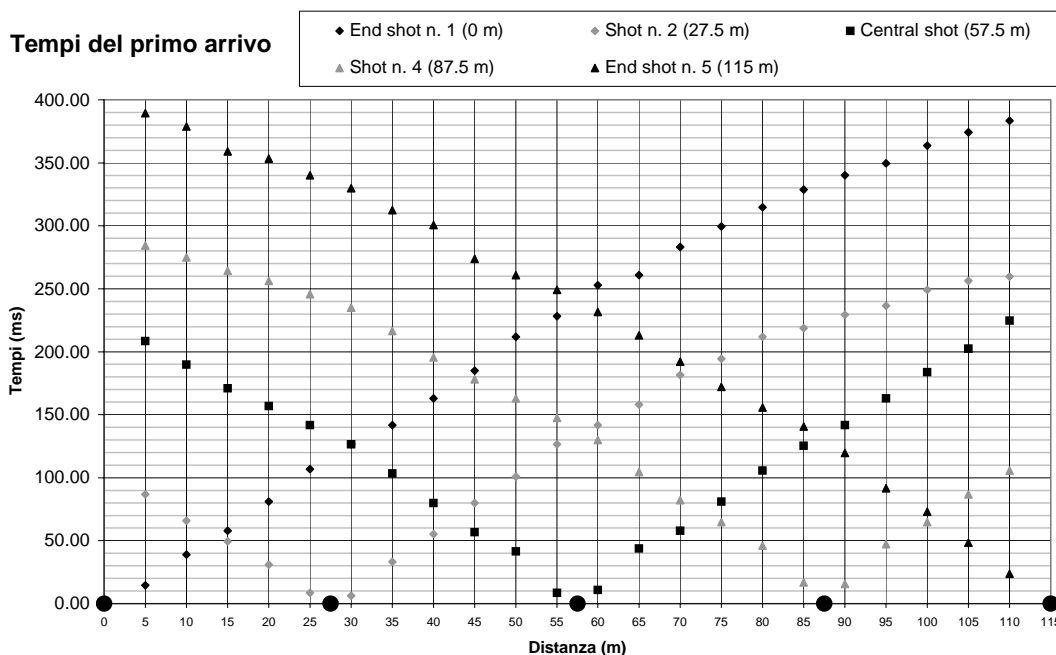
Di seguito si riporta un esempio di analisi eseguita su coppie di segnali acquisiti con polarità inversa, mediante sottrazione, osservazione della forma d'onda e dei punti caratteristici e filtrazione delle componenti di più alta frequenza rispetto a quella di interesse:



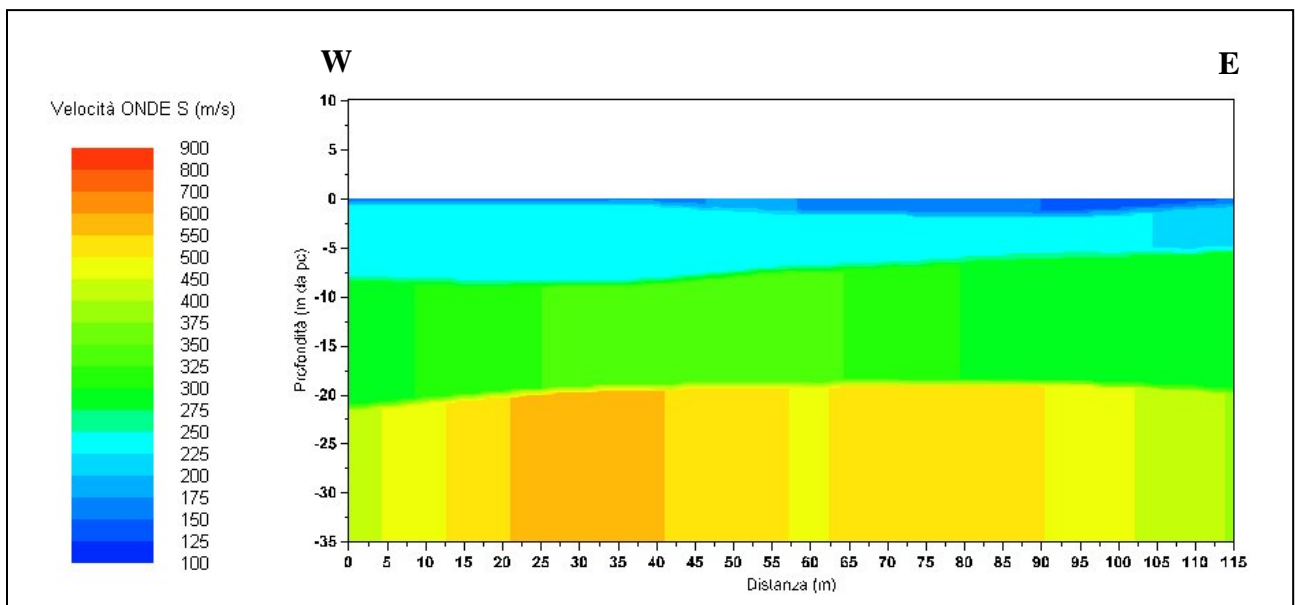
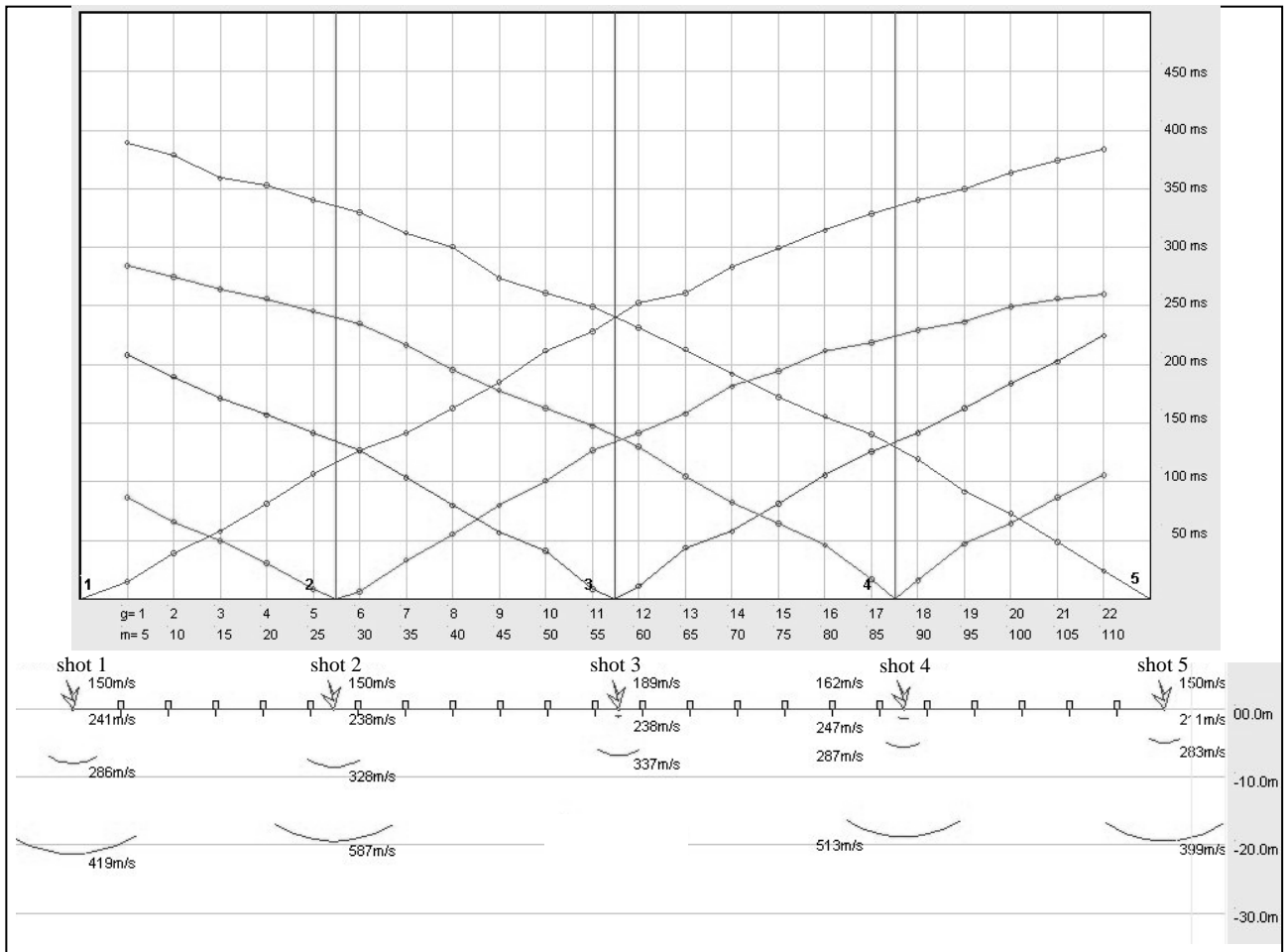
Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio:

N° shot			1	2	3	4	5
Distanza relativa (m)			0.0	27.5	57.5	87.5	115
Quota relativa (m)			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Geofono	Distanza relativa (m)	Quota relativa (m)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)				
			1	2	3	4	5
1	5	0.0	14.50	86.90	208.40	284.30	389.40
2	10	0.0	39.00	65.90	189.70	274.89	378.90
3	15	0.0	57.70	49.50	171.00	264.40	359.00
4	20	0.0	81.10	30.87	157.00	256.20	353.20
5	25	0.0	106.80	8.68	141.80	245.70	340.30
6	30	0.0	126.58	6.30	126.58	235.20	329.80
7	35	0.0	141.80	33.20	103.30	216.50	312.30
8	40	0.0	162.80	55.40	79.90	195.50	300.60
9	45	0.0	185.00	79.90	56.60	178.00	273.80
10	50	0.0	211.90	100.90	41.40	162.80	260.90
11	55	0.0	228.20	126.58	8.68	147.60	249.20
12	60	0.0	252.70	141.80	11.00	130.10	231.70
13	65	0.0	260.90	158.19	43.70	104.40	213.00
14	70	0.0	283.10	181.50	57.70	82.20	192.00
15	75	0.0	299.50	194.40	81.08	64.69	172.19
16	80	0.0	314.60	211.90	105.58	46.00	155.80
17	85	0.0	328.70	218.89	125.50	16.79	140.60
18	90	0.0	340.30	229.39	141.80	15.68	119.60
19	95	0.0	349.70	236.39	162.80	47.20	91.59
20	100	0.0	363.70	249.20	183.80	64.70	72.90
21	105	0.0	374.20	256.20	202.50	86.90	48.40
22	110	0.0	383.50	259.80	224.69	105.58	23.90

Nel grafico distanza-tempo sono riportati i tempi del primo arrivo da cui si individuano le dromocrone e tramite linearizzazione si individuano i principali rifrattori al di sotto di ciascun shot:



Di seguito si riporta lo schema interpretativo ottenuto scegliendo un modello a 4 strati ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (griglia shot point):



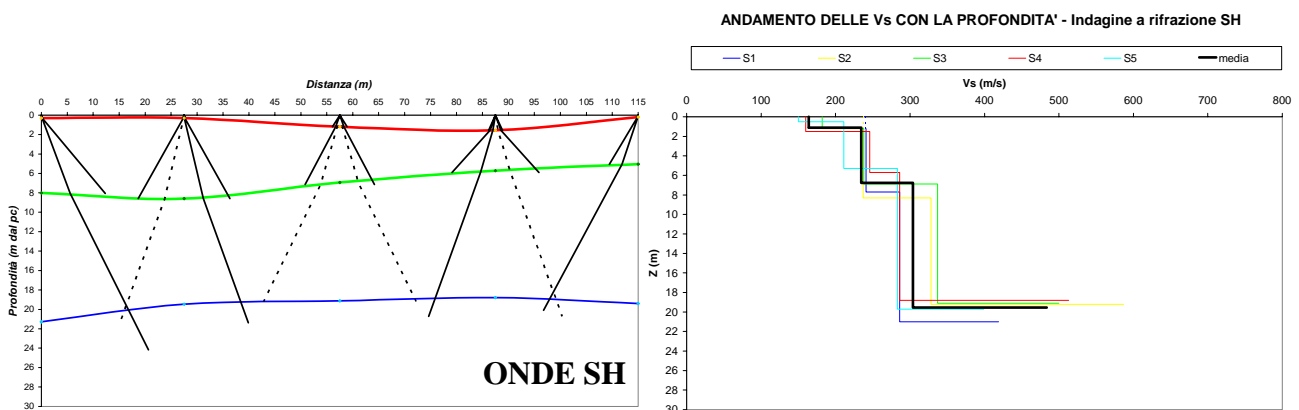
Si evidenziano pertanto 3 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità variabile da 0.5 a 1.5 m da pc (praticamente assente nel settore W), che separa il sismostrato superficiale con valori di V_S compresi tra 150 e 180 m/s da quello sottostante con valori di V_S compresi tra 210 e 250 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 5.0 a 8.0 m da pc che separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato con valori di V_S compresi tra 280 e 340 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 19.0 a 21.0 m da pc che separa il terzo sismostrato dal quarto sismostrato con valori di V_S compresi tra 400 e 580 m/s.

Nell'ipotesi di propagazione di onde di volume di tipo piano il cui percorso è modellizzato attraverso raggi rettilinei (al fine di rendere valide le leggi dell'ottica geometrica), è possibile tracciare le ipotetiche traiettorie dei raggi delle onde elastiche generate nei 5 shots di ciascun stendimento che si propagano nel sottosuolo, considerato elastico lineare isotropo.

L'indagine con onde SH fornisce per tutti i 5 shots e per i 3 rifrattori valori dell'angolo critico compresi tra 40-50°:

	ONDE SH		
	1° rifrattore	2° rifrattore	3° rifrattore
Angolo di trasmissione medio 1-2 (°)	-	32	20
Angolo di trasmissione medio 2-3 (°)	-	-	29
Angolo critico medio (°)	44	50	40



4. Modello geofisico sismico interpretativo

Le sezioni sismiche ottenute dall'interpretazione (sismica a rifrazione) dei segnali acquisiti (rappresentati tramite tecnica di campitura cromatica) permettono di individuare le principali unità geofisiche costituenti il modello geofisico dell'area d'indagine.

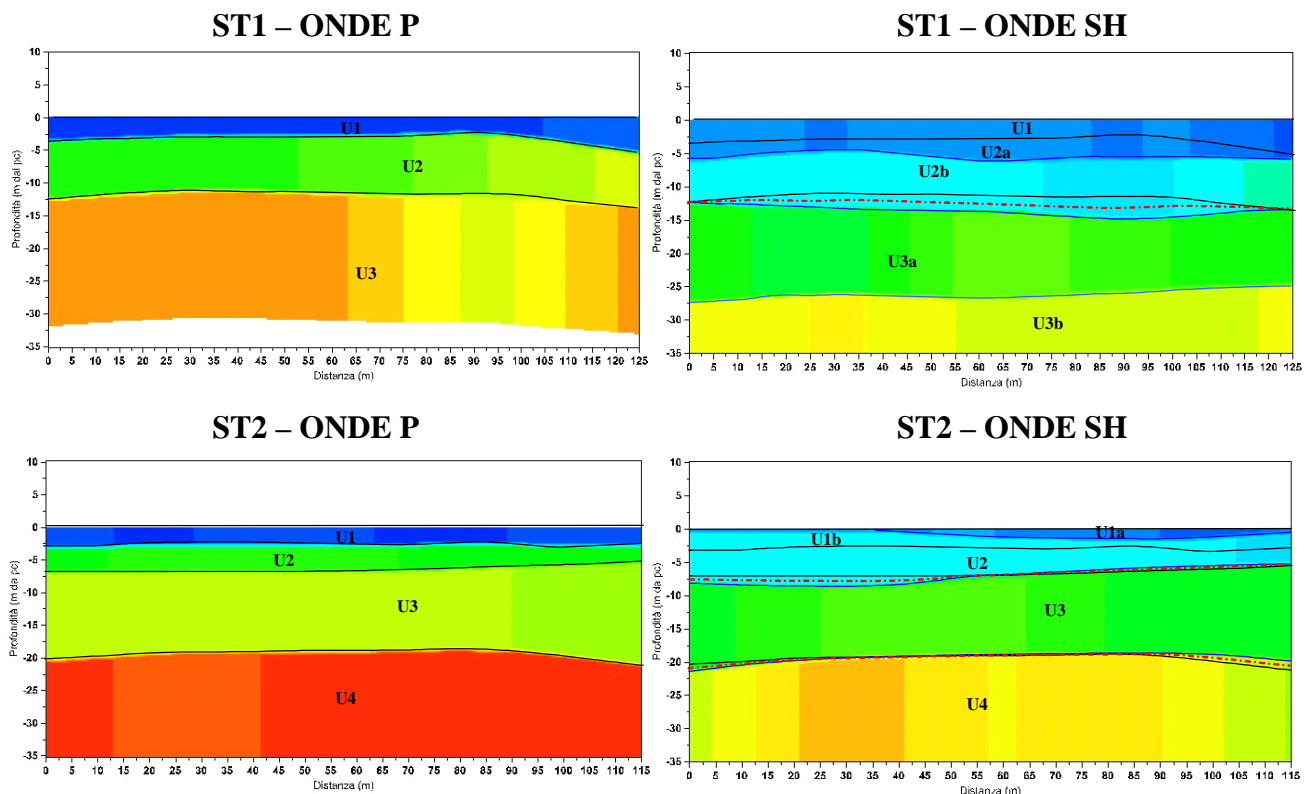
Si ricorda che qualunque tecnica di geofisica applicata ha un margine di errore intrinseco variabile in funzione del tipo di tecnica usata, di strumentazione adottata e di problematiche incontrate durante l'indagine e che solo l'operatore è in grado di quantificare in modo ottimale: nel caso in esame la risoluzione del metodo non permette precisioni in termini di spessore inferiori al metro e i

valori di velocità V_P e V_S sono da intendere come velocità medie all'interno di ciascuna unità geofisica individuata.

Si è proceduto all'interpretazione geofisica:

- individuando preliminarmente le unità geofisiche omogenee dal punto di vista delle onde P (V_P);
- sovrapponendo i limiti individuati sulle sezioni sismiche S, modificandoli ed integrandoli coerentemente con i valori di V_S e in rapporto con i valori di V_P , tenendo in considerazione i margini di errore dell'indagine.

Di seguito si riportano per i due siti di analisi le interpretazioni incrociate tra sezioni sismiche P e sezioni sismiche SH:

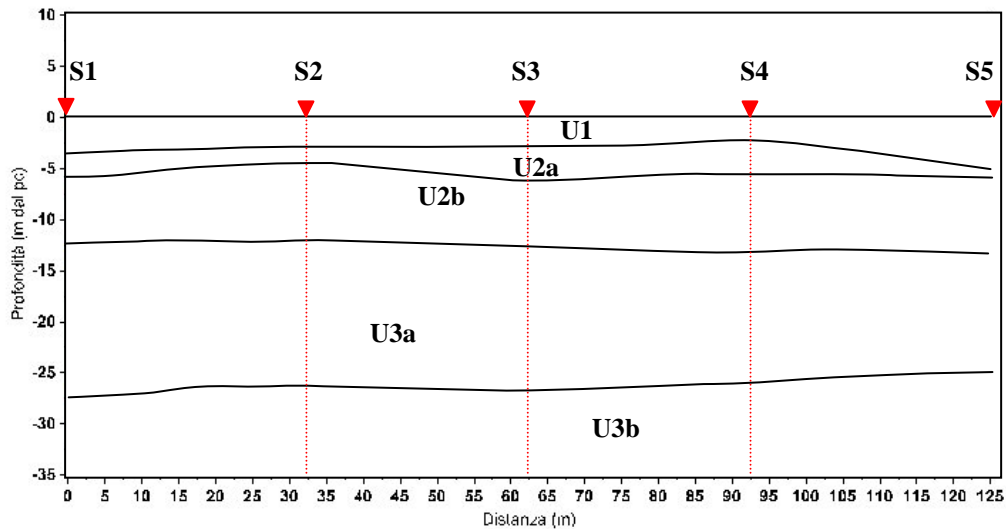


Ciascuna unità geofisica così individuata è da intendersi costituita da materiale continuo, isotropo ed elastico, le cui proprietà elastiche variano verticalmente in modo lineare da un valore minimo ad un valore massimo definito dall'intervallo di valori ad essa associati: a ciascuna unità è possibile assegnare un unico valore di V_P e V_S pari al valore medio dell'intervallo assegnato, mentre a tutto il modello è possibile associare uno o più gradienti di V_P e V_S con la profondità, in funzione delle variabilità laterali.

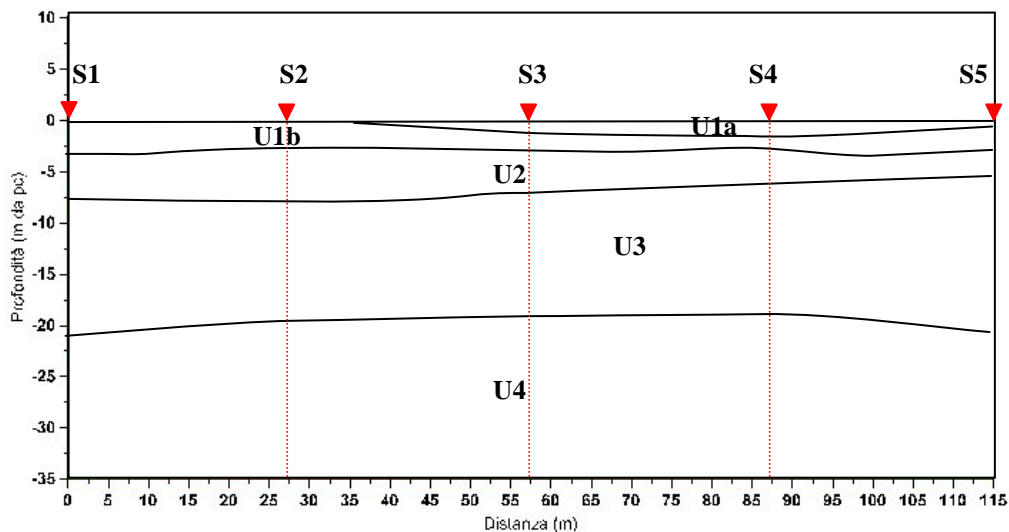
Le scelte interpretative sono volte nella direzione della maggior sicurezza e quindi in occasione di biunivocità sono state preferite condizioni cautelative in termini di spessori e valori di V_S che portano a situazioni più sfavorevoli dal punto di vista degli effetti sismici di sito.

Si è così individuato il modello geofisico sismico di ciascuna area, distinguendo diverse unità geofisiche, a cui si associano intervalli di valori di V_P e V_S e dei relativi parametri elastici.

MODELLO GEOFISICO – ST1



MODELLO GEOFISICO – ST2



Assegnando per ciascuna unità sismica individuata un intervallo di valore del peso di volume ricavato da dati di letteratura, ipotizzando pesi di volume gradualmente crescenti alle unità più profonde, è stato possibile calcolarne i principali parametri elastici.

Di seguito si riportano le tabelle dei parametri elastici delle unità geofisiche costituenti il modello geofisico di ciascuna area investigata, ove sono riportati i valori dei parametri elastici G (Modulo di taglio), E (Modulo di Young), K (Modulo di incompressibilità) e ν (coefficiente di Poisson) validi per l'intervallo di densità assegnato.

MODELLO GEOFISICO – STENDIMENTO ST1

Unità	Densità (g/cm ³)	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _P /V _S	v	G (MPa)	E (MPa)	K (MPa)
U1	1.83-1.94	350-500	150-190	2.33-2.63	0.39-0.42	41-70	115-198	170-391
U2a	1.83-1.94	1000-1400	150-190	6.67-7.37	0.48-0.49	41-70	123-208	1780-3703
U2b	1.94-2.04	1000-1400	230-290	4.35-4.83	0.47-0.48	102-171	302-507	1800-3767
U3a	1.94-2.04	1500-1800	300-400	4.50-5.00	0.47-0.48	174-326	516-962	4125-6171
U3b	2.04-2.14	1500-1800	450-500	3.33-3.60	0.45-0.46	413-535	1198-1561	4037-6222

MODELLO GEOFISICO – STENDIMENTO ST2

Unità	Densità (g/cm ³)	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _P /V _S	v	G (MPa)	E (MPa)	K (MPa)
U1a	1.73-1.83	330-380	150-180	2.11-2.20	0.35-0.37	39-59	107-161	137-186
U1b	1.83-1.94	330-380	210-250	1.52-1.57	0.12-0.16	81-121	188-271	92-118
U2	1.94-2.04	900-1100	210-250	4.29-4.40	0.47	85-127	251-375	1455-2297
U3	2.04-2.14	1300-1500	280-340	4.41-4.64	0.47	160-247	472-729	3232-4487
U4	2.04-2.14	2150-2350	400-580	4.05-5.38	0.47-0.48	326-720	967-2114	8989-10862

Si ricorda che tali valori sono validi per piccolissime deformazioni comprese nel tratto lineare elastico del legame costitutivo dei materiali (deformazioni tangenziali inferiore alla soglia elastica γ indicativamente dell'ordine di 10^{-2} - 10^{-4} %).

Di seguito si riportano i valori sperimentali di V_S (m/s) per ciascuna unità geofisica individuata nelle due aree di indagine e i rispettivi spessori (m):

VALORI SPERIMENTALI DA SISMICA A RIFRAZIONE– ST1

Distanza orizzontale lungo lo stendimento (m)	Valori sperimentali (caratteristici) di V _S (m/s) per ogni unità geofisica				
	U1-U2a	U2b	U3a	U3b	
Estremo NNE (0.0)	191	250	335	481	
32.5	163	257	311	505	
62.5	172	256	396	466	
92.5	168	237	353	450	
Estremo SSW (125.0)	146	294	344	481	
MEDIE	168	259	348	477	
Distanza orizzontale lungo lo stendimento (m)	Valori dello spessore (m) per ogni unità geofisica				Profondità interfaccia U3a-U3b (m da pc)
	U1	U2a	U2b	U3a	
Estremo NNE (0.0)	3.4	2.5	6.6	14.9	27.4
32.5	2.8	1.8	7.6	13.8	26.0
62.5	2.7	3.2	6.9	14.0	26.8
92.5	2.6	3.0	7.8	12.1	25.5
Estremo SSW (125.0)	5.5	0.3	7.8	11.2	24.8

VALORI SPERIMENTALI DA SISMICA A RIFRAZIONE– ST2					
Distanza orizzontale lungo lo stendimento (m)	Valori sperimentali (caratteristici) di V_S (m/s) per ogni unità geofisica				
	U1a	U1b-U2	U3	U4	
Estremo W (0.0)	-	241	286	419	
27.5	-	237	328	587	
57.5	182	238	337	500	
87.5	160	246	286	513	
Estremo E (115.0)	150	211	283	399	
MEDIE	164	235	304	484	
Distanza orizzontale lungo lo stendimento (m)	Valori dello spessore (m) per ogni unità geofisica				Profondità interfaccia U3-U4 (m da pc)
	U1a	U1b	U2	U3	
Estremo W (0.0)	-	3.1	4.1	13.6	20.8
27.5	-	2.7	4.8	11.8	19.3
57.5	1.2	1.5	4.1	12.4	19.2
87.5	1.5	1.1	3.3	13.1	19.0
Estremo E (115.0)	0.5	2.3	2.5	15.1	20.4

I risultati dell'indagine condotta nei 2 siti analizzati suggeriscono che:

- per il sito ST1, le unità U1 e U2a possono essere ragionevolmente assimilate a litologie sabbiose sciolte distinte in asciutte (U1) e da parzialmente a completamente sature (U2a); inoltre le differenze riscontrate nell'interpretazione dei dati sperimentali ottenuti dalle onde P e dalle onde S, in riferimento all'andamento dell'interfaccia U2b-U3a, suggeriscono la presenza di materiali eterogenei costituiti da corpi sedimentari lenticolari a granulometria diversa, che forniscono al deposito un comportamento, nel suo complesso, anisotropo e quindi risposte diverse alle diverse tipologie di energizzazione. Pertanto in un quadro geologico di questo tipo e in assenza di dati geologico-stratigrafici di taratura, non si è ritenuto significativo distinguere ulteriori unità geofisiche;
- per il sito ST2, l'unità U1a può essere ragionevolmente assimilata a materiale di riporto antropico, mentre quelle sottostanti a litologie prevalentemente sabbiose; inoltre l'interfaccia U1b-U2 può essere considerata il passaggio da deposito sabbioso asciutto a deposito parzialmente saturo, mentre l'interfaccia U2-U3 tra quest'ultimo e il deposito saturo. L'interfaccia U3-U4 è di difficile individuazione, a causa dell'alta dissipazione energetica esercitata dalle unità soprastanti: pertanto all'andamento di tale rifratore è associabile un errore stimato dell'ordine di ± 2 m.

Dai modelli geofisici sismici generali è possibile definire la situazione monodimensionale più sfavorevole dal punto di vista dei fenomeni di amplificazione sismica stratigrafica, assegnando

valori medi di V_s e valori massimi dello spessore di ciascuna unità e calcolando un opportuno gradiente fino a 30 m per definire il parametro V_{s30} da normativa nazionale e fino al bedrock geofisico per definire il parametro T (periodo proprio del sottosuolo).

Inoltre l'individuazione del modello geofisico sismico di cui sopra permette, integrandolo con parametri geotecnici di laboratorio descriventi il comportamento dei materiali sotto carichi ciclici e dinamici, di effettuare analisi sismiche di 3° livello mediante modellazioni numeriche della risposta sismica locale.

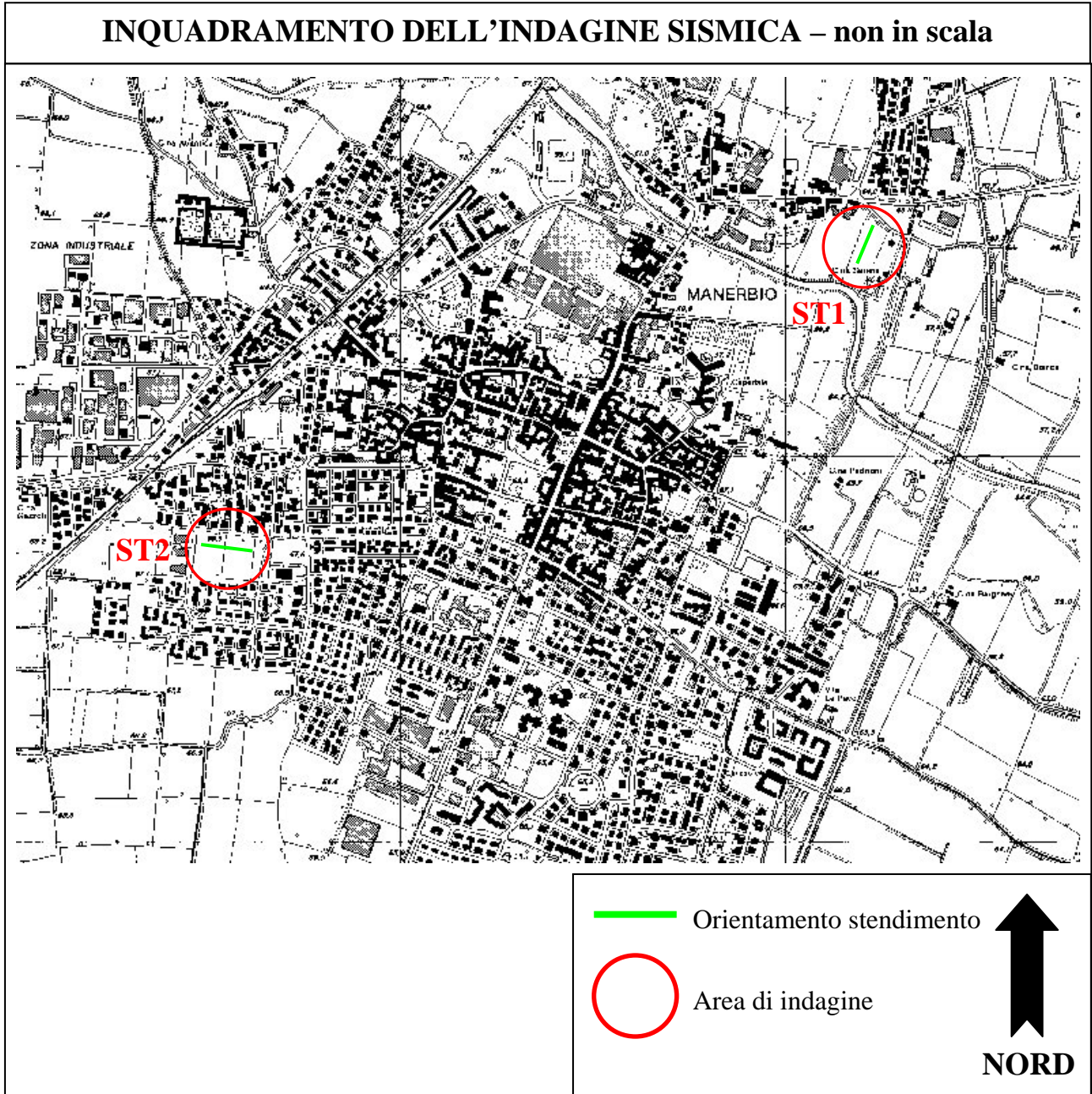
Per l'applicazione della procedura di valutazione dei fenomeni di amplificazione sismica contenuta nell'allegato 5 dei criteri regionali di cui alla D.G.R. 22 dicembre 2005, n. VIII/1566 "Criteri e indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del P.G.T., in attuazione dell'art. 57, comma 1, della l.r. 12/2005" ed aggiornati con DGR 28 maggio 2008 n. VIII/7374, si possono utilizzare come valori di V_s quelli mediati nell'intervallo di ciascuna unità geofisica (validi per l'intera area investigata), oppure quelli sperimentali ottenuti direttamente dall'indagine in corrispondenza di ciascun punto di energizzazione (validi per analisi puntuali sulle 5 verticali di energizzazione di ciascun stendimento sismico).

Dr. Geol. Daniela Chiarini Dr. Geol. Massimo Compagnoni Dr. Geol. Alberto Peruzzini

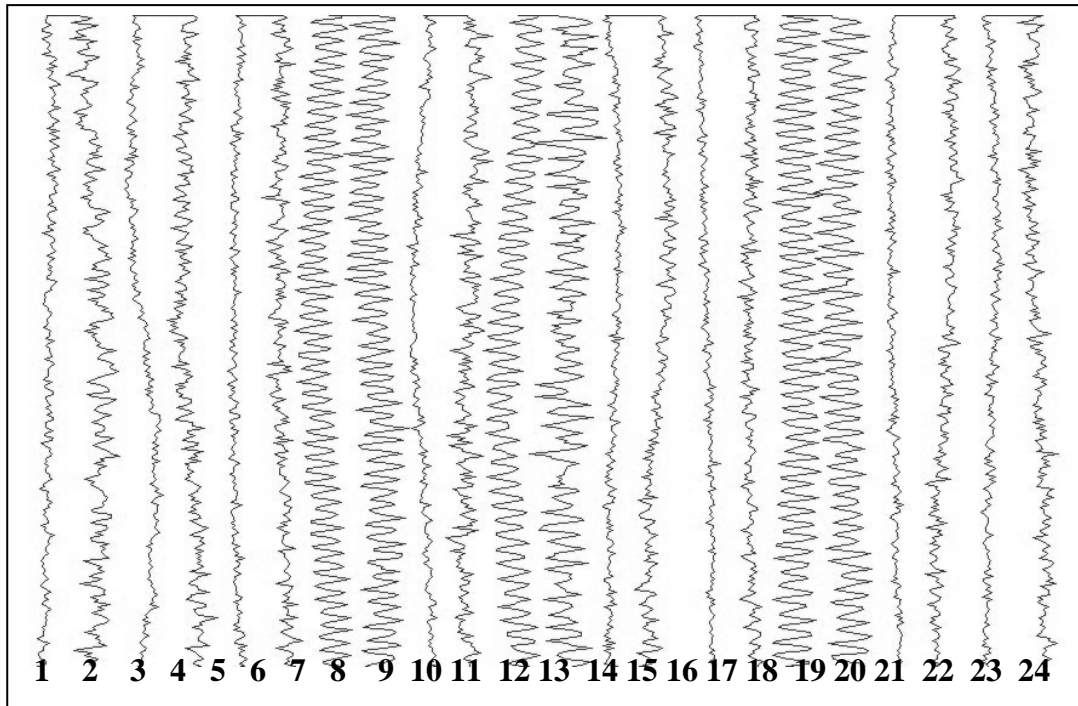
ALLEGATI

1. Ubicazione stendimenti sismici
2. Rumore ambientale – stendimento n. 1
3. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde P – stendimento n. 1
4. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde SH – stendimento n. 1
5. Rumore ambientale – stendimento n. 2
6. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde P – stendimento n. 2
7. Sismogramma multishots ed alcuni sismogrammi di singoli shot – acquisizione onde SH – stendimento n. 2

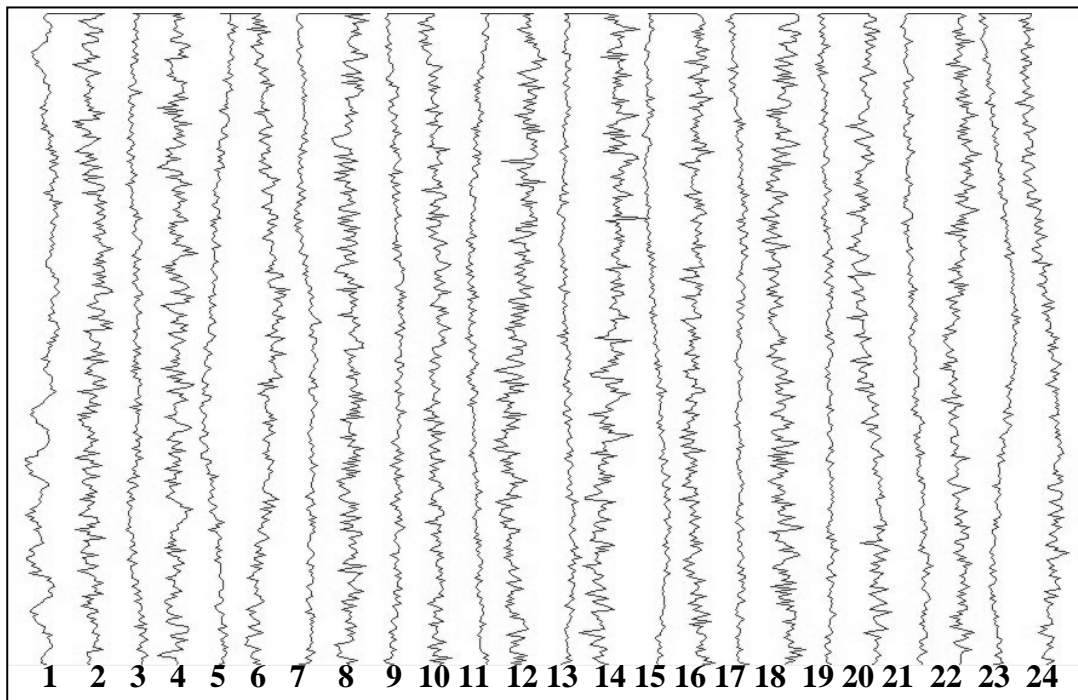
ALLEGATO n. 1 – Ubicazione stendimenti sismici



ALLEGATO n. 2 – Rumore ambientale – ST1

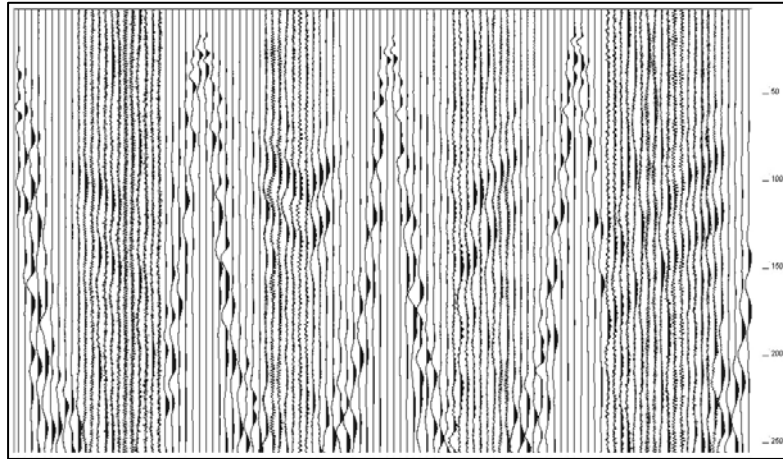


ONDE P

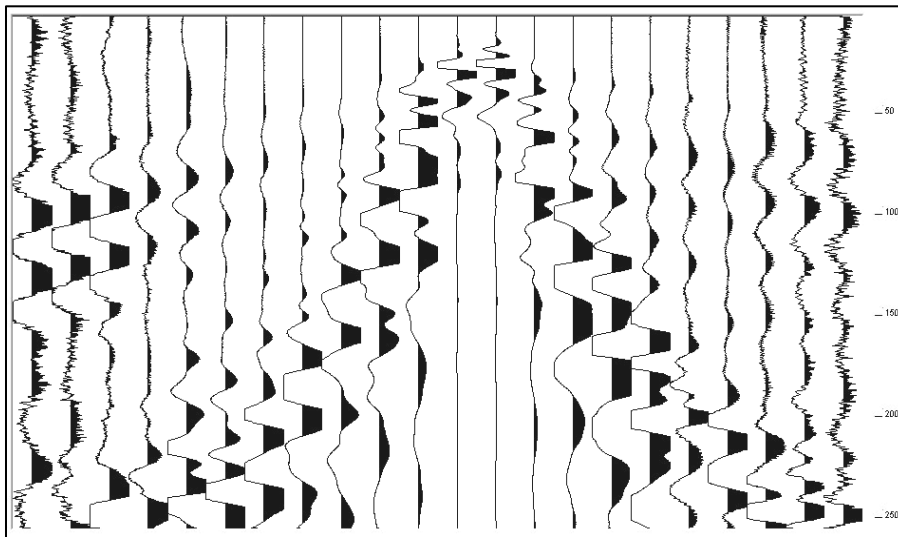


ONDE S

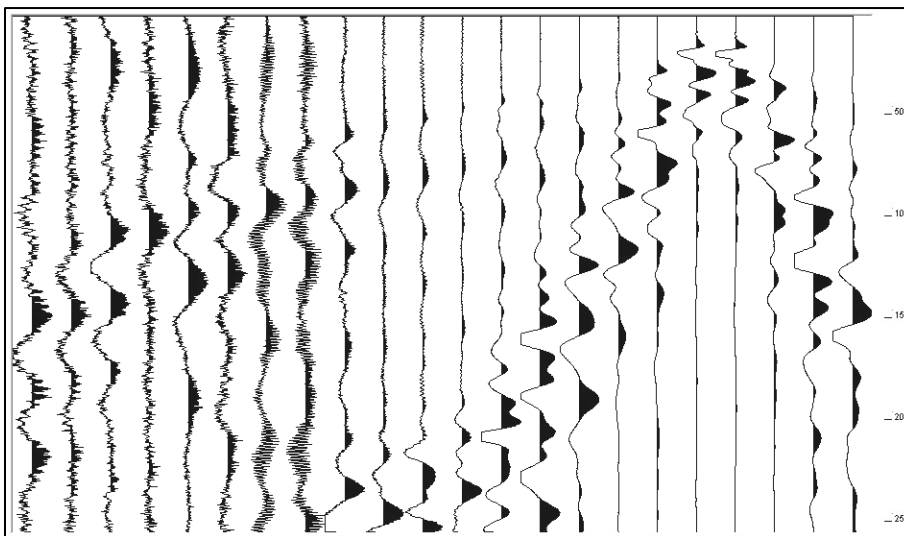
ALLEGATO n. 3 – Alcuni sismogrammi ONDE P – ST1



Sismogramma multishots acquisito

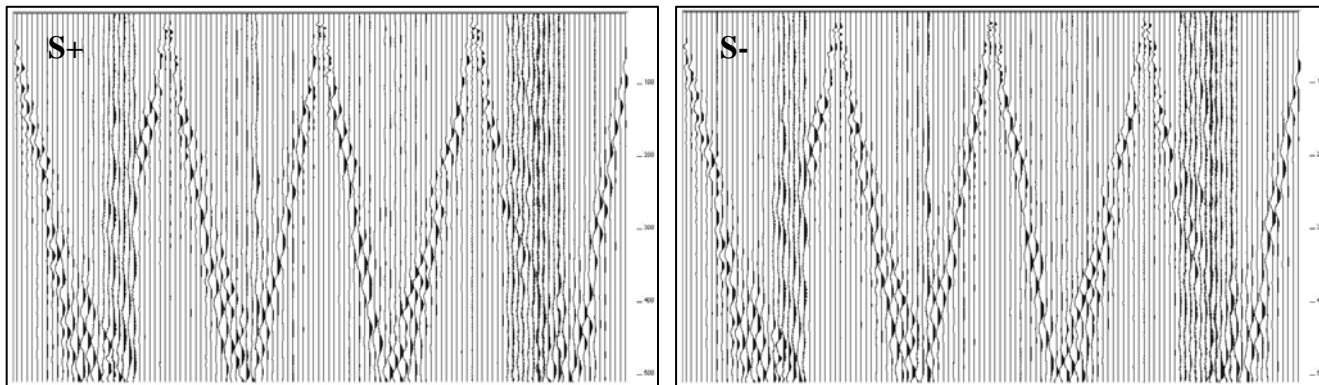


Sismogramma shot S3

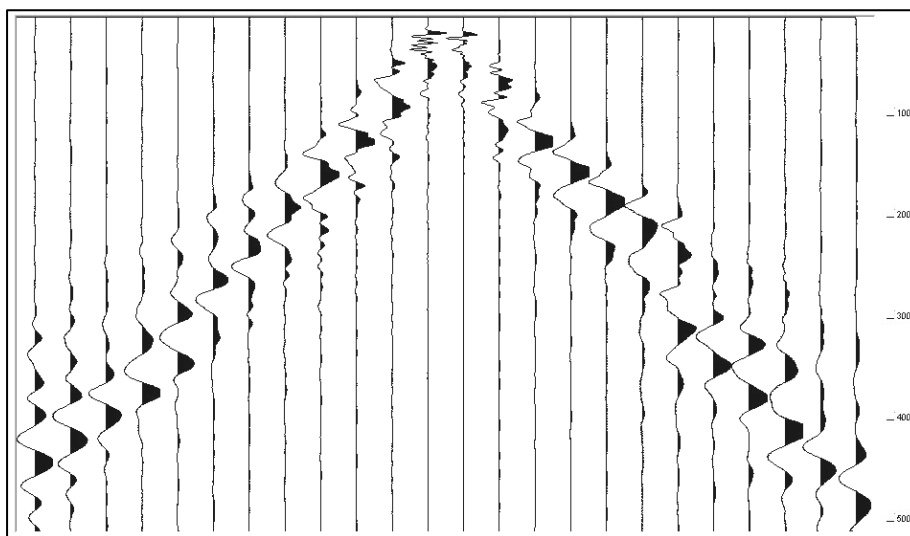


Sismogramma shot S4

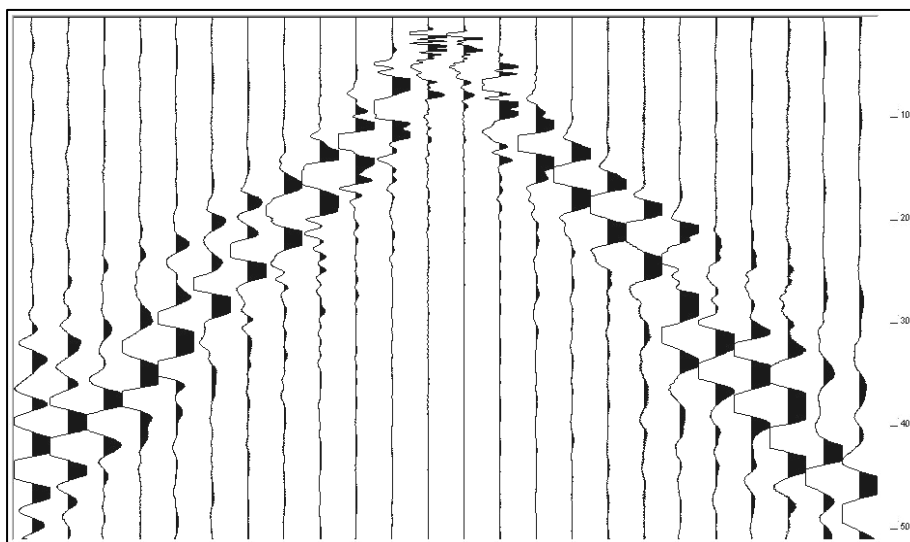
ALLEGATO n. 4 – Alcuni sismogrammi ONDE S – ST1



Sismogramma multishots acquisito con inversione di polarità

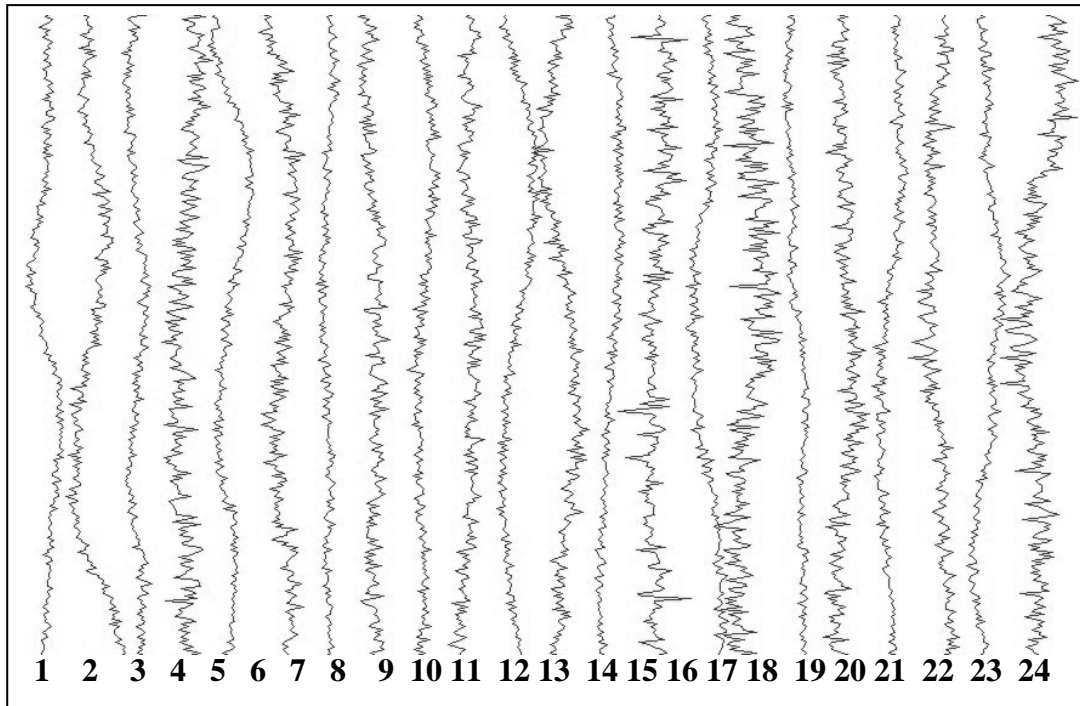


Sismogramma shot S3+ _ polarità diretta

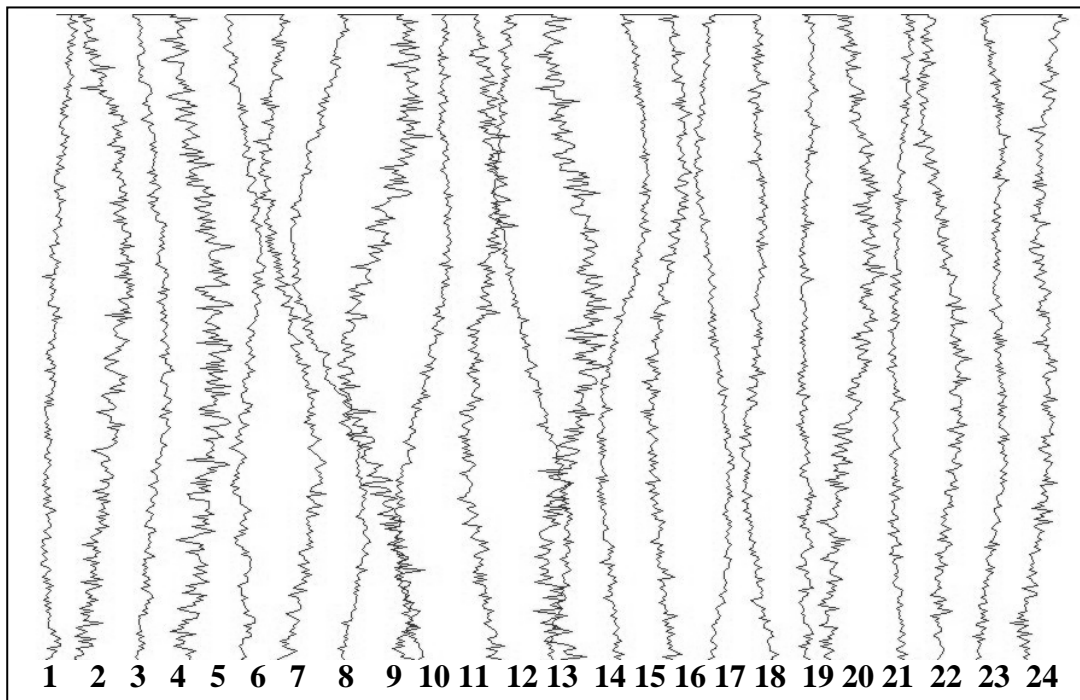


Sismogramma shot S3- _ polarità inversa

ALLEGATO n. 5 – Rumore ambientale – ST2

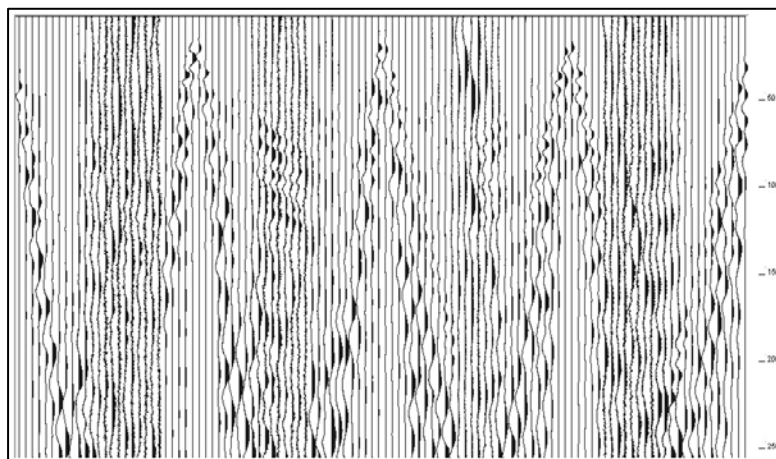


ONDE P

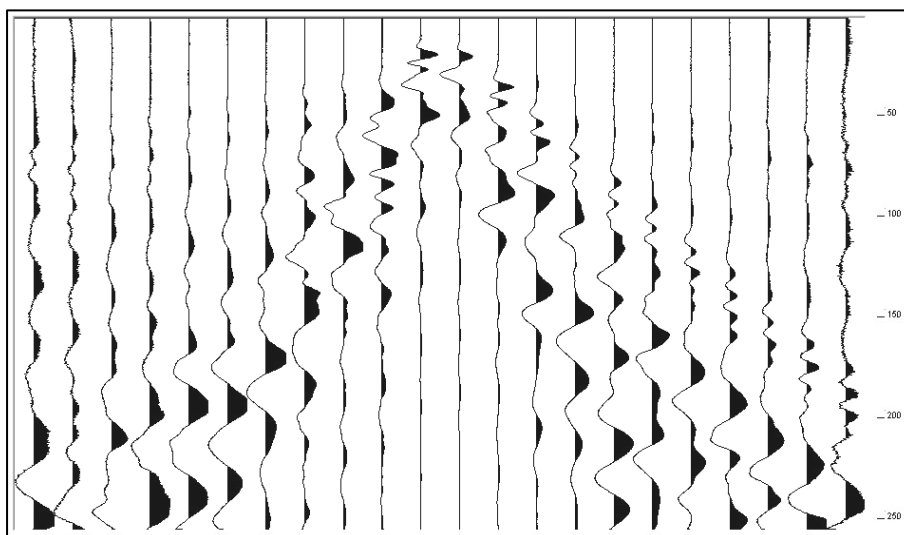


ONDE S

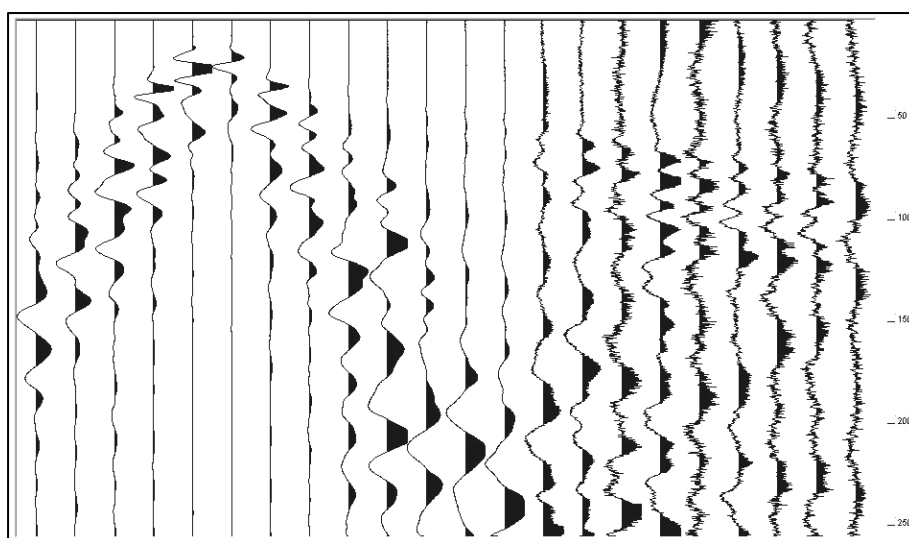
ALLEGATO n. 6 – Alcuni sismogrammi ONDE P – ST2



Sismogramma multishots acquisito

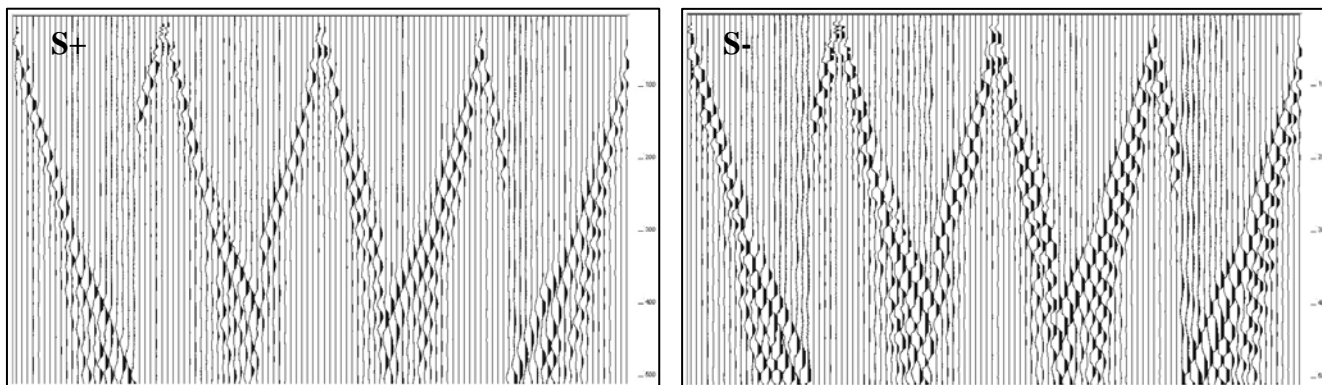


Sismogramma shot S3

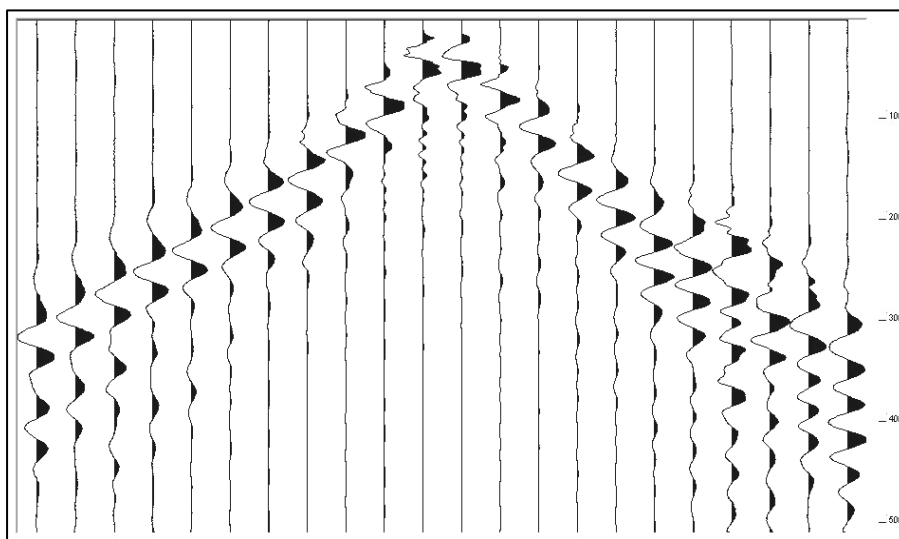


Sismogramma shot S2

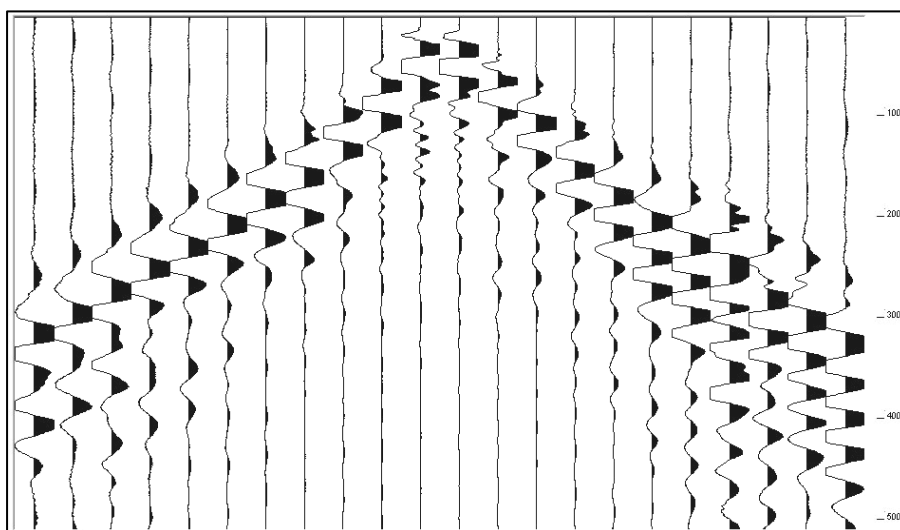
ALLEGATO n. 7 – Alcuni sismogrammi ONDE S – ST2



Sismogramma multishots acquisito con inversione di polarità



Sismogramma shot S3+ _ polarità diretta



Sismogramma shot S3- _ polarità inversa