
***INDAGINE GEOFISICA DI SISMICA A RIFRAZIONE
RAPPORTO INTERPRETATIVO***

COMUNE DI LOGRATO (BS)

INDICE

1. Premessa	3
2. Indagine e strumentazione utilizzata	3
3. Cenni teorici del metodo	5
4. Parametri elastici	9
5. Metodologia	10
6. Interpretazione e risultati	11
6.1. <i>Registrazione Onde P</i>	<i>13</i>
6.2. <i>Registrazione Onde S</i>	<i>17</i>
7. Modello geofisico e geologico interpretativo	22
8. Considerazioni finalizzate all'applicazione della normativa vigente	24

ALLEGATI

1. Ubicazione stendimento sismico

Brescia, 30 agosto 2006

1. Premessa

Su incarico e per conto della Dott.^{ssa} Laura Ziliani si è eseguita una campagna di indagine geofisica di sismica a rifrazione in 1 area del Comune di Lograto (Brescia), in particolare nel settore SE.

Lo scopo dell'indagine è la caratterizzazione dinamica del sottosuolo nei primi 30-35 m 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 (DM 14-09-2005 Norme Tecniche per le Costruzioni) 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”).

2. Indagine e strumentazione utilizzata

L'indagine consiste in uno stendimento di sismica a rifrazione di lunghezza pari a 115 m lungo il quale sono stati disposti alternativamente e collegati in serie 22 geofoni monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile, 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, sia longitudinali sia trasversali, prodotte da una specifica sorgente.

La distanza intergeofonica è stata fissata a 5 m per un totale di 22 geofoni collegati in serie attraverso un cavo telemetrico su cui sono disposti 11 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.

Sono stati utilizzati 5 punti di energizzazione disposti simmetricamente e reciprocamente lungo lo stendimento:

- 2 end-shots posti a 10 m dai geofoni esterni
- 2 intermedi posti rispettivamente tra il 5° e il 6° geofono e tra il 17° e 18° geofono
- 1 centrale tra il 11° e il 12° geofono.

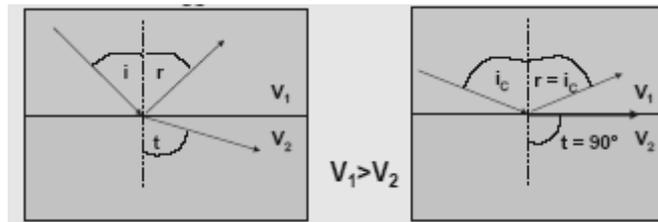
L'attrezzatura utilizzata è costituita da:

- 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 22 geofoni verticali e 22 geofoni orizzontali del tipo elettromagnetico a massa sospesa (peso della massa 12.2 gr) con frequenza propria 10 Hz;
- 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;
- 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.

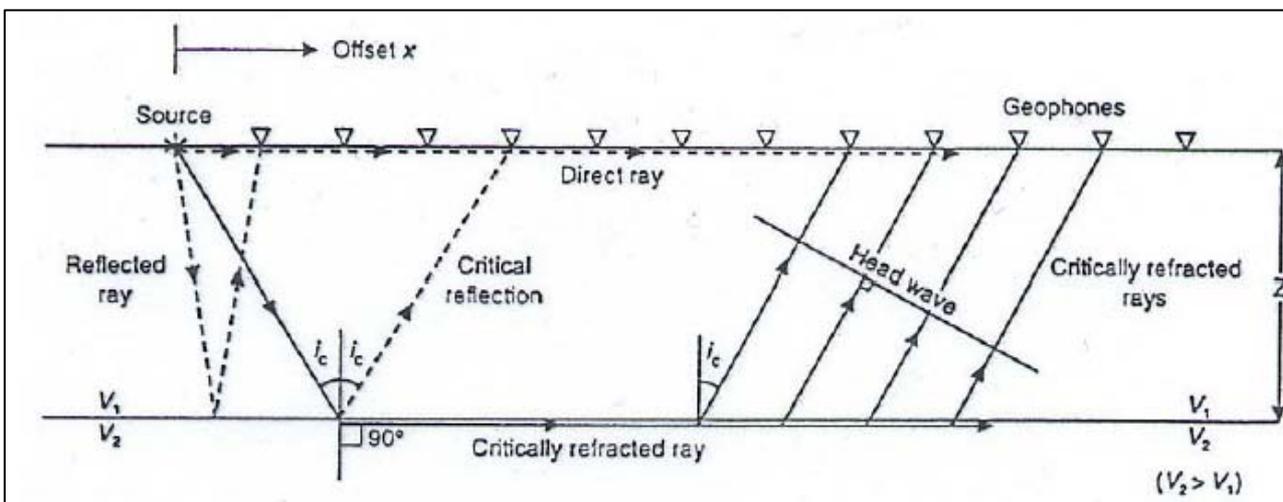
3. Cenni teorici del metodo

Le indagini indirette ed in particolare la metodologia a rifrazione permette la ricostruzione areale delle geometrie e degli spessori dei depositi di copertura, la profondità del substrato (entro i limiti di penetrazione del metodo), la verifica di eventuali discontinuità laterali nonché di determinare le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali attraverso la determinazione dei moduli elastici dinamici.

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.

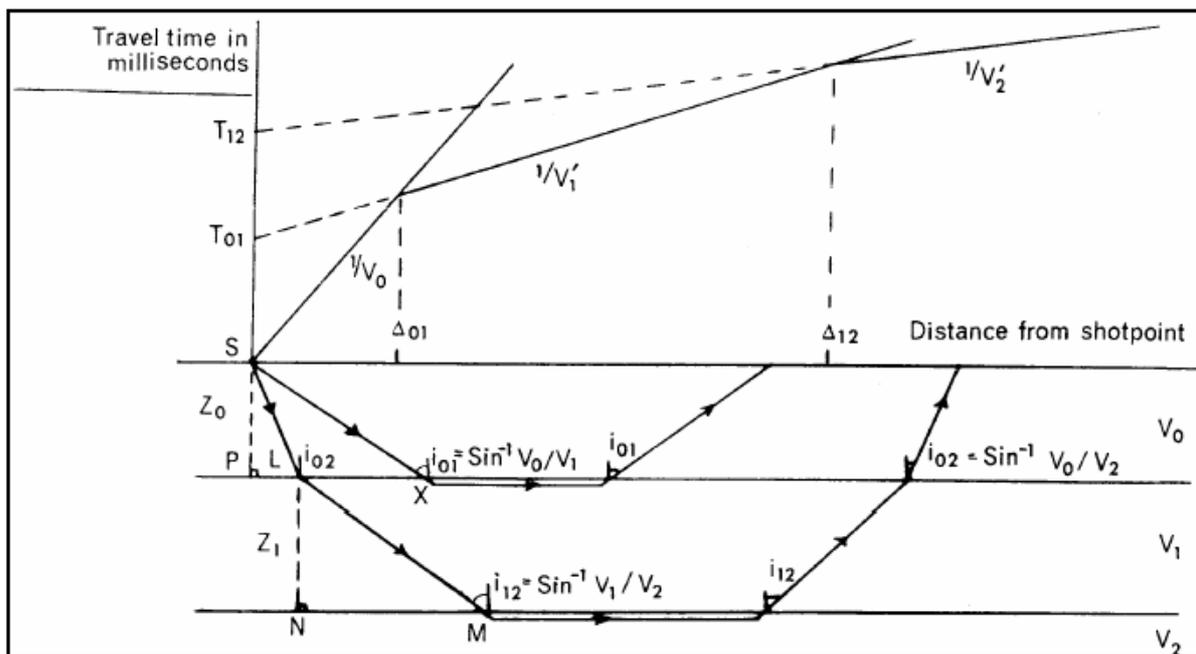


Disponendo una serie di ricevitori lungo la superficie libera del suolo e generando onde elastiche da una sorgente puntiforme l'onda riflessa arriverà sempre dopo le altre, mentre fino ad una certa distanza dalla sorgente arriverà prima l'onda diretta poi, quando l'onda birifratte avrà percorso sufficiente distanza alla velocità V_2 , essa arriverà prima della diretta (come riportato nella figura seguente).



Se riportiamo in un semplice grafico x-y per ogni distanza di ciascun ricevitore il tempo di arrivo del primo impulso letto sui sismogrammi i punti si dispongono in una serie di allineamenti, di cui il primo passante per l'origine: ciascuna linea è detta dromocrona ed è rappresentativa della velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo posto al di sopra di un rifrattore (una superficie di separazione più o meno netta tra due materiali a comportamento elastico diverso).

Di seguito a titolo esemplificativo si riportano le dromocrone relative ad un modello tristrato del sottosuolo: il coefficiente angolare della dromocrona passante per l'origine rappresenta l'inverso della velocità di propagazione delle onde elastiche nel primo strato (V_0), i coefficienti angolari delle altre 2 dromocrone rappresentano l'inverso delle velocità dei due strati sottostanti (V_1 e V_2); un modello tristrato è caratterizzato da 2 rifrattori che separano 3 materiali caratterizzati da un diverso comportamento meccanico rappresentato da un modello di tipo elastico omogeneo, continuo ed isotropo.



L'intersezione tra due dromocrone è detto punto di ginocchio e rappresenta il punto in cui arrivano contemporaneamente le onde rifratte da due rifrattori adiacenti o, se consideriamo le prime due dromocrone, le onde dirette e le onde rifratte dal primo rifrattore: in un'indagine di sismica a rifrazione sarà possibile individuare un numero di punti di ginocchio pari al numero di rifrattori investigati. Pertanto più è profondo il rifrattore più è distante dalla sorgente il rispettivo punto di ginocchio: da ciò si deduce che gli impulsi rifratti possono essere ricevuti solo a partire da una certa distanza proporzionale alla profondità del rifrattore e che quindi la profondità totale di indagine è legata alla lunghezza dello stendimento di ricevitori.

Tramite semplici relazioni trigonometriche è possibile, note le velocità di propagazione delle onde elastiche nei diversi strati omogenei del sottosuolo, conoscere gli spessori di ciascuno di essi: ciascun metodo presenta, in funzione delle ipotesi iniziali fissate, un diverso campo di applicabilità, ove è possibile considerare i risultati con un accettabile grado di affidabilità.

I principali limiti della tecnica di sismica a rifrazione risiedono nella impossibilità teorica di rilevare successioni stratigrafiche composte da strati a velocità decrescente con la profondità, in tal caso lo strato o gli strati non possono essere messi in evidenza dalle onde rifratte in quanto l'energia incidente, al contatto fra la sommità dello strato e la base dello strato sovrastante a più alta velocità, subisce una flessione verso il basso e non può venire di conseguenza rifratta: tale situazione è nota come "orizzonte muto" e porta, oltre all'inconveniente di non considerare la presenza di uno strato a comportamento diverso nel sottosuolo, alla sovrastima dello spessore dello strato sovrastante l'inversione di velocità.

Altra limitazione consiste nella presenza di uno strato a velocità intermedia ma di ridotto spessore; anche in questo caso l'orizzonte non produce alcun cambiamento di pendenza sulle dromocrone, e non è quindi sismicamente rilevabile. E' noto infatti che per essere visto uno strato deve poter essere campionato da almeno 2 geofoni e, se questo non avviene, lo strato è come se non esistesse e non se ne può valutare né velocità né spessore: tale fenomeno è noto come "orizzonte nascosto".

Altra limitazione, in parte risolvibile, è quella del cambio di pendenza di una dromocrona dovuta non alla presenza di una nuova interfaccia di separazione tra due strati ma alle variazioni di inclinazione della stessa interfaccia.

Le prime due limitazioni rappresentano situazioni stratigrafiche che mal si prestano ad essere investigate col metodo di sismica a rifrazione in quanto portano a sovrastimare o sottostimare lo spessore delle coperture.

La terza limitazione rappresenta una delle situazioni stratigrafiche molto ricorrente in quanto è molto difficile in realtà trovare situazioni perfettamente piano parallele: è possibile tramite metodi di interpretazione particolari (delay-time o plus minus ed altri), che richiedono specifiche configurazioni degli stendimenti rispetto ai punti di energizzazione, ricostruire situazioni litostratigrafiche caratterizzate da interfacce di separazione anche molto articolate.

Se gli strati sono poco potenti con velocità crescente con la profondità (come normalmente avviene nei terreni non consolidati), i percorsi delle onde saranno curvi, con concavità rivolta verso l'alto ed anche la corrispondente dromocrona sarà una curva.

Sebbene nei casi reali si abbia a che fare con depositi stratificati, spesso fittamente e in maniera poco definita, con un'alternanza di strati caratterizzati da rigidità anche molto differenti (con

inevitabili problemi di riflessione e rifrazione delle onde in corrispondenza delle superfici di discontinuità e/o di fratture), si assume che l'effetto delle onde dirette, in termini di ampiezza delle vibrazioni, sia predominante rispetto a quello delle onde indirette, tanto da potere trascurare queste ultime e considerare il mezzo, limitatamente all'area comprendente la sorgente e il ricevitore, come mezzo omogeneo, isotropo e non confinato, pur ben conoscendo i limiti di tale approssimazione.

La velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ($S_r = 100\%$) dipende talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione; invece le velocità delle onde S e delle onde di superficie, sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidità del terreno sono quelle di taglio e, subordinatamente le onde di superficie.

Si ricorda che, in linea di massima, in un terreno stratificato orizzontalmente le onde SH non trasmutano (cioè si convertono in altri tipi di onde elastiche) a differenza delle onde SV e P. Ciò significa che se si generano inizialmente onde SH, si avranno unicamente onde rifratte ed onde riflesse SH. D'altra parte se si generano onde SV, al ricevitore si possono ottenere sia onde SV che onde P di compressione; così come generando onde P si possono ottenere al ricevitore onde SV.

Inoltre il fenomeno della trasmutazione avviene in tutte le situazioni in cui esiste una differenza di impedenza-rigidità sismica; essa dipende in particolare dal contrasto di impedenza-rigidità e dall'angolo di incidenza. In pratica l'attenuazione che le onde di compressione subiscono in un mezzo, può essere maggiore o minore delle onde SV a seconda della litologia del mezzo e dipende da una serie di parametri tra cui la porosità, il grado di saturazione, etc. Si deve anche tenere presente che in un mezzo poroso omogeneo ed isotropo si propagano due tipi di onde compressionali P1 e P2 analogamente a quanto previsto dal modello di Biot.

Va rilevato che le onde SH dirette e rifratte costituiscono sempre un primo arrivo rispetto alle onde di superficie (nella fattispecie le onde di Love) e che per brevi stendimenti risultano sufficientemente energetiche da poter essere registrate nonostante la loro attenuazione sia maggiore perché proporzionale a $1/r^2$ in luogo di $1/r$ come accade per le onde di superficie (r è la distanza dal punto di energizzazione).

E' da evidenziare quindi che a differenza dei metodi d'indagine basati sull'osservazione delle onde superficiali con la tecnica a rifrazione non esistono le limitazioni connesse con l'orizzontalità degli strati.

4. Parametri elastici

Le indagini sismiche con tecnica a rifrazione sono finalizzate alla determinazione diretta e continua lungo la verticale d'esplorazione della velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di volume di compressione (onde P) e/o di taglio (onde S) e alla determinazione indiretta,

per mezzo di tali valori di velocità, di alcune proprietà meccaniche del materiale in questione.

Si assume che il terreno esplorato abbia un comportamento tensione-deformazione di tipo elastico lineare (ipotesi peraltro giustificata dall'esperienza in base alla quale le deformazioni tangenziali prodotte dalle onde sismiche sono spesso inferiori a 10^{-3} % e quindi al di sotto della soglia di linearità).

Pertanto in base alla teoria della elasticità sussistono specifiche relazioni tra i valori di velocità di propagazione delle onde P (V_P), delle onde S (V_S) e delle onde di Rayleigh (V_R) ed alcune delle proprietà meccaniche del mezzo attraversato, quali il modulo di compressibilità volumetrica E_v o K , il modulo di Young E , il coefficiente di Poisson ν e il modulo di deformazione a taglio G .

$$\begin{aligned}
 G &= \rho \cdot V_S^2 \\
 E_v &= \rho \cdot \left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right) \\
 G &= \rho \cdot V_S^2; \nu = \frac{0.5 \cdot \left(\frac{V_P}{V_S} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_P}{V_S} \right) - 1} \\
 E &= 2\rho \cdot V_S^2 \cdot (1 + \nu) \\
 \frac{V_R}{V_S} &= \frac{0.862 + 1.14 \cdot \nu}{1 + \nu}
 \end{aligned}$$

dove ρ rappresenta la densità del mezzo

$\gamma = \rho \cdot g$ il peso di volume

g rappresenta l'accelerazione di gravità.

Il rapporto tra V_P e V_S può fornire utili informazioni sullo stato di consolidazione e sulla presenza di gas nei porous media. Alcuni Autori (Gardner & Harris, 1968) affermano che rapporti maggiori di 2 si riscontrano in presenza di sabbie saturate non consolidate; alti rapporti risultano altresì per terreni incoerenti argillo-limosi ad alto grado di saturazione. Valori inferiori a 2 si registrano in presenza di rocce compatte o sedimenti gas saturati. In rocce saturate tale rapporto risulta dipendente dalla

litologia, dalla quantità e geometria dei pori e dalle microfratture e potrebbe, nota la litologia, fornire indicazioni su questi ultimi due parametri.

Il Coefficiente di Poisson è l'unico che non necessita della conoscenza della densità per la sua determinazione. Sebbene in teoria sia considerato stress indipendente ed i suoi valori risultino compresi tra 0.25 e 0.33, nei porous-media esso risulta stress dipendente, e presenta un campo di variabilità più esteso e può addirittura arrivare secondo GREGORY (1976) a valori negativi. I valori più bassi, in natura, si registrano per litotipi ad alta porosità, sottoposti a bassa pressione litostatica e gas saturati, in alcuni sedimenti incoerenti e saturi i valori possono risultare uguali o superiori a 0.49; nelle sospensioni assume il valore di 0.5.

Il Modulo di taglio G è fortemente dipendente dalla porosità e dalla pressione; assume valori più bassi in litotipi ad alta porosità, sottoposti a basse pressioni e saturati in acqua. Il campo di variabilità nei porous media è molto esteso.

Il Modulo di Young E dipende dalla porosità, dalla pressione litostatica e dagli altri moduli elastici. Aumenta in misura considerevole quando al campione "dry" a bassa porosità vengono aggiunte piccole quantità di acqua, diminuisce quando un campione ad alta porosità viene sottoposto allo stesso trattamento. I minimi valori del modulo si registrano in litotipi ad alta porosità saturi in gas, mentre i valori massimi si hanno per litotipi sotto pressione saturati in acqua ed a bassa porosità. Il campo di variabilità è considerevole.

5. Metodologia

Lo scopo della prova consiste nel caratterizzare dinamicamente, tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s), le unità litologiche presenti nell'area di indagine.

La tecnica di esplorazione trova il suo miglior campo di applicazione con profondità delle coperture da esplorare inferiore ai 30-40 m. Si rende necessaria soprattutto quando i risultati da ottenere devono essere di qualità e precisione discrete e quando interessano dati medi relativi ad ampi volumi di terreno.

La lunghezza dello stendimento di geofoni di 115 m rappresenta un valore limite per il sistema di energizzazione utilizzato, in quanto i segnali ricevuti risultano sensibilmente disturbati soprattutto in corrispondenza dei geofoni più lontani dal punto di energizzazione. L'entità del disturbo è molto variabile in funzione delle caratteristiche litologiche e meccaniche del sottosuolo.

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

- Individuazione del primo arrivo in P e del primo arrivo in SH 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;
- Ricostruzione delle dromocrone in P ed SH e scelta del modello di sottosuolo utilizzato 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.

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 (minimo 7 shots) e rendono più difficile l'individuazione di aree adatte all'indagine.

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 e si propone un possibile gradiente di variazione delle proprietà meccaniche dei materiali con la profondità.

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; al fine di individuare le reali geometrie dei sismostrati sarebbe necessario eseguire più stendimenti disposti tra loro ortogonalmente.

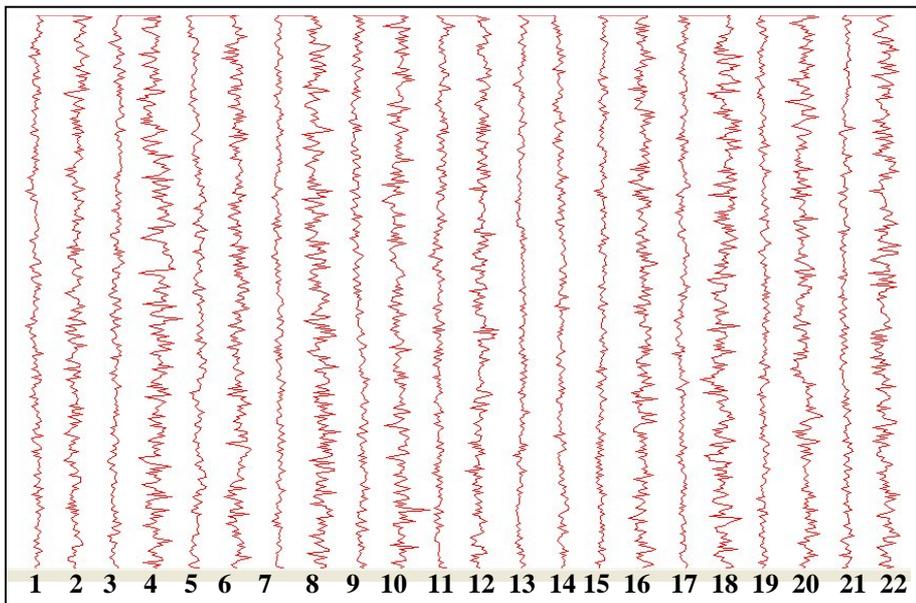
6. Interpretazione e risultati

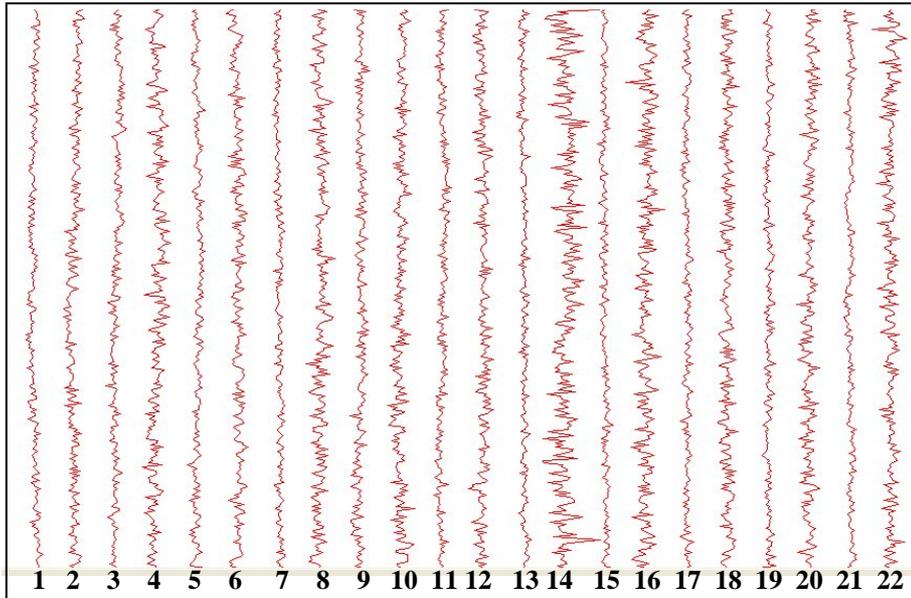
La topografia della superficie è pianeggiante sul tratto investigato ed è stata pertanto assegnata a tutto lo stendimento la quota relativa 0.

Lo stendimento è orientato 170-350 (circa S-N); l'origine del sistema di riferimento relativo è posto in corrispondenza dell'end shot a S posto a 10 m dal 1° geofono.

L'area investigata si colloca lungo la capezzagna di accesso ad un fondo agricolo ove, al momento dell'indagine, sono presenti coltivazioni di meloni: la strada si sviluppa parallelamente ad un vaso irriguo (le cui acque sgorgano da un fontanile posto immediatamente a monte dell'area), da cui, tramite condotte interrato (a profondità di circa 1 m), viene dirottata l'acqua per l'irrigazione delle coltivazioni. Lo stendimento di geofoni è stato ubicato parallelamente alla strada di accesso ed interseca a circa $\frac{3}{4}$ di lunghezza uno dei tubi interrati sopra citati.

Il rumore ambientale è risultato poco evidente, sebbene durante l'acquisizione (soprattutto tramite le onde di taglio SH) i segnali acquisiti più lontano dalle sorgenti siano risultati affetti da disturbi ad alta frequenza (indicativamente compresi nella banda tra i 400 Hz e gli 800 Hz), a causa della presenza del tubo interrato sopra menzionato. Di seguito si riporta per le onde P e le onde S la rappresentazione relativizzata dei rumori ambientali acquisiti dai 22 geofoni prima delle energizzazioni (una linea perfettamente rettilinea corrisponde alla situazione ideale di assenza totale di rumore ambientale):

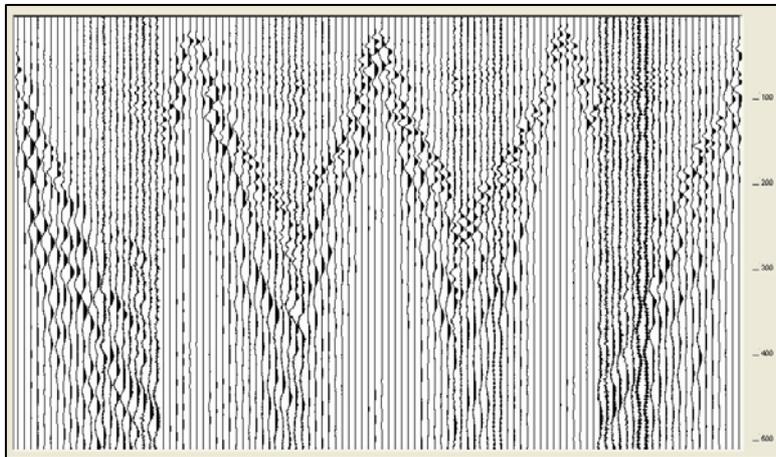
**ONDE P**



ONDE S

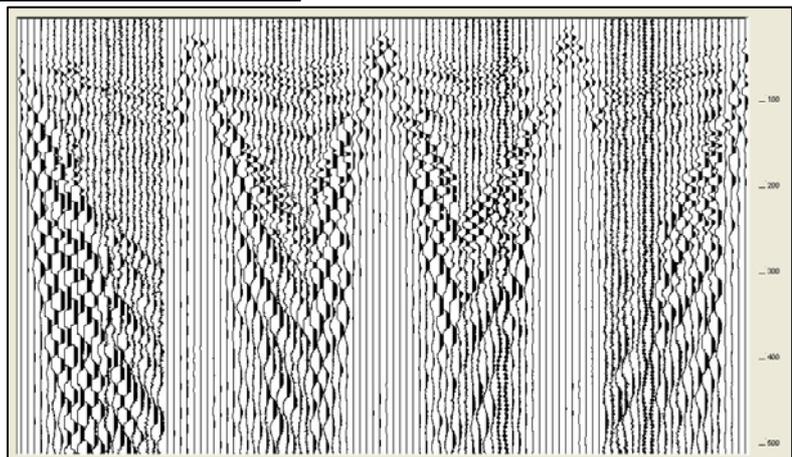
6.1. *Registrazione Onde P*

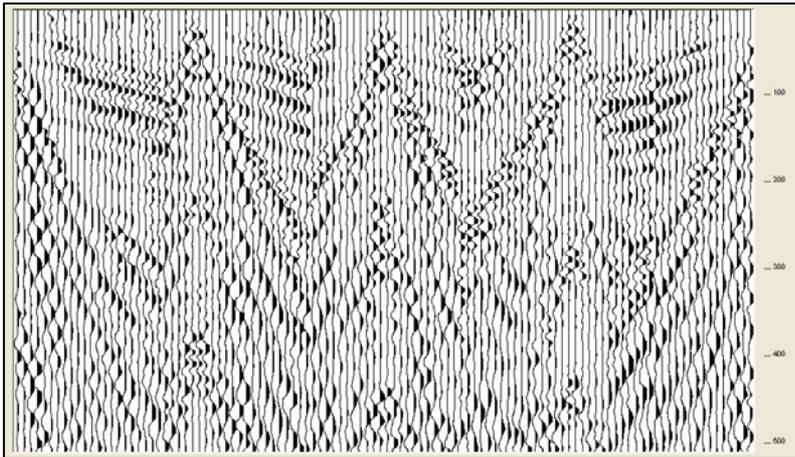
Le registrazioni per ciascun punto di scoppio sono state campionate con un intervallo di 500 microsecondi per un tempo totale di 512 ms (per un totale di 1024 tracce), senza utilizzo di filtro hardware. Di seguito si riportano il sismogramma multishot acquisito, quello elaborato e quello filtrato tramite procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto e passa banda:



sismogramma acquisito

sismogramma elaborato



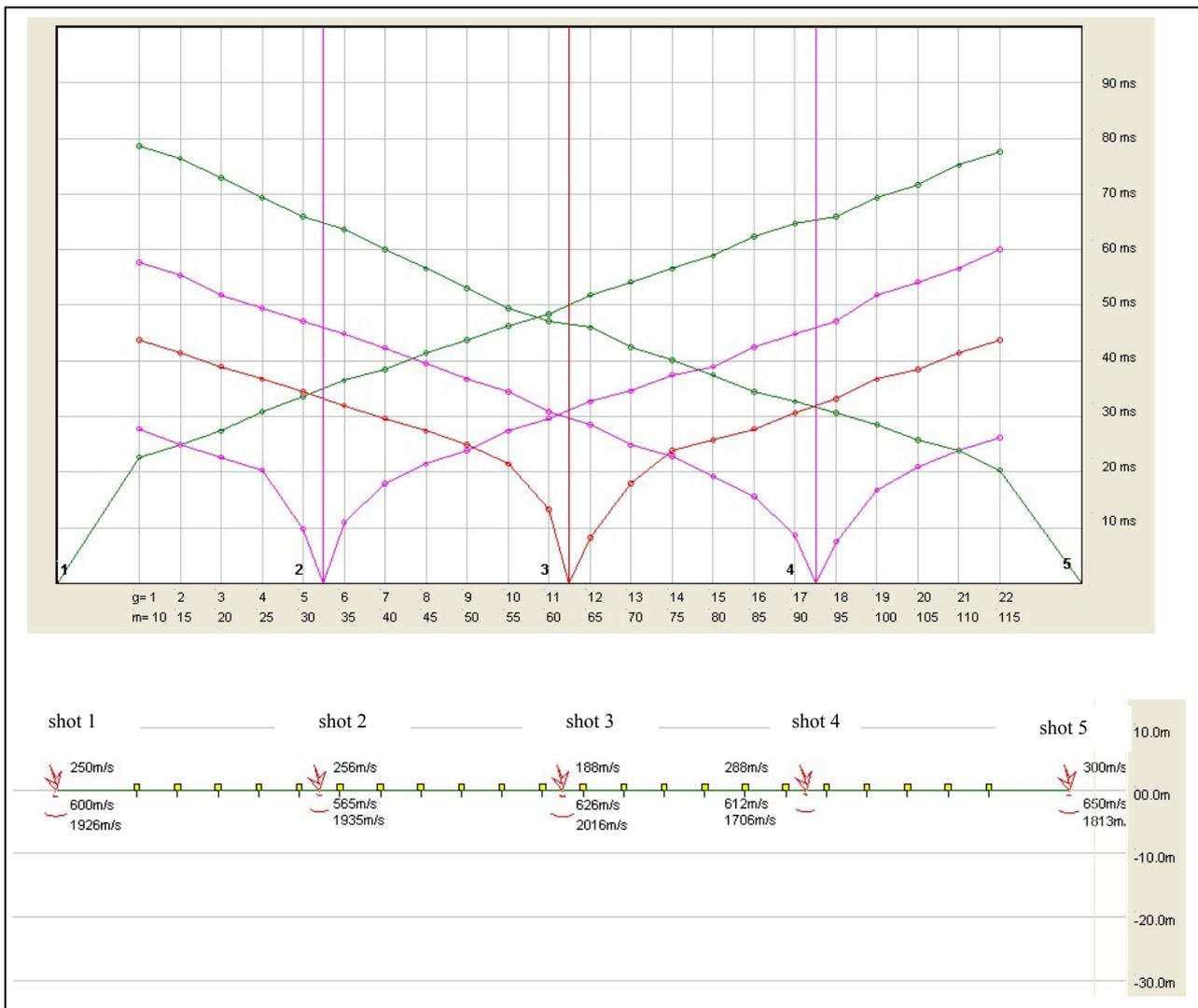
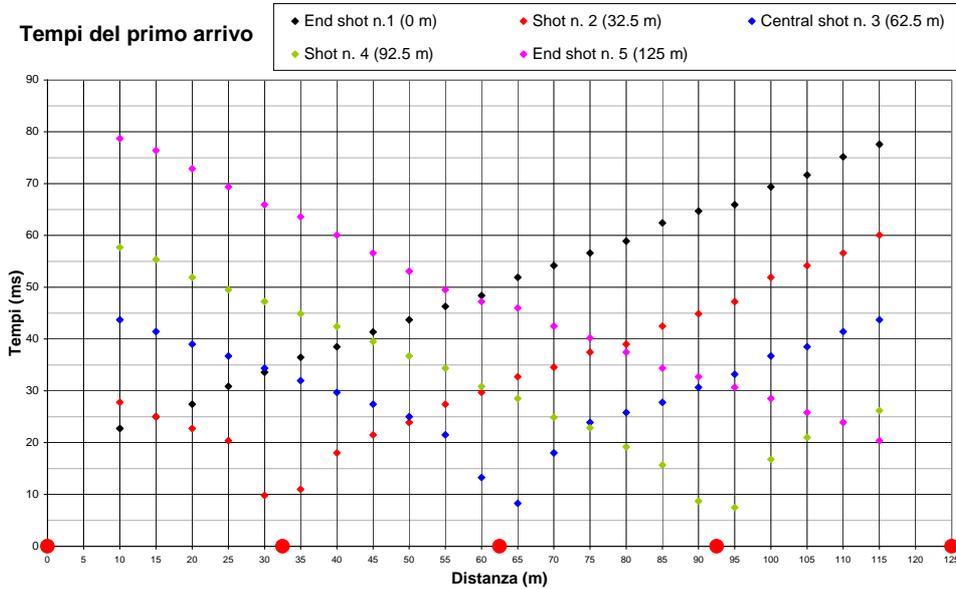


sismogramma filtrato

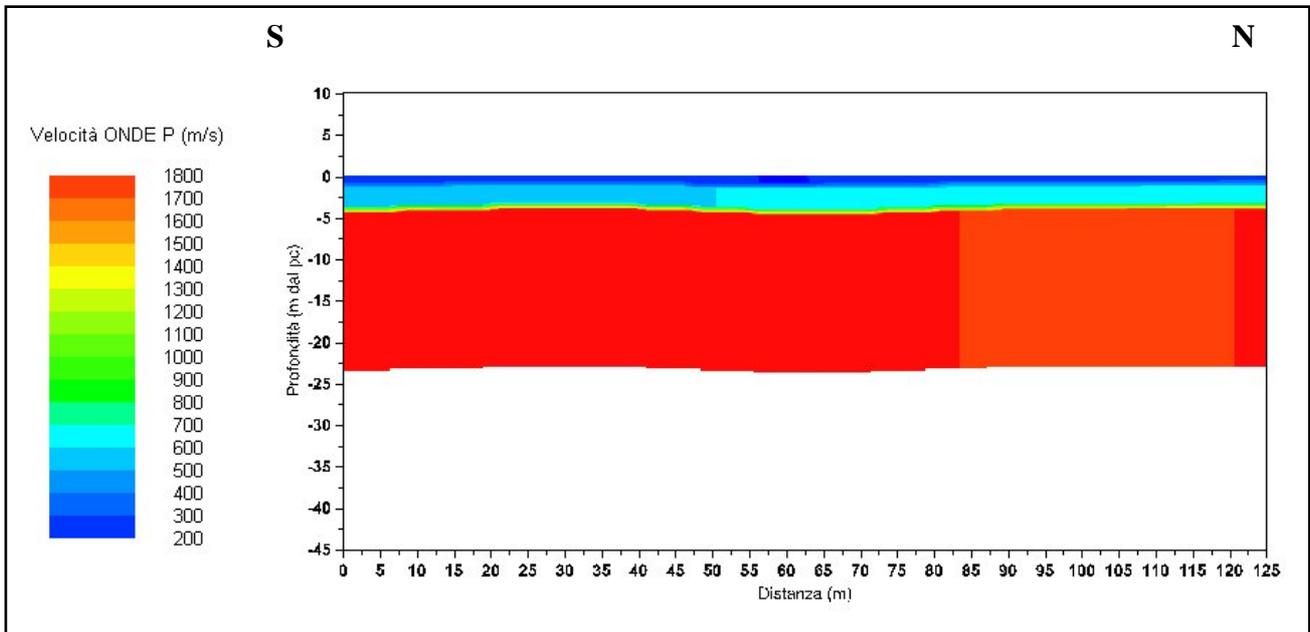
Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio; le quote in corrispondenza di ciascun ricevitore sono state calcolate tramite interpolazione lineare tra le quote dei 5 shots:

<i>N° shot</i>			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Distanza (m)</i>			0	32.5	62.5	92.5	125
<i>Quota (m slm)</i>			0	0	0	0	0
<i>Geofono</i>	<i>Distanza (m)</i>	<i>Quota (m slm)</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>	10	0	22.70	27.79	43.70	57.70	78.69
<i>2</i>	15	0	25.00	25.00	41.40	55.40	76.40
<i>3</i>	20	0	27.39	22.70	39.00	51.90	72.90
<i>4</i>	25	0	30.87	20.39	36.70	49.50	69.40
<i>5</i>	30	0	33.59	9.80	34.40	47.20	65.90
<i>6</i>	35	0	36.50	11.00	32.00	44.90	63.59
<i>7</i>	40	0	38.50	18.00	29.70	42.38	60.09
<i>8</i>	45	0	41.38	21.50	27.39	39.50	56.59
<i>9</i>	50	0	43.70	23.87	25.00	36.70	53.09
<i>10</i>	55	0	46.29	27.39	21.50	34.40	49.50
<i>11</i>	60	0	48.40	29.70	13.30	30.87	47.20
<i>12</i>	65	0	51.90	32.70	8.30	28.50	46.00
<i>13</i>	70	0	54.20	34.59	18.00	24.87	42.50
<i>14</i>	75	0	56.59	37.50	23.87	22.87	40.20
<i>15</i>	80	0	58.90	39.00	25.79	19.20	37.50
<i>16</i>	85	0	62.40	42.50	27.79	15.69	34.40
<i>17</i>	90	0	64.69	44.90	30.69	8.69	32.70
<i>18</i>	95	0	65.90	47.20	33.20	7.50	30.69
<i>19</i>	100	0	69.40	51.90	36.70	16.79	28.50
<i>20</i>	105	0	71.69	54.20	38.50	21.00	25.79
<i>21</i>	110	0	75.19	56.59	41.40	23.87	23.89
<i>22</i>	115	0	77.59	60.09	43.70	26.20	20.39

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:



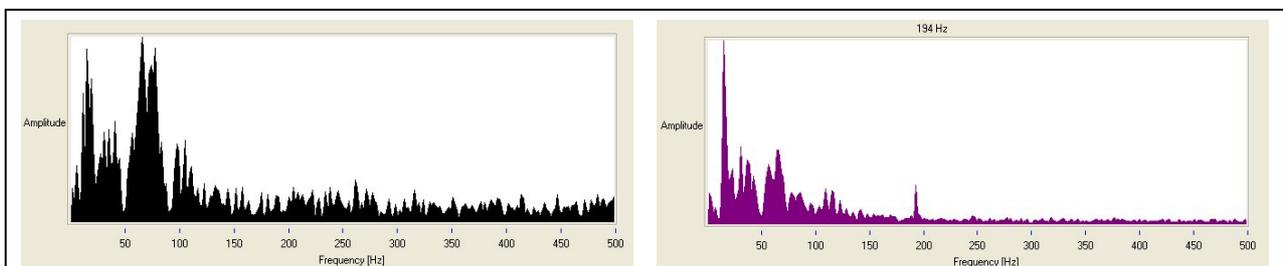
Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo a 3 strati ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (griglia shot-point):



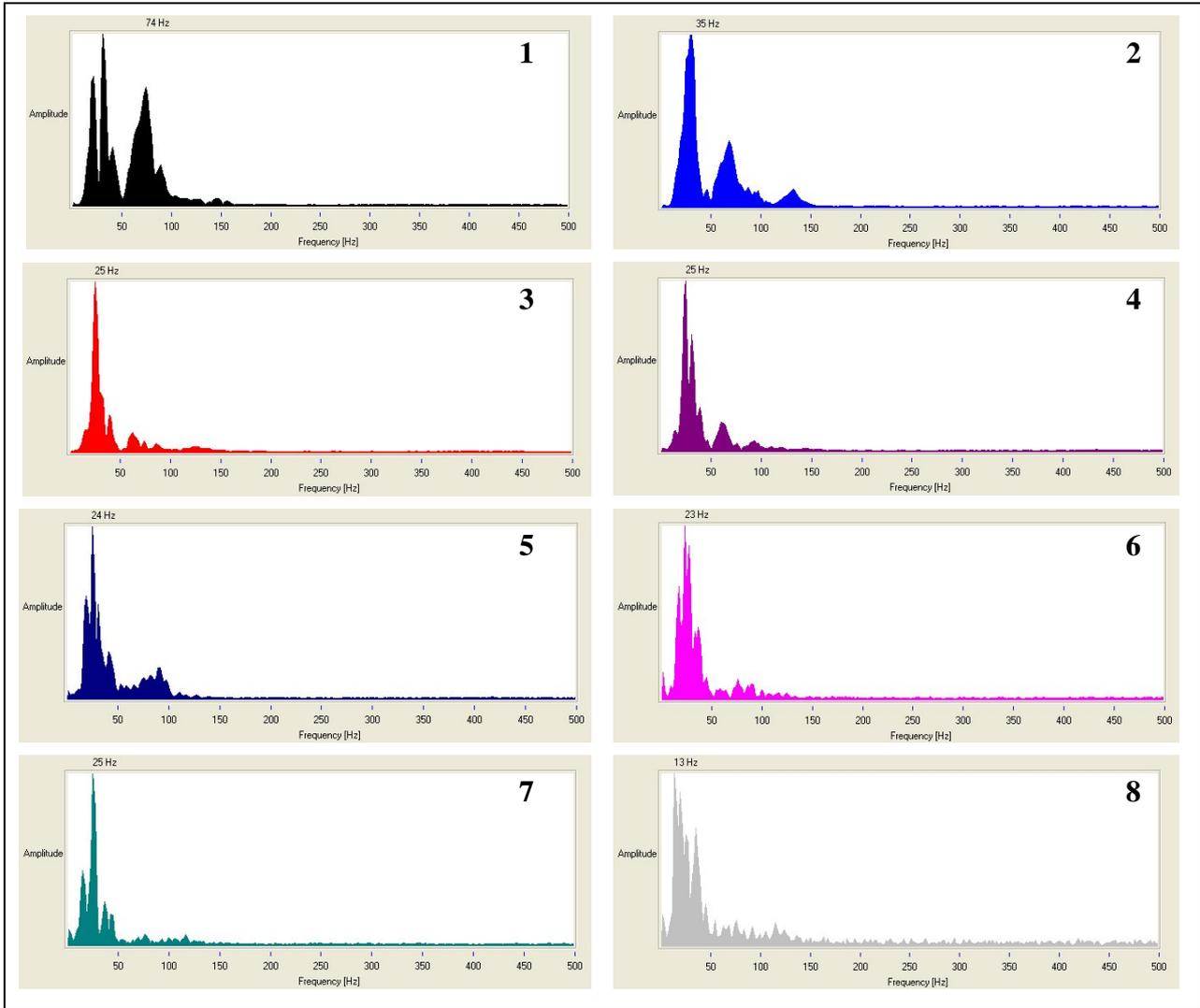
Si evidenziano pertanto 2 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità media di 0.5-1.0 m che separa il sismostrato superficiale caratterizzato da valori di V_p molto bassi compresi tra 200 e 300 m/s da quello sottostante con V_p compresi tra 550 e 650 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 3.5 a 4.5 m, che separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_p compresi tra 1700 e 2000 m/s.

Di seguito a titolo indicativo si riportano, nel dominio delle frequenze sottoforma di spettri di Fourier, alcune registrazioni affette da disturbi di alta frequenza (in particolare comprese nella banda 100-200 Hz), per cui è stata richiesta un'operazione di filtraggio digitale:

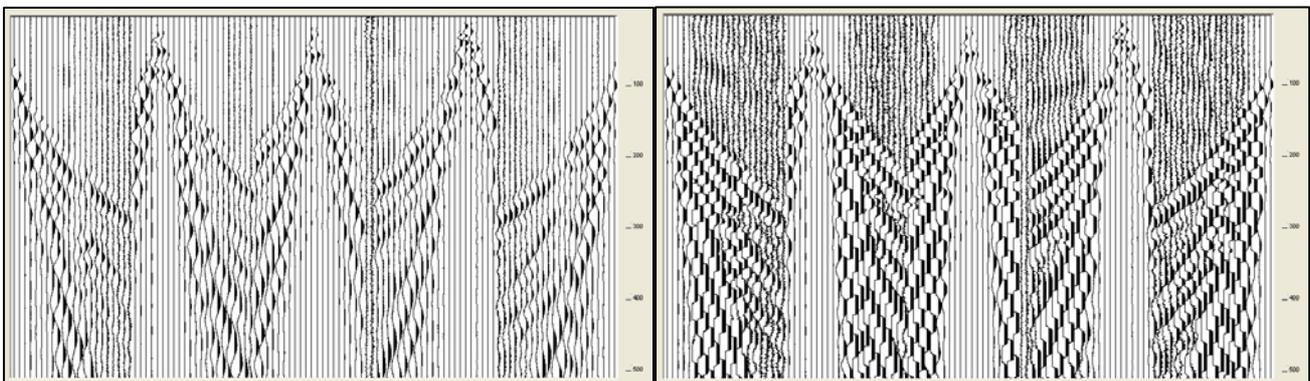


Di seguito si riportano alcune registrazioni che mostrano l'effetto filtrante del suolo esercitato sulle frequenze comprese tra i 50 e 100 Hz allontanandosi dalla sorgente (dal grafico 1 al grafico 8):



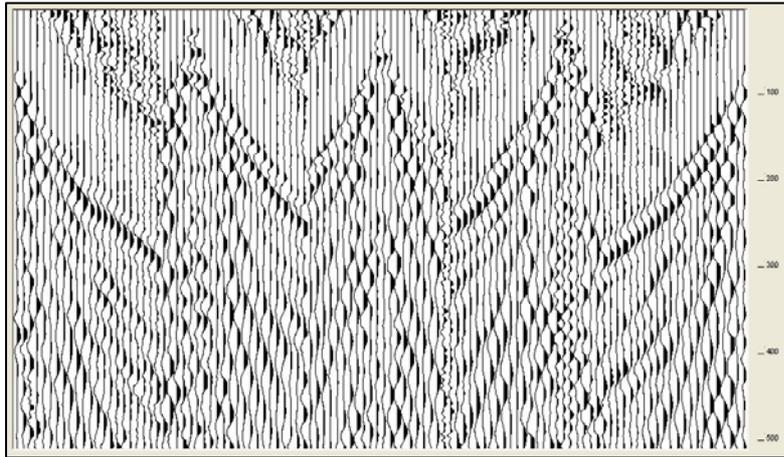
6.2. Registrazione Onde S

Le registrazioni per ciascun punto di scoppio sono state campionate con un intervallo di 500 microsecondi per un tempo totale di 512 ms (per un totale di 1024 tracce), senza utilizzo di filtri hardware. Di seguito si riportano il sismogramma multishot acquisito, quello elaborato e quello filtrato tramite procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto e passa banda:



sismogramma acquisito

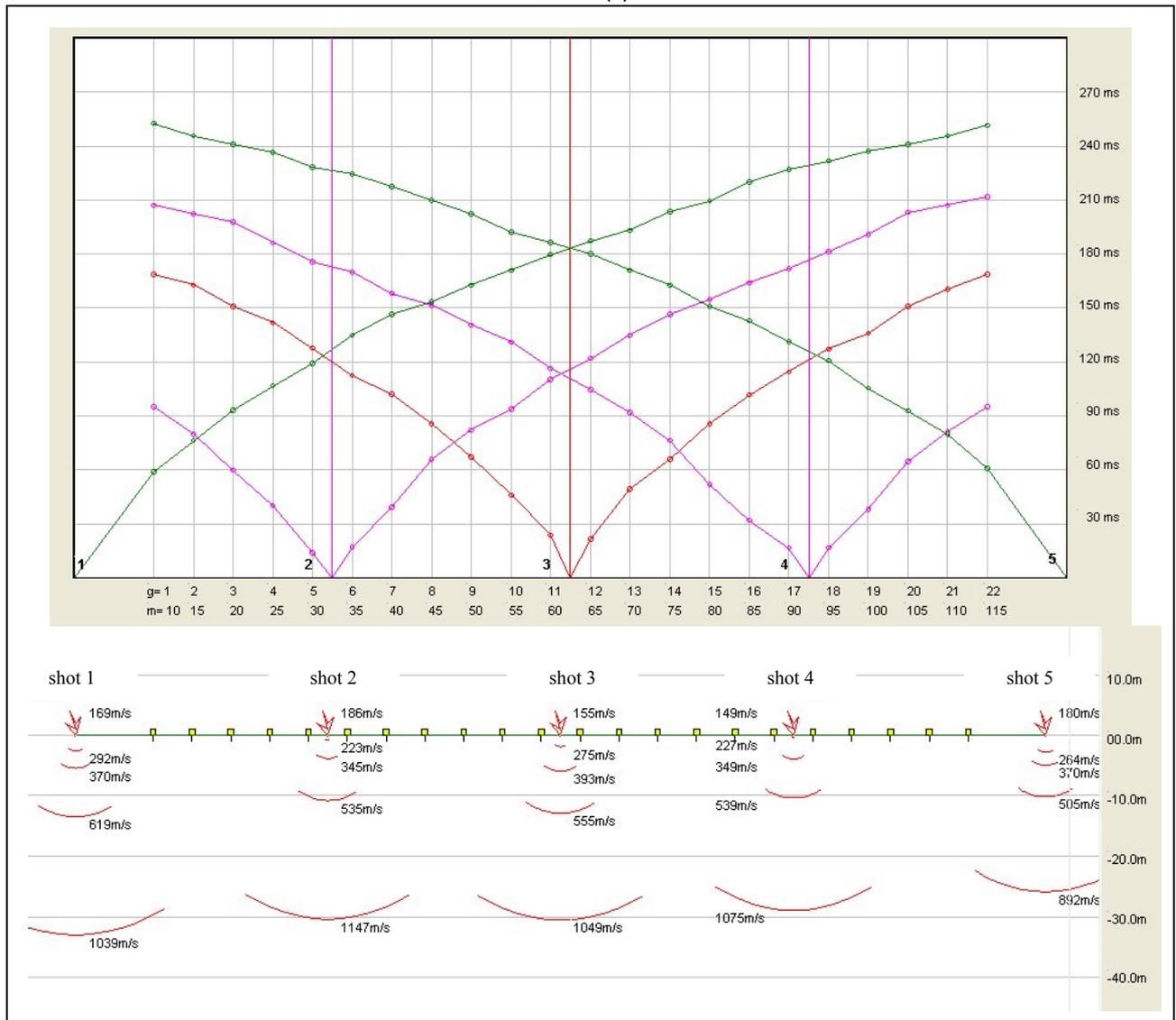
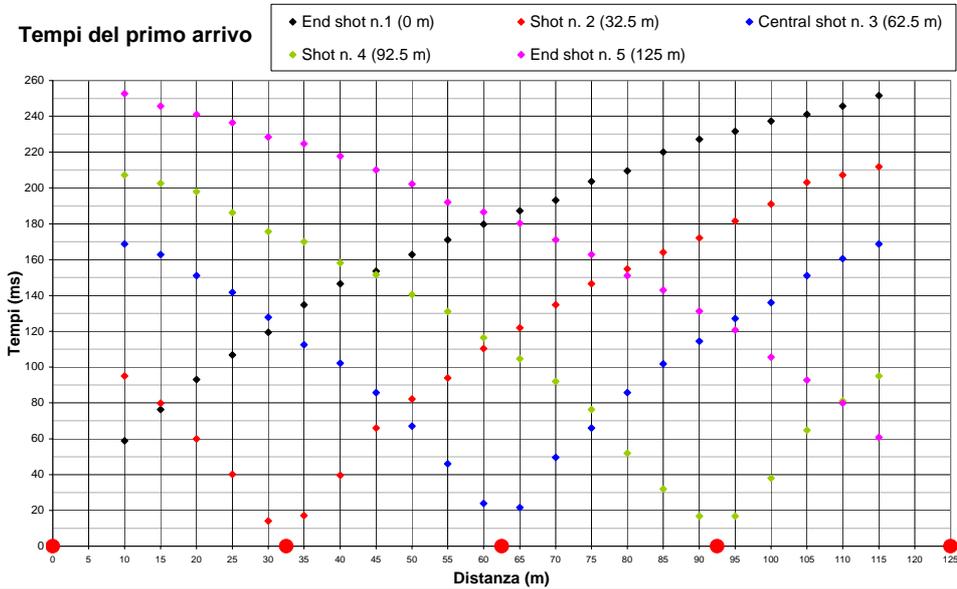
sismogramma elaborato

*sismogramma filtrato*

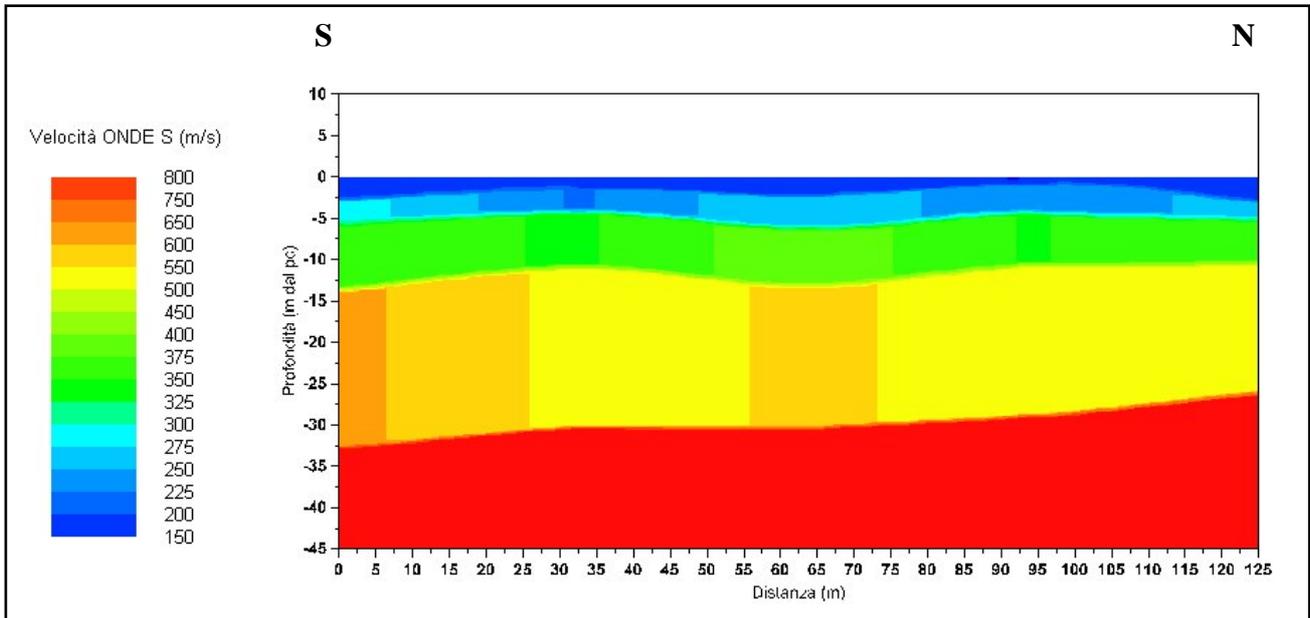
Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio; le quote in corrispondenza di ciascun ricevitore sono state calcolate tramite interpolazione lineare tra le quote dei 5 shots:

<i>N° shot</i>			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Distanza (m)</i>			0	32.5	62.5	92.5	125
<i>Quota (m slm)</i>			0	0	0	0	0
<i>Geofono</i>	<i>Distanza (m)</i>	<i>Quota (m slm)</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>	10	0	58.90	95.10	168.70	207.20	252.70
<i>2</i>	15	0	76.40	79.90	162.80	202.50	245.70
<i>3</i>	20	0	93.09	59.89	151.10	197.90	241.10
<i>4</i>	25	0	106.80	40.20	141.80	186.20	236.40
<i>5</i>	30	0	119.40	14.09	127.80	175.70	228.50
<i>6</i>	35	0	134.80	17.10	112.50	170.00	224.70
<i>7</i>	40	0	146.50	39.50	102.10	158.20	217.70
<i>8</i>	45	0	153.50	65.90	85.80	151.50	210.00
<i>9</i>	50	0	162.80	82.20	67.10	140.60	202.19
<i>10</i>	55	0	171.00	94.00	46.00	131.09	192.00
<i>11</i>	60	0	179.80	110.30	23.90	116.40	186.59
<i>12</i>	65	0	187.30	122.00	21.50	104.70	180.30
<i>13</i>	70	0	193.20	134.80	49.50	92.09	171.00
<i>14</i>	75	0	203.70	146.50	65.90	76.40	162.80
<i>15</i>	80	0	209.50	154.70	85.80	51.90	151.10
<i>16</i>	85	0	220.00	164.00	101.79	32.00	143.00
<i>17</i>	90	0	227.10	172.00	114.50	16.80	131.30
<i>18</i>	95	0	231.70	181.50	127.20	16.80	120.80
<i>19</i>	100	0	237.30	190.90	136.00	37.90	105.60
<i>20</i>	105	0	241.10	203.19	151.10	64.70	92.80
<i>21</i>	110	0	245.70	207.20	160.50	81.10	79.90
<i>22</i>	115	0	251.60	211.90	168.70	95.10	60.89

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 shots:



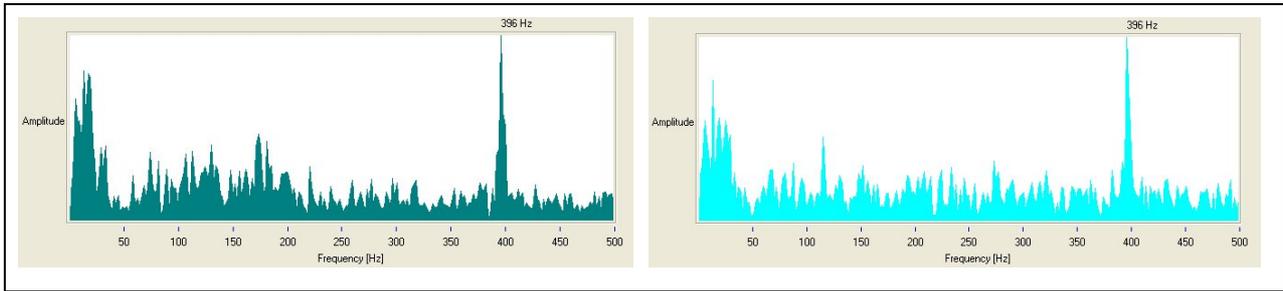
Di seguito si riporta lo schema interpretativo ottenuto scegliendo un modello a 5 strati ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (griglia shot point):



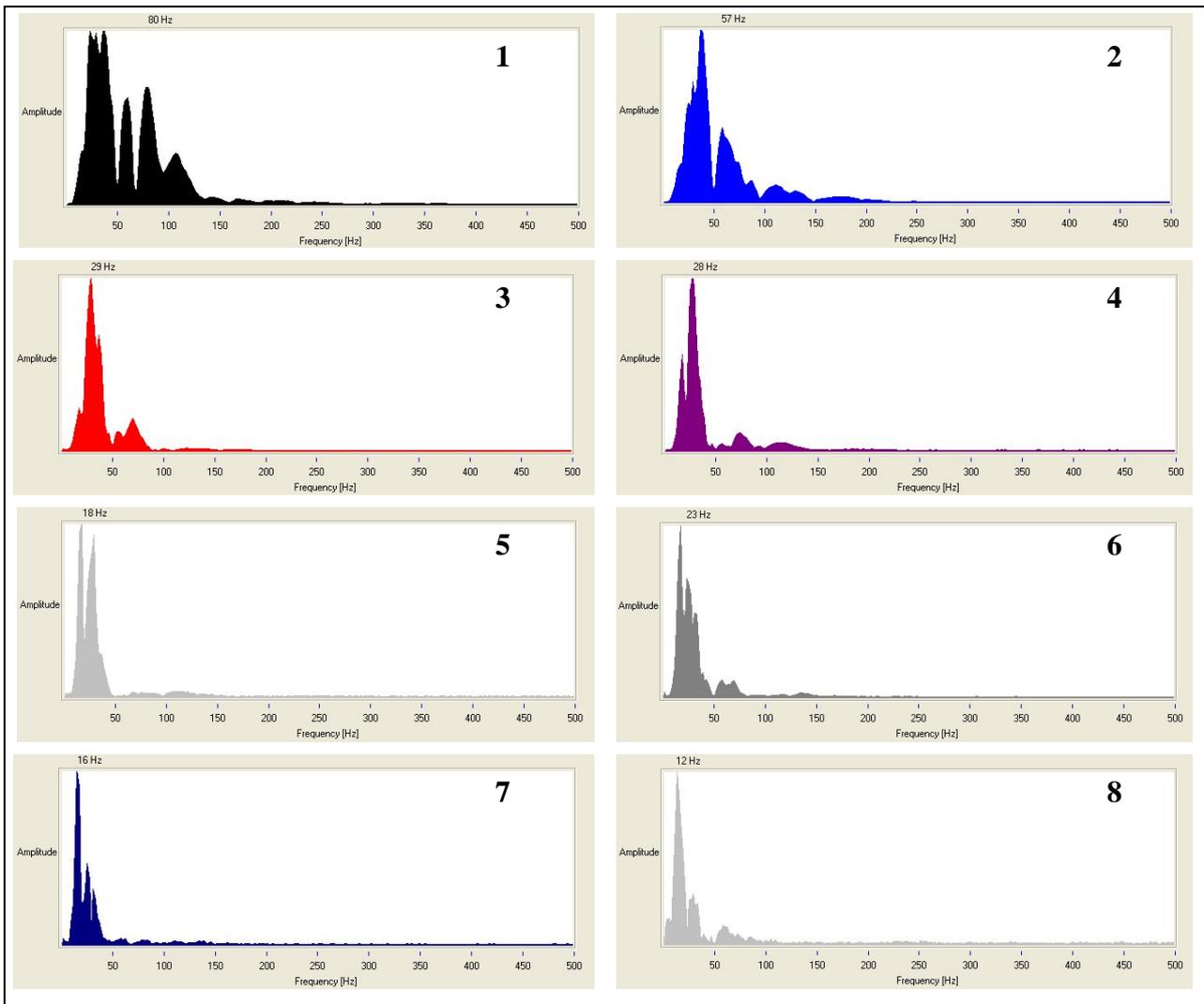
Si evidenziano pertanto 4 rifrattori principali ad andamento ondulato:

- uno posto alla profondità variabile da 1.0 a 3.0 m che separa il sismostrato superficiale con valori di V_S compresi tra 100 e 200 m/s da quello sottostante con valori di V_S compresi tra 225 e 275 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 4.0 a 6.0 m 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 10.0 a 14.0 m che separa il terzo sismostrato dal quarto sismostrato con valori di V_S compresi tra 500 e 600 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 26.0 a 33.0 m che separa il quarto sismostrato dal quinto sismostrato con valori di V_S compresi tra 900 e 1100 m/s.

Di seguito a titolo indicativo si riportano, nel dominio delle frequenze sottoforma di spettri di Fourier, alcune registrazioni affette da disturbi di alta frequenza (in particolare piccati a frequenze di 390-400 Hz), per cui è stata richiesta un'operazione di filtraggio digitale:



Di seguito si riportano alcune registrazioni che mostrano l'effetto filtrante del suolo esercitato sulle frequenze comprese tra i 50 e 150 Hz allontanandosi dalla sorgente (dal grafico 1 al grafico 8):



7. Modello geofisico e geologico interpretativo

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

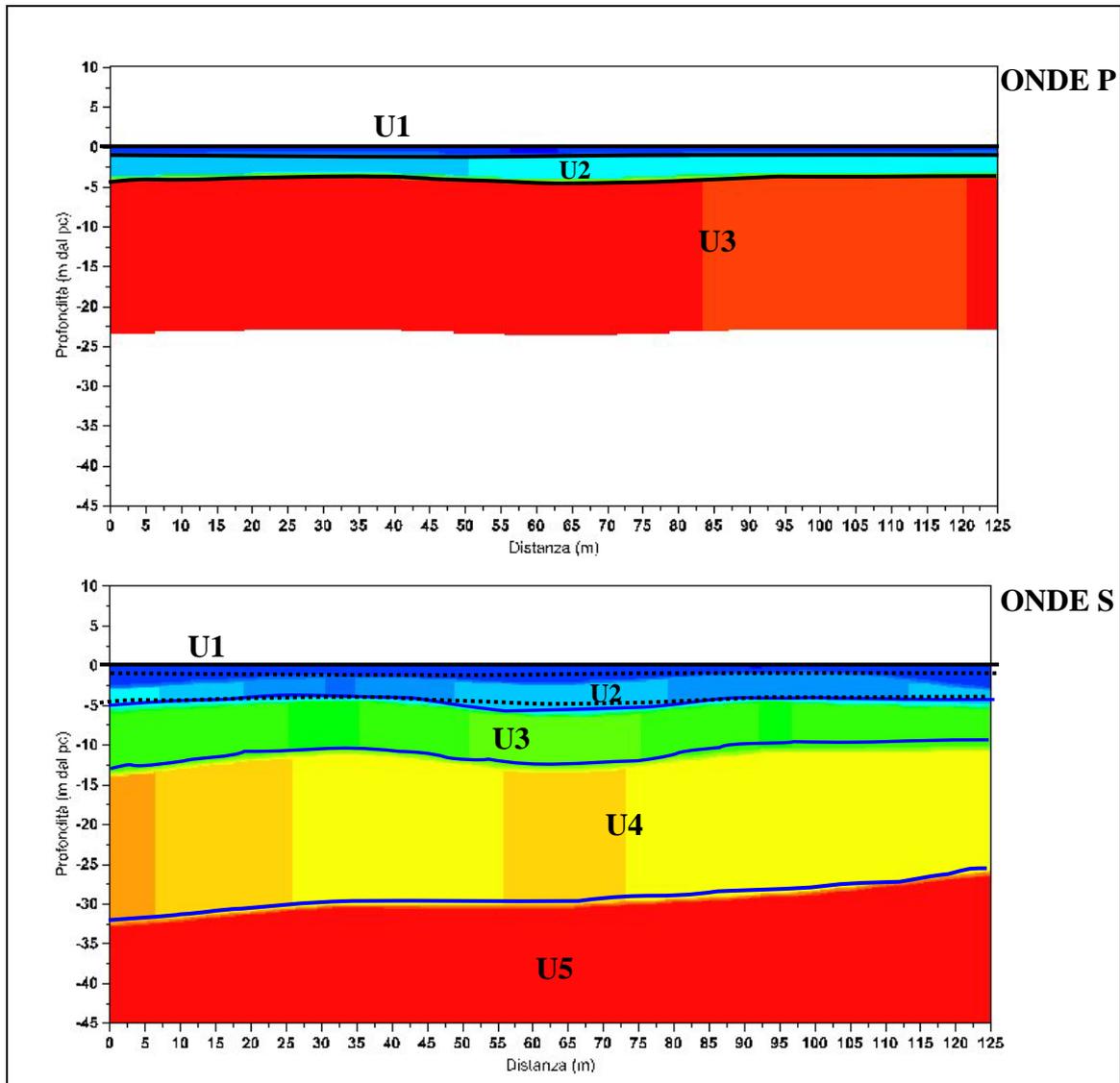
Si ricorda che qualunque tecnica di geofisica applicata ha un margine di errore intrinseco variabile in funzione del tipo di tecnica usata, di strumentazione adottata e di problematiche incontrate durante l'indagine e che solo l'operatore è in grado di quantificare in modo ottimale: nel caso in esame 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.

Pertanto si è proceduto all'interpretazione geofisico-geologica:

- 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 (si trascurano differenze inferiori al metro nella posizione dei limiti tra le unità scegliendo la situazione mediata o più sfavorevole dal punto di vista delle amplificazioni sismiche e considerando opportuni intervalli per i valori di velocità).

Ciascuna unità geofisica così individuata è da intendersi costituita da materiale continuo, omogeneo 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.

Di seguito si riporta l'interpretazione incrociata tra sezioni sismiche P e sezioni sismiche S, per l'area indagata:



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 dell'area investigata, distinguendo 5 unità geofisiche, a cui si associano intervalli di valori di V_P e V_S e dei relativi parametri elastici.

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.

Si è pertanto assegnato un valore del peso di volume di 17.0-18.0 KN/m³ all'unità più superficiale (U1), di 18.0-19.0 KN/m³ all'unità U2, di 19.0-20.0 KN/m³ all'unità U3, di 20.0-21.0 KN/m³ all'unità U4 e di 21.0-22.0 KN/m³ alle unità U5.

Di seguito si riporta la tabella dei parametri elastici delle 5 unità geofisiche costituenti il modello geofisico dell'area:

MODELLO GEOFISICO								
Unità	Densità (g/cm ³)	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _P /V _S	ν	G (MPa)	E (MPa)	K (MPa)
U1	1.73-1.83	200-300	100-200	1.50-2.00	0.10-0.33	17-73	46-161	46-67
U2	1.83-1.94	550-650	225-275	2.36-2.44	0.39-0.40	93-146	260-407	431-623
U3	1.94-2.04	1700-2000	300-400	5.00-5.67	0.48	174-326	517-965	5365-7720
U4	2.04-2.14	1700-2000	500-600	3.33-3.40	0.45	510-771	1481-2236	5212-7535
U5	2.14-2.24	1700-2000	900-1100	1.82-1.89	0.28-0.31	1734-2714	4527-6964	3875-5352

In tabella 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.

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} %).

Dal modello geofisico sopra riportato è possibile definire la situazione monodimensionale più sfavorevole dal punto di vista dei fenomeni di amplificazione sismica litologica, 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).

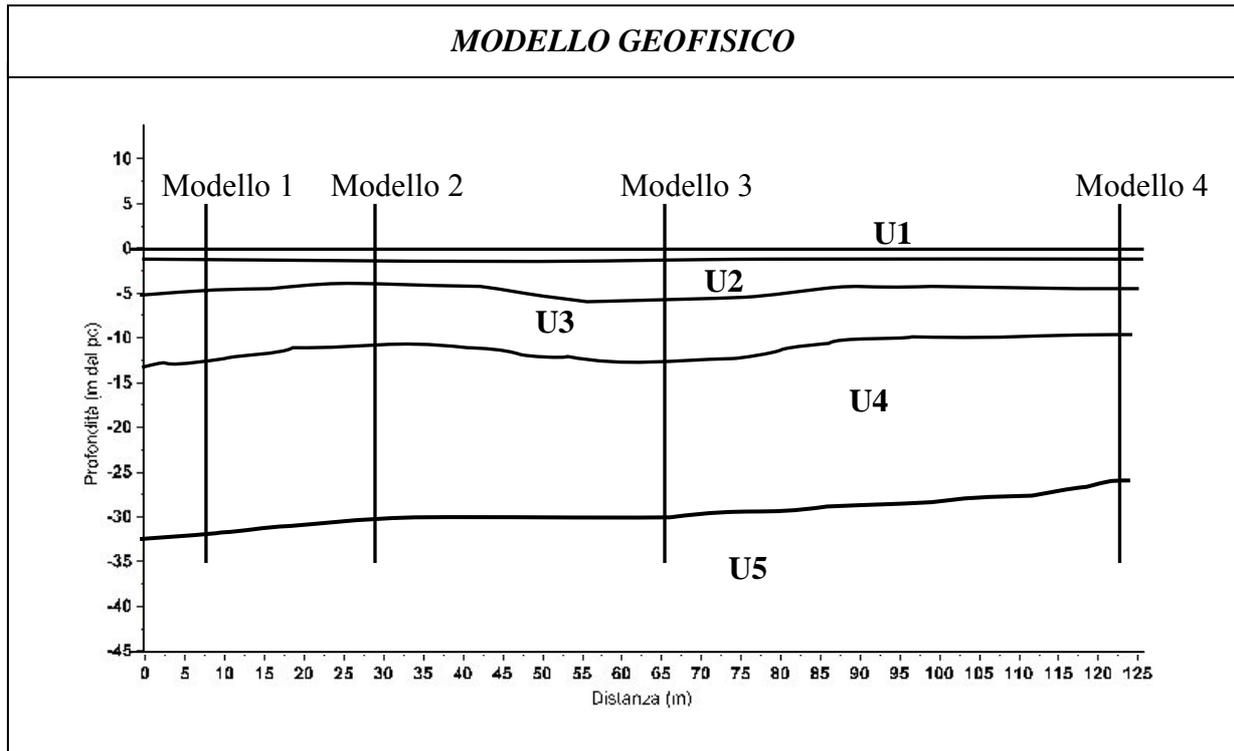
8. Considerazioni finalizzate all'applicazione della normativa vigente

Di seguito si forniscono alcune indicazioni utili per l'applicazione della normativa nazionale e regionale in tema di valutazione della risposta sismica locale.

Il modello geofisico dell'area denota la presenza in superficie (da 1.0 m a 3.0 m) di litotipi molto scadenti dal punto di vista meccanico seguiti da materiali insaturi limoso-sabbiosi e da materiali sabbioso-ghiaiosi saturi ad alta porosità.

Oltre i 25-30 m sono presenti orizzonti cementati o conglomeratici più o meno compatti.

Di seguito si propongono 4 esempi di modelli 1D per l'area indagata:



Di seguito si riportano gli spessori e le velocità V_s di ciascun strato costituente i 4 modelli multistrato monodimensionali identificati:

Modello 1		Modello 2		Modello 3		Modello 4	
S (m)	V_s (m/s)	S (m)	V_s (m/s)	S (m)	V_s (m/s)	V_s (m/s)	V_s (m/s)
1	150	1	150	1	150	1	150
4	250	3	250	5	250	4	250
8	350	6	350	7	350	5	350
19	550	20	550	17	550	16	550
950		950		950		950	
$V_{S30} = 393$ m/s		$V_{S30} = 416$ m/s		$V_{S30} = 387$ m/s		$V_{S30} = 427$ m/s	
SUOLO DI CATEGORIA B (ai sensi del DM 14-9-2005)							

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" è necessario individuare, seppure in modo approssimato, la profondità del bedrock geofisico ($V_s \geq 800$ m/s) e da esso fissare la stratigrafia in grado di interferire e modificare il moto sismico di riferimento.

L'indagine ha evidenziato la presenza di materiali con V_s superiori ad 800 m/s a profondità variabile da 26.0 m a 32.0 m.

Di seguito si riportano per i 4 modelli esemplificativi considerati i valori del periodo proprio del deposito calcolati mediante la formula semplificata contenuta nel suddetto allegato 5:

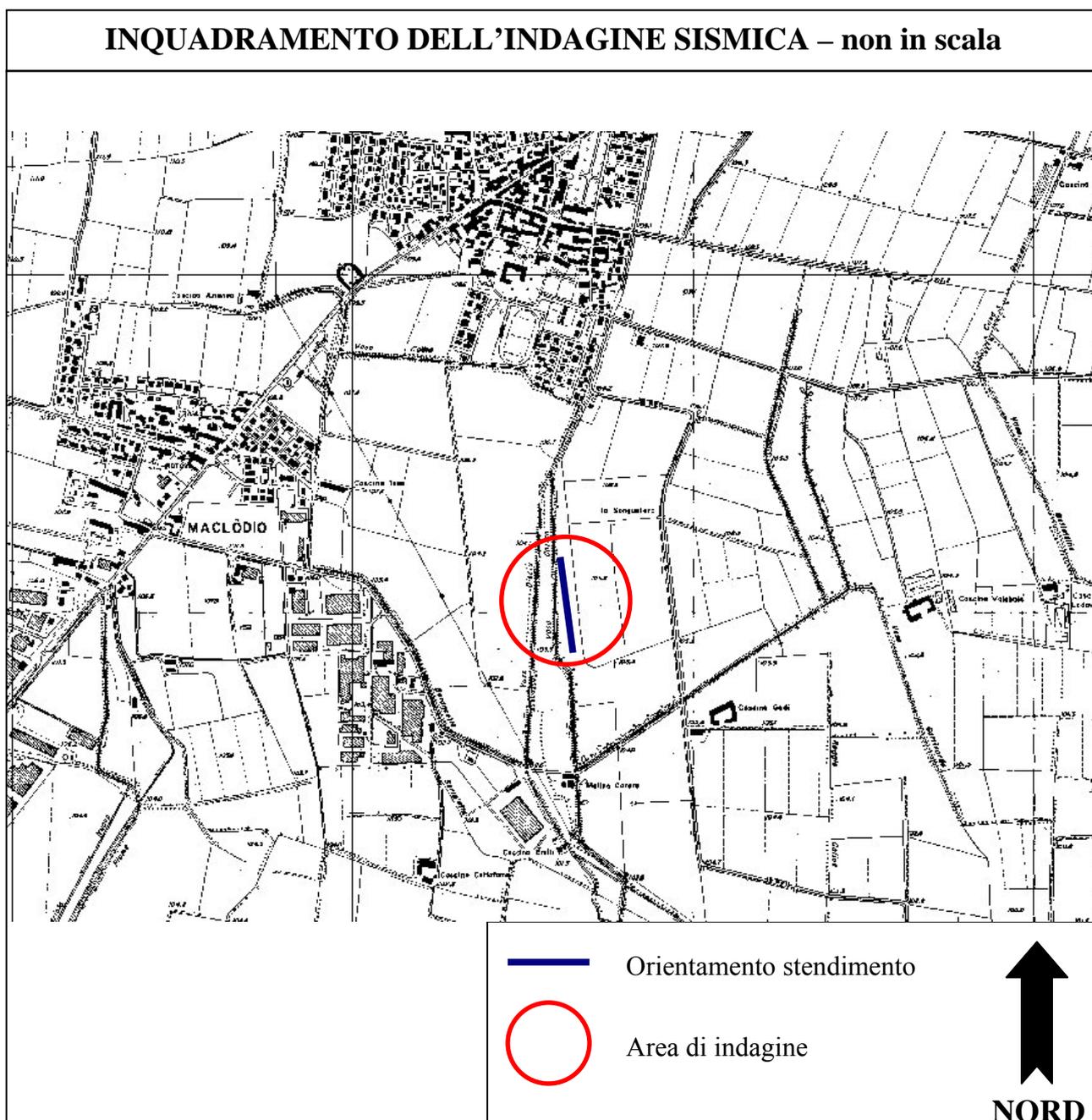
Modello 1	Modello 2	Modello 3	Modello 4
T = 0.284 s	T = 0.257 s	T = 0.273 s	T = 0.232 s

Dr. Geol. Daniela Chiarini

Dr. Geol. Massimo Compagnoni

Dr. Geol. Alberto Peruzzini

ALLEGATO



INTEGRAZIONE INDAGINE GEOFISICA DI SISMICA A RIFRAZIONE

RAPPORTO INTERPRETATIVO

COMUNE DI LOGRATO (BS)

INDICE

1. Premessa	4
2. Interpretazione e risultati	4
2.1. <i>Registrazione Onde P</i>	5
2.2. <i>Registrazione Onde S</i>	9
3. Modello geofisico e geologico interpretativo	12

ALLEGATI

1. Ubicazione stendimento sismico
2. Rumore ambientale
3. Sismogrammi multishots ONDE P
4. Sismogrammi multishots ONDE S

Brescia, 24 ottobre 2006

1. Premessa

Su incarico e per conto della Dr.^{ssa} L. Ziliani si è proceduto all'integrazione della precedente campagna di indagine geofisica di sismica a rifrazione eseguita in data 30 agosto 2006, eseguendo un nuovo stendimento sismico in un'area del Comune di Lograto (Brescia) ubicata nel settore nord-orientale del centro abitato comunale.

La strumentazione utilizzata è analoga a quella usata nella precedente indagine e analoghi sono gli scopi.

2. Interpretazione e risultati

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

- Individuazione del primo arrivo in P e del primo arrivo in SH 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 utilizzato 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 (minimo 7 shots) e rendono più difficile l'individuazione di aree adatte all'indagine.

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 e si propone un possibile gradiente di variazione delle proprietà meccaniche dei materiali con la profondità.

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; al fine di individuare le reali geometrie dei sismostrati sarebbe necessario eseguire più stendimenti disposti tra loro ortogonalmente.

La topografia della superficie è pianeggiante sul tratto investigato ed è stata pertanto assegnata a tutto lo stendimento la quota relativa 0.

Lo stendimento è orientato circa N-S (10-190) e l'origine del sistema di riferimento relativo è posto in corrispondenza dell'end shot a N posto a 5 m dal 1° geofono.

L'area investigata (allegato n. 1) si colloca all'interno di un vasto appezzamento agricolo recentemente adibito a coltivazione di mais in una zona non particolarmente disturbata, in quanto il rumore ambientale è risultato poco significativo (allegato n. 2).

2.1. Registrazione Onde P

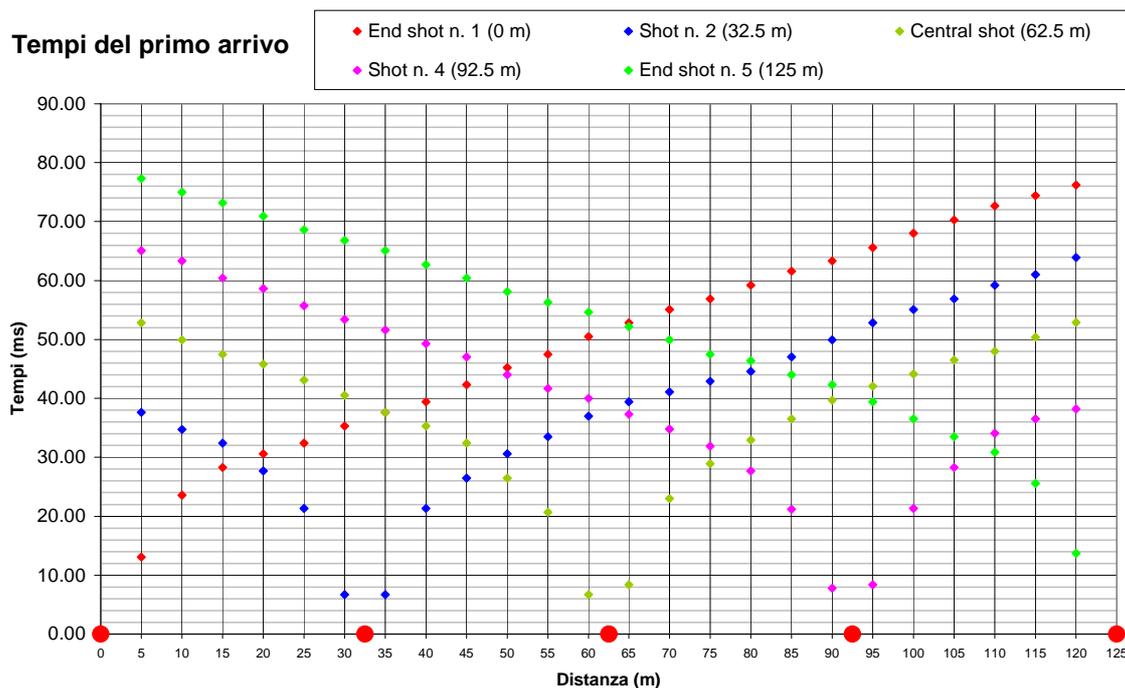
Le registrazioni per ciascun punto di scoppio sono state campionate con un intervallo di 250 microsecondi per un tempo totale di acquisizione pari a 256 ms (con un totale di 1024 campioni), con utilizzo di filtro hardware.

In allegato n. 3 si riportano il sismogramma multishot acquisito, quello elaborato tramite amplificazione ed equalizzazione delle tracce e quello filtrato tramite procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto e passa banda.

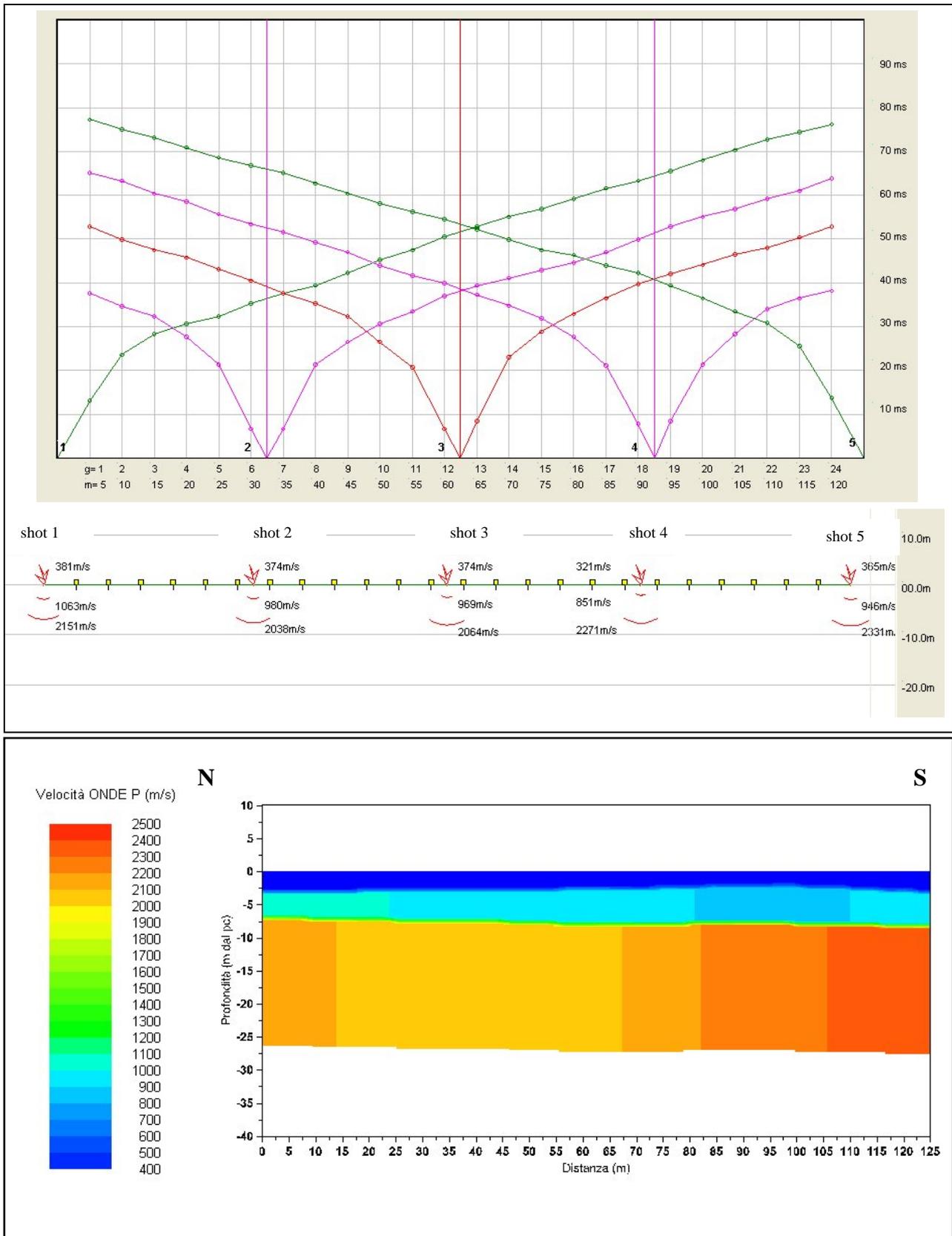
Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio; le quote in corrispondenza di ciascun ricevitore sono state calcolate tramite interpolazione lineare tra le quote dei 5 shots:

<i>N° shot</i>			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Distanza (m)</i>			0	32.5	62.5	92.5	125
<i>Quota (m slm)</i>			0	0	0	0	0
<i>Geofono</i>	<i>Distanza (m)</i>	<i>Quota (m slm)</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	13.10	37.60	52.80	65.10	77.30
<i>2</i>	10	0	23.60	34.70	49.90	63.30	75.00
<i>3</i>	15	0	28.30	32.40	47.50	60.40	73.20
<i>4</i>	20	0	30.60	27.70	45.80	58.60	70.90
<i>5</i>	25	0	32.40	21.30	43.10	55.70	68.60
<i>6</i>	30	0	35.30	6.70	40.50	53.40	66.80
<i>7</i>	35	0	37.60	6.70	37.60	51.60	65.10
<i>8</i>	40	0	39.40	21.30	35.30	49.30	62.70
<i>9</i>	45	0	42.30	26.50	32.40	47.00	60.40
<i>10</i>	50	0	45.20	30.60	26.50	44.00	58.10
<i>11</i>	55	0	47.50	33.50	20.69	41.70	56.30
<i>12</i>	60	0	50.50	37.00	6.70	40.00	54.60
<i>13</i>	65	0	52.80	39.40	8.40	37.29	52.20
<i>14</i>	70	0	55.10	41.10	23.00	34.79	49.90
<i>15</i>	75	0	56.90	42.90	28.90	31.89	47.50
<i>16</i>	80	0	59.20	44.60	32.90	27.70	46.40
<i>17</i>	85	0	61.60	47.00	36.50	21.19	44.00
<i>18</i>	90	0	63.30	49.90	39.70	7.80	42.30
<i>19</i>	95	0	65.60	52.80	42.10	8.40	39.40
<i>20</i>	100	0	68.00	55.10	44.10	21.30	36.50
<i>21</i>	105	0	70.30	56.90	46.50	28.30	33.50
<i>22</i>	110	0	72.70	59.20	48.00	34.10	30.89
<i>23</i>	115	0	74.40	61.00	50.39	36.50	25.60
<i>24</i>	120	0	76.20	63.90	52.89	38.20	13.70

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:



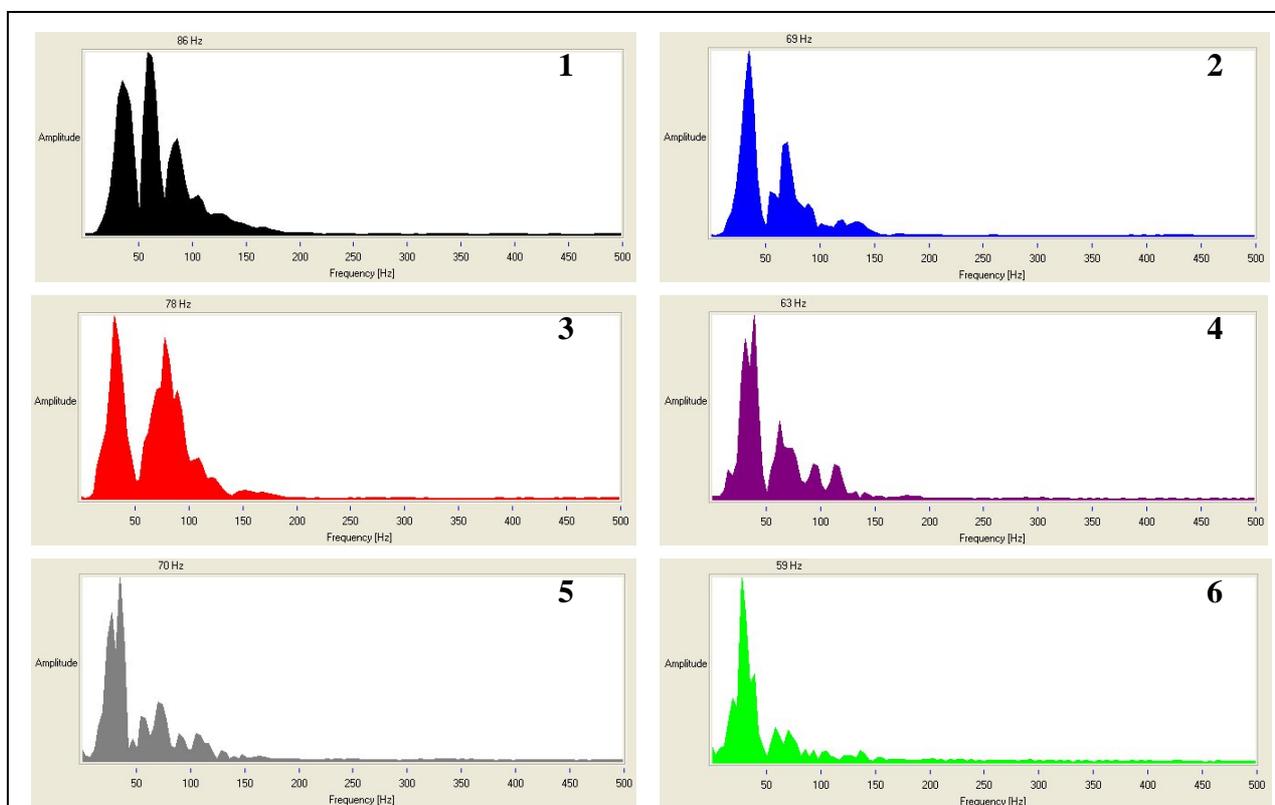
Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo a 3 strati ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta, computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio (griglia shot-point):



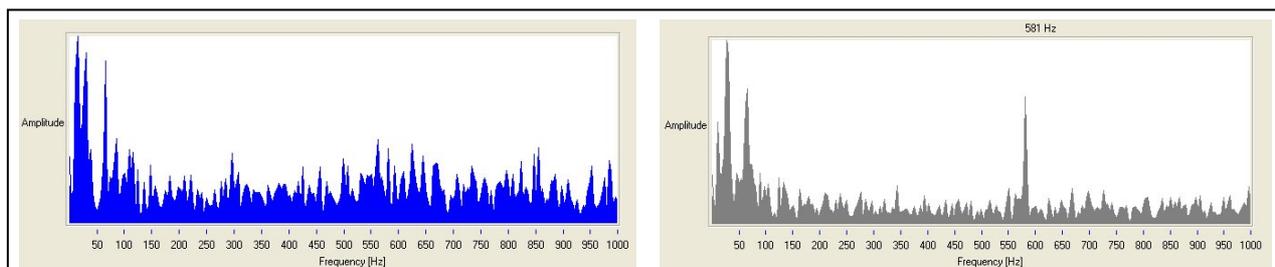
Si evidenziano pertanto 2 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità variabile da 2.0 a 3.0 m che separa il sismostrato superficiale caratterizzato da valori di V_p compresi tra 300 e 400 m/s da quello sottostante con V_p compresi tra 850 e 1050 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 7.0 a 8.0 m, che separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato caratterizzato da valori di V_p compresi tra 2000 e 2200 m/s.

Di seguito a titolo indicativo si riportano, nel dominio delle frequenze sottoforma di spettri di Fourier in ampiezza, alcune registrazioni poste a distanza crescente da una delle cinque sorgenti: esse mostrano l'effetto filtrante esercitato dal suolo con progressiva riduzione delle componenti a frequenze comprese tra i 50 e 150 Hz (dal grafico 1 al grafico 6):



Di seguito si riportano due esempi di registrazione affetta da disturbi:



2.2. Registrazione Onde S

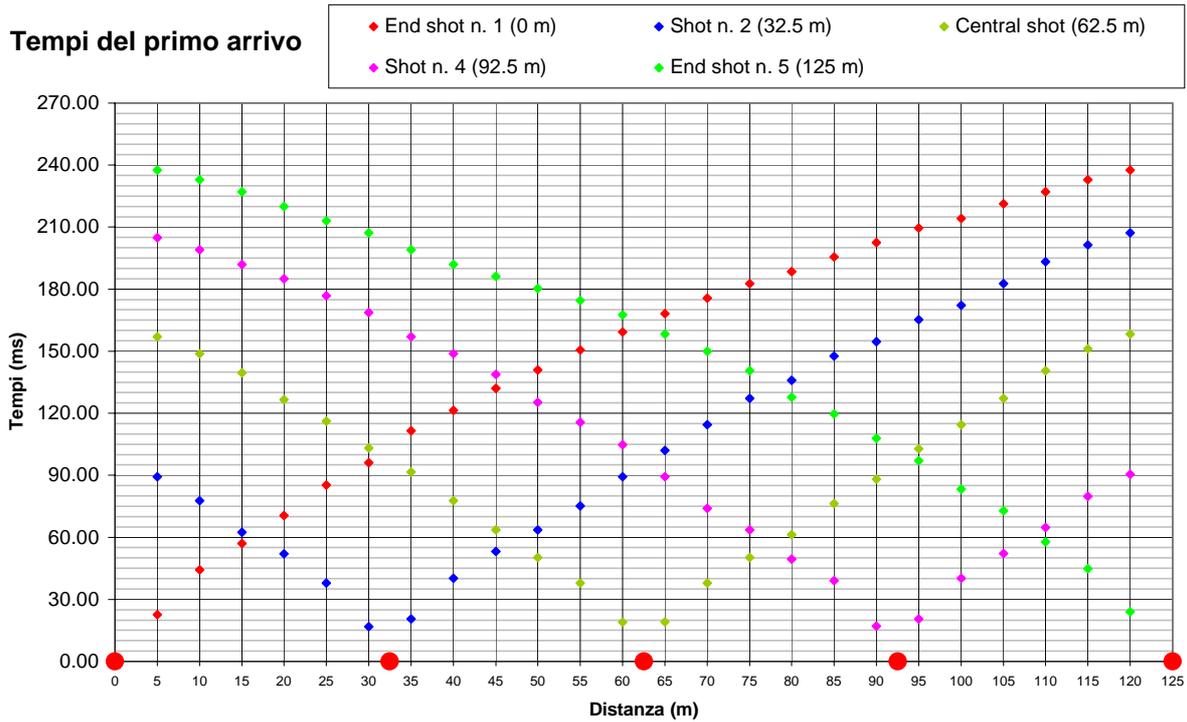
Le registrazioni per ciascun punto di scoppio sono state campionate con un intervallo di 500 microsecondi per un tempo totale di acquisizione di 512 ms (con un totale di 1024 campioni), con utilizzo di filtri hardware.

In allegato n. 4 si riportano il sismogramma multishot acquisito, quello elaborato tramite amplificazione ed equalizzazione delle tracce e quello filtrato tramite procedure di filtraggio digitale multiplo con filtro taglia alto e passa banda.

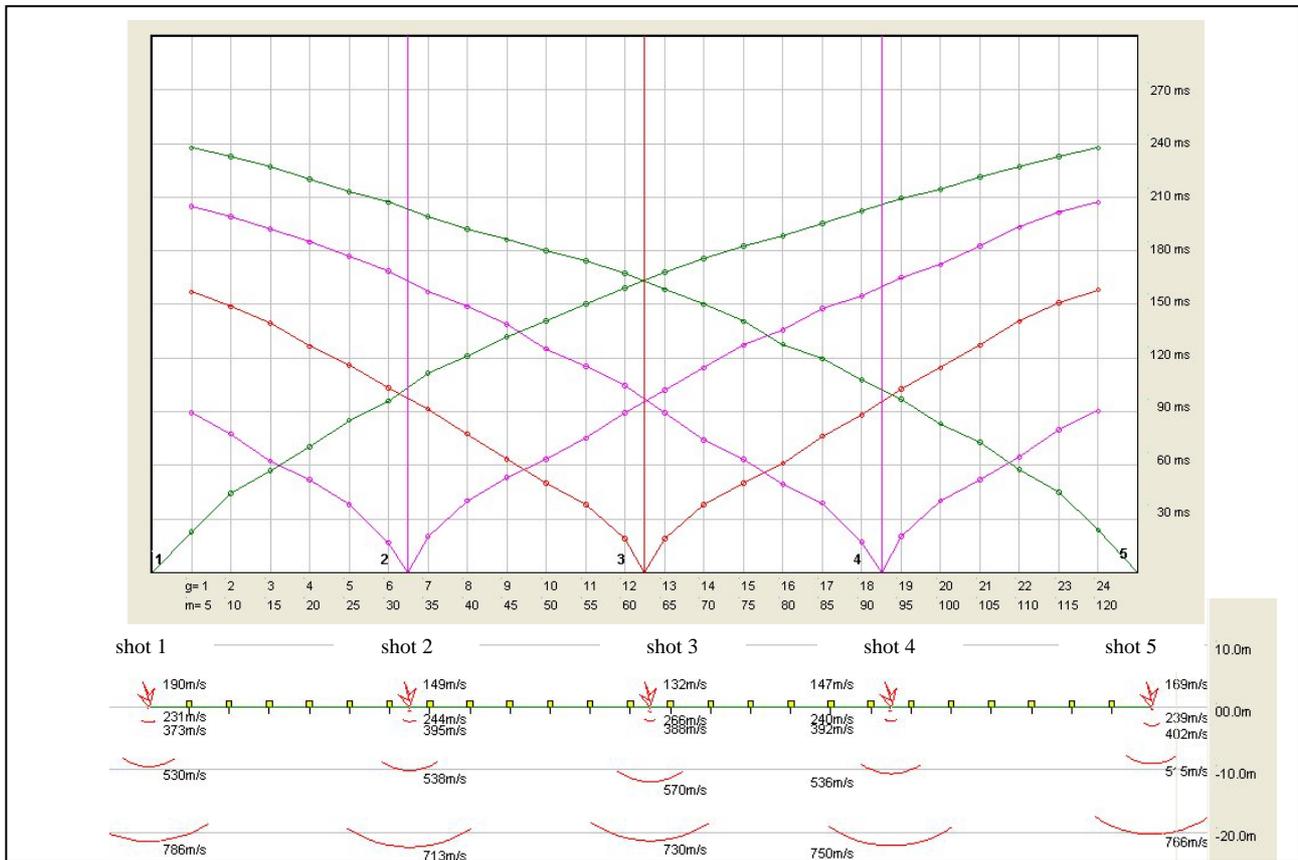
Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio; le quote in corrispondenza di ciascun ricevitore sono state calcolate tramite interpolazione lineare tra le quote dei 5 shots:

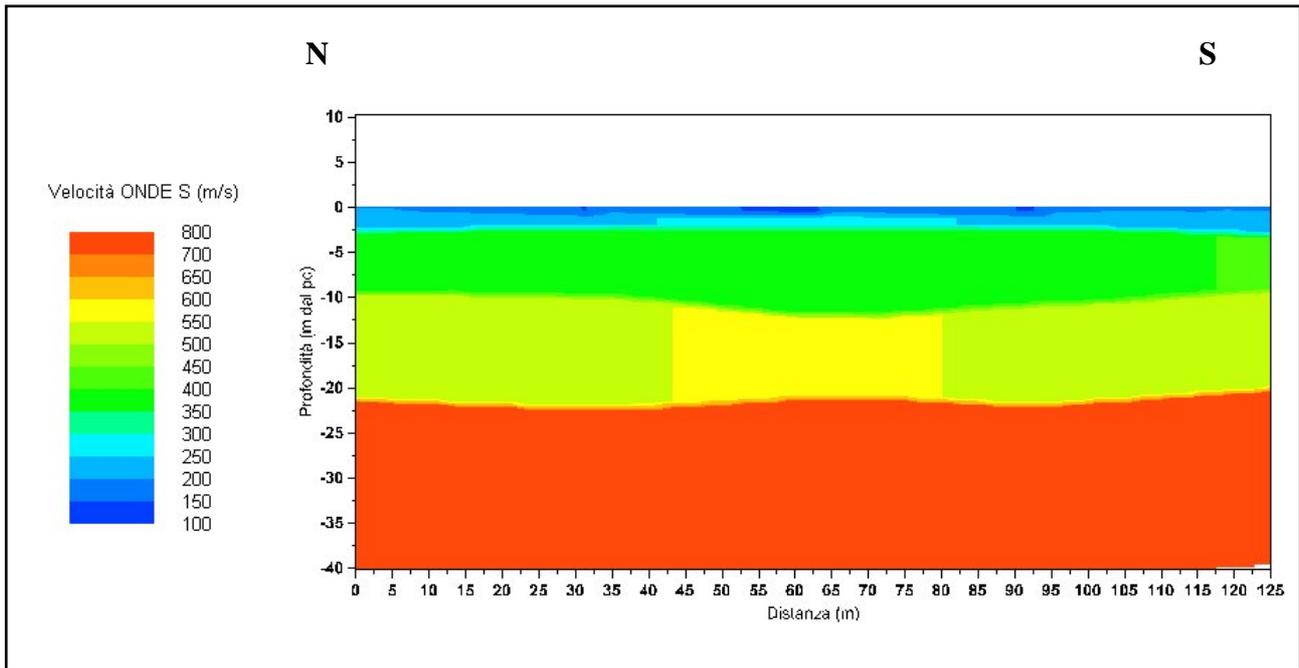
<i>N° shot</i>			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>Distanza (m)</i>			0	32.5	62.5	92.5	125
<i>Quota (m slm)</i>			0	0	0	0	0
<i>Geofono</i>	<i>Distanza (m)</i>	<i>Quota (m slm)</i>	<i>Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)</i>				
			<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
<i>1</i>	5	0	22.70	89.30	157.00	204.90	237.60
<i>2</i>	10	0	44.29	77.60	148.80	199.00	232.90
<i>3</i>	15	0	57.00	62.40	139.50	192.00	227.10
<i>4</i>	20	0	70.59	51.90	126.60	185.00	220.00
<i>5</i>	25	0	85.29	37.90	116.10	176.80	213.00
<i>6</i>	30	0	96.00	16.80	103.30	168.70	207.20
<i>7</i>	35	0	111.59	20.40	91.60	157.00	199.00
<i>8</i>	40	0	121.29	40.20	77.60	148.80	192.00
<i>9</i>	45	0	132.00	53.10	63.60	138.80	186.20
<i>10</i>	50	0	140.80	63.60	50.20	125.20	180.30
<i>11</i>	55	0	150.50	75.20	37.90	115.50	174.50
<i>12</i>	60	0	159.30	89.30	19.00	104.70	167.50
<i>13</i>	65	0	168.09	102.10	19.20	89.30	158.30
<i>14</i>	70	0	175.70	114.50	37.90	74.10	150.00
<i>15</i>	75	0	182.70	127.20	50.20	63.60	140.60
<i>16</i>	80	0	188.50	135.90	61.20	49.50	127.80
<i>17</i>	85	0	195.50	147.60	76.40	39.00	119.60
<i>18</i>	90	0	202.50	154.70	88.10	17.10	107.90
<i>19</i>	95	0	209.50	165.20	102.79	20.40	97.00
<i>20</i>	100	0	214.20	172.20	114.50	40.20	83.29
<i>21</i>	105	0	221.20	182.70	127.20	52.10	72.90
<i>22</i>	110	0	227.10	193.20	140.60	64.79	57.70
<i>23</i>	115	0	232.90	201.40	151.10	79.90	44.90
<i>24</i>	120	0	237.60	207.20	158.20	90.40	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 5 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):

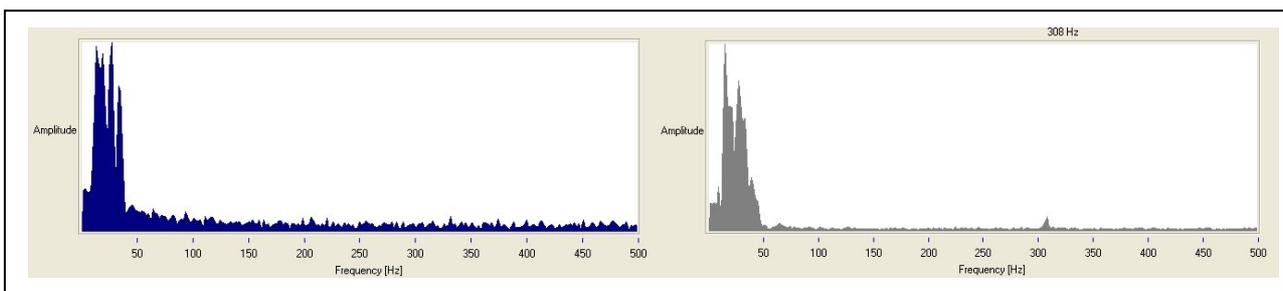




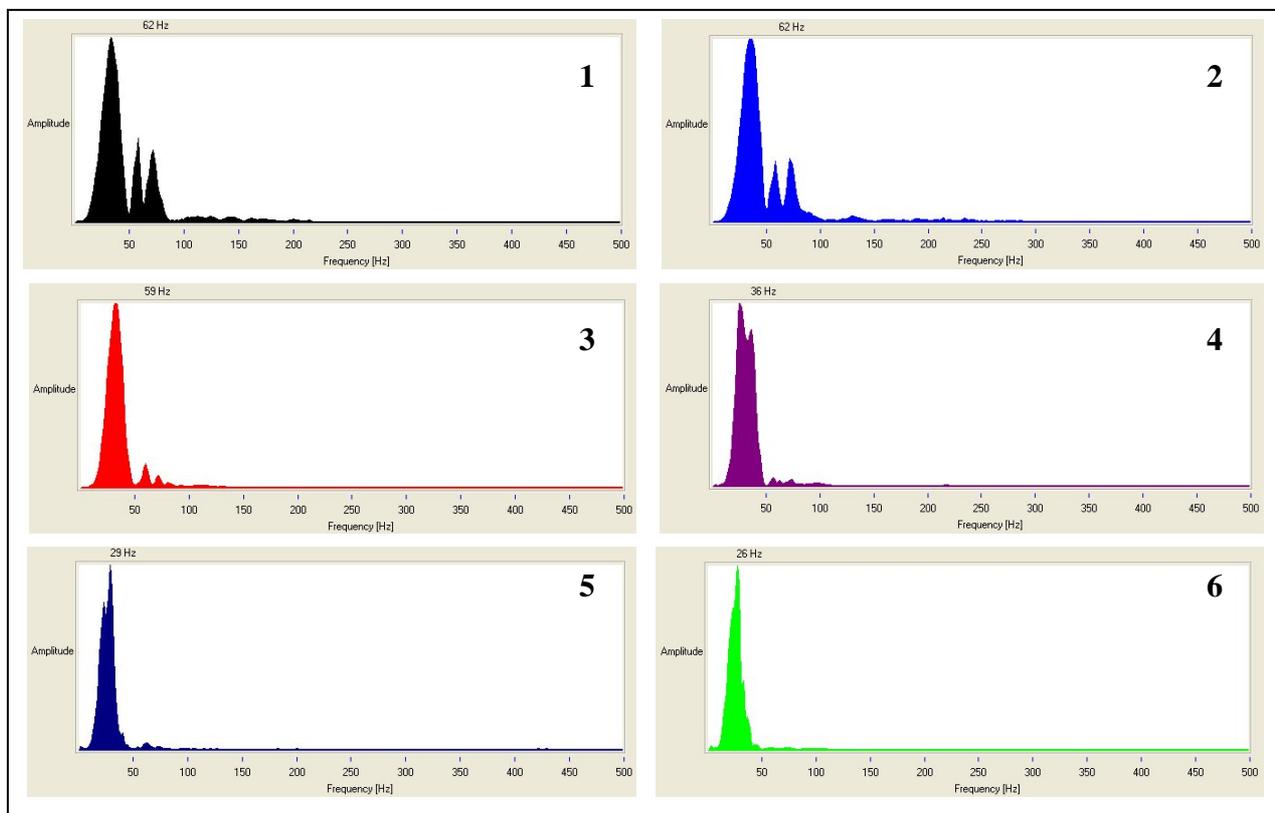
Si evidenziano pertanto 4 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità inferiore ad 1.0 m che separa il sismostrato superficiale con valori di V_S compresi tra 100 e 200 m/s da quello sottostante con valori di V_S compresi tra 200 e 300 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 2.0 a 3.0 m che separa il secondo sismostrato dal terzo sismostrato con valori di V_S compresi tra 350 e 400 m/s;
- uno posto alla profondità variabile da 9.0 a 12.0 m che separa il terzo sismostrato dal quarto sismostrato con valori di V_S compresi tra 500 e 600 m/s
- uno posto alla profondità variabile da 20.0 a 22.0 m che separa il quarto sismostrato dal quinto sismostrato con valori di V_S compresi tra 700 e 800 m/s.

Di seguito si riportano due esempi di registrazioni affette da disturbi di alta frequenza, per cui è stata richiesta un'operazione di filtraggio digitale:



Di seguito a titolo indicativo si riportano, nel dominio delle frequenze sottoforma di spettri di Fourier, alcune registrazioni che mostrano l'effetto filtrante del suolo esercitato sulle frequenze comprese tra i 50 e 100 Hz, allontanandosi dalla sorgente (dal grafico 1 al grafico 6):



3. Modello geofisico e geologico interpretativo

Le sezioni sismiche ottenute dall'interpretazione 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.

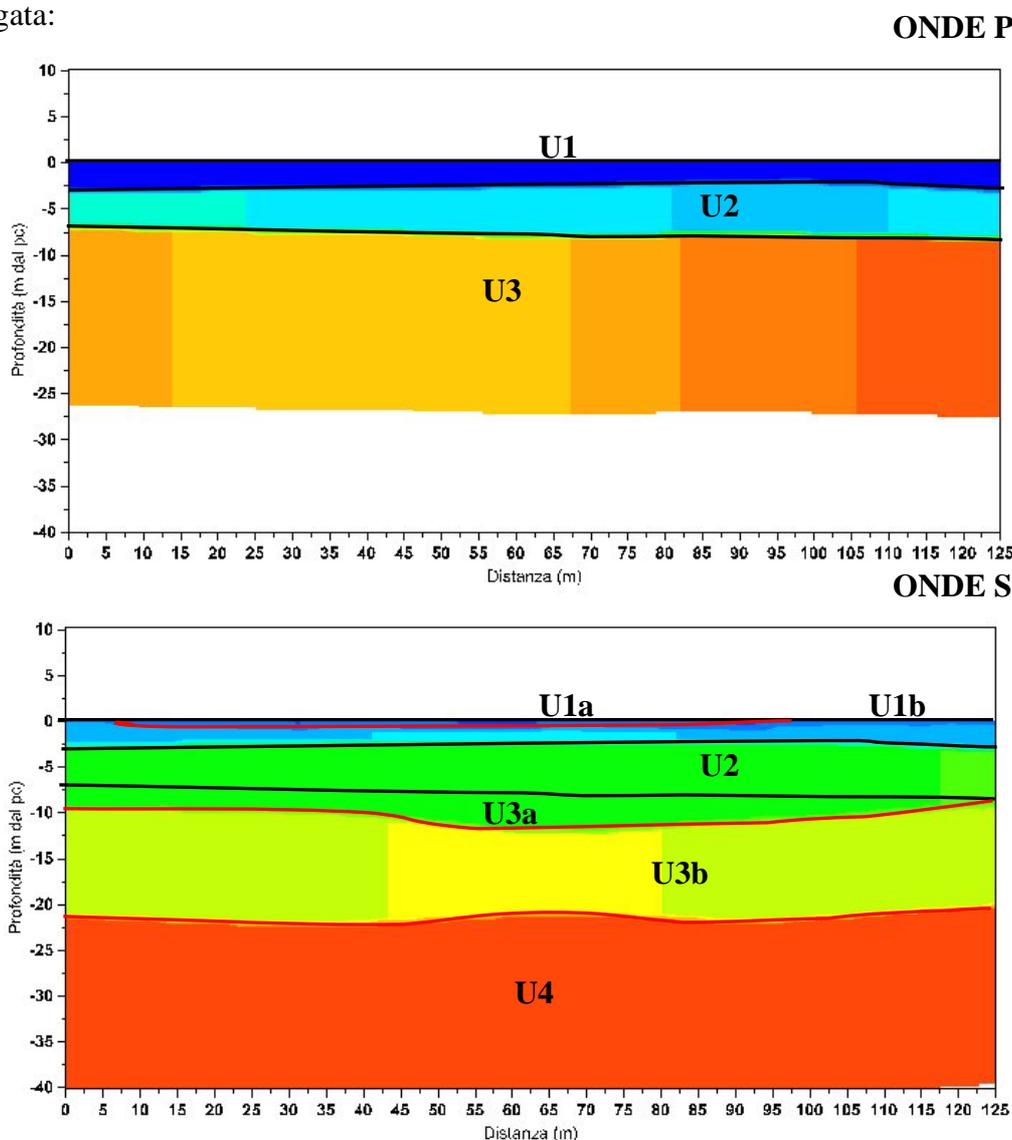
Pertanto si è proceduto all'interpretazione geofisico-geologica:

- 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 (si trascurano differenze inferiori al metro nella posizione dei

limiti tra le unità scegliendo la situazione mediata o più sfavorevole dal punto di vista delle amplificazioni sismiche e considerando opportuni intervalli per i valori di velocità).

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.

Di seguito si riporta l'interpretazione incrociata tra sezioni sismiche P e sezioni sismiche S, per l'area indagata:



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 dell'area investigata, distinguendo 6 unità geofisiche, a cui si associano intervalli di valori di V_P e V_S e dei relativi parametri elastici.

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.

Si è pertanto assegnato un valore del peso di volume di 17.0-18.0 kN/m³ all'unità più superficiale U1a, di 18.0-19.0 kN/m³ alle unità U1b e U2, di 19.0-20.0 kN/m³ alle unità U3a e U3b e di 20.0-21.0 kN/m³ all'unità U4.

Di seguito si riporta la tabella dei parametri elastici delle 6 unità geofisiche costituenti il modello geofisico dell'area:

MODELLO GEOFISICO								
Unità	Densità (g/cm ³)	V_P (m/s)	V_S (m/s)	V_P/V_S	ν	G (MPa)	E (MPa)	K (MPa)
U1a	1.73-1.83	300-400	100-200	2.00-3.00	0.33-0.44	17-73	50-196	133-196
U1b	1.83-1.94	300-400	200-300	1.50	0.10	73-174	161-299	67-77
U2	1.83-1.94	850-1050	350-400	2.43-2.63	0.40-0.42	225-310	628-877	1026-1722
U3a	1.94-2.04	2000-2200	350-400	5.50-5.71	0.48	237-326	704-967	7431-9433
U3b	1.94-2.04	2000-2200	500-600	3.67-4.00	0.46-0.47	484-734	1420-2143	7102-8889
U4	2.04-2.14	2000-2200	700-800	2.75-2.86	0.42-0.43	999-1370	2857-3901	6823-8534

In tabella 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.

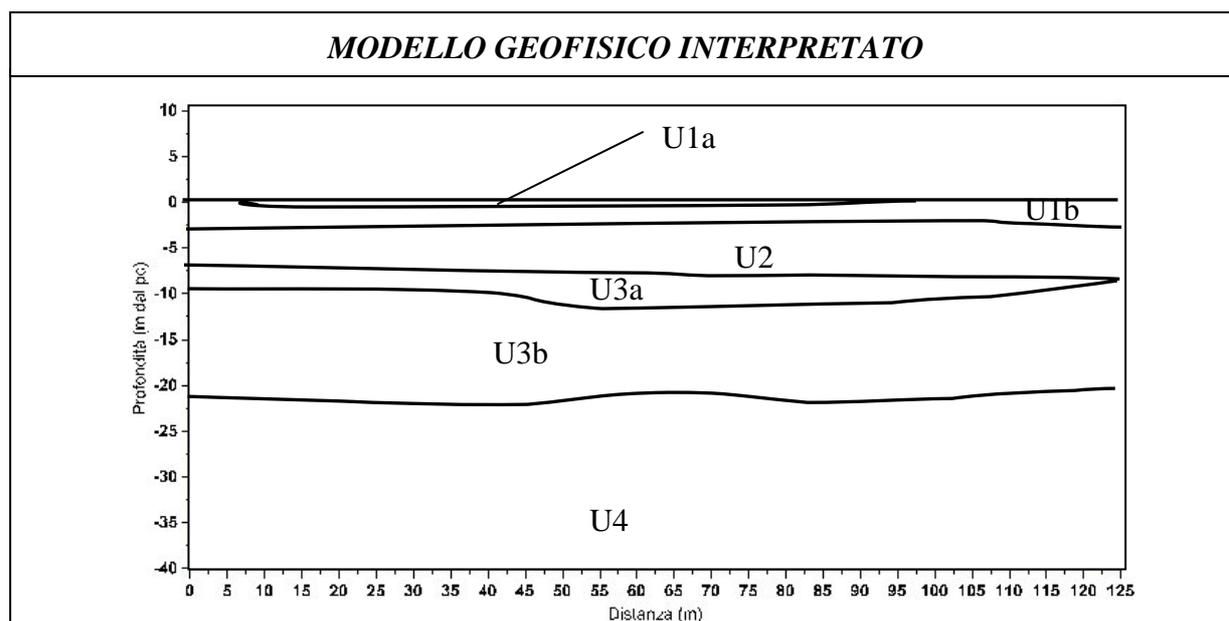
Si ricorda che tali valori sono validi per piccolissime deformazioni comprese nel tratto lineare elastico del legame costitutivo dei materiali (deformazioni tangenziali inferiore alla soglia elastica η indicativamente dell'ordine di 10^{-2} - 10^{-4} %).

Il rifratore U2-U3a rappresenta il tetto della falda freatica.

Dal modello geofisico sopra riportato è possibile definire la situazione monodimensionale più sfavorevole dal punto di vista dei fenomeni di amplificazione sismica litologica, 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 di cui sopra permette, integrandolo con parametri geotecnici di laboratorio descrittivi il comportamento dei materiali sotto carichi ciclici e dinamici, di effettuare analisi sismiche di 3° livello mediante modellazioni numeriche della risposta sismica locale.

Di seguito è riportato il modello geofisico per l'area investigata:



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" si possono utilizzare come valori di Vs quelli mediati nell'intervallo di ciascuna unità geofisica (validi per l'intera area investigata), oppure quelli caratteristici ottenuti direttamente dall'indagine in corrispondenza di ciascun punto di energizzazione (validi per analisi puntuali sulle 5 verticali di energizzazione).

Di seguito si riportano i valori caratteristici di Vs per ciascuna unità geofisica individuata, evidenziando un'alta omogeneità laterale dell'area investigata:

Distanza orizzontale lungo lo stendimento (m)	Valori caratteristici di Vs (m/s) per ogni unità geofisica					
	U1a	U1b	U2	U3a	U3b	U4
Estremo N (0.0)	190	231	373	373	530	786
32.5	149	244	395	395	538	713
62.5	132	266	388	388	570	730
92.5	147	240	392	392	536	750
Estremo S (125.0)	169	239	402	402	515	766
MEDIE	157	244	390	390	538	749

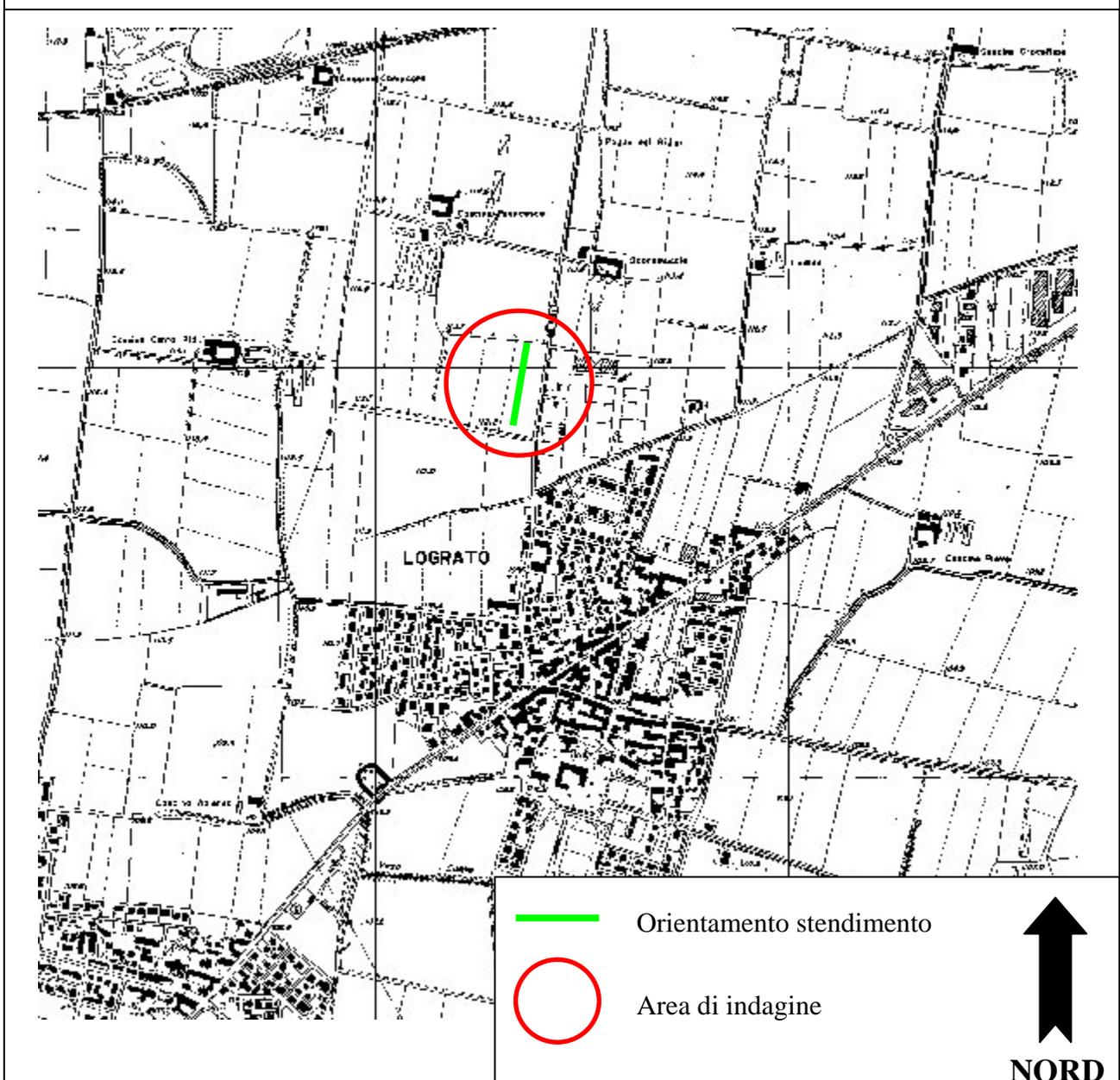
Dr. Geol. Daniela Chiarini

Dr. Geol. Massimo Compagnoni

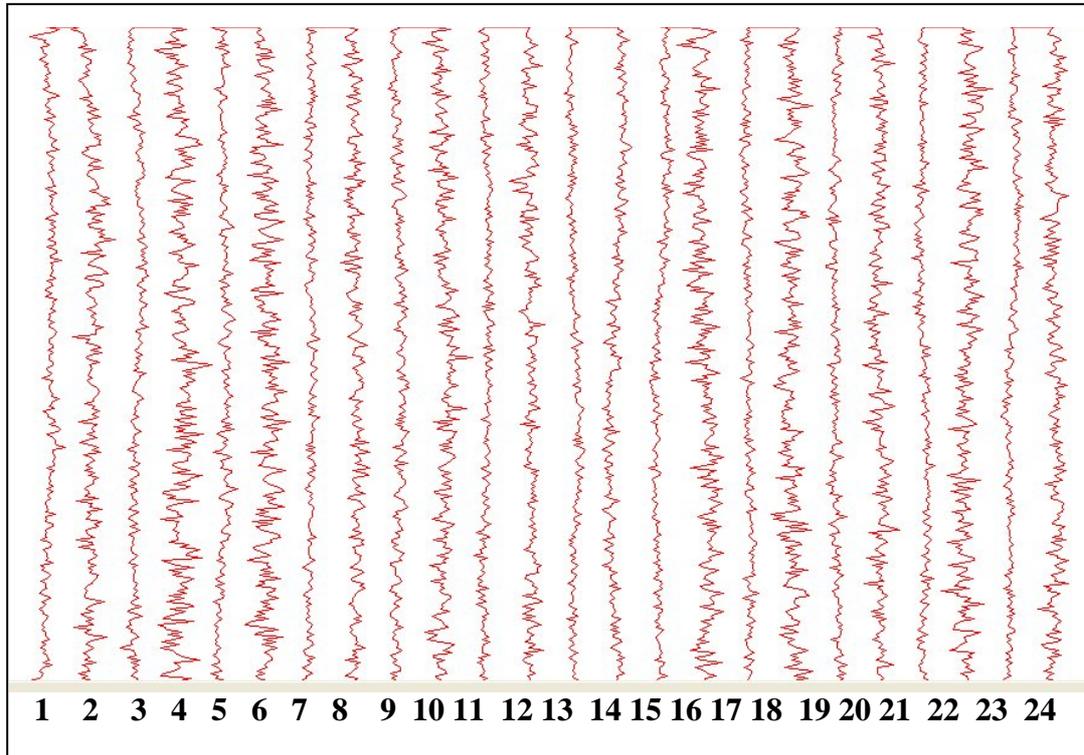
Dr. Geol. Alberto Peruzzini

ALLEGATO n. 1 – Ubicazione standimento sismico

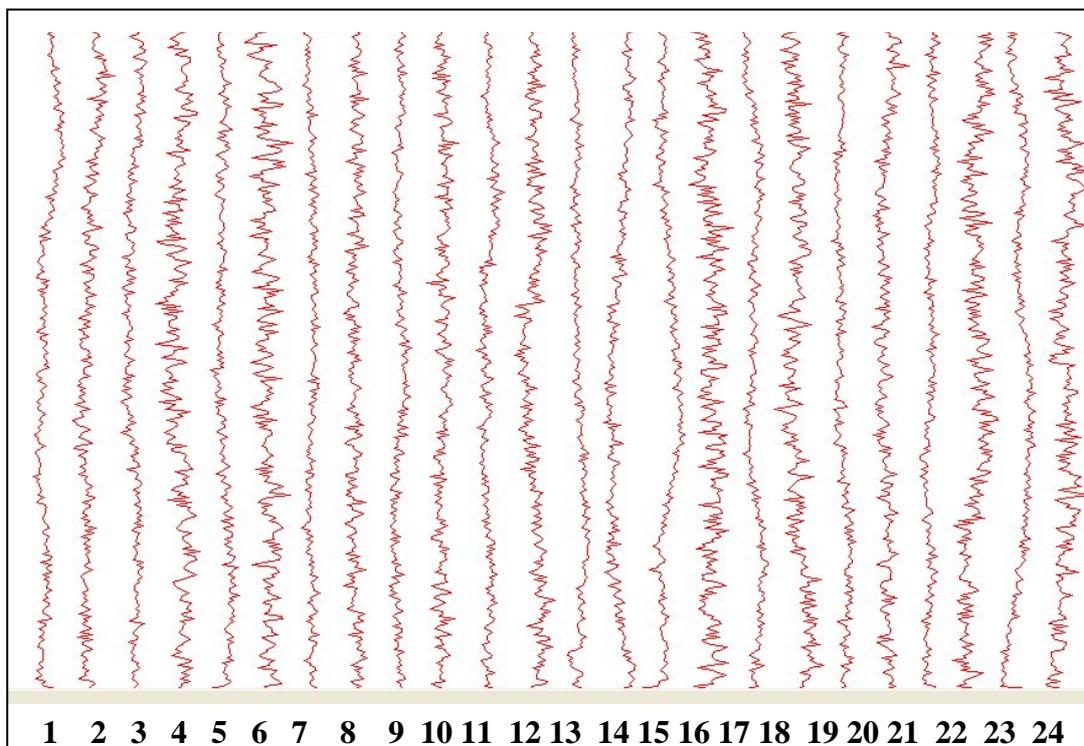
INQUADRAMENTO DELL'INDAGINE SISMICA – non in scala



ALLEGATO n. 2 – Rumore ambientale

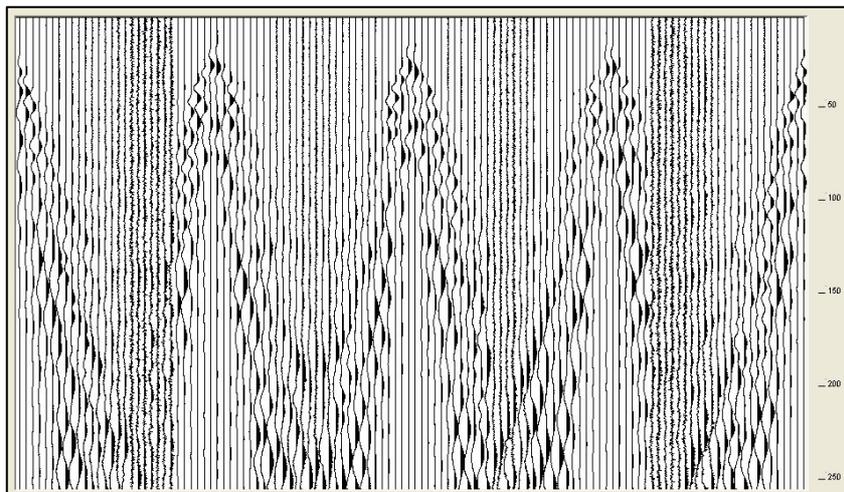


ONDE P

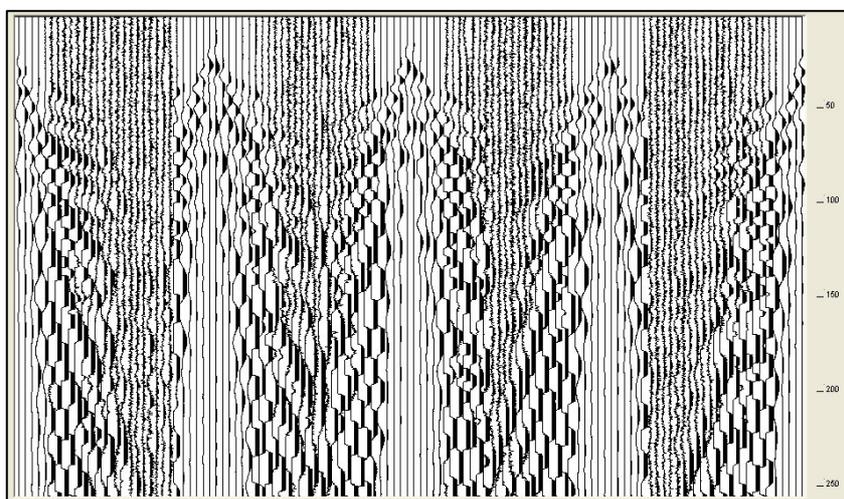


ONDE S

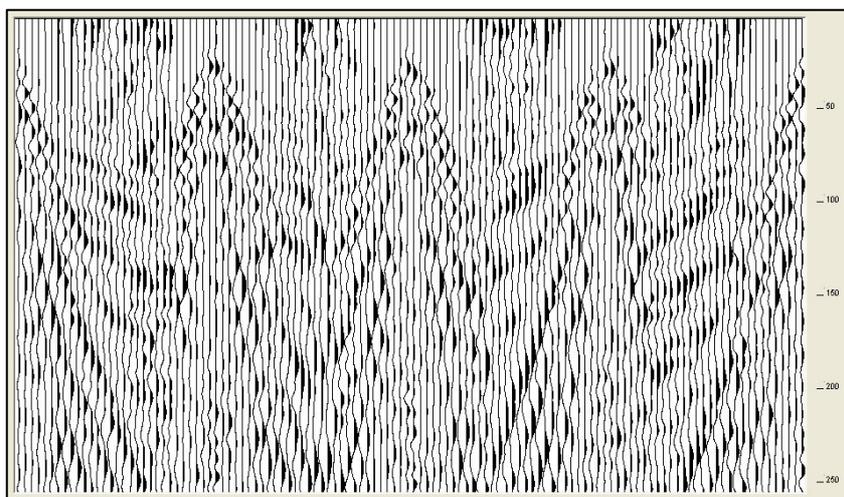
ALLEGATO n. 3 - Sismogrammi multishots ONDE P



Sismogramma multishots acquisito

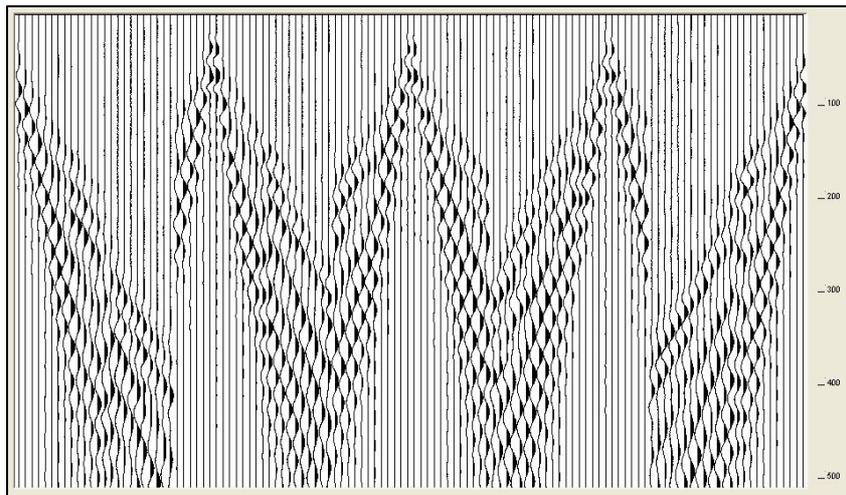


Sismogramma multishots elaborato

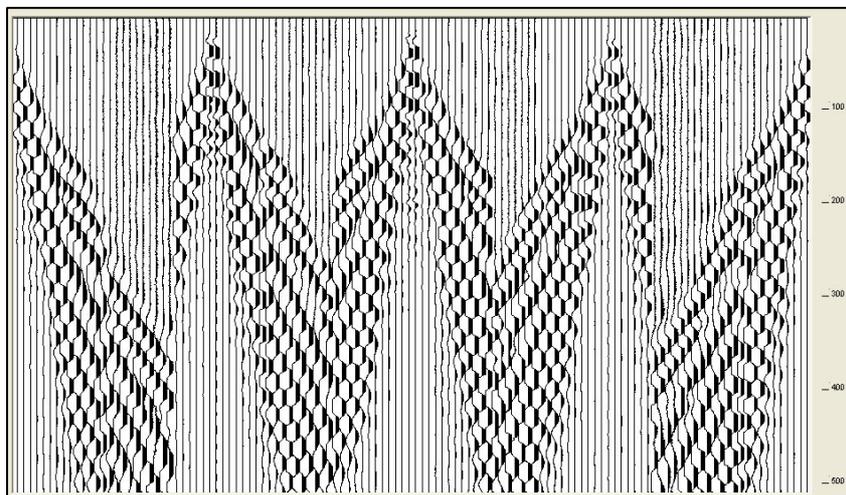


Sismogramma multishots filtrato

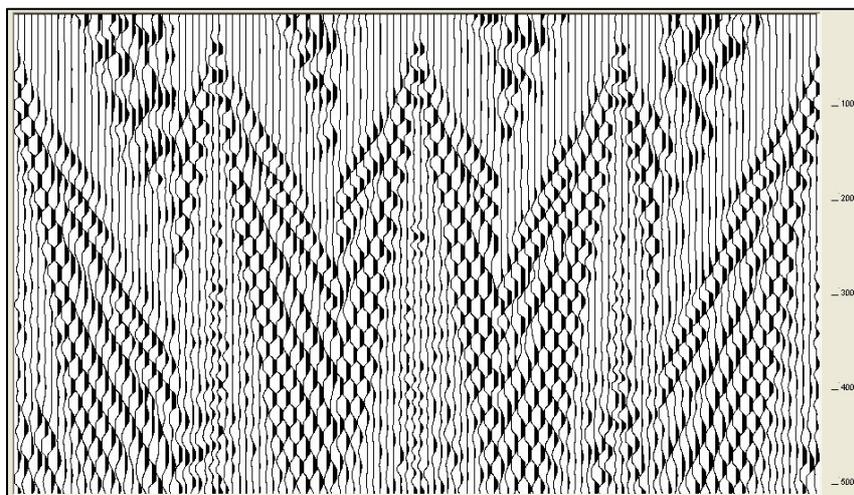
ALLEGATO n. 4 - Sismogrammi multishots ONDE S



Sismogramma multishots acquisito



Sismogramma multishots elaborato



Sismogramma multishots filtrato