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

COMUNE DI MAIRANO

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	12
6.1. <i>Registrazione Onde P</i>	<i>13</i>
6.2. <i>Registrazione Onde S</i>	<i>19</i>
7. Modello geofisico e geologico interpretativo	23
8. Considerazioni finalizzate all'applicazione della normativa vigente	26

ALLEGATI

1. Planimetria con ubicazione dello stendimento sismico

Brescia, 26 aprile 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 un'area, attualmente ad uso agricolo, recentemente lavorato, nei pressi del cimitero di Mairano (Brescia).

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 Testo Unico 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 singolo di sismica a rifrazione di lunghezza pari a 115 m orientato circa S-N, disposto lungo il lato minore dell'appezzamento rettangolare oggetto di indagine (vedi planimetria allegata): lungo lo stendimento sono stati disposti alternativamente e collegati in serie 24 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 frequenza propria di ciascun geofono utilizzato è di 10 Hz.

La distanza intergeofonica è stata fissata a 5 m per un totale di 24 geofoni collegati in serie 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.

Sono stati utilizzati 7 punti di energizzazione disposti lungo lo stendimento secondo lo schema previsto dal metodo reciproco e dal metodo reciproco generalizzato ovvero:

- 2 offset-shots posti a 50 m dai geofoni esterni
- 2 end-shots posti a 5 m dai geofoni esterni
- 2 intermedi posti rispettivamente tra il 6° e il 7° geofono e tra il 18° e 19° geofono
- 1 centrale tra il 12° e il 13° geofono.

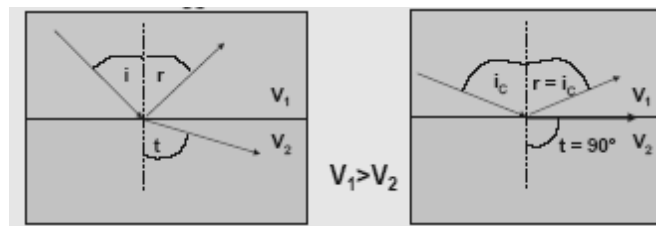
L'attrezzatura utilizzata è costituita da:

- 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 24 geofoni verticali e 24 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.

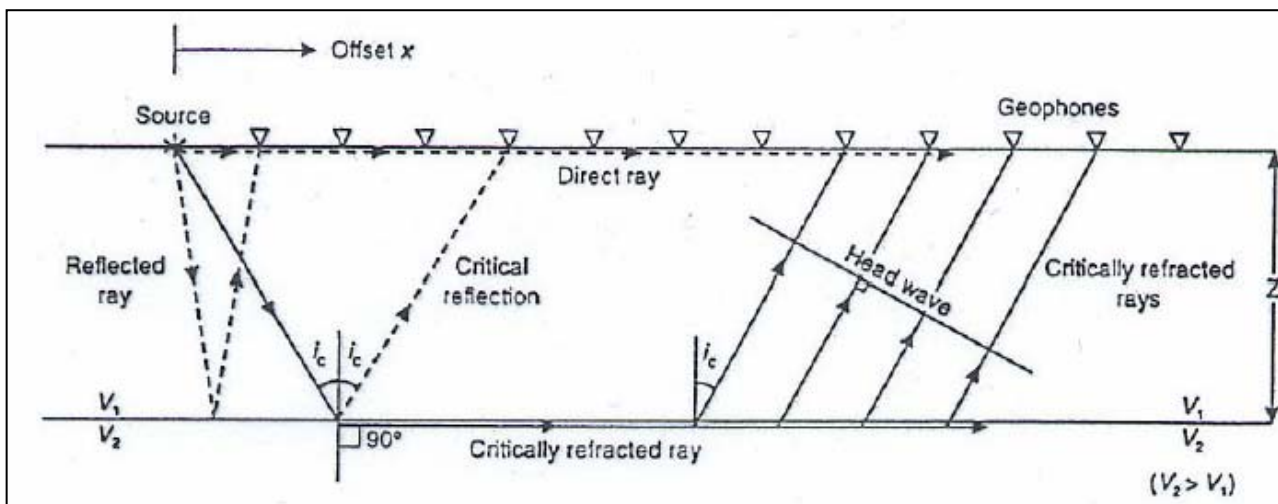
3. Cenni teorici del metodo

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.

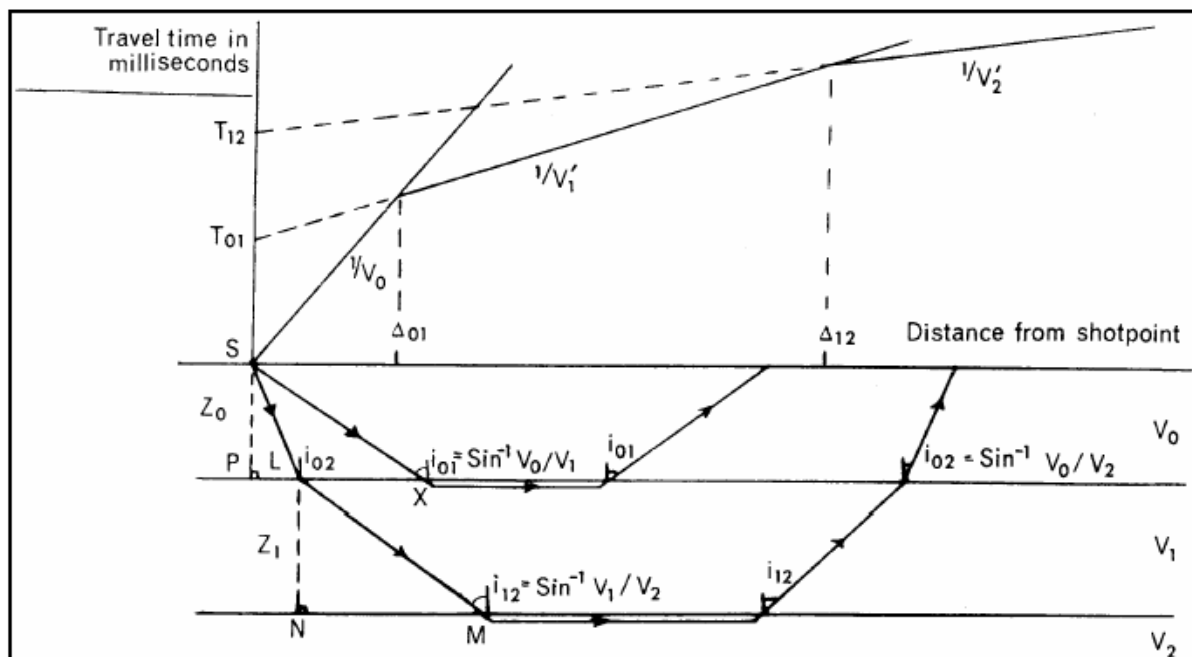


Disponendo una serie di ricevitori lungo la superficie libera del suolo e generando onde elastiche da una sorgente puntiforme l'onda riflessa arriverà sempre dopo le altre, mentre fino ad una certa distanza dalla sorgente arriverà prima l'onda diretta poi, quando l'onda birifratta avrà percorso sufficiente 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 molto disturbati soprattutto in corrispondenza dei geofoni più lontani in occasione degli offset shots (la distanza massima tra sorgente e ricevitore è di 165 m).

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 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 inclinati;
- Ricostruzione del modello del sottosuolo con calcolo della profondità e dell'andamento geometrico dei diversi rifrattori mediante il metodo delay-time (o ABC); si definisce delay time o tempo di ritardo la differenza tra il tempo che impiega il segnale sismico a compiere l'effettivo percorso dalla sorgente al generico geofono e il tempo che l'onda avrebbe impiegato a compiere il percorso fittizio lungo la superficie di discontinuità nel tratto definito dalla proiezione del tratto sorgente - geofono in superficie; questa tecnica permette di calcolare il tempo di ritardo del rifrattore a ciascun ricevitore e quindi di calcolare la profondità del rifrattore esaminato al di sotto di ciascun geofono; affinché i risultati ottenuti dall'interpretazione abbiano un buon grado di affidabilità è necessario che il tempo totale o reciproco letto sulle registrazioni dei due scoppi coniugati in esame sia uguale (o quasi a meno di una tolleranza prefissata) e che la rugosità della superficie di discontinuità sia limitata entro oscillazioni massime di 5° - 10° ; la profondità è intesa come distanza perpendicolare all'elemento di superficie e la superficie di discontinuità è ricostruita come involucro degli archi tracciati da ciascun geofono con raggio pari alla profondità calcolata;
- Ricostruzione del modello del sottosuolo con calcolo della profondità e dell'andamento geometrico dei diversi rifrattori mediante il metodo reciproco generalizzato GRM introdotto da Palmer alla fine degli anni '70; il metodo parte dal presupposto che l'informazione vera del rifrattore in un punto non è ricevuta dal geofono G posto sulla diretta proiezione in superficie del punto stesso, ma da due ricevitori posti ai suoi lati ad una distanza XY, non nota e pari circa alla distanza sul rifrattore dalla quale parte l'informazione diretta verso il ricevitore in superficie; costruendo la funzione analisi delle velocità per diversi valori di distanza XY è possibile scegliere quella funzione distanza-tempo che presenta il miglior andamento rettilineo e conoscere così il valore di XY per la costruzione della funzione tempo-profondità; la profondità

è intesa come distanza perpendicolare all'elemento di superficie e la superficie di discontinuità è ricostruita come involucro degli archi tracciati da ciascun geofono con raggio pari alla profondità calcolatavi; la tecnica permette di ricostruire dettagliatamente quelle situazioni che presentano superficie di discontinuità con rugosità e pendenze locali fino a 20°.

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

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.

I modelli 1D sopra individuati sono utilizzabili ai fini di valutazioni semiquantitative della risposta sismica locale.

6. Interpretazione e risultati

La topografia della superficie è pianeggiante sul tratto investigato e in fase interpretativa è stata assegnata a quota relativa 0, a cui si riferiscono tutti i valori di profondità dei diversi rifrattori.

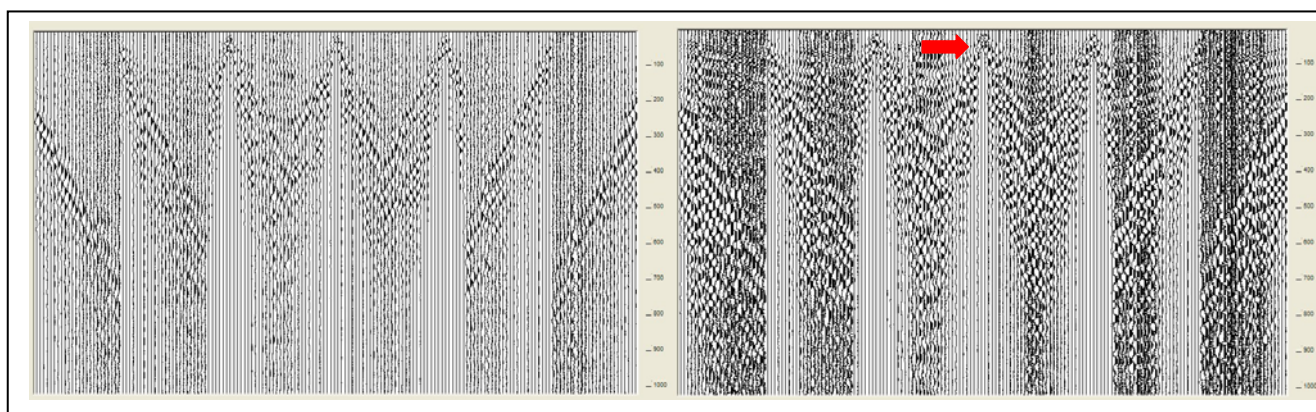
Lo stendimento è orientato circa N-S: l'origine del sistema di riferimento relativo è posto in corrispondenza dell'offset shot a S posto a 50 m dal 1° geofono; si rilevano in adiacenza allo stendimento piccole serre per cocomeri.

Il rumore ambientale è normalmente limitato, anche se si segnala in occasione dell'indagine la presenza di 2 mezzi agricoli in attività a distanze diverse: il mezzo più vicino (distante circa 300 m in linea d'aria) durante le operazioni di aratura ha introdotto nelle registrazioni alcune frequenze indesiderate ricadenti nell'intervallo d'interesse e quindi difficilmente eliminabili con le operazioni di filtraggio.

6.1. Registrazione Onde P

Le registrazioni per ciascun punto di scoppio sono state campionate con un intervallo di 1000 microsecondi per un tempo totale di 1024 ms (per un totale di 1024 tracce).

Di seguito si riportano il sismogramma multishot acquisito e quello amplificato in postprocessing di un fattore 2, ridigitalizzato con equalizzazione ad $\frac{1}{4}$ di lunghezza ed inversione di polarità su singola traccia per la modifica della fase:

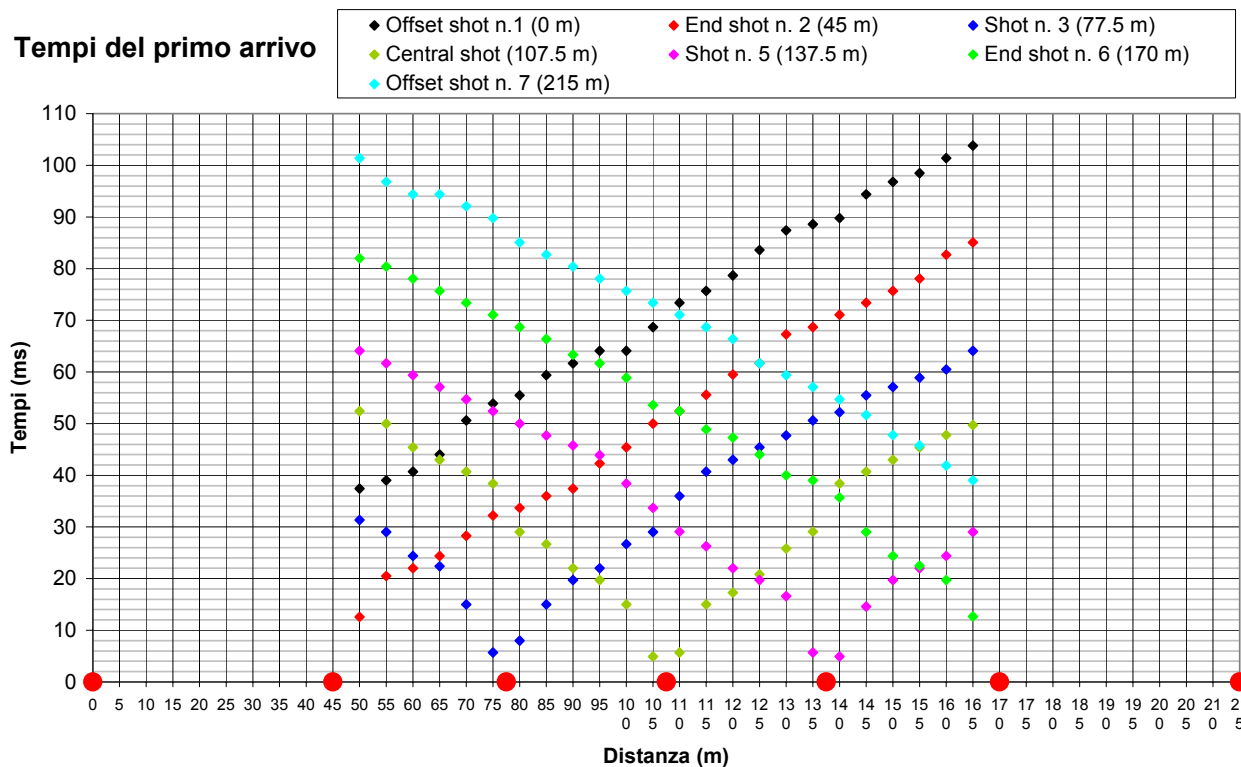


Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio:

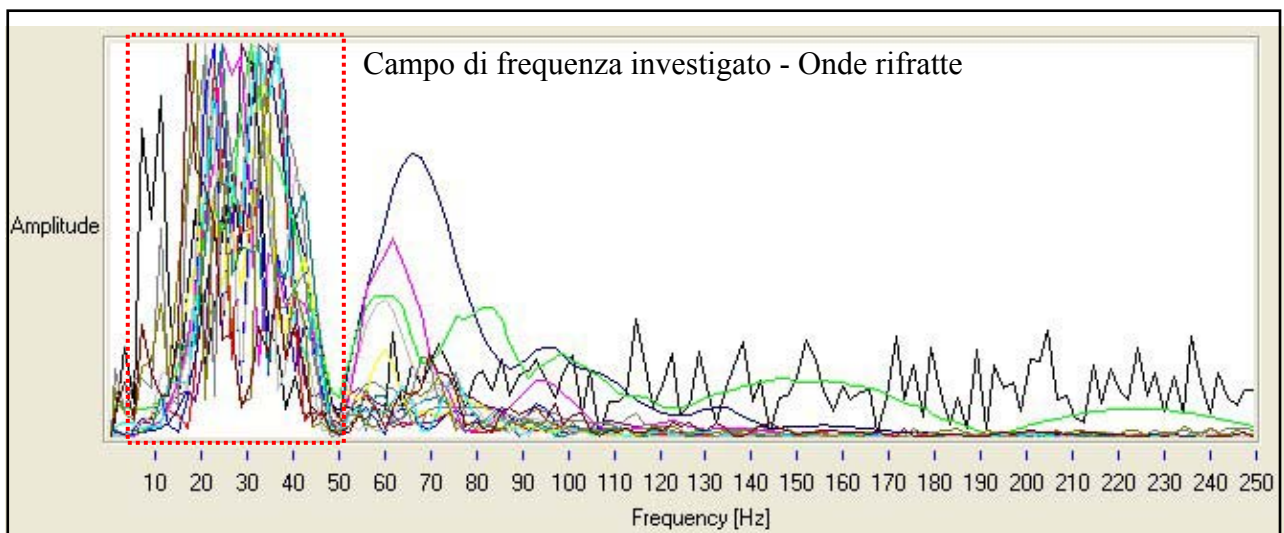
N° shot	1	2	3	4	5	6	7
Distanza (m)	0	45	77.5	107.5	137.5	170	215

Geofono	Distanza (m)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	50	37.40	12.60	31.37	52.40	64.08	82.00	101.40
2	55	39.00	20.50	29.00	50.00	61.70	80.40	96.80
3	60	40.70	22.00	24.37	45.40	59.40	78.08	94.40
4	65	44.00	24.37	22.37	43.00	57.09	75.69	94.40
5	70	50.60	28.29	15.00	40.70	54.70	73.40	92.08
6	75	53.90	32.20	5.69	38.40	52.40	71.08	89.80
7	80	55.50	33.70	8.00	29.00	50.00	68.69	85.08
8	85	59.40	36.00	15.00	26.70	47.70	66.40	82.69
9	90	61.70	37.40	19.70	22.00	45.79	63.38	80.40
10	95	64.08	42.30	22.00	19.70	43.88	61.70	78.08
11	100	64.08	45.40	26.70	15.00	38.40	58.90	75.69
12	105	68.69	50.00	29.00	4.90	33.70	53.59	73.40
13	110	73.40	52.40	36.00	5.69	29.10	52.40	71.08
14	115	75.69	55.59	40.70	15.00	26.29	48.90	68.69
15	120	78.70	59.50	43.00	17.29	22.00	47.30	66.40
16	125	83.60	61.70	45.40	20.80	19.70	44.00	61.70
17	130	87.40	67.29	47.70	25.80	16.60	40.00	59.40
18	135	88.60	68.69	50.60	29.10	5.69	39.00	57.09
19	140	89.80	71.08	52.20	38.40	4.90	35.70	54.70
20	145	94.40	73.40	55.50	40.70	14.59	29.00	51.70
21	150	96.80	75.69	57.09	43.00	19.70	24.37	47.79
22	155	98.50	78.08	58.90	45.40	22.00	22.50	45.79
23	160	101.40	82.69	60.50	47.79	24.37	19.70	41.88
24	165	103.80	85.08	64.08	49.70	29.00	12.68	39.00

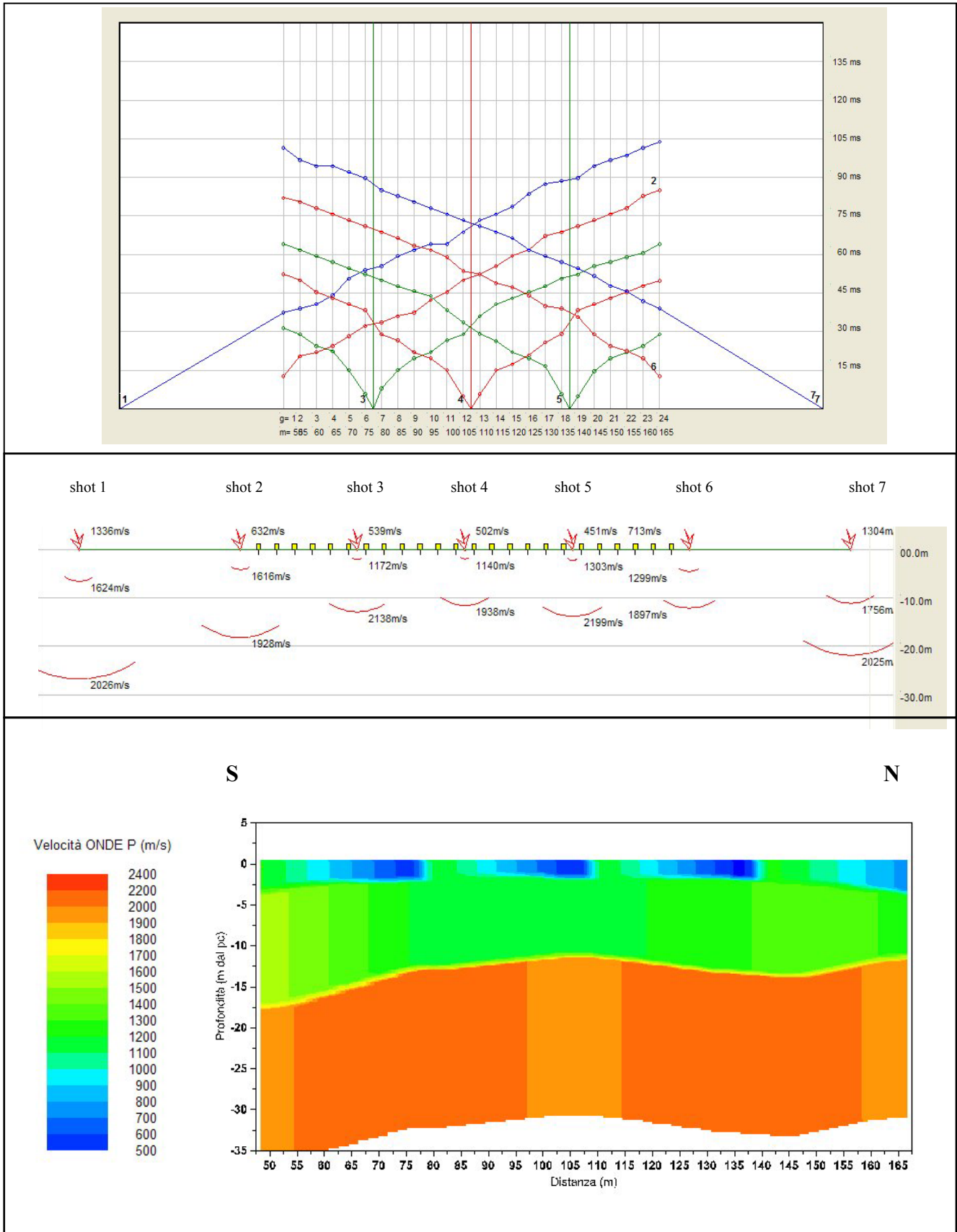
Nel grafico distanza-tempo sono riportati i tempi del primo arrivo da cui si individuano le dromocrone:



Di seguito a titolo indicativo si riportano nel dominio delle frequenze sottoforma di spettri di Fourier alcune registrazioni ritenute significative: è evidente il campo di frequenza dell'onda rifratta oggetto di indagine (10-50 Hz):

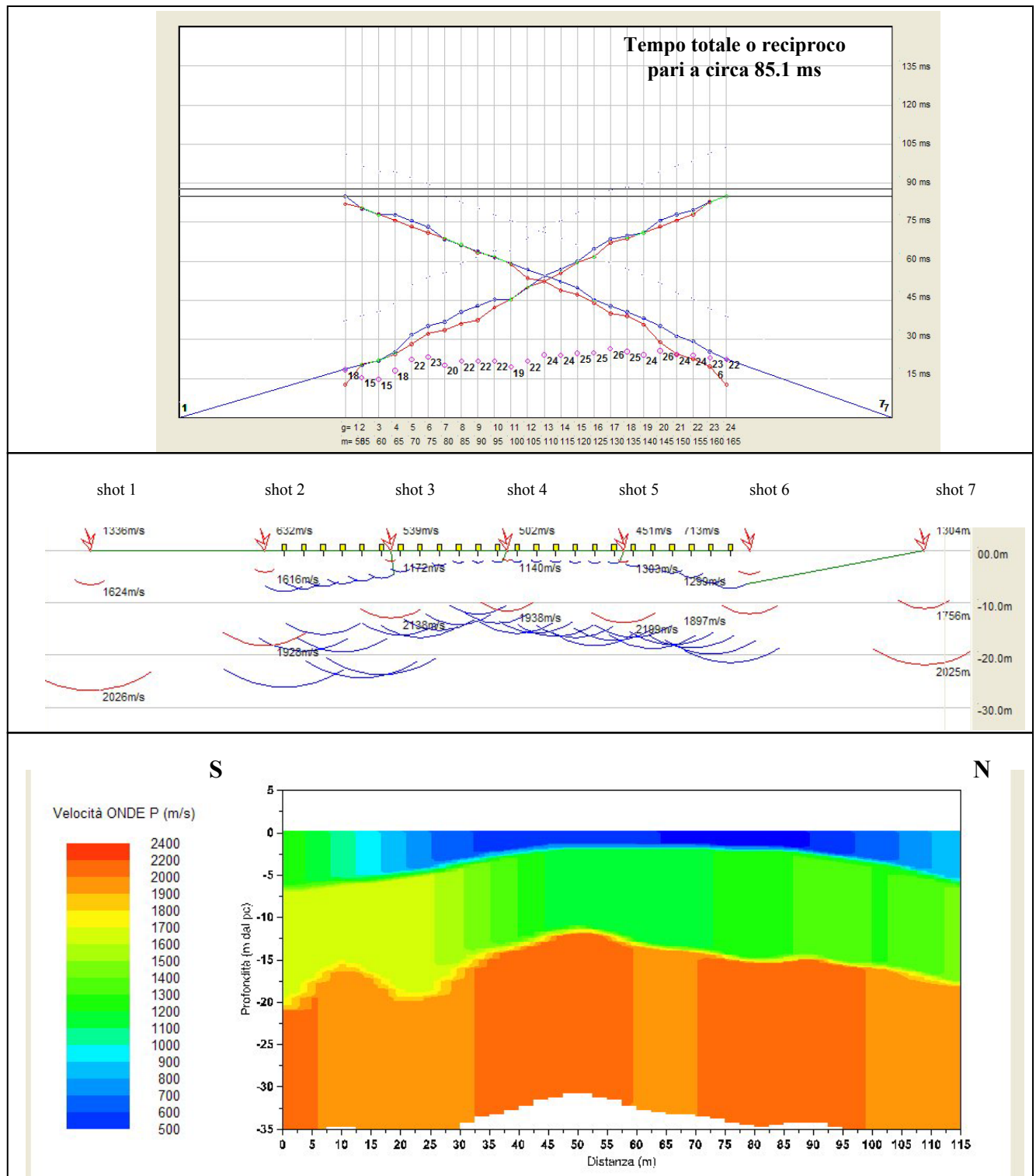


Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo tri-strato ed applicando il metodo di interpretazione con il tempo di intercetta e computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio:



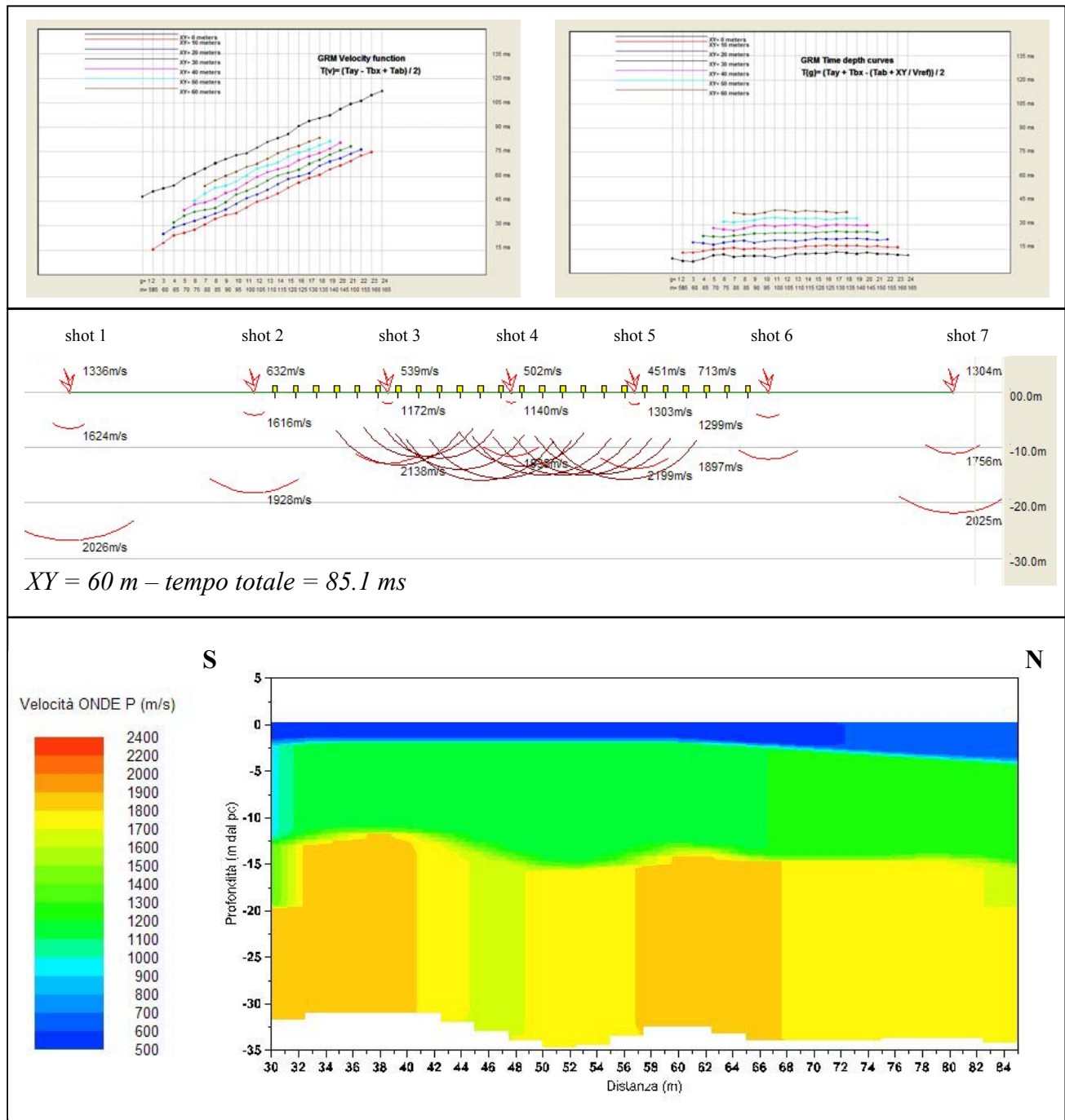
La sezione è rappresentativa per una lunghezza di 115 m, ove sono disposti i 24 geofoni (in ascissa sono riportate le distanze da 50 m a 165 m, assegnando al 1° geofono il valore di 50 m).

Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo tri-strato ed applicando il metodo di interpretazione delay time sugli scoppi coniugati più esterni e computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza di ciascun geofono:



La sezione è rappresentativa per una lunghezza di 115 m, ove sono disposti i 24 geofoni (in ascissa sono riportate le distanze da 0 a 115 m, assegnando al 1° geofono il valore di 0 m).

Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo tri-strato ed applicando il metodo di interpretazione GRM e computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza di ciascun geofono:



Il metodo GRM con XY pari a 60 m fornisce una buona interpretazione del primo rifrattore per tutta la lunghezza dello stendimento (115 m), mentre è in grado di fornire buoni risultati per il secondo rifrattore solo per la parte centrale di lunghezza 55 m, ovvero tra 80 e 135 m (in ascissa sono riportate le distanze da 30 a 85 m, assegnando al 1° geofono il valore di 0 m).

I risultati delle 3 diverse interpretazioni sono riportati nella seguente tabella, evidenziando con il colore grigio i settori dello stendimento che forniscono dati poco attendibili:

<i>Distanza</i>	<i>Metodo Shot-Point</i>		<i>Metodo Delay-time</i>		<i>Metodo GRM</i>	
	<i>Rifrattore 1</i>	<i>Rifrattore 2</i>	<i>Rifrattore 1</i>	<i>Rifrattore 2</i>	<i>Rifrattore 1</i>	<i>Rifrattore 2</i>
0*	6.58	26.67				
45*	4.22	18.11				
50	-	-	6.90	22.90	4.22	-
55	-	-	6.50	16.90	3.80	-
60	-	-	6.10	14.10	3.39	-
65	-	-	5.60	17.00	2.97	-
70	-	-	5.20	21.30	2.56	-
75	-	-	4.70	20.80	2.15	-
77.5*	2.15	12.91	-	-	-	-
80	-	-	3.70	14.20	2.15	12.95
85	-	-	3.10	14.60	2.11	11.71
90	-	-	2.60	13.40	2.08	11.78
95	-	-	2.10	12.40	2.05	13.75
100	-	-	2.10	10.70	2.02	15.72
105	-	-	2.00	12.20	1.99	15.29
107.5*	1.99	11.56	-	-	-	-
110	-	-	2.00	13.90	1.99	13.29
115	-	-	2.00	13.80	2.51	14.81
120	-	-	2.00	14.40	3.03	14.73
125	-	-	2.10	14.60	3.56	14.76
130	-	-	2.20	15.90	4.08	14.58
135	-	-	2.20	15.10	4.61	15.61
137.5*	2.28	13.76	-	-	-	-
140	-	-	2.80	14.50	2.28	-
145	-	-	3.30	16.40	4.04	-
150	-	-	3.90	15.80	5.80	-
155	-	-	4.60	16.30	7.57	-
160	-	-	5.50	17.30	9.33	-
165	-	-	6.40	18.80	11.10	-
170*	4.61	12.12				
215*	11.1	21.81				

* punti di energizzazione

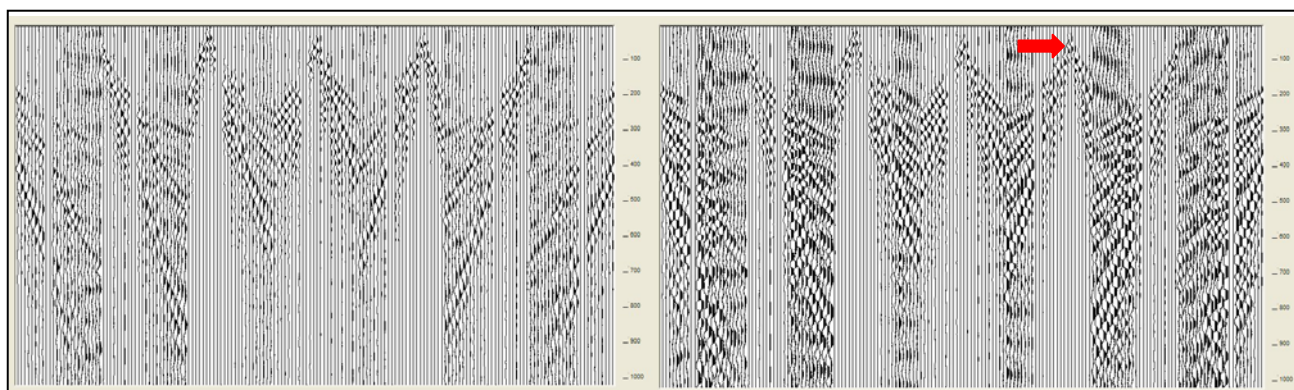
Si evidenziano pertanto 2 rifrattori principali:

- uno posto alla profondità media di 2-3 m ad andamento planare che separa lo strato aerato (sismostrato a V_p comprese tra 500 e 600 m/s) dallo strato sottostante a V_p comprese tra 1100 e 1300 m/s; corrisponde al superficie della falda freatica;
- uno posto alla profondità media di 15-20 m con andamento ondulato, che separa il secondo sismostrato dal terzo (strato saturo a V_p compreso tra 1700 e 2000 m/s).

6.2. Registrazione Onde S

Le registrazioni per ciascun punto di scoppio sono state campionate con un intervallo di 1000 microsecondi per un tempo totale di 1024 ms (per un totale di 1024 tracce).

Di seguito si riportano il sismogramma multishot acquisito e quello amplificato in postprocessing di un fattore 2, ridigitalizzato con equalizzazione ad $\frac{1}{4}$ di lunghezza ed inversione di polarità su singola traccia per la modifica della fase:



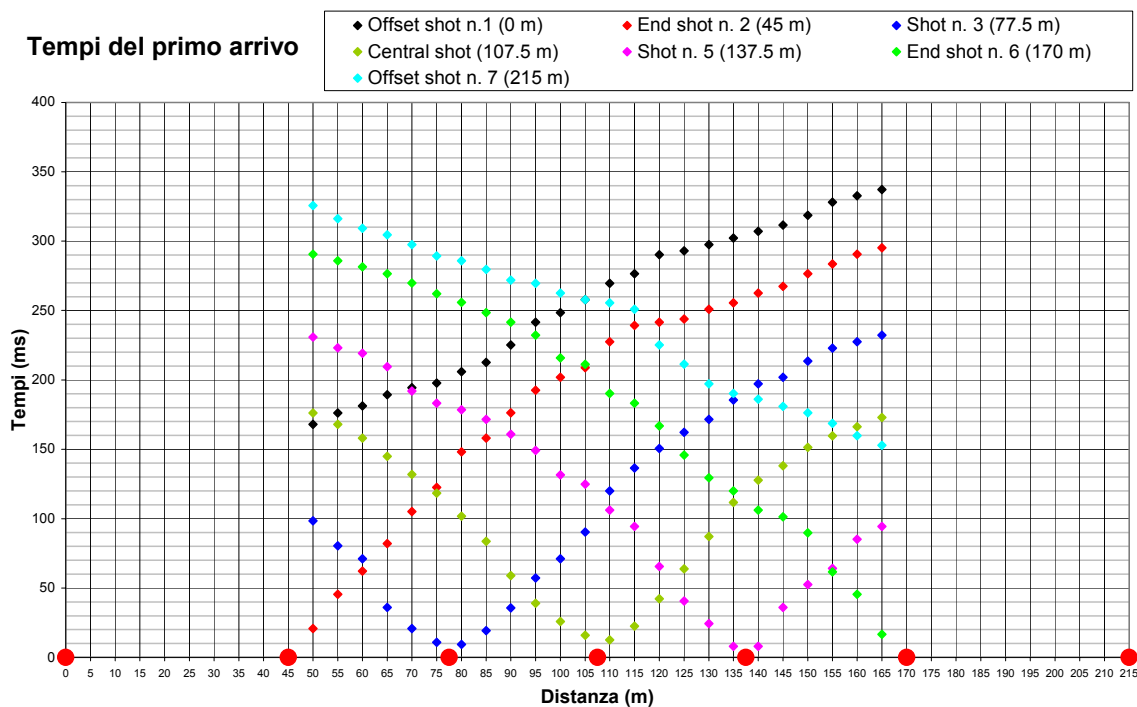
Di seguito si riportano i parametri di configurazione dello stendimento e il tempo di primo arrivo individuato su ciascun ricevitore per ciascun punto di scoppio:

N° shot	1	2	3	4	5	6	7
Distanza (m)	0	45	77.5	107.5	137.5	170	215

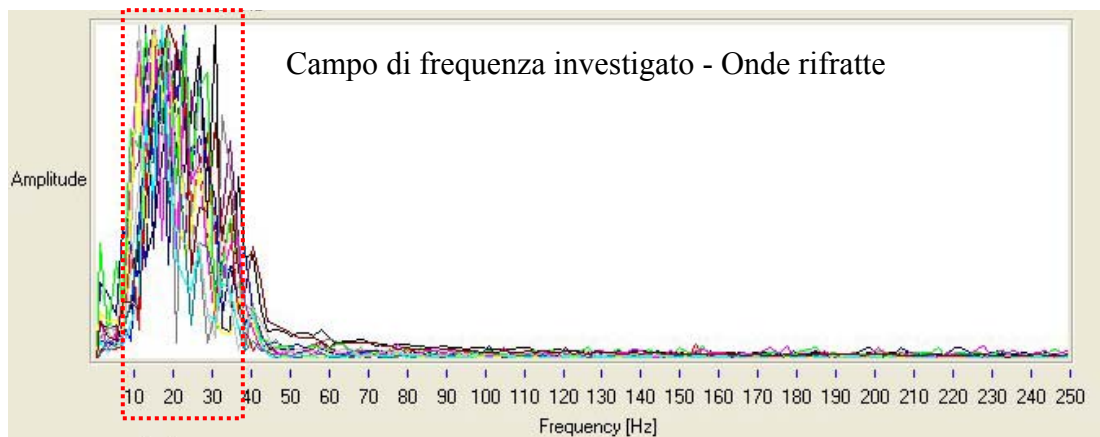
Geofono	Distanza (m)	Tempi del primo arrivo per ciascun shot (ms)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	50	167.89	20.79	98.40	176.19	230.88	290.60	325.70
2	55	176.19	45.40	80.40	167.89	223.08	285.89	316.29
3	60	181.19	62.20	71.08	158.00	219.19	281.50	309.29
4	65	189.39	82.00	36.00	144.80	209.50	276.60	304.60
5	70	194.39	105.09	20.79	131.80	192.00	269.89	297.60
6	75	197.69	122.50	10.89	118.40	183.19	262.10	289.39
7	80	206.00	148.10	9.30	101.80	178.50	255.80	285.89
8	85	212.60	158.00	19.20	83.59	171.50	248.60	279.60
9	90	225.19	176.38	35.70	58.90	160.80	241.60	271.89
10	95	241.60	192.50	57.20	39.00	149.08	232.19	269.60
11	100	248.60	201.88	71.08	25.79	131.58	215.88	262.60
12	105	257.89	208.88	90.30	15.89	124.80	211.19	257.89
13	110	269.60	227.50	120.08	12.60	106.08	190.19	255.60
14	115	276.60	239.19	136.50	22.50	94.40	183.19	250.89

15	120	290.29	241.60	150.50	42.29	65.50	166.80	225.19
16	125	293.00	243.88	162.19	63.79	40.70	145.80	211.38
17	130	297.60	250.88	171.50	87.00	24.37	129.50	197.19
18	135	302.29	255.60	185.50	111.69	8.00	120.08	190.19
19	140	307.00	262.60	197.19	127.69	8.00	106.08	186.08
20	145	311.60	267.29	201.89	138.19	36.00	101.40	180.80
21	150	318.60	276.60	213.50	151.39	52.40	89.80	176.38
22	155	328.00	283.60	222.89	159.69	64.08	61.70	168.58
23	160	332.70	290.60	227.60	166.30	85.08	45.40	159.80
24	165	337.29	295.29	232.19	172.89	94.40	16.60	152.80

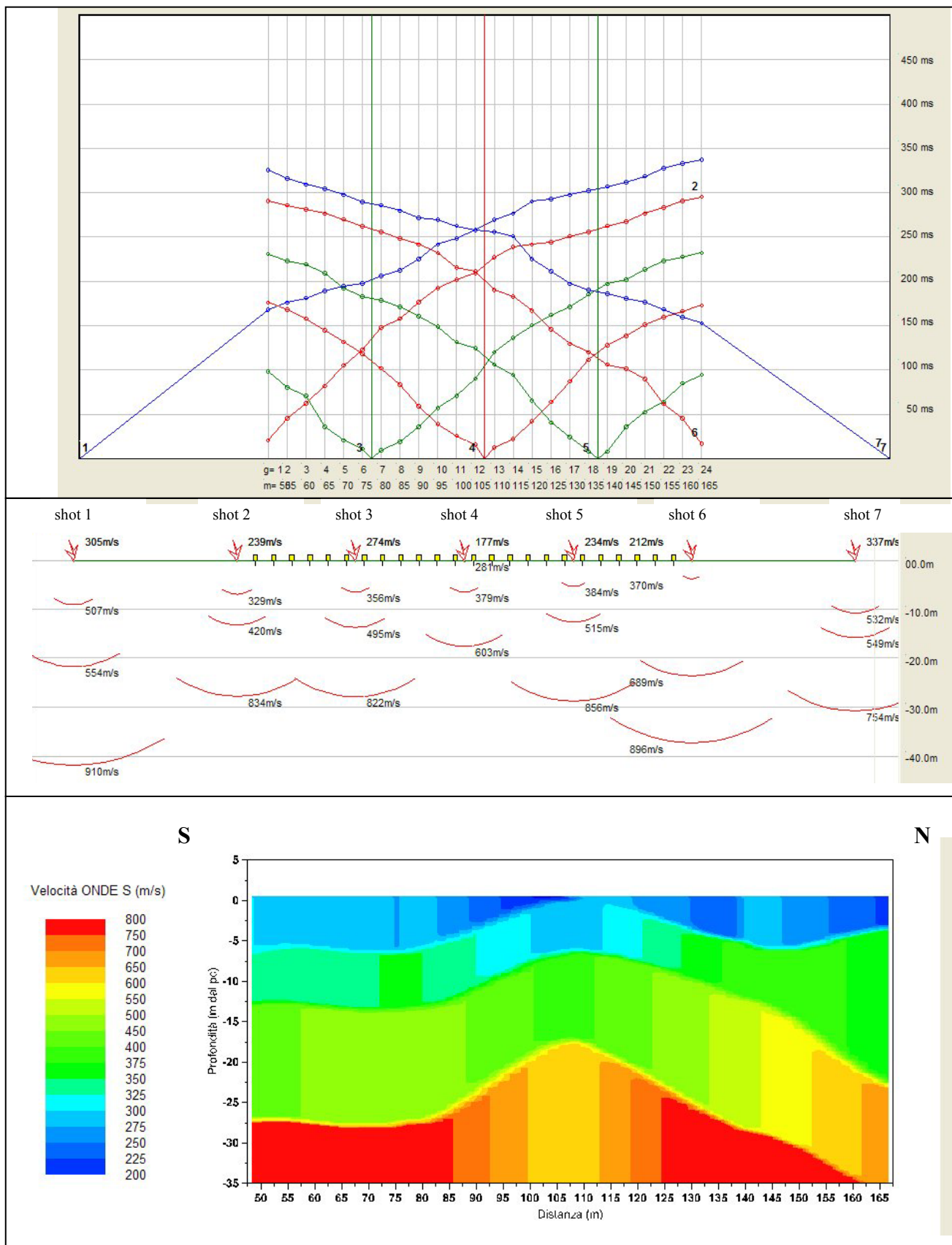
Nel grafico distanza-tempo sono riportati i tempi del primo arrivo da cui si individuano le dromocrone:



Di seguito a titolo indicativo si riportano nel dominio delle frequenze sottoforma di spettri di Fourier alcune registrazioni ritenute significative: è evidente il campo di frequenza dell'onda rifratta oggetto di indagine (10-30 Hz):

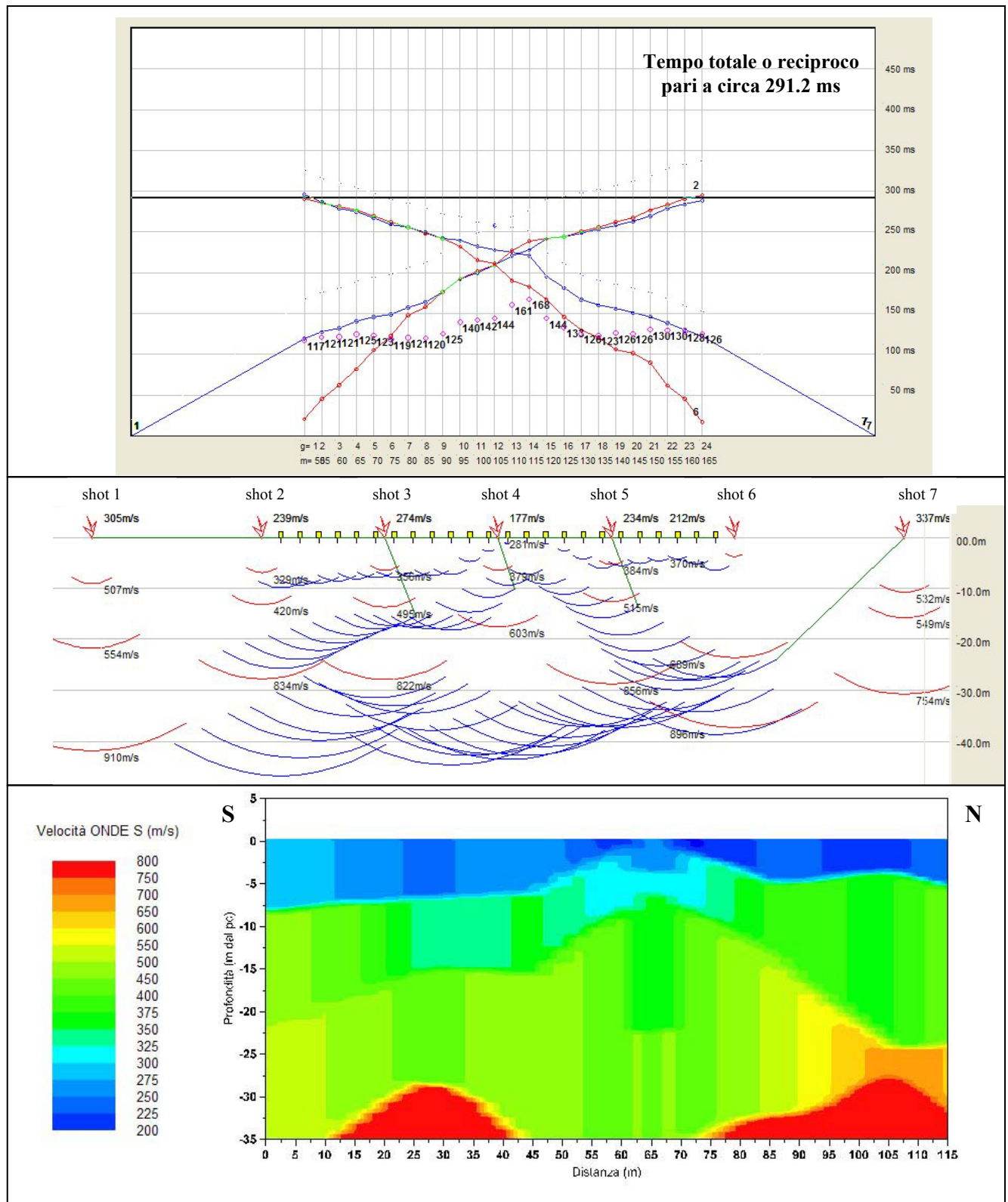


Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo a 4 strati ed applicando il solo metodo di interpretazione con il tempo di intercetta e computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza dei soli punti di scoppio:



La sezione è rappresentativa per una lunghezza di 115 m, ove sono disposti i 24 geofoni (in ascissa sono riportate le distanze da 50 m a 165 m, assegnando al 1° geofono il valore di 50 m).

Di seguito si riporta la sezione geofisica interpretativa ottenuta scegliendo un modello interpretativo a 4 strati ed applicando il metodo di interpretazione delay time sugli scoppi coniugati più esterni e computando la profondità dei rifrattori in corrispondenza di ciascun geofono:



La sezione è rappresentativa per una lunghezza di 115 m, ove sono disposti i 24 geofoni (in ascissa sono riportate le distanze da 0 a 115 m, assegnando al 1° geofono il valore di 0 m).

Il modello interpretativo utilizzato si è dimostrato sufficientemente attendibile, in base ai risultati ottenuti dall'interpretazione delle onde P, in quanto la situazione litostratigrafia media è rappresentata da strati planari più o meno ondulati.

7. Modello geofisico e geologico interpretativo

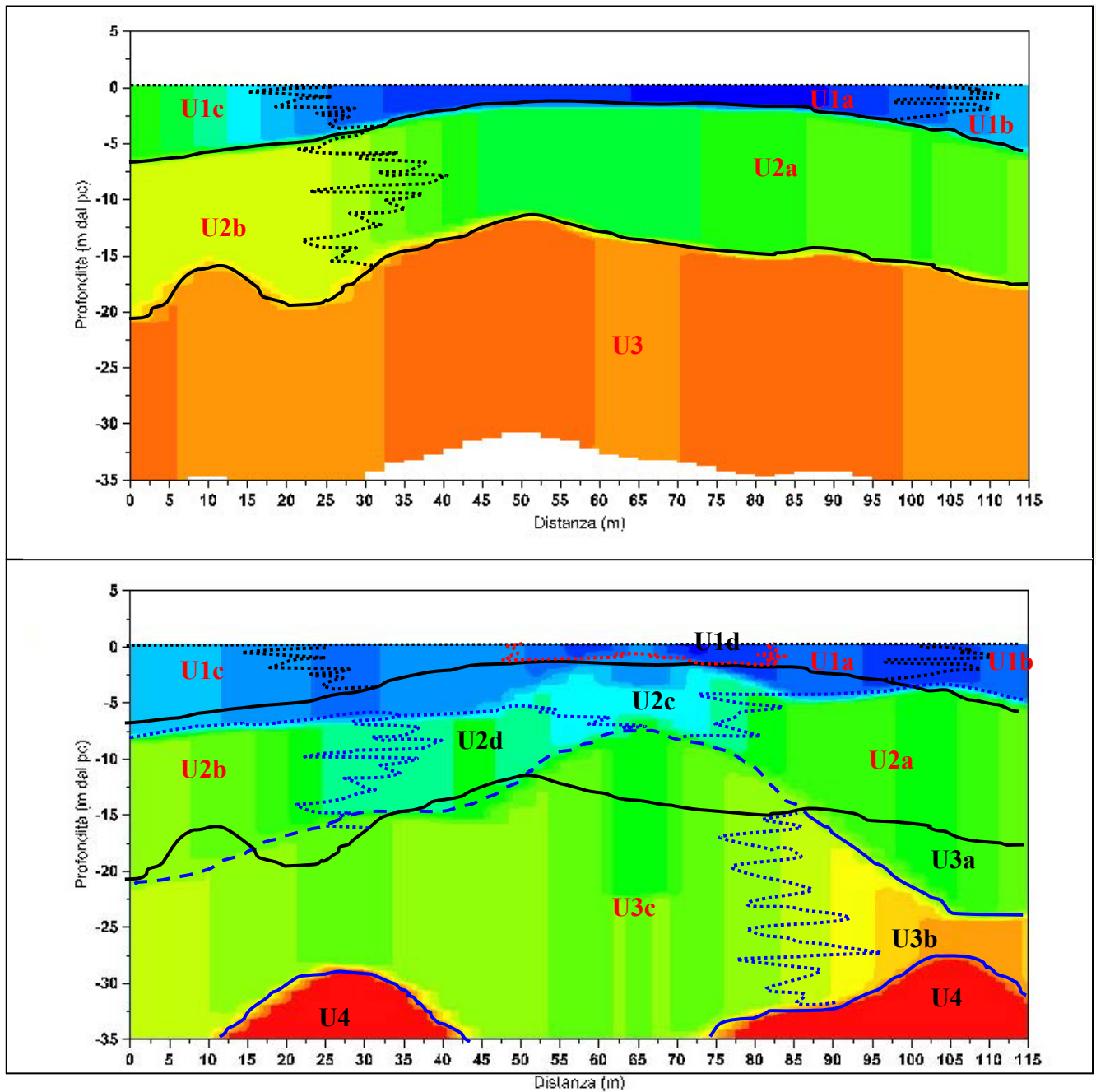
L'interpretazione dei segnali ha permesso di individuare 2 principali rifrattori per le onde P e 3 per le onde S, solo in parte tra loro coincidenti: il modello geofisico è stato pertanto costruito sovrapponendo l'interpretazione delle onde P (è stata scelta l'interpretazione con il metodo delay time ritenuta più adatta a rappresentare il 2° rifrattore) con quella delle onde S (è stata scelta l'interpretazione con il metodo delay time): il modello è di lunghezza circa 100 m di tipo multistrato, tipico di quelle situazioni stratigrafiche che non presentano nella parte più superficiale evidenti contrasti di impedenza sismica.

Nell'ambito dei principali rifrattori si evidenziano frequenti variazioni laterali del comportamento elastico dei materiali tipico di situazioni caratterizzate da fitte alternanze litologiche con limiti irregolari e lenticolari e deboli contrasti di impedenza.

Siccome la tecnica di sismica a rifrazione tende a mediare in strati con caratteristiche elastiche omogenee i diversi orizzonti litologici e siccome non esistono nei primi 10-15 m forti contrasti di impedenza, nella costruzione del modello si è cercato di sintetizzare le variazioni laterali dei principali parametri elastici in 3 principali settori, i cui contatti laterali sono da considerarsi indicativi.

Ciascun sismostrato è da intendersi costituito da materiale continuo, omogeneo ed elastico, le cui proprietà variano verticalmente in modo lineare da un valore minimo ad un valore massimo definito nelle sezioni sismiche tramite scala cromatica: a ciascun sismostrato è stato assegnato un unico valore di V_p e V_s pari al valore medio dell'intervallo, 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 il modello interpretativo sovrapposto alle sezioni sismiche P ed S: una prima individuazione delle unità è stata eseguita sulla base dei rifrattori P, poi sovrapposte e rielaborate sulla base dei rifrattori S.



Assegnando per ciascuna unità sismica individuata un valore del peso di volume ricavato da dati geotecnici a disposizione (limitati ai primi 4 m di profondità), è stato possibile calcolarne i principali parametri elastici.

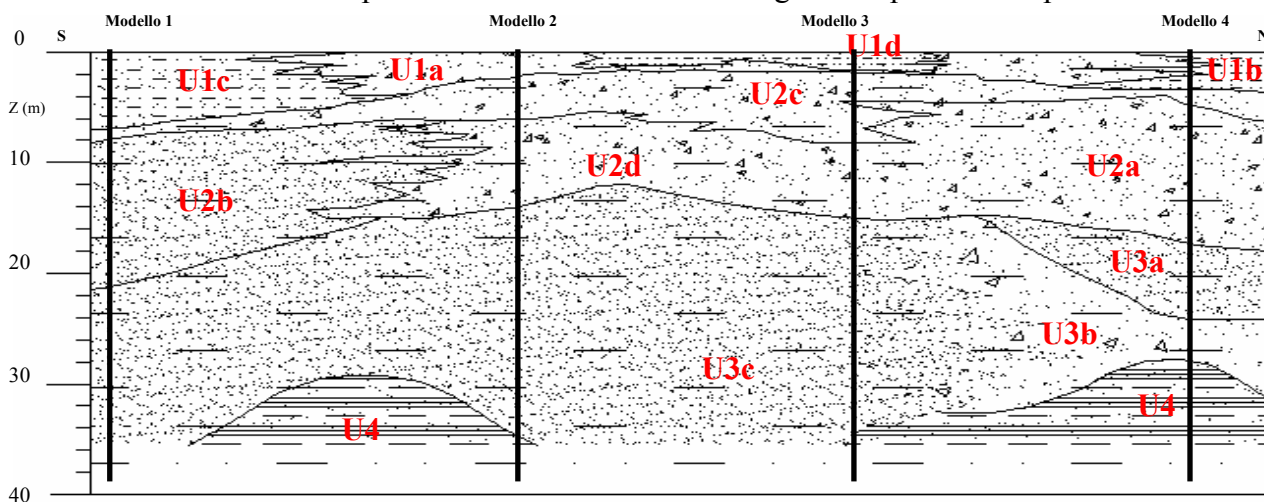
Si è pertanto assegnato un valore del peso di volume di 19.0 KN/m^3 alle unità più superficiali (U1a, U1b, U1c, U1d e U2c) ed ipotizzato pesi di volume gradualmente crescenti alle unità più profonde.

In tabella si riportano le unità individuate e i relativi parametri elastici:

Unità	Densità (g/cm ³)	V _P (m/s)	V _S (m/s)	V _P /V _S (m/s)	ν	G (MPa)	E (MPa)	K (MPa)
U1a	1.94	500	250	2.0	0.33	121	323	323
U1b	1.94	700	250	2.8	0.43	121	345	788
U1c	1.94	900	300	3.0	0.44	174	501	1336
U1d	1.94	500	200	2.5	0.40	77	217	380
U2a-U2d	1.99	1100	350	3.1	0.44	243	703	2080
U2b	1.99	1600	400	4.0	0.47	318	933	4665
U2c	1.94	1100	300	3.7	0.46	174	509	2111
U3a	2.09	1900	350	5.4	0.48	256	759	7203
U3b	2.09	1900	600	3.2	0.44	752	2173	6540
U3c	2.09	2000	450	4.4	0.45	423	1247	7795
U4	2.14	2000	750	2.7	0.42	1204	3415	6957

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.

Di seguito si riporta una possibile interpretazione litologica del modello geofisico proposto, derivato da dati ottenuti da prove indirette e da alcune stratigrafie di pozzi idrici presenti in zona:



- U1a – Limo e sabbia con ghiaia
- U1b – Limo sabbioso
- U1c – Limo sabbioso (probabilmente più compatto a causa del transito agricolo)
- U1d – Limo sabbioso argilloso (parzialmente saturo)
- U2a – U2b – U2c – U2d - U3a – U3b – U3c – Alternanza di orizzonti di ghiaia con sabbia e sabbia con ghiaia da sciolta a poco addensata saturo
- U4 – Limo argilloso compatto sovraconsolidato

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 permette di individuare alcune situazioni monodimensionali rappresentative di determinati settori, individuati lungo il profilo dello stendimento.

Di seguito se ne propongono alcuni:

Modello 1		Modello 2		Modello 3		Modello 4	
S (m)	Vs (m/s)	S (m)	Vs (m/s)	S (m)	Vs (m/s)	S (m)	Vs (m/s)
8	300	3	250	2	200	3	250
14	400	4	300	6	300	2	300
14	450	7	350	7	350	19	350
		20	450	19	450	4	600
		2	750	2	750	8	750
V _{S30} = 378 m/s		V _{S30} = 371 m/s		V _{S30} = 362 m/s		V _{S30} = 365 m/s	
SUOLO DI CATEGORIA B (al limite con C) (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 ($V_s \geq 800 \text{ m/s}$) e da esso fissare la stratigrafia in grado di interferire e modificare il moto sismico di riferimento.

Considerando i valori di V_s pari a 750 m/s individuati per l'unità U4 ed ipotizzandone una certa continuità laterale, seppure con interfaccia irregolare, è possibile ipotizzare di raggiungere il valore di 800 m/s approssimativamente intorno ai 40 m di profondità; sulla base di dati e conoscenze più approfondite sulla geologia profonda dell'area sarà possibile avanzare ipotesi più attendibili rispetto a quella qui proposta.

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:

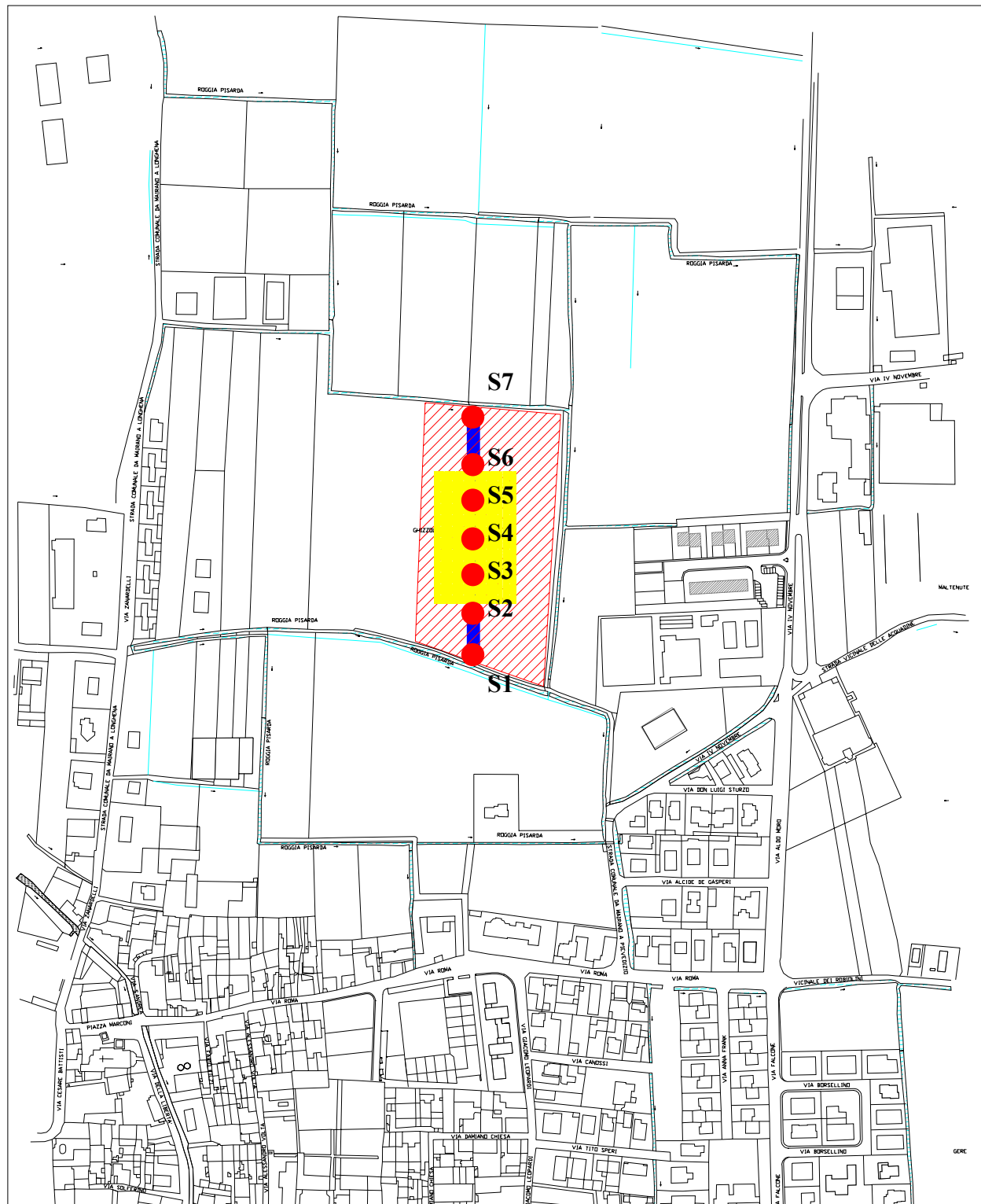
Modello 1	Modello 2	Modello 3	Modello 4
$T = 0.370 \text{ s}$	$T = 0.358 \text{ s}$	$T = 0.362 \text{ s}$	$T = 0.330 \text{ s}$

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

ALLEGATO

Planimetria con ubicazione dello stendimento sismico

PLANIMETRIA D'INQUADRAMENTO DELL'INDAGINE SISMICA



-  Punti di energizzazione
 -  Linea sismica
 -  Area indicativa ove risulta valido il modello geofisico
 -  Area di indagine

NON IN SCALA