

STUDIO GEOLOGICO  
Dott. Geol. NADIA SILLA

GEOLOGIA  
GEOTECNICA  
IDROGEOLOGIA

**COMUNE DI FOLIGNO**  
**AREA GOVERNO DEL TERRITORIO**  
**E BENI CULTURALI**

*PIANO ATTUATIVO DI INIZIATIVA MISTA  
IN VARIANTE AL P.R.G.  
AMBITO N. 25 "CROCE BIANCA"*

**RELAZIONE GEOLOGICA,**  
**IDROGEOLOGICA, GEOTECNICA**  
**E SUGLI ASPETTI IDRAULICI**  
**INTEGRAZIONE**

*Dott. Geol. Nadia Silla*

Via G. Cimabue, 10B  
06034 Foligno -PG-  
P.I. 02389950540  
tel. 0742/311562

- Foligno, Settembre 2009-

## INTEGRAZIONE

La presente costituisce integrazione alla Relazione Geologica, Idrogeologica, Geotecnica e sugli Aspetti Idraulici redatta dalla scrivente nel Marzo 2009 per conto della società C.E.R. 4 S.r.l. e finalizzata al progetto di lottizzazione dell'Ambito n. 25 – Croce Bianca, individuato dal PRG vigente del Comune di Foligno.

Ai fini della caratterizzazione sismica dell'area di lottizzazione, non rientrando la zona tra quelle oggetto delle indagini di microzonazione sismica speditiva, in relazione a quanto disposto dai commi 1 e 3 dell'art. 71 della variante n. 5 al P.R.G. e tenendo conto della recente evoluzione normativa, è stata eseguita una campagna di indagini sismiche mirate alla ricostruzione del profilo verticale delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  ed alla determinazione della velocità equivalente  $V_{s30}$  per la definizione del suolo tipo ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008 “NTC08 Norme Tecniche per le Costruzioni” e della Circolare del Ministero delle Infrastrutture e Trasporti n.617 del 2 febbraio 2009 “Istruzioni per l’applicazione delle nuove Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008”.

In fase di studio di fattibilità del piano attuativo, è stato deciso di realizzare due profili sismici tramite il metodo M.A.S.W. in due settori caratteristici dell'area di lottizzazione.

I risultati delle indagini svolte, dettagliatamente illustrati nelle pagine che seguono, hanno permesso una ricostruzione sismostratigrafica dei terreni interessati dal progetto evidenziando la presenza di una successione di strati a velocità  $V_s$  gradualmente crescente con la profondità in entrambi i profili sismici realizzati.

L’inversione del modello restituisce un valore  $V_{s30}$  di 451 m/s per il Profilo Sismico 1 ed un valore  $V_{s30}$  di 468 m/s per il Profilo Sismico 2, che permettono di classificare in base alla normativa vigente, secondo l’approccio di tipo semplificato, i terreni in oggetto come Suolo di categoria B.

Si assicura la completa disponibilità per ogni eventuale chiarimento.

Foligno, 21 Settembre 2009

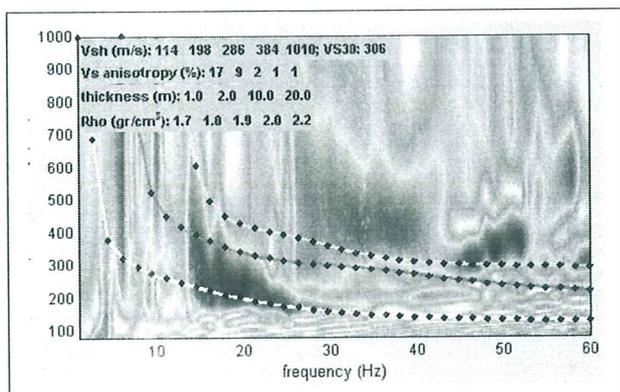
Dott. Geol. Nadia Silla



Geologo Dott. Ercolini Luca

Studio: Via Monte Sella n°7, 06034 Foligno (PG)

Cel. 339-4520697 Email: [lucaerc@alice.it](mailto:lucaerc@alice.it) - P.I. 02953810542



## INDAGINI GEOFISICHE

### INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE

INDAGINI SISMICHE PER LA RICOSTRUZIONE DEL PROFILO  
VERTICALE DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO Vs E PER  
LA DETERMINAZIONE DELLA VELOCITA' EQUIVALENTE Vs30

Geologo  
ERCOLINI LUCA

Settembre 2009

## **1.PREMESSA**

Su incarico del Geologo Silla Nadia è stata eseguita un'indagine sismica in località Foligno, per il progetto di attuazione dell' "Ambito Croce Bianca". L'indagine svolta consiste nella realizzazione di due profili sismici all'interno dell'area di lottizzazione.

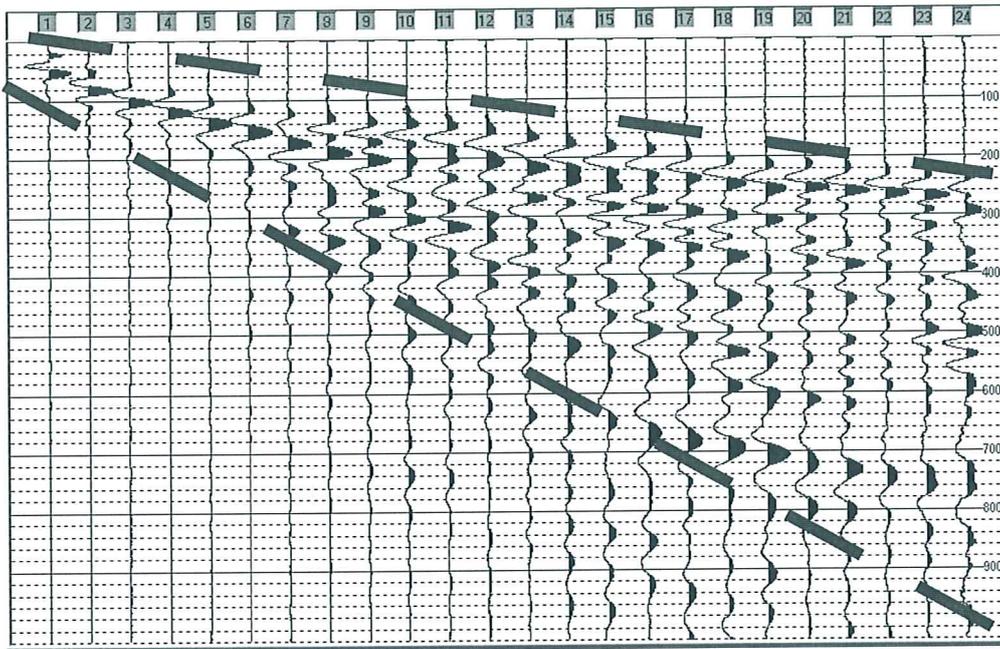
L'indagine è finalizzata alla ricostruzione del profilo verticale delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  e alla determinazione della velocità equivalente  $V_{s30}$  per la definizione del suolo tipo ai sensi del D.M. 14 gennaio 2008 "NTC08 Norme Tecniche per le Costruzioni" e della Circolare del Ministero delle Infrastrutture e Trasporti n.617 del 2 febbraio 2009 "Istruzioni per l'applicazione delle nuove Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008".

## **2. METODOLOGIA M.A.S.W. ( Multichannel Analysys of Surface Waves)**

La metodologia sismica adottata è quella sintetizzata dall'acronimo M.A.S.W. ovvero "analisi multicanale delle onde superficiali".

Tale metodo di analisi dei dati sismici sfrutta alcune proprietà delle componenti superficiali (Rayleigh e di Love) delle onde generate; a differenza della classica sismica rifrazione, nella quale come noto si misurano i tempi di primo arrivo delle onde energizzate rifratte in compressione o di taglio  $V_p$  e  $V_s$ .

Le principali proprietà utilizzate sono le seguenti: la maggior parte dell'energia generata sia in compressione che di taglio è convertita in onde di superficie (circa il 90%); la propagazione delle onde di superficie è influenzata in misura minore dalle onde P e dalla densità del mezzo, mentre è funzione delle  $V_s$ ; ma la proprietà fondamentale delle onde superficiali è costituita dal fenomeno della dispersione nei mezzi stratificati.



Tracciato sismico a 24 canali in onde S, l'area racchiusa nel tratteggio evidenzia il fenomeno di dispersione con l'aumentare della profondità delle onde superficiali di Love in un mezzo stratificato

Dall'analisi delle curve di dispersione dei due tipi di onde; curve di dispersione ottenibili dalle variazioni della velocità di fase, in funzione delle lunghezze d'onda o delle frequenze (inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda), è possibile determinare la variazione della velocità delle onde di taglio con la profondità, tramite l'adozione di processi analitici di inversione, consistenti nell'adozione di un modello teorico di partenza numero strati/velocità/spessori, e successiva ottimizzazione dei dati tramite processi di raffinamento).

### 3. METODO DI ACQUISIZIONE

L'indagine in oggetto è stata eseguita tramite l'acquisizione strumentale, lungo un profilo di misura lineare, della componente superficiale di onde generate in compressione (onde di Rayleigh) e della componente superficiale di onde generate di taglio (onde di Love).

Nel caso specifico per ciascun profilo sismico è stata utilizzata una stesa di costituita da 24 geofoni orizzontali da 10 hz, equidistanziati di 2 m, per una lunghezza complessiva di 46 m.

I geofoni sono stati posizionati parallelamente al profilo, nel corso dell'acquisizione delle onde di Rayleigh; ortogonali alla stesa nel corso dell'acquisizione delle onde di Love.

Sono stati effettuati tre tiri per ciascun tipo di acquisizione, in "compressione" con battuta di mazza su piastra, di "taglio" con battuta di mazza sulla faccia di un trave; i tiri sono stati posti a distanze crescenti dal geofono n.1, di 2 m, 5 m , 10 m.

Si è poi proceduto anche all'esecuzione di un profilo Vs a rifrazione, tramite l'esecuzione di tre tiri, due agli estremi e uno centrale; volto alla definizione delle velocità Vs e degli spessore degli strati più superficiali, al fine di tarare il modello inverso di partenza.

### Profilo Sismico 1

Tramite le Vs sono stati individuati i seguenti valori medi di velocità ( $V_s$ ) e spessore (H):

$V_s$ (m/s)	H (m)
200	1.15
313	

Oltre alla determinazione del valore dei primi rifrattori, tramite registrazioni in rifrazione, vengono utilizzati due sondaggi S1 – S4 adiacenti alla stesa sismica che mettono in evidenza le seguenti caratteristiche stratigrafiche

S1

m dal p.c	Stratigrafia
0.0 – 0.3	Suolo vegetale
0.3 – 1.1	Terreno di riporto natura limo-argillosa
1.1 – 4.8	Sabbia fine limosa
4.8 – 5.0	Sabbia fine limosa
5.0 – 6.0	Ghiaia calcarea medio fine

S4

m dal p.c	Stratigrafia
0.0 – 0.4	Suolo vegetale
0.4 – 4.7	Sabbia fine limosa
4.7 – 6.00	Ghiaia calcarea eterogenea

## Profilo Sismico 2

Tramite le Vs sono stati individuati i seguenti valori medi di velocità ( $V_s$ ) e spessore (H):

$V_s$ (m/s)	H (m)
170	2.00
420	4.00
698	

Oltre alla determinazione del valore dei primi rifrattori, tramite registrazioni in rifrazione, vengono utilizzati due sondaggi adiacenti alla stesa sismica che mettono in evidenza le seguenti caratteristiche stratigrafiche

m dal p.c	Stratigrafia
0.0 – 0.3	Suolo vegetale
0.3 – 1.1	Terreno di riporto natura limo-argillosa
1.1 – 4.8	Sabbia fine limosa
4.8 – 5.0	Sabbia fine limosa
5.0 – 6.0	Ghiaia calcarea medio fine

## 4. ELABORAZIONE DATI OTTENUTI

I dati così ottenuti sono stati analizzati scegliendo la serie di curve più idonee e sottoponendola alla successive fasi di elaborazione:

- caricamento sismogrammi onde di Rayleigh e onde di Love
- Calcolo degli spettri di velocità Frequenza Hz – Velocità fase m/s
- Modellazione diretta della curve di dispersione del modo fondamentale e di quelli superiori, tramite assunzione di modelli Velocità/Spessori via via più soddisfacenti, attribuiti a partire da dati geologico stratigrafici dell'area e da valori di  $V_s$  degli strati più superficiali, questi ultimi calcolati tramite i risultati del profilo a rifrazione eseguito.
- Piccaggio delle curve di dispersione ottimizzate

- e) Inversione delle curve di dispersione
- f) Modello finale della variazione della velocità  $V_s$  con la profondità

## 5. RISULTATI

### Profilo sismico 1

Dal calcolo degli spettri di velocità Frequenza (Hz) / Velocità di fase (m/s) (TAV 2), si rileva come la massima dispersione della velocità di fase risulta compresa nell' intervallo di frequenza tra i 10 e 50 Hz, mentre la corrispondente velocità risulta compresa tra 900 m/s e 220 m/s. Nella Tavola 3 viene presentato il modello teorico di partenza, assunto per l'elaborazione nel processo di inversione , ricondotto a cinque sismostrati sovrastanti il semispazio, aventi i seguenti valori di velocità e spessore:

Spessore ( m )	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)
0,5	354	170
5	520	250
15	1041	500
10	1457	700
Semispazio	2082	1000

Nella tavola 4 viene riportato il risultato finale del processo di inversione, nei grafici è evidente come la curva teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità è in buon accordo con la curva di dispersione sperimentale. Nella Tav. 4.1 è riportato il grafico velocità onde S m/s / profondità m con la rappresentazione della distribuzione delle velocità. Le tabelle seguenti riportano tutti i valori di input e output del modello

### Modello ricavato

	$V_{sv}$ (m/s)	$V_{sh}$ (m/s)	Spessore	Densità (gr/cm <sup>3</sup> )	Modulo di taglio (Mpa)
<b>STRATO 1</b>	170	121	0.5	1.82	53
<b>STRATO 2</b>	250	233	5.0	1.90	119
<b>STRATO 3</b>	500	487	15.30	2.06	516
<b>STRATO 4</b>	700	855	10.0	2.14	1048
<b>STRATO 5</b>	1000	735	-	2.21	2205

### Valori stimati di Vp e dei moduli elastici

	Vp (m/s)	Poisson	Bulk (Mpa)	Young's (Mpa)	Lamè (Mpa)
<b>STRATO 1</b>	378	0.37	190	144	155
<b>STRATO 2</b>	526	0.35	367	321	288
<b>STRATO 3</b>	1037	0.35	1531	1391	1187
<b>STRATO 4</b>	1412	0.34	2866	2801	2167
<b>STRATO 5</b>	1863	0.30	4730	5726	3260

### Profilo Sismico 2

Dal calcolo degli spettri di velocità Frequenza (Hz) / Velocità di fase (m/s) (TAV 2), si rileva come la massima dispersione della velocità di fase risulta compresa nell' intervallo di frequenza tra i 10 e i 40 Hz, mentre la corrispondente velocità risulta compresa tra 900 m/s e 180 m/s. Nella Tavola 3 viene presentato il modello teorico di partenza, assunto per l'elaborazione nel processo di inversione, ricondotto a cinque sismostrati sovrastanti il semispazio, aventi i seguenti valori di velocità e spessore:

Spessore ( m)	Vp (m/s)	Vs(m/s)
2.00	312	130
6.00	666	320
8.00	1145	550
15.00	1665	800
Semispazio	2082	1000

Nella tavola 4 viene riportato il risultato finale del processo di inversione, nei grafici è evidente come la curva teorica calcolata attraverso l'inversione del modello di velocità è in buon accordo con la curva di dispersione sperimentale. Nella Tav. 4.1 è riportato il grafico velocità onde S m/s / profondità m con la rappresentazione della distribuzione delle velocità. Le tabelle seguenti riportano tutti i valori di input e output del modello

### Modello ricavato

	Vsv (m/s)	Vsh (m/s)	Spessore	Densità (gr/cm3)	Modulo di taglio (Mpa)
<b>STRATO 1</b>	130	150	2.00	1.78	40
<b>STRATO 2</b>	320	322	6.00	1.95	199
<b>STRATO 3</b>	550	550	8.00	2.10	635
<b>STRATO 4</b>	800	800	15.00	2.20	1406
<b>STRATO 5</b>	1000	1198		2.22	2216

### Valori stimati di Vp e dei moduli elastici

	Vp (m/s)	Poisson	Bulk (Mpa)	Young's (Mpa)	Lamè (Mpa)
<b>STRATO 1</b>	317	0.36	125	108	99
<b>STRATO 2</b>	644	0.34	542	533	409
<b>STRATO 3</b>	1210	0.37	2228	1740	1804
<b>STRATO 4</b>	1806	0.38	5292	3876	4355
<b>STRATO 5</b>	1944	0.32	5419	5849	3942

### 5. DEFINIZIONE SUOLO TIPO

Il modello restituisce un valore della Vs30, tramite il fitting effettuato sulla base della relazione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{v_i}}$$

dove:

Vs<sub>30</sub> = velocità media di propagazione delle onde S entro 30 metri di profondità

h<sub>i</sub> = spessore dello strato i-esimo

v<sub>i</sub> = velocità delle onde S dello strato i-esimo

N = numero di strati presenti entro i primi 30 metri

Nel caso specifico il valore di Vs30 risulta pari a 451 m/s per il Profilo Sismico 1 e pari a 468 m/s per il Profilo Sismico 2. In base alle normative vigenti O.P.C.M. 3274/2003 e alla normativa "NTC" 14 Gennaio 2008, deve essere definita l'azione sismica di progetto, sulla base della zona sismica di appartenenza del sito e la categoria di suolo su cui sarà realizzata l'opera. Dal valore di Vs30 restituito dal modello di calcolo, per entrambi i profili sismici, il suolo di interesse progettuale ricade nella **categoria B**, come viene descritto nella TAB 2.

Suolo	Descrizione geotecnica	V <sub>s30</sub> (m/s)
A	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi caratterizzati da valori di V <sub>s30</sub> > 800m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5m	>800
B	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V <sub>s30</sub> compresi tra 360m/s e 800m/s	360+800 (N <sub>spt</sub> > 50) (C <sub>u</sub> > 250 kPa)
C	Depositi di sabbie o ghiaie mediamente addensate o argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V <sub>s30</sub> compresi tra 180m/s e 360m/s	180+360 (15 < N <sub>spt</sub> < 50) (70 < C <sub>u</sub> < 250 kPa)
D	Depositi di granulari da sciolti a poco addensati o coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di V <sub>s30</sub> < 180m/s	< 180 (N <sub>spt</sub> < 15) (C <sub>u</sub> < 70 kPa)
E	Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di V <sub>s</sub> simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5m e 20m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con V <sub>s</sub> > 800m/s	
S1	Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità (IP>40) e contenuto d'acqua, caratterizzati da valori di V <sub>s30</sub> < 100m/s	< 100 (10 < C <sub>u</sub> < 20 kPa)
S2	Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti	

TAB 2 – Range di Vs30 da normativa O.P.C.M. 3274

## 7. CONCLUSIONI

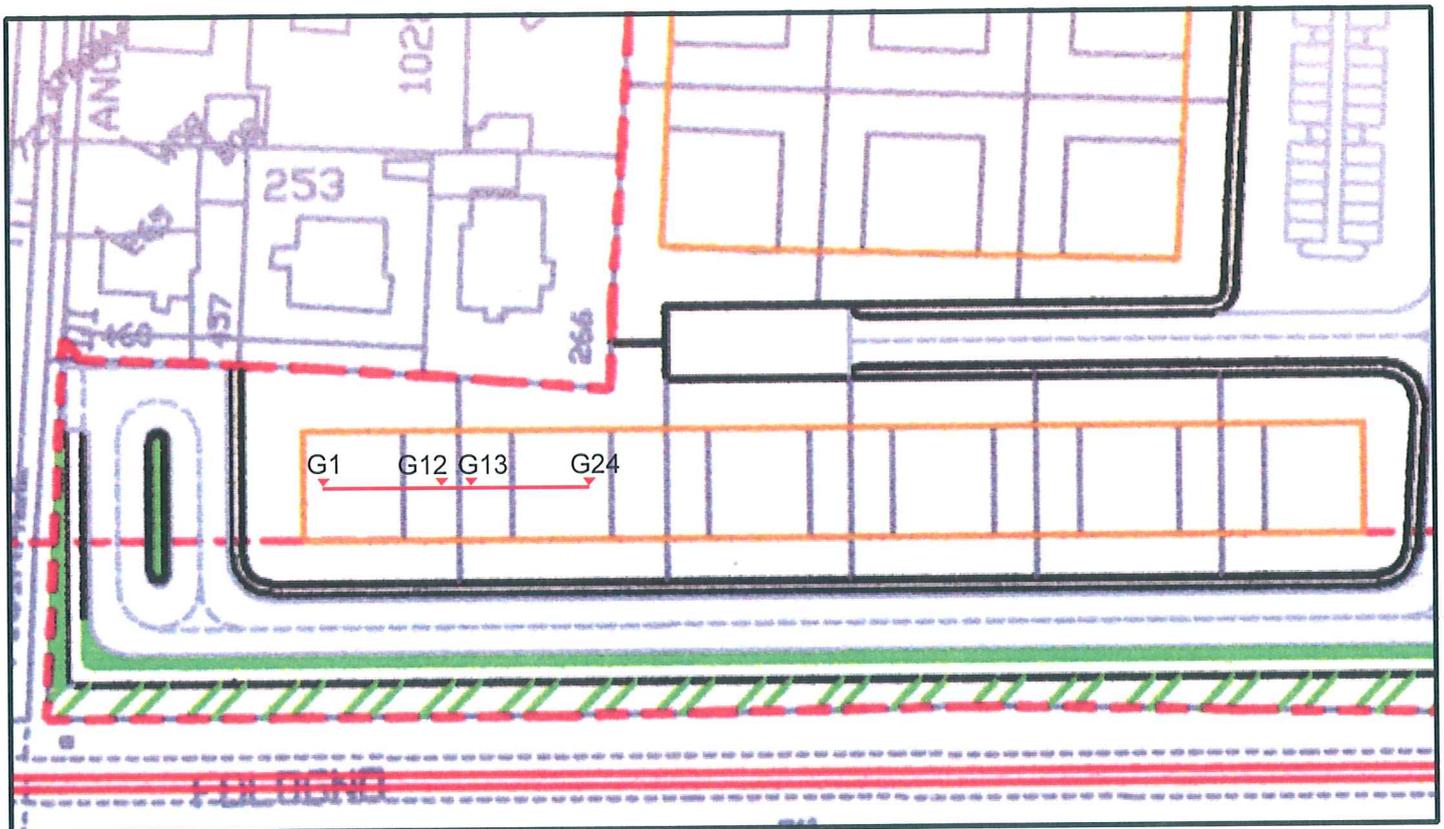
L'indagine sismica condotta con metodi di analisi M.A.S.W. ha permesso una ricostruzione sismostratigrafica dei terreni interessati dal progetto evidenziando la presenza di una successione di strati a velocità  $V_s$  gradualmente crescente con la profondità in entrambi i profili sismici realizzati.

L'inversione del modello restituisce un valore **Vs30 di 451 m/s** per il **Profilo Sismico 1** ed un valore **Vs30 di 468 m/s** per il **Profilo Sismico 2**, che permettono di classificare in base alla normativa vigente, secondo l'approccio di tipo semplificato, i terreni in oggetto come **Suolo di categoria B**.

Foligno 16/09/2009

Geologo Ercolini Luca

## PROFILO SISMICO 1



## PROFILO SISMICO 2

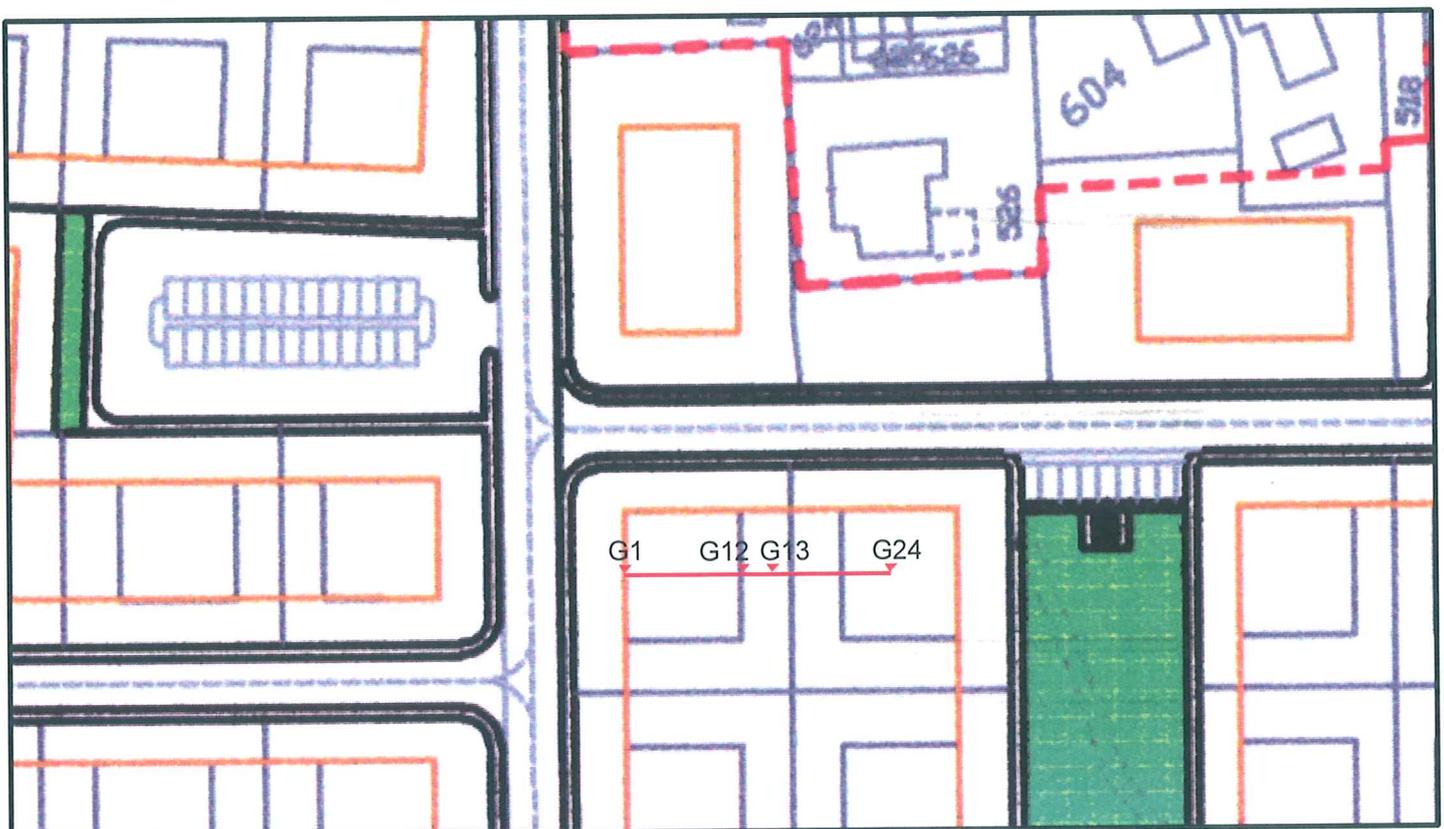
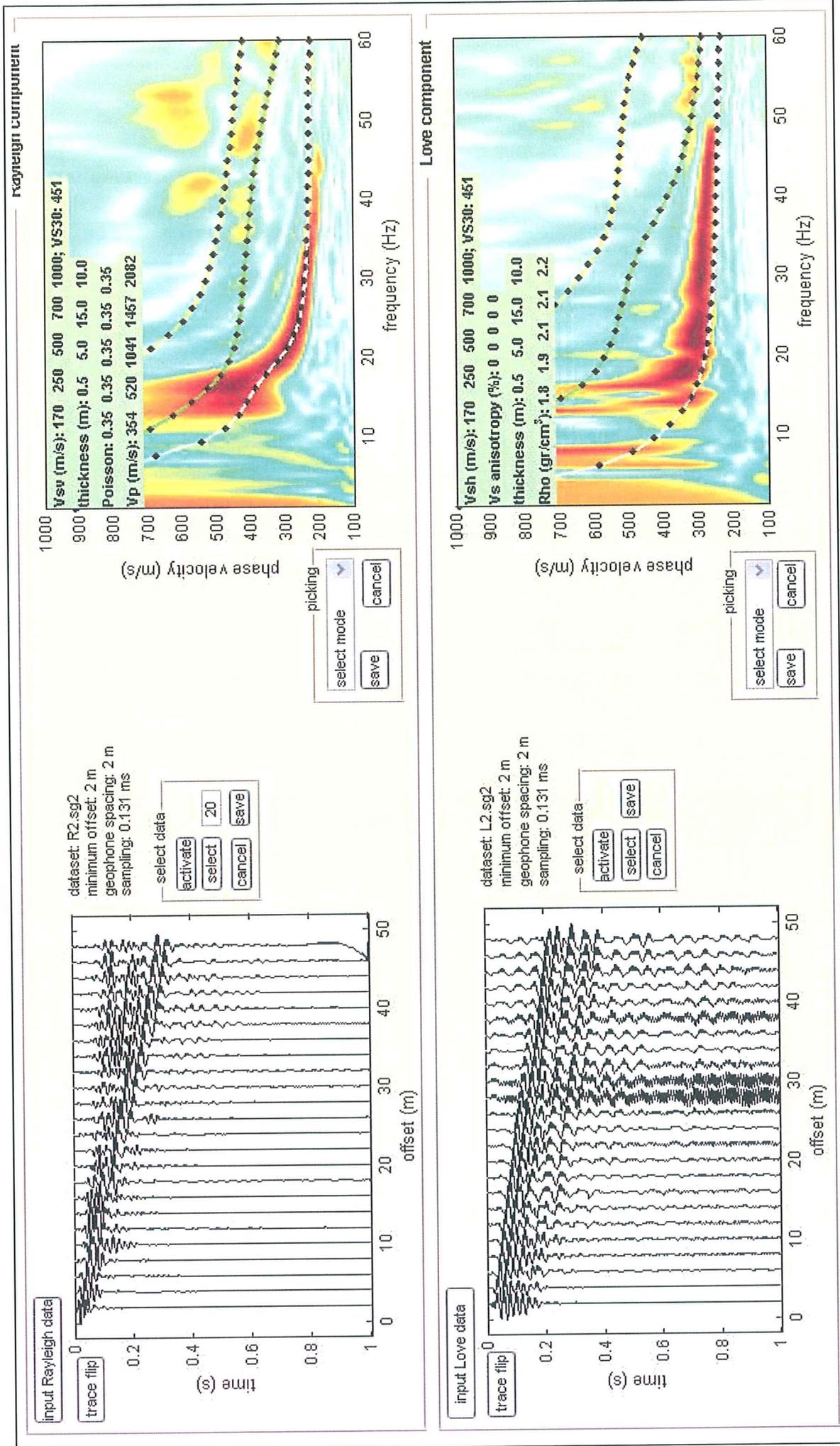
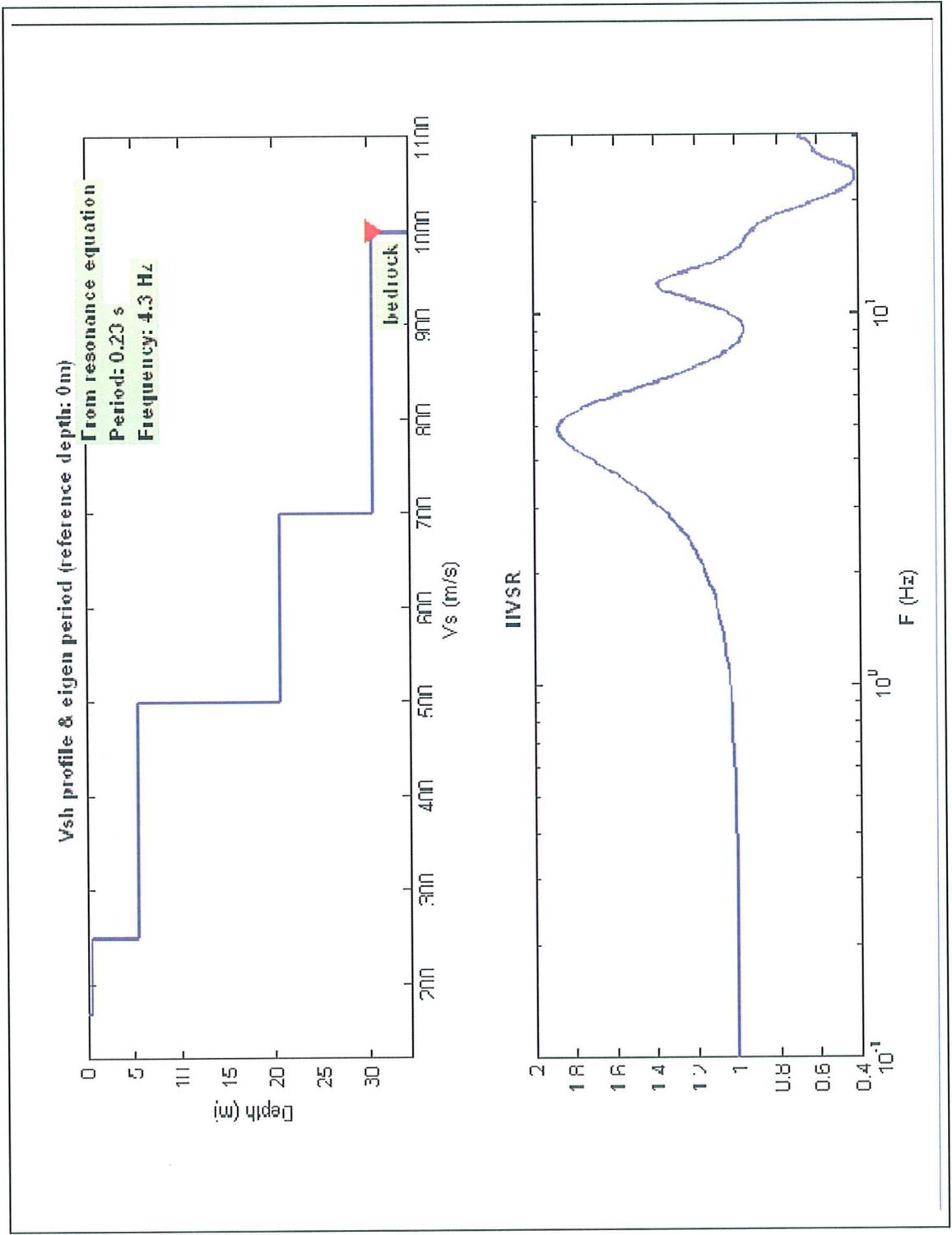


TAVOLA 1 - Ubicazione profilo sismico



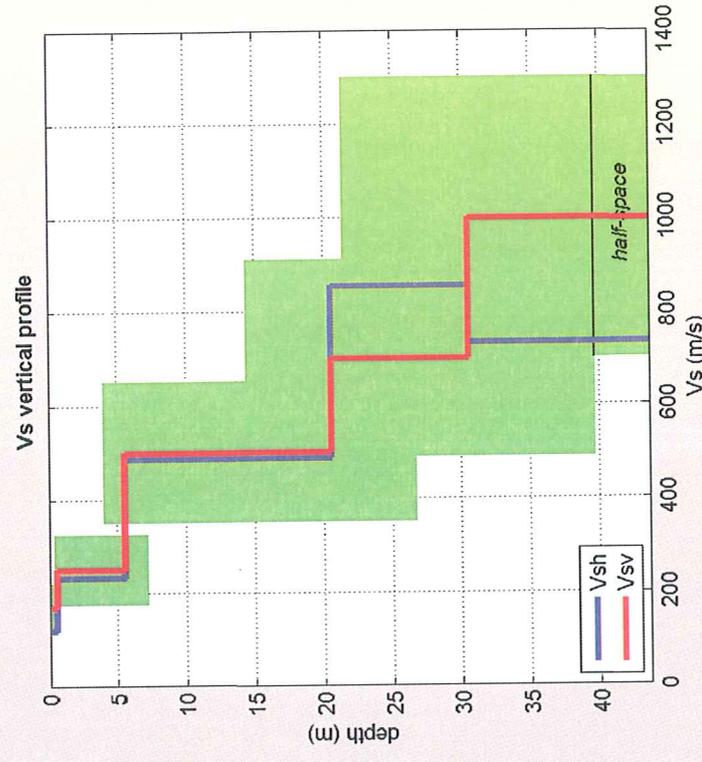
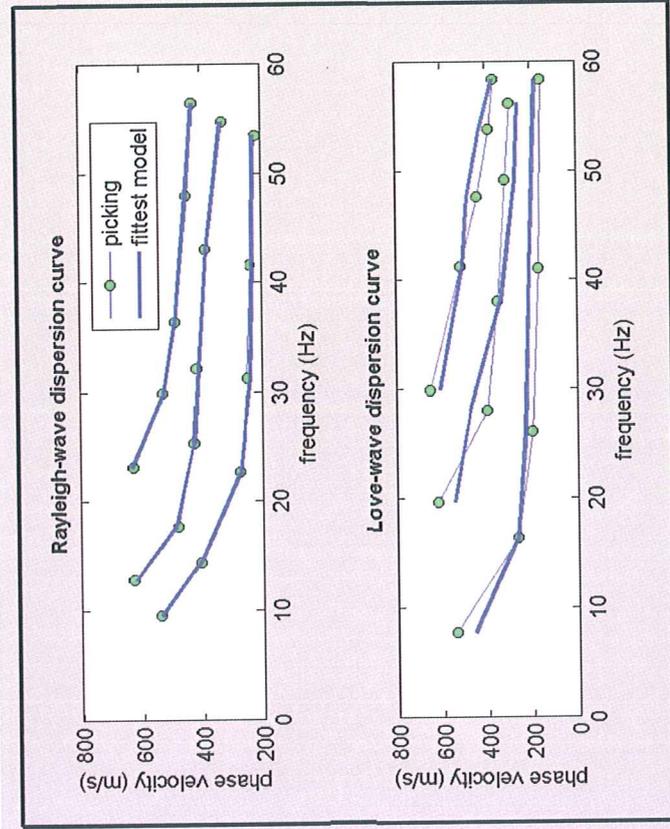
**TAVOLA 2 – Sismogrammi acquisiti e analisi spettrale – PROFILLO A**

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno



**TAVOLA 3 – Modello di input e grafico delle frequenze - PROFILO 1**

Indagini sismiche M.A.S.W./ "Ambito Croce Bianca"/Comune di Foligno



Rayleigh wave dispersion curve: PICR.cdp  
 Love wave dispersion curve: picL.cdp  
 VS30 (fittest model): 451 m/s

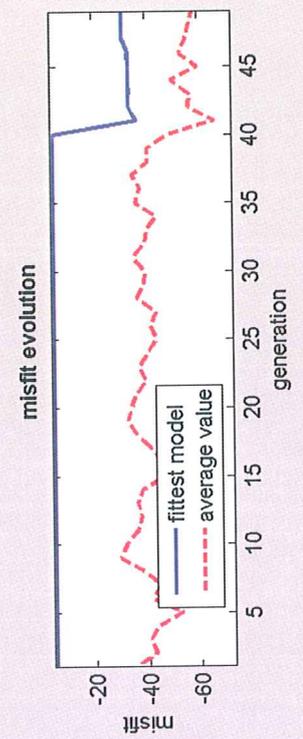


TAVOLA 4 – Curve di dispersione e modello invertito - PROFILO 1

Indagini sismiche M.A.S.W./ "Ambito Croce Bianca"/Comune di Foligno

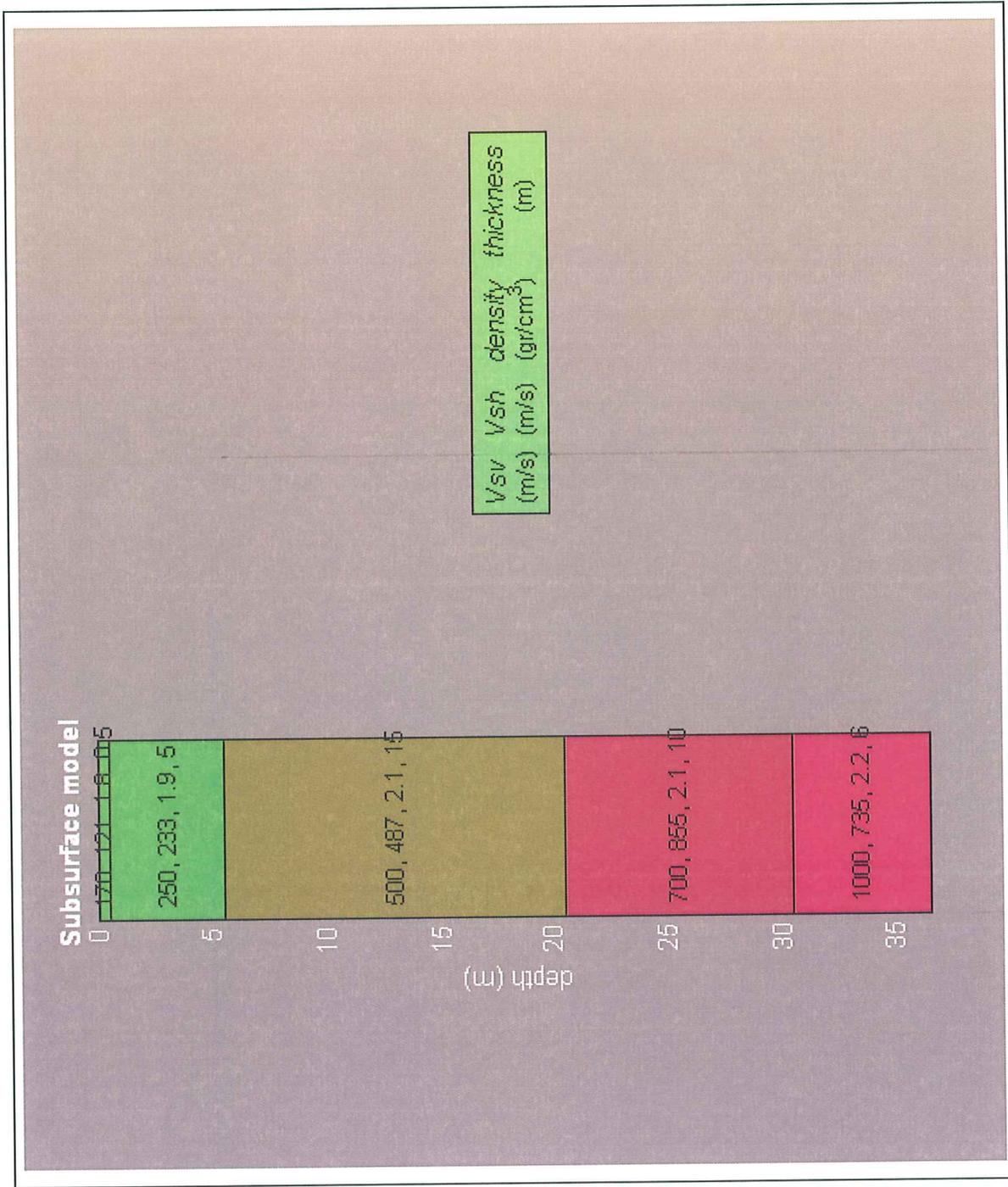
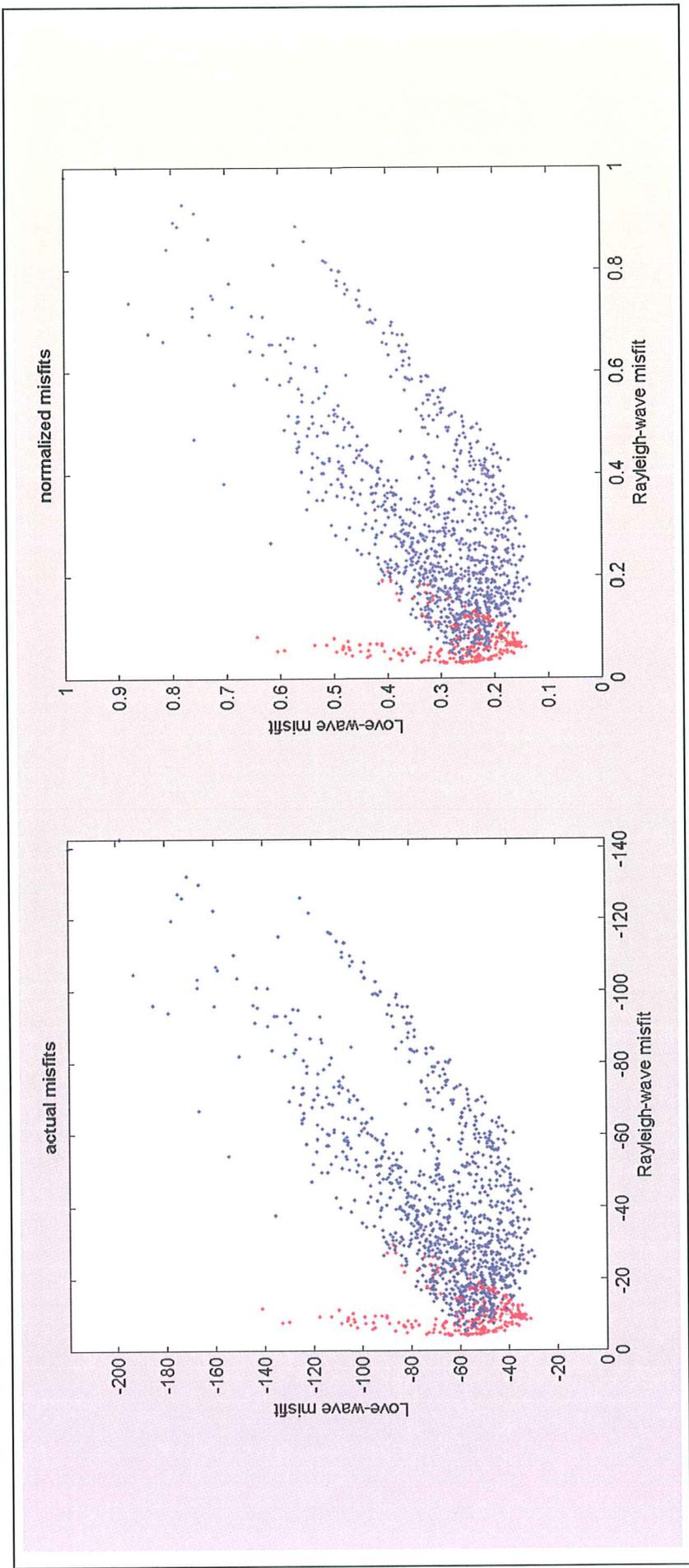


TAVOLA 4.1 – Suddivisione sismostrati - PROFILO 1

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno



**TAVOLA 5** – Grafici di distribuzione dei modelli per la valutazione delle anisotropie – **PROFILO 1**

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno

# Sismica a rifrazione Sismogrammi Onde S Profilo P1

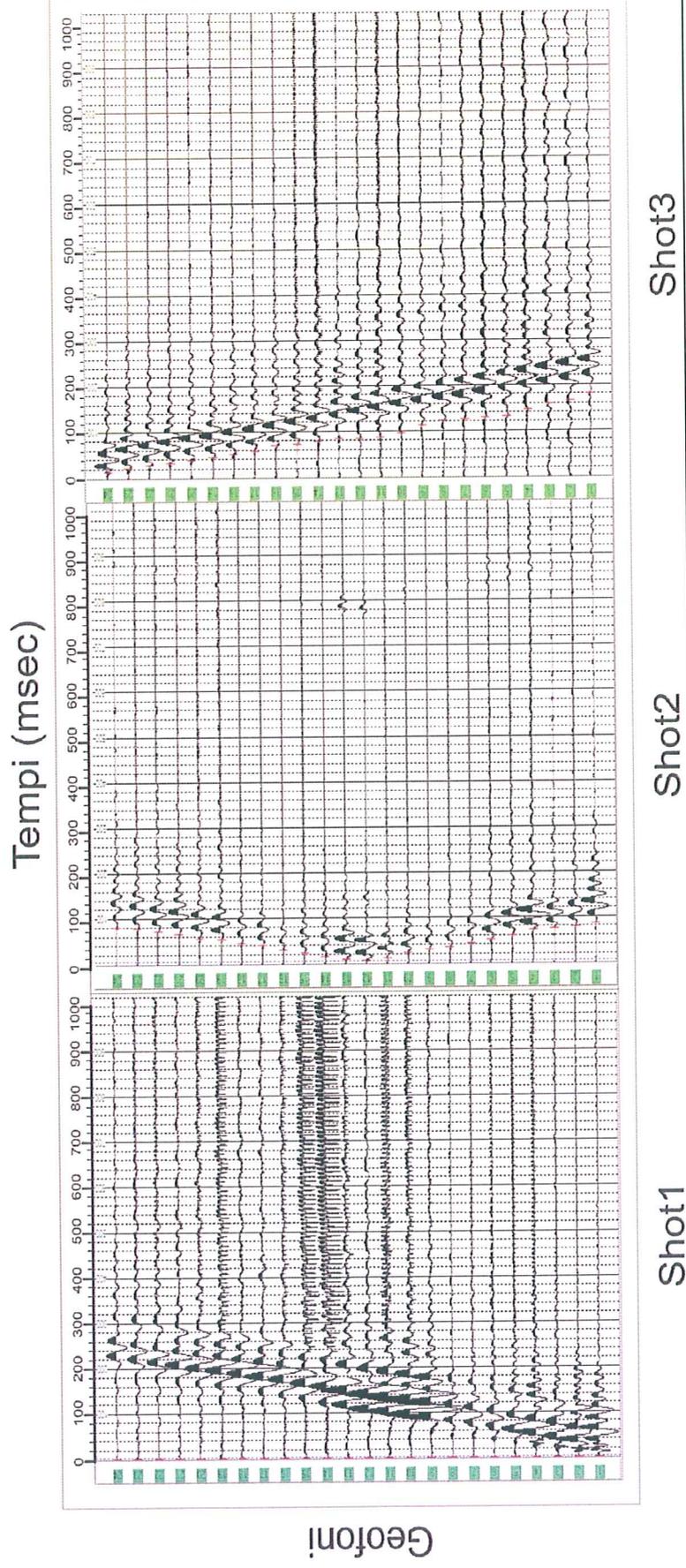
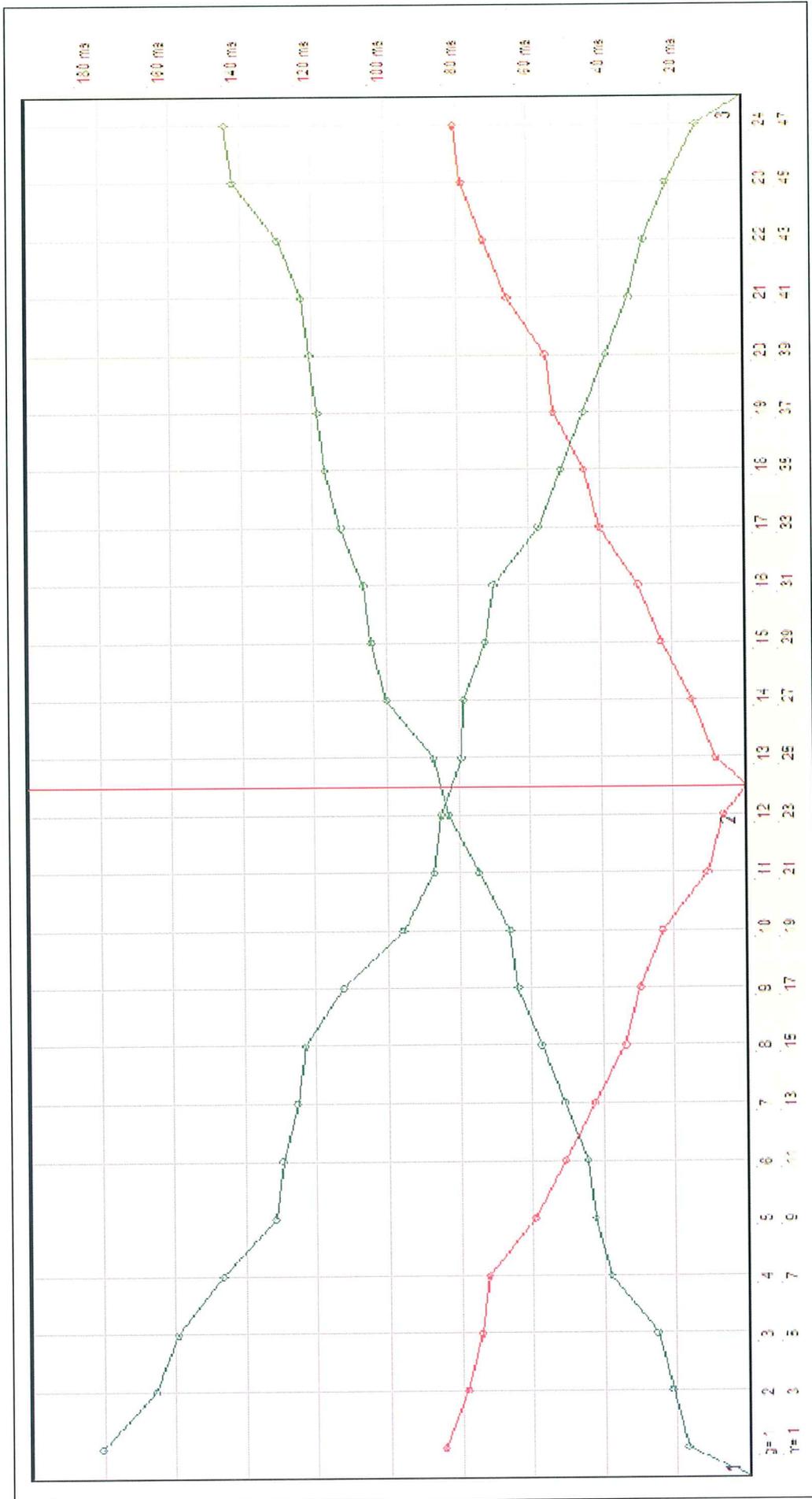
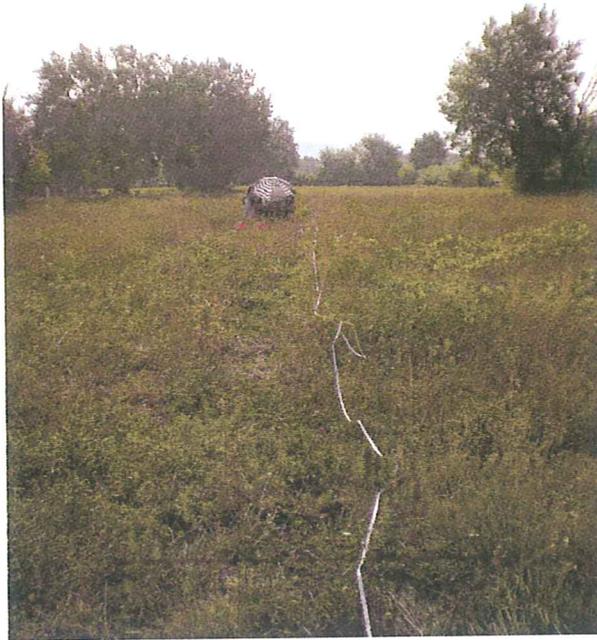


TAVOLA 6 – Sismogrammi profilo onde S



**TAVOLA 7 – Dromocrone onde S**



**Figura 1** Panoramica stendi mento



**Figura 2** Energizzazione onde in compressione

PROFILO 1

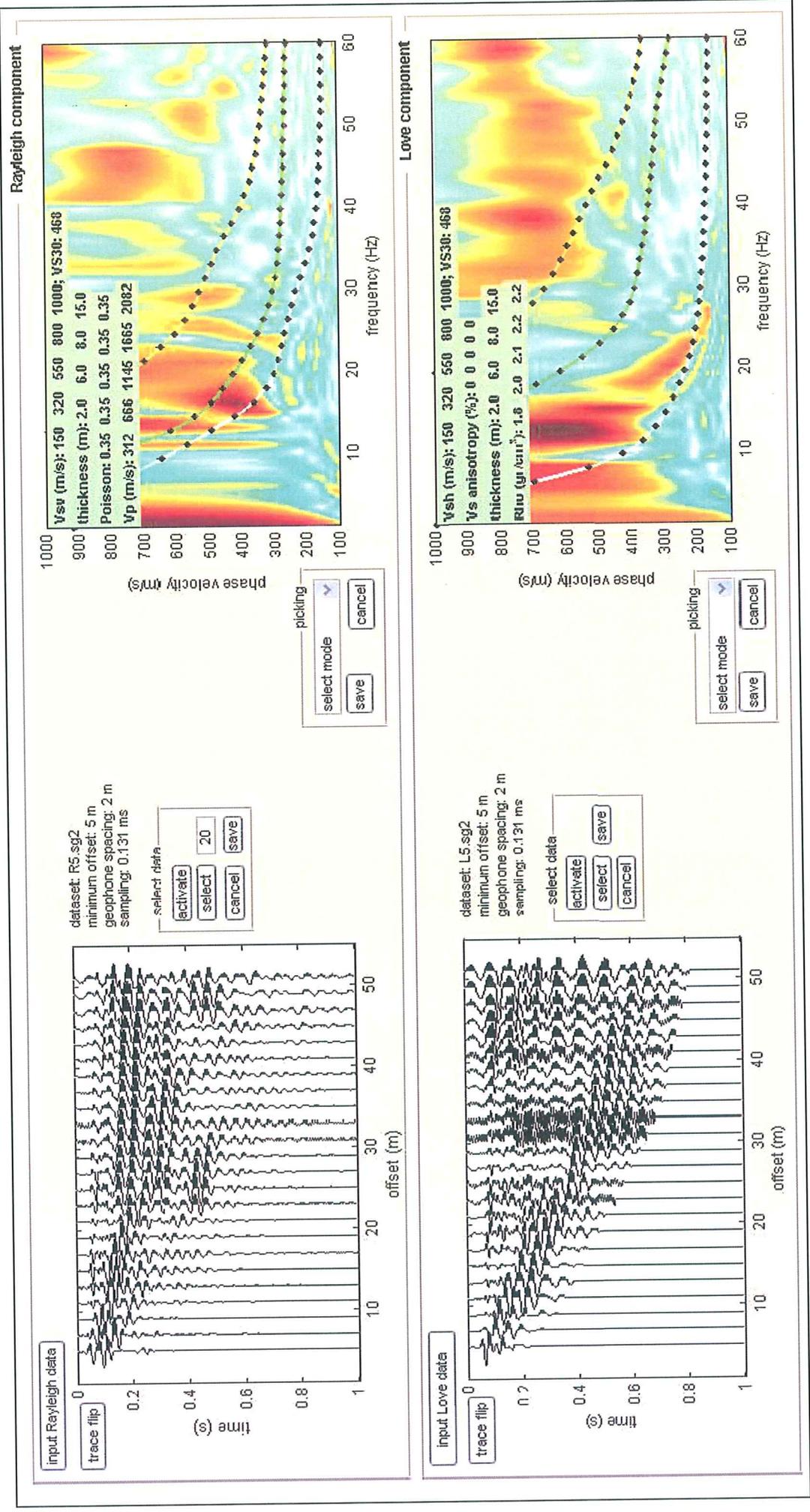
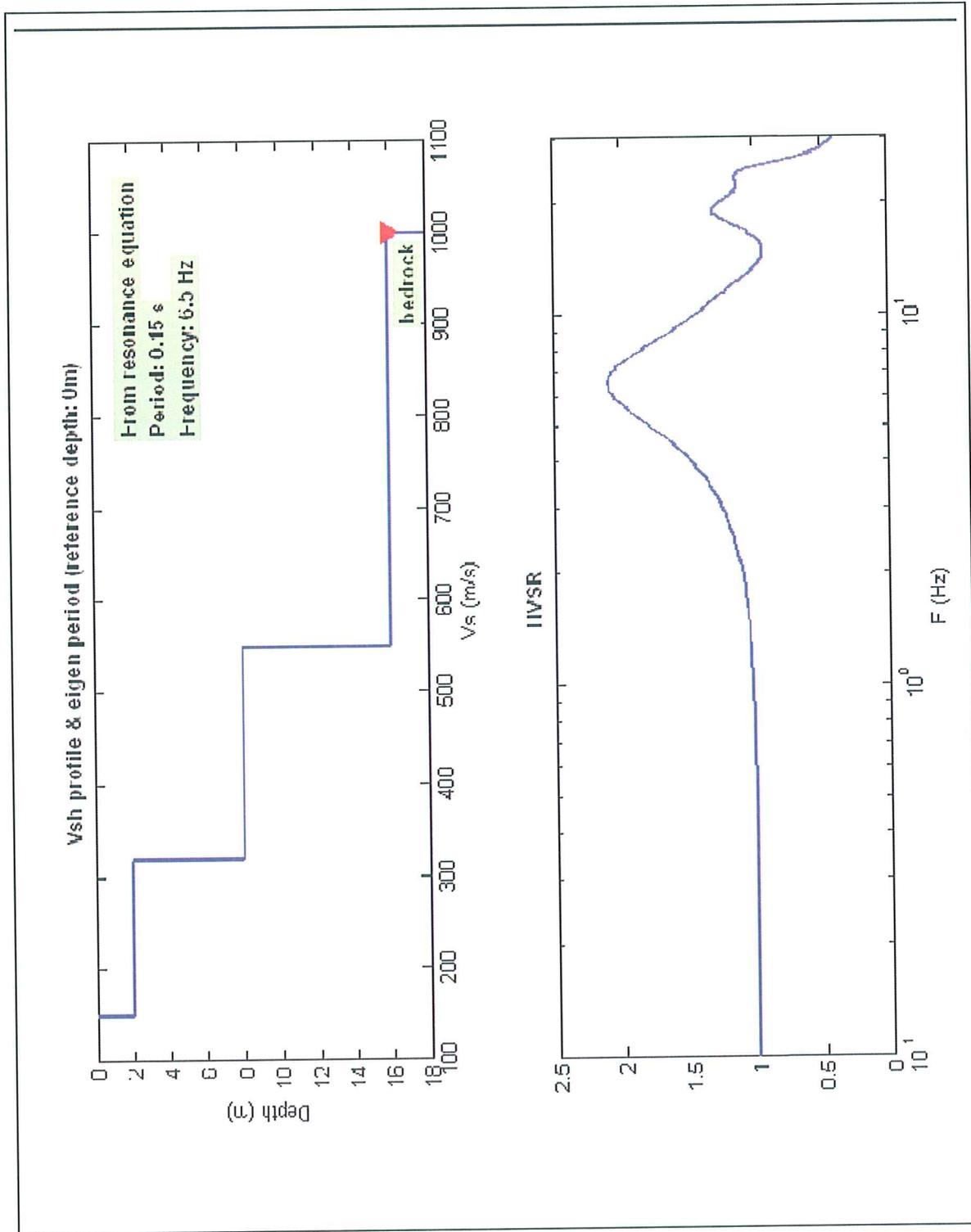


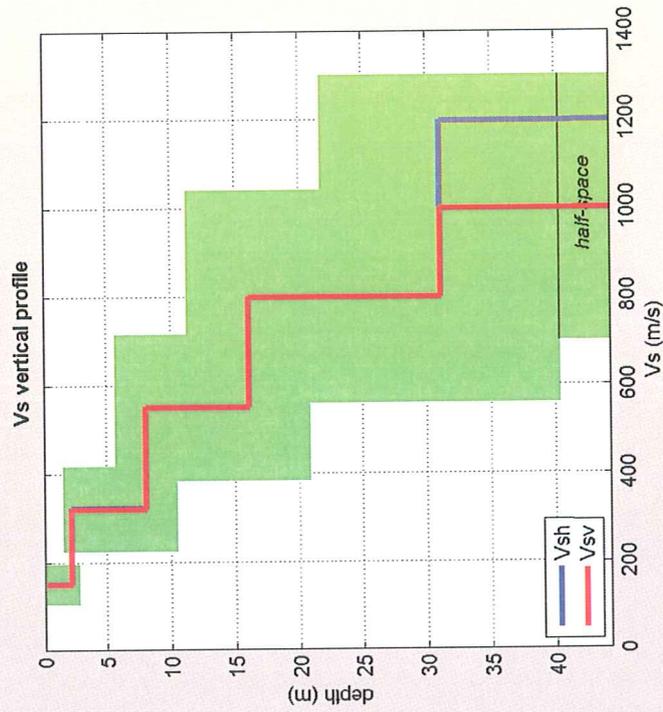
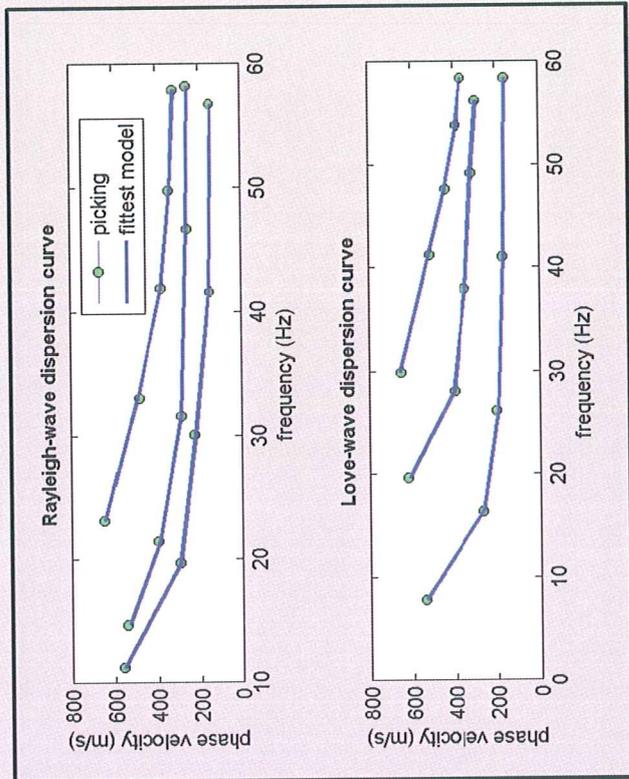
TAVOLA 2 – Sismogrammi acquisiti e analisi spettrale – *PROF. LO 2*

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno



**TAVOLA 3** – Modello di input e grafico delle frequenze - **PROFILO 2**

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno



Rayleigh wave dispersion curve: picR.cdp  
Love wave dispersion curve: picL.cdp  
VS30 (fittest model): 468 m/s

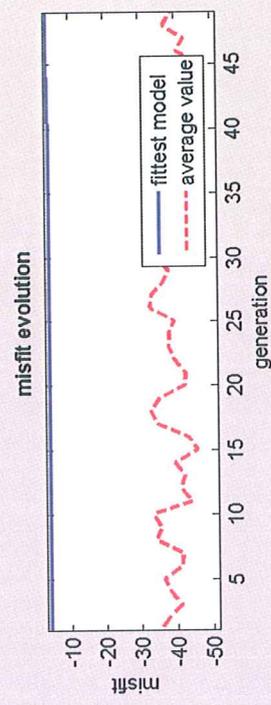
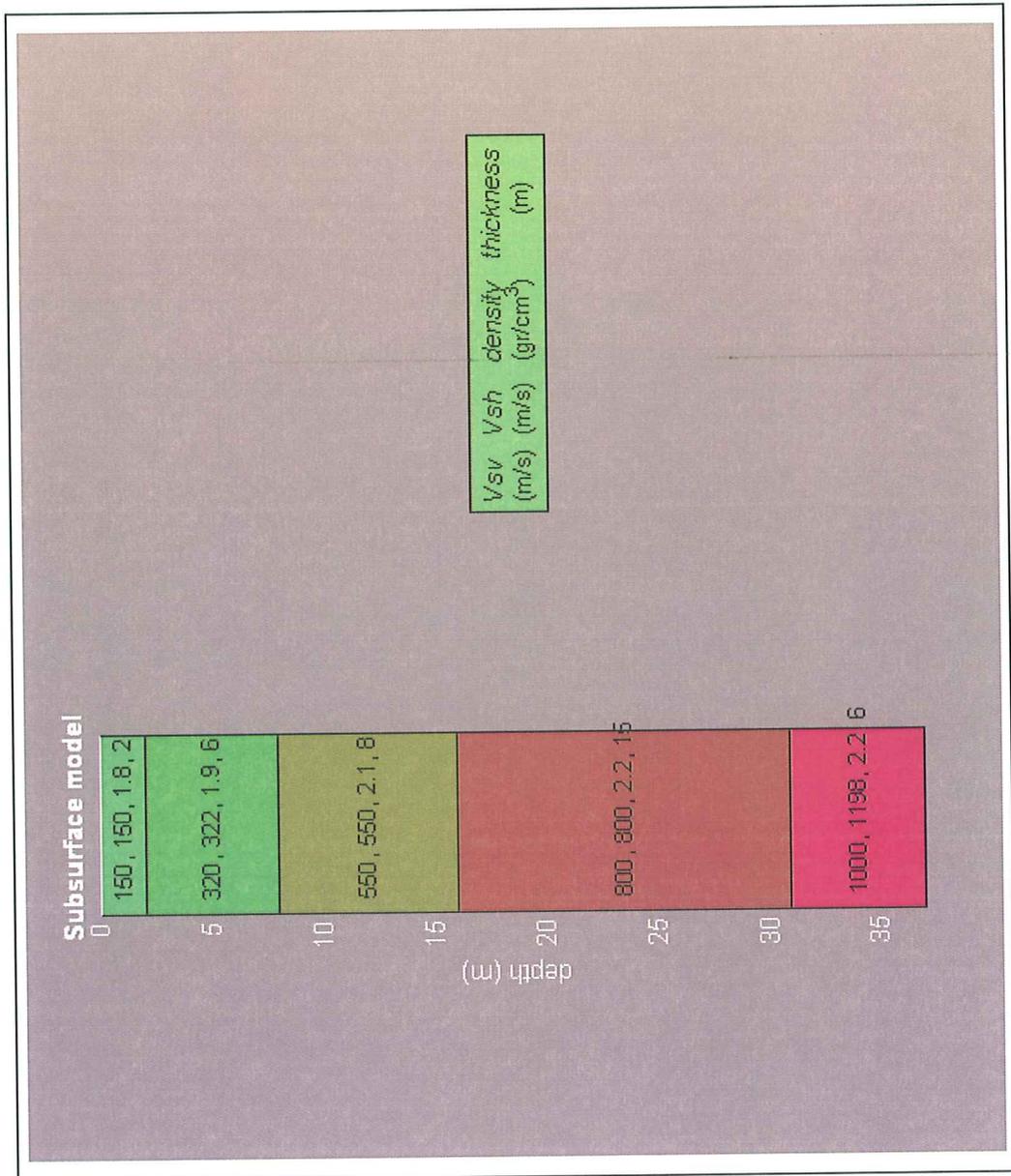


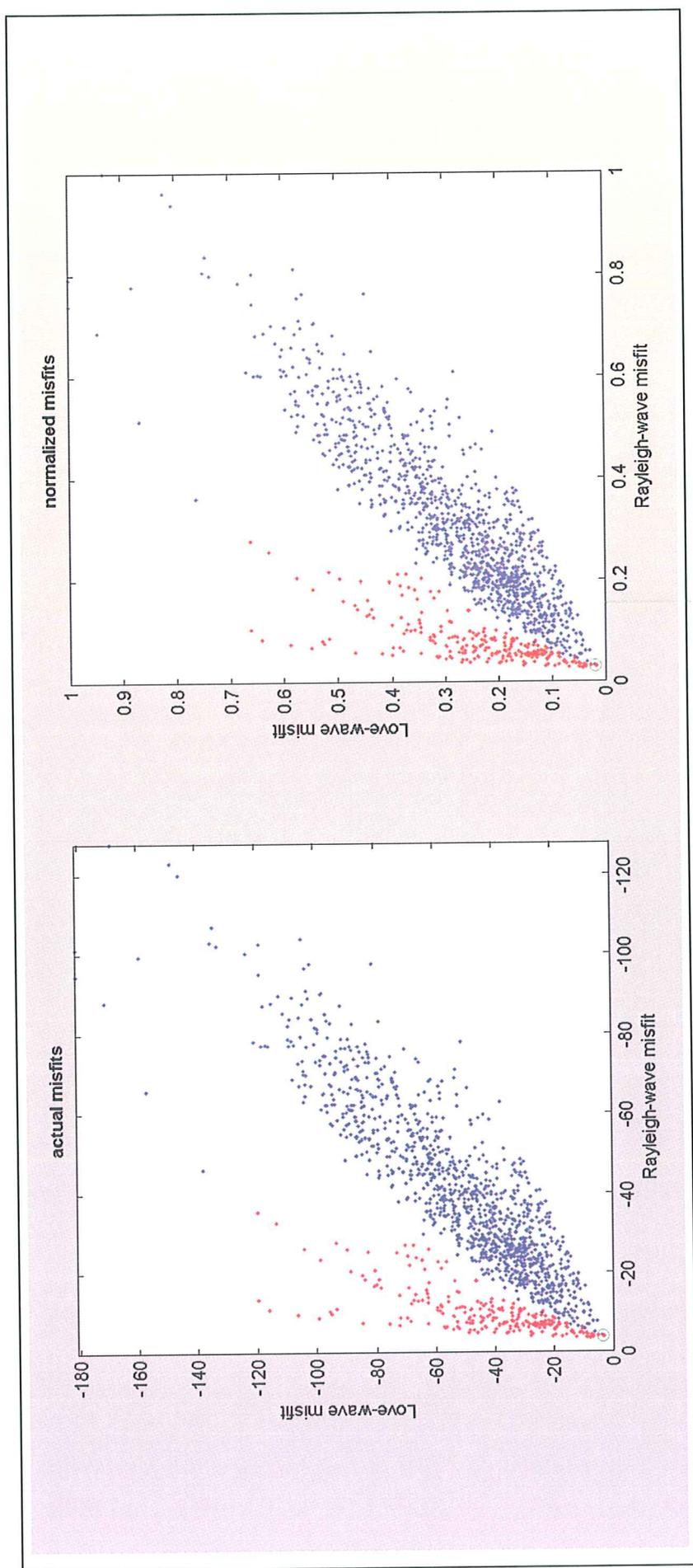
TAVOLA 4 – Curve di dispersione e modello invertito - PROFILO 2

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno



**TAVOLA 4.1** – Suddivisione sismostrati – **PROFLO 2**

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno



**TAVOLA 5** – Grafici di distribuzione dei modelli per la valutazione delle anisotropie – **PROFILO 2**

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno

# Sismica a rifrazione Sismogrammi Onde S Profilo P1

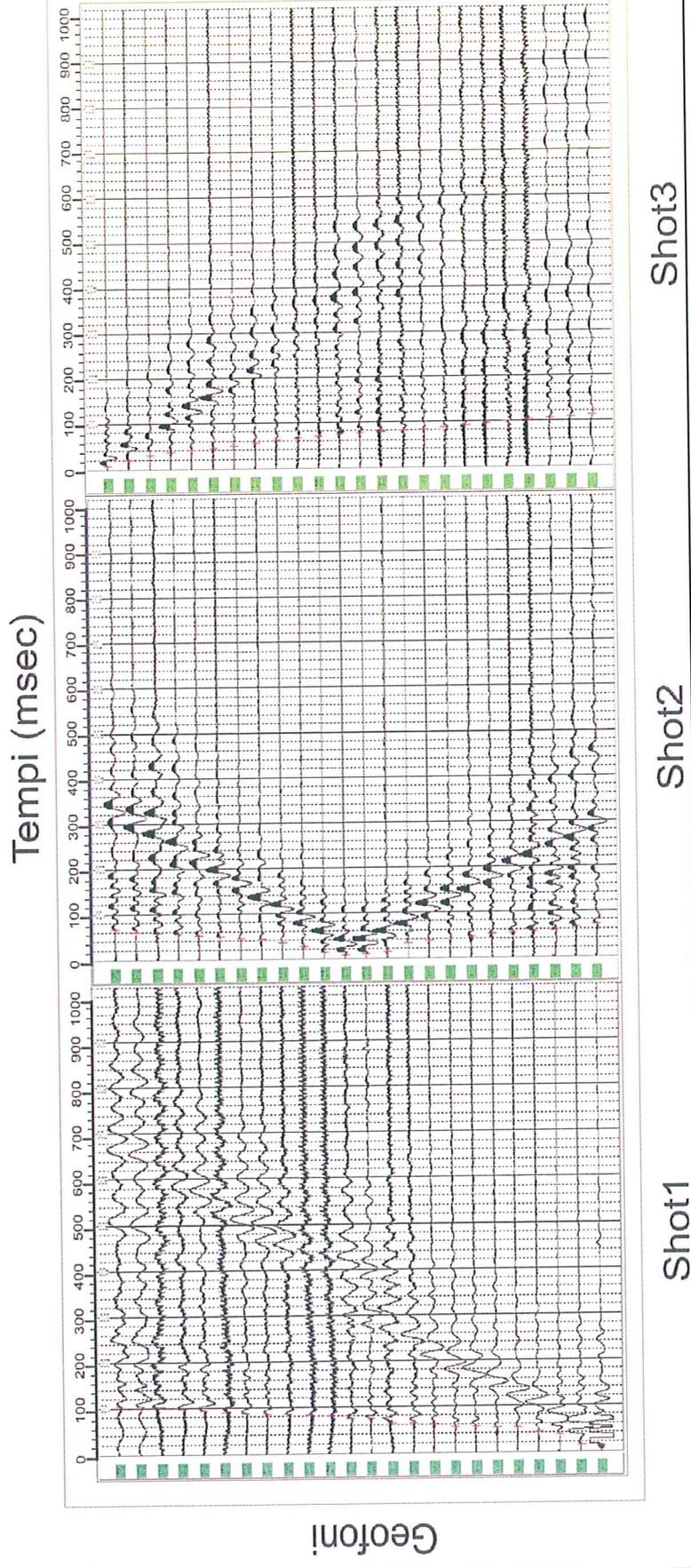


TAVOLA 6 – Sismogrammi profilo ande S - PROFILO 2

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno

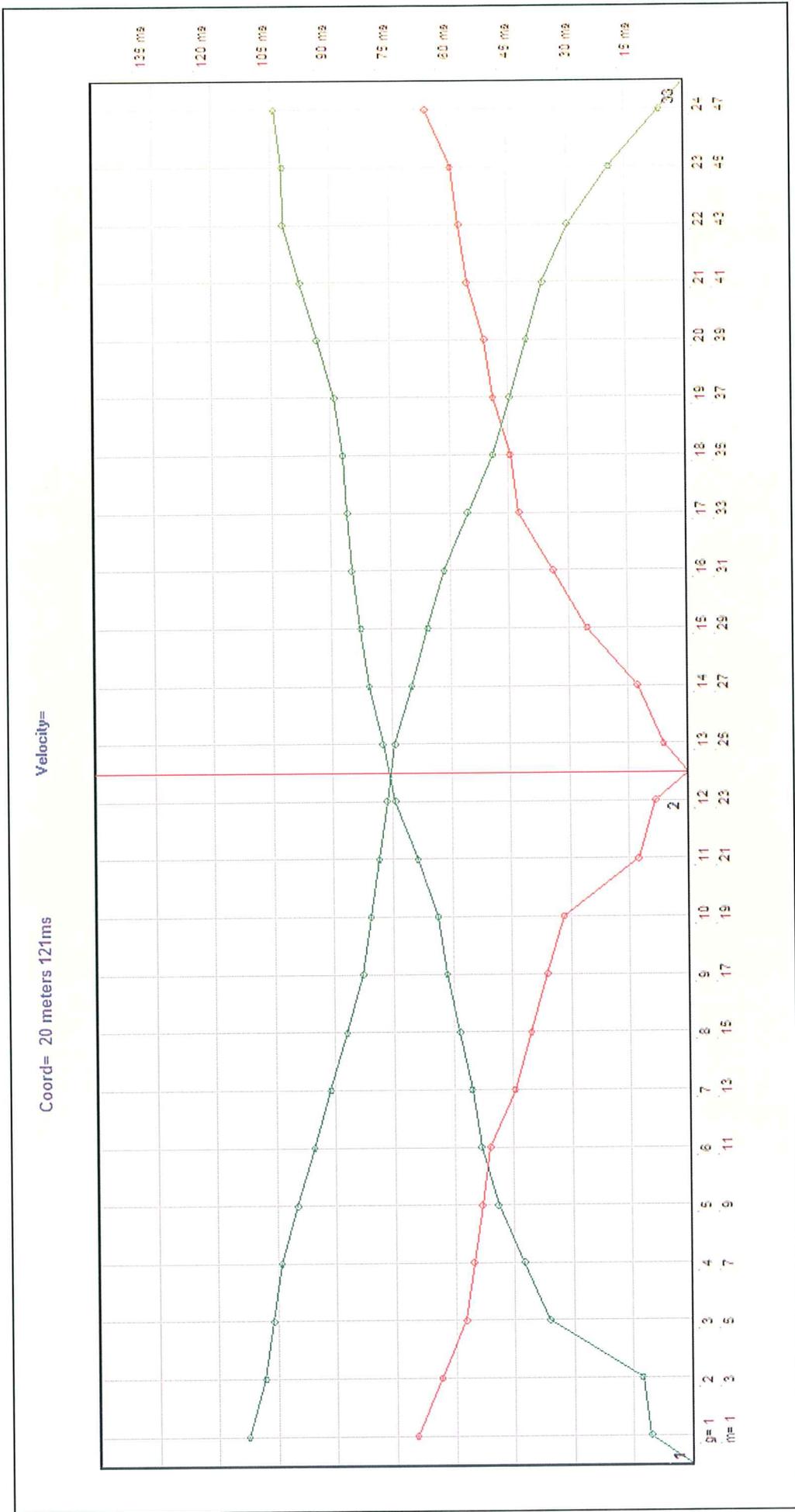
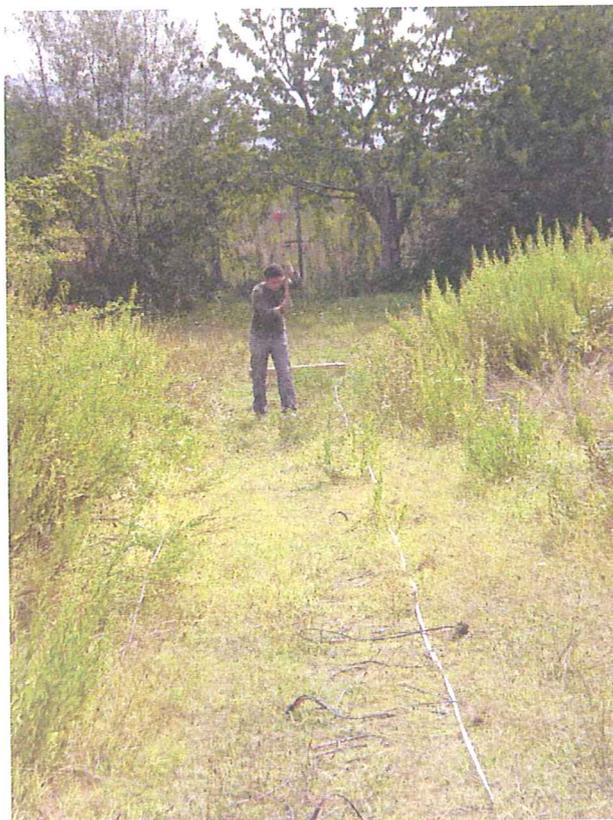


TAVOLA 7 – Dromocrone onde S – PROFILO 2

Indagini sismiche M.A.S.W./ “Ambito Croce Bianca”/Comune di Foligno



**Figura 1** Panoramica stendi mento



**Figura 2** Energizzazione onde in compressione

PROFILO 2  
Indagini sismiche M.A.S.W./ "Ambito Croce Bianca"/Comune di Foligno