

petra

RISULTATI DI UN'INDAGINE MASW  
EFFETTUATA IN LOC. POMARANCE

LUGLIO 2009

---

## RISULTATI DI UN'INDAGINE MASW EFFETTUATA IN LOC. POMARANCO.

---

### PREMESSE

La presente relazione sintetizza e illustra i risultati di un'indagine sismica effettuata, mediante il metodo MASW, in loc. pomarance (PI).

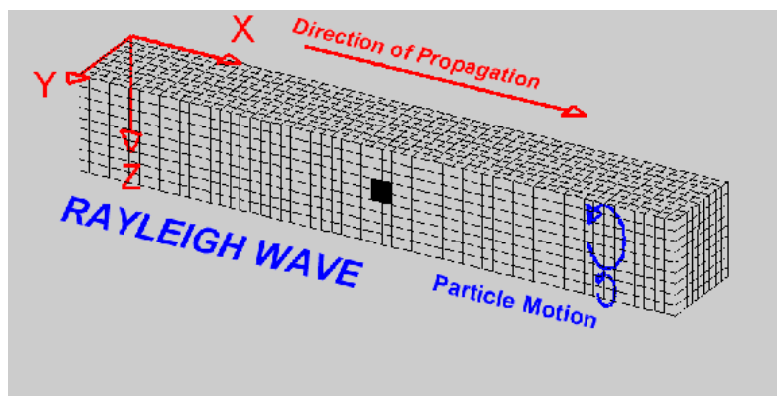
L'indagine MASW è stata effettuata per la caratterizzazione della velocità delle onde Sh dei terreni presenti, per determinare il parametro  $VS_{30}$ , necessario al fine della classificazione dei suoli per la definizione dell'azione sismica di progetto, come richiesto dalle "Norme Tecniche per le Costruzioni" (D.M. 14/01/2008).

L'interpretazione dei dati acquisiti in campagna ha consentito di ricavare una sequenza sismo-stratigrafica relativamente all'area di indagine, con suddivisione in strati aventi analoghe caratteristiche delle velocità di propagazione delle onde sismiche trasversali.

E' stato possibile, per ottimizzare l'interpretazione, riferirsi al locale assetto geolitologico-geotecnico, e a rilevazioni della  $V_{sh}$  in situ tramite indagine sismica a rifrazione.

### GENERALITÀ SUL METODO MASW

Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di *Rayleigh*, la componente principale delle onde superficiali.



Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga. Questa proprietà si chiama dispersione. Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali. Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità

superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

L'intero processo comprende tre passi successivi:

- l'acquisizione delle onde superficiali (*ground roll*);
- la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza);
- l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs.

Per ottenere un profilo Vs bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. Una molteplicità di tecniche diverse sono state utilizzate nel tempo per ricavare la curva di dispersione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi.

L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente, utilizzando la curva di dispersione misurata come riferimento sia per la modellizzazione diretta che per la procedura ai minimi quadrati. Dei valori approssimati per il rapporto di Poisson e per la densità sono necessari per ottenere il profilo verticale Vs dalla curva di dispersione e vengono solitamente stimati utilizzando misure prese in loco o valutando le tipologie dei materiali.

Quando si generano le onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh vengono generate anche una molteplicità di tipi diversi di onde. Fra queste le onde di corpo, le onde superficiali non piane, le onde riverberate (*back scattered*) dalle disomogeneità superficiali, il rumore ambientale e quello imputabile alle attività umane.

Le onde di corpo sono in vario modo riconoscibili in un sismogramma multicanale. Quelle rifratte e riflesse sono il risultato dell'interazione fra le onde e l'impedenza acustica (il contrasto di velocità) fra le superfici di discontinuità, mentre le onde di corpo dirette viaggiano, come è implicito nel nome, direttamente dalla sorgente ai ricevitori (geofoni). Le onde che si propagano a breve distanza dalla sorgente sono sempre onde superficiali. Queste onde, in prossimità della sorgente, seguono un complicato comportamento non lineare e non possono essere trattate come onde piane.

Le onde superficiali riverberate (*back scattered*) possono essere prevalenti in un sismogramma multicanale se in prossimità delle misure sono presenti discontinuità orizzontali quali fondazioni e muri di contenimento. Le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente. Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione multicanale grazie all'utilizzo di modelli di coerenza e in base ai tempi di arrivo e all'ampiezza di ciascuno.

La scomposizione di un campo di onde registrate in un formato a frequenza variabile consente l'identificazione della maggior parte del rumore, analizzando la fase e la frequenza indipendentemente dalla distanza dalla sorgente. La scomposizione può essere quindi utilizzata in associazione con la registrazione multicanale per minimizzare il rumore durante l'acquisizione.

La scelta dei parametri di elaborazione così come del miglior intervallo di frequenza per il calcolo della velocità di fase, può essere fatto con maggior accuratezza utilizzando dei sismogrammi multicanale.

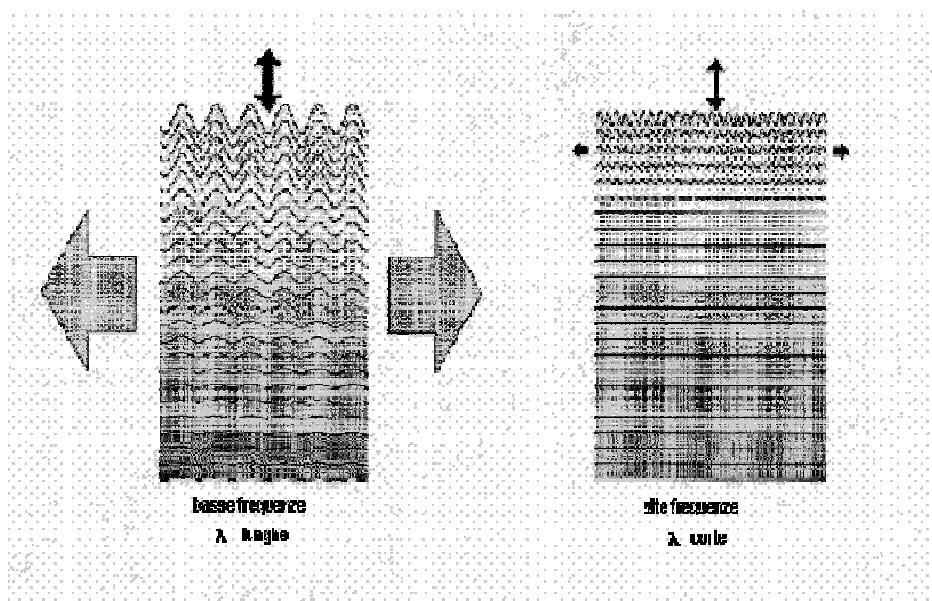
Una volta scomposto il sismogramma, una opportuna misura di coerenza applicata nel tempo e nel dominio della frequenza può essere utilizzata per calcolare la velocità di fase rispetto alla frequenza.

La velocità di fase e la frequenza sono le due variabili ( $x$ ;  $y$ ), il cui legame costituisce la curva di dispersione. E' anche possibile determinare l'accuratezza del calcolo della curva di dispersione analizzando la pendenza lineare di ciascuna componente di frequenza delle onde superficiali in un singolo sismogramma. In questo caso MASW permette la miglior registrazione e separazione ad ampia banda ed elevati rapporti S/N. Un buon rapporto S/N

assicura accuratezza nel calcolo della curva di dispersione, mentre l'ampiezza di banda migliora la risoluzione e la possibile profondità di indagine del profilo Vs di inversione.

Le onde di superficie sono facilmente generate da una sorgente sismica quale, ad esempio, una mazza battente. La configurazione base di campo e la routine di acquisizione per la procedura MASW sono generalmente le stesse utilizzate in una convenzionale indagine a riflessione (CMP). Però alcune regole operative per MASW sono incompatibili con l'ottimizzazione della riflessione. Questa similitudine permette di ottenere, con la procedura MASW, delle sezioni superficiali di velocità che possono essere utilizzate per accurate correzioni statiche dei profili a riflessione. MASW può essere efficace con anche solo dodici canali di registrazione collegati a geofoni singoli a bassa frequenza (<10Hz).

Come già detto, il metodo si basa sulle proprietà di dispersione delle onde di superficie. Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S ( $V_s$ ) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.



L'illustrazione mostra le proprietà di dispersione delle onde di superficie. Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S ( $V_s$ ) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

#### ATTREZZATURA E METODOLOGIE IMPIEGATE

Per l'indagine in oggetto si è impiegata un'attrezzatura *AMBROGEO "ECHO 12-24/2002 Sismic Unit"*, avente le seguenti caratteristiche:

- . numero di canali: 24
- . sampler interval: 0,296 msec
- . A/D conversion: 16 bit
- . input impedance: 1KOhm
- . Gain: 10 dB – 100 dB (step 1 dB)
- . saturation tension: +/- 2,3 V
- . saturation level: 100 dB
- . distortion: 0,01%
- . sampler:
  - 25 msec (191 punti)
  - 50 msec (383 punti)
  - 100 msec (756 punti)
  - 200 msec (1530 punti)
  - 400 msec (3060 punti)
  - 1000 msec (7560 punti)
- . sampling: 130 microsec
- . filter low pass: 50/950 Hz, step 1 Hz
- . digital filter low pass: 1000-50
- . digital filter high pass: 0-250
- . frequency response: 7-950 Hz, filter at 950 Hz
- . dynamic range: 93 dB
- . noise: 0,66 uV RMS, gain = 55 dB
- . crosstalk: 52 dB, gain = 55 dB
- . power: 12 V.

Il software di acquisizione dati è "ECHO 12-24" vers. 7.00. L'attrezzatura è completata da 2 cavi sismici a 12 takes out spazati a 5 m, con connettori *cannon*, montati su rullo, geofoni "Geospace" a 4,5 Hz, cannoncino per cartucce industriali, mazza di battuta da 8 Kg con interruttore starter, geofono starter, cavo trigger da 200 m montato su rullo.

Lo stendimento impiegato per il profilo MASW in oggetto ha le seguenti caratteristiche:

- n. geofoni: 24
- spaziatura fra i geofoni: 2,0 m
- n. shots: sono state effettuate 2 rilevazioni, impiegando esclusivamente la mazza di battuta, a distanze di 9 e 20 metri dalla linea geofonica.
- tempo di acquisizione : 1.000 msec.

Il profilo è da considerare orizzontale, in quanto i dislivelli massimi lungo lo stendimento sono modesti (nell'ordine dei decimetri).

### INTERPRETAZIONE DEI DATI

Per il processo di interpretazione/inversione è stata utilizzata la curva di dispersione relativa allo "shot" posto a offset di 20 m dalla linea geofonica.

Per l'interpretazione dei dati è stato impiegato il software *winMASW*, il quale consente la determinazione di profili verticali della velocità delle onde di taglio Vs tramite l'inversione delle curve di dispersione ottenute, effettuata con algoritmi "genetici". Tale programma è in grado di operare sui records in formato *SGY* prodotti dalla strumentazione *Ambrogeo* secondo la procedura specifica descritta nel capitolo introduttivo.

Come già accennato, per dare uno spazio di ricerca significativo al processo di inversione, e per avere un ausilio tramite modellazione diretta, ci si è basati

anche su dati del contesto geolitologico locale e rilevazioni dirette della Vsh per i primi strati tramite sismica a rifrazione.

I diagrammi ed il report relativi al procedimento di elaborazione ed inversione sono allegati alla presente relazione. Sono stati individuati 4 strati a differente velocità Vsh:

- secondo il MODELLO MEDIO:

strato	1	2	3	4
VS (m/sec):	231	666	660	798
Spessore (m):	0,9	6,6	7,3	

- secondo il MODELLO MIGLIORE:

strato	1	2	3	4
VS (m/sec):	215,901	671,4472	650,9105	805,5694
spessore (m):	0,79994	6,6478	8	

Con i dati ottenuti, per la zona di indagine (da p.campagna) si ha :

- VS30 del modello medio: 683 m/sec
- VS30 del modello migliore: 682 m/sec

il che corrisponde a un possibile suolo di fondazione "B" .

#### **ALLEGATI :**

- Grafici "common-shot gather" e spettro di velocità
- Grafici elaborazioni e profilo verticale onde S
- Report di calcolo

**Pomarance, Luglio 2009**

x Petra Snc

**Andrea Casella**



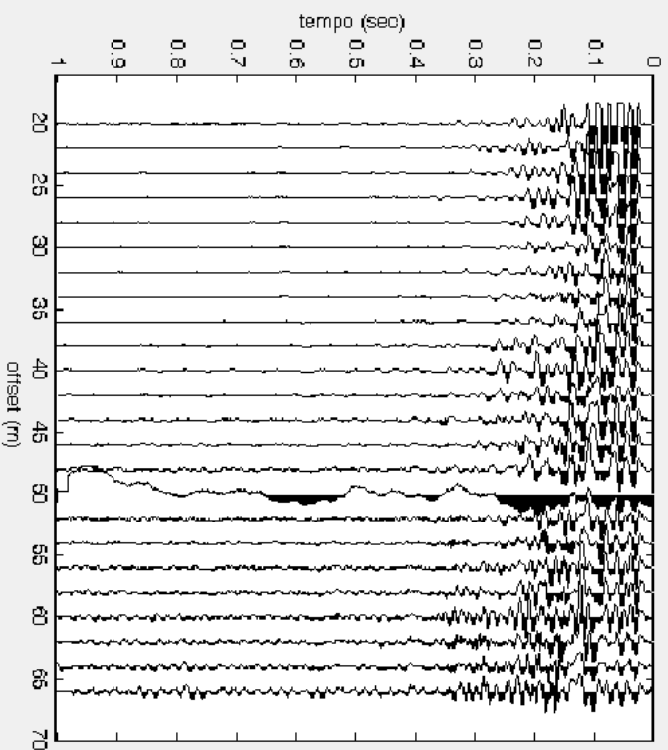


## GRAFICI “COMMON-SHOT GATHER” E SPETTRO DI VELOCITA’

primo passo: caricamento dati

input file

dataset: 20-mazza-som.SGY  
offset minimo: 20 m  
distanza intergeofonica: 2 m  
campionamento: 0.131 msec



ruota le tracce

move

?

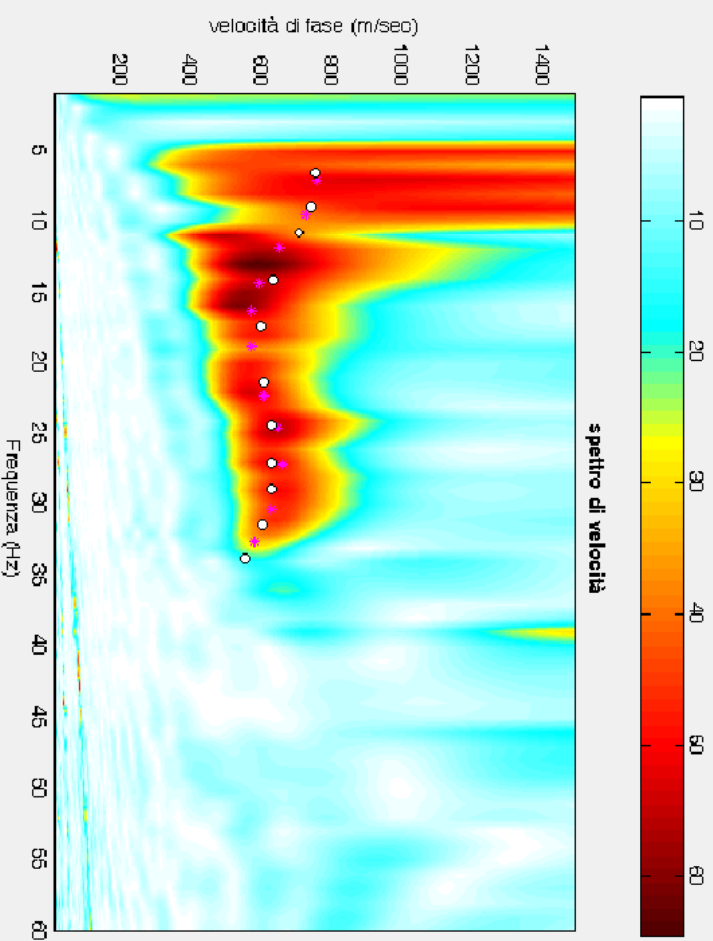
secondo passo: determinazione dello spettro di velocità

calcolo spettro di velocità

visualizza curve

input curve

?



picking

modo fondamentale

selezionare l'ultimo punto del modo  
utilizzando il tasto destro

salva picking

?

modellazione diretta

parametri

refresh

inversione

Esci

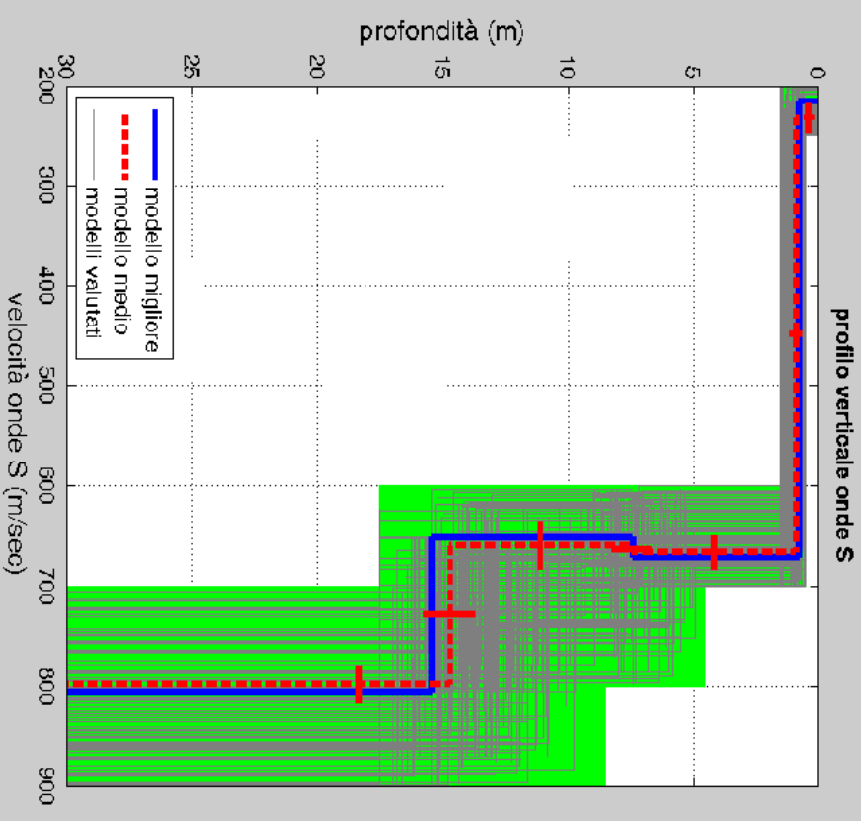
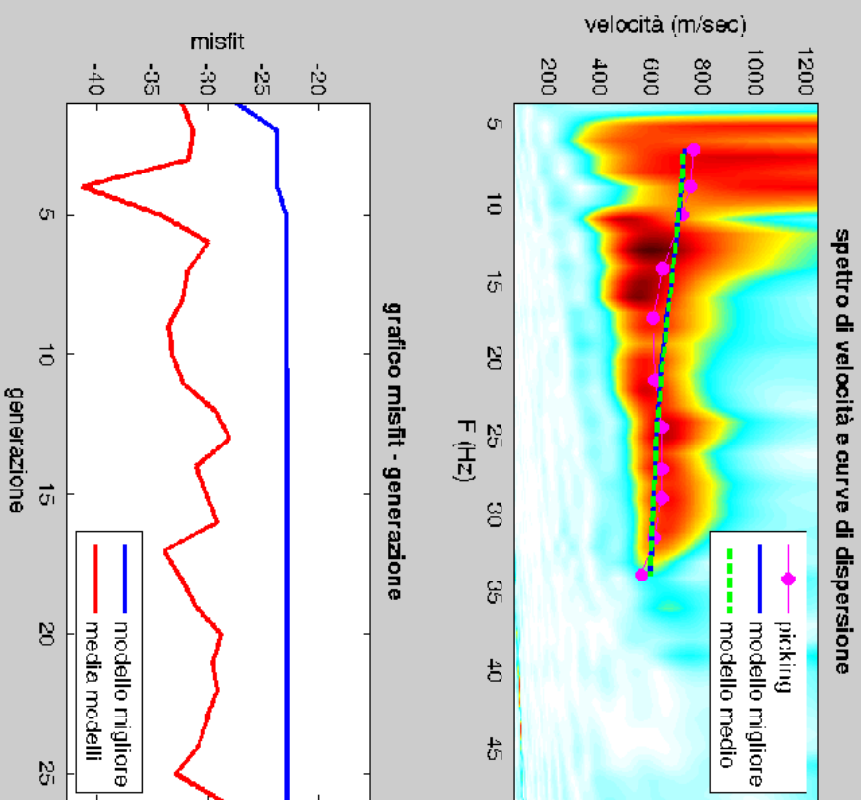


www.eliosoft.it

invia e-mail

salva schermata

## GRAFICI ELABORAZIONI E PROFILO VERTICALE ONDE S





## REPORT DI CALCOLO

### INDAGINE MASW LOC. POMARANCE

Numero totale di punti (coppie frequenza-velocità) della curva di dispersione: 11

dataset: 20-mazza-som.SGY  
offset minimo (m): 20  
distanza intergeofonica (m): 2  
campionamento (msec): 0.131  
curva di dispersione: 20pic\_bis.cdp  
Numero di individui: 15  
Numero di generazioni: 26

Spazio di ricerca utilizzato (VS e spessori minimi):	200	0.5	600	4	600	4	700
Spazio di ricerca utilizzato (VS e spessori massimi):	250	1.5	700	8	800	8	900
Poisson adottato:	0.35		0.35		0.35		0.3

Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 1; misfit medio e migliore:	-32.3513	-27.3964
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 2; misfit medio e migliore:	-31.399	-23.6892
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 3; misfit medio e migliore:	-31.7406	-23.6892
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 4; misfit medio e migliore:	-41.3419	-23.6892
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 5; misfit medio e migliore:	-34.3399	-22.9212
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 6; misfit medio e migliore:	-30.0261	-22.9212
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 7; misfit medio e migliore:	-31.8511	-22.9212
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 8; misfit medio e migliore:	-32.2285	-22.9212
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 9; misfit medio e migliore:	-33.5808	-22.9212
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 10; misfit medio e migliore:	-33.2306	-22.9212
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 11; misfit medio e migliore:	-32.2862	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 12; misfit medio e migliore:	-29.3725	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 13; misfit medio e migliore:	-28.0495	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 14; misfit medio e migliore:	-31.0899	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 15; misfit medio e migliore:	-30.1156	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 16; misfit medio e migliore:	-29.1712	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 17; misfit medio e migliore:	-33.9648	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 18; misfit medio e migliore:	-32.4358	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 19; misfit medio e migliore:	-31.0934	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 20; misfit medio e migliore:	-28.8221	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 21; misfit medio e migliore:	-29.5501	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 22; misfit medio e migliore:	-29.1661	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 23; misfit medio e migliore:	-30.1123	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 24; misfit medio e migliore:	-30.8886	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 25; misfit medio e migliore:	-32.8991	-22.8271
Ottimizzazione VS e spessori - generazione: 26; misfit medio e migliore:	-28.6297	-22.8271
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 1; misfit medio e migliore:	-22.9072	-22.7956
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 2; misfit medio e migliore:	-22.8643	-22.7514
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 3; misfit medio e migliore:	-22.8623	-22.7514
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 4; misfit medio e migliore:	-22.8527	-22.7488
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 5; misfit medio e migliore:	-22.8452	-22.7488
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 6; misfit medio e migliore:	-22.8188	-22.7488
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 7; misfit medio e migliore:	-22.85	-22.7488
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 8; misfit medio e migliore:	-22.8698	-22.7488
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 9; misfit medio e migliore:	-22.8493	-22.7488
Ottimizzazione VP e densità - generazione: 10; misfit medio e migliore:	-22.8099	-22.7475

Numero di modelli utilizzati per il calcolo del modello medio: 330

#####  
RISULTATI winMASW 3.0  
#####

Dataset: 20-mazza-som.SGY  
Curva analizzata: 20pic\_bis.cdp

#### =====

#### MODELLO MEDIO

VS (m/sec):	231	666	660	798
Deviazione standard (m/sec):	15	17	23	18

Spessore (m):	0.9	6.6	7.3	
Deviazione standard (m):	0.2	0.8	1.0	
Stima approssimativa di Vp, densità e moduli elastici				
Stima della Vp (m/sec):	459	1399	1348	1531
Stima della densità (gr/cm3):	1.87	2.14	2.13	2.16
Rapporto VP/VS:	1.99	2.10	2.04	1.92
Modulo di Poisson:	0.33	0.35	0.34	0.31
Modulo di Young (MPa):	265	2564	2487	3609
Modulo di Taglio (MPa):	100	947	926	1374
Costante di Lamé (MPa):	194	2285	2011	2309
Modulo di compressione (MPa):	260	2917	2629	3225

modo: 0 (modo fondamentale)

modello medio

f (Hz)	VR (m/sec)
6.58548	718.5627
8.97151	709.6025
10.8153	700.7788
14.1774	680.3787
17.4311	657.9579
21.3355	633.7902
24.3722	619.3862
27.0836	609.5576
28.9274	604.1431
31.4219	598.0194
33.8079	593.0893

=====

MODELLO MIGLIORE

VS (m/sec):	215.901	671.4472	650.9105	805.5694
spessore (m):	0.79994	6.6478	8	

Stima approssimativa di Vp, densità e moduli elastici				
Stima della VP (m/sec):	455	1408	1285	1581
Stima della densità (gr/cm3):	1.86	2.14	2.11	2.17
Rapporto VP/VS:	2.11	2.10	1.97	1.96
Modulo di Poisson:	0.35	0.35	0.33	0.32
Modulo di Young (MPa):	236	2604	2379	3726
Modulo di Taglio (MPa):	87	962	896	1407
Costante di Lamé (MPa):	212	2312	1699	2599
Modulo di compressione (MPa):	270	2954	2297	3537

curva di dispersione (frequenza - velocità di fase onde di Rayleigh)

modo: 0 (modo fondamentale)

modello migliore

F (Hz)	VR (m/sec)
6.58548	723.8264
8.97151	713.3489
10.8153	702.8879
14.1774	678.9104
17.4311	654.0365
21.3355	629.874
24.3722	616.8765
27.0836	608.6154
28.9274	604.2812
31.4219	599.5672
33.8079	595.9092

Massima Profondità di Penetrazione in Approssimazione "Steady State Rayleigh Method": 46 m

Qualità inversione: molto buona

VS5 del modello medio:	497 m/sec
VS5 del modello migliore:	502 m/sec

VS20 del modello medio:	637 m/sec
VS20 del modello migliore:	634 m/sec

VS30 del modello medio:	683 m/sec
VS30 del modello migliore:	682 m/sec

=====

winMASW 3.0

Software per la determinazione dello spettro di velocità e l'inversione della curva di dispersione secondo il metodo MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves - [www.eliosoft.it](http://www.eliosoft.it)