



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n. 77

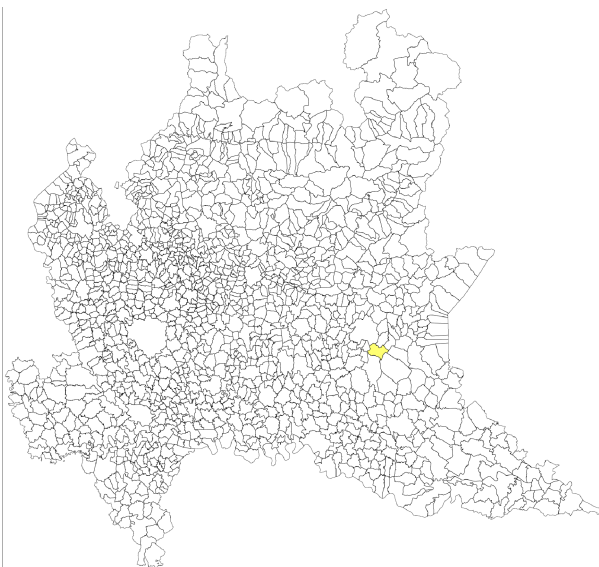
MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione Illustrativa

Allegato 2

Dati geofisici – Nuove acquisizioni

Regione Lombardia
Comune di Castenedolo



Comune di Castenedolo



Via XV Giugno 1859, 1
25014 CASTENEDOLO (BS)

Soggetto realizzatore

Dott. Geol. Laura Ziliani

Dott. Geol. Gianantonio Quassoli

Dott. Ing. Massimo Pilati

Data

Luglio 2018

1 CENNI SULLA METODOLOGIA MASW

MASW è l'acronimo di Multi-channel Analysis of Surface Waves (Analisi Multi-canale delle Onde di Superficie). Con un'indagine di tipo MASW è possibile analizzare il fenomeno della dispersione che le onde di superficie subiscono in un mezzo stratificato.

Ogni componente (frequenza) che compone le onde di superficie è infatti influenzata dalle proprietà del mezzo in cui si muove a partire dalla superficie sino ad una profondità proporzionale alla sua lunghezza d'onda (λ) e pari approssimativamente un terzo della lunghezza d'onda della singola componente.

Le MASW attive sono realizzate tramite analisi delle onde superficiali (di Rayleigh o di Love) prodotte dall'interazione delle onde di volume (P e S) con una superficie di discontinuità fisica. Le onde di Rayleigh, e più precisamente la loro componente verticale, vengono generate da una sorgente mediante un impatto verticale e registrate tramite geofoni verticali a bassa frequenza.

Il principio dell'analisi delle onde di superficie prevede che, poiché la loro dispersione dipende dalle caratteristiche del sottosuolo e dalle sue variazioni verticali, dalla determinazione delle curve di dispersione del segnale è possibile ricavare le caratteristiche fondamentali del mezzo quali ad esempio la velocità delle onde di taglio V_s e lo spessore degli strati.

La velocità delle onde di Rayleigh (V_R) infatti è correlabile alla V_s , essendo pari a circa il 90% della velocità delle onde di taglio.

L'analisi del fenomeno della dispersione, che avviene attraverso la curva di dispersione, permette quindi di determinare le caratteristiche del sottosuolo.

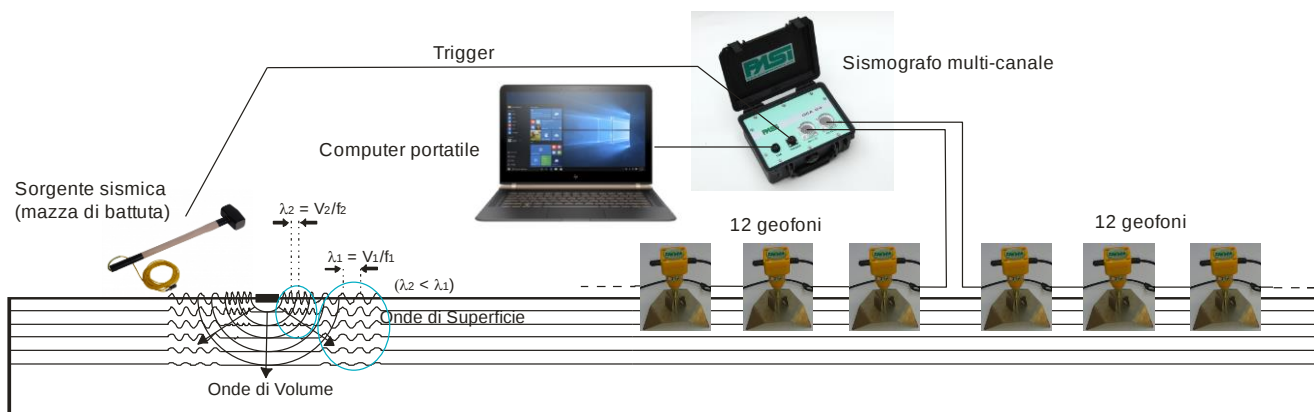
La curva di dispersione è ottenuta mediante il passaggio dal dominio spazio-tempo (sismogramma) al dominio velocità di fase/frequenza (spettro di velocità) effettuato mediante specifica operazione con software dedicato.

Tenuto conto degli scopi di uno Studio di Microzonazione Sismica si ritiene che la metodologia di analisi MASW risulti idonea alla definizione dei dati richiesti. Tale scelta risulta avvalorata dalle seguenti considerazioni:

- La percentuale di energia convertita in onde Rayleigh è di gran lunga maggiore (67%) rispetto a quella coinvolta nella propagazione delle onde P (7%) ed S (26%).
- La propagazione e dispersione delle onde di Rayleigh si verifica senza problemi anche in caso di inversioni di velocità. Rispetto alla sismica a rifrazione, infatti, il metodo MASW non presenta problemi legati alla presenza di strati soffici compresi tra strati più rigidi.
- La propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_p e dalla densità, è funzione innanzitutto della V_s , parametro di fondamentale importanza nella caratterizzazione geotecnica di un sito (D.M. 17/01/2018).

2 ACQUISIZIONE DATI

L'acquisizione dei dati è avvenuta mediante registrazione della propagazione delle onde di Rayleigh generate da una sorgente ad impatto (martellata), tramite uno stendimento sismico di 24 geofoni a componente verticale.



La strumentazione utilizzata è la seguente:

- Sorgente meccanica in grado di generare onde elastiche direzionali e ricche di energia realizzata mediante l'impatto verticale su un piattello di battuta in alluminio (20x20x5 cm) di una mazza (8 kg), completa di starter piezoelettrico (hammer switch).
- Sistema di ricezione costituito da 24 geofoni verticali con frequenza di 4.5 Hz e puntale da 3" (o tripodi in alluminio per acquisizioni su superfici rigide).
- Sistema di trasmissione costituito da 2 cavi sismici da 75 m a 12 tracce – intervallo 5 m - con connettori NK2721C e attacchi singoli
- Sistema di acquisizione costituito da sismografo multicanale "PASI S.r.l" modello "GEA24" a 24 canali+trigger (AUX)
- Sistema di analisi e memorizzazione del dato costituito da un notebook Asus M70VM con CPU Duo T9400 e 4 GB di RAM

3 ANALISI ED ELABORAZIONE DEI SEGNALE ACQUISITI

3.1 Determinazione degli spettri di velocità ed individuazione delle curve di dispersione

L'elaborazione delle tracce sismiche raccolte in sito è stata effettuata utilizzando il software winMASW® (Eliosoft).

La stima dell'andamento in profondità delle velocità V_s , mediante acquisizione sismica multicanale, è ottenuta tramite l'analisi del segnale nel dominio frequenza/velocità di fase.

Dopo aver scelto quindi il sismogramma più idoneo, quello solitamente con il miglior rapporto segnale/rumore, è stata eseguita una trasformata dal dominio spazio/tempo al dominio frequenza/velocità.

Nella trasformazione viene indicato come unico vincolo le massime e minime velocità e frequenze (in altri termini i limiti dello spettro di velocità).

Viene utilizzato lo spettro di velocità in quanto è il dominio dove è chiaramente più immediato e naturale comprendere le proprietà dispersive del segnale registrato, determinando con precisione la velocità di ciascuna componente del segnale stesso.

Particolare attenzione nell'interpretazione della curva di dispersione è posta in considerazione del fatto che le vibrazioni indotte dalle onde di superficie sono correlabili a diversi modi, che possono sovrapporsi all'interno dello spettro di velocità.

Se avviene tale sovrapposizione, può generarsi una curva di dispersione apparente, che può risultare fuorviante in fase di interpretazione. Al fine di individuare i modi correlabili alla reale successione stratigrafica è stato scelto di eseguire ed analizzare più scoppi sismici ad Offset variabili. Tutte le curve di dispersione vengono quindi visionate prima di procedere al processing del dataset prescelto. I modi superiori se correttamente riconosciuti, concorrono ad elaborare un modello maggiormente vincolato e preciso.

L'interpretazione dello spettro di velocità è stato effettuato mediante l'individuazione della curva di dispersione eseguendo il picking lungo gli allineamenti di massima energia del segnale.

Prima di procedere al picking è stato individuato, mediante modellazione diretta, il modo fondamentale e laddove presente il primo modo superiore che sono stati utilizzati per la successiva inversione della curva di dispersione.

Il modelling diretto è stato quindi utilizzato, mediante il programma di elaborazione, per una verifica finale e di partenza del modello di velocità ottenuto mediante inversione con algoritmi.

3.2 Determinazione dell'andamento della velocità delle onde di taglio (V_s) lungo la verticale mediante Inversione e/o modelling diretto della curva di dispersione

La ricostruzione della distribuzione verticale delle V_s ha rappresentato il passo successivo. Dalla curva di dispersione delle onde di Rayleigh è necessario ricostruire il modello sismi-stratigrafico che è responsabile di quella curva effettuando un'inversione; si ricava cioè il modello di sottosuolo che ha determinato il dato di campagna.

La curva di dispersione dipende, oltre che dalla velocità delle onde di taglio (V_s), anche dallo spessore degli strati, e in minima parte dalla velocità delle onde di compressione (V_p) e dalla densità del terreno.

Ciò implica che la determinazione delle V_s a partire dalla curva di dispersione e quindi dalla Velocità di fase $V_{(f)}$ costituisce un problema non lineare. Per la sua risoluzione il software winMASW® (Eliosoft) procede all'utilizzo di algoritmi basati su un approccio non lineare che vanno a valutare il "misfit" e quindi a minimizzare i valori di differenza tra curva piccata e la curva del modello considerato. Gli algoritmi utilizzati offrono una ricerca molto ampia delle possibili soluzioni. A differenza dei metodi lineari non è necessario fornire alcun modello di partenza.

Risulta invece necessario definire uno “spazio di ricerca” all’interno del quale vengono valutate diverse possibili soluzioni. Questo è stato scelto anche in funzione dei riscontri ottenuti dalla modellazione diretta, eseguita precedentemente e dalle conoscenze geolitologiche e stratigrafiche dell’area in esame.

4 RISULTATI STENDIMENTI DI SISMICA MASW

4.1 Indagine 017043L6 – (MASW 1 – Via Carlo Alberto dalla Chiesa)

L’ubicazione e la lunghezza dello stendimento sono state scelte in funzione della logistica dei luoghi e delle aree ritenute significative per l’esecuzione delle prospezioni.

L’allineamento sismico ha previsto una distanza tra i geofoni pari a 2.0 m ed una serie di scoppi esterni all’ultimo geofono con offset variabili (1-2-5-10-15 m) e diversa intensità di energizzazione (in maniera da poter eseguire lo stacking verticale per l’attenuazione del rumore incoerente).



Figura 1 – Ubicazione indagine 017043L6 (MASW1-Via Carlo Alberto dalla Chiesa)

4.1.1 *Determinazione dello spettro di velocità e picking della curva di dispersione – MASW1*

La prima operazione effettuata è stata quella di visionare tutte le curve di dispersione per poi procedere al processing del dataset prescelto (*casten_masw1_2018-06-07_0002.dat*).

Si riassumono di seguito alcuni dati relativi ai parametri di acquisizione e di elaborazione utilizzati:

Stacking shot 1 e shot 2 – dataset: *casten_masw1_2018-06-07_0002.dat*

offset del dataset utilizzato: 5 m

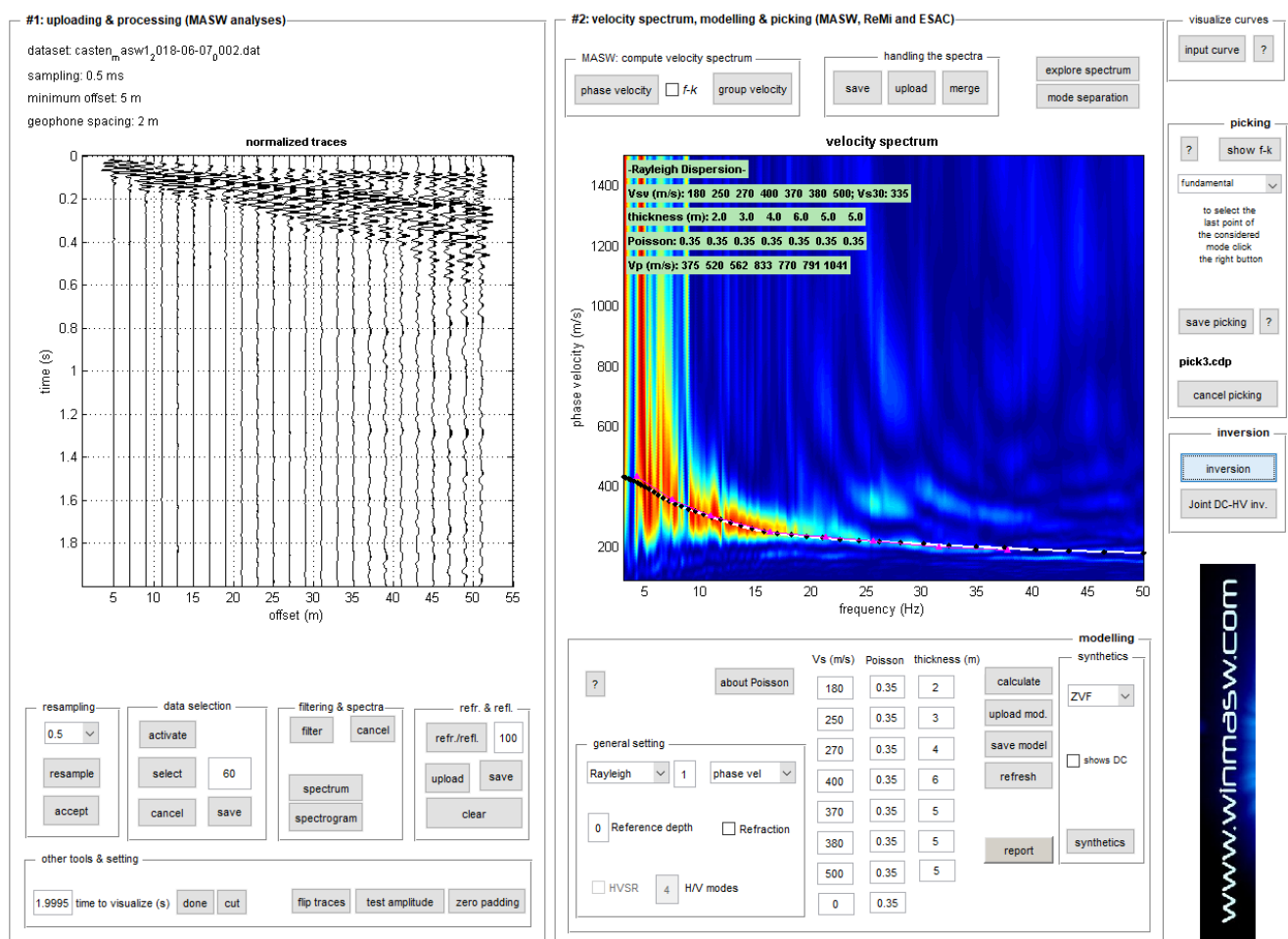
distanza intergeofonica: 2.0 m

Frequenza di campionamento: 0.5 ms

Tempo di acquisizione: 2 s

Una volta caricati i dati si procede con il calcolo dello spettro di velocità. Viene indicato come unico vincolo le massime e minime velocità e frequenze (in altri termini i limiti dello spettro di velocità).

Nel caso in esame è stato individuato, dapprima mediante modellazione diretta, un unico modo principale utilizzato per la successiva inversione della curva di dispersione.

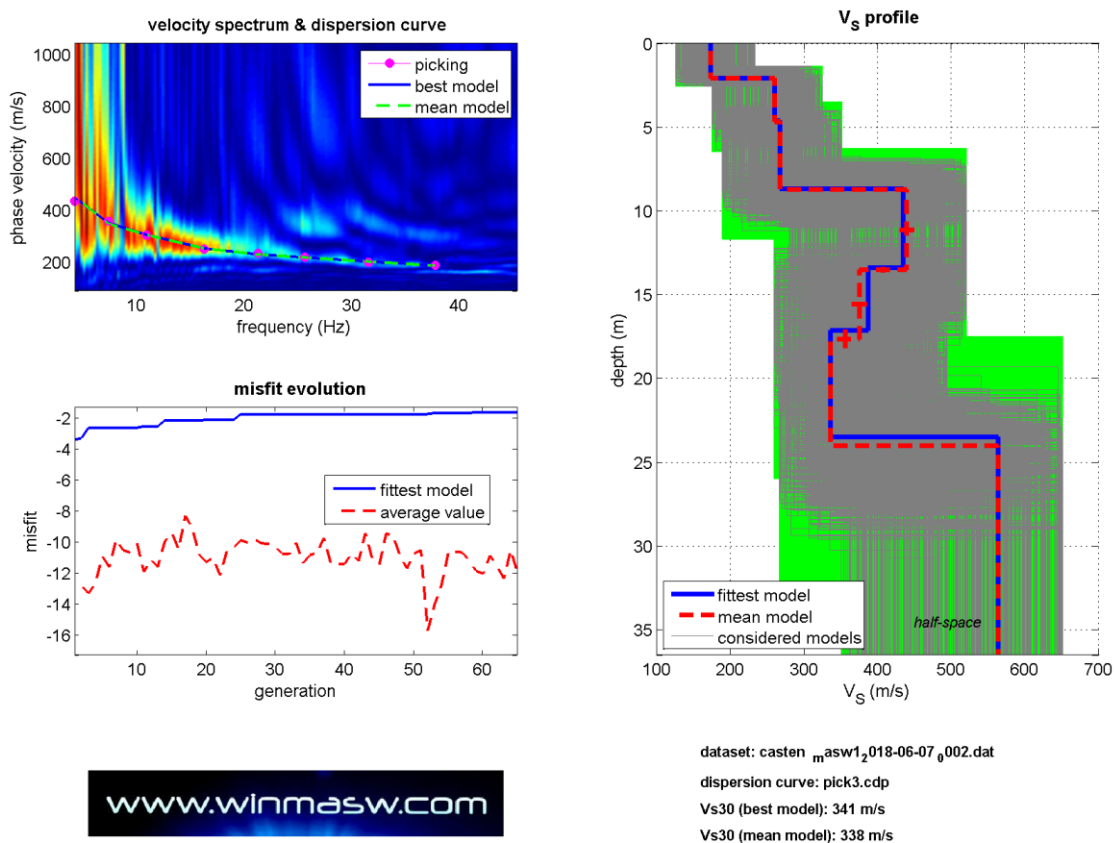


4.1.2 Inversione della curva di dispersione – MASW1

Il secondo passo da affrontare per ottenere il profilo verticale della Vs è l'inversione della curva di dispersione precedentemente "piccata".

Nel contesto in esame poiché il gradiente di velocità potrebbe subire variazioni drastiche non è valida, per determinare il possibile spazio di ricerca, la cosiddetta assunzione $\lambda/3$ (data una certa lunghezza d'onda λ si assume che la sua velocità di propagazione dipenda dalle caratteristiche del mezzo ad una profondità pari a $\lambda/3$). I limiti del search space (“spazio di ricerca” o “spazio dei parametri”) prescelti sono quindi piuttosto ampi.

Per l'elaborazione del modello di velocità è stato impostato l'utilizzo di 7 strati, compatibile con l'assetto stratigrafico del sito d'interesse, desunto anche dalle stratigrafie dei pozzi disponibili e con le finalità del presente studio.



4.1.3 Profilo Sismostratigrafico – MASW1

Nella seguente tabella sono stati riportati i valori delle velocità medie e gli spessori di ciascun sismostrato, ottenuti mediante analisi con metodologia MASW, in modo da definire un modello geofisico medio.

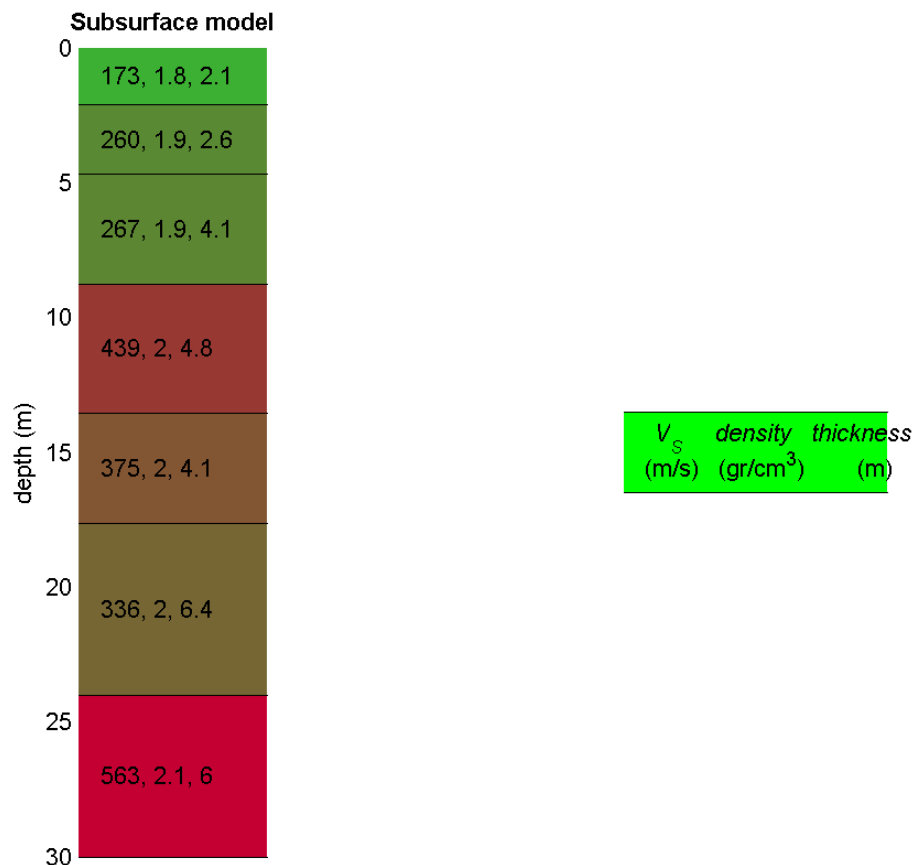
Si riportano anche, in maniera indicativa, le stime dei valori di V_p , densità e modulo di Poisson eseguite dal software di elaborazione.

Poiché, come già ricordato, la dispersione delle onde di Rayleigh dipende essenzialmente dalla V_s e degli spessori degli strati (cioè dalla geometria), tali valori di densità e V_p devono essere considerati solamente come stime largamente approssimative.

Viene riportato, inoltre, il valore del modulo di taglio che tra i moduli elastici è l'unico che non dipende da V_p , ma solamente da V_s e densità e quindi rappresenta una stima maggiormente significativa.

Indagine 017043L6 (MASW1-Via Carlo Alberto dalla Chiesa)								
MODELLO GEOFISICO MEDIO								
Sismostrato	Vs (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)	Stima della Vp (m/s)	Vp/Vs	Stima densità (g/cm ³)	Modulo di Poisson	Modulo di Taglio (MPa)
1	173	2.1	2.1	366	2.12	1.81	0.36	54
2	260	2.6	4.7	549	2.11	1.91	0.36	129
3	267	4.1	8.8	546	2.04	1.91	0.34	136
4	439	4.8	13.6	918	2.09	2.03	0.35	392
5	375	4.1	17.7	805	2.15	2.00	0.36	281
6	336	6.4	24.1	701	2.09	1.97	0.35	222
7	563	6	30	1059	1.88	2.07	0.30	655

Di seguito si riporta una sezione sismo-stratigrafica schematica.



Si sottolinea che i parametri sopra riportati sono riferiti a moduli dinamici e quindi a condizioni di bassa deformazione. I valori ottenuti sono stati infatti stimati in base alle deformazioni indotte nel terreno dalla propagazione delle onde sismiche. L'entità ridotta di tali deformazioni comporta alti valori dei moduli dinamici calcolati. Per deformazioni significativamente superiori, come di norma nei calcoli geotecnici, i valori stimati dovranno quindi essere idoneamente corretti tenendo conto della funzione matematica che ne regola la diminuzione in funzione dello sforzo applicato.

4.2 Indagine 017043L7 – (MASW 2 – Parco Pisa)

L'ubicazione e la lunghezza dello stendimento sono state scelte in funzione della logistica dei luoghi e delle aree ritenute significative per l'esecuzione delle prospezioni.

L'allineamento sismico ha previsto una distanza tra i geofoni pari a 2.0 m ed una serie di scoppi esterni all'ultimo geofono con offset variabili (1-2-5-10-15 m) e diversa intensità di energizzazione (in maniera da poter eseguire lo stacking verticale per l'attenuazione del rumore incoerente).



Figura 2 – Ubicazione indagine 017043L7 (MASW2 - Parco Pisa)

4.2.1 *Determinazione dello spettro di velocità e picking della curva di dispersione – MASW2*

La prima operazione effettuata è stata quella di visionare tutte le curve di dispersione per poi procedere al processing del dataset prescelto (*casten_masw2_2018-06-07_0000.dat*).

Si riassumono di seguito alcuni dati relativi ai parametri di acquisizione e di elaborazione utilizzati:

Stacking shot 1 e shot 2 – dataset: casten_masw2_2018-06-07_0000.dat

offset del dataset utilizzato: 15 m

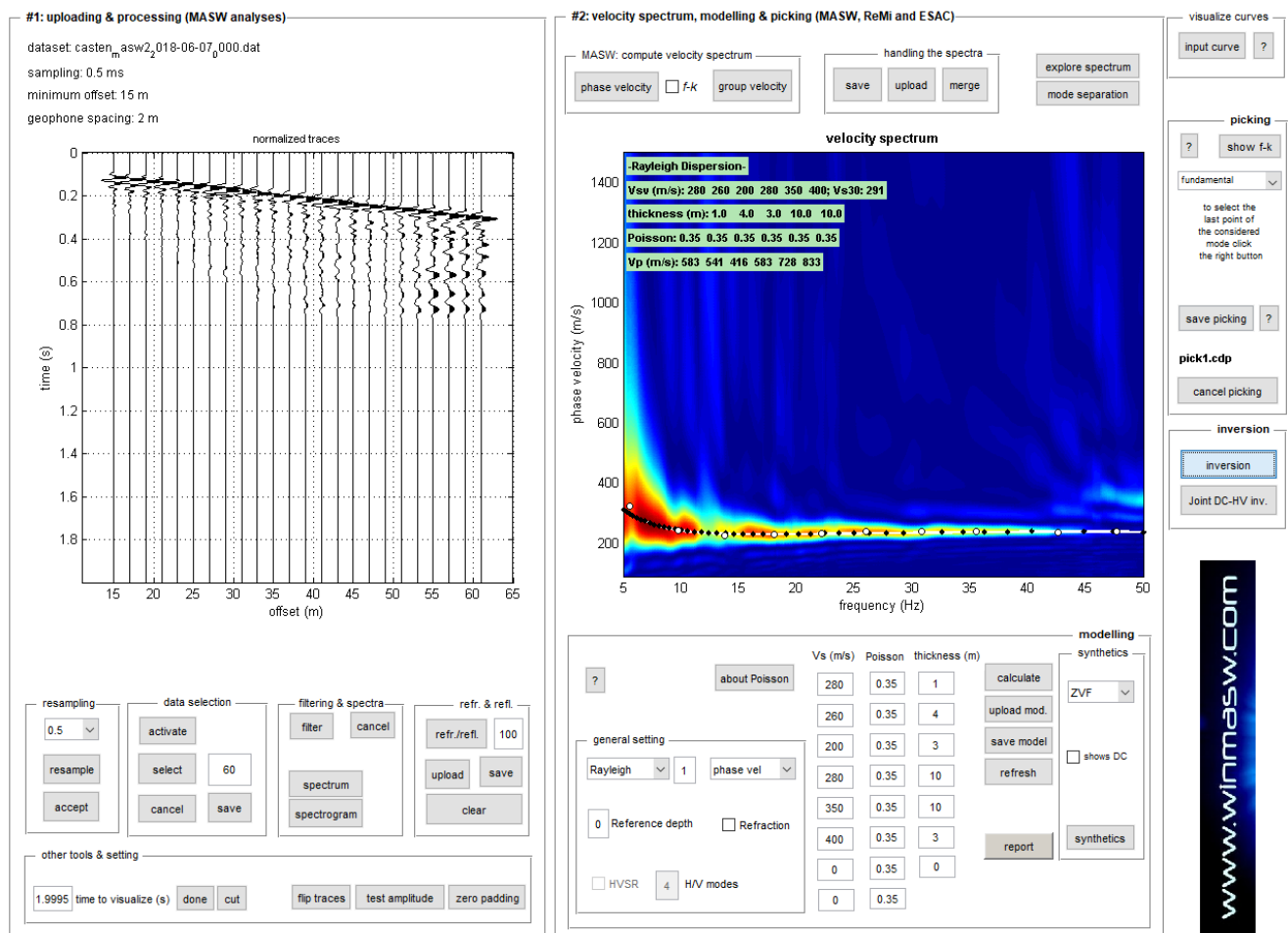
distanza intergeofonica: 2.0 m

Frequenza di campionamento: 0.5 ms

Tempo di acquisizione: 2 s

Una volta caricati i dati si procede con il calcolo dello spettro di velocità. Viene indicato come unico vincolo le massime e minime velocità e frequenze (in altri termini i limiti dello spettro di velocità).

Nel caso in esame è stato individuato, dapprima mediante modellazione diretta, un unico modo principale utilizzato per la successiva inversione della curva di dispersione.

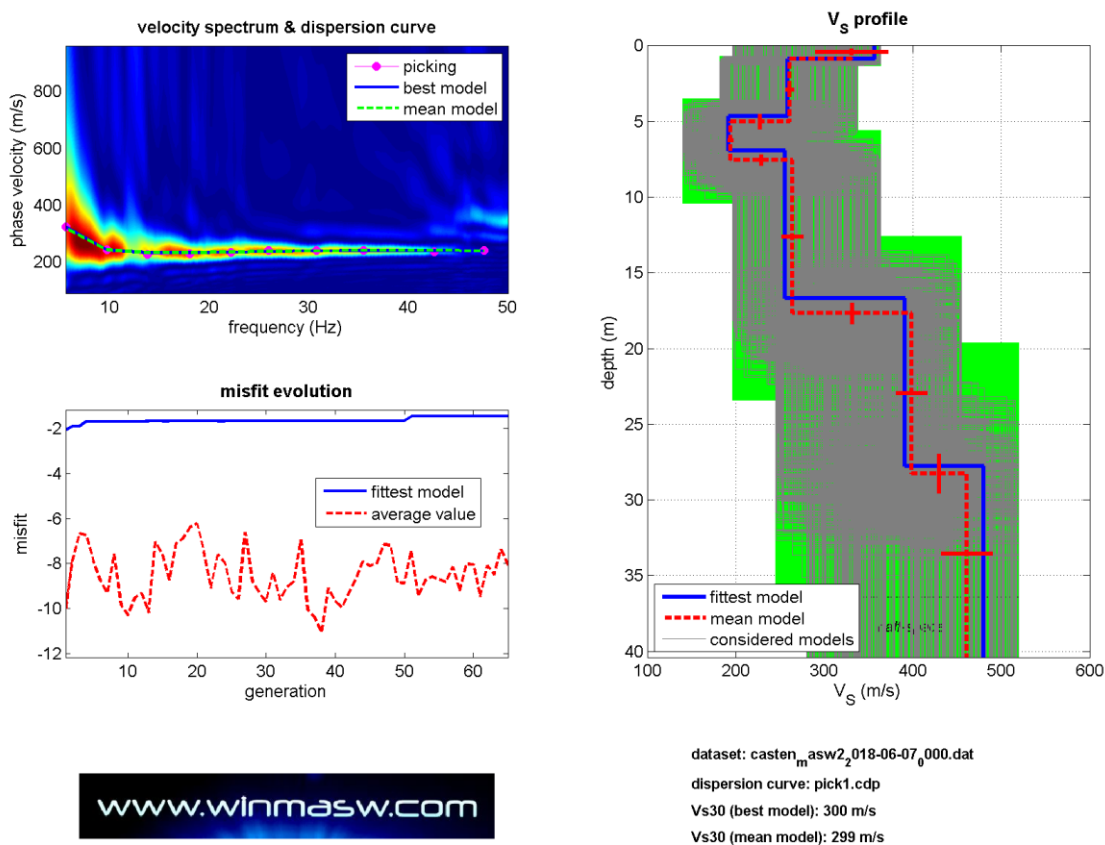


4.2.2 Inversione della curva di dispersione – MASW2

Il secondo passo da affrontare per ottenere il profilo verticale della Vs è l'inversione della curva di dispersione precedentemente "piccata".

Nel contesto in esame poiché il gradiente di velocità potrebbe subire variazioni drastiche non è valida, per determinare il possibile spazio di ricerca, la cosiddetta assunzione $\lambda/3$ (data una certa lunghezza d'onda λ si assume che la sua velocità di propagazione dipenda dalle caratteristiche del mezzo ad una profondità pari a $\lambda/3$). I limiti del search space ("spazio di ricerca" o "spazio dei parametri") prescelti sono quindi piuttosto ampi.

Per l'elaborazione del modello di velocità è stato impostato l'utilizzo di 6 strati, compatibile con l'assetto stratigrafico del sito d'interesse, desunto anche dalle stratigrafie dei pozzi disponibili e con le finalità del presente studio.



4.2.3 Profilo Sismostratigrafico – MASW2

Nella seguente tabella sono stati riportati i valori delle velocità medie e gli spessori di ciascun sismostrato, ottenuti mediante analisi con metodologia MASW, in modo da definire un modello geofisico medio.

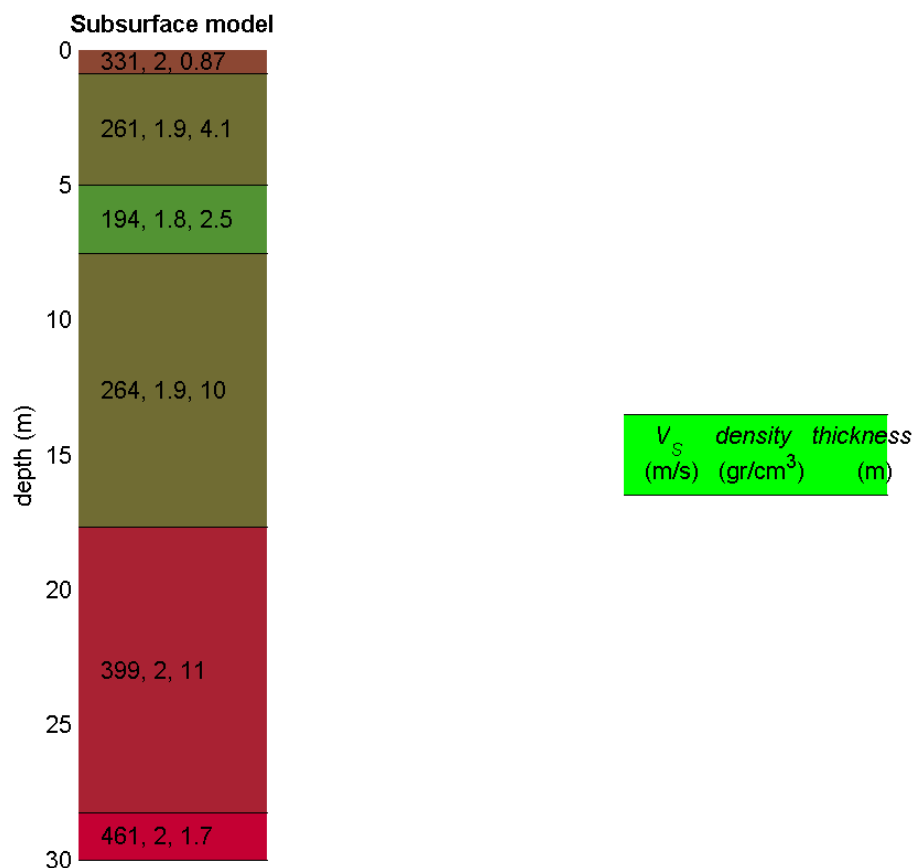
Si riportano anche, in maniera indicativa, le stime dei valori di V_p , densità e modulo di Poisson eseguite dal software di elaborazione.

Poiché, come già ricordato, la dispersione delle onde di Rayleigh dipende essenzialmente dalla V_s e degli spessori degli strati (cioè dalla geometria), tali valori di densità e V_p devono essere considerati solamente come stime largamente approssimative.

Viene riportato, inoltre, il valore del modulo di taglio che tra i moduli elastici è l'unico che non dipende da V_p , ma solamente da V_s e densità e quindi rappresenta una stima maggiormente significativa.

Indagine 017043L7 (MASW2 – Parco Pisa)								
MODELLO GEOFISICO MEDIO								
Sismostrato	V_s (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)	Stima della V_p (m/s)	V_p/V_s	Stima densità (g/cm ³)	Modulo di Poisson	Modulo di Taglio (MPa)
1	331	0.9	0.9	758	2.29	1.99	0.38	218
2	261	4.1	5	554	2.12	1.91	0.36	130
3	194	2.5	7.5	405	2.09	1.84	0.35	69
4	264	10.1	17.6	522	1.98	1.90	0.33	132
5	399	10.6	28.2	813	2.04	2.00	0.34	319
6	461	1.8	30	902	1.96	2.03	0.32	431

Di seguito si riporta una sezione sismo-stratigrafica schematica.



Si sottolinea che i parametri sopra riportati sono riferiti a moduli dinamici e quindi a condizioni di bassa deformazione. I valori ottenuti sono stati infatti stimati in base alle deformazioni indotte nel terreno dalla propagazione delle onde sismiche. L'entità ridotta di tali deformazioni comporta alti valori dei moduli dinamici calcolati. Per deformazioni significativamente superiori, come di norma nei calcoli geotecnici, i valori stimati dovranno quindi essere idoneamente corretti tenendo conto della funzione matematica che ne regola la diminuzione in funzione dello sforzo applicato.

4.3 Indagine 017043L8 – (MASW 3 – Via Risorgimento)

L'ubicazione e la lunghezza dello stendimento sono state scelte in funzione della logistica dei luoghi e delle aree ritenute significative per l'esecuzione delle prospezioni.

L'allineamento sismico ha previsto una distanza tra i geofoni pari a 2.0 m ed una serie di scoppi esterni all'ultimo geofono con offset variabili (1-2-5-10-15 m) e diversa intensità di energizzazione (in maniera da poter eseguire lo stacking verticale per l'attenuazione del rumore incoerente).

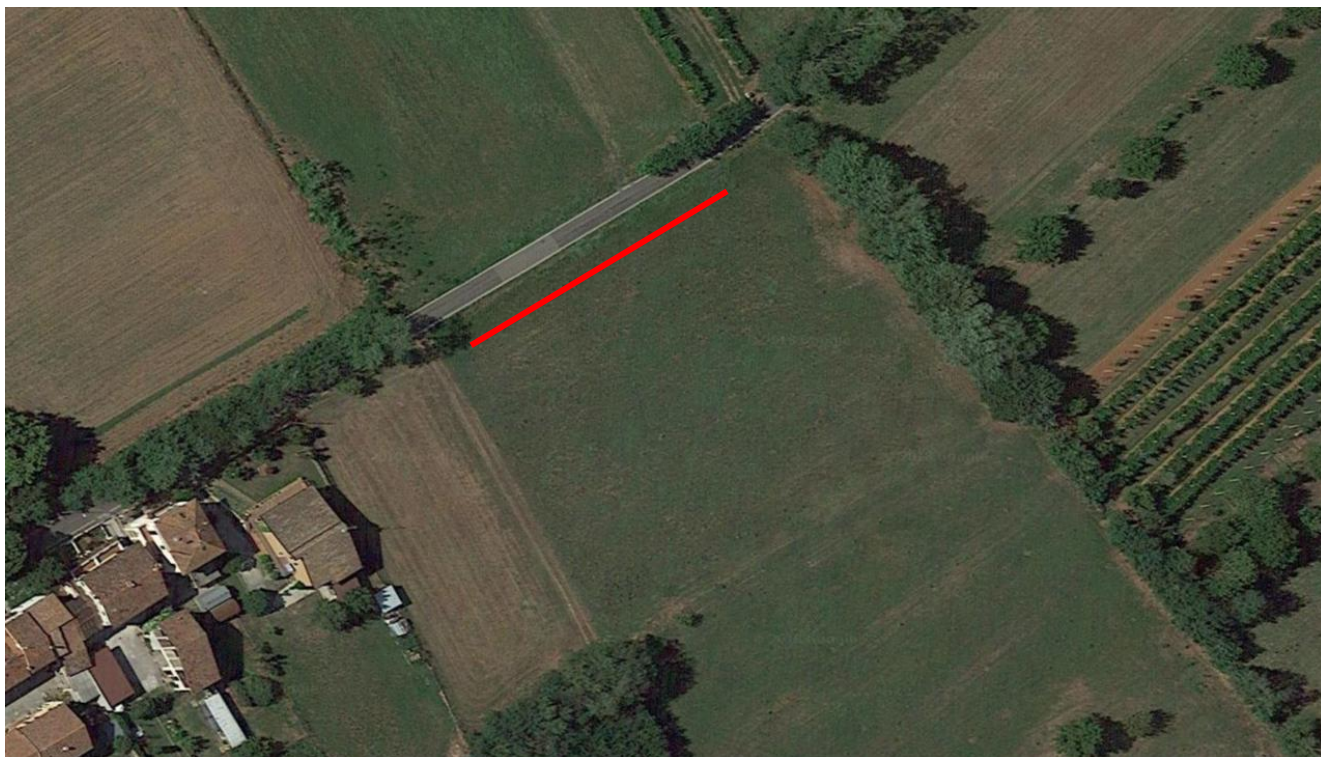


Figura 3 – Ubicazione indagine 017043L8 (MASW3 – Via Risorgimento)

4.3.1 *Determinazione dello spettro di velocità e picking della curva di dispersione – MASW3*

La prima operazione effettuata è stata quella di visionare tutte le curve di dispersione per poi procedere al processing del dataset prescelto (*cast_3_2018-06-19_0004.dat*).

Si riassumono di seguito alcuni dati relativi ai parametri di acquisizione e di elaborazione utilizzati:

Stacking shot 1 e shot 2 – dataset: cast_3_2018-06-19_0004.dat

offset del dataset utilizzato: 1.0 m

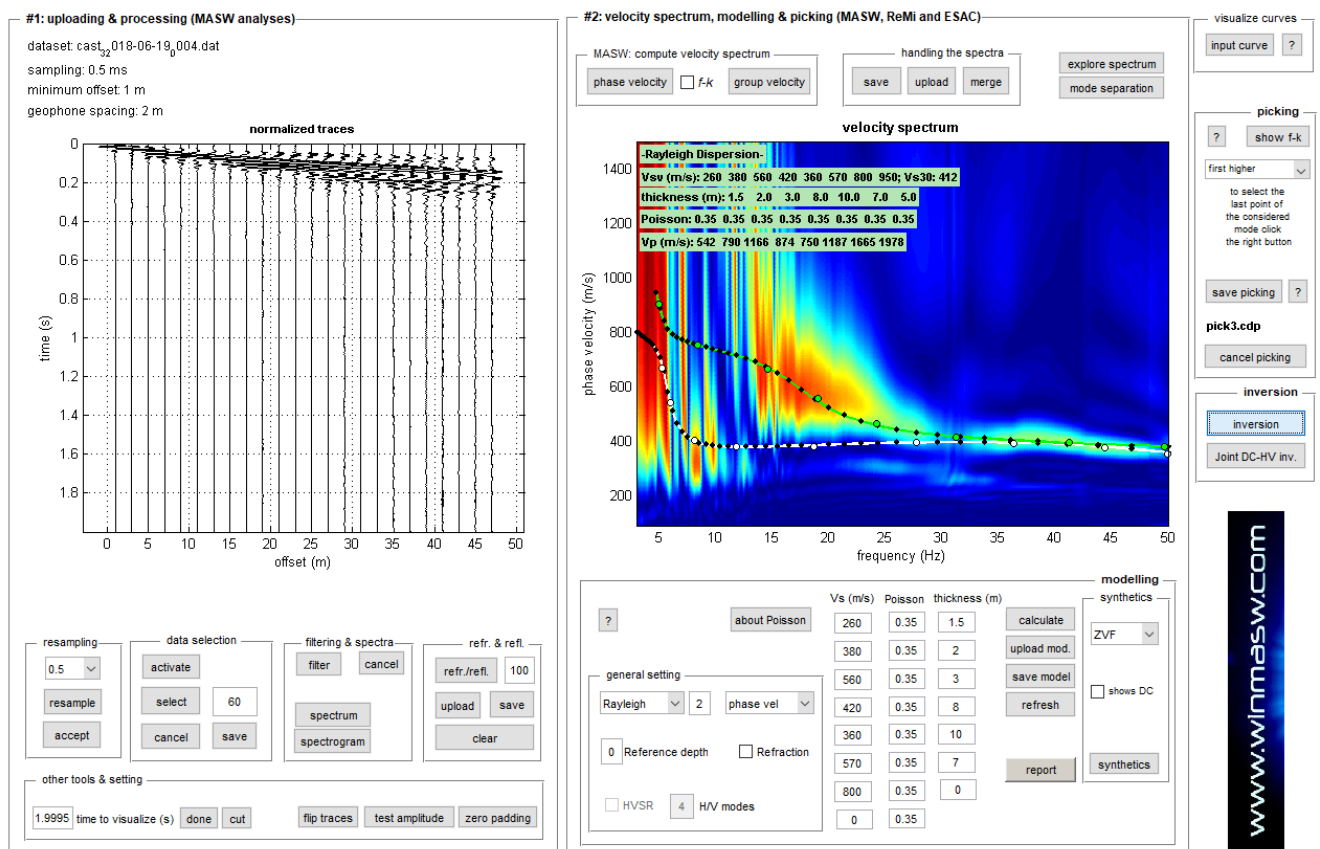
distanza intergeofonica: 2.0 m

Frequenza di campionamento: 0.5 ms

Tempo di acquisizione: 2 s

Una volta caricati i dati si procede con il calcolo dello spettro di velocità. Viene indicato come unico vincolo le massime e minime velocità e frequenze (in altri termini i limiti dello spettro di velocità).

Nel caso in esame sono stati individuati, dapprima mediante modellazione diretta, il modo fondamentale e il primo modo superiore utilizzati per la successiva inversione della curva di dispersione.



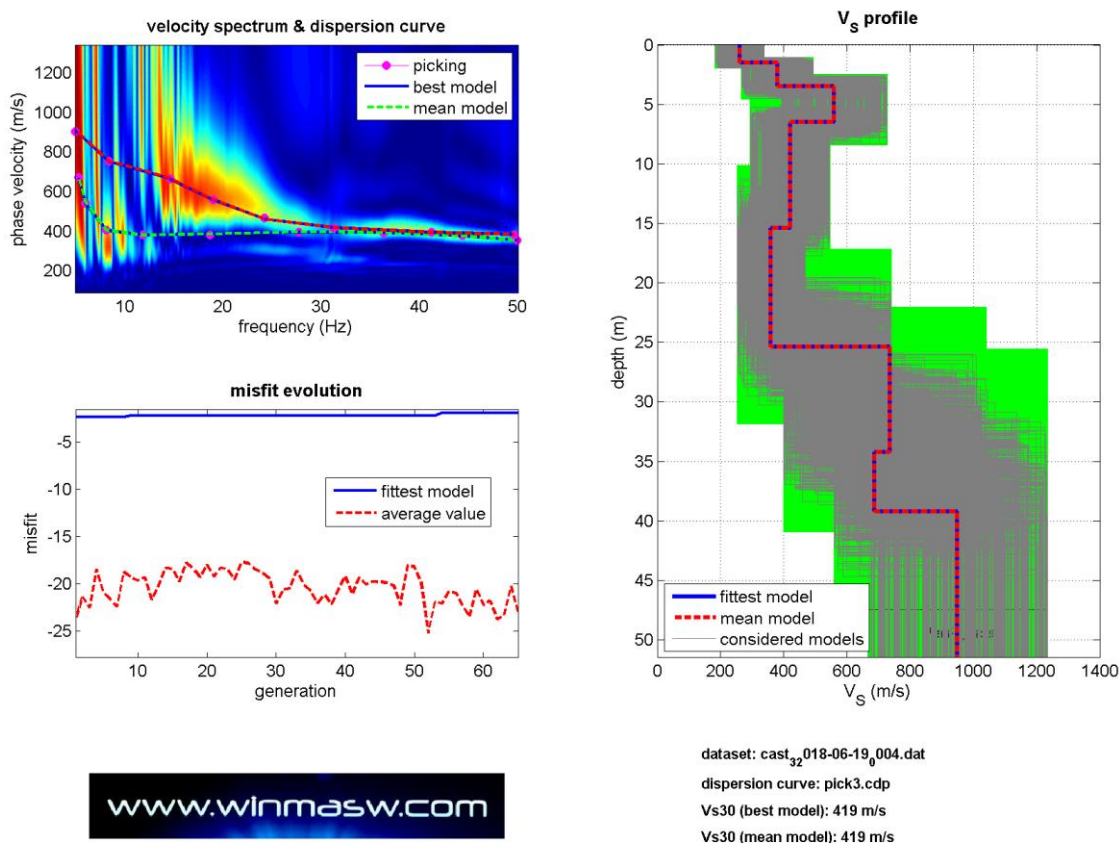
4.3.2 Inversione della curva di dispersione – MASW3

Il secondo passo da affrontare per ottenere il profilo verticale della Vs è l'inversione delle curve di dispersione precedentemente "piccate".

Nel contesto in esame poiché il gradiente di velocità potrebbe subire variazioni drastiche non è valida, per determinare il possibile spazio di ricerca, la cosiddetta assunzione $\lambda/3$ (data una certa lunghezza d'onda λ si assume che la sua velocità di propagazione dipenda dalle caratteristiche del

mezzo ad una profondità pari a $\lambda/3$). I limiti del search space (“spazio di ricerca” o “spazio dei parametri”) prescelti sono quindi piuttosto ampi.

Per l’elaborazione del modello di velocità è stato impostato l’utilizzo di 8 strati, compatibile con l’assetto stratigrafico del sito d’interesse e con le finalità del presente studio.



4.3.3 Profilo Sismostratigrafico – MASW3

Nella seguente tabella sono stati riportati i valori delle velocità medie e gli spessori di ciascun sismostrato, ottenuti mediante analisi con metodologia MASW, in modo da definire un modello geofisico medio.

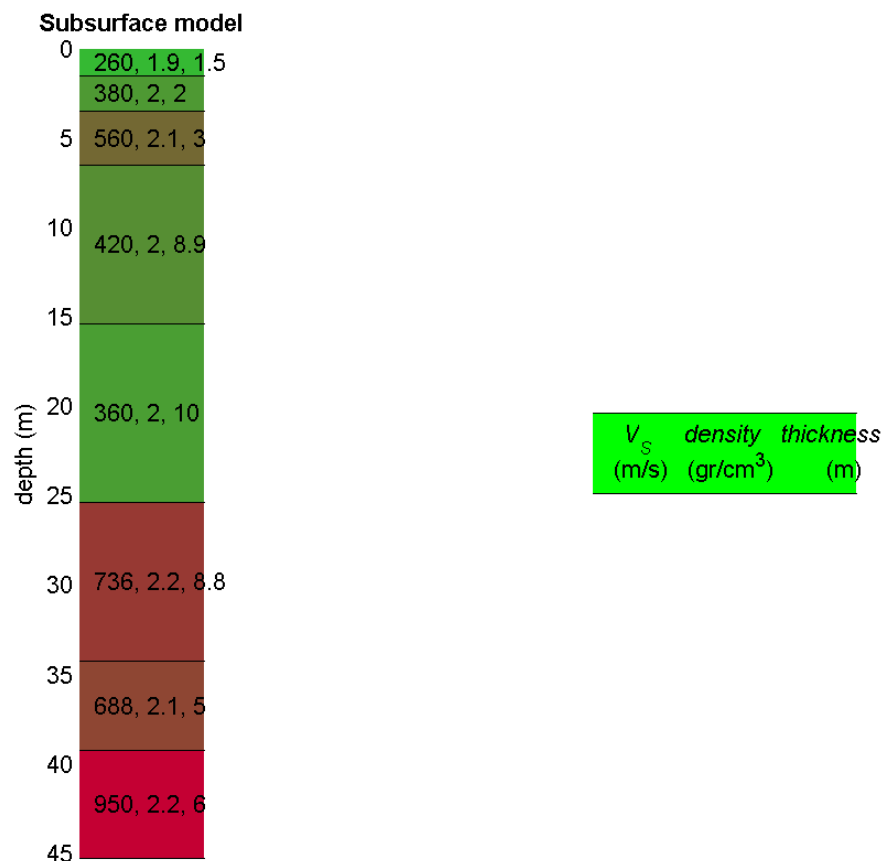
Si riportano anche, in maniera indicativa, le stime dei valori di V_p , densità e modulo di Poisson eseguite dal software di elaborazione.

Poiché, come già ricordato, la dispersione delle onde di Rayleigh dipende essenzialmente dalla V_s e degli spessori degli strati (cioè dalla geometria), tali valori di densità e V_p devono essere considerati solamente come stime largamente approssimative.

Viene riportato, inoltre, il valore del modulo di taglio che tra i moduli elastici è l’unico che non dipende da V_p , ma solamente da V_s e densità e quindi rappresenta una stima maggiormente significativa.

Indagine 017043L8 (MASW3 – Via Risorgimento)								
MODELLO GEOFISICO MEDIO								
Sismostrato	Vs (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)	Stima della Vp (m/s)	Vp/Vs	Stima densità (g/cm ³)	Modulo di Poisson	Modulo di Taglio (MPa)
1	260	1.5	1.5	521	2.00	1.90	0.33	128
2	380	2.0	3.5	769	2.02	1.99	0.34	287
3	560	3.0	6.5	1168	2.09	2.09	0.35	656
4	420	8.9	15.4	874	2.08	2.02	0.35	357
5	360	10.0	25.4	759	2.11	1.99	0.35	258
6	736	8.8	34.2	1543	2.10	2.16	0.35	1170
7	688	5.0	39.2	1476	2.15	2.15	0.36	1017
8	950	6.0	45.2	1788	1.88	2.20	0.30	1981

Di seguito si riporta una sezione sismo-stratigrafica schematica.



Si sottolinea che i parametri sopra riportati sono riferiti a moduli dinamici e quindi a condizioni di bassa deformazione. I valori ottenuti sono stati infatti stimati in base alle deformazioni indotte nel terreno dalla propagazione delle onde sismiche. L'entità ridotta di tali deformazioni comporta alti valori dei moduli dinamici calcolati. Per deformazioni significativamente superiori, come di norma nei calcoli geotecnici, i valori stimati dovranno quindi essere idoneamente corretti tenendo conto della funzione matematica che ne regola la diminuzione in funzione dello sforzo applicato.

4.4 Indagine 017043L9 – (MASW 4 – Via Ten. Olivari)

L'ubicazione e la lunghezza dello stendimento sono state scelte in funzione della logistica dei luoghi e delle aree ritenute significative per l'esecuzione delle prospezioni.

L'allineamento sismico ha previsto una distanza tra i geofoni pari a 2.0 m ed una serie di scoppi esterni all'ultimo geofono con offset variabili (1-2-5-10-15 m) e diversa intensità di energizzazione (in maniera da poter eseguire lo stacking verticale per l'attenuazione del rumore incoerente).



Figura 4 – Ubicazione indagine 017043L9 (MASW4 – Via Ten. Olivari)

4.4.1 *Determinazione dello spettro di velocità e picking della curva di dispersione – MASW4*

La prima operazione effettuata è stata quella di visionare tutte le curve di dispersione per poi procedere al processing del dataset prescelto (*cast_4_2018-06-19_0004.dat*).

Si riassumono di seguito alcuni dati relativi ai parametri di acquisizione e di elaborazione utilizzati:

Stacking shot 1 e shot 2 – dataset: *cast_4_2018-06-19_0004.dat*

offset del dataset utilizzato: 1.0 m

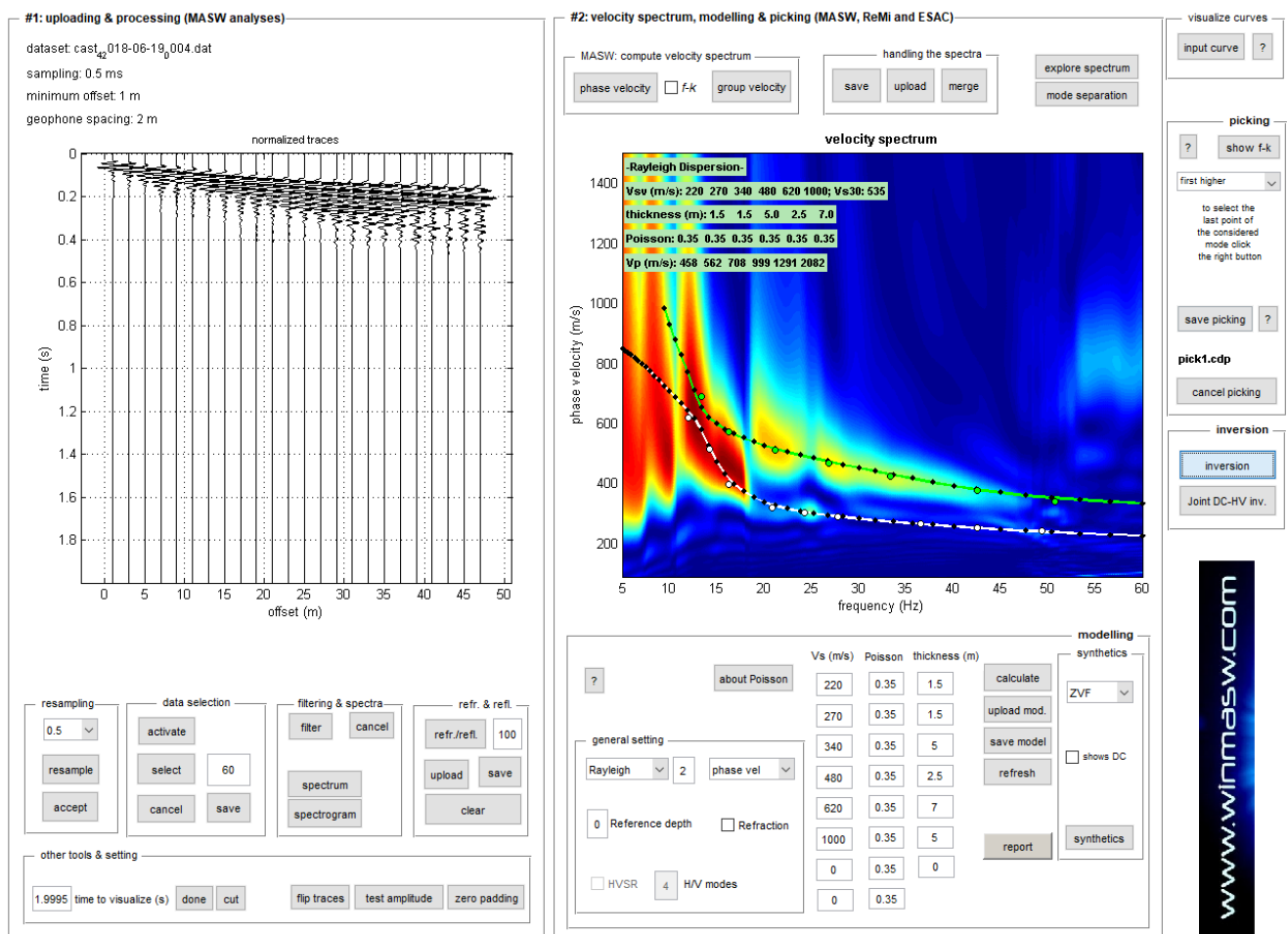
distanza intergeofonica: 2.0 m

Frequenza di campionamento: 0.5 ms

Tempo di acquisizione: 2 s

Una volta caricati i dati si procede con il calcolo dello spettro di velocità. Viene indicato come unico vincolo le massime e minime velocità e frequenze (in altri termini i limiti dello spettro di velocità).

Nel caso in esame sono stati individuati, dapprima mediante modellazione diretta, il modo fondamentale e il primo modo superiore utilizzati per la successiva inversione della curva di dispersione.

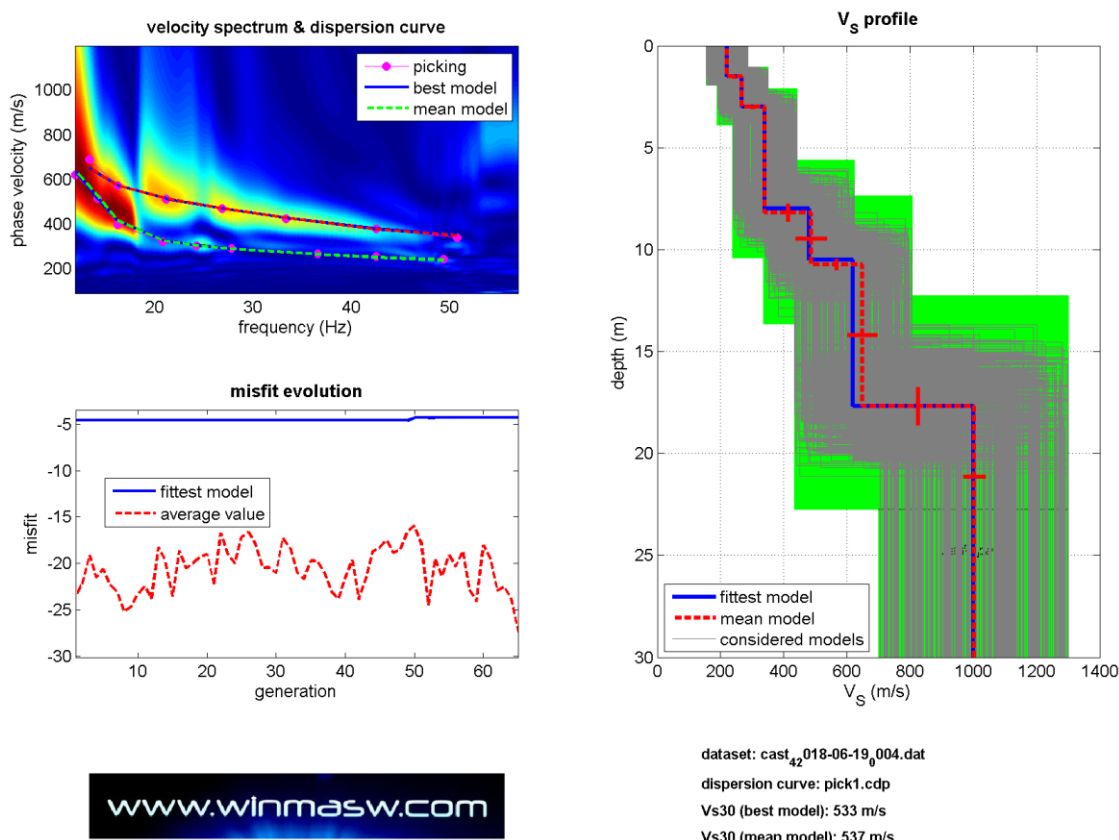


4.4.2 Inversione della curva di dispersione – MASW4

Il secondo passo da affrontare per ottenere il profilo verticale della Vs è l'inversione delle curve di dispersione precedentemente "piccate".

Nel contesto in esame poiché il gradiente di velocità potrebbe subire variazioni drastiche non è valida, per determinare il possibile spazio di ricerca, la cosiddetta assunzione $\lambda/3$ (data una certa lunghezza d'onda λ si assume che la sua velocità di propagazione dipenda dalle caratteristiche del mezzo ad una profondità pari a $\lambda/3$). I limiti del search space (“spazio di ricerca” o “spazio dei parametri”) prescelti sono quindi piuttosto ampi.

Per l'elaborazione del modello di velocità è stato impostato l'utilizzo di 6 strati, compatibile con l'assetto stratigrafico del sito d'interesse e con le finalità del presente studio.



4.4.3 Profilo Sismostratigrafico – MASW4

Nella seguente tabella sono stati riportati i valori delle velocità medie e gli spessori di ciascun sismostrato, ottenuti mediante analisi con metodologia MASW, in modo da definire un modello geofisico medio.

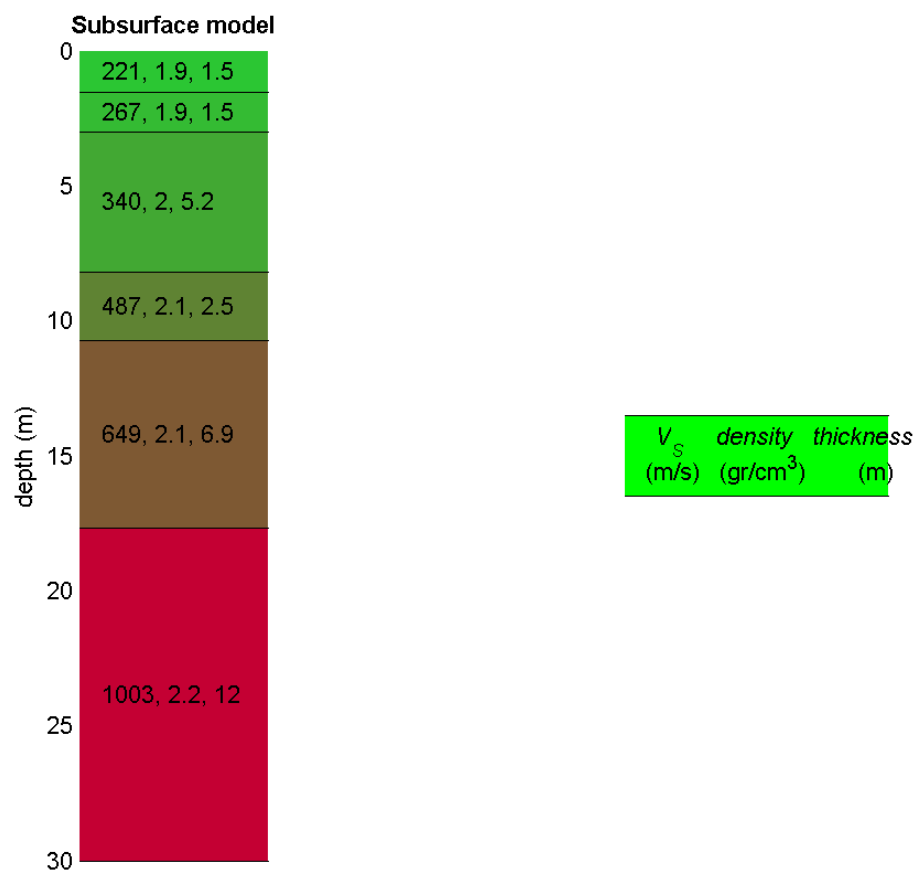
Si riportano anche, in maniera indicativa, le stime dei valori di V_p , densità e modulo di Poisson eseguite dal software di elaborazione.

Poiché, come già ricordato, la dispersione delle onde di Rayleigh dipende essenzialmente dalla V_s e degli spessori degli strati (cioè dalla geometria), tali valori di densità e V_p devono essere considerati solamente come stime largamente approssimative.

Viene riportato, inoltre, il valore del modulo di taglio che tra i moduli elastici è l'unico che non dipende da V_p , ma solamente da V_s e densità e quindi rappresenta una stima maggiormente significativa.

Indagine 017043L9 (MASW4 – Via Ten. Olivari)								
MODELLO GEOFISICO MEDIO								
Sismostrato	Vs (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)	Stima della Vp (m/s)	Vp/Vs	Stima densità (g/cm ³)	Modulo di Poisson	Modulo di Taglio (MPa)
1	221	1.5	1.5	460	2.08	1.87	0.35	91
2	267	1.5	3	556	2.08	1.91	0.35	136
3	340	5.2	8.2	708	2.08	1.97	0.35	228
4	487	2.5	10.7	1014	2.08	2.06	0.35	488
5	649	6.9	17.6	1351	2.08	2.13	0.35	896
6	1003	12	29.6	1876	1.87	2.21	0.30	220

Di seguito si riporta una sezione sismo-stratigrafica schematica.



Si sottolinea che i parametri sopra riportati sono riferiti a moduli dinamici e quindi a condizioni di bassa deformazione. I valori ottenuti sono stati infatti stimati in base alle deformazioni indotte nel

terreno dalla propagazione delle onde sismiche. L'entità ridotta di tali deformazioni comporta alti valori dei moduli dinamici calcolati. Per deformazioni significativamente superiori, come di norma nei calcoli geotecnici, i valori stimati dovranno quindi essere idoneamente corretti tenendo conto della funzione matematica che ne regola la diminuzione in funzione dello sforzo applicato.

4.5 Indagine 017043L10 – (MASW 5 – Via C. Colombo)

L'ubicazione e la lunghezza dello stendimento sono state scelte in funzione della logistica dei luoghi e delle aree ritenute significative per l'esecuzione delle prospezioni.

L'allineamento sismico ha previsto una distanza tra i geofoni pari a 2.0 m ed una serie di scoppi esterni all'ultimo geofono con offset variabili (1-2-5-10-15 m) e diversa intensità di energizzazione (in maniera da poter eseguire lo stacking verticale per l'attenuazione del rumore incoerente).

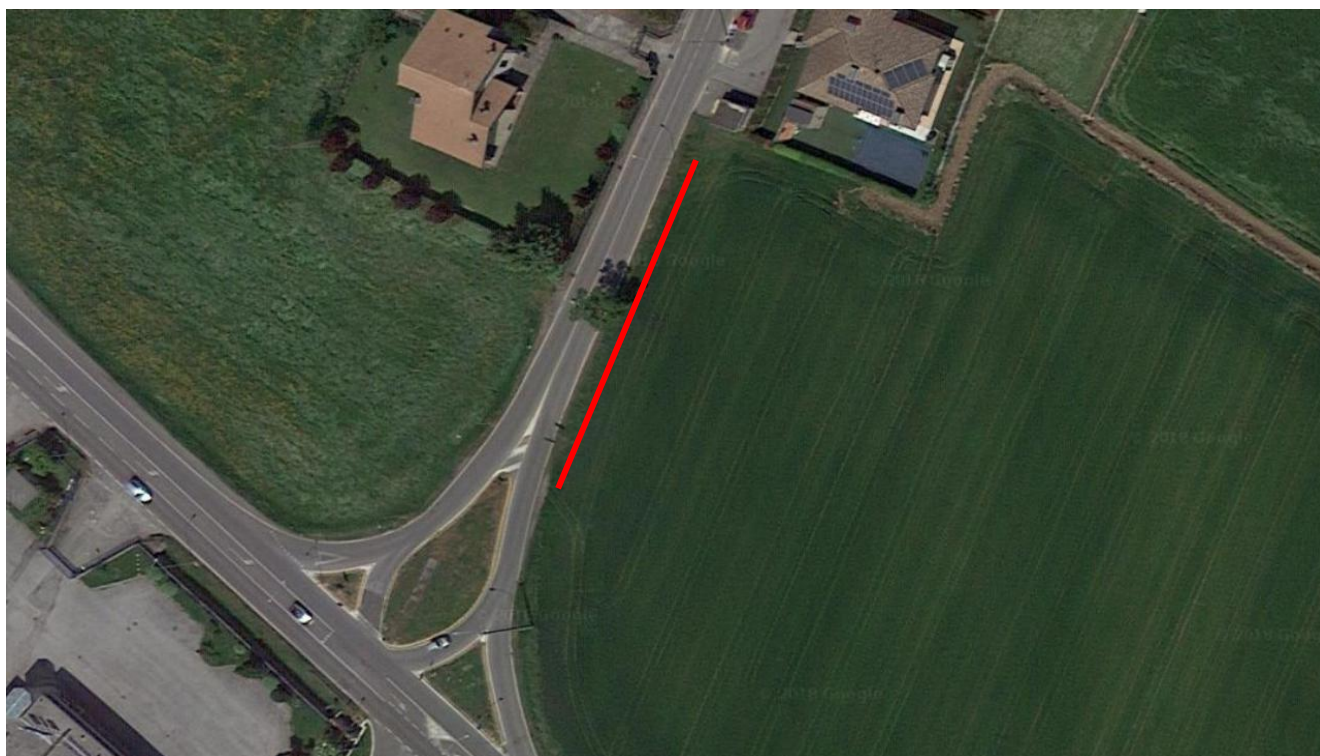


Figura 5 – Ubicazione indagine 017043L10 (MASW5 – Via C. Colombo)

4.5.1 *Determinazione dello spettro di velocità e picking della curva di dispersione – MASW5*

La prima operazione effettuata è stata quella di visionare tutte le curve di dispersione per poi procedere al processing del dataset prescelto (*casten_masw5_2018-06-07_0005.sgy*).

Si riassumono di seguito alcuni dati relativi ai parametri di acquisizione e di elaborazione utilizzati:

Stacking shot 1 e shot 2 – dataset: casten_masw5_2018-06-07_0005.sgy

offset del dataset utilizzato: 1 m

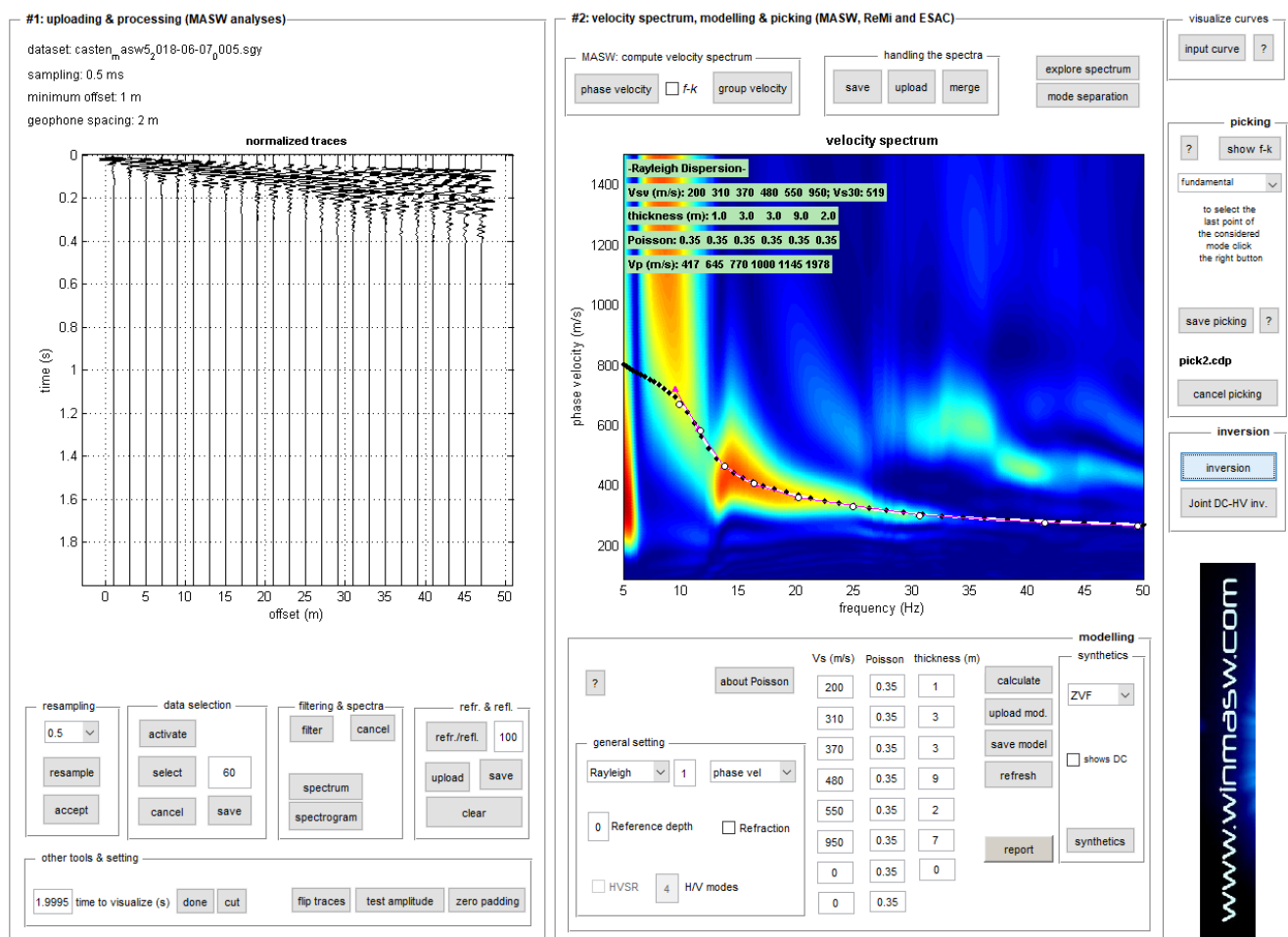
distanza intergeofonica: 2.0 m

Frequenza di campionamento: 0.5 ms

Tempo di acquisizione: 2 s

Una volta caricati i dati si procede con il calcolo dello spettro di velocità. Viene indicato come unico vincolo le massime e minime velocità e frequenze (in altri termini i limiti dello spettro di velocità).

Nel caso in esame è stato individuato, dapprima mediante modellazione diretta, un unico modo principale utilizzato per la successiva inversione della curva di dispersione.

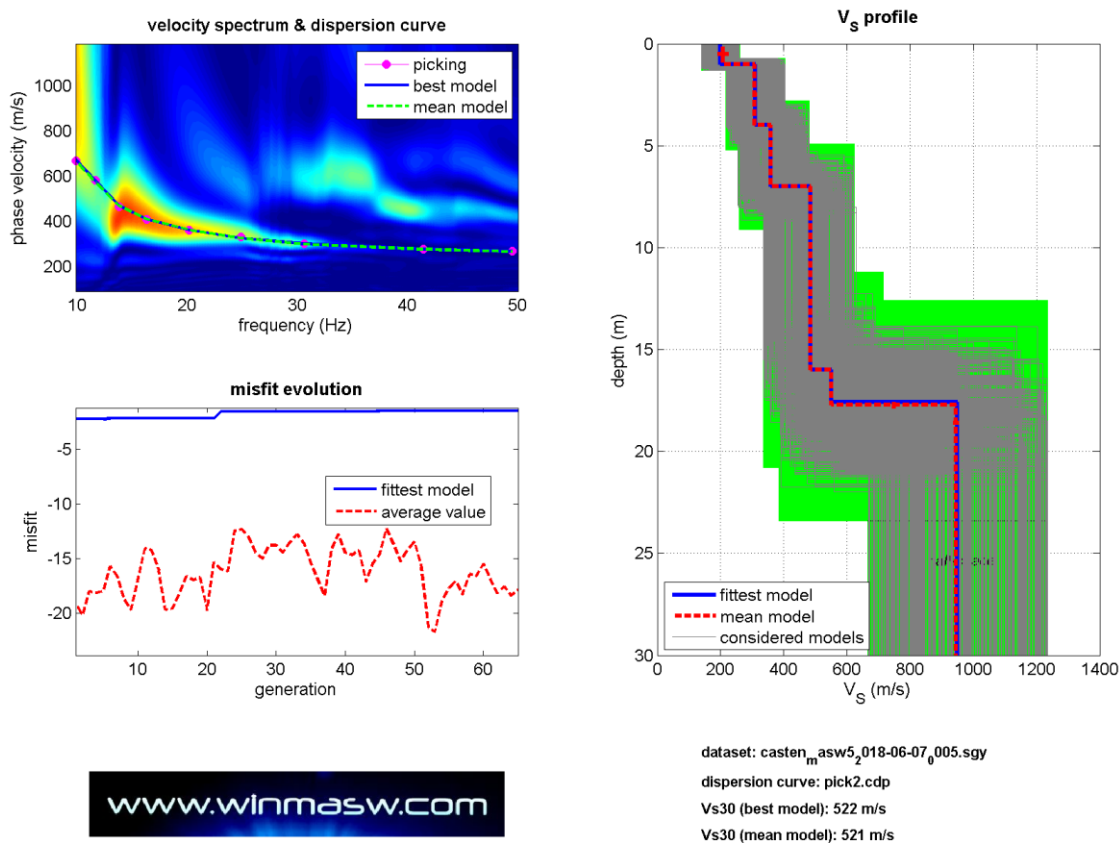


4.5.2 Inversione della curva di dispersione – MASW5

Il secondo passo da affrontare per ottenere il profilo verticale della Vs è l'inversione delle curve di dispersione precedentemente "piccate".

Nel contesto in esame poiché il gradiente di velocità potrebbe subire variazioni drastiche non è valida, per determinare il possibile spazio di ricerca, la cosiddetta assunzione $\lambda/3$ (data una certa lunghezza d'onda λ si assume che la sua velocità di propagazione dipenda dalle caratteristiche del mezzo ad una profondità pari a $\lambda/3$). I limiti del search space (“spazio di ricerca” o “spazio dei parametri”) prescelti sono quindi piuttosto ampi.

Per l'elaborazione del modello di velocità è stato impostato l'utilizzo di 6 strati, compatibile con l'assetto stratigrafico del sito d'interesse e con le finalità del presente studio.



4.5.3 Profilo Sismostratigrafico – MASW5

Nella seguente tabella sono stati riportati i valori delle velocità medie e gli spessori di ciascun sismostrato, ottenuti mediante analisi con metodologia MASW, in modo da definire un modello geofisico medio.

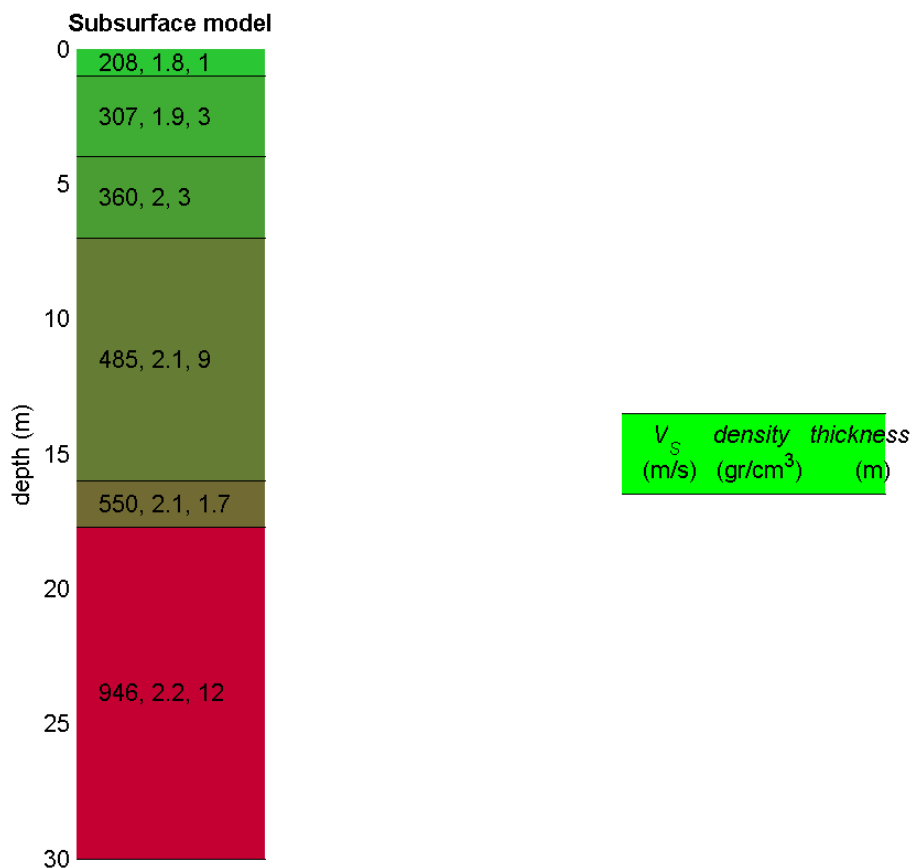
Si riportano anche, in maniera indicativa, le stime dei valori di V_p , densità e modulo di Poisson eseguite dal software di elaborazione.

Poiché, come già ricordato, la dispersione delle onde di Rayleigh dipende essenzialmente dalla V_s e degli spessori degli strati (cioè dalla geometria), tali valori di densità e V_p devono essere considerati solamente come stime largamente approssimative.

Viene riportato, inoltre, il valore del modulo di taglio che tra i moduli elastici è l'unico che non dipende da V_p , ma solamente da V_s e densità e quindi rappresenta una stima maggiormente significativa.

Indagine 017043L10 (MASW5 – Via C. Colombo)								
MODELLO GEOFISICO MEDIO								
Sismostrato	Vs (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)	Stima della Vp (m/s)	Vp/Vs	Stima densità (g/cm ³)	Modulo di Poisson	Modulo di Taglio (MPa)
1	221	1.5	1.5	460	2.08	1.87	0.35	91
2	267	1.5	3	556	2.08	1.91	0.35	136
3	340	5.2	8.2	708	2.08	1.97	0.35	228
4	487	2.5	10.7	1014	2.08	2.06	0.35	488
5	649	6.9	17.6	1351	2.08	2.13	0.35	896
6	1003	12	29.6	1876	1.87	2.21	0.30	220

Di seguito si riporta una sezione sismo-stratigrafica schematica.



Si sottolinea che i parametri sopra riportati sono riferiti a moduli dinamici e quindi a condizioni di bassa deformazione. I valori ottenuti sono stati infatti stimati in base alle deformazioni indotte nel terreno dalla propagazione delle onde sismiche. L'entità ridotta di tali deformazioni comporta alti valori dei moduli dinamici calcolati. Per deformazioni significativamente superiori, come di norma nei calcoli geotecnici, i valori stimati dovranno quindi essere idoneamente corretti tenendo conto della funzione matematica che ne regola la diminuzione in funzione dello sforzo applicato.