

## 5. INDAGINE M.A.S.W.

### 5.1- Metodo

La tecnica di analisi MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), rappresenta una tipologia d'indagine sismica che consente di individuare il profilo verticale di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali (Rayleigh e Love).

Il metodo MASW è basato sul fenomeno secondo il quale, in un mezzo stratificato, le onde superficiali sono "dispersive", ovvero sul fatto che frequenze diverse (cioè lunghezze d'onda diverse) viaggiano a velocità diversa. Più specificatamente, le lunghezze d'onda maggiori (cioè le frequenze più basse), sono influenzate dalla parte più profonda del sottosuolo e, quindi, caratterizzeranno gli strati più profondi, mentre le piccole lunghezze d'onda (frequenze più alte), dipendono dalle caratteristiche della parte più superficiale del sottosuolo.

Il metodo d'indagine MASW, descritto nella presente nota, è del tipo attivo ovvero le onde superficiali sono generate artificialmente mediante l'impatto di una massa battente (mazza sismica) sulla superficie del suolo e misurate ad uno stendimento lineare di velocimetri o geofoni. Un tipico schema di acquisizione è mostrato in figura (Fig. 5.1).

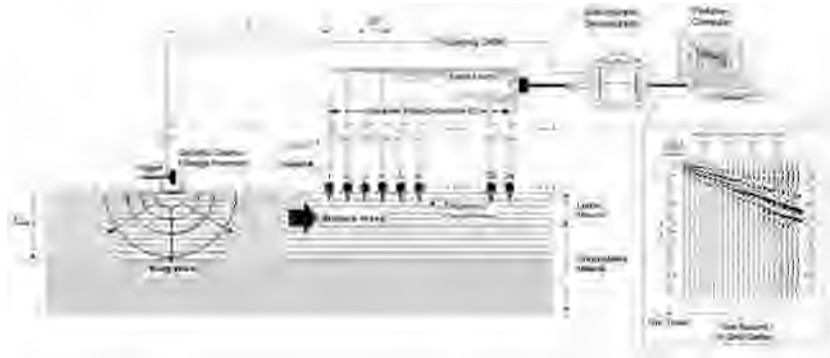


Fig. 5.1 – Esempio di configurazione sorgente-ricevitori per un rilievo MASW.

Nel metodo MASW di seguito descritto, si usano onde superficiali polarizzate nel piano verticale alla superficie libera del terreno o onde di Rayleigh, trascurando gli effetti dovuti alle onde di volume, alle onde riflesse o rifratte.

Sebbene una sorgente puntiforme verticale generi anche altri tipi di onde, oltre alle onde superficiali, intervengono due aspetti che rendono il contributo di queste ultime prevalente sul contributo delle onde di volume. Il primo è che le onde di Rayleigh trasportano circa i due terzi dell'energia generata dalla sorgente.

Il secondo aspetto è che, allontanandosi dalla sorgente, le onde di superficie subiscono un'attenuazione geometrica inferiore rispetto alle onde P ed  $S_v$ , perché esse si propagano secondo fronti d'onda cilindrici, mentre le onde di volume si propagano secondo fronti d'onda sferici.

## 5.2- Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione delle indagini sismiche MASW, è stata adoperata la strumentazione di cui si descrivono di seguito le caratteristiche principali:

- Sismografo a 24 canali **MAE X-610S**, munito di convertitore A/D a 24 bits con tecnologia sigma-delta, impostato con una frequenza di campionamento di 0,001 secondi (o 1.000 cps) ed una durata della registrazione (periodo di acquisizione) di circa 2,0 secondi.
- Geofoni OYO GEOSPACE, a componente verticale da 4,5 Hz.
- Trigger costituito da un dispositivo, collegato al sistema di acquisizione, che permette di avviare la registrazione del segnale sismico acquisito dai geofoni nell'istante in cui la sorgente viene attivata e parte la sollecitazione dinamica. Il sistema di "innescio" è realizzato mediante un geofono di superficie posizionato in prossimità della sorgente e attivato dall'impatto, nell'istante in cui la massa battente colpisce la sorgente.
- Sistema di energizzazione per la generazione di onde polarizzate nel piano verticale; nel caso in oggetto, è stata adottata una sorgente impattiva, costituita da un martello da 10 kg e un piattello metallico posto al suolo (mazza sismica).

La tecnica d'indagine sismica MASW, prevede che agli estremi dello stendimento ed allineati ad esso, siano materializzati i punti di energizzazione in numero e a distanza variabile in base alle esigenze specifiche di sito e alla logistica. Per le indagini in oggetto sono stati eseguiti n.4 *off-end shot*, agli estremi di ogni stendimento, ad una distanza variabile da un minimo di 5 a un massimo di 10 metri e con vari livelli di preamplificazione del segnale, come schematizzato nella figura di seguito (Fig. 5.2).

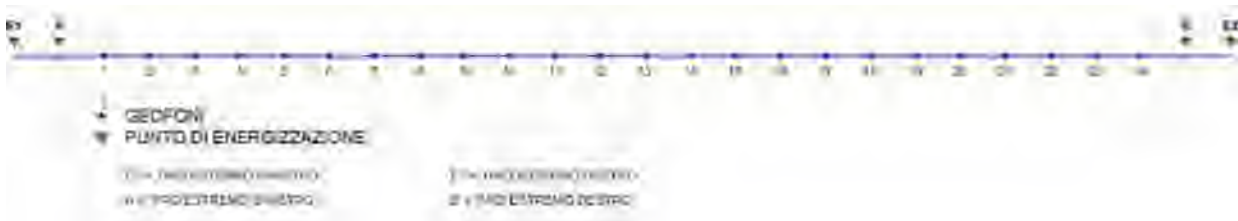


Fig. 5.2 – Indagine MASW. Disposizione siti di energizzazione.

### 5.3- Elaborazione dei dati

Il processo utilizzato per l'elaborazione dei profili di velocità delle onde di taglio con la tecnica MASW, ha richiesto tre passaggi fondamentali, di seguito descritti nel dettaglio:

1. Caricati i files d'interesse ed impostate le caratteristiche geometriche del profilo, in primo luogo viene calcolata la velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale, mediante un processo di elaborazione che consente di estrarre la suddetta curva dallo spettro nel dominio frequenza - numero d'onda applicando una doppia trasformata di Fourier al campo di moto misurato originariamente nel dominio spazio - tempo.
2. Successivamente, viene stimata la velocità di fase (o curva di dispersione) calcolata o numerica, del modo fondamentale delle onde di Rayleigh, mediante modellazione del sottosuolo in termini di velocità delle onde P ed S, valori del coefficiente di Poisson, densità dei materiali, numero e spessore degli strati.
3. La terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , modificando opportunamente lo spessore degli orizzonti litologici e la densità fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la curva di dispersione sperimentale e quella numerica corrispondente al modello di suolo assegnato, attraverso un processo iterativo.

L'algoritmo di inversione della curva di dispersione utilizzato, è quello proposto da Xia et al., 1999, caratterizzato da un metodo iterativo basato sul gradiente. Tale metodo utilizza un modello di sottosuolo iniziale stratificato, caratterizzato dai seguenti parametri: velocità delle onde S ( $V_s$ ), velocità delle onde P ( $V_p$ ), densità ( $\rho$ ), spessore ( $h$ ) e coefficiente di Poisson. Con questa serie di parametri, opportunamente variati, l'algoritmo di inversione cerca una soluzione in modo iterativo.

Viene poi definita una funzione obiettivo ed una matrice di pesi e, successivamente, minimizzata la funzione obiettivo con il metodo di Levenberg – Marquardt (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

L'inversione della curva di dispersione permette di ricavare un profilo di velocità delle onde S, che è posizionato in corrispondenza del centro dello stendimento sismico di geofoni.

L'elaborazione dei dati è avvenuta avvalendosi dei seguenti software specialistici:

- **IXSegzSegy** per la visualizzazione dei segnali acquisiti.
- **SurfSeis**® 3.0 sviluppato dal **Kansas Geological Survey** dell'Università del Kansas.

#### 5.4- Attività di campo

Come detto in premessa, è stato eseguito **n.1 profilo MASW**, di cui si riporta il dettaglio relativo alla lunghezza, al numero di geofoni utilizzati e alla distanza intergeofonica.

#	Id. profilo	Id. sito	Lunghezza (m.l.)	N° canali	Spaziatura (m)
1	MW-1	Postazione pozzo 128	46	24	2,0

La lunghezza degli stendimenti, unitamente alle frequenze di taglio dei geofoni utilizzati, hanno consentito di ottenere spettri di fase sperimentali nel range di frequenze compreso tra circa 4,5÷80 Hz, consentendo informazioni indirette sul sottosuolo entro i primi 30-40 metri dal p.c., in funzione della rigidità sismica dei litotipi attraversati (ovvero della velocità) e della massima lunghezza d'onda registrata.

L'ubicazione delle indagini, fornita dalla Committente, è stata talora rimodulata nel rispetto delle indicazioni di progetto in modo da fornire una posizione in grado di coprire in maniera omogenea, in base alla logistica, le aree oggetto di indagine.



*Fig. 5.3 – Postazione pozzo 128. Larderello (PI). Ubicazione dell'indagine MASW (in arancione il punto iniziale, in celeste il punto finale del profilo MASW).*

Terminata la fase di acquisizione, si è proceduto al rilievo topografico di precisione degli estremi e del centro dello stendimento, mediante strumentazione GPS Leica Geosystems GX 1200.

Nella tabella, si riportano le coordinate dei punti rilevati riferite al sistema nazionale Gauss-Boaga Fuso Ovest, mentre a seguire vengono riportate alcune foto eseguite durante le fasi di acquisizione in campo.

Id. punto	Sigla profilo_Id. geofono (Postazione pozzo 128)	Sistema di riferimento Gauss-Boaga - Fuso Ovest		
		Coordinata Est	Coordinata Nord	Quota ortometrica (m s.l.m.)
01	MW-1_ch 01	651931,21	4788047,23	461,60
02	MW-1_ch 12 (centro)	651952,32	4788044,16	461,43
03	MW-1_ch 24	651976,19	4788040,32	460,81



*Fig. 5.4 – Postazione pozzo 128. Larderello (PI). Foto del profilo MASW.*



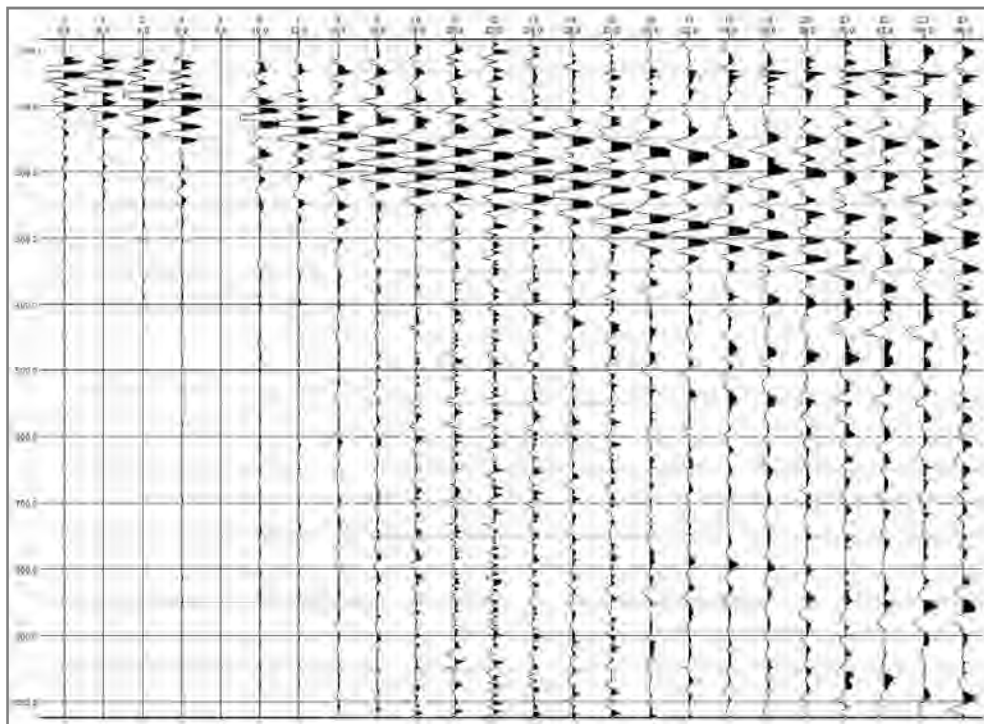
*Fig. 5.5 – Postazione pozzo 128. Larderello (PI). Foto del profilo MASW.*

#### 5.5- Risultati indagine MASW (MW-1)

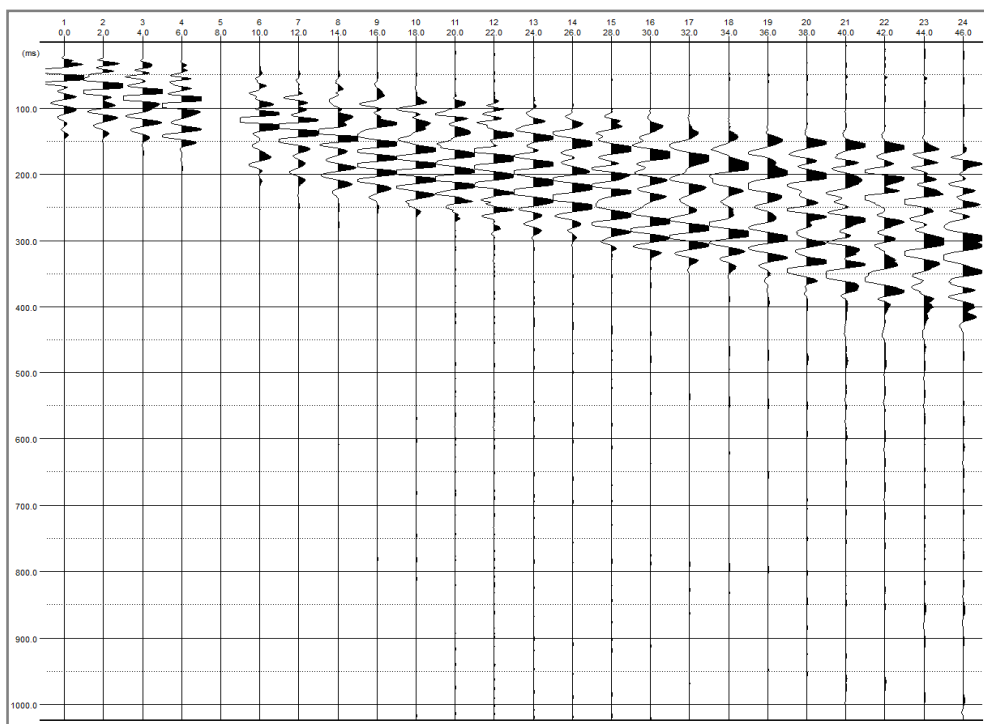
Nei paragrafi seguenti, sono riportate le risultanze della prospezione sismica MASW, riepilogate tramite gli elaborati elencati:

- Sismogramma originale, in cui sono riportate le tracce registrate sull'intero array di geofoni costituenti lo stendimento e sismogramma normalizzato, o sintetico (ovvero sottoposto ad un primo processo di filtraggio e selezione della finestra di segnale migliore), in cui sono riportate le tracce utilizzate per la successiva fase di inversione ed i relativi spettri di dispersione.
- Diagramma della trasformata bidimensionale del campo d'onda (nel sistema velocità di fase - frequenza F-K) in cui sono evidenziati i massimi spettrali.
- Diagramma di confronto tra la curva di dispersione stimata e quella sintetica generata a partire dal modello finale di  $V_S$ .
- Profilo verticale dell'andamento della velocità delle onde  $S$ , in funzione della profondità, e confronto tra il profilo  $V_S$  di primo tentativo con quello finale, risultante del processo di inversione dei dati.
- Tabella con i parametri calcolati ( $V_S$ , profondità e spessore dei sismostrati).





*Fig. 5.6 – Indagine MASW. Profilo MW-1. Sismogrammi originali.*



*Fig. 5.7 – Indagine MASW. Profilo MW-1. Sismogrammi normalizzati.*

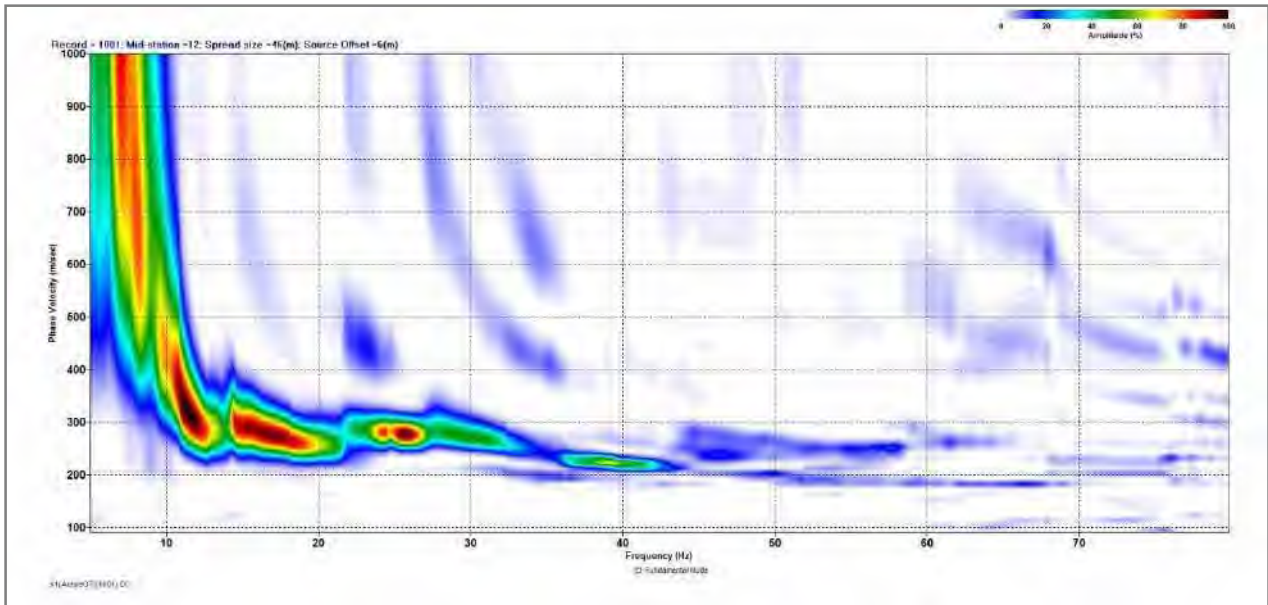


Fig. 5.8 – Indagine MASW. Profilo MW-1. Curva frequenza – velocità di fase.

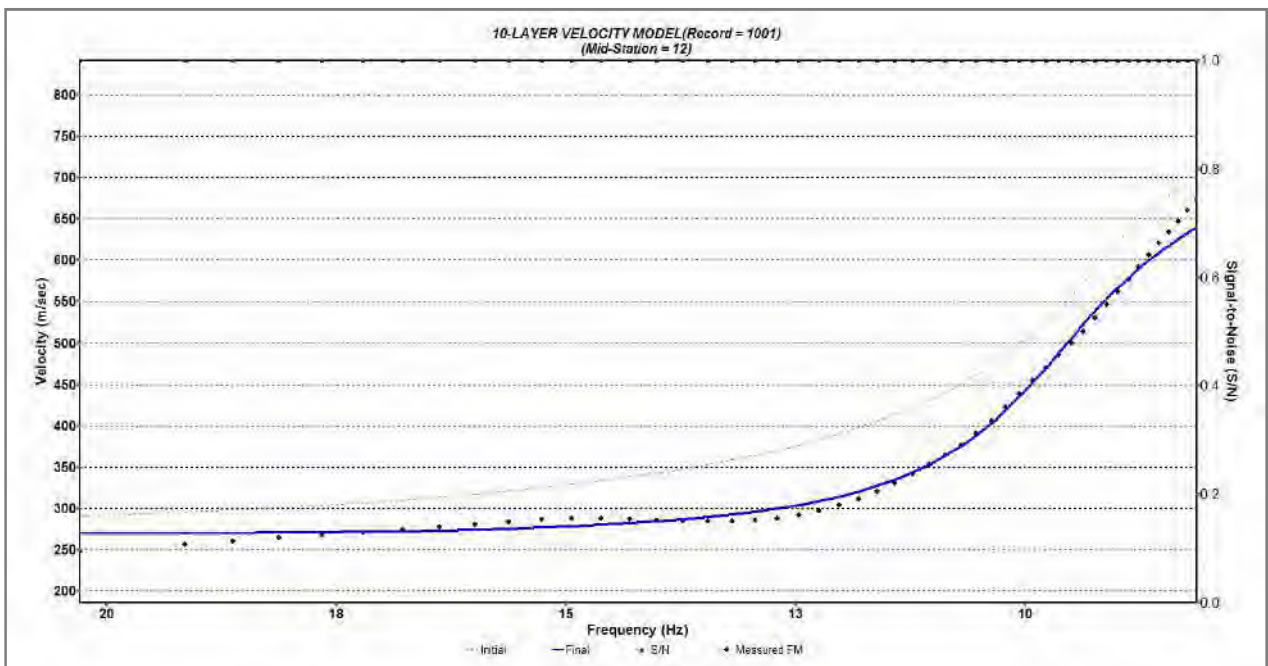


Fig. 5.9 – Indagine MASW. Profilo MW-1. Confronto tra curva di dispersione stimata e sintetica.



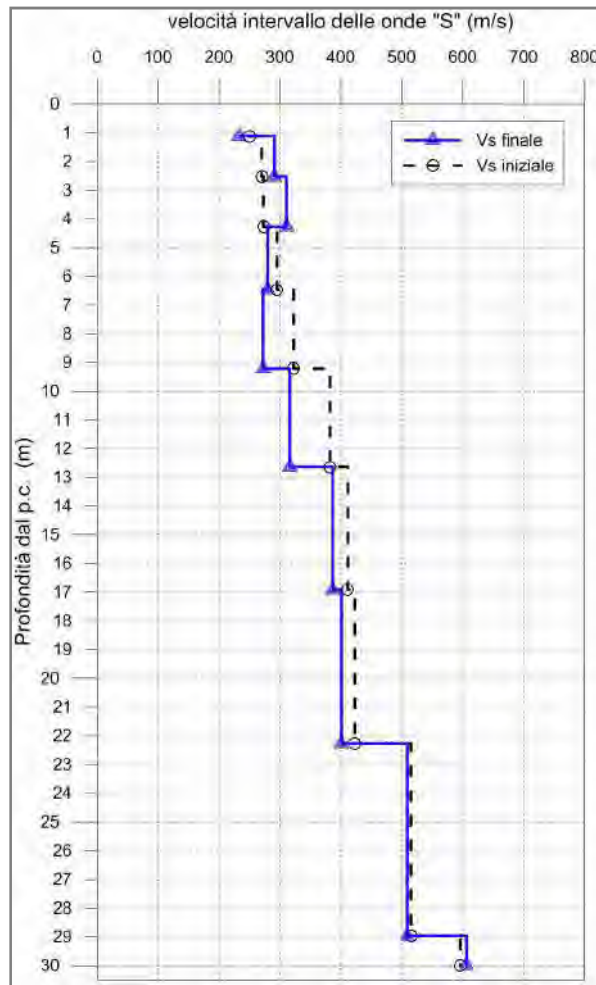


Fig. 5.10 – Indagine MASW. Profilo MW-1. Profilo verticale della velocità delle onde S.

(Si rimanda al paragrafo relativo al processing di elaborazione per la descrizione della  $V_s$  iniziale o calcolata e  $V_s$  finale).

Numero di Strati	Profondità (m dal p.c)	$V_s$ finale (m/s)	Spessore (m)	$h/V_s$
1	1.1	233	1.1	0.0048
2	2.5	291	1.4	0.0048
3	4.3	311	1.8	0.0056
4	6.5	280	2.2	0.0078
5	9.2	272	2.7	0.0101
6	12.6	316	3.4	0.0108
7	16.9	387	4.3	0.0111
8	22.3	401	5.4	0.0134
9	29.0	509	6.7	0.0131
10	30.0	606	1.0	0.0017

Fig. 5.11 – Indagine MASW. Profilo MW-1. Riepilogo dei parametri calcolati.

**$VS30 = 320\text{m/s}$**