

1. RELAZIONE TECNICA INDAGINE SISMICA

La presente relazione ha come oggetto la prova geofisica eseguita a corredo dello studio geologico riguardante la realizzazione di un fabbricato in loc. Podere Ligure, presso Monteaerti, nel comune di Castelnuovo Berardenga (SI). La suddetta prova riguarda la definizione delle velocità delle onde sismiche superficiali dell'area di progetto, per poterne definirne la velocità media nei primi 30 m di spessore (V_{s30}), secondo quanto previsto dall'OPCM 3274 e dal D.M.14/01/2008 (NTC 2008) e relativa circolare esplicativa (n. 47 del 26/02/2009), recepite dalla normativa regionale secondo le prescrizioni del DGR 39/R/2009.

In questo studio è stata realizzata una serie di prove con la tecnica della sismica attiva chiamata MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), la quale si basa sulla misurazione e analisi delle onde sismiche di superficie in un semispazio stratificato; a tale scopo, sono state analizzate le onde di Rayleigh.

Localizzazione del progetto

Coordinate (centro prova) (WGS84)	Latitudine	Longitudine
	43°19'59.53"N	11°25'57.16"E



Foto in figura 5

Figura 1 - ubicazione stendimento sismico e punti di energizzazione per le prove MASW in oggetto

1.1. Descrizione della tecnica di indagine

Il metodo MASW è una tecnica di indagine geofisica non invasiva che consente la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio superficiali V_s , basandosi sulla misura della loro attenuazione; la misura si esegue tramite apposito strumento (sismografo) il quale registra le sollecitazioni subite del terreno in corrispondenza di un certo numero di sensori (geofoni) posti al suolo; le sollecitazioni sono generate da una sorgente (massa battente) la cui posizione è nota nel tempo e nello spazio. Si parla pertanto di prova sismica "attiva".

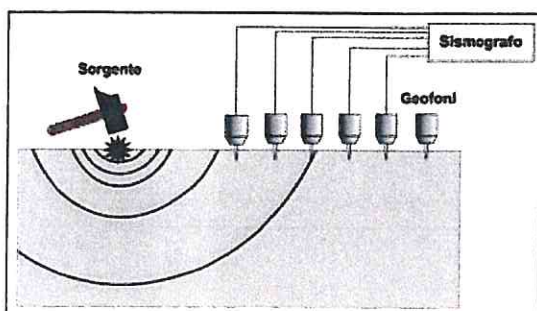


Figura 2 - Schema della prova; energizzazione verticale, adatta per studiare le onde di Rayleigh
Il modo è dato dalle onde di Rayleigh, le quali si trasmettono con velocità correlata alle caratteristiche di rigidità dei terreni interessati dalla propagazione delle onde sismiche che si

sono prodotte con l'energizzazione. In un mezzo stratificato, le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè, onde con diversa lunghezza d'onda si propagano con diversa velocità di fase o di gruppo; in altre parole, la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione; cioè, sono onde la cui velocità dipende dalla frequenza.

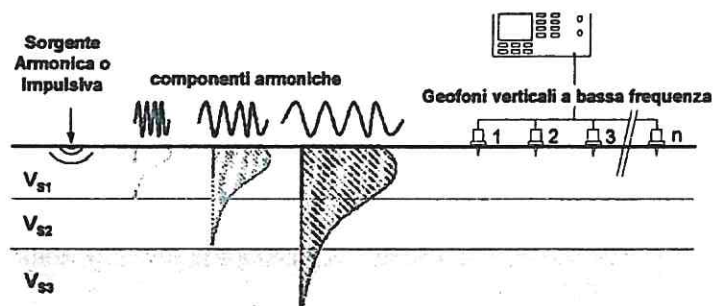


Figura 3 - Schema della dispersione delle onde di Rayleigh in un mezzo stratificato, e disposizione sensori e sismografo

Pertanto, misurando la dispersione della frequenza rispetto alla velocità di fase, si può determinare la velocità sismica delle onde superficiali associate ad un determinato modello geologico/geofisico del sottosuolo, tramite la cosiddetta "inversione" dei dati, ovvero tramite la modellazione di un contesto geologico compatibile con i dati osservati. Questo concetto sta alla base della metodologia MASW, e si applica anche alle onde di Love, che sono l'altro tipo fondamentale di onda superficiale.

È bene ricordare a questo punto, che le onde sismiche si propagano dalla sorgente di energia, con varie componenti. Per le analisi in esame, utilizziamo solamente le onde di superficie, comunque vengono prodotte anche onde di volume e di taglio (P ed S); inoltre, come si è accennato, le onde di superficie comprendono sia le onde di Rayleigh, sia quelle di Love; esse si propagano in maniera differente, come illustrato nella figura 4.

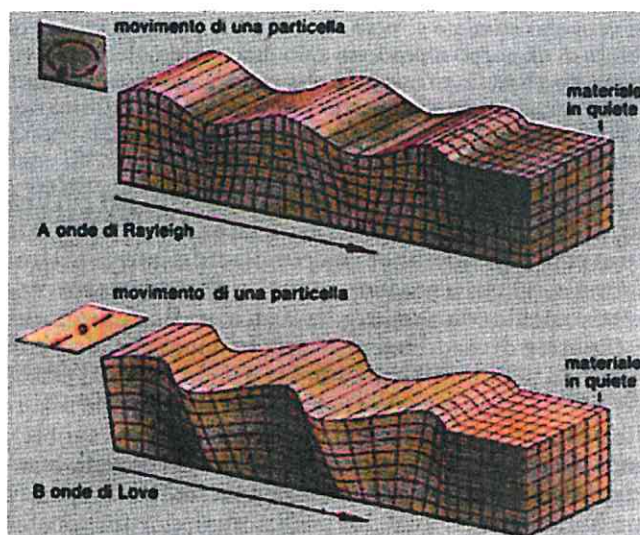


Figura 4 - Differenti modi di propagazione per le onde di Rayleigh e di Love; differisce anche il moto delle particelle e, di conseguenza, il modo di registrare il segnale sismico relativo alla componente specifica.

Conviene infine sottolineare che il metodo MASW, come la maggior parte delle tecniche di inversione di dati geofisici, non ha una soluzione unica, ovvero per un determinato segnale sismico sono possibili molteplici conformazioni geologiche. Per tale motivo, l'indagine geofisica non può prescindere dalle osservazioni geologiche (ossia, della comprensione dell'assetto tettonico e stratigrafico dell'area) e dall'unione di più tecniche, anche geofisiche, per la determinazione del più probabile modello geologico e geotecnico del sottosuolo. Per ridurre l'incertezza in fase di interpretazione, e fornire un modello interpretativo più vincolato, sono stati acquisiti due set di dati sismici per analizzare le onde di Rayleigh nella componente verticale. I due sets di dati sono stati acquisiti lungo lo stesso stendimento, invertendo la posizione di battuta, ma lasciando invariata la posizione dei geofoni.

Nel caso in esame, la stratigrafia di massima e la storia geologica del sito sono stati dedotti dalla bibliografia disponibile e dalle banche dati di analisi geologiche dell'area. Nelle fasi di modellazione sismica è stato utilizzato un modello geologico iniziale di riferimento congruo con il contesto geologico locale, che considera anche i risultati della prova penetrometrica effettuata.

1.2. Strumentazione utilizzata per l'indagine sismica:

La strumentazione utilizzata per la prova è la seguente:

- sismografo PASI 16S-24-U, 24 bit:
 - 124 canali a 24 bit;
 - campionamento dei segnali: tra 125 μ sec a 2 μ sec;
 - tempo di registrazione: tra 32ms e 65536 ms;
 - sistema trigger configurabile (in questo caso, utilizzato sensore piezoelettrico su mazza);
 - Comandi di filtraggio, guadagno e *enhancement* del segnale digitale;
- 12 geofoni verticali PASI con periodo proprio di 4.5Hz;
- massa battente di 7 Kg collegata al *trigger* piezoelettrico.

Il sismografo viene collegato via USB ad un computer esterno dedicato, un Motion J3500 (*rugged* tablet pc; processore Intel i5 quad-core, 4 Gb di RAM, disco rigido SSD64Gb, S/O Windows 7 a 64bit), che funge da unità di controllo del sismografo, e dal quale è possibile verificare immediatamente la qualità del segnale acquisito ed eseguire una serie di operazioni di *pre-processing* delle tracce sismiche.

La strumentazione utilizzata è di recente acquisizione e risulta completamente conforme alle specifiche di fabbrica (i certificati di calibrazione sono disponibili su richiesta) ed agli standard qualitativi richiesti per le indagini in oggetto; ogni geofono ed altro componente soggetto a usura, viene testato per corretto funzionamento prima dell'utilizzo, e durante le fasi preliminari all'acquisizione. Il software utilizzato per l'analisi MASW è il WinMASW, versione academy 7.0 (aggiornata a Giugno 2015).

1.3. Configurazione delle prove:

Prova MASW # 1: onde di Rayleigh verticali (ZVF)

- Lunghezza dello stendimento: 60 m;
- n. 12 geofoni verticali con frequenza propria di 4,5 Hz, distanziati (Gx) 5 m;
- n. 2 energizzazioni ad offset (Sx) di 5 m e di 7.5 m;
- passo di campionatura di 250Hz;
- lunghezza delle tracce sismiche di 1 sec;
- massa battente verticale di 7 Kg su piattello di alluminio;
- N. 3 stack verticali delle tracce.

Tale configurazione ha consentito di mitigare gli effetti di *near-field* delle onde di volume (fig. 6); il segnale è stato sufficientemente chiaro da non necessitare guadagni eccessivi.

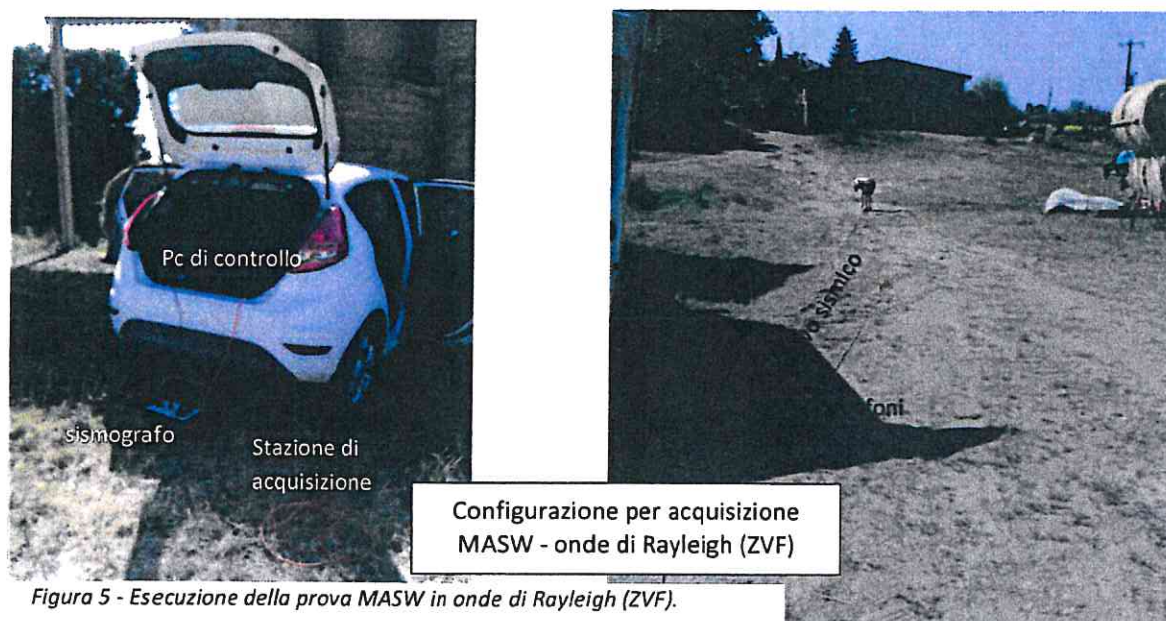


Figura 5 - Esecuzione della prova MASW in onde di Rayleigh (ZVF).

1.4. Elaborazione dei dati

Successivamente alla fase di acquisizione, le tracce sismiche registrate sono state analizzate e preparate (*pre-processing*: analisi delle ampiezze, filtraggio, taglio e correzione delle tracce) per l'analisi MASW,

utilizzando il software freeware Front End della Geogiga. Questo passaggio fa parte del controllo di qualità del segnale effettuato in campagna durante l'acquisizione, prima di cambiare settaggio o smontare la stesa sismica.

Preliminarmente all'analisi, si sono valutate le singole acquisizioni fatte e le *stack*; verificata la qualità dei dati acquisiti, si sono quindi sommate le acquisizioni con offset minimo pari a 5m e 7,5 m, per ottenere una traccia di 24 canali reali lungo la stessa stesa sismica.

L'analisi MASW consiste essenzialmente in 4 fasi:

1. La prima fase consiste nella trasformazione delle serie temporali nel dominio frequenza (f) - numero d'onda (k) (in cui è possibile cercare una correlazione tra le due grandezze);
2. La seconda fase consiste nell'individuazione delle coppie $f-k$ cui corrispondono i massimi spettrali d'energia (densità spettrale), che consentono di risalire alla curva di dispersione delle onde di Rayleigh (e/o di Love) nel piano Velocità di fase (m/sec) – frequenza (esprimibile come lentezza (s/m), o frequenza (Hz));
3. La terza fase consiste nel calcolo della curva di dispersione teorica attraverso la formulazione del profilo di velocità delle onde di taglio V_s , modificando opportunamente lo spessore h , le velocità di taglio V_s e di volume V_p , la densità di massa ρ degli strati che costituiscono il modello di sottosuolo;
4. La quarta ed ultima fase consiste nella modificazione della curva teorica (calcolata dal modello del sottosuolo modellato) fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale con la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica (sovrapposizione del modello sperimentale e di quello teorico).

L'elaborazione dei dati schematicamente riassunta qui sopra, è stata eseguita attraverso il software WINMASW versione Academy 7.0; tale software permette di modellare le curve di dispersione $f-k$ relative a vari modi di vibrazione (il fondamentale, se presente, e modi superiori, oppure un modo "apparente"), di generare un modello diretto (definito dall'operatore) o automatizzato del sottosuolo tramite inversione dei dati, verificare la corrispondenza del modello con le osservazioni, ed infine generare un modello sintetico del sottosuolo, secondo metodi matematicamente rigorosi e robusti. Dalla modellazione dei sismo-strati e delle loro velocità sismiche, si ricava il parametro della V_{s30} , necessario alla classificazione del terreno di fondazione. Si rammenta che il parametro V_{s30} va riferito al piano di posa delle fondazioni, oppure alla testa dei pali. Nel nostro caso, trattandosi di fondazioni superficiali, la V_{s30} va riferita a circa 1 m dal piano campagna. Viene comunque fornita anche la V_{s30} calcolata a partire dal piano campagna, quale ulteriore riferimento per il progettista.

Le caratteristiche geologiche del sito possono essere riassunte come segue, dall'alto: sabbie debolmente limose e sabbie alterate, per uno spessore di circa 1m, quindi sabbie debolmente alterate da mediamente addensate ad addensate, con rari livelli arenitici, per almeno 40 m, al di sopra delle intercalazioni di sabbie risedimentate e argille, ancora parte delle sequenze marine plioceniche..

Considerate le caratteristiche del sito di indagine sopra descritte, sono state eseguite due acquisizioni MASW ed eseguite diverse modellazioni, al fine di approssimare un modello il più possibile compatibile con i segnali osservati e con le conoscenze geologiche di sito e dell'area, e di conseguenza, rappresentativo delle caratteristiche dei terreni in esame. In effetti, la conoscenza geologica dell'area suggeriva a priori la mancanza di un chiaro contrasto di impedenza acustica per le profondità indagabili con tali tecniche; ciò nonostante, il bedrock sismico è risultato chiaro dalla presente prova, come il passaggio da sedimenti alterati e "rilassati" ad argille più compatte e con velocità sismiche decisamente maggiori.

Si riportano di seguito i grafici relativi ai sismogrammi e alla dispersione delle velocità di fase (mostrato assieme al *picking* (ossia, interpretazione) del modo fondamentale di dispersione della velocità), per lo spettro ottenuto per le onde di Rayleigh (ZVF).

Parametri di acquisizione: 12 geofoni verticali da 4,5Hz; distanza intergeofonica di 5 m; offset minimo a 5m e 7.5 m, mazza battente da 7 kg, battuta verticale. Si sono analizzate sia le acquisizioni relative ai due punti di energizzazione, scoppio, sia la somma delle due tracce; in ogni caso, lo spettro di dispersione è risultato

confrontabile. Si riporta di seguito l'esempio relativo ad un'acquisizione a 7.5m come minimo offset, e l'interpretazione tracciata sullo spettro di dispersione fv.

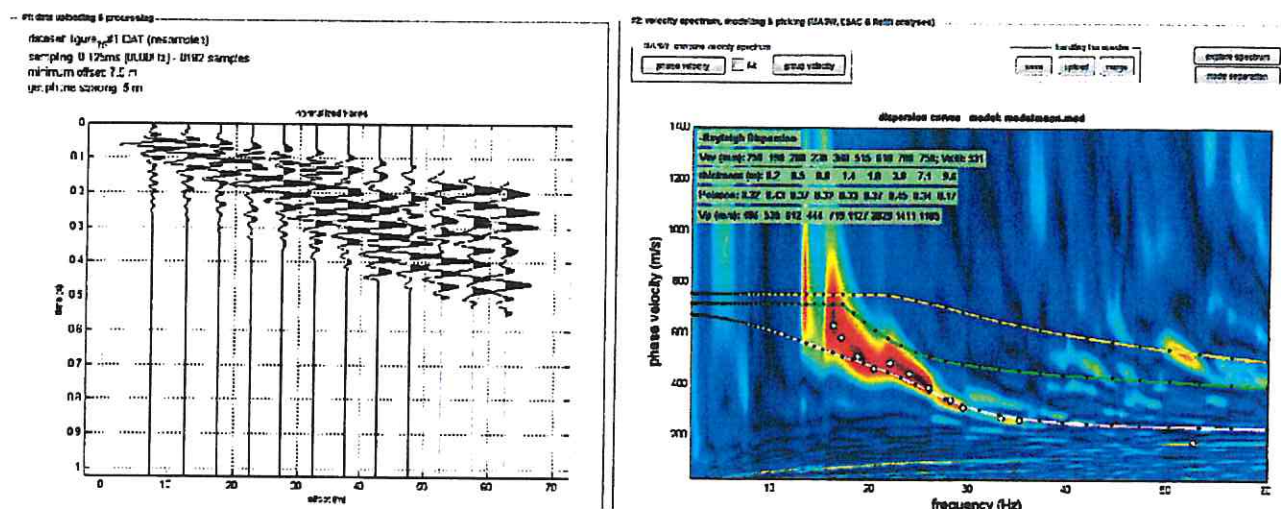


Figura 6- A sinistra: sismogramma delle componenti radiale di Rayleigh (ZVF) dopo il filtraggio e l'isolamento dei segnali di interesse per la presente analisi. A destra, relativo spettro di velocità di fase. Si evidenziano bene almeno due modi e fenomeni di aliasing spaziale al di fuori del range di frequenze di interesse.

L'analisi dello spettro mette in evidenza una zona di buona correlazione (colori rossi) tra velocità e frequenze, nel range 12-27 Hz per velocità superiori a 300 m/s, rappresentativi dei terreni entro le profondità di interesse per la presente indagine.

A partire dal *picking* dei primi modi riconosciuti (in questo caso, il modo fondamentale ed il primo superiore), si è creato un modello di riferimento (modellazione diretta) ed impostati i parametri di ricerca per affinare un modello matematico del sottosuolo in grado da soddisfare i vincoli geologici e l'interpretazione del profilo di velocità, in particolare utilizzando le indicazioni stratigrafiche derivate dall'analisi cartografica e dalle sezioni geologiche.

Il modello di partenza prevede quanto segue:

- 0-0.5 m: suolo e terreno areato; Vs circa 180 m/s;
- 0.5-5 m: sabbie mediamente addensate con $200 < V_s < 350$ m/s;
- 5-30 m: sabbie addensate con Vs circa 550 m/s, crescente con la profondità;
- >30m: sabbie addensate con interstrati di argilla, con Vs > 650 m/s.

Tale modello approssima sufficientemente bene i valori di Vs per il tratto a maggiore coerenza dello spettro f-k di fig. 7. A partire da tale modello, il processo di inversione dei dati affina la ricerca dei parametri di modellazione (modello geologico) che meglio soddisfano il profilo di velocità. L'algoritmo di ricerca -che fa parte della famiglia degli algoritmi genetici- è stato settato per effettuare 80 realizzazioni basate sugli 80 modelli genetici generati. Il risultato è una serie di modelli statisticamente validi, di cui viene evidenziato il modello "migliore" (in termini di scarti quadratici) ed il modello "medio" (statisticamente più rappresentativo). La qualità dell'analisi viene interpretata dal software mediante analisi di errore su modelli intermedi. Vengono inoltre calcolati la qualità dell'inversione e la profondità di investigazione.

Maximum penetration depth according to the "Steady State Rayleigh Method": **45 m**

Inversion quality: very good

Vs5 (mean model): 296 m/s
Vs20 (mean model): 367 m/s
Vs30 (mean model): 439 m/s

Vs5 (best model): 270 m/s
Vs20 (best model): 361 m/s
Vs30 (best model): 432 m/s

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_i}}$$

dove V_i e h_i sono la velocità delle onde di taglio verticali e lo spessore dello strato i -esimo.

Per il caso in esame, utilizzando i valori del modello di velocità relativo alle onde di taglio considerato fino alla profondità di 30 metri a partire dal piano di posa delle fondazioni (-1m dal p.c.), risulta:

Vs (m/s): 260 166 223 210 394 572 717 806 841
 Thickness (m): 0.17 0.48 0.85 1.41 1.83 4.05 6.87 8.52

Depth of the foundation (meters):

Results

Vs (m/s): 223 210 394 572 717 806 841
 Thickness (m): 0.5 1.41 1.83 4.05 6.87 8.52

Vs30 at surface (m/s): 567

Foundation depth: 1m. Vs30 at foundation depth (m/s): 613

$$V_{s30 \text{ fondaz}} \text{ (m/s)} = 613$$

In base allo spessore della coltre alterata (>3 m) e all'incertezza sulla effettiva posizione del bedrock sismico si individua la categoria del suolo come:

SUOLO DI TIPO **B**:

"B - Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs,30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero NSPT,30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu,30 > 250 kPa nei terreni a grana fina)".

Asciano, 28 Luglio 2015

Il Tecnico
 Dr. Geologo Riccardo Aquè