COMUNE DI MOLINI DI TRIORA

PROVINCIA DI IMPERIA

LOCALITA' AGAGGIO INFERIORE

PROSPEZIONE SISMICA CON METODOLOGIA MASW

(Multichannel Analisys of Surface Waves)

COMMITTENTE:

Soc. F.lli Carminati S.p.A.

Pietra Ligure, 17/02/2020

Dott. Geol. MARTA PIROVANO, Via E. Accame 12 - 17027 Pietra Ligure (SV)
Tel.: 3384315618 E-mail: martapiro@yahoo.it
- marta.pirovano@epap.sicurezzapostale.it
P.Iva: 01482720099 c.f.: PRV MRT 80R56 D969L

INDICE

1. Premessa *pag.2*

2. Cenni teorici *pag.2*

3. Strumentazione utilizzata *pag.3*

4. Acquisizione dati e operazioni di campagna *pag.4*

5. Elaborazione dei dati *pag.6*

6. Risultati ottenuti *pag.6*

1. PREMESSA

La prospezione sismica con metodologia MASW (Multichannel Analisys of Surface Waves) permette di definire le caratteristiche sismiche del sottosuolo ricostruendo l'andamento della velocità delle onde di taglio in relazione alla profondità.

L'indagine sismica tipo MASW è stata eseguita in accordo con il Dott. Geol. Guido Carieri, ubicata in Località Agaggio Inferiore, nel Comune di Molini di Triora (IM), in data 13/02/2020, attraverso il sismografo DoReMi a 12 canali, ed interpretata con i software open source "*Geopsy e Dinver*".

2. CENNI TEORICI

La prova MASW, messa a punto nel 1999 da ricercatori del Kansas Geological Survey (Park et al., 1999) permette di determinare l'andamento della velocità delle onde di taglio S in funzione della profondità attraverso lo studio della propagazione delle onde superficiali o di Rayleigh.

I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si distinguono in "attivi" e "passivi" in base al tipo di sorgente con la quale viene prodotta la perturbazione sismica da osservare (Zywicki, 1999; Park e Miller, 2006; Roma, 2006):

- ✓ nel "*metodo attivo*" (MASW) le onde superficiali sono prodotte da una sorgente impulsiva disposta a piano campagna e vengono registrate da uno stendimento lineare composto da numerosi ricevitori posti a breve distanza (distanza intergeofonica);
- ✓ nel "*metodo passivo*" (ReMi) lo stendimento presenta le stesse caratteristiche geometriche del metodo attivo ma i ricevitori non registrano le onde superficiali prodotte da una sorgente impulsiva, bensì il rumore di fondo (detto anche "microtremore") prodotto da sorgenti naturali (vento) e antropiche (traffico, attività industriali, ecc...).

Le tecniche di indagine MASW consentono di determinare una classificazione del suolo in modo speditivo e non invasivo generando, mediante una sorgente artificiale (generalmente una mazza battente su piastra) onde che si propagano lungo un piano verticale. Come nella prospezione sismica a rifrazione, tali energizzazioni possono essere ripetute più volte nello stesso punto, sommando in modo aritmetico i segnali per ottenere un aumento del rapporto segnale/rumore.

In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano e danno informazioni sugli strati più superficiali del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi.

L'intero processo comprende tre passi successivi: l'acquisizione e registrazione delle onde superficiali; la costruzione di una curva di dispersione; l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs.

A partire dall'intero campo d'onda, acquisito in campagna utilizzando un numero variabile di geofoni allineati a spaziatura regolare, l'obbiettivo del metodo è di derivare una curva di dispersione sperimentale velocità di fase – frequenza, la cui forma è associata alle proprietà meccaniche del terreno da indagare.

Dato che le onde superficiali mostrano le ampiezze e le durate maggiori nel dominio spazio-tempo, anche nel dominio frequenza-velocità di fase, i massimi dello spettro saranno relativi alle differenti frequenze con cui si propagano le onde superficiali stesse.

Dall'estrazione delle coppie frequenza velocità di fase corrispondenti ai massimi d'intensità dello spettro si deriva la curva di dispersione sperimentale. In realtà, l'interpretazione degli spettri risulta spesso complicata dall'intrecciarsi dei modi superiori rispetto a quello fondamentale e/o alla generazione e propagazione di onde guidate.

Per la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio è poi necessario procedere alla fase d'inversione della curva di dispersione per ottenere un modello delle proprietà fisiche del sottosuolo. Un miglioramento nell'individuazione di un modello più accurato può essere ottenuto utilizzando, nel processo di inversione, curve relative a più modi di vibrazione

3. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La strumentazione utilizzata per la registrazione dei segnali sismici si compone dei seguenti elementi.

- *Sistema energizzante*: la sorgente è costituita da una mazza metallica del peso di 5 Kg battente verticalmente su una piastra circolare del diametro di 25 cm posta direttamente sul piano campagna. Laddove necessario per ogni shot point viene preparata nel terreno una piazzola, asportando i primi centimetri di suolo vegetale scadente, in cui si posiziona la piastra, in questo modo si ottiene una migliore energizzazione sismica in termini di ampiezza e di spettro dell'impulso immesso, con un incremento del rapporto segnale/rumore.

- *Sistema di ricezione*: costituito da 12 geofoni verticali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile, con frequenza caratteristica di 4.5 Hz. I trasduttori di velocità sono in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali e trasversali prodotte da una specifica sorgente.

- *Sistema trigger*: la metodologia utilizzata, in quanto attiva, prevede che l'inizio della registrazione sia individuato mediante un trigger, il quale consiste in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui la massa battente colpisce la piastra, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato ad un sensore collegato al sistema di acquisizione dati.

- *Sistema di trasferimento del segnale*: il trasferimento del segnale dal sistema di ricezione (geofono) al sistema di acquisizione dati (sismografo) è effettuato tramite cavo sismico, costituito da un cavo elettrico bipolare schermato, collegato al geofono. Il segnale acquisito dai geofoni sarà trasferito al sistema di acquisizione senza nessuna perdita di informazione.

- *Computer*: i dati relativi a ciascuna energizzazione vengono memorizzati istantaneamente su di un computer portatile, collegato al sismografo attraverso interfaccia USB, al fine di consentire la visualizzazione delle registrazioni effettuate e la regolazione dei parametri di acquisizione prima di ogni registrazione. Il software consente di codificare i dati nei formati utilizzati dai diversi programmi di elaborazione (SEG-2, SEG-Y, ecc...).

- *Sistema di acquisizione dati*: si tratta di un sismografo digitale DoReMi (distribuito dalla Sara Electronic Instruments S.r.l.) a 12 canali, collegato a ciascuno dei geofoni ed al sensore del trigger, consentendo in questo modo di registrare in forma numerica e visualizzare come tracce su un apposito monitor le vibrazioni a partire dall'impulso inviato dal trigger. Di seguito le principali caratteristiche dello strumento.

No. of Bits	24
A/D Converter Type	SIGMA DELTA
Converter Input Span	5 V
S/N Ratio @ 500 SPS	140 dB
S/N Ratio @ 5000 SPS	130 dB
S/N Ratio @ 20000 SPS	105 dB
Input Type	Unipolar Differential
Input Impedance	20 kΩ
Commot Mode Rejection	> 80dB
Low Pass Filter	400 Hz
High Pass Filter	None
Max Sampling Lag Between Ch.	< 30 ppm
Max Error Between Trigger Ch.	< 1 ns
Ch. Memory	128000 byte
Maximum Samples	30000
Sampling Rates	200 Hz to 20000 Hz
Maximum Connectable Channels	255
Power Consumption	≈ 0.3 W per Ch.
Instrument Chain Max Length	1000 m
Recommended Geophones	4.5 Hz High Gain 80 V/m/s
Diagnosis	Memory Status (OK / Vdc)
Baud Rate	115200/230400, N, 8, 1

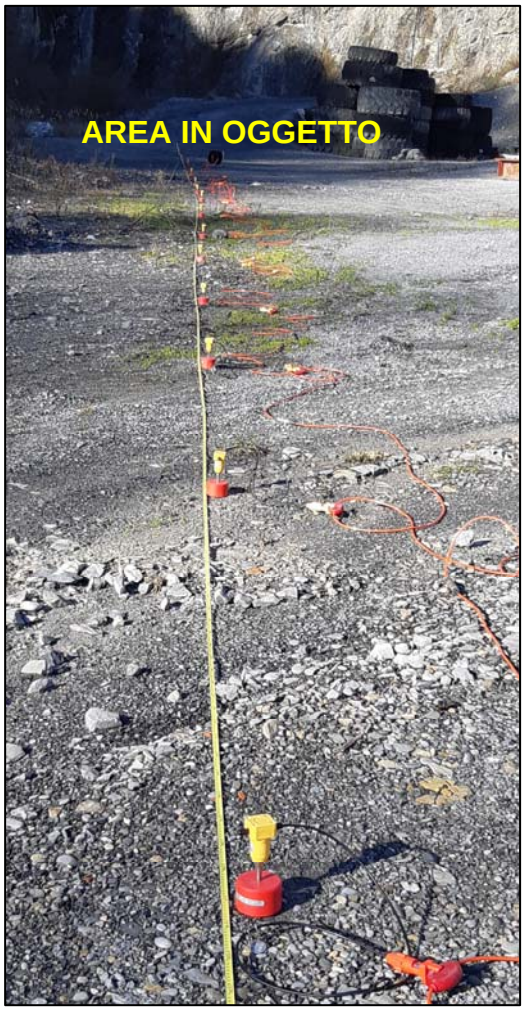
4. ACQUISIZIONE DATI E OPERAZIONI DI CAMPAGNA

L'acquisizione è stata condotta mediante uno stendimento di geofoni superficiali. Dopo aver posizionato i geofoni e dopo il collegamento di questi ultimi ai cavi elettrici, tramite appositi morsetti bipolari, son stati realizzati alcuni *shots* di prova allo scopo di tarare i parametri del sismografo in termini di determinazione del livello del rumore di fondo e taratura delle amplificazioni dei singoli canali di registrazione.

Effettuata la taratura della strumentazione si è proceduto alle energizzazioni su ciascun punto di impatto prestabilito, posto ad una distanza ottimale dai geofoni (*Optimum Field Parameters of an MASW Survey", Park et al., 2005; Dal Moro, 2008*), acquisendo e registrando il segnale sul sismografo per la successiva elaborazione. L'istante di tempo zero, ovvero il segnale d'inizio registrazione, è stato inviato allo strumento da uno *shock-sensor (trigger*) posto direttamente sul terreno.

Gli impulsi sismici ricevuti dai geofoni posizionati sulla superficie topografica sono stati acquisiti utilizzando il già citato sismografo DoReMi (distribuito dalla Sara Electronic Instruments S.r.l.) tramite il quale, dopo una conversione digitale, che consente di non sporcare il segnale nel tragitto, sono stati registrati nell'hard disk del computer esterno e trasformati in formato SEG-2, per l'elaborazione attraverso i software open source "Geopsy e Dinver".

Nel caso specifico l'indagine geofisica è stata condotta attraverso l'utilizzo del metodo MASW, attraverso una stesa sismica disposta sul terreno secondo un array lineare, visibile nella foto posta lateralmente.



L'acquisizione dei dati sismici e stata condotta secondo la seguente configurazione:

- n° geofoni 12 verticali con Fo = 4.5 Hz;
- distanza intergeofonica di 3.00 m per complessivi 33 m;
- 1 sorgente mazza battente da 5 kg su piastra circolare;
- n° 4 punti di energizzazione distanti 3 m, 4.5 m e 6 m dal primo e dall'ultimo geofono dello stendimento, nonchè 10 metri dal primo geofono dello stendimento, tra questi è stato considerato il più rappresentativo;
- n° 2-4 shot per ogni punto di energizzazione al fine di confrontare e migliorare la qualità delle acquisizioni in termini di rapporto segnale/rumore di fondo, le registrazioni di scarsa qualità o quelle caratterizzate dalla presenza di rumore sono state scartate;
- tempo di acquisizione 2 s,
- frequenza di campionamento 1000 Hz e tempo passo di campionamento 1 ms.

Di seguito l'ubicazione dell'indagine geofisica.



5.ELABORAZIONE DEI DATI

Per l'interpretazione dei dati sperimentali relativi all'indagine sismica MASW sono stati utilizzati i software di elaborazione open source "Geopsy e Dinver", trasformando i dati acquisiti e trasferiti sul computer esterno in formato SEG-2.

La procedura utilizzata può essere suddivisa in tre fasi: acquisizione, ovvero registrazione e osservazione delle onde superficiali per un intervallo sufficientemente ampio di frequenze; processing, ovvero il trattamento dei dati con filtraggi e altre tecniche finalizzate all'estrazione delle caratteristiche di dispersione, in particolare espresse come velocità di fase in funzione della frequenza (curva di dispersione); l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs in funzione della profondità.

L'elaborazione del segnale consiste nell'operare una trasformata bidimensionale *velocity-frequency*, che consente di analizzare l'energia di propagazione del rumore in un'unica direzione della linea sismica rappresentando poi lo spettro di frequenza su un grafico che mette in relazione la velocità e la frequenza dell'onda.

Dallo spettro così ottenuto viene eseguito un picking i cui valori sono poi riportati sul software Dinver per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello interpretativo ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva di dispersione calcolata in modo da ottenere un buon *fitting* con i valori sperimentali assumendo tale modello come interpretativo.

Il software Dinver utilizza il metodo del Neighbourhood Algorithm, che minimizza la funzione di errore tra la curva calcolata e quella misurata, attraverso una ricerca diretta nello spazio dei modelli. Questo algoritmo genera un numero Ns0 di modelli di Vs iniziali, da questi modelli ricava una curva di dispersione che confronta con quella misurata e ne deduce un valore di misfit; da questi modelli seleziona quelli che hanno restituito il minor misfit e li varia minimamente generando nuovi Ns modelli da cui genera la curva di dispersione, calcola nuovamente i misfit rispetto alla curva misurata, seleziona quelli con il misfit minore e continua seguendo questo schema fino a trovare la curva di dispersione che più si avvicina a quella misurata.

La peculiarità di questo algoritmo è che non cerca casualmente nello spazio dei modelli quello che meglio interpola i dati misurati, ma lo cerca seguendo uno schema, basato sulle celle di Voronoi, che velocizza molto la ricerca e diminuisce la possibilità di cadere in minimi locali.

6. RISULTATI OTTENUTI

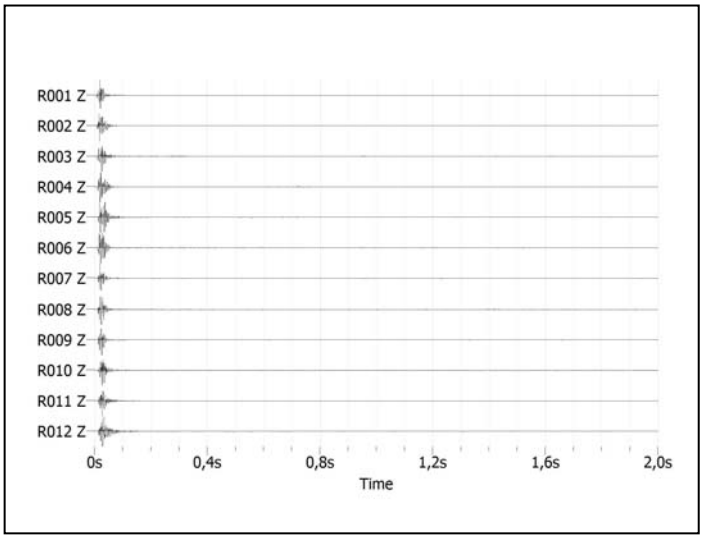
Dall'acquisizione attraverso l'indagine sismica MASW e dalla successiva elaborazione è stato possibile ricavare il modello medio di distribuzione della velocità delle onde S con la profondità.

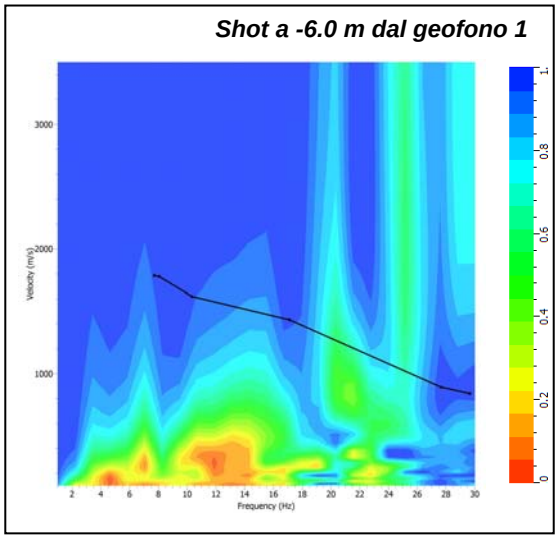
I risultati ottenuti vengono riportati di seguito:

- sismogramma del segnale acquisito;
- curva di dispersione misurata (diagramma frequenza-velocità) e relativo picking;
- profilo di velocità Vs;
- tabella riepilogativa dell'andamento delle velocità delle onde S con la profondità per i sismostrati individuati.

SISMOGRAMMA DEL SEGNALE ACQUISITO

CURVA DI DISPERSIONE MISURATA E RELATIVO PICKING





PROFILO VERTICALE DI VELOCITA' VS

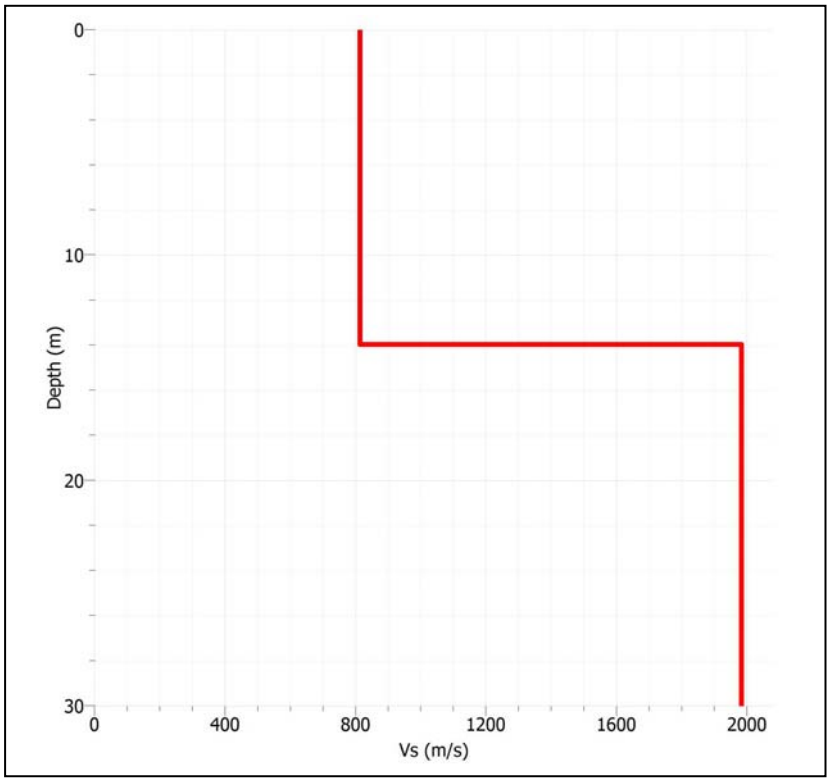


TABELLA DELL'ANDAMENTO DELLE VS CON LA PROFONDITA'

Profondità (m)	Spessore (m)	VS (m/s)
~ 14	~ 14	~ 814
Inf.	Inf.	~ 1983

Attraverso il modello medio della distribuzione della velocità delle onde S è possibile stimare la velocità di propagazione delle onde di taglio (Vs).

Il calcolo della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio (Vs,eq in m/s) è definita dalla seguente espressione (riportata nel D.M. 17.01.2018 - "Norme Tecniche per le Costruzioni"):

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove: h_i e Vs,i indicano rispettivamente lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio dell'i-esimo strato, N il numero di strati, H la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio Vs,eq è definita dal parametro Vs30, ottenuto ponendo H=30 m nella precedente espressione e considerando la profondità degli strati di terreno fino a tale profondità.

Con riferimento all'approccio semplificato proposto dal D.M. 17.01.2018 (Norme Tecniche per le Costruzioni) ed alla tabella riportata di seguito, quanto esposto in precedenza può essere compatibile con una *Categoria di sottosuolo di tipo A*; si precisa che resta comunque a carico del professionista/progettista incaricato la definizione della categoria di suolo così come la scelta di adottare il modello semplificato contenuto nelle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Categoria	Descrizione
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti,* caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti,* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	*Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D,* con profondità del substrato non superiore a 30 m.