



COMUNE DI VERDELLINO

PROVINCIA DI BERGAMO

**AGGIORNAMENTO E REVISIONE DELLO STUDIO
DELLA COMPONENTE GEOLOGICA E SISMICA DI
SUPPORTO AL PGT**

RELAZIONE ILLUSTRATIVA

***Allegato n° 2: Relazione sulle indagini geofisiche
eseguite tipo MASW***

INDICE

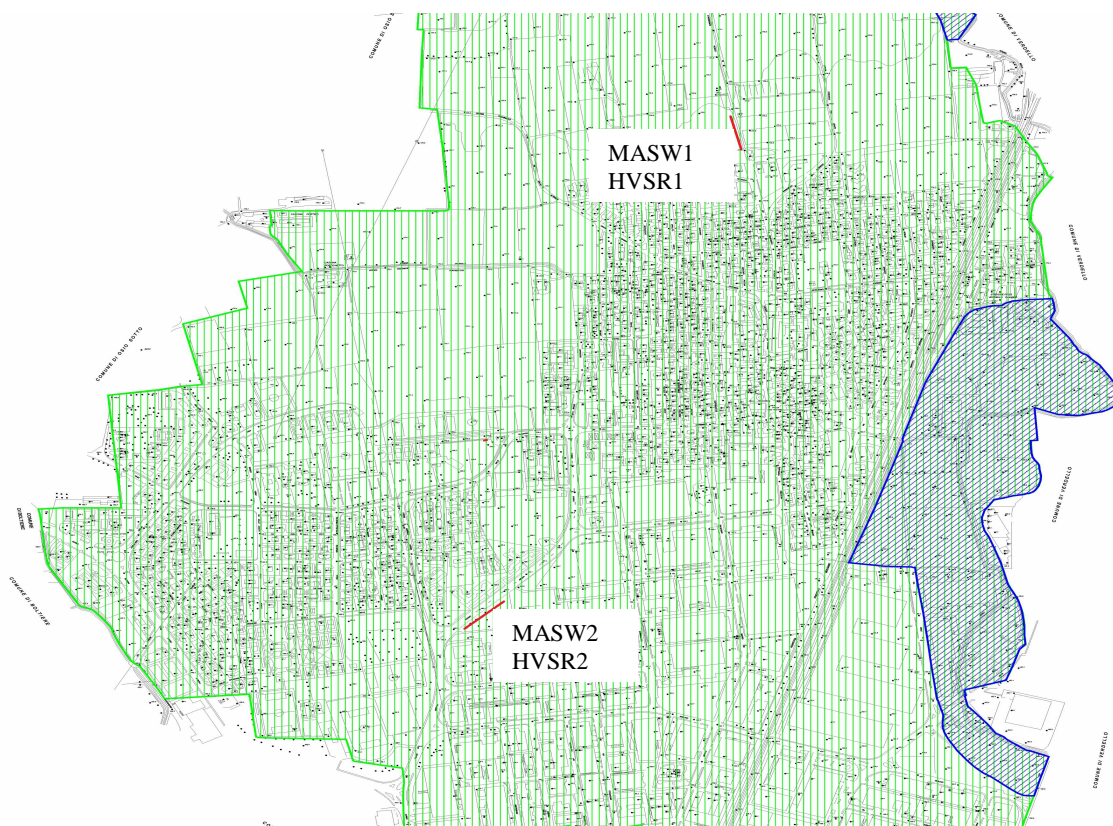
1.0 PREMESSA	3
2.0 INDAGINI EFFETTUATE	4
3.0 ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI	6
4.0 RISULTATI	13

1.0 PREMESSA

A supporto delle analisi sismiche di 2° livello del Comune di Verdellino è stata eseguita una campagna di indagini geofisiche consistente in 2 prove MAWS e n° 2 prove HVSR; le due differenti tipologie di prova sono state effettuate nello stesso sito in modo da raccogliere tutti i parametri di interesse geofisico e sismico e per poter effettuare un'elaborazione incrociata delle due metodologie, per una maggiore affidabilità del dato.

La presente relazione si focalizza sulle indagini HVSR; i dettagli sulle prove MASW sono contenuti nell'apposita relazione.

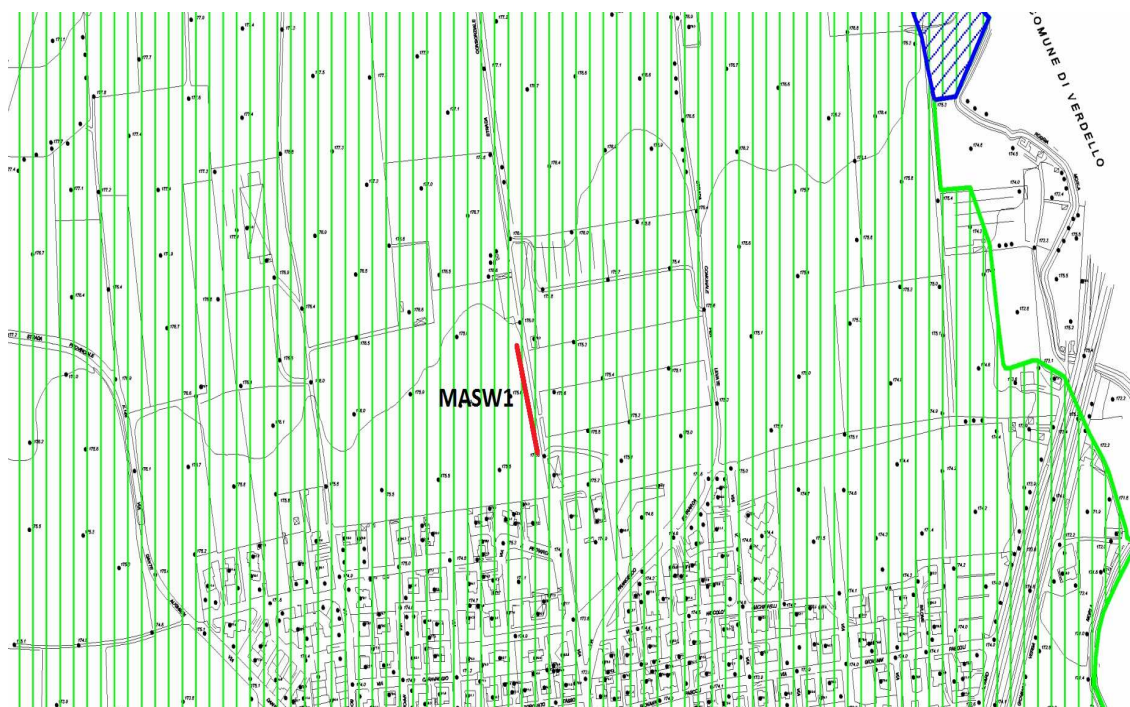
L'ubicazione delle indagini è la seguente:



2.0 INDAGINI EFFETTUATE

Di seguito sono riportate, sinteticamente, le singole prove MASW effettuate con le relative caratteristiche:

PROVA MASW N° 1

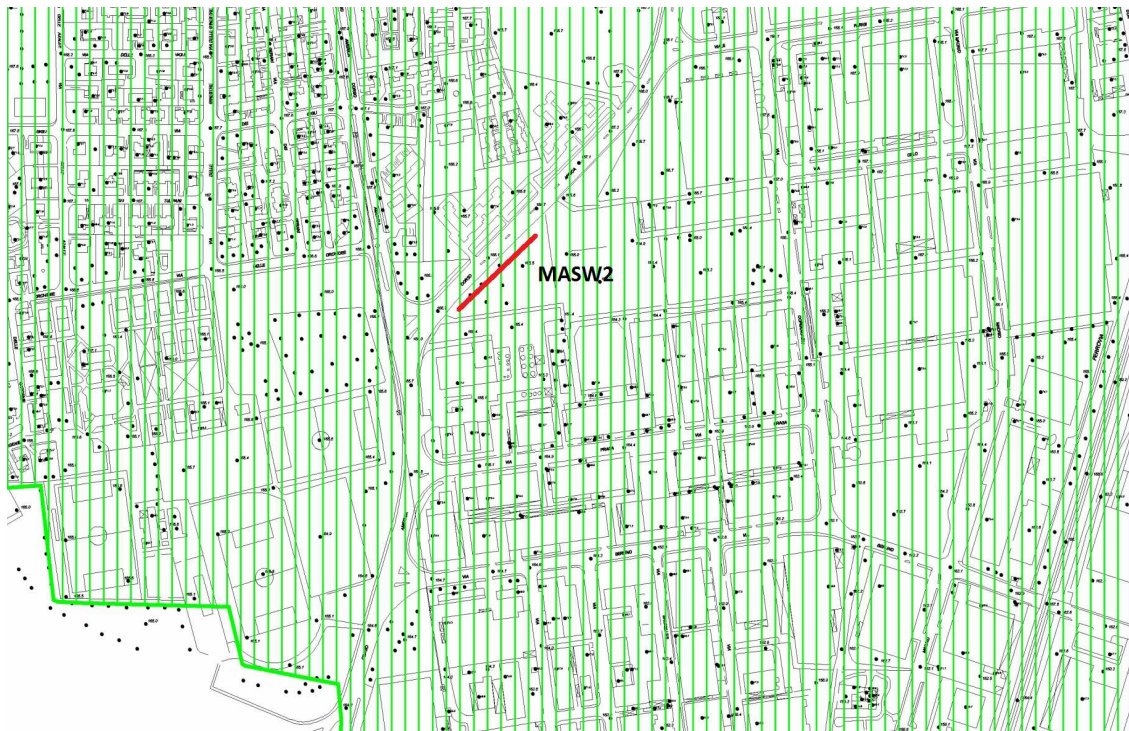


Note geologiche: quest'indagine è situata sopra l'unità di Brembate (78) costituita da depositi fluvioglaciali e alluvionali (ghiaie a supporto di clasti).

Dati stendimento:

- Passo dei geofoni 2 m
- Energizzazione a 2.5 m dal geofono 1
- Energizzazione a 2.5 m dal geofono 24

PROVA MASW N° 2



Note geologiche: quest'indagine è situata in una zona limitrofa al contatto tra l'unità di Brembate (78) ed il Complesso del Brembo (80) costituiti entrambi da depositi fluvio-glaciali e alluvionali (ghiaie a supporto di clasti) e differenziati solamente dalla copertura loessica (presente nella prima unità e assente nella seconda).

Dati stendimento:

- Passo dei geofoni 2 m
- Energizzazione a 3 m dal geofono 1
- Energizzazione a 3 m dal geofono 24

3.0 ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI

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) e 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 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 Reyleigh, 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

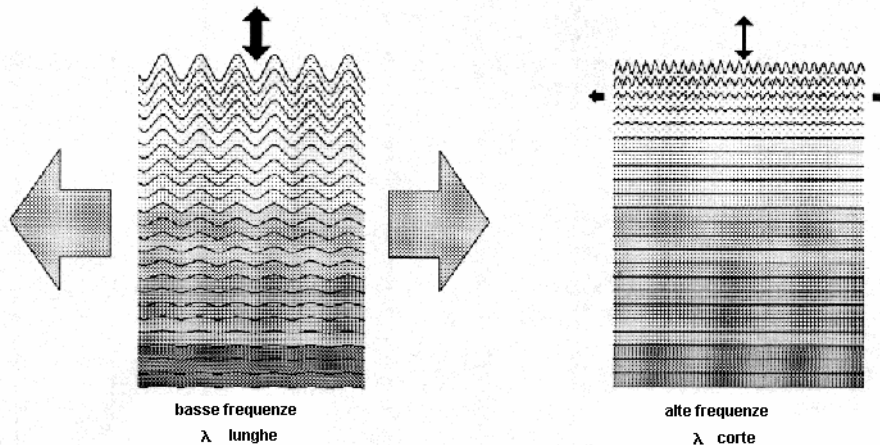
discontinuità orizzontali quali fondazioni e muri di contenimento. Le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente. Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione 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 dipendentemente 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).



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.

STRUMENTAZIONE

La strumentazione utilizzata è costituita da :

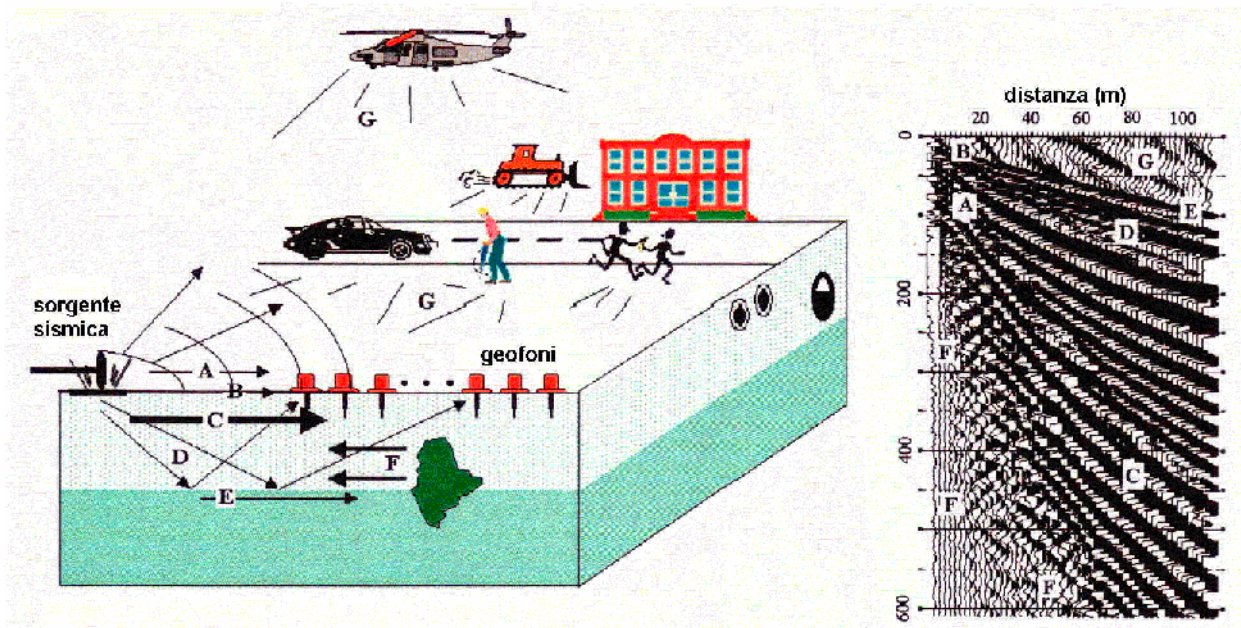
- un sismografo EEG BR24 24 canali
- 24 geofoni a 4.5Hz
- fucile sismico o una mazza da 6 Kg

Il principale vantaggio di un metodo di registrazione multicanale è la capacità di riconoscimento dei diversi comportamenti, che consente di identificare ed estrarre il segnale utile dall'insieme di varie e differenti tipi di onde sismiche. Quando un impatto è applicato sulla superficie del terreno, tutte queste onde vengono simultaneamente generate con differenti proprietà di attenuazione, velocità e contenuti spettrali. Queste proprietà sono individualmente identificabili in una registrazione multicanale e lo stadio successivo del processo fornisce grande versatilità nell'estrazione delle informazioni.

VANTAGGI DELLA REGISTRAZIONE MULTICANALE

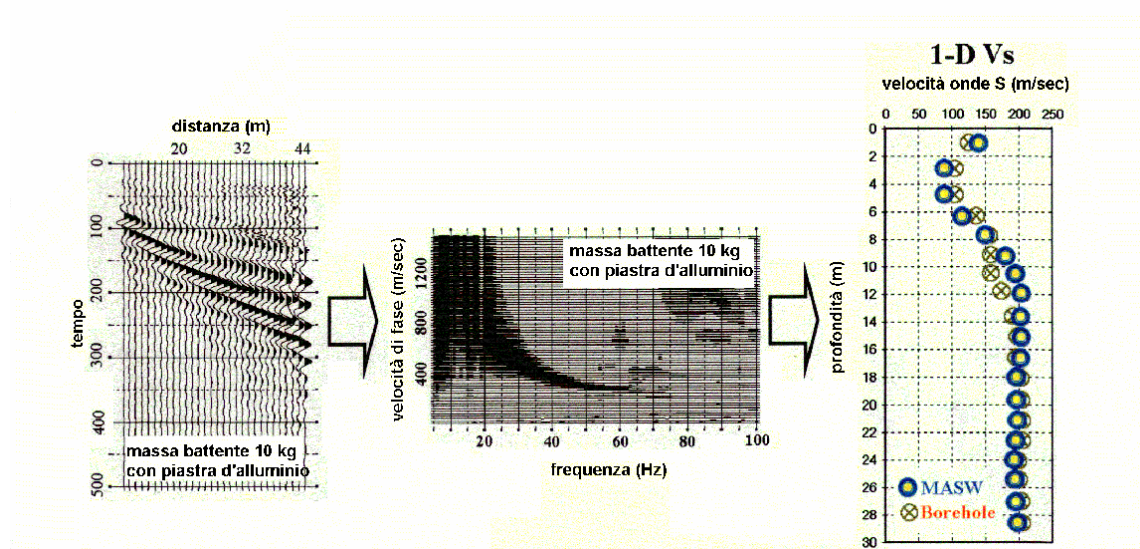
Acquisizione multicanale

Sismogramma multicanale



- A: onde in aria E: onde rifratte
B: onde dirette F: onde riverberate
C: onde di superficie G: rumore ambientale
D: onde riflesse

DESCRIZIONE GENERALE DELLA PROCEDURA MASW



La procedura MASW può sintetizzarsi in tre stadi distinti:

- 1- acquisizione dei dati di campo;
- 2- estrazione della curva di dispersione;
- 3- inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs (profilo 1-D) che descrive la variazione di Vs con la profondità

4.0 RISULTATI

Alla fine della presente relazione sono riportati i risultati delle prove MASW.

Nel riquadro in alto a sinistra è riportata l'immagine di dispersione dell'energia sismica.

Al di sotto è riportata l'estrazione della curva di dispersione eseguita sull'immagine precedente.

Ancora sotto sono riportati i grafici relativi al modello del terreno, sia sotto forma di stratificazione V_s (spezzata di colore blu) che di Modulo di Taglio (spezzata verde).

Per il calcolo del modulo di taglio è stata usata una formula approssimata per la valutazione della densità, non nota.

La formula utilizzata è la seguente:

$$\text{Densità} = 1,5 + V_s/1000$$

Poiché il valore del modulo di taglio G in MegaPascal si ottiene dalla formula

$$G = V_s \times V_s \times \text{Densità} / 10^3$$

è facile ricalcolare il modulo G esatto quando si disponesse di valori più precisi di densità. Con una curva di colore rosso è stato tracciato il valore di V_s progressiva.

Dalla curva si può quindi ricavare il valore di V_{s10} , V_{s20} e così via, e quindi anche il valore di V_{s30} , quest'ultimo ovviamente alla profondità 30.

A destra è visibile il sismogramma mentre in basso è riportato il valore del parametro V_{s30} calcolato utilizzando la stratigrafia V_s e la formula

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} h_i / V_i}$$

STUDIO ASSOCIATO DI GEOLOGIA SPADA
di Spada Mario, Orlandi Gian Marco e Bianchi Susanna

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (m/s) dello strato i – esimo, per un total e di N strati presenti nei 30 m superiori.

Il sito verrà classificato sulla base del valore di V_{S30} come riportato nella seguente tabella:

Grado	Classe	Velocità sismica (m/s)
Molto buono	A	$V_{S30} > 800$
Buono	B	$360 < V_{S30} < 800$
Discreto	C	$180 < V_{S30} < 360$
Sufficiente	D	$V_{S30} < 180$
Insufficiente	E	Strati sup. all. (5 – 20 m) tipo C e D soprastanti substrato tipo A
Molto scadente	S1	$V_{S30} < 100$
Pessimo	S2	$V_{S30} < 50$

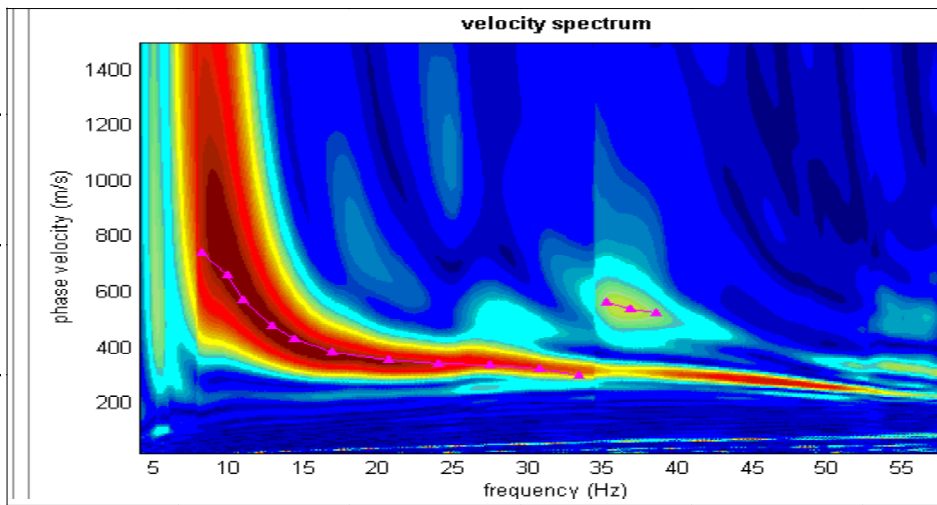
La stratigrafia V_s riportata nelle tavole allegate è quella utilizzata per il calcolo del V_{S30} ed è sismicamente equivalente e ragionevolmente prossima alla stratigrafia reale ma probabilmente non esattamente coincidente.

Di seguito sono riportati i valori V_{S30} calcolati nelle aree di studio

MASW1: 496 m/s

MASW2: 449 m/s

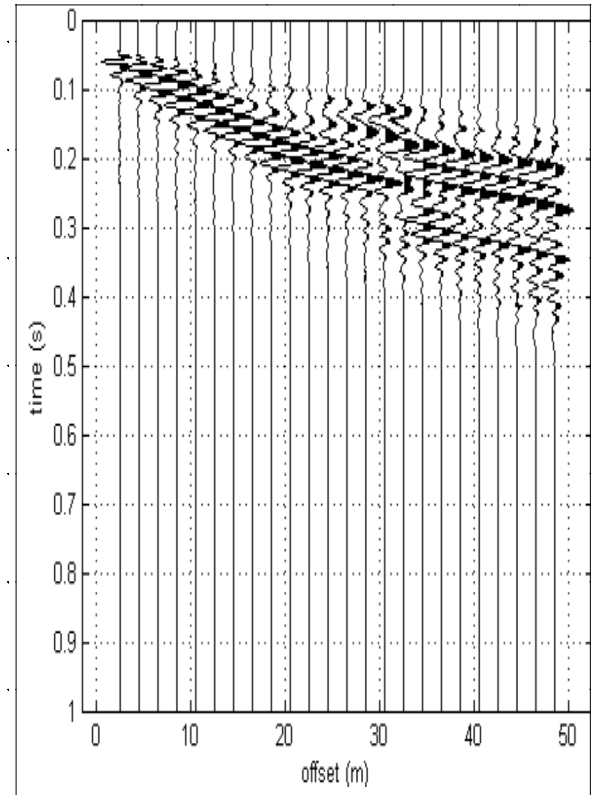
I risultati delle indagini sono sintetizzati nelle immagini seguenti



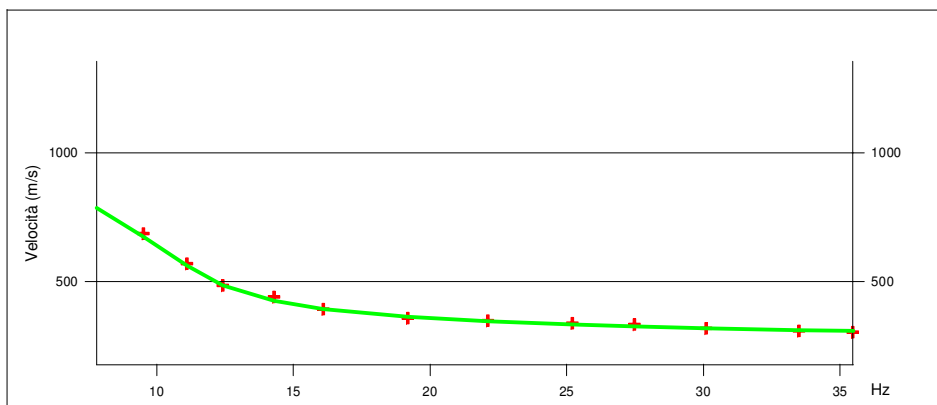
LEGENDA

- + Curva di dispersione misurata
- Curva di dispersione calcolata
- Velocità sismica delle onde S
- Modulo di taglio (Mpascal)
- VsX

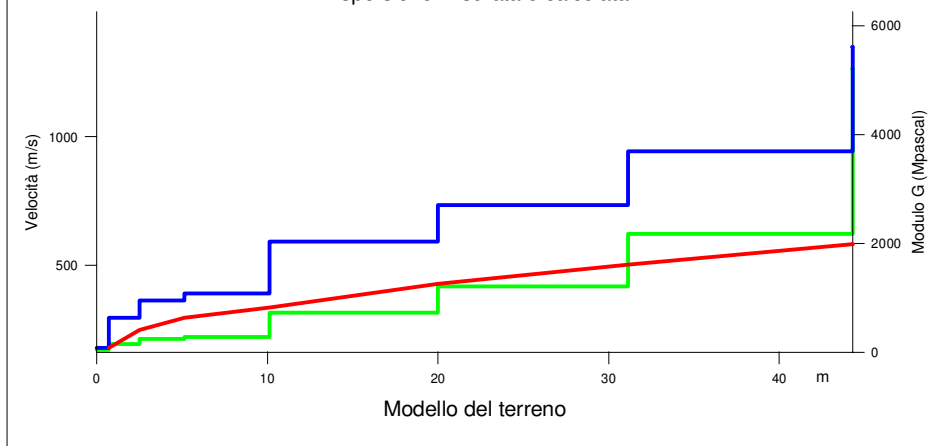
Il valore approssimato del peso di volume per il calcolo del parametro G è dato dalla formula $D=1.5 + Vs/1000$



Sismogramma



Dispersione misurata e calcolata



Modello del terreno

TABELLA DI CALCOLO

Da Prof.	a Prof.	Vs	Hi/Vi	VsX	G
0	.7	177	.004	177	53
.7	2.5	294	.0061	248	155
2.5	5.1	362	.0073	295	244
5.1	10.1	390	.0128	336	287
10.1	20	591	.0167	426	729
20	31.1	735	.0151	502	1207
31.1	44.3	943	.014	583	2171

VALORE CALCOLATO VS30 = 496 m/s

PROVA SISMICA VS30

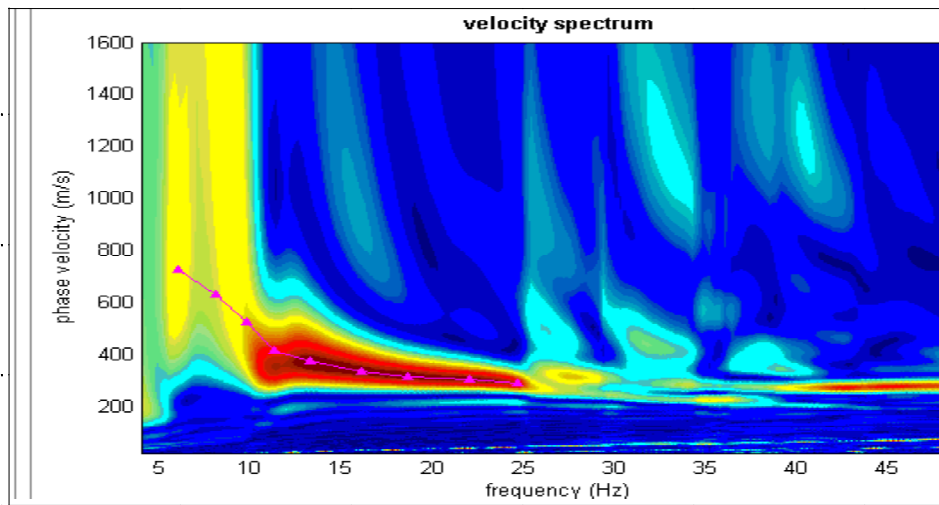
COMUNE DI VERDELLINO (BG) - MASW 1

STUDIO ASSOCIATO DI GEOLOGIA SPADA

Metodologia MASW

**VELOCITA' DELLE ONDE S
MASW 1**

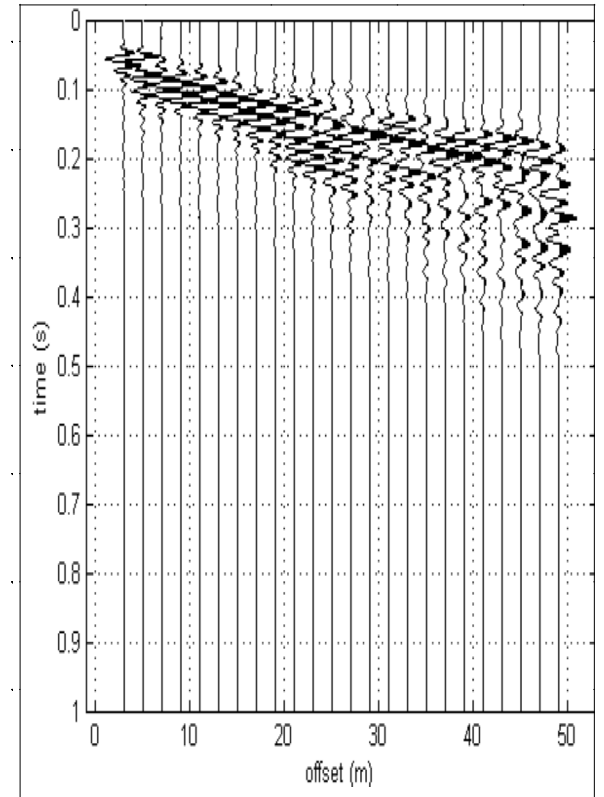
All. 2/a	Ottobre 2016	 <small>GEOPINCA ELABORAZIONE DATI</small>
----------	--------------	---



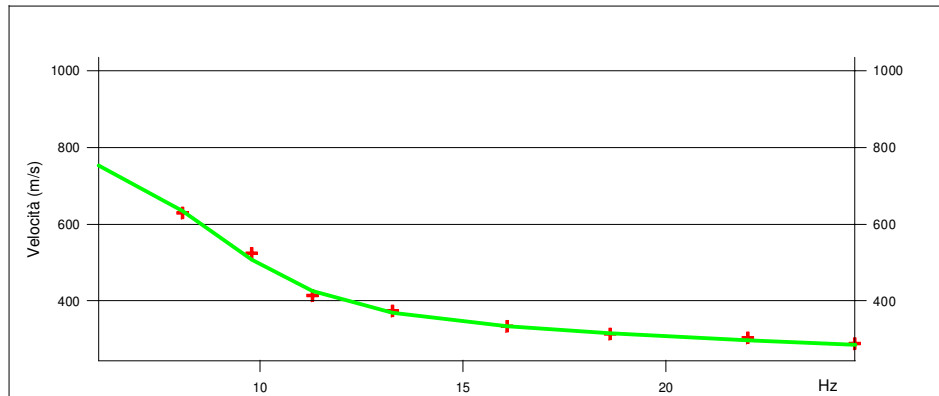
LEGENDA

- + Curva di dispersione misurata
- Curva di dispersione calcolata
- Velocità sismica delle onde S
- Modulo di taglio (Mpasca)
- VsX

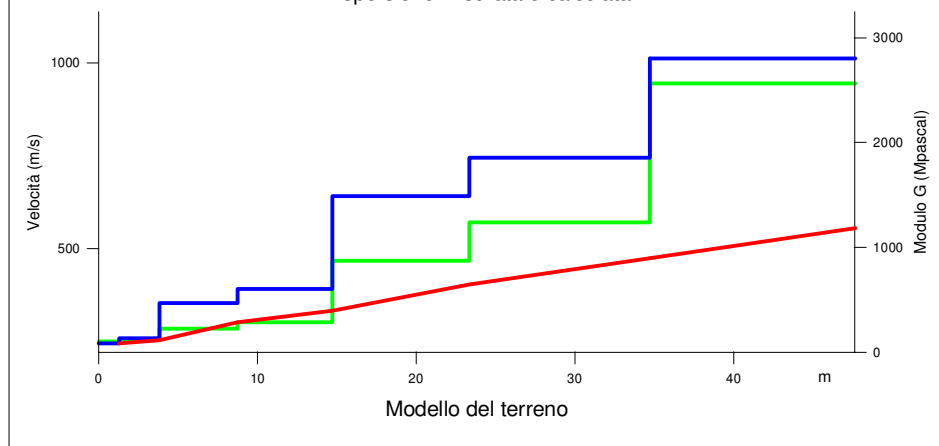
Il valore approssimato del peso di volume per il calcolo del parametro G è dato dalla formula $D=1.5 + V_s/1000$



Sismogramma



Dispersione misurata e calcolata



Modello del terreno

TABELLA DI CALCOLO

Da Prof.	a Prof.	Vs	Hi/Vi	VsX	G
0	1.3	244	.0052	244	104
1.3	3.8	257	.01	253	116
3.8	8.7	352	.0139	300	229
8.7	14.7	390	.0154	331	287
14.7	23.4	640	.0135	403	877
23.4	34.7	744	.0153	474	1242
34.7	47.6	1011	.0128	554	2567

VALORE CALCOLATO VS30 = 449 m/s

PROVA SISMICA VS30

COMUNE DI VERDELLINO (BG) - MASW 2

STUDIO ASSOCIATO DI GEOLOGIA SPADA

Metodologia MASW

**VELOCITA' DELLE ONDE S
MASW 2**

All. 2/a	Ottobre 2016	 <small>GEOTECNICA ELABORAZIONE DATI</small>
----------	--------------	---