

The background of the cover features a 3D wireframe landscape in shades of blue and white, with a prominent green line graph overlaid at the bottom. The graph shows a fluctuating line with a sharp peak on the left and a broader peak on the right. In the bottom left corner, there are faint contour lines with numerical values like 70, 60, and 50. The overall design is modern and technical, with abstract shapes in orange, blue, and red in the corners.

**EEG**

Comune di Guanzate (CO)

Viale Rimembranze – Guanzate (CO)

**INDAGINE GEOFISICA DI TIPO MASW  
FINALIZZATA  
ALLA DETERMINAZIONE DEL  
PARAMETRO VS30**

Dicembre 2011

## 1 PREMESSA

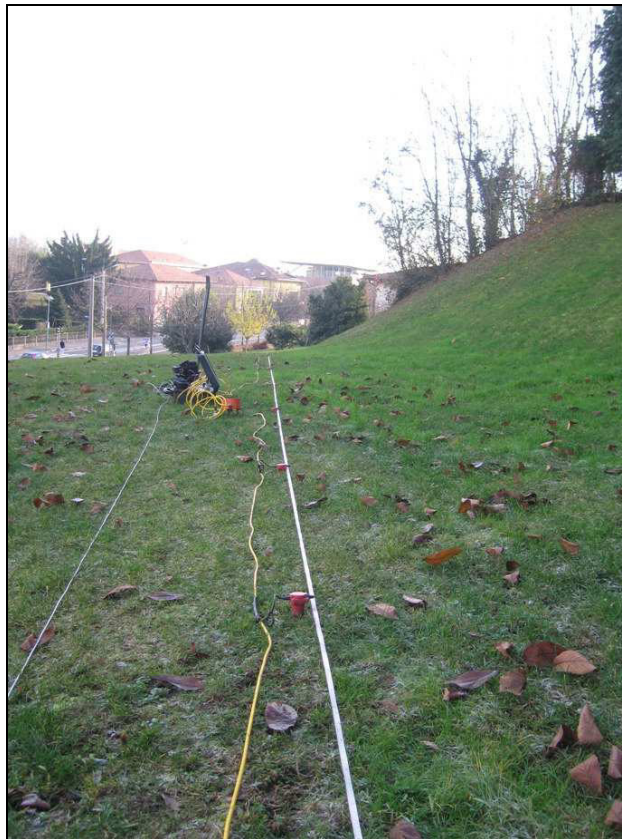
Il giorno 7 Dicembre, per conto del Comune di Guanzate, è stata eseguita un'indagine geofisica mediante una prova MASW, sul terreno terrazzato adiacente a viale Rimembranze; lo scopo del lavoro era il calcolo del parametro Vs30, come richiesto dall' Ordinanza 3274 del 20/03/03 del Presidente del Consiglio dei Ministri che ha introdotto la nuova normativa tecnica in materia di progettazione antisismica.

In questo cantiere si realizzerà un probabile ampliamento dell'edificio scolastico.

## 2 INDAGINI EFFETTUATE

La caratteristica delle prova è:

<i>Nome</i>	<i>Stendimento geofonico (m)</i>	<i>Energizzaz.</i>	<i>Geofoni</i>
M1	46	2	24



*Foto 1:  
Il sismografo, al centro della stesa fra il geofono 12 e 13*



*Foto 2:*

*Il geofono triassiale, collegato al sismografo, durante l'acquisizione dei microtremori*

### 3 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  $V_s$ .

Per ottenere un profilo  $V_s$  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 modellazione diretta che per la procedura ai minimi quadrati.

Dei valori approssimati per il rapporto di Poisson e per la densità sono necessari per ottenere il profilo verticale  $V_s$  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 Rayleigh, 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.



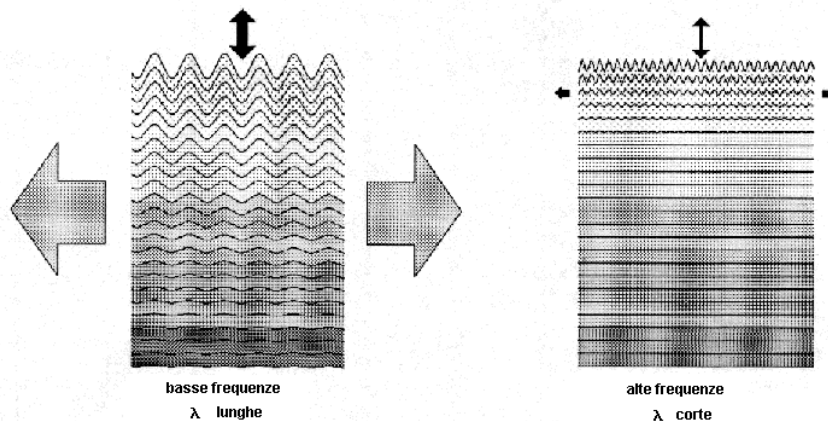
Le onde superficiali riverberate (back scattered) possono essere prevalenti in un sismogramma multicanale se in prossimità delle misure sono presenti discontinuità orizzontali quali fondazioni e muri di contenimento. Le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza 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  $V_s$  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).



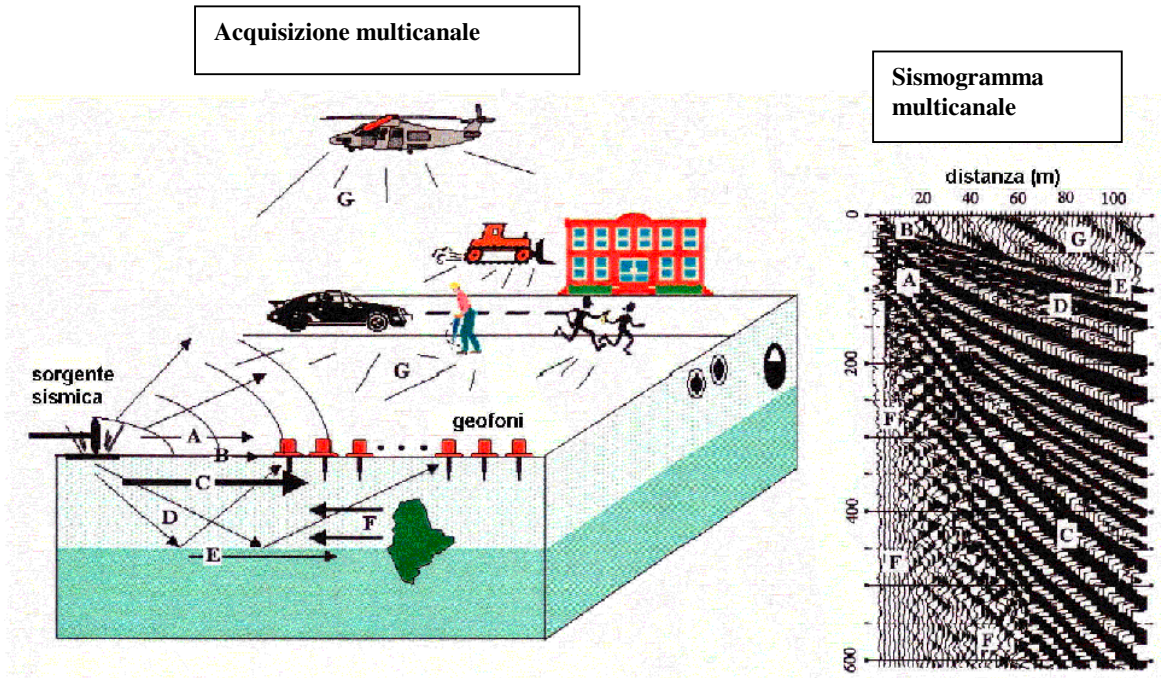
L'illustrazione mostra le proprietà di dispersione delle onde di superficie. Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione 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

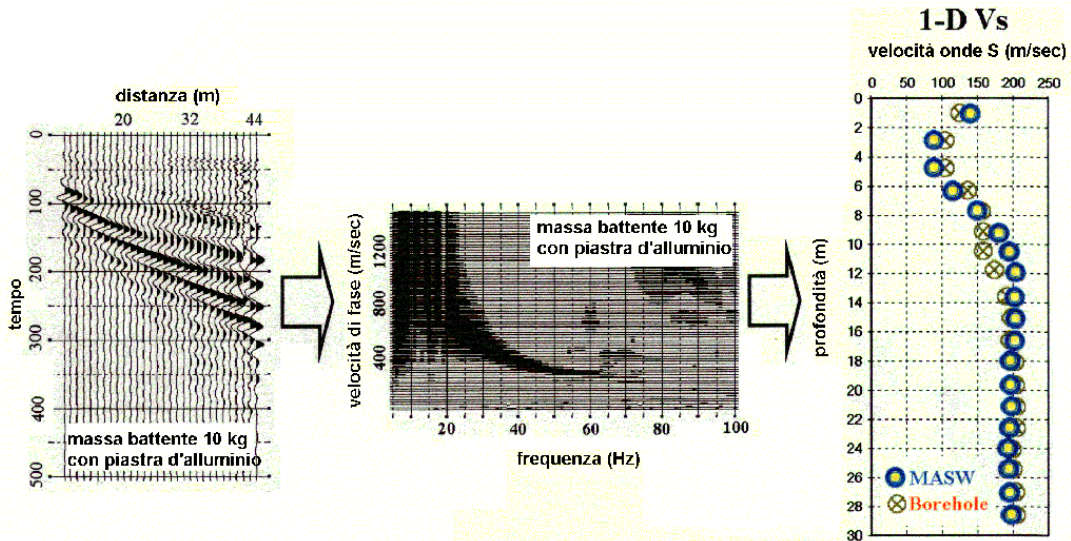
## VANTAGGI DELLA REGISTRAZIONE MULTICANALE



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

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 utili.

## 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 - PROSPEZIONE SISMICA PASSIVA – METODO HVSR

La metodologia sismica HVSR (Horizontal to Vertical Spectrum Ratio) misura il rumore sismico ambientale che è presente ovunque sulla superficie terrestre, ed è prodotto dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, microterremoti, vento) e dall'attività antropica.

Il rumore sismico ambientale viene anche chiamato *microtremore* in quanto costituito da oscillazioni di piccolissima ampiezza se confrontate con quelle associate ai terremoti.

La denominazione di sismica passiva dipende dal fatto che il rumore non viene generato *artificialmente*, come nelle energizzazione della sismica attiva, ma è presente naturalmente.

In qualsiasi luogo pianeggiante sono sempre presenti delle vibrazioni associate alle onde oceaniche con dei picchi a 0,14 e 0,07 Hz. A questo comportamento spettrale di "fondo", sempre presente in varia forma, e soggetto a scarsissima attenuazione, si sovrappongono le sorgenti locali dovute alle attività antropiche (traffico, macchinari ecc..) e naturali. L'effetto di queste sorgenti locali è soggetto ad attenuazioni quanto maggiori all'aumentare della frequenza e dovute all'assorbimento anelastico associato all'attrito interno delle rocce e dei terreni.

La metodologia HVSR è stata introdotta da Nakamura (1989) per la determinazione delle frequenze di risonanza dei terreni e la stima dell'amplificazione sismica locale, elementi di grande utilità per l'ingegneria sismica.

La frequenza fondamentale di risonanza ( $F$ ) dello strato di terreno  $n$  è data dalla formula:

$$F_n = V_s / 4 h$$

in cui  $V_s$  è la velocità media delle onde S nello strato  $N$  ed  $h$  è lo spessore.

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima delle velocità è in grado di fornire previsioni sullo spessore  $h$  degli strati.

Viceversa, nota la stratigrafia è teoricamente possibile fornire una valutazione approssimativa della velocità delle onde S nei singoli strati.



**Figura 1 - Sismografo EEG con geofono triassiale in fase di acquisizione**

I risultati (grafici) visibili in allegato, sono stati ottenuti mediante impiego di un geofono triassiale EEG ed elaborati con software EEG:

- il segnale dei velocimetri (3) è acquisito in sito per un tempo  $t$ , e digitalizzato a 16 bit con due linee di preamplificatori .

Per ciascuna delle 3 componenti del moto, il software esegue le seguenti elaborazioni:

- divide il tracciato acquisito in finestre di lunghezza  $L$  (in questo lavoro generalmente 26 s);
- elimina il trend da ciascuna finestra;
- fa il "pad" di ciascuna finestra con degli zero;
- calcola la trasformata di Fourier (FFT) per ciascuna finestra;
- calcola lo spettro di ampiezza per ciascuna finestra;
- liscia lo spettro di ogni finestra secondo opportuno smoothing;
- calcola il rapporto spettrale HVSR ad ogni frequenza, per ciascuna finestra.

La funzione HVSR finale è data dalle media degli HVSR di ciascuna finestra.

## 5 RISULTATI

Nelle **foto 1 e 2** del capitolo 2 e nell' **Allegato 1** sono visibili la posizione della stesa sismica ed i punti di shot, concordati con la committenza il giorno stesso dell'indagine. Tutti i geofoni sono stati posizionati in modo stabile e solidale sulla superficie prativa.

In **Allegato 2/a** sono riportati i risultati della prova MASW. L'allegato presenta nel riquadro in alto a sinistra l'immagine di dispersione dell'energia sismica (overtone); come si osserva per entrambi gli allegati esso è definito e nitido fra le frequenze 7 Hz e 30 Hz, (asse delle ascisse) con un buon rapporto segnale – rumore, idoneo per estrapolare una curva delle Vs di qualità ed attendibile.

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 Vs (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 con precisione. La formula utilizzata è la seguente:

$$\text{Densità} = 1,5 + Vs/1000$$

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

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

Con una curva di colore rosso è stato tracciato il valore di Vs progressiva.

Dalla curva si può quindi ricavare il valore di Vs10, Vs20 e così via, e quindi anche il valore di Vs30, quest'ultimo ovviamente alla profondità 30.

A destra è visibile il sismogramma mentre in basso è riportato il valore del parametro Vs30 calcolato utilizzando la stratigrafia Vs e la formula

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} h_i / V_i}$$

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 Vs riportata nella tavola allegata è quella utilizzata per il calcolo del Vs30 ed è sismicamente equivalente e ragionevolmente prossima alla stratigrafia reale anche se probabilmente non perfettamente coincidente.

Dallo studio della stratigrafia sismica delle Vs, (spezzata blu) dell' allegato, si osserva come le velocità siano modeste (inferiori a 200 m/s) solo per i primi decimetri di profondità da P.C. indice di terreni aerati di copertura; appena al di sotto si osserva subito un deciso incremento delle VS che salgono a circa 350 m/s, poi a circa 5 metri, con un altro importante step si superano i 750 m/s, indice di terreni grossolani ben addensati. Il bedrock sismico si raggiunge a circa 9 metri di profondità, indice di terreni consolidati; la velocità delle Vs poi sale molto più lentamente e gradualmente con il crescere della profondità.

Il Vs30 finale ottenuto, pari a 645 m/s colloca i terreni nella tabella ministeriale nella classe B, classificando con il grado Buono i terreni indagati.

Nell' **Allegato 2/b** sono riportati i risultati della misura dei microtremori, acquisiti mediante il geofono triassiale; la curva dei rapporti spettrali fra le componenti di moto è stata utilizzata per la modellizzazione congiunta con la prova masw, allo scopo di ottenere un modello finale il più coerente possibile con tutti i dati di campo.

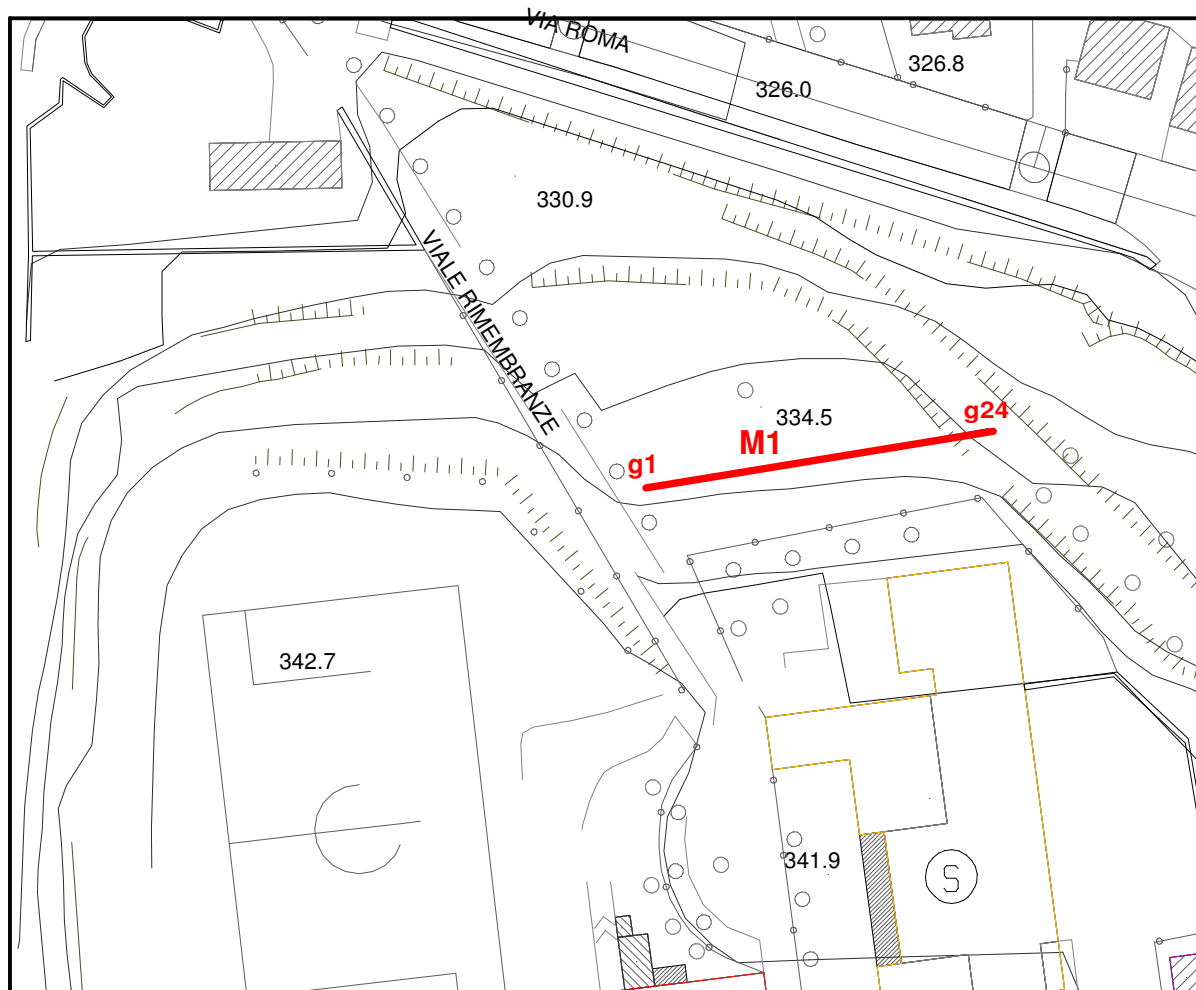
*Maurizio Zera*

**INDICE**

<b>1 PREMESSA</b>	<b>1</b>
<b>2 INDAGINI EFFETTUATE</b>	<b>1</b>
<b>3 ANALISI MULTICANALE DELLE ONDE SUPERFICIALI</b>	<b>3</b>
<b>4 RISULTATI</b>	<b>10</b>

**ALLEGATI**

<b>All. 1</b>	<b>UBICAZIONE DELLA MASW 1</b>
<b>All. 2/a – 2/b</b>	<b>RISULTATI MASW ED HVSR</b>



**LEGENDA**



Sezione sismica, suo nome, ubicazione del primo e dell'ultimo geofono

**PROVA SISMICA VS30**

Comune di Guanzate

Viale Rimembranze - Guanzate (CO)

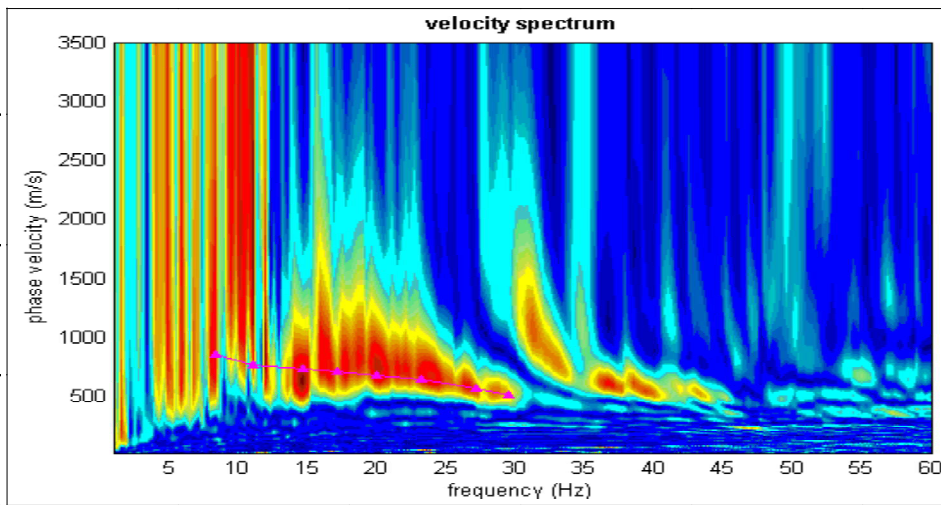
Metodologia MASW ed HVSR

**UBICAZIONE DELLA PROVA**

All. 1

Dicembre 2011

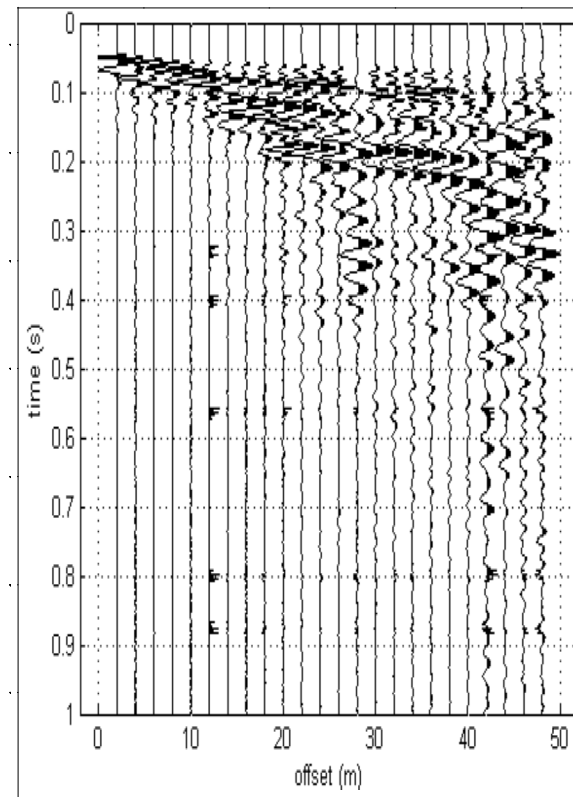
**EEG** s.r.l.  
GEOFISICA  
ELABORAZIONE DATI



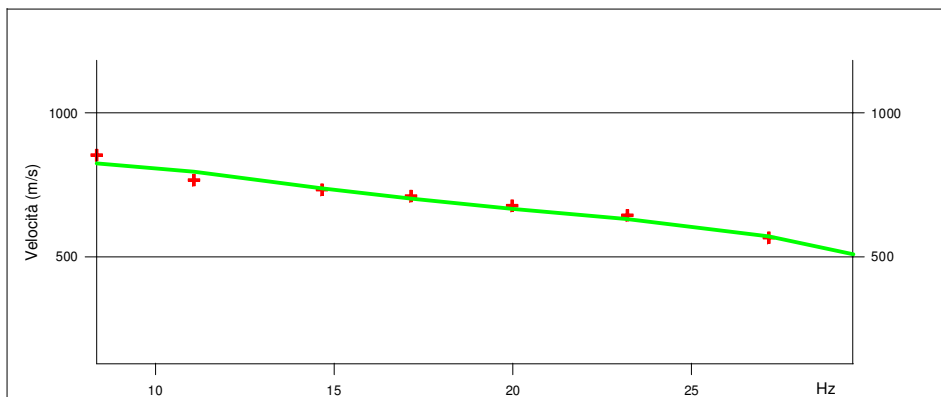
### LEGENDA

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

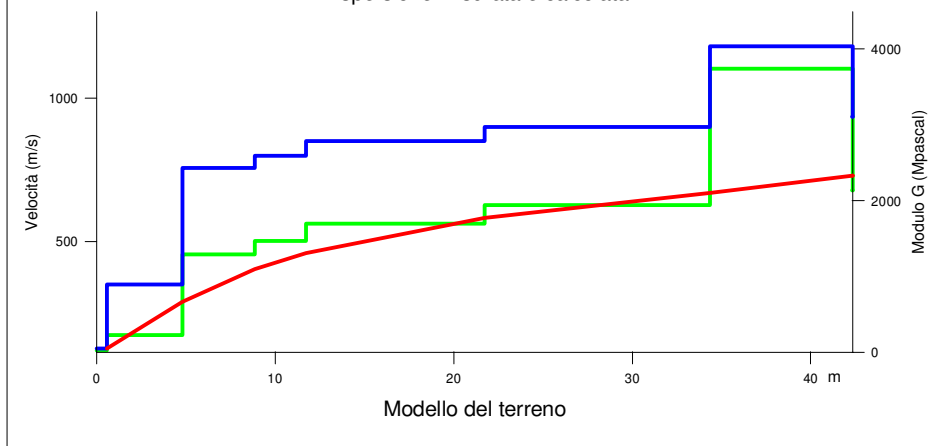
Il valore approssimato del peso di volume per il calcolo del parametro G è dato dalla formula  $D=1.5 + Vs/1000$



Sismogramma



Dispersione misurata e calcolata



Modello del terreno

### TABELLA DI CALCOLO

Da Prof.	a Prof.	Vs	Hi/Vi	VsX	G
0	.6	127	.0045	127	26
.6	4.8	350	.0121	290	227
4.8	8.8	757	.0053	404	1293
8.8	11.7	800	.0036	460	1472
11.7	21.7	850	.0118	583	1698
21.7	34.4	900	.014	669	1944
34.4	42.4	1181	.0068	729	3739

VALORE CALCOLATO VS30 = 645 m/s

## PROVA SISMICA VS30

Comune di Guanzate

Viale Rimembranze - Guanzate (CO)

metodologia MASW

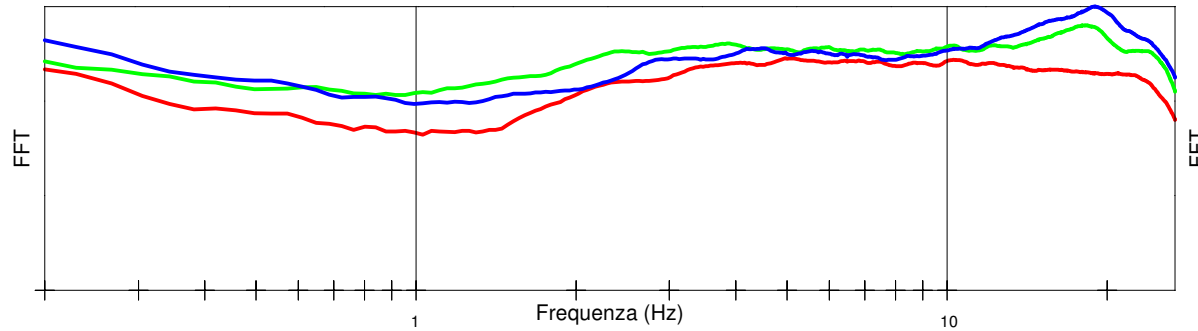
## VELOCITA' DELLE ONDE S

All. 2/a

Dicembre 2011

EEG s.r.l.  
GEOFISICA  
ELABORAZIONE DATI

### COMPONENTI XYZ DELLO SPETTRO DI FREQUENZA

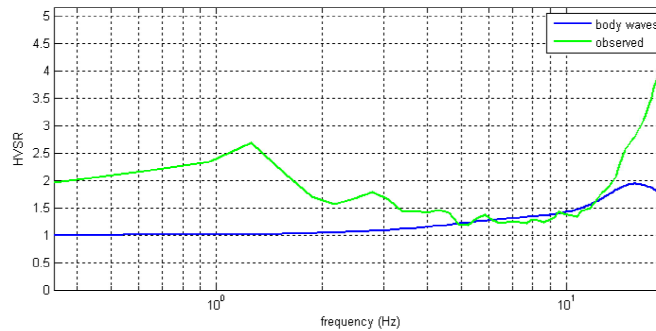
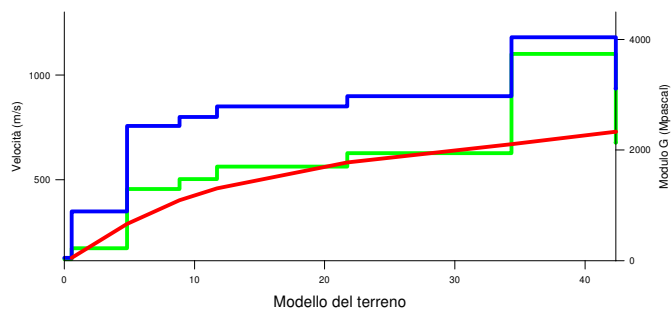
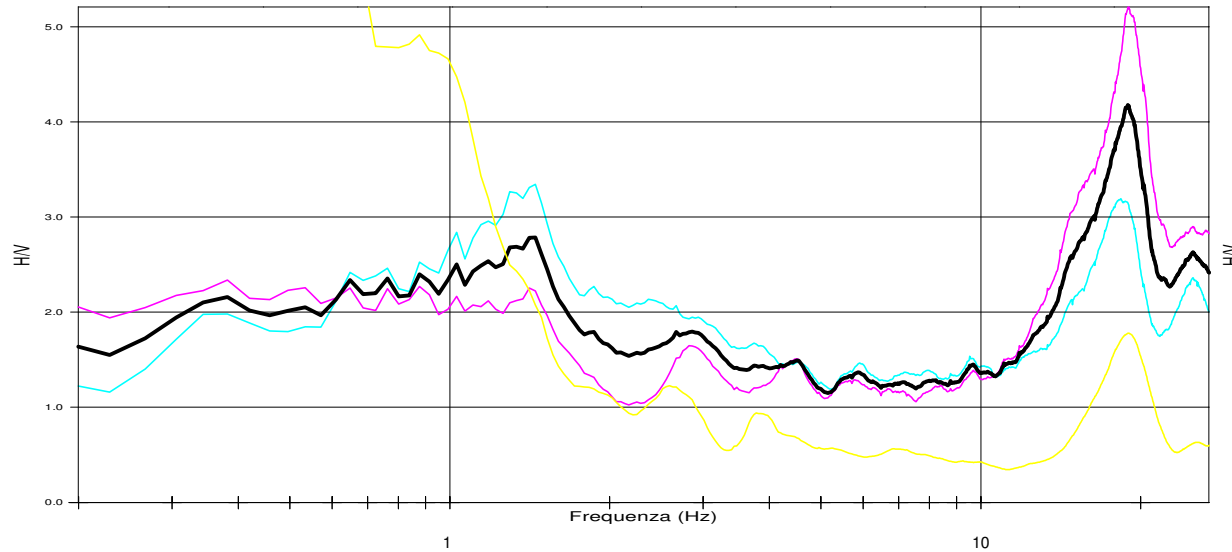


### LEGENDA

- Spettro asse Z (verticale)
- Spettro asse X
- Spettro asse Y
- H/V direzione X
- H/V direzione Y
- H/V media
- Deviazione standard

Durata della registrazione 17' 28.6"  
 Campionamento 10 Khz  
 Finestra di campionamento 26,2 s  
 Minima freq. attendibile 0.38

### RAPPORTO DELLE COMPONENTI SPETTRALI ORIZZONTALI SULLA VERTICALE



## PROVA H/V

Comune di Guanzate

Viale Rimembranze - Guanzate (CO)

Analisi H/V - Metodo Nakamura

## SPETTRI DI FREQUENZA

All. 2/b

Dicembre 2011

EEG  
 GEOFISICA  
 ELABORAZIONE DATI