



Via P. M. Faverio n° 4
22079 Villa Guardia CO
Tel e fax 031-563148
E-mail frati@geologi.it

ANALISI DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E
SISMICA DEL PIANO DI GOVERNO DEL TERRITORIO DEL
COMUNE DI VALMOREA (CO)

Secondo livello di approfondimento sismico

Febbraio 2009

COMMITTENTE: Amministrazione comunale di Valmorea (CO)

PROFESSIONISTI INCARICATI :

Dott. Geol. Civelli Giovanna - Dott. Geol. Frati Stefano

INDICE

1	PREMESSA.....	3
2	METODOLOGIA DI RIFERIMENTO	5
3	INDAGINI SVOLTE	8
3.1	INDAGINE MASW	9
3.2	INDAGINE HVSR	14
4	DETERMINAZIONE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE LOCALE	17
4.1	DEFINIZIONE DEL PERIODO PROPRIO DEL SITO.....	17
4.2	SITO 1 - POLO SCOLASTICO	17
4.3	SITO 2 - AROTUBI	20
5	DISCUSSIONE DEI RISULTATI	22

ALLEGATI

- Risultati delle indagini geofisiche

1 PREMESSA

Nell'ambito dell'incarico di aggiornamento/adeguamento dello Studio Geologico Comunale secondo i nuovi criteri stabiliti dalla l.r. 12/05 (legge per il governo del territorio), considerato che la progettazione urbanistica prevede due aree destinate ad edifici rientranti nell'elenco tipologico di quelli strategici e/o rilevanti (vedi d.d.u.o. n. 19904/03), si è reso necessario procedere al SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO SISMICO.

I due siti in esame (vedi Figure 1.1 e 1.2) sono:

1. Polo scolastico intercomunale di Via Roma;
2. Edificio industriale denominato ambito di trasformazione 2 (Arotubi) sito in Via Papa Giovanni XXIII.

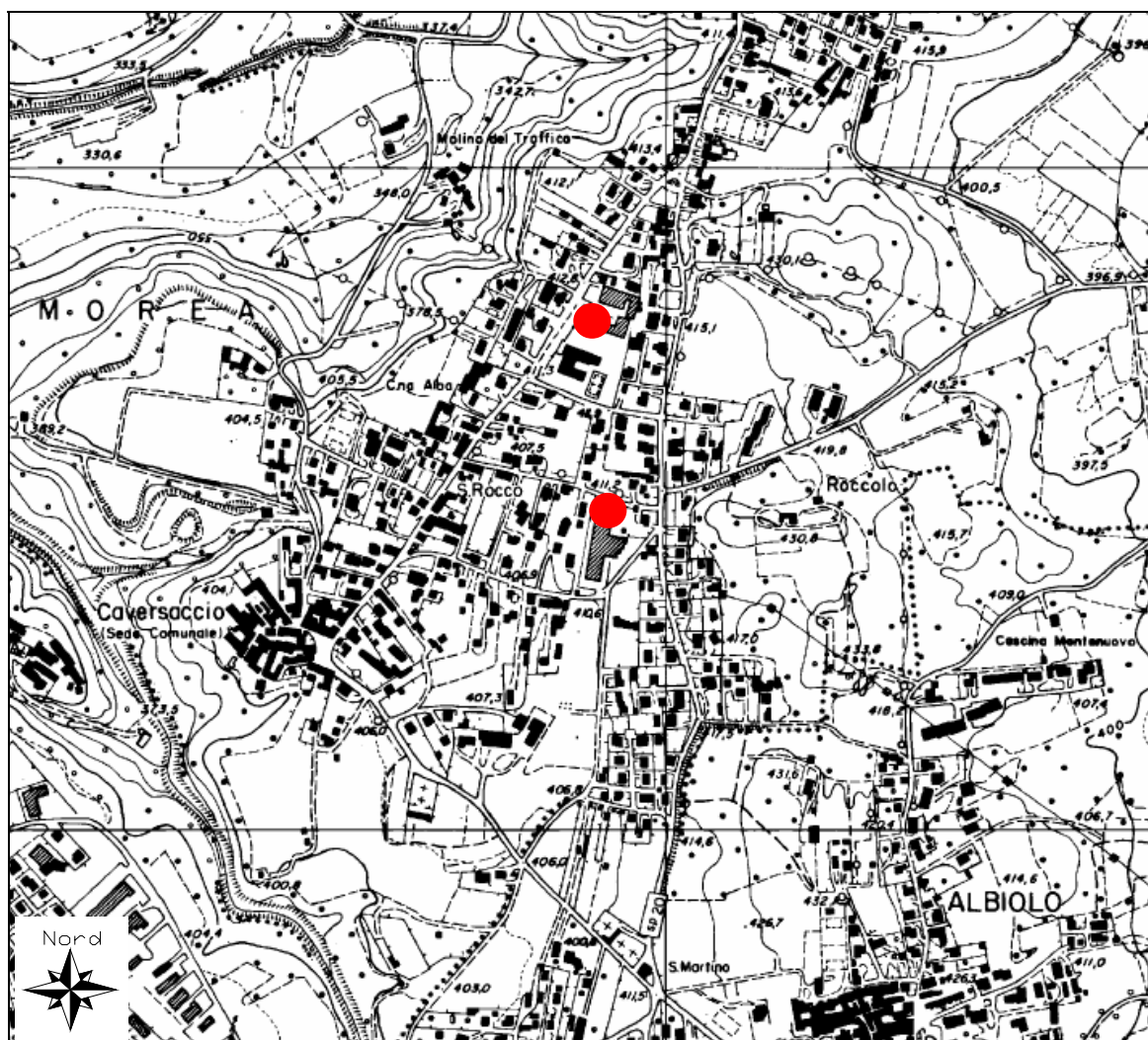


Figura 1.1 - Ubicazione aree in esame su CTR

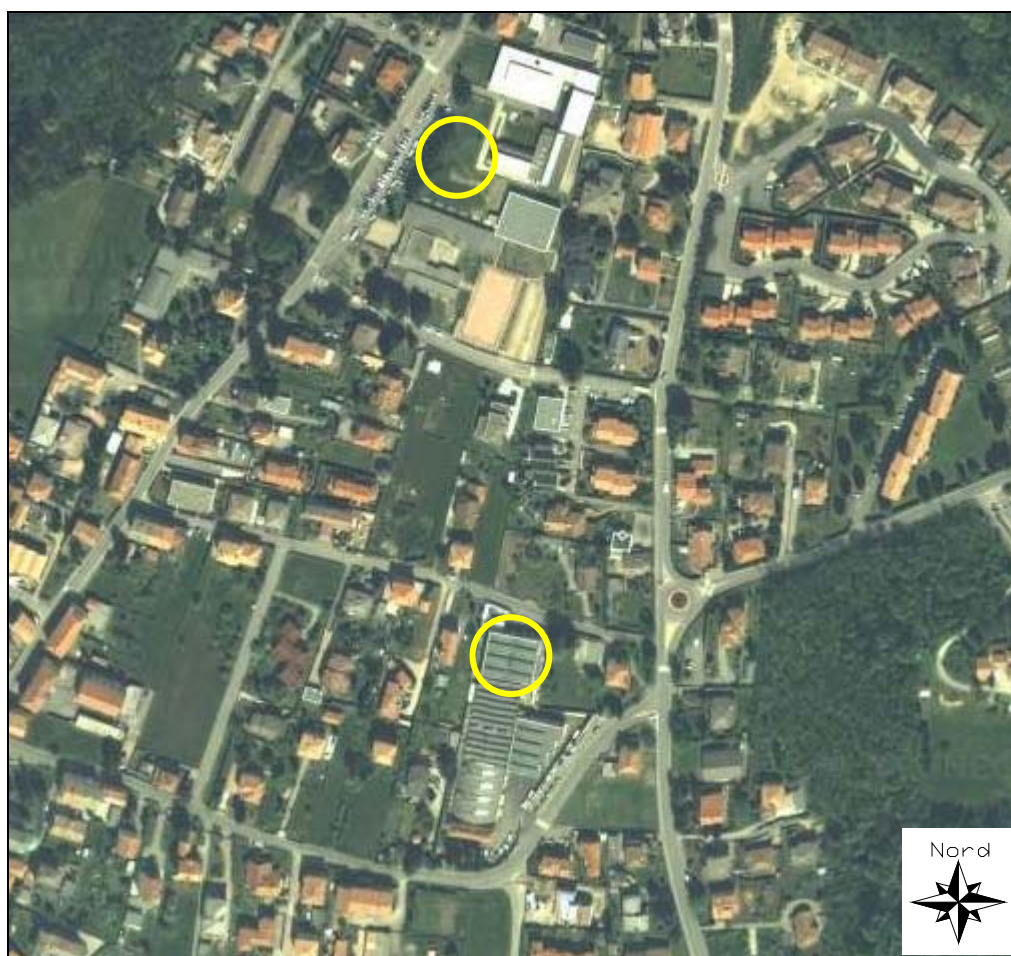


Figura 1.2 - Ubicazione aree in esame su foto aerea

L'analisi sismica di primo livello ha inserito i due siti in esame nello scenario di pericolosità sismica locale **Z4a** (zona di fondovalle e di pianura con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali granulari e/o coesivi), il cui effetto è riconducibile ad amplificazioni litologiche (vedi d.g.r. 8/7374 del 28 maggio 2008).

2 METODOLOGIA DI RIFERIMENTO

Secondo quanto stabilito dalla d.g.r n.14964 del 07/11/2003, la Regione Lombardia ha inserito il territorio comunale di Valmorea in Zona Sismica 4. Risulta, quindi, obbligatoria la progettazione antisismica per gli edifici strategici e/o rilevanti riportati nell'elenco tipologico di cui al d.d.u.o. n. 19904/03.

Le particolari condizioni geologiche e geomorfologiche di una zona (definite come “condizioni locali”) possono influenzare la pericolosità sismica di base, producendo effetti diversi che devono essere considerati nella valutazione generale della pericolosità sismica dell'area stessa.

Tali effetti vengono distinti in funzione del comportamento dinamico dei materiali coinvolti, ricavabile dall'identificazione delle caratteristiche del terreno presente nell'area.

In funzione di tali caratteristiche, si distinguono due gruppi di effetti locali:

- Effetti di sito o di amplificazione sismica locale: interessano tutti i terreni che mostrano un comportamento stabile nei confronti delle sollecitazioni sismiche attese. Gli effetti sono rappresentati dall'insieme delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico (terremoto di riferimento) relativo ad una formazione rocciosa di base (bedrock) può subire a causa dell'interazione delle onde sismiche con le particolari condizioni locali. Tali effetti si distinguono in:
 - effetti di amplificazione topografica: si verificano quando le condizioni locali sono caratterizzate da morfologie articolate ed irregolari;
 - effetti di amplificazione litologica: si verificano quando le condizioni locali sono rappresentate da morfologie sepolte e da particolari profili stratigrafici costituiti da litologie con determinate proprietà meccaniche.
- Effetti di instabilità: interessano tutti i terreni che mostrano un comportamento instabile o potenzialmente instabile nei confronti delle sollecitazioni sismiche attese e sono rappresentati da fenomeni di instabilità consistenti in collassi e/o movimenti di grandi masse di terreno.

La valutazione degli effetti sismici di sito riportata nella delibera di riferimento (d.g.r. 22 dicembre 2005 n. 8/1566 “*Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio, in attuazione dell'art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n. 12*” e successive modifiche) prevede tre livelli di approfondimento con grado di dettaglio crescente:

- 1° livello: da realizzarsi in fase di pianificazione urbanistica;
- 2° livello: obbligatorio per i Comuni ricadenti in Zona Sismica 4 in aree classificate Z3 e Z4 solo per progettazione di edifici strategici e/o rilevanti;
- 3° livello: da realizzarsi se necessario in fase di progettazione.

Il 1° livello consiste in un approccio qualitativo e costituisce lo studio propedeutico ai successivi livelli di approfondimento. Si tratta di un metodo empirico che permette l'individuazione delle zone dove i diversi effetti prodotti dall'azione sismica sono prevedibili, sulla base di osservazioni geologiche e sulla raccolta dei dati disponibili.

Lo Studio Geologico Comunale di Valmorea inserisce le aree in esame in zona Z4a, che include lo scenario di pericolosità sismica locale legato alla presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali.

La situazione rilevata impone quindi la necessità di effettuare il secondo livello di approfondimento sismico al fine di valutare gli effetti di amplificazione litologica.

L'applicazione del 2° livello consente l'individuazione di aree in cui la normativa nazionale risulta insufficiente a salvaguardare dagli effetti di amplificazione sismica locale (*Fattore di amplificazione calcolato superiore ai Fattori di amplificazione di soglia comunali* forniti dal Politecnico di Milano).

La metodologia utilizzata per la stima quantitativa della risposta sismica dei terreni in termini di valore di fattore di amplificazione locale è quella riportata nella d.g.r. 28 maggio 2008 n. 8/7374.

Di seguito vengono riportati i valori di soglia calcolati ai sensi del d.m. 14/01/2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni" per il Comune di Valmorea.

CATEGORIA DI SUOLO	FATTORE DI AMPLIFICAZIONE Intervallo di periodo 0.1-0.5 s	FATTORE DI AMPLIFICAZIONE Intervallo di periodo 0.5-1.5 s
B	1,4	1,7
C	1,8	2,4
D	2,2	4,2
E	2,0	3,1

Fattori di amplificazione per periodi e suoli differenti

Per quanto riguarda le categorie di suolo si rimanda alla definizione riportata nelle NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI.

- A – *Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi* caratterizzati da valori di V_{S30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali livelli di alterazione superficiale con spessore massimo pari a 5 m.
- B – *Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti*, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica NSPT > 50, o coesione non drenata C_u > 250 kPa).
- C – *Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{S30} compresi tra 180 e 360 m/s ($15 < \text{NSPT} < 50$, $70 < C_u < 250\text{kPa}$).
- D – *Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti*, caratterizzati da valori di $V_{S30} < 180$ m/s ($\text{NSPT} < 15$, $C_u < 70\text{kPa}$).
- E – *Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali*, con valori di V_{S30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{S30} > 800$ m/s.

Per quanto riguarda gli intervalli di periodo, si ricorda che l'intervallo tra 0,1 e 0,5 s si riferisce a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide, mentre l'intervallo tra 0,5 e 1,5 s si riferisce a strutture più alte e flessibili.

3 INDAGINI SVOLTE

Al fine di procedere ad una caratterizzazione sismica dei terreni in esame è stata eseguita una campagna di indagini geofisiche la cui ubicazione e tipologia è riportata nelle Figure 3.1 e 3.2.

Nello specifico, le metodologie utilizzate sono state le prove sismiche MASW, finalizzate alla ricostruzione della stratigrafia sismica del sottosuolo, e quella mediante la tecnica dei rapporti spettrali, o HVSr, per individuare il periodo di risonanza del sito.

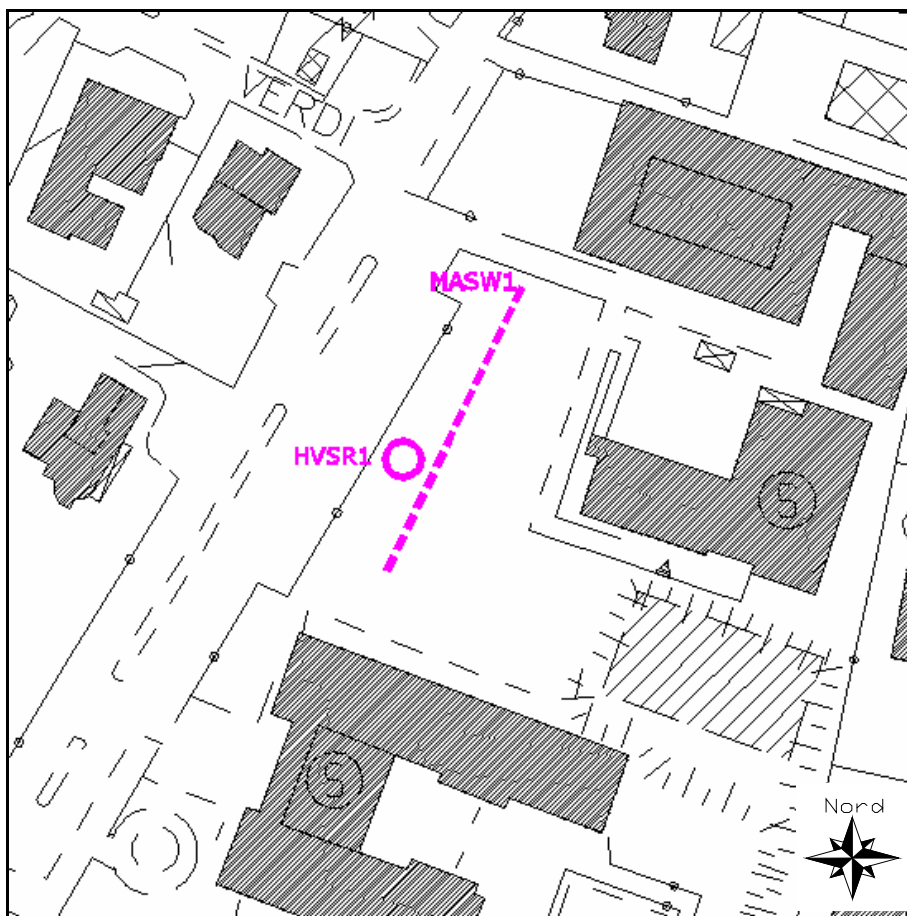


Figura 3.1 – Ubicazione delle indagini geofisiche nel sito 1

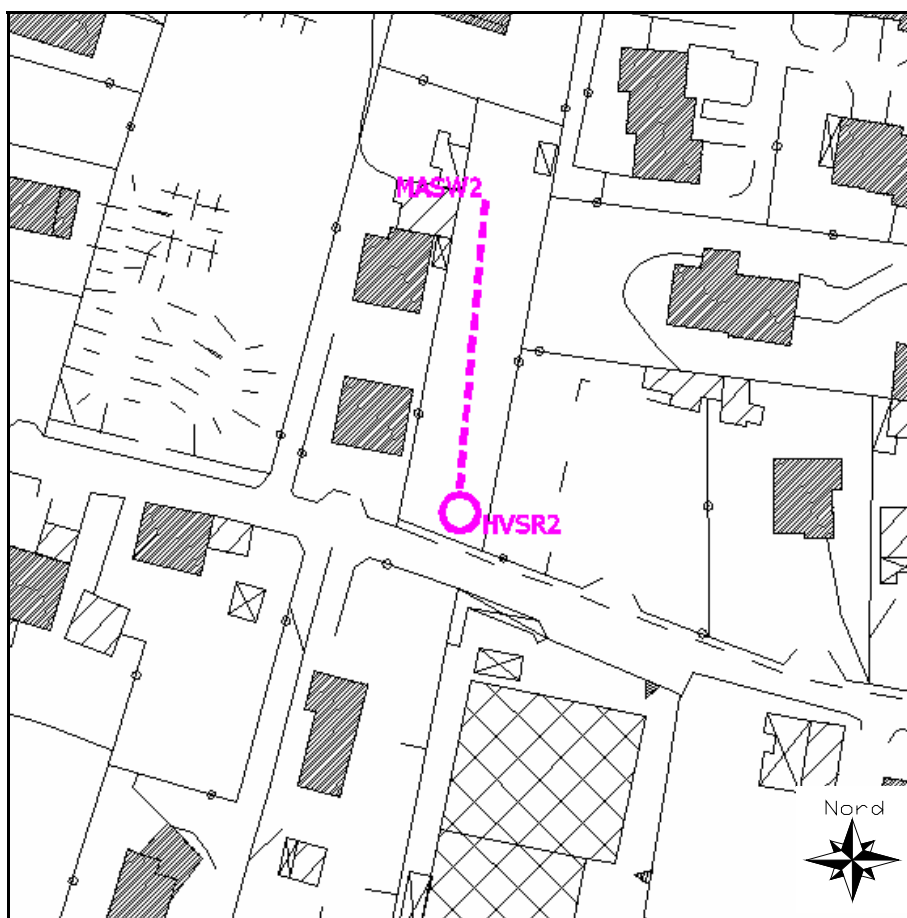


Figura 3.2 – Ubicazione delle indagini geofisiche nel sito 2

3.1 Indagine MASW

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 valuta-

re la rigidità superficiale. 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 il rapporto di Poisson e 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 presenti. 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, un'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 la 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). La Figura 3.3 mostra le proprietà di dispersione delle onde di superficie.

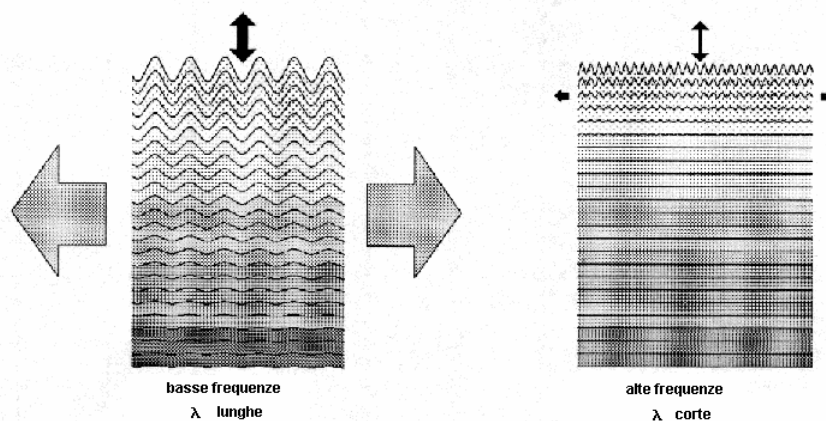


Figura 3.3 - Proprietà di dispersione delle onde di superficie

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 caratteri-

stiche della dispersione.

La strumentazione utilizzata per le indagini condotte è costituita da :

- *un sismografo EEG BR24 24 canali*
- *24 geofoni a 4.5Hz*
- *fucile sismico*



Sito 1



Sito 2

Documentazione fotografica esecuzione stendimenti sismici

RESTITUZIONE GRAFICA DEI RISULTATI

Gli allegati grafici alle prove MASW (in allegato alla presente relazione) mostrano nel riquadro in alto a sinistra l'immagine di dispersione dell'energia sismica (overtone); come si osserva esso è definito e nitido fra le frequenze 5 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:

- $Densità = 1,5 + V_s/1000$

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

- $G = V_s \times V_s \times Densità / 10^3$

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 relativa formula.

COMMENTO ALLE INDAGINI ESEGUITE

▪ **Sito 1**

Dallo studio della stratigrafia sismica delle V_s (spezzata blu), si osserva come le velocità nei primi metri siano già discrete (circa 300 m/s) fino a circa 6,5 m di profondità da p.c., indice di terreni di copertura già moderatamente addensati. Dopo 6,5 m si osserva un modesto incremento delle V_s che salgono a circa 350 m/s, indice di terreni ad addensamento crescente, mentre a 10 m da p.c. un ulteriore incremento dell'onda S spinge la velocità a circa 430 m/s, indice di terreni consolidati. Al crescere della profondità, si nota un debole ma costante e graduale incremento della V_s con velocità che superano 500 m/s nei primi 30 metri, indice di terreni probabilmente molto addensati o parzialmente cementati. Il V_{s30} finale ottenuto, pari a 408 m/s, colloca i terreni nella tabella ministeriale nella classe B.

▪ **Sito 2**

Dallo studio della stratigrafia sismica delle V_s (spezzata blu), si osserva come le velocità nei primissimi metri siano lente (inferiori a 300 m/s) fino a circa 4,5 metri di profondità da p.c., indice di terreni agricoli e di copertura. Dopo 4,5 m e a 13 m da piano campagna, si osservano rispettivamente due step di incremento delle V_s che salgono a circa 380 m/s dopo il primo e a quasi 600 m/s dopo il secondo step, indice di terreni che da addensati diventano probabilmente parzialmente cementati. Al crescere della profondità, si nota un costante, ma debole e graduale incremento della V_s con velocità che superano 650 m/s a 30 metri, indice di terreni probabilmente parzialmente cementati e litificati. Il V_{s30} finale ottenuto, pari a 473 m/s, colloca i terreni nella tabella ministeriale nella classe B.

3.2 Indagine HVSR

L'indagine geofisica tomografica si avvale della metodologia basata sulla tecnica di Nakamura e sul rapporto spettrale H/V.

La tecnica dei rapporti spettrali o HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque. I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la velocità media delle onde di taglio V_s calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. È possibile calcolare la V_{s30} e la relativa categoria del suolo di fondazione come esplicitamente richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 gennaio 2008.
- la stratigrafia del sottosuolo con un *range* di indagine compreso tra 0,5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremoni. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

1. dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s ,
2. dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
3. dalla risposta dello strumento.

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai

fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre (vedi Figura 3.4). Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

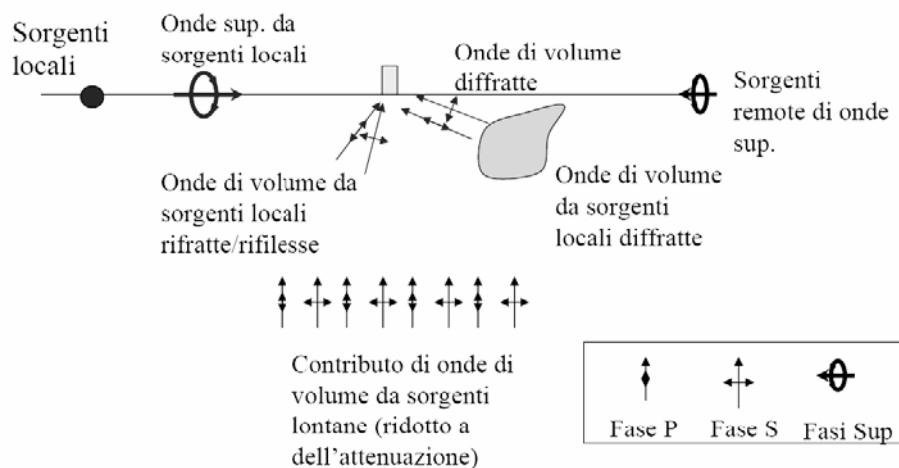


Figura 3.4 – Rappresentazione grafica tecnica HVSR

Nel tragitto dalla sorgente *s* al sito *x* le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartate dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune. Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali dei sottosuoli; informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromometro digitale modello "Tromino" che rappresenta la nuova generazione di strumenti ultra-leggeri e ultra-compatti in alta risoluzione adatti a tali misurazioni. Lo strumento racchiude al suo interno tre velocimetri elettrodinamici ortogonali tra loro ad alta definizione con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz. I dati vengono memorizzati in una scheda di memoria interna da 512 Mb, evitando così la presenza di qualsiasi cavo che possa introdurre rumore meccanico ed e-

lettronico.

I dati sono stati convertiti in file ASCII mediante il software “Grilla”, fornito a supporto dello strumento utilizzato, quindi elaborati per ottenere spettri di velocità in funzione della frequenza. Per considerare la misura ottenuta come una stima dell’ellitticità delle onde di Rayleigh è necessario che:

1. i rapporti H/V ottenuti sperimentalmente siano “stabili” ovvero frutto di un campionamento statistico adeguato,
2. gli effetti di sorgente siano stati effettivamente mediati ovvero non ci siano state sorgenti “dominanti”,
3. la misura non contenga errori sistematici (per es. dovuti ad un cattivo accoppiamento dello strumento con il terreno)

Per la determinazione delle velocità delle onde di taglio si utilizza un codice di calcolo appositamente creato per interpretare i rapporti spettrali (HVSr) basati sulla simulazione del campo di onde di superficie (Rayleigh e Love) in sistemi multistrato a strati piani e paralleli secondo la teoria descritta in AKI (1964) e Ben-Menahem e Singh (1981). Il codice può elaborare modelli con qualsiasi numero di strati (limitati a 50 nella tabella d’input), in qualsiasi intervallo di frequenze e in un qualsiasi numero di modi (fondamentale e superiori). Operativamente si costruisce un modello teorico HVSr avente tante discontinuità sismiche quante sono le discontinuità evidenziate dalla registrazione eseguita. Successivamente, tramite uno specifico algoritmo, si cercherà di adattare la curva teorica a quella sperimentale; in questo modo si otterranno gli spessori dei sismostrati con la relativa velocità delle onde Vs.

COMMENTO ALLE INDAGINI ESEGUITE

Le due misurazioni tromografiche effettuate hanno fornito alcune informazioni sul sottosuolo dell’area. Il valore Vs₃₀ determinato con i risultati tromografici ipotizzando un stratigrafia litologica del sottosuolo è risultata compatibile con quello misurato con le indagini MASW. Probabilmente a causa della presenza di un’inversione di velocità, legata alla presenza della formazione argillosa del Villafranchiano, il picco di risonanza riferito al tetto del substrato roccioso risulta poco evidente.

La MASW 2 indica una probabile frequenza di risonanza inferiore all’unità il che corrisponde ad una profondità del substrato roccioso maggiore di 100 m.

I picchi più evidenti osservati nelle misurazioni tromografiche corrispondono probabilmente al passaggio litologico depositi fluvioglaciali/conglomerato del Ceppo ma non rappresentano il periodo di risonanza principale del sito.

4 DETERMINAZIONE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE LOCALE

Attraverso i risultati delle indagini geofisiche condotte è stato possibile utilizzare la procedura riportata nella normativa di riferimento per la determinazione semplificata dei fattori di amplificazione litologica locale per ogni singolo sito indagato.

4.1 Definizione del periodo proprio del sito

Il periodo proprio del sito (T), secondo la procedura della Regione Lombardia, deve essere ricavato dalla stratigrafia sismica dell'area fino al substrato sismico ($V_s > 800$ m/s).

Un approccio più realistico al problema può essere effettuato con una misura diretta di tale valore mediante misurazione tomografica. Le misurazioni effettuate nell'ambito del presente lavoro, però, hanno evidenziato la presenza di un inversione di velocità che determina uno smorzamento del valore di risonanza tipico.

Le indagini MASW d'altra parte non hanno raggiunto il substrato sismico in quanto non hanno intercettato orizzonti con valori di V_s maggiori di 800 m/s.

Per la determinazione del periodo si sono dovute quindi accettare delle semplificazioni e delle ipotesi. In particolare è stata "ricostruita" una stratigrafia sismica oltre la profondità massima raggiunta dalle MASW, sulla base di un andamento compatibile con la parte finale della spezzata MASW.

Con questa metodologia si è giunti ai seguenti valori:

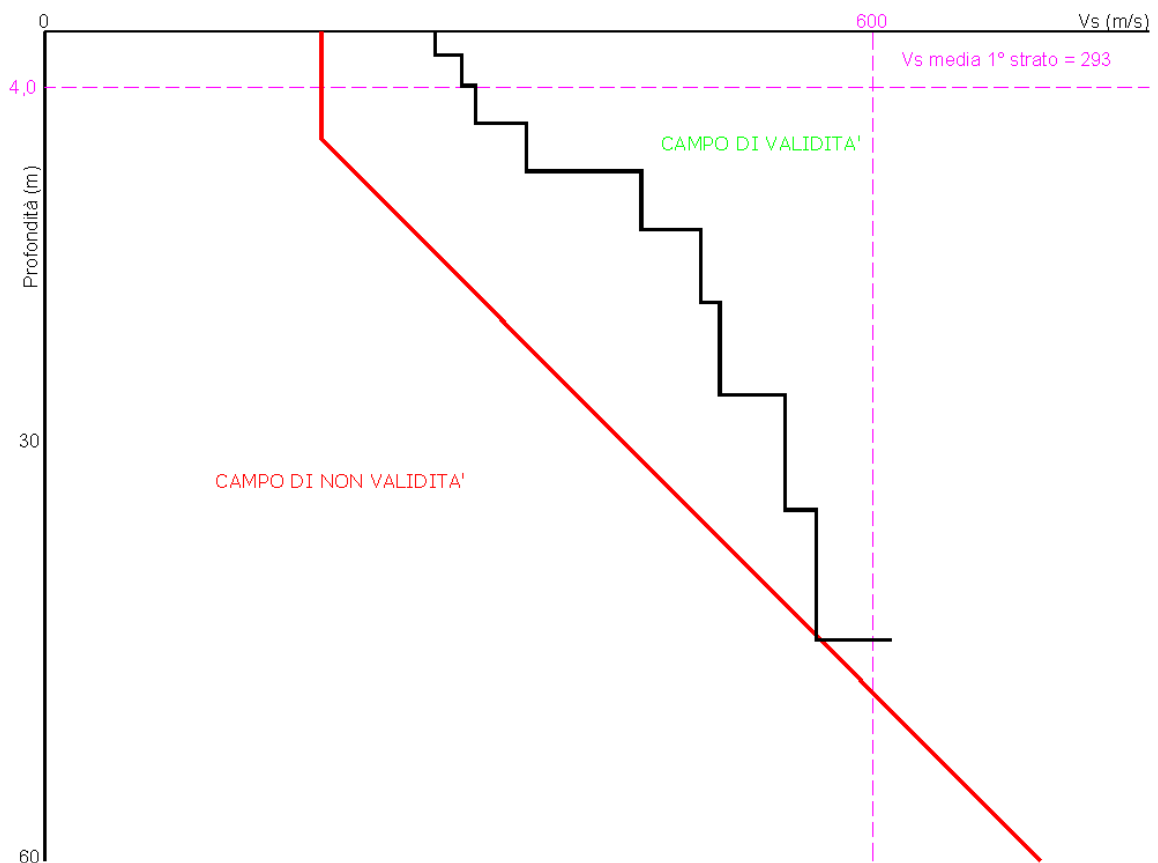
- Sito 1 - Periodo proprio = 0.5 s
- Sito 2 - Periodo proprio = 0.4 s

Tali valori risultano compatibili con i risultati delle misure tomografiche in quanto indicano la presenza di un substrato molto profondo.

4.2 Sito 1 - Polo scolastico

Inizialmente, è stata verificata la validità della scheda di riferimento proposta per litologie prevalenti ghiaiose (litologia che caratterizza il primo sottosuolo dell'area in esame). La stratigrafia sismica ricavata dalle indagini condotte non ricade però nel campo di validità di tale scheda.

La stratigrafia ricostruita risulta invece compatibile con la scheda relativa a litologia limoso-sabbiosa tipo 2 (vedi Figura 4.1).



*Figura 4.1 - Verifica della validità del modello per litologia limoso-sabbiosa tipo 2
VERIFICATO*

Sono stati quindi determinati i valori di F_a riferiti ai due intervalli di periodo 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s.

▪ PERIODO 0,1 – 0,5 s (strutture rigide e basse)

Nella Figura 4.2 sono riportate tre differenti curve sulla base dello spessore e della velocità delle onde S del primo strato sismico.

Il sito in esame è risultato compatibile con la curva 3 di colore blu.

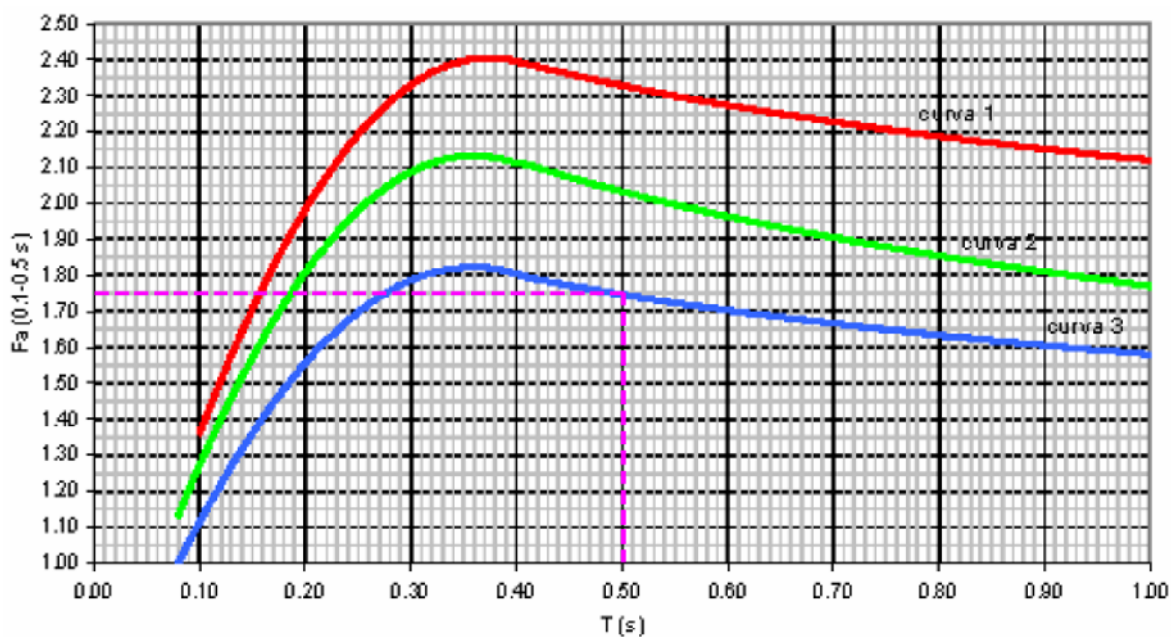


Figura 4.2

Di seguito viene ricavato il valore di F_a .

$$T = 0.50 \Rightarrow F_a = 1.75$$

- PERIODO 0,5 – 1,5 s (strutture flessibili e alte)

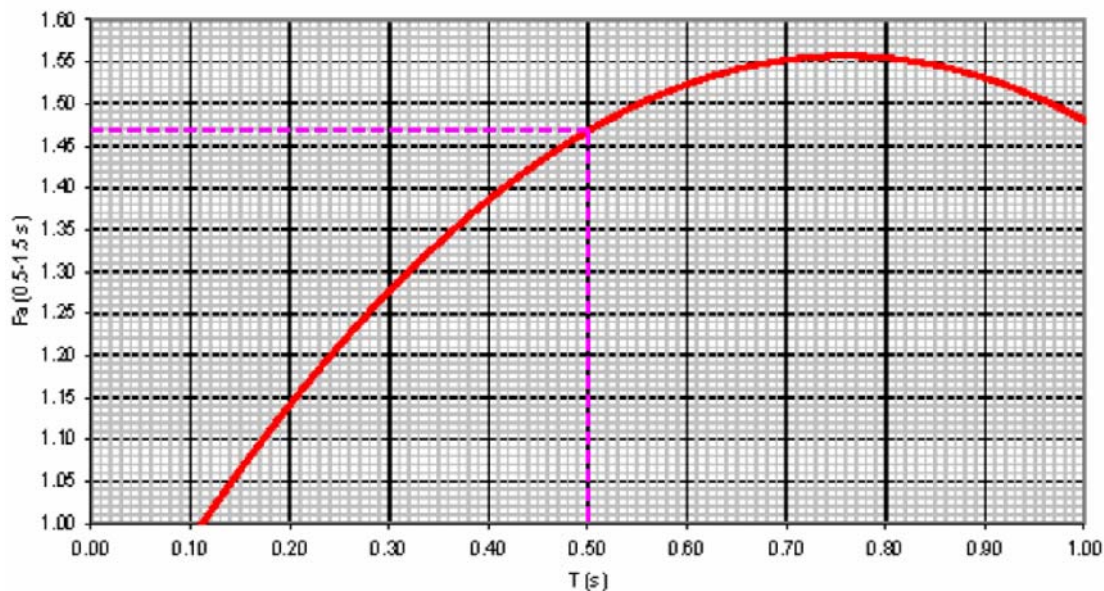


Figura 4.3

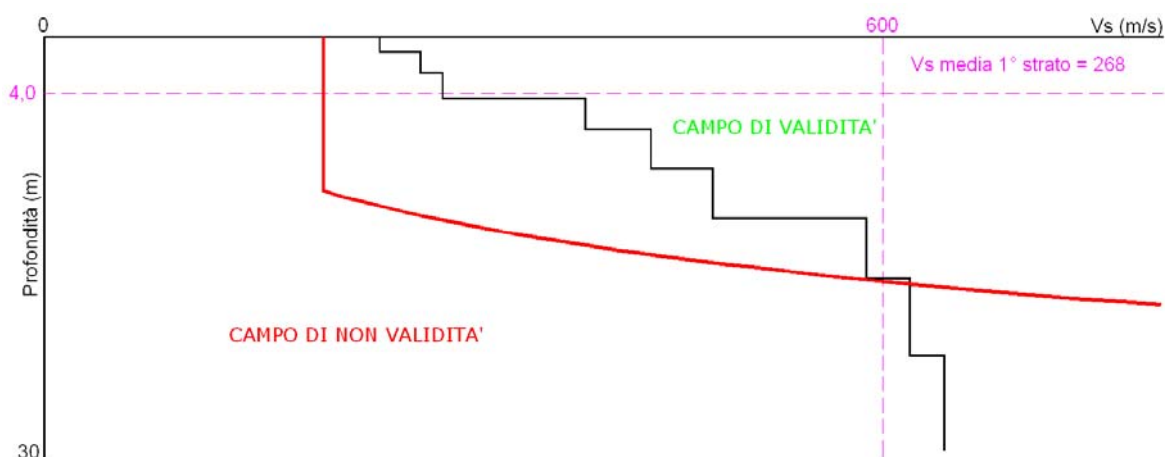
Il grafico (Figura 4.3) per questo intervallo di periodo riporta un'unica curva di riferimento. Si è quindi ricavato il valore di F_a , riferito ad un periodo T di 0.5 s.

$$T = 0.5 \Rightarrow F_a = 1.47$$

4.3 Sito 2 - Arotubi

Inizialmente, è stata verificata la validità della scheda di riferimento proposta per litologie prevalenti ghiaiose (litologia che caratterizza il primo sottosuolo dell'area in esame). La stratigrafia sismica ricavata dalle indagini condotte non ricade però nel campo di validità di tale scheda.

La stratigrafia misurata risulta invece compatibile con la scheda relativa a litologia limoso-sabbiosa tipo 1 (vedi Figura 4.4).



*Figura 4.4 - Verifica della validità del modello per litologia limoso-sabbiosa tipo 1
VERIFICATO*

Sono stati quindi determinati i valori di F_a riferiti ai due intervalli di periodo 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s.

- PERIODO 0,1 – 0,5 s (strutture rigide e basse)

Nella Figura 4.5 sono riportate tre differenti curve sulla base dello spessore e della velocità delle onde S del primo strato sismico.

Il sito in esame è risultato compatibile con la curva 2 di colore verde.

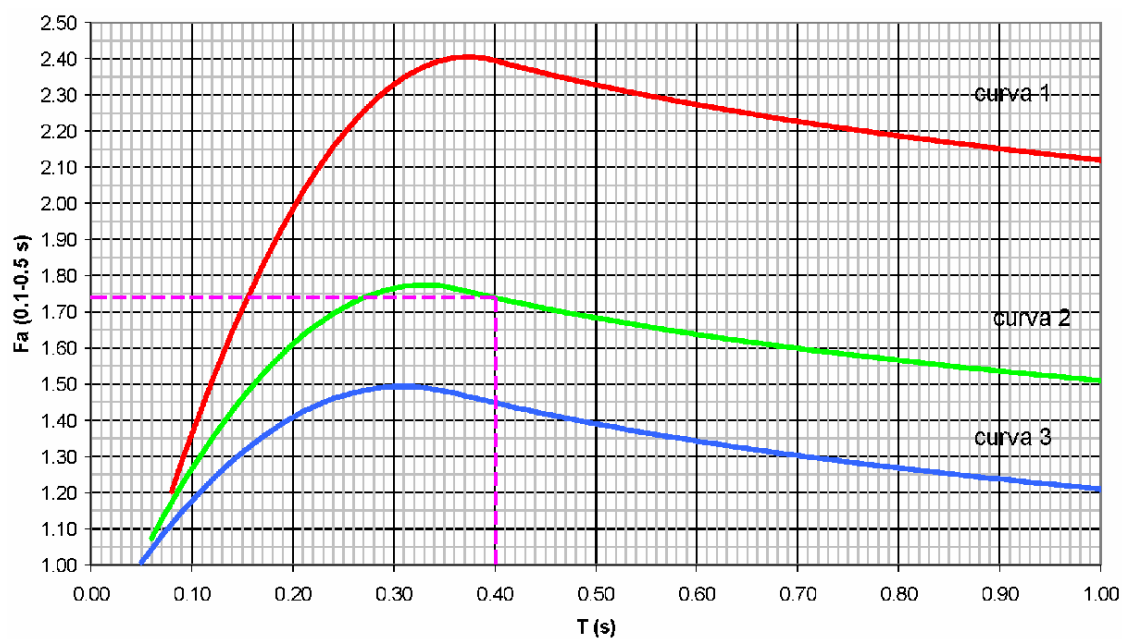


Figura 4.5

Di seguito viene ricavato il valore di F_a .

$$T = 0.40 \Rightarrow F_a = 1.75$$

- PERIODO 0,5 – 1,5 s (strutture flessibili e alte)

Il grafico (Figura 4.6) per questo intervallo di periodo riporta un'unica curva di riferimento.

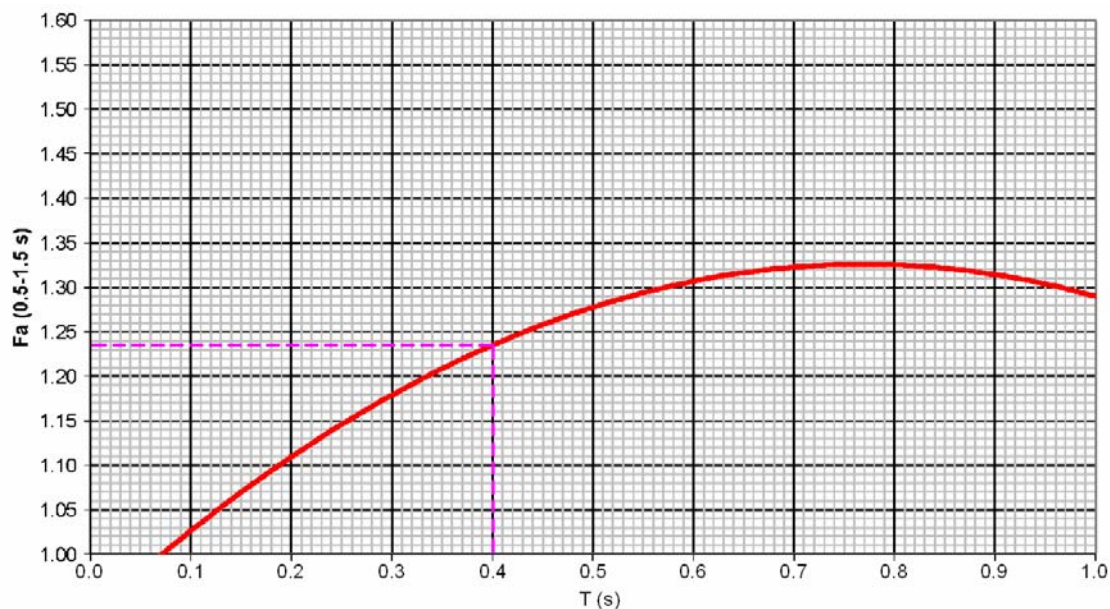


Figura 4.6

Si è quindi ricavato il valore di F_a riferito ad un periodo T di 0.4 s.

$$T = 0.4 \Rightarrow F_a = 1.24$$

5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Di seguito vengono analizzati in dettaglio i risultati delle analisi condotte, facendo il confronto con quanto previsto dalla normativa nazionale.

Sito 1 - Polo scolastico intercomunale di Via Roma

Le indagini condotte hanno ricavato un valore di V_{s30} pari a 408 m/s che corrisponde ad un terreno di categoria B.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva con i valori del fattore di amplificazione ottenuti con il metodo semplificato approssimati alla prima cifra decimale, comparati con i valori di soglia per un terreno di tipo B proposti dalla normativa vigente per il comune di Valmorea.

Periodo proprio del sito	Intervallo (0.1-0.5)	Valore di soglia	Intervallo (0.5-1.5)	Valore di soglia
0,50	Fa = 1.8	1.4 ± 0.1	Fa = 1.5	1.7 ± 0.1

COMMENTO

- **INTERVALLO 0.1 / 0.5 s – Strutture basse e rigide**

L'analisi effettuata ha definito che i valori di F_a previsti dalla normativa nazionale non sono sufficienti a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito esaminato. In fase di progettazione delle nuove strutture sarà quindi necessario o passare al terzo livello di approfondimento sismico o utilizzare lo spettro di norma riferita alla categoria di suolo C.

- **INTERVALLO 0.5 / 1.5 s – Strutture alte e flessibili**

L'analisi effettuata ha definito che i valori di F_a previsti dalla normativa nazionale sono sufficienti a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito esaminato. In fase di progettazione delle nuove strutture sarà quindi possibile applicare lo spettro previsto dalla normativa vigente.

Sito 2 - Edificio industriale “ambito di trasformazione 2 (Arotubi)” sito in Via Papa Giovanni XXIII

Le indagini condotte hanno ricavato un valore di V_{s30} pari a 473 m/s che corrisponde ad un terreno di categoria B.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva con i valori di fattore di amplificazione ottenuti con il metodo semplificato approssimato alla prima cifra decimale, comparati con i valori

di soglia per un terreno di tipo B proposti dalla normativa vigente per il comune di Valmorea.

Periodo proprio del sito	Intervallo (0.1-0.5)	Valore di soglia	Intervallo (0.5-1.5)	Valore di soglia
0,40	Fa = 1.8	1.4 ± 0.1	Fa = 1.2	1.7 ± 0.1

COMMENTO

- **INTERVALLO 0.1 / 0.5 s – Strutture basse e rigide**

L'analisi effettuata ha definito che i valori di *Fa* previsti dalla normativa nazionale non sono sufficienti a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito esaminato. In fase di progettazione delle nuove strutture sarà quindi necessario o passare al terzo livello di approfondimento sismico o utilizzare lo spettro di norma riferita alla categoria di suolo C.

- **INTERVALLO 0.5 / 1.5 s – Strutture alte e flessibili**

L'analisi effettuata ha definito che i valori di *Fa* previsti dalla normativa nazionale sono sufficienti a tenere in considerazione anche i possibili effetti di amplificazione litologica del sito esaminato. In fase di progettazione delle nuove strutture sarà quindi possibile applicare lo spettro previsto dalla normativa vigente.

I dati d'ingresso utilizzati per la procedura sopra riportata consentono di assegnare ai risultati ottenuti un livello di attendibilità medio-alto.

Villa Guardia, 12 febbraio 2009

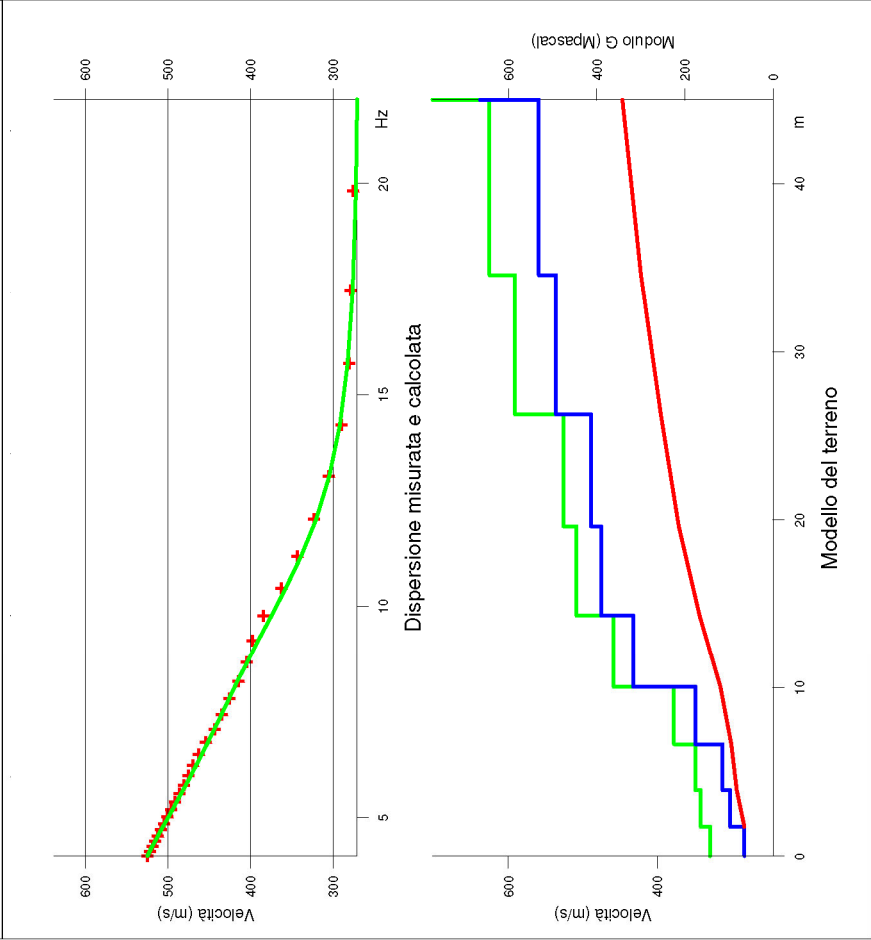
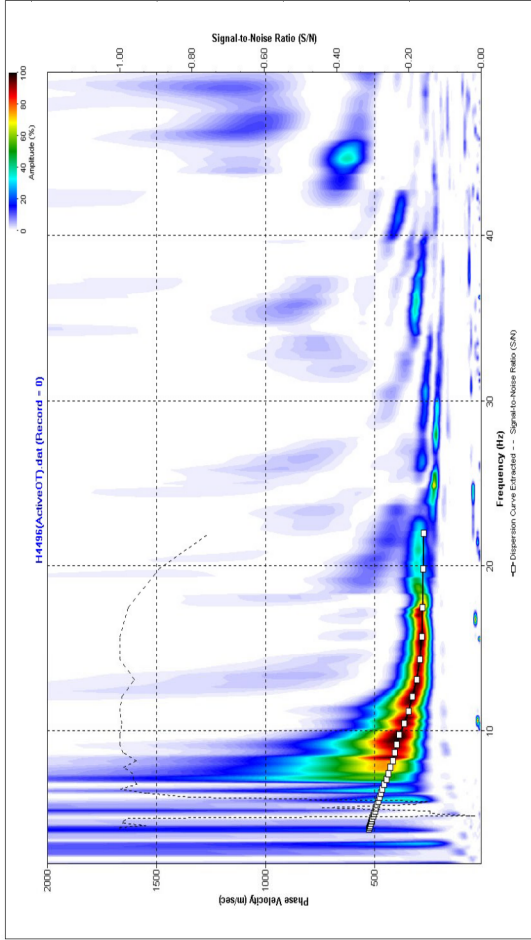
Dott. Geol. Civelli Giovanna



Giovanna Civelli

Dott. Geol. Frati Stefano





LEGENDA

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

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

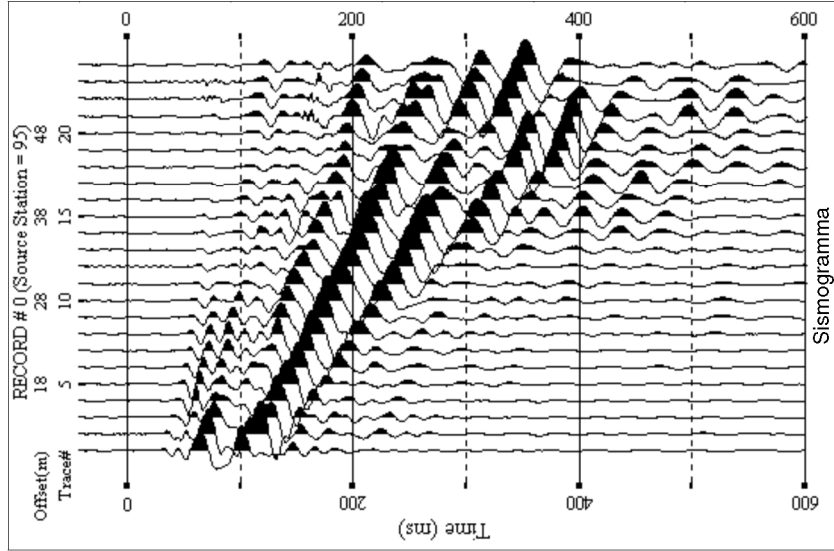


TABELLA DI CALCOLO

Da Prof.	a Prof.	Vs	H/Vi	VsProg	G
0	1.7	283	.0061	283	143
1.7	3.9	302	.0072	293	164
3.9	6.6	312	.0087	301	176
6.6	10.1	349	.0098	315	225
10.1	14.3	432	.0098	343	361
14.3	19.6	475	.0112	371	446
19.6	26.3	489	.0136	395	475
26.3	34.6	536	.0155	422	585
34.6	45	559	.0186	447	643

VALORE CALCOLATO VS30 = 408 m/s

PROVA SISMICA VS30

Sito 1

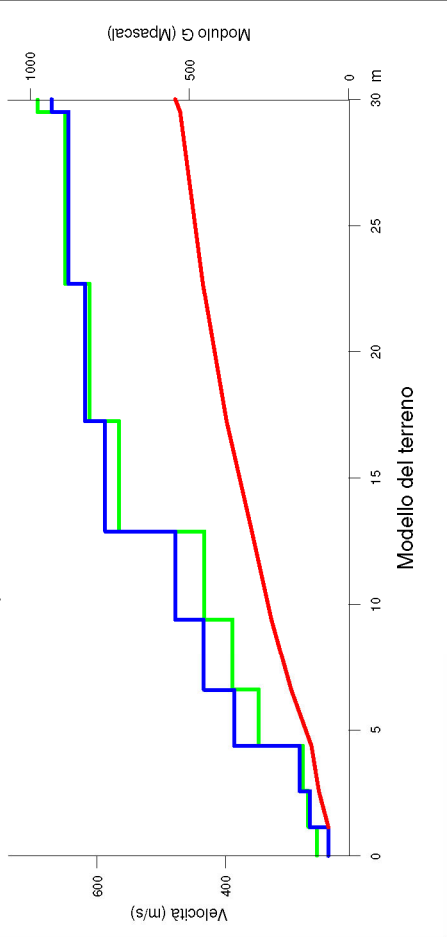
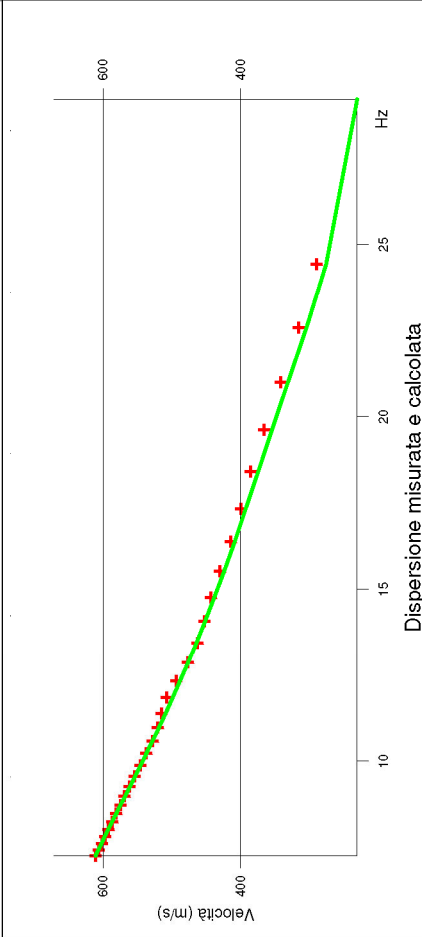
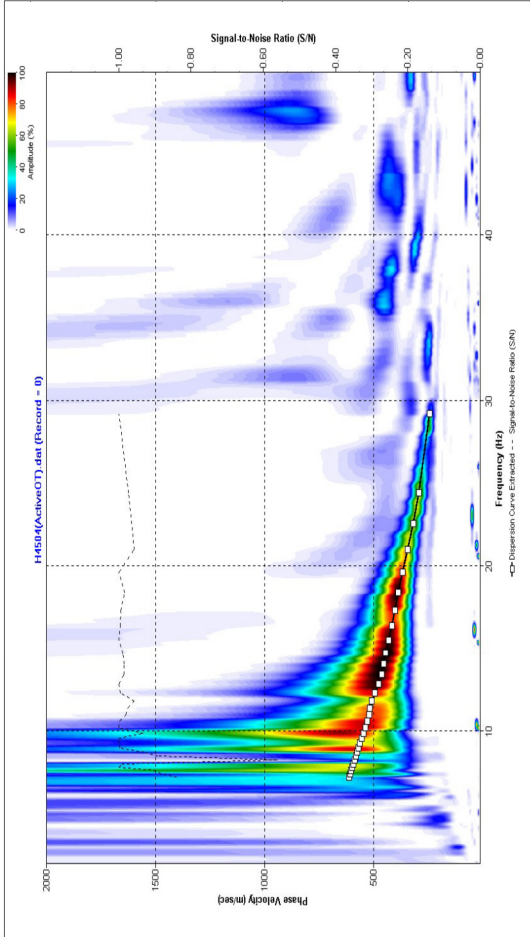
Comune di Valmorea (CO)

Prova MASW 1

VELOCITA' DELLE ONDE S

Febbraio 2009

EEG
S.p.A.
INGEGNERIA
E LABORATORI DATI



LEGENDA

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

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

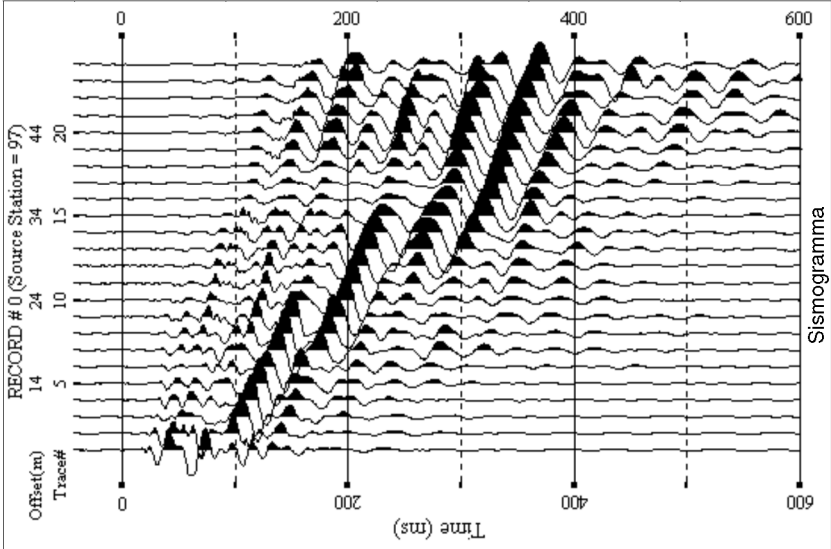


TABELLA DI CALCOLO

Da Prof.	a Prof.	Vs	HI/VI	VsProg	G
0	1.1	240	.0047	240	101
1.1	2.6	269	.0053	255	128
2.6	4.4	285	.0063	267	145
4.4	6.6	387	.0058	298	282
6.6	9.4	434	.0064	329	365
9.4	12.9	478	.0073	359	453
12.9	17.2	588	.0074	398	722
17.2	22.7	619	.0088	436	813
22.7	29.5	644	.0106	471	890

VALORE CALCOLATO VS30 = 473 m/s

PROVA SISMICA VS30

Sito 2

Comune di Valmorea (CO)

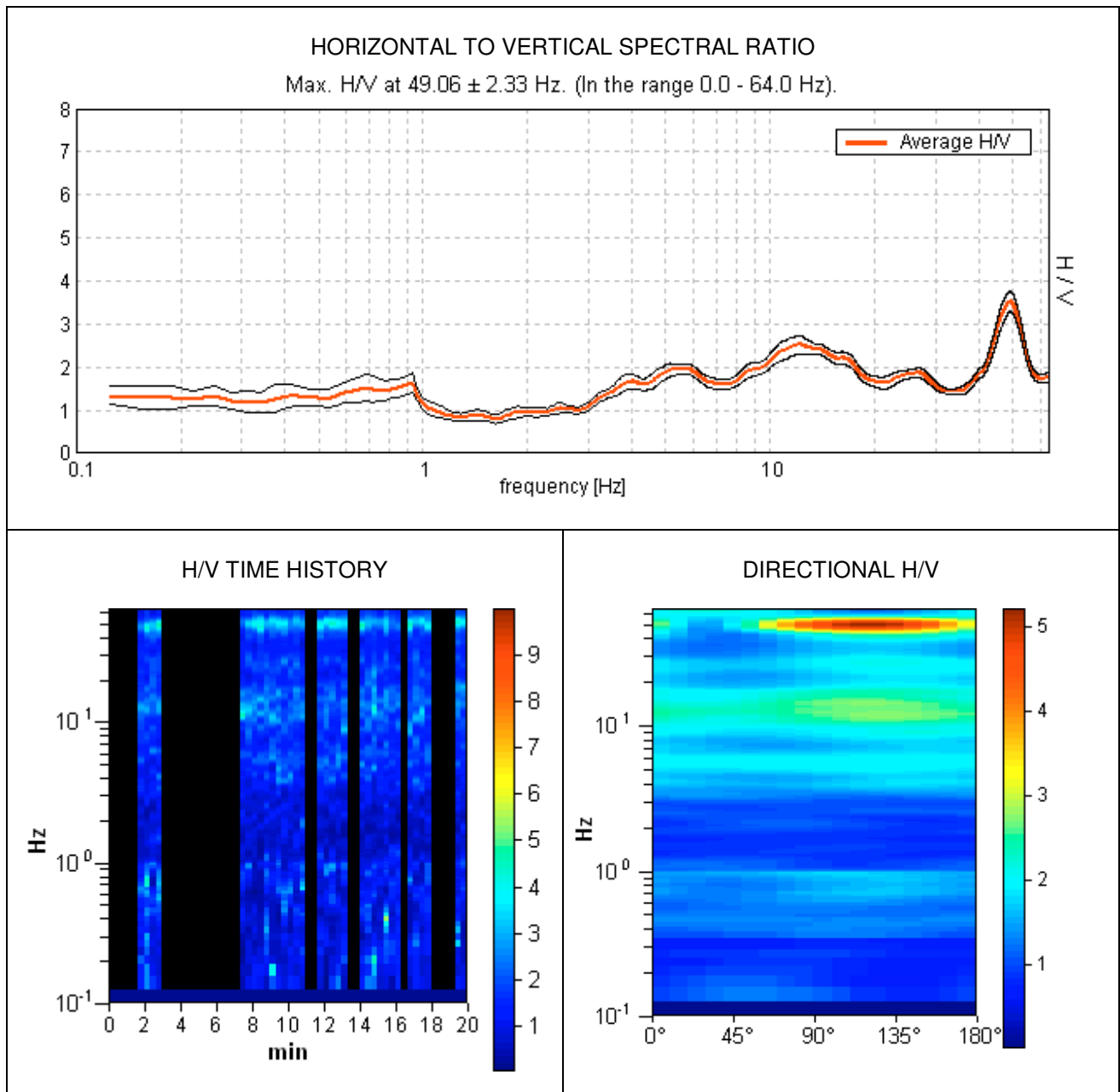
Prova MASW 2

VELOCITA' DELLE ONDE S

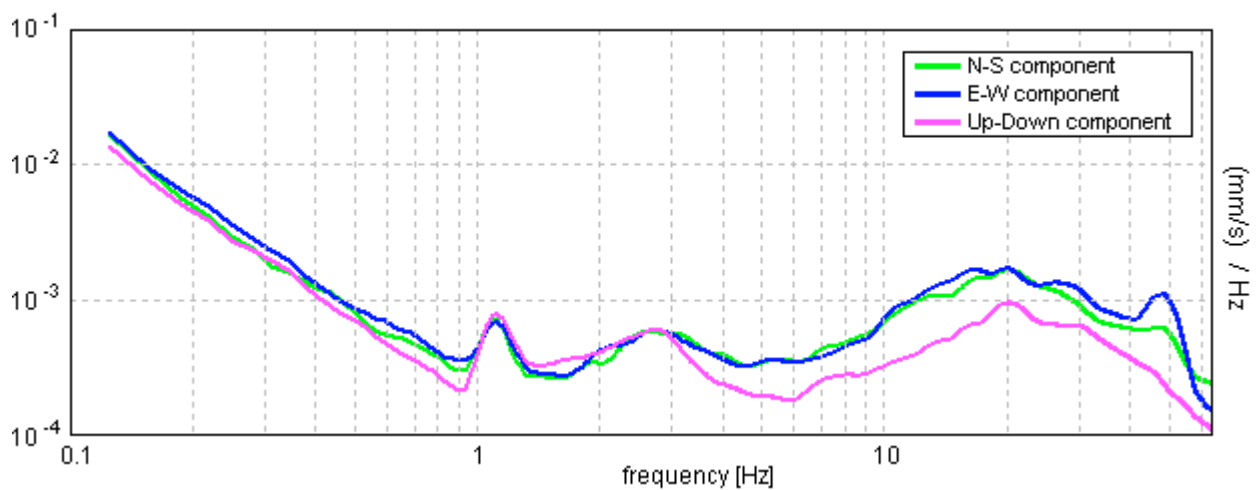
Febbraio 2009

EEG s.r.l.
geotecnica
e laboratorio dati

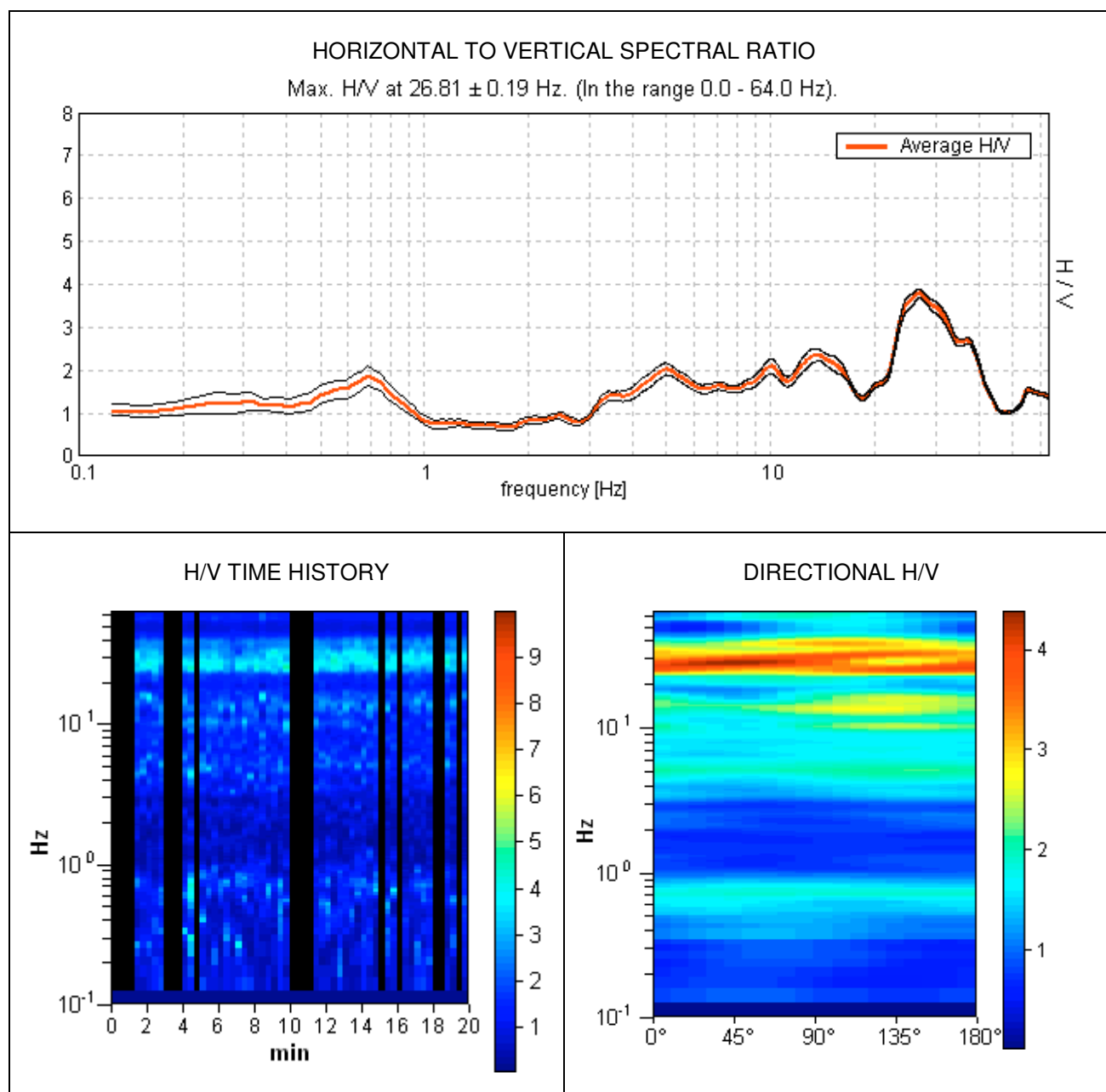
Sito 1 – HVSR 1



SINGLE COMPONENT SPECTRA



Sito 2 – HVSR 2



SINGLE COMPONENT SPECTRA

