giovanni bassi, geologo, via donatori di sangue, 13 - 26029 soncino (cr)
tel. e fax 0374 85486, e_mail: bassi.geologo@gmail.com

REGIONE LOMBARDIA

COMUNE DI CASTELVERDE
(Provincia di Cremona)

Piano di Governo del Territorio

COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA

(L.R. 11.3.05 N.12, art. 57, D.G.R. 22.12.05 N. 8/1566, Criteri attuativi, Componente geologica, D.G.R.L. 28.05.08 n.8/7374)

Zona sismica 4

RAPPORTO GEOFISICO

Allegato 8

IL GEOLOGO
DR GIOVANNI BASSI
NOVEMBRE 2009

130-054-07

INDICE CAPITOLI pag.

1. Premessa 3
2. Cenni sulla Metodologia dei Microtremori 3
3. Strumentazione e Software 3
4. Elaborazione dati 4
5. Metodologia di Calcolo 5
6. Descrizione dei risultati 6
7. Conclusioni 8

ELENCO FIGURE

Fig. 01: Curve di correlazione Periodo-Fa della scheda litologica Ls2
Fig. 1.1 -1.5: Spettri di Frequenza
Fig. 2.1 -2.2: Distribuzione verticale calcolata delle Vs
Fig. 31 -3.5: Curve di dispersione e Fitting

Sigle ed abbreviazioni

Vs Velocità delle onde di taglio (m/s)
Vs30 Velocità media delle onde di taglio nei primi 30 m di profondità (m/s)
Tp periodo proprio del sito (s)
Fa Fattore di amplificazione sismico

1. Premessa

Nei giorni 14 e 15 Novembre 2007, sono state effettuate prove sismiche mediante microtremori, in 5 aree del territorio comunale di Castelverde (CR).
Le prove sono state eseguite nell'ambito di studi di analisi del rischio sismico, per rilevare la velocità delle onde di taglio (onde S) nel sottosuolo. Successivamente si è proceduto ad elaborazione dei dati con la finalità di ricostruire il periodo naturale dei siti ed il fattore di amplificazione sismica ai sensi della LR 12-2005. Il comune di Castelverde è inserito in zona sismica 4, a minimo rischio sismico.

2. Cenni sulla Metodologia dei Microtremori

L'analisi dei microtremori è stata effettuata utilizzando strumentazione per la prospezione sismica a rifrazione con stendimenti lineari da 24 geofoni, con frequenza naturale di 4.5 Hz, spaziati di 5 m. Per ogni linea sono state effettuate 10 registrazioni di 30 secondi l'una, con frequenza di campionamento 0,004 secondi. .

In questo modo si possono registrare onde di superficie il cui contenuto in frequenza oscilla in un range da 25-30 Hz fino a 4-6 Hz che, in condizioni ottimali, offre una dettagliata ricostruzione dell'andamento delle Vs. La profondità d'indagine è in gran parte funzione della lunghezza di stendimento e corrisponde al 25-40% di tale lunghezza. Nel caso in oggetto la profondità massima può variare tra 30 e 50 m.

Il profilo verticale delle Vs può essere ricavato per inversione o per modellizzazione diretta della velocità di fase delle onde di superficie (Rayleigh e/o Love).
Le onde di Rayleigh costituiscono un particolare tipo di onde di superficie che si trasmettono sulla superficie libera di un mezzo isotropo e omogeneo e sono il risultato dell'interferenza tra onde di pressione (P) e di taglio verticali (Sv).
In un mezzo stratificato queste onde sono di tipo guidato e dispersivo, e vengono definite pseudo-Rayleigh.
La dispersione è una deformazione di un treno d'onde dovuta ad una variazione di propagazione di velocità con la frequenza. Le componenti a frequenza minore penetrano più in profondità rispetto a quelle a frequenza maggiore e presentano normalmente velocità di fase più elevate.

3. Strumentazione e Software

Per l'esecuzione delle indagini si è fatto uso della strumentazione di seguito elencata:

- sismografo Ambrogeo a 24 canali con dinamica 16 bit
- cavi sismici schermati
- 24 geofoni verticali con frequenza naturale di 4.5 Hz
- batterie da 12 V per l'alimentazione del sismografo
- set di connessioni e materiali d'uso

Per l'elaborazione dei dati è stato utilizzato il programma ReMI, versione 4.0 della Optim.

4. Elaborazione dati

I dati acquisiti sono stati elaborati mediante il software ReMi 4.0 della Optim Ltd.
Di seguito sono riportate le fasi dell'elaborazione eseguita:

1. conversione dei file in formato Seg-Y
2. preprocessing del segnale per il filtraggio e l'equalizzazione delle tracce
3. definizione della geometria di rilievo

4. elaborazione bidimensionale degli spettri di velocità *p-f* (attenuazione - frequenza) per ogni singola registrazione
5. sommatoria degli spettri delle singole registrazioni dopo l'eliminazione di quelli meno indicativi
6. picking della curva di dispersione
7. modellizzazione diretta delle onde di taglio
8. iterazione del modello fino a risultato soddisfacente
9. realizzazione dei profili di velocità

Nei capitoli relativi alla descrizione dei risultati dell'indagine suddivisi per comune, sono riportati 3 tipi di allegato grafico:

- Il primo gruppo di figure è costituito dagli spettri di frequenza delle linee eseguite, tramite diagrammi frequenza-lentezza (inverso della velocità).
- Nel secondo gruppo di figure sono riportati i modelli interpretativi delle Vs. Questi costituiscono l'elaborato finale del processo interpretativo su cui si effettuano i calcoli successivi del periodo di oscillazione proprio dei siti indagati ed i valori dei fattori di amplificazione.
- Nel terzo gruppo di figure sono riportate le curve di dispersione in cui viene evidenziato il fitting tra il picking eseguito sugli spettri di frequenza ed il modello delle Vs.

5. Metodologia di Calcolo

Le analisi effettuate a partire dalla distribuzione verticale delle onde S seguono la metodologia riportata nella LR 12 – 2005, in particolare nell'allegato 5, che si può sintetizzare come segue:

- Dalle informazione litologiche e geotecniche e dalla distribuzione delle Vs si individua il tipo di suolo di fondazione a cui appartengono i depositi dell'area (a, b, c, d, e), utilizzando la classificazione delle norme tecniche del DM 14-09-2005. In ogni comune, per ogni classe di suolo sono fissati dei valori massimi del fattore di amplificazione sismica (Fa), riportati nel file *soglie_lombardia.xls* redatto dalla Regione Lombardia.
- Il periodo di oscillazione naturale del terreno (o periodo proprio del sito Tp) si calcola mediante una formula che prevede la conoscenza dettagliata della distribuzione in profondità delle Vs, fino allo strato con Vs ≥ 800 m/s, considerato il substrato dello successione sedimentaria (cioè lo strato fino a cui tetto l'onda sismica si propaga senza alcun effetto di amplificazione). Purtroppo per i terreni sabbiosi (spesso dominanti nella media e bassa pianura padana) il substrato veloce si trova a profondità elevate, spesso superiori a 50-60 m e spesso la metodologia di esecuzione dei microtremori non consente una penetrazione così elevata. In questo caso, per ovviare a tale inconveniente, in fase di modellizzazione, si introduce un substrato fittizio e si verifica fino a quale profondità esso non può essere presente senza influenzare la configurazione dello spettro.
- Sulla base delle Vs si procede alla valutazione della litologia dominante in ogni sito, confrontando la distribuzione verticale delle Vs con quella di 5 schede, redatte dalla Regione Lombardia, a cui sono associate equazioni e curve che permettono di ricavare, per via matematica, il fattore di amplificazione Fa, a partire dal periodo di oscillazione naturale del terreno. Poiché la varietà di situazioni geologiche che è possibile incontrare è pressoché infinita, il confronto con le 5 schede litologiche risulta generalmente sempre difficile e va condotto con molta approssimazione. In particolare si segnala l'assenza di schede litologiche relative a litologia sabbiosa dominante. La mancanza di tali schede costituisce un grave fattore limitante, poiché, nell'area d'indagine i depositi sabbiosi sono generalmente predominanti, almeno fino a 40-50 m. In questo caso si sceglie la scheda dei limi sabbiosi 2, che risulta la più vicina alla distribuzione Vs rilevata.
- In ogni scheda sono riportate 3 serie di curve (corrispondenti a 3 diverse equazioni) per gli edifici con periodo di risonanza tra 0.1 e 0.5 secondi (vedi figura 01) e una sola curva per

edifici con periodo maggiore di 0.5 secondi. Una volta individuata la scheda che meglio risponde alla distribuzione delle Vs rilevata, sulla base dello spessore e della velocità del primo strato s'individua a quale dei tre tipi di curva (1, 2 o 3) si deve far riferimento nel calcolo del periodo del terreno, per edifici con periodo di risonanza tra 0.1 e 0.5 secondi. Per periodi superiori a 0.5 la scheda di calcolo di Fa è unica.

- Una volta individuata la curva, si calcolano i due fattori Fa per le due diverse classi di periodo (0.1-0.5 e 0.5-1.5 secondi). Se i due valori di Fa calcolati sono inferiori (o eguali o minori per non più di 0.1) a quelli del file *soglie_lombardia.xls* l'analisi di II livello è terminata con esito positivo altrimenti si segnalerà la necessità, in fase progettuale, di passare ad analisi di III livello o di inserire l'area in oggetto nella classe sismica superiore.

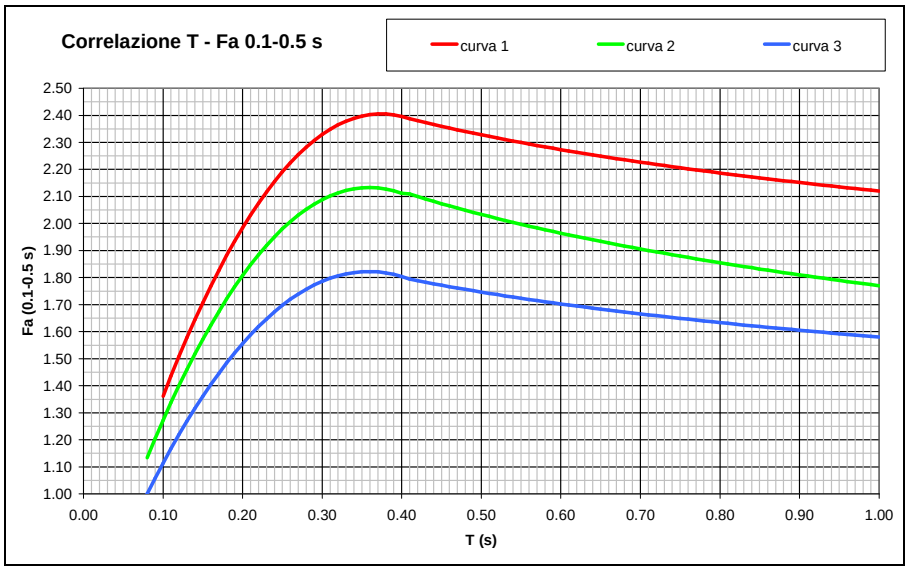

Fig. 01 – Curve di correlazione Periodo-Fa (scheda litologica Ls2) – Il tratto polinomiale è quello calcolato per periodi (Tp) ≤ 0.40 s, il tratto logaritmico è quello calcolato per periodi superiori.

6. Descrizione dei Risultati

Il rilievo è stato effettuato mediante 5 linee eseguite con 24 geofoni da 4,5 Hz spaziati di 5 m con una lunghezza totale di 115 m.
Per ogni linea sono state effettuate 10 registrazioni di 30 secondi l'una, con frequenza di campionamento 0,004 secondi. Nella tabella di seguito si riportano i dati relativi alla posizione di ogni linea.

Linea	Posizione
Cv01	Castelverde – Zona Industriale
Cv02	Caserma Carabinieri – Castelverde Centro
Cv03	S. Martino in Beliseto
Cv04	Castelverde Ovest
Cv05	Costa S. Abramo

Tabella 1

Nelle figure da 1.1 a 1.5 sono riportati gli spettri di frequenza delle linee eseguite, tramite diagrammi frequenza-lentezza (inverso della velocità). La frequenza varia in senso orizzontale, aumentando da sinistra verso destra, mentre la lentezza aumenta verso il basso (quindi la velocità aumenta verso l'alto).
I colori "caldi" (rosso, arancio, verde) corrispondono ad aree con maggiore ampiezza di segnale, mentre quelli freddi (blu, azzurro) corrispondono ad ampiezze minori. Nelle figure in oggetto si può

notare una distribuzione dei colori caldi che sale da sinistra verso destra ed indica velocità crescenti a frequenze minori, quindi a profondità maggiori.
I quadratini neri al bordo inferiore della fascia alta corrispondono ai valori selezionati (picking) per la modellizzazione delle onde S. Tali punti vengono scelti al limite tra colori caldi e freddi.

I modelli interpretativi delle Vs sono riportati nelle figure 2.1 e 2.2, e i dati dei singoli strati (profondità in m e velocità in m/s) in Tab 2.

Linea	Strato 1		Strato 2		Strato 3		Strato 4		Strato 5	
	H1	Vs1	H2	Vs2	H3	Vs3	H4	Vs4	H5	Vs5
Cv01	7	160	16	200	34	280	90	400		**800**
Cv02	36	220	80	360		**800**				
Cv03	7	150	16	200	40	270	90	400		**800**
Cv04	10	160	36	270	90	400		**800**		
Cv05	8	170	40	200	80	400		**800**		

Tab. 2 – distribuzione verticale delle Vs

Nelle figure da 3.1 a 3.5 sono riportate le curve di dispersione in cui viene evidenziato il fitting tra il picking eseguito sugli spettri di frequenza ed il modello delle Vs. In queste figure, in basso a sinistra è riportato anche il valore della Vs30 e lo scarto percentuale.

Per la linea Cv02 sono stati elaborati 2 modelli di velocità, che hanno dato risultati simili in termini di fattore di amplificazione. Di seguito si farà riferimento solo al modello B, in quanto più simile a quello ricavato dagli altri microtremori.

Tutte le linee eseguite hanno dato risultati simili tra loro:

- I valori di Vs30 variano tra 190 e 220 e caratterizzano i terreni dell'area come suoli appartenenti al tipo C (depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o argille mediamente consistenti $180 < Vs_{30} < 360$ m/s).
- Tutti gli spettri mostrano una distribuzione di colori crescente verso sinistra, il che indica una distribuzione di velocità crescente con la profondità, senza inversioni di velocità. Il numero totale di strati varia da 3 a 5.
- 4 linee su 5, ad esclusione della 2, presentano uno strato superficiale tra 7 e 10 m con velocità tra 150 e 170 m/s. Al di sotto di questo strato si trovano velocità crescenti più o meno gradualmente, fino ad un substrato veloce che si trova a profondità comprese tra 80 e 90 m. La profondità del substrato è stata valutata con il procedimento descritto nel cap. 5, secondo paragrafo.
- Sulla base delle Vs calcolate, i valori di Vs30 variano tra 190 e 220 e caratterizzano i terreni dell'area come suoli appartenenti al tipo C (depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o argille mediamente consistenti $180 < Vs_{30} < 360$ m/s).
- La scheda morfologica, la cui curva di Vs meglio si adatta alle funzioni di velocità individuate è quella dei limi sabbiosi 2, di cui si è scelta la curva periodo-Fa 1, a causa di uno strato superficiale a bassa velocità.
- Sulla base di questi dati si sono ottenuti periodi molto elevati, da 1.06 a 1.08, cui corrispondono valori di Fa di ***2.1***, per edifici con periodo di risonanza ≤ 0.5 s, e di ***1.4*** per edifici con periodo di risonanza > 0.5 s.

7. Conclusioni

I valori soglia indicati dalla scheda regionale nel comune di Catelverde, per suoli di tipo C, sono di 0.9 e di 1.3 rispettivamente per edifici con periodo inferiore a 0.5 s (bassi e rigidi) e superiore a 0.5 s (edifici alti ed elastici).

Il risultato comune alle linee effettuate è che i valori di Fa calcolati sono più elevati di quelli forniti dalla regione Lombardia, per gli edifici con periodo inferiore. Pertanto, in fase progettuale, in tutte le aree indagate soggette a predominante rischio di tipo litologico (scenario di PSL Z4) per questa tipologia di edificio sono necessarie indagini di III livello oppure dovranno essere utilizzati gli spettri di normativa validi per la categoria di suolo sismico D.
Per tutti gli edifici con periodo superiore a 0.5 s i valori di Fa sono inferiori a quelli regionali per una differenza maggiore di 0.1, e pertanto sono da considerare validi gli spettri di normativa per la categoria di suolo sismico C.

In tabella 2 sono sintetizzati i valori di Vs_{30} (velocità media delle Vs nei primi 30 m), il tipo di suolo di fondazione, il periodo proprio del sito (Tp) calcolato dalle Vs ed i valori calcolati del Fattore di Amplificazione (Fa) per le due tipologie di edifici: 0.1< T ≤0.5 s e T > 0.5 s. Nell'ultima riga sono riportati i valori soglia (di riferimento) forniti dalla regione Lombardia.

Linea	Vs_{30}	Terreno di fondazione	Periodo (Tp)	**Fa** (T=01-0.5 s)	**Fa** (T>0.5 s)
Cv01	216	C	1.07	2.1	1.4
Cv02	220	C	1.08	2.1	1.4
Cv03	209	C	1.06	2.1	1.4
Cv04	220	C	1.07	2.1	1.4
Cv05	191	C	1.08	2.1	1.4
Fa di riferimento Regione Lombardia				**1.8**	**2.4**

Tabella 3 – Parametri Sismici

IL GEOLOGO
Dr Giovanni Bassi
Novembre 2009

SPETTRI DI FREQUENZA

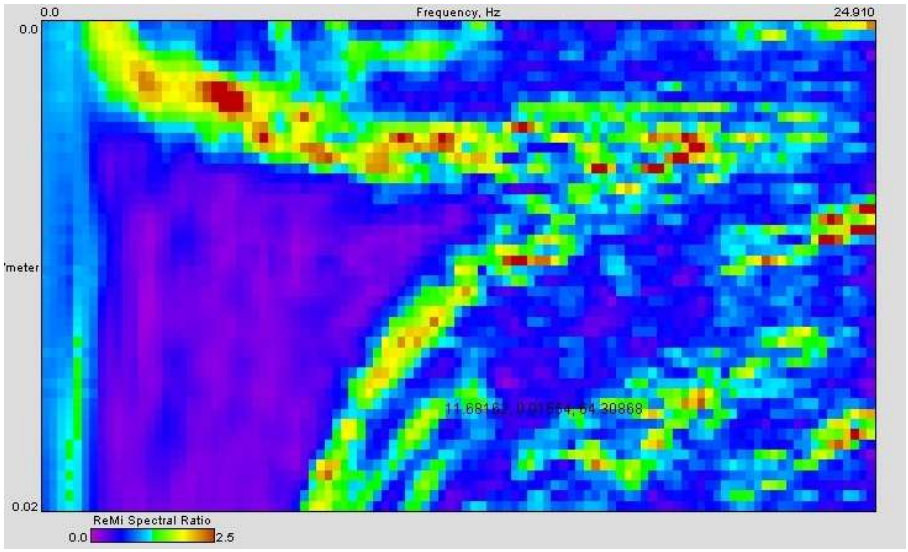

Fig. 1.1 - linea Cv01-2

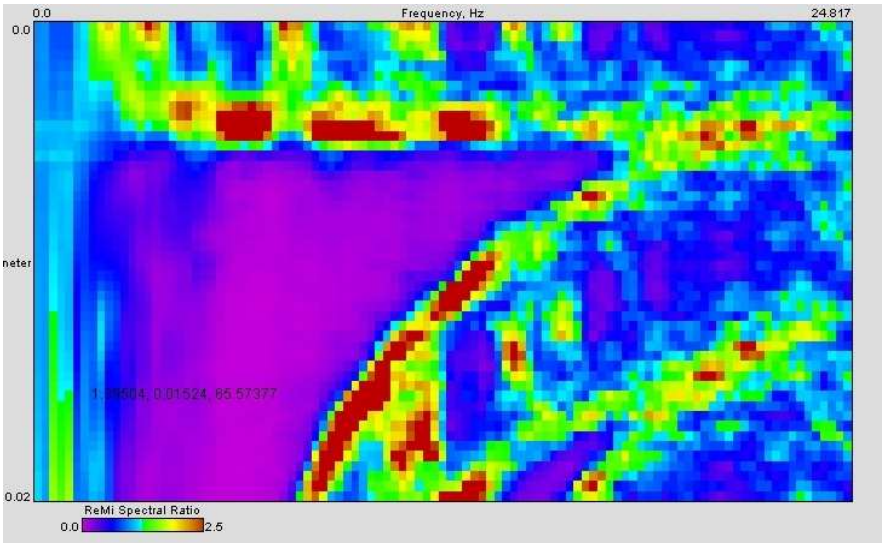

Fig. 1.2 - linea Cv02-4

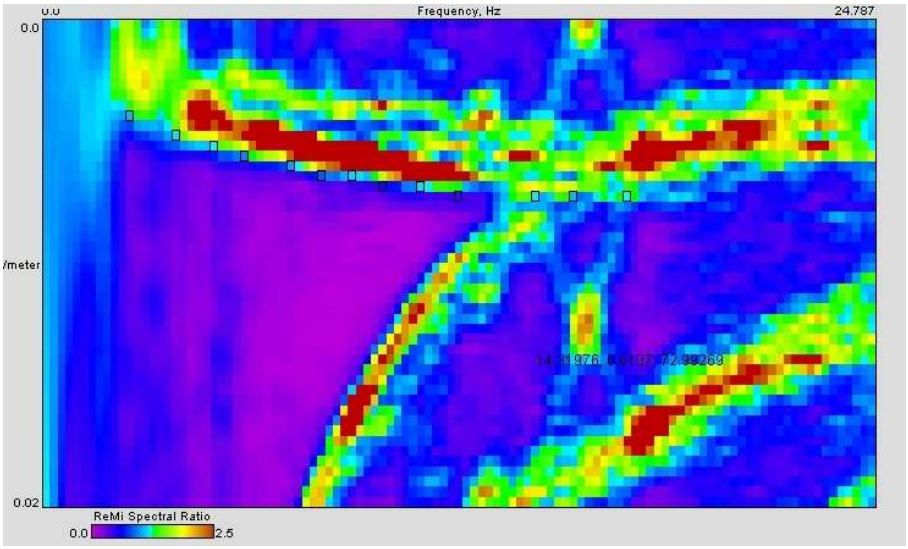

Fig. 1.3 – linea Cv03-5

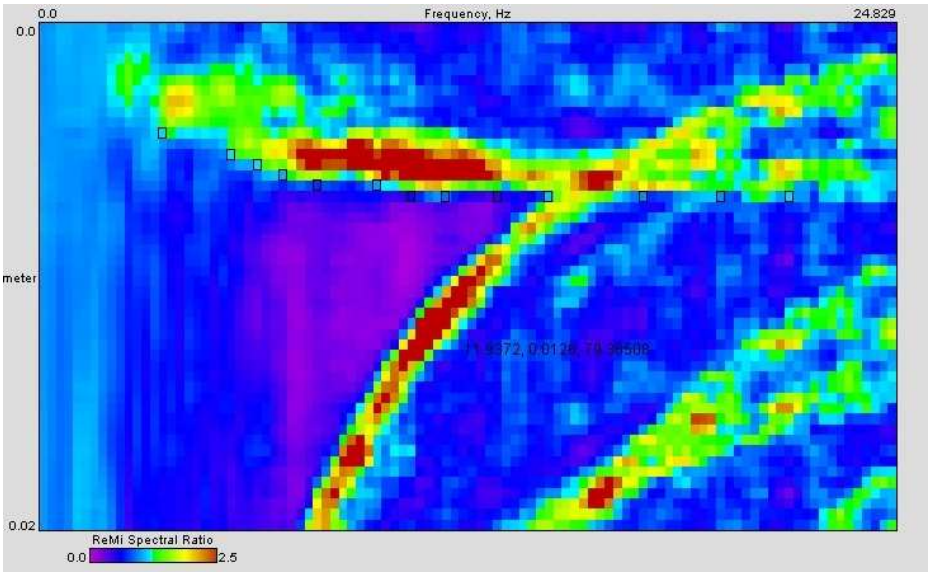

Fig. 1.4 – linea Cv04-7

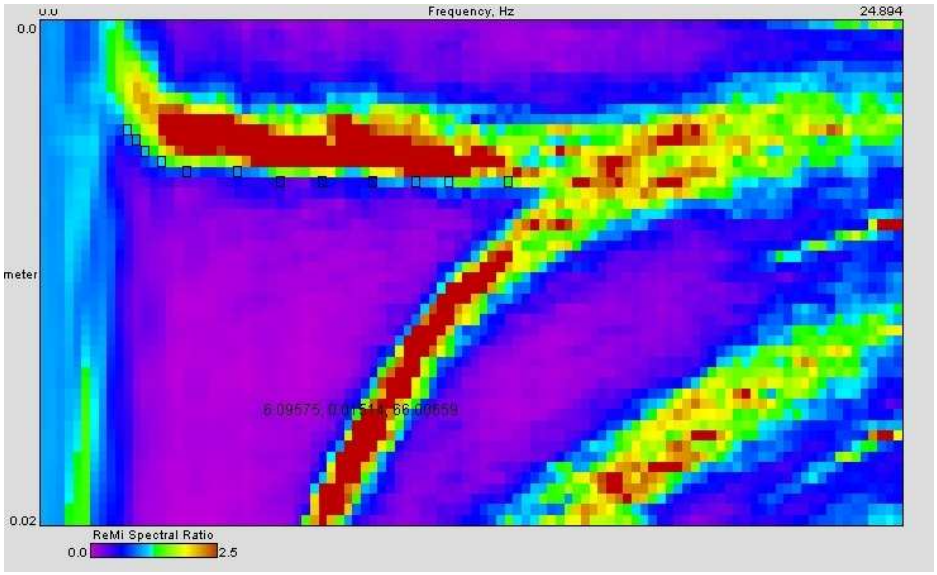

Fig. 1.5 – linea Cv05-5

MODELLI DI VELOCITÀ DELLE ONDE S

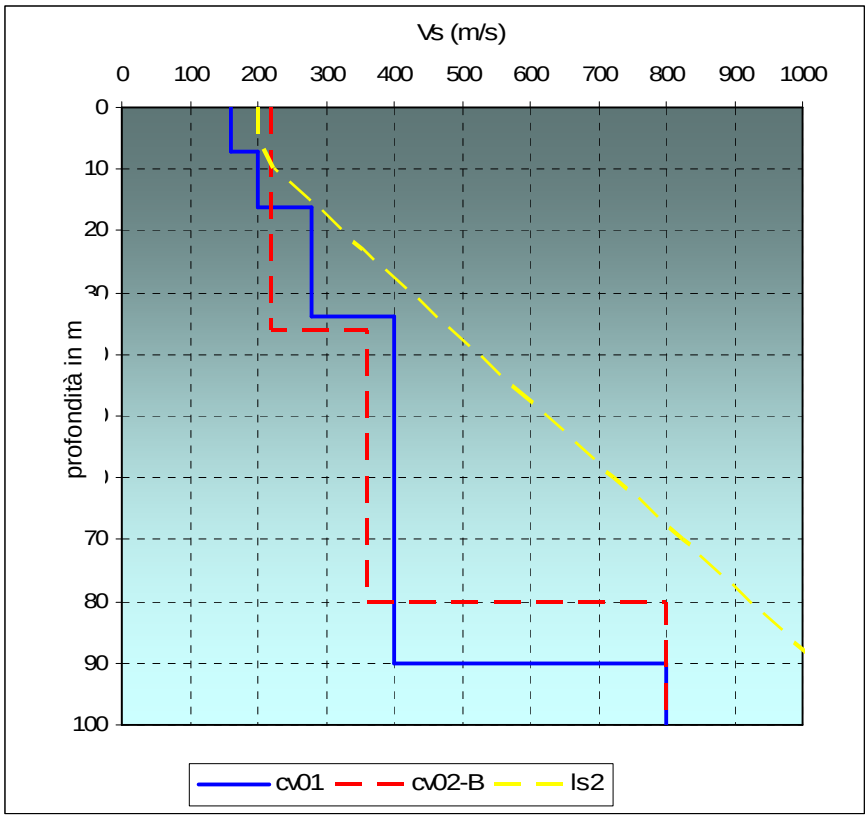

Fig. 2.1 – linee Cv01 e Cv02

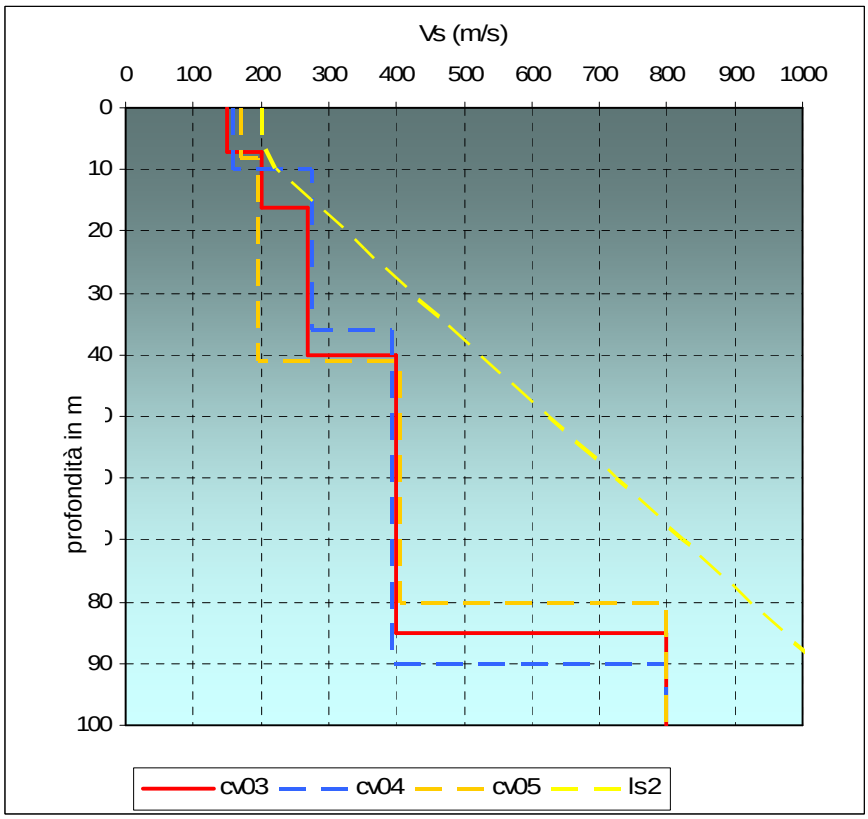

Fig. 2.2 – linee Cv03 - Cv04 – Cv05

Curve di dispersione e Picking

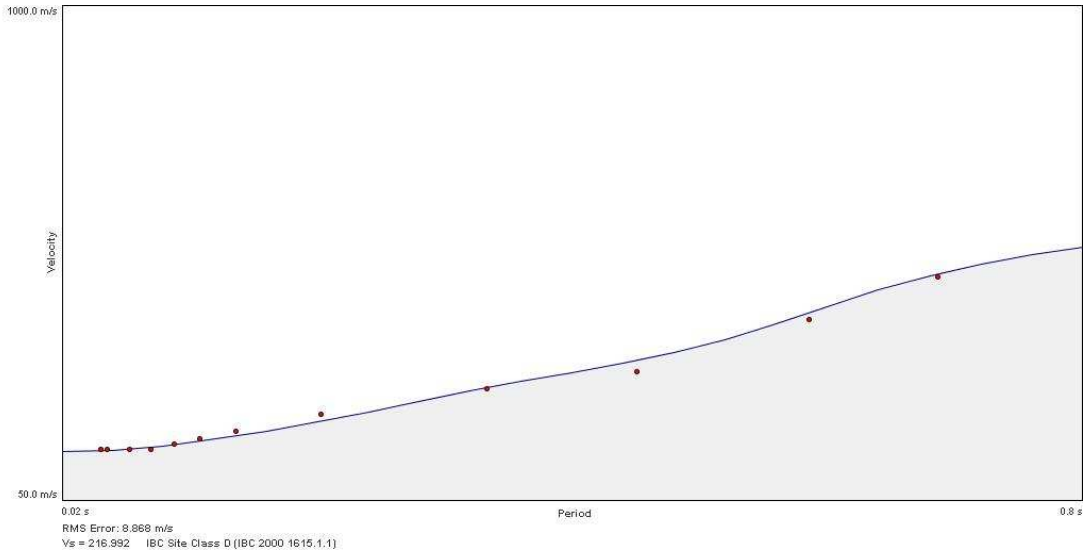

Fig. 3.1 – linea Cv01-2

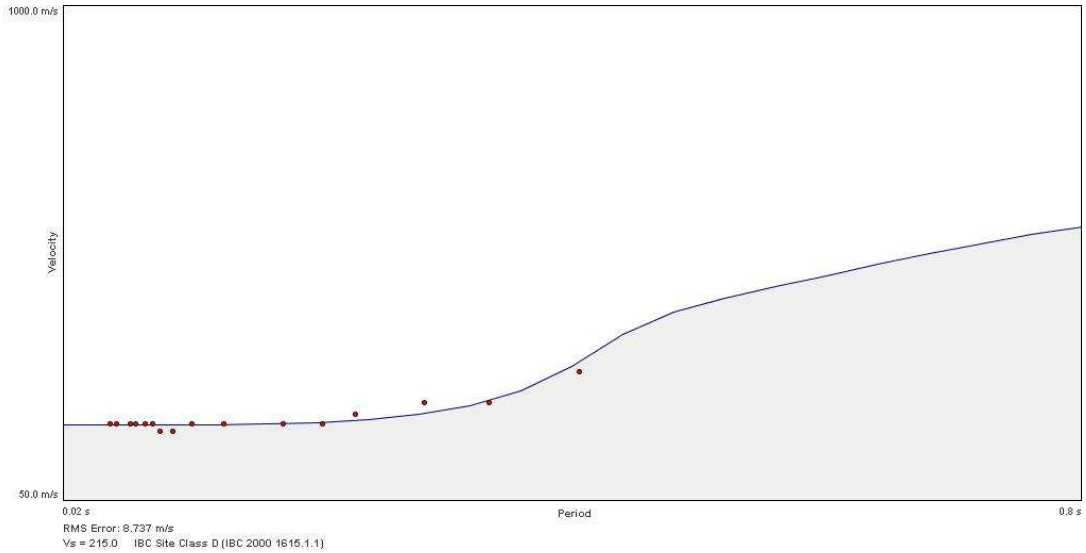

Fig. 3.2 – linea Cv02-4

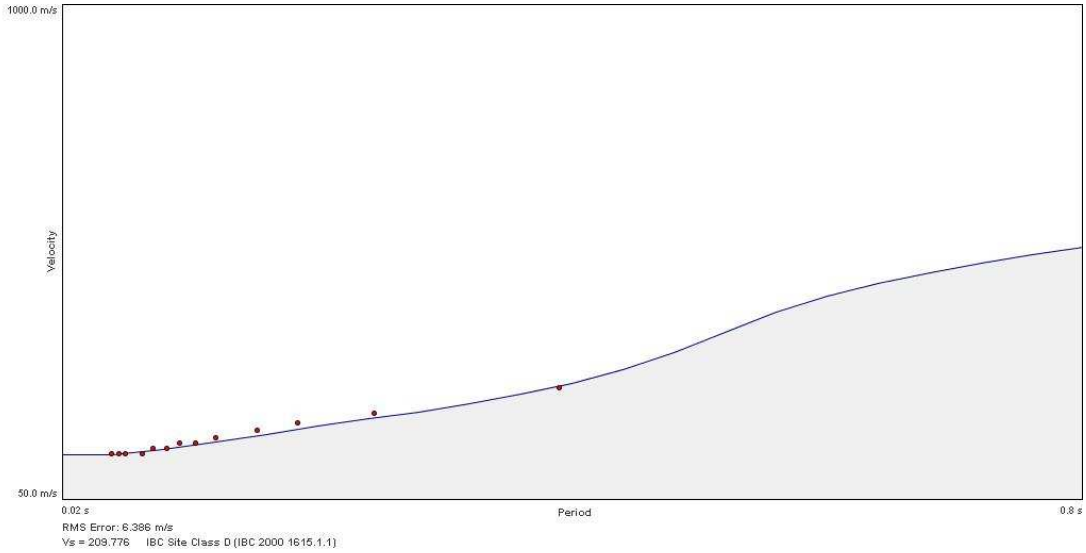

Fig. 3.3 – linea Cv03-1

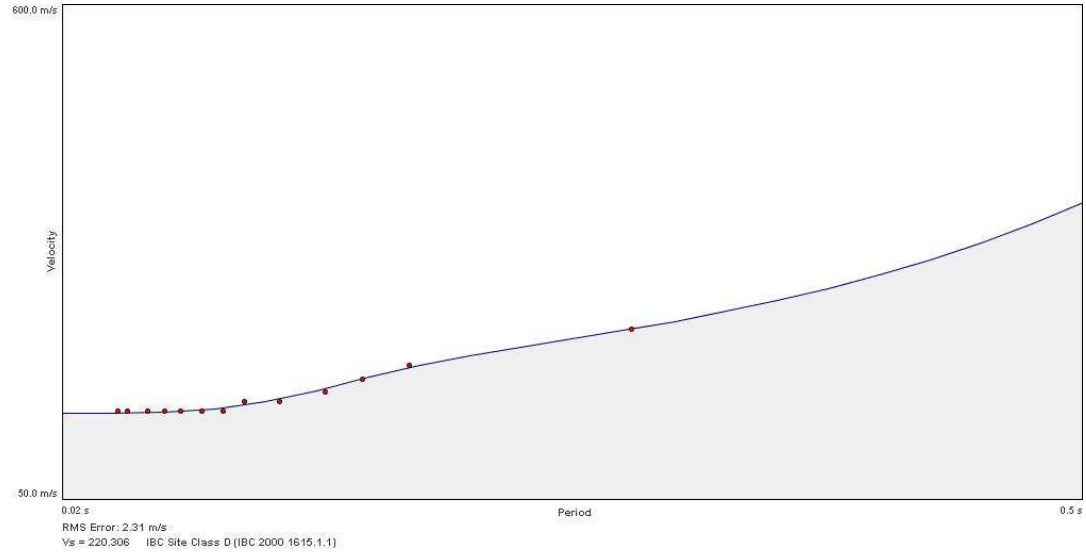

Fig. 3.4 – linea Cv04-7

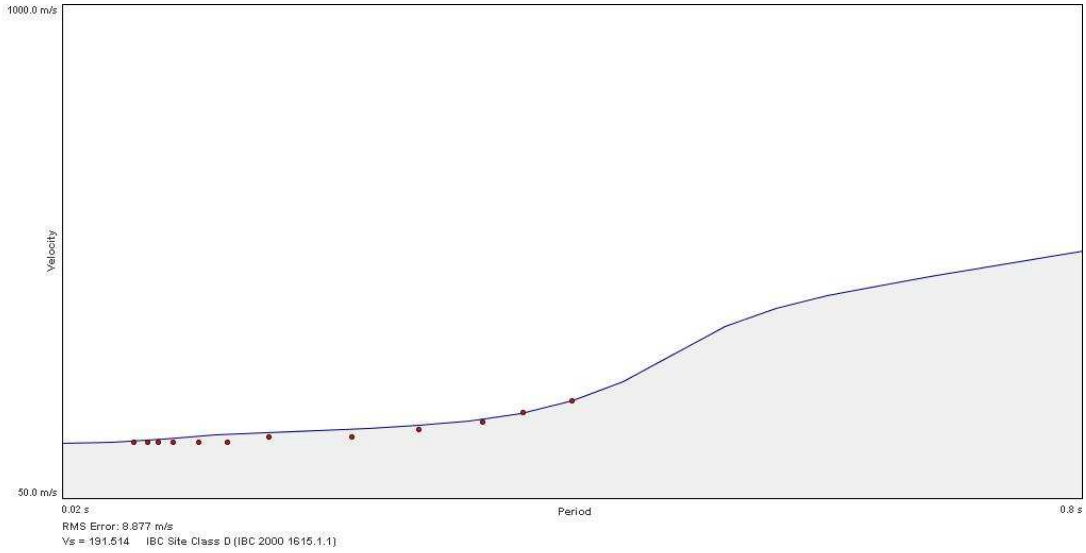

Fig. 3.5 – linea Cv05-5