

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 LODI

Provincia di Lodi



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 e D.G.R.L. 28.05.08 n. 8/7374)

RAPPORTO GEOFISICO

ALLEGATO 12



IL GEOLOGO
Dr Giovanni Bassi
Ottobre 2010

Collaboratore: dott. Massimiliano Trespidi

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

ELENCO FIGURE

Fig. 1.a-1.b:	Ubicazione Linee Sismiche
Fig. 2.1..... 2.10:	Spettri di Frequenza
Fig. 3.a 3.d:	Distribuzione verticale calcolata delle Vs
Fig. 4.1..... 4.10:	Curve di dispersione e Fitting

Sigle ed abbreviazioni

Vs	Velocità delle onde di taglio (m/s)
Vs ₃₀	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 10 e 11 Dicembre 2009, sono state eseguite 8 prove sismiche mediante microtremori, in varie aree del territorio comunale di Lodi.

Le prove sismiche sono finalizzate all'aggiornamento della componente geologica, idrogeologica e sismica per il PGT. Il comune di Lodi è compreso in zona sismica 4, a minimo rischio sismico. Nell'ambito del presente lavoro sono stati inoltre riesaminati due microtremori, eseguiti nel Luglio 2008, al centro sportivo La Faustina ed i risultati della prova down-hole, eseguita nel Gennaio 2007 in sinistra d'Adda a valle del vecchio ponte.

2. Cenni sulla Metodologia dei Microtremori

L'analisi mediante microtremori è stata eseguita utilizzando strumentazione per la prospezione sismica a rifrazione, con stendimenti lineari da 24 geofoni, con frequenza naturale di 4.5 Hz, spazati di 5 metri.

Per ogni linea sono state effettuate 10 registrazioni di 30 secondi l'una, con frequenza di campionamento 0,006 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 dello stendimento e della frequenza dei geofoni e corrisponde generalmente 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 Echo-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:

- La prime due figure sono costituite dall'ubicazione delle linee eseguite su immagini satellitari Google Earth.
- Il secondo gruppo di figure è costituito dagli spettri di frequenza delle linee eseguite, rappresentati con diagrammi frequenza-lentezza (inverso della velocità).
- Nel terzo 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. In queste figure sono riportate anche le distribuzioni di Vs ricavate dai microtremori eseguiti nel centro sportivo la Faustina e quella ricavata dal down-hole.
- Nel quarto gruppo di figure sono riportate le curve di dispersione (relative ai modelli di Vs prescelti) su cui viene evidenziato il fitting con il picking eseguito sugli spettri di frequenza.

5. Metodologia di Calcolo

Le analisi effettuate a partire dalla distribuzione verticale delle onde S seguono la metodologia riportata nella L.R. 12/05 e nella DGRL 8/7374 del 28 maggio 2008, Allegato 5, che si sintetizza come qui segue:

- Dalle informazione litologiche e geotecniche e dalla distribuzione delle Vs si individua il tipo di suolo sismico a cui appartengono i depositi dell'area (b, c, d, e), utilizzando la classificazione delle norme tecniche del DM 14.01. 2008. In ogni comune, per ogni classe di suolo sono fissati dei valori massimi del fattore di amplificazione sismica (F_a), riportati nel file *soglie_lombardia.xls* approntate dal Politecnico di Milano su incarico della Regione Lombardia ed allegate alla già citata DGRL N 8/7374.
- Dalla distribuzione in profondità delle Vs si calcola il periodo di oscillazione naturale del terreno (o periodo proprio del sito T_p).
- Sulla base dei dati stratigrafici e delle Vs si procede alla valutazione della litologia dominante in ogni sito, confrontando la distribuzione verticale delle Vs con quella di 6 schede litologiche, cui sono associate equazioni e curve che permettono di ricavare il fattore di amplificazione F_a , a partire dal periodo di oscillazione naturale del terreno. Ovviamente la realtà geologica è difficilmente riconducibile ad una sola litologia tipo, quindi

in pratica si sceglie la scheda che presenta la distribuzione di Vs più simile a quella sperimentale. In particolare, nel caso in oggetto, si è fatto riferimento alle schede litologiche “sabbie” e “limi sabbiosi 2”, soprattutto a causa del rapporto spessori-velocità degli strati nei primi 30 metri.

- 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 e una o due curve 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.
- Una volta selezionata la curva, si calcolano i 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 è terminata con esito positivo altrimenti i terreni in oggetto saranno inseriti nella categoria di suolo sismico con fattore di amplificazione più alto di quello misurato e, per la progettazione, si farà riferimento allo spettro relativo a quest'ultima categoria di suolo sismico.

6. Descrizione dei Risultati

Il rilievo di campagna è stato effettuato mediante 8 linee sismiche (microtremori), costituite da stendimenti di 24 geofoni da 4,5 Hz, spaziate di 5 m, con lunghezza totale di 115 m. In Tabella 1 sono elencate le linee eseguite, il nome della strada e l'edificio (o gruppi di edifici) di riferimento. L'ubicazione è riportata nelle figure 1a e 1b.

Si sottolinea che le linee Lo-1, 2 e 3 ed il down-hole sono poste in corrispondenza delle unità geomorfologiche 3.1a e 3.2 a della carta geomorfologica (alluvioni recenti, prevalentemente ghiaiose della Valle dell'Adda). Le altre linee sono state eseguite in aree urbanizzate, morfologicamente riconducibili all'unità 1a, (Livello Fondamentale della Pianura) costituita da alluvioni più antiche, terrazzate, con depositi sabbioso-limosi prevalenti.

Nelle figure da 2.1 a 2.8 sono riportati gli spettri di frequenza delle linee sismiche eseguite, utilizzando 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 nota una distribuzione dei colori caldi, che sale leggermente da destra verso sinistra. La pendenza della salita aumenta significativamente nella parte terminale dei grafici ed indica velocità decisamente crescenti alle frequenze minori, corrispondenti a profondità più elevate.

I quadratini neri al bordo inferiore della fascia alta corrispondono ai valori selezionati (picking) per la modellizzazione delle onde S. Tali punti sono scelti al limite tra colori caldi e freddi.

Linea	Via	Edifici di riferimento	Unità geomorfologica
Lo-1	V. Battaglia di Cassano	Ospedale	3.2a – alluvioni recenti
Lo-2	Raccordo Viale Piave	Lodi Riolo ?	3.1a– alluvioni recenti
Lo-3	Viale Napoli	Torretta	3.2a– alluvioni recenti
Lo-4	Viale Milano	Cimitero – San Grato	1a- LFP
Lo-5	Viale Europa	Scuola	1a- LFP
Lo-6	Viale Agnelli	Scuola	1a- LFP
Lo-7	Via San Fereolo	?	1a- LFP
Lo-8	Strada Provinciale 26	Quartiere Olmo	1a- LFP
Lo-p-1	Piazzale ingresso	Centro La Faustina	1a- LFP
Lo-p-2	Via Piermarini	Centro La Faustina	1a- LFP

Tab. 1 – Ubicazione linee

I modelli interpretativi delle Vs sono riportati in figura 3 e i dati di velocità e profondità dei singoli strati (profondità in m e velocità in m/s) in Tabella 2.

Linea	Strato 1		Strato 2		Strato 3	
	H1	Vs1	H2	Vs2	H3	Vs3
Lo-1	10.0	200	33	450		800
Lo-2	10.5	280	30	420		800
Lo-3	10.5	235	30	420		800
Lo-4	13.0	230	30	270		800
Lo-5	12.0	210	24.5	340		800
Lo-6	12.0	215	26.5	320		800
Lo-7	10.5	185	32	340		800
Lo-8	10.0	180	30	310		800

Tab. 2 – distribuzione verticale delle Vs

Nelle figure da 4.1 a 4.8 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 è riportato anche il valore della V_{s30} (velocità media nei primi 30 m).

Va sottolineato che l'analisi sismica mediante microtremiti fornisce come risultato distribuzioni di velocità monodimensionali. In altri termini i dati raccolti lungo la sezione contribuiscono a fornire un modello che si suppone valido in corrispondenza del centro dello stendimento e che non prevede variazioni né in senso longitudinale né in senso trasversale.

I risultati si possono così sintetizzare:

- I modelli delle Vs sono risultati generalmente a 3 strati, con velocità crescenti in profondità.
- I suoli sismici definiti in base alla V_{s30} (velocità medie delle Vs tra 0 e 30 m di profondità) risultano di tipo **C** (sabbie o ghiaie mediamente addensate o argille di media consistenza – $180 < V_{s30} < 360$ m/s) in quanto sono comprese tra 245 e 251 m/s.
- Il primo strato, raggiunge profondità tra 10.0 e 13.0 m da p.c., con velocità variabili tra 180 e 280 m/s.
- Il secondo strato presenta velocità tra 270 e 450 m/s e si sviluppa a profondità variabili tra 24.5 e 33.0 metri. Le velocità del secondo strato sono più elevate nel gruppo di linee 1-2-3, alluvioni recenti dell'Adda (unità geomorfologiche 3.1a e 3.2a).
- Il substrato veloce non è identificabile con esattezza, in quanto l'aumento di velocità, evidenziato dalla salita finale degli spettri di frequenza (fig. 2.1 ... 2.9), è incompleta a causa della limitata profondità dell'indagine. In altri termini, l'aumento di velocità in oggetto potrebbe corrispondere ad uno strato con $V_s=500-600$ m/s. Questo strato potrebbe spingersi fin oltre 60-70 m di profondità, dove si troverebbe il substrato veloce. Se questa ipotesi fosse verificata, anche le distribuzioni di velocità attribuite alla scheda litologica "limoso sabbiosa 2" ricadrebbero nel dominio della scheda "sabbiosa". Si è preferito considerare valida la prima ipotesi che è più cautelativa.
- E' da segnalare che una delle linee del centro sportivo La Faustina (lo-p-2) presenta risultati diversi da quelli delle altre linee in quanto, al di sotto dei 30 m, si rileva uno strato, con velocità 450 m/s e di forte spessore che si spinge fino a profondità molto più elevate, rilevabile con sufficiente chiarezza tra 80 e 100 m di profondità.
- Le distribuzioni di velocità rilevate ricadono in prossimità della curva della scheda litologica "limoso sabbiosa 2"; tuttavia, mentre i valori di Vs delle prime 3 linee (Lo-1-2-3), eseguite in corrispondenza dei depositi fluviali più recenti, ricadono nel campo di validità della scheda, le Vs di tutte le altre linee, poste in destra idrografica dell'Adda, sul terrazzo wurmiano, ricadono in parte nel campo di non validità. Per queste linee quindi si è scelta la scheda litologica "sabbiosa".

- Per le prime tre linee si è selezionata la curva 2 della scheda “limoso sabbiosa 2”, anche se gli spessori del primo strato si trovano al limite tra la curva 1 e la 2. Le ragioni di tale scelta sono dovute al fatto che la curva 2 presenta fattori di amplificazione più simili a quelli della scheda sabbiosa, anche se leggermente più bassi dei valori di Fa della curva 1 “limi sabbiosi”. Pur con questa scelta, i valori di Fa ottenuti sono superiori a quelli previsti dalla normativa regionale per i suoli sismici di tipo **C**. Si è invece verificata la compatibilità dei valori di Fa, degli edifici con periodo non superiore a 0.5 secondi, con suoli sismici di tipo **D**. Invece, per gli edifici con periodo superiore a 0.5 s, i valori di Fa sono inferiori a quelli previsti dalla norma già per i suoli sismici di tipo **C**.
- Per le linee sismiche da 4 a 8, i valori di Fa, per tutte le classi di edifici, risultano inferiori a quelli previsti per i suoli sismici di tipo **C**.
- In sintesi per le linee 1-2-3 si sono ottenuti valori del fattore di amplificazione sismica inferiori a quelli indicati da Regione Lombardia, per edifici con periodo compreso tra 0.1 e 0.5s e per suoli di tipo **D**. Si sottolinea che le aree indagate da queste linee nella carta di Pericolosità Sismica Locale sono inserite in scenario di pericolosità sismica locale “ **Z2**: zona con terreni di fondazione particolarmente scadenti e zone con depositi granulari fini saturi”. Per le aree indagate con le linee da 4 ad 8, in destra idrografica di Adda, riferibili al Livello fondamentale della Pianura (unità 1a), si farà riferimento alla parametrizzazione prevista per i suoli di tipo **C**. Per quanto riguarda gli edifici con periodo superiore a 0.5s, in tutte le aree indagate, si farà riferimento a suoli di tipo **C**.

7. Conclusioni

I valori soglia (Fa) indicati dagli allegati regionali nel territorio di Lodi, per suoli sismici di tipo **C**, sono **1.8** e **2.4** rispettivamente per edifici con periodo inferiore a 0.5s (bassi e rigidi) e superiore a 0.5s (edifici alti ed elastici); per suoli di tipo **D** i valori Fa sono rispettivamente **2.2** e **4.1**.

Il risultato comune alle linee sismiche effettuate è che i valori di Fa, per edifici con periodo superiore a 0.5s, sono inferiori a quelli indicati da Regione Lombardia. Pertanto, per tali edifici, nell'area indagata, si adotteranno gli spettri di norma relativi ai suoli sismici di tipo **C**.

Per gli edifici con periodo compreso tra 0.1 e 0.5s si adotteranno spettri di norma dei suoli di tipo **D** nelle aree caratterizzate dalle linee Lo-1-2-3 (alluvioni recenti, scenario di pericolosità sismica locale Z2), mentre si adotteranno spettri di norma dei suoli di tipo **C** nelle aree caratterizzate dalle linee Lo-4-5-6-7-8 (livello fondamentale della pianura, scenario di pericolosità sismica locale Z4a).

In Tabella 3 sono sintetizzati i valori di V_{s30} (velocità media delle onde trasversali nei primi 30 m), il suolo sismico, il periodo proprio del sito (T_p) calcolato dalle V_s , i valori calcolati del Fattore di Amplificazione (Fa) per le due tipologie di edifici: $0.1 < T \leq 0.5$ s e $T > 0.5$ s ed il suolo sismico di riferimento; nell'ultima colonna sono riportati i valori soglia di riferimento indicati da Regione Lombardia.

Linea	V_{s30}	Periodo (T_p)	Suolo sismico	Periodo Edifici	Fa Calcolato	Fa di riferimento
Lo-1	318	0.35	D C	≤ 0.5	2.1	2.2
				>0.5	1.5	2.4
Lo-2	357	0.32	D C	≤ 0.5	2.1	2.2
				>0.5	1.5	2.4
Lo-3	329	0.34	D C	≤ 0.5	2.1	2.2
				>0.5	1.5	2.4
Lo-4	251	0.47	C	≤ 0.5	1.5	1.8
				>0.5	1.8	2.4
Lo-5	298	0.35	C	≤ 0.5	1.7	1.8
				>0.5	1.5	2.4

Lo-6	284	0.39	C	≤ 0.5 >0.5	1.6 1.6	1.8 2.4
Lo-7	263	0.44	C	≤ 0.5 >0.5	1.6 1.7	1.8 2.4
Lo-8	250	0.45	C	≤ 0.5 >0.5	1.5 1.7	1.8 2.4
Lo-p-1	245	0.46	C	≤ 0.5 >0.5	1.5 1.8	1.8 2.4
Lo-p-2	251	0.92	C	≤ 0.5 >0.5	1.0 1.8	1.8 2.4

Tab. 3 – V_{s30} , T_p , Suolo sismico e F_a

8. Effetti Morfologici

Nel territorio comunale è presente una scarpata morfologica principale che si snoda intorno al centro storico; tale scarpata è evidenziata in carta di Pericolosità Sismica Locale con scenario di pericolosità sismica locale Z3. Al riguardo si precisa che quasi mai tale orlo di terrazzo morfologico principale ha altezze superiori a 10 metri, ma che tale eventualità si limita al solo tratto orientale, prospiciente la via Secondo Cremonesi.

La DGRL 8/7374 prevede, a pag. 32, che, per eseguire un'analisi degli effetti morfologici, sui soli edifici con periodo tra 0.1 e 0.5 s, ... "il materiale costituente il rilievo deve avere una V_s maggiore o uguale a 800 m/s". Nel caso in discussione si esclude questa fattispecie poiché terreni con $V_s \geq 800$ m/s sono sempre a profondità superiore a 20 m.

Volendo sviluppare l'analisi sismica per possibili effetti di amplificazione locale da terrazzo morfologico, la deliberazione regionale prevede che: "nel caso di presenza contemporanea di effetti litologici (Z4) e morfologici (Z3) si analizzeranno entrambi i casi e si sceglierà quello più sfavorevole (pag. 34)".

Nel caso di scarpate con altezza tra 10 e 20 m, la deliberazione regionale indica un fattore di amplificazione (F_a) di 1.1.

Poiché dalla Tabella 3 risulta che nelle linee eseguite sul terrazzo del LFDp i fattori amplificazione variano da 1.5 a 1.7, ad eccezione della linea Lo-2, peraltro lontana oltre 500 m dalla scarpata, si deduce che l'effetto litologico è, nel territorio in discussione, più cautelativo dell'effetto morfologico. Per tale ragione si suggerisce di considerare, ai fini della sicurezza sismica, anche per gli orli di terrazzo morfologico (Z3), in prossimità della scarpata ed in una fascia di profondità pari all'altezza della stessa, le amplificazioni sismiche locali dovute agli effetti litologici (Z4a), come sintetizzate in Tabella 3.

IL GEOLOGO
DR GIOVANNI BASSI
Ottobre 2010



Fig. 1 - UBICAZIONE LINEE SISMICHE



Fig. 1a –zona nord (Immagine Google Earth)

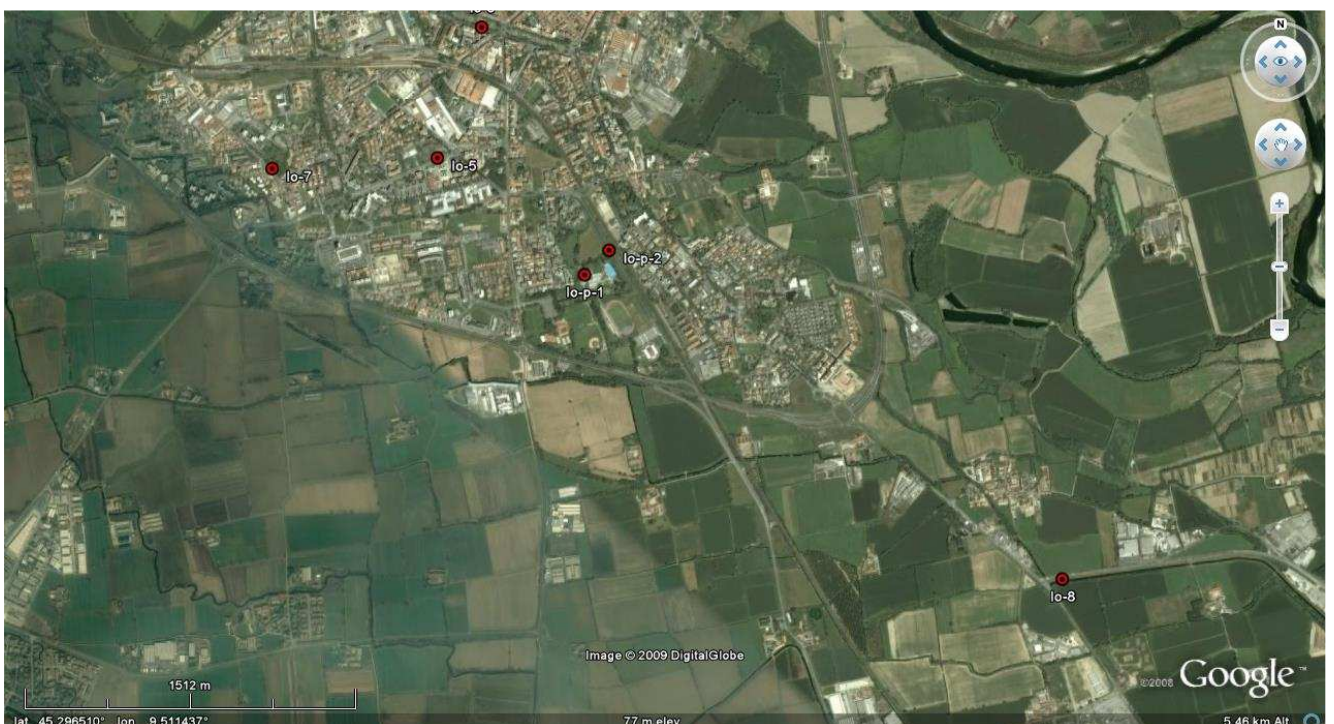


Fig. 1b –zona sud (Immagine Google Earth)

Fig. 2 - SPETTRI DI FREQUENZA

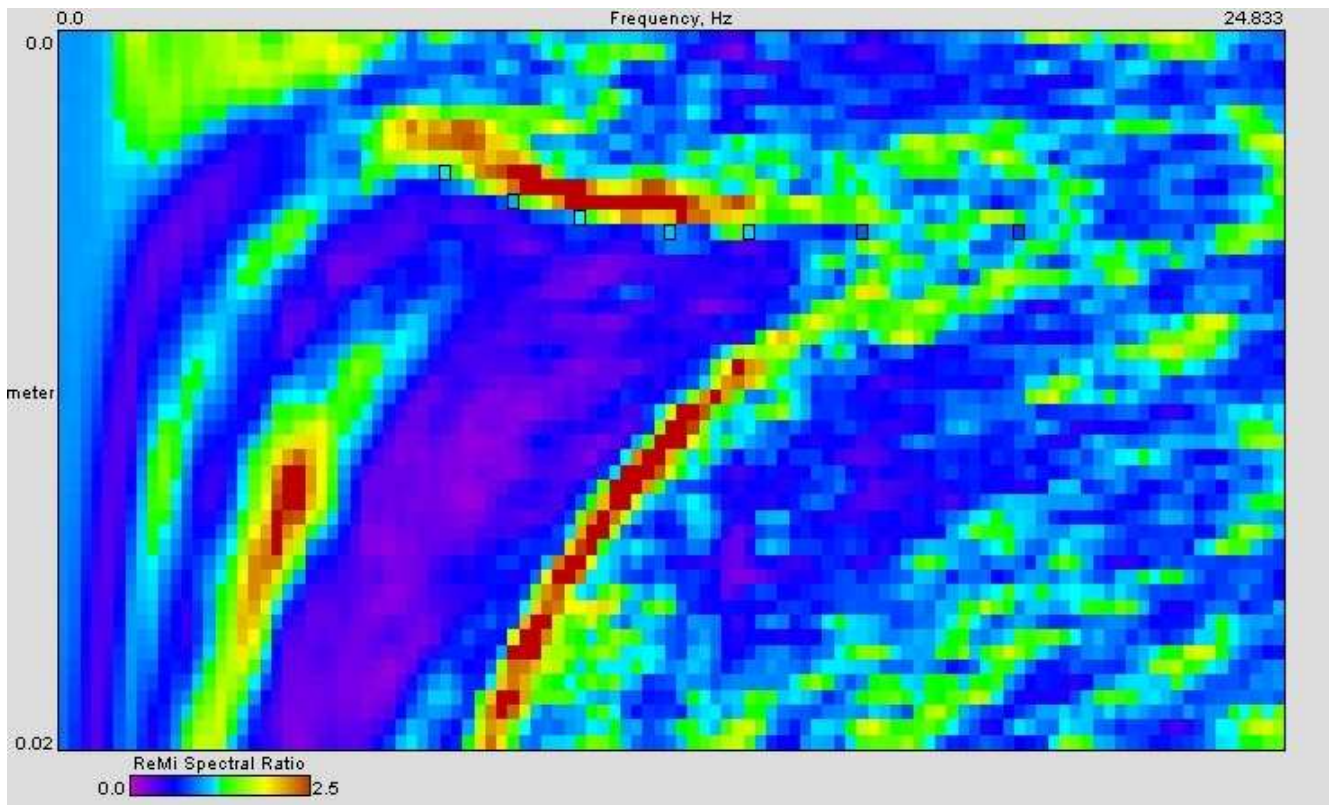


Fig. 2.1 - linea lo-1-04

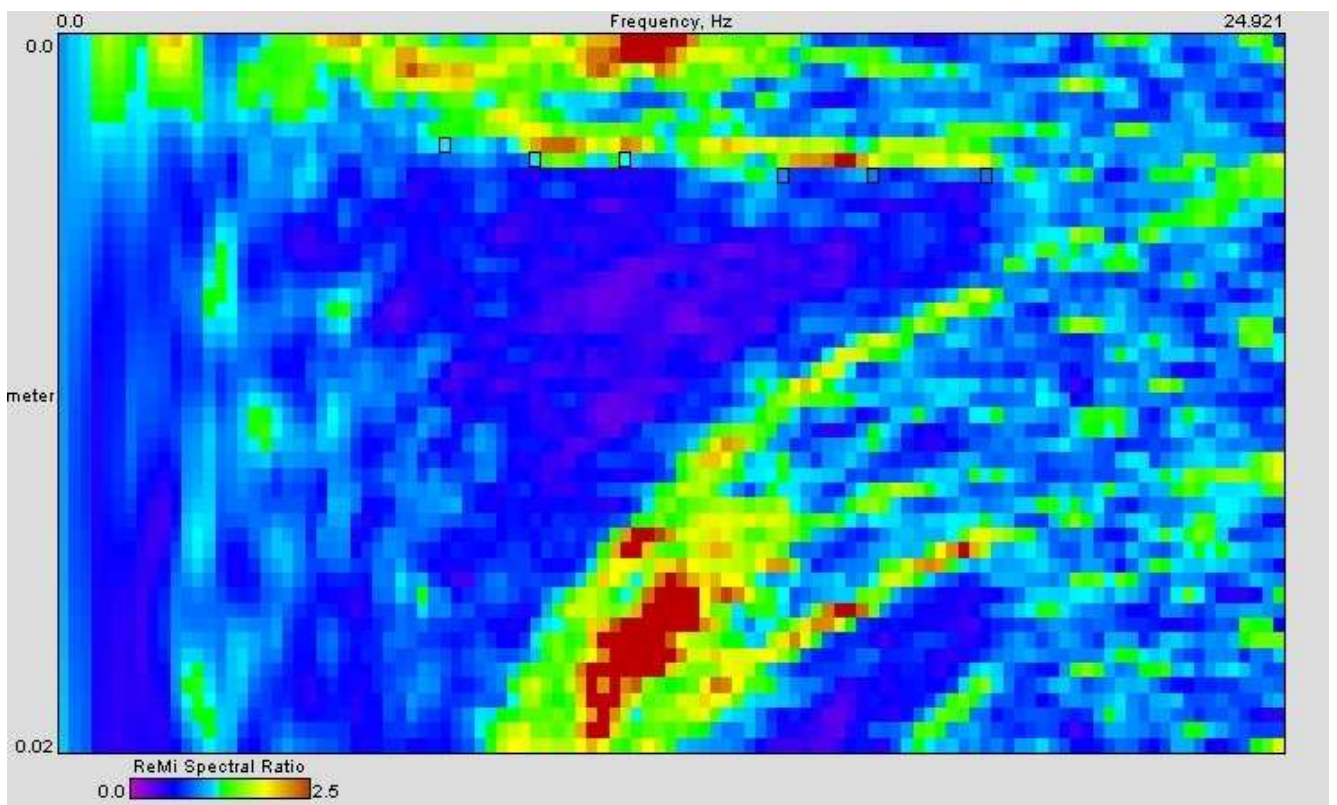


Fig. 2.2 - linea lo-2-16

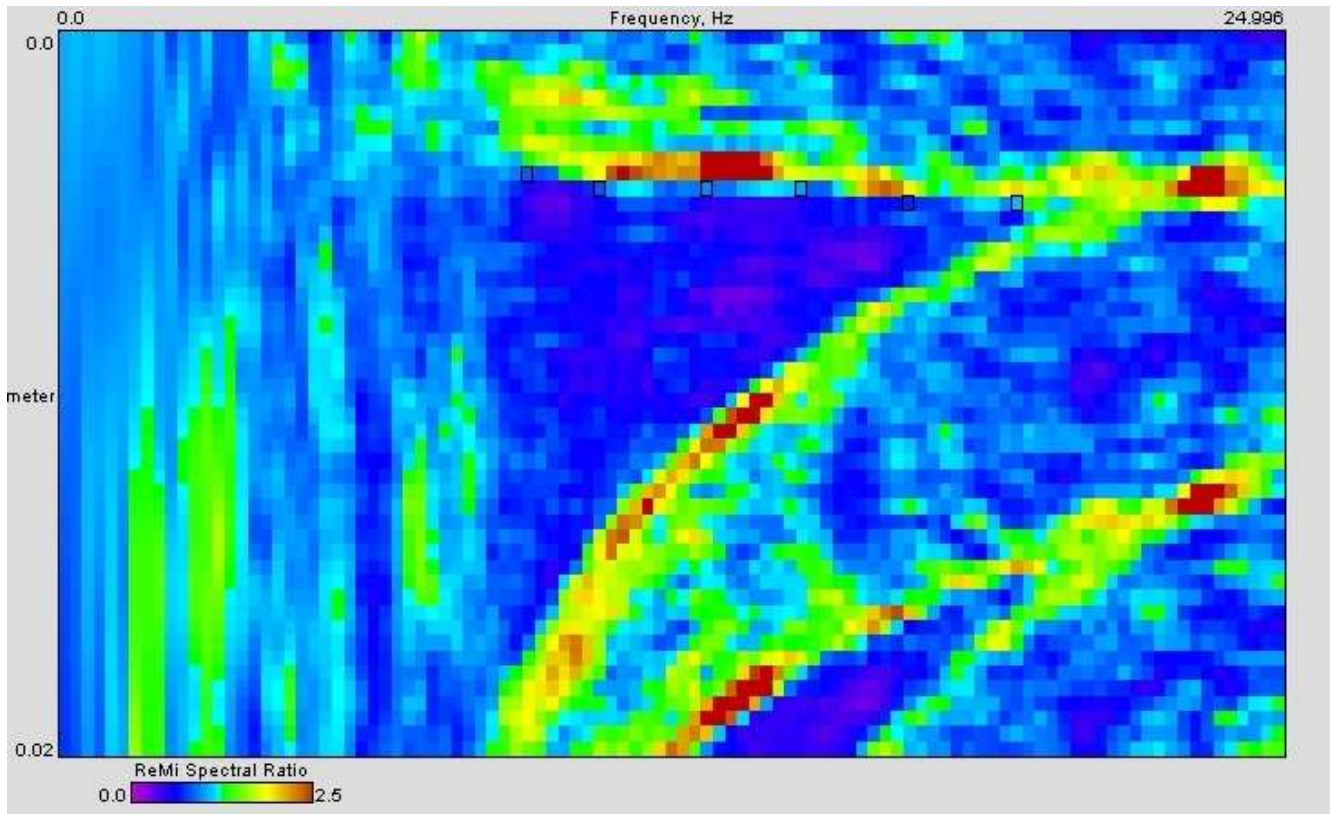


Fig. 2.3 - linea lo-3-29

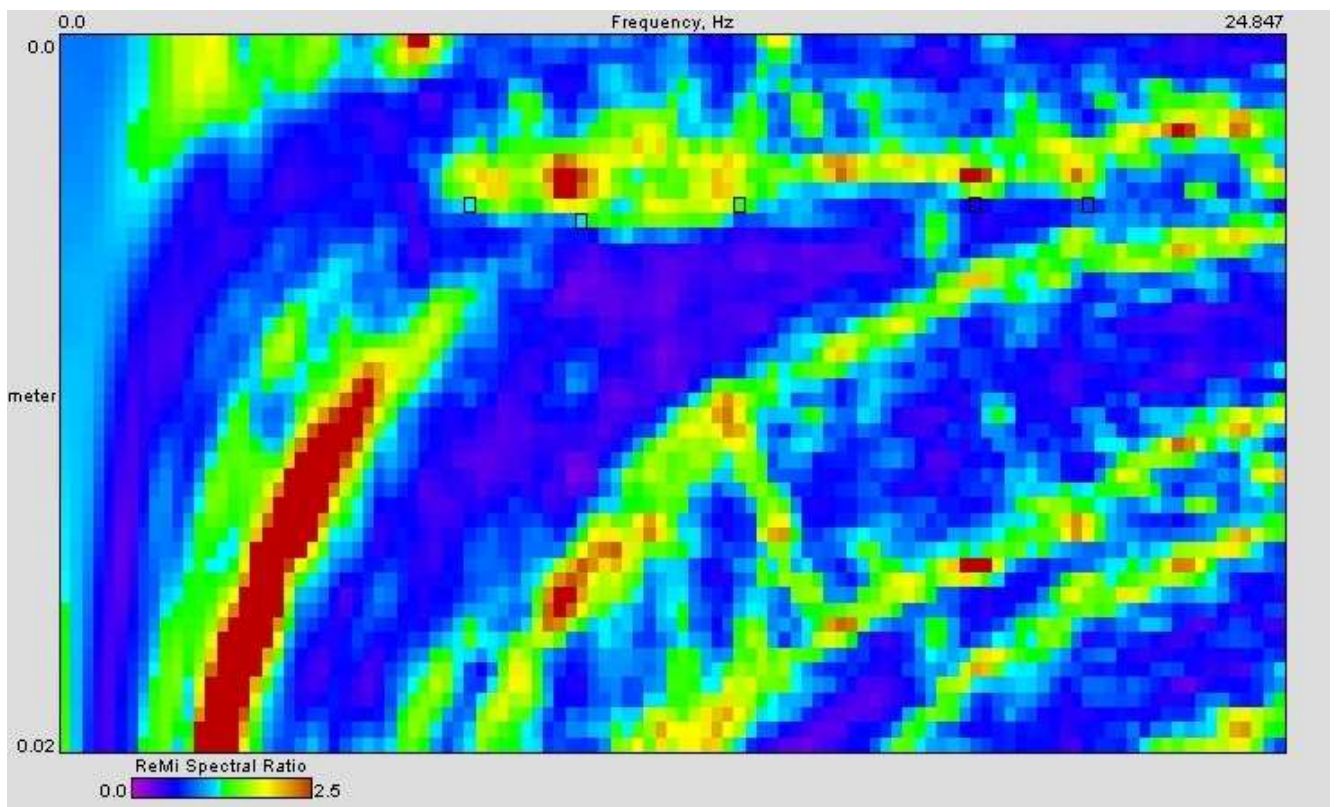


Fig. 2.4 - linea lo-4-39

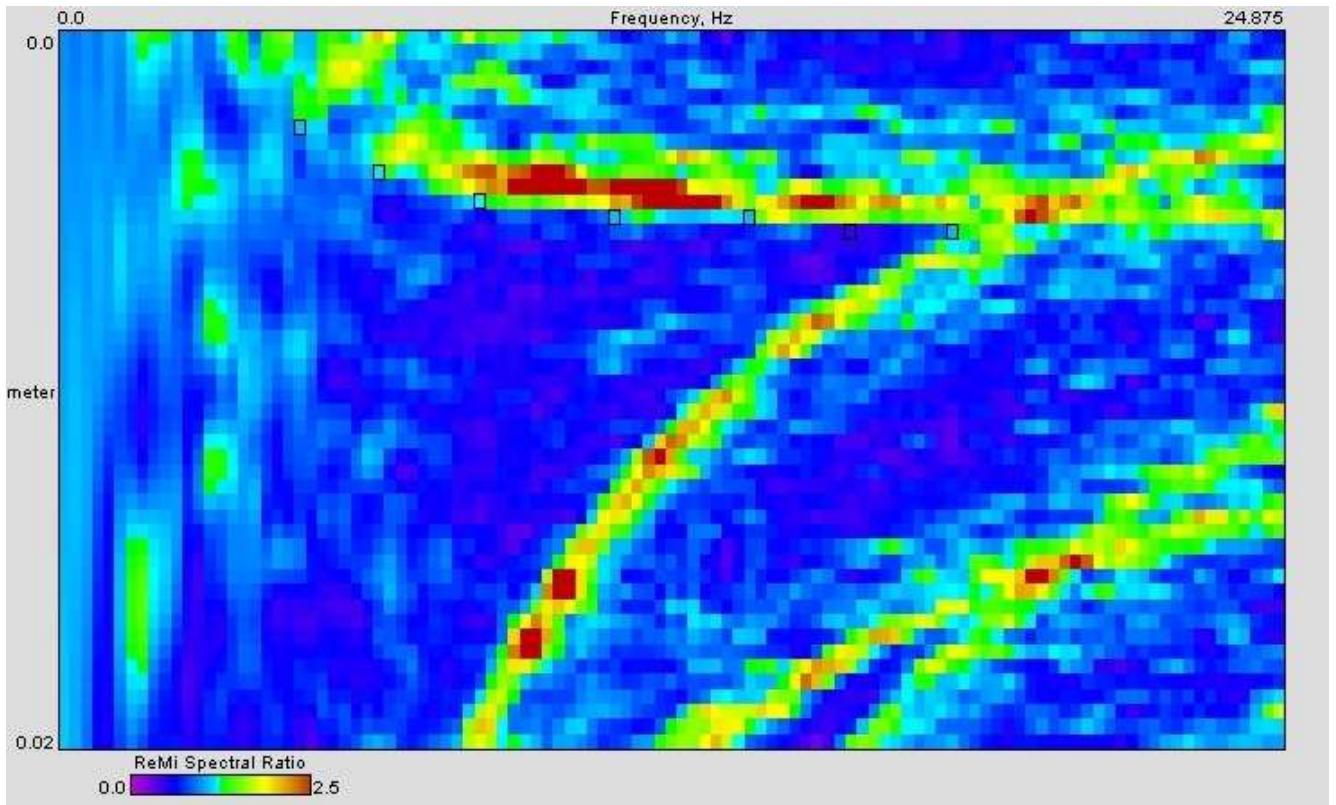


Fig. 2.5 - linea lo-5-48

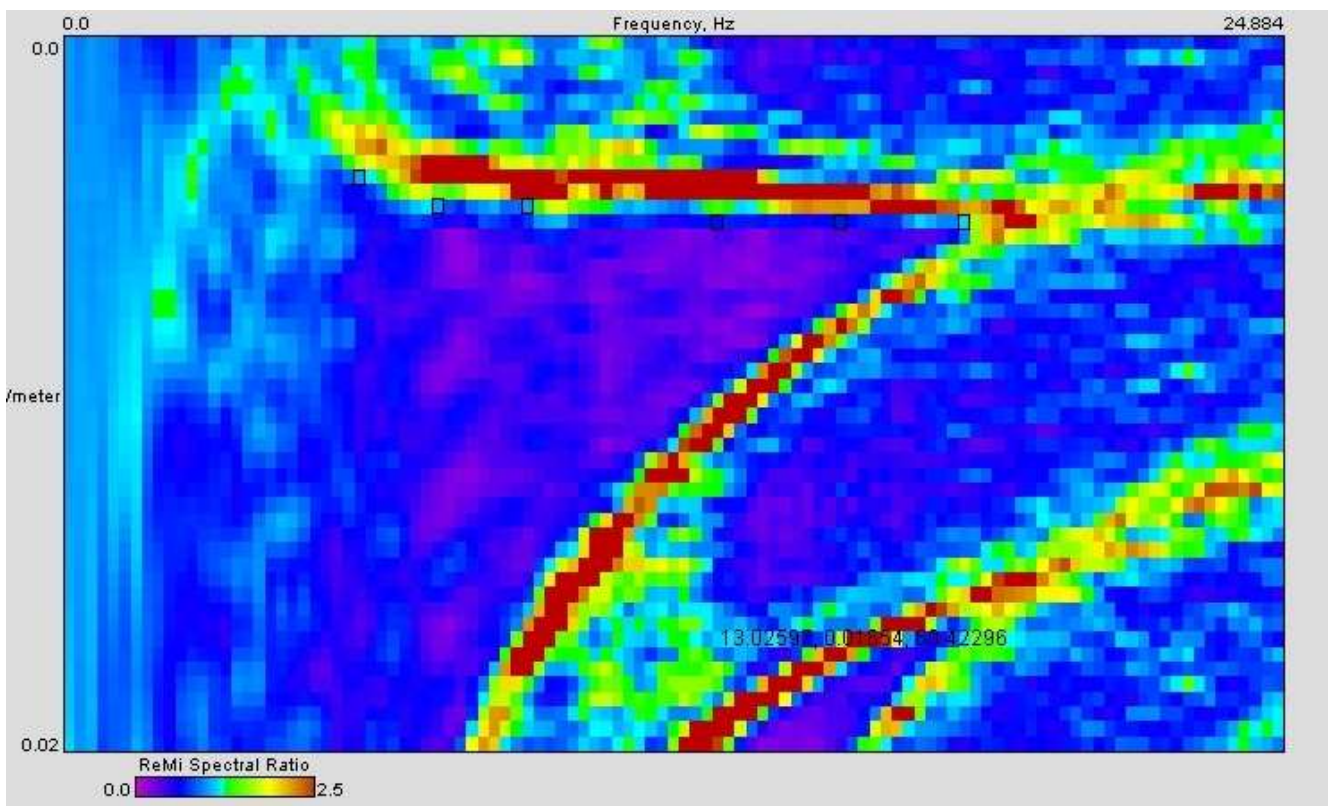


Fig. 2.6 - linea lo-6-53

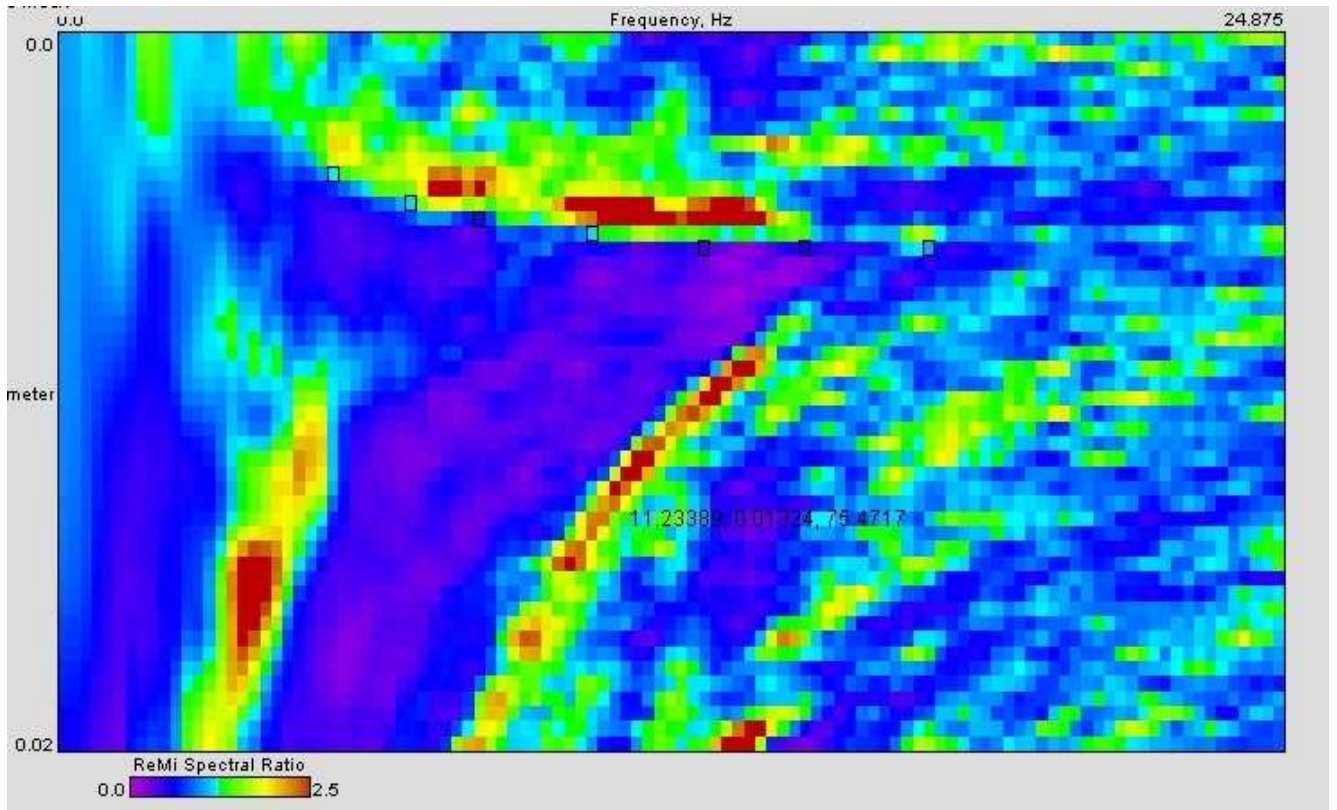


Fig. 2.7 - linea lo-7-68

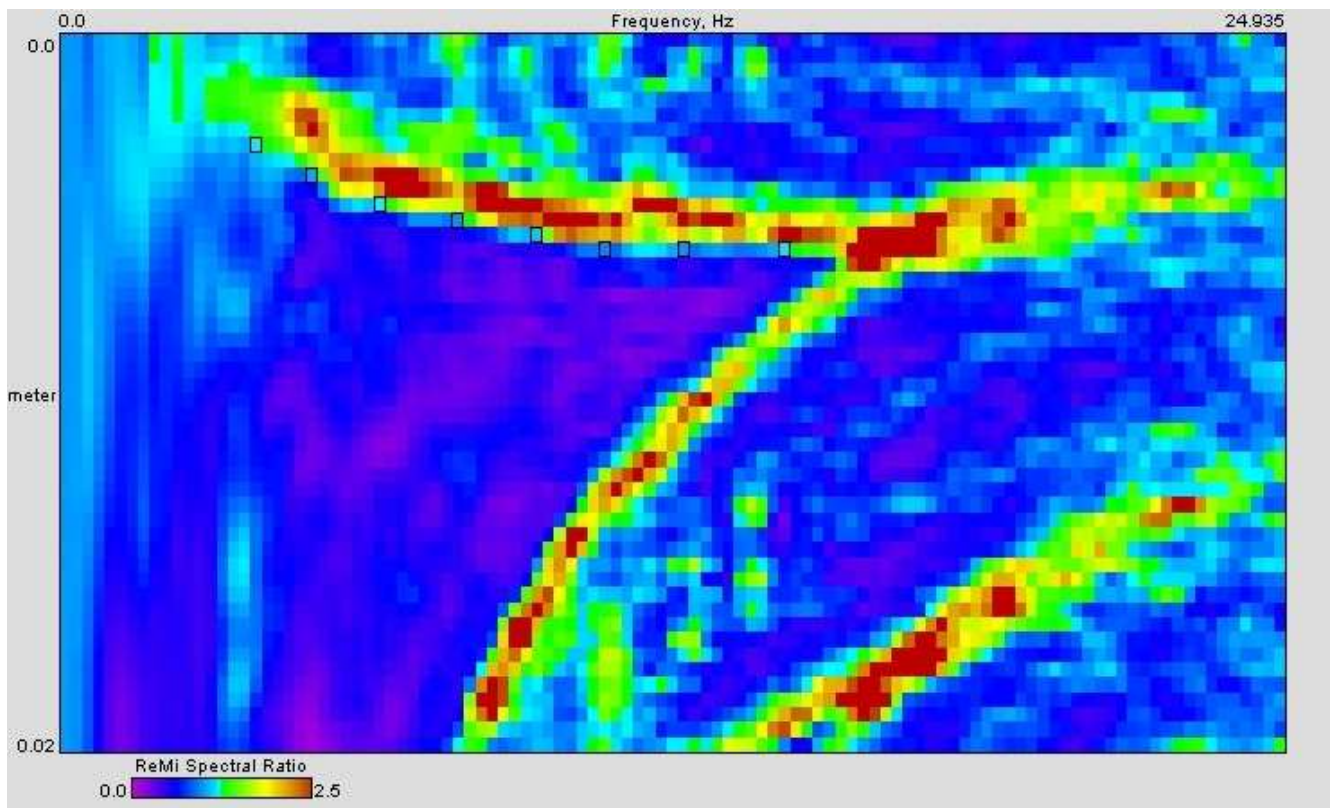


Fig. 2.8 - linea lo-8-77

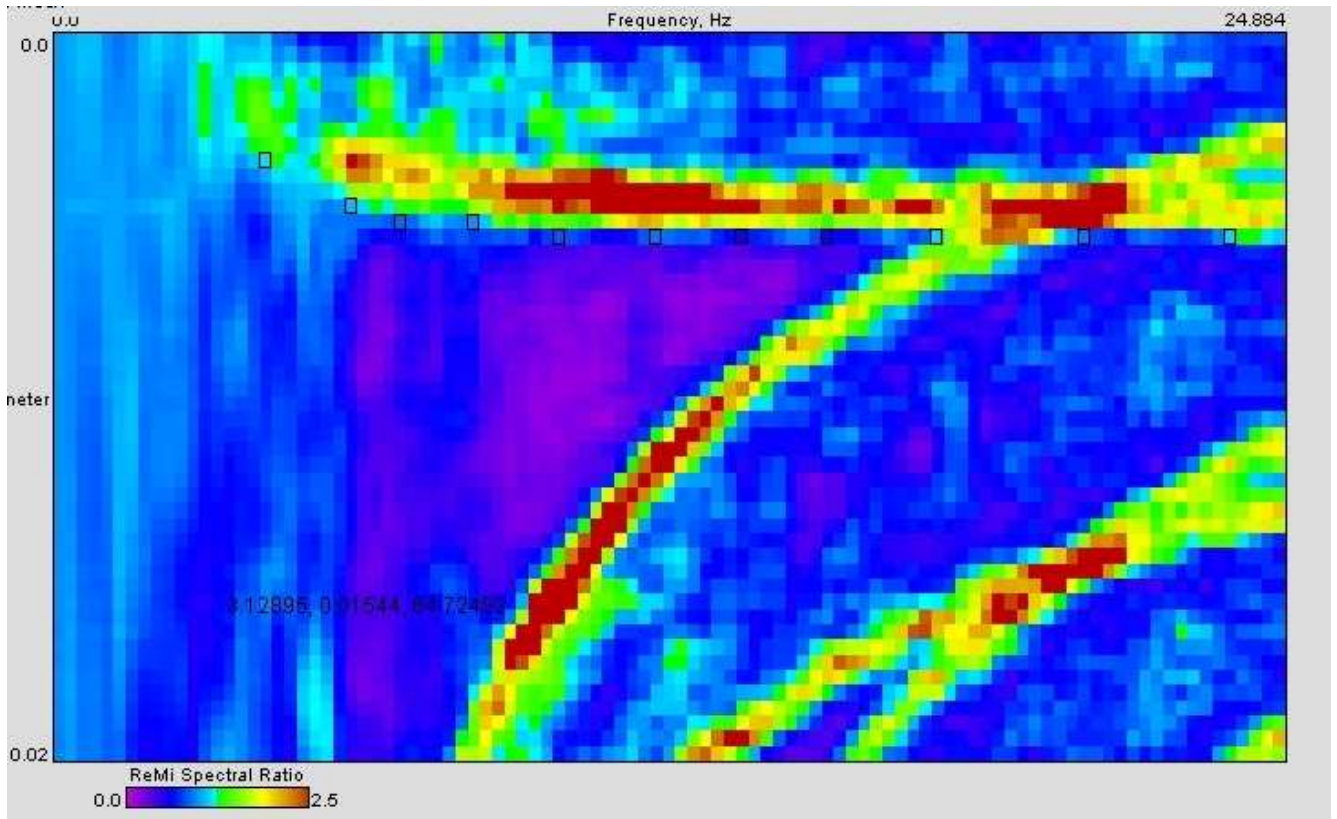


Fig. 2.9 - linea lo-p-1-8

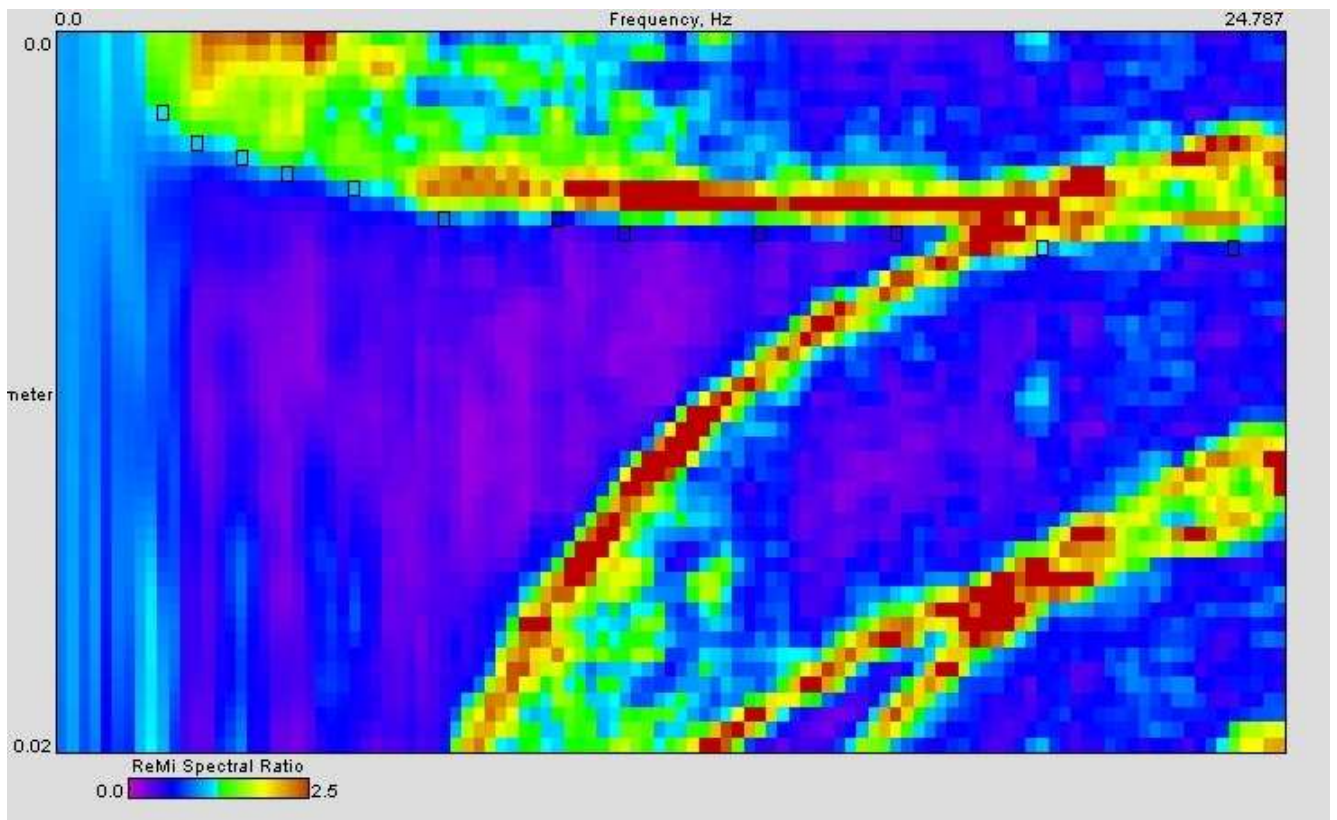


Fig. 2.10- linea lo-p-2-13

FIG. 3 - MODELLI DI VELOCITÀ DELLE ONDE S

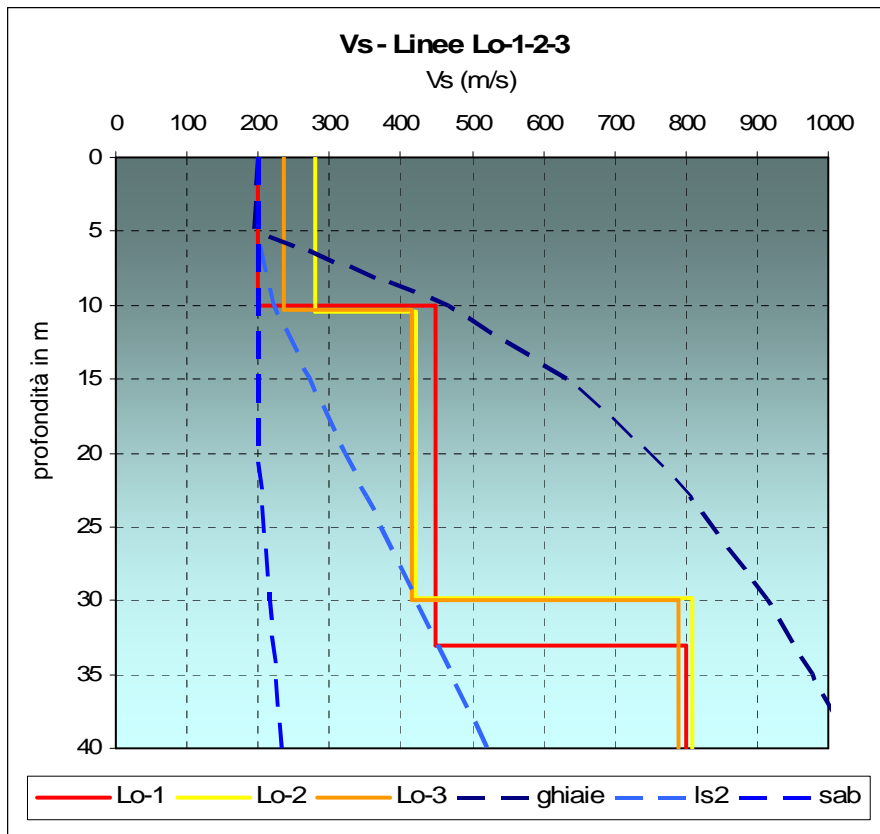


Fig.3a

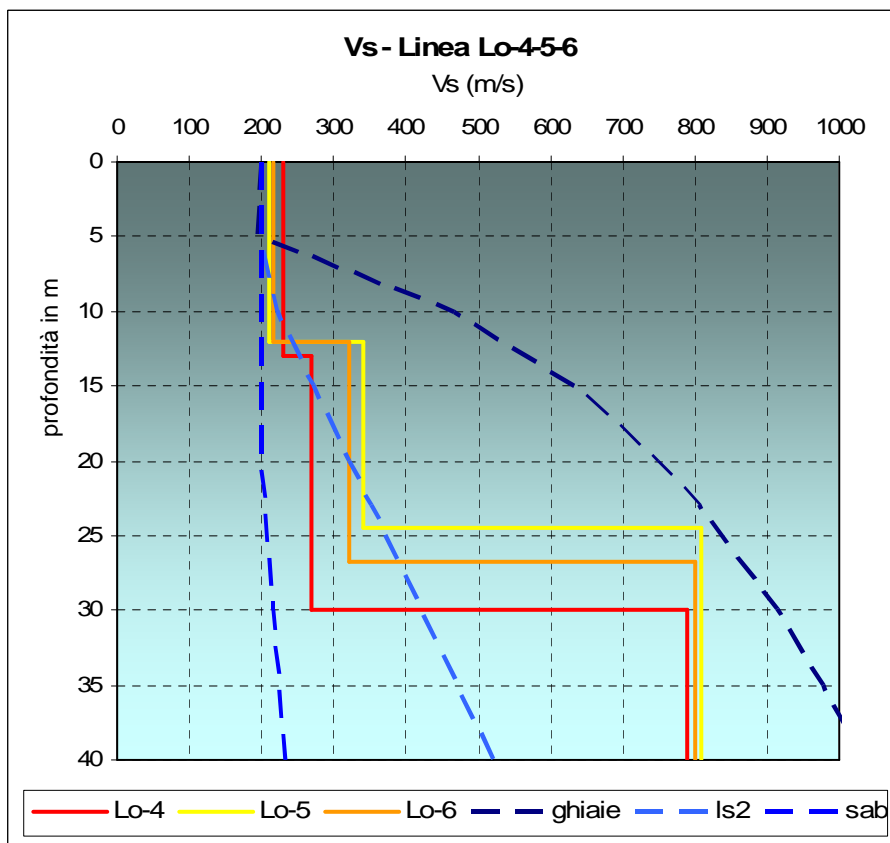


Fig.3b

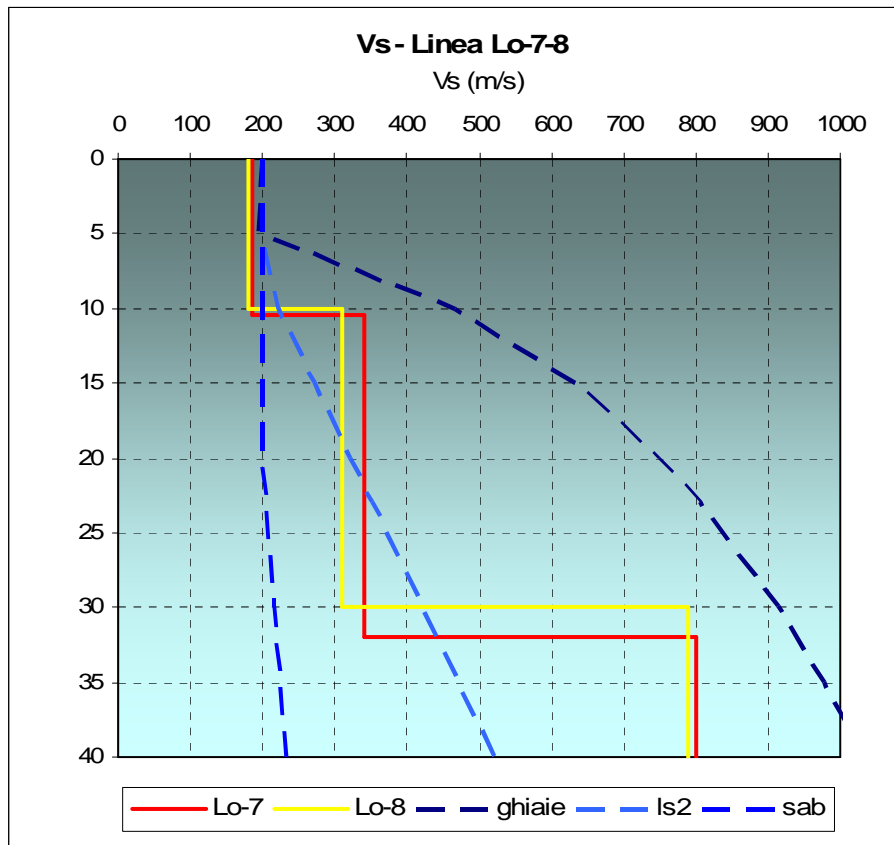


Fig.3c

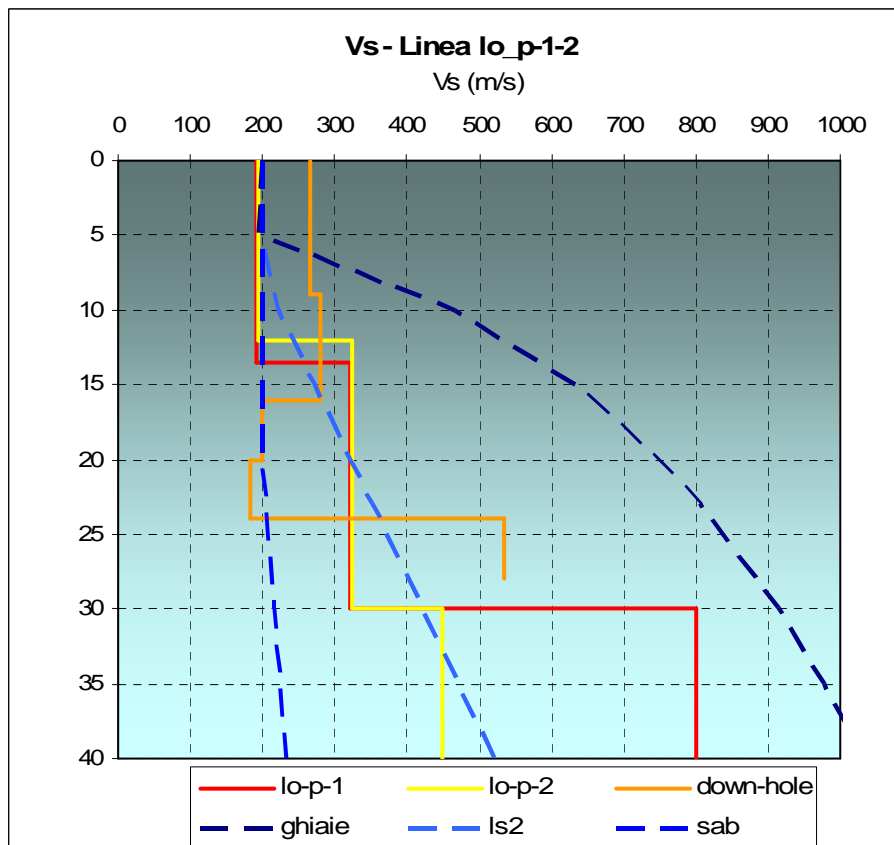


Fig.3d

FIG. 4 - CURVE DI DISPERSIONE E PICKING

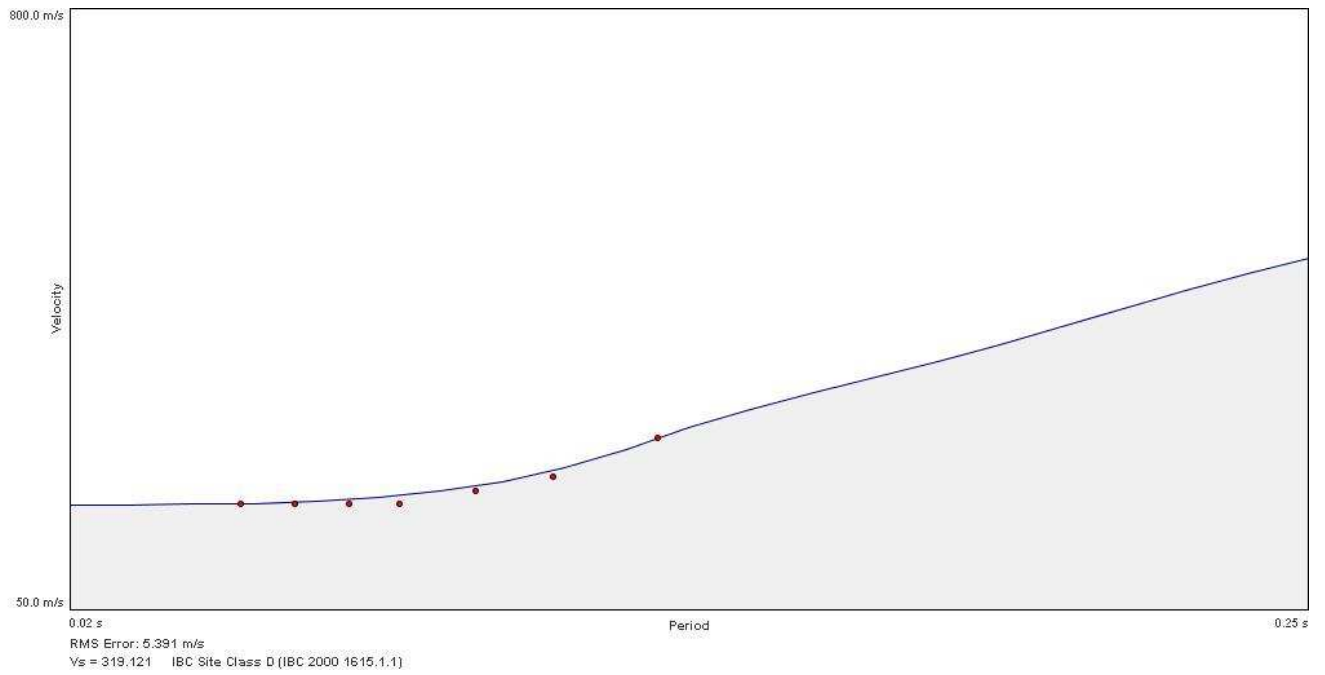


Fig. 4.1 - linea lo-1-04

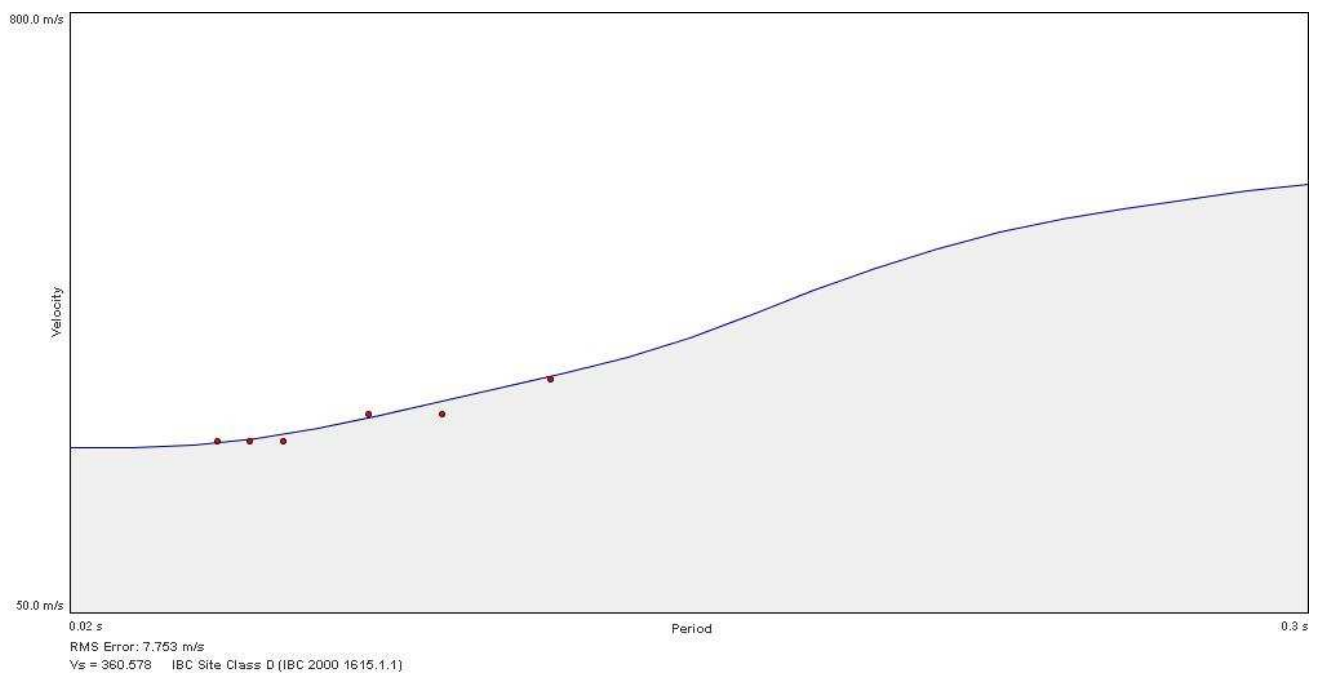


Fig. 4.2 - linea lo-2-16

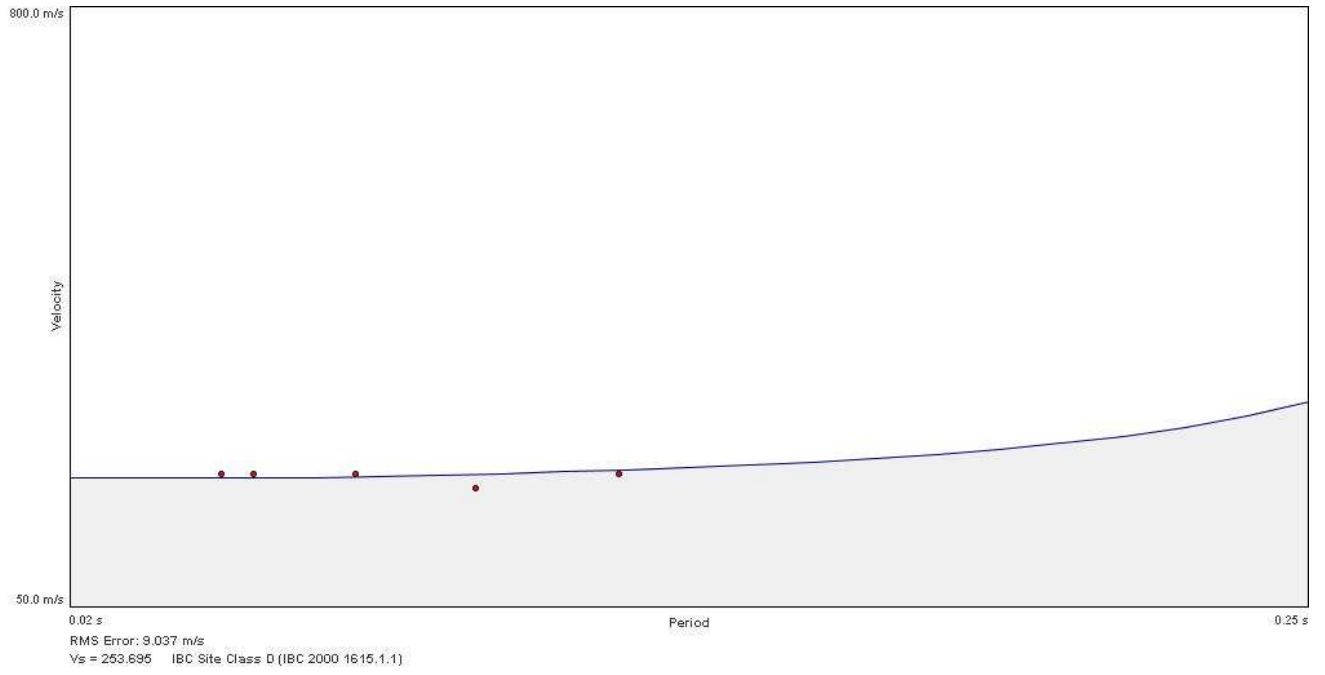


Fig. 4.3 - linea lo-3-29

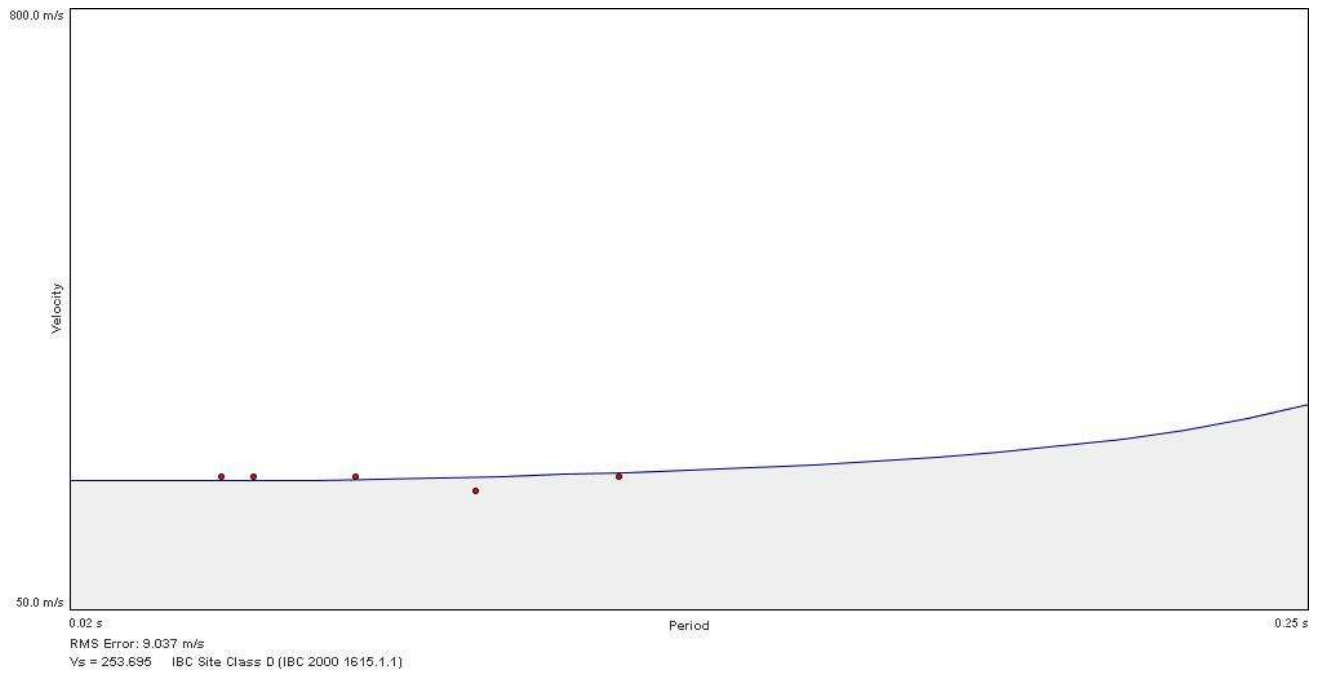


Fig. 4.4 - linea lo-4-39

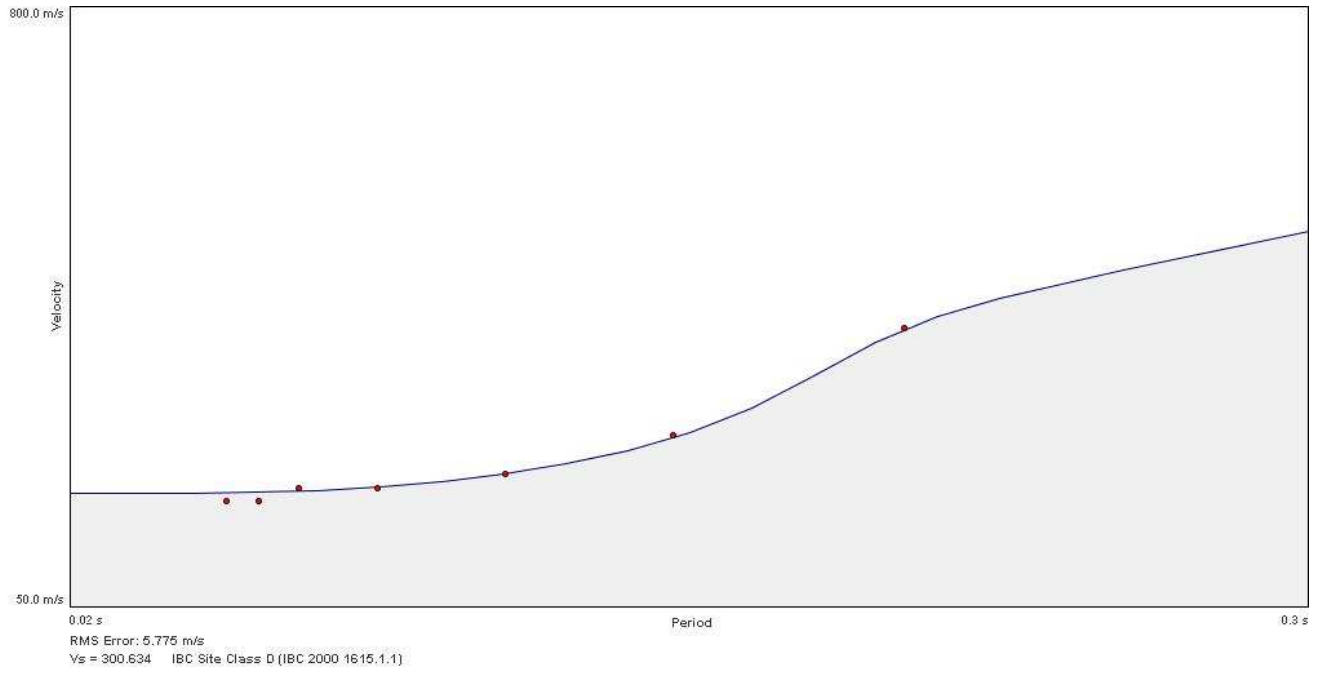


Fig. 4.5 - linea lo-5-48

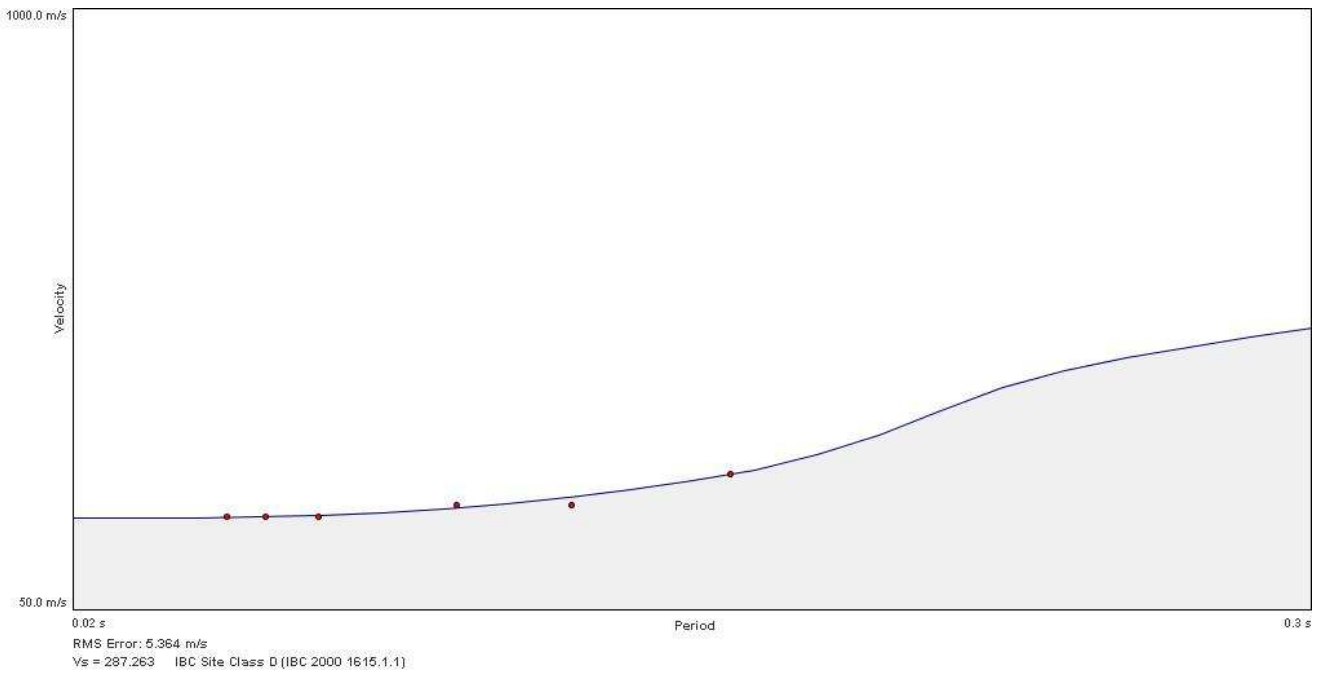


Fig. 4.6 - linea lo-6-53

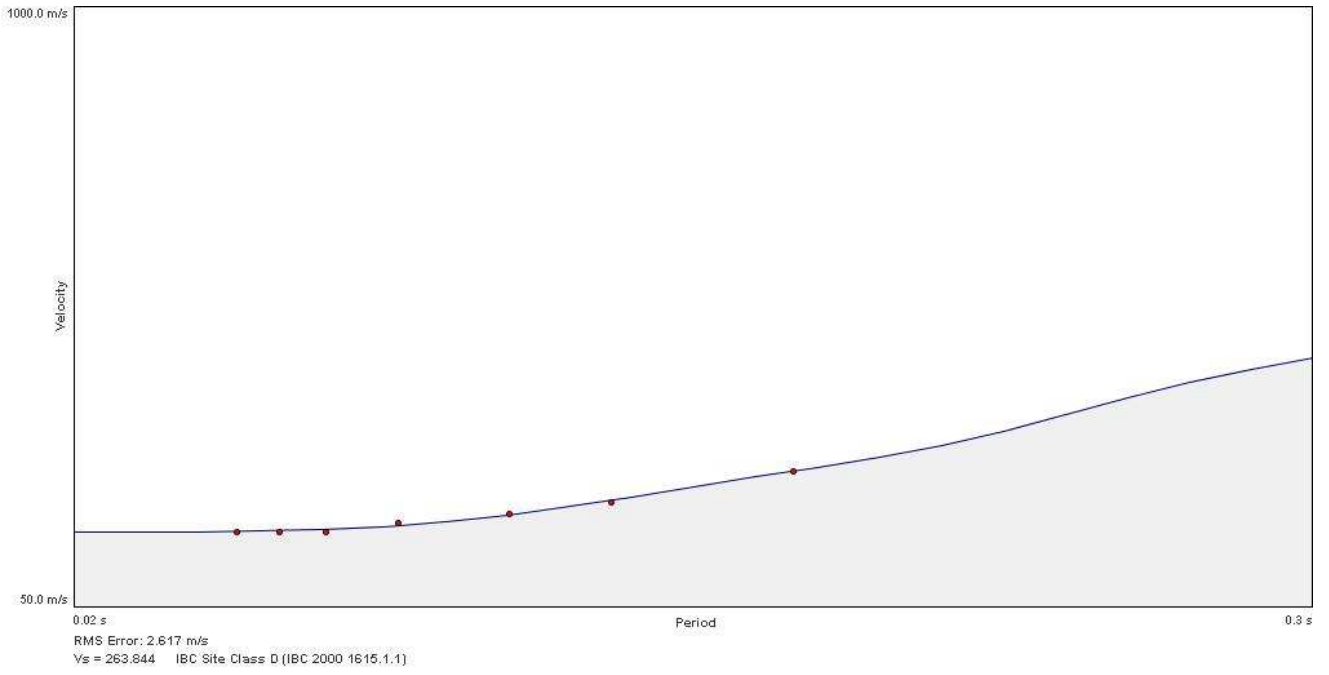


Fig. 4.7 - linea lo-7-68

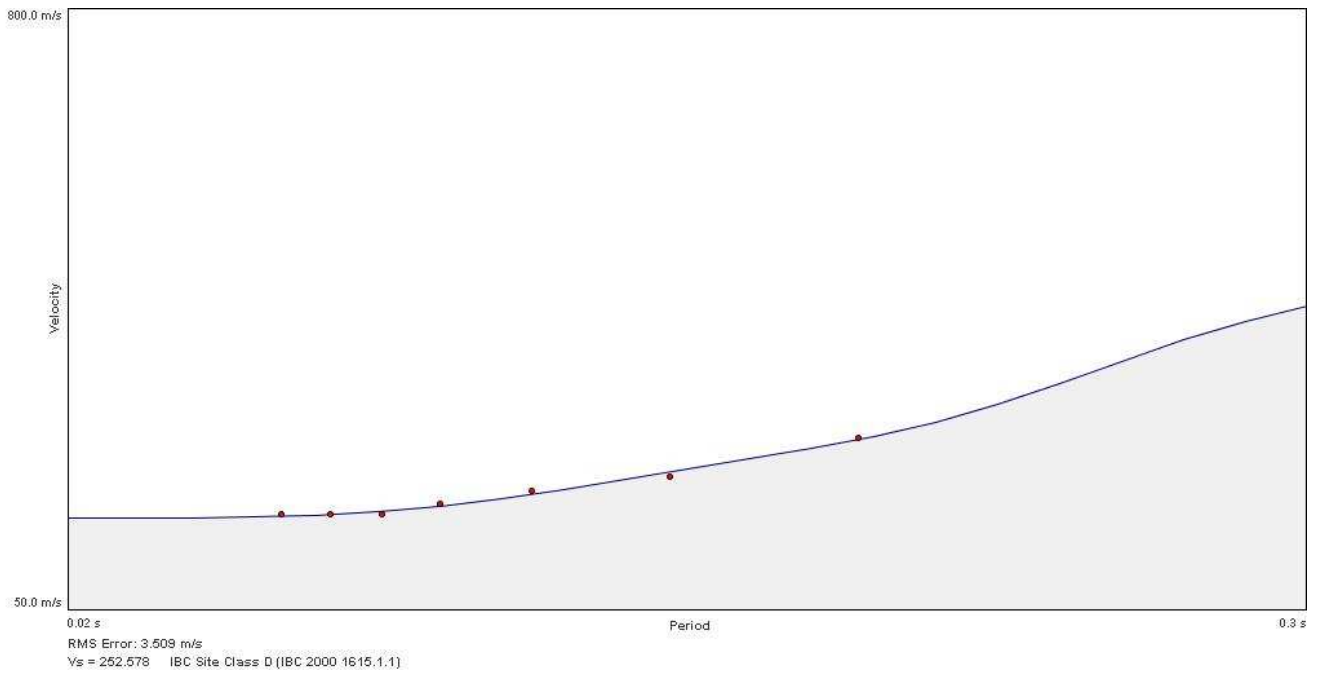


Fig. 4.8 - linea lo-8-77

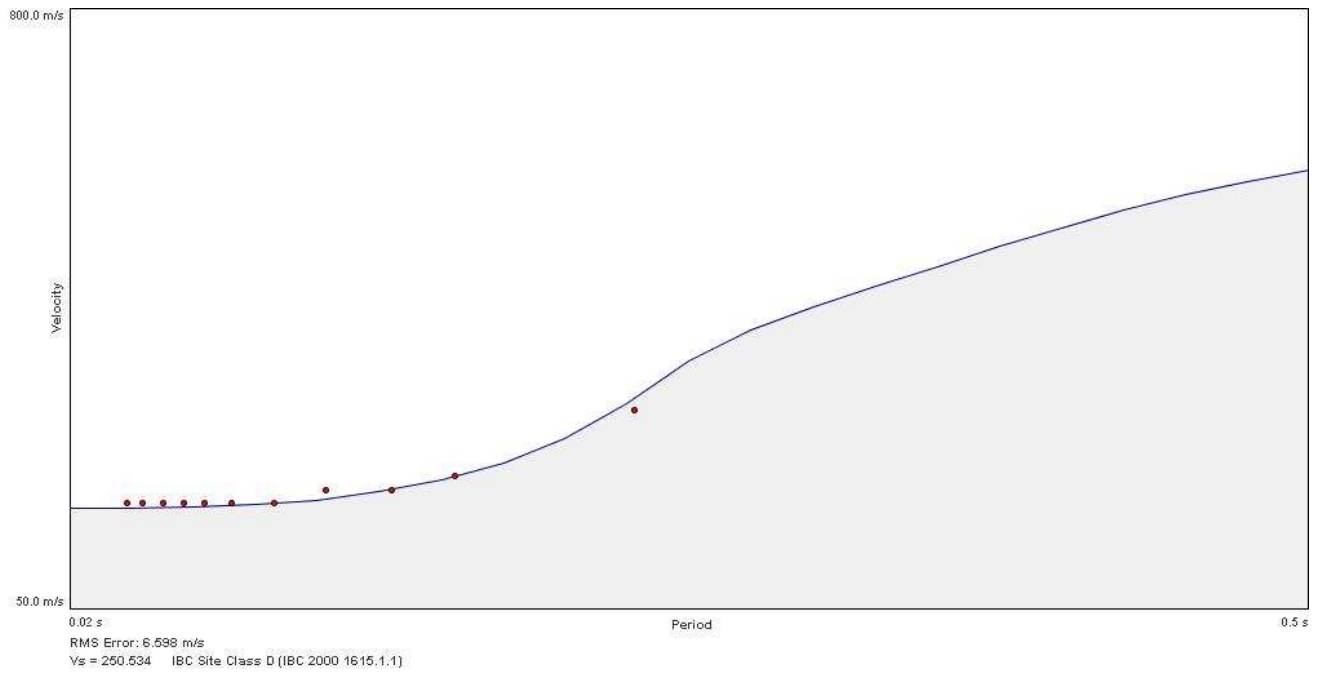


Fig. 4.9 – linea lodi-1-8

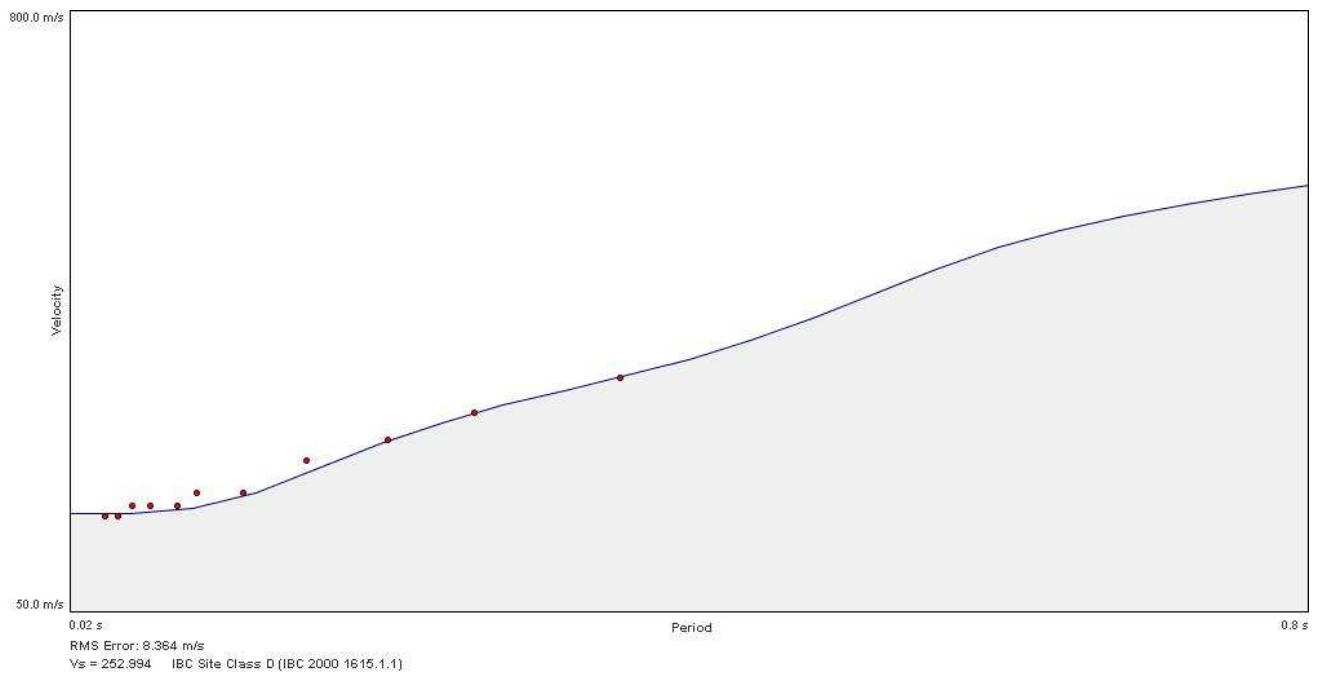


Fig. 4.10 – linea lodi-2-13