

S.S. 38 - LOTTO 4: VARIANTE DI TIRANO DALLO SVINCOLO DI STAZZONA (COMPRESO) ALLO SVINCOLO DI LOVERO (CON COLLEGAMENTO ALLA DOGANA DI POSCHIAVO)

**S.S. 38 - LOTTO 4: NODO DI TIRANO -
TRATTA "A" (SVINCOLO DI BIANZONE - SVINCOLO LA GANDA)
E TRATTA "B" (SVINCOLO LA GANDA - CAMPONE IN TIRANO),
AI SENSI DEL PROTOCOLLO D'INTESA DEL 05/11/2007**

PROGETTO ESECUTIVO

 STUDIO CORONA Ing. Renato Vaira (Ordine degli Ingg. di Torino e Provincia n° 4663 W)	 Ing. Valerio Bajetti Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-26211	ING. RENATO DEL PRETE Ing. Renato Del Prete Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5073	 Arch. Nicoletta Frattini Ordine degli Arch. di Torino e provincia n° A-8433	 Ing. Gabriele Incecchi Ordine degli Ingg. di Roma e provincia n° A-12102
	 Società designata: GA&M Prof. Ing. Matteo Ranieri Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1137	SETAC Srl Servizi & Engineering Trasporti Ambiente Costruzioni Prof. Ing. Luigi Monterisi Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 1771	ARKE' INGENGERIA s.r.l. Via Immacolata Concezione n. 2 - 70124 Bari Ing. Gioacchino Angarano Ordine degli Ingg. di Bari e provincia n° 5970	DOTT. GEOL. DANILLO GALLO Dott. Geol. Danilo Gallo Ordine dei Geologi della Regione Puglia n° 588

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO Dott. Ing. Giancarlo LUONGO	RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE  Ing. Valerio BAJETTI	GEOLOGO  Dott. Geol. Francesco AMANTIA SCUDERI	IL COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE  Ing. Gaetano RANIERI
---	---	---	--

<h1>BC08</h1>	<h2>GEOLOGIA, GEOTECNICA E SISMICA</h2> <h3>BC - GEOTECNICA</h3> <p>Indagini 2009 - Relazione sulle indagini geofisiche</p>
---------------	---

CODICE PROGETTO PROGETTO LIV. PROG. N. PROG. M 3 2 4 E 1 8 0 1	NOME FILE BC06-P00GE00GETRE04_A.dwg	REVISIONE B	SCALA:
CODICE ELAB.	P 0 0 G E 0 0 G E T R E 0 4	B	

C					
B	REVISIONE PER ISTRUTTORIA ANAS	FEBBRAIO 2020	DOTT. FRANCESCO AMANTIA	PROF. ING. VITTORIO RANIERI	ING. VALERIO BAJETTI
A	EMISSIONE	FEBBRAIO 2019	DOTT. FRANCESCO AMANTIA	PROF. ING. VITTORIO RANIERI	ING. VALERIO BAJETTI
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

**“S.S. 38 – LOTTO 4: NODO DI TIRANO
TRATTA “A” (SVINCOLO DI BIANZONE – SVINCOLO LA GANDA)
E TRATTA “B” (SVINCOLO LA GANDA – CAMPONE IN TIRANO)**

RELAZIONE SULLE INDAGINI GEOFISICHE

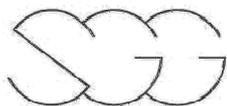
1. PREMESSA

Nel presente rapporto geotecnico viene riportata la Relazione sulle Indagini Geofisiche eseguite durante la fase di Progettazione Definitiva.

La relazione sulle indagini geofisiche eseguite durante la fase di Progettazione Definitiva viene integralmente recepita, analizzata ed interpretata nella Relazione Geotecnica del Progetto Esecutivo.

Tutti i diritti sono riservati.
La riproduzione e la divulgazione a terzi e' vietata.

D																									
C																									
B																									
A	EMISSIONE	28/09/2009	Notari	Baldi	Baldi																				
Rev.	Descrizione	Data	Redatto	Verificato	Approvato																				
COMMITTENTE : SWS ENGINEERING S.p.A.				Archivio n° 3688																					
				Commessa n° Q252																					
LOCALITA': Comune di Tirano (SO)																									
INDAGINE: Ricostruzione del sottosuolo																									
OGGETTO: RAPPORTO TECNICO																									
<table border="1"> <tr> <td>3</td><td>6</td><td>8</td><td>8</td><td>S</td><td>G</td><td>G</td><td>9</td><td>9</td><td>A</td> </tr> </table>			3	6	8	8	S	G	G	9	9	A	<table border="1"> <tr> <td>N° Copie</td> <td>N° Pagine</td> <td>Formato</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>A4 <input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>A3 <input type="checkbox"/></td> </tr> </table>		N° Copie	N° Pagine	Formato			A4 <input checked="" type="checkbox"/>			A3 <input type="checkbox"/>	<table border="1"> <tr> <td>data 28 Set 2009</td> </tr> </table>	data 28 Set 2009
3	6	8	8	S	G	G	9	9	A																
N° Copie	N° Pagine	Formato																							
		A4 <input checked="" type="checkbox"/>																							
		A3 <input type="checkbox"/>																							
data 28 Set 2009																									
Nome file 3688SGG99A.doc																									
Coordinatore: Dr. Geol, Antonio Maria Baldi																									
				STUDIO DI GEOLOGIA E GEOFISICA S.r.l. STRADA MASSETANA ROMANA , 56 - SIENA - ITALY - Tel. +39 0577 49276 - Fax +39 0577 287254 - e.mail: info@sgg.it																					
				CONTROLLO QUALITA' data-sigla																					



INDICE

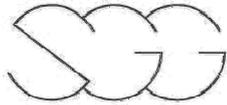
1	- INTRODUZIONE	Pag.	3
2	- INDAGINI SISMICHE SVOLTE	Pag.	4
3	- STRUMENTAZIONI, PERSONALE IMPIEGATO E QUALITÀ	Pag.	7
4	- FINALITA' DELLA PROSPEZIONE	Pag.	9
5	- ESECUZIONE DEI RILIEVI	Pag.	10
6	- ANALISI DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI VOLUME "P"	Pag.	17
7	- ANALISI DELLE VELOCITA' DELLE ONDE SUPERFICIALI "R"	Pag.	21
8	- PROVA DOWN-HOLE	Pag.	27
9	- ANALISI DEI RISULTATI	Pag.	29

APPENDICE

Risultati delle prove Re.Mi.	Pag.	43
Risultati delle prove MASW	Pag.	64

ALLEGATI

3688SGG01	Planimetria generale
3688SGG02	Profilo sismico a rifrazione LS4 e prova Down-Hole
3688SGG03	Profilo sismico a rifrazione LS5
3688SGG04	Profili sismici a rifrazione LS6 e LS7
3688SGG05	Profilo sismico a rifrazione LS8
3688SGG06	Profili sismici a rifrazione LS1 e LS2
3688SGG07	Profilo sismico a rifrazione LS9
3688SGG08	Profili sismici a rifrazione LS10 e LS3



1 - INTRODUZIONE

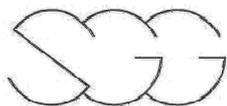
Il presente rapporto riferisce i risultati ottenuti da un'indagine sismica condotta nel Comune di Tirano (SO) per conto di SWS ENGINEERING S.p.A..

Le finalità della prospezione erano quelle di identificare e ricostruire, sulla base delle loro caratteristiche fisiche e meccaniche, i rapporti geometrici dei terreni presenti nel sottosuolo dell'area indagata, e di fornire il valore V_{s30} utile per la classificazione del terreno nelle varie categorie di suolo come prescritto dalla nuova normativa antisismica.

A tal scopo sono stati realizzati dieci profili sismici tomografici a rifrazione per determinare le variazioni della velocità delle onde di volume "P" nel sottosuolo. Inoltre, per permettere una più adeguata rappresentazione del terreno indagato e descrivere la propagazione delle onde superficiali sono state realizzate, in corrispondenza di ciascuno stendimento sismico, una prova "Re.Mi." (Refraction Microtremor) ed una prova MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) in modo da ricostruire le distribuzioni della velocità delle onde di taglio "S". Infine, per la caratterizzazione dinamica dei terreni attraverso il parametro della velocità sismica delle onde P e delle onde SH e la definizione del valore di V_{s30} , è stata eseguita una prova Down-Hole.

Nella presente relazione sono illustrate le metodologie esecutive ed interpretative delle misure geofisiche ed i risultati della prospezione secondo un criterio essenzialmente geofisico.

I lavori si sono svolti nei giorni dal 20 al 23 Luglio e il giorno 25 Settembre 2009.



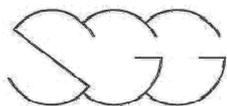
2 - INDAGINI SISMICHE SVOLTE

Le indagini sismiche in sito hanno permesso di determinare direttamente la velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di compressione (onde "P") e delle onde di superficie (onde di Rayleigh).

Al fine di minimizzare i limiti dovuti in parte al carattere indiretto delle metodologie geofisiche stesse ed in parte alle caratteristiche del contesto geologico in cui si è operato, i risultati delle indagini sono stati tarati e verificati attraverso le informazioni fornite direttamente da alcune stratigrafie di pozzo forniteci direttamente dalla committenza. Tale confronto ha consentito in ultima analisi di compiere elaborazioni dei dati geofisici i cui modelli risultano essere corretti dal punto di vista matematico e fisico e al contempo il più possibile coerenti con la situazione geologica reale.

Le prove geofisiche in generale si sono spinte fino ad incontrare il bedrock sismico, attraversandolo per uno spessore significativo, permettendo così di ricostruire un modello geologico del sottosuolo rappresentativo dell'area in esame. A tal fine per le indagini di superficie (sismica a rifrazione interpretata con metodologia tomografica), è stato utilizzato uno schema geometrico avente lunghezza di 120 metri lineari.

Nell'ambito degli studi per la risposta sismica locale, si è invece provveduto alla parametrizzazione dinamica dei terreni. Nello specifico sono state acquisite misure indirette della velocità delle onde di taglio che hanno permesso di determinare la rigidezza iniziale (G_0 o G_{max}), ossia la rigidezza a livelli di deformazione molto bassi. Nell'indagine geofisica svolta tale parametrizzazione è stata ottenuta attraverso due differenti tecniche: misure delle onde di Rayleigh tramite la tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) e mediante metodi passivi basati sul campionamento del rumore ambientale attraverso la tecnica Re.Mi. (Refraction Microtremor). Per quanto riguarda le principali proprietà dinamiche dei terreni, è opportuno ricordare che per sottosuoli naturali, a causa della rapidità delle azioni e del



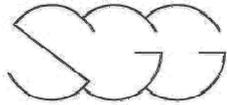
fatto che questi si trovano per gran parte sotto falda, ci si trova in condizioni di drenaggio impedito e pertanto il fenomeno sismico produce deformazioni volumetriche trascurabili, rispetto a quelle distorsionali. Per questo motivo appare giustificato ricondurre la modellazione meccanica di un fenomeno sismico all'analisi degli effetti prodotti da un insieme d'onde "S", che si propagano dal substrato alla superficie, con un campo di spostamenti del terreno in pratica orizzontale. Tale assunzione è oltretutto giustificata dal fatto che, da un punto di vista ingegneristico, il moto più verosimile ai fini della verifica sismica dei manufatti è quello orizzontale. In tal senso, a livelli di deformazione bassi, è assunta l'ipotesi che il terreno in esame presenti un comportamento tensione-deformazione di tipo elastico lineare (deformazioni inferiori a 10^{-3} %).

Nei paragrafi successivi saranno descritte le indagini svolte, analizzando le modalità d'esecuzione, le apparecchiature e le modalità interpretative e di restituzione dei dati inerenti alle indagini geofisiche eseguite nell'area di studio.

Di seguito si riporta il dettaglio delle indagini:

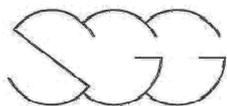
Profilo sismico a rifrazione n°	Interdistanza Geofoni (m)	Geofoni n°	Lunghezza * (m)	Prove Re.Mi. n°	Prove MASW n°
LS1	5	24	120	1	1
LS2	5	24	120	1	1
LS3	5	24	120	1	1
LS4	5	24	120	1	1
LS5	5	24	120	1	1
LS6	5	24	120	1	1
LS7	5	24	120	1	1
LS8	5	24	120	1	1
LS9	5	24	120	1	1
LS10	5	24	120	1	1

* Si ricorda che la misura riportata per il profilo è comprensiva dei punti di scoppio esterni allo stendimento geofonico realizzato.



Prova Down-Hole				
Sondaggio	Profondità (m)	Offset sistema energizzante (m)	Interdistanza misure (m)	Livello dell'acqua nel tubo (m p.c.)
S8	30	2	1	-5,2

L'ubicazione delle prove sismiche è riportata nella tavola 3688SGG01 allegata (*Planimetria Generale*).



3 – STRUMENTAZIONI, PERSONALE IMPIEGATO, E QUALITA'

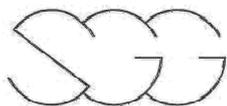
Strumentazione

Per l'esecuzione della prospezione sono state utilizzate le seguenti strumentazioni ed attrezzature:

n°	Strumentazione per indagini sismiche	COD. IDENT.
1	Sismografo GEOMETRICS "GEODE" 24 ch- 24 bit	SGG-SI-56
1	Computer portatile HP per registrazione dei dati di campagna;	
24	Geofoni verticali con frequenza pari a 4,5 Hz	SGG-SI-02
1	Cavo di collegamento per geofoni	SGG-SI-39H
1	Masse battenti da 5 e 45 kg	

n°	Strumentazione prova Down-Hole	COD. IDENT.
1	Sismografo GEOMETRICS "GEODE" 24 ch - 24 bit	SGG-SI-56
1	Computer portatile HP per registrazione dei dati di campagna	
1	Cavo di collegamento per geofoni	SGG-SI-50C
1	Geofono tridimensionale da foro Geostuff, a frequenza propria di 15 Hz, munito di bussola elettronica per orientamento del geofono stesso e di ancoraggio meccanico motorizzato alla parete del foro	SGG-SI-50A
1	Apparecchiatura Geostuff BHGC-4 per gestione geofono tridimensionale	SGG-SI-50B
1	Sistema specifico per la generazione di onde polarizzate SH	
1	Trigger dispositivo "arm switch"	
2	Masse battenti del peso di 5 e 10 kg	

Tutti gli strumenti di misura impiegati, in riferimento con il "calendario di taratura" afferente al "sistema di qualità" in uso presso questo studio, sono periodicamente tarati presso il LABORATORIO CETACE di Prato, della CESVIT S.p.A., ed accreditato SIT (Servizio di Taratura in Italia).



Risorse coinvolte

Per l'esecuzione della prospezione di campagna e della relativa interpretazione in ufficio, sono state coinvolte le seguenti risorse:

- | | |
|--------------------------------------|------------------------|
| • Responsabile dell'incarico | A. M. BALDI |
| • Responsabile della prospezione | A. M. BALDI |
| • Responsabile Assicurazione Qualità | A. M. BALDI |
| • Prospektori geofisici | D. NOTARI |
| • Interpretazione | D. NOTARI
S. PRIANO |
| • Editing | D. NOTARI
A. NELLI |

Tutte le risorse umane coinvolte sono state utilizzate nel rispetto della certificazione SA8000 in materia di responsabilità sociale.

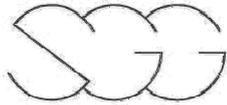
SISTEMA QUALITÀ

La prospezione geofisica è stata eseguita in riferimento alle specifiche SP0302 e SP0901; l'elaborazione dei dati è avvenuta in conformità all'istruzione IS0901.

Per la registrazione delle varie attività sono stati utilizzati i moduli del sistema qualità in uso presso questo studio.

AUTOMEZZI

- ◆ 1 Fiat Doblò (DR 780 SE).



4 - FINALITÀ DELLA PROSPEZIONE

Le finalità della prospezione geofisica possono così essere sinteticamente riassunte:

- *definire la geometria e gli spessori dei terreni indagati;*
- *definire il modello del sottosuolo in riferimento alla velocità di propagazione delle onde "P";*
- *caratterizzazione dinamica per bassi livelli di deformazione delle unità litostratigrafiche presenti nell'area di indagine, computo della V_{S30} , dei moduli elasto-dinamici e del coefficiente di Poisson.*

5 – ESECUZIONE DEI RILIEVI

Profilo sismico tomografico a rifrazione onde “P”

Lo scopo della prova consiste nel determinare il profilo di rigidità del sito attraverso la misura diretta della velocità di propagazione delle onde di compressione (VP), secondo fasi d’acquisizione differenti e determinare le geometrie sepolte (spessori e superfici di contatto) dei sismostrati individuati.

Teoricamente si suppone che, nell’ambito della porzione di sottosuolo indagata, la distribuzione delle velocità sismiche sia crescente con la profondità; questa, infatti, è la condizione necessaria affinché si verifichi il fenomeno della doppia rifrazione, attraverso il quale, il treno d’onde sismico generato è in grado di essere registrato dai geofoni posti in superficie. In caso contrario avviene il fenomeno cosiddetto dell’”orizzonte muto o cieco”, ossia si è nell’impossibilità di poter distinguere ed individuare strati con velocità di propagazione delle onde sismiche inferiori rispetto ai livelli sovrastanti.

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, delle sollecitazioni dinamiche verticali per la generazione delle onde P e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori a componente verticale (geofoni).

Di seguito si riporta lo schema dell’array sismico realizzato per la base da 115 m (non comprensiva dei punti di scoppio esterni) con sistema ricevente composto da 24 geofoni utilizzati per lo svolgimento dell’indagine:

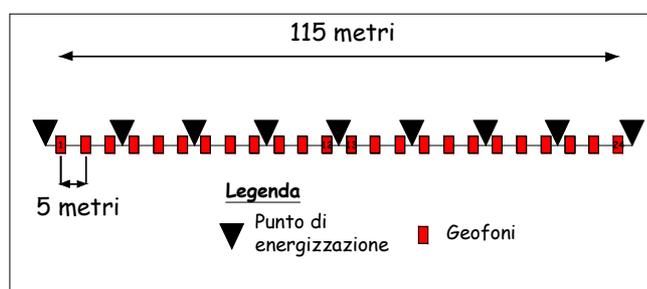
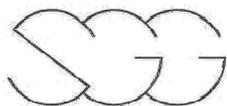


Figura n°1 : rappresentazione schematica di array sismico a rifrazione



Come sistema energizzante per la generazione delle onde P sono state adottate una massa battente da 5 kg e una da 45 kg in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza, con forme d'onda ripetibili e direzionali, ovvero con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione polarizzate su piani orizzontali.

Il sistema d'acquisizione dati è di tipo multicanale ed è in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica a 24 bit.

In riferimento all'indagine geofisica il profilo sismico a rifrazione eseguito presenta le seguenti caratteristiche:

- *Numero geofoni: 24;*
- *Spaziatura dei geofoni: 5 metri;*
- *Frequenza geofoni: 4.5 Hz;*
- *Spaziatura dei tiri: 15 metri;*
- *Sorgente: massa battente da 5 e da 45 kg*

Prova Refraction Microtremor ("Re.Mi.")

Lo scopo della prova Re.Mi. consiste nel determinare il profilo di rigidità del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di Rayleigh ed un successivo processo d'inversione, attraverso il qual è fornita una stima indiretta della distribuzione delle Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio).

La prova consiste nell'acquisire i microtremori naturali e/o artificiali a bassa frequenza, che si propagano all'interno del mezzo indagato.

L'acquisizione dei dati è stata eseguita utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione (a geofono singolo; vedi figura

n°2) disposta sul terreno con array lineare da 24 geofoni.

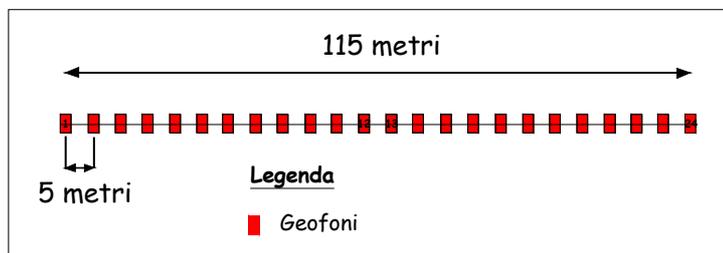


Figura n°2 : rappresentazione schematica di array per la prova Re.Mi.

Per ottenere una buona risoluzione in termini di frequenza, oltre ad utilizzare geofoni da 4.5 Hz, è stato programmato un tempo di registrazione pari a 30 secondi con un passo di campionamento di 0.02 secondi.

In riferimento all'indagine geofisica la prova Re.Mi. è stata acquisita con le seguenti caratteristiche:

- Numero geofoni: 24;
- Spaziatura dei geofoni: 5 metri;
- Frequenza geofoni: 4.5 Hz;
- Tempo di registrazione degli eventi: 30 s;
- Tempo di campionamento: 2×10^{-3} s;
- n°11 registrazioni.

Prove Multi-channel Analysis of Surface Waves ("MASW")

Lo scopo della prova MASW è quello di ricostruire il profilo di rigidità del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di Rayleigh con un successivo processo d'inversione, attraverso il quale è fornita una stima indiretta della distribuzione delle Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio).

La prova consiste nel produrre in un punto sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione dinamica verticale in un determinato campo di frequenze e nel registrare tramite uno stendimento lineare di sensori le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della

superficie, a distanze note e prefissate.

L'acquisizione dei dati è stata eseguita utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione (a geofono singolo da 4,5 Hz) disposta sul terreno con array lineare da 24 geofoni.

L'analisi degli spettri in fase d'elaborazione ha indicato che la configurazione spaziale più adatta per il sito di Tirano corrispondeva ad una spaziatura dei geofoni pari a 5 metri con sorgente posta a 10 metri dal primo geofono. (fig. 3)

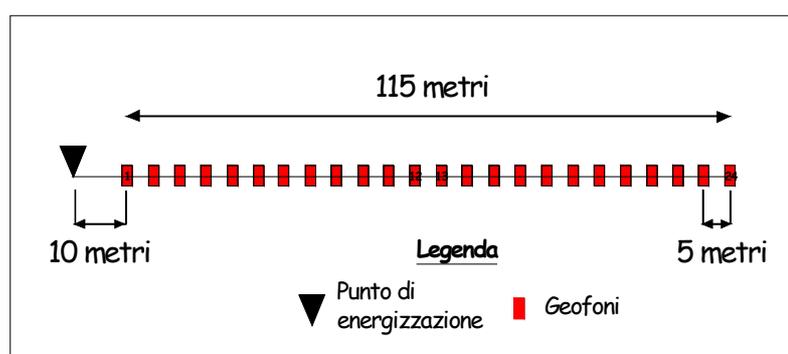


Figura n°3 : rappresentazione schematica di array per prova MASW

Prova Down-Hole

Lo scopo della prova down-hole consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P) e di taglio (onde SH), calcolando il tempo ad esse necessario per raggiungere il geofono ricevitore (all'interno del foro di sondaggio) dalla zona sorgente (su piano campagna a distanza nota dal foro). Si suppone che il volume di terreno, interessato dalle indagini sia stratificato orizzontalmente e che all'interno d'ogni strato il comportamento del terreno si possa considerare elastico, omogeneo ed isotropo.

La prova consiste nel produrre in superficie sollecitazioni verticali per la generazione di onde di compressione P, ed orizzontali per la generazione di onde di taglio polarizzate orizzontalmente SH e nel registrare l'istante di primo arrivo del treno d'onde ad un sistema composto da una terna di geofoni,

ancorati a profondità nota nel foro di sondaggio (fig. 4).

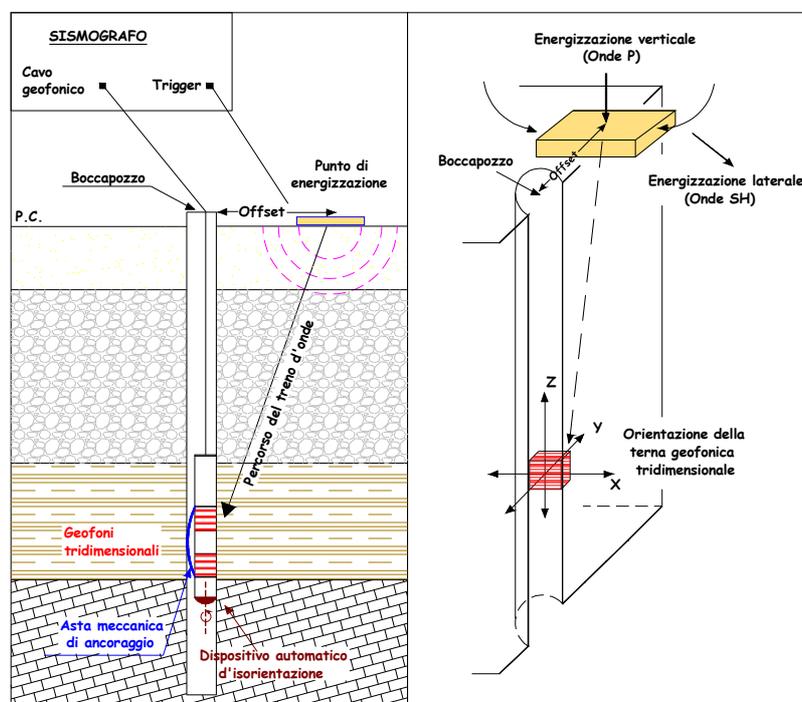


Figura 4 - Rappresentazione schematica di un carotaggio sismico down-hole.

Conosciuta la distanza tra la sorgente ed i ricevitori e determinato il tempo di propagazione, è possibile stimare in maniera accurata la distribuzione delle velocità sismiche (P e S_H) in corrispondenza della verticale di misura.

Per generare le onde di compressione P è stata utilizzata una massa battente da 5 kg. Per le onde S_H è stato invece utilizzato, come sorgente, un apposito dispositivo, la cui forma permette colpi laterali su entrambi i lati. Tale dispositivo viene gravato con sacchi di sabbia, al fine di assicurare una perfetta aderenza con il terreno, così da evitare ogni tipo di dispersione dell'energia prodotta. Il sistema energizzante adottato è in grado di generare onde elastiche ad alta frequenza, con forme d'onda ripetibili e direzionali, vale a dire con la possibilità di ottenere prevalentemente onde di compressione e/o di taglio polarizzate su piani orizzontali, ed eventualmente anche verticali, (fig. 5).

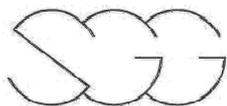


Figura 5 – Il dispositivo di energizzazione utilizzato per la prova down-hole.

Come sistema di ricezione è stata utilizzata una sonda meccanizzata al cui interno sono alloggiati tre ricevitori, ciascuno dei quali è costituito da un trasduttore di velocità. Il trasduttore verticale è orientato secondo la lunghezza della sonda, mentre i trasduttori orizzontali, orientabili automaticamente secondo il Nord geografico, sono disposti in direzioni ad essa perpendicolare (N-S ed E-W). I trasduttori hanno una frequenza propria di 15 Hz ed una sensibilità tale da poter ricevere in maniera adeguata il treno d'onde prodotto dalla sorgente. La sonda possiede un'asta meccanica motorizzata che garantisce l'aderenza tra i ricevitori e le pareti del rivestimento. Il sistema d'acquisizione dati è di tipo multicanale ed è in grado di registrare su ciascun canale in forma digitale le forme d'onda e di conservarle su memoria di massa dinamica a 24 bit.

Le quattro prove si sono sviluppate secondo le seguenti fasi:

1. Dopo ad aver predisposto un opportuno piano d'appoggio, il dispositivo sorgente è stato collocato sulla superficie in prossimità del foro ad una



distanza di 2,0 m ed orientato con direzione Est-Ovest perpendicolarmente al raggio condotto dal foro.

2. Il sistema, costituito dai tre ricevitori è stato calato a fondo foro collegandolo alla superficie mediante un sistema che ne consente l'orientamento assoluto dalla superficie.
3. Dopo aver ancorato la sonda geofonica alle pareti del rivestimento, si è proceduto con le fasi di orientamento dei trasduttori.
4. Campionamento del rumore ambientale.
5. È stato quindi attivato il dispositivo sorgente, producendo una sollecitazione che, attivando il trigger (dispositivo "arm-switch"), si propaga dalla sorgente verso i ricevitori con vibrazioni di tipo compressionale; di seguito (con energizzazione separata e distinta) sono state generate vibrazioni di tipo S_H , dirette perpendicolarmente alla direzione di percussione e polarizzate sul piano orizzontale. Per l'ottenimento di una buona qualità dei dati, è necessario produrre alla sorgente due onde di polarità opposta e sommare le registrazioni d'ogni singolo arrivo, così da individuare in modo migliore l'istante di primo arrivo (metodo cross-over).
6. La prova è stata quindi ripetuta con interdistanza fra le misure pari a 1,0 m per tutto il tratto di sondaggio.

6 – ANALISI DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI VOLUME “P”

Profilo sismico tomografico a rifrazione

La fase d'interpretazione dei dati acquisiti in campagna (fig. da 6 a 15) è stata preceduta dalla lettura dei tempi sismici registrati.

<p>Figura n°6 : acquisizione dei dati sismici del profilo LS1</p>	<p>Figura n°7 : acquisizione dei dati sismici del profilo LS2</p>
<p>Figura n°8 : acquisizione dei dati sismici del profilo LS3</p>	<p>Figura n°9 : acquisizione dei dati sismici del profilo LS4</p>

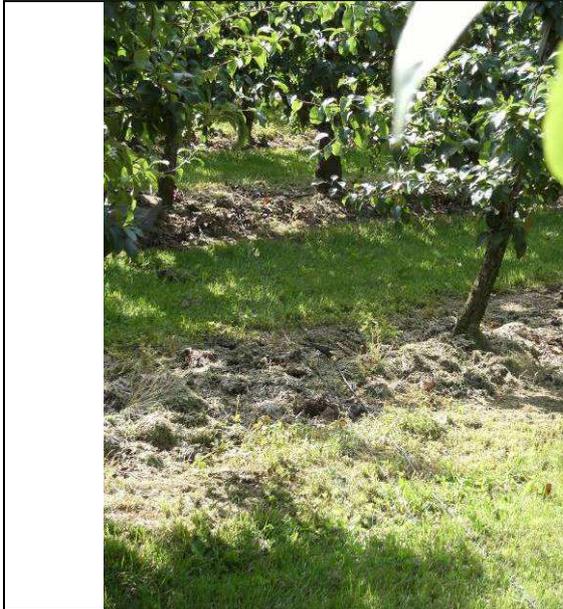


Figura n°10 : acquisizione dei dati sismici del profilo LS5



Figura n°11 : acquisizione dei dati sismici del profilo LS6

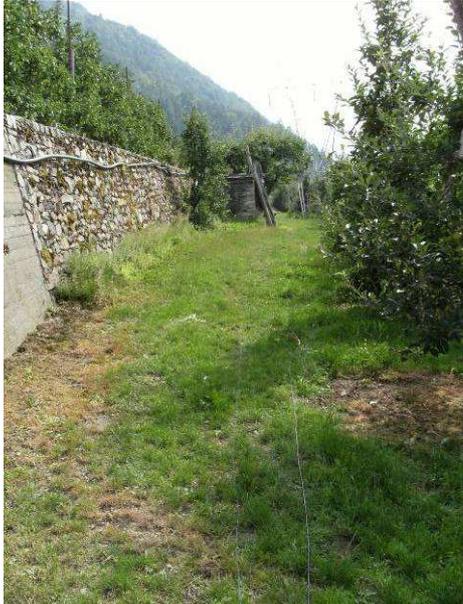


Figura n°12 : acquisizione dei dati sismici del profilo LS7



Figura n°13 : acquisizione dei dati sismici del profilo LS8



Figura n°14 : acquisizione dei dati sismici del profilo LS10

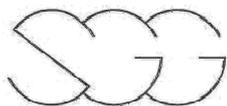
I tempi d'arrivo delle onde "P" sono letti attraverso uno specifico programma di *picking* ed in seguito tabellati. Tale programma permette di apprezzare variazioni di tempo dell'ordine di $0,1 \times 10^{-3}$ sec.

Dopo, per mezzo dello specifico programma SEISOPT@PRO v5.0, è stata eseguita un'interpretazione con metodologia tomografica del profilo sismico.

La metodologia tomografica prevede la suddivisione dello spazio bidimensionale in celle quadrate o rettangolari secondo una maglia prefissata, con l'attribuzione ad ognuna di un determinato valore di velocità sismica. Il programma calcola quindi il tempo di transito dell'onda sismica attraverso le maglie del modello e confronta tale valore con quello sperimentale, impiegando iterativamente algoritmi di calcolo adeguati, previo controllo dei tragitti dei raggi sismici. Per successive iterazioni si perviene a dei valori di velocità sismica per le diverse celle che soddisfino contemporaneamente più raggi sismici.

L'elaborazione dei dati è sviluppata tramite un'analisi con modellazione del sottosuolo su base anisotropa, la quale fornisce, in seguito ad un'elaborazione con metodologie iterative R.T.C. e ad algoritmi di ricostruzione tomografica, il campo delle velocità sismiche del sottosuolo attraverso la suddivisione dello spazio in celle regolari.

Nel caso specifico è stata utilizzata una maglia rettangolare di dimensioni 1,8 x 0,9 metri. Nella restituzione, i valori di velocità sismica attribuiti alla singola cella, sono rappresentati attraverso una scala colorimetrica. Inoltre, per facilitare la lettura delle velocità sulle sezioni, sono state disegnate le curve



d'isovelocità con equidistanza pari a 200 m/s.

Per la determinazione del modello d'interpretazione, il software utilizza il metodo d'inversione controllato MONTECARLO, basato su una modellizzazione avanzata, dove i modelli derivati dagli algoritmi propri del programma sono accettati o rifiutati basandosi su un criterio statistico.

In particolare, i risultati in termine d'affidabilità statistica delle interpretazioni operate, risultano essere i seguenti:

profilo sismico	precisione (s²)	n° di iterazioni
LS1	7,7 ⁻⁰⁰⁶	62.742
LS2	6,4 ⁻⁰⁰⁶	102.806
LS3	6,3 ⁻⁰⁰⁶	50.157
LS4	2,5 ⁻⁰⁰⁶	106.055
LS5	7,9 ⁻⁰⁰⁶	37.291
LS6	1,3 ⁻⁰⁰⁶	121.960
LS7	3,5 ⁻⁰⁰⁶	89.263
LS8	3,6 ⁻⁰⁰⁶	85.563
LS9	1,0 ⁻⁰⁰⁵	126.940
LS10	2,6 ⁻⁰⁰⁶	89.686

dove per *precisione* si intende la sommatoria degli scarti al quadrato tra i valori sperimentali e quelli calcolati nelle dromocrone diviso per il numero dei punti e per *iterazioni* il numero di volte che il programma ha eseguito la verifica del modello totale.

7 – ANALISI DI VELOCITA' DELLE ONDE SUPERFICIALI “R”

Prove Refraction Microtremor (“Re.Mi.”)

Sugli stessi allineamenti dei profili sismici sono state eseguite delle prove “Re.Mi.”, al fine di caratterizzare il sottosuolo anche attraverso l’ausilio della velocità delle onde di superficie.

Il metodo “Re.Mi.” consente di eseguire un’analisi del terreno mediante l’uso dei microtremori, naturali e/o artificiali, i quali si propagano all’interno dello stesso.

La metodologia Refraction Microtremor permette altresì di definire il parametro V_{s30} , utile per la classificazione dei terreni nelle categorie di suolo da utilizzare in seguito per la descrizione dell’azione sismica in sito.

Si precisa che Il valore del parametro V_{s30} della prova Re.Mi. è riportato, per convenzione, al centro del relativo stendimento geofonico.

Per l’interpretazione dei dati sperimentali è stato utilizzato uno specifico programma (*SeiSopt “Re.Mi. Version 5.0”*).

L’elaborazione del segnale consiste nell’operare una trasformata bidimensionale “slowness-frequency” ($p-f$), che analizza l’energia di propagazione del rumore in entrambe le direzioni (orizzontale e verticale) della linea sismica, e nel rappresentarne poi lo spettro di potenza su un grafico $p-f$ (fig. 15).

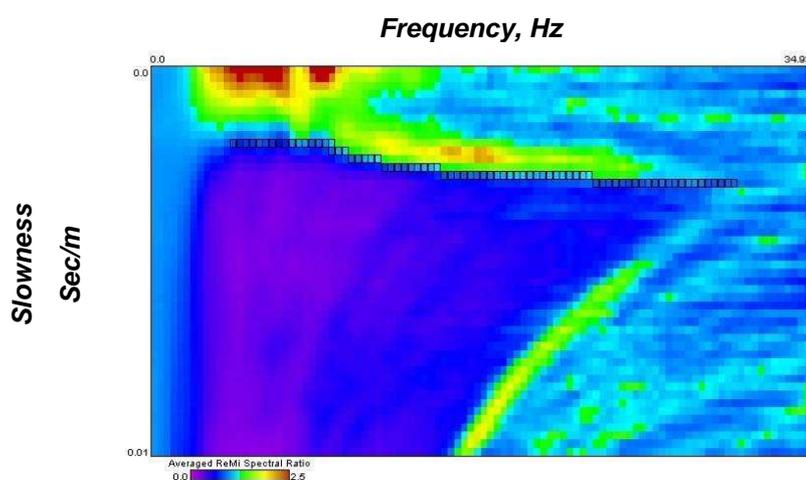


Figura 15: esempio di grafico slowness-frequency

Nella soprariportata immagine sono evidenziati gli andamenti che possiedono sia una spiccata coerenza di fase che una potenza rilevante, e ciò consente un riconoscimento visivo delle onde di Rayleigh in quanto queste presentano un carattere dispersivo rispetto a quelle riconducibili ad altre modalità e tipi d'onda.

Sullo spettro di frequenza è eseguito un “picking” (soprassegno con quadratini neri) attribuendo ad un certo numero di punti una o più slowness (inverso della velocità di fase) per alcune frequenze (fig. 15). Tali valori di picking poi sono riportati su di un diagramma periodo-velocità di fase (fig. 16) sui quali è sovrapposta la curva di dispersione al fine di ottimizzare il modello interpretativo.

Dispersion Curve Showing Picks and Fit

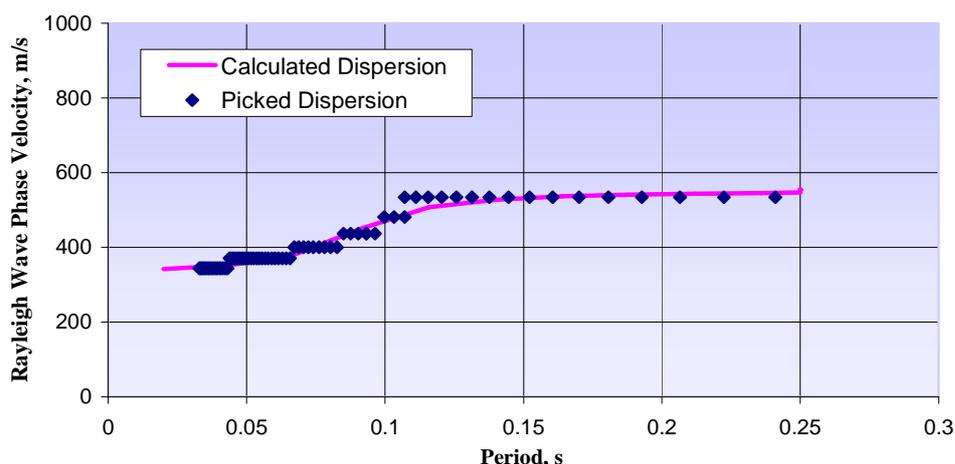


Figura 16: Esempio di diagramma periodo – velocità di fase

Variando la geometria del modello interpretativo ed i valori di velocità delle onde “S” si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione, rappresentata con il colore magenta nella figura 16; si consegue un buon fitting con i valori sperimentali e si assume tale modello come interpretativo. Al fine di ridurre le incognite, ottenere una maggiore attendibilità del modello e ridurre i casi d’equivalenza, si opera introducendo nell’interpretazione, come inamovibili, i seguenti elementi:

- per la densità si utilizzano valori di bibliografia associati ai litotipi presenti nel sottosuolo dell'area indagata;
- Il numero degli strati e la loro rispettiva potenza, sono assunti in relazione alle informazioni stratigrafiche e alle discontinuità sismiche individuate sulla base del modello interpretativo tomografico delle onde "P";
- La velocità delle onde P è assunta in relazione all'interpretazione tomografica dei profili sismici a rifrazione e dei carotaggi sismici.

Lo studio dello spettro di potenza permette in definitiva la ricostruzione di un modello sismico monodimensionale del sottosuolo (fig. 17), con le velocità delle onde di superficie "S" (esprese in m/sec) e la profondità (espressa in metri).

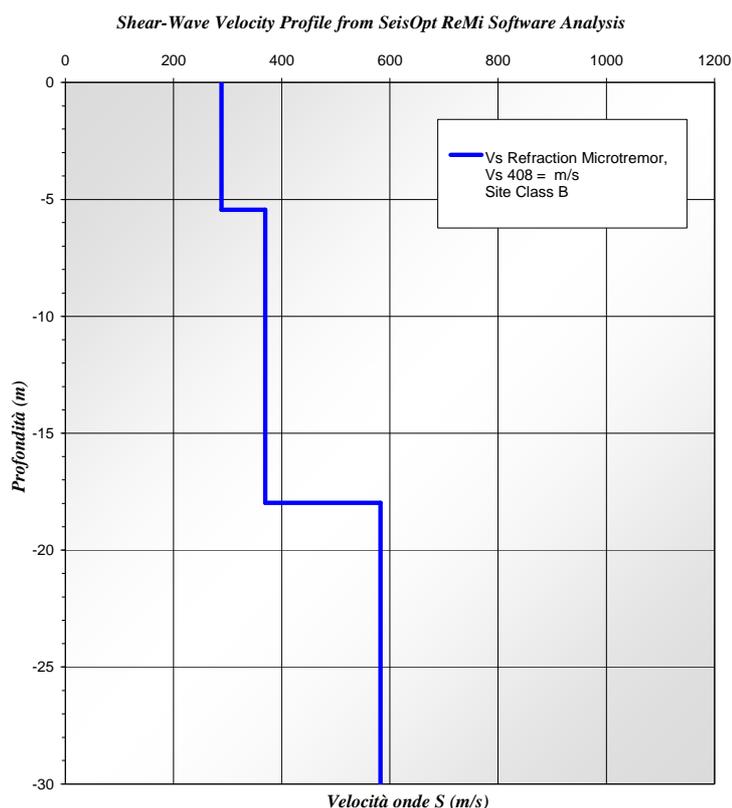


Figura 17: Esempio di modello interpretativo, le cui modifiche influenzano direttamente la curva di dispersione.

Prove Multi-channel Analysis of Surface Waves (“MASW”)

Sugli stessi allineamenti dei profili sismici è stata eseguita anche una prova MASW, al fine di caratterizzare il sottosuolo anche attraverso l’ausilio della velocità delle onde superficiali.

Il metodo “MASW” consente di eseguire un’analisi dei dati sismici in modo tale da poter ricavare il profilo verticale della velocità delle onde S.

La metodologia MASW permette altresì di definire il parametro V_{s30} , utile per la classificazione dei terreni nelle categorie di suolo da utilizzare in seguito per la descrizione dell’azione sismica in sito.

Si ricorda che il valore del parametro V_{s30} della prova MASW è riportato, per convenzione, al centro del relativo stendimento geofonico.

Per l’interpretazione dei dati sperimentali è stato utilizzato uno specifico programma (winMASW Version 2.0).

Il profilo verticale di V_s è ottenuto tramite l’inversione (considerando tanto il modo fondamentale che quelli superiori) delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh.

La procedura si sviluppa in due fasi:

- Determinazione dello spettro della velocità sulla quale si identifica la curva di dispersione
- Inversione della curva di dispersione attraverso l’utilizzo di algoritmi genetici.

L’elaborazione del segnale consiste inizialmente nel calcolo dello spettro di velocità dei dati sismici acquisiti in campagna (fig. 18).

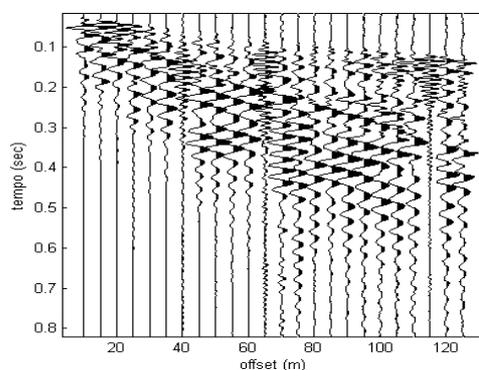


Figura 18: esempio di dati di campagna.

Sullo spettro di velocità (fig. 19) è eseguito un “picking” della curva di dispersione (soprassegno con cerchietti) individuando un insieme di punti che appartengono ad un certo modo (in questo caso al modo fondamentale) di propagazione dell’onda superficiale di Rayleigh.

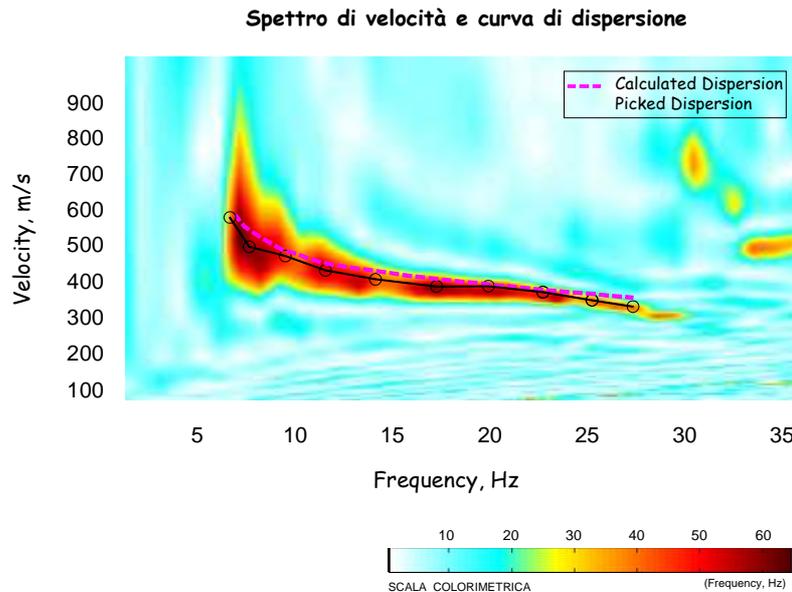


Figura 19: Esempio di spettro di velocità e relativo picking.

Allo scopo di ottenere una prima valutazione del possibile modello del terreno è altresì effettuata una modellazione diretta del terreno tramite il calcolo di una curva di dispersione appartenente ad un modello a più strati, i cui valori di V_s e degli spessori sono definiti sulla base di osservazioni desunte e dalla tomografia sismica a rifrazione e delle stratigrafie dei pozzi.

Successivamente per ottenere il profilo verticale di V_s è eseguita l’inversione della curva di dispersione precedentemente “piccata”. Tale inversione è eseguita tramite l’utilizzo di algoritmi genetici che consentono di ottenere soluzioni affidabili ed una stima dell’attendibilità del modello ricavato in termini di deviazione standard.

L'operazione di inversione è ottimizzata definendo uno spazio di ricerca i cui confini sono definiti da valori di V_s e spessori all'interno dei quali si cerca la soluzione. Tali assunzioni sono fatte sulla base delle conoscenze geologiche del sito e delle informazioni derivate dalla sismica a rifrazione

Una volta fissati i limiti minimi e massimi dello spazio di ricerca, sono quindi impostati i parametri genetici che definiscono sia il numero di individui (ossia il numero di modelli che costituiscono la popolazione che si evolverà verso soluzioni sempre migliori) sia il numero di generazioni al passare delle quali sono esplorati modelli sempre migliori.

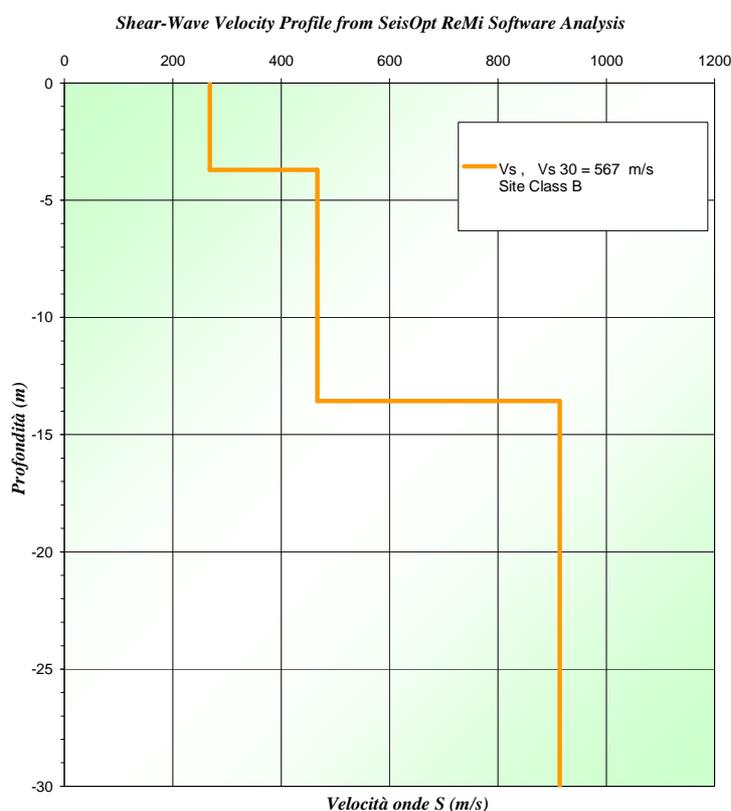
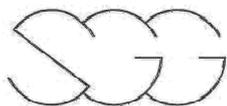


Figura 20 Esempio di modello interpretativo.

L'analisi dei dati attraverso l'uso di algoritmi genetici porta in ultima analisi alla definizione del profilo verticale della V_s (fig. 20) in funzione della profondità con associato il valore del V_s 30.



8 – PROVA DOWN-HOLE

Nel presente rilievo sono stati impiegati rispettivamente fondo scala di 1 secondo e passo di campionamento di 0,125 millisecondi.

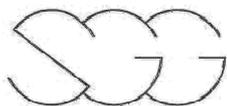
I tempi relativi alle onde P ed SH sono stati letti attraverso uno specifico programma di picking (SeisOptPicker; precisione dell'ordine di 0,1 millisecondi). Per avere un buon controllo sulla procedura di lettura dei tempi e valutare al contempo la qualità dei dati sismici acquisiti per tutto il tragitto di ogni sondaggio, i valori numerici dei primi arrivi delle onde sismiche P ed S_H sono stati riportati su sezioni tempo/tracce ove le varie tracce sono scelte in funzione dell'orientamento del sistema ricevitore/sorgente. Tale procedura consente di ottenere così delle forme d'onda più definite nelle ampiezze. In particolare con riferimento alle onde di taglio sono state scelte le tracce riferite alla differenza tra la battuta destra e quella sinistra.

In una prima fase i tempi d'arrivo delle onde di compressione e di taglio sono stati corretti, rispetto alla verticale, e riportati su un diagramma profondità – tempi sui quali sono stati individuati i tratti a pendenza circa costante. Dalla pendenza dei tratti sono state determinate le velocità intervallari delle onde P ed S_H nel terreno.

In seguito la prova sismica down-hole è stata interpretata anche con il metodo tomografico. In questo caso i tempi di transito sono stati inseriti in uno specifico programma di interpretazione tomografica (SEISOPTPRO v.2.5) che permette la definizione della velocità di propagazione delle onde elastiche nello spazio, impiegando iterativamente algoritmi di calcolo adeguati previo controllo dei “tragitti dei raggi sismici” (Raw Tracing Curvilineo).

L'elaborazione dei dati è stata sviluppata tramite un'analisi con modellazione del sottosuolo su base anisotropa, la quale fornisce, previa elaborazione con metodologie iterative R.T.C. e algoritmi di ricostruzione tomografica il campo delle velocità sismiche del sottosuolo.

La metodologia tomografica prevede la suddivisione dello spazio bidimensionale in celle, secondo una maglia prefissata, con l'attribuzione ad ognuna di un determinato valore di velocità sismica. Successivamente, il programma torna a calcolare il tempo di transito dell'onda sismica attraverso le



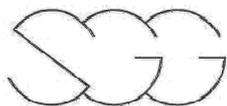
maglie del modello e si confronta tale valore con quello sperimentale impiegando iterativamente algoritmi di calcolo adeguati previo controllo dei tragitti dei raggi sismici. Per la determinazione del modello interpretativo, il programma utilizza il metodo d'inversione controllato MONTE CARLO, basato su una modellizzazione avanzata, ove i modelli derivati dagli algoritmi propri del programma sono accettati o rifiutati basandosi su di un criterio statistico. Per successive iterazioni si perviene a dei valori di velocità sismica per le diverse celle che soddisfino contemporaneamente più raggi sismici.

Per ogni cella investigata è stato calcolato un valore di velocità sismica. La maglia quadrata è stata definita arbitrariamente in modo tale da dividere la superficie in celle adottando un lato pari a 0,5 metri. Per rendere più immediata la comprensione del risultato, alle stesse celle è stato attribuito un colore secondo una scala con tonalità prefissate: da 0 a 3.000 m/s per le onde P e da 0 a 600 m/s per le onde S_H (tavola 3688SSG02). Inoltre nella rappresentazione grafica per ogni cella è stato riportato il suo corrispondente valore numerico.

La precisione dei valori di velocità sismica attribuita alle singole celle non è lineare in quanto è legata sia alla precisione di misura del tempo di transito, sia alla geometria dei sondaggi. In particolare, i risultati in termini di affidabilità statistica risultano essere i seguenti:

sondaggio n°	onde sismiche	precisione s^2	iterazioni n°
S8	P	$2,0^{-7}$	36.156
	S_H	$8,4^{-8}$	59.807

Ove per *precisione* si intende la sommatoria degli scarti al quadrato tra i valori sperimentali e quelli calcolati nei raggi sismici diviso per il numero dei punti e per *iterazioni* il numero di volte che il programma ha eseguito la verifica del modello totale.



9 – ANALISI DEI RISULTATI

Nel complesso l'indagine geofisica eseguita ha permesso di caratterizzare il sottosuolo sia con il modello di distribuzione della velocità delle onde "P", tramite l'interpretazione tomografica, sia con il modello di distribuzione della velocità delle onde "S", attraverso l'analisi della prova Re.Mi e della prova MASW, sia attraverso la prova Down-Hole.

I risultati dell'indagine geofisica di seguito descritti sono stati riportati nelle tavole allegate, in cui sono stati evidenziati con dei soprassegni i limiti probabili dei sismostrati, che sono stati individuati tenendo conto delle caratteristiche meccaniche del sottosuolo.

Linee sismiche LS1 e LS2 (tavola 3668SGG06)

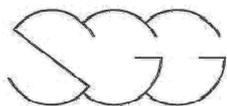
L'incrocio tra questi due profili cade circa a metà del profilo LS1 e leggermente spostato verso valle nel profilo LS2.

In entrambi i profili è stato individuato un sismostrato con velocità sismiche inferiori a 1000 m/s che raggiunge uno spessore massimo di 18 metri in corrispondenza del punto di scoppio 3 del profilo LS1 ma ha uno spessore medio di circa 13 metri in entrambi i profili.

Inferiormente si può osservare un secondo sismostrato, caratterizzato da velocità sismiche comprese tra 1000 e 2800 m/s, e da uno spessore molto variabile.

Il substrato sismico, caratterizzato da velocità delle onde P superiori a 2800 m/s, si presenta a due quote diverse in entrambi i profili probabilmente a causa di una faglia che ribassa la parte settentrionale del bedrock sismico.

L'interpretazione delle prove Re.Mi., relativamente alle onde S, ha reso evidente le seguenti successioni:



LS1		
Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	5.4	288
5.4	17.9	369
17.9	30.0	583

LS2		
Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	7.2	359
7.2	16.7	367
16.7	30.0	370

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 408 m/s per il profilo LS1 e 465 per il profilo LS2.

In definitiva, le prove Re.Mi. realizzate evidenziano che l'area in esame può essere collocata, secondo la normativa italiana, in **classe B**.

L'interpretazione della prova MASW, relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

LS1		
Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	3.4	252
3.4	15.0	400
15.0	30.0	537

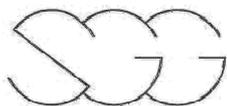
LS2		
Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	7.9	347
7.9	16.7	408
16.7	30.0	682

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 426 m/s per il profilo LS1 e 470 per il profilo LS2 (**classe B**).

Linea sismica LS3 (tavola 3668SGG08)

Nel profilo sismico LS3 è possibile individuare un primo sismostrato sismico caratterizzato da velocità sismiche inferiori a 1000 m/s che presenta uno spessore minimo di circa 5 metri nella porzione centrale del profilo, per poi andare ad aumentare spostandosi verso le estremità, in particolar modo verso Sud-SudEst.

Il secondo sismostrato, caratterizzato da velocità delle onde P comprese



tra 1000 e 2800 m/s, presenta notevoli variazioni laterali nella disposizione delle curve di velocità.

Anche il bedrock sismico, come il primo sismostrato, presenta un approfondimento nella porzione Sud-Est del profilo, a partire dal punto di scoppio 6.

L'interpretazione della prova Re.Mi., relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	3.3	310
3.3	12.2	406
12.2	30.0	915

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 580 m/s **(classe B)**.

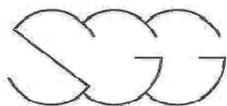
L'interpretazione della prova MASW, relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	3.7	267
3.7	13.5	467
13.5	30.0	914

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 567 m/s **(classe B)**.

Linea sismica LS4 (tavola 3668SGG02)

Nel profilo sismico LS4 è possibile individuare un primo sismostrato sismico caratterizzato da velocità sismiche inferiori a 700 m/s che presenta uno



spessore medio di circa 3 metri ed appare leggermente inclinato verso Nord-Est.

Il secondo sismostrato, caratterizzato da velocità sismiche inferiori a 2800 m/s, è stato suddiviso in due ulteriori sismostrati basandosi sulla diversa gradazione delle velocità sismiche in profondità e sui risultati delle prove Re.Mi. e Masw; il limite tra questi due sismostrati è stato indicativamente posizionato in corrispondenza della curva di isovelocità di 1400 m/s, tra 375 e 380 metri s.l.m..

Il bedrock sismico, che ha velocità delle onde P superiori a 2800 m/s, presenta una immersione apparente verso Nord-Est.

L'interpretazione della prova Re.Mi., relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

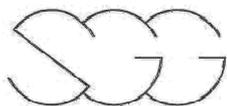
Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	3.3	243
3.3	16.8	385
16.8	30.0	615

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 429 m/s **(classe B)**.

L'interpretazione della prova MASW, relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	3.8	269
3.8	17.7	402
17.7	30.0	681

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 449 m/s **(classe B)**.



Linea sismica LS5 (tavola 3668SGG03)

Il primo sismostrato sismico identificato nel profilo sismico LS3, è caratterizzato da velocità sismiche inferiori a 800 m/s e presenta uno spessore medio di 3 metri che si assottiglia notevolmente nella porzione Sud-Est del profilo.

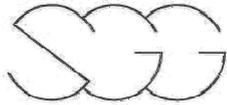
Il secondo sismostrato, caratterizzato da velocità delle onde P comprese mediamente tra 800 e 1000 m/s, presenta una notevole diminuzione in spessore procedendo da Sud-Est a Nord-Ovest e due anomalie, in corrispondenza dei punti di scoppio 3 e 4, il cui significato geologico non è chiaro.

La linea di separazione tra il secondo ed il terzo sismostrato, corrispondente circa alla isolina di velocità sismica di 1000 m/s, si trova ad una quota compresa tra 400 e 405 metri s.l.m.; la porzione Nord-Ovest di tale linea è stata tratteggiata in quanto il comportamento anomalo in quest'area, in controtendenza con il resto del profilo in cui si ha una lieve immersione da Sud-Est a Nord-Ovest, potrebbe essere dovuto a fattori non strettamente geologici quali presenza della falda influenzata dal fiume Adda, interventi antropici di consolidazione dell'argine o anomalie imposte dal software in prossimità dei limiti del profilo.

Dato il notevole spessore delle coperture in quest'area, il profilo non ha raggiunto il bedrock sismico incontrato nelle altre sezioni sismiche.

L'interpretazione della prova Re.Mi., relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	3.3	227
3.3	13.0	497
13.0	30.0	942



Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 578 m/s **(classe B)**.

L'interpretazione della prova MASW, relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	3.5	256
3.5	14.7	467
14.7	30.0	852

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 539 m/s **(classe B)**.

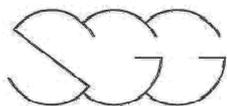
Linea sismica LS6 (tavola 3668SGG04)

Nel profilo sismico LS6 è possibile individuare un primo sismostrato sismico caratterizzato da velocità sismiche inferiori a 1000 m/s anche se è presente in modo discontinuo lungo il profilo e raggiunge uno spessore massimo di 3 metri.

Il secondo sismostrato, caratterizzato da velocità sismiche comprese tra 1000 e 2800 m/s, è presente fino ad una profondità compresa tra 460 e 465 metri s.l.m., con uno spessore medio di circa 7 metri.

Il bedrock sismico, è caratterizzato da valori di velocità delle onde P superiori a 2800 m/s, e presenta notevoli variazioni laterali nella distribuzione delle velocità sismiche.

L'interpretazione della prova Re.Mi., relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:



Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	3.6	275
3.6	8.1	315
8.1	30.0	577

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 530 m/s **(classe B)**.

L'interpretazione della prova MASW, relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	1.8	181
1.8	4.0	284
4.0	7.6	273
7.6	30.0	887

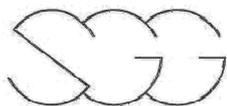
Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 533 m/s **(classe B)**.

Linea sismica LS7 (tavola 3668SGG07)

Nel profilo sismico LS7 è possibile individuare un primo sismostrato sismico che presenta uno spessore medio di circa 10 metri ed un leggero ispessimento nella porzione centrale del profilo, raggiungendo comunque una profondità massima di circa 474 metri s.l.m..

Il secondo sismostrato, caratterizzato da velocità sismiche comprese tra 1000 e 2800 m/s, presenta uno spessore variabile tra 6 e 15 metri.

Il bedrock sismico è caratterizzato da valori di velocità delle onde P superiori a 2800 m/s, e presenta una lieve immersione verso Nord-Est; la linea di separazione dal secondo sismostrato infatti parte dalla quota di 470 metri s.l.m nella porzione Sud-Ovest del profilo per giungere alla quota di circa 463 metri s.l.m. nella porzione Nord-Est.



L'interpretazione della prova Re.Mi., relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	5.3	505
5.3	8.7	470
8.7	16.5	880
16.5	30.0	1075

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 765 m/s **(classe B)**.

L'interpretazione della prova MASW, relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	7.0	416
7.0	15.8	750
15.8	30.0	850

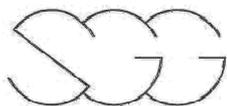
Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 663 m/s **(classe B)**.

Linea sismica LS8 (tavola 3668SGG05)

Il primo sismostrato sismico identificato nel profilo sismico LS8, è caratterizzato da velocità sismiche inferiori a 1000 m/s e presenta uno spessore compreso tra 9 e 12 metri.

La linea di separazione tra il secondo sismostrato, con spessore medio di 19 metri, ed il bedrock sismico, corrispondente circa alla isolina di velocità di 2800 m/s, si trova ad una quota compresa tra 470 e 460 metri s.l.m. con immersione verso Nord-Est.

L'interpretazione della prova Re.Mi., relativamente alle onde S, ha reso



evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	6.3	334
6.3	17.3	524
17.3	30.0	751

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 531 m/s **(classe B)**.

L'interpretazione della prova MASW, relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	6.2	323
6.2	22.3	548
22.3	30.0	775

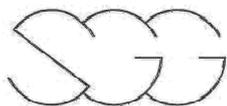
Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 512 m/s **(classe B)**.

Linea sismica LS9 (tavola 3668SGG07)

Il profilo sismico LS9 è caratterizzato dalla struttura "a gradini" del substrato sismico, che è identificabile su quattro livelli a quote sempre minori procedendo da Sud-Est a Nord-Ovest; questa struttura è stata probabilmente originata da almeno tre zone di faglie dirette con immersione a Nord-Ovest.

Sopra il bedrock sismico si può riconoscere un sismostrato caratterizzato da velocità sismiche comprese tra 1000 e 2800 m/s, che presenta spessori variabili legati prevalentemente all'andamento del substrato sismico.

Il sismostrato più superficiale è identificato da valori di velocità delle onde P inferiori a 1000 m/s, e presenta uno spessore variabile tra 5 e 8 metri.



L'interpretazione della prova Re.Mi., relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	3.8	251
6.3	18.1	462
17.3	30.0	1062

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 523 m/s **(classe B)**.

L'interpretazione della prova MASW, relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

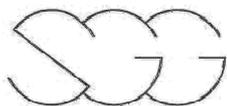
Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	6.1	256
6.2	12.4	1277
22.3	30.0	1646

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 760 m/s **(classe B)**.

Linea sismica LS10 (tavola 3668SGG08)

Nel profilo sismico LS10 è possibile individuare un primo sismostrato sismico caratterizzato da velocità sismiche inferiori a 1000 m/s che presenta uno spessore massimo di circa 5 metri nella porzione Nord-Est.

Il limite inferiore del secondo sismostrato, indicativamente corrispondente alla velocità delle onde P di 2800 m/s, è caratterizzato da tre improvvise diminuzioni di quota, passando da circa 522 metri s.l.m. nella porzione sud-occidentale del profilo a circa 515 metri s.l.m. nella porzione centrale per poi terminare a circa 496 metri s.l.m. nella porzione Nord-orientale; tale andamento potrebbe essere giustificato dalla presenza di una serie di



faglie che ribassino da monte verso valle il bedrock sismico, caratterizzato da velocità sismiche superiori a 2800 m/s.

L'interpretazione della prova Re.Mi., relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	5.8	336
5.8	14.4	672
14.4	30.0	1007

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 662 m/s **(classe B)**.

L'interpretazione della prova MASW, relativamente alle onde S, ha reso evidente la seguente successione:

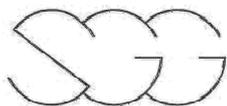
Profondità da P.C		Velocità Onde S (m/s)
0.0	2.9	243
2.9	6.3	330
6.3	10.3	447
10.3	30.0	1378

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 600 m/s **(classe B)**.

Carotaggio sismico Down-Hole S8 (tavola 3668SGG02)

L'elaborazione delle misure geofisiche ha permesso di ricostruire la porzione di terreno immediatamente adiacente il sondaggio S8 per una profondità, da piano campagna, di 30 metri.

Di seguito si riportano le tabelle con indicazioni dei tempi d'arrivo originali e quelli corretti in funzione della profondità di misura (poiché le onde sismiche prodotte dalla sorgente non si propagano esattamente in direzione verticale



rispetto ai ricevitori, data la posizione della sorgente, è necessario correggere i tempi di arrivo stimati per tenere conto dell'inclinazione del percorso effettivo) e le dromocrone sismiche in onde P ed S_H (fig.21).

<i>profondità, m pc</i>	<i>onde P sperimentali tempo, ms</i>	<i>onde P tempo corretto, ms</i>	<i>onde Sh sperimentali tempo, ms</i>	<i>onde Sh tempo corretto, ms</i>
0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	5.0	1.6	8.1	3.6
2	6.4	3.6	8.9	6.3
3	7.5	5.3	9.5	7.9
4	8.1	6.5	10.8	9.7
5	8.6	7.4	13.1	12.2
6	9.2	8.2	14.0	13.3
7	9.8	9.0	16.7	16.1
8	10.3	9.6	18.5	17.9
9	11.2	10.6	21.0	20.5
10	12.3	11.8	22.8	22.4
11	13.2	12.7	26.0	25.6
12	13.3	12.9	27.9	27.5
13	14.0	13.6	30.1	29.7
14	14.9	14.6	32.8	32.5
15	15.7	15.4	35.3	35.0
16	16.6	16.3	37.6	37.3
17	17.4	17.1	39.9	39.6
18	18.0	17.8	41.6	41.3
19	18.6	18.4	44.4	44.2
20	19.1	18.9	46.7	46.5
21	19.7	19.5	48.9	48.7
22	20.0	19.8	51.1	50.9
23	20.3	20.1	53.4	53.2
24	20.9	20.7	55.1	54.9
25	21.4	21.2	57.2	57.0
26	22.0	21.9	59.2	59.0
27	22.3	22.2	60.9	60.7
28	22.6	22.5	63.2	63.0
29	22.8	22.7	64.6	64.4
30	23.4	23.3	66.4	66.3

I valori dei tempi di transito, sia delle onde P che delle SH, risultano buoni in quanto è stato possibile eseguire un buon picking; a dimostrazione di questo si può notare come i relativi punti siano sostanzialmente ben allineati su delle rette, con scarsa o assente dispersione.

Carotaggio sismico down hole S8

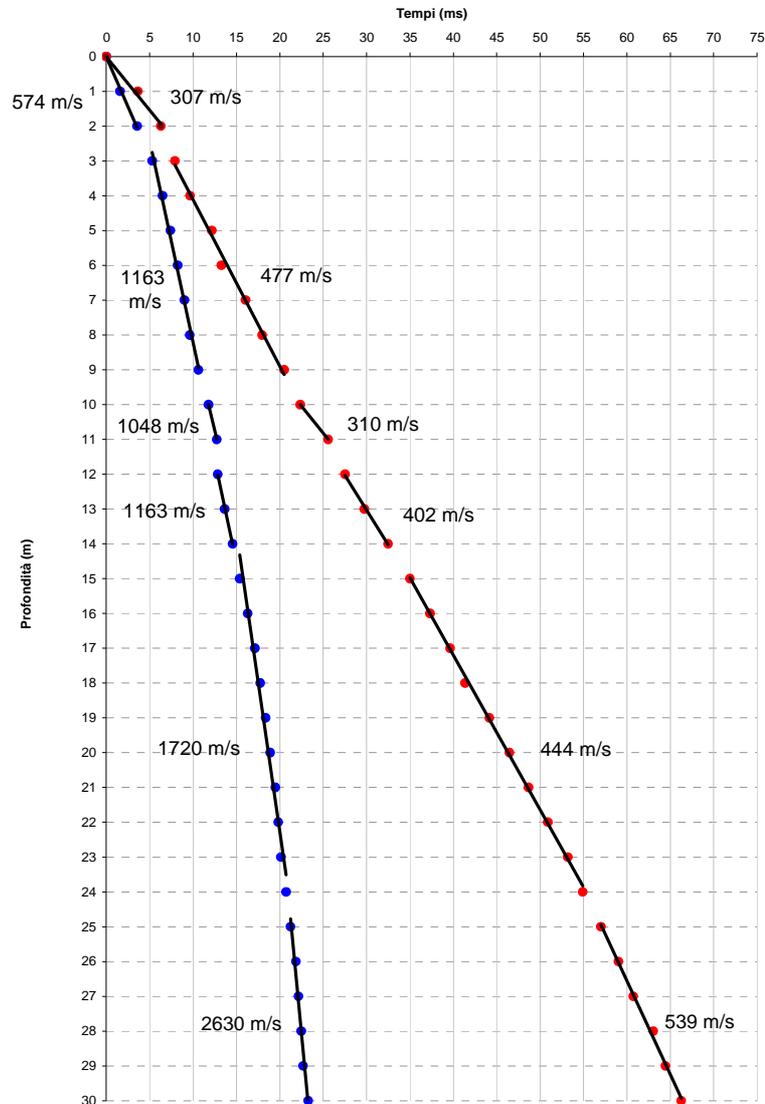
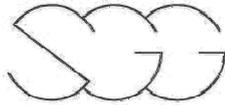


Figura 21 Dromocrone sismiche in onde P (blu) ed S_H (rosso) con le relative velocità intervallari.

In riferimento all'elaborazione tomografica delle misure geofisiche l'interpretazione effettuata, riportata nella allegata Tavola 3688SSG02, mostra la buona correlazione esistente tra i valori delle velocità intervallari ricavate dai tempi dei primi arrivi corretti rispetto alla verticale e quelli derivati dall'elaborazione tomografica stessa.



Sulla base delle velocità delle onde di taglio (V_{SH}), il valore di V_{s30} , riferito al piano campagna, risulta pari a 436 m/s utilizzando i valori di velocità intervallare ricavati dalle dromocrone e pari a 466 m/s utilizzando i valori di velocità delle celle tomografiche. Si evidenzia, quindi, che l'area in esame può essere collocata, secondo la normativa italiana vigente, in **classe B**.

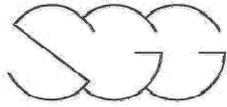
Sulla base delle velocità sismiche V_P e delle V_S , è stato possibile calcolare i moduli elastici dinamici dei terreni attraversati dal sondaggio S8.

I valori di densità attribuiti a ciascuno strato sono stati desunti da dati reperibili in bibliografia. I risultati sono riportati nella tabella sottostante:

Profondità m (da)	Profondità m (a)	densità (kN/m^3)	V_P m/s	V_{SH} m/s	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico (kN/m^2)	modulo Young (kN/m^2)	modulo bulk (kN/m^2)
0	2	18.5	574	307	0.30	1.78E+05	4.62E+05	3.84E+05
2	9	18.5	1,163	477	0.40	4.29E+05	1.20E+06	1.98E+06
9	11	18.5	1,048	310	0.45	1.81E+05	5.26E+05	1.83E+06
11	14	19.0	1,163	402	0.43	3.13E+05	8.97E+05	2.20E+06
14	24	19.0	1,720	444	0.46	3.82E+05	1.12E+06	5.22E+06
24	30	19.0	2,630	539	0.48	5.63E+05	1.66E+06	1.26E+07

Siena, Ottobre 2009

Dr. Geol. Antonio Maria Baldi

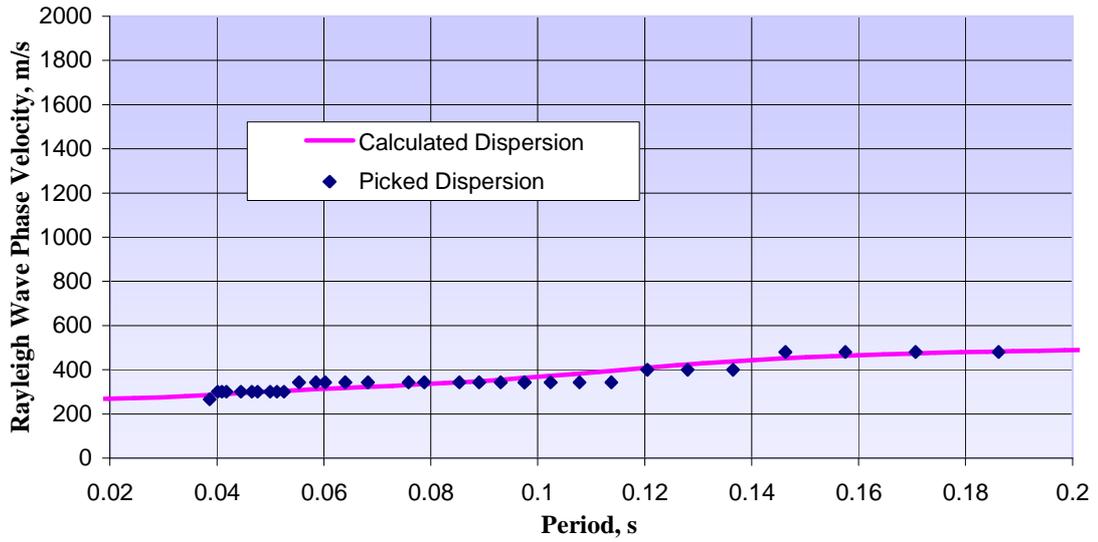


APPENDICE

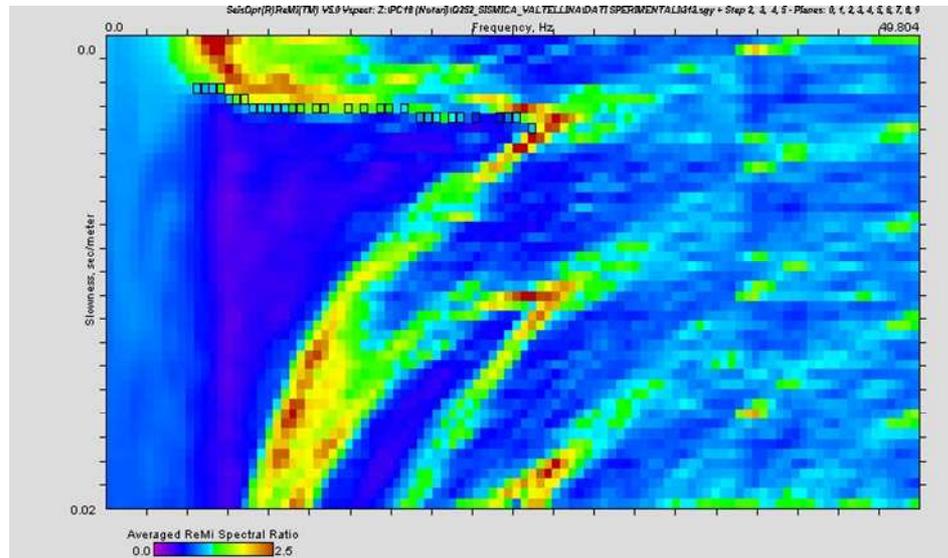
Risultati delle prove Re.Mi.

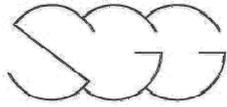
Re.Mi. LS1

Dispersion Curve Showing Picks and Fit



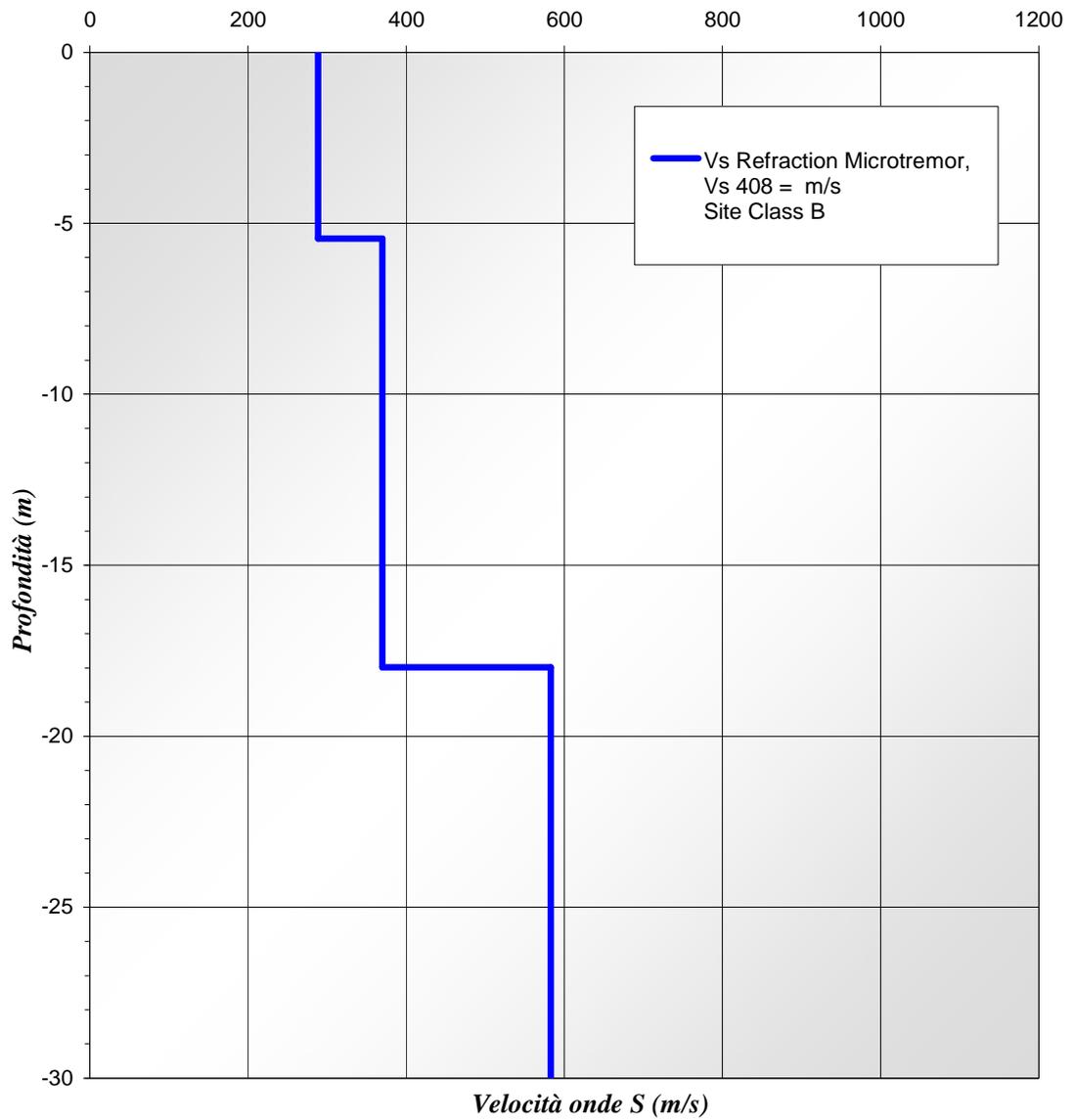
p-f Image with Dispersion Modeling Picks





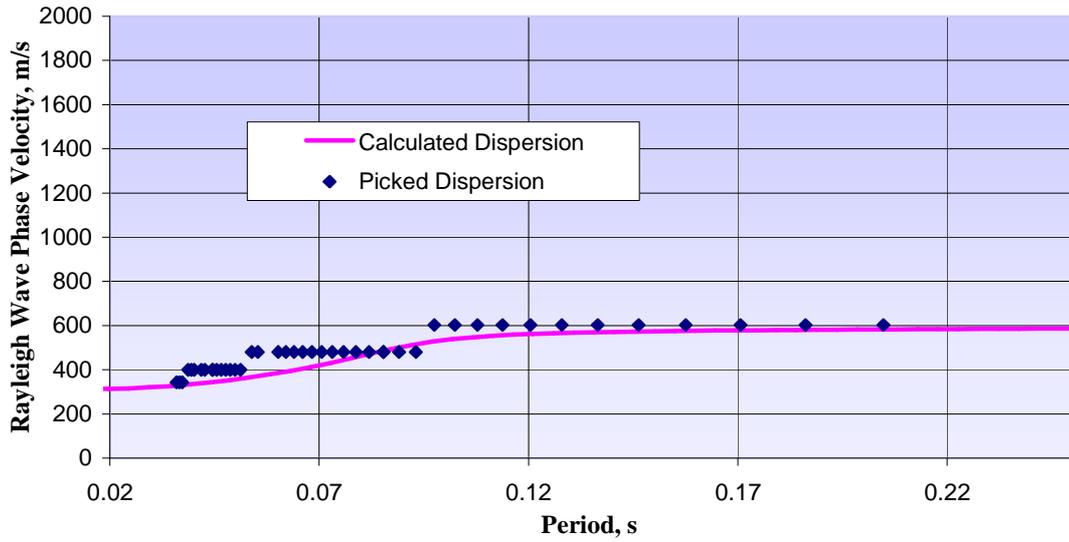
Re.Mi. LS1

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

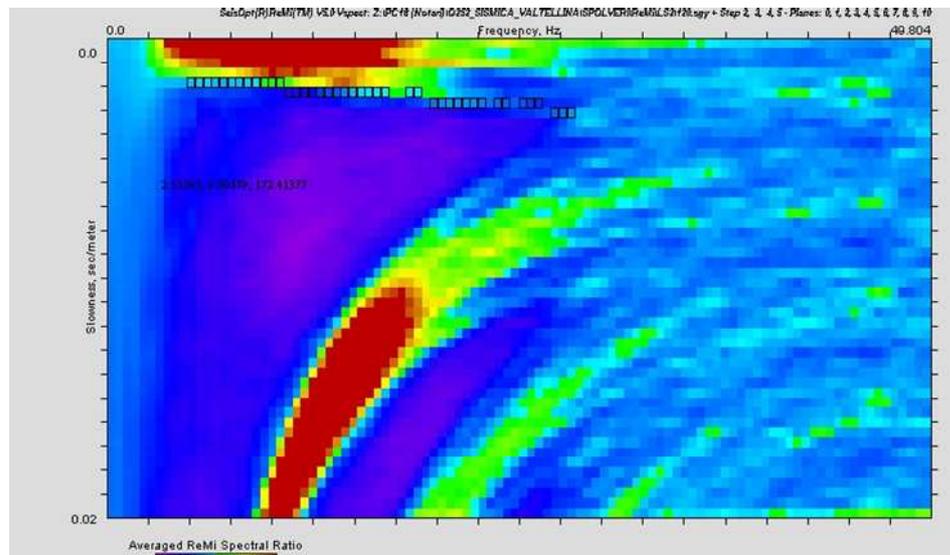


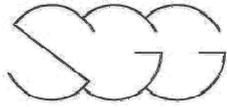
Re.Mi. LS2

Dispersion Curve Showing Picks and Fit



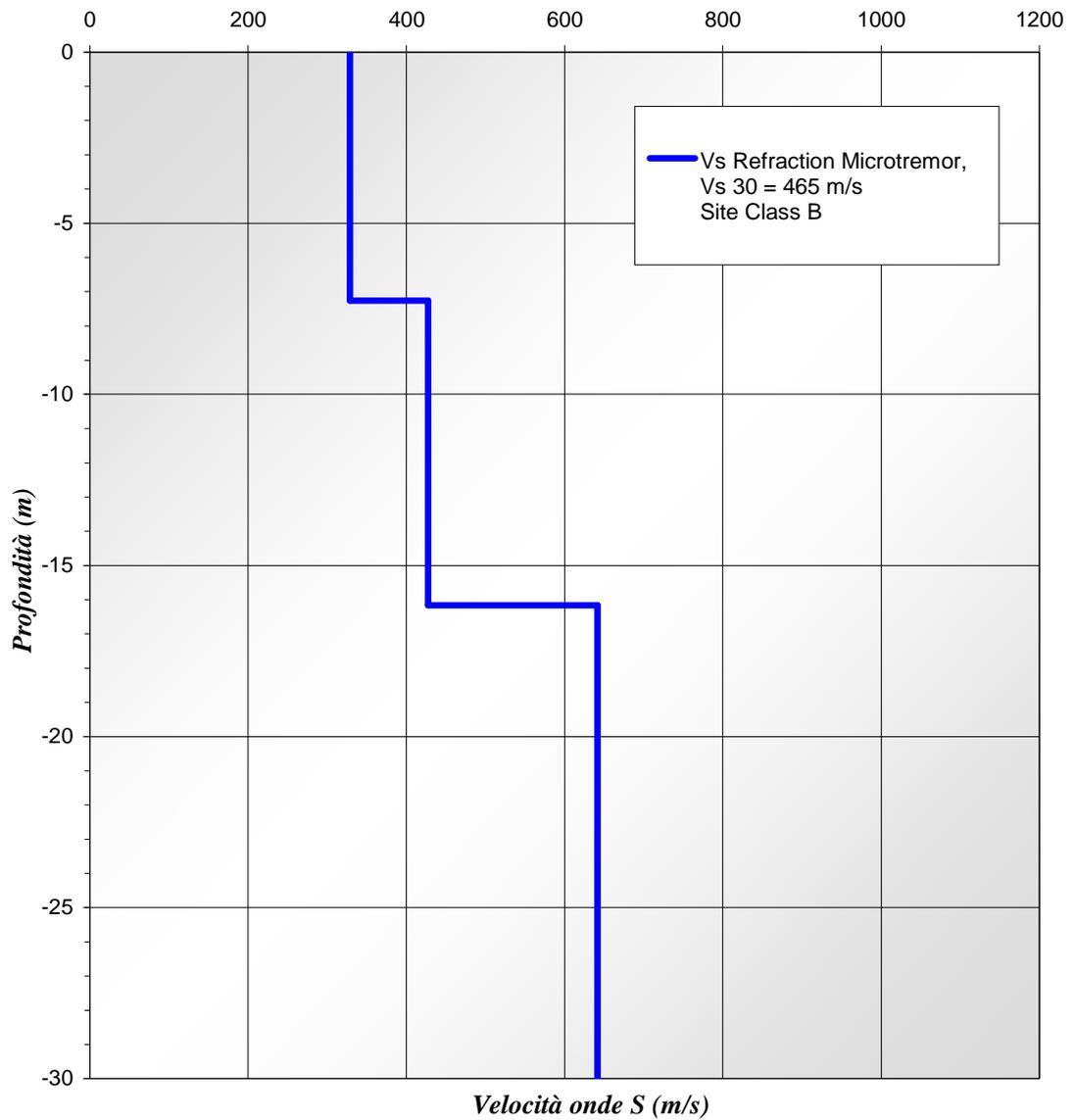
p-f Image with Dispersion Modeling Picks

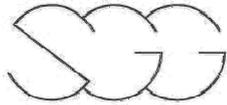




Re.Mi. LS2

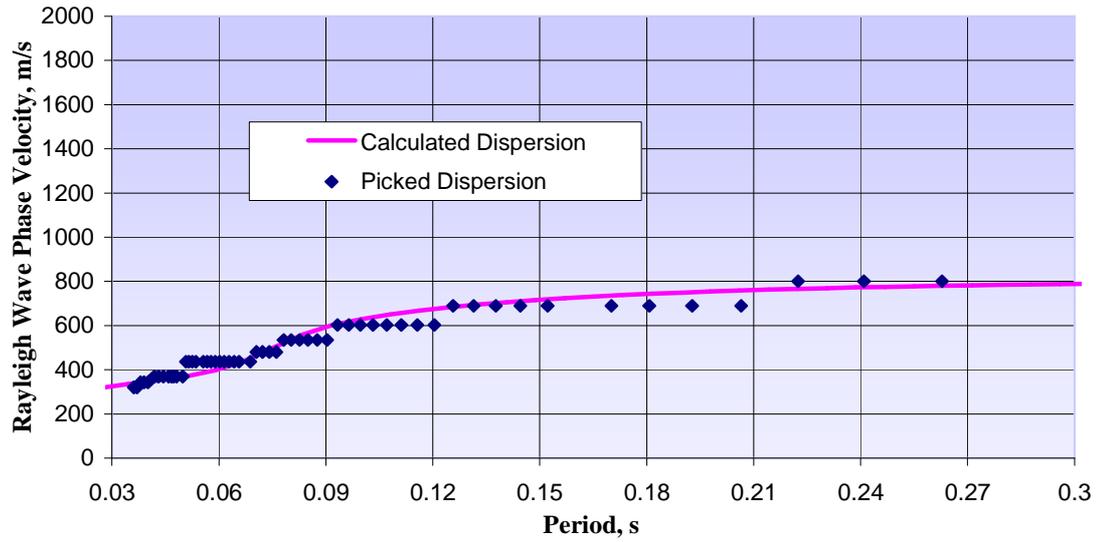
Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis



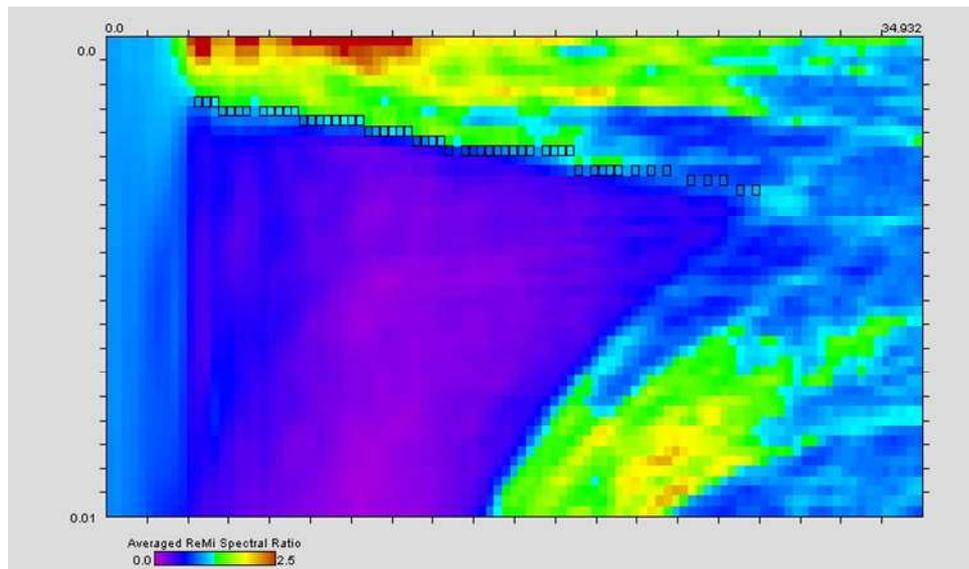


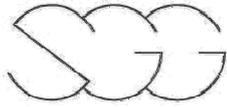
Re.Mi. LS3

Dispersion Curve Showing Picks and Fit



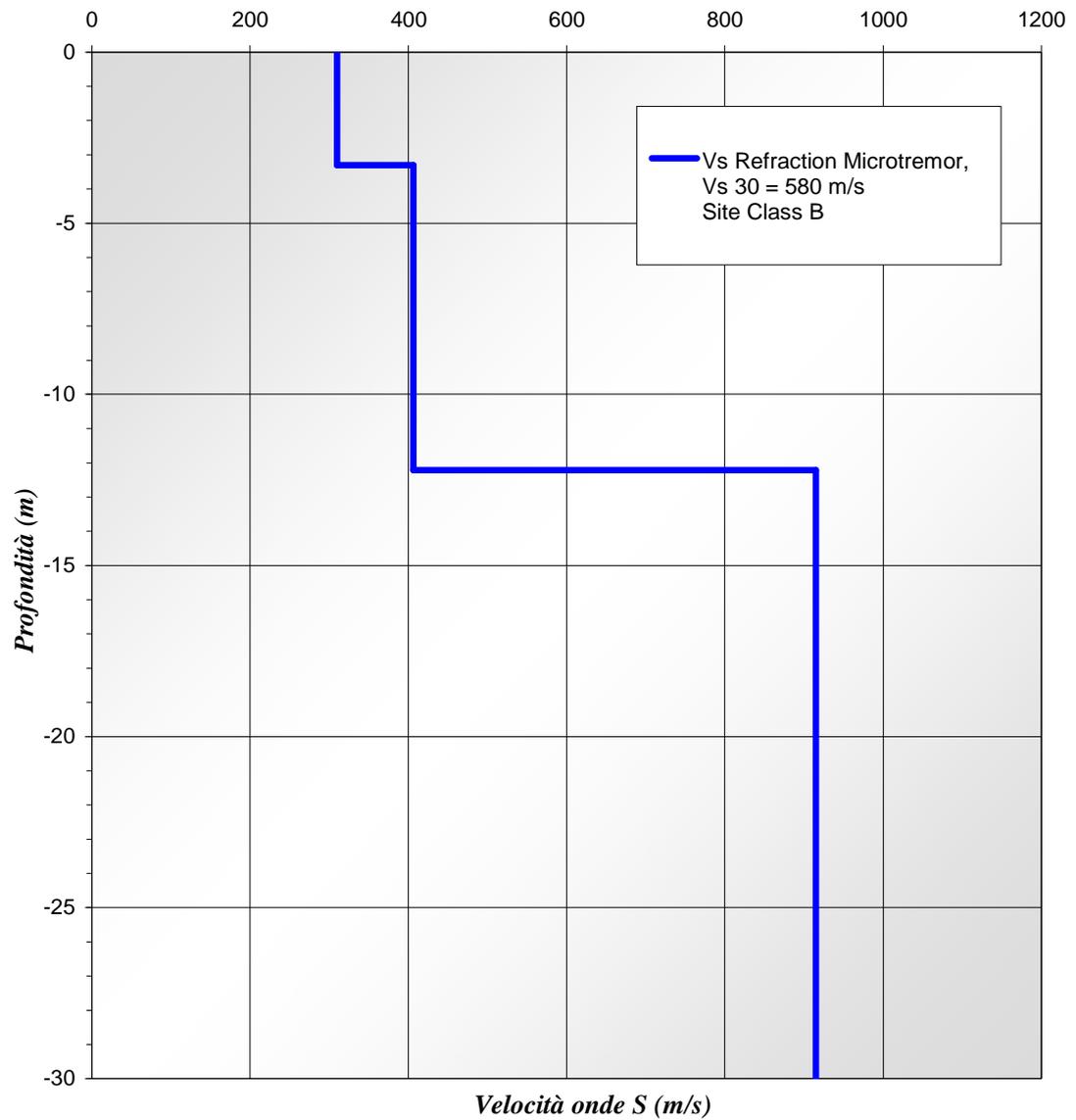
p-f Image with Dispersion Modeling Picks





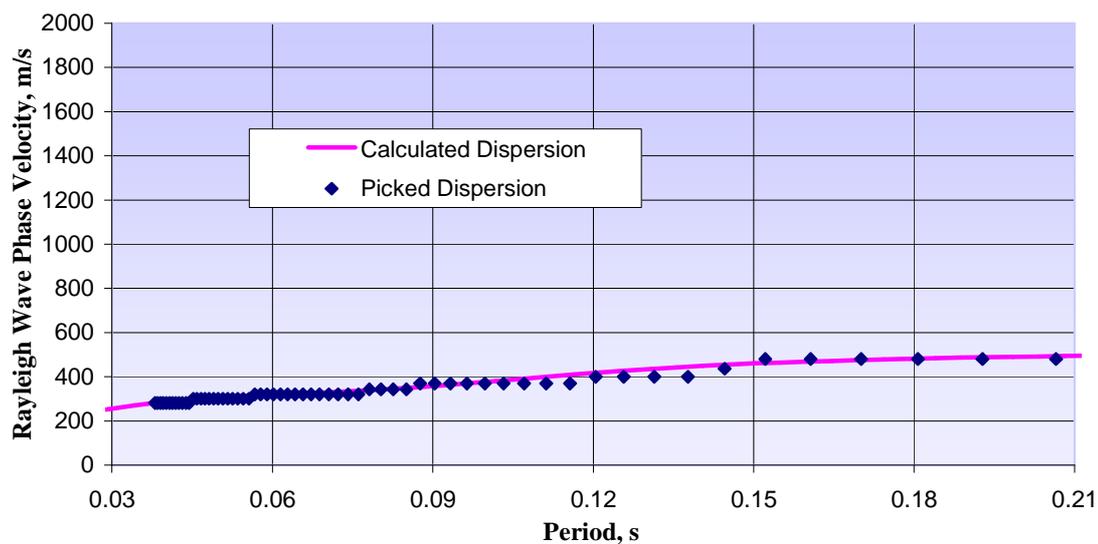
Re.Mi. LS3

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

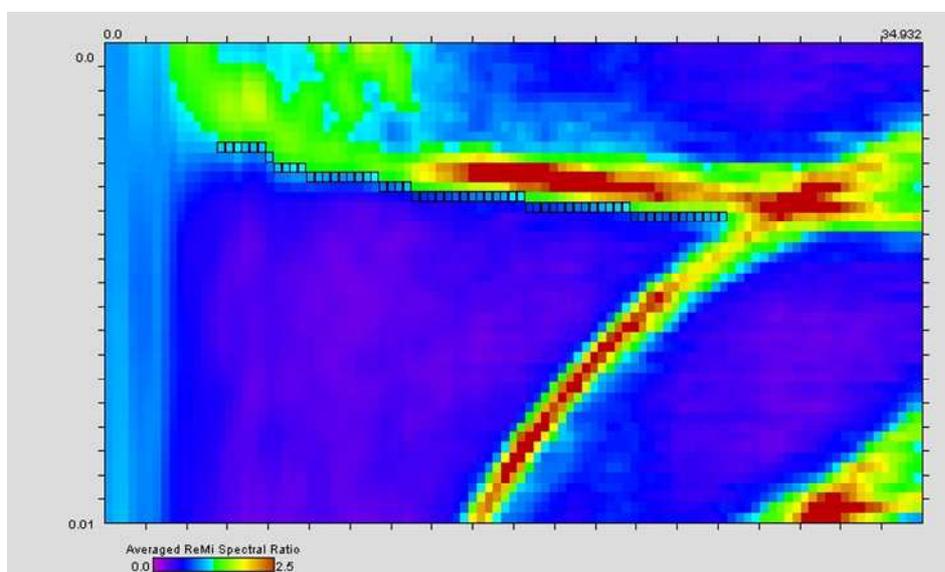


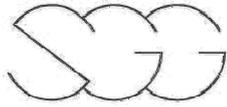
Re.Mi. LS4

Dispersion Curve Showing Picks and Fit



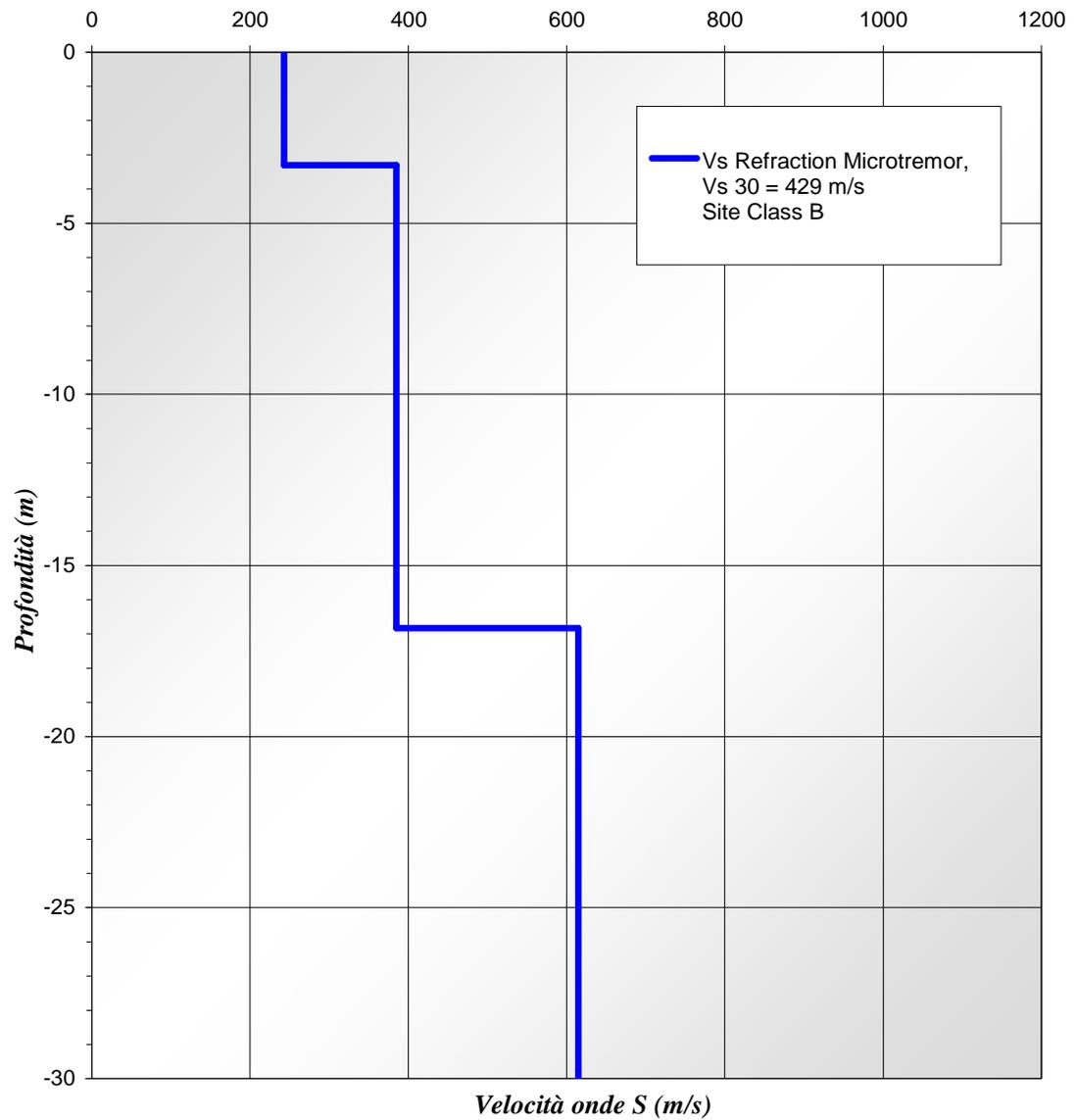
p-f Image with Dispersion Modeling Picks





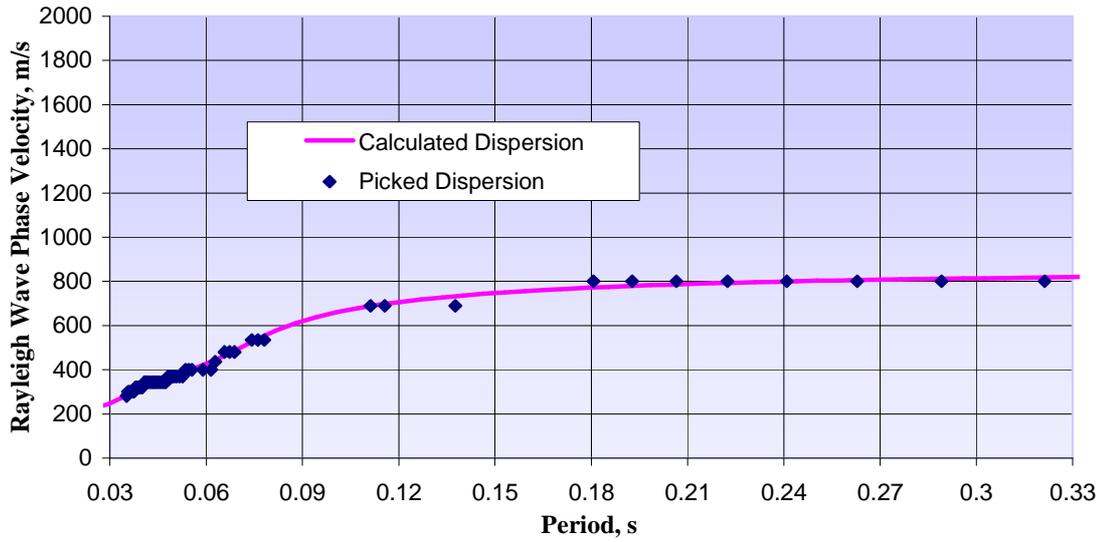
Re.Mi. LS4

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

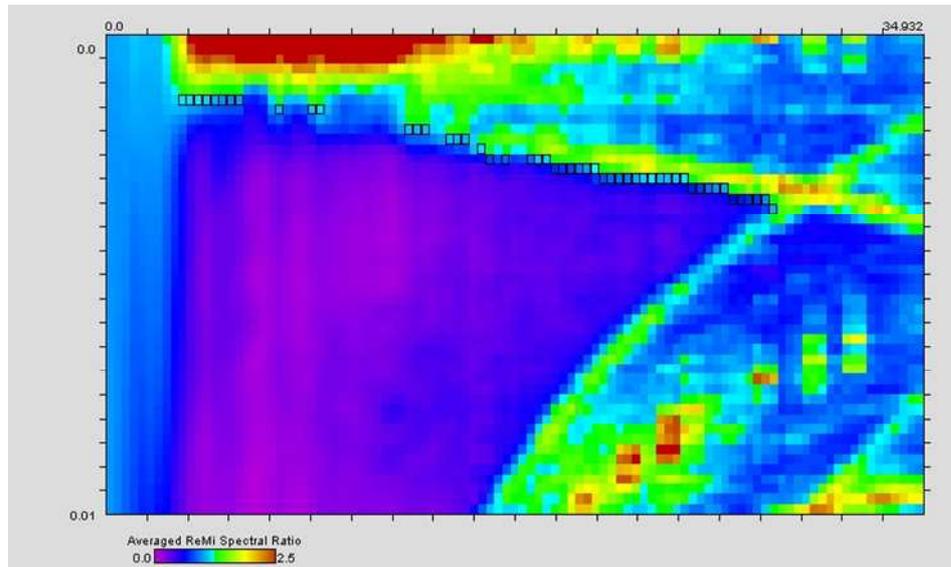


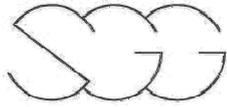
Re.Mi. LS5

Dispersion Curve Showing Picks and Fit



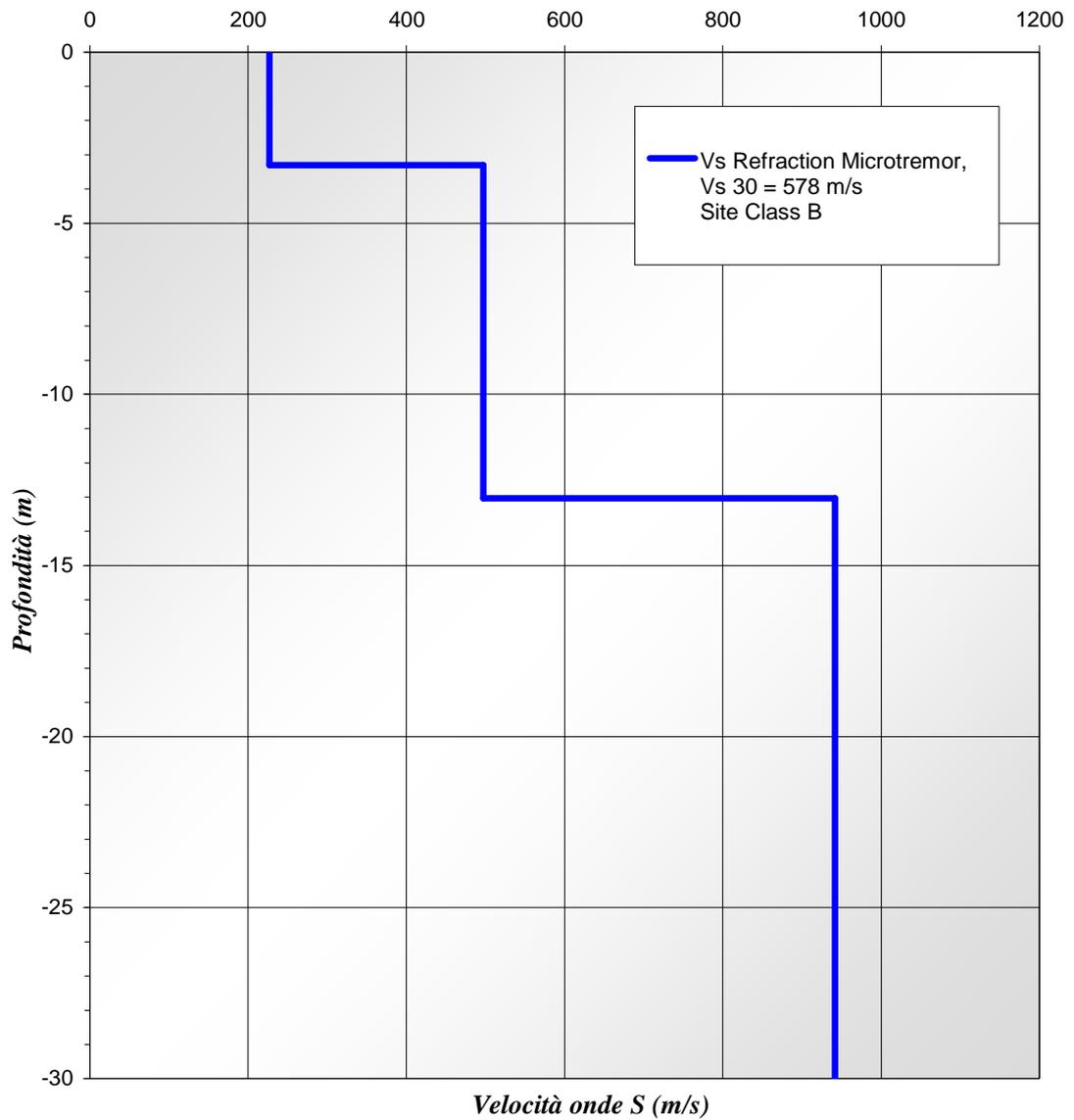
p-f Image with Dispersion Modeling Picks





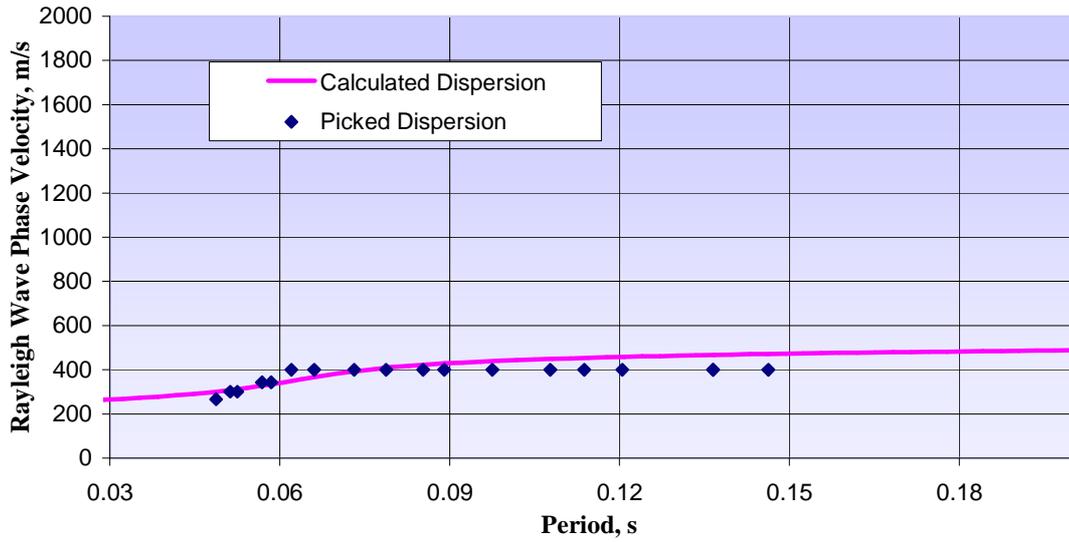
Re.Mi. LS5

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

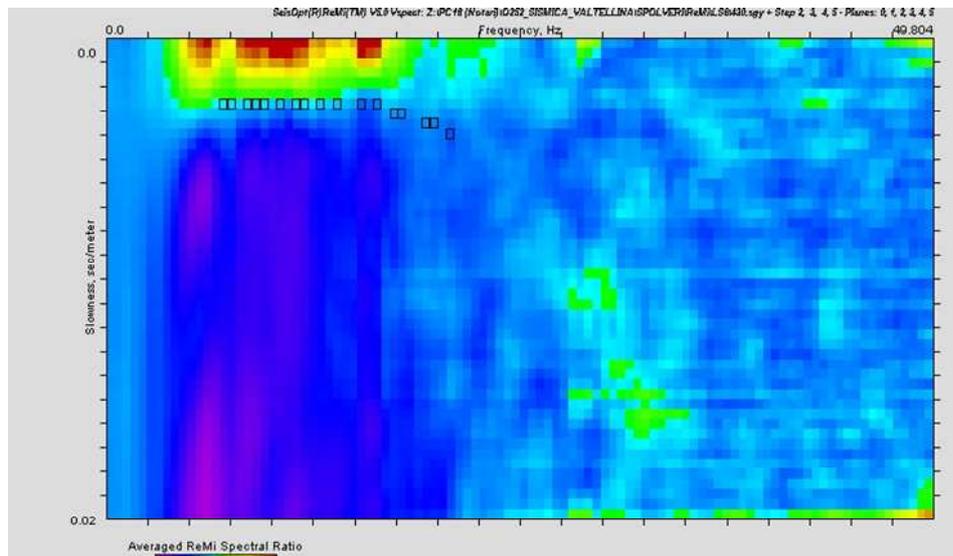


Re.Mi. LS6

Dispersion Curve Showing Picks and Fit

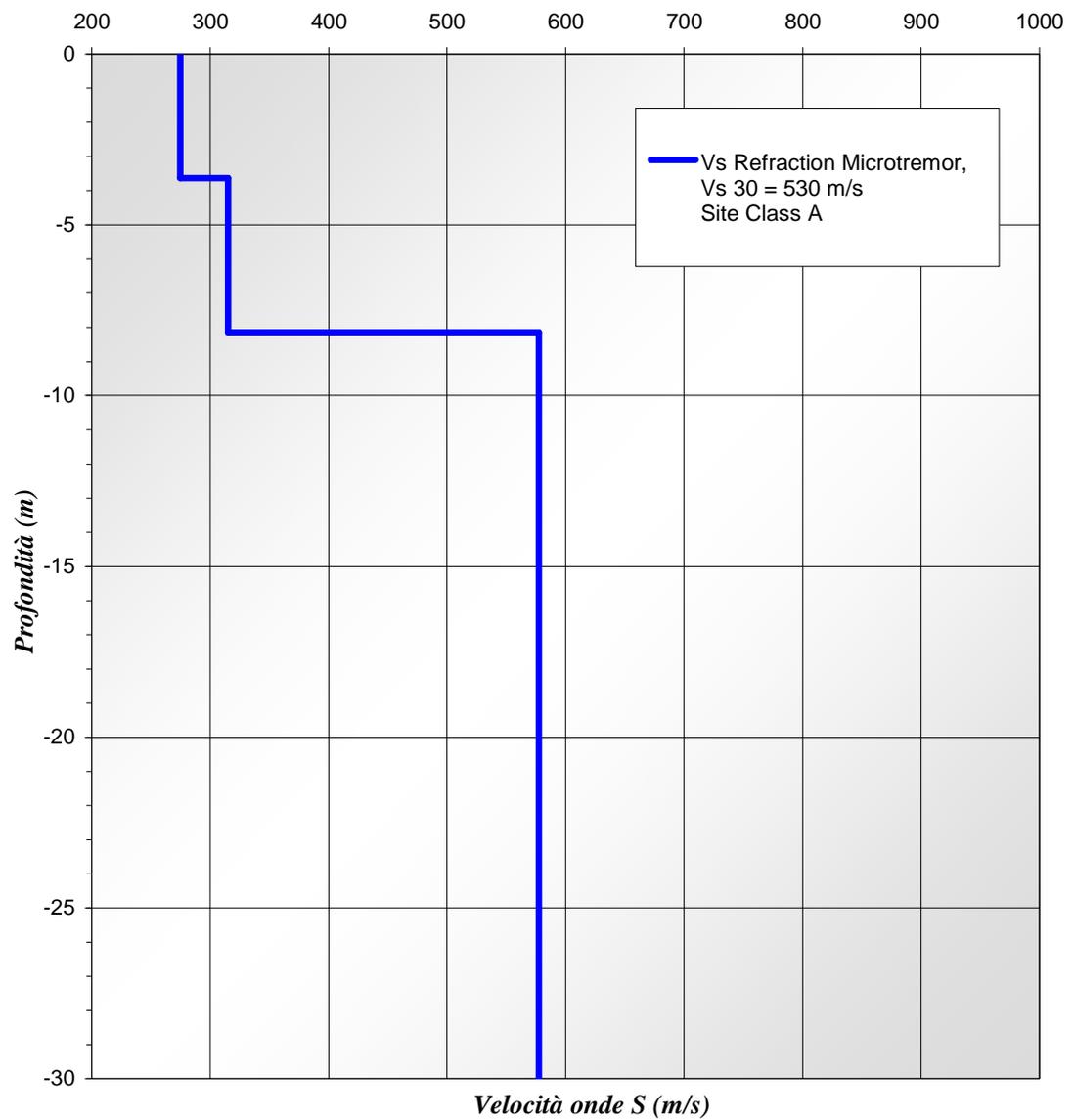


p-f Image with Dispersion Modeling Picks



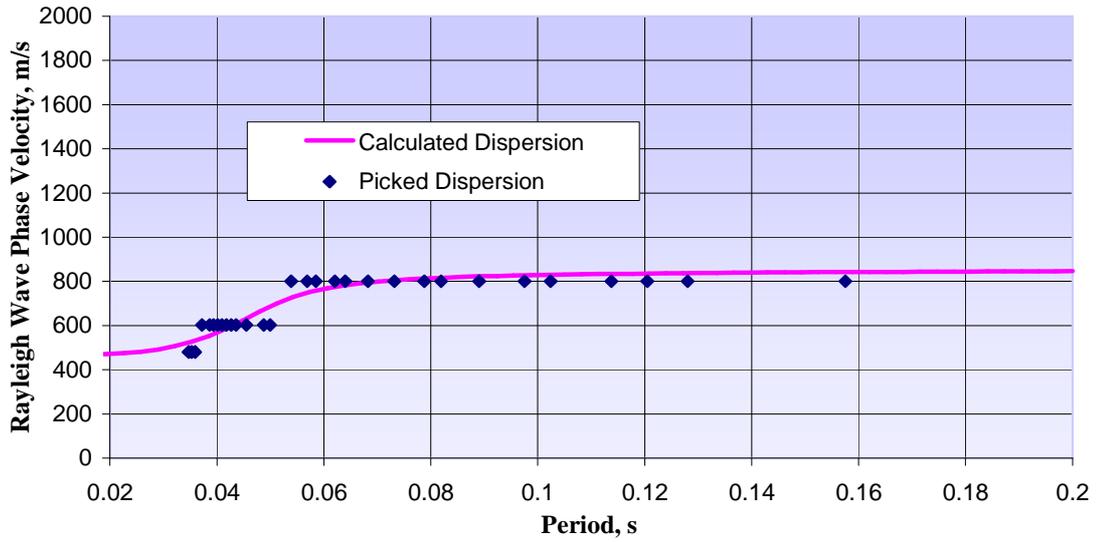
Re.Mi. LS6

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

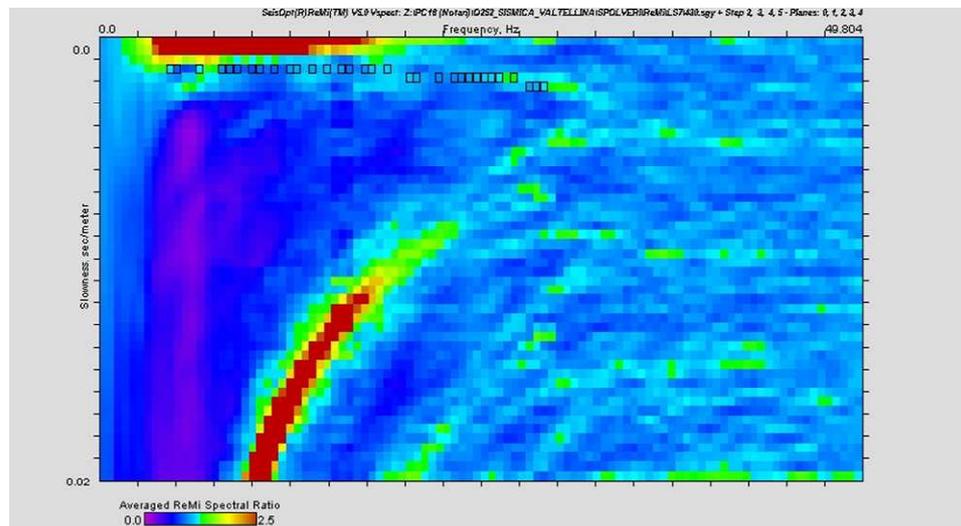


Re.Mi. LS7

Dispersion Curve Showing Picks and Fit

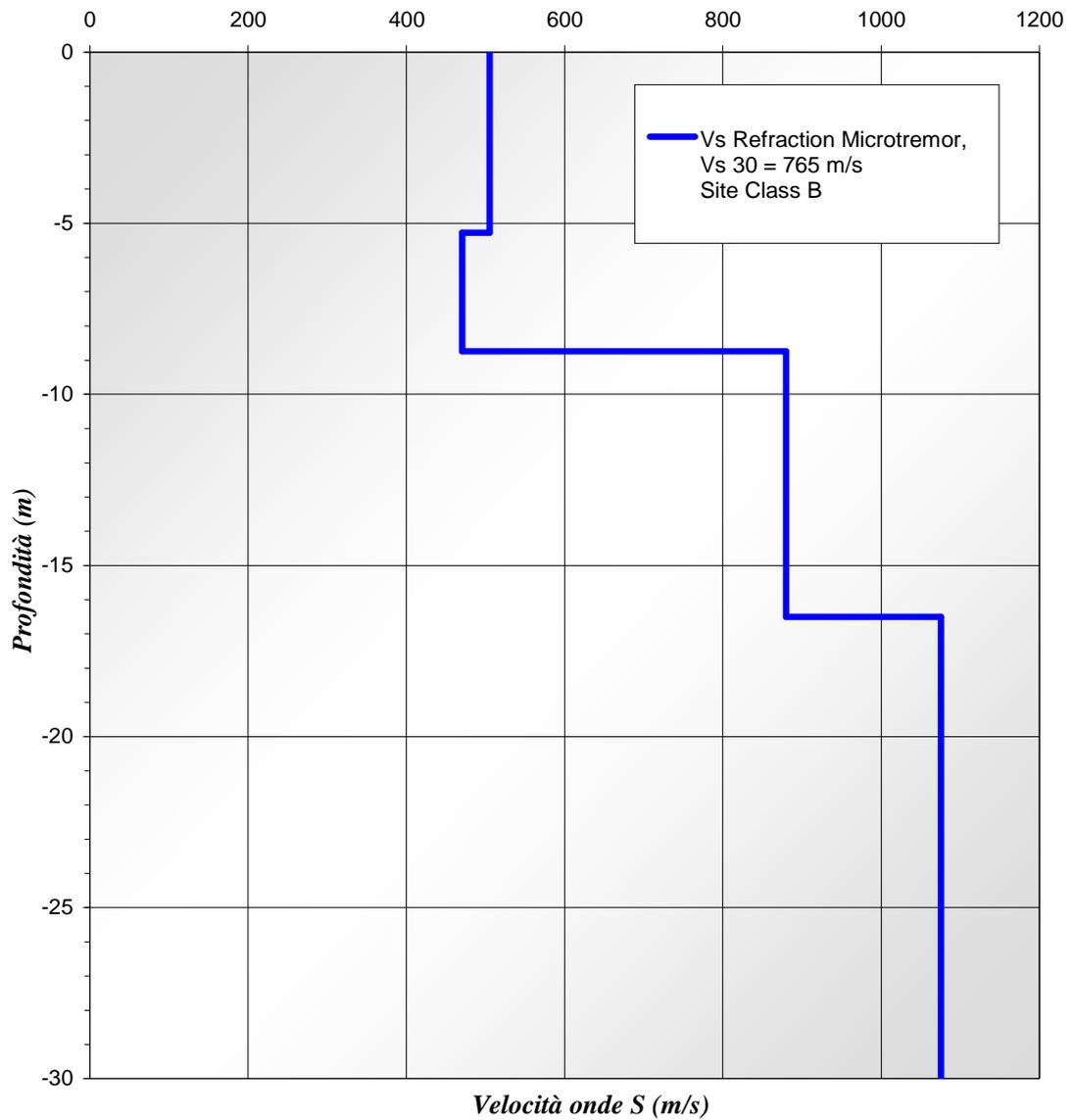


p-f Image with Dispersion Modeling Picks



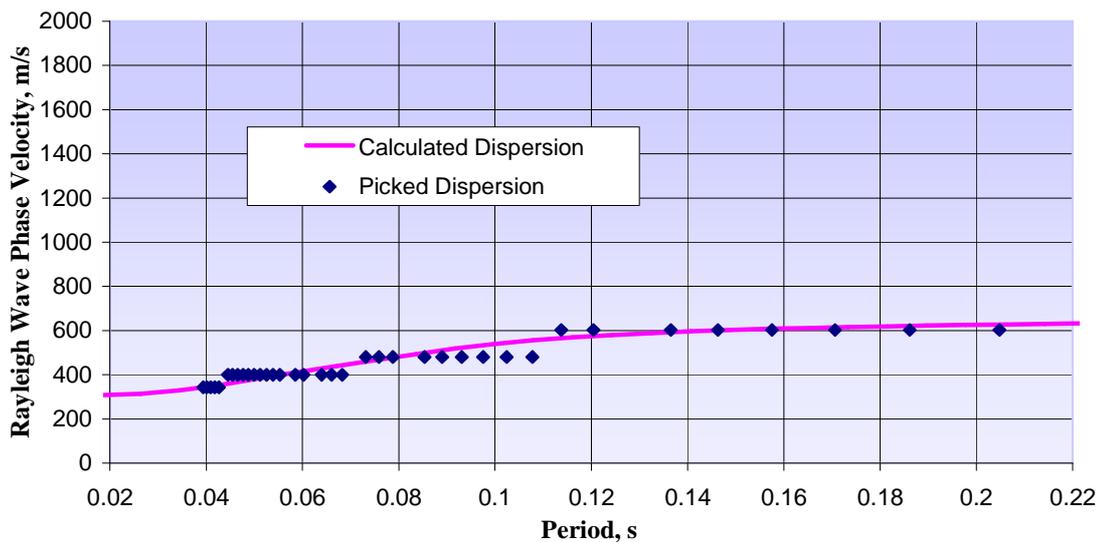
Re.Mi. LS7

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

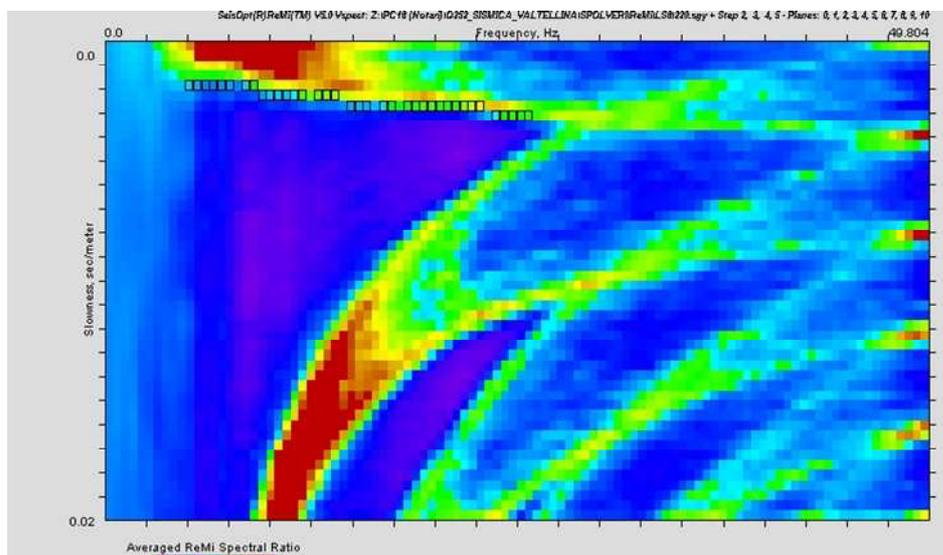


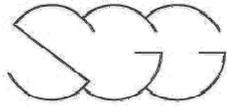
Re.Mi. LS8

Dispersion Curve Showing Picks and Fit



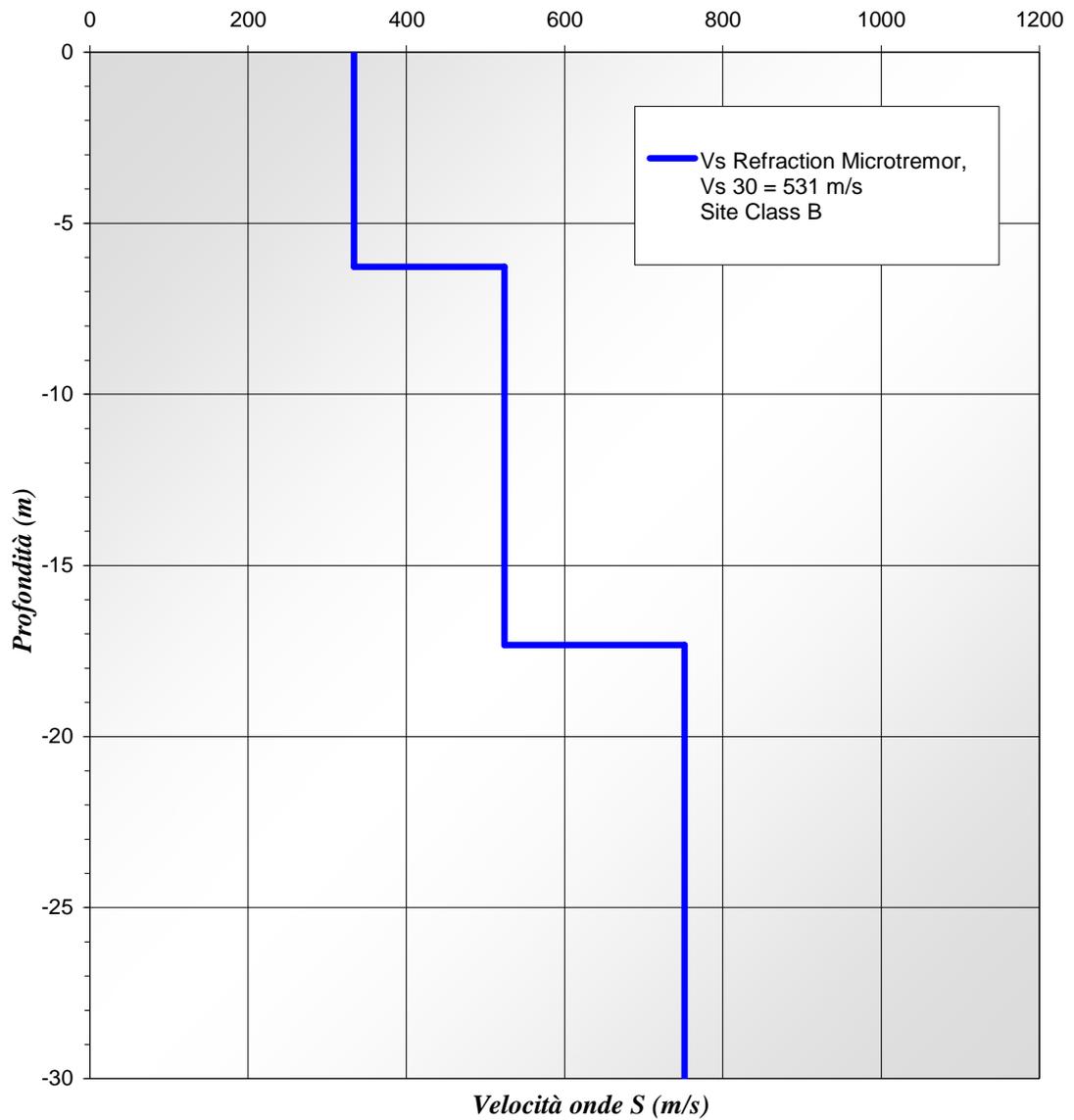
p-f Image with Dispersion Modeling Picks





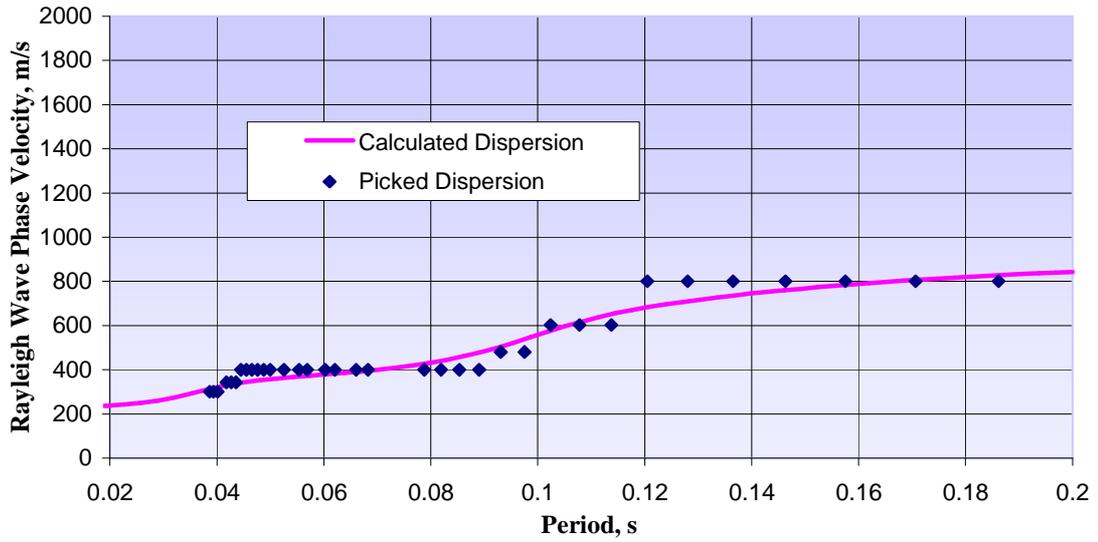
Re.Mi. LS8

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

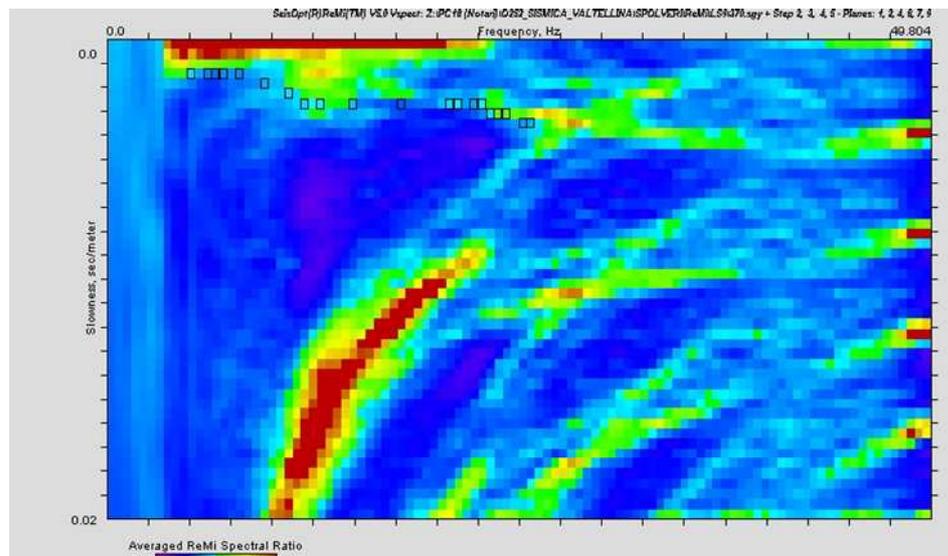


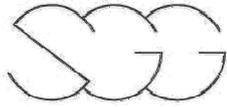
Re.Mi. LS9

Dispersion Curve Showing Picks and Fit



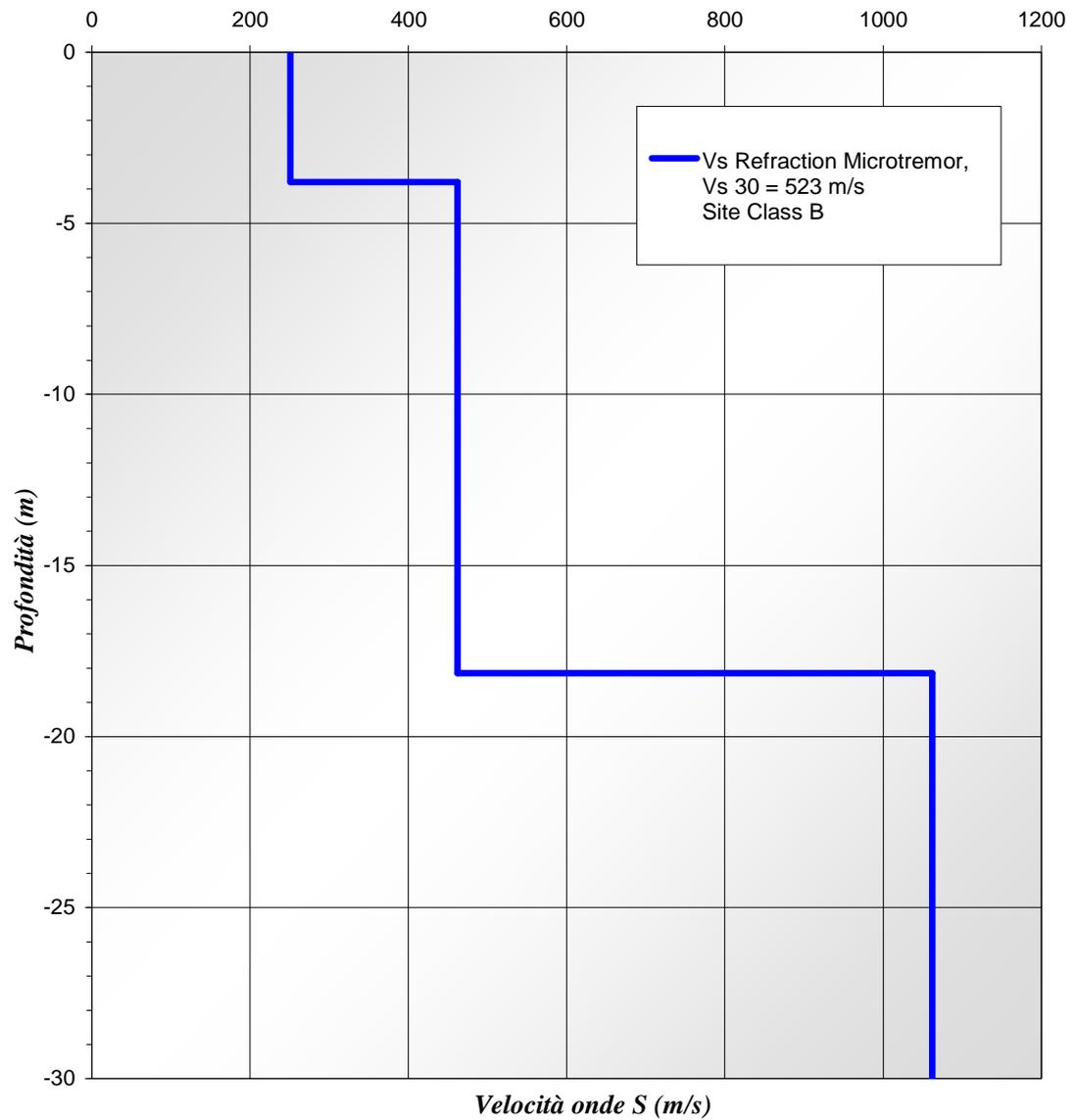
p-f Image with Dispersion Modeling Picks





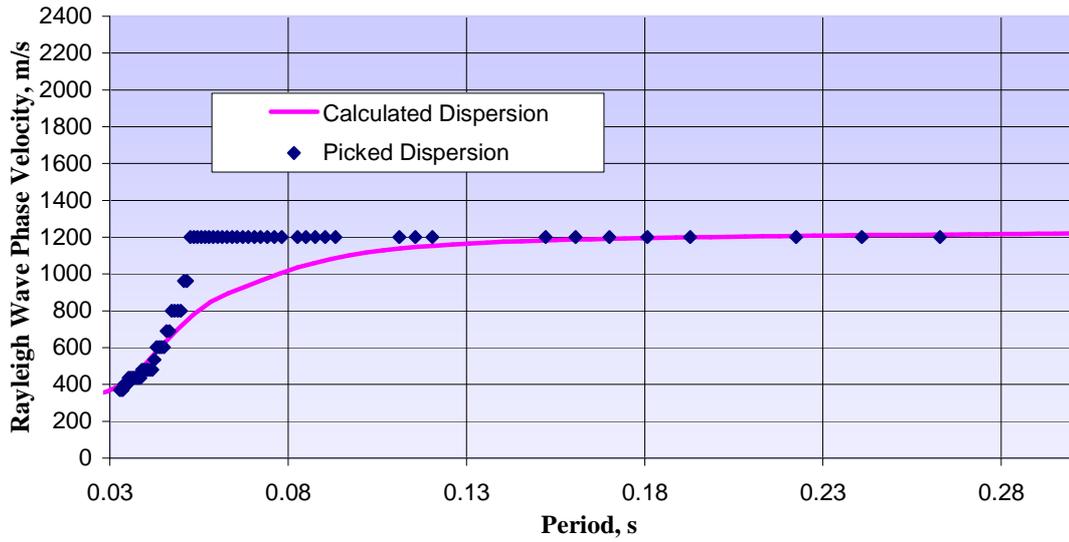
Re.Mi. LS9

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

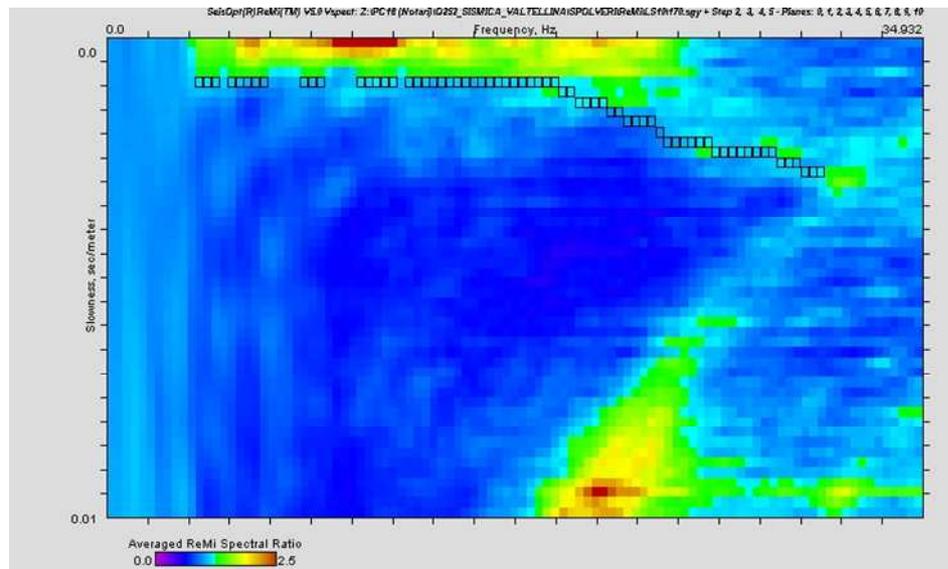


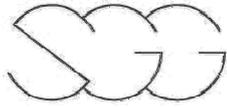
Re.Mi. LS10

Dispersion Curve Showing Picks and Fit



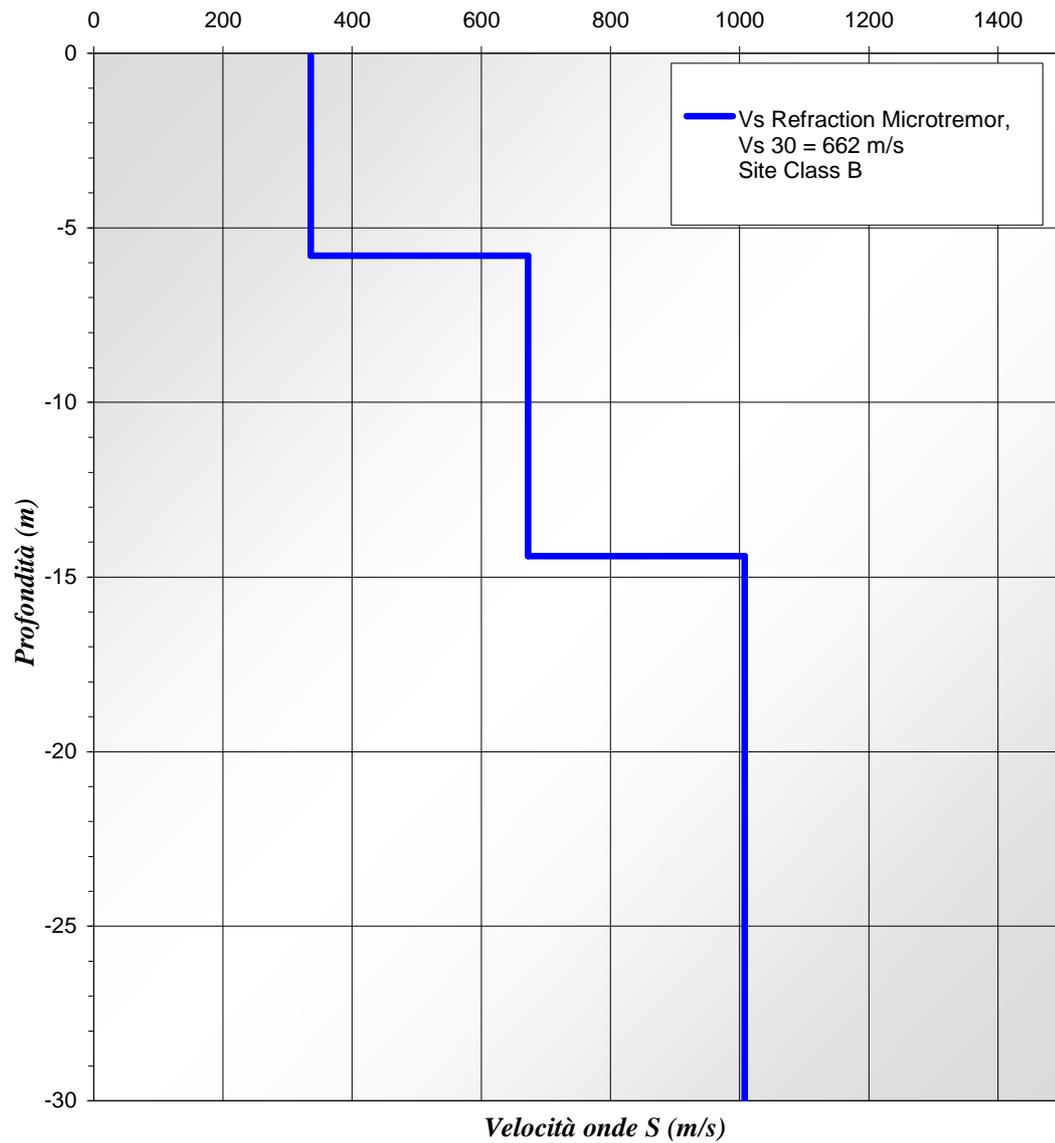
p-f Image with Dispersion Modeling Picks

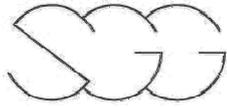




Re.Mi. LS10

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

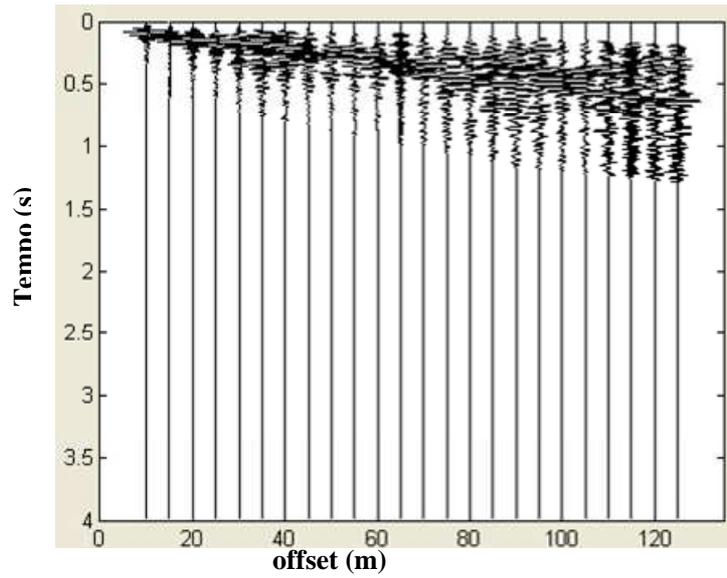




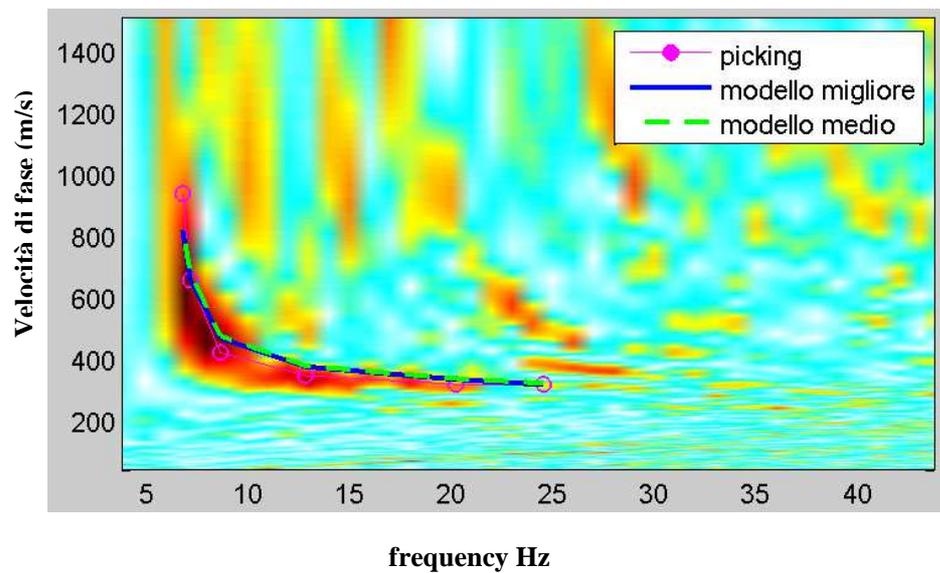
Risultati delle prove MASW

Masw LS1

tracce normalizzate

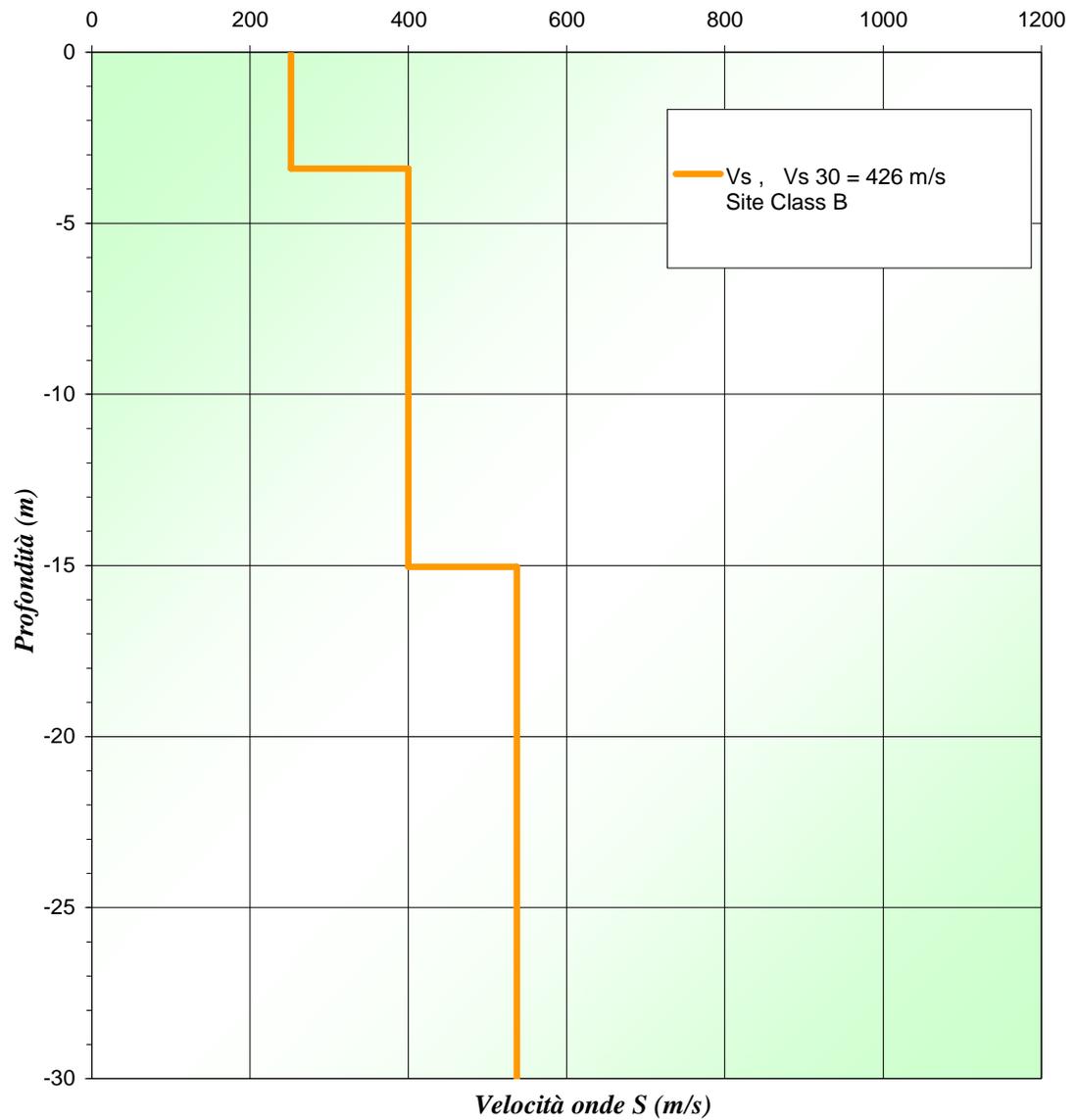


spettro di velocità e curve di dispersione



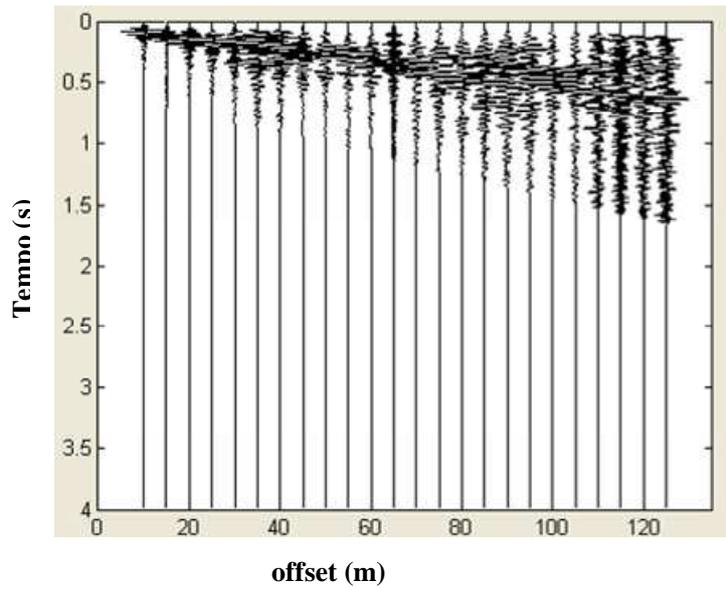
Masw LS1

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

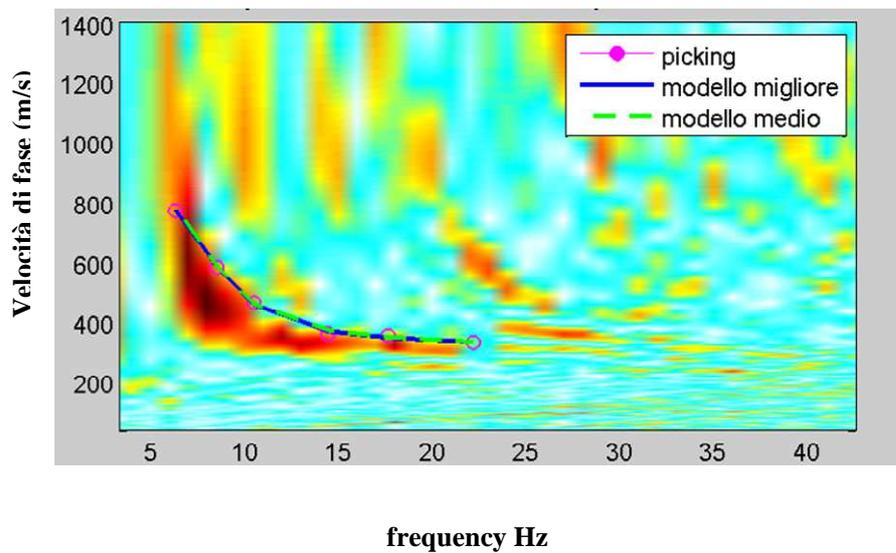


Masw LS2

tracce normalizzate

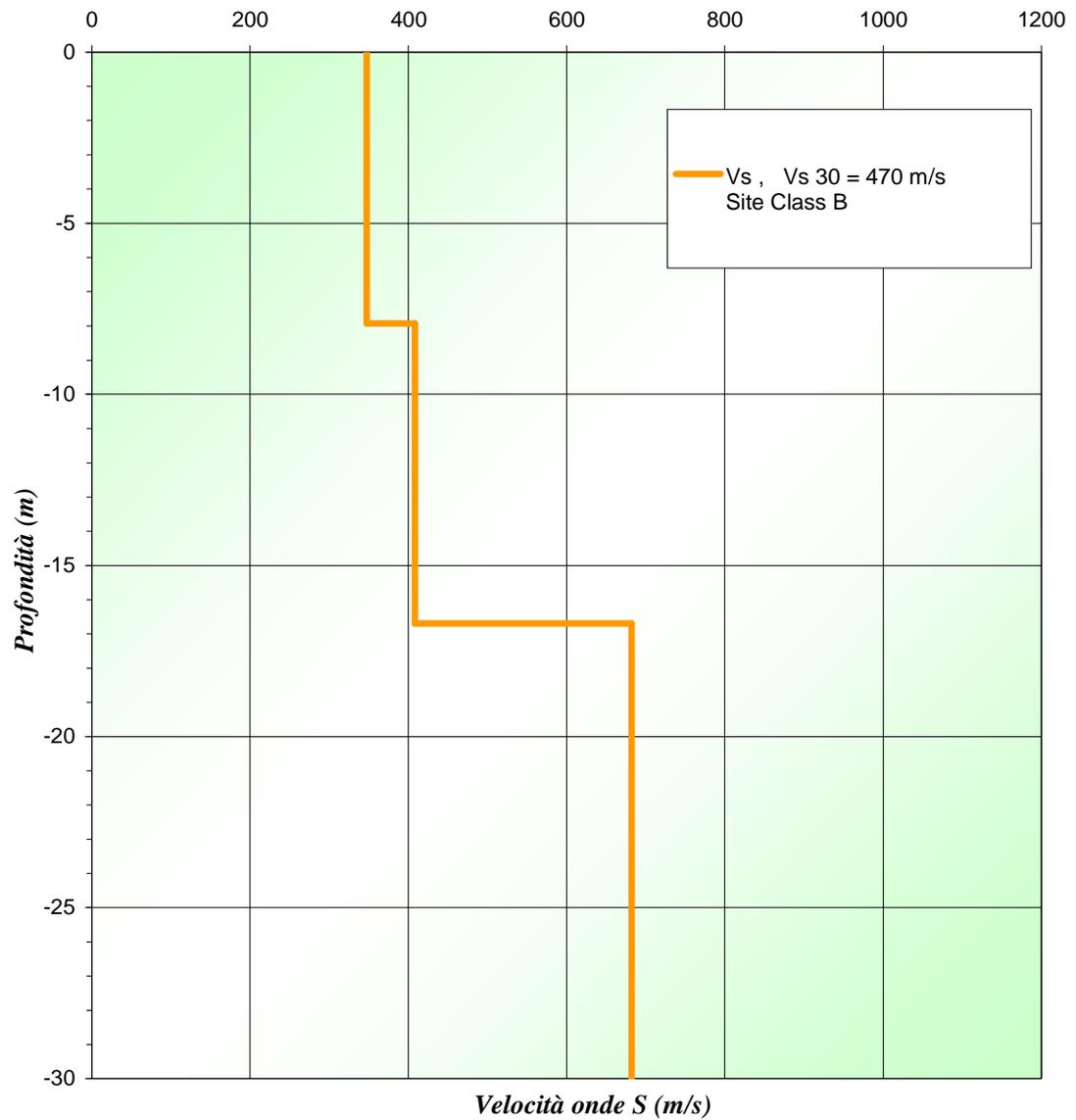


spettro di velocità e curve di dispersione



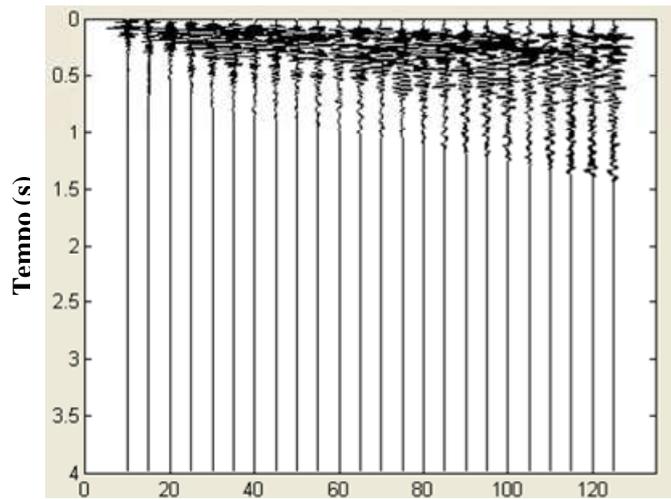
Masw LS2

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis



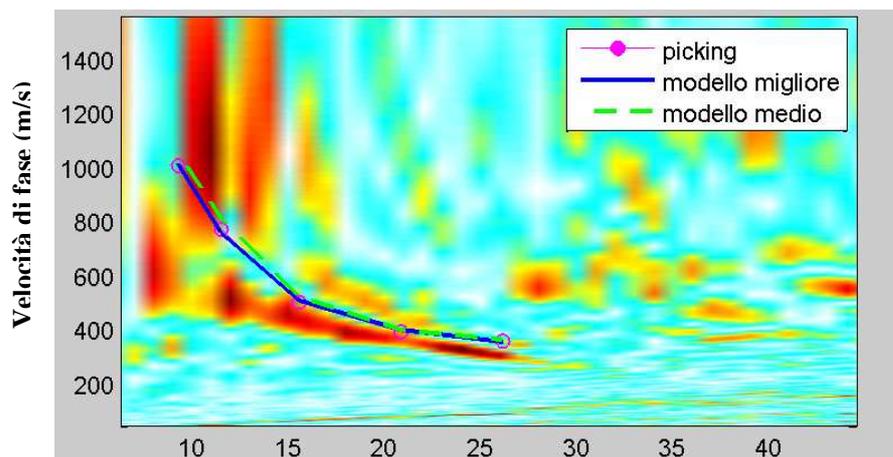
Masw LS3

tracce normalizzate

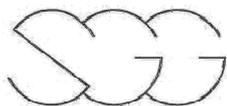


offset (m)

spettro di velocità e curve di dispersione

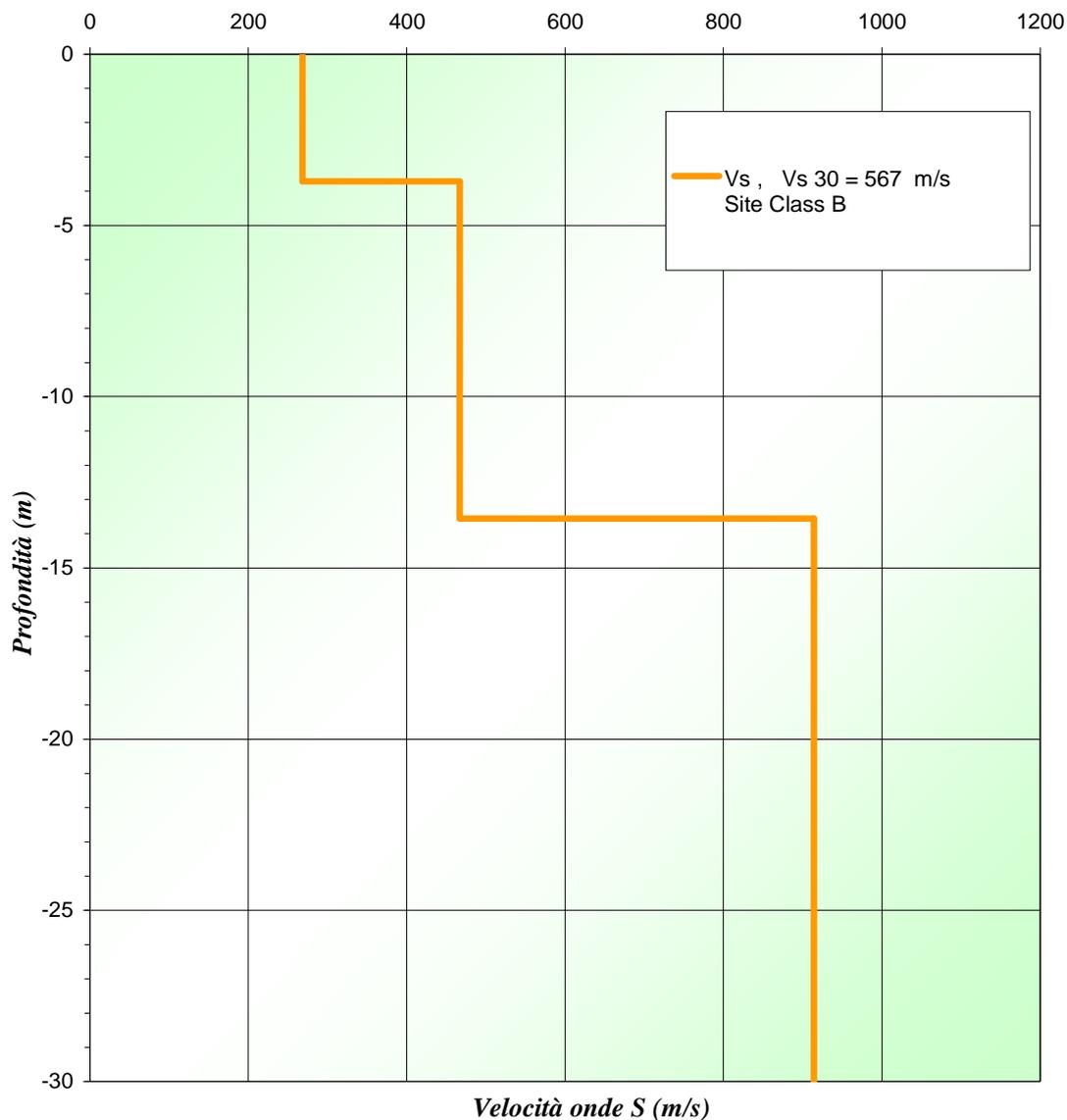


frequency Hz



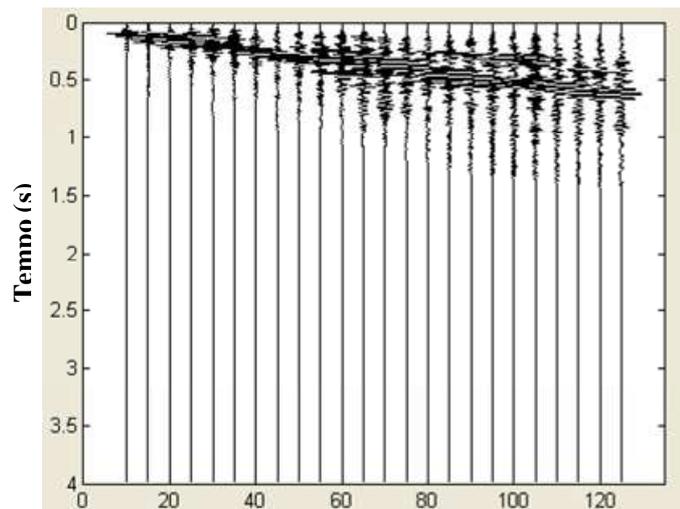
Masw LS3

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis



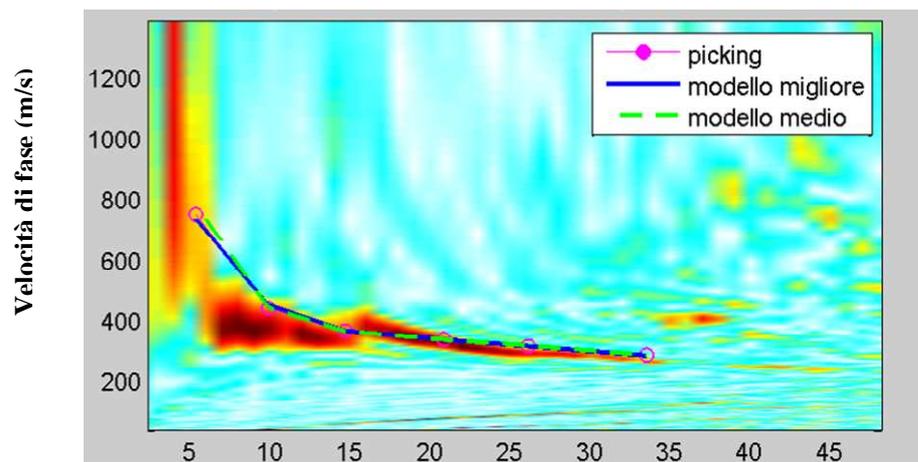
Masw LS4

tracce normalizzate

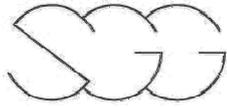


offset (m)

spettro di velocità e curve di dispersione

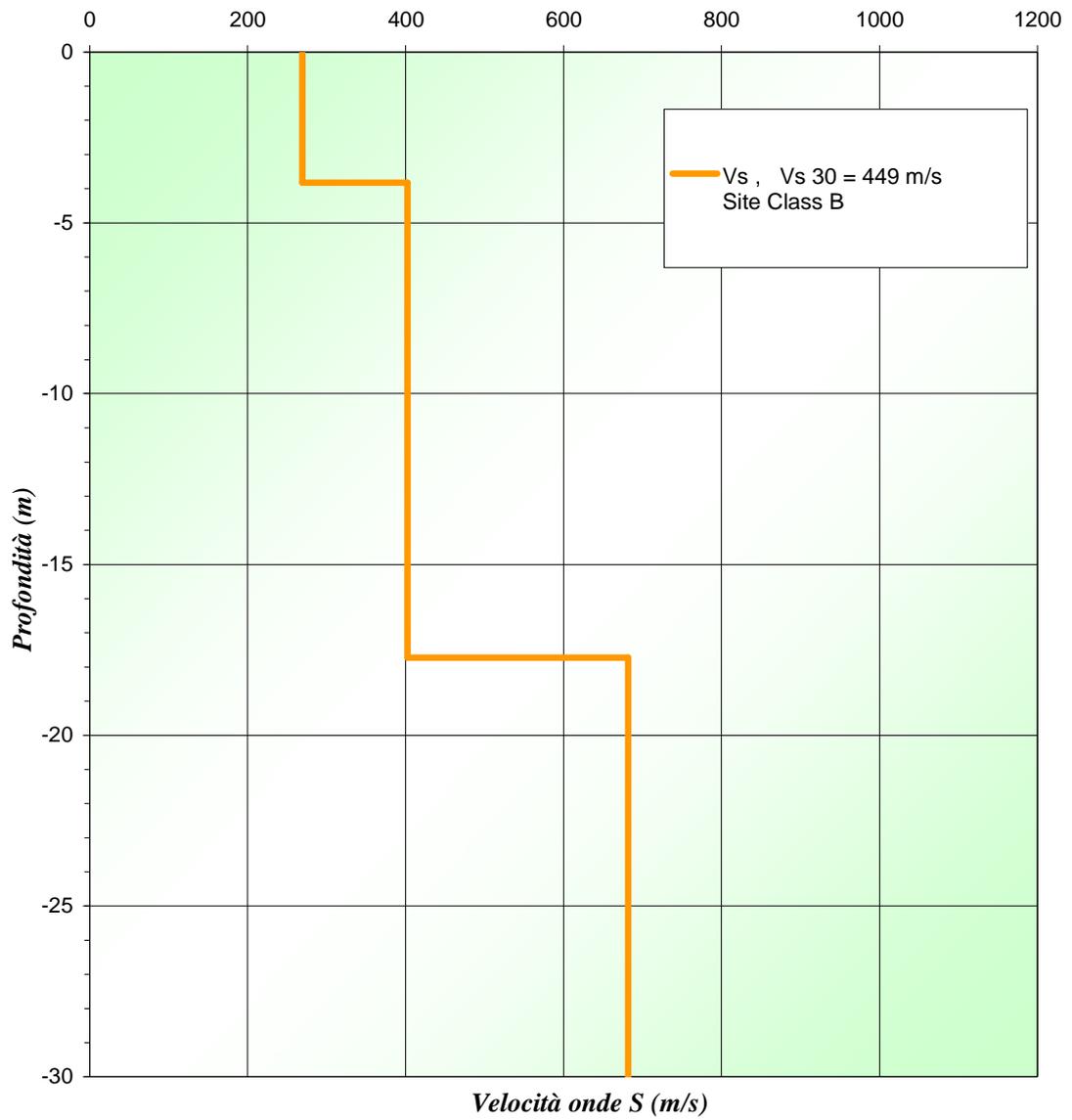


frequency Hz



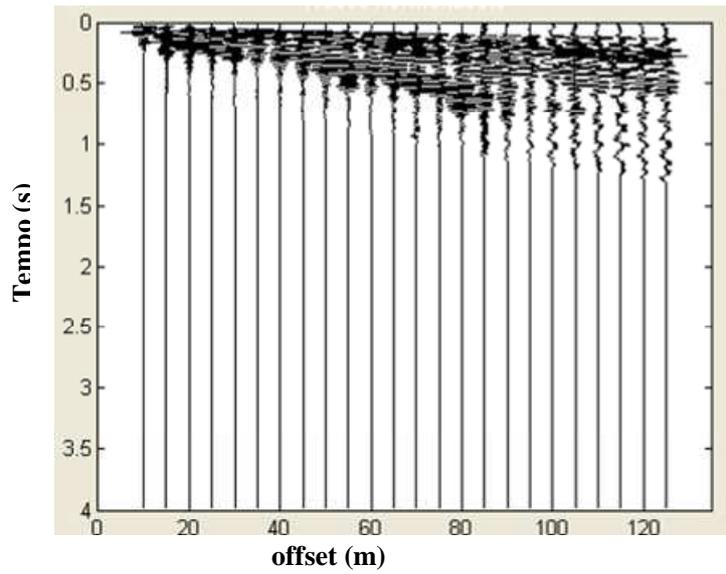
Masw LS4

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

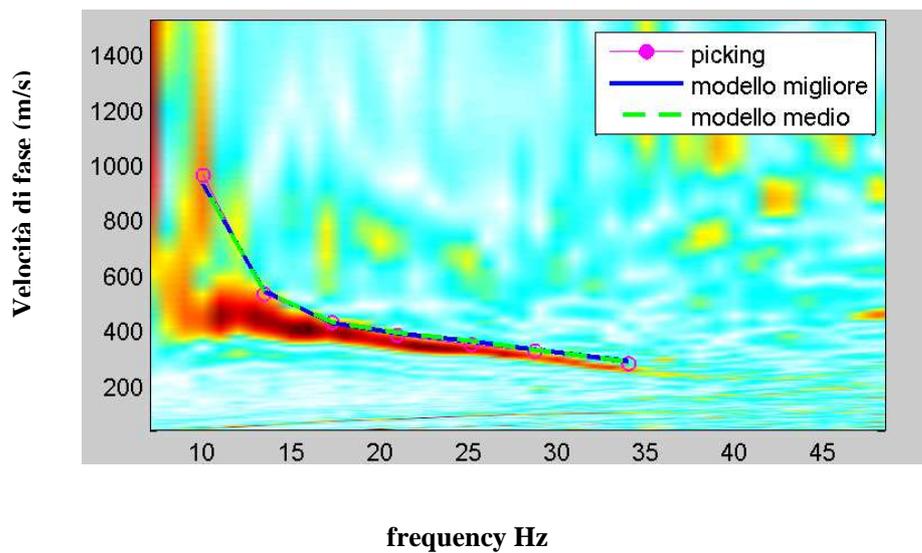


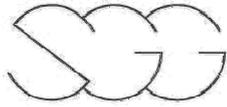
Masw LS5

tracce normalizzate



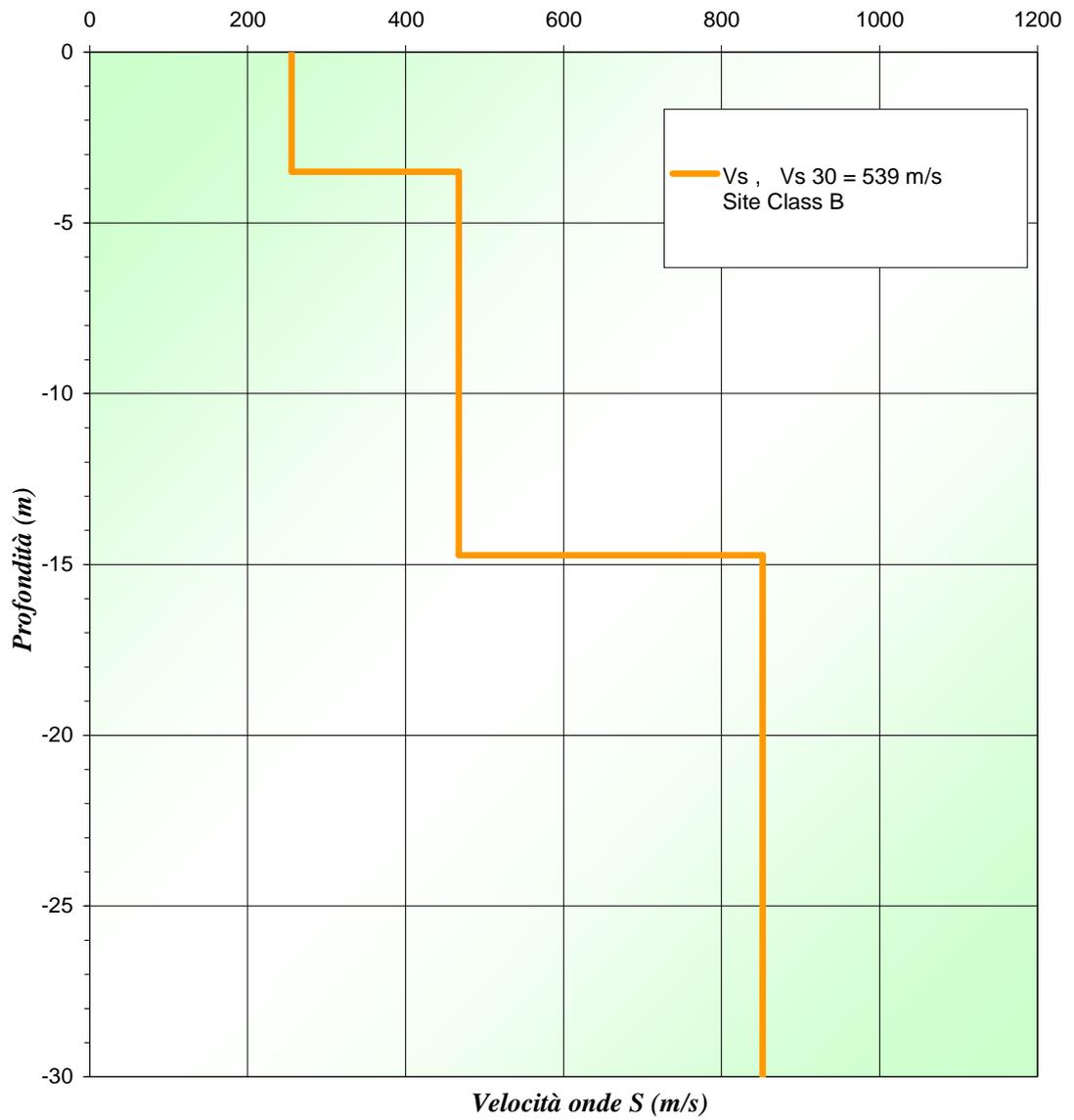
spettro di velocità e curve di dispersione





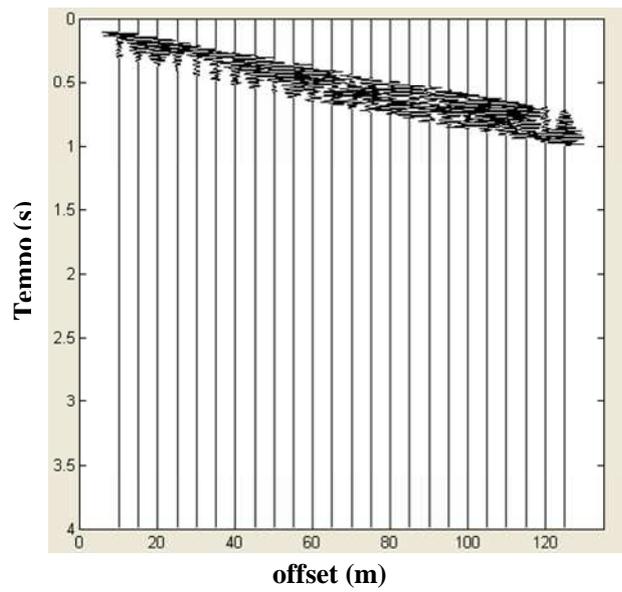
Masw LS5

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

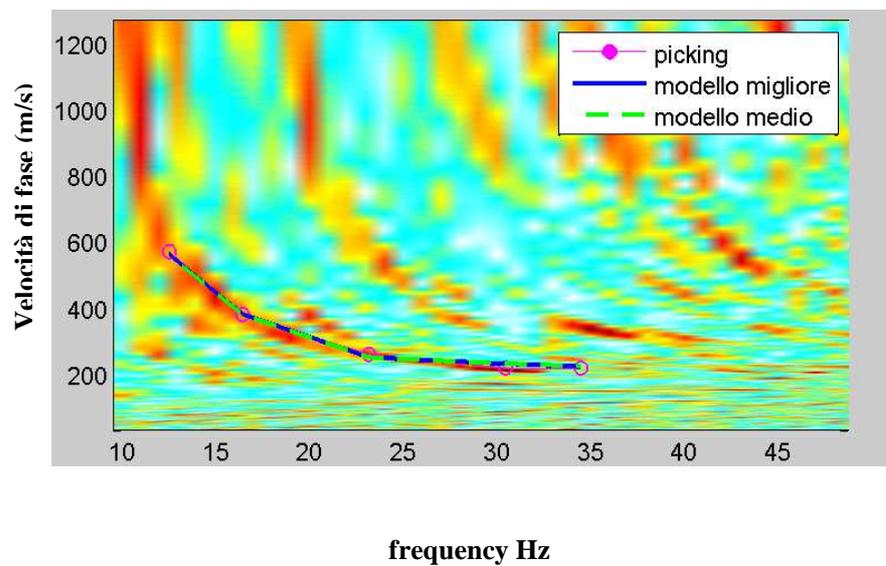


Masw LS6

tracce normalizzate

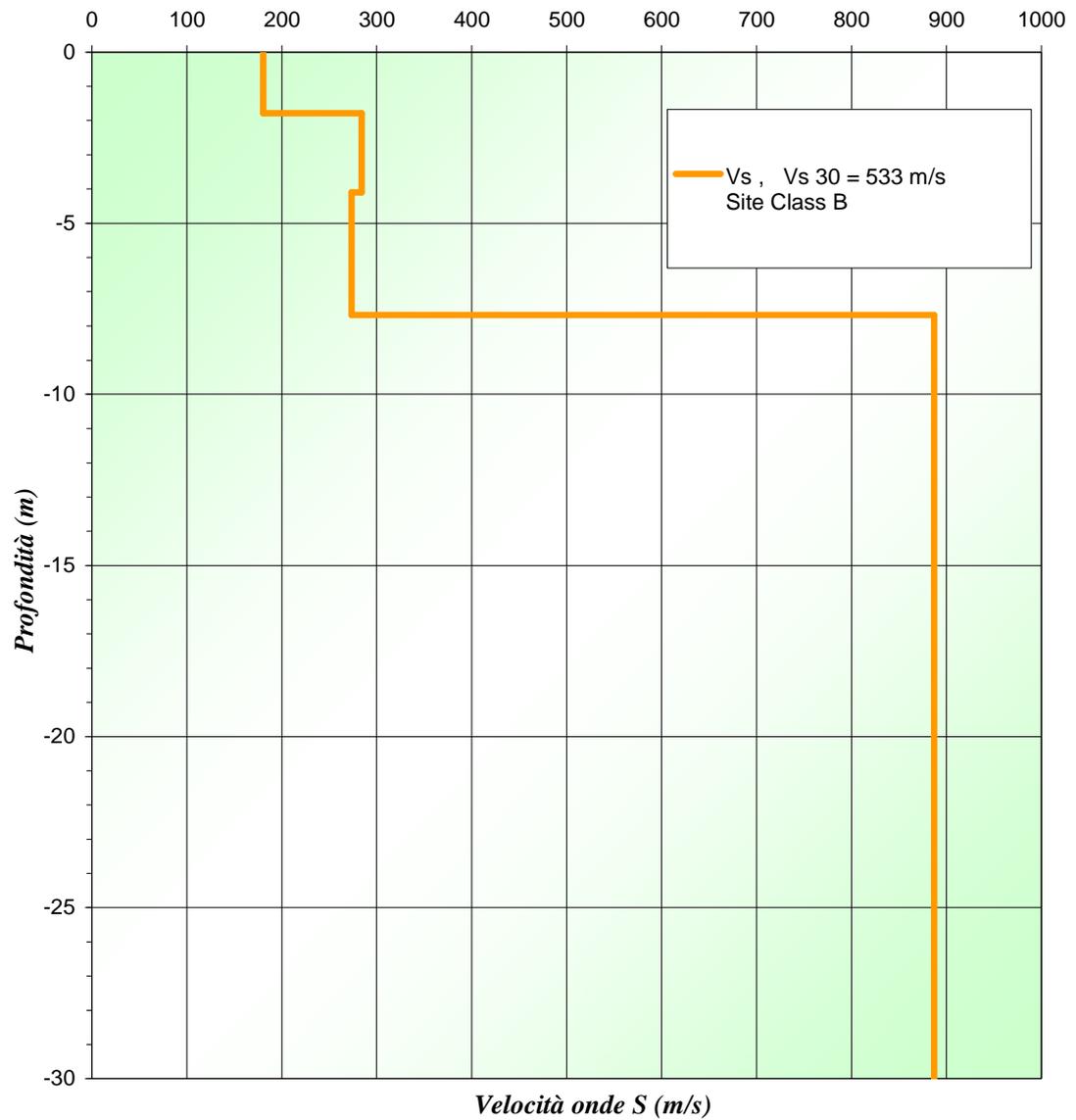


spettro di velocità e curve di dispersione



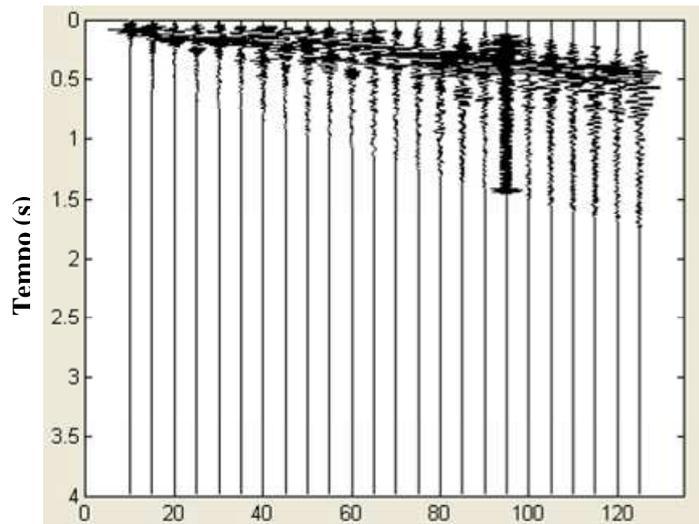
Masw LS6

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis



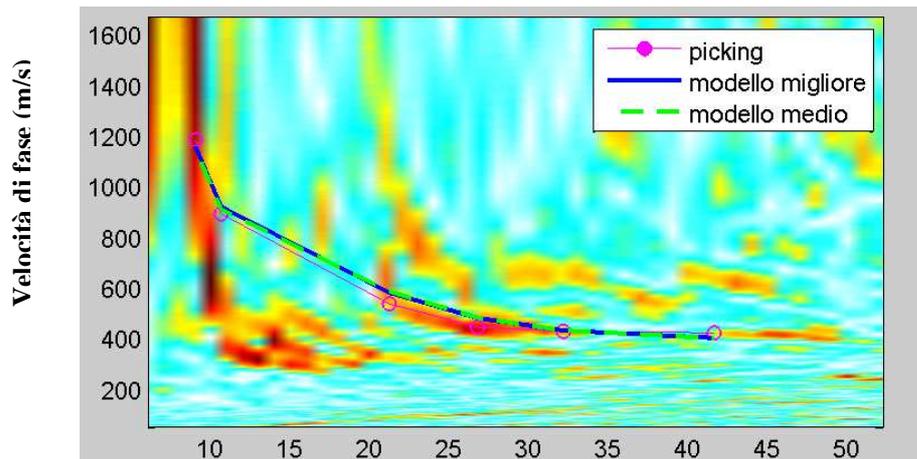
Masw LS7

tracce normalizzate

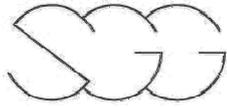


offset (m)

spettro di velocità e curve di dispersione

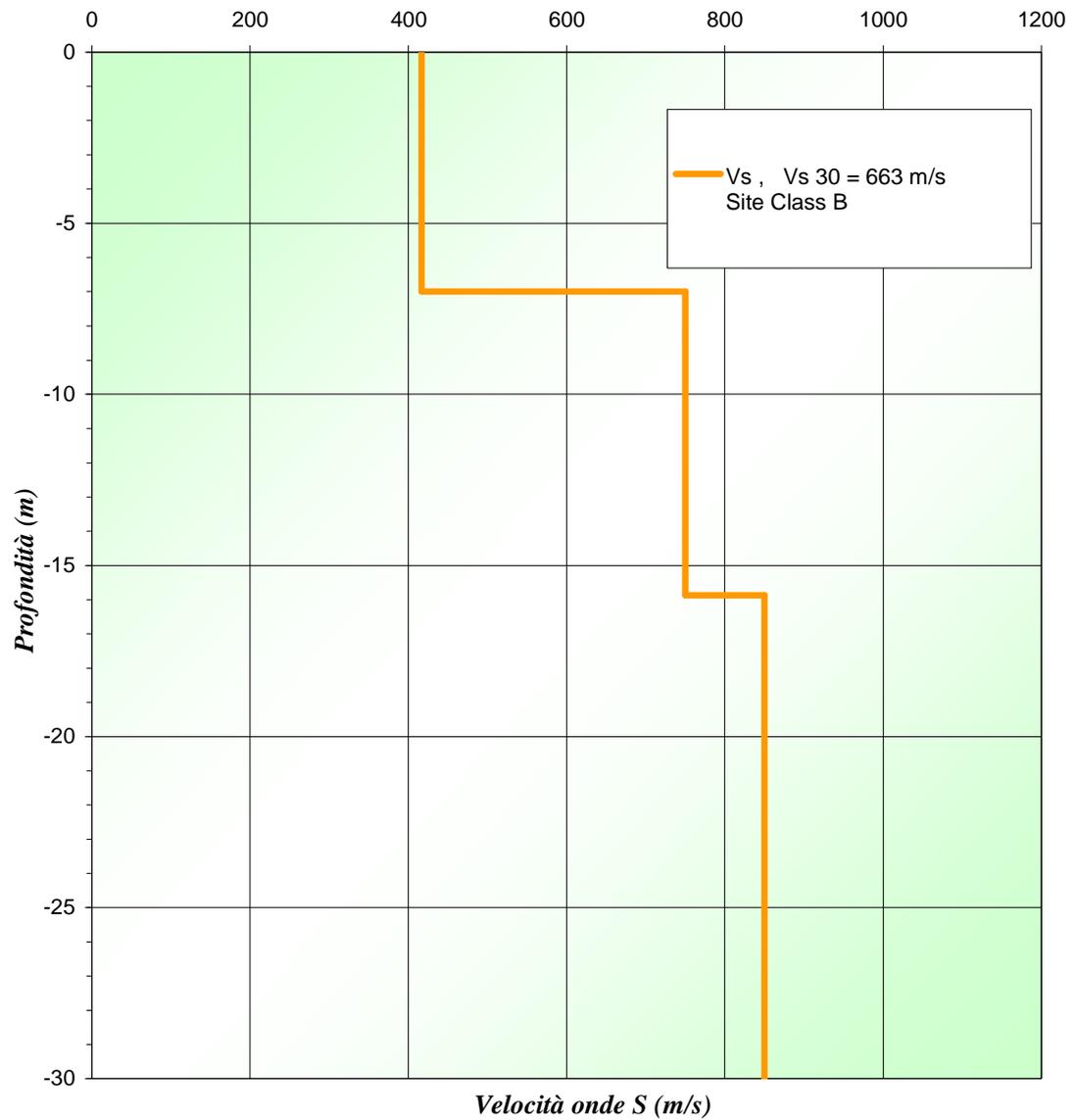


frequency Hz



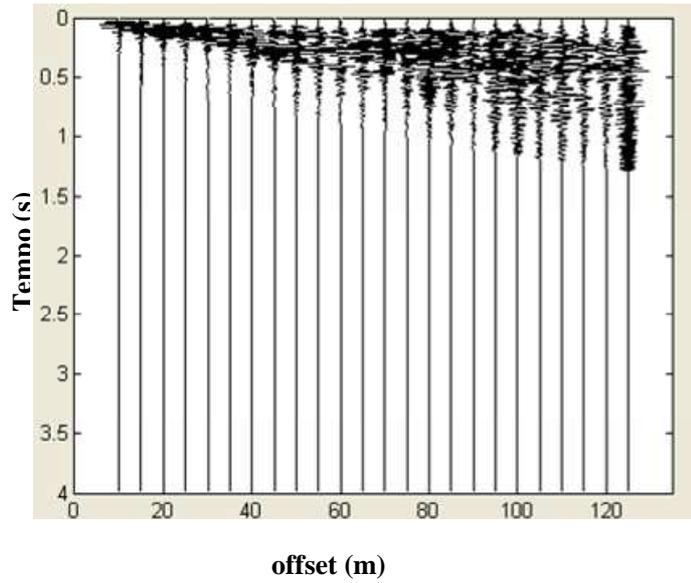
Masw LS7

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

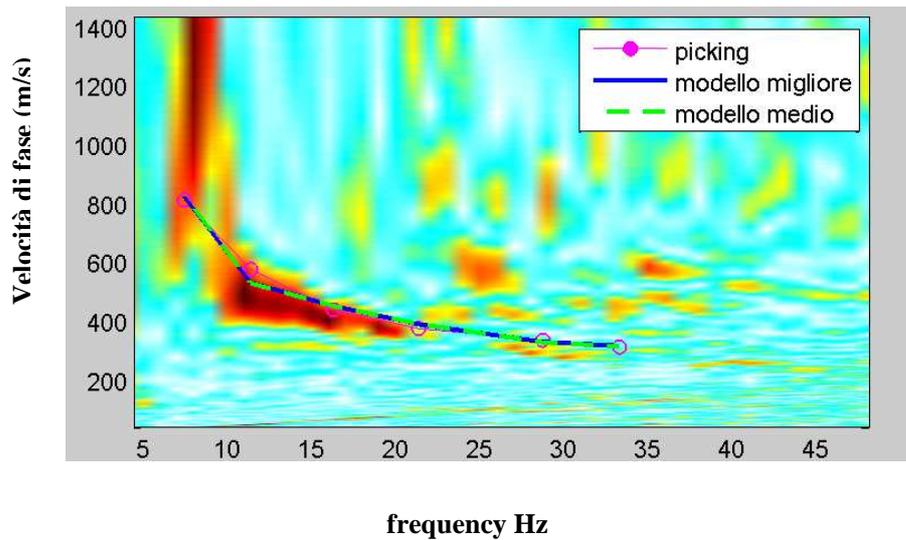


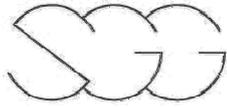
Masw LS8

tracce normalizzate



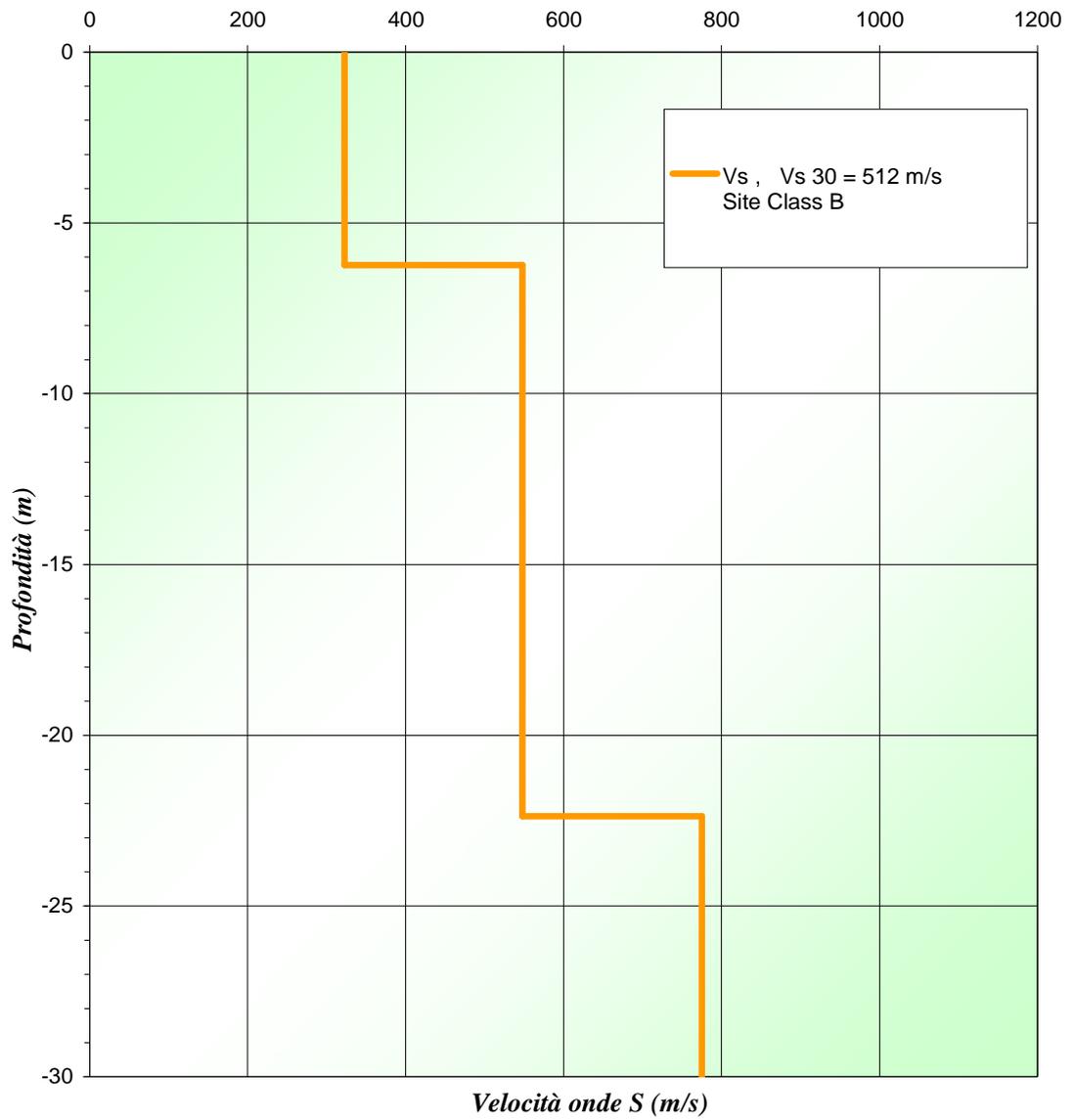
spettro di velocità e curve di dispersione

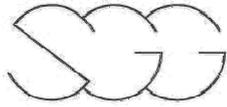




Masw LS8

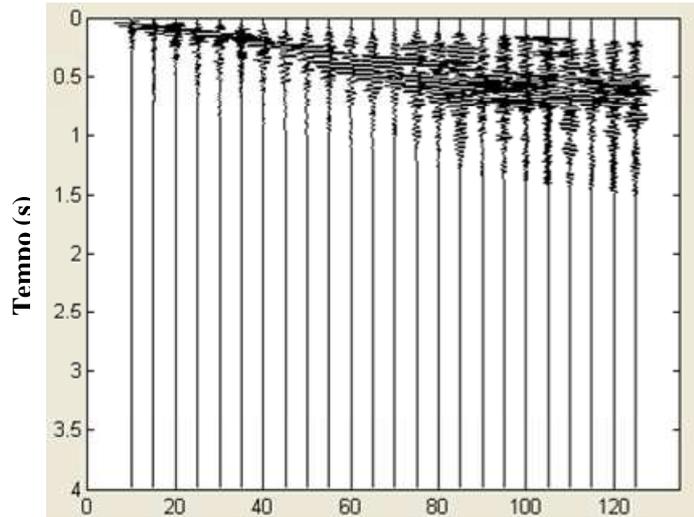
Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis





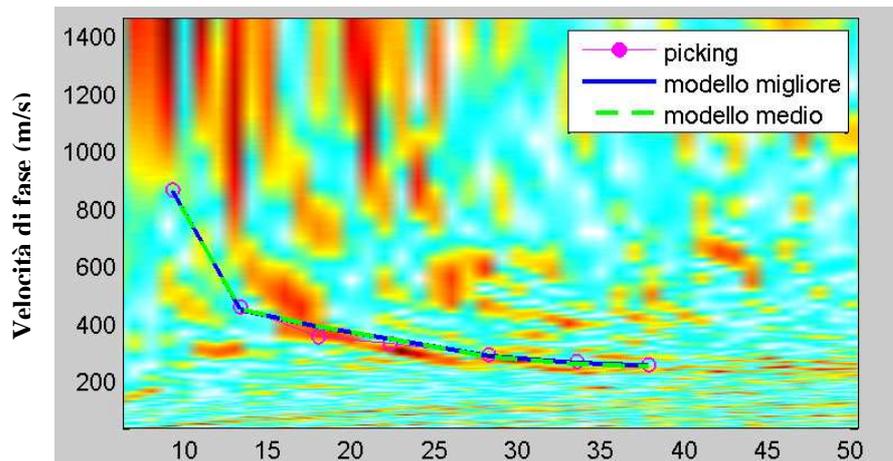
Masw LS9

tracce normalizzate



offset (m)

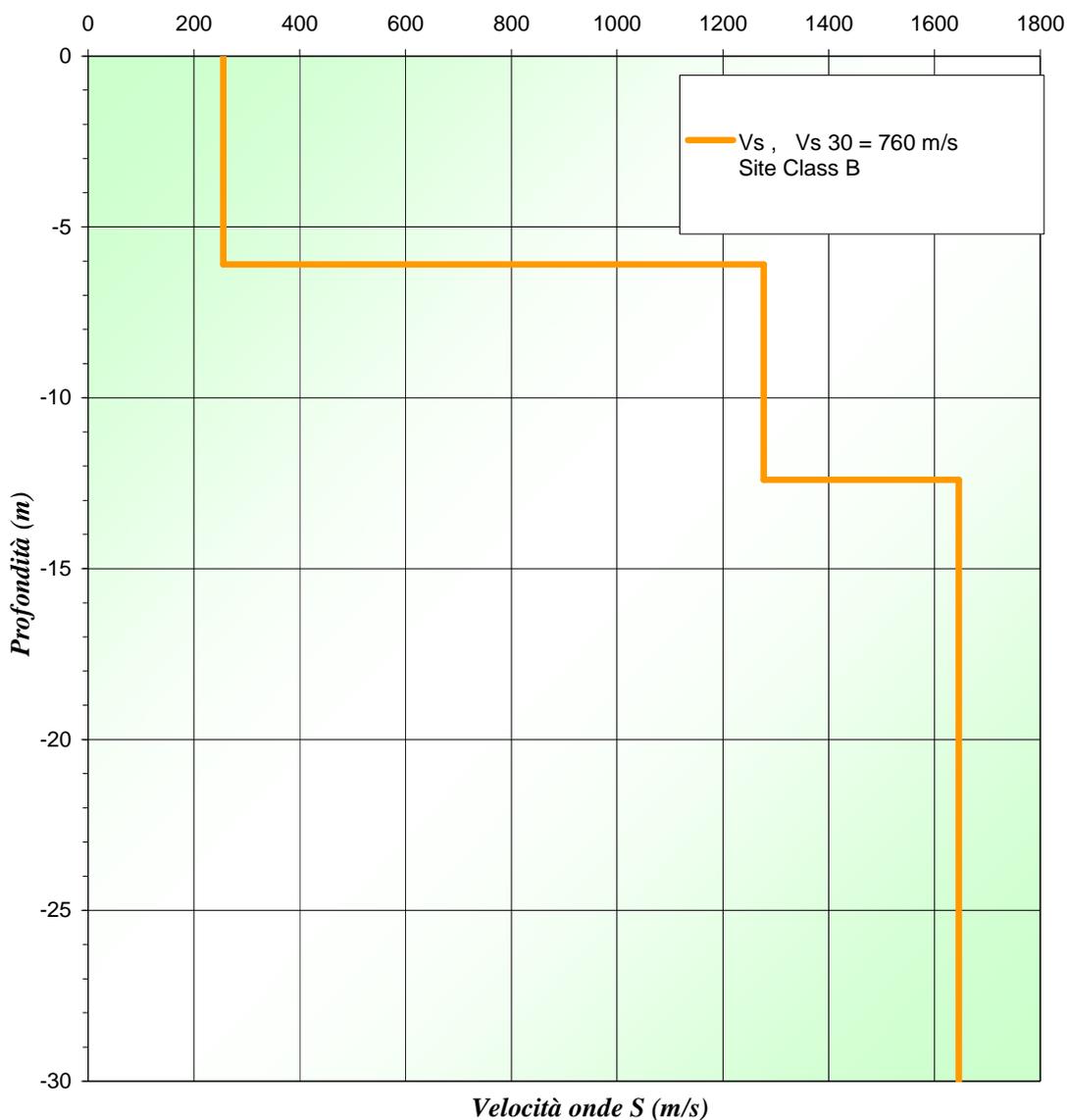
spettro di velocità e curve di dispersione



frequency Hz

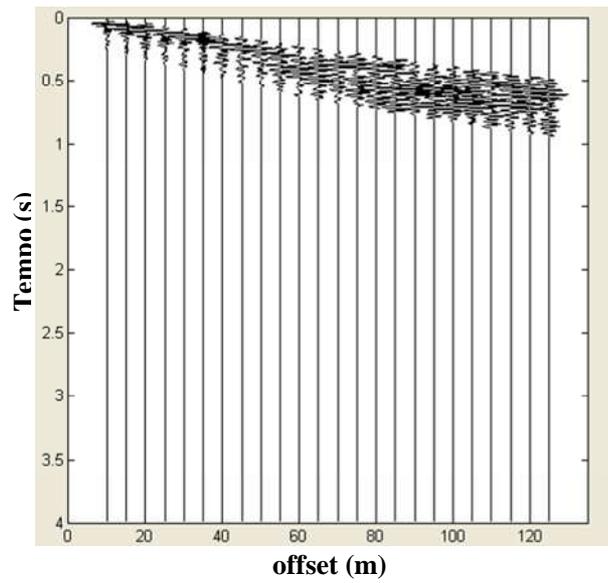
Masw LS9

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

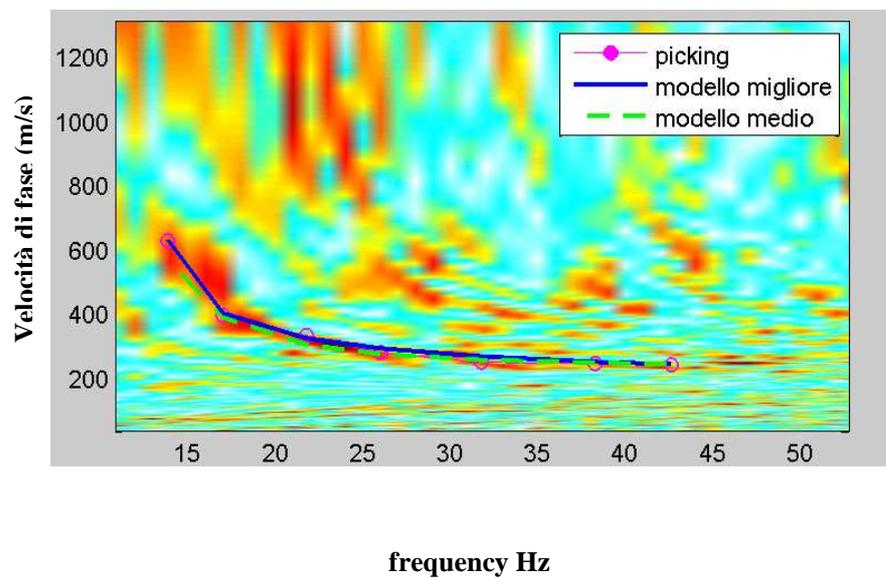


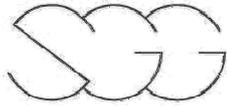
Masw LS10

tracce normalizzate



spettro di velocità e curve di dispersione





Masw LS10

Shear-Wave Velocity Profile from SeisOpt ReMi Software Analysis

