

GeoTirreno s.r.l.
Servizi per la Geologia e l'Ambiente



sondaggi ambientali
sondaggi geotecnici
sismica di superficie
sismica in foro
tomografia elettrica
indagini penetrometriche
punta elettrica e piezocono
monitoraggio inclinometri

Viale Stazione, 39
54100 Massa

tel./fax 0585.42141
Part. IVA: 00713690451

e-mail: info@geotirreno.it
web site: www.geotirreno.it

<i>Progetto:</i>					
RISTRUTTURAZIONE EDIFICIO EX MACCHIA NERA PER SEDE BIBLIOTECA COMUNALE					
<i>Titolo documento:</i>					
DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE MEDIANTE PROCEDURA M.A.S.W.					
<i>Cliente:</i>				<i>Inoltro al cliente:</i>	
AMMINISTRAZIONE COMUNALE DI PISA				CHIUSURA COMMESSA [] PER INFORMAZIONE [] NON RICHIESTO []	
<i>Località:</i>		<i>Comune:</i>		<i>Provincia:</i>	
Porta a Piagge		Pisa		Pisa	
Responsabile indagini Ambientali					
Responsabile indagini Geofisiche <i>Dr. Geol. Cosseddu Paolo A.</i>					
Responsabile indagini Geotecniche					
Responsabile redazione documento <i>Dr. Geol. Cosseddu Paolo A.</i>		<i>Descrizione delle revisioni:</i>			
		00 Prima emissione			
Responsabile di Produzione <i>Dott. Riccardo Barbieri</i>					
Prima emissione:	00	Marzo 2008	Pagine:	Denominazione file:	Elaborato:
Aggiornamento:	01	-	1 di 8	Macchia Nera.doc	C

<i>File: relaz. tecnica.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	
<p align="center">Sez. 7.5: "Produzione ed Erogazione Servizi"</p> <p align="center">ATTIVITÀ DI CANTIERE, STRATIGRAFIE E INDAGINI GEOTECNICHE IN SITO</p>			

Premessa

All'interno di una campagna geognostica, commissionata dall'Amministrazione Comunale di Pisa, per la realizzazione di una nuova sede della Biblioteca Comunale, in Via S.Michele, quartiere Porta a Piagge, a Pisa, è stata eseguita una stesa sismica, con procedura MASW, atta a determinare il parametro VS_{30} secondo quanto impone la recente normativa sismica nazionale.

Metodologia MASW

L'interesse verso i metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde superficiali è cresciuto notevolmente negli ultimi anni, data la necessità di identificare le caratteristiche dei terreni in condizioni dinamiche insieme al profilo verticale della velocità delle onde di taglio VS facendo ricorso a tecniche poco costose e non invasive.

La recente Normativa sismica nazionale (OPCM 3274 del 2003 e successive modifiche ed integrazioni, DM 14/09/2005 "Norme Tecniche per le Costruzioni") riprendendo l'Eurocodice 8, impone la classificazione sismica del sottosuolo in base al parametro VS_{30} per la progettazione in zona sismica. Tale parametro, che rappresenta la velocità equivalente delle onde di taglio nei primi 30 metri di sottosuolo, può essere calcolato facilmente una volta noti gli spessori degli strati presenti nei primi 30 metri di profondità e la velocità di propagazione delle onde S all'interno di ogni strato.

In particolare i metodi di prospezione sismica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) consentono di ottenere un modello verticale delle VS, a partire dalle modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare le onde di Rayleigh, e non attraverso quelle di volume come invece accade per i metodi propri della sismica più tradizionale. In particolare osservando le caratteristiche dispersive del sito e applicando opportune tecniche di inversione è possibile stimare alcune proprietà meccaniche del sottosuolo in condizioni di sollecitazione sismica.

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più una unica velocità, ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a

<i>File: relaz. tecnica.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	
<p align="center">Sez. 7.5: "Produzione ed Erogazione Servizi"</p> <p align="center">ATTIVITÀ DI CANTIERE, STRATIGRAFIE E INDAGINI GEOTECNICHE IN SITO</p>			

sua volta legata alle varie lunghezze d'onda. Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità. Questo comportamento viene definito *dispersione in frequenza* ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie. Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie.

I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati sovrapposti con caratteristiche elastiche lineari. Per ogni strato si devono definire quattro parametri: lo spessore H dello strato, ad esclusione dell'ultimo considerato infinito; la densità ρ dello strato; la velocità di propagazione delle onde di taglio V_s all'interno dello strato; il coefficiente di Poisson ν . A partire dai parametri del sottosuolo è quindi possibile ricavare le proprietà dispersive delle onde di Rayleigh, per il sito in esame. Quanto detto rappresenta il *problema diretto*: quello cioè che a partire dalla conoscenza delle caratteristiche del terreno permette di descrivere la dispersione delle onde di Rayleigh. Nella prospezione occorre invece affrontare il *problema inverso*: a partire dalla curva di dispersione rilevata, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri meccanici e sismici.

La procedura utilizzata può essere suddivisa in tre fasi:

1. **Acquisizione:** registrazione e osservazione dei dati sismici "grezzi" contenenti le onde di Rayleigh per un intervallo sufficientemente ampio di frequenze;
2. **Processing:** trattamento dei dati attraverso filtraggio e altre tecniche finalizzate all'estrazione delle caratteristiche di dispersione, in particolare espresse come velocità di fase in funzione della frequenza (Spettro FK);
3. **Inversione:** uso di un modello del terreno che permette di ricavare un profilo monodimensionale della velocità delle onde S ed altri parametri in funzione della profondità.

<i>File: relaz. tecnica.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	
<p align="center">Sez. 7.5: "Produzione ed Erogazione Servizi" ATTIVITÀ DI CANTIERE, STRATIGRAFIE E INDAGINI GEOTECNICHE IN SITO</p>			

Tutto ciò è quindi possibile sfruttando le relazioni che legano le proprietà meccaniche alla dispersione frequenziale.

I vantaggi promessi da questo metodo sono molteplici: è molto veloce e semplice da organizzare, è molto economico rispetto ai metodi più invasivi, raggiunge una buona profondità e risoluzione di indagine, ma soprattutto permette di ottenere buoni risultati anche in ambienti urbanizzati dove il rumore ambientale è particolarmente elevato.

La fase di acquisizione deve essere effettuata con una serie di accorgimenti e precauzioni da prendere in sito e nella pianificazione della registrazione. Tutto è finalizzato alla registrazione di dati contenenti la miglior informazione possibile riguardo alla propagazione delle onde di Rayleigh con buon rapporto segnale rumore. Nella procedura MASW, la presenza di rumore di tipo casuale può causare notevole disturbo; a questo scopo si procede con la tecnica di stacking sommando cioè algebricamente i segnali di successive energizzazioni rendendo in tal modo la potenza del segnale superiore a quella del rumore. Per la riduzione di rumore di tipo sistematico come la presenza dell'onda d'aria o di rumore elettrico è opportuno ricorrere a operazioni di filtraggio.

Per il trattamento e l'analisi dei dati ottenuti dalla procedura MASW si è utilizzato il software *WinMasw*© della Eliosoft s.r.l.

Il software *WinMASW* consente di analizzare dati sismici (*common-shot gathers* acquisiti in campagna) in modo tale da poter ricavare il profilo verticale della VS (velocità delle onde di taglio).

Tale risultato viene ottenuto tramite inversione (è possibile considerare tanto il modo fondamentale che quelli superiori) delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh, determinate tramite la tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves).

La procedura si sviluppa in due operazioni svolte in successione:

- 1) determinazione dello spettro di velocità (sul quale l'utente deve identificare la curva di dispersione)
- 2) inversione della curva di dispersione (precedentemente individuata) attraverso l'utilizzo di algoritmi genetici

<i>File: relaz. tecnica.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	
<p align="center">Sez. 7.5: "Produzione ed Erogazione Servizi" ATTIVITÀ DI CANTIERE, STRATIGRAFIE E INDAGINI GEOTECNICHE IN SITO</p>			

Gli algoritmi genetici rappresentano un tipo di procedura di ottimizzazione appartenente alla classe degli algoritmi euristici (o anche *global-search methods* o *soft computing*).

Rispetto ai comuni metodi di inversione lineare basati su metodi del gradiente (matrice Jacobiana), queste tecniche di inversione offrono un'affidabilità del risultato di gran lunga superiore per precisione e completezza.

I comuni metodi lineari forniscono infatti soluzioni che dipendono pesantemente dal modello iniziale di partenza che l'utente deve necessariamente fornire. Per la natura del problema (inversione delle curve di dispersione), la grande quantità di minimi locali porta necessariamente ad attrarre il modello iniziale verso un minimo locale che può essere significativamente diverso da quello reale (o globale).

In altre parole, i metodi lineari richiedono che il modello di partenza sia già di per sé vicinissimo alla soluzione reale. In caso contrario il rischio è quello di fornire soluzioni erronee. Gli algoritmi genetici (come altri analoghi) offrono invece un'esplorazione molto più ampia delle possibili soluzioni.

A differenza dei metodi lineari non è necessario fornire alcun modello di partenza. E' invece necessario definire uno "spazio di ricerca" (*search space*) all'interno del quale vengono valutate diverse possibili soluzioni.

Quella finale viene infine proposta con anche una stima della sua attendibilità (*deviazioni standard*) attenuate grazie all'impegno di tecniche statistiche.

Il principale punto di forza di *WinMASW* è quindi proprio quello di fornire risultati molto più robusti rispetto a quelli possibili con altre metodologie, arricchiti anche da una stima dell'attendibilità.

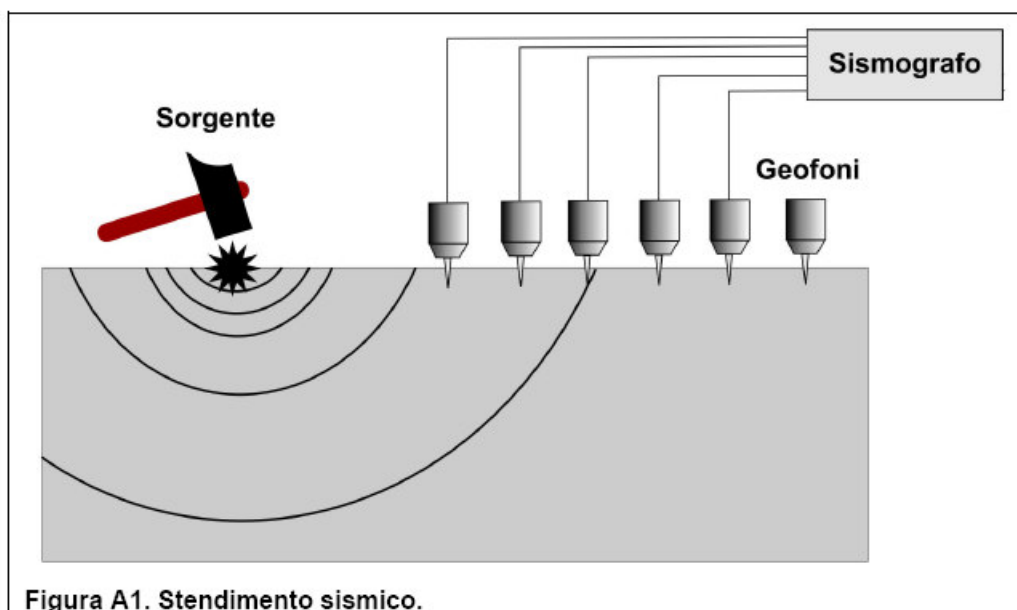
Schema della prova

Acquisire un set di dati per l'indagine MASW non è troppo diverso da una comune acquisizione per un'indagine a rifrazione (o riflessione). E' sufficiente effettuare uno stendimento di geofoni (almeno 24 con frequenza propria di 4.5 Hz) allineati con la sorgente (vedi Figura A1) ed utilizzare una sorgente ad impatto verticale (mazza da 10 kg

<i>File: relaz. tecnica.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	
Sez. 7.5: "Produzione ed Erogazione Servizi" ATTIVITÀ DI CANTIERE, STRATIGRAFIE E INDAGINI GEOTECNICHE IN SITO			

su piattello metallico). La distanza intergeofonica e la distanza sorgente-primario geofono sono determinate dalla tipologia del substrato e dalla profondità che si intende investigare.

Nel nostro caso si è utilizzata una distanza intergeofonica di 2.0 metri, mentre l'offset della sorgente era a 5.0 metri dal primo geofono.



Strumentazione

L'apparecchiatura è costituita da un sismografo Pasi Serie 16S24 a 24 canali con risoluzione di acquisizione a 24 bit, da un cavo sismico e dai geofoni verticali con frequenza propria di 4.5 Hz.

Il sistema ha anche le seguenti caratteristiche:

- lunghezza di registrazione fino a 2 secondi
- filtri per l'eliminazione delle interferenze derivanti da linee di tensione,
- filtri in acquisizione ed in uscita,
- registrazione su Hard Disk.

<i>File: relaz. tecnica.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	
<p align="center">Sez. 7.5: "Produzione ed Erogazione Servizi" ATTIVITÀ DI CANTIERE, STRATIGRAFIE E INDAGINI GEOTECNICHE IN SITO</p>			

Conclusioni

Nelle tavole seguenti sono riportati l'ubicazione dello stendimento, il sismogramma ed i risultati ottenuti mediante l'analisi dei segnali acquisiti.

Il profilo della variazione della velocità delle Onde S con la profondità riportato è un profilo semplificato a 5 strati; per la procedura di inversione, mediante algoritmi genetici, si sono utilizzati come parametri di partenza (spessori) i risultati dei sondaggi e delle penetrometrie effettuate nel sito.

Si noterà che sono due i modelli presentati come soluzione: il modello "migliore" (in termini di minor *misfit*, cioè discrepanza tra curva osservata e calcolata) e un modello medio calcolato secondo un'operazione statistica nota come MPPD (*Marginal Posterior Probability Density*); la VS media fino a 30 metri di profondità viene fornita per entrambi i modelli finali (il "migliore" ed il "medio")

A conclusione di quanto fin qui scritto, si evidenzia come le analisi eseguite conducano a valori di Vs30 pari a circa **190** m/s (modello medio) e **187** m/s (modello migliore), che corrispondono ad un suolo di fondazione classificato come di seguito indicato:

- categoria "C"

Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di Vs30 compresi tra 180 e 360 m/s ($15 < \text{NSPT} < 50$, $70 < \text{cu} < 250$ kPa).

Si fa presente che il valore di Vs30 sopra riportato è relativo all'intervallo di profondità compreso fra 0 e 30 metri.

Massa, Marzo 2008

per Geotirreno

GEO TIRRENO s.r.l.

Viale Stazione, 39

54100 MASSA

C.F. e P. IVA 00713690451

<i>File: relaz. tecnica.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	
<p align="center">Sez. 7.5: "Produzione ed Erogazione Servizi" ATTIVITÀ DI CANTIERE, STRATIGRAFIE E INDAGINI GEOTECNICHE IN SITO</p>			

**Classificazione dei suoli secondo la normativa italiana
(DM 14 settembre 2005, Ministero Infrastrutture e Trasporti)**

In base al valore della VS30 si identificano le seguenti le **categorie del suolo di fondazione**:

A - *Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi* caratterizzati da valori di **VS30 superiori a 800 m/s**, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.

B - *Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti*, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di **VS30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s** (ovvero resistenza penetrometrica media NSPT > 50, o coesione non drenata media $c_u > 250$ kPa).

C - *Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di **VS30 compresi tra 180 e 360 m/s** ($15 < \text{NSPT} < 50$, $70 < c_u < 250$ kPa).

D - *Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti*, caratterizzati da valori di **VS30 < 180 m/s** ($\text{NSPT} < 15$, $c_u < 70$ kPa).

E - *Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali*, con valori di VS simili a quelli dei tipi C o D e **spessore compreso tra 5 e 20 m**, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con **VS > 800 m/s**.

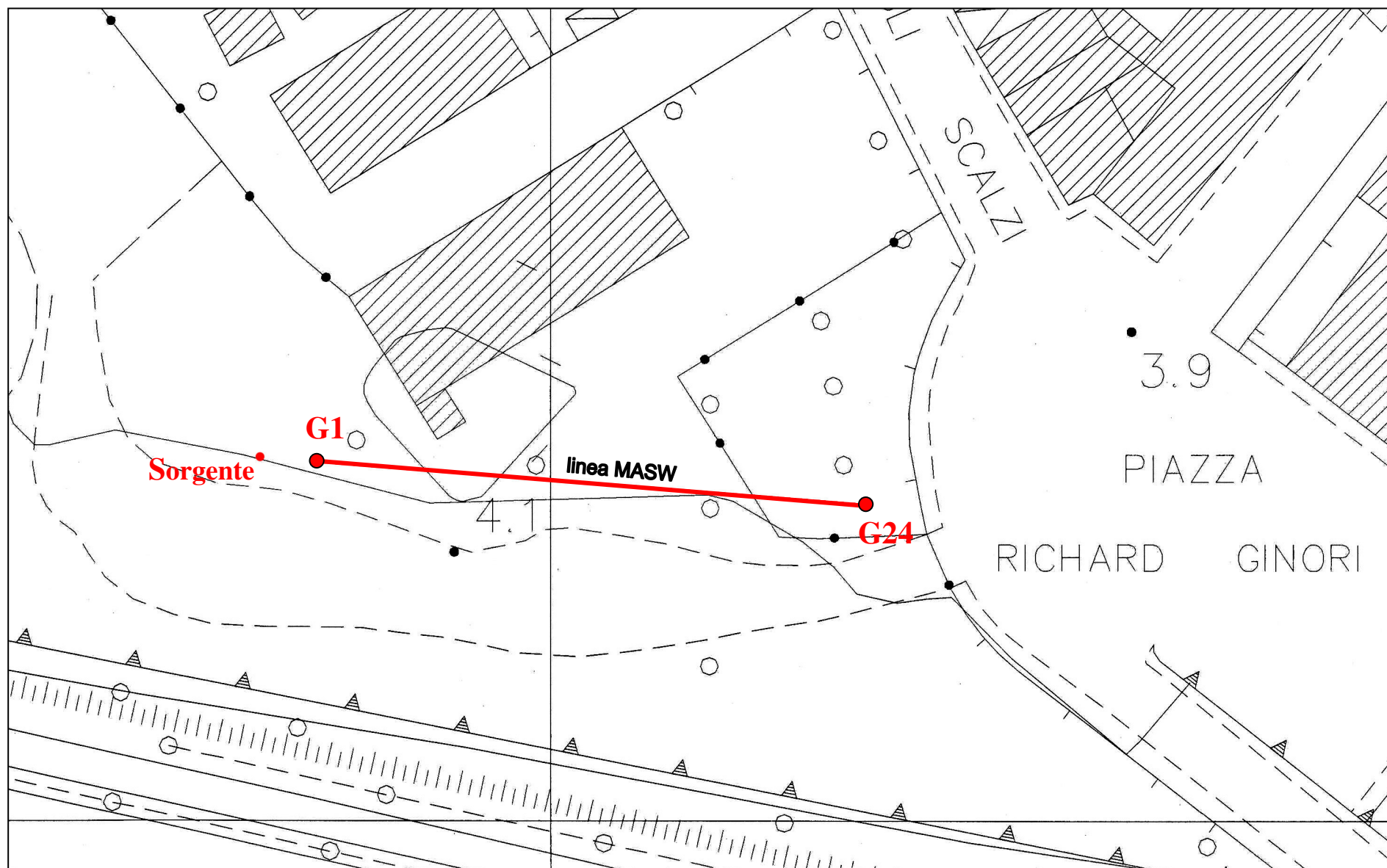
Per i terreni di seguito illustrati andranno svolti studi speciali per la definizione dell'azione sismica:

S1 - Terreni che includono uno strato di almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ($PI > 40$) e contenuto di acqua, con $10 < c_u < 20$ kPa e caratterizzati da valori di **VS30 < 100 m/s**.

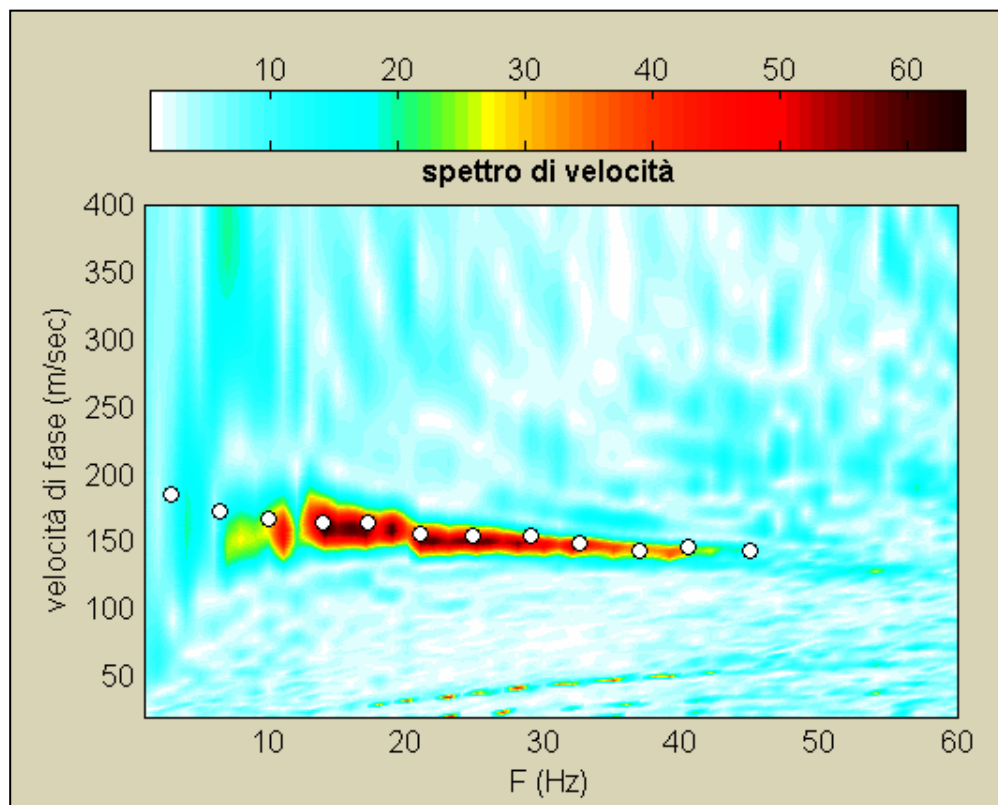
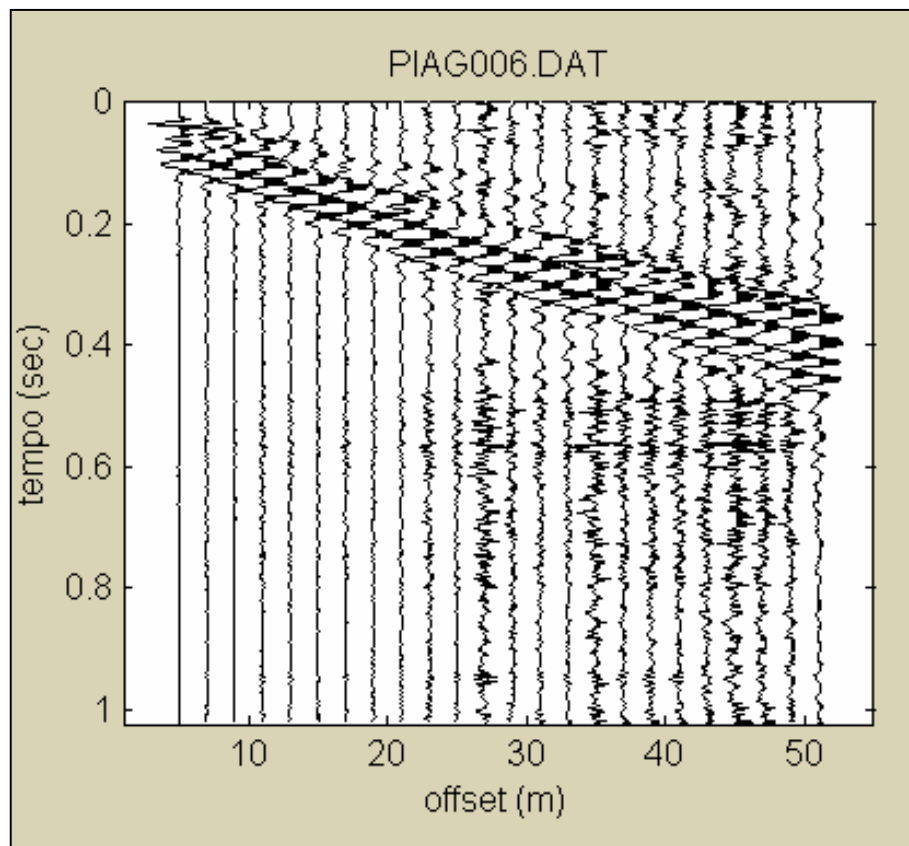
S2 - Terreni soggetti a liquefazione, argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.

UBICAZIONE STESA SISMICA

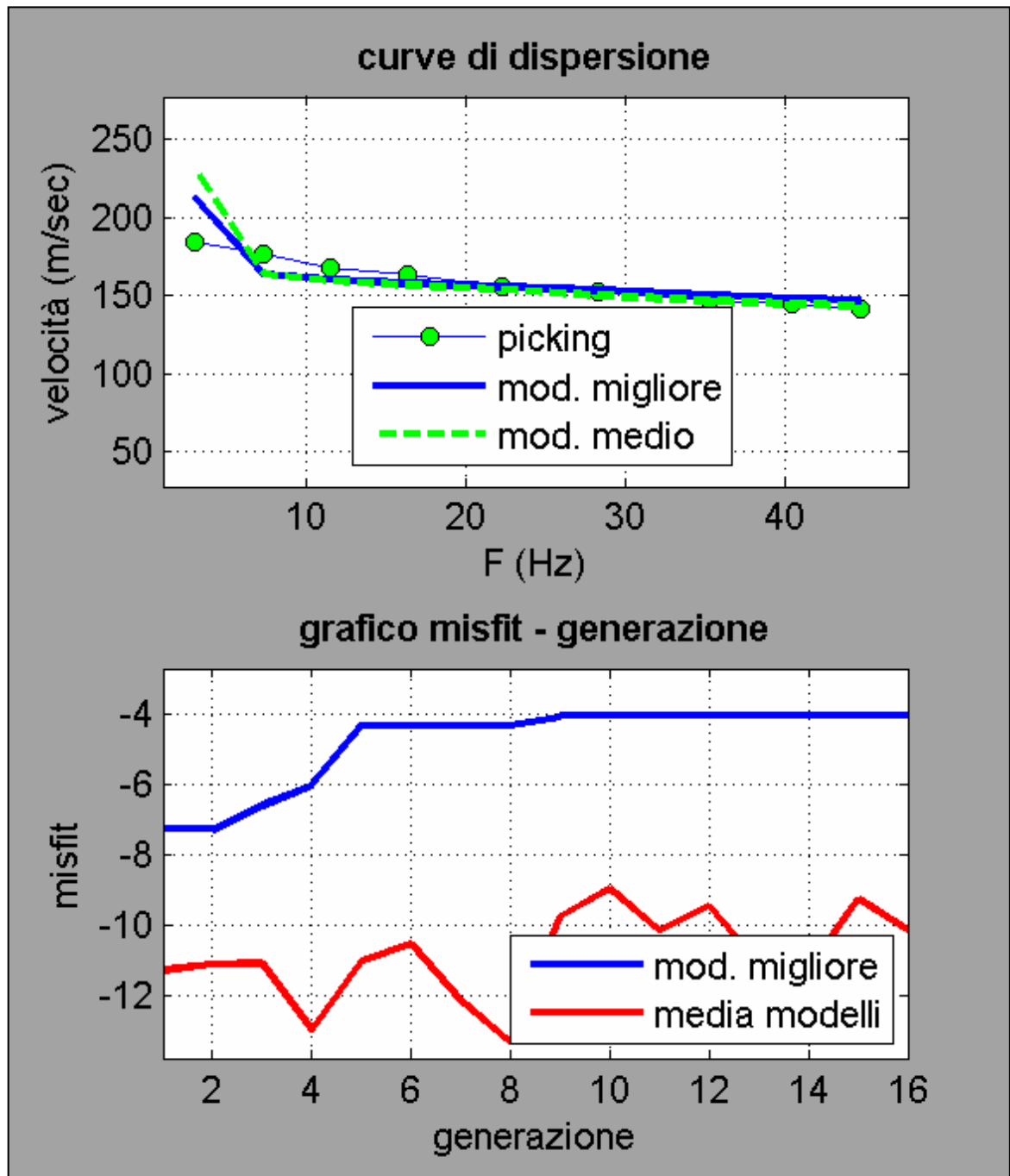
Località.: Via S.Michele, Quartiere Porta a Piagge, Pisa



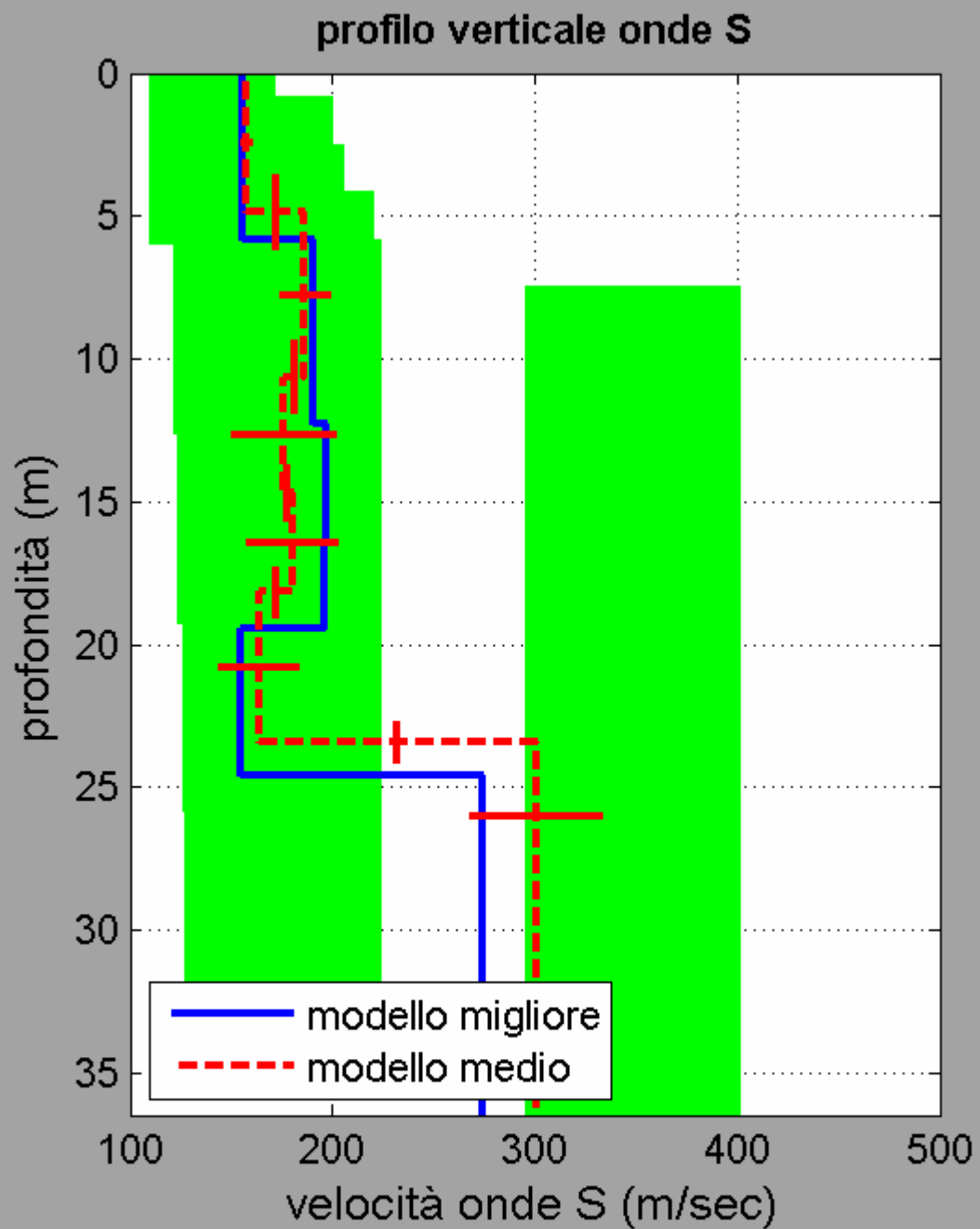
File: allegati.doc	Codifica: Rel. Tec.	Rev. 0 del 07/2007	



<i>File: allegati.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	



File: allegati.doc	Codifica: Rel. Tec.	Rev. 0 del 07/2007	



dataset: PIAG006.DAT

curva di dispersione: piagge10.cdp

modello migliore VS30: 187 m/sec

modello medio VS30: 190 m/sec

<i>File: allegati.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	

Numero totale di punti (coppie frequenza-velocità) della curva di dispersione: 9

Curva di dispersione: piagge10.cd

Numero di individui: 10

Numero di generazioni: 16

generazione: 1; misfit medio e migliore: -11.2864 -7.29279
generazione: 2; misfit medio e migliore: -11.1262 -7.29279
generazione: 3; misfit medio e migliore: -11.0824 -6.6036
generazione: 4; misfit medio e migliore: -13.0091 -6.02998
generazione: 5; misfit medio e migliore: -11.0484 -4.33263
generazione: 6; misfit medio e migliore: -10.5603 -4.33263
generazione: 7; misfit medio e migliore: -12.1509 -4.33263
generazione: 8; misfit medio e migliore: -13.3441 -4.33263
generazione: 9; misfit medio e migliore: -9.7659 -4.0731
generazione: 10; misfit medio e migliore: -8.968 -4.0731
generazione: 11; misfit medio e migliore: -10.16 -4.07311
generazione: 12; misfit medio e migliore: -9.4628 -4.0731
generazione: 13; misfit medio e migliore: -11.074 -4.07311
generazione: 14; misfit medio e migliore: -11.2479 -4.07311
generazione: 15; misfit medio e migliore: -9.2548 -4.0731
generazione: 16; misfit medio e migliore: -10.1756 -4.07311

=====

MODELLO MEDIO

VS (m/sec):	148.8434	171.6015	170.4583	198.637	152.82	304.0186
Deviazione standard (m/sec):	6.58834	2.5317	9.2111	8.6386	12.4822	10.2637
Spessore (m):	2.0741	4.6838	4.5909	4.8681	5.5438	
Deviazione standard (m):	1.0752	1.0111	1.4091	0.91651	0.90952	

<i>File: allegati.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	

curva di dispersione (frequenza - velocità di fase onde di Rayleigh)

modo: 0 (modo fondamentale)

modello medio

f(Hz)	VR(m/sec)
2.9712	231.2932
7.32143	163.941
11.5357	159.4652
16.2938	156.758
22.2753	153.6212
28.2569	150.2199
35.326	146.6982
40.4919	144.7951
44.7062	143.6428

=====

MODELLO MIGLIORE

VS (m/sec):	147.5842	170.5008	173.8109	209.9931	141.2614	298.3706
spessore (m):	1.5187	5.0827	5.7337	4.2507	6.12	

curva di dispersione (frequenza - velocità di fase onde di Rayleigh)

modo: 0 (modo fondamentale)

modello migliore

f(Hz)	VR(m/sec)
2.9712	212.9728
7.32143	163.8645
11.5357	160.281
16.2938	157.8442
22.2753	155.6737

<i>File: allegati.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	

28.2569	153.3686
35.326	150.3605
40.4919	148.2019
44.7062	146.6055

Massima Profondità di Penetrazione in Approssimazione "Steady State Rayleigh Method": 35 m

VS5 del modello medio: 161 m/sec

VS5 del modello migliore: 163 m/sec

VS20 del modello medio: 170 m/sec

VS20 del modello migliore: 170 m/sec

VS30 del modello medio: 190 m/sec

VS30 del modello migliore: 187 m/sec

Possibile Tipo di Suolo: C

(sulla base del modello medio)

<i>File: allegati.doc</i>	<i>Codifica: Rel. Tec.</i>	<i>Rev. 0 del 07/2007</i>	

