Rev.	Descrizione	Data	Redatto	Verificato	Approvato
D					
C					
B					
A	EMISSIONE	18/07/2011	Notari	Baldi	Baldi

COMMITTENTE : **Infrastrutture Liguria s.r.l.**

Archivio n° 4113/11

Commessa n° S279

LOCALITA': Comune di Noli (SV)

INDAGINE: Ricostruzione del sottosuolo

OGGETTO: Rapporto tecnico di indagine geofisica

4	1	1	3	S	G	G	0	1	A	data Lug 2011

Nome file: 4113SGG01A.doc

N° Copie	N° Pagine	Formato
		A4 ☒ A3 ☐

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

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

INDICE

1 - INTRODUZIONE.....3

2 - INDAGINI SISMICHE SVOLTE 4

3 – STRUMENTAZIONI, PERSONALE IMPIEGATO E QUALITA' 7

4 - FINALITÀ DELLA PROSPEZIONE 8

5 – ESECUZIONE DEI RILIEVI 9

6 – ANALISI DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI VOLUME "P" 12

7 – ANALISI DI VELOCITA' DELLE ONDE SUPERFICIALI "R" 14

8 – ANALISI DEI RISULTATI 17

ALLEGATO

4113SGG02A	Planimetria ubicativa, profili sismici a rifrazione, prova MASW	scala	1:1000 1:500

1 - INTRODUZIONE

Il presente rapporto riferisce i risultati ottenuti da un'indagine sismica condotta per conto di **Infrastrutture Liguria s.r.l.** nell'ambito degli studi geologici per le opere accessorie alla galleria di bypass della S.S. Aurelia nel Comune di Noli (SV).

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 Vs_{30} utile per la classificazione del terreno nelle varie categorie di suolo come prescritto dalla nuova normativa antisismica.

A tal scopo, per ogni area indicata dal dott. Minuto, è stato realizzato un profilo sismico tomografico 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 è stata realizzata, in corrispondenza di ciascun stendimento sismico, una prova MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) in modo da ricostruire le distribuzioni della velocità delle onde di taglio "S".

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 nel giorno 08 Luglio 2011.

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).

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), sono stati realizzati un profilo sismico avente lunghezza di 72 metri lineari ed uno avente lunghezza di 96 metri nei luoghi indicati dalla committenza.

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 misure delle onde di Rayleigh tramite la tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves).

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} %). Attraverso i valori di velocità di propagazione delle onde S (V_S) è stato calcolato il valore del Vs_{30} 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 parametro Vs_{30} corrisponde alla velocità equivalente di propagazione entro i primi 30 metri di profondità delle onde di taglio ed è calcolata con la seguente espressione:

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove h_i e V_i indicano rispettivamente lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei primi 30 metri di profondità.

Le velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi (Sr = 100%) dipendono talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tali valori possono non essere rappresentativi delle proprietà meccaniche del materiale in questione secondo le relazioni matematiche espresse in precedenza; invece le velocità delle onde "S" e delle onde di superficie, sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni sotto falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidezza del terreno sono quelle di taglio e, subordinatamente, le onde di superficie.

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°	**prove MASW n°**	**Interdistanza Geofoni (m)**	**Geofoni n°**	**Lunghezza * (m)**
1	1	**3**	**24**	**72**
2	1	**4**	**24**	**96**

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

L'ubicazione delle prove sismiche sono riportate nella tavola allegata: *Planimetria ubicativa, profili sismici a rifrazione e prova MASW.*

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-52
1	Computer portatile Acer 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	Massa battente da 5 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
- Prospettori geofisici D. NOTARI
- Interpretazione D. NOTARI
- Editing D. NOTARI

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 Nissan Navara double cab DM270XH

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";*
- *computo della* Vs_{30}.

5 – ESECUZIONE DEI RILIEVI

Profilo sismico tomografico a rifrazione onde "P"

Lo scopo della prova consiste nel determinare il profilo di rigidezza 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 72 m (comprensiva dei punti di scoppio esterni) con sistema ricevente composto da 24 geofoni utilizzati per lo svolgimento dell'indagine:

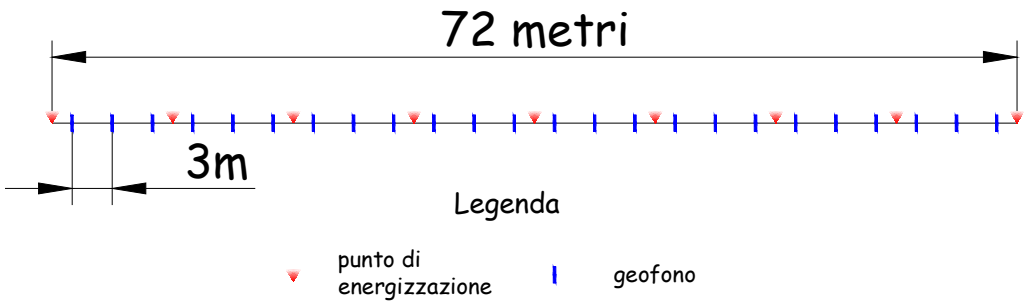


***Figura 5.1**: Rappresentazione schematica di array sismico a rifrazione*

Come sistema energizzante per la generazione delle onde P è stata adottata una massa battente da 5 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: 3 e 4 metri;*
- *Frequenza geofoni: 4.5 Hz;*
- *Spaziatura dei tiri: 9 e 12 metri;*
- *Sorgente: massa battente da 5 kg*

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

Lo scopo della prova MASW è quello di ricostruire il profilo di rigidezza 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.

Per ottenere una buona risoluzione della di curva di dispersione ed una buona affidabilità del segnale misurato sono state effettuate varie configurazioni spaziali. L'analisi degli spettri in fase d'elaborazione ha indicato che la configurazione spaziale più adatta per il sito di Noli corrispondeva ad una spaziatura dei geofoni pari a 3 metri con sorgente posta a 3 metri dal primo geofono per la base 1 e spaziatura pari a 4 metri con sorgente posta a 4 metri dal primo geofono per la base 2. (fig. 5.3)

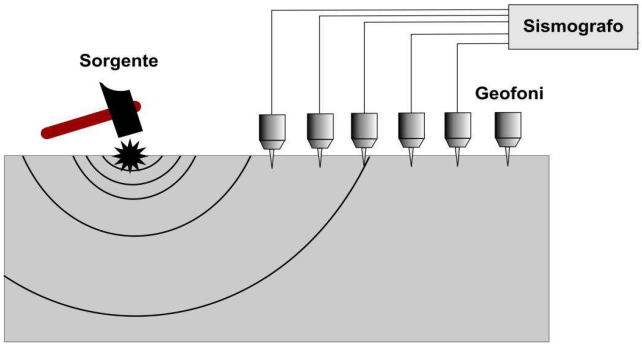


***Figura 5.2**: Rappresentazione schematica di array per prova MASW*

6 – ANALISI DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI VOLUME "P"

Profilo sismico tomografico a rifrazione

La fase d'interpretazione dei dati acquisiti in campagna (fig. 6.1 e 6.2) è stata preceduta dalla lettura dei tempi sismici registrati.





***Figure 6.1 e 6.2**: Acquisizione dei dati sismici*

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 x 10^{-3} sec.

Dopo, per mezzo dello specifico programma SEISOPT@PROV5.0, 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 per il profilo sismico 1 è stata utilizzata una maglia rettangolare di dimensioni 1,1 x 0,5 metri mentre per il profilo sismico 2 è stata utilizzata una maglia rettangolare di dimensioni 1,4 x 0,7 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 dell'interpretazione operata, risultano essere i seguenti:

profilo sismico	precisione (s^2)	n° di iterazioni
1	$1,1^{-006}$	58.014
2	$1,4^{-006}$	44.783

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

Sullo stesso allineamento del profilo sismico è stata eseguita 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 Vs_{30}, 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 Vs_{30} della prova MASW è riportato, per convenzione, al centro del relativo stendimento geofonico (tav. 4113SGG02A).

Per l'interpretazione dei dati sperimentali è stato utilizzato uno specifico programma (winMASW Version 4.3 Pro).

Il profilo verticale di Vs 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. 7.1).

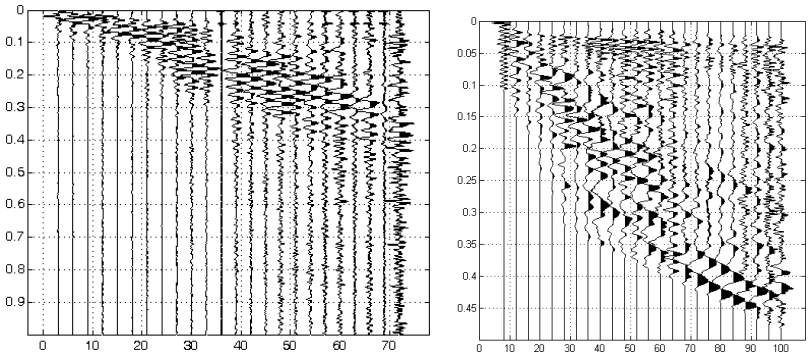


Figura 7.1- *Dati di campagna dei profili sismici 1 e 2.*

Sullo spettro di velocità (fig. 7.2 e 7.3) 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.

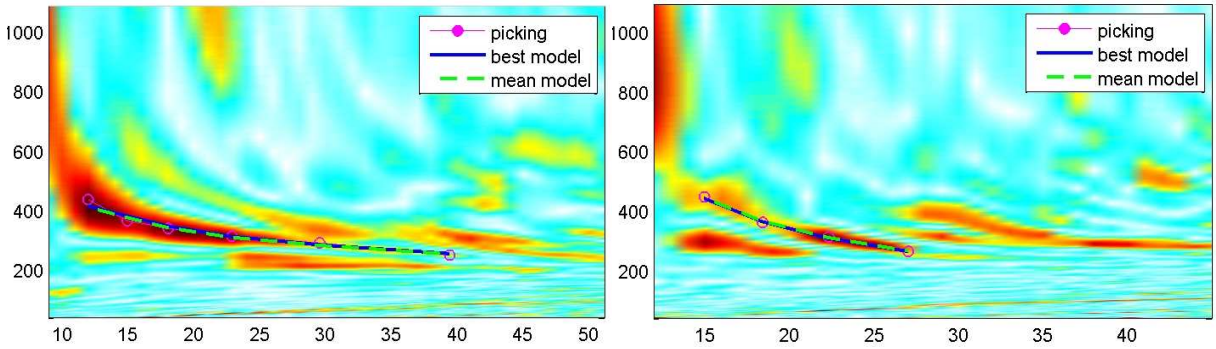


Figura 7.2 e 7.3 - *Spettro di velocità tratto dalle prove MASW e relativo picking.*

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 tre strati, i cui valori di Vs e degli spessori sono definiti sulla base di osservazioni desunte in campagna e dalla tomografia sismica a rifrazione.

Successivamente per ottenere il profilo verticale di Vs 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 Vs 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.

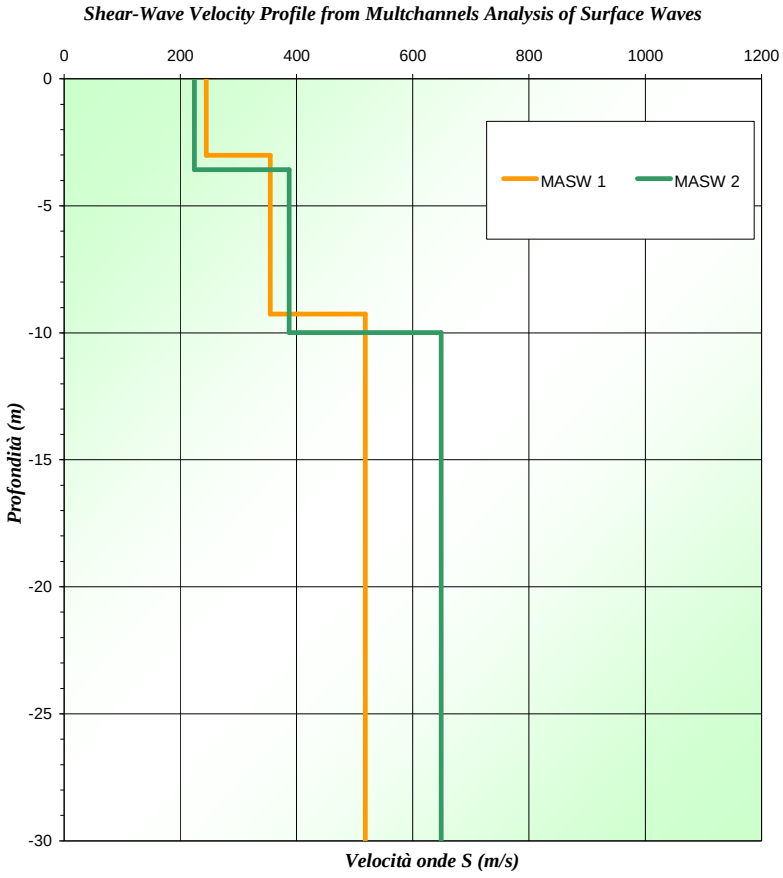


Figura 7.4 *Modello interpretativo, tratto dalle prove MASW.*

L’analisi dei dati attraverso l’uso di algoritmi genetici porta in ultima analisi alla definizione del profilo verticale della Vs (fig. 7.4) in funzione della profondità con associato il valore del Vs 30.

8 – 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 MASW.

I risultati dell'indagine geofisica di seguito descritti sono stati riportati nella tavola allegata 4113SGG02A.

Profilo sismico tomografico a rifrazione 1

Nel profilo si evidenzia la presenza di un primo sismostrato (identificato in tavola come "A") con spessore di circa 3-4 metri delimitato inferiormente dalla curva di isovelocità di 2.000 m/s; la sezione sismica, nella zona compresa tra il punto di sparo 8 ed il punto di sparo 9, risulta alterata dalla presenza di uno strato superficiale compattato e/o cementato per la costruzione del parcheggio dello stabilimento balneare.

Al di sotto è presente un secondo sismostrato (B), dello spessore medio di circa 6 metri, caratterizzato da velocità sismiche delle onde P comprese tra 2.000 e 3.000 m/s e da un andamento lievemente immergente verso Est-Sud-Est.

Infine l'ultimo sismostrato (C), identificabile come bedrock sismico, è caratterizzato da velocità sismiche superiori a 3.000 m/s.

Prova MASW

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	3.0	245
3.0	9.2	355
9.2	≈30	518

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

In definitiva, la prova MASW realizzata evidenzia che l'area in esame può essere collocata, secondo la normativa italiana, in **classe B**.

Profilo sismico tomografico a rifrazione 2

Il profilo sismico 2 presenta caratteristiche simili al profilo 1 anche se l'immersione delle curve di isovelocità risulta speculare.

Come nel profilo 1 si può individuare un primo sismostrato dall'andamento tabulare (A) caratterizzato da velocità sismiche inferiori a 2.000 m/s e spessore medio di circa 5 metri. Al di sotto del primo sismostrato è presente un livello caratterizzato da velocità sismiche comprese tra 2.000 e 3.000 m/s (B) che sembra assottigliarsi procedendo da Ovest a Est lungo il profilo sismico, fino a non essere più identificabile nella porzione orientale della sezione.

Il bedrrock sismico (C) risulta essere caratterizzato da velocità sismiche superiori a 3.000 m/s e si presenta a quote maggiori nella porzione orientale della sezione.

Prova MASW

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	224
3.5	10.0	387
10.0	≈30	649

Per questo terreno il valore di Vs30 (calcolato da p.c.) risulta pari a 473 m/s.

In definitiva, la prova MASW realizzata evidenzia che l'area in esame può essere collocata, secondo la normativa italiana, in **classe B**.

Siena, Luglio 2011

Dr. Geol. Antonio Maria Baldi