



**PROVINCIA DI UDINE**

SERVIZIO DIFESA DEL SUOLO  
E PROTEZIONE CIVILE

## **CONVEGNO**

**LA GEOFISICA E LA NUOVA  
NORMATIVA SISMICA**



*UDINE, Sala del Consiglio Provinciale  
Lunedì 23 febbraio 2004*

CON IL PATROCINIO

**ORDINE DEI GEOLOGI  
FRIULI - VENEZIA GIULIA**

# **ESPERIENZE DI MISURA $V_{s30}$ CON LA TECNICA REFRACTION MICROTREMOR (ReMi)**

**Luigi Veronese\* Tomas Garbari°**

\* geologo, Servizio Geologico Provincia Autonoma di Trento

° geologo, libero professionista, contrattista presso il Servizio Geologico P.A.T.

## Introduzione

L'Ordinanza 3274 del Presidente del Consiglio dei Ministri ha introdotto la nuova normativa tecnica in materia di progettazione antisismica, che ci adegua allo standard europeo e mondiale. Oltre alle importanti novità relative alle metodologie di calcolo ingegneristico è stata introdotta la classificazione dei suoli per la definizione dell'azione sismica di progetto in 5 categorie principali (dalla A alla E) a cui ne sono aggiunte altre 2 (S1 ed S2 per le quali sono richiesti studi speciali per definire l'azione sismica da considerare), sulla base del parametro  $V_{s30}$ . Questo rappresenta la velocità media di propagazione delle onde S entro 30m di profondità (al di sotto del piano di fondazione) ed è calcolato mediante la seguente espressione:

$$V_{s30} = 30 / \sum_{i=1, N} h_i / V_i$$

dove  $h_i$  e  $V_i$  indicano 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 30 metri superiori. La proposta della nuova normativa conclude che il sito verrà classificato sulla base del valore di  $V_{s30}$  se disponibile, altrimenti sulla base del valore di  $N_{spt}$  o della  $c_u$ .

Viene in sostanza enfatizzata l'importanza del parametro  $V_s$  che com'è noto è il parametro geofisico che meglio rappresenta la variabilità geotecnica dei materiali geologici presenti nel sottosuolo.

Le tecniche investigative per l'acquisizione di questo parametro sono essenzialmente di tre tipi:

- Prove in foro (down hole e cross hole)
- Profili sismici (riflessione o rifrazione) con geofoni orizzontali ed energizzatori di onde SH.
- Modellazione del sottosuolo mediante l'analisi delle onde di Rayleigh (SASW, MASW e Refraction Microtremor) e l'impiego di geofoni verticali.

Le prime richiedono la realizzazione di fori di sondaggio appositamente attrezzati per un ottimale accoppiamento dei sensori e quindi un consistente impegno economico.

Le seconde offrono risultati qualitativamente elevati ma costi di esecuzione impegnativi.

Le ultime, al contrario, vengono realizzate (fa eccezione il SASW) con procedure operative molto simili a quelle applicate per la comune microsismica e sono di conseguenza meno onerose ed hanno un grado di incertezza nella determinazione della  $V_s < 20\%$ . La tecnica MASW consente una dettagliatissima ricostruzione della distribuzione della velocità delle onde S nel sottosuolo, ma soffre di limitazioni per quanto riguarda la profondità di investigazione che normalmente, con le tecniche elaborative attualmente disponibili, difficilmente supera la ventina di metri (in presenza di materiali sciolti normalconsolidati).

La tecnica di Refraction Microtremor (ReMi) al contrario consente di raggiungere profondità ragguardevoli fornendo un profilo verticale

medio delle Vs relative al volume di sottosuolo sotteso dallo stendimento messo in opera.

Questa tecnica viene estensivamente utilizzata negli Stati Uniti nell'ambito del NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) tanto che il software fornisce anche direttamente il valore di  $V_{s30}$  e la categoria della classificazione del suolo secondo la normativa americana.

Il Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento ha iniziato la sperimentazione di questo metodo geognostico nell'autunno del 2002 e, a quella data, l'interesse principale risiedeva nel fatto di poter acquisire informazioni circa la struttura del sottosuolo anche in ambienti "ostili" per i metodi geofisici in generale, quali quelli urbani ed urbanizzati. Ciò è possibile grazie al fatto che il rumore rappresenta la fonte di segnale utile per ottenere le informazioni richieste.

Le misure di  $V_{s30}$  mediante questa tecnica sono iniziate nel nostro territorio alla fine del 2002 precedentemente all'entrata in vigore dell'Ordinanza per alcuni progetti localizzati nel Trentino meridionale. Pur non avendo alcun comune classificato come sismico la Provincia di Trento aveva redatto uno studio di pericolosità del suo territorio giungendo nel 1995 ad una zonizzazione che, sulla base della competenza primaria che le compete in materia urbanistica, era stata inserita nella Carta di sintesi geologica allegata al Piano Urbanistico Provinciale (P.U.P.). Ma anche in precedenza tutti gli edifici pubblici venivano progettati come se l'area fosse classificata in terza categoria. L'attività investigativa ha naturalmente subito un significativo impulso dopo l'entrata in vigore dell'Ordinanza sia a supporto dell'attività di progettazione che in maniera sistematica per quanto riguarda l'area di sperimentazione del comune di Rovereto.

L'output finale del software (che viene prodotto su una macro di Excell) è stato opportunamente modificato in maniera da fornire direttamente la categoria del suolo secondo la normativa tecnica in vigore.

## **Le onde di superficie**

Il profilo verticale delle Vs può essere ricavato per inversione o per modellizzazione diretta della velocità di fase delle onde di superficie (Rayleigh e/o Love) (Dorman e Ewing, 1962).

Le onde di Rayleigh (1885) costituiscono un particolare tipo di onde di superficie che si trasmettono sulla superficie libera di un mezzo isotropo e omogeneo e sono il risultato dell'interferenza tra onde di pressione (P-waves) e di taglio verticali ( $S_v$ -waves).

In un mezzo stratificato queste onde sono di tipo guidato e dispersivo, e vengono definite pseudo-Rayleigh. Per questioni di esposizione, nel testo qui presentato, verranno chiamate semplicemente di Rayleigh o di superficie.

La dispersione è una deformazione di un treno d'onde dovuta ad una variazione di propagazione di velocità con la frequenza. Le componenti a frequenza minore penetrano più in profondità rispetto a quelle a

frequenza maggiore, per un dato modo, e presentano normalmente più elevate velocità di fase.

Il calcolo del profilo delle velocità delle onde di Rayleigh,  $V(\text{fase})/\text{frequenza}$ , può essere convertito nel profilo di  $V_s/\text{profondità}$ .

Nazarian e Stokoe (1984) hanno presentato per primi il metodo SASW, che utilizza una sorgente attiva e due soli sismometri da 1Hz spazati da 1m fino a 500m. I sismometri sono polarizzati verticalmente e quindi i profili di  $V_s$  sono ricavati dallo studio delle velocità di fase delle onde di Rayleigh. Le velocità di fase sono ricavate per confronto diretto degli spettri di ampiezza e fase di ciascuna coppia di sismometri, ottenuti istantaneamente in sito tramite un oscilloscopio che esegue una trasformata veloce di Fourier. Poiché il metodo non prevede il salvataggio delle tracce temporali e l'interpretazione è svolta nel dominio delle frequenze, si suppone che gli arrivi più energetici appartengano al treno d'onde di Rayleigh. Nelle situazioni in cui il rumore sovrasta la potenza della sorgente artificiale, o in cui gli arrivi delle onde di pressione sono più energetici, questa metodologia non porta a risultati soddisfacenti per il fatto che, nel dominio delle frequenze, non è possibile separare le onde di Rayleigh da quelle di altra natura.

Il MASW (Park et al., 1999) è stato sviluppato in parte per superare le difficoltà dell'applicazione del SASW in ambienti rumorosi. La registrazione simultanea di 12 o più canali (separati da 0,5m a 10m) fornisce una ridondanza statistica delle misure di velocità di fase e ne avvalorata la veridicità. Il salvataggio delle tracce nel dominio temporale, previsto dal metodo, permette inoltre di distinguere e evidenziare, durante l'analisi, le onde di Rayleigh presenti nel record che, normalmente, sono caratterizzate da un'elevata ampiezza di segnale (circa il 60% dell'energia prodotta dalla sorgente artificiale si distribuisce in onde di superficie). Una particolare analisi spettrale, "overtone analysis", produce un grafico *Velocità di fase-frequenza* in cui si può distinguere il modo fondamentale delle onde di superficie da cui ricavare la curva di dispersione ed il profilo delle  $V_s$  per successiva inversione 1-D. La tecnica prevede inoltre di eseguire misure ripetute spostandosi nella direzione di allineamento per risalire ad un profilo bidimensionale che evidenzia le variazioni laterali delle  $V_s$ . Le modalità esecutive e, di conseguenza, i costi si elevano risultando molto simili a quelli delle indagini di sismica a riflessione ad alta risoluzione.

Il metodo dei "Refraction Microtremor" (Louie, 2001) combina la semplicità operativa del SASW con l'elevata risoluzione dei primi strati propria del MASW. Registrando i microtremori mediante uno stendimento lineare con più di 12 geofoni a bassa frequenza il metodo consente una rapida ed agevole acquisizione dei dati senza dover operare con un sorgente attiva. Un profilo ReMi può essere realizzato, al limite, anche da un solo operatore.

## Generalità sul metodo ReMi

La tecnica di analisi del sottosuolo mediante l'uso dei microtremori prende origine dagli studi e dalle sperimentazioni condotte da J.Louie presso la Nevada University. Il software commerciale (ReMi®) che supporta questo tipo di elaborazione è stato prodotto dalla Optim LLC (Reno, Nevada, USA).

L'analisi dei microtremori viene effettuata utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione (a geofono singolo) disposta sul terreno con array lineare, da 12 a 48 geofoni; per ottenere una buona risoluzione in termine di frequenza, oltre ad utilizzare geofoni con bassa frequenza di risonanza (4-14 Hz raccomandati), è indispensabile allungare il tempo di registrazione (15-30s) rispetto alla sismica a rifrazione tradizionale. L'uso di un simografo digitale con elevata dinamica consente di dimezzare la frequenza utile campionabile rispetto a quella nominale dei geofoni impiegati.

Si possono così registrare onde di superficie il cui contenuto in frequenza copre un range da 25-30Hz fino a 2 Hz che, in condizioni ottimali, offre una dettagliata ricostruzione dell'andamento delle Vs relativamente ai primi cento metri di profondità.

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 della linea sismica e nel rappresentarne lo spettro di potenza su un grafico  $p-f$ .

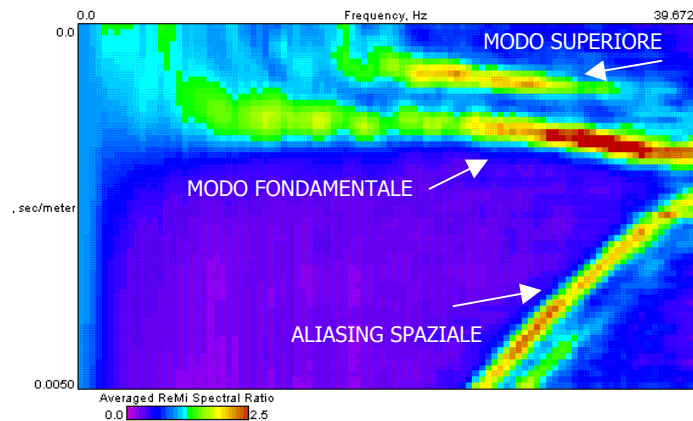


Fig. 1 esempio di spettro di potenza  $p-f$ .

In questa immagine risaltano gli andamenti che possiedono sia una spiccata coerenza di fase che una potenza significativa, ed è possibile un riconoscimento visivo delle onde di Rayleigh, che hanno carattere dispersivo, da quelle riconducibili ad altri modi e tipi di onde (onde di Rayleigh di ordine superiore, onde di pressione, suono e rumore incoerente).

A questo punto l'operatore, in maniera arbitraria ed in base all'esperienza, esegue un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più slowness ( $p$  o  $1/\text{velocità di fase}$ ) per alcune frequenze. Tali valori vengono in seguito plottati su un diagramma *periodo-velocità*

*di fase* per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello diretto.

## **Operazioni di campagna**

Le metodiche analitiche del sistema rendono possibile operare in ambienti fortemente "inquinati" da rumore urbano e industriale tanto che ogni sito si presta ad essere studiato a patto che ci sia la possibilità di gestire in "sicurezza" uno stendimento complessivo di 50-200ml.

Osservate le comuni precauzioni che si adottano in qualsiasi campagna sismica (accoppiamento e verticalità dei geofoni, ad es.) si stabilisce la distanza intergeofonica (che sarà funzionale al target e compatibile con l'area disponibile), si impostano i parametri di acquisizione, intervallo di campionamento (sample rate, che varia da 2 a 4 ms) e tempo di registrazione (record length, da 15 a 30 s), ripetendo le misure dalle 4 alle 6 volte.

Nel caso in cui si sia in presenza di una sorgente fissa di rumore è consigliabile ruotare di 90° l'intero stendimento e ripetere alcune acquisizioni; l'analisi complessiva del segnale mitiga l'effetto della unidirezionalità della sorgente e evita di incorrere nella sottostima della velocità di fase durante la più delicata operazione di picking.

La spaziatura geofonica rappresenta una sorta di filtro in frequenza per il segnale che può arrivare da tutte le direzioni. E' quindi implicito che maggiore è la spaziatura minore è la frequenza del segnale utile campionabile e di conseguenza maggiore è la profondità di investigazione. Questo fattore diventa interessante, e fondamentale, qualora l'oggetto dell'indagine sia la modellazione profonda, mentre può essere trascurabile se la finalità della misura è la definizione del profilo sismico verticale relativo a poche decine di metri.

Anche se l'esperienza fin qui maturata consente di affermare che la gran parte delle aree di fondovalle o prossime a centri abitati o a vie di comunicazione è in grado di produrre un "noise" utile è tuttavia preferibile poter disporre di una fonte di rumore vicina per arricchire lo spettro di frequenze medio alte (25-35Hz). In questo modo si potrà dettagliare il modello della porzione superficiale di sottosuolo che è quello di maggiore interesse ai fini del calcolo del parametro  $V_{s30}$ .

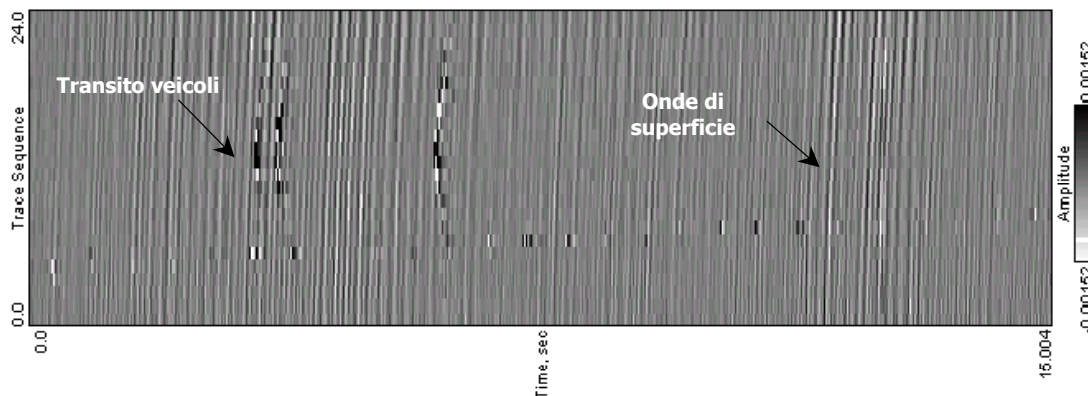
I profili ReMi possono essere realizzati anche su terreni duri quali ad esempio le pavimentazioni stradali mediante preparazione preventiva di fori per alloggiare i geofoni o, più semplicemente, adottando dei supporti o ancora sfruttando le intercapedini presenti sui marciapiedi al contatto con la profilatura in pietra.

## **Analisi del segnale**

Nella prima fase elaborativa dei record il ruolo dell'interprete è abbastanza limitato essendo guidato a seguire alcuni passi obbligati tra cui la conversione dei file dati in forma seg-Y e il preprocess semiautomatizzato che filtra ed equalizza le tracce. Viene richiesta l'introduzione di alcuni parametri quali la geometria (geophone spacing)

utilizzata, la frequenza massima da indagare, la velocità di fase minima di partenza ed il numero di vettori "slowness" ( $n_p=2*n$  geofoni). Questi ultimi tre parametri, opportunamente scelti, concorrono ad aumentare il dettaglio dello spettro di potenza  $p-f$  e a renderlo più adatto ad una campionatura meno ambigua della curva di dispersione.

Fig.2 time serie filtrata con evidenziate le onde di superficie



Il numero di vettori "slowness" agisce sulla dimensione dei pixel e sulla risoluzione verticale dell'immagine  $p-f$ ; la frequenza massima, fissata a 25Hz di default, se aumentata (a condizione che vi sia segnale utile) può agevolare una maggiore conoscenza dell'andamento delle Vs nella porzione più superficiale del terreno. Si ricorda che il dettaglio laterale dell'immagine  $p-f$  è legato alla risoluzione in termini di frequenza che, a sua volta, deriva dalla scelta del tempo di registrazione (ad esempio ad una registrazione di 15 s corrisponde una risoluzione di 0.066Hz) e pertanto non cambia al variare della frequenza massima da indagare. La velocità di fase minima agisce sulla rappresentazione della potenza significativa del segnale; essa è fissata di default a 200m/s e diminuendola si ottiene un incremento dell'intensità dello spettro ma, per i valori eccessivamente bassi (<50m/s) si registra un eccessivo schiacciamento verticale dell'immagine  $p-f$ . Questa operazione è abbastanza delicata ed importante in quanto condiziona la morfologia del segnale dispersivo. Si tratta in sostanza di un'operazione di zoom sullo spettro ed è stato riscontrato che un eccesso di amplificazione può indurre incertezza nel riconoscimento della corretta posizione producendo, come conseguenza, una curva di dispersione poco "smoothed" che rende meno precisa la modellazione diretta (fig.1).

Quindi il corretto dimensionamento dei parametri sopra descritti, suggeriti in buona parte dall'esperienza dell'interprete, ha lo scopo di diminuire il grado di incertezza e di arbitrarietà che distingue le operazioni di campionatura della curva di dispersione (picking).

## Picking

Muovendosi con il puntatore del mouse sopra l'immagine  $p-f$  è possibile selezionare un certo numero di triplette di valori ( $f, p, V_{\text{apparente}}$ ) ricalcando il trend visualizzato nel grafico  $p-f$ . La scelta del "picking" è condizionata da alcune regole che possono essere riassunte nei seguenti punti:

- è consigliabile selezionare esclusivamente quelle triplette contraddistinte da una buona definizione dello spettro di potenza, e cioè quello che è contraddistinto da elevata coerenza e intensità di segnale;
- a parità di frequenza la velocità scelta non deve essere quella coincidente con il picco massimo di intensità del segnale, come accade nel MASW dove la sorgente energetica è in linea con lo stendimento, bensì quella più bassa prossima al confine tra incoerenza propria del rumore e segnale; questo accorgimento è motivato dal fatto che i microtremori, per definizione, non provengono da un'unica sorgente definita e fissa e che l'energia del rumore che attraversa obliquamente lo stendimento appare nell'immagine  $p-f$  con una velocità apparente ( $V_a$ ) più elevata di quella reale ( $V_r$ ) osservabile in linea. Supponendo che l'energia dei microtremori provenga da tutte le direzioni in maniera uguale, più del 40% presenterà una  $V_a$  di poco inferiore a  $125\%V_r$  e sarà inglobata nel picco massimo di intensità, mentre l'energia restante copre progressivamente l'intervallo tra  $V_a$  e  $V_r$  fino a che non viene raggiunta l'eguaglianza lungo l'involuppo che delimita velocità inferiori situato tra la zona a massima potenza ed il rumore (fig.3). Inoltre eseguire il picking lungo l'involuppo a velocità più bassa fornisce maggiori garanzie di campionare velocità che appartengono al modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

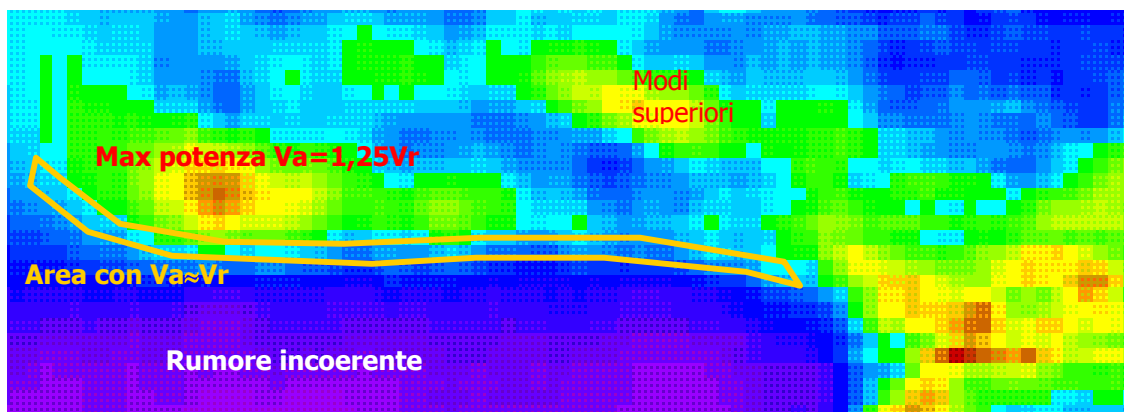


Fig.3 Spettro di potenza con evidenziata l'area utile per il corretto picking della velocità di fase

- È buona norma evitare le inversioni di velocità di fase, a meno che non siano palesi, per intervalli di frequenza relativamente elevati: gli ordini superiori (modi) delle onde di Rayleigh possono presentare un'intensità dello spettro paragonabile a quella del modo primario e

indurre in errore sovrastimando la velocità degli orizzonti più superficiali (fig.1)

### Modellazione delle onde di taglio

I dati selezionati dall'immagine  $p-f$  vengono plottati su un diagramma nel quale compare anche una curva di dispersione calcolata a partire da un modello di  $V_s$  che è modificabile dall'interprete. Variando il numero di strati, la loro velocità e la densità la curva di dispersione calcolata viene adattata fino a farla aderire il più possibile a quella sperimentale ottenuta con il picking.

Si tratta di una modellazione diretta, monodimensionale, che può accettare inversioni di velocità con la profondità ed in cui conta molto il peso che deriva dall'abilità e dall'esperienza del geofisico.

I profili di  $V_s$  ricavati con questa metodologia non presentano una soluzione univoca e cioè più di un modello può fornire curve di dispersione simili tra loro e con il medesimo RMS.

### La sperimentazione

Nelle numerose sperimentazioni effettuate sul campo sono stati confrontati i risultati ottenuti, sul medesimo sito, con differenti intervalli geofonici ed effettuate operazioni di taratura operando in situazioni note e dove, oltre alle informazioni litologiche, esistevano rilevazioni in foro sia di tipo down hole che di tipo cross hole.

Un interessante confronto, sia pur qualitativo, è stato condotto comparando i risultati di analisi spettrali ottenute con il metodo di Nakamura con i valori di velocità ricavati da indagini ReMi; infine vengono confrontati i risultati di un profilo MASW con quelli di un profilo ReMi.

#### 1) verifica dell'attendibilità dei modelli ReMi confrontati a profili verticali di $V_s$ calcolati con prove down hole

Nel 1994 sono stati realizzati a Riva del Garda, nell'ambito di studi microzonazione sismica, due sondaggi meccanici della lunghezza di 30m, con misure di Spt ogni 1.5m, all'interno dei quali sono state effettuate misure di velocità delle onde S e P. I due siti (fig.14a) sono ubicati in contesti morfologici differenti: area urbana (cimitero vecchio) e bordo lago (Miralago).

Nel primo sito sono state realizzate tre differenti registrazioni con spaziatura 2m e 4m (profilo NS) e 4m (profilo EW). La sequenza stratigrafica messa in luce dal sondaggio meccanico era costituita da materiali prevalentemente grossolani (alternanza di corpi ghiaiosi e intercalazioni sabbiose) che iniziavano a 5m di profondità alla base di un livello limoso soffice che sosteneva una piccola falda acquifera. I dati

sono stati trattati sia singolarmente che cumulando i due profili ortogonali con ugual spaziatura. Nella fig.4 è riportato il confronto tra i due VSP (down hole e ReMi) unitamente allo spettro  $p-f$  (con evidenziato il picking) e le curve di dispersione sperimentale e calcolata. Nel grafico sono stati riportati i modelli ReMi ottenuti dai file relativi agli intervalli geofonici 2m e 4m. Dal loro confronto emerge come i due modelli sono sostanzialmente confrontabili tra di loro ed in particolare come sia positivo il raffronto con il VSP del down hole soprattutto in termini di  $V_{s30}$  con uno scarto <10%.

Nel secondo sito (Miralago) la successione stratigrafica metteva in luce un'alternanza di orizzonti sabbiosi e ghiaiosi ad addensamento medio e la falda acquifera ad 1m di profondità. Sia pure in presenza di rumore ambientale di minore intensità rispetto al test del sito precedente, si sono ottenute buone registrazioni sia con la spaziatura da 2m che da 4m ed un tempo di acquisizione di 30 secondi (5 stacks). Come si può vedere dalla fig.5 il modello calcolato mostra un ottimo fit con il profilo sismico ottenuto con il down hole ed i valori di  $V_{s30}$  sono praticamente identici.

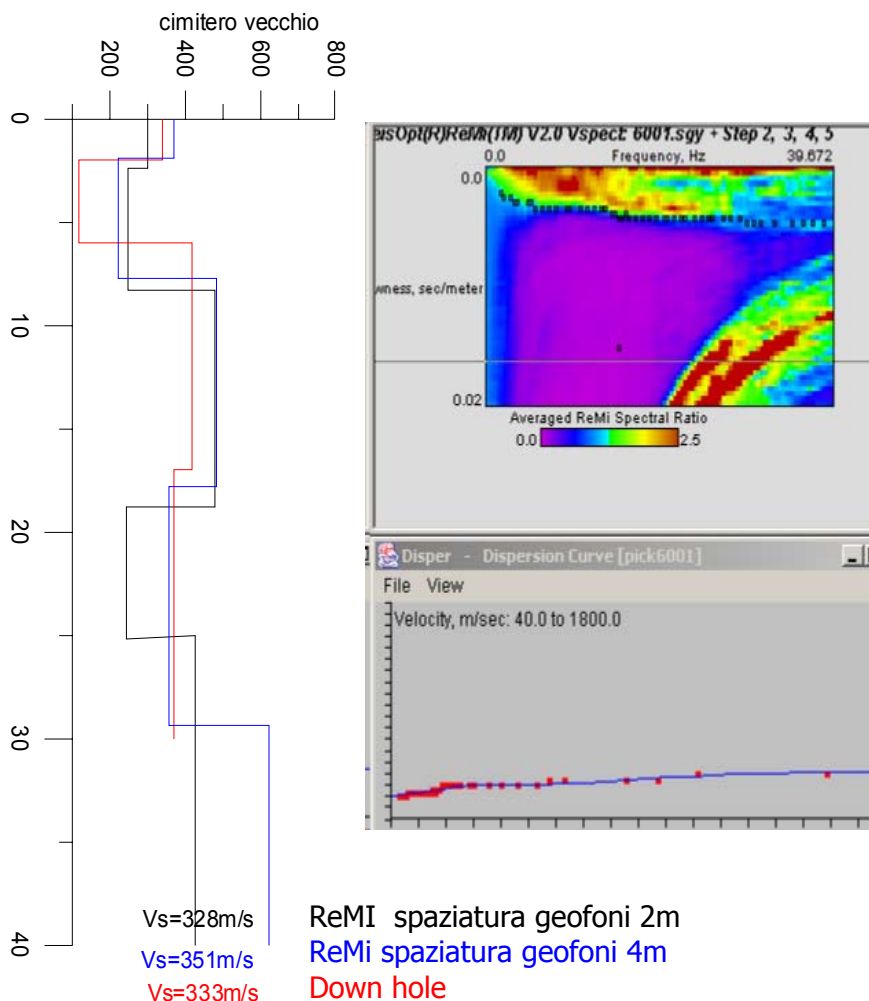


Fig.4: Riva d/Garda (Tn) - raffronto tra profili down hole e ReMi, sito cimitero vecchio

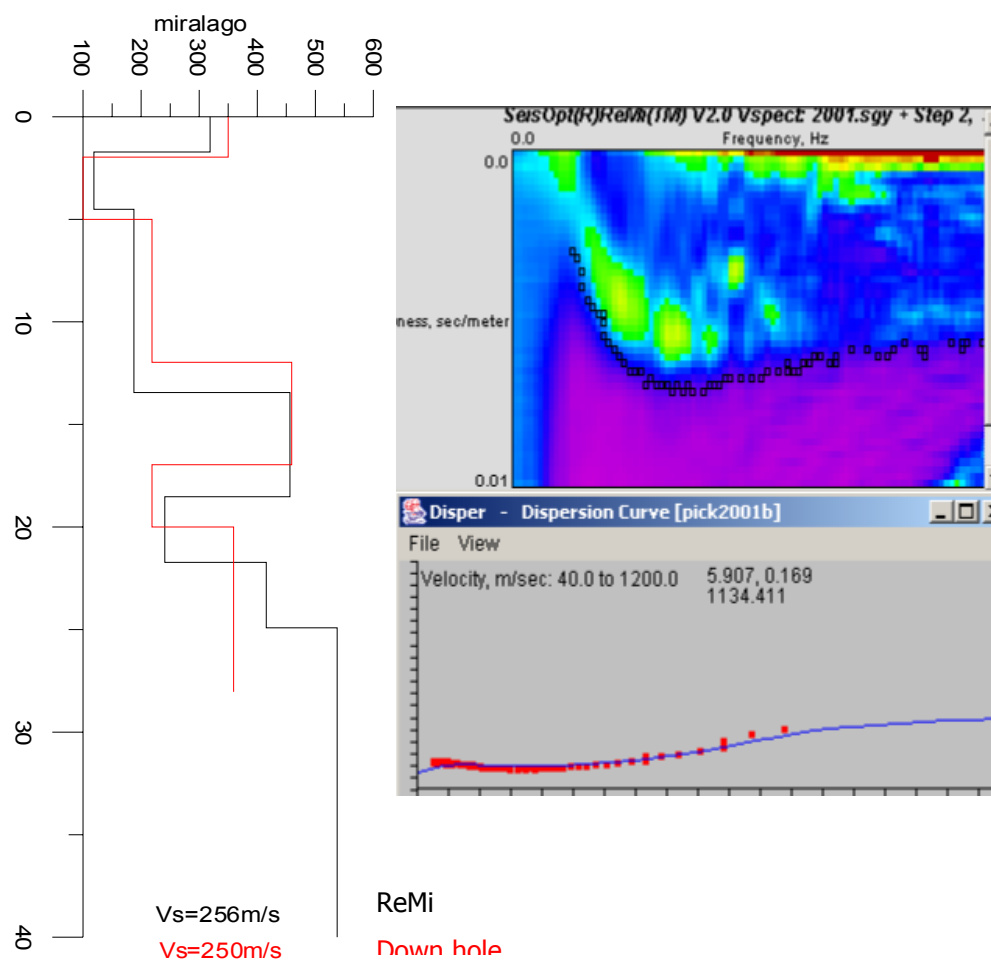


Fig.5: Riva d/Garda (Tn) - raffronto profili down hole e ReMi, sito miralago

## 2) verifica dell'attendibilità del metodo con dati di cross-hole

Durante la fase realizzativa della variante alla S.S.45bis per la costruzione di una galleria artificiale per superare l'abitato di Cadine (periferia ovest di Trento) sono state eseguite delle indagini di tipo cross hole la verifica delle caratteristiche del terreno ove si deve costruire una doppia berlinese che dovrà sostenere il nuovo piano viario posizionato a profondità comprese tra -20m e -10m dall'attuale superficie topografica. I profili ReMi sono stati condotti parallelamente al nuovo tracciato che risulta, in quel punto, parallelo anche al tracciato viario attuale. Si tratta di un'area urbanizzata con tratti pavimentati ed altri in terreno con copertura erbosa. Si sono adottate tre spazature geofoniche di 2m, 3m e 6m ed un tempo di acquisizione di 30 secondi per 5 file. Su un tratto di circa 140m erano state realizzate 3 postazioni per il cross hole con tre sondaggi per postazione. Le prove in foro non sono state condotte dal Servizio Geologico, bensì da una ditta specializzata per conto della DL.

In tutte le postazioni i sondaggi sono stati spinti fino a 40m ed il bedrock (Calcari Grigi liassici) si posiziona attorno a 30m (29.5m-30.7m) e la copertura sciolta risulta costituita da sedimenti alluvionali prevalentemente grossolani con intercalazioni sabbiose.

L'elaborazione dei dati ReMi relative alle spazature 2m e 6m hanno fornito risultati concordanti al modello sismico del sottosuolo e soprattutto con quello geologico definendo con elevata precisione il contatto roccia-copertura.

Se confrontiamo i due modelli ReMi (figg. 6 e 7) si può rilevare come la curva di dispersione del profilo 2m abbia un andamento più "smoothed" di quella relativa alla spaziatura 6m che presenta una rampa eccessivamente ripida in corrispondenza del passaggio roccia copertura. Questo potrebbe essere dovuto ad un effetto laterale causato dalla complessa situazione geologica del sito che risulta attraversato da un solco erosivo particolarmente inciso. La minor lunghezza del profilo ReMi 2m potrebbe quindi aver incontrato una situazione di minore disomogeneità nel modello geologico del sottosuolo e questo potrebbe spiegare l'andamento più regolare della curva di dispersione. Entrambi i profili però presentano un modello diretto molto simile con differenze contenute. Lo stesso si può dire per quanto riguarda i valori di  $V_{s30}$  che si discostano di appena 15m/s e soprattutto sono veramente molto prossimi a quelli calcolati dai VSP ottenuti con i cross hole. Nella figura 8 sotto riportata sono messi a raffronto i dati sperimentali che consentono di apprezzare come i dati ReMi forniscano una rappresentazione delle condizioni medie del sottosuolo, la cui variabilità è manifestata dai profili cross hole, da cui si ricava un range tra i valori di  $V_{s30}$  che va da 420 a 472m/s.

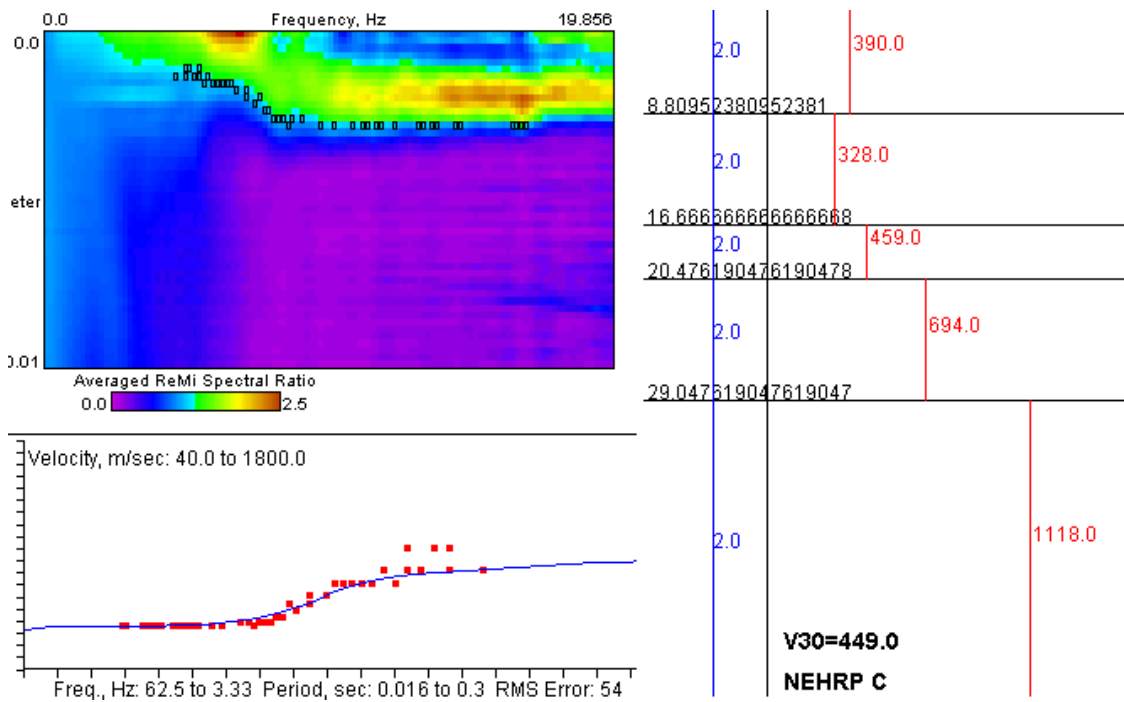


Fig. 6: Cadine (Tn) - Curve di dispersione, spettro e modello diretto con spaziatura 2m

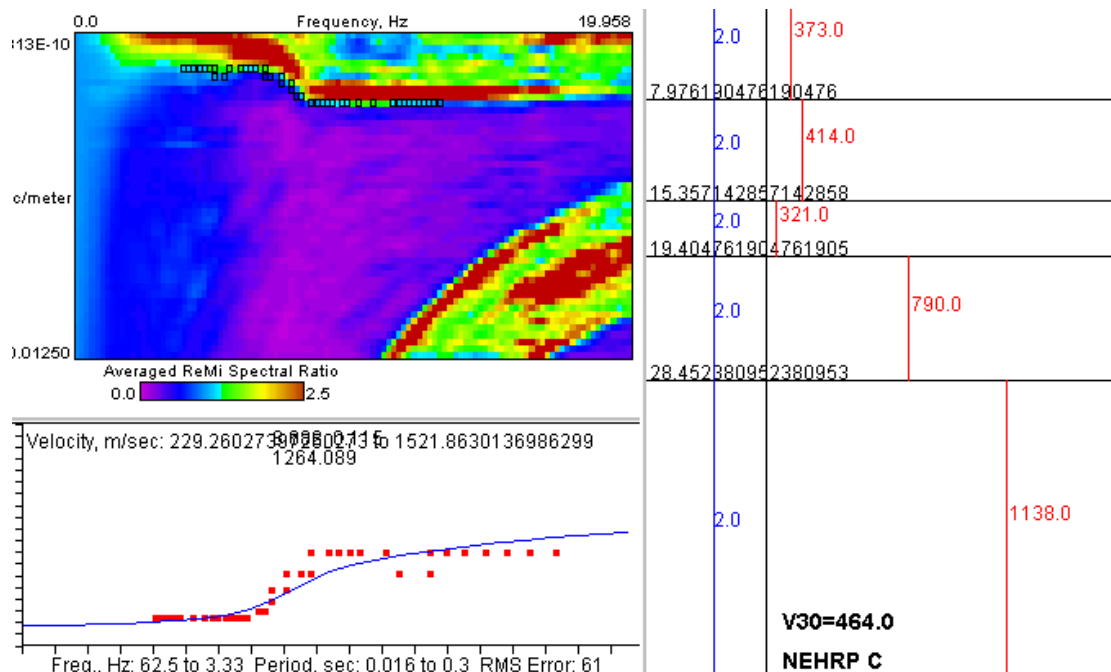


Fig. 7: Cadine (Tn) - Curve di dispersione, spettro e modello diretto con spaziatura 6m

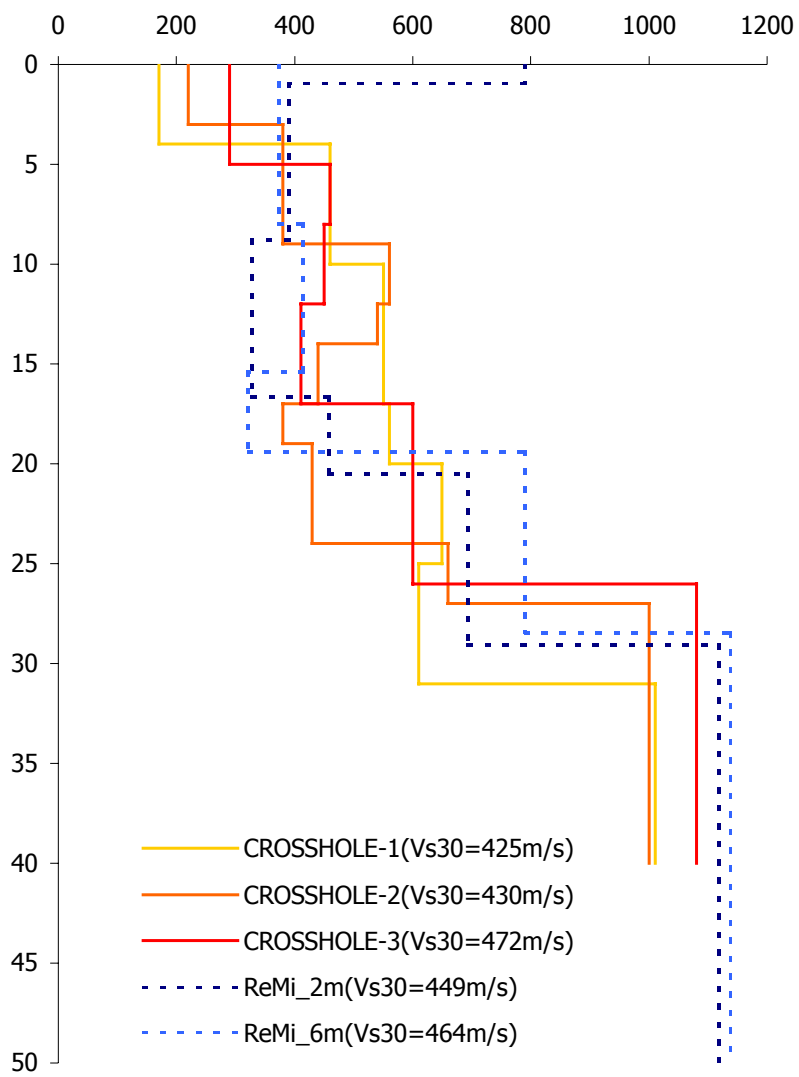


Fig. 8: Cadine (Tn) - Raffronto tra profili cross hole e ReMi

### 3) Raffronto tra analisi spettrali dei rumori di fondo (metodo di Nakamura) e misure ReMi

Un ulteriore raffronto è stato condotto in occasione dello studio, tuttora in corso, di microzonazione del territorio urbanizzato di Rovereto (fig. 15b). In questo caso oltre alle misure ReMi sono state condotte delle rilevazioni del rumore di fondo mediante sismometro tridimensionale da 1Hz con registrazioni multiple di 10minuti e più sessioni di misura per lo stesso sito in differenti condizioni ambientali (giorno e notte). Mediante l'analisi dei rapporti spettrali tra la componente verticale e quella orizzontale (metodo di Nakamura) si può ottenere un'indicazione dei possibili effetti di amplificazione locale conseguenti ad una sollecitazione sismica. La loro entità è strettamente connessa con le caratteristiche geotecniche dei materiali presenti nel sottosuolo ed all'assetto geomorfologico dell'area. Il raffronto dei risultati non può ovviamente fornire delle correlazioni dirette essendo differenti i target delle due tecniche investigative, ma la ReMi può rappresentare un importante supporto interpretativo mediante il modello sismico locale che riesce a produrre.

I dati spettrali dei 17 siti rilevati con il metodo di Nakamura non hanno evidenziato elementi che facciano ipotizzare la possibilità che si verifichino fenomeni di amplificazione locale e ciò è riconducibile all'elevata rigidità dei terreni presenti nel sottosuolo. Questo dato è stato confermato dai risultati delle oltre 50 misure ReMi effettuate che hanno fornito valori di  $V_{s30}$  sempre superiori a 350m/s e con netta predominanza di velocità  $>450$ m/s.

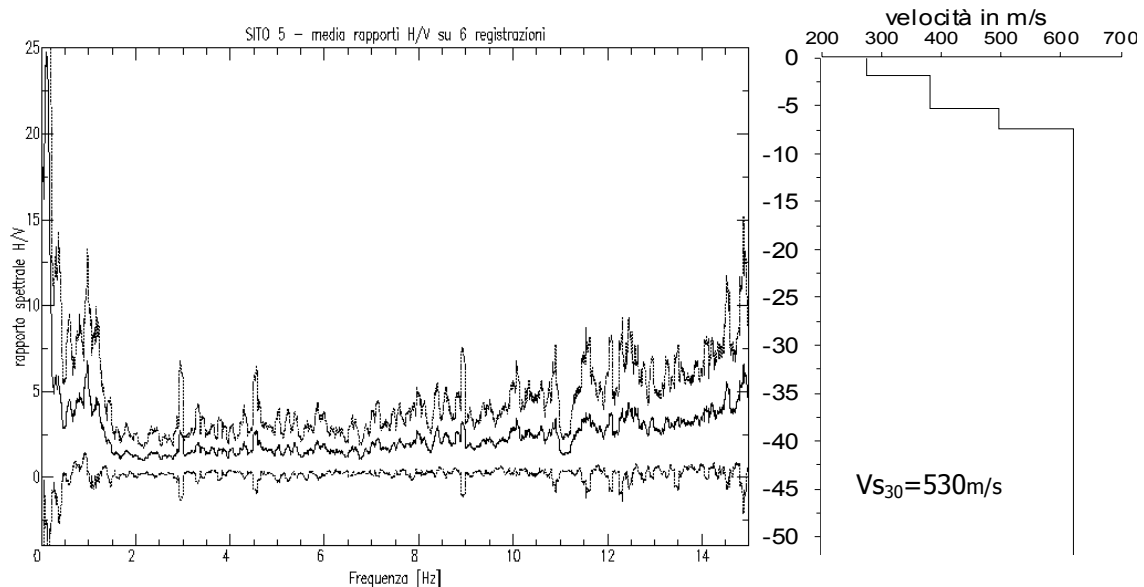


Fig. 9 : Rapporti spettrali H/V ( $m \pm 1$  sqm) nel sito 5 di Rovereto (valore più prossimo di  $V_{s30} = 530$  m/s) e modello ReMi a  $V_{s30}=530$ m/s

Anche se il dato esposto non ha la conferma di tarature dirette in quanto non disponibili nel territorio in questione vi è tuttavia il conforto del modello geologico dell'area che risulta caratterizzato da depositi

grossolani molto addensati di conoide fluvio torrentizia e profondità del bedrock dell'ordine del centinaio di metri.

#### 4) Raffronto fra dati MASW e dati ReMi.

Nel corso dell'attività geognostica si è avuto modo di confrontare i risultati delle prove ReMi effettuate su siti ove erano stati condotte in precedenza dagli scriventi indagini MASW. L'esempio che si propone è relativo ad un'area a Nord di Trento (Lavis, fig.15a) situata sul conoide del t. Avisio. La situazione litologica locale prevede una sequenza monotona di alluvioni grossolane di una cinquantina di metri di spessore poggianti sui sedimenti medio fini dell'Adige. La curva MASW prescelta può essere considerata come rappresentativa delle condizioni medie del sito.

In figura 10 sono messi a raffronto i modelli calcolati con le due metodologie (più la curva di dispersione ReMi ottenuta con intervallo geofonico di 5m) organizzati in modo rendere più agevole la lettura dei due grafici. Dal loro esame si possono trarre le seguenti indicazioni:

- le due tecniche (sono state utilizzati gli stessi geofoni da 8Hz e il medesimo acquisitore Seistronix RAS24) analizzano segnali sismici appartenenti a campi di frequenza ben distinti (25Hz-4Hz ReMi e 40Hz-23Hz MASW) e ciò è imputabile alla differente sorgente che viene utilizzata. La barra riportata nel grafico della curva di dispersione ReMi indica l'intervallo di periodo dove si collocano i dati MASW.
- è evidente la concordanza morfologica tra le due curve di dispersione che presentano un modello con Vs crescente con la profondità.
- I modelli quantitativi ottenuti (inversione monodimensionale MASW/SurfSeis<sup>®1</sup> e modello diretto ReMi) mostrano un ottimo fitting ed è rimarchevole la capacità risolutiva della tecnica ReMi.

---

<sup>1</sup> Prodotto da Kansas Geological Survey, KS, USA

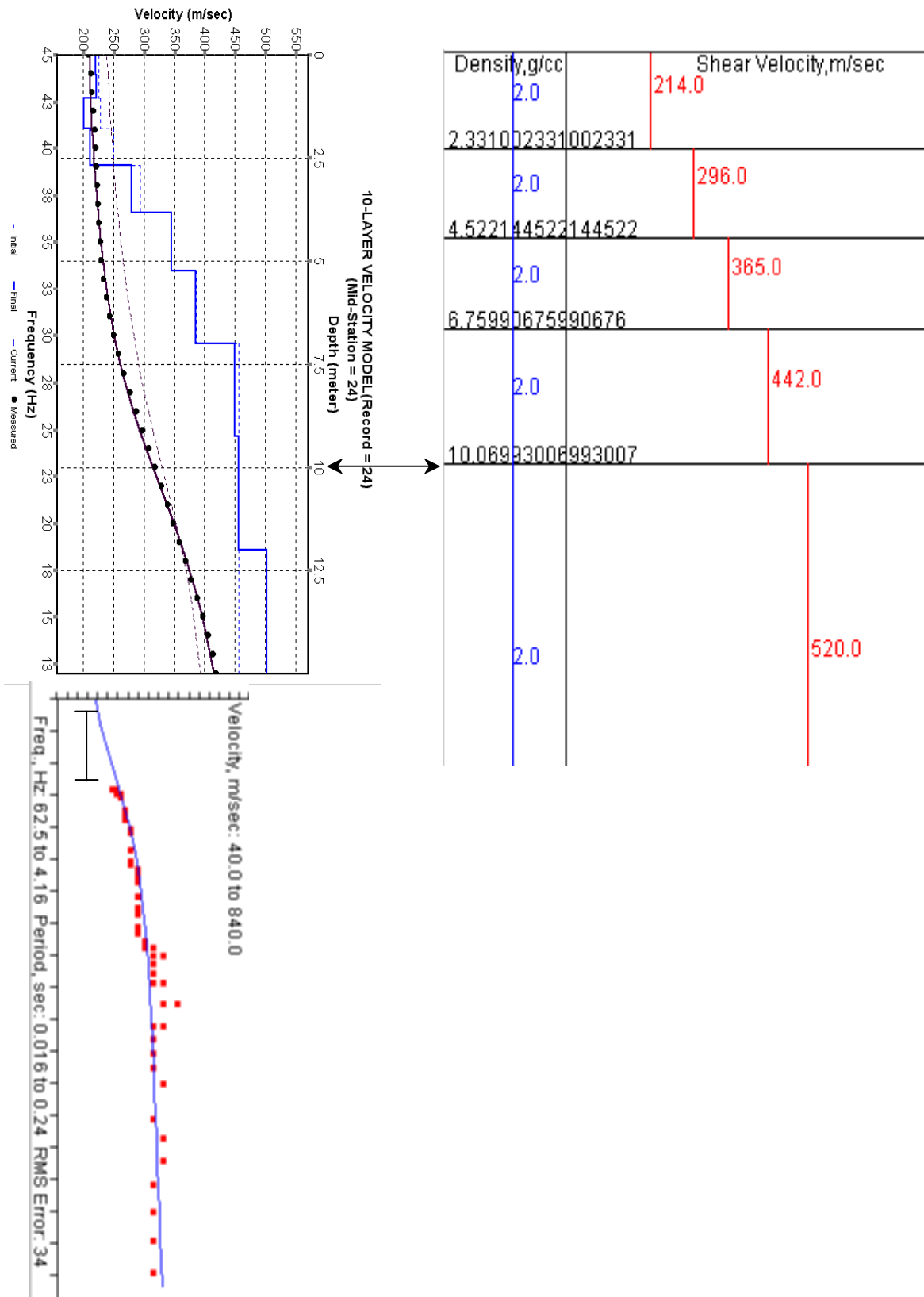


Fig.10. Lavis – raffronto risultati indagine MASW e ReMi

## Esperienze di campo

Come accennato in premessa le misure ReMi sono state condotte su numerosi siti del territorio provinciale sia come supporto progettuale, come previsto dall'ordinanza 3274, sia come indagine areale per la la classificazione dei suoli di fondazione. La finalità di questo secondo target è quella fornire un riferimento per i professionisti e gli enti locali finalizzato alla pianificazione territoriale con ugual significato e pregnanza normativa della carta di sintesi geologica allegata al Piano Urbanistico Provinciale (PUP).

La tecnica ReMi non è nata per la misura del parametro  $V_{S30}$ , bensì per l'investigazione del sottosuolo fino a profondità talvolta considerevoli (in presenza di situazioni geologico-geotecniche particolarmente favorevoli) e comunque sempre superiori ai trenta metri. L'applicazione del metodo alla caratterizzazione del comportamento dei suoli dal punto di vista sismico è stata avviata, testata ed utilizzata estensivamente negli Stati Uniti (per la classificazione dei suoli del NHERP).

L'adozione di questa tecnica geognostica è sembrata interessante soprattutto per il fatto che, oltre al software specialistico, non richiedeva strumentazione differente da quella già in dotazione al Servizio Geologico. Inoltre poteva essere utilmente impiegata in condizioni improponibili per altre metodologie, anche se l'ambiente urbano era già stato oggetto di utili investigazioni con la tecnica MASW (numerosi rilievi nell'ambito cittadino). L'uso di una sorgente passiva, quale quella del rumore di fondo ambientale, la rende applicabile in moltissime situazioni, anche in quelle apparentemente silenziose quali, ad esempio, quelle di aperta campagna, lontane dai centri abitati: è infatti sorprendente costatare l'entità della diffusione del "noise" a bassa frequenza, che è segnale utile, prodotto dalle aree urbane o dalle vie di comunicazione.

Quasi tutti gli ambiti fisici presentano quindi condizioni sfruttabili per l'impiego di questa tecnica, anche se va precisato che operare in siti dove è presente un rumore ambientale con un contenuto in frequenza abbastanza esteso consente una migliore ricostruzione della porzione più superficiale del sottosuolo. Il metodo permette in tempi brevi ed anche direttamente in sito una prima elaborazione dei dati acquisiti per ottenere informazioni sulle caratteristiche della struttura del sottosuolo. Inoltre fornisce indicazioni, se non conosciute, sulla posizione del substrato roccioso ( $>0 < 20\text{m}$ ) ed una stima rapida del valore di  $V_{S30}$  che viene fornito direttamente dal programma unitamente alla categoria relativa alla classificazione NHERP (che differisce però sensibilmente da quella introdotta con la normativa tecnica).

Con la finalità di fornire una panoramica delle differenti situazioni geologiche affrontate si propongono gli spettri  $p-f$  che si possono ritenere rappresentativi di situazioni tipo.

- 1) bedrock prossimo alla superficie ( $<20\text{m}$ ). Il sito è quello dell'ospedale di Arco (fig.14a) dove le indagini dirette condotte a distanza di una trentina di metri indicavano il substrato marnoso a 5-7m dalla superficie. Il punto del profilo ReMi si trova nella

direzione di approfondimento del bedrock. Si può osservare agevolmente come i valori di slowness siano bassi (alta velocità di fase) già per valori di frequenza elevati (15-20Hz). Il modello diretto fornirà una profondità del bedrock (velocità superiori a 1000m/s) comprese tra 13m e 15m in buon accordo con i dati stratigrafici noti (fig.11).

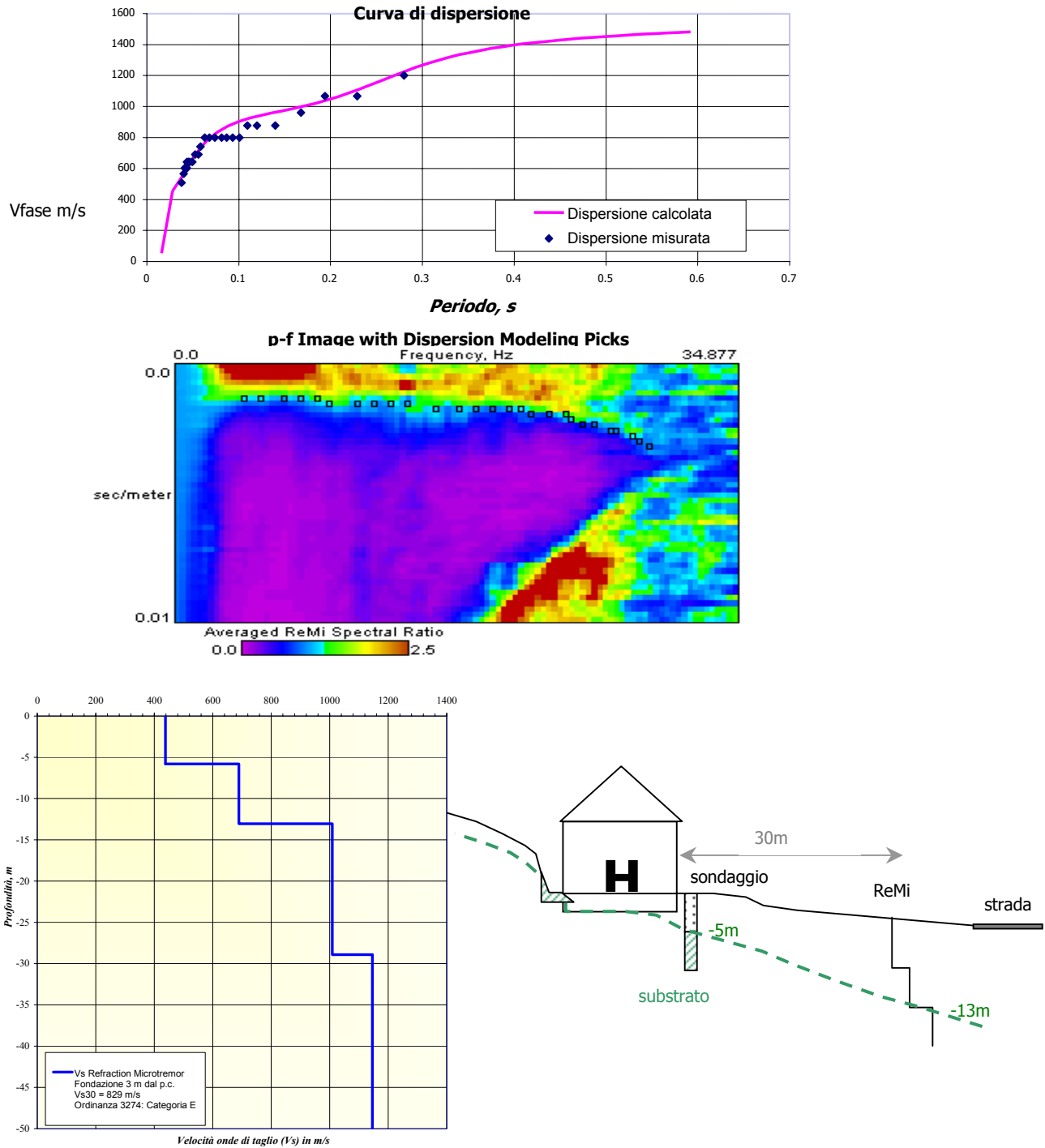


Fig. 11 Ospedale di Arco (Tn) - Curva di dispersione, spettro, modello Vs e sezione geologica

2) bedrock profondo (>20m). L'indagine si riferisce ad un'area limitrofa al centro storico di Trento (via T.Gar, fig.14b) dove esistono indicazioni stratigrafiche che pongono il basamento roccioso ad alcune centinaia di metri. I sedimenti alluvionali sono costituiti da una sequenza complessa di materiali fini e grossolani. E' stata adottata (per esigenze logistiche) una spaziatura dei geofoni pari a 4m e si sono potute utilizzare, come sorgente, le sollecitazioni prodotte dal transito dei treni. Lo spettro ottenuto consente di vedere come vi sia segnale utile da 4Hz fino a frequenze prossime a 30Hz e come i materiali siano caratterizzati da basse velocità trasversali fino a 25m di profondità (fig.12a).

L'area, che è destinata a edilizia universitaria, era stata precedentemente oggetto di indagini sia dirette che indirette (sondaggi meccanici e profili MASW). Questa disponibilità di dati ha permesso di verificare l'ottima corrispondenza tra i risultati ottenuti con le due tecniche (12c). In particolare i dati di picking dello spettro p-f sono stati invertiti con la procedura del Surfseis<sup>®</sup>. La qualità dell'esito si può osservare in fig. 12b dove sono messi a confronto i due modelli (diretto ReMi, inverso Surfseis<sup>®</sup> a 10 strati). La profondità di indagine raggiunta è stata calcolata in 50m (figg.12b,c).

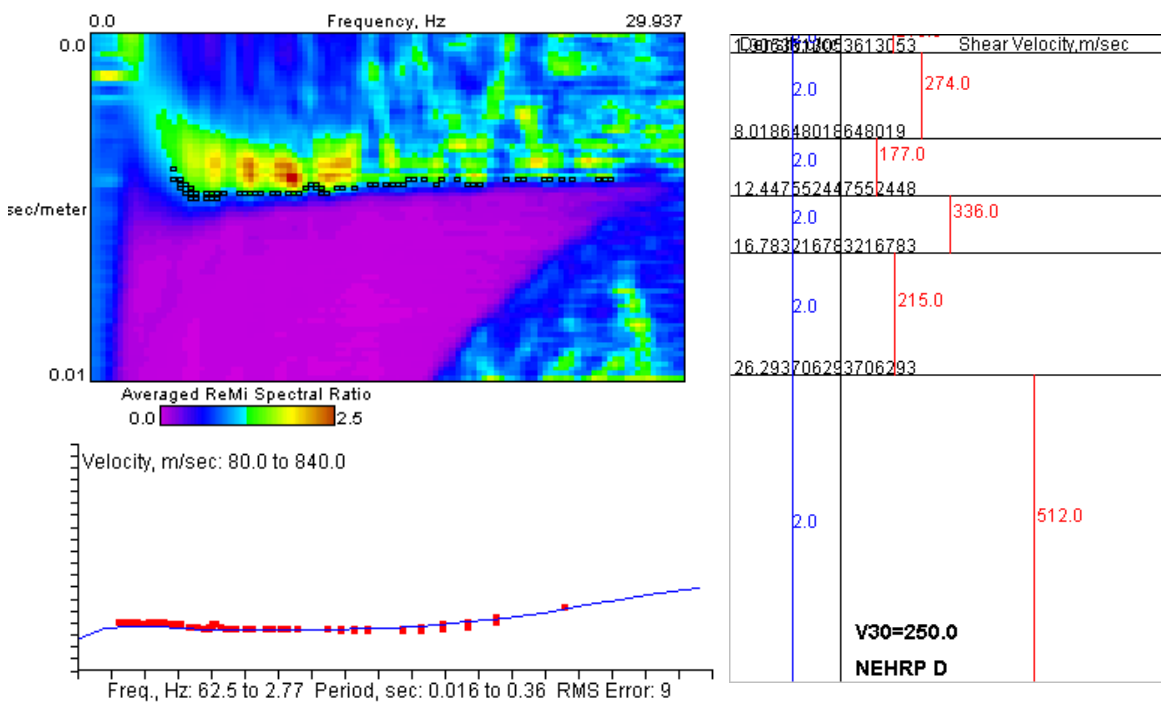
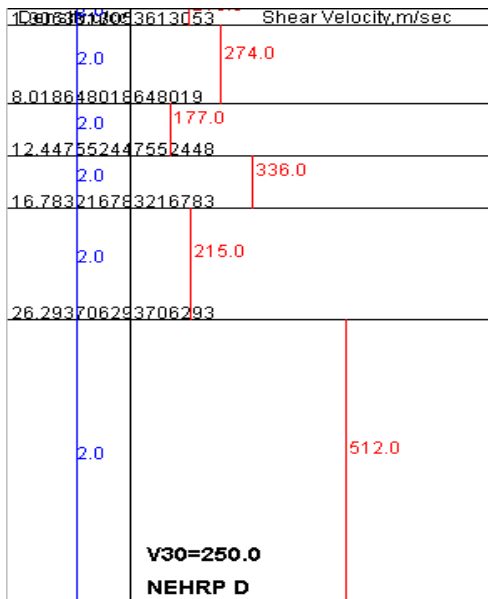


Fig.12a Trento (via Tommaso Gar) – Curva di dispersione, spettro e modello delle Vs.

modello diretto ottimizzato (ReMi)



modello ottimizzato con inversione 1D Surfseis®

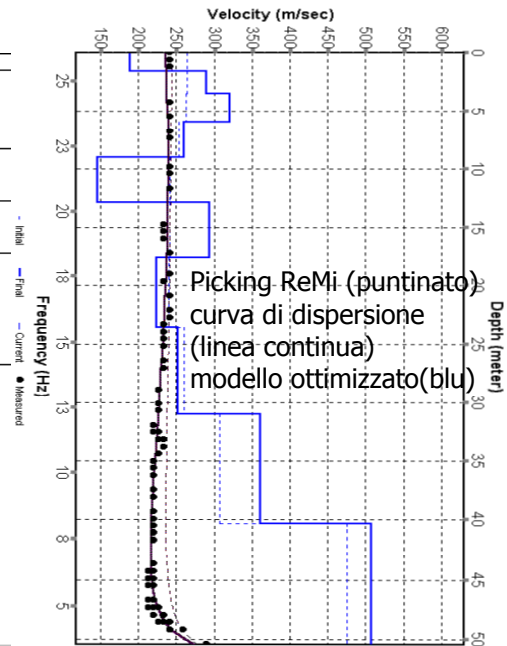


Fig.12b Trento (via Tommaso Gar) – raffronto tra modello diretto (ReMi) e inversione (Surfseis®).

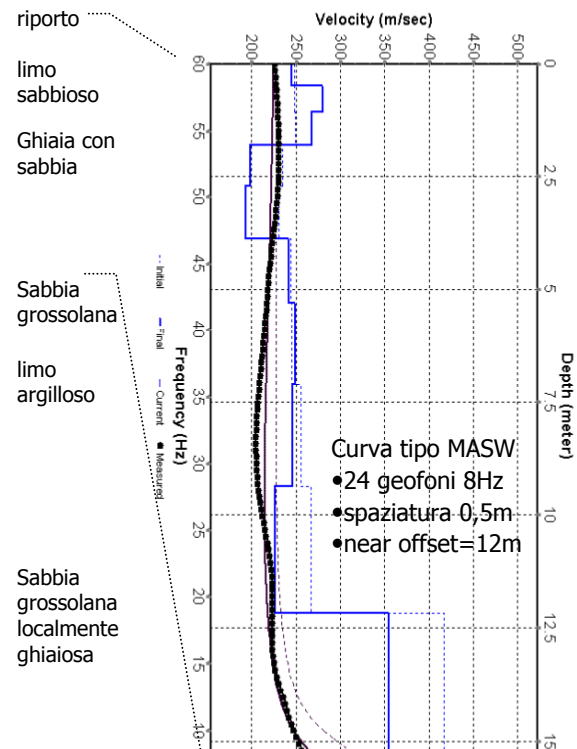
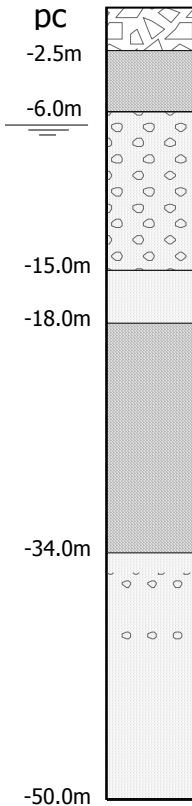
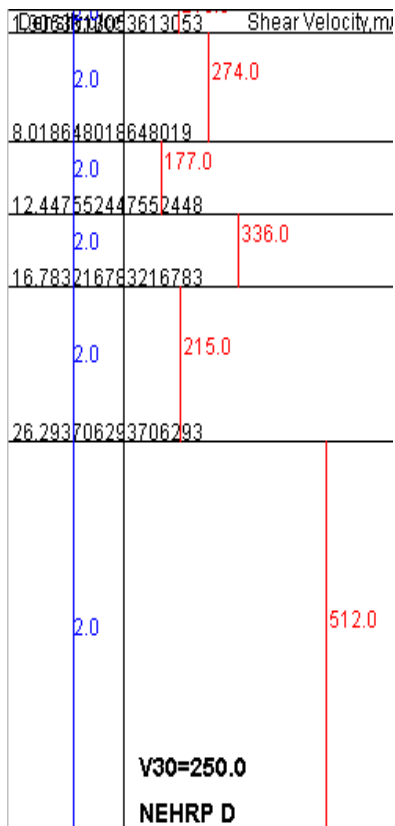


Fig.12c Trento (via Tommaso Gar) – raffronto tra modello diretto (ReMi) e inversione (Surfseis®).

3) inversioni di velocità. L'analisi del sottosuolo mediante le tecniche che utilizzano le onde di superficie consente di evidenziare, al contrario di quanto avviene con la rifrazione, le inversioni di velocità permettendo quindi di mettere in evidenza situazioni di delicatezza geotecnica. Un esempio è riportato in fig.13. I dati sono stati raccolti a sud di Rovereto in fregio al fiume Adige (destra orografica,fig.15b) in un tratto di campagna compreso tra il corso d'acqua e la parete rocciosa, lontano dall'abitato e dalle infrastrutture viarie che si trovano ad alcune centinaia di metri di distanza. Il picking evidenzia sullo spettro la morfologia tipica che esso assume in presenza di un'inversione di velocità nei materiali del sottosuolo.

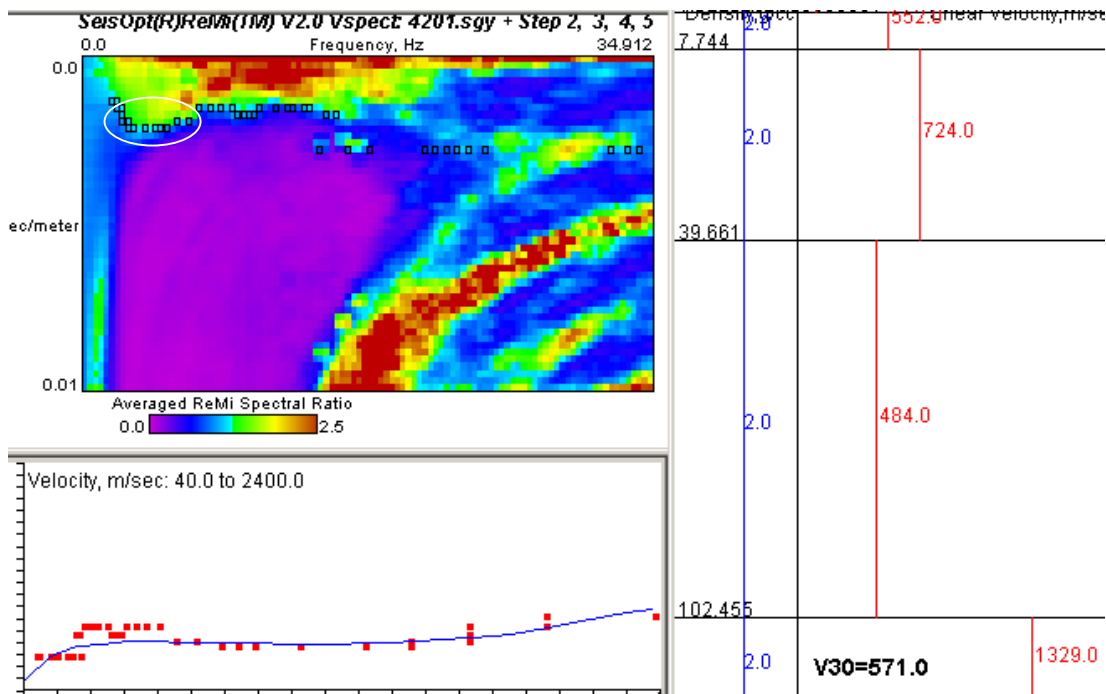


Fig.13 - Periferia sudovest di Rovereto. Curve di dispersione, spettro e modello delle Vs con evidenziato lo strato a minor velocità

La figura mostra inoltre che i sedimenti presenti in superficie sono caratterizzati da una notevole rigidità che fa ipotizzare possa trattarsi di un episodio di frana o di alluvioni cementate. Il modello calcolato risulta compatibile con il quadro geologico locale che, come già detto, prevede un substrato decisamente più "superficiale" rispetto a quello riscontrato nell'area di Trento.

## **Considerazioni conclusive**

Fino ad ora sono state realizzate in provincia di Trento oltre un centinaio di misure del parametro  $V_{S30}$  mediante la tecnica dei microtrempi. Sono stati indagati vari contesti geologici ottenendo, tranne rarissimi casi, dati di buona qualità che hanno fornito dei modelli di sottosuolo verosimili e compatibili con quelli geologici dedotti da indagini dirette, laddove presenti. Vi è però da rilevare che tranne in pochi casi le profondità raggiunte dai sondaggi meccanici sono generalmente inferiori a quelle dei modelli sismici ricavati con la tecnica ReMi. Questa si può proporre quindi anche come un supporto di tipo geognostico consentendo di acquisire, in aree dove l'informazione di base è ridotta ed insufficiente, elementi cognitivi supplementari ai quali il geologo dovrà dare il giusto peso nella ricostruzione del quadro geologico. Non va infatti dimenticato che si tratta di una metodica investigativa di tipo indiretto che soffre di tutte le limitazioni proprie delle indagini non invasive.

Il metodo si presenta di agevole eseguibilità sul campo a condizione di avere a disposizione lo spazio necessario per realizzare uno stendimento lineare di almeno 50m. La scelta della spaziatura tra i geofoni rappresenta un parametro di "peso" ai fini dell'ottenimento di un buon risultato anche se dalle esperienze fin qui maturate non siamo stati in grado di definire una "regola" che consenta una generalizzazione. Pertanto laddove le condizioni logistiche lo consentono sarebbe buona norma effettuare il rilievo ReMi adottando più di una spaziatura.

La stragrande maggioranza dei siti testati si è dimostrata idonea all'impiego di questa tecnica sotto il profilo dell'intensità e qualità del rumore presente, anche se non sempre i risultati ottenuti possono essere considerati di elevata qualità. Dovendo infatti operare in un contesto "naturale" qualità e contenuto in frequenza del segnale può variare nel corso della giornata e quindi può succedere che sia necessario ripetere l'acquisizione in un momento successivo del giorno.

La tecnica ReMi richiede un numero molto contenuto di operatori: due persone sono in grado di produrre una quindicina di profili al giorno, ipotizzando circa 30 minuti per profilo.

La disponibilità di un profilo di taratura ottenuto mediante prove in foro agevola grandemente il compito dell'interprete per quanto riguarda la caratterizzazione degli orizzonti più superficiali in considerazione della non univocità del modello finale (che si ricorda è il prodotto di una modellazione diretta che presuppone una struttura del sottosuolo pianoparallela).

La sperimentazione di inversione delle curve di dispersione misurate (dati del picking) utilizzando il codice Surfseis<sup>®</sup> ha consentito di verificare la generale buona concordanza dei modelli ottenuti. Nelle situazioni dove l'assenza di conoscenze geologiche rende arbitraria la definizione della struttura del sottosuolo, il supporto di una procedura di calcolo semiautomatica può fornire un buon punto di partenza per

contribuire a superare i problemi di equivalenza insiti nella modellazione di tipo diretto.

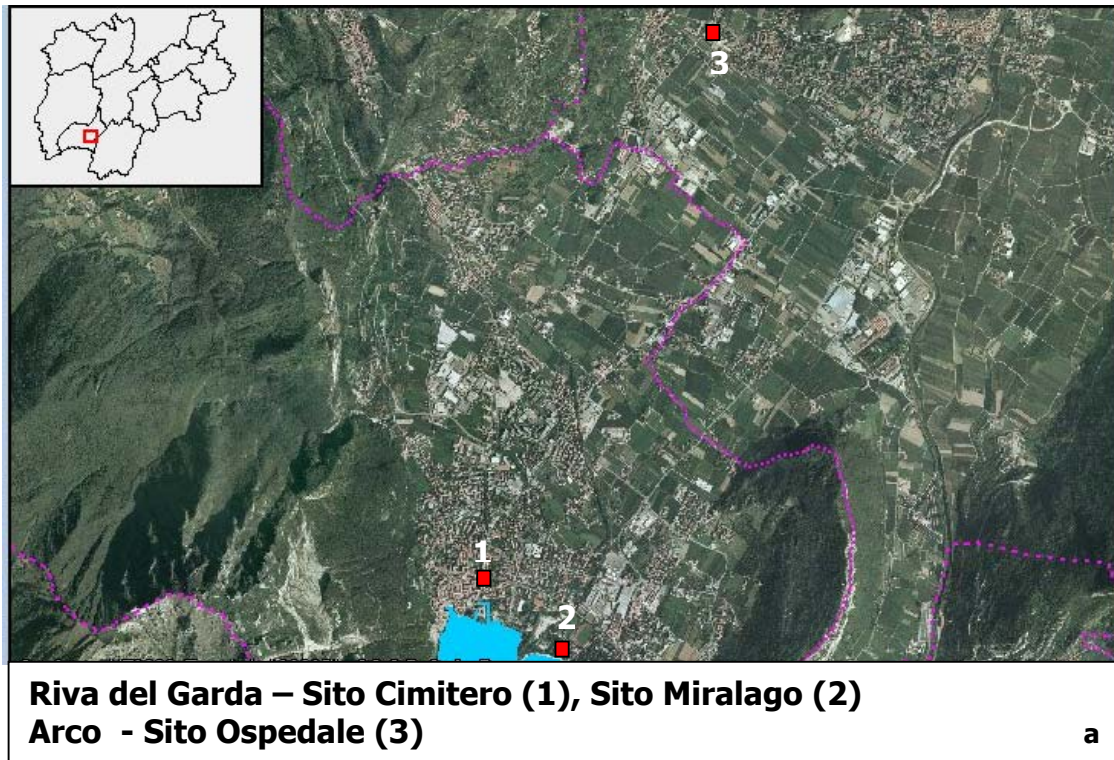


Fig. 14 – Ubicazione siti

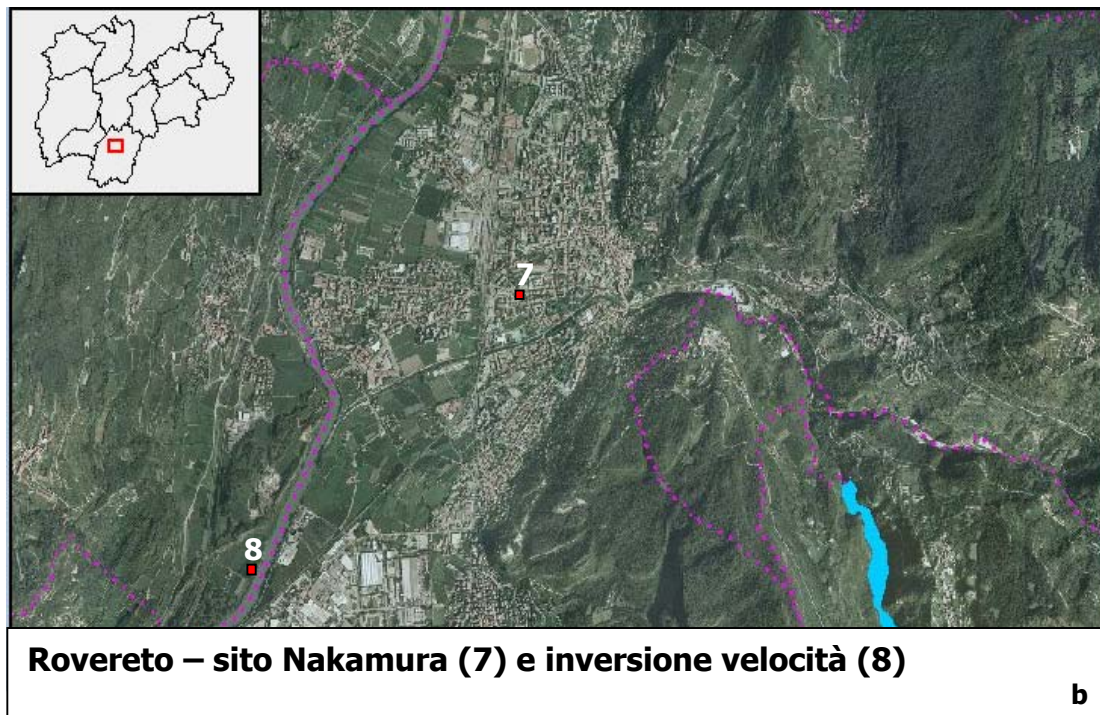
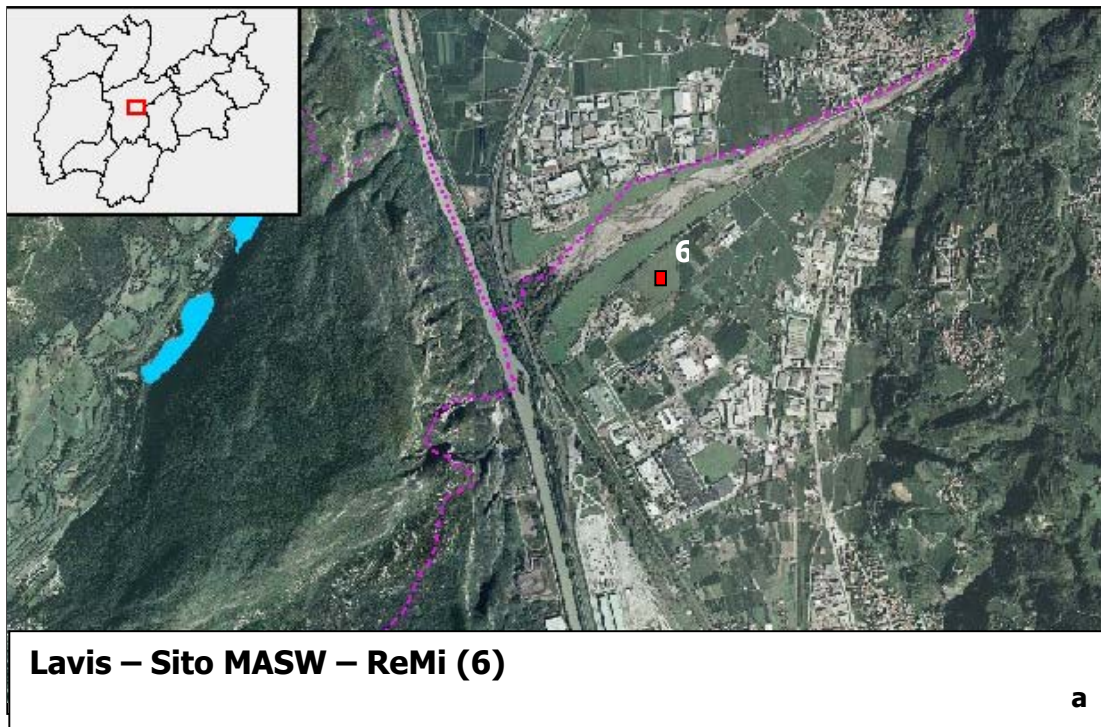


Fig. 15 - Ubicazione siti

## BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE:

- Dorman, J., Ewing, M., 1962. Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and crust-mantle structure in the New York-Pennsylvania area. *J.Geophys. Res.* 67,5227-5241
- Louie, J., 2001. Faster, Better: Shear Wave Velocity to 100 meters Depth from Refraction Microtremor Arrays. *Bullettin of the Seismological Society of America*, 91, 2, 347-364 aprile
- Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on ground surface. *QR Raylw. Tech. Res.Inst.*, 30, 25-33.
- Nazarian, S. e Stokoe, K. H., 1984. In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves in *Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering*, vol.8, San Francisco, 21-28 luglio
- Park, C. B., R. D. Miller e Xia, J., 1999. Multi-channel analysis of surface waves, *Geophys.* 64, 800-808
- Rayleigh, W., 1885. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. *London Mathematical Soc.Proc.*, 17:4-11