

Esperimento di sismica attiva in onde S con sorgente vibratoria Ivi-MiniVib in corrispondenza della faglia della Pernicana nel comune di Linguaglossa (CT).

A cura di:

*Michele Punzo, Francesco Varriale, Pier Paolo Bruno, Antonio Rovelli, Giuseppe di Giulio.*

**Indice**

<b><u>1. Introduzione .....</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>2. Inquadramento geologico.....</u></b>	<b><u>2</u></b>
<b><u>3. Acquisizione dei dati.....</u></b>	<b><u>3</u></b>
<b><u>4. Strumentazione.....</u></b>	<b><u>5</u></b>
<b><u>5. Analisi spettrale e risultati preliminari... ..</u></b>	<b><u>12</u></b>
<b><u>6. Bibliografia .....</u></b>	<b><u>14</u></b>

## **1. INTRODUZIONE**

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo l'acquisizione e l'elaborazione di dati di sismica attiva del tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) per lo studio del fenomeno della dispersione delle onde superficiali nella porzione superficiale (0-30 metri di profondità) in corrispondenza della faglia della Pernicana.

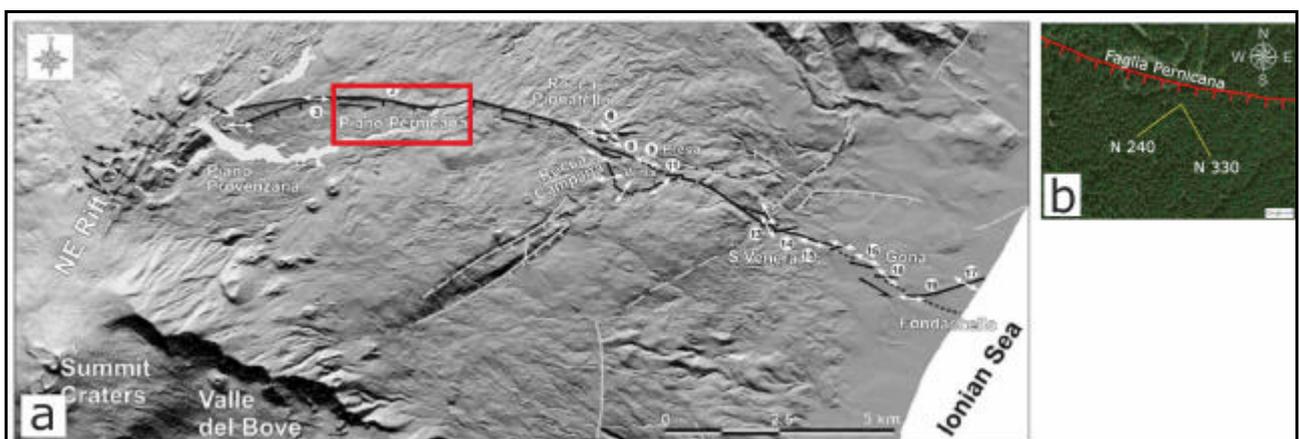
L'indagine è stata realizzata utilizzando una sorgente sismica vibratoria ad alta risoluzione (Ivi-MiniVib®) in un sito localizzato nella parte occidentale di piano Pernicana (Linguaglossa, CT) (Figura 1a). Il sito d'indagine dista circa 50 m dalle zona di rottura superficiale legata alla faglia della Pernicana (figura 1b). Lo scopo dell'esplorazione è stato di valutare la velocità di propagazione delle onde sismiche longitudinali e trasversali lungo due direzioni tra loro ortogonali (orientate rispettivamente N330 e N240). Ciò al fine di stimare e quantificare la differenza di velocità delle onde S nelle due direzioni, studiare il fenomeno della dispersione delle onde superficiali nei pressi della zona di faglia e di definire la  $V_{S30}$  secondo quanto previsto dalla normativa sismica Europea EC8. La versatilità della sorgente utilizzata ha permesso di registrare dati con differente configurazione sorgente/ricevitore. Questi diversi dataset sono stati analizzati sia singolarmente che in combinazione tra loro, per meglio interpretare la loro variabilità e le reciproche relazioni.

Il gruppo di lavoro è stato composto da:

- Pier Paolo Bruno (INGV–Osservatorio Vesuviano);
- Fabrizio Cara (INGV–Roma);
- Antonio Castiello (INGV–Grottaminarda);
- Rocco Cogliano (INGV–Grottaminarda);
- Dario De Rosa (INGV–Grottaminarda);
- Giuseppe Di Giulio (INGV–Roma);
- Stefania Pucillo (INGV–Grottaminarda);
- Michele Punzo (AMRA S.C.aR.L. - INGV–Grottaminarda);
- Antonio Rovelli (INGV–Roma);
- Francesco Varriale (AMRA S.C.aR.L. - INGV–Grottaminarda).

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La faglia della Pernicana rappresenta una delle principali strutture che caratterizza il versante nord-orientale del monte Etna. Unitamente al sistema di fessure eruttive del Rift di NE, delimita un ampio settore del vulcano che si estende fino ai crateri sommitali, caratterizzato da deformazioni estensionali, accomodate lateralmente da movimenti di tipo sinistro. In funzione del differente comportamento cinematico fra la porzione orientale e quella occidentale del vulcano, il sistema della faglia Pernicana è stato identificato da diversi Autori come una struttura di svincolo dell'estensione attiva nel versante orientale dell'edificio etneo. La deformazione sarebbe di natura gravitativa, risultato di un lento scivolamento verso ESE dell'intero versante orientale etneo. La Pernicana è costituita da un segmento occidentale, orientato E-W, lungo circa 3,5 Km, e da un segmento orientale, orientato WNW-ESE, lungo circa 3 Km, che scompare repentinamente verso la terminazione orientale della struttura. Il segmento occidentale è caratterizzato da terremoti superficiali che producono rotture cosismiche al suolo, con movimenti principali trascorrenti sinistri e minori dislocazioni verticali. Il segmento orientale è affetto solamente da fenomenologie di creep asismico con movimenti transtensivi sinistri puri e tassi di movimenti dell'ordine di 2 cm/a. Questi elevati tassi di movimento sono ripartiti in una serie di splay che si sviluppano tra gli abitati di Vena e Presa (APAT. Note illustrative della carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 613)



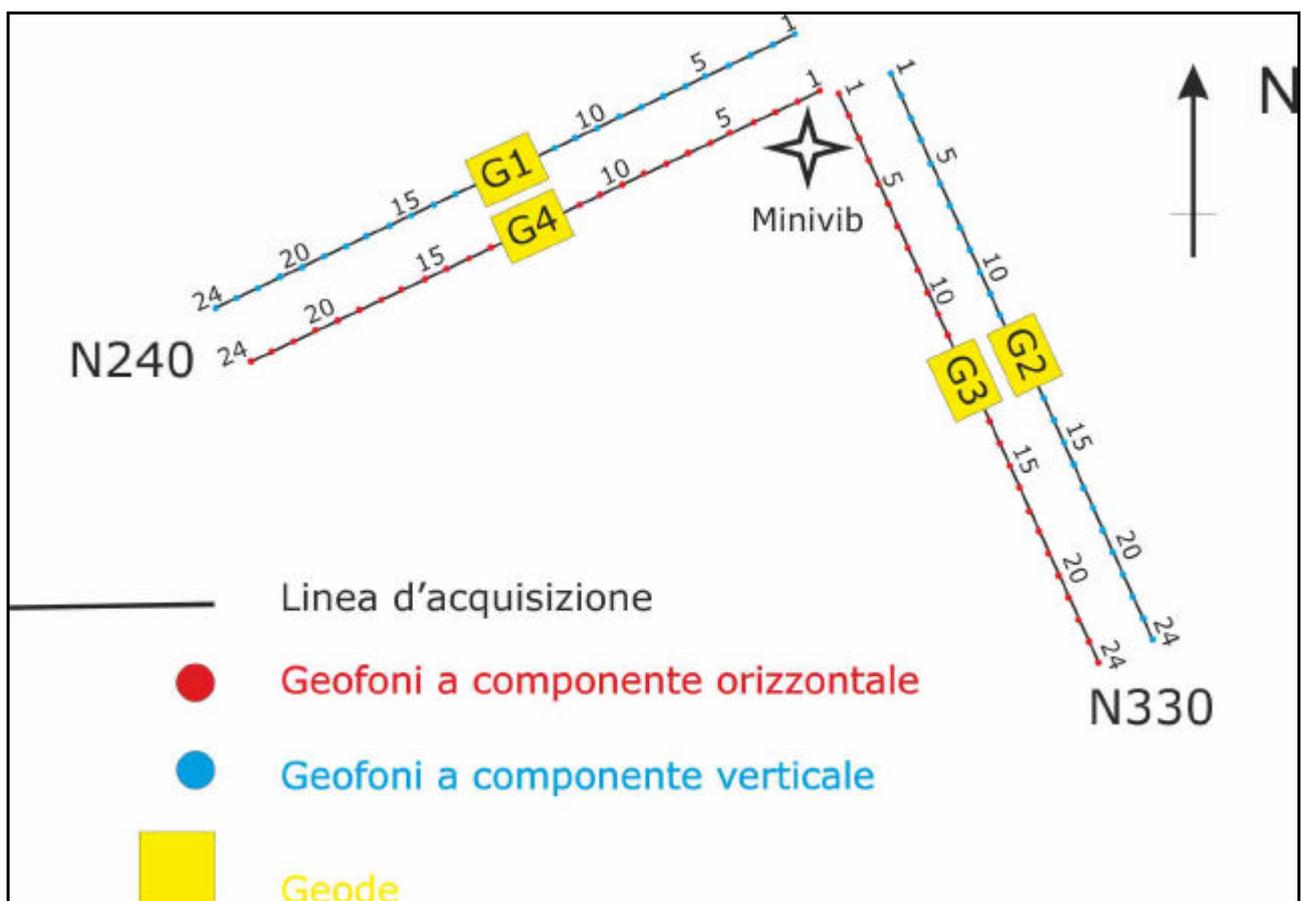
**Fig.1.** a) Modello digitale del settore NE del Monte Etna (da Acocella & Neri, 2005); il rettangolo mostra la localizzazione dell'esperimento rispetto la faglia Pernicana; b) dettaglio della localizzazione dei profili sismici acquisiti (immagine tratta da Google Earth).

### 3. ACQUISIZIONE DEI DATI

I dati sono stati acquisiti disponendo sul terreno uno stendimento di 96 geofoni totali, di cui 48 a componente orizzontale e 48 a componente verticale. I ricevitori sono stati posizionati su due direzioni radiali, N30 e N240, rispetto la posizione della sorgente. Ogni direzione radiale dello stendimento era costituita da due file parallele di geofoni orizzontali e verticali, come schematizzato in figura 2.

Il sistema d'acquisizione totale è composto, quindi, da quattro array, 2 con geofoni a componente verticale e 2 con geofoni a componente orizzontale. Ciascun array è costituito da 24 geofoni con frequenza di 4,5 Hz equamente spaziatati ogni 5 metri per una lunghezza pari a 115 metri.

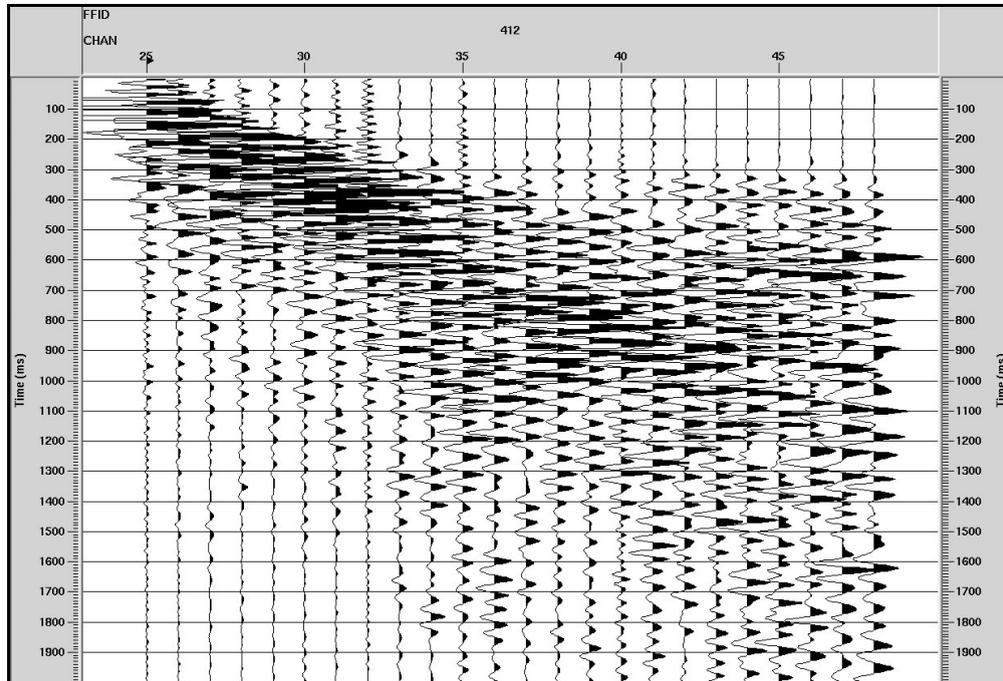
Tale configurazione ha permesso di ottenere due serie di dati, una per l'analisi a rifrazione ed una per l'analisi della dispersione delle onde superficiali.



**Fig. 2.** Rappresentazione dello schema d'acquisizione utilizzato a Piano Pernicana.

Ogni singolo array è stato connesso ad un sismografo Geode; l'unità di energizzazione, collocata nel vertice dello stendimento, è costituita dalla sorgente vibratoria Ivi-MiniVib® (proprietà del CRdC AMRA) nella configurazione per la

generazione di onde S. I dati sono stati acquisiti con oscillazione della massa del MiniVib sia parallelamente che perpendicolarmente all'asse d'oscillazione dei geofoni orizzontali (figura 3).



**Fig. 3.** Esempio di Common Shot Gather acquisito a Piano Pernicana. Lo shot rappresenta una registrazione ottenuta con un array di geofoni a componente verticale lungo la direzione N240; la sorgente è orientata in direzione N330.

Nel corso della stessa indagine, inoltre, sono state eseguite diverse registrazioni di tremore sismico (noise) utilizzando la stessa configurazione d'acquisizione.

Le due tecniche impiegate indagano bande spettrali differenti: mentre il metodo attivo consente di ottenere una curva di dispersione nel range di frequenza compreso tra 10 e 40 Hz e fornisce informazioni sulla parte più superficiale di sottosuolo, il metodo passivo consente di determinare una curva di dispersione nella banda di frequenza inferiore a 10 Hz e fornisce informazioni sugli strati più profondi (>20-30 m di profondità). Le bande di frequenza investigate, comunque, sono fortemente influenzate dalle caratteristiche di rigidità e di assorbimento dei terreni interessati e tendono ad aumentare al crescere della rigidità. La combinazione delle due tecniche consente di ottenere uno spettro completo nella banda di frequenza comprese tra 4 e 50 Hz, consentendo una dettagliata ricostruzione dell'andamento della velocità delle onde di taglio fino a circa 30-40 m di profondità.

## 4. STRUMENTAZIONE

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione del profilo sismico può essere descritta come costituita da 4 unità principali: sistema d'acquisizione dati, sistema di trasduzione, sistema di immagazzinamento dati e sistema di energizzazione.

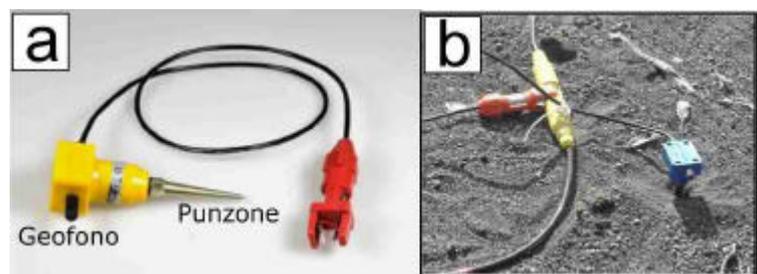
Il *sistema di acquisizione dati* è costituito da 4 sismografi modulari GEODE della Geometrics (da 24 canali cadauno). Il Geode (figura 4) è un sismografo a 24 bit ad elevata dinamica (144 dB di range dinamico totale - 105 dB istantanei), ampia banda d'ingresso (1.75 Hz - 20 kHz), con passo di campionamento da 0.02 ms a 16 ms, che amplifica e digitalizza il segnale



**Fig. 4.** Sismografo Geode

ricevuto dai geofoni e lo invia all'unità d'immagazzinamento dati. Ogni modulo è estremamente compatto (27 x 25 x 18 cm – circa 3 Kg) e può essere configurato da 3 a 24 canali. Più moduli geode possono essere collegati in serie da cavi di interfaccia digitali in modo da costituire sistemi fino a 1000 canali. Ogni modulo è alimentato autonomamente con batterie esterne da 12 Volt, con un consumo ridotto grazie ad un efficiente sistema di stand-by.

Il *sistema di trasduzione* è costituito da 48 geofoni Geospace 4,5 Hz verticali e 48 geofoni Geospace 4,5 Hz orizzontali per trasformare la sollecitazione dinamica imposta dalle vibrazioni del terreno, cui è reso solidale attraverso un punzone, in un



**Fig. 5.** A) geofono; b) particolare della connessione tra il geofono ed il cavo sismico

segnale elettrico proporzionale alla velocità di vibrazione. I segnali elettrici uscenti dai geofoni vengono inviati tramite cavi multipolari (cavi sismici) ad un sismografo che li registra in un formato digitale consentendone la successiva acquisizione (figura 5).

Parte integrante del sistema di traduzione ed acquisizione sono anche:

8 cavi sismici Geospace, 12 take-out con spaziature a 5 m;

4 cavi di interfaccia digitale, 125 m, per connessione moduli geode;

Il sistema d'immagazzinamento dati è rappresentato da un Laptop Panasonic CF-28 (figura 6). Il laptop, collegato tramite rete locale Ethernet ai 4 Geodi, svolge il compito di archiviare i dati digitalizzati provenienti dai Geodi (in formato seg-2), di gestire i parametri d'acquisizione e consente di valutare interattivamente la qualità dei dati acquisiti.



**Fig. 6.** Unità di archiviazione dati

Infine, il sistema di energizzazione è costituito da un sorgente sismica vibratoria - Ivi-MiniVib<sup>®</sup> (proprietà del CRdC AMRA) - progettata specificamente per applicazioni ad alta risoluzione. Il MiniVib<sup>®</sup> è un mezzo pesante gommato che trasporta e gestisce una massa vibrante di 168 Kg azionata da un meccanismo idraulico ad alta pressione (figura 7). Il vantaggio dell'utilizzo di tale sorgente vibratoria risiede nel fatto che è una sorgente "non invasiva". Nessun danno viene quindi arrecato alle strutture; tali rilievi, inoltre, sono meno costosi di quelli effettuati con la dinamite, presentano minori problemi organizzativi, possono essere effettuati anche in zone densamente popolate e su strade e autostrade.

L'Ivi-MiniVib<sup>®</sup> presenta le seguenti caratteristiche:

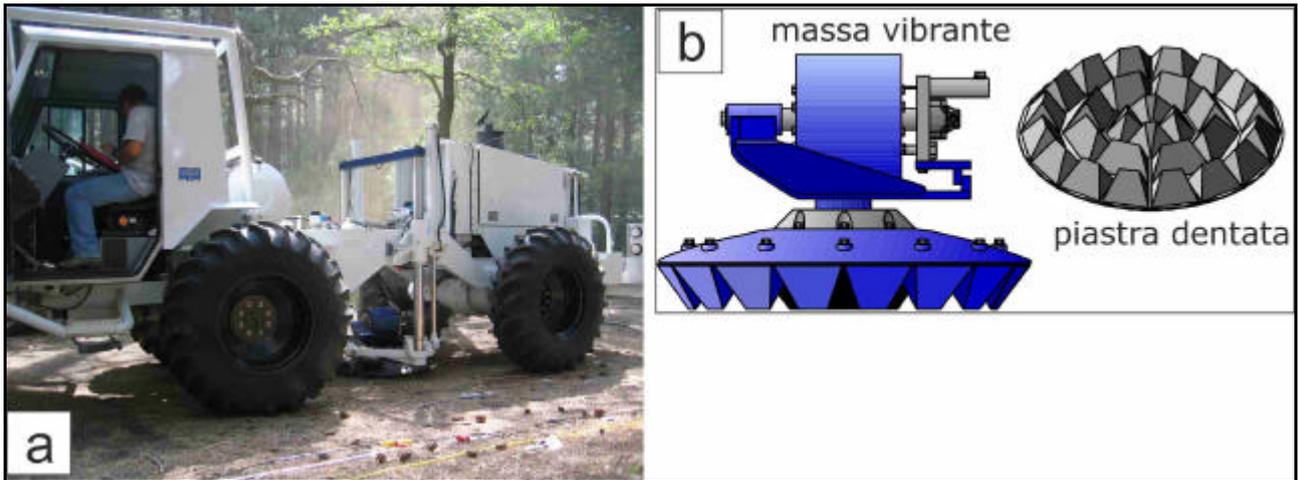
- Peso: 6368 Kg
- Lunghezza: 6.04 m
- Altezza: 2.59 m
- Larghezza: 2.46 m



**Fig. 7.** veicolo Ivi-MiniVib; le frequenze di oscillazione in esercizio del MINIVIB vanno da 5 Hz a 550 Hz.

L'Ivi-MiniVib<sup>®</sup> è una sorgente di energia utilizzata nei rilievi sismici terrestri, basata sull'immissione nel sottosuolo di un treno d'onda controllato (sweep) in ampiezza, fase e durata, della durata massima di 65 secondi. Viene usato un vibratore idraulico ad alta pressione, collegato ad una piastra di superficie di circa 6567 cm<sup>2</sup>, tenuta sospesa tra gli assi delle ruote di un automezzo speciale a 4 ruote motrici ed abbassata sul terreno al momento dell'energizzazione. La massima forza che produce un tale sistema sul terreno è di circa 27 kN.

L'esperienza di sismica attiva di Piano Pernicana è stato effettuato utilizzando il Minivib<sup>®</sup> nella configurazione per la generazione di onde S (figura 8a). Il vibratore, infatti, oltre che generare onde P, ha la possibilità di energizzare anche con onde S mediante la rotazione di 90° della massa vibrante ed il fissaggio di questa ad una piastra dentata (figura 8b). La sostituzione della piastra e la rotazione della massa oscillante sono stati eseguiti direttamente sul sito d'acquisizione in circa tre ore. In tale configurazione è poi possibile, inoltre, cambiare la direzione di oscillazione della massa, variandone l'azimut di vibrazione, attraverso la rotazione della stessa senza dover spostare il mezzo dalla posizione di energizzazione.



**Fig. 8.** a) il MiniVib impiegato per l'indagine a Piano Pernicana; b) schematizzazione del sistema vibrante configurato per generare onde S.

Il controllo e la gestione dei parametri del vibratore avviene tramite un PC interfacciato all'interno dell'automezzo all'unità di controllo SIB-100 (figura 9). Il SIB-100 controlla il sistema idraulico del Minivib ed è a sua volta collegata all'interfaccia RTS-100, che costituisce il collegamento radio con la stazione di acquisizione. La stazione di acquisizione a sua volta è connessa con un'interfaccia gemella del RTS-100, per trasmettere e ricevere il segnale pilota ed i riferimenti temporali.



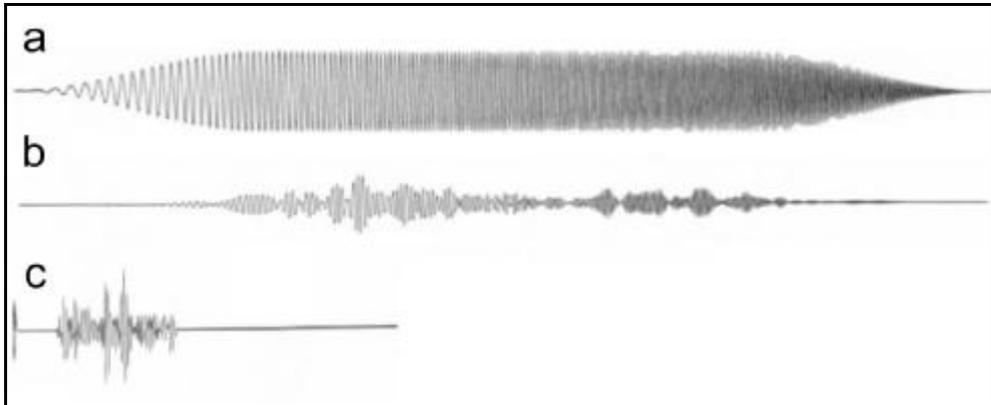
**Fig. 9.** PC di controllo installato all'interno del Minivib

Il MiniVib è capace di generare vibrazioni (sweep) da 5 a 550 Hz, lineari o non lineari (linear, db/Octave, db/Hertz, T-Power), inserire diversi tipi di smorzamento, e sono possibili diversi controlli sull'ampiezza del segnale emesso, sia manuali che automatici.

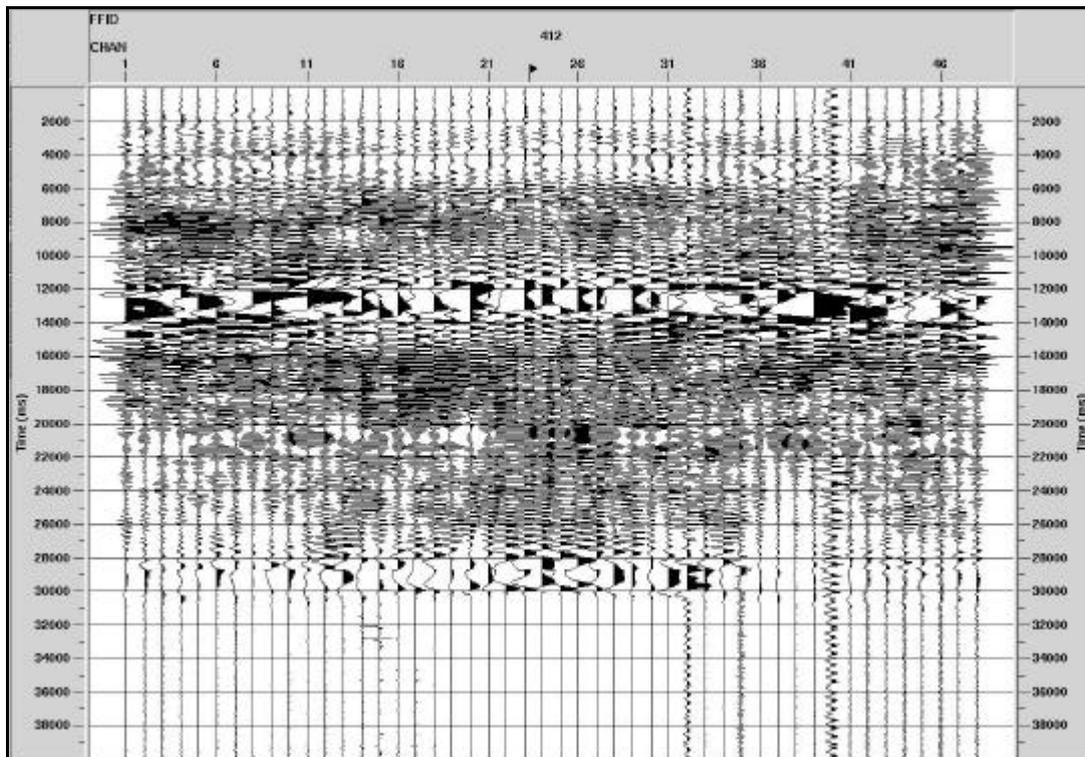
Il vibratore è dotato di due accelerometri, montati rispettivamente sulla piastra e sulla massa vibrante, i cui dati possono essere inviati alla stazione d'acquisizione, per essere registrati al fine di ottenere le funzioni di correlazione. Si possono trasmettere 3 diversi segnali pilota: a) il segnale sintetico (SYN); b) la composizione degli accelerometri non filtrata (GF); c) la composizione degli accelerometri filtrata con un filtro taglia alto, per rimuovere le armoniche superiori.

I dati registrati con sorgente vibratoria si presentano come treni di forme sinusoidali che non evidenziano la struttura del sottosuolo (figure 10 e 11). Solamente dopo un'operazione matematica (crosscorrelazione tra il segnale registrato e la forma

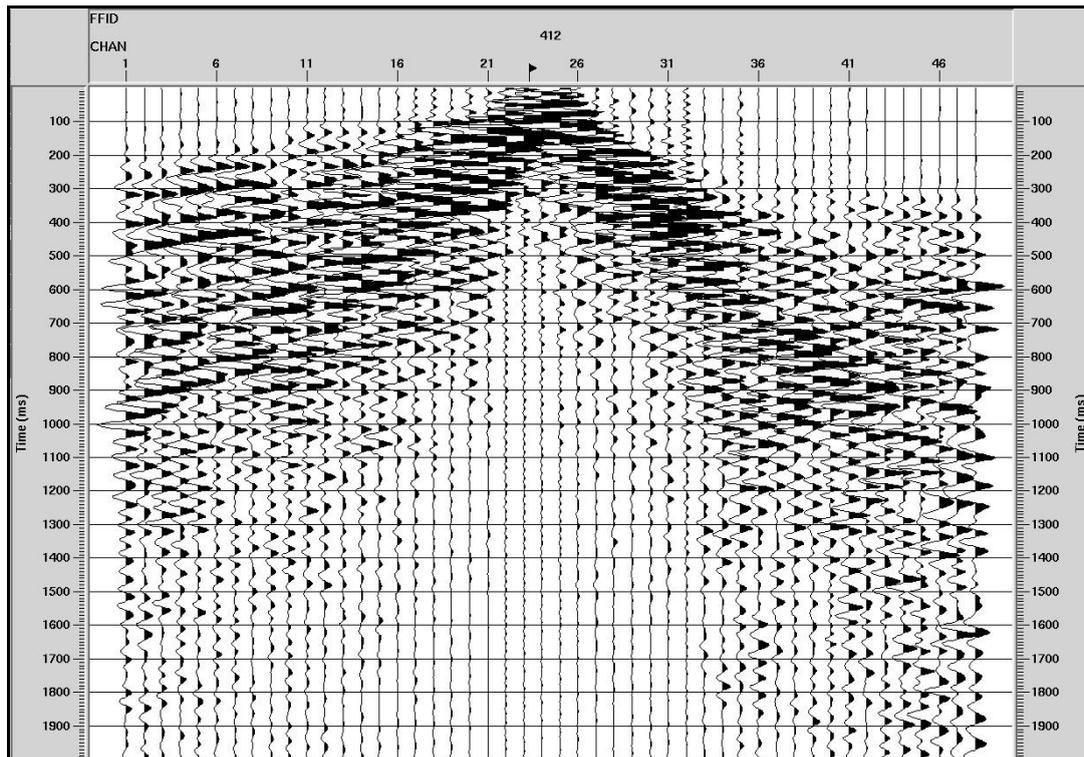
d'onda della sorgente - sweep) si ottiene un segnale sismico analogo a quello ottenuto mediante l'impiego di sorgenti impulsive (figura 12).



**Fig. 10.** Dati sintetici: a) esempio di sweep; b) registrazione del segnale inviato ad un ipotetico geofono; c) riflettività terrestre: risultato della crosscorrelazione tra a e b.



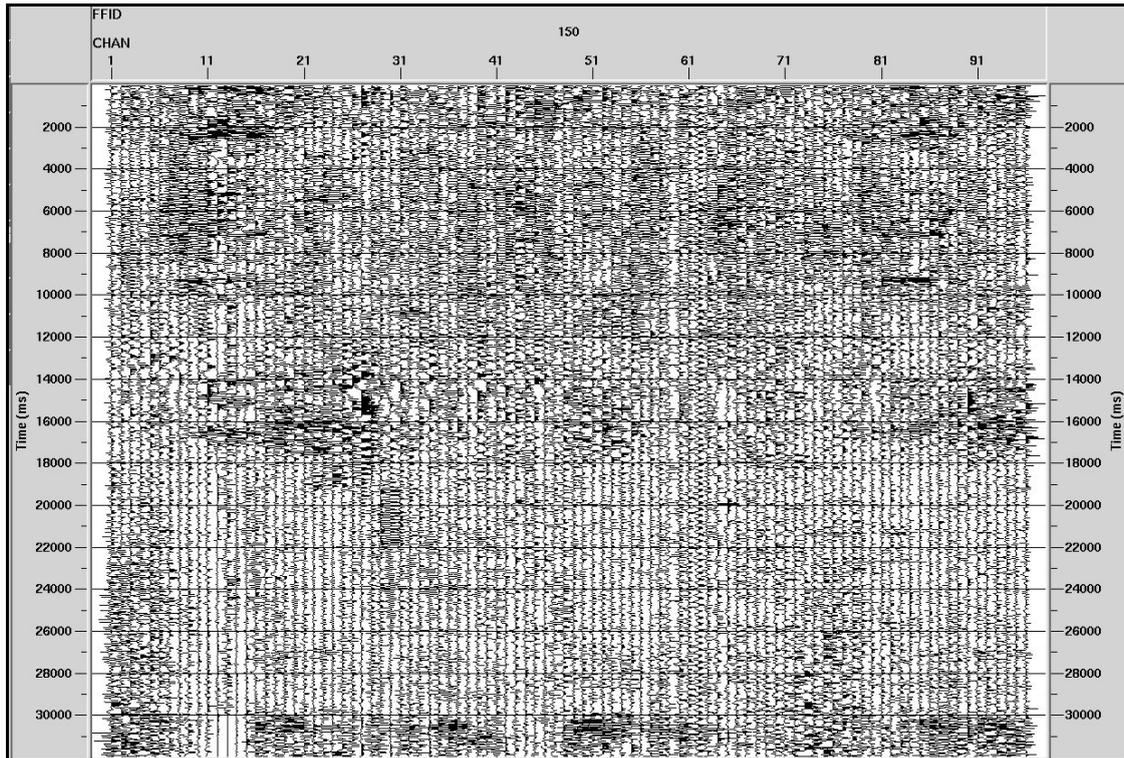
**Fig. 11.** Dati sperimentali: Common Shot Gather relativo al profilo sismico acquisito a Piano Pernicana prima dell'operazione di crosscorrelazione tra lo sweep e le registrazioni ai 48 geofoni. Lo shot rappresenta una registrazione ottenuta con 2 array di geofoni a componente verticale uno lungo la direzione N240 (dal canale 1 al 24) ed uno in direzione N330 (dal canale 25 al 48).



**Fig. 12.** Dati sperimentali Common Shot Gather relativo al profilo sismico acquisito a Piano Pernicana dopo l'operazione di crosscorrelazione tra lo sweep e le registrazioni ai 48 geofoni. La crosscorrelazione ha compresso il segnale registrato (i 32 secondi di registrazione della figura precedente sono stati compressi in 2 secondi) restituendo l'informazione desiderata: la riflettività terrestre

In ogni posizione d'energizzazione sono stati acquisiti 2 sweep lineari della durata di 30 s, con frequenze che vanno dai 5 ai 40 Hz; il passo di campionamento impiegato è stato di 4 ms. La somma delle due registrazioni in un'identica posizione consente di ridurre notevolmente il rumore ambientale già in fase d'acquisizione.

Durante la prova MASW passiva sono state registrate 10 finestre di rumore sismico della durata di 32 secondi ciascuna con un passo di campionamento di 2 ms (figura 13).



**Fig. 13.** Noise test registrato a Piano Pernicana.

Per ogni stendimento sono state anche acquisiti dati ottenuti mediante l'immissione nel terreno di sweep monofrequenza rispettivamente a 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 Hz ciascuno registrato con una finestra temporale di 32 secondi e con un passo di campionamento di 4 ms.

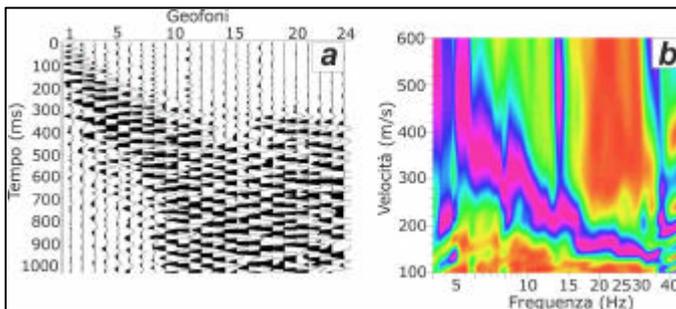
L'integrazione dei differenti dataset acquisiti (sweep monofrequenza, up-sweep lineari e noise) ha permesso una migliore validazione della curva di dispersione per entrambe le direzioni d'acquisizione (N330 e N240).

## **5. ANALISI SPETTRALE E RISULTATI PRELIMINARI**

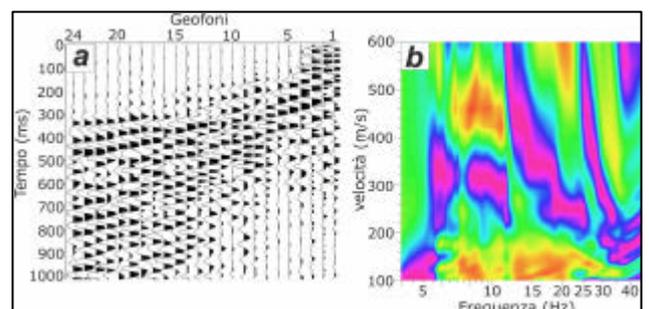
Il metodo MASW si basa sull'analisi delle velocità delle onde di Rayleigh. Il processo usato per produrre profili di velocità delle onde S a partire dalle onde di Rayleigh, ha richiesto tre passi:

- 1) l'acquisizione delle onde di superficie (ground roll);
- 2) la costruzione della curva di dispersione (il grafico della velocità di fase e/o della "slowness" in funzione della frequenza);
- 3) inversione per ottenere il profilo delle Vs a partire dalla curva di dispersione calcolata (Park et al., 1999).

Per procedere all'elaborazione è stato necessario rimuovere lo sweep dalle tracce registrate, attraverso la crosscorrelazione, covertendolo in un segnale impulsivo (figure 14a e 15a). Assegnata la geometria d'acquisizione, dai registrati è stato possibile quindi ottenere un grafico velocità di fase-frequenza (figure. 14b and 15b) che mostra le ampiezze corrispondenti ad ogni coppia di valori velocità-frequenza.



**Fig. 14.** a) Esempio di dato registrato con sorgente sismica attiva lungo il profilo N330; b) dispersione ottenuta dall'analisi dei dati raffigurati in (a).



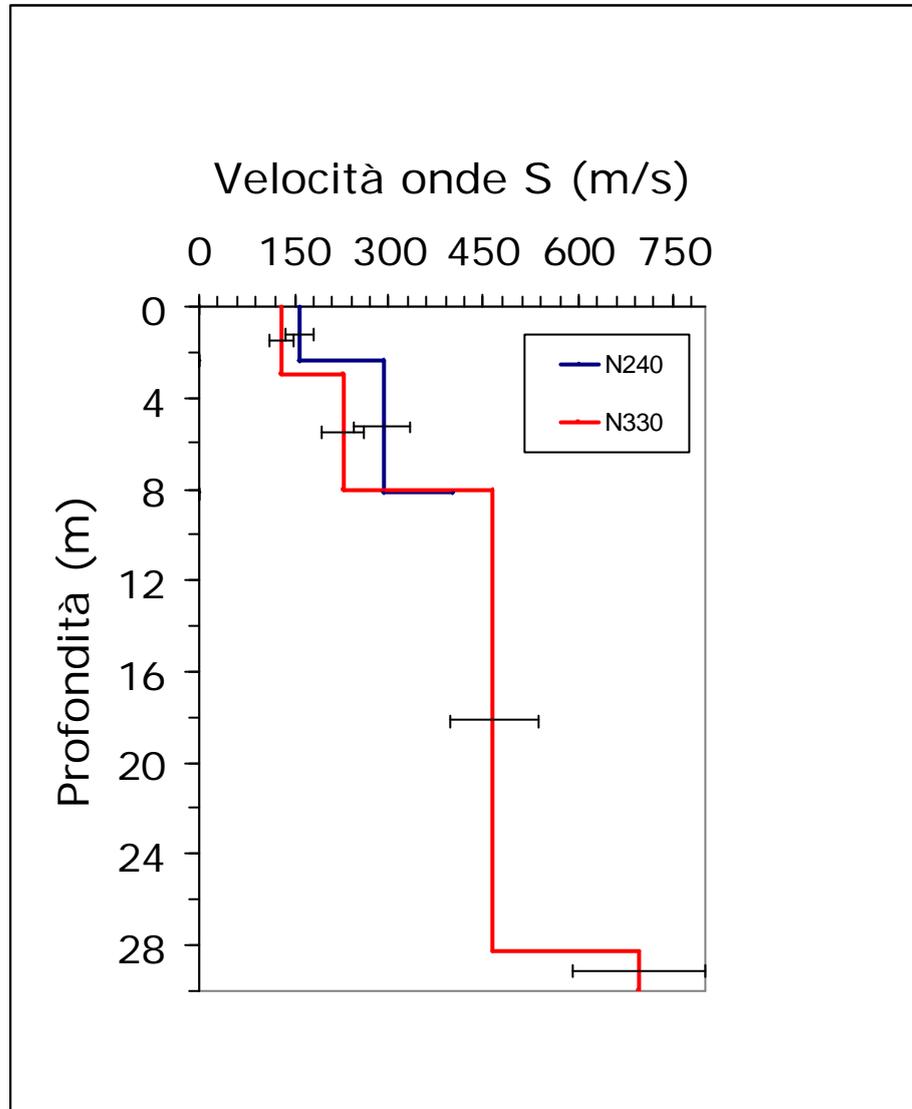
**Fig. 15.** a) Esempio di dato registrato con sorgente sismica attiva lungo il profilo N240; b) dispersione ottenuta dall'analisi dei dati raffigurati in (a).

Da questi grafici (figure. 14b and 15b) si estrae la curva di dispersione sperimentale del modo fondamentale delle onde di Rayleigh effettuando il *picking* sul massimo di ampiezza nello spettro di velocità.

Partendo, poi, da un modello geotecnico iniziale del sottosuolo, caratterizzato da: velocità delle onde S, velocità delle onde P, densità dello strato e coefficiente di Poisson, è stata ricavata la curva di inversione teorica che viene confrontata con quella sperimentale. Il modello iniziale è stato ottenuto sulla base delle informazioni ricavate dall'analisi a rifrazione dei dati.

Sono stati eseguiti diversi test dei parametri del modello iniziale sino ad ottenere la migliore sovrapposizione della curva teorica con la curva di inversione sperimentale.

Il processo d'inversione è basato sul "neighbourhood algorithm" (Sambridge, 1999) implementato da Wathelet 2008. I risultati dell'inversione per entrambe le direzioni (N330 e N240) sono mostrati in figura 16.



**Fig. 16.** Andamento della  $V_s$  con la profondità per i profili N330 (in rosso) e N240 (in blu). Per entrambi i profili, la barra di errore è stata stimata, in accordo con Xia et al., 2002, essere circa il  $\pm 15\%$  delle velocità reali.

## **RINGRAZIAMENTI**

Le attività di questo rapporto sono state attuate grazie a fondi di ricerca della sezione "Sismologia e Tettonofisica" dell'INGV di Roma e un parziale contributo finanziario del Progetto FLANK della convenzione DPC -INGV degli anni 2008-2010.

Si ringrazia Marco Neri della sezione INGV di Catania, per le utili informazioni fornite e la fattiva collaborazione.

Si ringraziano inoltre Paolo Gasparini, Roberto Muti e Fabio Vigliotta di AMRA S.C.aR.L. per il supporto scientifico ed amministrativo.

## **6. BIBLIOGRAFIA**

APAT. Note illustrative della carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 613: Taormina. A cura di: Catalano S.. Con i contributi di: Corsaro R.A., Marino M. Con la collaborazione di: Branca S., Cirrincione R., De Guidi G., Di Stefano A., Mazzoleni P.

Park C. B., Xia, J., and Miller, R. D., 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, Vol. 64, No. 3 P. 800–808.

Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm I. Searching a parameter space, *J. Geophys. Res.*, 103, 4839-4878.

Xia J., Miller R. D., Park Choon B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, Vol. 64, No. 3; p. 691–700.

Xia J., Miller R. D., Park Choon B., Hunter A.J., Harris J.B., Ivanov J. (2002). Comparing shear-wave velocity profiles inverted from multichannel surface wave with borehole measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 22, Issue 3, pp. 181-190.

Wathelet, M., D. Jongmans, M. Ohrnberger and S. Bonnefoy-Claudet. (2008). Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over vs inversion, *J. Seismol.*, 12, 1-19, doi: 10.1007/s10950-007-9067-x.