

## STUDIO DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE ED ANELASTICHE DEL FRIULI ATTRAVERSO EVENTI REGISTRATI DALLA STAZIONE A LARGA BANDA DI TRIESTE

### INDICE

RIASSUNTO	pag.	65
ABSTRACT	"	65
INTRODUZIONE	"	65
METODO	"	65
MISURA DELLE CURVE DI DISPERSIONE E LORO INVERSIONE	"	66
ANALISI NEL DOMINIO DEI TEMPI	"	67
CONCLUSIONI	"	69
BIBLIOGRAFIA	"	69

### RIASSUNTO

Presso l'Istituto di Geodesia e Geofisica dell'Università di Trieste è in funzione un sismografo digitale a banda molto larga (VBB) che fa parte della rete internazionale MEDNET. Con il metodo della stazione singola per l'analisi della dispersione delle onde di superficie, esteso al dominio dei tempi, sono stati analizzati due segnali di eventi avvenuti, nell'area sismica del Friuli, ad una distanza compresa tra 70 e 90 km dalla stazione. L'analisi dei segnali ha permesso di ottenere informazioni dettagliate sulle caratteristiche elastiche crostali medie e sulla profondità focale degli eventi dell'area. L'uso sistematico di registrazioni con un ampio contenuto spettrale, congiunto con l'applicazione delle moderne tecniche di analisi del segnale permetterà di raggiungere un conoscenza molto accurata dei parametri di sorgente e strutturali nell'area indagata.

### ABSTRACT

At the Istituto di Geodesia e Geofisica of the Università di Trieste a Very Broad Band (VBB) seismometer is operating. This instrument is part of the International network MEDNET. Using the single station technique for surface waves dispersion analysis, extended to the time domain, two events occurred in the Friuli seismic area, and recorded by the VBB station, at a distance between 70 and 90 km, have been analysed. The signal's analysis permits to obtain information about the detailed crustal elastic average characteristics and about the source depths of the events of the area. The systematic use of VBB records, with a broad frequency content, in conjunction with the use of the most powerful techniques for the analysis of the seismic signal will allow us to obtain a quite detailed knowledge of the seismotectonic of the studied area.

(\*) Istituto di Geodesia e Geofisica, Università di Trieste, via Università 7, 34100 Trieste

(\*\*) International Center for Theoretical Physics, Miramar, 34100 Trieste

PAROLE CHIAVE: Curve di dispersione, larga-banda.

KEYWORDS: Dispersion curves, broad-band.

### INTRODUZIONE

Dal 1991, presso l'Istituto di Geodesia e Geofisica (IGG) dell'Università di Trieste è in funzione uno strumento a banda molto larga, inserito nella rete internazionale MEDNET, gestita dall'Istituto Nazionale di Geofisica (ING-Roma). La rete è costituita da strumenti digitali, con caratteristiche molto simili tra loro ed alti standards tecnologici, installati in paesi dell'area mediterranea. Lo strumento installato presso l'IGG è formato da un sensore verticale Streckeisen STS-1/VBB (WIELANDT & STRECKEISEN, 1982) accoppiato ad un'elettronica Quantetra (WIELANDT & STEIM, 1985), con convertitore analogico digitale da 24 bits e dinamica di 140 dB. Questo strumento, con un periodo proprio di 360 s, permette la registrazione, con una risposta piatta in velocità da 0.1 s a 300 s, di segnali che vanno dal minimo evento locale all'ampio spettro dei telesismi. La disponibilità di segnali digitali, con una grande dinamica in un ampio spettro di frequenze, ha dato un nuovo impulso alla sismologia quantitativa. Tecniche di analisi già validamente sperimentate per intervalli di frequenza limitati, sono state implementate per sfruttare le maggiori informazioni contenute nei segnali a larga banda. È il caso, per esempio, del metodo della stazione singola (CHENG & MITCHELL, 1981; KIJKO & MITCHELL, 1983). Questo metodo, nato per l'analisi di segnali a lungo periodo, ed esteso al dominio dei tempi da CRAGLIETTO *et al.* (1989), permette di ricavare le proprietà elastiche ed anelastiche medie della struttura campionata, mediante l'analisi delle onde superficiali - modo fondamentale e modi superiori.

In particolare, per quanto riguarda la misura dell'anelasticità, la difficoltà di determinare le ampiezze assolute di un segnale, a causa dell'indeterminatezza dell'energia del terremoto e delle esatte caratteristiche di amplificazione assoluta dello strumento, rendono l'utilizzo delle onde superficiali, modo fondamentale e modi superiori, molto conveniente. Infatti, l'attenuazione può essere determinata dal rapporto tra le ampiezze del modo fondamentale e le ampiezze dei modi superiori, svincolandosi, quindi, dalla necessità di avere misure assolute di ampiezza.

### METODO

Il metodo qui impiegato, i suoi limiti e le sue possibilità, sono descritte in dettaglio da CRAGLIETTO *et al.* (1989), verrà qui solo brevemente accennato. Inizialmente vengono de-

terminati i parametri di primo ordine, cioè i parametri elastici della struttura e la profondità dell'evento. I parametri elastici vengono ricavati dall'inversione delle curve di dispersione del modo fondamentale e dei primi modi superiori (YANOVSKAYA, 1984), determinate utilizzando la "multiple-filter technique" e precisamente la versione implementata nel programma FTA (*Frequency Time Analysis*) (KEILIS-BOROK, 1989). Una volta determinate le proprietà elastiche, si passa alla determinazione delle proprietà anelastiche, analizzando il rapporto tra l'ampiezza del segnale del modo fondamentale rispetto a quelle dei primi modi superiori con l'aiuto delle serie temporali sintetiche, calcolate in maniera completa, utilizzando il metodo della somma multimodale (PANZA, 1985).

### MISURA DELLE CURVE DI DISPERSIONE E LORO INVERSIONE

I segnali utilizzati in questo lavoro sono due registrazioni di eventi avvenuti nell'area sismica del Friuli (Fig. 1), il terremoto del 11/6/91 (lat. 46.261, long. 12.927) (Fig. 2a) e quello del 5/10/91 (lat. 46.273, long. 13.431) (Fig. 2b). L'evento del 11/6 è avvenuto ad una distanza di 94 km dalla stazione, con una magnitudo locale (ING) pari a 4.1, mentre l'evento di ottobre è avvenuto ad una distanza di 74 km con una magnitudo locale (ING) pari a 4.2.

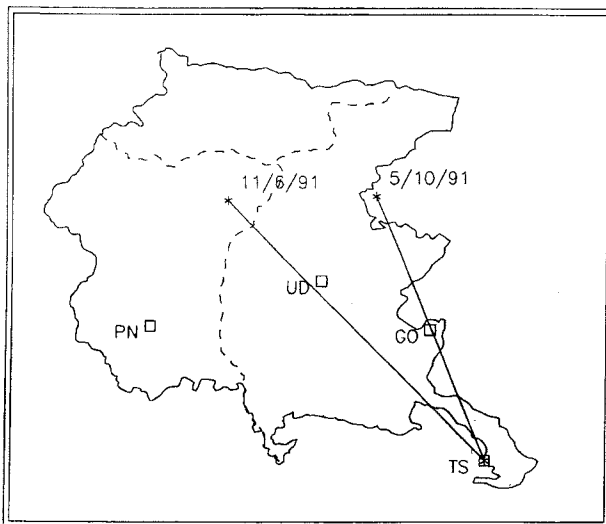


Fig. 1 - Profili analizzati. Gli asterischi indicano gli epicentri dei due eventi studiati, identificati dalla data di occorrenza.

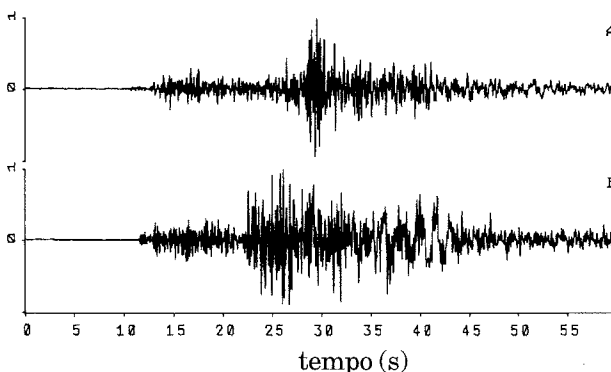


Fig. 2 - Segnali registrati nella stazione a larga banda di Trieste, relativi agli eventi riportati in Fig. 1.

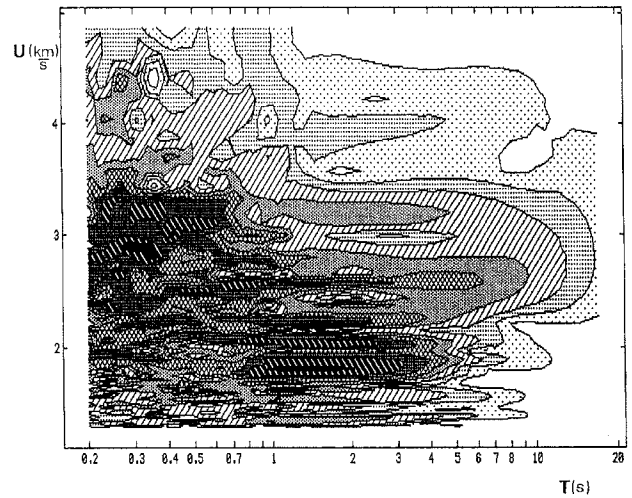


Fig. 3 - Diagramma Periodo(T)-Velocità di gruppo(U) per l'evento del 5/10/91.

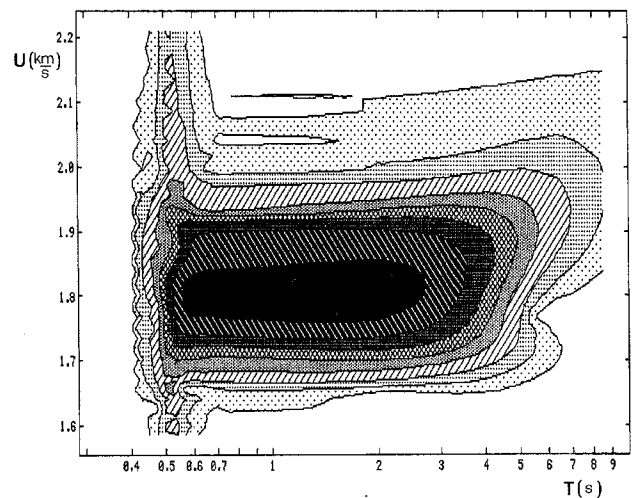


Fig. 4 - Come in Fig.3, ma per il solo modo fondamentale.

Il procedimento per la determinazione sperimentale delle curve di dispersione delle onde superficiali, su cui si basa il programma FTA, utilizza la "Frequency Time Analysis (FTAN)" (LEVSHIN *et al.*, 1972) che rappresenta un'ottimizzazione della "multiple filter technique" di DZIEWONSKI *et al.* (1969). Tale metodologia è finalizzata ad una rappresentazione bidimensionale della serie temporale in grado di risolvere e separare le curve di dispersione dei vari modi di oscillazione.

In Fig. 3 è riportato il diagramma Periodo (T) - Velocità di gruppo (U) per il segnale del 5/10/91. I massimi di energia (grigio scuro) visibili nel diagramma, tra 2.0 km/s e 3.5 km/s, rappresentano il contributo dei diversi modi superiori, che non risultano però risolvibili. Questi massimi di energia rimangono, comunque, un riferimento importante per il confronto con le curve di dispersione teoriche. Il modo fondamentale è caratterizzato dal massimo, visibile in Fig. 3, che va da 1 a 3 secondi in corrispondenza di una velocità di gruppo di circa 1.8 km/s. Utilizzando la flessibilità del programma FTA, che permette, grazie a diversi tipi di filtraggio, di estrarre dal segnale il contributo dei diversi modi, si è estratto il contributo del modo fondamentale (Fig. 4).

Le velocità di gruppo così ricavate, sono state invertite, utilizzando tecniche di inversione lineare (BACKUS & GILBERT,

1968) per ottenere i parametri elastici della struttura. Come modello strutturale superficiale di partenza si è utilizzato il modello ottenuto dall'inversione simultanea degli ipocentri e dei parametri elastici (MAO, 1992).

In Fig. 5 sono mostrate le curve sperimentali di dispersione per i due eventi, confrontate con le curve teoriche ottenute dopo l'inversione, e corrispondenti ai modelli strutturali riportati nelle Fig. 6a e 6b. Per l'evento di ottobre è stato possibile riconoscere il modo fondamentale in due intervalli di frequenza diversi: tra 0.1 e 0.3 Hz e tra 0.4 e 0.8 Hz, mentre per l'evento di giugno ci si è limitati all'inversione nell'intervallo 0.08 - 0.28 Hz.

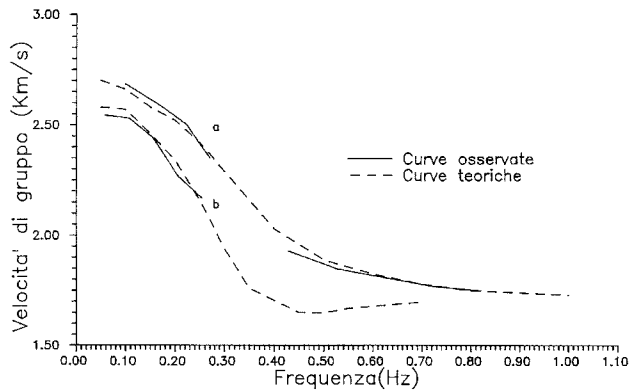


Fig. 5 - Confronto fra velocità di gruppo osservate e curve teoriche ottenute dall'inversione.

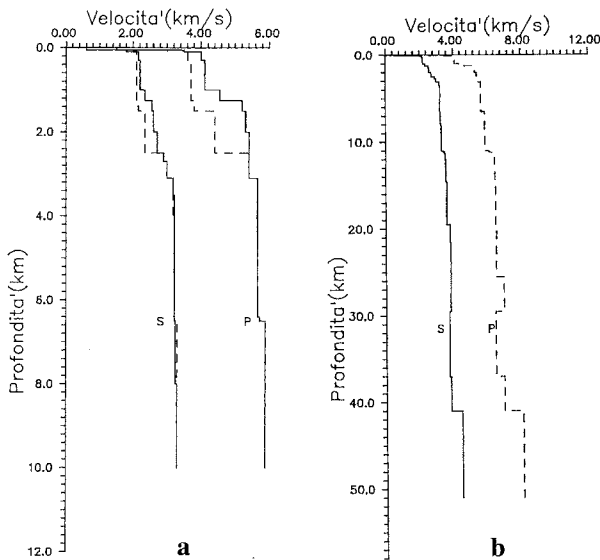


Fig. 6a - Distribuzione della velocità delle onde P ed S nei primi 10 km del modello strutturale corrispondente alla curva a) (linee continue) ed alla curva b) (linee tratteggiate) di Fig. 5. Per profondità superiori a 10 km i due modelli sono coincidenti e sono rappresentati in Fig. 6b.

#### ANALISI NEL DOMINIO DEI TEMPI

Una volta determinati i parametri elastici, utilizzando l'analisi nel dominio delle frequenze, si è passati all'analisi nel dominio dei tempi. Per il calcolo dei sismogrammi sintetici si è utilizzato il metodo della somma multimodale sviluppato da PANZA (1985).

La scarsità dei dati sulle polarità dei primi arrivi per i

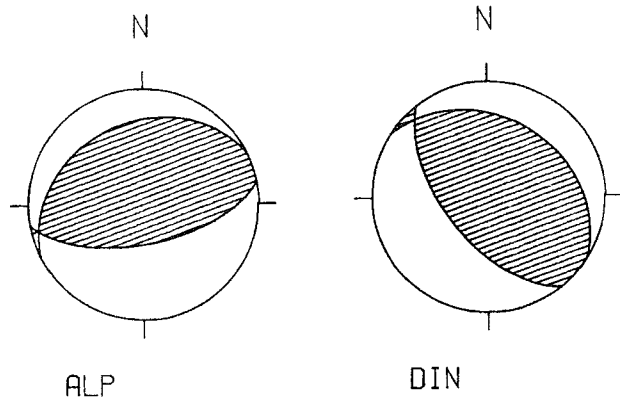


Fig. 7 - Meccanismi focali più probabili per l'area studiata.

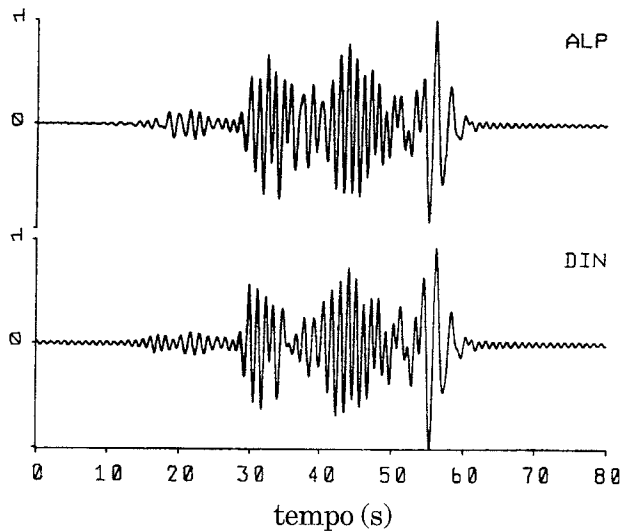


Fig. 8 - Segnali sintetici corrispondenti ai due meccanismi mostrati in Fig. 7, calcolati con profondità ipocentrale di 3 km. I parametri focali sono dati in Tabella 1.

due eventi non permette la definizione dettagliata del meccanismo focale. Pertanto sono stati utilizzati i due meccanismi caratteristici della zona sismica del Friuli, estratti dal *database* di meccanismi focali di SUHADOLC (1990). I due meccanismi usati, uno di tipo alpino (ALP) ed uno di tipo dinarico (DIN) sono mostrati in Fig. 7. Il meccanismo alpino risulta in soddisfacente accordo con le poche polarità dei primi arrivi disponibili per l'evento di giugno. In Fig. 8 sono mostrati i sismogrammi sintetici calcolati, con una frequenza massima di 1 Hz, utilizzando i due meccanismi, ALP e DIN, ed i parametri focali dati in Tab. 1.

Tab. 1 - Parametri focali per i meccanismi ALP e DIN.

	ALP	DIN
Dip	61,5	59,0
Slip	97,8	100,0
Strike	79,7	142,0

Dal confronto dei segnali sperimentali, filtrati ad una frequenza di 1 Hz, con i corrispondenti segnali teorici, calcolati per diverse profondità della sorgente, si può

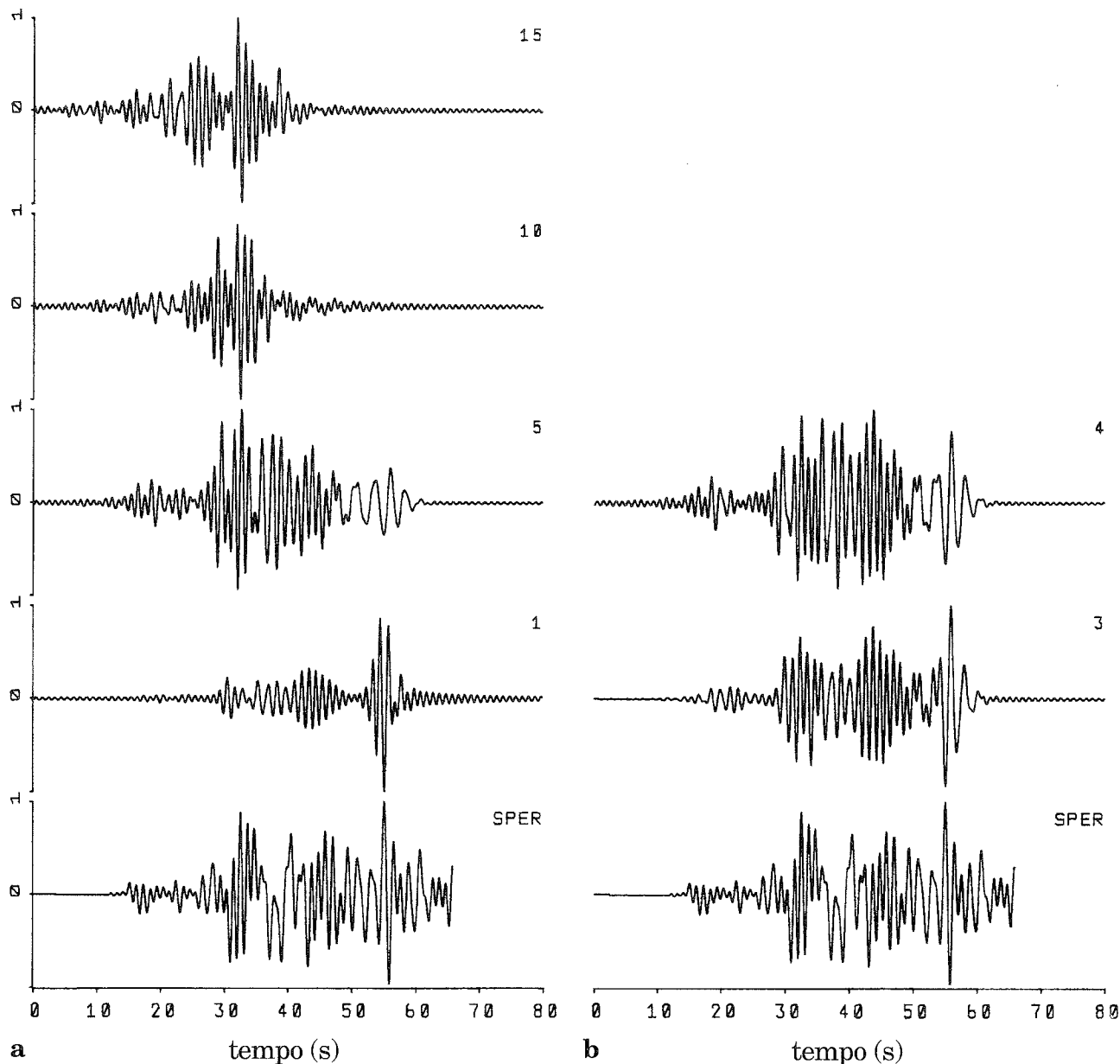


Fig. 9 - Confronto fra sismogrammi sintetici corrispondenti a diverse profondità ipocentrali per la sorgente con meccanismo ALP e segnale sperimentale dell'evento del 11/6/91. La parte a) si riferisce ad una campionatura grossolana delle profondità, mentre la parte b) rappresenta il potere risolutivo del metodo.

determinare la profondità focale degli eventi con una incertezza dell'ordine del chilometro. In Fig. 9 sono mostrati i sismogrammi sintetici, calcolati a diverse profondità ipocentrali, confrontati con il segnale sperimentale del terremoto di giugno (SPER). Da una prima indagine grossolana (Fig. 9a) risulta evidente che la profondità ipocentrale deve essere compresa tra 1 km e 5 km, quindi successivamente sono stati calcolati i sismogrammi sintetici a 3 km e 4 km di profondità ipocentrale (Fig. 9b). Osservando che alla variazione di un chilometro nella profondità ipocentrale corrisponde una variazione notevole nel rapporto di ampiezza tra modo fondamentale e modi superiori, si può concludere che la profondità della sorgente di questo evento è compresa tra 3 km e 4 km. Un analogo procedimento permette di concludere che la profondità focale dell'evento di ottobre è attorno ai 2 km (Fig. 10).

Una volta fissati i parametri elastici della struttura e la profondità della sorgente si può tentare la determinazione delle caratteristiche anelastiche. Infatti, rispetto alle variazioni dei parametri elastici e della profondità della sorgente, le variazioni dei parametri anelastici rappresentano un effetto di secondo ordine. Data la breve distanza sorgente-ricevitore è necessario considerare frequenze superiori ad 1 Hz. Quindi, utilizzando i risultati fin qui ottenuti con l'analisi dei segnali filtrati ad 1 Hz sono stati calcolati dei segnali sintetici con frequenza massima pari a 10 Hz, il cui confronto con i dati sperimentali (Fig. 11) permette di concludere che i primi 4-5 km dei modelli riportati in Fig. 6 sono caratterizzati da un fattore di qualità  $Q_b$  prossimo a 50, mentre la parte più profonda è caratterizzata da valori di  $Q_b$  dell'ordine di 500, in ottimo accordo con le precedenti misure di Craglietto *et al.* (1989).

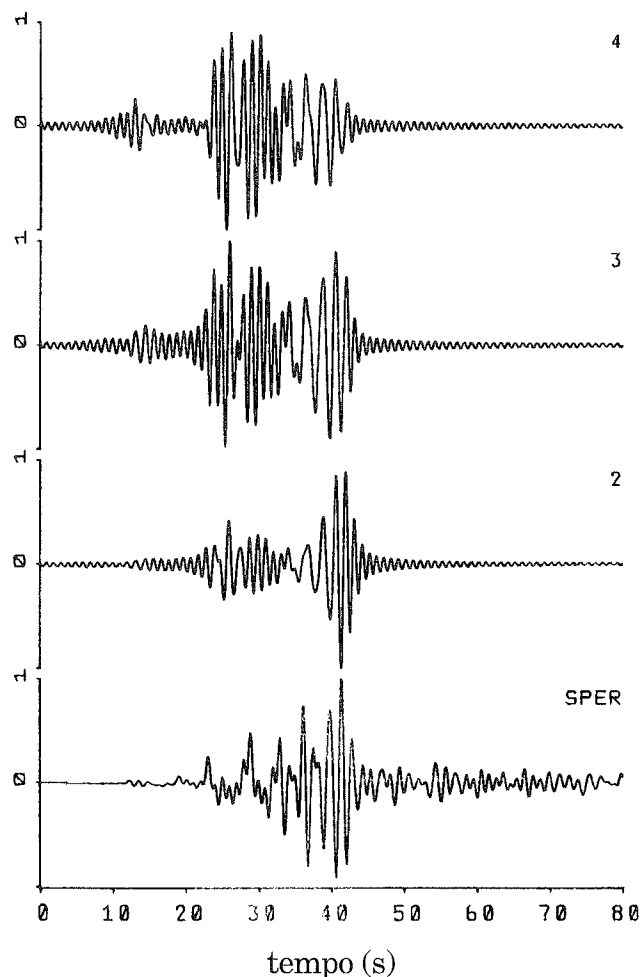


Fig. 10 - Come in Fig. 9 ma per l'evento del 5/10/91.

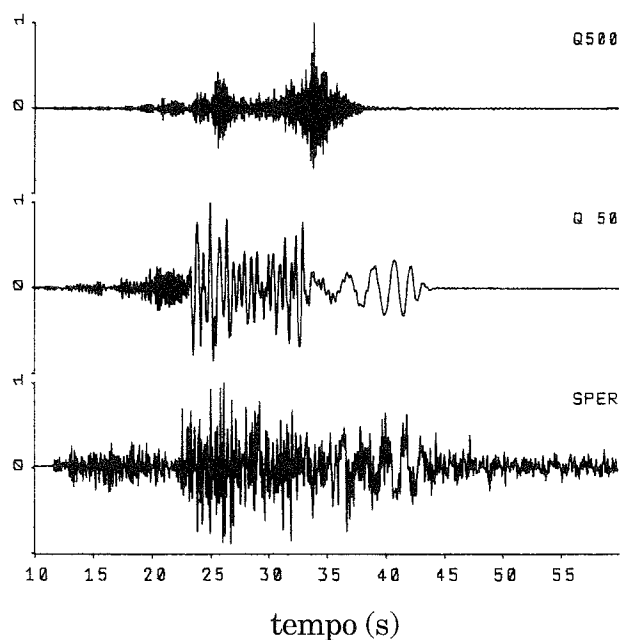


Fig. 11 - Confronto tra segnale sperimentale e sismogrammi sintetici (massima frequenza 10 Hz) per due modelli estremi di  $Q_b$  per i primi 4-5 km.

## CONCLUSIONI

Avendo a disposizione segnali registrati da stazioni digitali a larga banda, dallo studio della propagazione delle onde superficiali, modo fondamentale e modi superiori, è possibile, in tempi brevi ed a basso costo, determinare, con una notevole precisione, i parametri elastici medi della struttura attraversata dai segnali e la profondità focale della sorgente. Ciò è dovuto al fatto che il metodo utilizzato sfrutta la maggior parte delle informazioni contenute in una serie temporale completa.

Con più registrazioni di uno stesso evento è possibile applicare tecniche ancor più sofisticate per l'inversione automatica sia della struttura che della sorgente (SILENY *et al.*, 1992; MAO *et al.*, 1992). La possibilità di studiare l'attenuazione dell'energia sismica, in particolare, dà una misura diretta del grado di anelasticità, e risulta quindi un'importante fonte di informazione sullo stato fisico e sulla temperatura della crosta.

La stazione a larga banda di Trieste risulta di fondamentale importanza per lo studio della crosta e delle sorgenti sismiche del Friuli e delle Alpi orientali. L'uso sistematico di registrazioni con un ampio contenuto spettrale, congiunto con l'applicazione delle moderne tecniche di analisi del segnale permetterà di raggiungere un conoscenza molto dettagliata dei parametri di sorgente e strutturali nell'area indagata.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'ENEA che tramite il Centro di Calcolo INFOBOL, ha messo a disposizione il calcolatore IBM 3090E, sul quale è stata effettuata una parte dei calcoli, e per il supporto finanziario il CNR (contratti n°91.02539.54 e n°92.00068.12) ed il MURST (fondi 40% e 60%).

## BIBLIOGRAFIA

- BACKUS G. & GILBERT F. (1968) - *The resolving power of gross earth data*. Geophys. J. Roy. Astron. Soc., **16**, 169-205.
- CHENG C.C. & MITCHELL B.J. (1981) - *Crustal Q structure in the United States from multi-mode surface waves*. Bull. Seismol. Soc. Am., **71**, 161-181.
- CRAGLIETTO A., PANZA G.F., MITCHELL B.J. & COSTA G. (1989) - *Anelastic properties of the crust in the Mediterranean area*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 51, IUGG, **6**, 179-196.
- DZIEWONSKI A., BLOCH S. & LANDISMAN M. (1969) - *A technique for the analysis of transient seismic signals*. B.S.S.A., **59**, 427-444.
- KIJKO A. & MITCHELL B.J. (1983) - *Multimode Rayleigh wave attenuation and  $Q_b$  in the crust of the Barents shelf*. J. Geophys. Res., **88**, 3315-3328.
- LEVSHIN A.L., PISARENKO V.F. & POGREBINSKY G.A. (1972) - *On a frequency-time analysis of oscillations*. Annales geophys., **28** 211-218.

- KEILIS-BOROK V.I. (1989) - *Seismic surface waves in a laterally inhomogeneous Earth*. Edited by KEILIS-BOROK, Kluwer Academic Publishers.
- MAO W.J. & SUHADOLC P. (1992) - *Simultaneous inversion of velocity structures and hypocentral application to the Friuli seismic area Nord-East Italy*. *Pageoph*, **138**, N.2.
- PANZA G.F. (1985) - *Sinthetic seismograms: the Rayleigh Waves modal summation*. *J. Geophysics*, **58**, 125-145.
- SILENY J., PANZA G.F. & CAMPUS P. (1992) - *Waveform inversion for point source moment tensor retrieval with variable hypocentral depth and structural model*. *Geophys. J. Int.*, **109**, 259-274.
- SUHADOLC P. (1990) - *Fault-plane solutions and seismicity around the EGT southern segment*. In: R. FREEMAN & ST. MUELLER (Eds.), *Proc. 6th Workshop on the European Geotransverse (EGT), Data compilations and synoptic interpretation*. European Science Foundation, Strasbourg, 371-382.
- WIELANDT E. & STEIM M. (1985) - *A digital very broad-band seismograph*. *Annales Geophys.*, **4**, 227-232.
- WIELANDT E. & STRECKEISEN G. (1982) - *The leaf-spring seismometer: design and performance*. *B.S.S.A.*, **72**, N.2, 2349-2367.
- YANOVSKAYA T.B. (1984) - *Solution of the inverse problem of seismology for laterally inhomogeneous media*. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, **79**, 293-304.