

Osservazioni sulla determinazione dei moduli elastici dinamici. Note sulle applicazioni del telerilevamento in campo geotecnico

R. CASSINIS *

SOMMARIO: 1) Per il problema della corretta determinazione dei moduli elastici dinamici si fa osservare che, spesso, non è possibile ottenere con sufficiente chiarezza e precisione gli impulsi successivi (soprattutto le onde di taglio). In tal caso è utile un procedimento di analisi periodale che può essere realizzato in tempo reale collegando l'apparecchiatura di registrazione a un microprocessore.

2) Le applicazioni delle tecniche di telerilevamento nel campo geotecnico e, in genere, della geologia applicata all'ingegneria, non sono ancora molto diffuse soprattutto perché la piattaforma più adatta per l'osservazione ripetuta dei fenomeni, e cioè il satellite artificiale, non è ancora utilizzabile data l'insufficiente risoluzione geometrica dei sensori di bordo.

1. Osservazioni sulla misura dei moduli elastici dinamici

La tendenza attuale è di ottenere sempre maggiori informazioni dalla prospezione sismica. All'indagine puramente geometrica, che si basa essenzialmente sulla determinazione dei tempi di arrivo delle onde compressionali, si è aggiunta un'analisi sempre più qualitativa.

In campo geotecnico, occorre misurare parametri atti a classificare le rocce e i terreni secondo le loro caratteristiche meccaniche. In particolare, e limitandoci ai parametri cinematici, la misura congiunta delle velocità delle onde P e delle onde S consente di calcolare le costanti elastiche (*dinamiche*) del mezzo. Difatti se V_p e V_s sono rispettivamente, le velocità delle onde P e S in m/sec e ρ è la densità, le costanti elastiche più significative sono espresse da:

Rapporto di Poisson:

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}{\left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}$$

Modulo di Young:

$$E = \frac{\rho \cdot V_s^2 \left[3 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 4 \right]}{\left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1 \right]}$$

Costanti di Lamé:

$$\mu = \rho \cdot V_s^2 \quad \lambda = \rho \cdot V_s^2 \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 2 \right]$$

Comprimibilità:

$$k = \rho \cdot V_s^2 \left[\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - \frac{4}{3} \right]$$

Per rocce compatte $\nu = 0.25$ e $V_p/V_s = \sqrt{3}$.

In genere il rapporto V_p/V_s non si discosta molto da questo valore medio. Nelle rocce alterate e nelle formazioni tenere, invece il rapporto varia notevolmente e, quindi, ν dinamico varia molto (da 0.2 e 0.4). Per le argille, anche compatte, ν raggiunge talora 0.43 e quindi la rigidità diviene molto bassa. È necessario, pertanto, misurare sia V_p che V_s con precisione sufficiente (in media $\pm 5\%$). Mentre per le onde P non vi sono, di solito, difficoltà, la determinazione precisa di V_s incontra notevoli ostacoli. Difatti non è facile separare le onde P dalle S e da altri tipi di onde a diverso meccanismo (superficiali).

Le tecniche per effettuare queste misure sono di vario tipo; si possono porre sia la sorgente che i ricevitori in superficie, oppure la sorgente in superficie e i ricevitori in pozzo (uno o più di uno), oppure la sorgente in pozzi e i ricevitori in superficie, oppure ancora sia la sorgente che i ricevitori in pozzo (fig. 1).

Il primo sistema in qualche caso può dare delle indicazioni abbastanza buone, ma esiste sempre una difficoltà rappresentata dalla stratificazione del mezzo in superficie; le onde ritenute S perché ne hanno le caratteristiche in generale sono delle trasformate P_s ; per l'inter-

* Prof. Ing. Roberto CASSINIS, Ordinario di Fisica Terrestre - Università degli Studi di Milano.

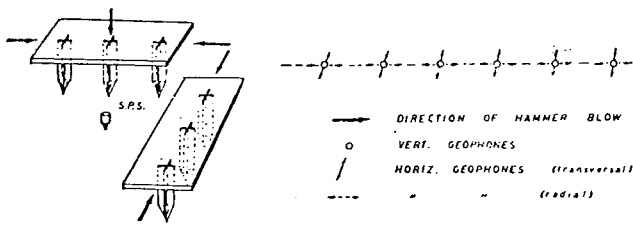


FIG. 1 a)

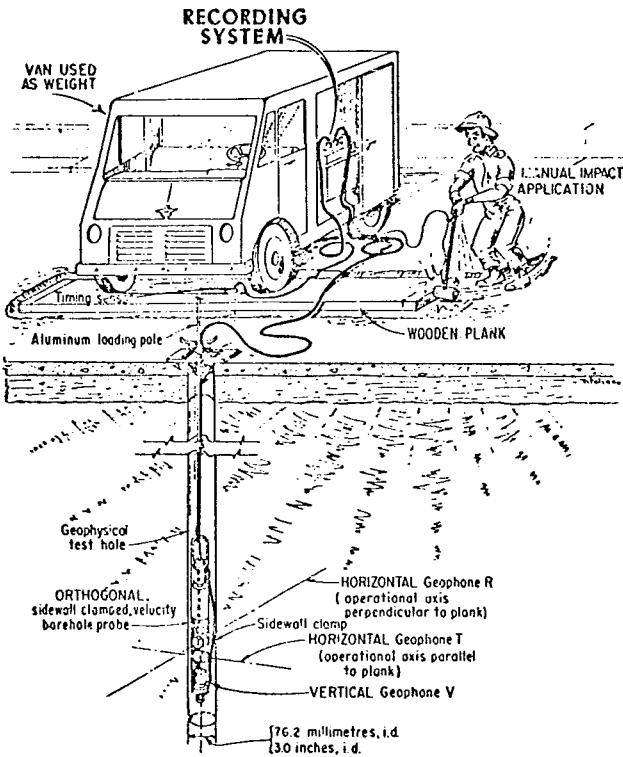


FIG. 1 b)

Fig. 1. - Dispositivi usati per la determinazione di V_p e V_s (onde S polarizzate verticalmente e orizzontalmente)

- a) Sorgente e geofoni a tre componenti in superficie (Cassinis 1967)
- b) « Downhole » (sorgente in superficie e ricevitori in pozzo) Viksne, U.S. Bureau of reclamation, '76
- c) « Uphole » (sorgente in pozzo e ricevitori in superficie) idem
- d) « Cross-hole » (sorgente in pozzo e ricevitori in pozzo) idem.

pretazione bisogna allora ricorrere ad un modello più complesso che spesso non è facile costruire.

Mettendo la sorgente in superficie e i ricevitori in pozzo (metodo « downhole »), oppure il contrario « up-hole », si corre il pericolo di ottenere, invece delle onde S, delle onde di Stoneley (o di « tubo »), di tipo superficiale, caratterizzate da velocità più bassa.

L'ultimo metodo (cross-hole) che, per ottenere buoni risultati deve utilizzare un pozzo per la sorgente e almeno due o tre pozzi, po-

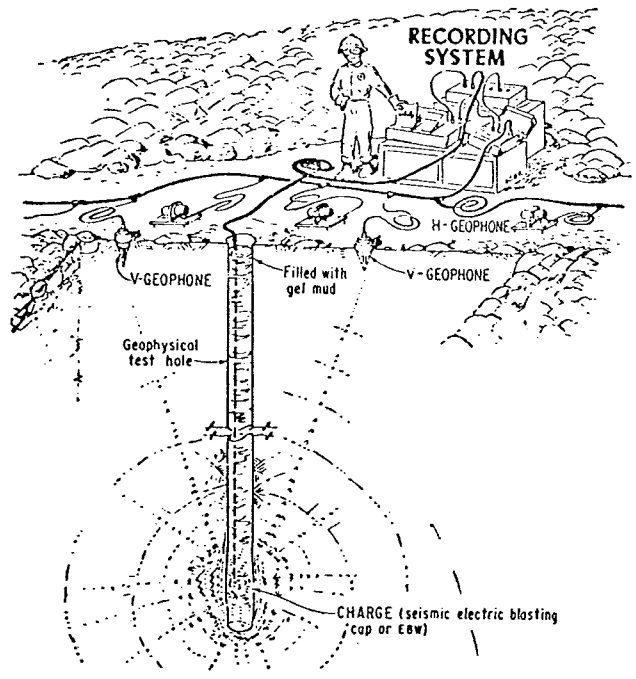


FIG. 1 c)

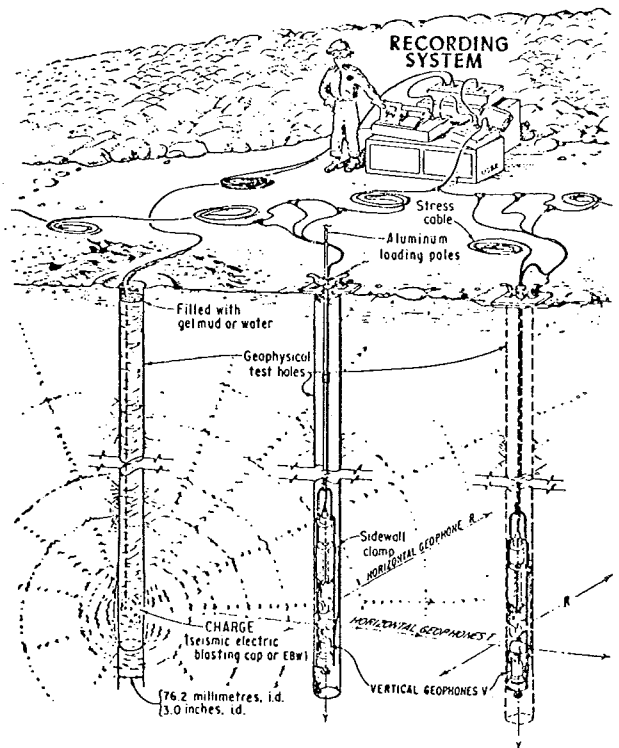


FIG. 1 d)

sti ad una certa distanza reciproca, per i ricevitori a tre componenti, è quello che dà i migliori risultati.

Tuttavia molto spesso, soprattutto quando per necessità di maggiore energia bisogna usare piccole quantità di esplosivo, oppure quando

i ricevitori non sono ben orientati nel pozzo, gli impulsi successivi non sono chiaramente discernibili dai primi.

Noi abbiamo proposto una tecnica che riassumo brevemente perché già pubblicata, e che può essere interessante soprattutto in vista dei progressi strumentali attuali. La tecnica si basa sull'analisi di Fourier delle tracce. Occorre ricavare, per ogni traccia, lo spettro di potenza e lo spettro di fase: la velocità di ogni tipo di onda si può ricavare con due metodi (fig. 2):

a) Ritardo di fase:

$$V = f \cdot X \frac{360^\circ}{\Phi_A - \Phi_B}$$

dove X è la distanza tra due punti di registrazione successivi, Φ_A e Φ_B gli angoli di fase in A e in B della componente armonica considerata, di frequenza f.

b) Cross-correlazione:

$$V = \frac{X}{\tau_B - \tau_A}$$

dove τ_A e τ_B sono i tempi per cui, in A e in B, si verifica la massima similarità tra il segnale sismico e un'onda armonica avente la frequenza di picco indicata dallo spettro di potenza.

Naturalmente, si suppone che le onde non siano dispersive.

Il metodo è stato sperimentato con buoni risultati sia su formazioni « dure » che su formazioni « molli ».

Occorrono, di solito, tre o quattro pozzi: uno per la piccola carica e gli altri per i geofoni a tre componenti che vengono bloccati alla profondità voluta, da un dispositivo meccanico molto semplice.

Il metodo ha il vantaggio di poter venire applicato per distanze e configurazioni diverse e dà buoni risultati anche se le componenti non desiderate dell'impulso non vengono perfettamente annullate.

Poiché l'elaborazione è piuttosto complessa, il metodo può diventare molto conveniente solo impiegando dei microcomputers programmati « ad hoc » e che forniscano i risultati in tempo quasi reale. Ciò è senz'altro possibile con la tecnica attuale.

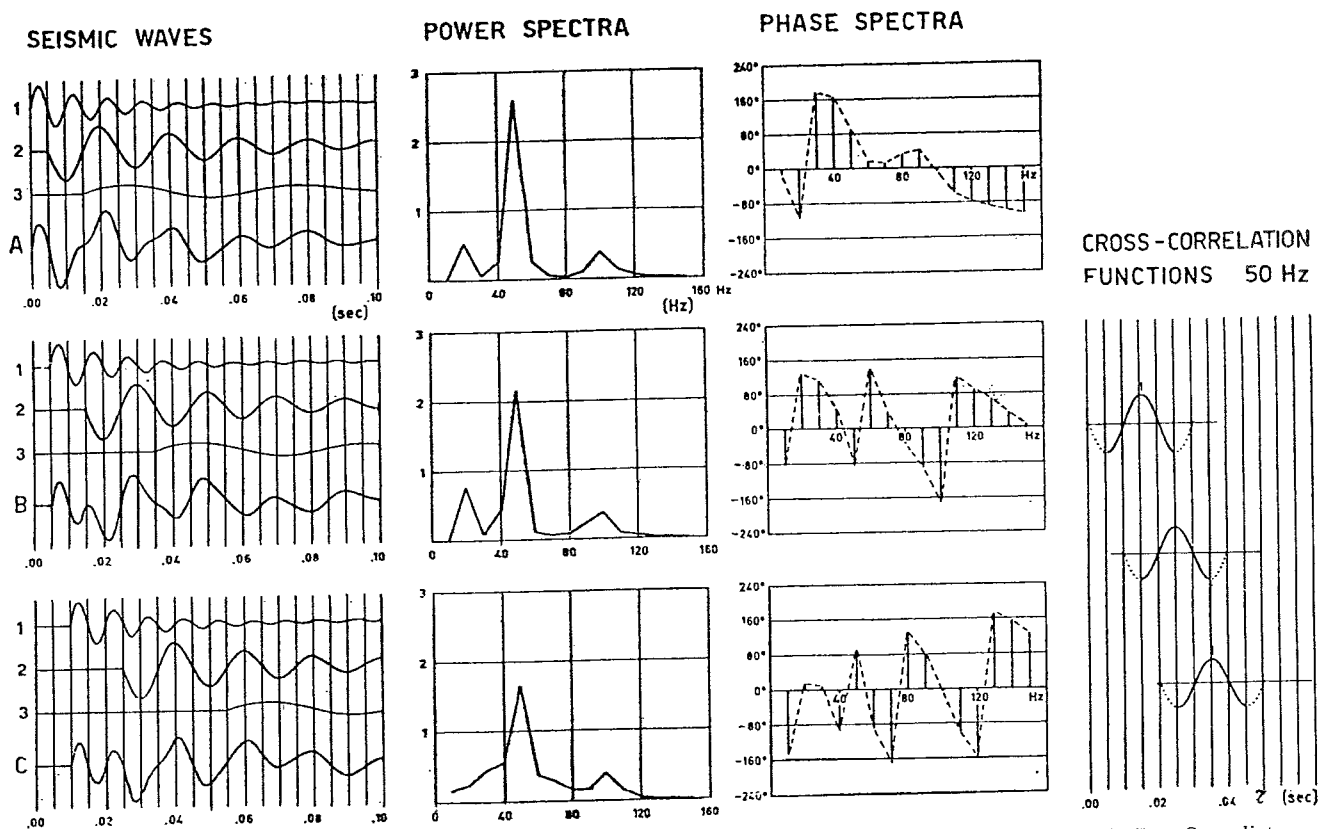


Fig. 2. - Procedimento per il calcolo delle velocità di eventi disturbati successivi ai primi. Le tracce A, B e C, a distanza crescente dalla sorgente, vengono sottoposte all'analisi di Fourier (spettri di potenza e di fase). Vengono anche ricavate le funzioni di cross-correlazione ottenute con onde armoniche di frequenza centrata sul picco dello spettro [SCARASCIA *et al.* 1974].

2. Applicazioni in corso e avvenire del telerilevamento nel campo della Geologia applicata e della Geotecnica

Le tecniche di telerilevamento o « remote sensing » costituiscono una via di mezzo tra i metodi fotografici di esplorazione della superficie e i metodi geofisici di prospezione del sottosuolo. Difatti esse descrivono il terreno attraverso fenomeni fisici non direttamente osservabili dall'occhio e riescono spesso, in tal modo, a correlare quanto rilevato in superficie con le caratteristiche delle formazioni sepolte.

Il rilievo fotogrammetrico, invece, serve soprattutto per definire la geometria della superficie e, quindi, è perfettamente complementare « remote sensing ».

Il telerilevamento osserva le proprietà fisiche di una superficie mediante la misura a distanza dall'intensità di radiazioni elettromagnetiche naturali o artificiali, riflesse o emesse dall'oggetto in uno spettro che comprende lunghezze d'onda da 0.4μ fino a qualche cm.

Le « bande » più usate sono nella zona visibile dello spettro, in quella dell'infrarosso « vicino » e in quella dell'infrarosso « termico ».

Il limite tra energia riflessa ed emessa si colloca all'incirca intorno a 2μ .

I parametri fondamentali sono la *riflettività*:

$$\left(\frac{\text{radianza-riflessa}}{\text{radianza-incidente}} \right)$$

e la *emissività*:

$$\left(\frac{\text{radianza termica dell'oggetto}}{\text{radianza termica del corpo nero}} \right)$$

che sono tra loro complementari.

La capacità di identificare un oggetto a distanza viene determinata dalla *risoluzione* che ha vari aspetti:

- risoluzione spaziale (geometrica)
 - » spettrale (migliora osservando l'oggetto in varie bande)
 - » temporale (migliora osservandolo in tempi, e quindi, in condizioni diverse).

La risoluzione dipende dal tipo dei sensori usati, dalle bande impiegate, dalla loro larghezza e dalle *piattaforme* di osservazione.

Per le applicazioni che interessano la Geotecnica i satelliti artificiali non rappresentano, per ora, delle piattaforme utili. La risoluzione geometrica ottenibile è difatti troppo bassa (l'elemento di immagine è, mediamente, di 80×80 m

per il visibile e di 230×230 m per l'infrarosso « termico »). Nel 1982-83 saranno possibili risoluzioni fino a 15-20 m e quindi sufficienti per parecchi problemi.

Per ora si impiegano aerei con sensori relativamente semplici (camere fotografiche « multispettrali » e « scanners » multicanali, in genere, per l'infrarosso termico).

La risoluzione geometrica, volando a 2 o 3000 metri di quota, è di 3 o 4 m.

Occorre poi, per una corretta interpretazione dei dati, un'adeguata raccolta di campionature a terra (la cosiddetta « verità terreno »). Tale raccolta deve, spesso, venire effettuata con strumenti simili a quelli che si trovano a bordo per poter ricostruire la « firma spettrale » necessaria per riconoscere gli oggetti.

I problemi già affrontabili nel campo geotecnico sono essenzialmente:

- studio di invasi e controllo di corsi d'acqua;
- controllo di zone franose.

Nel caso dello *studio dei bacini* prima dell'invaso o nella fase di progettazione dello sbarramento, è molto promettente l'analisi della cosiddetta « inerzia termica » delle rocce e cioè del modo con cui la superficie riemette il calore solare durante la notte.

Una roccia compatta è caratterizzata, in genere, da inerzia termica più elevata di una roccia fratturata a parità, naturalmente, di tipo, orientamento e contenuto delle fratture.

Tale analisi si applica utilmente anche alle zone soggette a *frane di crollo*. Sono sufficienti due osservazioni in ore della giornata in cui il « carico termico » sulla roccia è molto diverso.

La sorveglianza degli argini dei corsi d'acqua e dei tracciati stradali e ferroviari in zone soggette a *frane di colamento* si effettua invece mediante l'osservazione della variazione dell'umidità del suolo; per un terreno umido (figura 3) l'energia riflessa nel campo dall'infrarosso « vicino », diminuisce notevolmente e, contemporaneamente, diminuisce la riemissione del calore solare. Per un terreno nudo e drenato, invece, riflessione ed emissione aumentano entrambe.

Per determinare la propensione a frane di colamento, tuttavia, occorre aggiungere alla determinazione dell'umidità, quella della pendenza.

È quindi necessario accoppiare al telerilevamento la ripresa aerofotogrammetrica e costruiri-

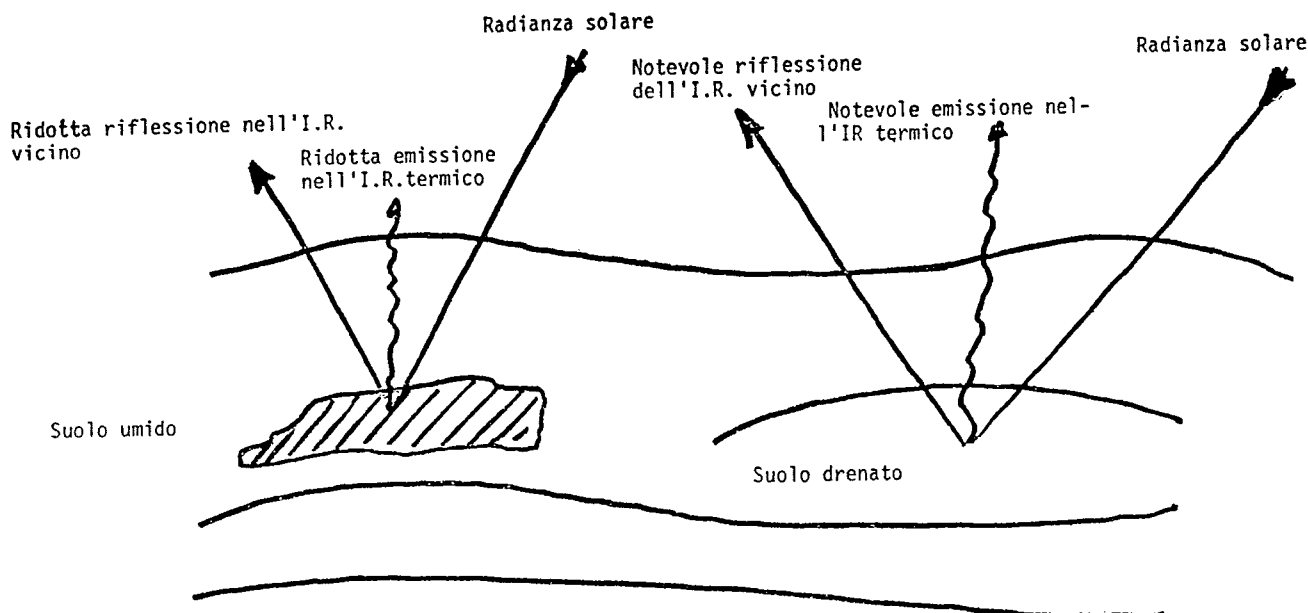


Fig. 3. - Comportamento della radiazione riflessa (infrarosso « vicino ») ed emessa (infrarosso « termico ») per un suolo umido e per un suolo drenato [TONELLI, 1977].

re due carte sovrapponibili dell'umidità e della pendenza.

I controlli dei tracciati stradali e ferroviari e la determinazione del rischio di frane richiedono la sistematica ripetizione dei rilievi nei periodi dell'anno nei quali si possa meglio valutare l'influenza dei fattori mascheranti; due sorvoli all'anno sono sufficienti nella maggior parte dei casi.

Queste, ed altre applicazioni del telerilevamento che saranno possibili in futuro, sono realizzabili solo con un adeguato controllo a terra e con l'ausilio di altre informazioni. In altre parole, anche il telerilevamento, come la prospezione geofisica, non può fare a meno dell'integrazione con altri metodi di indagine.

BIBLIOGRAFIA

1) Determinazione dei moduli elastici dinamici

- BERTACCHI P., CARABELLI E., SAMPAOLO A. (1966) - *A contribution to the use of geophysical methods for investigation of rock masses*. Lisbon meeting.
- CASSINIS R. (1967) - *Application of surface three components seismic systems to the evaluation of soil properties*. Boll. Geof. Teor. ed Appl. 9, 36.
- JOLLY R. N. (1956) - *Investigation of shear waves*, Geophysics 21, 905-938.
- GEYER, ROBERT L., MARTNER S. T. (1969) - *SH waves from explosive sources*. Geophysics, 34, 803-905.
- MC DONALD F. J., ANGONA F. A., MILLS R. L., SENGBUSH R. L., VAN NOSTRAND R. G., WHITE J. E. (1958) - *Attenuation of shear and compressional waves in Pierre Shale*. Geophysics 23, 421-439.

- MEISSNER R. (1965) - *P and SV waves from uphole shooting*. Geoph. Prospecting 13, 433-458.
- SCARASCIA S., COLOMBI B., CASSINIS R. (1974) - *Some experiments on transverse waves*, Geophysical Prospecting, 24, 549-568.
- SWAIN R. J. (1962) - *Recent techniques for determination of « in situ » elastic properties*. Geophysics 27, 237-241.
- VIKSNE A. - *U.S. Bureau of reclamation*, April 1976.
- WHITE J. E. (1960) - *Use of reciprocity theorem for computation of low-frequency radiation patterns*. Geophysics 25, 613-624.
- WHITE J. E., SENGBUSH R. L. (1953) - *Velocity measurements in near surface formations*. Geophysics 18, 54-69.
- WHITE J. E., SENGBUSH R. L. (1963) - *Shear waves from explosive source*. Geophysics 28, 1001-1019.
- WYLLIE M. R., GREGORY A. R., GARDNER L. W. (1956) - *Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media*. Geophysics 21, 41-70.
- WYLLIE M. R., GREGORY A. R., GARDNER L. W. (1958) - *An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media*. Geophysics 459-493.

2) Telerilevamento su problemi di Geologia Tecnica.

- CASSINIS R., LECHI G. M., TONELLI A. M. (1972) - *Le misure nel campo dell'infrarosso termico: prime applicazioni alle Scienze della Terra*. Proceedings Associazione Geofisica Italiana, Istituto Universitario Navale di Napoli, 1972.
- CASSINIS R. (1978) - *The Italian activity in the field of remote sensing - 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Manila, April. In stampa sugli Atti del Simposio.
- MARCOLONGO B., LECHI G. M., TONELLI A. M. (1974) - *Applicazioni delle immagini multispettrali da satellite alla individuazione di materiali da costruzione nella Pianura Veneta*, Proceedings of I Convegno Internazionale sulla Coltivazione di Pietre e Minerali Litoidi. Associazione Mineraria Subalpina, Torino.
- MARINO C. M. (1978) - *Landsat images analysis in the field of Regional geology*. Proceedings of an international conference on Earth observation from space and management of Planetary Resources, held at Toulouse, 6-11 March (ESA SP-134).

- STINGELIN R. W. - *Operational airborne thermal imaging surveys*, Geophysics, 34, 760.
- TONELLI A. M. (1975) - *The study of landslides forecasting by means of thermal transitory of rocks*. Proceedings of the Tenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan.
- TONELLI A. M. (1977) - *Computing residuals in geothermal research by I. R. scanning*, Journal of the British Interplanetary Society. Vol. 30, n. 5-Maggio.
- TONELLI A. M. (1978) - *Il ruolo del telerilevamento nelle analisi delle potenzialità al dissesto*. In stampa sugli atti del Congresso SISA, Macerata, Ottobre.
- TONELLI A. M. (1978) - *Aspetti attuali del telerilevamento operativo: complementarità fra le varie piattaforme per l'acquisizione dei dati e con la fotogrammetria*. Convegno SITE, Ottobre. In stampa sugli atti del Convegno.
- VERGANI C., PIZZAFERRI G. (1978) - *Il problema dell'elaborazione dei dati ripresi da aereo mediante scanners a più canali con riferimento ad esempi di applicazioni disciplinari*, Convegno SITE, Ottobre. In stampa sugli atti del Convegno.

SUMMARY

Notes on dynamic moduli determination and on geotechnical applications of remote sensing

1) Very often a correct determination of the dynamic elastic moduli is a difficult task because the interference among the later events of the seismic trace. The cross-hole method seems the best technique to be used in order to obtain the velocity of shear waves; a wave discrimination and velocity determination procedure based on Fourier analysis is described.

2) The applications of remote sensing techniques to the problems of engineering geology have been rather limited, so far, due to the unavailability of stable and repetitive platforms (artificial satellites) carrying sensors of sufficient resolution. However, current applications of remote sensing, using both the visible and the infrared part of the e.l.m. spectrum, are accomplished using airborne sensors. Particularly promising results have been obtained for the control of reservoirs and rivers and for the control and forecasting of rockfalls and landslides.