

## 6. INDAGINI GEOFISICHE

INDICE		
6.1. PREMESSA	pag.	83
6.2. PROGRAMMA DELLA ESPLORAZIONE GEOFISICA	"	83
6.3. PROFILI SISMICI. DESCRIZIONE DEI RISULTATI	"	84
6.4. MISURE DI VELOCITA' IN POZZO ( <i>down hole</i> ). RISULTATI	"	85
6.5. CAROTAGGIO SONICO. RISULTATI	"	89
6.6. CONTRIBUTO DEI DATI GEOFISICI ALLA DEFINIZIONE DEL MODELLO DELLA FRANA	"	91
6.7. CONCLUSIONI	"	92

### 6.1. PREMESSA

Il programma dei rilievi geofisici è stato indirizzato al raggiungimento di due obiettivi:

- fornire informazioni dettagliate sull'area interessata dall'evento franoso allo scopo di definire il possibile futuro utilizzo dell'area stessa;
- ricercare e migliorare le metodologie da utilizzarsi per la valutazione del rischio franoso in aree geomorfologicamente simili.

In particolare, le misure geofisiche sono state utilizzate per:

- definire la geometria e le caratteristiche fisiche delle formazioni e per individuare le superfici di scivolamento e le cause che hanno innescato l'evento;
- ricercare correlazioni tra evento franoso e proprietà fisiche, caratteristiche geologiche e geometria delle formazioni, allo scopo di individuare indicatori della predisposizione alle frane anche in zone simili a quella anconetana.

Questo secondo obiettivo è stato raggiunto solo in parte in quanto, a causa dei limitati mezzi finanziari messi a disposizione, non è stato possibile realizzare nella sua totalità il programma delle misure.

In particolare non è stato possibile estendere in maniera sistematica i rilievi sulle aree esterne al corpo della frana; è venuto quindi a mancare lo studio e il confronto tra dati ricavati sulle zone collassate e dati delle zone "in posto".

### 6.2. PROGRAMMA DELLA ESPLORAZIONE GEOFISICA

Tenuto conto di ricerche e studi precedenti condotti su altre zone franose dell'Appennino si è ritenuto opportuno limitare l'intervento geofisico alla sismica di rifrazione e alla prospezione elettrica mediante Sondaggi Verticali.

In aggiunta sono state seguite misure in pozzo, sia mediante la tecnica delle misure di velocità che con carotaggi sonici. Si è esclusa la sismica di riflessione (ad alta risoluzione) a causa degli alti costi ed anche per il rischio di non ottenere risultati soddisfacenti.

Per quanto riguarda la prospezione elettrica sono stati eseguiti sette SEV con stendimento massimo di 1000 m ubicati tutti sul corpo della frana (i SEV sono stati effettuati dall'Istituto di Geologia Marina di Bologna del C.N.R.). Il ridotto numero dei sondaggi, e la mancanza di dati sui valori di resistività del fluido di imbibizione delle formazioni, non hanno consentito di giungere ad informazioni esaurienti. Tuttavia, l'interpretazione ha messo in evidenza la presenza di tre unità elettrostratigrafiche, la cui resistività, dall'alto verso il basso sono:  $\rho_1 = 10 + 15 \Omega \text{ m}$ ,  $\rho_2 = 3 + 5 \Omega \text{ m}$ ,  $\rho_3 = 10 \Omega \text{ m}$ .

Lo spessore dello strato intermedio, più conduttivo, è risultato variabile da un minimo di 10 fino ad un massimo di 50 m.

Per quanto riguarda la prospezione sismica a rifrazione è opportuno ricordare le caratteristiche litologiche della zona: le formazioni sono in linea generale costituite da argille e argille marnose prevalenti, con intercalazioni di sabbie poco cementate e silt.

Tali formazioni, da un punto di vista sismico presentano deboli variazioni di velocità, o, addirittura, a seconda delle successioni e degli spessori, possono presentare variazioni continue di velocità con le profondità.

Le condizioni di applicazione della sismica a rifrazione non sono quindi ottimali. Per tale ragione i rilievi sono stati programmati con profili ad elevata densità sia dei punti di energizzazione che dei punti di ricezione (rispettivamente ogni 100 m e 20 m).

Sono stati eseguiti quattro profili normali alla costa ed un profilo di collegamento parallelo alla costa (lungo la strada di Posatora) per un totale di 7 Km (Fig. 6.1).

Solo alcuni tratti dei profili sono ubicati al di fuori della zona franata.

Le apparecchiature impiegate consistono in due unità di registrazione a 12 tracce NIMBUS GEOME-

(\*)Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Milano.

(\*\*)GEOINVEST, S.n.c., Piacenza.

(\*\*\*)ISMES, Divisione Geofisica, Bergamo.

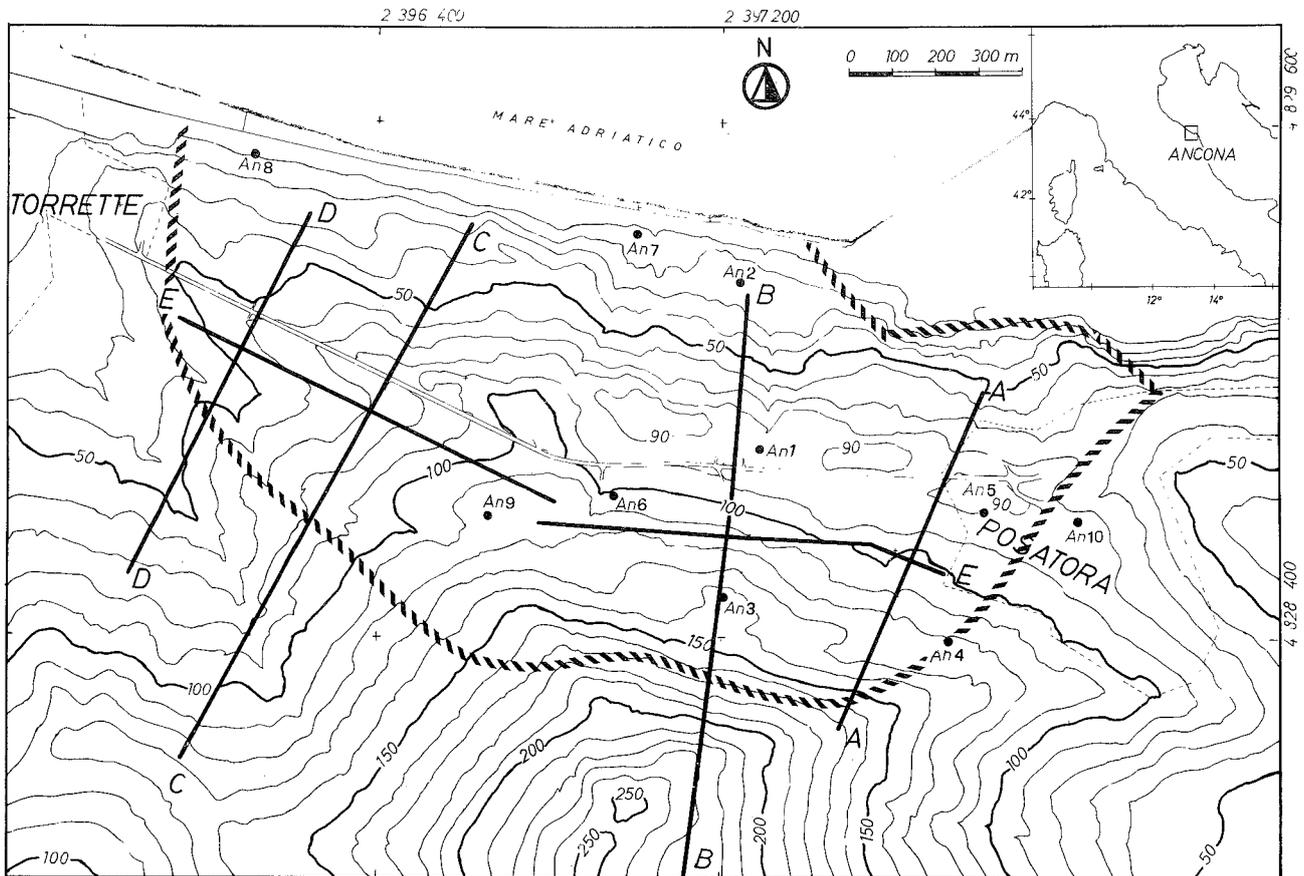


Fig. 6.1 - Ubicazione dei profili sismici e dei pozzi.

*Relief map of the area with the traces of seismic profiles and the position of the bore-holes. The perimeter of the collapsed area is indicated by the hatched strip.*

TRICS (ad accumulo dei segnali) sincronizzate con lo scoppio.

Ciascuno stendimento, composto da 24 geofoni, corrisponde a 460 m di profilo.

Le misure di velocità sono state eseguite in vari pozzi (la ubicazione è indicata in Fig. 6.1), utilizzando una catena di 12 idrofoni con intervallo di 5 m. La catena è stata calata con un passo di 2,5 m. Per ogni posizione è stata brillata una piccola carica di esplosivo in superficie.

Il carotaggio sonico è stato eseguito in un solo pozzo (AN-1) usando un sistema trasmettitore- ricevitore con intervallo di 1 m.

La frequenza di energizzazione è compresa in una banda da 0 a circa 25KHz. L'intervallo di misura è stato di 0,5 m.

### 6.3. PROFILI SISMICI. DESCRIZIONE DEI RISULTATI

In Fig. 6.2 è riportato un esempio di registrazione. I sismogrammi si presentano in maniera abbastanza uniforme e con risposte molto buone.

I primi arrivi sono sempre molto netti; lo smorzamento delle oscillazioni è piuttosto rapido e non si sono rilevati arrivi successivi.

La frequenza dominante del primo ciclo aumenta con la distanza da circa 35 Hz a circa 50 Hz questa

apparente anomalia è probabilmente dovuta a interferenze.

L'interpretazione è stata condotta assumendo sia l'ipotesi di una successione discreta delle velocità con la profondità, sia ipotizzando una crescita continua delle stesse.

Nelle Figg. 6.3 a,b,c,d sono riportate la dromocrona del profilo B e le interpretazioni ottenute secondo le due diverse ipotesi I risultati non mostrano sensibili differenze.

Con il modello a passaggi discreti di velocità si sono individuati, al di sotto di un sottile strato areato, tre formazioni: quella più superficiale con velocità comprese tra 1.2 e 1.6 km sec<sup>-1</sup> e con spessori variabili da pochi metri a 30 m; una seconda formazione con velocità media di circa 1.8 Km sec<sup>-1</sup> con spessori fino a 100 m; una formazione, più profonda la cui velocità (circa 2.2 km sec<sup>-1</sup>) sembra essere costante.

Nella Fig. 6.4 sono riportati i risultati relativi agli altri profili ottenuti secondo il modello della distribuzione discreta della velocità.

Nelle Figg. 6.5 a,b,c sono state tracciate le isobate di alcuni "orizzonti sismici" significativi caratterizzati rispettivamente dalle velocità 1.5, 1.8 e 2.2 km sec<sup>-1</sup> (i primi due orizzonti sono stati ricavati utilizzando il modello della distribuzione continua della velocità con la profondità, il terzo, invece, assumendo velocità costanti).

Confrontando le tre carte si può osservare che la

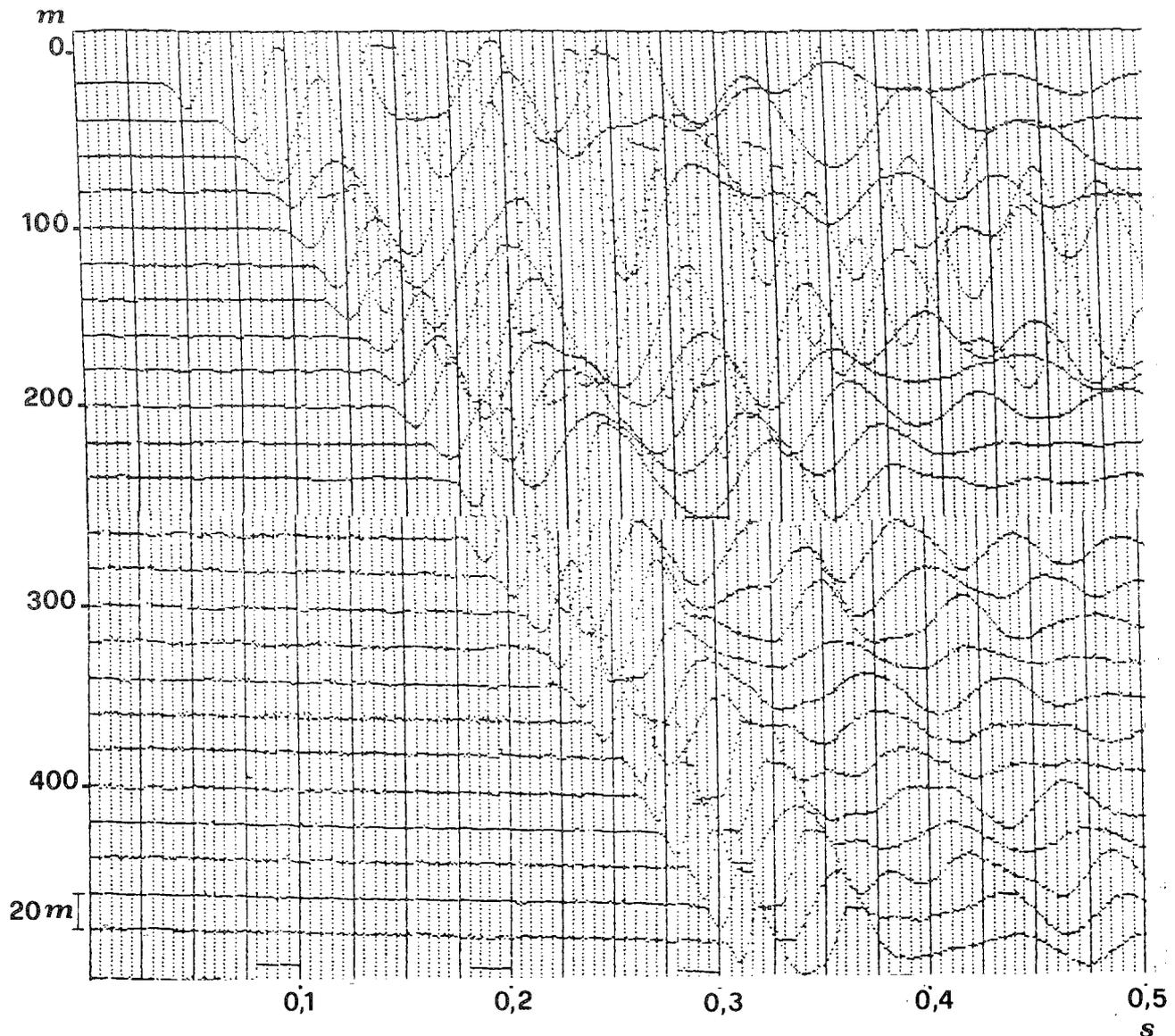


Fig. 6.2 - Esempio di registrazione di uno stendimento di rifrazione.  
*Example of refraction record.*

forma dell'orizzonte piú profondo è piú regolare che in quelli piú superficiali.

In particolare questi ultimi evidenziano alcune irregolarità nella parte centrale dell'area, lungo il profilo E, dove si osserva una improvvisa variazione di pendenza. L'andamento dei primi due orizzonti è molto piú simile alla topografia di quanto non sia quello delle discontinuità piú profonde.

Quest'ultima osservazione potrebbe essere in accordo con l'assunzione che la formazione con velocità  $2.2 \text{ km sec}^{-1}$  non sia stata coinvolta con il recente fenomeno franoso.

#### 6.4. MISURE DI VELOCITA' IN POZZO (*down hole*). RISULTATI

Nelle Figg. 6.6 a,b,c sono riportati i risultati ot-

tenuti (velocità di intervallo) assieme alle stratigrafie, al contenuto naturale di acqua ( $W_n\%$ ) e alle densità (misurate sui campioni) nei pozzi AN<sub>1</sub>, AN<sub>4</sub>, AN<sub>5</sub>.

Nel pozzo AN<sub>1</sub> (Fig. 6.6 a) da 20 a 50 m le sabbie cementate hanno una velocità piú alta di quelle delle argille alla stessa profondità; si determina di conseguenza una inversione di velocità che potrebbe essere fonte di errore nella interpretazione dei profili sismici a rifrazione, specie per quelle condotte nell'ipotesi della distribuzione continua della velocità.

E' da notare, tuttavia che le sabbie quaternarie presentano spessori apprezzabili solo in AN<sub>1</sub>.

Al di sotto delle sabbie quaternarie la velocità delle argille plioceniche aumenta gradualmente da circa  $1.65$  a  $1.8 \text{ km sec}^{-1}$ ; alla profondità di circa 100 m si osserva un brusco aumento della velocità ( $2.2 \text{ km sec}^{-1}$ ) che si mantiene, a profondità maggiori, in valori costanti.

In accordo con la stratigrafia, questo salto corri-

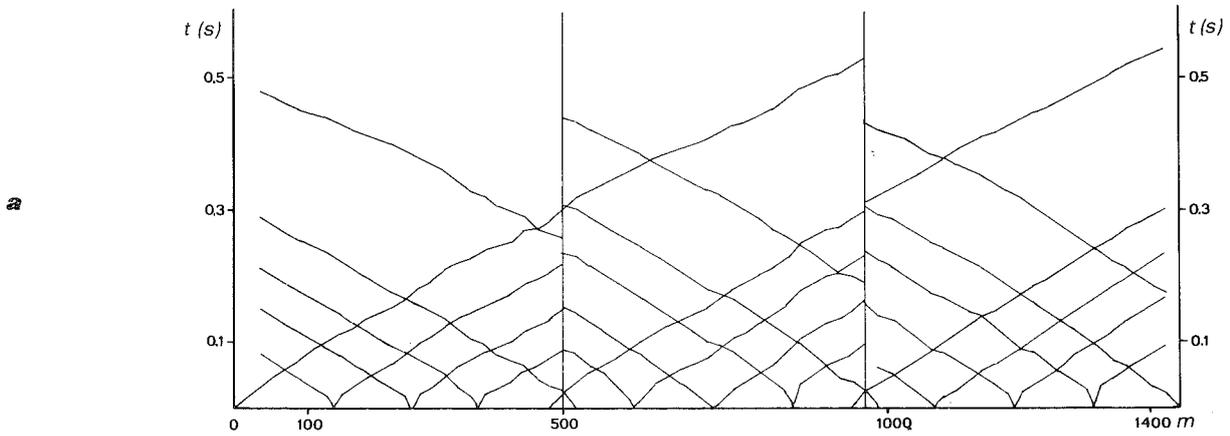


Fig. 6.3a - Dromocrone del profilo sismico B.  
Time-distance curves of the seismic profile (see Fig. 6.1 for position).

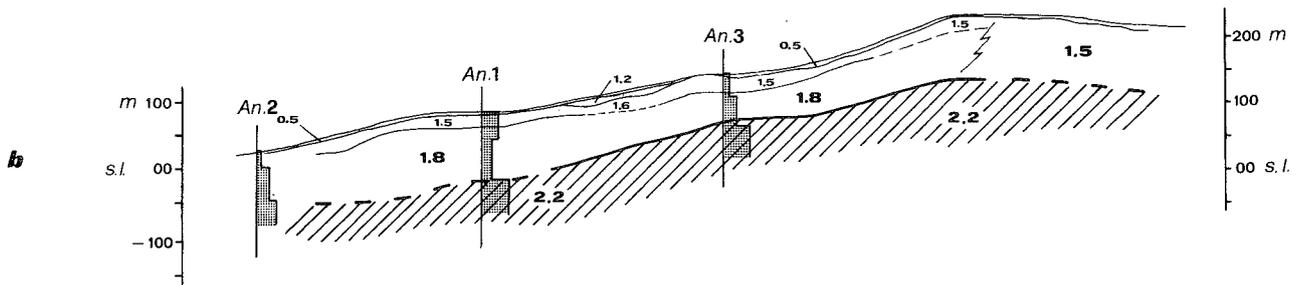


Fig. 6.3b - Interpretazione del profilo B, considerando successioni discrete di velocità. Sulla sezione verticale sono proiettati anche i risultati schematici ottenuti nei pozzi (velocità di intervallo).  
Cross section interpretation considering discrete velocity increases. The schematic results of the down hole (interval velocity measurements) in three boreholes are also projected on the cross section.

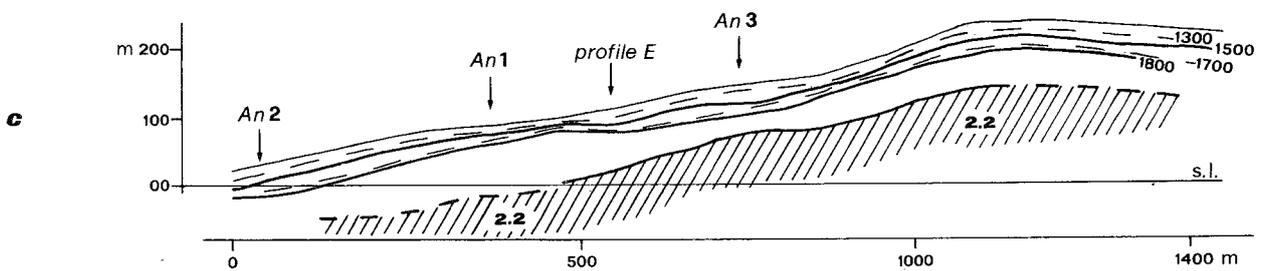


Fig. 6.3c - Interpretazione del profilo B considerando aumenti continui di velocità con la profondità. Nella figura le velocità sono espresse in  $\text{km sec}^{-1}$ .  
Cross section interpretation considering a continuous velocity increase. The figures represent the  $V_p$  in  $\text{km sec}^{-1}$ .

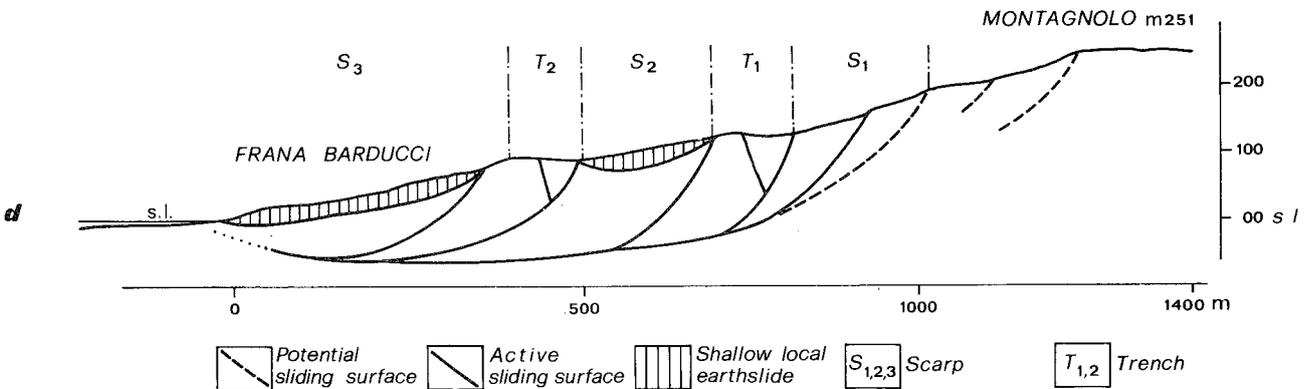


Fig. 6.3d - Modello della frana.  
Model of the landslide.

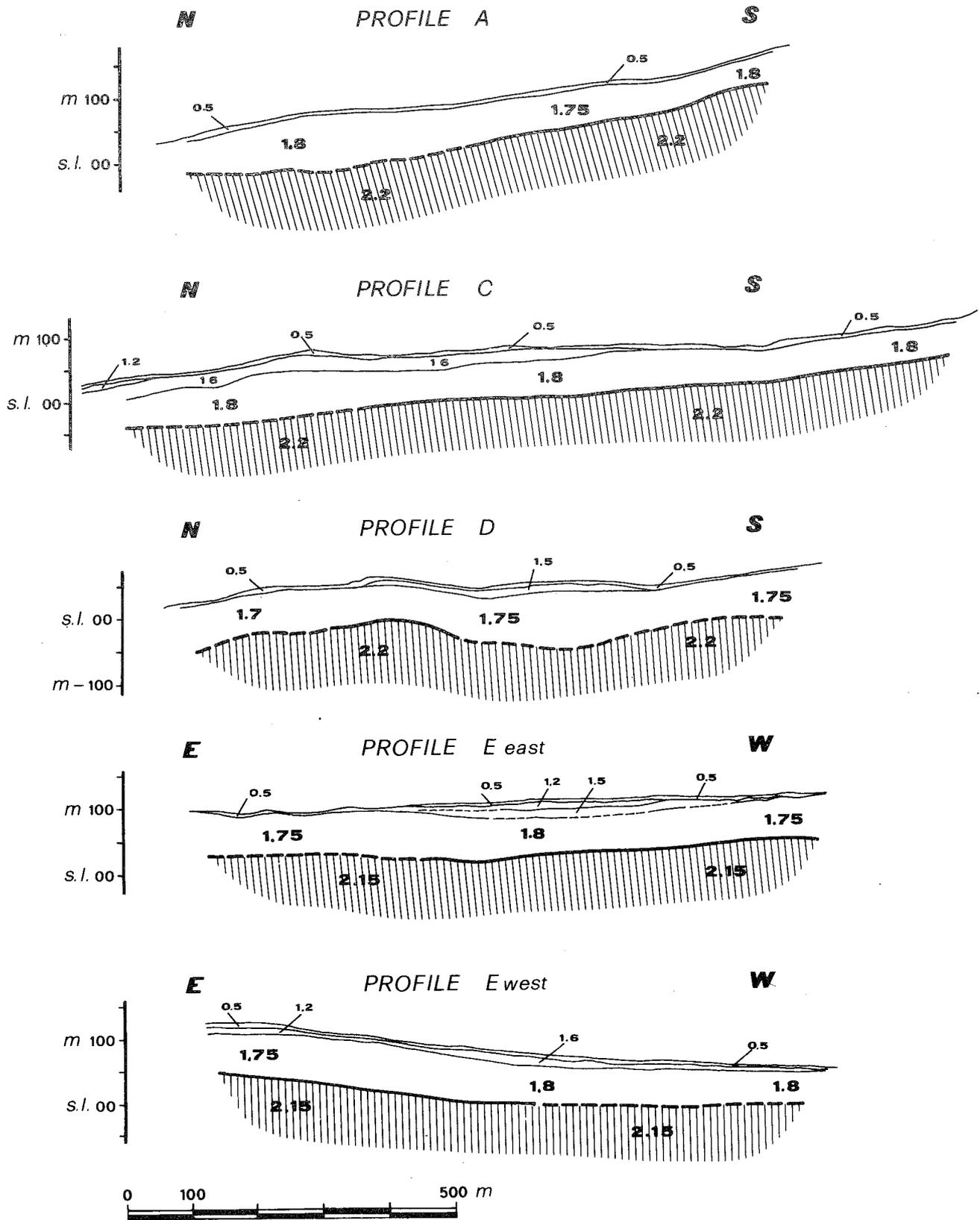


Fig. 6.4 - Interpretazione degli altri profili sismici considerando successioni discrete di velocità.  
*Interpretation of the other seismic profiles (see Fig. 6.1 for position) considering discrete velocity increases.*

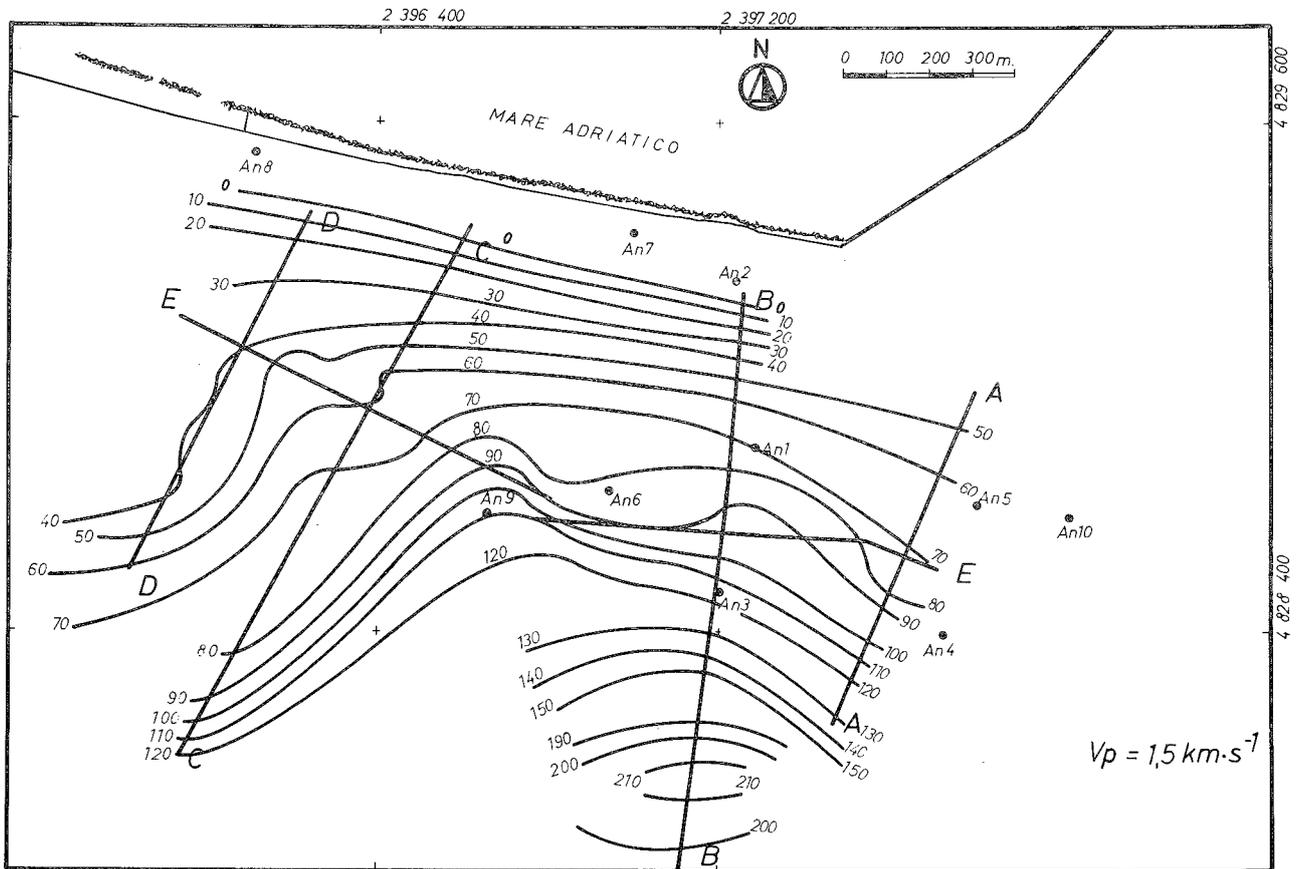


Fig. 6.5a - Isobate dell'orizzonte sismico con  $V = 1.5 \text{ km sec}^{-1}$ .  
See Fig. 6.5c.

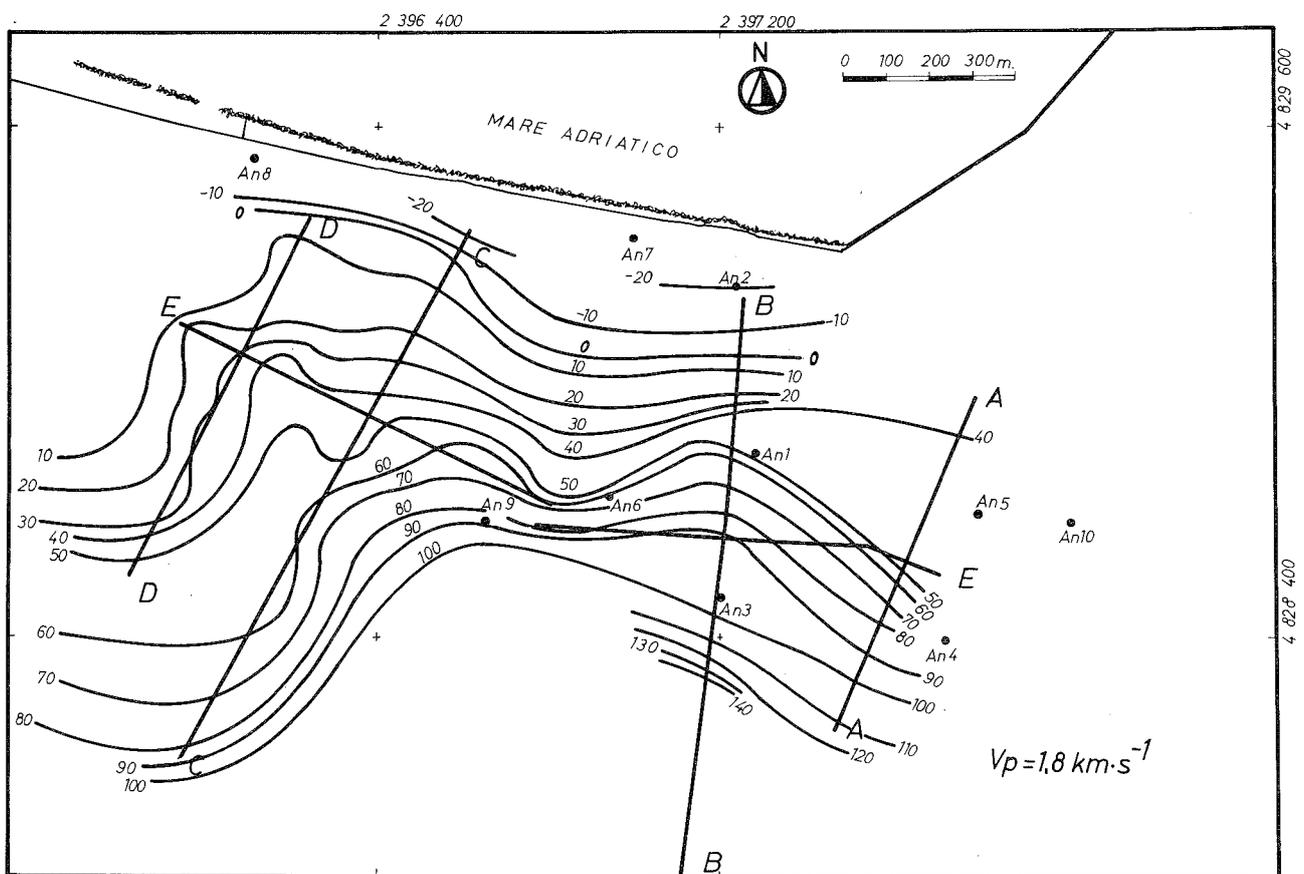


Fig. 6.5b - Isobate dell'orizzonte sismico con  $V = 1.8 \text{ km sec}^{-1}$ .  
See Fig. 6.5c.

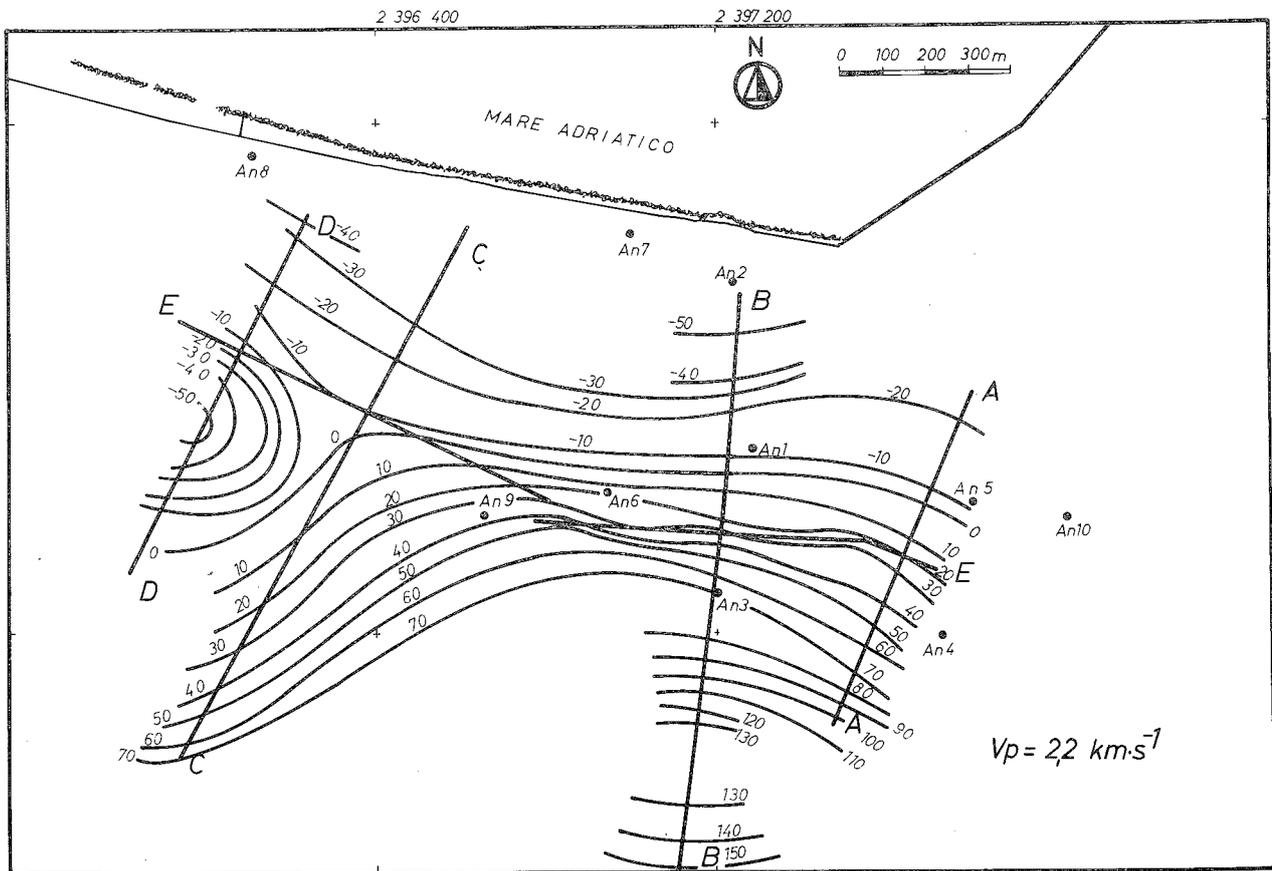


Fig. 6.5c - Isobate dell'orizzonte sismico con  $V_p = 2.2 \text{ km sec}^{-1}$ .  
 Isovelocity contour maps: a)  $V_p = 1,5 \text{ km sec}^{-1}$ , b)  $V_p = 1,8 \text{ km sec}^{-1}$  c)  $V_p = 2,2 \text{ km sec}^{-1}$ . The former two maps have been drawn according to the interpretation of the time-distance curves assuming a continuous increase of  $V_p$  with depth. The latter map has been obtained considering discrete velocity increases. Heights a.s.l in m.

sponde alla transizione delle argille disturbate e molto fratturate ad una formazione piú regolare e meno fratturata.

Generalmente il contenuto d'acqua decresce passando dal 25% nella formazione intermedia, a meno del 20% nella formazione di fondo.

La densità aumenta in accordo con la velocità.

Nella Fig. 6.6 b sono riportati i dati relativi pozzo AN<sub>5</sub>, che non si discostano di molto da quelli precedenti.

Il pozzo AN<sub>4</sub> (Fig. 6.6 c) è stato l'unico terebrato lungo il perimetro dell'area franata. Ad una profondità di 10 m si è ricavata una velocità di  $1.85 \text{ km sec}^{-1}$  e quindi si è osservato un successivo aumento della velocità molto regolare e con basso gradiente.

Questo andamento, diverso rispetto a quello relativo agli altri due pozzi, sembra essere in buon accordo con il piú regolare e basso contenuto d'acqua (minore del 20%) e con il minor numero di variazioni litologiche e di fratture incontrate durante la perforazione.

In conclusione si può dire che nei pozzi ubicati all'interno della frana si è evidenziato un salto di velocità, tra la formazione intermedia e quella profonda, di circa  $0.20 \div 0.25 \text{ km sec}^{-1}$ ; nel contempo il contenuto d'acqua è diminuito dal 25 al 20%.

Nel pozzo esterno alla frana (o meglio lungo il perimetro della zona franata) il salto di velocità è mino-

re (circa  $0.1 \text{ km sec}^{-1}$ ) così come è minore la variazione del contenuto d'acqua (meno del 2%).

Il pozzo AN<sub>10</sub>, è stato perforato solo fino alla profondità di 20 metri e pertanto è stato utilizzato.

## 6.5. CAROTAGGIO SONICO. RISULTATI

Nella Fig. 6.7 a sono riportate le registrazioni dei carotaggi sonici nella parte inferiore del sondaggio AN-1.

L'ampiezza e la forma dei primi arrivi sono buoni indicatori del tipo di formazione.

Da 25 a 50 m, (intervallo non riportato in Fig. 6.7 a) tempi e ampiezze molto variabili individuano molto bene le intercalazioni delle sabbie e arenarie (piú o meno cementate) e delle argille.

Si osservano strati sottili, con spessori di alcuni centimetri, a velocità alte ( $V > 2.0 \text{ km sec}^{-1}$ ) inglobati in una massa la cui velocità media è di  $1.5 \text{ km sec}^{-1}$ .

Al di sotto del Quaternario, a profondità superiore a 50 m, l'ampiezza dei segnali è piú regolare anche se si possono osservare zone "deboli".

Le zone di frattura sono evidenziate dalle variazioni di frequenza e di ampiezza.

A 100 m di profondità, le ampiezze maggiori, le

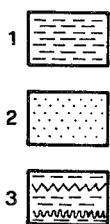
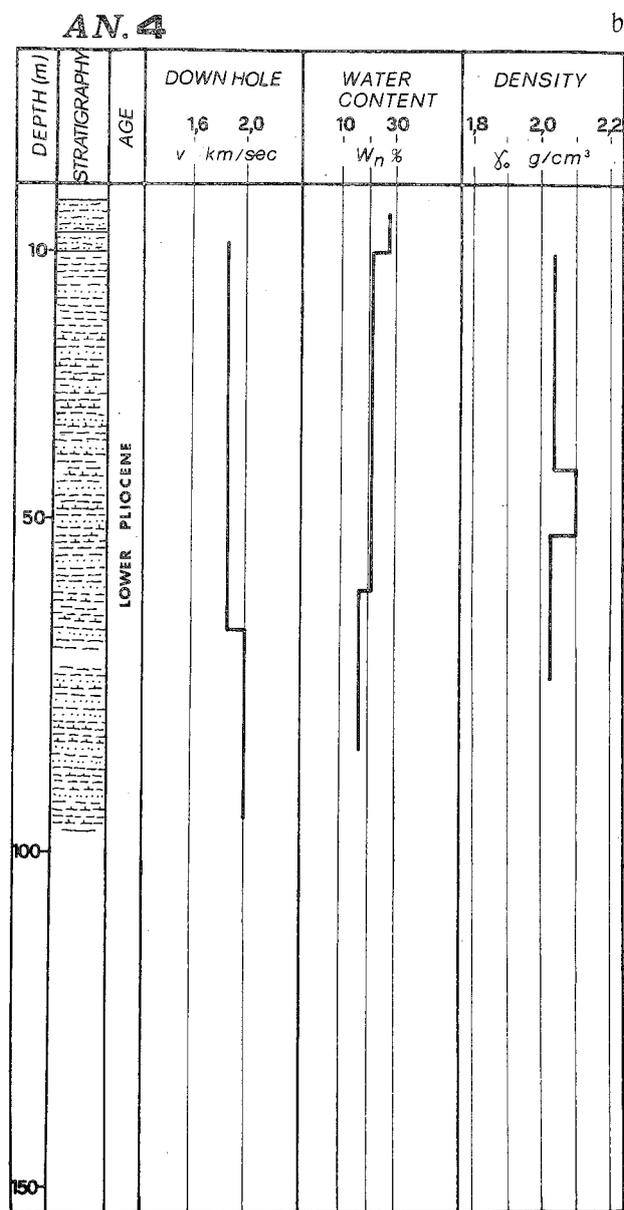
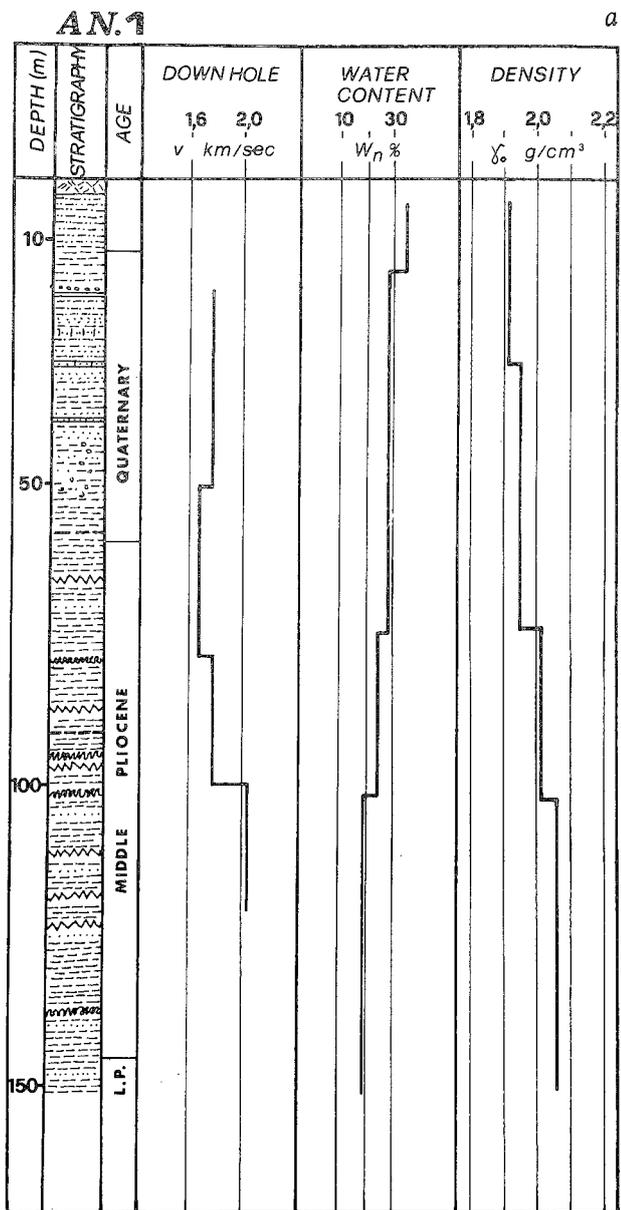


Fig. 6.6a-6.6b - Velocità di intervallo, stratigrafia, contenuto d'acqua e densità ricavati nei pozzi AN<sub>1</sub>, AN<sub>3</sub>, AN<sub>4</sub>.  
 The interval velocity (down hole) compared with the stratigraphy, the water content and the density in three boreholes (AN<sub>1</sub>, AN<sub>3</sub>, AN<sub>4</sub>). The AN<sub>4</sub> well was drilled along the perimeter of the collapsed area (see Fig. 6.2 for position). 1: clays 2: sands 3: fractured clays.

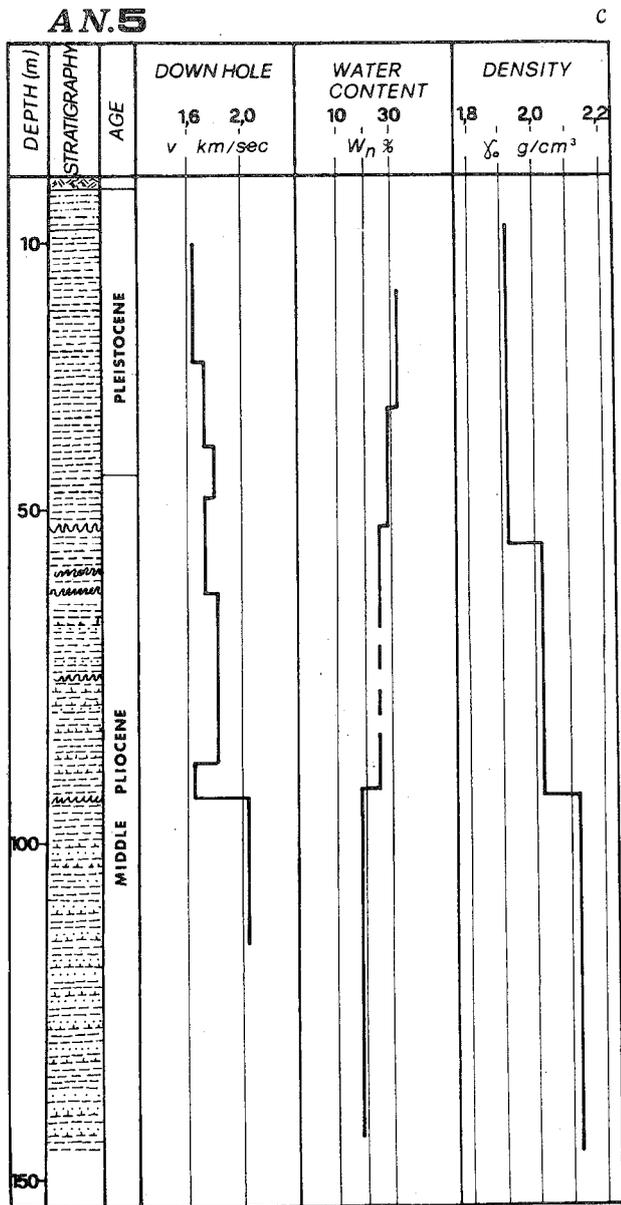


Fig. 6.6c - Vedi didascalia Figg. 6.6a-b.  
See Figs. 6.6a-b.

frequenze più basse e la forma molto uniforme dei segnali sembra evidenziare un netto cambiamento di comportamento delle formazioni. E' stata anche eseguita un'analisi spettrale dei segnali campionando le tracce ogni 2.5 m.

Nella Fig. 6.7 b sono riportati due esempi: il primo (a 109 m) giace nelle argille meno disturbate: lo spettro mostra due chiari picchi, uno a 20 KHz (corrispondente alla frequenza di risonanza del trasmettitore) ad un secondo, più largo, a circa 10 KHz.

Il secondo esempio (traccia a 95 m) è tipico di formazioni disturbate, i picchi sono meno chiari e vi è un maggior contenuto di frequenze alte (15 + 30KHz).

#### 6.6. CONTRIBUTO DEI DATI GEOFISICI ALLA DEFINIZIONE DEL MODELLO DELLA FRANA

Il modello della frana è stato affinato sulla base

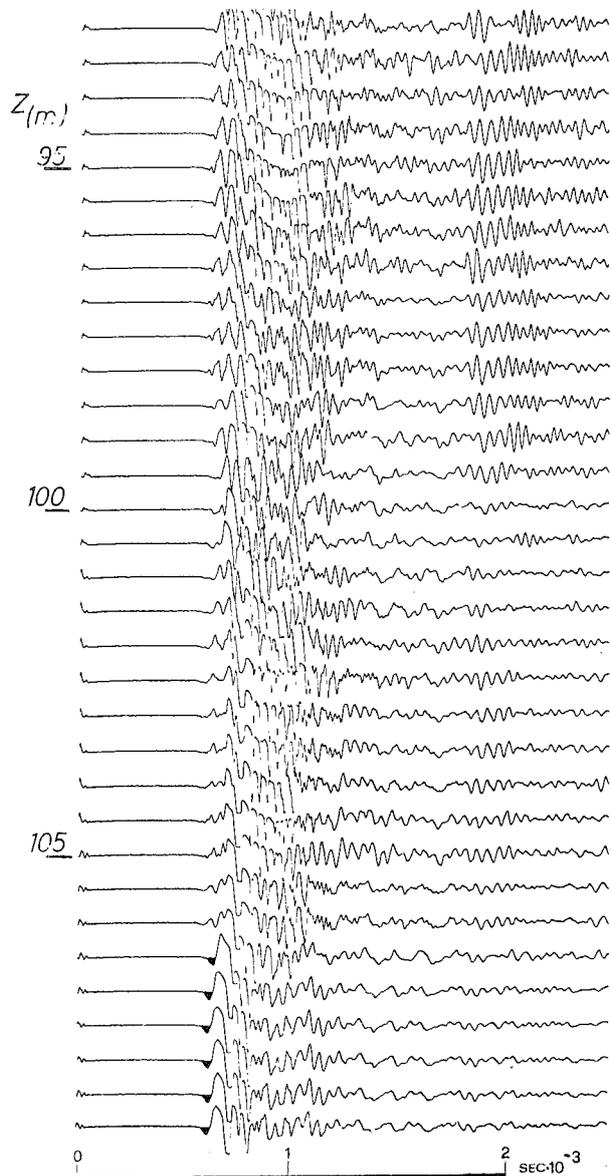


Fig. 6.7a - Particolare ingrandito, in ampiezza variabile, del carotaggio sonico nel pozzo AN<sub>1</sub>; tracce comprese tra Z = 90 m e il fondo del pozzo.

*Compacted record section of the sonic log in borehole AN<sub>1</sub> (variable density). Trace interval 0,5 m; frequency of the transmitting pulse 0-25 KHz; transmitter-receiver interval: 1 m.*

dei risultati della prospezione sismica (Fig. 6.3 d) ed è stato confrontato e verificato dai dati ottenuti nei pozzi.

L'ipotesi di un orizzonte profondo sul quale sia avvenuto sincronicamente lo scivolamento delle masse sovrastanti è provato anche da altri dati.

Tra questi ultimi i più chiari sono quelli degli inclinometri che sono stati alloggiati in alcuni pozzi.

A più di un anno dall'evento gli inclinometri mostrano ancora un movimento differenziale tra le formazioni "disturbate" e quelle "non disturbate".

Recentemente (febbraio 1984) nel pozzo AN<sub>3</sub> il tubo dell'inclinometro è stato tagliato da pressioni differenziali alla profondità di 70 m.

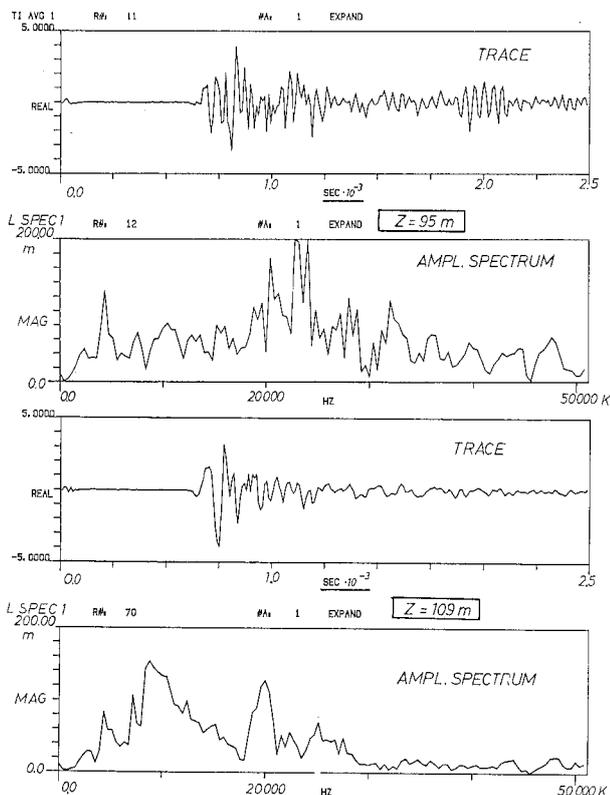


Fig. 6.7b - Esempio di analisi spettrale di due tracce del carotaggio sonico; in alto una traccia e relativo spettro, tipica della formazione "disturbata"; in basso, un'altra traccia con relativo spettro, nella formazione di fondo. *Enlargement of the bottom part of the record section (wiggle traces). Compare the behaviour of traces above 105 m depth ("disturbed" clays) and below ("undisturbed" clays). This change in character is confirmed by the spectral analysis of the traces at 109 m and at 95 m.*

Questa profondità corrisponde (vedi Fig. 6.3 b) al contatto tra le formazioni caratterizzate da una litologia uniforme; l'unità sismica intermedia corrisponde al Quaternario ed alle argille plioceniche con alto grado di sovraconsolidazione; la presenza di macrofratture che suddividono l'intera massa in blocchi, può essere causa di scivolamento degli uni rispetto agli altri.

Le piccole fratture, dal canto loro, contribuiscono ad aumentare la permeabilità secondaria delle masse.

L'unità sismica profonda corrisponde alle argille meno disturbate del fondo dove il numero delle fratture è minore e la permeabilità è molto più bassa; questo fatto potrebbe suggerire un comportamento dinamico più plastico.

Si pone infine ulteriore problema: quale è l'intervallo di tempo che può intercorrere tra la formazione di fratture e la frana? Questa domanda è di difficile risposta ma è estremamente importante.

Si consideri, infatti che al bordo della frana attuale, i risultati del pozzo AN<sub>4</sub> hanno confermato la presenza di una unità sismica "intermedia" sia pur a spessore ridotto. Si pone quindi l'interrogativo se queste zone possono essere a loro volta sede di futuri movimenti.

Per poter fare un buon confronto sarebbe neces-

sario eseguire sulle argille plioceniche, dove non vi siano evidenze storiche di eventi franosi, profili sismici ed almeno una perforazione corredata di misure di velocità e di carotaggi sonici.

Sarebbe inoltre utile eseguire almeno due *cross hole* per la determinazione del  $V_p$  e  $V_s$  e del rapporto di Poisson a varia profondità.

Queste ulteriori indagini, anche se piuttosto costose, potrebbero contribuire ad eliminare alcune incertezze.

## 6.7. CONCLUSIONI

I metodi geofisici, applicati a posteriori per lo studio della frana di Ancona, hanno portato un sostanziale contributo per la comprensione del meccanismo dell'evento, in particolare:

- i profili a rifrazione hanno confermato il meccanismo di scivolamento a "grande" profondità ed hanno contribuito alla ubicazione ottimale dei pozzi.
- Le misure di velocità in pozzo (*down hole*) e il carotaggio sonico sono stati utili per la interpretazione della stratigrafia; i loro dati inoltre hanno consentito una taratura e verifica dei profili sismici. In particolare il carotaggio sonico ha indicato chiaramente lo stato delle argille, il loro grado di fratturazione e le possibili superfici di scivolamento.

Dalle esperienze di questa campagna di misura si può ricavare che le indagini preventive in aree soggette a rischio di frana dovrebbero sempre includere:

- profili sismici a rifrazione per verificare variazioni verticali e orizzontali dalla velocità di propagazione in aree che siano state soggette di recente e nel passato a movimenti franosi.
- misure di velocità in pozzo e carotaggi sismici in almeno un pozzo perforato in ciascuna unità definita come omogenea dalla prospezione sismica a rifrazione, per verificare lo "stato" della formazione.

## OPERE CITATE

Relazione della Commissione C.N.R. per lo studio della frana di Ancona 1982, Contributo C.N.R. n. 830001105, Responsabile U. CRESCENTI, Università di Ancona, 7 Dic. 1983.

Si fa riferimento, in particolare, ai rapporti su:

- Misure topografiche (M. CUNIETTI)
- Geologia e geomorfologia (U. CRESCENTI)
- Geofisica (R. CASSINIS)
- Sonic logging (ISMES)
- Rilievo sismico (GEOINVEST)
- Geotecnica (F. ESU)
- Sondaggi geognostici (G.S. TAZIOLI)
- Sondaggi elettrici (C.N.R., Istituto di Geologia Marina).

## ABSTRACT.

The earthslide that occurred along the coastal strip near the city of Ancona is one of the largest historical events of this type; however this hazard is common to large areas of peninsular Italy, especially on the Adriatic slope of the Apenninic range.

A programme of investigation has been undertaken after the event, aiming to both short term and long term objectives.

The contribution of geophysical methods consisted of

refraction profiles, electrical soundings and seismic measurements in boreholes.

The refraction survey, in spite of the very slight contrast of physical properties in geological formations (mainly pliocene clays) gave a first model of the earthslide, that assumed a slip mechanism at large depth and helped to plan the boreholes.

The "down hole" and the sonic logging in boreholes have been very useful for the interpretation of stratigraphies, their data verifying the results of the seismic survey.

As far as the long term objectives are concerned, the experience of the survey indicates the criteria to be followed in prognostic investigation of similar areas prone to landslides.

