

Sulla dispersione delle onde sismiche nell'ambito delle altissime frequenze (*)

P. CALOI

1. - Dal 1949 sto conducendo, per conto di una Società Idroelettrica (la Società Adriatica di Elettricità di Venezia), alcune ricerche di carattere geofisico, con particolare riguardo alle caratteristiche elastiche della roccia in diverse strette di valli alpine e prealpine, e al comportamento di grandi dighe di sbarramento sotto l'azione del bacino idrico, della temperatura o di altre cause.

La liberalità dell'Ufficio Studi di detta Società mi consente di condurre le ricerche in modo da trarne il massimo profitto, anche dal punto di vista strettamente scientifico.

Ciò sta dando i suoi frutti, sotto forma di risultati che vado riassumendo da qualche anno e che via via esporrò successivamente.

Qui mi limito ad accennare ad uno di tali risultati, che ritengo di particolare interesse per i riflessi che esso ha sulla natura non esclusivamente elastica del materiale costituente la crosta terrestre.

2. - In parecchie valli alpine ho avuto occasione di determinare la velocità di propagazione delle onde sismiche, destinate da piccole esplosioni, lungo brevi tragitti che, nel loro insieme, venivano a costituire l'inviluppo di una sezione trasversale di una valle.

Altri tragitti riguardavano brevi tratti longitudinali della valle stessa, dai bordi esterni al fondo.

Devo precisare che l'interpretazione

delle registrazioni veniva fatta *singolarmente* e le velocità calcolate caso per caso, senza mediare cioè mediante dromocrono. Le distanze prese in esame variavano fra 50 e 200 m circa, in media. Oltre alle velocità, venivano annotati anche i periodi delle onde longitudinali e trasversali.

3. - L'esame dei dati ottenuti ed elaborati mi ha condotto alle seguenti considerazioni:

a) In alcune valli delle Prealpi (Valle del Mis: presso Belluno, in prossimità della valle del Cordevole —, Valle dell'Ambiesta: affluente del Tagliamento, nei pressi di Tolmezzo —, Val Gallina: affluente del Piave, nei pressi del lago di Santa Croce —, Valle del Glagnò: affluente del Fella, nei pressi di Carnia —, Val Cellina ecc.), le velocità di propagazione osservate per le onde longitudinali non superano mai i 5 km/sec e possono essere anche sensibilmente inferiori a tale limite.

Inoltre, i periodi associati non scendono mai al di sotto di 1/100 di secondo e possono essere invece sensibilmente superiori.

Si tratta generalmente di valli poco profonde e relativamente larghe, nelle quali il lavoro dell'erosione non appare eccessivamente penetrante.

b) In altre valli invece si sono ripetutamente osservati valori altissimi per la velocità di propagazione delle onde longitudinali: valle del Lumiei: affluente del Tagliamento, sopra Ampezzo carnico —, alta valle del Chiarzò, in località Zermula: affluente del But-Tagliamento, nei pressi di Paularo —, valle del Vinadia: affluente

(*) Comunicazione presentata all'XI Assemblea Generale dell'U.G.G.I., (Toronto, 1-14 Settembre 1957).

del Tagliamento —, valle del Piave: nei pressi di Pieve di Cadore —, valle del Vajont: affluente del Piave, nei pressi di Longarone —, valle del Maè: affluente

vere forre penetranti nel vivo della montagna (vedasi il Vajont, Zermula, il Lumiei, ecc.). Inoltre sono sovrastate da montagne quasi sempre di quota elevata.

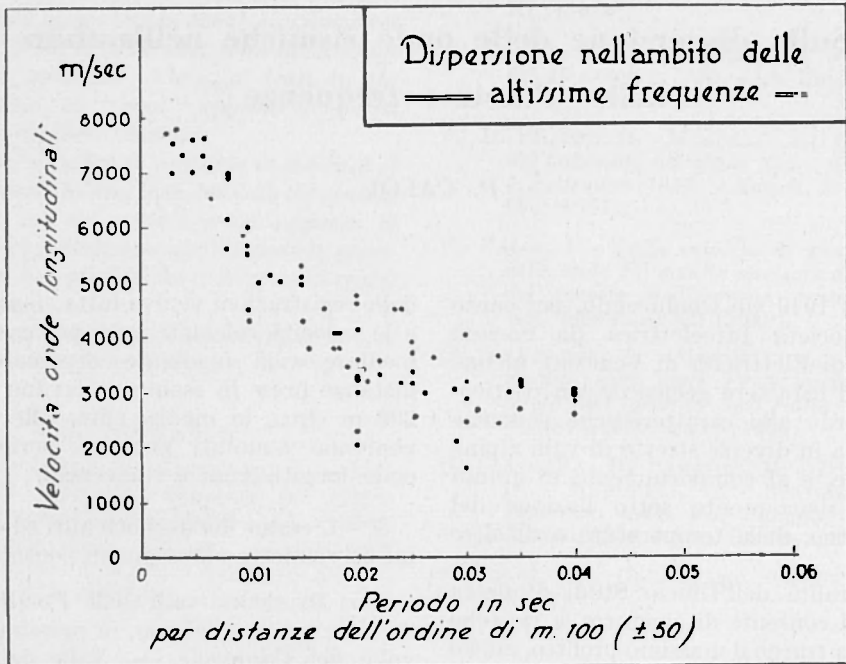


Fig. 1

del Piave, nei pressi di Forno di Zoldo —, Marmolada: ad oltre 2600 m di quota, nei pressi del Pian dei Fiacconi —, Valle del Leno (Vallarsa): affluente dell'Adige, nei pressi di Parrocchia di Vallarsa —, Cordevole, presso Caprile, —, Travignolo, presso Belladonna (Rolle), ecc.

Le velocità in dette valli possono raggiungere valori di 7-7,5 km/sec ed anche superiori.

I periodi associati non superano 0,005 sec e possono arrivare a 0,002 sec.

I valori citati vengono generalmente osservati sul fondo valle (Pieve di Cadore, Zermula, Vajont, Valle del Leno ecc.) od anche su pareti a picco (Vajont, Lumiei, Maè, ecc.) od anche in alta montagna, alla base di ghiacciai (Marmolada).

Si tratta generalmente di valli profonde, strette, nelle quali l'erosione ha compiuto poderosi lavori di penetrazione, creando

4. — Qui sorge spontanea una domanda. Gli elevatissimi valori osservati per la velocità delle onde longitudinali (e trasversali) hanno reale consistenza? E, in questo caso, come possono conciliarsi con i valori forniti dagli studi sismici, condotti su terremoti che hanno interessato le stesse zone?

Sulla bontà e fedeltà delle registrazioni posso dare le massime garanzie; come sul calcolo dei tempi di trasmissione, misura delle distanze, ecc. Inoltre, va sottolineato che — appunto per l'eccezionalità dei valori in più parti trovati — le esperienze vennero ripetute più volte, nelle stesse condizioni e nei stessi luoghi, a distanza di anni: sempre con gli stessi risultati.

D'altronde, in ricerche sismologiche precedenti, condotte su terremoti che riguardano la zona interessata in modo specifico (terremoto del Bellunese dell'8-VI-1934, forte terremoto del Cansiglio⁽¹⁾ del 18-X-

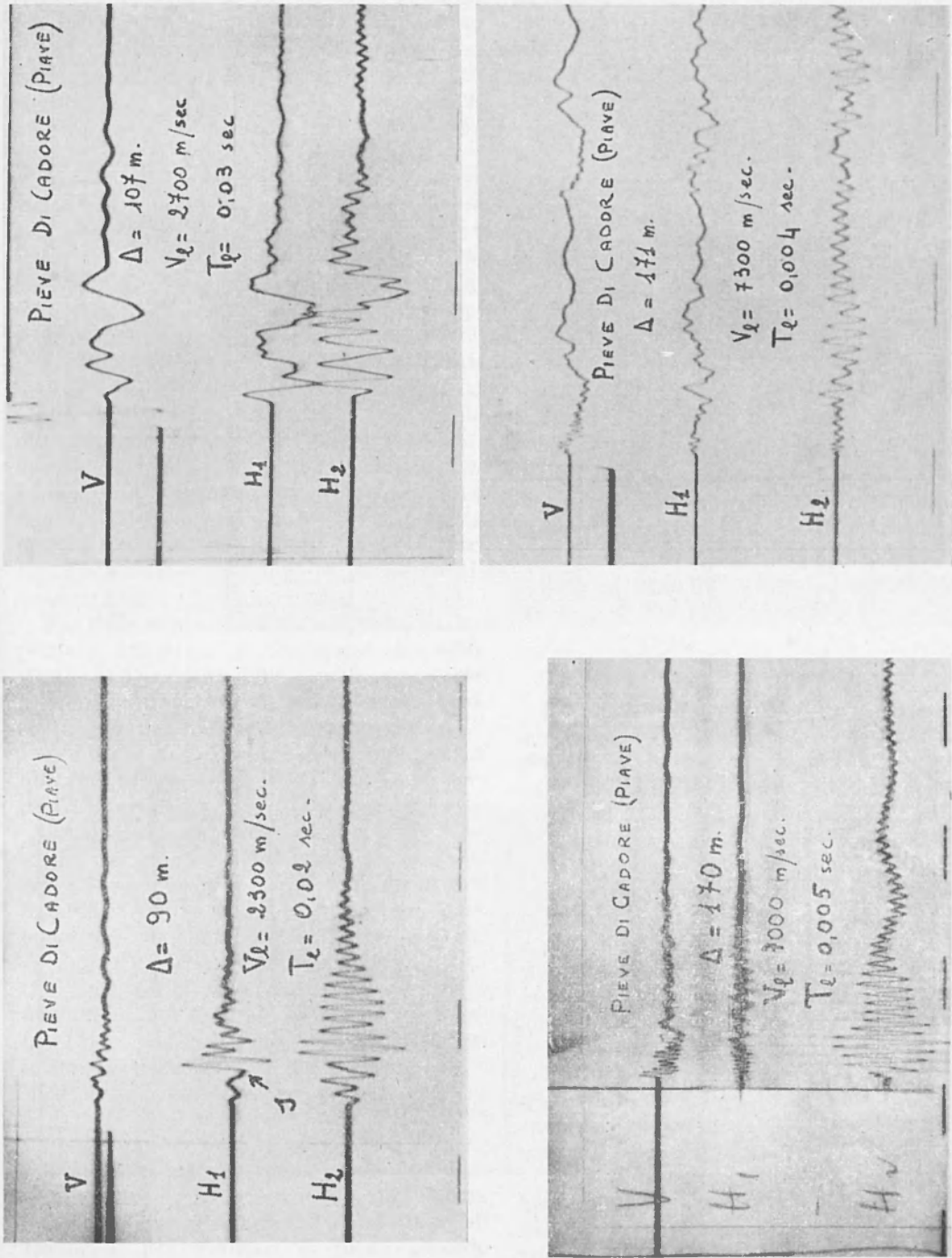


Fig. 2. - Dispersione (impropriamente detta anormale) nella stretta del Piave a Pieve di Cadore.

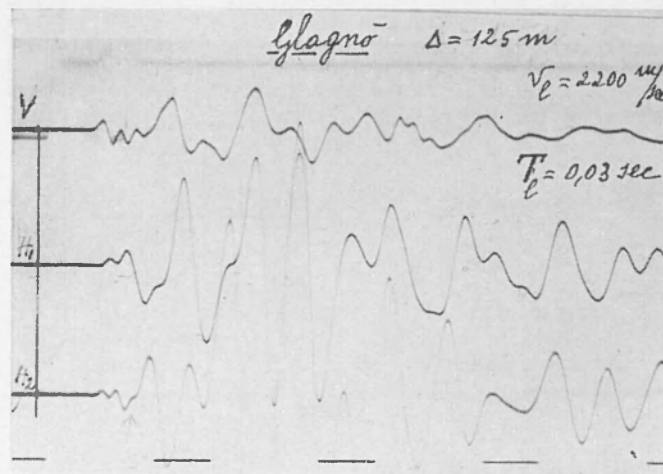
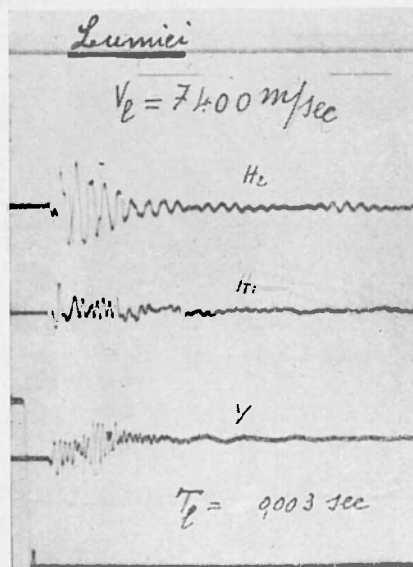
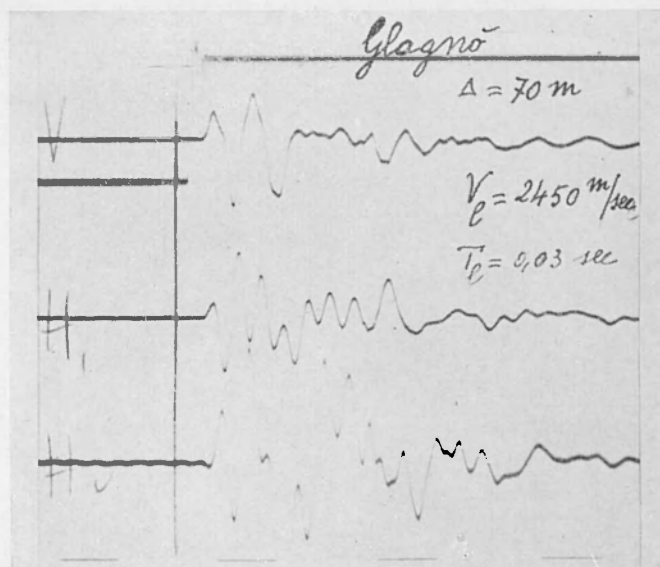
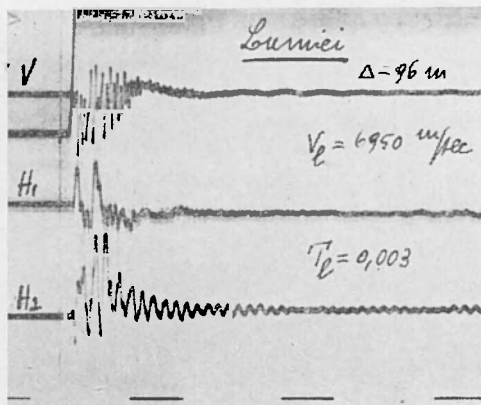


Fig. 3. - Dispersione in due diversi valli dell'alta Carnia

1936, ecc.), la velocità delle onde Pg è risultata concordemente di 5.7 km/sec., ben inferiore quindi a quelle sopra riportate.

Valori, come quelli sopra riportati, sono caratteristici dello strato-base della crosta terrestre, a profondità medie di 30 km, mentre, nel caso in esame, sono stati osservati in superficie.

Va ancora tenuto presente che le osservazioni di cui sopra non hanno carattere accidentale o di esclusività di una zona ristretta: esse interessano località sparse su una vasta regione alpina: da Zermula, nelle Alpi Carniche, a Vallarsa nelle Prealpi trentino-veronesi.

I valori elevatissimi riportati, con riferimento alla base delle valli prealpine od alpine od alle alte quote, più denudate dall'erosione, mal si conciliano, evidentemente, con quelli tratti dalle ricerche sismologiche vere e proprie. La sismologia prova che tali valori si riscontrano per profondità dell'ordine di 30 km almeno: sono, in altri termini, caratteristici delle più basse stratificazioni della crosta terrestre.

Tali stratificazioni d'altronde, non possono pensarsi affioranti in corrispondenza delle Alpi, nell'ambito delle quali numerose ricerche sismologiche hanno mostrato velocità medie dell'ordine di 5,7 km/sec.

D'altra parte, l'esistenza di quei valori non può essere messa in dubbio. Deve pertanto intervenire un'«effetto» che ne consenta una spiegazione. E qui un fatto innegabile va subito sottolineato: *le massime velocità osservate sono associate alle massime frequenze*. Ciò ho avuto modo di constatare non sporadicamente, bensì *sistematicamente*. Le figg. 1-5 ne forniscono un saggio evidentissimo. Questo assodato, restava da vedere quale teoria contempla un effetto del genere, per i piccoli periodi. Malgrado il vento di fronda che taluno ha agitato recentemente su di essa, sono stato costretto — ancora una volta — a far ricorso alla teoria della propagazione in mezzi elastici, che ammettono attrito interno (firmo-elasticità). Con essa, avevo già spiegato⁽²⁾, fra l'altro, come avviene l'estinzione delle onde di Rayleigh, con risultati in pieno accordo con l'osservazione.

Ho fatto ricorso alla stessa teoria, con le opportune modifiche, suggerite dal fatto

che qui si tratta di onde spaziali. A questo riguardo, soccorre un lavoro di Kubotera⁽³⁾. Partendo dalla teoria sviluppata da Toda per mezzi firmo-elastici, si trova che la velocità V_p delle onde longitudinali viene impressa da

$$V_p^2 = \frac{1}{\rho K_S} + \frac{4}{3} \frac{\mu}{\rho} \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad [1]$$

essendo ρ la densità, K_S la compressibilità statica, μ la rigidità, τ il tempo di rilassamento per tensioni tangenziali e $\omega = \frac{2\pi}{T}$,

essendo T il periodo dell'onda.

La velocità delle corrispondenti onde trasversali è espressa da

$$V_S^2 = \frac{\mu}{\rho} \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad [2]$$

In entrambe le espressioni, la velocità dipende da ω .

Se k è il coefficiente di attenuazione dipendente dalla firmoviscosità del mezzo, partendo dal modello di Toda, Kubotera ottiene la seguente relazione approssimata fra k e le costanti viscoelastiche:

$$k = \frac{2}{3} \frac{1}{V_p} \left(\frac{V_S}{V_p} \right)^2 \frac{1}{\tau}. \quad [3]$$

Il valore di k è stato da me determinato per le onde di Rayleigh e — per i grandi periodi — è risultato conforme a quello dato dalle osservazioni. Mancavano confronti con i brevi periodi: dai risultati ottenuti da Kubotera appare evidente la validità della teoria anche per i più piccoli periodi. Come del resto appare chiaro dai valori calcolati da Kubotera (pag. 32), per i periodi molto piccoli (quali sono quelli che si osservano nelle registrazioni delle esplosioni) i valori di k relativi alle onde longitudinali e a quelle di Rayleigh sono dello stesso ordine di grandezza. Pertanto nella [3], per la determinazione di τ relativo ad un dato periodo, mi sono valso dei corrispondenti valori di k , a suo tempo da me calcolati⁽²⁾.

Tenendo conto dei valori elevati che ω assume nel caso delle esplosioni, la velocità delle onde longitudinali nelle esplosioni potrà essere espressa da:

$$V_{p,es.}^2 = \frac{1}{\rho K_S} + \frac{4}{3} \frac{\mu}{\rho}.$$

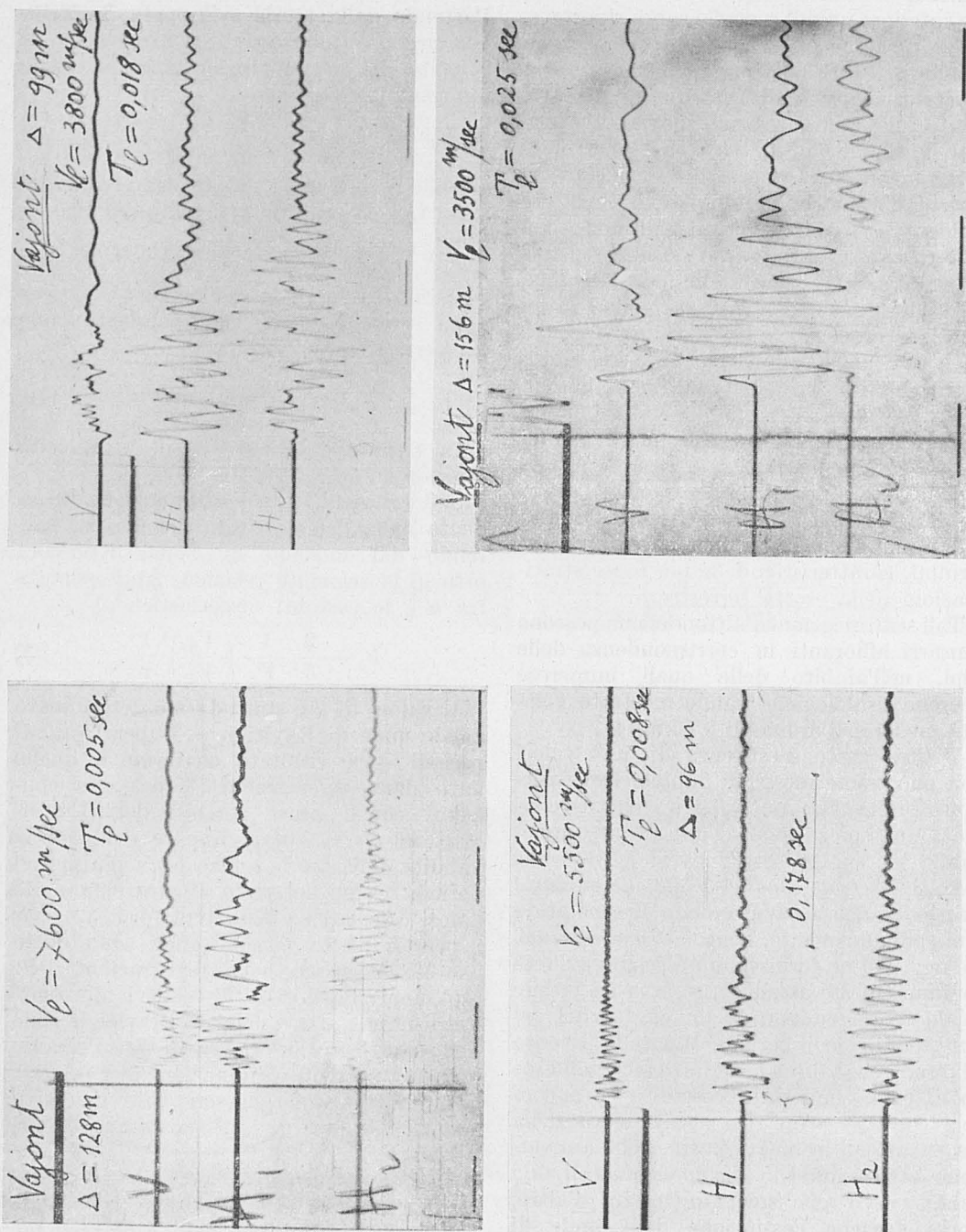


Fig. 4. - Dispersione nella stretta del Vajont, dal fondo valle al margine superiore.

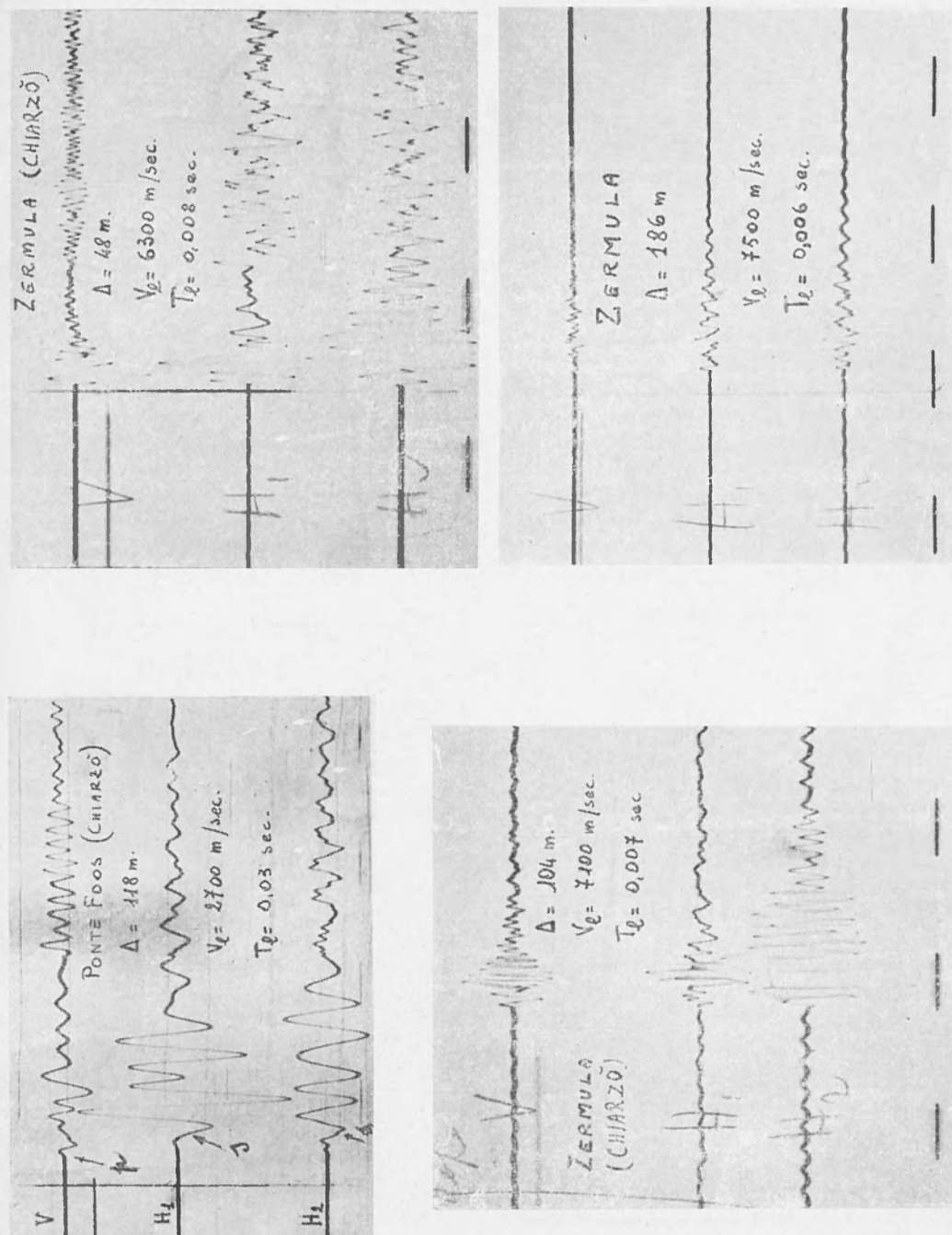


Fig. 5. - Dispersione in due valli vicine nell'alta Carnia.

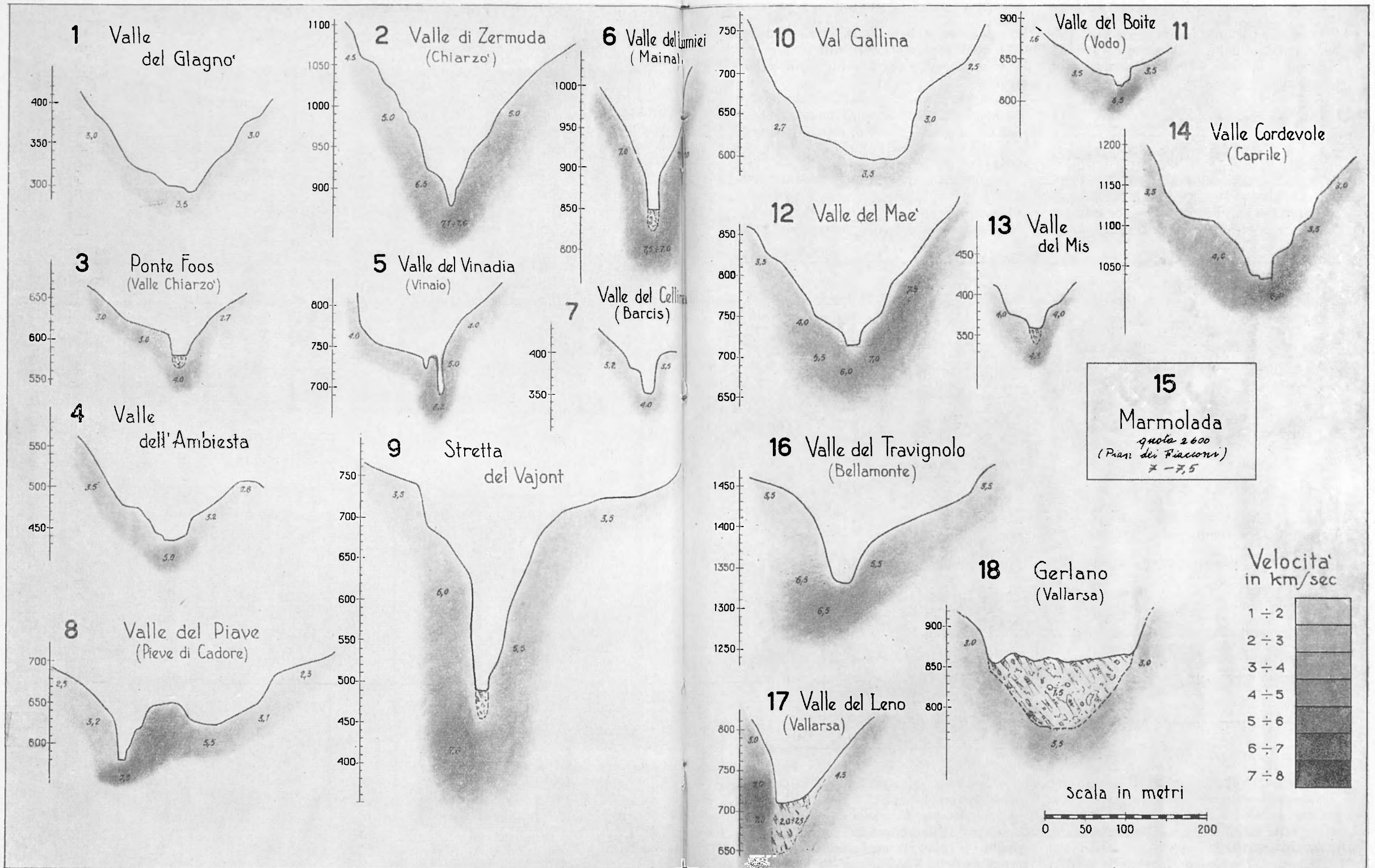


Fig. 6. - Valli nelle Alpi centro-orientali, in cui furono eseguite esperienze geosismiche.

Possiamo pertanto legare le velocità delle onde longitudinali, quali si osservano nei terremoti naturali e nelle esplosioni, con la relazione

$$V'_{P\text{sis.}} - V'_{P\text{es.}} = \frac{4}{5} \frac{\mu}{\rho} \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad [4]$$

dove $\frac{\omega^2}{\rho}$ esprime il quadrato della velocità delle onde trasversali destinate da esplosioni.

Ho applicato la [3] e la [4]. Mi limito a riportare qui i risultati relativi alle massime frequenze, come quelli che più ci interessano.

le esperienze e le valli in corrispondenza delle quali sono stati osservati i valori per le velocità, ivi riportate (nel loro valore medio).

La teoria della firmo-elasticità, come si è visto, spiega come i valori massimi osservati (intorno ai 7 km/sec) siano riportabili ai valori *sismologici*, propri dello strato del « granito ».

Tale strato quindi, in molte località delle Alpi e delle Prealpi, si trova pressochè affiorante, anche a grandi quote (Marmolada), mentre in altre, le registrazioni otte-

	V_P	
	Calcolanti	Osservanti (tenendo conto effetto atrito interno)
<i>Lumiei</i> (valle e fondo valle)	6.9	5.7
	6.9	5.7
	6.9	5.7
	6.95	5.8
	7.4	6.0
	7.5	6.1
<i>Pieve di Cadore</i>	7.3	6.0
	7.0	5.65
<i>Vajont</i> (valle e fondo valle)	7.6	6.3
<i>Pontesei</i> (Val Zoldana-sperone, sponda sinistra e fondo valle)	7.5	6.0
	6.7	5.6
<i>Travignolo</i> (fondo valle)	6.6	5.3
<i>Caprile</i> (sperone sponda sinistra)	6.0	5.0
<i>Zermula</i> (Alta Carnia-fondo valle)	6.5	5.2
	7.1	5.9
	7.6	6.3
<i>Speccheri</i> (Vallarsa sperone fondo valle)	7.3	6.3

In media, risulta un valore di 5,8 km/sec.

Naturalmente, ciò che conta in questo genere di calcoli è l'ordine di grandezza dei valori ottenuti e questo non potrebbe essere più significativo.

Nelle figg. 7 e 6 sono riportate le località alpine e prealpine, dove sono state eseguite

nute lo danno alla profondità di 2-3 km (Mis, Travignolo, ecc.).

Concludendo, le ricerche vibrografiche condotte nell'ambito di numerose valli Alpine — collegate con quelle eseguite su terremoti della Val Padana —, hanno consentito di trarre due notevoli conclusioni:

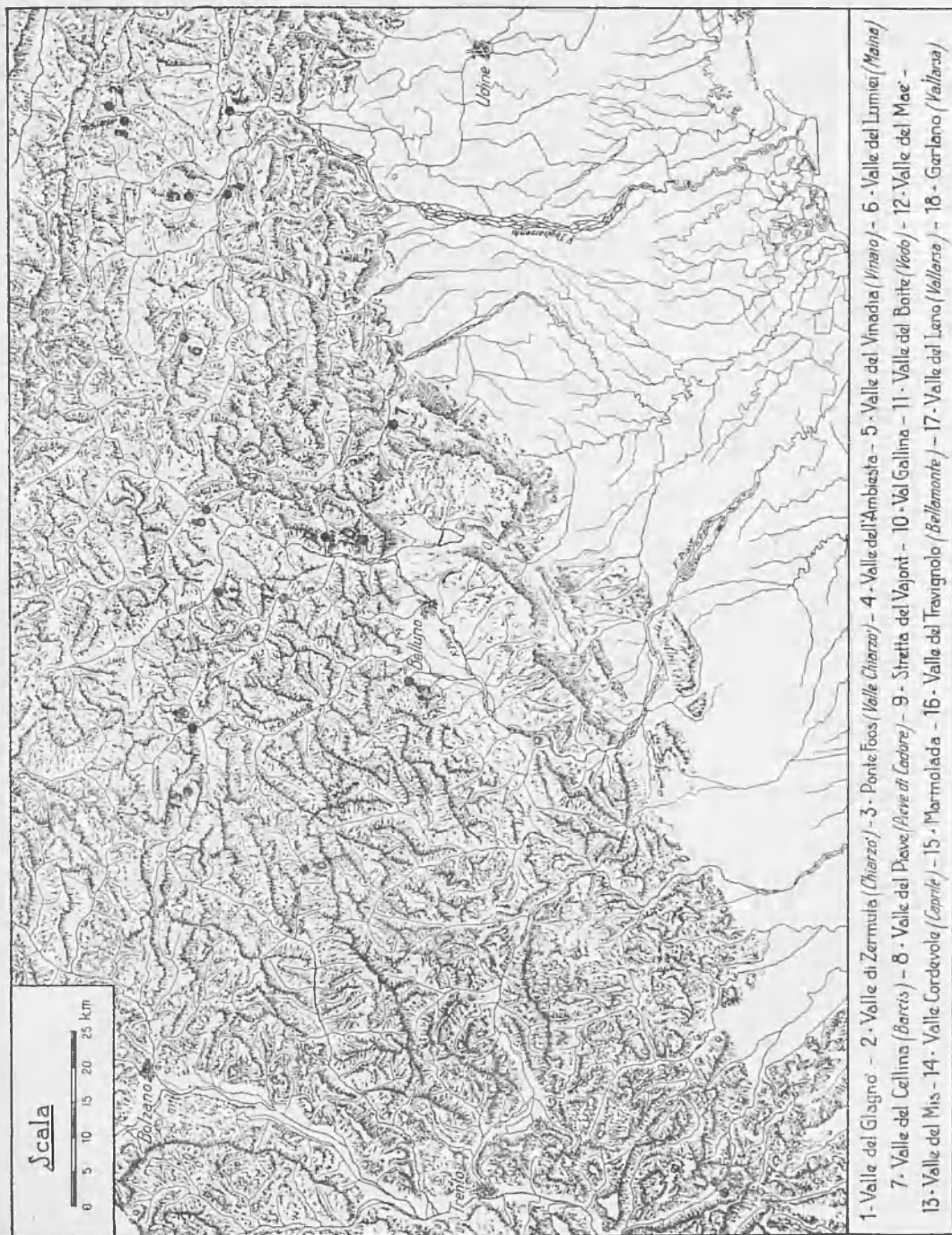


Fig. 7. - Località alpine, nelle quali si trovano le valli, di cui alla fig. 6.

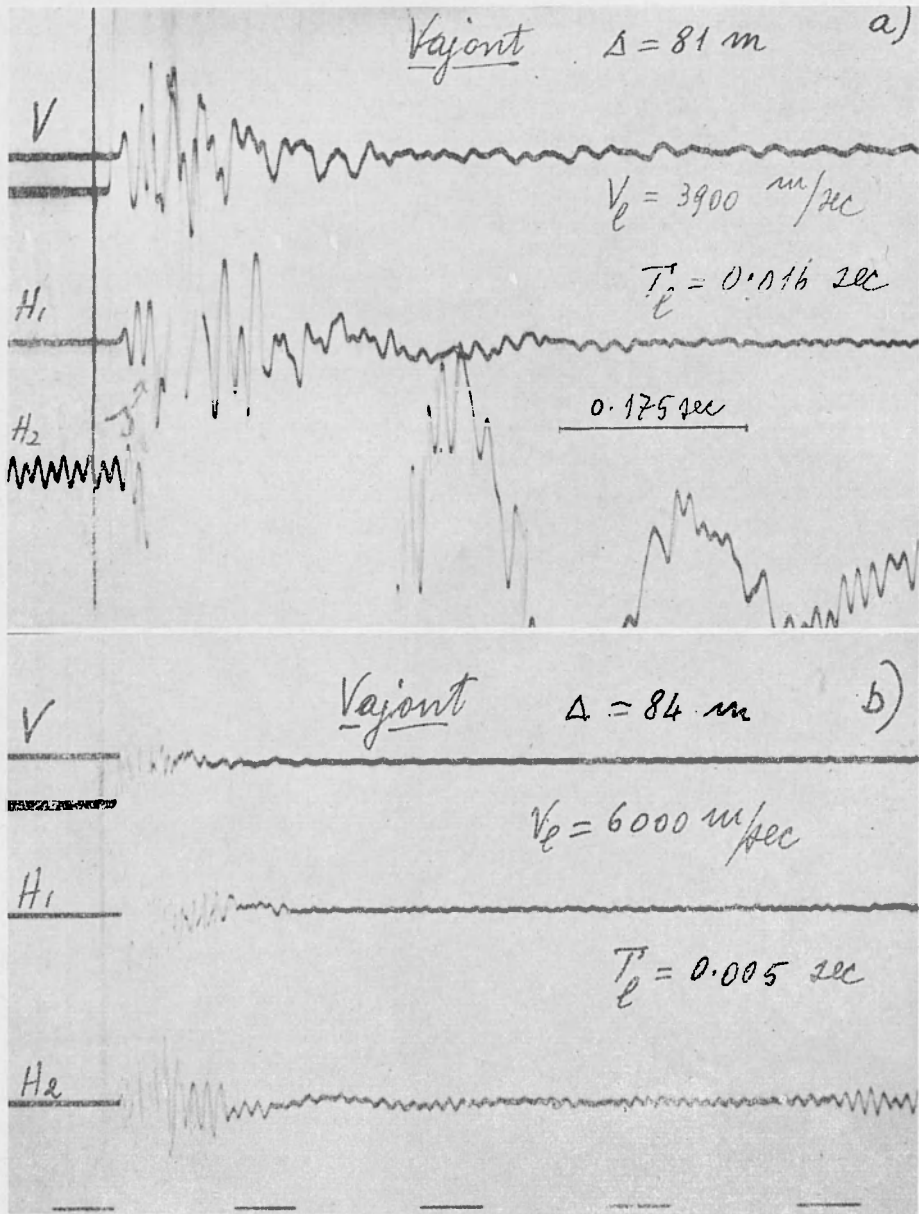


Fig. 8. - a) RegISTRAZIONI OTTENUTE PRIMA DELLE PROVE DI CONSOLIDAMENTO; b) Vibrogrammi avuti dopo le iniezioni di cemento in roccia.

a) Nei fenomeni sismici esiste realmente dispersione, nel senso che le *massime velocità* sono collegate alle *massime frequenze*: e quanto più compatta è la roccia tanto maggiori possono essere le frequenze (e quindi le velocità) in essa destinate e tanto minori (a parità di altre condizioni) le ampiezze provocate.

Questo fenomeno, del resto, assume carattere generale nella Fisica, tanto che questa specie di dispersione non è più ritenuta — dai fisici — anomala, bensì *normale dispersione*.

Si sa p. es. che, nella ionizzazione provocata da raggi X, la velocità massima degli elettroni espulsi è in rapporto con la

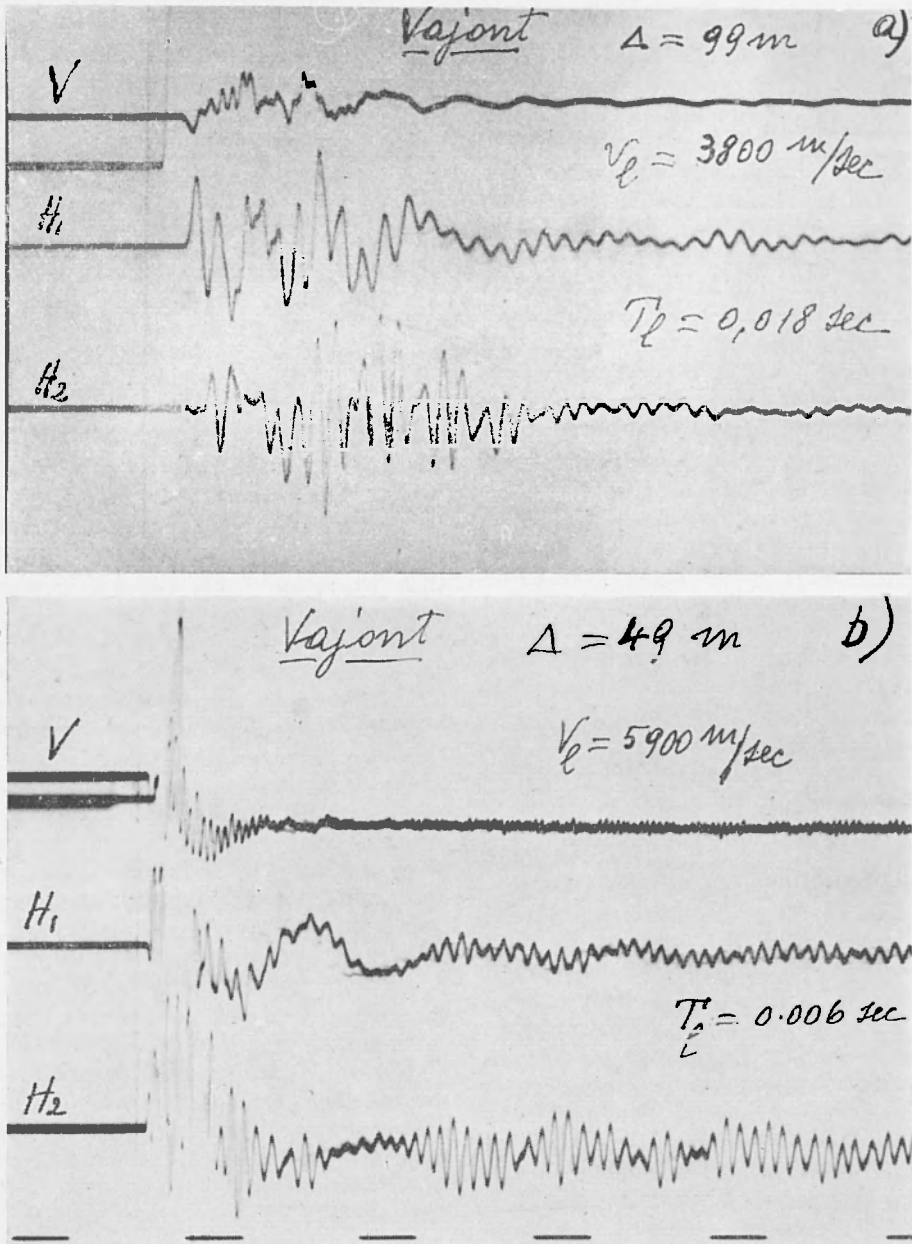


Fig. 9. - a) Vibrogrammi registrati prima del consolidamento; b) vibrogrammi ottenuti dopo le iniezioni di cemento in roccia.

lunghezza d'onda dei raggi X, nel senso che il massimo di velocità è tanto più elevato quanto più corta è la lunghezza d'onda. Questa legge è comune anche alla produzione dei raggi X, che si realizza quando dei raggi catodici urtano un ostacolo: a

una maggior velocità dei raggi catodici, corrisponde infatti una più breve lunghezza d'onda per i raggi X.

Del resto, fenomeni analoghi si verificano pure nella teoria ondulatoria della materia e nell'energia dei quanti, che risulta propor-

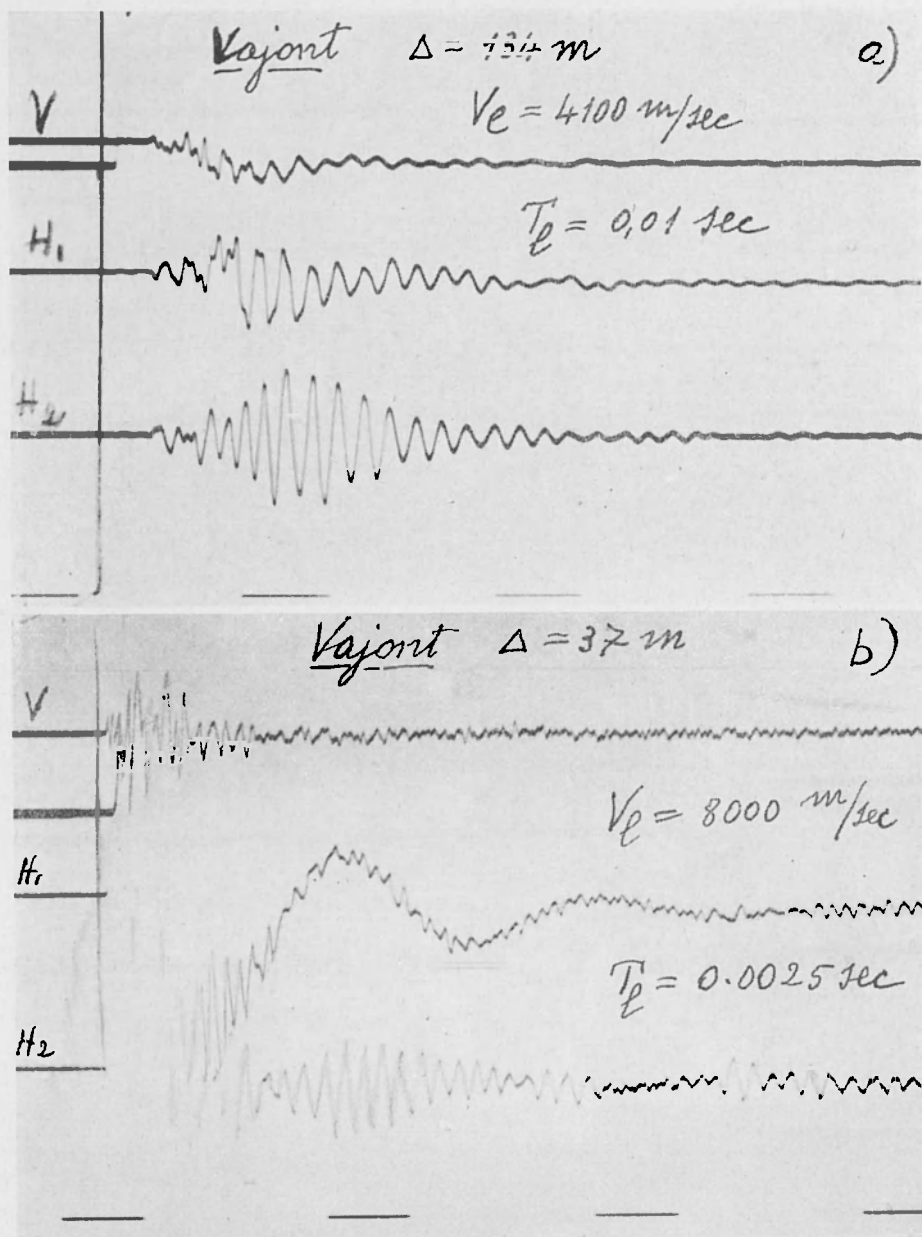


Fig. 10. — a) Vibrogrammi in roccia non ancora consolidata; b) Vibrogrammi dopo il consolidamento per iniezione di cemento.

zionale alla frequenza della radiazione, di cui essa si considera la trasformazione. Ogni dominio della Fisica — fatte, naturalmente, le opportune modifiche —, presenta fenomeni simili, tanto che Sir George Thomson riconosceva che questa legge conta fra le più feconde della fisica moderna.

La teoria della firmo-elasticità (sulla base dei forti coefficienti d'assorbimento, collegati alle più forti frequenze) permette di provare che le massime velocità osservate sono riducibili — sismologicamente parlando — alle velocità osservate nei terremoti, per frequenze abituali.

b) Nel sistema alpino — almeno nella sua parte centro-orientale-meridionale —, il così detto strato del granito affiora in superficie in più posti (specie nelle valli più profonde), anche a notevoli quote.

5. — Ogni mezzo, evidentemente, presenta un limite massimo di dispersione, legato alla sua natura fisica.

Si è visto che, nei mezzi con i quali si è sperimentato — calcari in genere, dolomia in particolare — tale limite si aggira sugli 8 km/sec. Per periodi superiori a 0.02 di secondo la dispersione si riduce moltissimo. Essa, in tutti i casi, cessa a brevissima distanza (poche centinaia di metri), a causa dell'elevatissimo coefficiente di estinzione, cui sono soggette le altissime frequenze (²).

Potrà meravigliare il fatto che tale dispersione non sia stata osservata nelle normali esperienze di prospezione sismica, mediante l'uso dei geofoni. Va osservato, a questo riguardo, che i filtri d'onde, di cui si fa uso in tali esperienze, comportano un più o meno sensibile ritardo nella propagazione, oltre costituire un ostacolo per certe gamme d'onda. L'esistenza dei gavanometri è poi sorgente, a sua volta, di altre cause di ritardo.

Le registrazioni da me eseguite sono state ottenute con vibrografi «Askania», nei quali interviene esclusivamente un'amplificazione ottica, con esclusione quindi di amplificazioni galvanometriche.

Va ancora notato che, nelle esperienze di laboratorio, ci si limita a campioni di roccia, di limitate dimensioni. È inevitabile che tali campioni siano alterati nelle loro intime caratteristiche: la struttura molecolare subisce certamente modificazioni nelle operazioni di prelievo dei pezzi di roccia, modifiche che non possono essere agevolmente valutate. Inoltre, le vibrazioni in esse destate sono imposte, forzate, condizionate dalla forma limitata e dalla sostanza comunque alterata. Non sono certo come quelle osservate in natura, nella roccia in sito, non artificialmente alterata.

6. — Restava da compiere una nuova esperienza, a testimonianza della dispersione nell'ambito delle altissime frequenze. Se tale fenomeno ha reale esistenza, un

tipo di roccia — comunque consolidato — dovrà rivelarlo, più o meno chiaramente.

È ciò che ho avuto campo di verificare, nel corso delle indagini condotte in alcune valli alpine.

Mi limito ai chiarissimi esempi forniti dal Vajont. Si è già osservato che la quasi generalità delle valli alpine presenta un modulo elastico decrescente dai limiti superiori al fondo. La profonda stretta del Vajont presenta la stessa caratteristica. Poiché essa verrà sbarrata da una grande diga, i costruttori si sono preoccupati di rendere il più possibile elasticamente omogenea la roccia in cui lo sbarramento troverà il suo appoggio. A questo scopo, molte zone sono state consolidate mediante iniezione di cemento, per notevoli profondità. Ciò mi ha consentito di poter sperimentare alcuni tratti di roccia, prima e dopo il consolidamento per iniezione di cemento. Il risultato è pienamente conforme ai principi del fenomeno accennato: il consolidamento comporta infatti un notevole aumento della velocità di propagazione nel mezzo, aumento che diviene anormale a mano a mano che l'entità del consolidamento consente il progressivo elevarsi della frequenza.

Le figg. 0-0 ne danno significativa testimonianza.

Resta così provato l'effetto di dispersione (un tempo detta anormale) delle onde sismiche nel campo delle altissime frequenze. L'analogia con fenomeni analoghi osservati in altri rami della Fisica si spinge fino a constatare che, come in Ottica, la dispersione è in dipendenza stretta dell'assorbimento, e i due fenomeni devono sempre essere studiati e spiegati nello stesso tempo. In altri termini, come nel dominio dei raggi X e in quello dell'Ottica, anche *nell'ambito delle onde sismiche la dispersione è intimamente legata all'assorbimento.*

RIASSUNTO

Da qualche anno mi sto interessando di questo fenomeno, con particolare riguardo alla propagazione del moto ondoso in mezzi non esclusivamente elastici, come sono quelli costituenti la crosta terrestre.

Studiando la propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo che ammette attrito in-

terno, sono riuscito a spiegare alcune caratteristiche di queste onde, che attendevano chiarimento da oltre un quarantennio. Risultò in quel lavoro, che in tali mezzi le onde di Rayleigh presentavano il massimo di velocità associato al massimo di frequenza, nelle zone di massimo assorbimento.

Era da ritenere che tale fenomeno avesse carattere generale e investisse la propagazione delle onde sismiche nella loro totalità.

E ciò che ebbi modo di verificare in recenti esperienze, compiute in profonde valli alpine, su brevissime distanze. Anche le onde spaziali presentano questo tipo di dispersione; massima velocità associata a massima frequenza, come vuole la teoria della firmo-elasticità.

Inoltre, come avviene nel campo dei raggi X e dell'Ottica, così anche per le onde sismiche la dispersione va sempre associata all'assorbimento, e i due fenomeni vanno studiati contemporaneamente.

In altri termini, come avviene per la luce, dispersione e assorbimento sono intimamente interdipendenti.

Per quanto concerne l'assorbimento, esso è in relazione alla dissipazione d'energia per fenomeni analoghi a quelli dell'attrito: questa dissipazione trasforma in calore una parte dell'energia delle vibrazioni sismiche, donde il loro assorbimento.

ABSTRACT

For some years I have been taking interest in this phenomenon and especially in the propagation of undulatory movement in mediums that are not elastic throughout, such as those of which the earth's crust consists.

Studying the propagation of Rayleigh's waves in a medium that admits internal friction, I have succeeded in explaining some features of these waves which have been waiting

for elucidations for over forty years. It has transpired from this work that in such mediums Rayleigh's waves showed the maximum speed associated with maximum frequencies, in the areas of maximum absorption.

It is to be thought that this phenomenon is of a general character and that it concerns the propagation of the totality of seismic waves.

This I have been able to verify during recent experiments conducted over very short distances in deep Alpine valleys. Spatial waves too present this type of dispersion; maximum speed associated with maximum frequency, as expected in accordance with the theory of firmo-elasticity.

Furthermore, in the same manner as it happens in the field of X-rays and optics, with seismic waves dispersion is always associated with absorption and the two phenomena have to be studied at the same time.

In other words, as in the case of light, dispersion and absorption are intimately interdependent.

As regards absorption, it is connected with dissipation of energy due to phenomena similar to those that accompany friction. This dissipation transforms into heat a part of the energy of seismic vibrations, hence their absorption.

BIBLIOGRAFIA

- (¹) CALOI, P., *Ricerche su terremoti ad origine vicina. Scosse del Consiglio dell'Ottobre 1936*, « La Ric. Scient. », IX, (1938).
- (²) — *Comportamento delle onde di Rayleigh in un mezzo firmo-viscoso indefinito*. « Annali di Geofisica », I, (1948).
— *Teoria delle onde di Rayleigh in mezzi elastici e firmo-elastici, esposta con le omografie vettoriali*. « Archiv. fur Met., Geoph. und Biokl. », IV, (1951).
- (³) KUBOTERA, A., *Rheological Properties of the Earth's Crust...* « Journal of Physics of the Earth », I, 1 (1952).