

Aspetti della dinamica di rocce, calcestruzzo ed acque

PIETRO CALOI

Ricevuto il 20 Marzo 1962

1. — In un lavoro precedente, destinato ad una Rivista tecnica (22), ho esposto le possibilità della geofisica (o, almeno, di parte della geofisica) nella ricerca delle condizioni ambiente più adatte alla costruzione di una grande diga, nonché — una volta costruito lo sbarramento — nel fornire i mezzi e i metodi per un controllo efficace, sensibile e continuo della sua stabilità.

Desidero qui approfondire alcuni aspetti dei problemi che si presentano in queste indagini, sui quali nel lavoro citato ho dovuto sorvolare.

Ho detto dell'utilità di un'indagine preliminare, condotta con clinografi, allo scopo di stabilire l'unicità del blocco geodetico, destinato a supportare una diga. Ho accennato pure all'opportunità di una ricerca dei periodi predominanti nella zona prescelta per l'ancoraggio della diga, allo scopo di evitare la costruzione del manufatto su culle rocciose animate da periodi propri, che rientrino tra quelli più frequenti nelle zone epicentrali. Fatto da evitare soprattutto se solo una parte della diga risultasse ancorata ad uno sperone con periodi liberi dell'ordine detto, creando pericolose dissimmetrie in campo dinamico. La sismologia ha già mostrato quali sono i periodi che maggiormente predominano nelle zone epicentrali (v. fig. 1). Nelle indagini compiute in numerose valli alpine, ho avuto modo di riscontrare sovente oscillazioni libere trasversali («flexural waves») in speroni di roccia, che avevano resistito all'erosione e che si sarebbero prestati ottimamente all'ancoraggio di una diga, aventi periodi di quell'ordine (0,2 sec. circa) (v. figg. 2 e 3). Talvolta, tali speroni appaiono mascherati da sovrastrutture. Specie in zone soggette a movimenti sismici, sono rigorosamente da evitare situazioni del genere.

Ho già riferito a lungo sull'ausilio prezioso del vibrometro nel rilevamento delle caratteristiche elastiche del mezzo. Ho osservato come tali caratteristiche varino da luogo a luogo e, nello stesso posto, secondo

le direzioni. Ho dimostrato che, nell'ambito delle elevate frequenze, esiste il fenomeno della dispersione anomala, nel senso che la velocità di gruppo riesce maggiore della velocità di fase delle onde componenti, per cui il fronte è costituito dalle onde associate ai più brevi periodi.

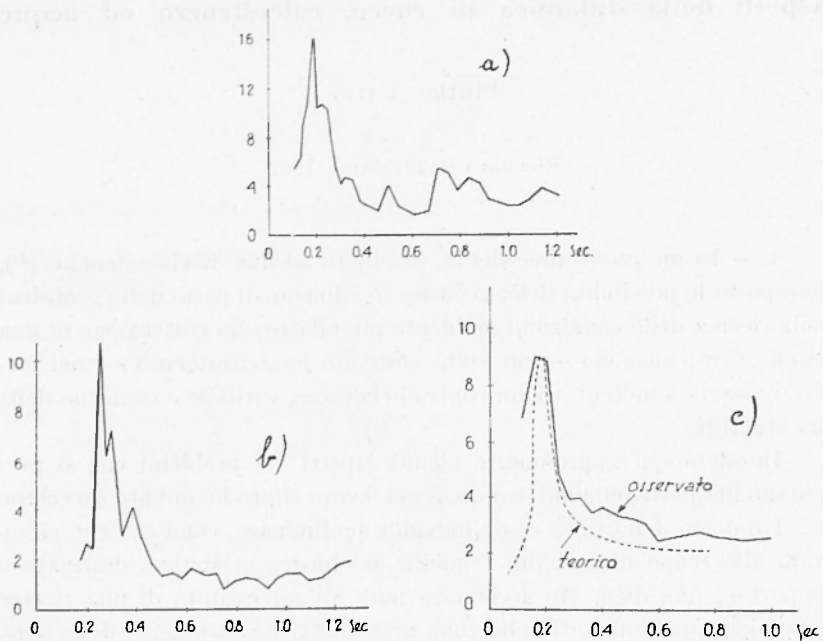


Fig. 1 — a) Rapporto ampiezze osservate in superficie e a 300 m di profondità nella miniera di Hitachi (Giappone);
 b) Rapporto ampiezze osservate in superficie e a 21 m di profondità a Tokai-mura (Giappone);
 c) Rapporto medio ampiezze fra 0 e 300 m di profondità nella miniera di Hitachi (Giappone).

Pertanto, più il mezzo presenta elevate le sue caratteristiche elastiche — e quindi più alte le velocità delle onde longitudinali e trasversali — più alta risulta la frequenza d'onda. È questo un altro elemento qualitativo nella valutazione della compattezza di un mezzo solido. Ho ampiamente documentato altrove la realtà di questo fenomeno. Qui mi limito a riportare gli esempi delle figg. 4, 5, 6, 7. Più il mezzo è rilassato più lungo diviene il periodo dell'onda sismica che in esso insorge. In coltri alluvionali ciò riesce di chiara evidenza (fig. 6). Qualora il fondo roccioso, sopportando un tratto di terreno coperto da materiale sciolto, sia a non grande

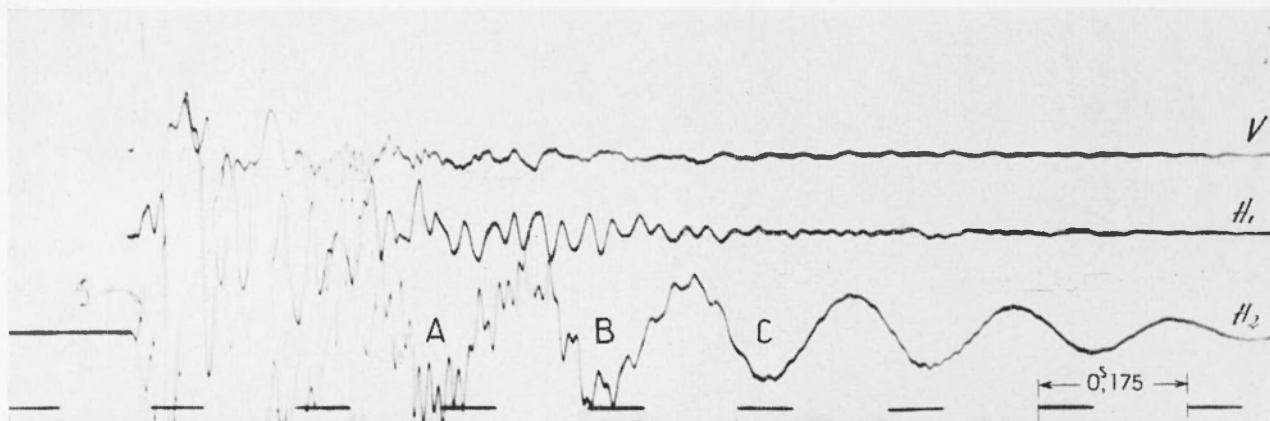


Fig. 2 - Oscillazioni con periodo di 0,2 sec. circa (AB-BC-...) osservate nella valle dell'Ambiesta.

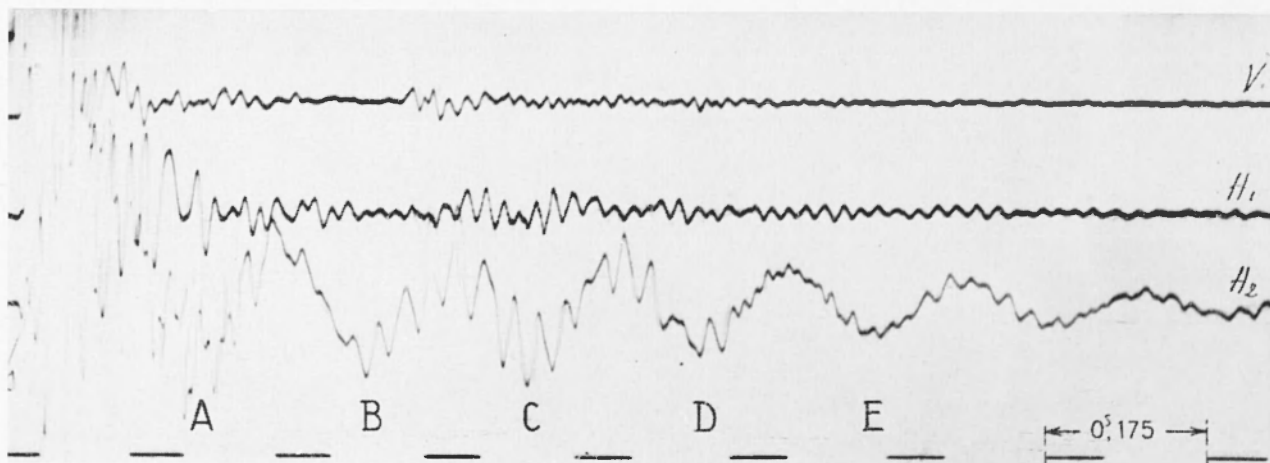


Fig. 3 - Oscillazioni con periodo di 0,2 sec. circa (AB-BC-...) osservate nella valle del Cordevole.

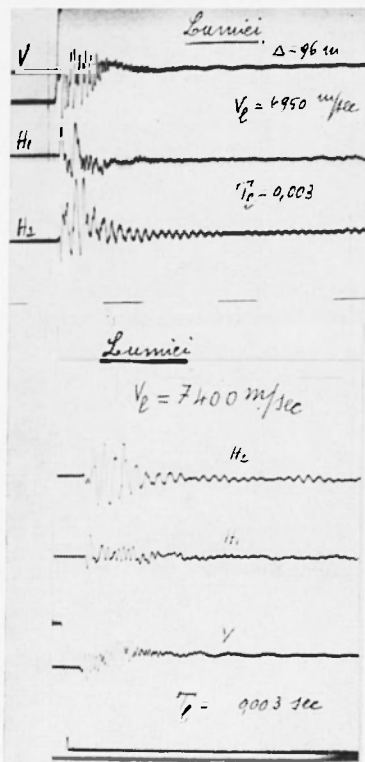


Fig. 4 - RegISTRAZIONI vibrografiche in roccia molto compatta, ad elevato modulo di elasticità (si noti l'elevatissima frequenza delle oscillazioni longitudinali e trasversali dirette).

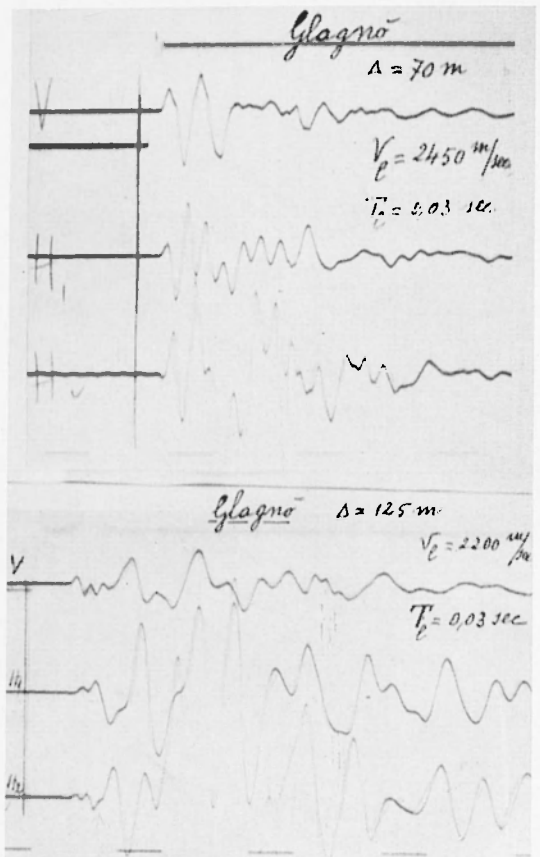


Fig. 5 - RegISTRAZIONI vibrografiche in roccia poco compatta, a basso modulo di elasticità (il periodo delle onde sismiche è notevolmente più alto di quello delle oscillazioni, di cui alla fig. 4).

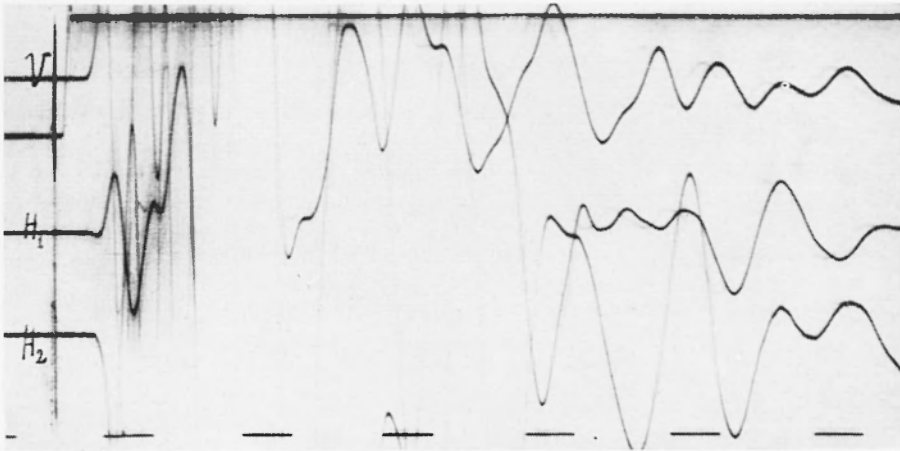


Fig. 6 - In terreno alluvionale, le oscillazioni presentano periodi elevati anche nelle onde longitudinali dirette (0,06 sec. in questo esempio, tratto da esperienze nella valle del Gerlano, sopra una profonda coltre di sconnesso terreno di frana).

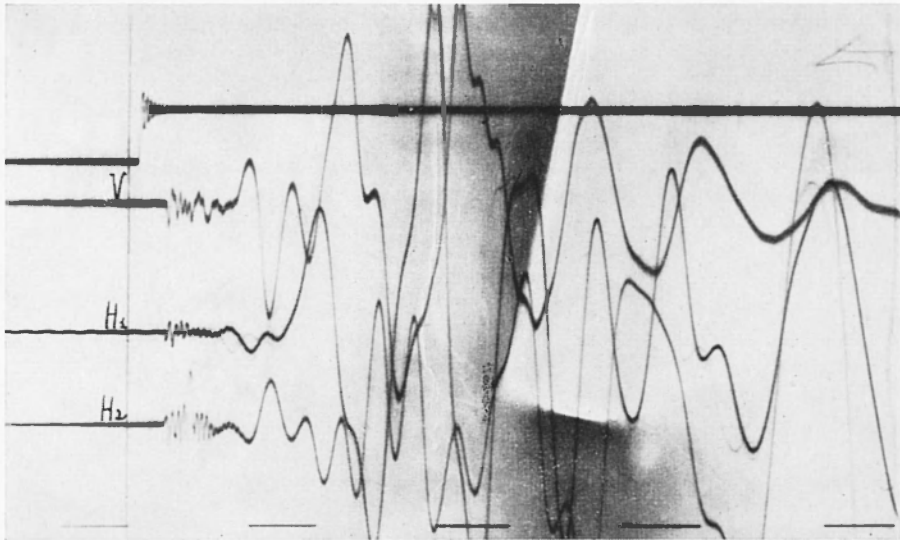


Fig. 7 - RegISTRAZIONI su terreno alluvionale, sovrastante a roccia: le fasi iniziali, di elevata frequenza, provengono dalla roccia sottostante (nell'esempio riportato, ottenuto a Ponte Noiaris, a circa 8 metri di profondità); le successive, proprie della coltre alluvionale, iniziano con periodi dell'ordine di 0,06 sec.

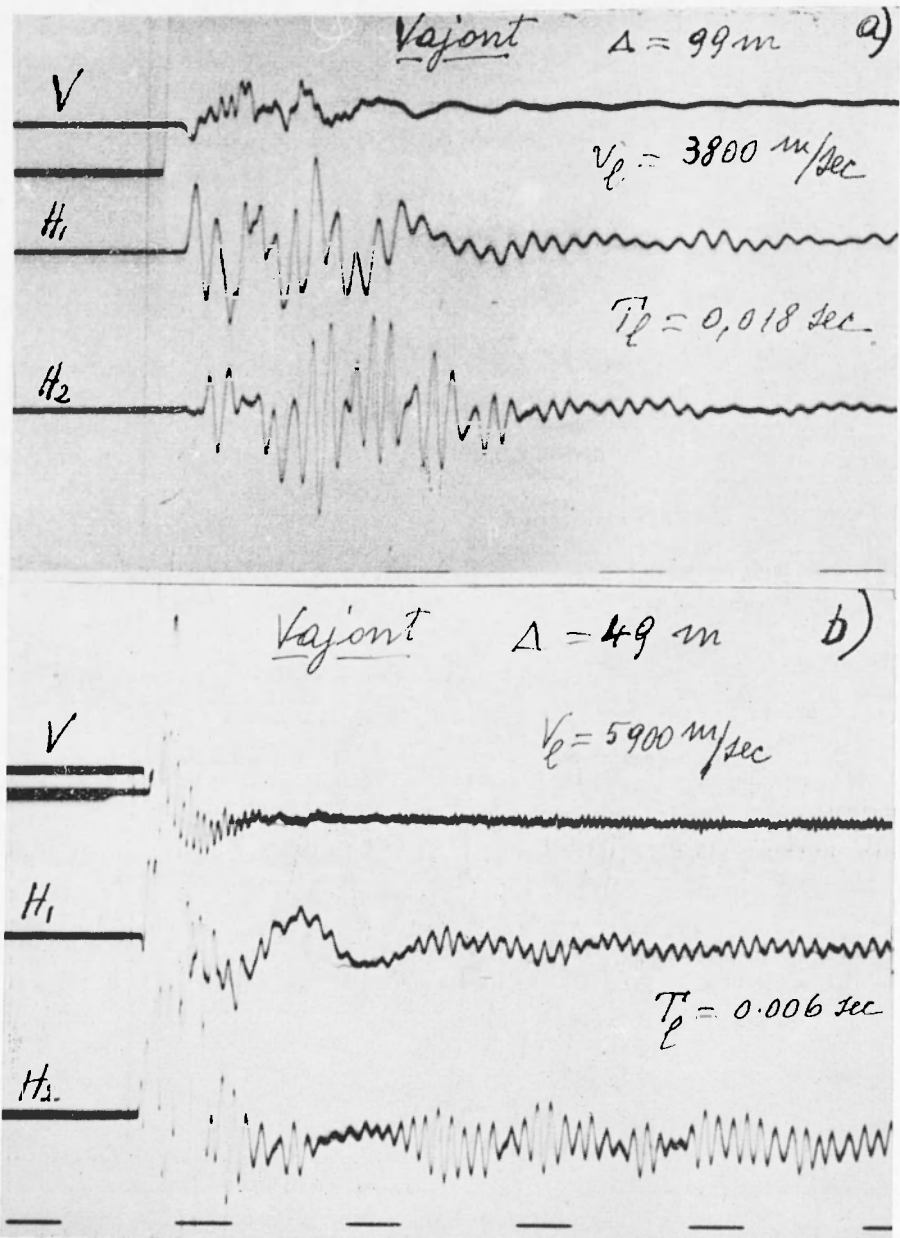


Fig. 8 - Zona rocciosa prima (a) e dopo (b) le iniezioni di cemento: il sensibile aumento della compattezza è rivelato sia dall'aumentata velocità delle onde elastiche, sia dall'aumentata frequenza delle stesse.

profondità, esso può inviare in superficie, come onde rifratte, le oscillazioni che lo contraddistinguono, con più elevata frequenza. Tale contrasto risulta nettissimo dalla registrazione ottenuta in superficie, come appare chiaramente dai vibrogrammi della fig. 7, ottenuti alla superficie di una coltre alluvionale, poggiante su roccia alla profondità di 10 metri circa. Registrazione del genere sono sicura testimonianza che la roccia si trova a non grande profondità. Se lo spessore del materiale sciolto è notevole, le onde rifratte dalla roccia sottostante vengono assorbite dal materiale incoerente (caso della fig. 6).

Il verificarsi della dispersione anomala nell'ambito delle alte frequenze, si presta ottimamente anche nelle operazioni di rigenerazione della roccia, quale controllo dell'efficacia delle iniezioni di cemento in roccia deteriorata, indipendentemente da ogni misura di velocità. Vedansi p. es. le conseguenze dell'aumentata compattezza di un tratto di roccia del Vajont, quale risulta dal confronto delle registrazioni fatte nello stesso mezzo prima e dopo l'iniezione del cemento (fig. 8).

Il tormento, derivante dall'azione dirompente dell'esplosivo nella fase di sbancamento della valle, seguito poi, a diga costruita, dal giuoco delle tensioni determinate nella zona di ancoraggio della diga, dalle flessioni in un senso o nell'altro — cui il manufatto viene sottoposto dalle variazioni dell'invaso e da quelle termiche — causa nella roccia un deterioramento del tessuto molecolare, che si traduce in un decadimento del modulo elastico. Ciò viene messo in chiara evidenza dalle registrazioni vibrografiche, sia quantitativamente, nella constatata variazione della velocità delle onde elastiche, sia qualitativamente, nel progressivo abbassarsi della frequenza d'onda, effetto del progressivo rilassamento del mezzo. Di ciò ho avuto modo di riferire a più riprese. Fenomeni strettamente collegati a quelli sopra accennati, si verificano nel caso di zone rocciose, soggette a pressioni crescenti, la cui azione può infine provocare fratture e frane. Al crescere della pressione, nella fase iniziale, può addirittura constatarsi un aumento nella velocità di propagazione delle onde elastiche. Ciò probabilmente è da attribuirsi alla riduzione o alla scomparsa degli spazi vuoti, preesistenti fra cristallo e cristallo, in seguito alla compressione. Quando però quest'ultima comincia ad intaccare la compattezza dell'edificio molecolare, facendo passare il mezzo dal campo elastico a quello plastico, allora la velocità di propagazione delle onde sismiche comincia a decrescere. La diminuzione si mantiene limitata. Ma se la pressione, cui la roccia è sottoposta, persiste a lungo o si accresce, si giunge al limite di frattura, in corrispondenza del quale la velocità subisce un improvviso collasso. Nella fase plastica, la lieve dimi-

nuzione di velocità è da attribuire alla formazione di sottili fenditure con dislocazione di cristalli, in corrente plastica. Nella fase di rottura, le fenditure si ingrandiscono in larghe fratture, con annientamento dell'edificio molecolare. Casi del genere, sono stati seguiti in zone dove era manifesta l'azione preponderante di strati sovrastanti, con sintomi di cedimento della roccia sottoposta a pressione; cedimento mutatosi al fine in moto franoso.

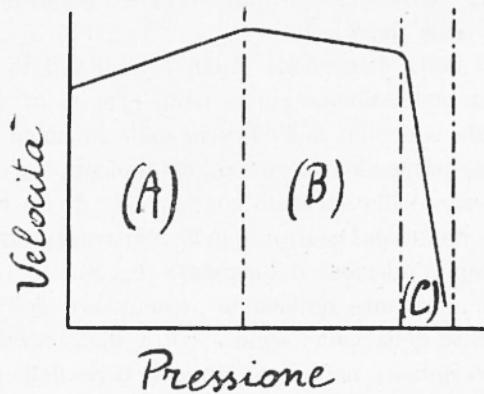


Fig. 9 - (A) fase elastica, (B) fase plastica, (C) fase di frattura (secondo Shimozuru).

L'andamento del fenomeno, così come è stato descritto ha trovato conferma in esperienze di laboratorio ⁽²¹⁾. La fig. 9 sintetizza l'andamento degli esperimenti, compiuti su campioni di marmo.

2. - Nelle numerose esperienze di registrazione di onde elastiche, compiute presso bacini idrici, ho avuto modo di osservare un altro interessante fenomeno, che qui intendo solo accennare. Più volte ho disposto le esperienze così da ottenere la registrazione, su un lato della valle, di esplosioni provocate sul lato opposto. Le esperienze sono state compiute sia a valle della diga che a monte, in corrispondenza del bacino pieno. Ebbene, invariabilmente, mentre a valle della diga le onde longitudinali venivano largamente registrate come onde difratte (fig. 10), in corrispondenza del fondo valle, a monte della diga le onde longitudinali difratte praticamente mancavano. Esse erano invece seguite da ampie oscillazioni, che avevano attraversato il bacino idrico con la velocità delle onde sonore. Si verifica quindi un pressoché totale trasferimento di energia elastica dal mezzo solido a quello liquido. A conferma di tale tra-

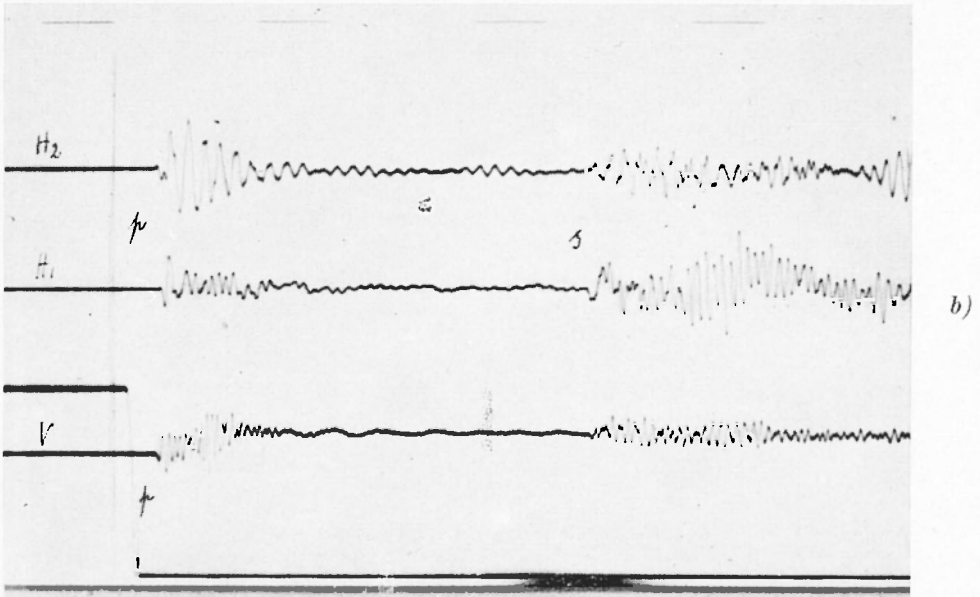
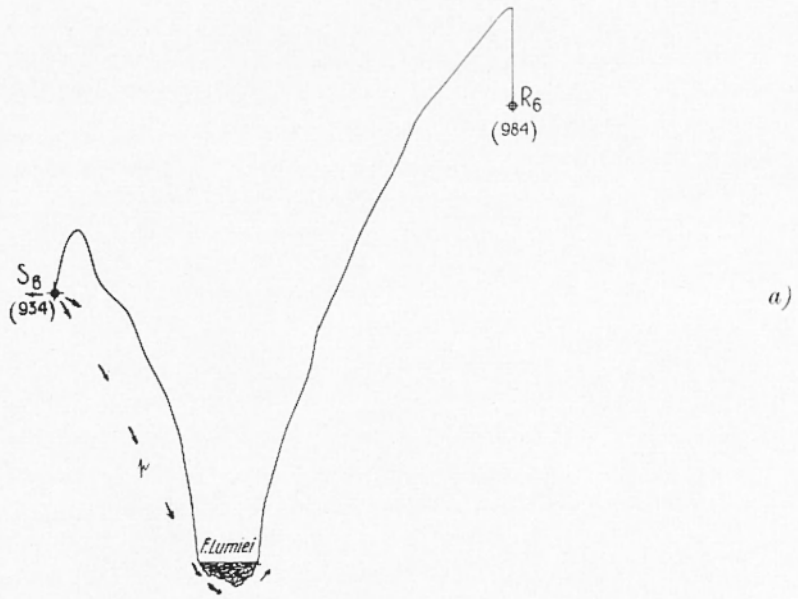


Fig. 10 - a) Scoppio provocato in S_6 , da un lato della valle del Lumiei, e registrato in P_6 sul lato opposto; b) le onde p (difratte-riflesse) risultano nette ed ampie (s , onde di pressione).

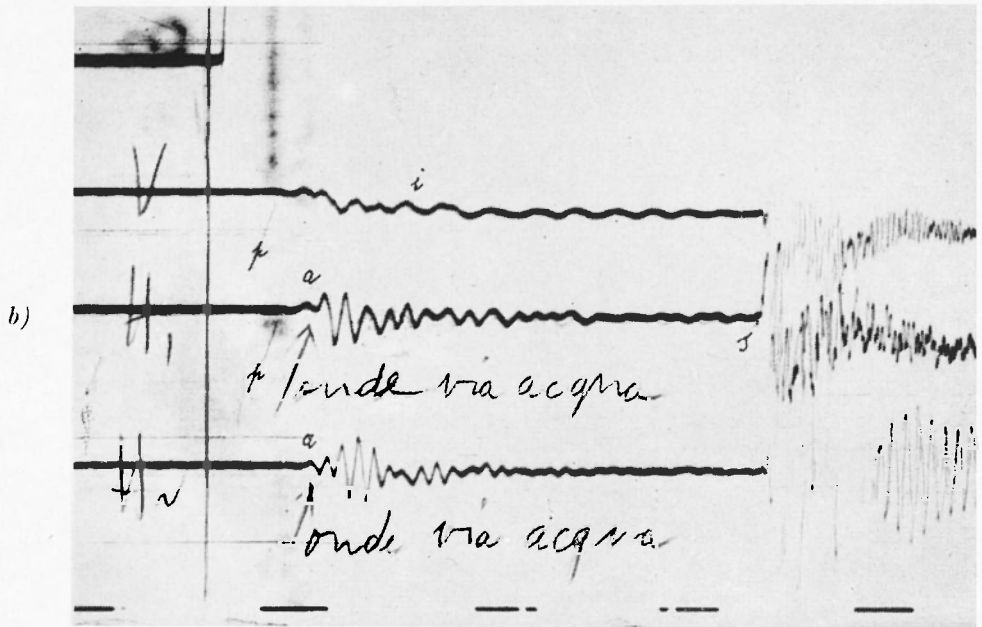
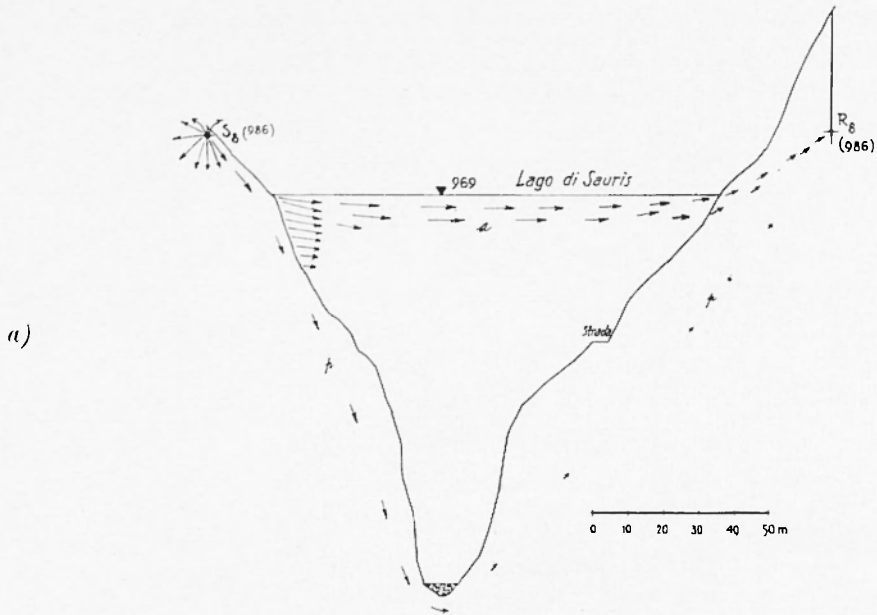
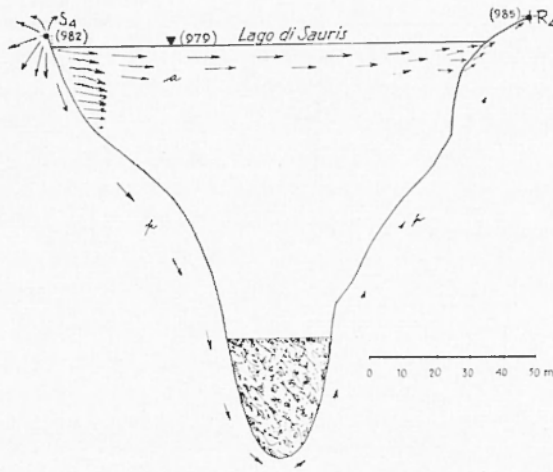
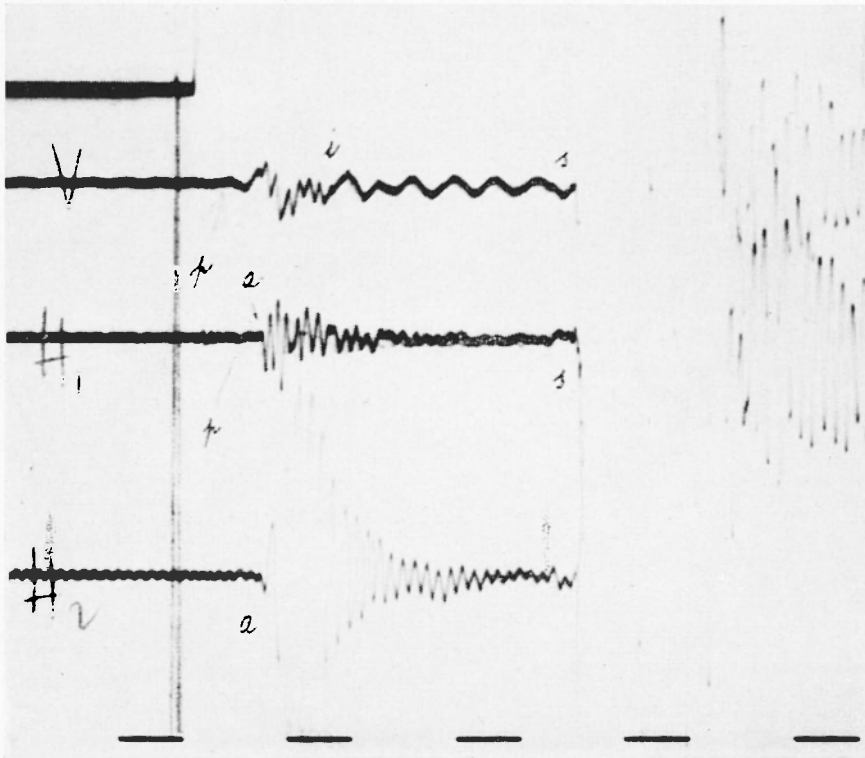


Fig. 11 - a) Registrazione a monte della diga del Lumiei: punto di scoppio in S_8 , punto di registrazione in R_8 , sull'altra sponda del lago;

b) le onde p sono di ampiezza trascurabile; vengono invece registrate chiaramente le onde a che hanno attraversato il lago, con la velocità di 1450 m/sec ca.



a)



b)

Fig. 12 - a) Scoppio in S_4 , registrazione in R_4 sull'altra sponda del lago;
 b) lieve ampiezza delle onde p , mentre risultano marcatissime le onde a che hanno attraversato il bacino idrico, subendo due rifrazioni successive.

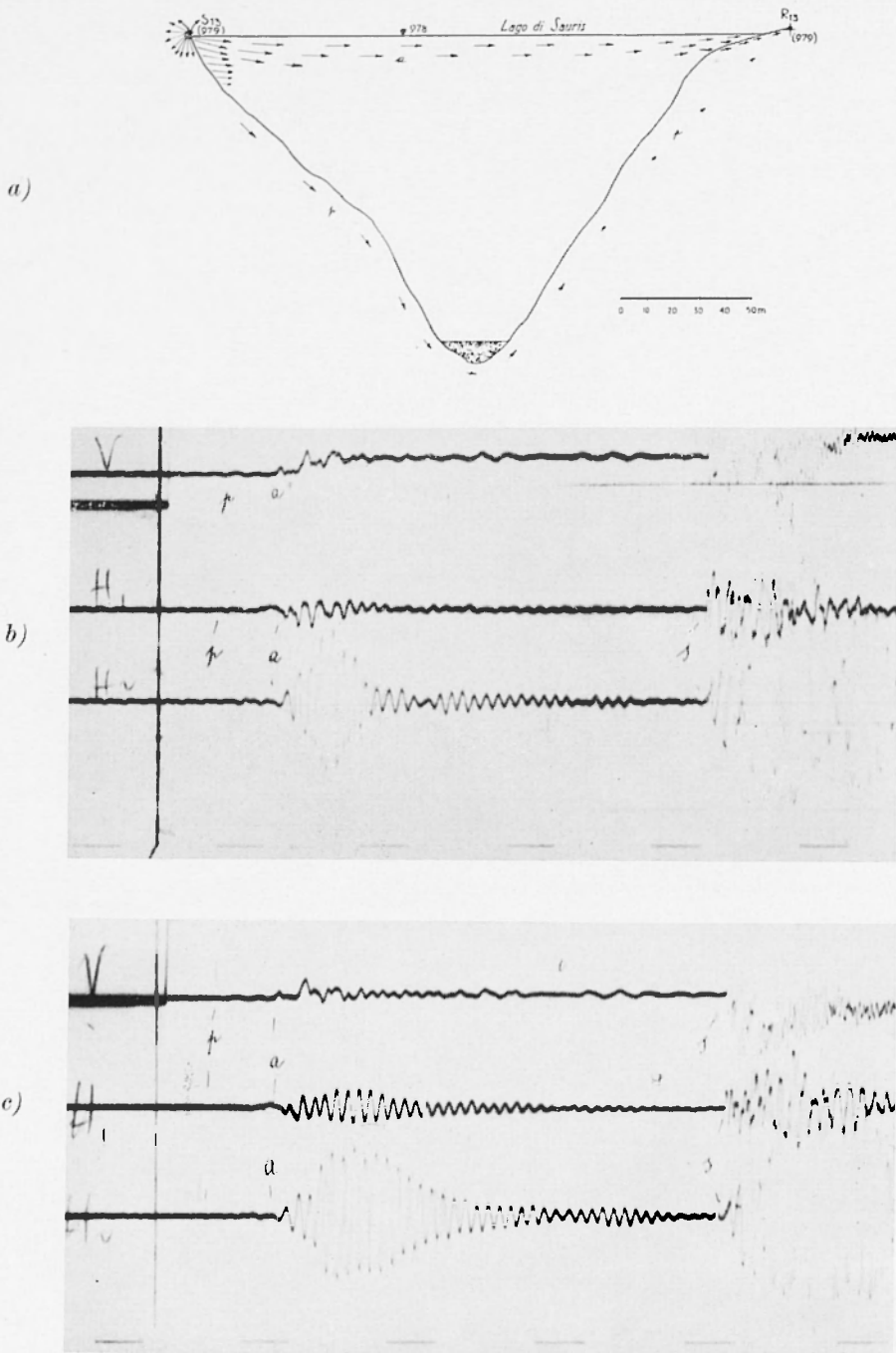


Fig. 13 - a) Scoppio in S_{13} , registrazione in R_{13} , sull'altra sponda del lago;
 b) onde difratte-riflesse di ampiezza trascurabile, ampie onde *a* attraversanti il lago con velocità dell'ordine di 1450 m/sec.
 c) registrazioni su tragitto analogo.

sferimento sta non solo il fatto della pressoché totale scomparsa di onde longitudinali diffratte, condotte dal mezzo solido, ma altresì l'ampiezza delle oscillazioni che hanno attraversato il lago, malgrado due rifrazioni intermedie, fra solido e liquido e viceversa (figg. 11-15). Tale trasferimento di energia sembra scostarsi sensibilmente dalle leggi della riflessione-rifrazione fra mezzi solido e liquido a contatto. Può darsi sia specifico delle elevate frequenze. È caratteristica poi la formazione di onde nate dall'accoppiamento acqua-aria, che precedono l'arrivo dell'onda di pressione e che appaiono particolarmente chiare sulla componente verticale.

L'energia trasmessa all'acqua, una volta ritrasmessa al mezzo solido, subisce in esso una rapida estinzione; a questo riguardo, sono significativi gli esempi forniti dalle registrazioni, di cui alle figure 12 e 11. La prima è stata ottenuta a pochi metri dalla riva, mentre la seconda si è avuta a 30 m circa dal margine del lago.

Il trasferimento dell'energia elastica al bacino idrico e la trasmissione da parte di quest'ultimo, vengono a creare per la diga condizioni di asimmetria dinamica, in caso di scosse locali, legate alle sollecitazioni che la diga stessa deve sopportare da parte del lago.

Mi riservo di riprendere l'argomento, anche nei suoi aspetti sismologici.

3. — Ho già detto estesamente altrove della grande utilità del vibrometro nella determinazione del modulo elastico del mezzo in esame. Ho sottolineato che tale utilità si rende particolarmente manifesta nella possibilità di prescindere, con tale strumento, dalla conoscenza del rapporto di Poisson, che — come è noto — non è affatto costante, pur variando entro limiti generalmente non molto discosti. La contemporanea registrazione delle onde trasversali, permette infatti di calcolare il modulo di Young E con la formula:

$$E = \rho \frac{v_2^2 \left[3 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 - 4 \right]}{\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 - 1},$$

dove ρ è la densità, v_1 la velocità delle onde longitudinali e v_2 quella delle onde trasversali, proprie del mezzo.

L'uso del vibrometro diviene di grande interesse anche nel controllo delle caratteristiche dinamiche (e quindi elastiche) di una diga. Le variazioni di tali caratteristiche possono dedursi non solo mediante la determinazione diretta del modulo di Young del calcestruzzo, ma altresì regi-

strando, di quando in quando, le oscillazioni libere trasversali dei concio della diga. I periodi di queste oscillazioni sono legati al modulo E e alla densità ρ del calcestruzzo, attraverso la formula (16):

$$T = \frac{4\pi\sqrt{3}}{\vartheta^2} \cdot \frac{l^2}{b} \cdot \frac{1}{\sqrt{E/\rho}}$$

dove l è l'altezza del concio prescelto, b il suo spessore medio, $\sqrt{E/\rho}$ la velocità delle onde longitudinali nel calcestruzzo (come corpo finito, in forma di sbarra), mentre ϑ (legato, fra l'altro, ad l e alla pulsazione delle onde stazionarie), consegue come una delle radici dell'equazione

$$\cosh \vartheta + \cos \vartheta + 1 = 0.$$

Eventuali variazioni nel tempo subite dalla grandezza T testimoniano di variazioni nelle caratteristiche fisiche del calcestruzzo; queste possono dipendere sia da variazioni nella rigidità del calcestruzzo, sia dall'intervento di lesioni.

Tabella - PERIODO OSCILLAZIONI STAZIONARIE TRASVERSALI.

	Uninodali		Binodali		Trinodali	
	calc.	oss.	calc.	oss.	calc.	oss.
Diga di Pieve di Cadore . . . (concio XIV)	0,23	0,21	—	—	—	—
Diga del Lumiei (concio centrale)	—	—	0,25	0,23	0,10	0,10
Diga di Val Gallina (concio centrale)	—	—	0,13	0,15	—	—
Diga di Barcis	—	—	0,10	0,11	—	—

La tabellina riporta i risultati di osservazioni e di calcoli, discussi nelle note citate, relativi a dighe della Società Adriatica di Elettricità.

Le figure 16-20 danno esempi di registrazioni ottenuti su varie dighe.

Di non minore interesse risulta l'uso di stazioni sismiche presso le grandi dighe. Anche su questo argomento ebbi a intrattenermi a lungo, a più riprese (3, 7, 10, 12, 17, 20, 22).

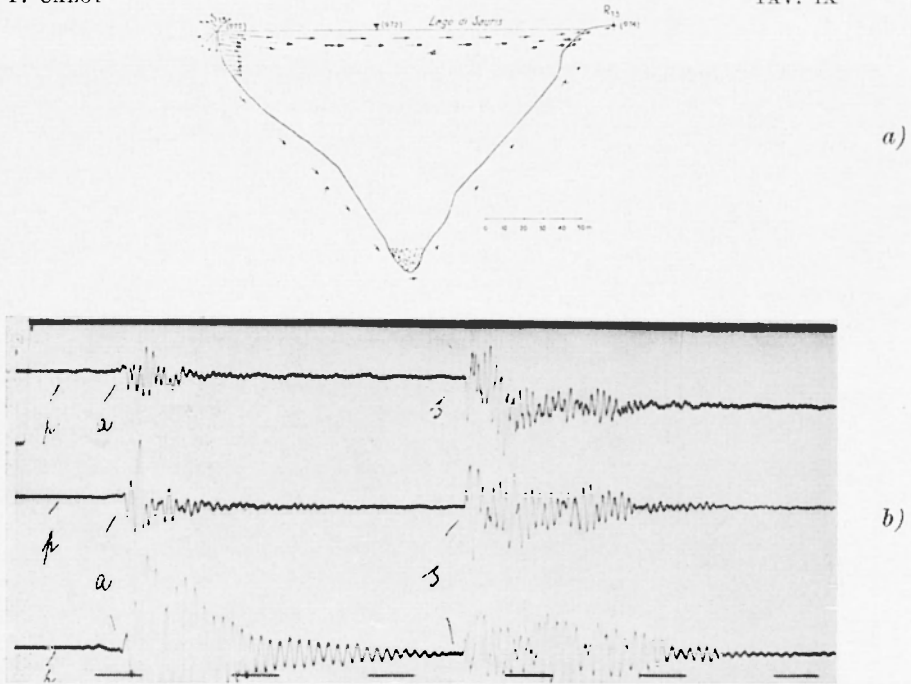


Fig. 14 - a) Scoppio in S_{13} , registrazione in R_{13} , sull'altra sponda del lago;
 b) onde p trascurabili, ampie le a che hanno attraversato l'elemento liquido.

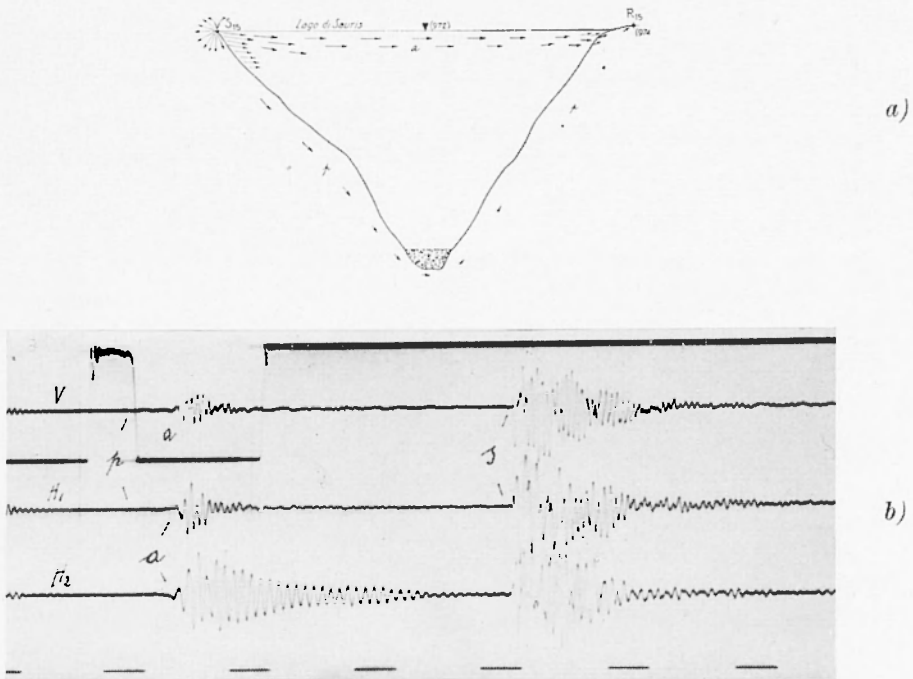


Fig. 15 - a) Scoppio in R_{15} , registrazione in R_{15} , sull'opposta sponda del lago;
 b) onde p appena accennate, ampie onde a a cui è associata un'alta percentuale dell'energia sviluppata in S_{15} .

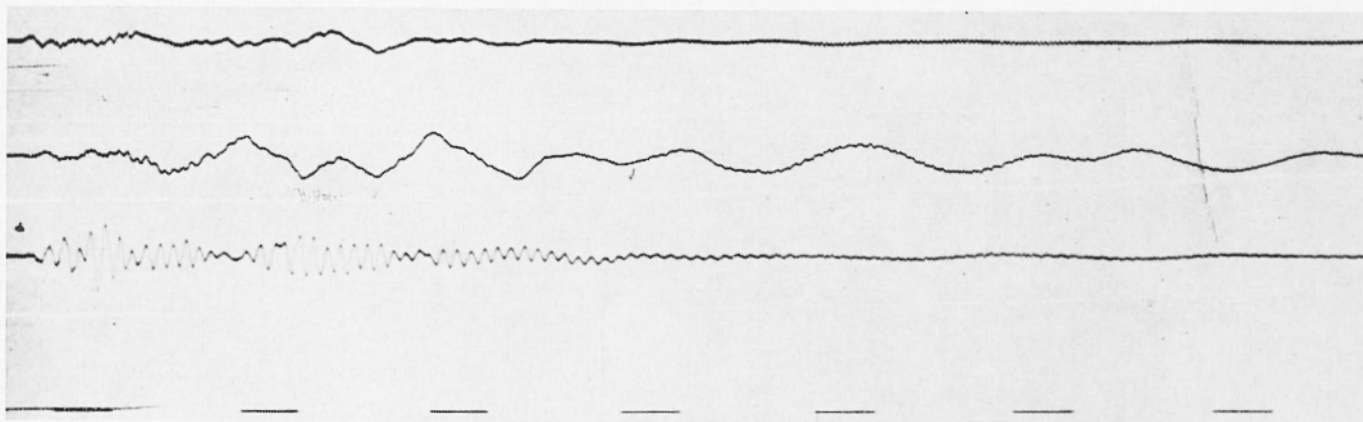


Fig. 16 - Vibrazioni libere binodali e uninodali (vibrogramma centrale) della diga di Pieve di Cadore (concio XIV).

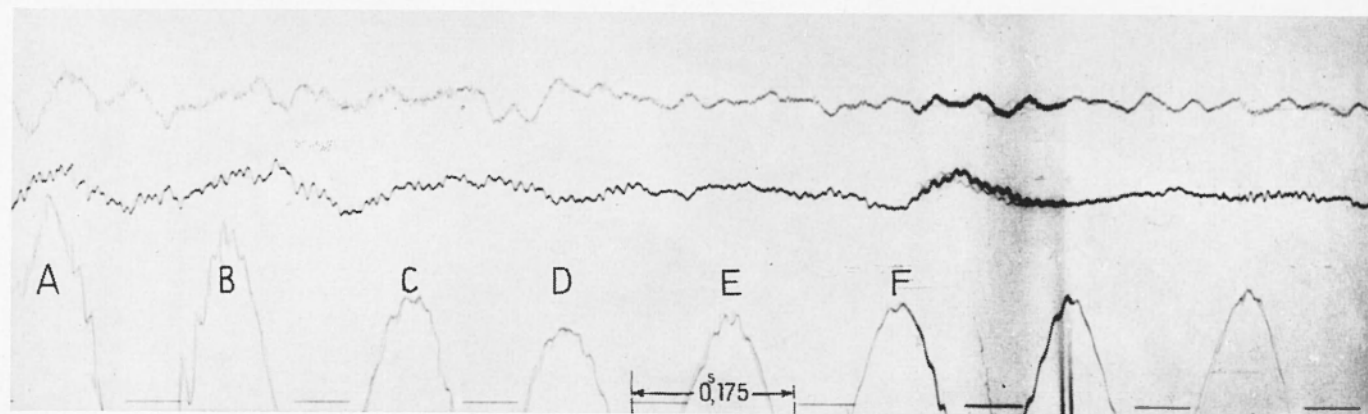


Fig. 17 - Vibrazioni libere binodali (AB, -BC, ...) trasversali della diga del Lumiei (1954), sulla comp. valle-monte H_2 .

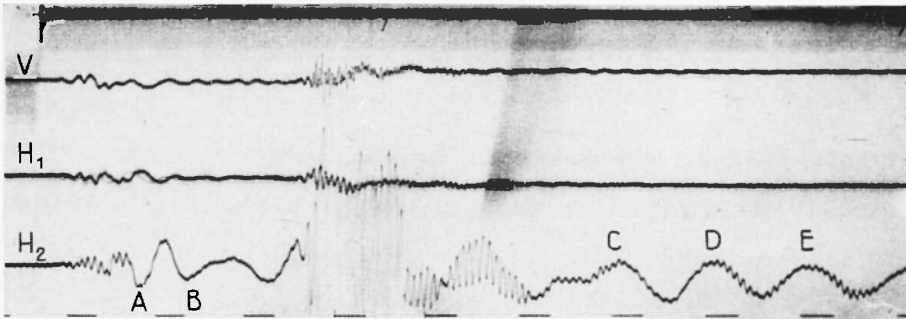


Fig. 18 - Vibrazioni libere trasversali trinodali (AB) e binodali (CD) della diga di Val Gallina (1953).

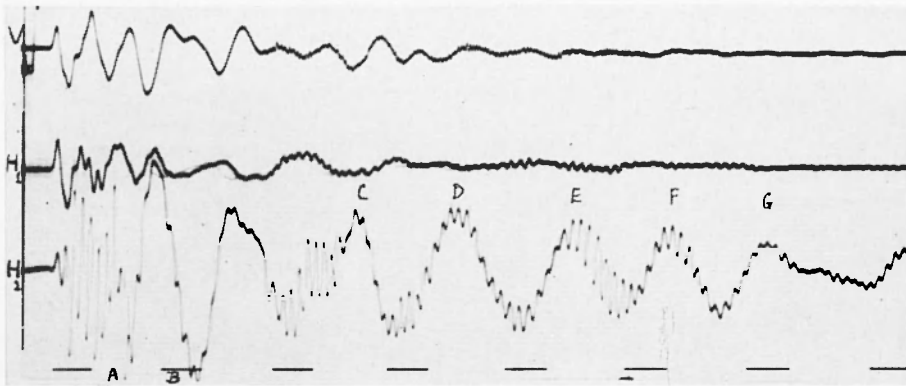


Fig. 19 - Vibrazioni libere trasversali (AB) e binodali (CD) della diga di Val Gallina (1955).

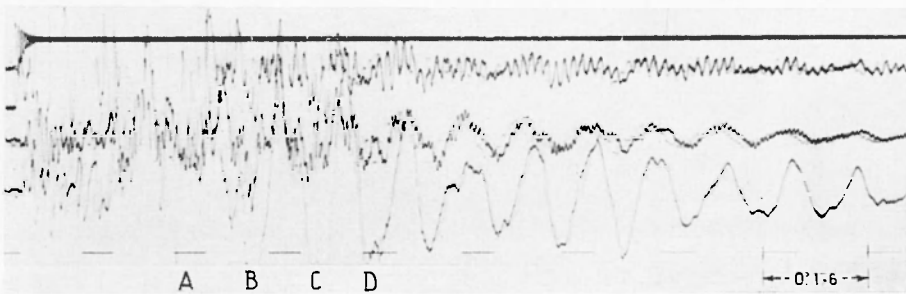


Fig. 20 - Vibrazioni libere trasversali binodali (AB, BC) ... della diga di Barcis (1959).

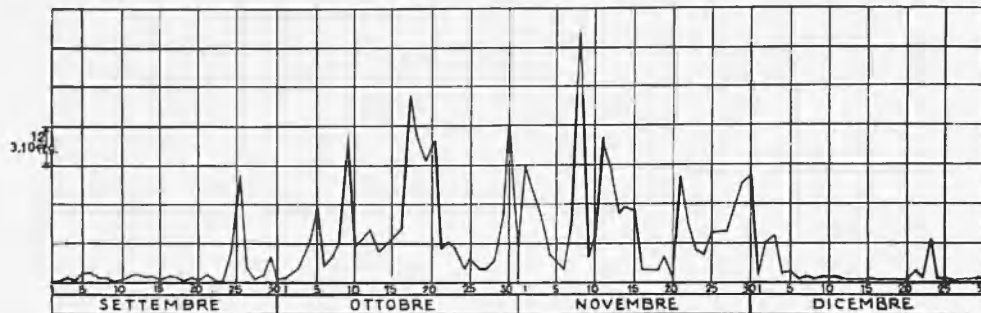


Fig. 21 — Energia (in $3 \cdot 10^{12}$ erg) associata alle micrososse provocate dalla flessione autunnale verso valle della diga di Pieve di Cadore, nell'autunno 1951.

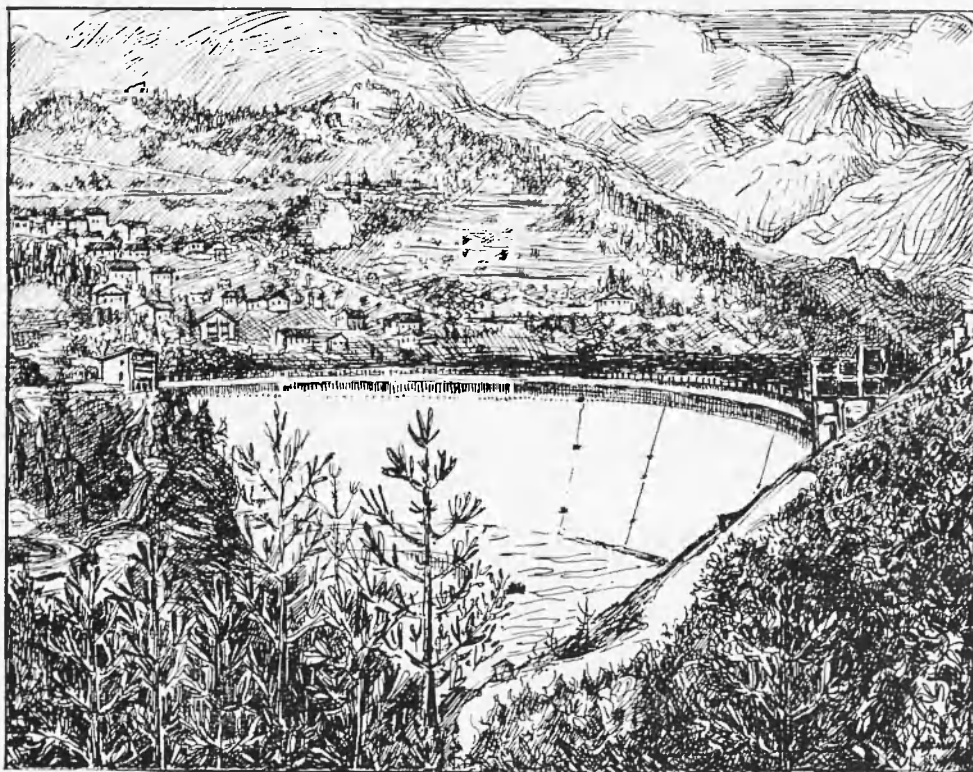


Fig. 21 bis — Diga di Pieve di Cadore (disegno di Luciana Luciani) nella quale funzionano diverse coppie di fotoclinografi; nello scantinato della cabina-comandi (a sinistra della figura) funziona una stazione sismica, costituita da una terna di apparecchi elettromagnetici.

Particolarmente prezioso riesce l'uso del sismografo nel periodo che va dallo sbancamento ai primi anni dopo la costruzione della diga. L'equilibrio delle tensioni elastiche risulta, in questo periodo, — sia pure superficialmente — rotto: di qui tutta una serie di microterremoti, che accompagnano il lavoro dinamico della roccia, tesa verso nuove posizioni di equilibrio. È in questa fase di crisi che le zone rocciose più esposte al giuoco delle tensioni subiscono sensibili flessioni nelle caratteristiche elastiche, rivelate dal decadere del modulo. Dalle registrazioni delle stazioni sismiche si può risalire all'ordine di grandezza dell'energia associata alle singole microscosse.

Con sufficiente approssimazione, l'energia E associata ad una componente di una scossetta può essere così espressa (3. 7)

$$E = 4 \pi^3 \rho v t \left(\frac{a}{T} \right)^2 \Delta^2 \quad , \quad \text{c. g. s.}$$

dove ρ è la densità della roccia, v la velocità delle onde longitudinali (o trasversali) prese in esame, t la durata in secondi del treno d'onde di periodo T ed ampiezza media a , registrato alla distanza Δ .

L'energia associata alle altre due componenti può ritenersi all'incirca uguale.

La distanza origine del movimento può essere facilmente dedotta dalla registrazione delle onde longitudinali (p) e trasversali (s). Determinate con esperienze preliminari, le velocità medie di propagazione delle onde longitudinali v_p e trasversali v_s , proprie della roccia, nella zona della diga, si ha — se $s-p$ indica la differenza nei tempi di arrivo fra le onde trasversali e longitudinali —

$$\Delta = \frac{v_p \cdot v_s}{v_p - v_s} (s - p) .$$

Le microagitazioni, legate al tormento delle flessioni della diga nella roccia d'imposta, hanno un particolare aspetto (10) e si registrano numerose nelle epoche in cui la diga compie i suoi movimenti stagionali monte-valle e viceversa. La fig. 21 dà l'ammontare dell'energia associata alle microscosse, registrate presso la diga di Pieve di Cadore nel periodo Settembre-Dicembre 1951. L'energia liberata tende a crescere verso la metà di Ottobre e raggiunge il suo massimo a mezzo Novembre; quindi gradualmente decresce e si annulla nella prima decade di Dicembre. In questo periodo, comè noto, la diga esegue la graduale flessione verso valle — in concomitanza col progressivo diminuire della temperatura dell'aria —, che presenta la sua acuta accentuazione nei mesi di Ottobre

e Novembre. Ciò è provato, del resto, dalle contemporanee registrazioni clinografiche, effettuate nei conei, e nei pressi, della diga.

La crisi geodinamica nella zona di una diga dipende da svariati fattori: natura della roccia d'imposta, omogeneità od eterogeneità di questa, variazione continua o meno delle sue caratteristiche elastiche, adattabilità del manufatto all'ambiente fisico e bontà della sua realizzazione, ecc. Nella zona interessata dalla diga di Pieve di Cadore, l'attività microsismica è durata, nel suo complesso, circa sei anni: iniziata con le operazioni di sbancamento (1948), ha presentato i suoi massimi nel biennio 1950-1952, per esaurirsi nel 1955.

Le figg. 22 e 23 riportano esempi di microscosse, registrate presso la diga di Pieve nel periodo sopra accennato.

La reazione elastica della roccia, sorpresa nelle sue condizioni di equilibrio naturale, varia da situazione a situazione. Ho accennato, nel precedente lavoro (22), al caso del Vajont e alle vicissitudini che riportarono le fiancate della valle verso un nuovo equilibrio, dopo la complessa inquietudine, insorta con i lavori di sbancamento. Anche dal punto di vista sismico, la stretta del Vajont presenta aspetti che la distinguono da quella di Pieve di Cadore. La stazione sismica in funzione al Vajont, unitamente a quelle di Pieve di Cadore e di Tolmezzo, dà un contributo preziosissimo alla conoscenza sismo-tettonica della zona, specie per quanto si riferisce al meccanismo dei piccoli terremoti che la interessano (v. figg. 24 e 25).

4. — A più riprese ho avuto modo di sottolineare, con testimonianze, l'eccezionale interesse del *clinografo*, sia nella geofisica generale che in quella applicata. Naturalmente, eviterò di ripetermi.

Il clinografo in funzione in numerose località del Cadore e della Carnia è retto dall'equazione

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \left(\frac{2}{3} l m g i + \frac{\pi r^4 \mu}{\lambda} \right) \varphi = 0 ,$$

dove φ è l'angolo di cui ruota il pendolo bifilare per una variazione φ della verticale apparente, I è il momento d'inerzia della massa m rispetto all'asse di rotazione, l la lunghezza della sbarretta portante la massa, g l'accelerazione di gravità, i l'angolo d'inclinazione dell'asse del pendolo sulla verticale, r il raggio dei fili di sospensione, di lunghezza media λ e di rigidità μ . Il coefficiente di φ , diviso per I , dà il quadrato della pulsazione, donde l'espressione del periodo.

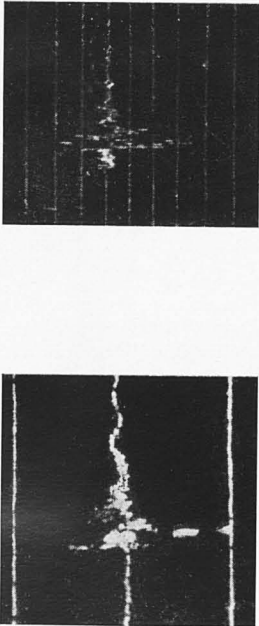


Fig. 22 - Esempio di microscossa presso la diga di Pieve di Cadore (3-VII-1950, $\Delta = 500$ m circa, $E = 5 \cdot 10^2$ erg. ca; $1s = \text{mm } 11,2$), comp. E-W.

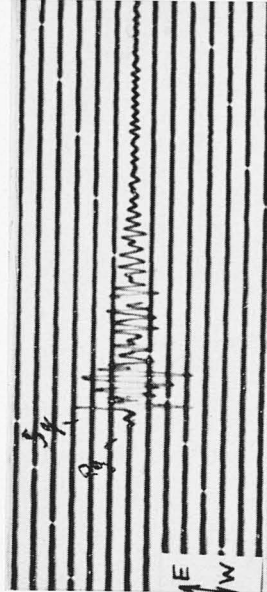


Fig. 24 - Comp. E-W di una scossa verificatasi nella valle del Vajont (23-IV-1962) registrata a Pieve di Cadore alla distanza di 17 km ca.



Fig. 24 bis - Comp. N-S della scossa di cui alla figura precedente.



Fig. 25 - Comp. E-W di una scossa avvenuta nei pressi di Tolmezzo (13-VIII-1962), e registrata a Pieve di Cadore, alla distanza di 55 km ca.

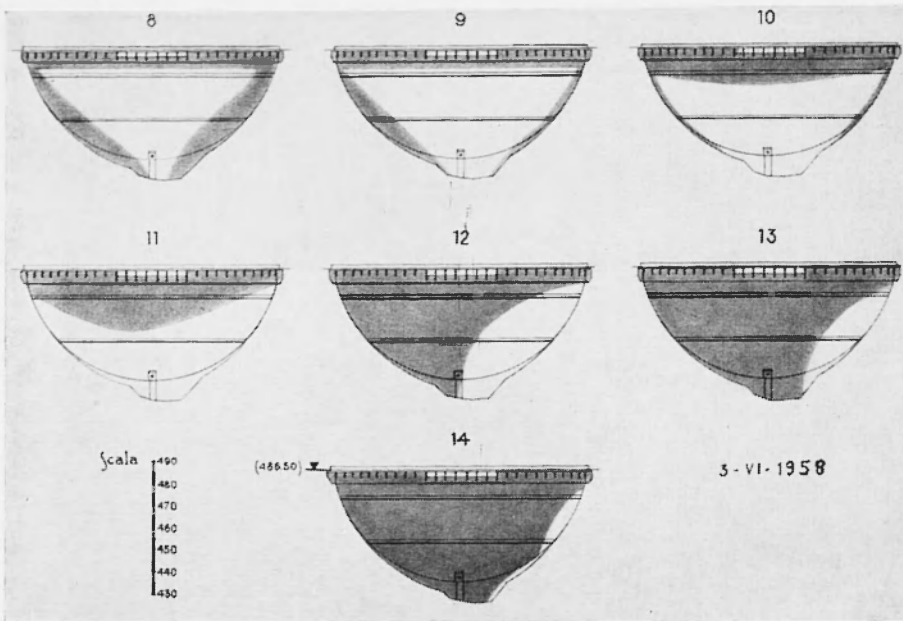


Fig. 29 - Diga dell'Ambiesta. Andamento dell'insolazione nei primi di Giugno (secondo Giovanni De Vido): essa interessa principalmente il lato sinistro della diga (vista da valle).

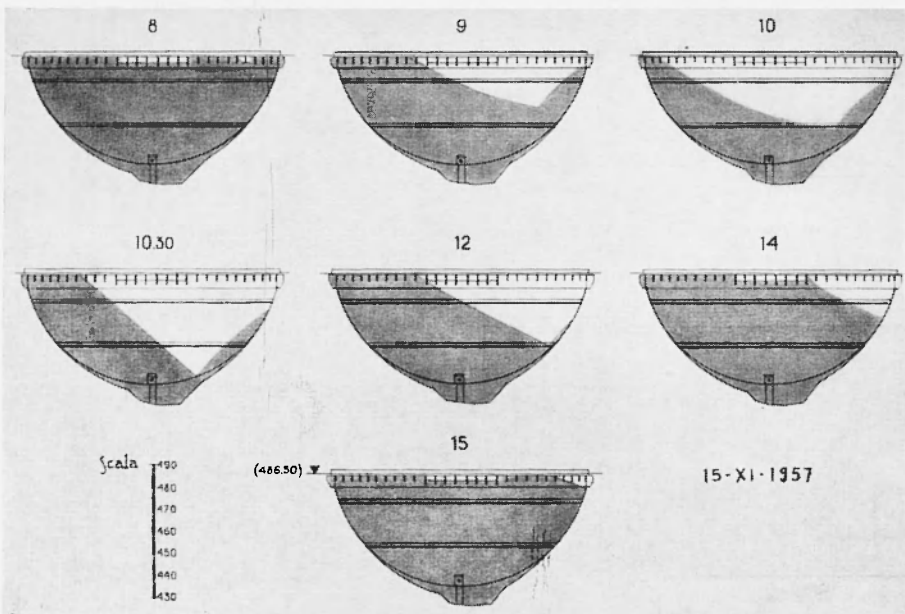


Fig. 30 - Diga dell'Ambiesta. Andamento dell'insolazione a metà Novembre (secondo Giovanni De Vido): conferma dell'asimmetria dell'insolazione, prevalente sul lato sinistro.

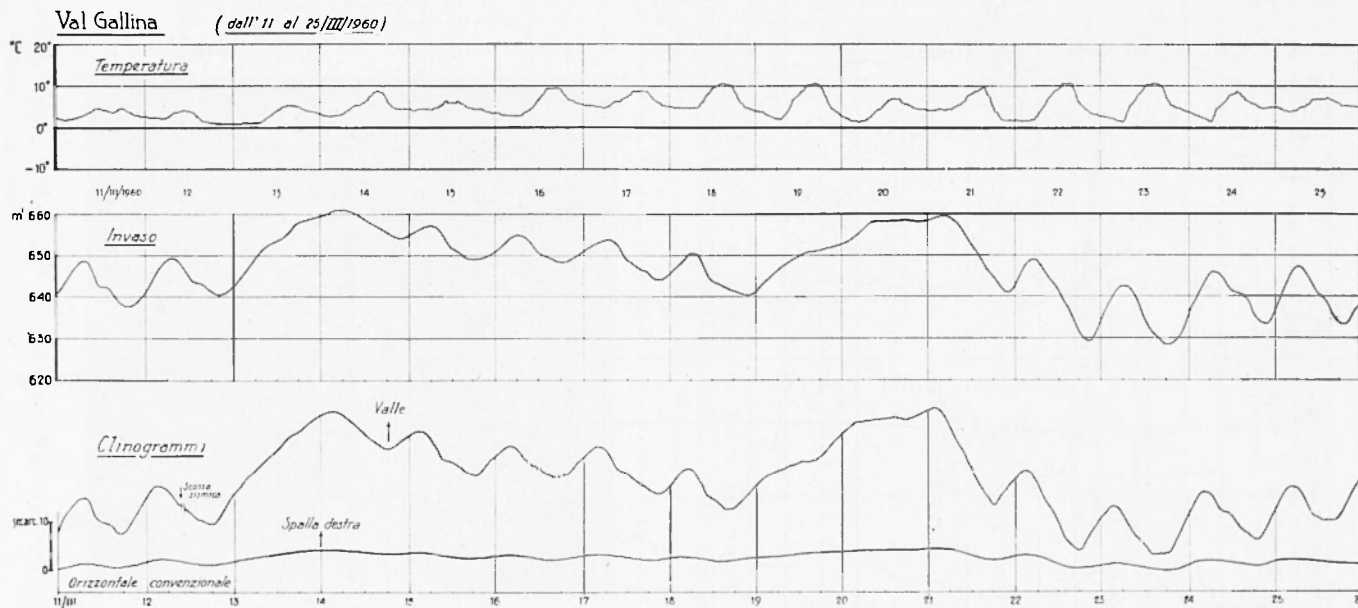
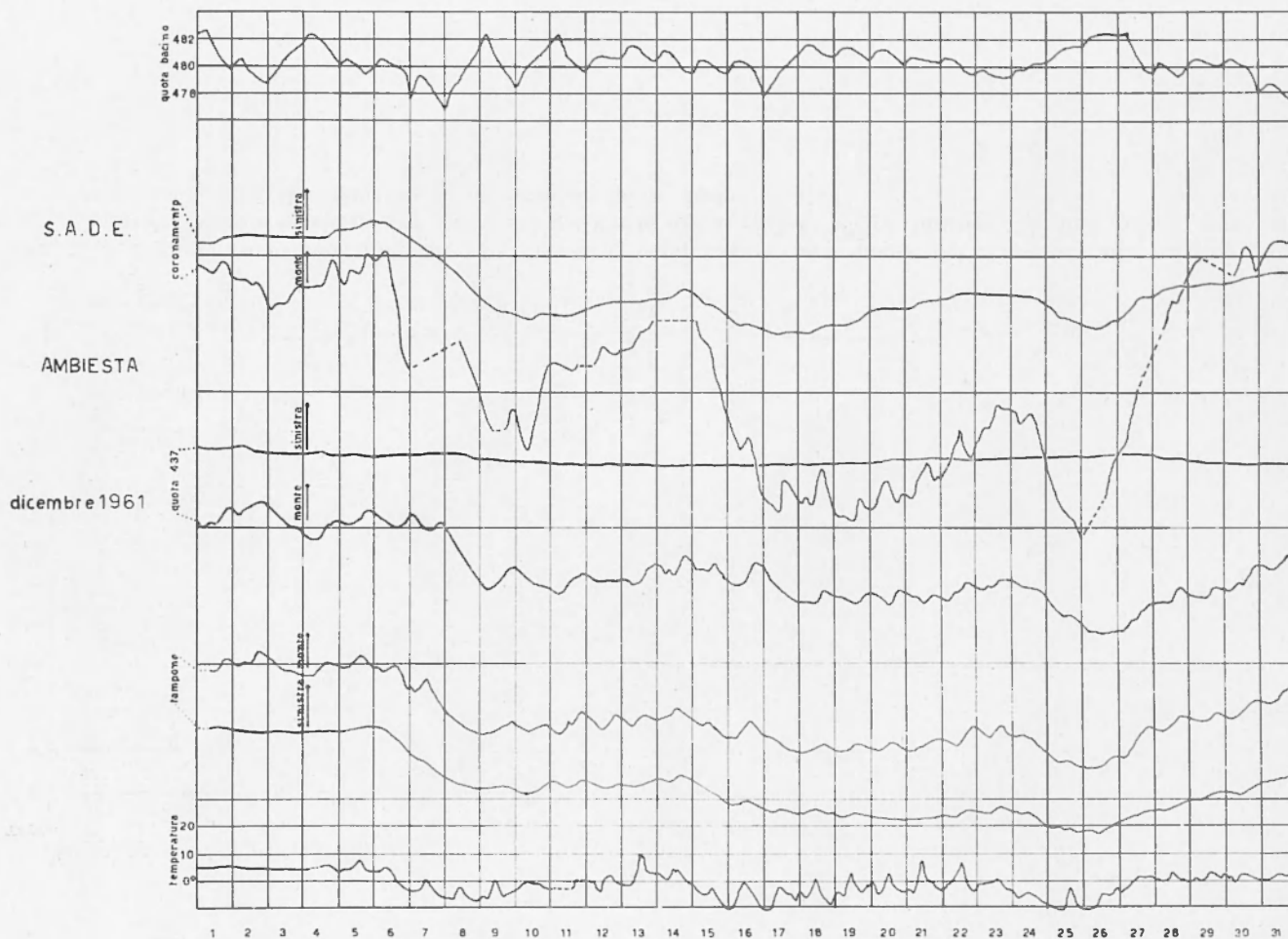


Fig. 26 - Diga di Val Gallina (affluente del Piave): la componente valle-monte del clinografo alla base del concio centrale, registra fedelmente le variazioni del livello dell'acqua nel bacino (invaso): ad una spinta verso valle, corrisponde una lievissima flessione verso la spalla destra.



centimetri 0,5 = mm

Fig 27 - Diga dell'Ambiesta (affluente del Tagliamento): in Dicembre (come in altre dighe) l'insolazione riesce inefficace (mancanza dell'onda diurna). Oltre alle variazioni dell'invaso (evidente dal coronamento al tampone, specie sulla componente valle-monte), si rende manifesta sulla diga anche la diminuzione della temperatura esterna, che si traduce in una contrazione della diga stessa, con flessione a valle. Resta provato il comportamento del tampone, che segue anche in direzione spalla-spalla le variazioni di temperatura (v. testo).

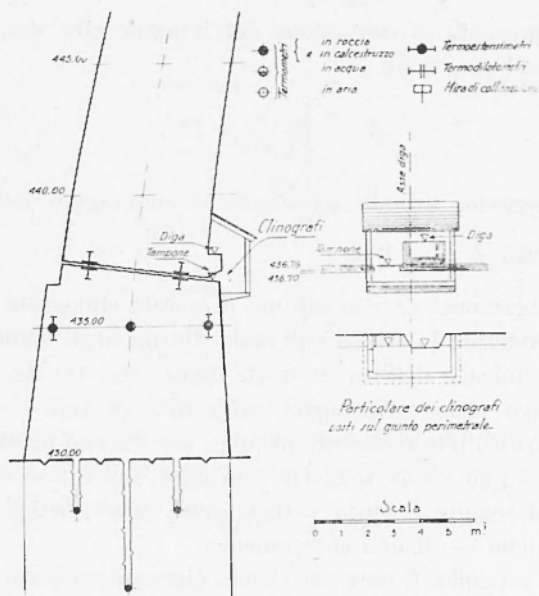


Fig. 28 - Diga dell'Ambiesta: sezione di parte del conccio centrale, con postazione del clinografo-diga (q. 437,5) e del clinografo-tampone.

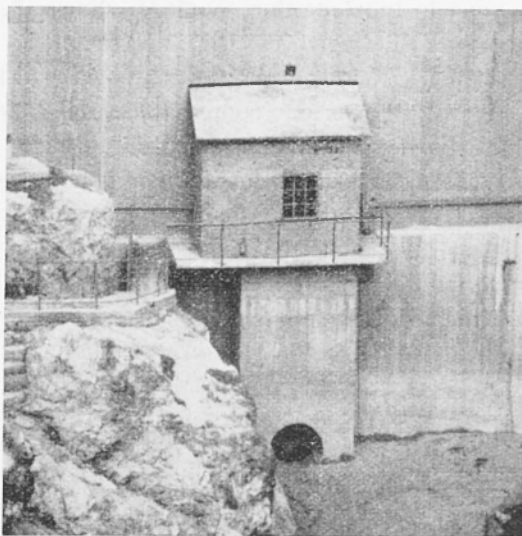


Fig. 28 bis - Diga dell'Ambiesta: casetta-custodia dei clinografi diga (q. 437,5) e tampone.

Se δ rappresenta la deviazione dell'immagine alla distanza di registrazione di 100 cm, si ha

$$\delta = 75 \frac{g}{\pi^2 l} \psi T^2 ,$$

dove T è il periodo, avendo effettuato il montaggio del pendolo in modo che risulti $l = \frac{4}{9} l^2 m$.

Ho già largamente riferito sull'uso di questo clinografo per la ricerca dei blocchi geodetici, lo studio dell'onda diurna negli edifici, dell'azione di flessione termica o dell'invaso nelle dighe, ecc. (v. fig. 26).

Qui ritengo utile soffermarmi sull'utilità di tale strumento, non solo come insostituibile rivelatore di ogni, per quanto piccola, variazione di flessione cui può essere soggetta una diga, ma anche quale prezioso coadiutore nel seguire il lento variare delle caratteristiche fisiche — e quindi dinamiche — di uno sbarramento.

Valga un esempio. È noto che l'onda diurna è presente con ampiezza crescente, dal tampone verso il coronamento della diga (dove scompare solo nei mesi di pieno inverno (fig. 27), quando l'insolazione è insufficiente per l'azione meccanica flettente). Il tampone, generalmente, ha un comportamento a sé⁽²¹⁾. Ciò riesce oltremodo netto nella diga dell'Ambiesta. In questa diga, sono in funzione due coppie di clinografi, alla distanza minore di 1 metro una sulla verticale dell'altra: senonché, mentre una è solidale con la base del concio centrale, l'altra poggia sul tampone (pulsino) (figg. 28 e 28 bis). La prima coppia (base del concio) pressoché non registra l'onda diurna. L'altra, un metro più in basso, registra chiaramente l'effetto dell'insolazione su entrambe le componenti. La spiegazione è la seguente. L'onda diurna sulla componente valle-monte è dovuta all'allungamento per dilatazione del concio durante l'insolazione e alla sua flessione verso monte, il fenomeno contrario verificandosi ad insolazione ultimata. L'onda diurna sulla componente spalla-spalla è da attribuire all'asimmetria dell'insolazione stessa, che indugia molto a lungo sul lato sinistro della diga, anche quando il lato destro è già in ombra (v. figg. 29 e 30); asimmetria che resta tale anche nell'azione dinamica. Furono eseguite numerose risultanti del moto del tampone, soggetto agli effetti dell'insolazione. Gli esempi delle figg. 31-33 si riferiscono al 1957 e al 1958. Si noterà che le ellissi che ne conseguono hanno l'asse maggiore diretto nel primo (e terzo) quadrante e che la sua inclinazione rispetto alla linea monte-valle varia fra 52° e 35° circa. Col passare del tempo tale inclinazione è andata aumentando, mentre l'ellissi si faceva

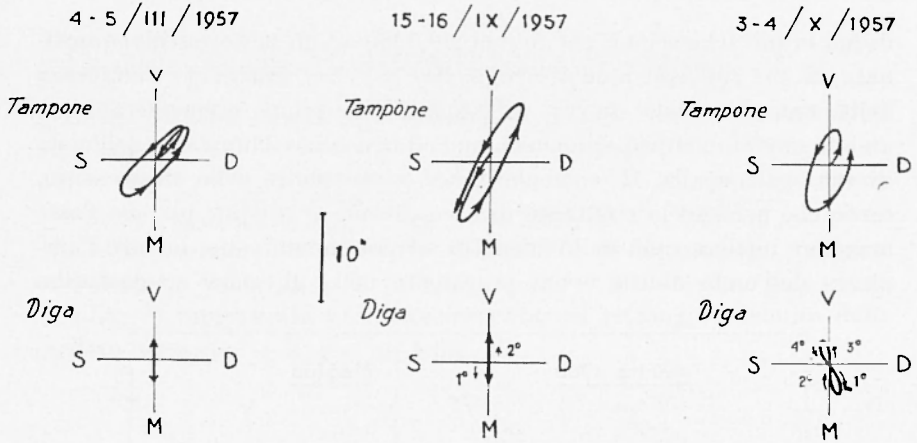


Fig. 31 - Diga dell'Ambiesta: composizione del movimento diurno (insolazione) a quota postazione diga (q. 437,5) e tamponi (q. 436,7).

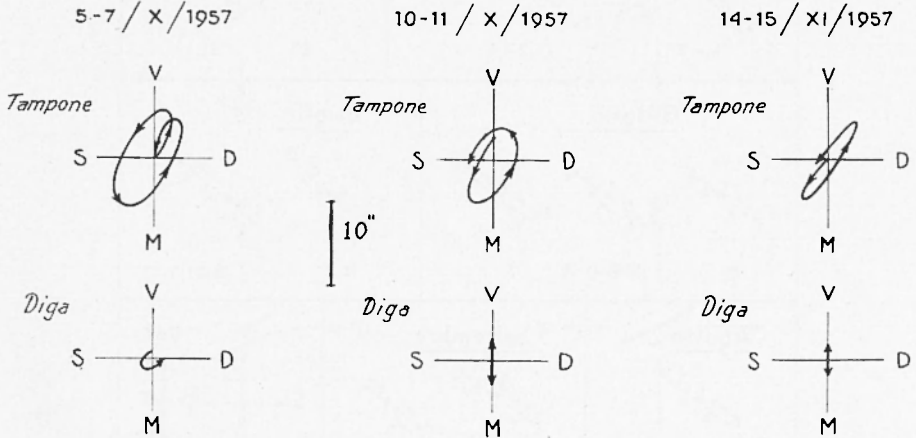


Fig. 32 - Diga dell'Ambiesta: altri esempi di composizione dei movimenti diurni, in due postazioni a meno di un metro sulla stessa verticale.

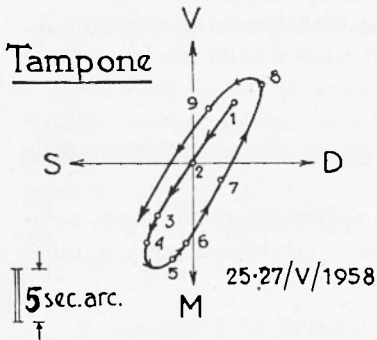


Fig. 33 - Diga dell'Ambiesta: moto associato all'onda diurna sul tamponi (1958).

di più in più schiacciata, per ridursi nel 1960 ad un moto rettilineo inclinato di 45° sull'asse predetto (figg. 34, 35). Nel frattempo l'ampiezza della sinusoidale onda diurna valle-monte, dapprima preponderante, è andata gradatamente diminuendo, fino ad uguagliare l'ampiezza dell'onda diurna spalla-spalla. Il fenomeno tende a proseguire nello stesso senso, tanto che nel 1961 la risultante torna a diventare ellittica, ma con l'asse maggiore inclinato più di 45° rispetto all'asse monte-valle; mentre l'ampiezza dell'onda diurna è ora prevalente nella direzione spalla-spalla.

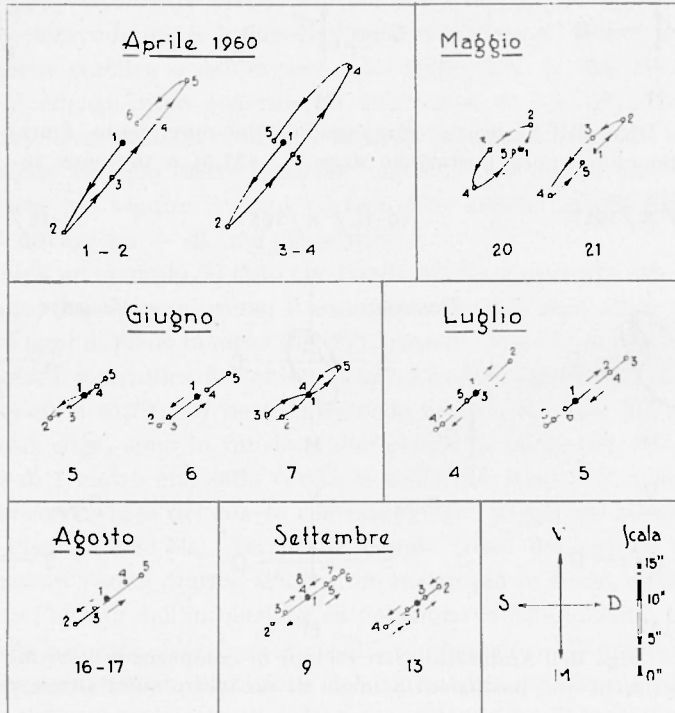


Fig. 34 - Diga dell'Ambiesta: il moto provocato dall'onda diurna sul tampono evolve nel tempo, tendendo ad accentuarsi nella sua componente spalla-spalla.

L'interpretazione dei fatti osservati è legata alla composizione delle vibrazioni armoniche rettangolari.

Supponiamo che una particella P sia sollecitata a muoversi, nello stesso tempo, lungo due direzioni rettangolari x (sinistra-destra), y (monte-valle) secondo le leggi di movimento

$$x = a \sin (\omega t + \alpha_1) \quad , \quad y = b \sin (\omega t + \alpha_2) \quad .$$

Il punto P descrive allora nel piano x, y e nel tempo $T = \frac{2\pi}{\omega}$, periodo comune ai due spostamenti x, y , una traiettoria chiusa di equazione

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \varphi - \sin^2 \varphi = 0, \quad (*)$$

essendo $\varphi = \alpha_1 - \alpha_2$.

La (*) rappresenta un'ellisse inscritta nel rettangolo definito dalle quattro rette $x = \pm a, y = \pm b$ (fig. 36).

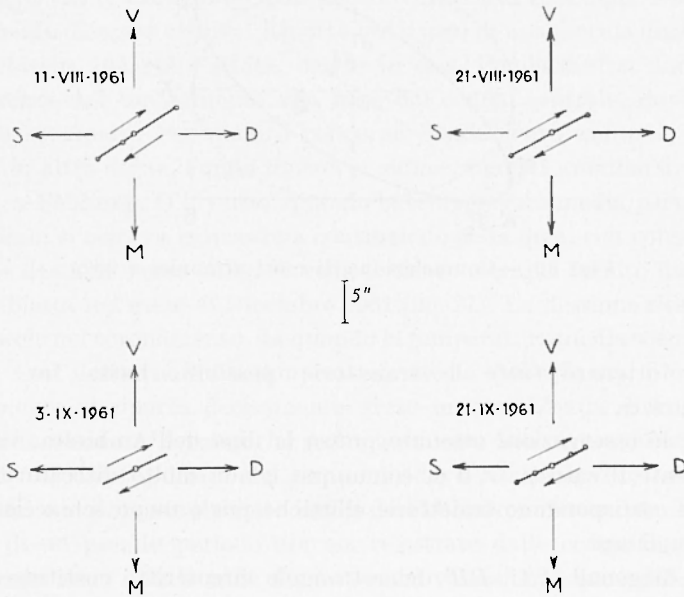


Fig. 35 - Diga dell'Ambiesta: altre testimonianze sul progressivo prevalere della componente spalla destra-spalla sinistra sulla componente valle-monte, nel movimento provocato sul tampone dall'onda diurna.

Nel caso in cui le ampiezze a e b (che noi supporremo positive) restano *costanti*, l'orientazione e la grandezza dell'ellisse traiettoria dipendono esclusivamente dalla differenza di fase φ delle vibrazioni componenti.

Per $\varphi = 0$ l'ellisse si riduce alla diagonale AA' , in quanto (*) diviene $\left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right)^2 = 0$.

È questo il caso verificatosi nel 1960.

Per $\varphi = \frac{\pi}{2}$, la (*) diviene un'ellisse riferita agli assi coordinati ed a e b ne divengono i semiassi. Per $a = b$ l'ellisse si trasforma in circonferenza.

Per $\varphi = \pi$ la (*) prende la forma $\left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right)^2 = 0$, e l'ellisse degenera nella diagonale BB' del rettangolo.

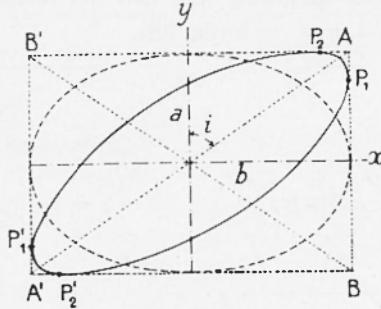


Fig. 36 - Composizione di moti armonici a 90° .

Per ottenere tutte le traiettorie possibili, basta far variare φ da 0 a π .

Per le osservazioni ottenute presso la diga dell'Ambiesta, vale evidentemente il caso $\varphi = 0$ o, comunque, φ non molto discosto da zero, al quale corrispondono traiettorie ellittiche più o meno schiacciate, non riferite agli assi.

Le diagonali AA' , BB' del rettangolo circoscritto costituiscono un sistema di diametri coniugati per la famiglia di ellissi (*).

Nel caso in cui si verificano variazioni nell'ampiezza delle due sinusoidi, poiché $\frac{a}{b} = \tan i$, è chiaro che — per variazioni di fase pressoché nulle (come è il caso in esame) — per $a \lesseqgtr b$ è $i \lesseqgtr 45^\circ$, come appunto si è verificato dal 1957 al 1961.

Negli anni considerati, le ellissi traiettorie hanno subito variazioni sostanzialmente legate alle variazioni delle ampiezze dei moti componenti. È da chiedersi a cosa va attribuito il progressivo prevalere dell'ampiezza destra-sinistra su valle-monte. A prima vista sembra doversi ricercare la causa in una maggiore efficacia dell'insolazione (che agisce, come si è visto, in modo asimmetrico) sul calcestruzzo.

Se però si osserva che, sostanzialmente, negli ultimi quattro anni la componente spalla-spalla ha conservato ampiezze pressoché costanti, mentre è stata la componente valle-monte che è andata progressivamente scemando di ampiezza, appare più giusto attribuire il fatto ad un progressivo irrigidimento del calcestruzzo, così da giustificare la sua scemata attitudine a flettere sotto l'azione delle variazioni termiche, conseguenti all'insolazione. In un modo o nell'altro, i fatti constatati presuppongono una variazione nel tempo delle caratteristiche del calcestruzzo, tali da giustificare il fenomeno su detto.

Le variazioni della temperatura dell'aria e l'andamento dell'insolazione, sono fra le cause principali dei movimenti di una diga. Di esse ho ampiamente discusso altrove. Riporto qui il caso di una piccola diga, quella dell'Ambiesta, più volte citata. Anche in essa, l'onda diurna diminuisce in ampiezza dal coronamento alla base del concio centrale, dove praticamente scompare. Per quanto concerne l'andamento annuale, come si verifica in altre dighe, l'onda diurna si riduce, fino ad annullarsi, da Novembre a Febbraio. D'inverno, quando la temperatura media perviene ad un minimo, si osserva la massima contrazione della diga, con conseguente sensibile flessione verso valle. Si veda il chiaro esempio fornito dalla diga dell'Ambiesta nel mese di Dicembre 1961 (fig. 27). La flessione riesce marcata, specie nel coronamento, da quando la temperatura media scende sotto lo zero. Con il ritorno della temperatura media dell'aria sopra lo zero, il coronamento si riporta decisamente verso monte. L'onda diurna, associata all'insolazione, è pressoché scomparsa: essa non figura infatti nella componente sinistra-destra del tampone, dove risulta invece (come si è visto) molto sviluppata durante i mesi da Febbraio a Novembre. Le oscillazioni di un pseudo periodo diurno, registrate dalle componenti valle-monte, non sono infatti onde diurne, bensì variazioni coperiodali dell'invaso. A questo riguardo, si noti come esse vengano trasmesse attenuate al tampone dalla base del concio (quota 437), su esso poggiate.

5. — Ho mostrato in lavori precedenti l'interesse di valutare, nei suoi riflessi geofisici, le misure geodetiche, che periodicamente vengono eseguite intorno alle grandi dighe. Così, le misure degli spostamenti orizzontali di punti determinati, quali risultano dalle triangolazioni, possono servire per il calcolo della deformazione orizzontale per ogni triangolo, nonché la grandezza e la direzione degli elementi caratteristici della deformazione elastica: *dilatazione, rotazione, distorsione e deformazione principale*. Se u e v sono le componenti dello spostamento di un punto trigonometrico, con riferimento ad un arbitrario sistema di assi x, y ,

indicate con A , ε , S , ecc. rispettivamente la dilatazione, la rotazione, la distorsione, ecc., si ha ⁽¹⁸⁾:

$$A = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} ; 2\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} ; 2S = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} ; \quad \text{ecc. ecc.}$$

Si può così determinare l'entità delle tensioni che si generano nella roccia in un intorno della diga, in corrispondenza degli spostamenti osservati; e valutare quando esse sono tali da condurre oltre il limite di rottura, sotto forma di piccole scosse sismiche.

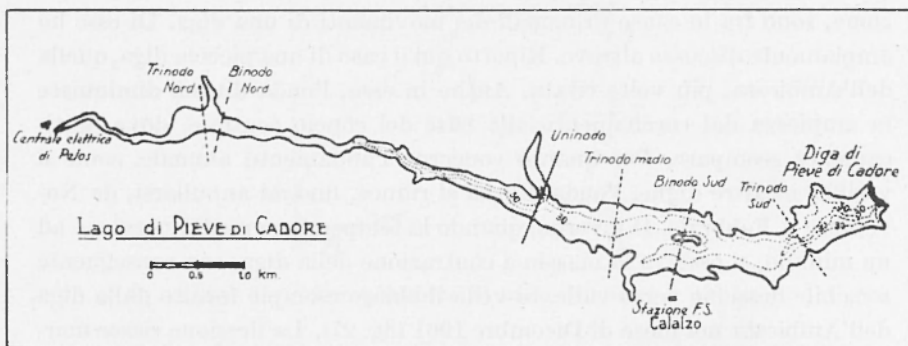


Fig. 37 - Lago di Pieve di Cadore: posizione dei nodi delle sesse uni-, bi- e trinodali.

Un'ampia ricerca compiuta sulle prime otto triangolazioni eseguite presso la diga di Pieve di Cadore, ha portato a notevoli risultati, alcuni dei quali del tutto imprevisi. Non mi soffermerò su di essi, discussi nel lavoro in cui sono riportati ⁽¹⁸⁾. Mi limiterò ad osservare che — normalmente — ogni triangolazione è caratterizzata da un solo segno (positivo o negativo) per la *dilatazione*. Ciò sta ad indicare che, in tutta la zona sottoposta a misure geodetiche, intorno alla diga, si ha contemporaneamente o espansione del mezzo (dilatazione positiva) o contrazione. Il variare della misura o della direzione di tali fenomeni, dà luogo a *distorsioni*, più o meno accentuate. Gli assi principali delle *ellissi di deformazione* (tese o contratte) esprimono, con le loro lunghezze e direzioni, l'entità della deformazione elastica e l'azimut secondo cui agisce.

6. - Si è già osservato che anche l'idrodinamica può portare il suo valido contributo, per configurare compiutamente l'ambiente geofisico associato ad una grande diga.

L'acqua contenuta in bacini chiusi o comunque aperti (mari interni, laghi, golfi, baie, rade, ecc.) può divenir sede di moti liberi, capaci di tenerla in movimento sul ritmo di periodi svariati, legati alla forma dei bacini e alla profondità dell'acqua. La vasta letteratura sull'argomento considera un gran numero fra i casi che si possono presentare, alcuni dei

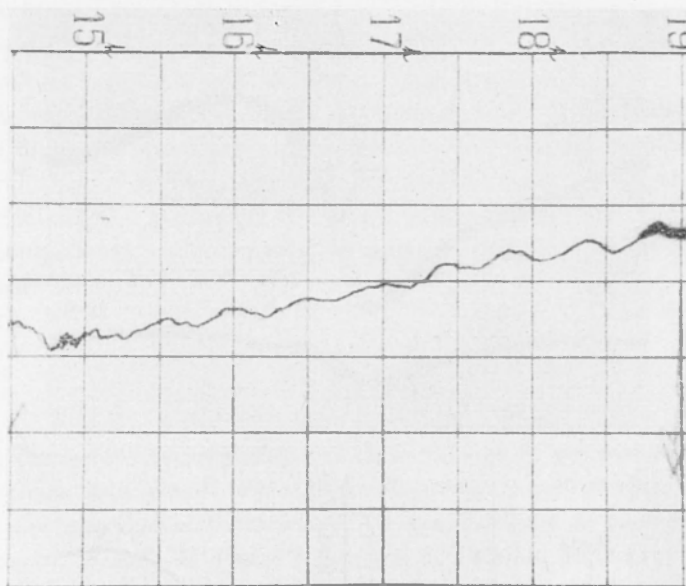


Fig. 38 - Lago di Pieve di Cadore: esempio di lieve uninodale dal lato della diga.

quali risultano alquanto complessi. Nella teoria di Chrystal, l'equazione fondamentale che regge il moto stazionario in bacini chiusi è della forma

$$\sigma(v) \frac{d^2 u}{dv^2} + \frac{4\pi^2}{gT^2} u = 0,$$

dove $u = \xi \cdot S(x)$, essendo ξ espressione degli spostamenti orizzontali delle particelle di una generica sezione $S(x)$, T è il periodo del moto libero, g l'accelerazione di gravità, $v = \int_a^x b(x) dx$, essendo $b(x)$ la larghezza variabile del bacino, misurata alla superficie libera, e $\sigma(v) = S(x) \cdot b(x)$. La curva rappresentata dalla funzione $\sigma(v)$ è detta la *curva normale*.

La determinazione delle oscillazioni libere nei bacini chiusi è quindi ricondotta alla risoluzione di un'equazione differenziale omogenea del second'ordine, con certe condizioni agli estremi. Esistono altri metodi, sui quali ritengo inutile di insistere in questa sede. Accennerò solo a

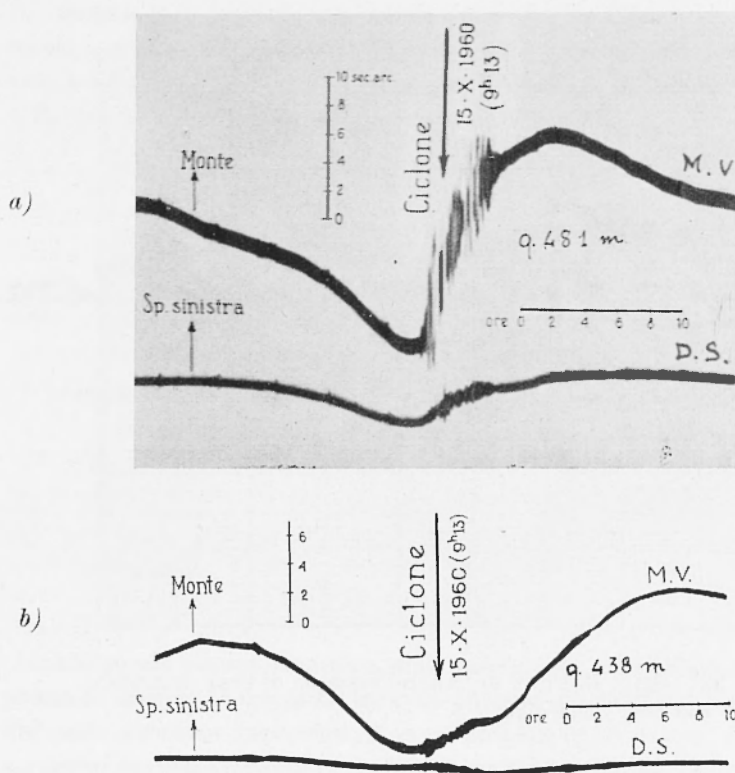


Fig. 39 – Diga dell'Ambiesta: l'azione del vento ciclonico (nel caso specifico, da valle) sulla diga e sul lago può determinare variazioni rapidissime della verticale apparente (vibrazioni), decrescenti dal coronamento (a) al tampone (b) e particolarmente ampie sulla componente valle-monte.

quelle delle impedenze idrodinamiche di Neumann che, assieme a quello di Hidaka, fu applicato al lago Cadore⁽¹⁴⁾, creato dallo sbarramento del Piave, compiuto nella stretta di Sottocastello (fig. 37). Le oscillazioni uninodali di detto lago furono dapprima registrate dai clinografi funzionanti nei conci della diga, sotto forma di variazioni della verticale apparente, aventi un periodo di mezz'ora circa⁽⁷⁾. I periodi delle oscillazioni

libere uninodali e binodali, quali risultano dall'applicazione delle teorie idrodinamiche sulle sesse, sono

oscillazione uninodale	periodo 26,2 min.
oscillazione binodale	periodo 8,1 min.

L'osservazione compiuta dal lato della diga (dove le sesse presentano minore ampiezza) mediante apposito limnografo, ha portato, per il periodo dell'uninodale, ad un valore di 28-30 m circa (fig. 38). Saranno realizzate, a questo proposito, osservazioni sistematiche.

Va infine notato che il lago in burrasca può — specie nel caso di piccole dighe — provocare rapide flessioni, chiaramente registrabili dai clinografi. Presso la diga dell'Ambiesta, non mancano esempi di tali perturbazioni, che — per evidenti motivi — sono particolarmente sensibili sulla componente valle-monte e scemano d'ampiezza dal coronamento alla base della diga (fig. 39).

RIASSUNTO

Il sismografo (vibrografo) e il clinografo quali preziosi coadiuvanti nel problema delle grandi dighe. Come il vibrografo può rivelare i periodi propri dominanti nelle stratificazioni rocciose, destinate ad ancorare grandi sbarramenti. Modulo di Young e rapporto di Poisson, dedotti con l'uso del vibrografo, che consente la registrazione delle onde trasversali, permettendo il raggiungimento di una maggiore approssimazione, nella determinazione delle costanti elastiche del mezzo solido. Decadimento del modulo elastico della roccia, in seguito ai lavori di sbancamento e al comportamento della diga sotto l'azione delle flessioni provenienti dall'invaso e dall'andamento termico stagionale e diurno.

Il problema della trasmissione dell'energia elastica dalla roccia all'acqua e viceversa: esperienze eseguite sul lago di Sauris (Lumiei). Appartenenza della roccia d'imposta ad un solo blocco geodetico: come il clinografo può controllare questa opportuna richiesta. Utilità di una stazione sismica funzionante presso un grande sbarramento; sua utilizzazione ai fini di un costante, sensibilissimo controllo, e nella valutazione dell'energia associata alle minutissime fratture provocate nella roccia dal giuoco alterno delle flessioni della diga, rivelate dalle stazioni clinografiche funzionanti nei suoi cunicoli e sulle sue spalle. Casi delle dighe di Pieve di Cadore e del Vajont. Funzione delle stazioni clinografiche e sismografiche dopo la costruzione della diga: controllo continuo delle condizioni di equilibrio ambientali.

Dighe di Pieve di Cadore, Val Gallina, Ambiesta, Pontesei, ecc. Interpretazioni geofisiche di misure geodetiche, con particolare riguardo alla determinazione degli elementi della deformazione elastica: dilatazione, rotazione, distorsione ed assi principali della deformazione. Eventuale variazione nel tempo delle caratteristiche elastiche di una diga: loro controllo mediante il periodico rilevamento dei periodi delle oscillazioni libere trasversali dei conci della diga. — L'idrodinamica al servizio delle grandi dighe: rilevamento delle caratteristiche principali delle oscillazioni libere (sesse) del bacino idrico, conseguente alla costruzione di un grande sbarramento. Applicazione al lago Cadore, formato dallo sbarramento della valle del Piave, a Pieve di Cadore.

SUMMARY

The seismograph (vibrograph) and the clinograph as precious helps in the problem of large dams. — How a vibrograph may reveal the dominant periods of the rocky layers, which shall anchor large barrages. — Modulus of Young and Poisson ratio, obtained through the vibrograph, which allows to record also the transversal waves, and therefore to achieve a closer approximation in the determination of elastic characteristics of the solid medium. — Decay of the elastic modulus of the rock, due to breaking works and to the behaviour of the dam under the action of the flexions from the hydric basin and the seasonal and daily thermic cycle. — Pertinance of the rock to a single geodetic block: how the clinograph may check this opportune request. — How the elastic energy is captured from the hydric basin and forwarded: experiences from the lake of Sauris. — Utility of a working seismic station by a large dam: its application with regard to a constant, very sensitive control and to the evaluation of the energy connected to the very small fractures caused in the rock by the alternate flexions of the dam, revealed by the clinograph stations functioning in its galleries and behind it. The dams at Pieve di Cadore and the Vajont. — Function of clinographic and seismographic stations after the building of the dam: continuous control of the equilibrium of the area. Dams at Pieve di Cadore, Val Gallina, Ambiesta, Pontesei, etc. — Geophysical interpretations of geodetical measurements, with special regard to the determination of the elements of the elastic deformation: dilatation, rotation, shear and main axes of the deformation. — Possible eventual variation of a dam's elastic characteristics: control through periodical survey of the periods of free, transversal oscillations of the dam's section. — Hydrodynamics for large dams: survey of the main features of free vibrations (seiches)

of the hydric basin, consequent to the construction of a large barrage. Application to the lake Cadore, formed by the barrage of the Piave valley, at Pieve di Cadore.

BIBLIOGRAFIA

- (1) CALOI P., *Il pendolo orizzontale come clinometro*. « Annali di Geofisica », III, (1950).
- (2) CALOI P., *Determinazione del Modulo di Young col metodo sismico*. « Relazioni e Studi », dell'Ufficio Studi SADE, n. 1, (Dicembre 1951).
- (3) CALOI P., *Ricerche sismologiche presso la diga di Pieve di Cadore*. « Relaz. e Studi », n. 9, (1952).
- (4) CALOI P., *Ricerche clinografiche presso la diga di Pieve di Cadore*. « Relaz. e Studi », n. 12, (1952).
- (5) CALOI P., *Vibrazioni della diga del Lumiei durante l'apertura dello scarico di fondo*. « Relaz. e Studi », n. 6, (1953).
- (6) CALOI P., *Esperienze nella stretta del Mis*. « Relaz. e Studi », n. 10, (1953).
- (7) CALOI P., *Osservazioni sismiche e clinografiche presso grandi dighe di sbarramento*. « Annali di Geofisica », VI, 3, (1953).
- (8) CALOI P., *Esperienze geosismiche sul ghiacciaio della Marmolada*. « Relaz. e Studi », n. 19, (1954).
- (9) CALOI P., *Esperienze geosismiche nella valle del Cordevole (Caprile)*. « Relaz. e Studi », n. 21, (1954).
- (10) CALOI P., SPADEA M. C., *Decadimento del modulo elastico in roccia a contatto con bacini idrici artificiali*. « Annali di Geofisica », VI, 4, (1954).
- (11) CALOI P., SPADEA M. C., *Relazioni fra lente variazioni d'inclinazione e moti sismici in zona ad elevata sismicità*. « Rend. Acc. Naz. dei Lincei », XVIII, 3, (1955).
- (12) CALOI P., *Sismicità della zona di Tolmezzo*. « Relaz. e Studi SADE », n. 7. (Nuova serie), (1955).
- (13) CALOI P., *Il comportamento delle grandi dighe dal punto di vista geofisico*. « L'Acqua », 1-2, (1955).
- (14) PEZZOLI G. A., *Oscillazioni libere del lago di Pieve di Cadore*. « Archivio di Oceanografia e Limnologia », X, 1-2, (1955).
- (15) CALOI P., *Il fotoclinografo a pendolo orizzontale nella teoria e nell'applicazione*. « L'Energia Elettrica », XXXIII, 10, (1956).
- (16) CALOI P., *Sui periodi d'oscillazione libera dei concii di una diga e sulle loro relazioni con le caratteristiche elastiche del calcestruzzo*. « L'Energia Elettrica », XXXIII, 12, (1956).
- (17) CALOI P., *Sulla dispersione delle onde sismiche nell'ambito delle altissime frequenze*. « Annali di Geofisica », X, 3-4, (1957).

- (18) CALOI P., SPADEA M. C., *Geophysical Interpretations of the first Series of Triangulations carried out at the Pieve di Cadore Dam*. « VI Congrès des Grands Barrages », New York, 1958.
- (19) CALOI P., *Come la geofisica può contribuire ai problemi concernenti la costruzione e l'osservazione delle grandi dighe*. « Relazioni e Studi », n. 19, (Nuova Serie), (1958).
- (20) CALOI P., *About some phenomena preceding and following the seismic movements in the zone characterized by high seismicity*. « Contributions in Geophysics: In Honor of Beno Gutenberg ». Pergamon Press, Londra, 1958.
- (21) CALOI P., *Osservazioni clinografiche presso la diga dell'Ambiesta*. « Relazioni e Studi », n. 21, (Nuova serie), (1959).
- (22) CALOI P., *La geofisica e le grandi dighe*. « L'Energia Elettrica », XXXIX, 1, (1962).
- (23) KANAI K., TANAKA T. and YOSHIZAWA S., *Comparative Studies of Earthquake Motions on the Ground and Underground*. « Bull. Earthq. Res. Inst. », 37, (1959).
- (24) SHIMIZURU D., *Elasticity of Rocks under Initial Stresses, with Special Reference to the Fracture Problem*. « Bull. Earthq. Res. Inst. », XXXIII, 3, (1955).
-