

# Le indagini geofisiche per i problemi dei grandi serbatoi artificiali

O. VECCHIA \*

**SOMMARIO:** I metodi geofisici, principalmente sismici ed elettrici, già applicati spesso, da circa 25 anni, per la determinazione del fianco o fondo roccioso nelle sezioni d'imposta delle dighe, si sono evoluti nelle tecniche e nelle applicazioni e si stanno impiegando in molti casi ad altre parti dei serbatoi. Essi permettono ora di ottenere parametri meccanici od idrotecnici delle rocce e terreni, e forniscono elementi di base oltre che nella delimitazione di rocce permeabili anche per lo studio di masse rocciose franabili, per determinare spessore e volume di frane antiche o nuove, per ricercare e cubare materiali da costruzione, per valutare l'efficacia di consolidamenti, per stabilire la degradazione delle caratteristiche meccaniche col tempo e infine per misurare vibrazioni pericolose.

## 1. Premessa.

Nell'indagine geofisica dei terreni e delle rocce per l'ingegneria civile i metodi utilizzati in grande prevalenza sono quelli sismici e quelli elettrici. Di solito, le grandezze fisiche che si mettono in evidenza diretta con questi metodi sono la velocità di propagazione delle onde elastiche per il primo e la resistività elettrica per il secondo. È noto che dalla loro distribuzione si possono ricavare la configurazione spaziale e la forma delle diverse rocce presenti, almeno entro certi limiti, e che ciò ha costituito la principale utilizzazione della geofisica nei primi tempi. Ma sempre di più ci si è resi conto che la velocità delle onde elastiche e la resistività elettrica dipendono a loro volta da altre proprietà, con derivazione più o meno diretta e con precisione varia, che interessano anche più delle prime l'ingegneria civile, quali il modulo elastico, la resistenza meccanica, la densità, la compressibilità, la porosità, la permeabilità, la imbibizione (v. ad es. fig. 1-3). Studiando la dipendenza di queste proprietà dalle prime è apparso sempre più che le proprietà geofisiche misurate direttamente, elastiche ed elettriche (ed altre), esprimono non tanto la classificazione geologica dei mezzi naturali, quanto le loro proprietà meccaniche ed idrotecniche, perciò sono atte a riconoscere e differenziare lo stato meccanico e geotecnico di questi mezzi, anche dove essi appaiono uniformi per il geologo.

Ciò ha portato alle applicazioni, ormai molto

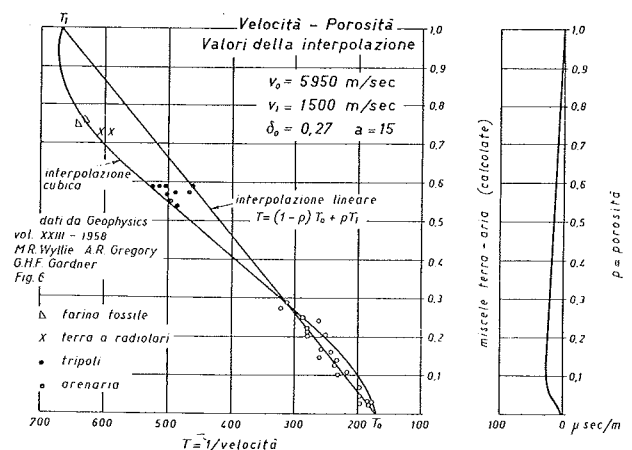


Fig. 1. - Velocità delle onde longitudinali in funzione della porosità. A sinistra per quelli imbevuti d'acqua, a destra per gli aerati.

diffuse, dei metodi geofisici per le indagini alle rocce ed ai terreni di fondazione delle grandi dighe di muratura e di terra, dapprima per esplorare, oltre le condizioni geologiche della sezione di imposta, anche le condizioni meccaniche ed idrogeologiche dei fianchi e del fondo, poi per accertare gli effetti degli interventi di consolidamento ed infine per esaminare lo stato delle opere e dei terreni di fondazione durante l'esercizio.

Ma col progredire della esperienza e delle tecniche si è constatato che i benefici della geofisica potevano anche estendersi sempre più ai problemi posti dai bacini, problemi talora preoccupanti e molti dei quali esulavano, in parte o del tutto, dalla possibilità di indagine coi normali metodi.

Quanto alla scelta tra i metodi geofisici è da te-

(\*) Prof. ing. Orlando VECCHIA, Istituto di Geofisica Applicata del Politecnico di Milano.

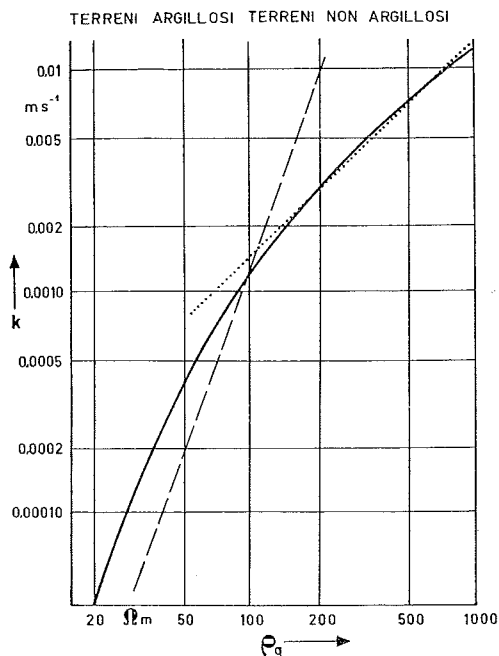


Fig. 2. - Resistività elettrica in funzione della permeabilità in terreni alluvionali sciolti. Varie curve sperimentali. (da FRITSCH, modif.)

ner presente che i metodi elettrici sono indispensabili laddove si ha a che fare con rocce più o meno argillose e sono i soli a poter essere impiegati in terreni sciolti anch'essi argillosi od alternanti con altri, specialmente in connessione con problemi di permeabilità (fig. 2). Quelli sismici invece regnano quasi incontrastati dove si hanno rocce e terreni privi di argilla e dove si debbano distinguere i terreni dalle rocce rigide (fig. 3). Ma vi è una grandissima varietà di situazioni che richiedono l'impiego abbinato dei due metodi o in cui è dubbio quale potrà dare risultati utili.

Inoltre, anche altre proprietà, talune di recente impiego, trovano efficaci applicazioni; tra esse: attenuazione d'intensità e frequenza acustica, potenziali elettrici spontanei, radioattività provocata, ecc.

I problemi più comuni che richiedono indagini geofisiche per grandi serbatoi artificiali possono essere classificati così:

- presenza di rocce permeabili per fessure oppure di natura porosa, capaci di compromettere la tenuta del serbatoio o di impedirne il riempimento;
- presenza di rocce franabili sulle sponde;
- misura di volumi e spessori di frane vecchie o nuove;
- ricerca e cubatura di materiale da costruzione;
- valutazione della efficacia di consolidazioni;
- variazioni delle caratteristiche meccaniche negli anni;

g) misura di vibrazioni dannose.

Gli inviti ricevuti da più parti m'inducono a ritenere utile l'esemplificazione di alcuni interventi geofisici di cui ho avuto esperienza diretta, tolti non soltanto dal campo dei grandi impianti idroelettrici ma anche da altri in cui si incontrano problemi inscindibili o affini (gallerie parietali e passanti, cave, strade, viadotti, ponti, grandi fondazioni, ecc.).<sup>(1)</sup>

## 2. Perdite nel serbatoio.

In alcuni bacini è possibile che il serbatoio a pieno invaso perda, in qualche parte del perimetro bagnato, per la presenza, sotto terreni permeabili, di una gola o sella della roccia impermeabile di fondo. Casi di questo genere, simili a quelli analoghi delle soglie di imposta, si presentano spesso e sono stati accertati in numerosi studi preliminari di serbatoi realizzati o di altri poi abbandonati. Quelli qui nominati e molti altri sono stati riconosciuti o esplorati colla sismica a rifrazione. In ampie valli alpine glacializzate la temuta perdita può essere imputata alla presenza di un antico letto fluviale sepolto: particolarmente imponente il caso dello sbarramento del torrente Drac presso *Sinard*

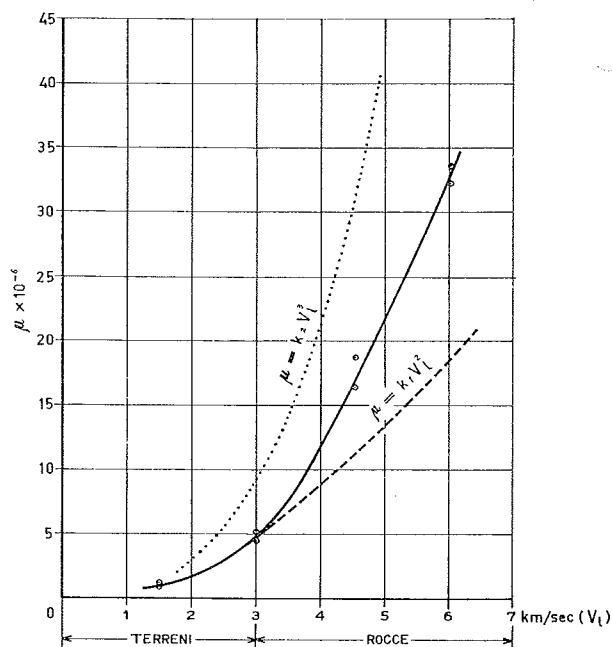


Fig. 3. - Modulo di rigidità in funzione della velocità di propagazione delle onde longitudinali. (A linea intera: curva sperimentale).

<sup>(1)</sup> Si ringrazia la *Fondazione Lerici* di Milano che ha fornito molti dei dati qui presentati.

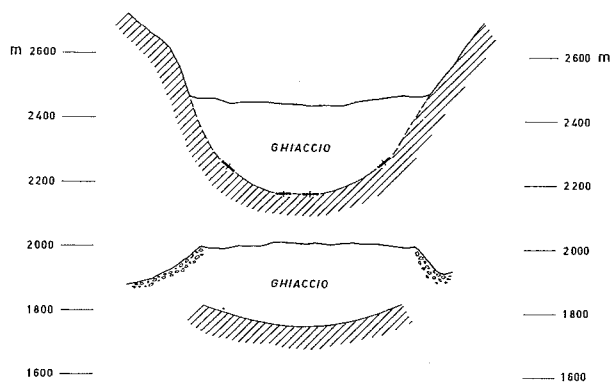


Fig. 4. - Il letto del ghiacciaio del Miage (M. Bianco) delineato colla sismica di riflessione. In alto una sezione in roccia, in basso una sezione pensile tra morene (Val Veni).

(Grenoble) dove lungo il lato sinistro del burrone da sbarrare vi è un vasto altopiano formato da terreni morenici ricoprenti alluvioni ghiaiose. Il sottosuolo dell'altopiano cela alcuni ampi letti interglaciali del Drac, sino a profondità di oltre 400 metri dalla superficie. Essi sono stati delineati per mezzo della esplorazione sismica a rifrazione.

In altri casi la sella di trabocco subalveo si trova all'estremo opposto della diga, cioè nella sezione più a monte; si può citare il caso della *Fedaja* presso la Marmolada e della diga sotterranea presso *San Giacomo di Fraele*. Oppure è laterale (per es. nel caso di un impianto sul *Basso Vanoi*, in Val Cison, in quello di *Valdaora* in Val Pusteria).

Una complicazione può essere dovuta al fatto che un tratto della parete del bacino sia costituita da un ghiacciaio, poggiante a sua volta su morena di fondo più o meno permeabile. La determinazione dello spessore del ghiacciaio è riuscita bene in alcuni casi impiegando la sismica a riflessione, integrata con quella a rifrazione per delineare il fondo roccioso sottostante la coltre morenica sui cui poggia il ghiacciaio. Un caso tipico di tale indagine è costituito dall'alta valle della *Dora di Veni*, sbarrata dal ghiacciaio del *Miage*, esplorata colla sismica già nel 1942. Altri numerosi ghiacciai sono stati esplorati con questi due metodi sismici, tra cui in Italia quello dei *Forni*, del *Careser*, del *Lys*.

Però l'esplorazione sismica può dare risultati erronei quando la soglia sepolta sia molto ristretta e sfavorevolmente situata rispetto alla superficie. È ciò che è avvenuto al serbatoio del *Vajont*, estremo opposto a quello della diga, cioè sotto il passo di *S. Osvaldo* ove i risultati sismici furono riscontrati in disaccordo con le perforazioni. Tuttavia in altri casi i risultati sismici servirono a correggere indicazioni molto errate fornite dalle perforazioni (*Alpe Gera* in Val Malenco, fig. 5) o furono

più utili di esse (*Basso Vanoi* sul Cison; Lago di *Valdurna* in Val Sarentina, Galleria *S. Valentino* in Val Rendena, ecc.).

In altre situazioni le perdite da temersi erano quelle sul fondo, per es. allo sbarramento dell'*Adda* a *Monastero*: qui il fiume percorre una pianura al-

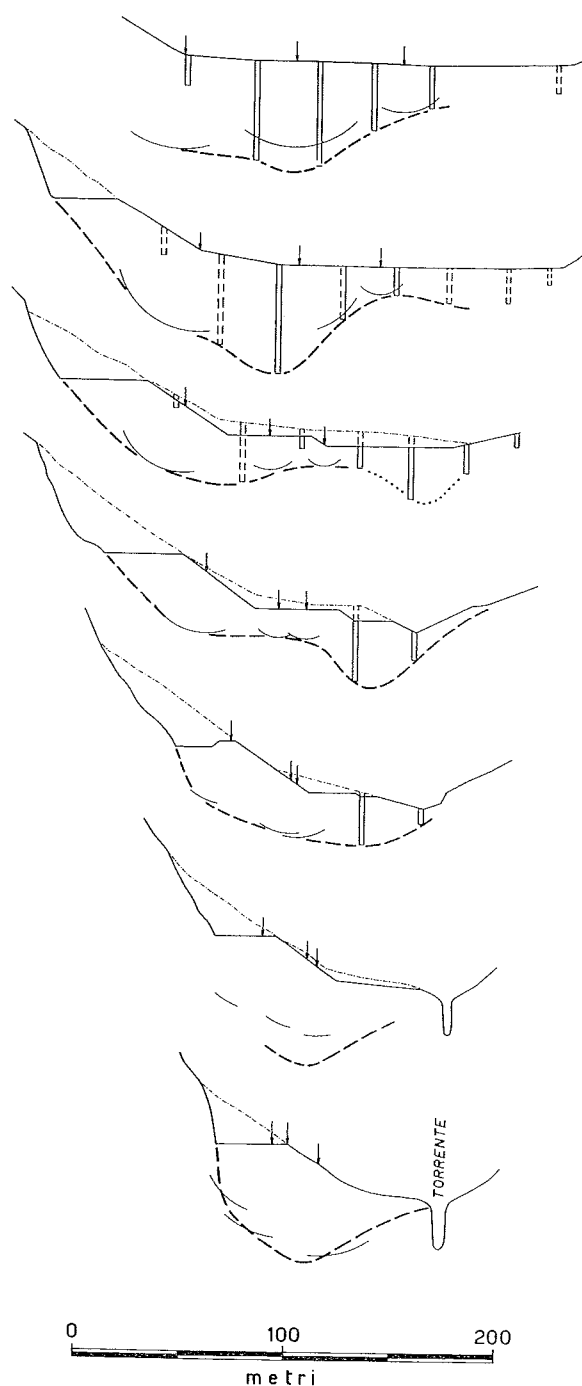


Fig. 5. - Alpe Gera - Varie sezioni parallele alla diga -. Dopo una campagna di terebrazioni per delineare il fondo roccioso, messa mano all'asportazione della copertura detritica, apparve che taluni perfori erano stati arrestati a profondità molto minori di quella reale della roccia. Il metodo sismico fu adoperato per una rapida efficace verifica e correzione del disegno del fondo roccioso.

luvionale coperta di limo finissimo che ha spessore di alcuni metri, come risulta da numerose trivellazioni. Sotto di esso vi è una coltre di ghiaie pulite alluvionali, di grande potenza. La esplorazione geofisica ebbe per scopo di verificare la estensione e la potenza dello strato limoso, ch'è praticamente impermeabile e sostiene il letto pensile dell'Adda. Il metodo più adatto apparve quello elettrico e si fecero numerosi profili di sondaggi elettrici verticali: infatti la resistività dei limi è qui di  $40 \div 80$  ohm.m mentre quella delle ghiaie sottostanti è sempre superiore a 100 o raggiunge 1000 per quelle asciutte.

Diverso dai precedenti è il caso in cui la serie stratigrafica dei terreni del bacino comporti una formazione inferiore argillosa ed una superiore sabbiosa o comunque porosa. Sono da citare esempi dagli Appennini e particolarmente dall'Italia meridionale ove le sabbie od arenarie che hanno concluso la sedimentazione marina giacciono spesso su argille o argilloscisti. In questo caso la presenza delle rocce argillose, alla base od alternanti colle porose, richiede di ricorrere ai metodi elettrici ed esclude l'impiego di quelli sismici. Applicazioni dei sondaggi elettrici ne sono state fatte diverse, con esito più o meno felice a seconda se il passaggio tra le due formazioni è brusco oppure più o meno sfumato. Citiamo gli studi per alcuni sbarramenti sul fiume Ofanto (*Atella, Cairano*), alla *Marana Capacciotti* ed a *Brindisi*.

Le perdite nel bacino possono avvenire per la presenza in esso di rocce fratturate, specialmente calcari o gessi. La forma e la profondità di rocce calcaree subaffioranti o di cui si teme l'esistenza entro il bacino formato di rocce sciolte o di rocce argillose è uno dei problemi tipici frequenti, specialmente negli Appennini. La roccia calcarea può essere riconosciuta talvolta colla sismica di rifrazione e coi sondaggi elettrici, specie se abbinati (per es. impianto del *Mantaro* in Perù). Più difficile o impossibile può essere la scoperta di affioramenti calcarei o gessosi di modesta dimensione, tanto più se celati alla vista, ed ancora peggio indagare se tali affioramenti si prolunghino od estendano in profondità sino a compromettere la tenuta del bacino (*Lago del Moncenisio*).

Se la roccia calcarea affiorante o quasi è estesa, è possibile mettere in rapporto il suo grado di fratturazione col valore della velocità di propagazione delle onde elastiche o colla resistività elettrica. Ciò si può fare mediante una esplorazione areale sistematica dalla superficie, con numerosi brevi profili sismici a rifrazione, oppure nell'interno della roccia, attraverso gruppi di perfori esplo-

rativi di piccolo diametro, mediante esplosioni fatte in tali fori a varie profondità e registrazione delle onde d'urto in altri fori, cambiando in vari modi le posizioni degli scoppi e dei ricevitori in modo da realizzare una esplorazione tridimensionale (per es. a *Tana Termini* presso Bagni di Lucca e *Valvestino* presso Gargnano). In questi ultimi anni si è messa a punto la « diagrafia sonica » con cui si esplora minuziosamente e con continuità tutta la parete di un perforo, rivelando con precisione non soltanto la velocità di propagazione d'impulsi sonori ma anche l'attenuazione e le variazioni di frequenza delle onde. Questo fornisce una stratigrafia dello stato meccanico della roccia *in situ* che dà molto più particolari ed è più precisa della colonna stratigrafica di perforazione, anche quando in quest'ultima la percentuale di carotaggio è molto elevata (*Beauregard* in Valgrisanche, *Place Moulin* in Valpelline, *Pantano D'Avio* sull'Adamello, *Alpe Gera* in Val Malenco, *Gallo* nel Matese, ecc.). In certi casi anche diagrafie elettriche (per es. spalla della diga del *Vajont*, durante la costruzione) o radiometriche possono essere utili.

### 3. Rocce franabili sulle sponde del bacino.

È questo il fenomeno cui nel passato si è dedicata la minore cura e che invece desta oggi le maggiori preoccupazioni. Il problema è molto affine od inscindibile da quelli che si incontrano per le opere di imbocco delle gallerie e per il tracciato delle gallerie parietali; è pure analogo a quelli che ricorrono per lo studio e l'esecuzione delle opere d'arte sulle autostrade. Le possibilità di intervento con metodi geofisici sono varie e si sono introdotte via via nel corso degli ultimi anni, soprattutto poiché si sta diffondendo il concetto della necessità di indagini sistematiche preventive anche ai serbatoi: esse si basano essenzialmente nel riconoscere lo stato di degradazione delle caratteristiche meccaniche delle rocce (cioè l'abbassamento della velocità di propagazione delle onde elastiche, la diminuzione delle frequenze e l'assorbimento della energia) che conferisce loro proprietà elastiche lontane da quelle normali e poco o nulla differenti da quelle dei terreni sciolti.

Da questa definizione appare anche un limite all'efficacia dei metodi geofisici: infatti mentre è riconoscibile la degradazione della roccia lapidea o comunque coerente, appare impossibile riconoscere per questa via le condizioni di stabilità di un terreno detritico, specialmente se sciolto, altro che in via comparativa; inoltre sono comuni condizioni

intermedie, che si incontrano tra le rocce molto porose, i tufi vulcanici e gli argilloscisti. La classificazione può prendere a base soprattutto le condizioni geologiche.

In rocce dure fratturate diversi interventi sono stati fatti su rocce gneissiche. Ricordiamo ad esempio la determinazione della profondità della roccia indebolita o smossa nella parte sinistra del lago artificiale di *Vernago* (Val Senales).

In calcescisti, citiamo il riconoscimento dello strato fratturato in cui si addentrano le gallerie parietali della ferrovia internazionale Italia-Francia (*Salbertrand*), gallerie più volte rifatte e pericolanti, benchè all'esterno la roccia non manifesti frane vere e proprie, in quel tratto (fig. 6). Se si fosse trattato delle pendici di un serbatoio idroelettrico e in assenza delle gallerie, solo la geofisica avrebbe potuto dimostrare lo stato di pericolo e lo spessore vario, talvolta grande, della corteccia di roccia instabile: qui oltre il metodo sismico a rifrazione, impiegato con successo, fu adottato insieme anche il metodo dei sondaggi elettrici perché la roccia smossa è imbevuta abbondantemente di acqua.

I calcescisti e le rocce filladiche appaiono tra le più soggette al fenomeno del lento cedimento gravitativo che talvolta scatena le frane. Anche nelle filladi è stato riscontrato in diversi casi abbassamento forte della velocità sismica per cause tettoniche, anche a grande profondità (ad es. *L. di Valdurna* in Val Sarentina, *Brunico* in Val Pusteria).

In certi territori lo stato di degradazione meccanica della roccia, per le vicende tettoniche subite, è ancora più spinto, sino alla disgregazione comminuta (« cataclasi ») od anche sino alla « milonisi » dei petrografi. Oltre alla citata Val Pusteria è notorio che ciò si osserva specialmente in certe parti della Calabria e territori vicini, per i quali si pone spesso il problema se lo stato anormale della roccia sia limitato ad una coltre superficiale o se invece colpisca tutta la massa rocciosa anche in profondità. In tali casi le velocità sismiche in rocce che pur si chiamano gneiss sono abbassate a valori eguali a quelli dei terreni sciolti (per es. lungo il torr. *Jassa* a sud di Potenza). Valori un po' meno bassi furono trovati anche in parti sottomarine di rocce analoghe (indagini geofisiche per le fondazioni del ponte sullo *stretto di Messina*).

Circa lo spessore della roccia alterata o indebolita, una casistica numerosa risulta dalle applicazioni del metodo sismico a rifrazione per le nuove autostrade e ferrovie dell'Italia meridionale, specie per le opere d'arte. Metodo che nel caso di applicazioni idroelettriche potrebbe essere integrato dalla sismica nei perfori e dalle diagrafie soniche. Lo

stato di fracassamento dello gneiss in alcuni di questi luoghi appare moderato o limitato a spessori non grandissimi (*Vibo Valentia*, *Pizzo Calabro*, attraversamento dei *Monti Peloritani*). In altri invece non si trovò roccia avente velocità sismica di valore normale in tutto lo spessore indagato (che era limitato, dati gli scopi delle ricerche).

Si osserva che spesso sui fianchi delle gole da sbarrare o da attraversare l'alterazione è più in-

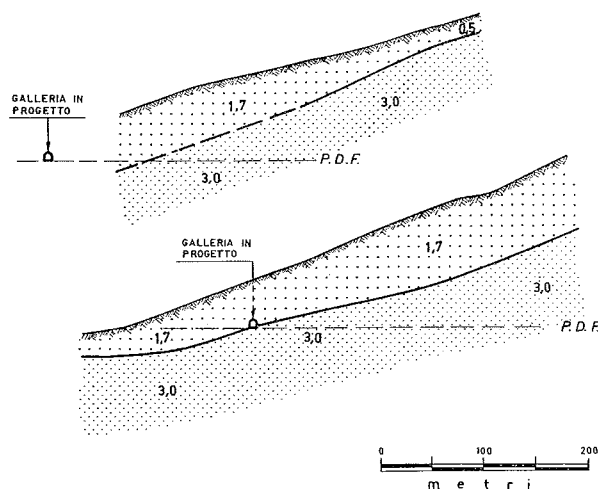


Fig. 6. - Studio per il progetto di una nuova galleria ferroviaria in Val di Susa. L'esplorazione sismica ha delineato il grande spessore della roccia pericolante (punti radi) in base alla velocità bassissima che essa presenta.

tensa e più profonda nelle parti alte ma si assottiglia al fondovalle, anche se la cataclasi può sembrare generale. Questo in particolare è indice di alterazione meteorica, piuttosto che di indebolimento tettonico. Ciò è manifesto per es. nel caso di alcune indagini nella Sardegna granitica per le dighe del *Taloro* e in diversi altri.

In condizioni climatiche di altri continenti lo strato di alterazione della roccia può assumere spessori grandissimi: ciò è stato riscontrato per es. nelle Ande peruviane, mediante i metodi sismico ed elettrico, nelle indagini per i grandi impianti idroelettrici del *Mantaro*.

Nel caso delle gallerie trasversali, le quali debbono addentrarsi molto nella roccia e profondamente sotto i rilievi, in modo che la sismica può trovarsi impossibilitata ad intervenire, le condizioni interne possono essere indagate, più o meno felicemente, mediante i sondaggi elettrici (per es.: gallerie ferroviarie di *Vibo Valentia* e di *Salerno*, gallerie idroelettriche del *Mantaro* in Perù).

Sono da tenere separati i casi in cui la roccia sia dolomitica o calcarea senza intercalazioni argillose: in genere queste sono rocce che formano pendii ripidi, dall'apparenza piuttosto stabile anche quan-

do fratturate, poiché la facile circolazione di umidità interna è spesso sufficiente a depositare un po' di calcite che cementa alquanto e cicatrizza gran parte delle piccole fratture, il maggior deflusso acqueo concentrandosi invece in un sistema di meati carsici. Tuttavia il clamoroso caso del Vajont o le frane di Zambana (Trento), tra gli altri, stanno a mostrare che la loro stabilità spesso è precaria. Tutti i metodi sismici ed acustici atti a rivelare il comportamento delle onde elastiche hanno dimostrato di essere sensibilissimi indici della eventuale degradazione meccanica di queste rocce.

Ricordiamo le applicazioni fatte (per il progetto della diga) a *Gargnano*, dove in una parte della imposta di destra la dolomia aveva velocità estremamente bassa e si poté intervenire tempestivamente a migliorarla. Una ricerca di franosità, in rocce calcaree stratificate, fu fatta, per altro scopo, in una grandiosa cava di calcare da cemento presso *Voltaggio* (Liguria). Con numerosi piccoli profili sismici a rifrazione furono riconosciute le estese aree in cui fenomeni iniziali avevano fatto temere il manifestarsi di grandi frane, e calcolati gli spessori della roccia instabile, caratterizzata da velocità molto bassa (fig. 7).

Citiamo il caso di una frana colossale di cui abbiamo i risultati delle misure di proprietà elastiche della roccia rimasta in posto, fatte dopo il disastro. Il valore basso della velocità sismica nella

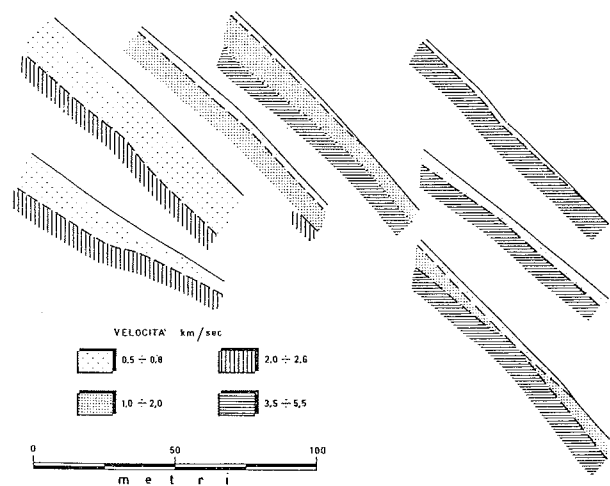


Fig. 7. - Alcuni profili sismici lungo il ripido pendio roccioso della cava di Voltaggio (calcari a strati), alcuni dei quali (a sinistra) presentano spessori grandi di roccia franosa, altri (a destra) spessori piccoli.

roccia rilevato con misure eseguite sulla superficie di distacco, apparve in contrasto così vivo con quello della roccia di fondo e di quella sana nella gola

a valle della diga (pur trattandosi delle stesse rocce) che non si sarebbe potuto divisare un esperimento più cruciale per dimostrare il valore del decadimento della velocità elastica per tormento meccanico, nonostante la sua apparenza di solida roccia inalterata.

In rocce « dure » o cristalline quali quelle considerate sino ad ora, talvolta può essere utile anche l'applicazione dei sondaggi elettrici verticali, in condizioni geologiche particolari, ma in genere non si può stabilire un nesso tra la franosità e la resistività elettrica che dipende soprattutto dalla umidità più che dalla imbibizione.

Le applicazioni più numerose e più vaste all'indagine della stabilità dei pendii rocciosi riguardano opportunamente quelle rocce in cui si alternano, più o meno fittamente, strati di argilla con altri di arenaria o marna o calcare o selce: rocce indicate con vari nomi (arenoscisti, argilloscisti, scisti silicei, argille scagliose o in genere « flysch », « marnoso-arenacea », « macigno B »). Sono rocce in cui la velocità delle onde elastiche è bassa, spesso al limite con quella dei sedimenti sciolti, e così pure la tendenza a franare è notevolissima. Quest'ultima condizione può dipendere o dal già avvenuto smuovimento lungo i pendii, con intima fratturazione degli interstrati rigidi per indebolimento ed imbibizione con acqua, oppure dalla esistenza di una successione di orizzonti litologici atti a favorire il franamento, anche per la loro inclinazione, in attesa di una causa occasionale.

L'indagine sismica, spesso da abbinare a quella elettrica, ha già dato molti buoni risultati, anche laddove la perforazione non sempre riesce a mettere bene in evidenza lo stato di degradazione meccanica. Tra le indagini nell'Italia meridionale citiamo quello per le dighe di *Camastra* e di *Pignola*. Analoghe ricerche sono state svolte nell'Alto Belice (Palermo). Problemi affini si incontrano per le opere d'arte sulle autostrade e sono state fatte esplorazioni dapprima lungo l'attraversamento dell'Appennino settentrionale coll'*autostrada del Sole* (sondaggi elettrici) e poi in autostrade meridionali adoperando efficacemente il metodo sismico a rifrazione (per esempio sulla *Messina-Catania*).

Se le sponde del bacino sono costituite o rivestite di terreno sciolto o solo insensibilmente coerente non è facile dimostrare colle onde elastiche la stabilità o la franosità di esso: la velocità sismica e la stabilità diminuiscono ambedue al crescere della porosità o amentano invece colla cementazione, seppure in misure diverse; ma sono influenzate in modi opposti dalla imbibizione e talvolta anche dalla pressione: cioè per queste laddove la

velocità cresce la stabilità può diminuire. Tuttavia quando non tutte queste variabili siano in gioco, la presenza e lo spessore di terreni a velocità bassissima è indice di porosità e insieme di instabilità almeno potenziale, cosicché non si dovrebbe sollecitarli con invasi e svassi. Tra gli esempi citiamo diversi interventi lungo vecchie gallerie idroelettriche pericolanti, decorrenti in parte nelle falde di detrito, lungo la *valle Seriana*, il cui rifacimento, da addentrarsi nella roccia, fu potuto progettare con sicurezza in base ai risultati della sismica a rifrazione.

È pure importante il comportamento della resistività elettrica, che è sempre abbassata sia dalla imbibizione nei terreni porosi sia dalla presenza di argilla anche in piccola quantità e perciò può contribuire validamente a definire le condizioni dei terreni. Inoltre la valutazione della stabilità dei terreni sciolti può dipendere dalla presenza di un sottofondo a basamento argilloso: il riconoscimento,

mediante l'installazione di clinografi e stazioni sismografiche fisse (vedasi capitolo 8).

#### 4. Indagini su masse franate.

Nelle rocce franate il sommuovimento riduce sempre la velocità sismica e la resistività elettrica, sia che si tratti di rocce rigide, sia di rocce plastiche o di terreni costipati. Anzi, in ordine di tempo, le ricerche geofisiche sulle frane nei territori ad argilloscisti, ove i movimenti dei terreni sono frequenti, precedettero quelle per i bacini idroelettrici. In alcune frane lungo le strade appenniniche parmigiane, lo spessore e la forma della massa argillo-scistosa franata fu determinato con successo mediante brevi profili sismici a rifrazione abbinati con sondaggi elettrici.

La ricerca sismica ha fornito risultati migliori in terreni di dissesto profondo e recente, con piano di scorrimento ben definito e su un terreno di

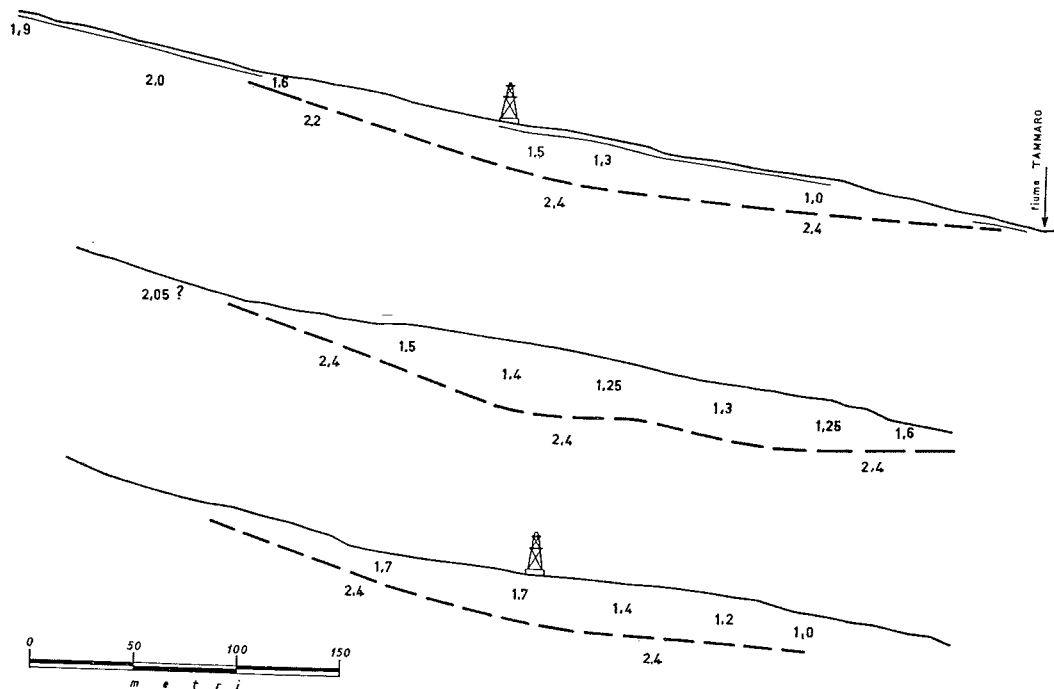


Fig. 8. - Tre profili sismici attraverso un'antica frana in terreni argillosi miocenici. La velocità nella massa franata è decisamente più bassa ( $1,0 \div 1,7$  km/s) che nei terreni indisturbati ( $2,0 \div 2,4$  km/s). La profondità è verificata da alcune trivellazioni (due in figura).

to e la delimitazione di queste condizioni sono tra i compiti più tipici da affidare ai sondaggi elettrici; questo si fa ormai anche per lo studio del basamento di edifici importanti (per es. un grande stabilimento a *Policoro*).

C'è anche da considerare il contributo che la geofisica ha iniziato a dare alla sorveglianza dei moti sismici e d'assestamento delle rocce nei bacini

base sano o più o meno bene assestato; la ricerca elettrica è servita dove la massa franata, di recente e profonda, era molto umida e laddove la roccia sana è costituita da argille massicce, ha cioè resistività molto bassa.

Questi metodi si dimostrarono poi efficaci per delimitare rocce argillose franate ad es. nel caso dei fianchi di un serbatoio da costruire sul f. Sinni

(Valsinni) e, più recentemente (Fig. 9), per lo studio di presunte vecchie frane già consolidate a *Campolattaro* (f. Tammaro). In questi luoghi il sondaggio elettrico apparve utile anche per riconoscere la presenza di alluvioni ghiaiose sepolte dalla frana.

Il metodo sismico a rifrazione è stato impiegato pure per delimitare una frana che fece precipitare un tratto del Cimitero-Ossario di guerra del *Montello*, altura composta di conglomerati quaternari antichi. In altro territorio di conglomerati, per il grande viadotto sulla gola del f. Coscile presso *Castrovillari*, la sismica a rifrazione denunciò grossi spessori a velocità bassa rivelando una probabile frana, sfuggita all'osservazione geologica ed alla trivellazione.

Le applicazioni più moderne e perfezionate della geofisica per il riconoscimento delle frane comprendono, oltre i metodi suddetti, anche lo studio in verticale, lungo fori di piccolo diametro, del diagramma continuo delle velocità elastiche. Queste applicazioni richiedono però l'assenza di un rivestimento metallico del foro. Il metodo ha avuto i suoi primi successi nello gneiss presso la diga di *Valgrisanche*, ove la diagrafia sonica ha integrato e perfezionato i risultati delle perforazioni. Questi risultati talvolta possono essere scarni e lacunosi nonostante la campionatura, inoltre spezzandosi ulteriormente durante la terebrazione le rocce fratturate, ne possono apparire dati non veri sullo stato meccanico della roccia attraversata, mentre non si ha che una vaga idea sulle zone completamente sfatte o detritiche. Ciò che invece è rappresentato dalla diagrafia sonica in modo più chiaro ed esatto.

Però il diagramma sonico, pur minuzioso e preciso, indica solo ciò che si trova entro un raggio di 10 ÷ 20 cm dal foro; perciò è possibile che si scambino per roccia sana trovanti o masse rocciose rimaste indenni nel crollo generale. È dunque opportuno integrare quei diagrammi con indagini sismiche a rifrazione o con misure di velocità globale nell'interno della massa, ottenute mediante esplosioni in alcuni perfori e ricezioni in altri perfori distanziati; metodi che hanno sempre mostrato di essere adatti a tale distinzione.

L'insieme di questi metodi è stato applicato anche per lo studio della gigantesca frana del *Vajont*, ove ha servito per riconoscere non soltanto lo spessore della massa franata ma anche la velocità della roccia del fondo e dei fianchi.

L'indagine su masse franate assume un'importanza essenziale quando i franamenti avvengono in galleria. Qui si tratta di riconoscere la lunghezza di tratto franoso od ancora l'altezza della massa franabile a tetto della galleria. Talvolta an-

che in questi casi l'indagine sismica può venire impiegata utilmente mediante quelli, tra i metodi già citati, che appaiono più adatti nella grandissima varietà di casi possibili. Citiamo ad esempio l'impiego della sismica a rifrazione per una galleria idroelettrica di carico presso *Tione* e le misure di velocità in perfori per una galleria in *Libano*.

## 5. Ricerca e cubatura di materiali da costruzione.

È un problema che ha grande affinità con quelli delle misure sulle frane.

Citiamo come esempi la ricerca e la cubatura di una grande massa di detriti di falda da adoperarsi per inerti (*Place Moulin*) il cui spessore era praticamente impossibile da ricavare per altra via. In tal caso il metodo adatto era quello dei profili sismici a rifrazione: lo gneiss della roccia sana sottostante aveva infatti velocità di 4,5 km/s, i terreni detritici soprastanti di 1,81 ÷ 1,2 km/s.

In altro caso, per la ricerca di argilla da impiegarsi per una diga in terra in un territorio del Beneventano, si voleva delimitare e cubare la massa di argilla superficiale che occupa parte di uno slargo vallivo (fiume Tammaro). In tal caso, per distinguere le argille dalle altre alluvioni e dai terreni marnoso-arenacei sottostanti, il metodo più adatto è quello dei sondaggi elettrici, corti e distribuiti su una fitta serie di profili.

## 6. Valutazione dell'efficacia di consolidamenti.

Questo genere di indagini è stato fatto sinora soltanto per le rocce di imposta delle dighe (ad es.: *Valgrisanche*, *Frera* presso il passo Aprica). Tuttavia non è da escludere che possa convenire farlo anche in qualche luogo dei serbatoi.

## 7. Variazione di resistenza meccanica col tempo.

Misure per esaminare la variazione delle condizioni meccaniche nel tempo ne sono state fatte per le dighe, ma non per i serbatoi. Sulle dighe diverse misure sono state eseguite per esaminare la degradazione del calcestruzzo in varie condizioni climatiche, ma oltre a queste, altre misure sono state fatte nelle rocce di imposta, in condizioni geologiche varie. Le citiamo qui poiché misure analoghe potrebbero essere altrettanto interessanti per casi relativi ai serbatoi. Misure di velocità elastica con esplosioni, e rilievi di diagrafie soniche sono state ripetute al *Pantano D'Avio* (Adamello) in tonalite; così pure a *Place Moulin* (Buthier)



in calcescisti e gneiss, ed a *Frera* in filladi; come anche a *Valgrisanche*. Misure con sondaggi elettrici ripetute numerose volte sugli stessi luoghi, sono state fatte al *lago di Molveno*, nei terreni detritici permeabili sui quali si imposta la diga, per osservare le variazioni della resistività connesse colla escursione della falda acquifera durante il ciclo di carico e scarico del lago.

#### 8. Misure di sismi, microsismi e vibrazioni dannose.

Per quanto riguarda i pericoli che possono essere provocati da terremoti la geofisica non può prevedere né l'entità dei danni né la pericolosità delle scosse, ma ha mostrato di poter contribuire validamente alla sorveglianza degli eventi. L'impiego di stazioni sismografiche permanenti per registrare l'attività vibratoria naturale in zone notoriamente sismiche ed insieme la distribuzione di gruppi di clinografi nell'ambito di serbatoi in esercizio, permettono utili confronti circa le cause dell'attività microsismica nel serbatoio e segnalano l'intensificarsi di essa (per es. Lago di S. Croce), che può preludere a moti franosi, o la localizzano.

Nel nostro paese, in cui le zone sismiche sono così numerose, è da augurarsi che l'esperienza già fatta in questo campo si estenda il più possibile. Un esempio dell'affermarsi di questa necessità è il recentissimo caso dei terremoti di *Entracque* (Cuneo), dove stazioni sismometriche mobili e fisse,

sono state approntate per studiare se il sisma principale e lo sciame dei secondari siano in connessione con la messa in carico della galleria di derivazione dell'impianto di Andonno.

Esplosioni fatte per lavori in vicinanza delle dighe di serbatoi già invasati possono provocare vibrazioni non ammissibili all'opera di sbarramento o frane nel serbatoio. Al grandioso serbatoio di irrigazione di *Sennar*, sul Nilo Azzurro (Sudan), i lavori intrapresi alcuni anni or sono a ridosso della vecchia diga in muratura, per adattarla anche a sfruttamento idroelettrico, richiesero l'impiego di esplosivi per ricavare la sede per la centrale nella dura roccia di base (gabbro). Ma l'impiego degli esplosivi doveva essere graduato in modo da non far temere danni alla diga. Essendo intervenuta una causa giudiziaria intentata dal governo sudanese alla ditta germanica esecutrice dei lavori, la geofisica fu chiamata a svolgere esperimenti per conoscere l'entità ed i caratteri delle vibrazioni a seconda delle cariche, loro distanze e distribuzione. I numerosi esperimenti eseguiti permisero di ricavare dati utilissimi in un campo in cui mancavano del tutto elementi di giudizio. Questa esperienza servì poi tra l'altro per un serbatoio nelle Alpi Orobiche, al lago di *Barbellino*, dove la necessità di scavare una nuova galleria in prossimità della diga richiese di graduare l'impiego degli esplosivi in base a misure geofisiche con geofoni tarati.

#### SUMMARY

##### Geophysical investigations for large reservoirs.

Since about 25 years the geophysical methods, particularly the seismic and electrical ones, have been applied to the problems of dam sites bedrock. More recently the techniques have evolved and also new methods have been introduced. The results are no more limited to the bedrock determination but comprise surveys of the shoulders and underground mechanical and hydrotechnical parameters.

In many cases the applications could be extended from the dam sites to the reservoirs selves. Now geophysics may furnish basic data in many problems such as in the explo-

ration of concealed permeable rocks and terrains, in detecting and measuring rock masses which are weak or liable to slide, in determining thickness and volume of ancient or new landslides, in the delimitation and cubage of building materials, in controlling the efficiency of injections and other strengthening processes, in evaluating the decay of rock or concrete quality with time and finally in measuring dangerous vibrations.

The description is supported by a number of examples in the fields of water reservoirs and others having similar problems.