

UN ESEMPIO DI CONTROLLO CON METODO SISMICO DELLE CARATTERISTICHE DI UNA ROCCIA CONSOLIDATA (*)

M. BERNABINI - M. BEOMONTE (**)

SOMMARIO: Richiamate le leggi generali che legano i moduli elastici alle velocità di propagazione delle onde elastiche, vengono descritti i metodi in uso per controlli sismici dell'efficacia dei trattamenti di consolidamento. Si illustrano poi i motivi che hanno portato alla scelta di una apparecchiatura normalmente usata per indagini sismiche a rifrazione.

Tali motivi sono essenzialmente: la possibilità di ottenere, con minimo intralcio al normale svolgimento dei lavori di costruzione, il maggior numero di informazioni; l'impossibilità, nel caso in esame, di determinare, con i sistemi scartati, il valore del coefficiente di Poisson con grado di approssimazione accettabile.

Si illustrano anche i criteri adottati per l'analisi statistica delle informazioni ottenute e la possibilità di ricavare attraverso tale analisi sia i valori medi delle caratteristiche elastiche del mezzo sia indici di disomogeneità medie e di mettere in evidenza eventuali anomalie locali.

Vengono inoltre descritti il lavoro di consolidamento e la metodologia usata per il controllo mettendo in evidenza l'aiuto che tale controllo ha fornito per una corretta esecuzione del trattamento di consolidamento.

1 - Premesse

L'utilizzazione dei metodi « sismici » o « sonici », per il controllo della consistenza di un terreno sciolto o di una roccia, è ormai largamente diffusa e accettata.

Come è noto, tali metodi si basano per lo più sulla misura della velocità di propagazione di perturbazioni elastiche originate artificialmente. Nel caso di mezzi elastici, omogenei, isotropi, indefiniti, possono sussistere solo due tipi di onde, longitudinali o di compressione e trasversali o di « taglio »; le velocità di propagazione di queste onde sono legate alla densità ρ ed alle coppie di moduli elastici E e ν o λ e μ , dalle relazioni:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{1} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{1}}$$
$$V_t = \sqrt{\frac{E}{1} \times \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{\mu}{1}}$$

Nota la densità, dalla misura di tali velocità si risale al valore dei moduli. Tali valori in generale differiscono da quelli determinati con prove statiche (1).

I metodi sismici di tipo tradizionale permettono cioè di ricavare i cosiddetti moduli « dinamici » di una roccia.

I moduli dinamici, o le stesse velocità di propagazione delle onde sismiche, possono costituire un parametro per un giudizio comparativo dello stato di consistenza di diverse parti di una stessa roccia, o sulle variazioni nel tempo di detto stato in una stessa porzione di roccia per effetto o di consolida-

(*) Comunicazione presentata al VII *Convegno di Geotecnica* (Trieste, 1-2 giugno 1965).

(**) Dott. Ing. Marcello BERNABINI, Assistente presso l'Istituto di Geofisica Mineraria della facoltà d'Ingegneria dell'Università di Roma.

Dott. Ing. Mario BEOMONTE, Associato allo « Studio d'Ingegneria Carlo Lotti & C. » Roma, Assistente volontario presso l'Istituto di Costruzioni Idrauliche della facoltà d'Ingegneria dell'Università di Roma.

M. BERNABINI, che ha curato i paragrafi 1, 2, 3 e 5, ha eseguito l'impostazione, le misure di campagna, l'elaborazione e l'interpretazione dei risultati dell'indagine sismica.

M. BEOMONTE, cui sono dovuti i paragrafi 4 e 6, ha diretto le cementazioni ed i controlli, effettuato le prove meccaniche di controllo e coordinato le varie indagini.

(1) Benchè ancora il problema sia in fase di studio [9-10] una giustificazione di tale differenza dovrebbe risiedere nella non perfetta elasticità dei corpi, per i quali, nella propagazione di una perturbazione elastica, debbono essere prese in considerazione, oltre che le coppie dei moduli elastici, anche altri fattori quale soprattutto la viscosità. Le perturbazioni elastiche osservate con le indagini sismiche hanno frequenze variabili da qualche ciclo ad alcuni Megacicli al secondo ed ingenerano quindi nel materiale tensioni variabili in periodi estremamente più brevi di quanto possa accadere nelle prove « statiche ».

menti o di processi di disgregazione (ad esempio ad opera di esplosivi).

Controlli di tale tipo sono ormai entrati nella normale tecnica applicativa. Nella presente comunicazione si vuole illustrare la metodologia usata nel controllo dell'efficacia delle cementazioni di una roccia di fondazione, in quanto si sono seguiti alcuni criteri che potrebbero risultare utili in molti altri casi.

2 - Criteri di scelta del metodo di indagine

Per il controllo in sito con i metodi sismici dei risultati di iniezioni di consolidamento, sono usualmente applicate varie tecniche che si possono raggruppare nel modo seguente:

a) Metodi che impiegano apparecchi con amplificazione meccanica od ottica [2-3-4]

Tali apparecchi permettono di ottenere una registrazione poco distorta dell'impulso elastico che giunge allo strumento e consentono l'individuazione delle varie onde tra cui la longitudinale e la trasversale, la determinazione delle loro frequenze, ampiezze, tempi di percorrenza e quindi velocità di propagazione.

D'altro canto, però, le registrazioni non permettono in genere un'elevata accuratezza nelle misure dei tempi (al massimo ± 1 millisecondo sui primi impulsi) e possono essere eseguite solo in punti direttamente accessibili all'operatore ed allo strumento (che è alquanto ingombrante): il campo di applicabilità del metodo ne risulta perciò molto limitato.

b) Metodi che utilizzano apparecchiature con trasduttori accelerometri e registratori con oscillografo a raggi catodici [5-8]

Tali sistemi consentono in genere la determinazione dei tempi di arrivo delle sole onde longitudinali con approssimazione notevole (anche più di 1 milionesimo di secondo), in uno o due punti contemporaneamente. I trasduttori sono di piccole dimensioni (qualche centimetro) e possono, con relativa facilità, essere immessi in fori da sonda.

c) Metodi utilizzanti le apparecchiature usate normalmente per le prospezioni sismiche [9]

Con tali apparecchiature i tempi di arrivo delle onde longitudinali possono essere letti (se molto netti e con l'aiuto di un micrometro) con l'approssimazione di $0,2 \div 0,3$ millisecondi. È in genere possibile registrare su 12 canali contemporaneamente e quindi ottenere, con un unico scoppio, i tempi relativi a 12 percorsi, se si usano geofoni che registrano una sola componente delle oscillazioni del suolo, o a quattro percorsi, se si usano geofoni a tre componenti.

In entrambi i casi i geofoni possono essere immessi in fori da sonda e, con esplosioni effettuate anch'esse in foro, consentono quindi di investigare qualsiasi parte della massa da controllare.

I sistemi di registrazione a tre componenti permettono di individuare, oltre l'onda longitudinale, anche l'onda trasversale e di ottenere quindi i valori del modulo di YOUNG e del coefficiente di POISSON.

In genere è possibile rendere sufficientemente approssimate le letture sui sismogrammi dell'istante di arrivo dell'onda longitudinale (ad es. aumentando il quantitativo di esplosivo impiegato o l'amplificazione dell'apparecchiatura); non altrettanto può ottenersi per l'onda trasversale, soprattutto per percorsi relativamente brevi, quali quelli utilizzati per i controlli in oggetto.

Gli errori sul valore della velocità dell'onda trasversale influiscono in maniera determinante nel calcolo del coefficiente di POISSON. La loro influenza è senza dubbio minore nella determinazione del modulo di YOUNG, almeno per coefficienti di POISSON inferiori a 0,30.

L'entità di tali errori si possono ricavare dalle figure 1, 2, 3, 4. Nella figure 1, 2 e 3 sono diagrammati, per vari valori di v reale della roccia, i valori che si otterrebbero dal calcolo per diversi tempi di percorrenza dell'onda elastica longitudinale (e quindi per diverse distanze), nel caso di errori di ± 1 , ± 2 e ± 3 millisecondi sulla determinazione del tempo di arrivo dell'onda elastica trasversale ⁽²⁾.

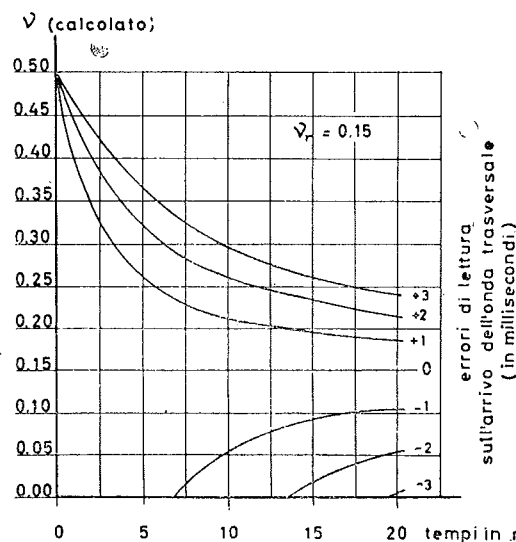


Fig. 1 - Diagramma delle variazioni del coefficiente di Poisson rispetto al valore reale (caso di $\nu_r = 0,15$) in funzione dei tempi di percorrenza dell'onda longitudinale per vari valori dell'errore di lettura dei tempi di percorrenza dell'onda trasversale.

⁽²⁾ I valori riportati nelle fig. 1, 2 e 3 sono stati calcolati con la formula

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{t^2}{[(Kt + \Delta)^2 - t^2]}$$

in cui t è il tempo di percorrenza dell'onda longitudinale, Δ l'errore di lettura sul tempo di arrivo dell'onda trasversale e K il rapporto tra la velocità delle onde longitudinali e trasversali.

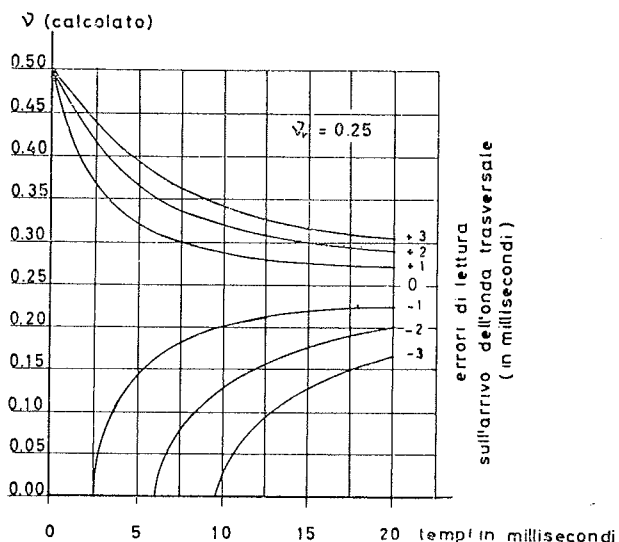


Fig. 2 - Diagramma delle variazioni del coefficiente di Poisson rispetto al valore reale (caso di $\nu_r = 0,25$) in funzione dei tempi di percorrenza dell'onda longitudinale per vari valori dell'errore di lettura dei tempi di percorrenza dell'onda trasversale.

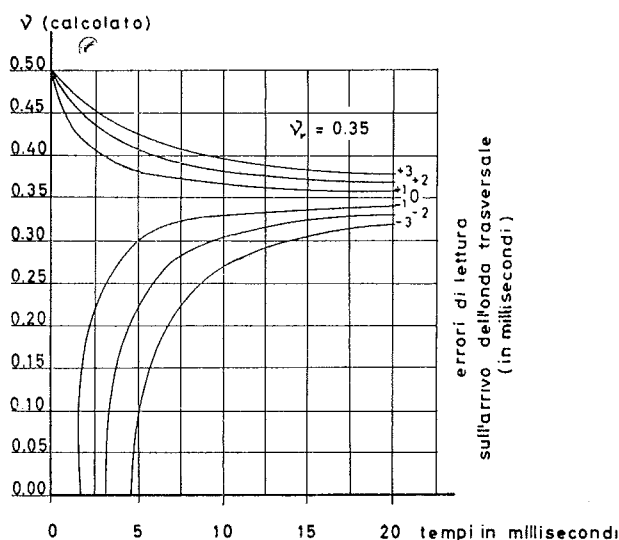


Fig. 3 - Diagramma delle variazioni del coefficiente di Poisson rispetto al valore reale (caso di $\nu_r = 0,35$) in funzione dei tempi di percorrenza dell'onda longitudinale per vari valori dell'errore di lettura dei tempi di percorrenza dell'onda trasversale.

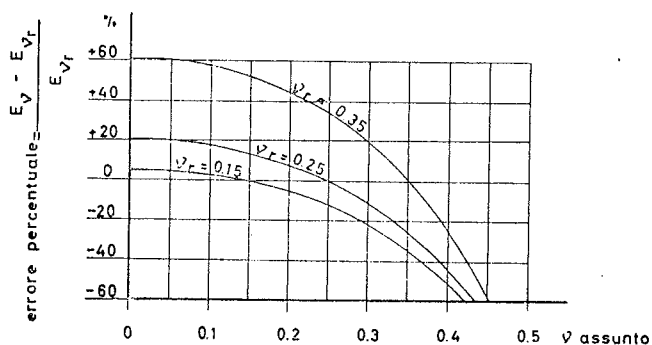


Fig. 4 - Diagramma degli errori percentuali sulla misura di E per valori del modulo di Poisson assunto diversi da quelli reali (ν_r).

Nella figura 4 sono invece diagrammati gli errori percentuali sul valore di E che si commetterebbero assumendo un ν diverso da quello reale. Ad esempio per ν reale $\leq 0,25$ si otterrebbero errori non superiori al 10% su E se si assumesse un ν che differisse da quello reale di $\pm 0,05$.

Nel caso oggetto della presente relazione la parte interessata dai consolidamenti era rappresentata dall'intera area di fondazione di una diga, e da due fasce in alveo a monte e a valle della diga, per una profondità compresa fra i 20 e i 30 m.

Le operazioni di controllo venivano eseguite su zone di forma grosso modo parallelepipeda con dimensioni comprese tra i 20 e i 50 metri.

Il controllo da effettuare su ciascuna zona sarebbe stato un controllo statico per campioni. Si presentavano al riguardo due possibilità di impostazione:

a) con la prima si sarebbero scelte casualmente porzioni di roccia di dimensioni ridotte (ad esempio 2-3 m) nel seno di ogni singola zona da trattare con iniezioni e si sarebbero determinate, tramite fori di sonda, le velocità di propagazione delle onde elastiche nelle porzioni stesse.

In tale caso sarebbe stato necessario l'impiego di apparecchiature con registrazione con oscillografo a raggi catodici.

b) Un secondo criterio sarebbe stato quello di prendere in considerazione l'intera zona in esame misurando i tempi di percorrenza di onde che avessero attraversato l'intera zona stessa.

Nel caso di cui trattasi si scelse per il controllo delle cementazioni tale secondo criterio, poichè aveva maggiore interesse il comportamento « medio » della zona di fondazione sotto ogni concio della diga, piuttosto che quello di singoli blocchi di ridotte dimensioni. Del resto aumentando convenientemente il numero e le orientazioni dei percorsi si sarebbero potute rilevare, in una singola zona, porzioni di roccia a comportamento anomalo, di dimensioni tali, da recar pregiudizio alla stabilità e all'impermeabilità della zona di fondazione.

L'indirizzo scelto fece preferire l'uso di apparecchiature sismiche del tipo usato nelle prospezioni, con geofoni ad una sola componente (3), in quanto come precedentemente detto, esse permettono registrazioni su molti punti (in genere 12) con una sola esplosione.

In tal modo si sarebbe ottenuto il massimo numero di informazioni nel minimo tempo evitando di intralciare i lavori di costruzione della diga (4).

D'altra parte il solo dato quantitativo, che si sa-

(3) I primi controlli di prova furono effettuati con vibrometro Askania dal Prof. P. CALOI che aveva eseguito i rilievi sismici preliminari e cui era stata affidata la supervisione di tutte le indagini sismiche effettuate.

(4) Con le apparecchiature a tre componenti si sarebbero effettuate registrazioni su di un numero inferiore di punti, con necessità quindi di effettuare un maggior numero di scoppi. Ciò, oltre ad un maggior tempo per le prove, avrebbe potuto causare inconvenienti sia per la maggiore probabilità di frantumamenti dei fori di scoppio (con conseguente impossibilità di eseguirvi nuove esplosioni), sia, anche nel caso che il foro non fosse franato, per la presenza, intorno alle pareti del foro, della zona frantumata dalle precedenti esplosioni effettuate nello stesso punto, presenza che avrebbe alterato le condizioni di sperimentazione.

rebbe potuto ricavare in più da una registrazione su tre componenti, sarebbe stata la velocità delle onde trasversali, la cui conoscenza avrebbe dovuto permettere la determinazione del coefficiente di POISSON.

Nel caso in esame, però, date le piccole distanze tra punti di scoppio e punti di ricezione (20-50 m), gli errori sulle letture dei tempi di arrivo dell'onda longitudinale e soprattutto della trasversale, avrebbero portato nel calcolo del valore del coefficiente di POISSON ad errori superiori alle variazioni che ci si sarebbero potute ragionevolmente aspettare nel valore del coefficiente stesso ad opera delle cementazioni.

Con il sistema di registrazione adottato si sarebbero dunque ricavate le sole velocità dell'onda elastica longitudinale calcolate su percorsi considerati rettilinei tra scoppio e punto di ricezione (5).

Tali velocità furono assunte come parametri per il giudizio sulla efficacia del consolidamento.

Peraltro, poichè nell'ambiente tecnico ci si riferisce più di sovente ai moduli elastici, sono stati calcolati, in base alle velocità, i valori del modulo di YOUNG dinamico una volta prefissati i valori del coefficiente di POISSON e della densità che furono mantenuti costanti per tutte le prove (6).

È da tener presente quindi che a tali valori dei moduli deve essere attribuita la stessa significatività dei valori delle velocità in quanto calcolati con coefficienti di POISSON e densità prefissati e costanti. D'altra parte una determinazione accurata del valore vero del modulo di YOUNG dinamico, oltre che praticamente impossibile, come si è detto, per la scarsa approssimazione raggiungibile nelle misure dei tempi relativi all'onda trasversale, sarebbe risultata anche superflua, perchè i valori assoluti dei moduli interessanti agli effetti della progettazione e costruzione della diga, sono quelli dei moduli « statici ».

3 - Criteri seguiti nell'elaborazione dei risultati

Come si è detto, per ciascuna zona investigata si sono ottenuti, alla fine di ciascuna prova, un certo numero di valori della velocità di propagazione dell'onda elastica longitudinale, ciascuno di essi relativo ad un determinato percorso ipotetico considerato rettilineo tra scoppio e geofono.

I vari valori così ottenuti sono stati analizzati con i metodi statistici; per ogni zona sono stati considerati il valore medio, la distribuzione di frequenza e la dispersione delle velocità.

(5) In realtà il percorso effettivo di ciascun impulso registrato è quello di minor tempo di percorrenza (brachistocronico). Esso coinciderebbe con il percorso in linea retta solo in alcuni casi (ad es. mezzo omogeneo e isotropo o con eventuali linee di discontinuità elastica normali al percorso considerato rettilineo).

Da qui ovviamente l'importanza di mantenere invariate quanto possibile le posizioni degli scoppi e dei geofoni nelle varie prove sia prima che dopo l'effettuazione delle cementazioni.

(6) Le variazioni medie di densità dovute alle cementazioni per le varie zone, risultarono al massimo dell'ordine del 2% e quindi trascurabili rispetto agli altri errori.

La dispersione dei valori in linea di massima può essere attribuita a tre fattori principali: a) errori casuali di misura; b) inomogeneità o anisotropia insita nella formazione considerata nel suo insieme; c) esistenza di zone localizzate con caratteristiche differenti dalla media.

a) Gli errori di misura sono dovuti essenzialmente agli errori sulla misura dei tempi. L'entità di tali errori può ovviamente ricavarsi dalle caratteristiche dell'apparecchiatura utilizzata per le misure e dalle condizioni di sperimentazione. Si può pertanto valutare l'errore medio su di una singola misura e quindi la probabilità di ottenere una data dispersione dei valori misurati nel caso di mezzo omogeneo ed isotropo (7).

b) La inomogeneità di parti di roccia, di dimensioni relativamente piccole, disposte con una certa regolarità o casualmente nel seno della massa rocciosa avrebbero influenzato in modo diverso i valori della velocità sui vari percorsi.

La relativa dispersione intorno al valore medio, valutata ad es. mediante lo scarto quadratico medio, poteva dunque costituire indice comparativo del grado di inomogeneità medio della roccia, sempre che fossero stati presi in considerazione percorsi di lunghezze non molto dissimili tra loro (8).

Anche l'anisotropia è fonte di dispersione; per es. in un mezzo stratificato, le velocità su percorsi paralleli alle stratificazioni sono, in media, più elevate che quelle su percorsi normali alle stratificazioni stesse.

Altra causa di dispersione può essere l'aumento medio della velocità con la profondità, che quasi sempre si verifica anche in rocce relativamente omogenee, spesso solo a causa di un aumento del carico soprastante. Tale fenomeno può essere messo in evidenza ad es. calcolando le medie e le relative varianze di percorsi che hanno interessato fasce di roccia a profondità crescente.

c) Zone estese particolarmente fratturate, eventualmente presenti, avrebbero interessato uno o più percorsi, a seconda delle dimensioni delle zone stesse, determinando valori medi anomali e dispersioni anomale. In tal caso, un controllo sulla posizione dei percorsi con velocità relativamente differenti avrebbe potuto consentire d'individuare, grosso modo, la ubicazione e la probabile estensione della zona anomala.

Se tale zona fosse risultata relativamente estesa, si sarebbe potuto scinderla dal resto dell'area inve-

(7) Ad esempio nel caso in esame mediamente si può considerare che l'errore medio di una singola misura sia di $\pm 0,3$ millisecondi e che per ogni zona si siano in genere mediate almeno 20 misure ottenute; la deviazione standard dei valori delle velocità, dovuta ai soli errori di misura, sarebbe perciò superiore a 0,5 millisecondi in un caso su 10.000. Poichè i valori dei tempi di percorrenza erano nell'ordine di 10 millisecondi, scarti quadratici medi percentuali superiori al 5%, sarebbero stati estremamente improbabili nell'ipotesi di rocce omogenee ed isotrope.

(8) È ovvio ad es. che in una stessa porzione di roccia costituita da un insieme di parti di differenti caratteristiche elastiche, la dispersione dei valori delle velocità è maggiore quando le misure vengono eseguite su tratti di lunghezza dello stesso ordine di grandezza (o inferiori) delle dimensioni delle parti costituenti la roccia stessa.

stigata e calcolarne a parte il relativo valore medio delle velocità e la varianza.

Tale procedimento ovviamente doveva essere seguito nelle zone manifestamente costituite da più di una formazione geologica.

Alla fine di ciascun ciclo di misura effettuato su di una zona, si sarebbe dovuto ottenere un quadro sullo stato della roccia costituente la zona stessa.

Le cementazioni avevano ovviamente lo scopo di ridurre il grado di inomogeneità della roccia (soprattutto nel caso di presenza di zone anomale) e di migliorarne le caratteristiche meccaniche, e di tenuta.

Una buona riuscita delle cementazioni (almeno dal punto di vista elastico) doveva pertanto portare, per ogni singola zona, ad un aumento del valore medio delle velocità e ad una diminuzione della deviazione standard.

L'entità di tali variazioni ed un confronto tra i vari valori delle medie e degli scarti quadratici medi delle velocità in tutte le diverse zone costituite dallo stesso tipo di roccia, avrebbero permesso un giudizio comparativo dell'efficacia delle cementazioni nelle varie zone e avrebbero indicato se e dove si dovesse intervenire con successive fasi di cementazioni.

Ovviamente non si sarebbe mai potuto ottenere una diminuzione della varianza oltre un certo limite, a causa sia degli inevitabili errori di misura, sia dell'esistenza di una eventuale inomogeneità propria o anisotropia della roccia, non eliminabile con le cementazioni.

4 - Schemi operativi per le cementazioni e i controlli

I lavori di cementazione da sottoporre a controllo riguardavano il consolidamento della roccia di fon-

dazione di una diga di calcestruzzo ⁽⁹⁾.

I terreni interessati dalle fondazioni della diga e dal consolidamento erano costituiti da ⁽¹⁰⁾ una formazione di conglomerati lapidei, in grossi banchi, in genere ottimamente cementati, costituiti da ciottoli di vario tipo e dimensioni, annegati in una pasta arenacea ad elementi prevalentemente quarzosi e feldspatici a cemento calcitico.

Questo complesso conglomeratico era sormontato da una pila di strati di arenarie tenacemente cementate ed ancora lapidee alle quali, procedendo verso l'alto, si alternavano, sino a divenire predominanti, arenarie tenere a cemento almeno in parte argilloso ed anche argilla sabbiosa (fig. 5).

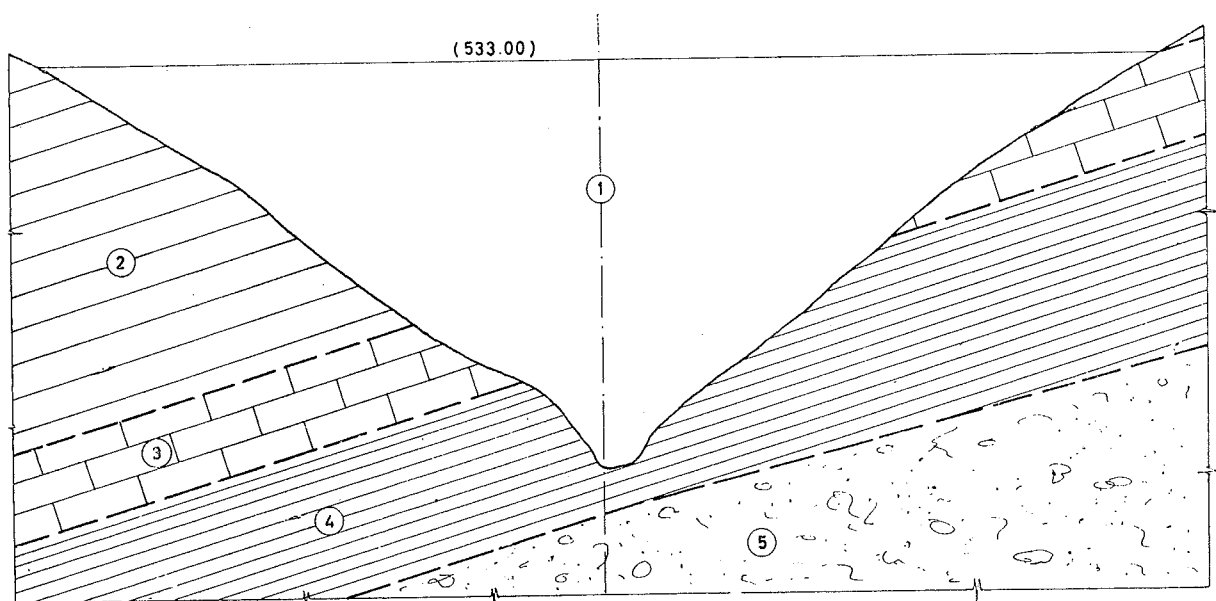
La formazione arenacea, fra sponda destra e sinistra, presentava una disuniformità di condizioni di fratturazione e conservazione probabilmente legata in parte alla differente costituzione dei vari livelli ed al loro diverso comportamento rispetto alle sollecitazioni tettoniche, in parte ai diversi rapporti esistenti sulle due sponde fra la morfologia della stretta e la giacitura della stratificazione.

Riassumendo, nella roccia di fondazione potevano individuarsi, sotto il profilo geologico-tecnico tre zone distinte:

— la parte centrale, costituita dai conglomerati lapidei, con caratteristiche elastiche ottime come roc-

⁽⁹⁾ Diga di Pietra del Pertusillo sul f. Agri [7]: Tipo ad arco gravità - altezza massima sulle fondazioni m 94 - volume di calcestruzzo mc 400.000 - invaso 155 × 10⁶ mc. Realizzata dall'Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione e la Trasformazione Fondiaria in Puglia e Lucania su progetto dei Proff. Ingg. C. DRIOLI e G. OBERTI. Lavori eseguiti dalla Soc. Italiana per Condotte di Acqua e dalla Impresa Rodio & C. sotto la direzione dello Studio d'Ingegneria CARLO LOTTI & C.

⁽¹⁰⁾ Dati ripresi dalla relazione geologico-tecnica a firma Prof. Ing. F. PENTA e Dr. Ing. F. CAPOZZA.



- 1 Diga
- 2 - Arenarie tenere
- 3 - Arenarie lapidee
- 4 - Conglomerati lapidei
- 5 - Complesso marnoso-argilloso-arenaceo

Fig. 5 - Schema geologico della zona di imposta della diga.

cia in sè, ma meno buone se riferite all'intera formazione, per la presenza di una fitta rete di fratture;

— la spalla destra, costituita da arenarie con caratteristiche elastiche buone nella parte inferiore e poi via via degradanti verso l'alto per effetto di intercalazioni di arenarie tenere e argillose sempre più frequenti;

— la spalla sinistra, costituita da arenarie lapidee e quindi con buone caratteristiche elastiche intrinseche, ma mediocri come formazione per l'accentuato stato di disturbo provocato dai movimenti tettonici specie nella parte alta della spalla.

Il problema che si presentava per poter impostare sulla formazione sopra descritta una diga di tipo arcuato, era accertare se, attraverso iniezioni cementizie, si potevano migliorare le caratteristiche elastiche della roccia, onde assicurare lungo tutta la sezione di imposta congrue e uniformi caratteristiche di deformabilità.

A tale scopo, vennero eseguiti consolidamenti preliminari in zone ristrette della superficie di imposta della diga sia per mettere a punto la tecnica più idonea da adottare per le iniezioni sia per controllare i miglioramenti delle caratteristiche meccaniche della roccia conseguibili attraverso le iniezioni stesse.

Il controllo dei risultati di tali consolidamenti preliminari venne eseguito con il metodo sismico ⁽¹⁾ e — in parallelo — con il metodo tradizionale di misura in sito di deformazioni sotto carichi costanti: è stato così possibile controllare la congruità delle indicazioni fornite dai due metodi adottati.

Accertata, attraverso tali consolidamenti e controlli preliminari, la possibilità di migliore ed omogeneizzare le caratteristiche di deformabilità della roccia fino ai valori che ci si era prefisso di raggiungere, si passò al lavoro di consolidamento vero e proprio lasciando al metodo sismico il compito di controllare in maniera sistematica il miglioramento ottenuto.

(1) Si veda la precedente nota 3.

L'ammasso roccioso da consolidare riguardava la intera imposta della diga per una superficie di circa m^2 12.000 (compresi alcuni allargamenti effettuati in corrispondenza dei conci centrali della diga nella zona di minore spessore della formazione conglomeratica) e per un volume di circa $300.000 m^3$ di roccia.

La perforazione dei fori per iniezione venne eseguita con sonde a rotazione con corone del diametro di mm 36.

L'iniezione della miscela (acqua-cemento) venne effettuata dall'alto per sezioni discendenti di 5 m.

Il lavoro di iniezione venne diviso in due fasi separate:

— una prima passata a bassa pressione, per intasare le fessure maggiori, con pressioni variabili da 1,5 a 30 atm al variare della profondità della sezione da iniettare;

— una seconda passata, a pressione elevata, per intasare le fessure più minute, con pressioni variabili da 4 a 65 atm.

L'interasse dei fori, per ogni passata, venne fissato in m 4 per la parte media e alta dell'imposta e m 3 per la parte centrale, per cui in definitiva l'interasse dei fori risultò di m 2,80 per la parte alta della fondazione e di m 2,10 circa per la zona centrale.

I consumi di miscela iniettata sono risultati di circa 100.000 q.li di cemento con un consumo unitario di q.li 0,33 per m^3 di roccia iniettata e di q.li 1,00 per ml di foro.

Queste cifre danno un'idea dell'importanza e della mole del lavoro di consolidamento svolto.

Il controllo con il metodo sismico dei risultati conseguiti con il lavoro di consolidamento è stato svolto nel modo seguente:

L'intera superficie interessata dalle iniezioni di consolidamento è stata divisa in 18 zone (fig. 6) in ognuna delle quali è stata eseguita una serie di registrazioni di velocità di propagazione di onde elastiche longitudinali provocate da scoppi di modeste cariche di esplosivo (generalmente di circa Kg 0,2 di gelignite o GDI).

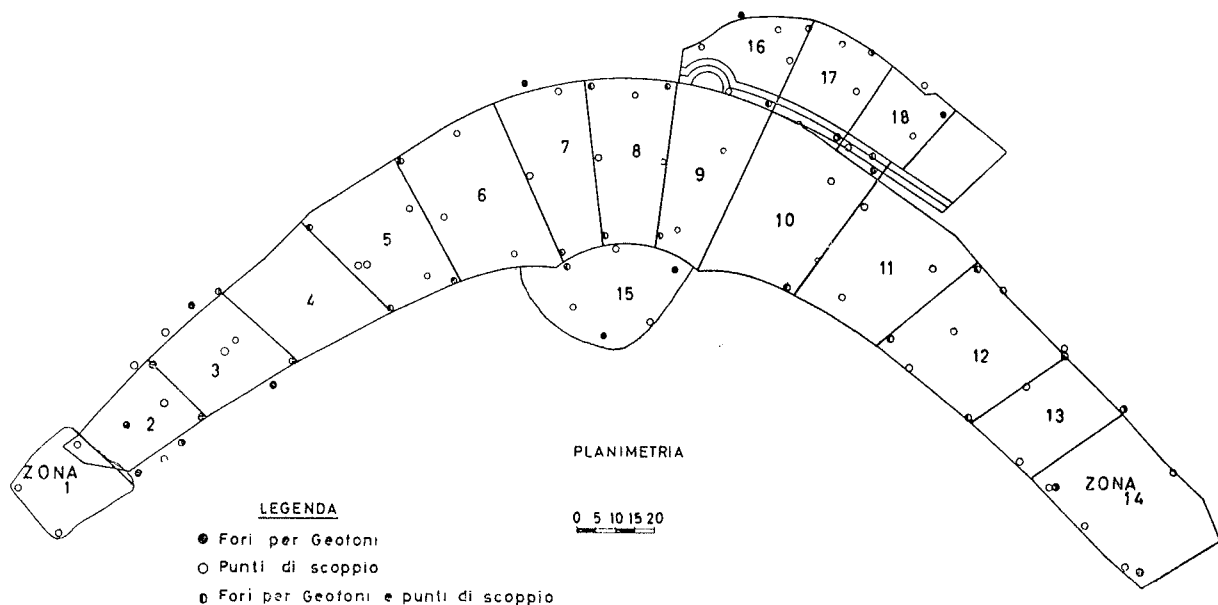
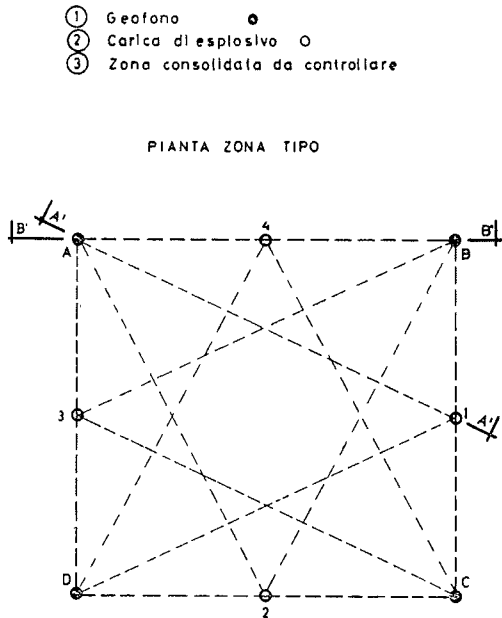


Fig. 6 - Planimetria della zona interessata dai controlli.

Ogni serie di registrazioni è stata effettuata in ogni zona prima del consolidamento e ripetuta dopo l'esecuzione della seconda passata di iniezioni ad alta pressione, avendo cura di ubicare i punti di scoppio e di registrazione relativi alla seconda fase nelle stesse posizioni adottate nella prima fase.

Lo schema operativo seguito in ogni zona era generalmente il seguente (fig. 7):



zioni di onde elastiche secondo i 9 percorsi dal punto di scoppio a ognuno dei 9 geofoni rimasti negli altri 3 fori;

— si toglievano quindi i geofoni da un altro foro, per esempio il foro B, e si ripeteva per esso lo stesso schema precedente ottenendo questa volta $2 \times 6 = 12$ registrazioni essendo 6 i geofoni rimasti nei fori C e D.

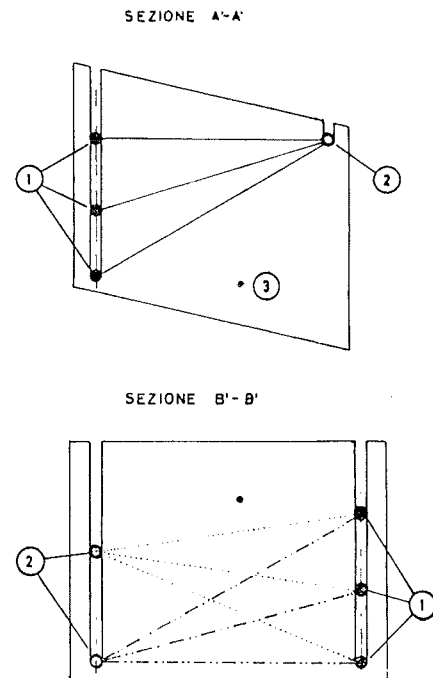


Fig. 7 - Schema operativo dei controlli sismici.

— Ai quattro angoli della zona da controllare venivano eseguiti con sonde a rotazione quattro fori verticali (A, B, C e D) del diametro di mm 65 spinti fino alla profondità massima del consolidamento (da 20 a 30 metri); in ognuno di tali fori venivano posti 3 geofoni a profondità di 1/3, 2/3 e 3/3 della profondità massima;

— lungo ciascuno dei quattro lati della zona in esame veniva quindi eseguito, con martello perforatore, generalmente al centro di ogni lato, un foro della lunghezza di circa m 2,00 ove veniva sistemata una carica di esplosivo (fori n. 1, 2-3 e 4);

— i 12 geofoni sistemati nei fori A, B, C e D erano collegati con l'apparecchiatura di amplificazione e registrazione;

— provocato il primo scoppio nel foro n. 1 veniva successivamente fatta brillare la carica di esplosivo nei fori 2, 3 e 4: si ottenevano così per ogni scoppio 12 registrazioni di onde elastiche secondo 12 percorsi dal punto di scoppio ad ognuno dei 12 geofoni;

— successivamente si toglievano i geofoni da un foro, per esempio il foro A, e si provocavano successivamente due scoppi in tale foro immettendovi una carica di esplosivo prima sul fondo, poi a metà altezza.

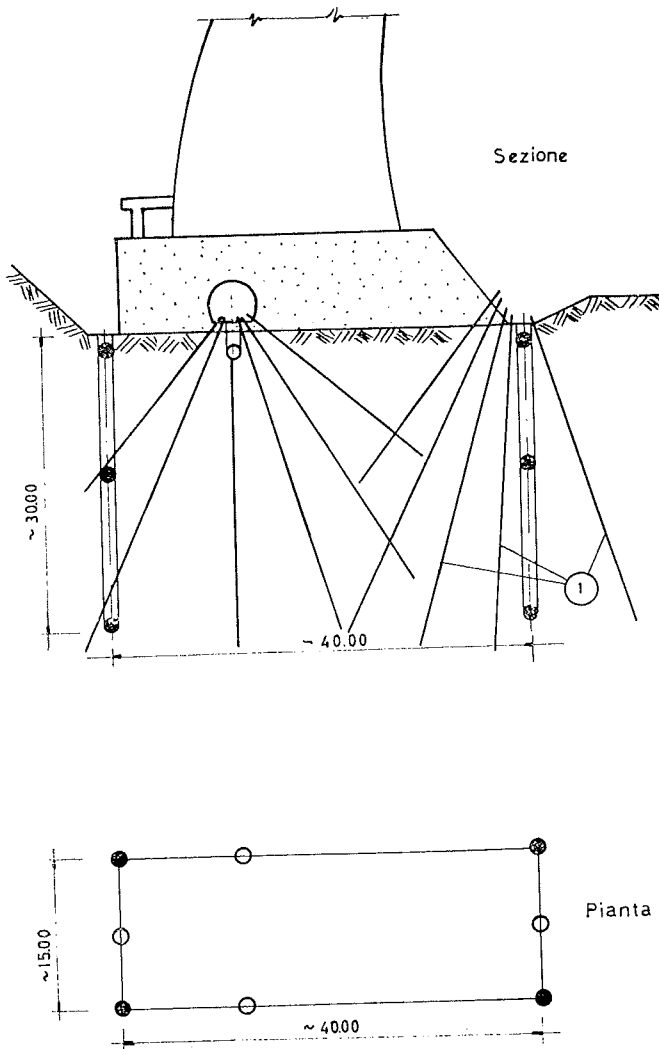
Si ottenevano così, per ogni scoppio, 9 registra-

In totale si ottenevano così, per ogni zona, $48 + 18 + 12 = 78$ registrazioni di velocità di propagazione di onde elastiche lungo svariatissime direzioni.

Lo schema operativo precedentemente illustrato si è mantenuto per il controllo, dopo il consolidamento, delle zone centrali; zone nelle quali la seconda passata di iniezioni venne effettuata dopo il getto del pulvino della diga, sia per conseguire un miglior effetto di intasamento della zona superficiale della roccia di fondazione, sia per ragioni operative connesse con il programma dei getti.

In tali zone il controllo del consolidamento venne effettuato utilizzando, per l'ubicazione dei fori di scoppio, il cunicolo longitudinale esistente al piede della diga mentre i geofoni erano posti in fori perforati dall'esterno in corrispondenza delle unghie di valle e di monte del pulvino della diga (fig. 8) ⁽¹²⁾.

⁽¹²⁾ Tale tipo di controllo effettuato durante la fase dei getti, a nostro avviso, potrebbe essere generalizzato ed esteso, in maniera sistematica, per controllare efficacemente, sempre fornendo indicazioni per lo meno di valore comparativo, il comportamento della roccia di fondazione sotto il carico indotto dalle opere e sotto l'effetto del carico idrostatico e delle eventuali filtrazioni nelle fasi di invaso.



- ① Fori di iniezione
 ● Geofoni
 ○ Punti di scoppio

Fig. 8 - Schema operativo dei controlli sismici nelle zone centrali.

5 - Elaborazione dei risultati dei controlli sismici

Lo schema di registrazione precedentemente indicato è stato mantenuto, per quanto possibile, in tutte le fasi di controllo. Per ogni fase, in ciascuna delle 18 zone indicate nella fig. 6, sono stati ottenuti un certo numero di valori della velocità, relativi sia ad onde registrate in foro alle varie profondità e originate con cariche fatte esplodere in superficie, sia ad onde registrate e originate nei fori di sonda.

I valori della velocità risultano dispersi entro un intervallo più o meno vasto come si rileva nella figura 9 riportata a titolo di esempio, nella quale sono rappresentati gli istogrammi di frequenza dei valori della velocità ottenuti nella zona 3 (vedi figura 6), nei controlli eseguiti rispettivamente prima e

dopo le iniezioni di consolidamento. Da un confronto degli istogrammi, appare evidente che i valori ottenuti dopo le iniezioni sono meno dispersi e che le frequenze più alte si hanno in corrispondenza dei valori maggiori della velocità.

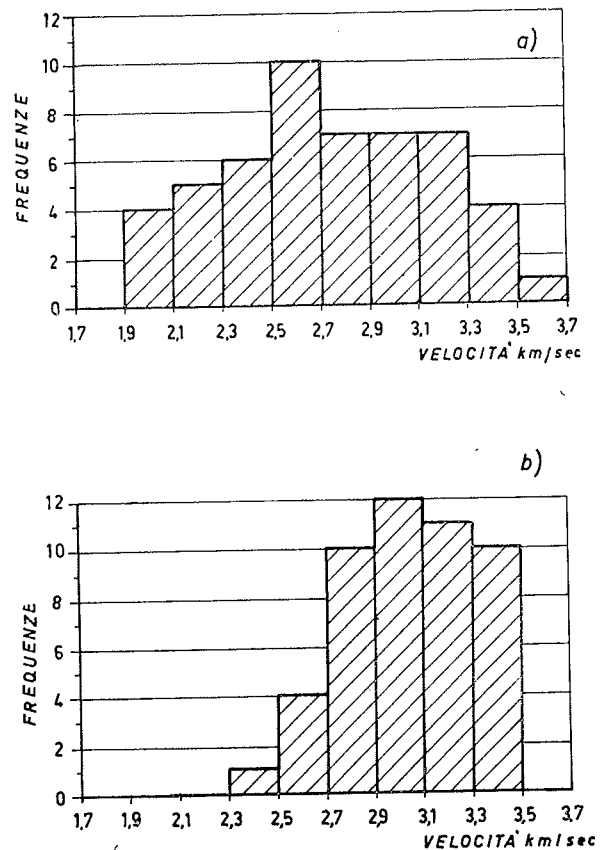


Fig. 9 - Istogrammi dei valori della velocità misurata nella zona 3.
 a) prima del consolidamento.
 b) dopo il consolidamento.

Risultati analoghi sono stati riscontrati nelle prove effettuate sulle altre zone; sono cioè confermate, almeno qualitativamente, le considerazioni sugli effetti del consolidamento già premesse nel paragrafo 3.

Da una prima analisi della distribuzione dei vari valori della velocità, è risultato inoltre che le velocità relative a percorsi interessanti zone più profonde, sono in media, più elevate.

Nella tabella I sono riportati a titolo di esempio i valori medi \bar{x}_i e gli scarti quadratici S_i relativi alla zona 3, calcolati su vari gruppi di valori delle velocità per percorsi che interessano profondità via via maggiori. I primi tre gruppi si riferiscono a scoppi effettuati in superficie, mentre il quarto si riferisce a registrazioni con scoppio in foro.

Per un esame comparativo di prima approssimazione dei risultati ottenuti nelle diverse zone prima e dopo le iniezioni, si è calcolata per ciascuna zona la media aritmetica \bar{X} delle medie \bar{x}_i dei singoli gruppi di percorsi (vedi tab. II colonne 3 e 6).

TABELLA I
(zona n. 3)

Gruppo	Prof. del punto di scoppio (dal p.c.) m	Prof. dei geofoni (dal p.c.) m	Prima delle iniezioni			Dopo le iniezioni		
			n	valore medio \bar{x}_i (Km/sec)	scarto S_i (Km/sec)	n	valore medio \bar{x}_i (Km/sec)	scarto S_i (Km/sec)
1	1	7	12	2,22	0,19	4	2,70	0,25
2	1	14	12	2,58	0,25	14	2,80	0,20
3	1	20	17	2,87	0,27	18	3,11	0,18
4	20	da 7 a 20	10	3,20	0,18	12	3,16	0,21

Come indice della dispersione dei valori della velocità nell'ambito della zona stessa, si è calcolato il valore

$$S^2 = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N S_i^2 + \sum_{i=1}^N (\bar{x}_i - \bar{X})^2 \right]$$

dove:

N è il numero dei gruppi di percorsi considerati; nel nostro caso $N = 4$;

nella tabella stessa sono indicate: nella seconda colonna, le formazioni geologiche costituenti le varie zone e nelle colonne 5 e 8 i valori degli scarti percentuali $U = S/\bar{X}$.

Dal confronto dei valori ottenuti prima e dopo le iniezioni, si può notare:

1) i valori medi delle velocità \bar{X} risultano dopo le iniezioni più elevati; fanno eccezione le zone 7, 8, 15 e 16 nelle quali i valori di \bar{X} prima del consolidamento erano già molto elevati. Peraltro la diminuzione di \bar{X} , in queste zone, è molto piccola e rien-

TABELLA II

Zona	Formazione geologica	Prima del trattamento			Dopo il trattamento		
		valore medio \bar{x} Km/sec	$S^2 \cdot 10^2$	S/\bar{x} scarto perc. U %	valore medio \bar{x} Km/sec	$S^2 \cdot 10^2$	S/\bar{x} scarto perc. U %
1	a	2,67	5,3	8,5	2,76	7,5	9,5
2	a	2,73	41	23,5	2,85	18	14,5
3	a	2,71	18	14,5	2,94	8,5	10
4	a	2,50	35	23,5	2,85	8,5	10
5	a	2,79	14	13,5	2,85	10	11
6	c	3,70	—	—	3,95	—	—
7	c	3,88	31	14,5	4,04	11	8
8	c	4,16	3,5	4	4,09	8,5	7
9	c	3,97	12	9	3,98	13	9
10	c	3,59	25	14	3,78	17	11
11	c	3,62	12	9,5	3,83	13,5	9,5
12	c	3,27	12	10,5	3,59	18	12,0
13	a + c	2,82	11	11,5	3,03	15	13
14	a + c	2,76	20	16,5	3,28	10	10
15	c	2,91	20	15	3,44	14	10,5
16	c	4,11	8	7	4,02	6	6
17	c	3,80	18	11	3,70	10	8,5
18	c	3,41	13	10,5	3,62	9	8,5
18	c	3,27	35	17,5	3,57	17	12

a = arenarie
c = conglomerati

$$S_i^2 = \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ji} - \bar{x}_i)^2 / n_i - 1$$

con n_i = numero dei valori nel gruppo iesimo.

I valori così calcolati sono stati riportati nelle colonne 4 e 7 della tabella II. Per maggiore chiarezza,

tra nei limiti di approssimazione delle misure.

2) Le dispersioni dei valori in generale sono più basse dopo le iniezioni; ciò si verifica in particolar modo nelle zone (ad es. 2-4-6 e 18) nelle quali i valori iniziali (prima delle iniezioni) erano molto dispersi.

I valori più frequenti degli scarti percentuali U,

dopo le iniezioni, sono strettamente raggruppati intorno a 8-10 ‰, come risulta nell'istogramma della fig. 10. Per contro gli stessi scarti percentuali prima delle iniezioni erano fortemente dispersi.

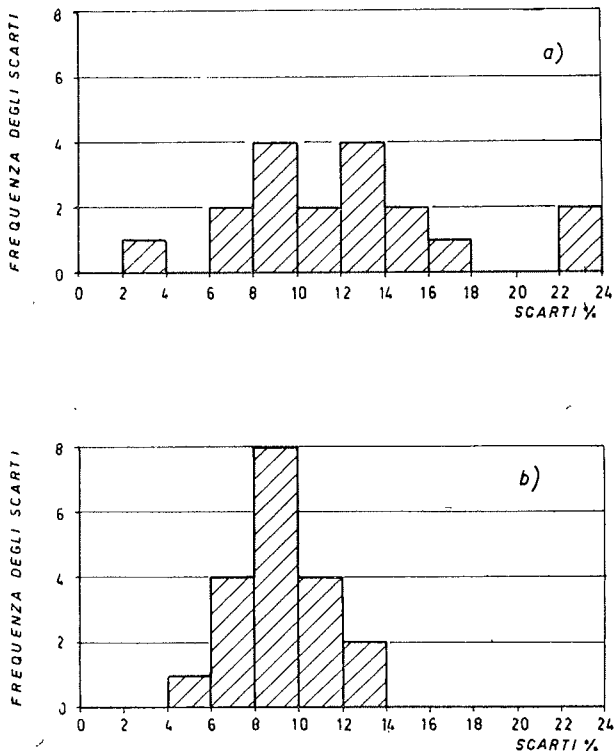


Fig. 10 - Iistogrammi degli scarti percentuali nell'ambito delle varie zone.

a) prima delle iniezioni
b) dopo le iniezioni.

Nella tabella III sono stati inoltre riportati i valori medi ottenuti nel complesso delle zone costituite dalle diverse formazioni geologiche.

Si sono esaminate più in dettaglio le zone entro le quali (anche dopo le iniezioni) si sono riscontrati scarti percentuali relativamente elevati.

Nelle zone 11 e 12, i percorsi con velocità maggiori e minori si presentavano distribuiti entro le zone stesse in modo apparentemente casuale; ciò potrebbe indicare una relativamente elevata inomogeneità media in tutta la zona.

Nelle zone 2 e 18, invece, i percorsi caratterizzati da velocità minori risultavano abbastanza chiaramente raggruppati rispettivamente entro una porzione di piccole dimensioni nella zona 2 ed entro circa la metà verso monte della zona 18.

Sono quindi considerate separatamente le porzioni « anomale » e « normali » delle due zone; i valori della velocità delle quattro porzioni così ottenute sono stati elaborati nel modo già detto in precedenza. I risultati sono riportati nella tabella IV. Si può notare che mentre i valori medi (\bar{X}) delle porzioni « anomale » sono nettamente più bassi dei corrispondenti valori delle porzioni « normali », gli scarti in ogni singola porzione sono del tutto paragonabili a quelli relativi alle altre zone.

Risulta perciò molto probabile che nelle zone 2 e 18 la dispersione particolarmente elevata (vedi tabella IV) sia da attribuire alla presenza in ciascuna zona di due porzioni distinte con velocità medie molto diverse. Dato che nell'ambito di ciascuna zona non varia la natura litologica, tali porzioni dovrebbero corrispondere a parti con diverso grado di fratturazione.

Per chiarezza, nella fig. 11 si sono riportati gli istogrammi delle velocità riscontrate nell'intera zona 18 (a), nella porzione « anomala » a bassa velocità media (b) e nella porzione « normale » (c).

È risultato così possibile, con il metodo impiegato, di riconoscere la presenza di zone nel loro complesso più fratturate, in rapporto ad altre di uguale costituzione geologica, ed inoltre di individuare, nell'ambito di una singola zona petrograficamente omogenea, la presenza di porzioni distinte particolarmente fratturate.

TABELLA III

Zone	Prima del trattamento			Dopo il trattamento		
	media delle medie delle zone \bar{X} Km/sec	S	scarto percentuale U %	media delle medie delle zone \bar{X} Km/sec	S	scarto percentuale U %
Zone costituite da arenarie (1+2+3+4+5)	2,68	0,11	4	2,85	0,06	2
Zone costituite da conglomerati (5+6+7+8+9+10+11+12+15+16+17+18)	3,63	0,39	11	3,76	0,29	8
Zone miste 13+14	2,83	0,08	3	3,36	0,08	2
Totalità delle zone	3,29	0,55	17	3,48	0,46	13

TABELLA IV

Zona	Porzione	Formazione geologica	Prima del trattamento			Dopo il trattamento		
			valore medio in Km/sec \bar{X}	$S^2 \cdot 10^2$	scarti percentuali U %	valore medio in Km/sec \bar{X}	$S^2 \cdot 10^2$	scarti percentuali U %
18	normale	c	3,78	12	9,5	3,82	7	7
	anomala	c	3,01	12	11,5	3,24	13	11,5
2	normale	a	3,00	11	11	3,06	6	8
	anomala	a	1,63	9	18	2,28	5	10
	anomala	a	Dopo una terza passata di iniezioni			2,47	3	7

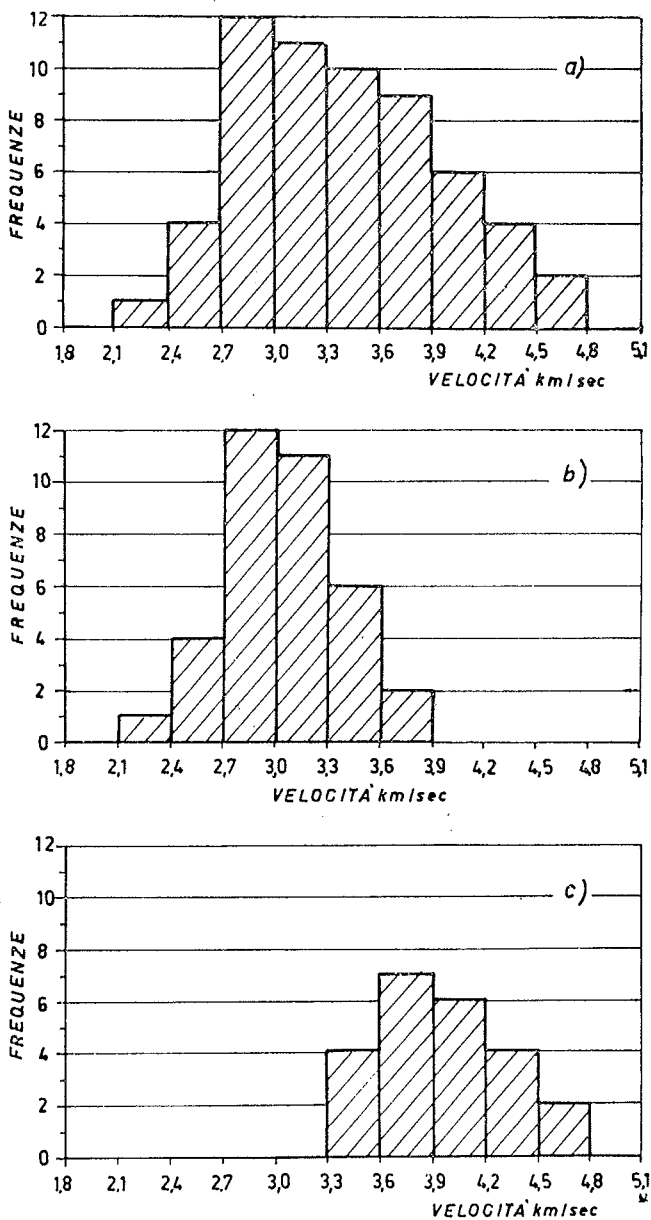


Fig. 11 - Istogrammi dei valori della velocità misurati nella zona 18.

- a) nell'intera zona
- b) nella porzione « anomala » con bassa velocità media
- c) nella porzione « normale ».

6 - Conclusioni

I valori delle velocità riscontrate nelle varie zone prima del consolidamento hanno in generale confermato le previsioni sulle caratteristiche meccaniche delle rocce di fondazione maturate sulla base delle indagini geologiche.

I valori medi delle velocità ricavate per ogni zona dopo il consolidamento hanno confermato l'efficacia del trattamento. I valori delle velocità medie sono di regola aumentati ed inoltre, cosa più importante, sono aumentati maggiormente i valori più bassi: la indagine sismica ha cioè consentito di accertare non solo un generale miglioramento delle caratteristiche meccaniche della roccia consolidata ma anche il raggiungimento di una loro maggiore uniformità.

Considerando un coefficiente di Poisson di 0,25 ed una densità di 2,65 tonn/m³, dai valori delle velocità sono stati determinati i valori dei moduli di Young dinamici, cui, peraltro, come già detto, deve essere attribuita la stessa significatività dei valori delle velocità.

Nella fig. 12 sono riportati i valori medi dei moduli dinamici, i valori degli assorbimenti di miscela cementizia e i risultati delle prove di permeabilità effettuate prima e dopo il consolidamento.

I valori medi generali del modulo dinamico sono passati da 241.000 Kg/cm² a 273.000 Kg/cm².

Infine l'indagine sismica ha messo in evidenza la presenza di porzioni particolari di roccia caratterizzate da velocità ancora particolarmente basse anche dopo il consolidamento.

La porzione « anomala » appartenente alla zona 18 non è stata presa in esame per un ulteriore trattamento in quanto non interessata direttamente dalle fondazioni della diga; d'altra parte era già noto che in tale zona, per la presenza di numerose linee di discontinuità tettoniche, la roccia presentava caratteristiche meccaniche scarse e difficilmente migliorabili.

Nella porzione « anomala » appartenente alla zona 2 si è invece intervenuti con una terza passata di iniezioni, durante la quale si verificò un ulteriore assorbimento di circa 0,75 qli/ml di foro.

I controlli sismici effettuati dopo tale ulteriore consolidamento indicarono un sensibile miglioramento

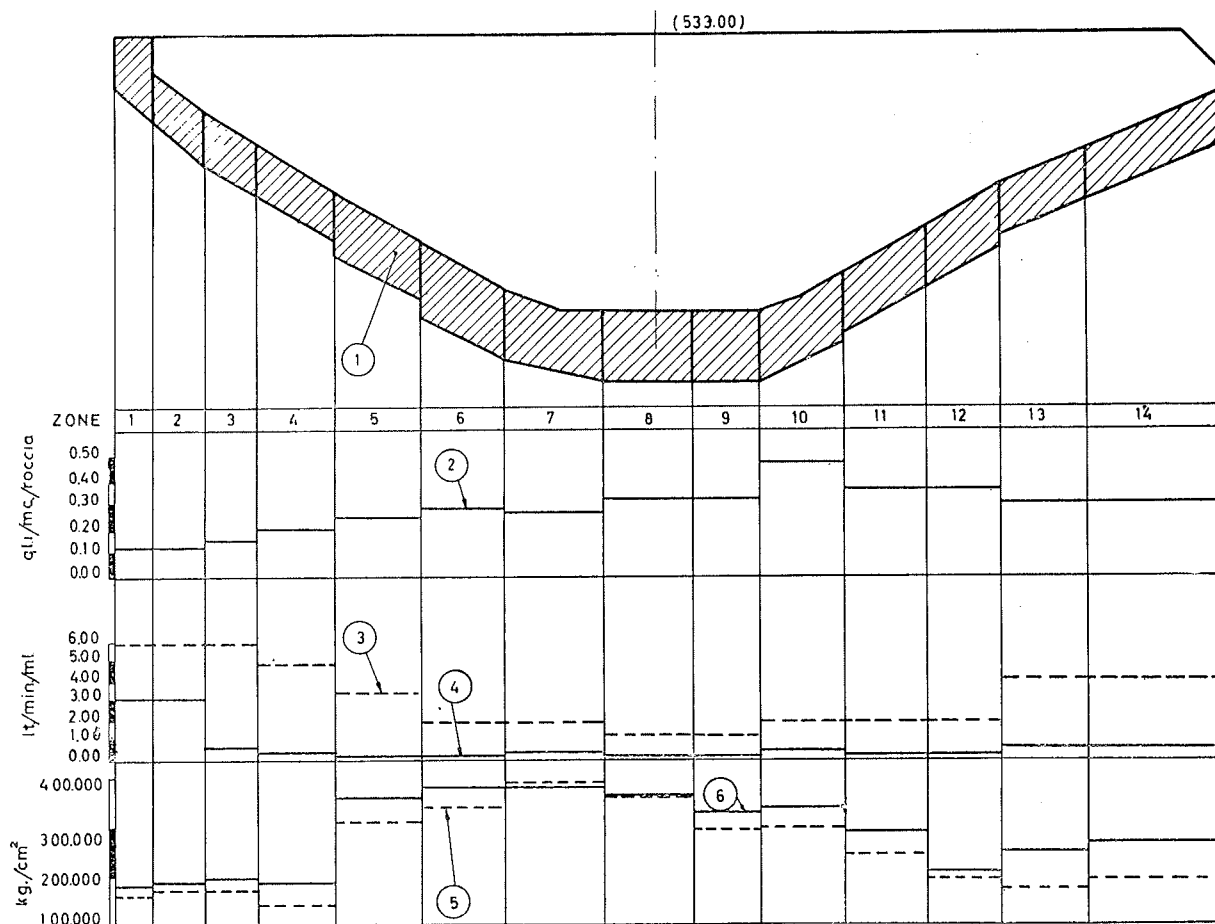


Fig. 12 - Diagrammi riepilogativi dei controlli.

del modulo elastico dinamico i cui valori si avvicinarono sensibilmente a quelli delle zone adiacenti ($E_D =$ circa 150.000 Kg/cm^2). Anche nelle prove di permeabilità, effettuate dopo tale intervento supplementivo nella zona « anomala », le perdite risultarono nulle.

Altro lato positivo del controllo con metodo sismico è stato quindi quello di individuare punti particolari nei quali, per fattori legati ad un'esecuzione in massa del lavoro, il trattamento di consolidamento non aveva sortito l'esito desiderato, consentendo un tal modo un tempestivo intervento di integrazione.

Concludendo quindi si può affermare, generalizzando il caso esaminato, che l'indagine sismica non costituisce solo un mezzo di controllo per la valutazione delle variazioni delle caratteristiche di una roccia oggetto di consolidamenti, ma anche una valida guida per indirizzare tempestivamente il lavoro di consolidamento stesso.

Bibliografia

- [1] M. BEOMONTE: *Resistenze di una miscela cemento-argilla in funzione della pressione di iniezione*, Geotecnica, n. 4, 1962.
- [2] P. CALOI: *Decadimento del modulo elastico in roccia a contatto con bacini idrici artificiali*, Annali di Geofisica, vol. VII, n. 4, ottobre 1954.
- [3] P. CALOI: *La Geofisica e le grandi dighe*, L'energia elettrica, anno XXXIX, 1, 1962.
- [4] P. CALOI: *Aspetti della dinamica di rocce, calcestruzzo ed acque*, Annali di Geofisica, vol. XV, n. 2-3, aprile-settembre 1962.
- [5] E. CARABELLI: *Misure dirette della velocità delle onde elastiche nella roccia di fondazione della diga di Beaugregard*, Rivista di Geofisica applicata, anno XV, n. 2, 1954.
- [6] A. HALD: *Statistical Theory with engineering applications*, John Wiley & Sons, New York, 1952.
- [7] C. LOTTI, M. BEOMONTE: *Execution and controls of consolidation works carried out in the foundation dock on an arch gravity dam*, Transaction of the eighth congress on large dams, Edimbourg, Great Britain, 1964.
- [8] L. SOLAINI: *Impiego di metodi geofisici per lo studio delle proprietà elastiche delle rocce*, L'Energia elettrica, volume XXXII, n. 6, 1955.
- [9] R. J. SWAIN: *Recent techniques for determination of « in situ » elastic properties and measurement of motion amplification in layered media*, Geophysics, vol. XXVII, n. 2, aprile 1962.
- [10] TSVI MEIDAV: *Discussion on « R. J. Swain - Recent techniques for determination of « in situ » elastic properties and measurement of motion amplification in layered media*, Geophysics, vol. XXVIII, n. 1, febbraio 1963.

UN EXEMPLE DE CONTRÔLE, PAR LA MÉTHODE SISMIQUE,
DES CARACTÉRISTIQUES D'UNE ROCHE CONSOLIDÉE

Sommaire: On expose les considérations qui ont déterminé le choix des appareils et la méthode utilisée pour le contrôle de l'efficacité d'un traitement pour la consolidation de la roche de fondation d'un barrage.

On explique le principe adopté pour l'analyse statistique des informations obtenues qui permettent de tirer soit les valeurs moyennes des caractéristiques élastiques de la roche, soit les indications de manque d'homogénéité moyenne, et de mettre en évidence les anomalies locales.

On décrit les travaux de consolidation et la méthode employée pour le contrôle.

AN EXAMPLE OF CHECKING THE PROPERTIES OF A CON-
SOLIDATED ROCK BY SEISMIC METHOD

Summary: Results of strengthening work of the foundation rock of a dam were to be checked. The authors describe how the instruments and the checking procedure were selected. Measurement results are elaborated by means of statistical methods.

So, the mean values of elastic properties of the medium and the mean-inhomogeneity index can be calculated and local anomalies evidenced. Strengthening work and methodology employed in the checking procedure are described.