

DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA MECCANICA DEL MATERIALE COSTITUENTE IL CORPO DI UNA DIGA DEL TIPO « ROCKFILL »

T. SILVESTRI (*)

SOMMARIO - Dopo alcuni brevi cenni descrittivi sulle caratteristiche e modalità esecutive di una diga del tipo "rockfill" si riferisce sulle prove eseguite con una speciale apparecchiatura, particolarmente adatta a materiali di grossa pezzatura, per la determinazione delle curve di rottura del materiale adoperato per la costruzione del corpo dello sbarramento.

Si discutono i risultati ottenuti ricavandone anche un'indicazione sul grado di sicurezza del rilevato.

1 - Premessa

La diga di Contrada Sabetta, presso Caselle in Pitari in provincia di Salerno, costituisce una delle opere più interessanti recentemente realizzate dalla Società Meridionale di Elettricità per l'utilizzazione idroelettrica del F. Bussento.

con paramento di monte impermeabile. Il rilevato è costituito da materiale lapideo sciolto (pietrame calcareo) gettato in opera alla rinfusa, sul quale è adagiato a monte un cuscino di pietrame più grosso sistemato a mano, costituente una vera e propria muratura a secco. Il manto di tenuta è realizzato con un doppio strato di lastroni in calcestruzzo con in-

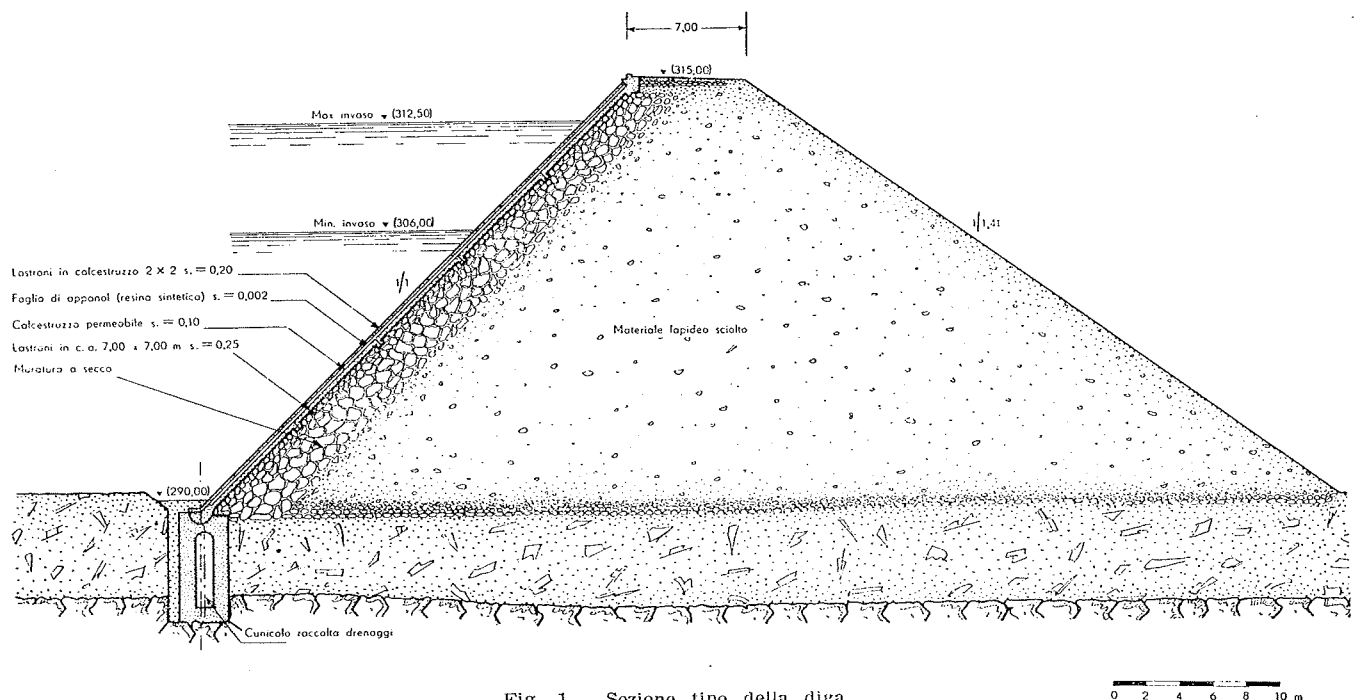


Fig. 1 - Sezione tipo della diga.

Lo sbarramento, che misura 26 m di altezza sul punto più depresso dell'alveo, è del tipo « rockfill »

terposti fogli di materiale impermeabilizzante. Al paramento di monte (finito) è stata assegnata una pendenza di 1 : 1.

Il pietrame che forma il corpo dello sbarramento venne integralmente ricavato da una cava aperta nei

(*) Dott. Ing. Tito SILVESTRI, della Società Meridionale di Elettricità.

pressi della sponda sinistra, circa 500 m a monte della sezione di ritenuta.

Quivi la formazione di calcari del Cretacico, che compare praticamente lungo l'intero corso del fiume in sinistra, presentava un costone molto ripido, e quindi particolarmente adatto all'apertura di un fronte di abbattimento alto una ventina di metri, nel quale la roccia, a strati sub-orizzontali, appariva sufficientemente sana.

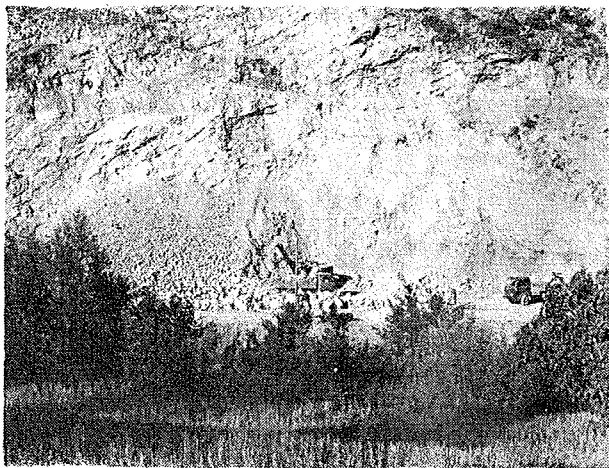


Fig. 2 - La cava.

Dopo aver sbancato un ampio piazzale al piede del fronte di attacco, a circa 20 m di altezza venne aperto nella roccia un gradone che consentì l'installazione delle perforatrici pueumatiche del tipo « wagon-drill », con le quali venivano eseguiti, fino ad una profondità di 20 m circa, i fori per la carica delle mine, disposti su due file a quinconce, con interasse di 2 m fra foro e foro; la volata veniva effettuata simultaneamente su un fronte di una quindicina di m. Il « tout venant » accumulatosi sul piazzale veniva successivamente mediante escavatore a cucchiaio frontale da 0,5 m³, caricato su automezzi ribaltabili dai quali veniva trasportato e scaricato direttamente dalle due spalle dello sbarramento a formare il rilevato. Durante la messa in opera il materiale veniva investito dall'alto e dal basso con potenti getti d'acqua lanciati da due « spingarde » con canna da 46 mm, di quelle in normale dotazione presso i VV.FF., alimentate da elettropompa da 4500 l/1', prevalenza 96 m.

Si otteneva in tal modo oltre che un'azione meccanica di costipamento, cui contribuiva il continuo passaggio degli automezzi carichi, un dilavamento della frazione più fina del « tout venant » che veniva trascinata dall'acqua, consentendo agli elementi più grossi di disporsi a diretto contatto fra di loro, e nello stesso tempo andava a riempire i vuoti fra elemento ed elemento negli strati sottostanti.

Il pietrame messo in opera con queste modalità venne a disporsi con la sua scarpa verso valle secondo una propria naturale pendenza, che è risultata a diga ultimata di 1 : 1,41,

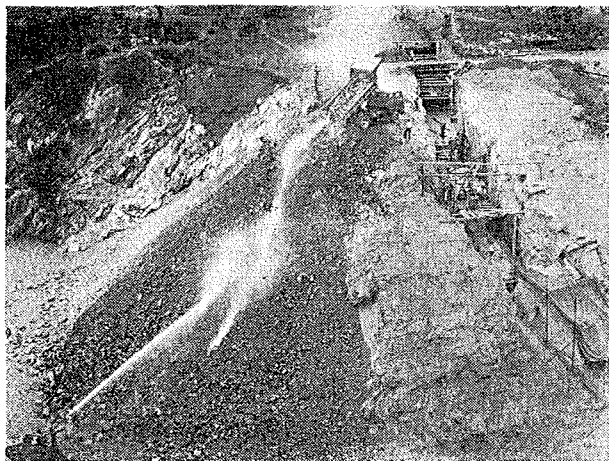


Fig. 3 - La spalla destra durante la costruzione.

Il peso specifico della roccia calcarea da cui è stato ricavato il pietrame è risultato 2,415 t/m³.

La composizione granulometrica del « tout venant » può rilevarsi dalla curva riportata in Fig. 4 che rappresenta la media di numerosi controlli eseguiti durante la costruzione. Il peso (secco) dell'unità di volume misurato in opera è risultato mediamente 1,810 t/m³, corrispondente ad una porosità del 25%.

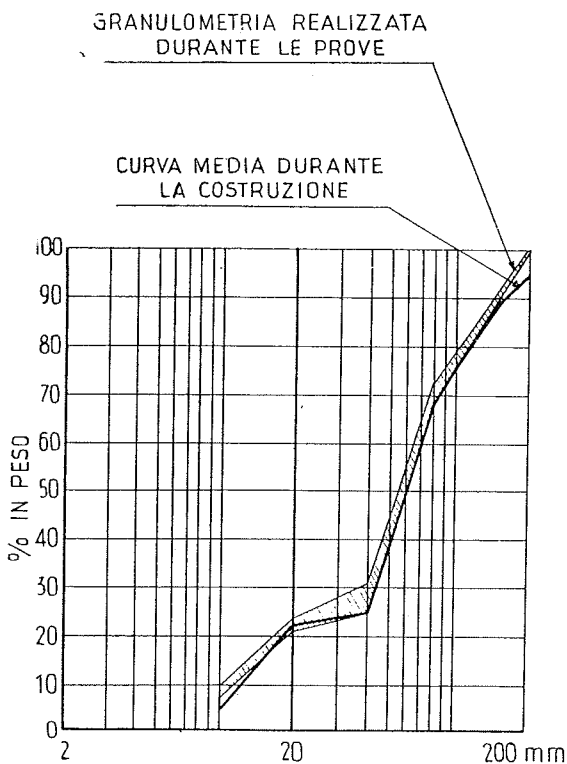


Fig. 4 - Curve granulometriche.

Per quanto concerne le caratteristiche di resistenza meccanica, per la riconosciuta impossibilità di servirsi dei normali mezzi di laboratorio, si è soliti far ricorso con materiali di così grossa pezzatura ad apparecchiature di grandi dimensioni,

Esistono nella letteratura diversi esempi in merito: il problema riveste notevole interesse per le numerose applicazioni pratiche che materiali del genere possono trovare nella tecnica costruttiva ⁽¹⁾. I dati esistenti però sono troppo pochi e frammentari per consentire un criterio di valutazione qualsiasi; venne perciò stabilito di eseguire prove dirette in sito con una speciale apparecchiatura appositamente predisposta.

La presente nota tratta appunto delle prove eseguite e dei risultati ottenuti.

2 - Descrizione dell'apparecchiatura - Modalità delle prove

L'apparecchiatura che venne adoperata per le prove, si ispira, naturalmente in scala molto maggiore, al ben noto apparecchio di CASAGRANDE per la misura della resistenza al taglio dei terreni in laboratorio; essa è costituita essenzialmente da una grossa scatola quadrata 1,60 x 1,60 m divisa secondo un piano orizzontale in due parti uguali, di altezza 40 cm ciascuna. Quella inferiore, in calcestruzzo, è incassata nella roccia e costituisce la parte fissa del-

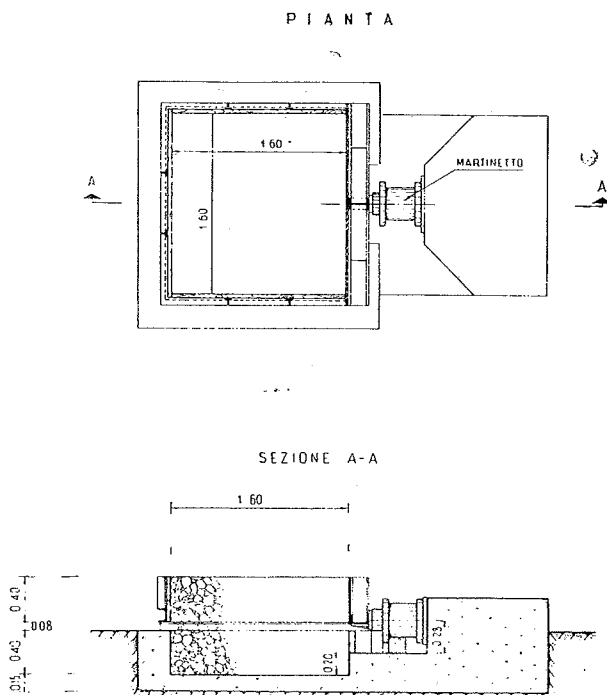


Fig. 5 - Apparecchiatura adoperata per le prove.

l'apparecchiatura. Su di essa può scorrere orizzontalmente, lungo due guide parallele, una robusta cassa con pareti in tavole di legno sostenute da un telaio molto rigido in profilati di ferro.

(1) Attualmente, sotto gli auspici dell'ANIDEL, è in corso, presso l'Istituto di Tecnica delle Fondazioni dell'Università di Napoli, una vasta ricerca sperimentale sulla resistenza alla compressione triassiale dei materiali a grana grossa.

Prima di ogni prova entrambe le parti della scatola venivano riempite di pietrame precedentemente classificato e dosato in modo da accostarsi il più possibile alla curva granulometrica media. Disponendo una zavorra di blocchi di cemento, pani di piombo, putrelle e rotaie di ferro, sulla superficie superiore del materiale, tramite un interposto tavolato atto ad assicurarne una ripartizione quanto più uniforme possibile, poteva ottenersi di volta in volta un valore differente del carico verticale totale N agente sulla sezione orizzontale mediana. In corrispondenza di ogni determinato valore di N , veniva quindi effettuata la prova di rottura a taglio: un martinetto idraulico, che riceveva il necessario contrasto da un appoggio in calcestruzzo, agendo sulla parte superiore (mobile) della cassa esercitava in corrispondenza della sezione orizzontale mediana (sezione scelta per la rottura) uno sforzo orizzontale T via via crescente.

Tutte le prove vennero eseguite con il sistema così detto a « carico controllato » facendo cioè aumentare la pressione del martinetto con velocità costante.

Per ognuno dei valori successivamente assunti dalla forza T veniva misurato lo spostamento orizzontale relativo delle due parti dell'apparecchiatura. Il carico trasmesso dal martinetto veniva progressivamente aumentato fino ad un valore T_{max} raggiunto il quale pur proseguendo nel pompaggio si aveva una leggera caduta di pressione, mentre lo scorrimento continuava ad aumentare.

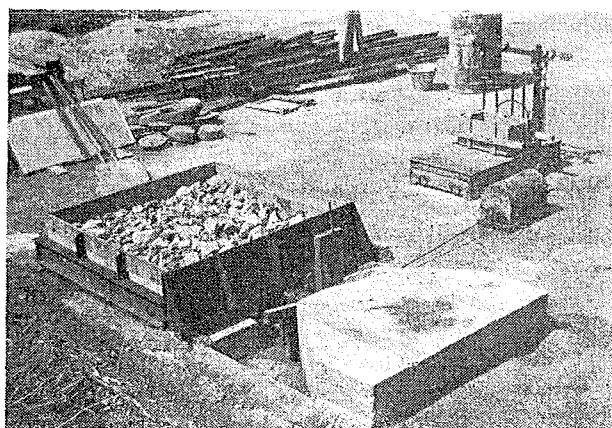


Fig. 6 - La scatola di prova dopo il riempimento col pietrame.

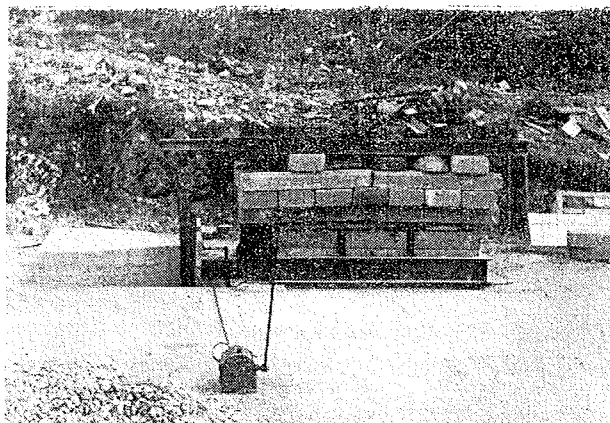


Fig. 7 - L'apparecchiatura pronta per una prova.

3 - Risultati delle prove

Complessivamente vennero eseguite 3 serie di prove, con lo stesso campione granulometrico di materiale (v. Fig. 4) variando però per ciascuna serie le condizioni di costipamento e umidità.

Un primo gruppo di prove venne eseguito vibrando energeticamente il pietrame, asciutto, nella cassa con un apposito vibratore ad immersione, di quelli comunemente in uso per calcestruzzi. Scopo della vibratura era di ottenere un efficace costipamento del materiale, e di avere un peso dell'unità di volume quanto più prossimo a quello misurato in opera che risultava, come già accennato sopra, $1,810 \text{ t/m}^3$.

In effetti si ottenne un valore leggermente inferiore: $1,774 \text{ t/m}^3$, corrispondente ad una porosità del 26%.

In Fig. 8 sono rappresentati i diagrammi degli spostamenti orizzontali misurati in corrispondenza dei valori via via assunti dalla forza orizzontale T trasmessa dal martinetto.

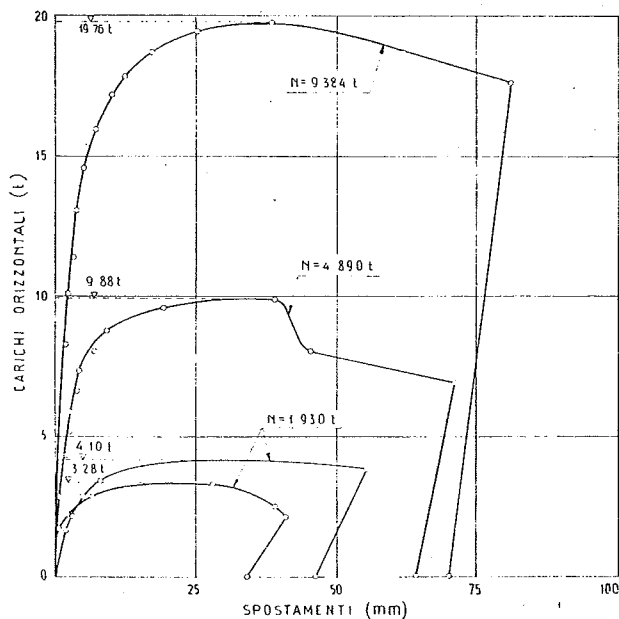


Fig. 8 - Diagrammi degli spostamenti orizzontali in funzione del carico al martinetto (materiale vibrato asciutto).

Riportando, per ciascuna prova effettuata, come ascissa il valore della zavorra applicata (carico verticale N) e come ordinata il valore T_{max} rilevato al martinetto, si è ottenuta la curva di rottura di Fig. 11 che risulta praticamente una retta passante per l'origine.

Un secondo gruppo di prove venne effettuato disponendo nella cassa il materiale, sempre asciutto, senza nessun costipamento. Ne risultò un peso di volume $\gamma = 1,622 \text{ t/m}^3$ corrispondente ad una porosità del 33%. In Fig. 9 sono riportati i diagrammi spostamenti orizzontali-pressione del martinetto; in Fig. 11 la retta di rottura.

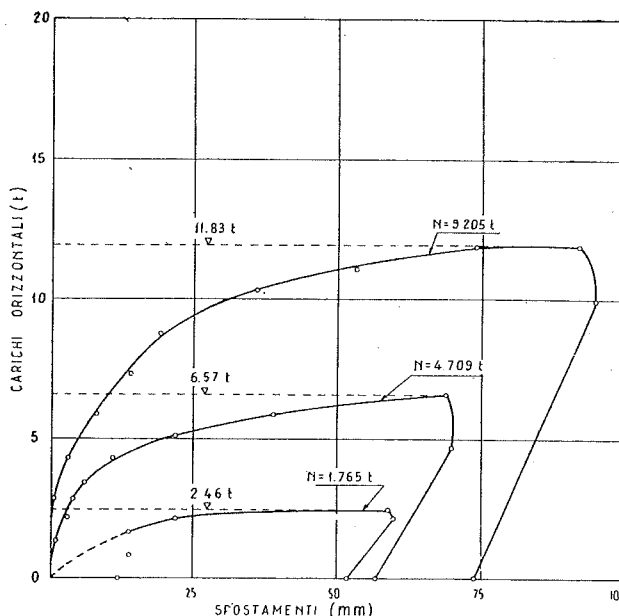


Fig. 9 - Diagrammi degli spostamenti orizzontali in funzione del carico al martinetto (materiale non vibrato asciutto).

Una terza ed ultima serie di prove venne effettuata con lo stesso peso di volume $\gamma = 1,622 \text{ t/m}^3$, riempiendo però di acqua la metà inferiore della cassa, sicché il materiale in essa contenuto risultava completamente saturo, ed innaffiando abbondantemente la metà superiore; nella sezione di rottura veniva quindi a trovarsi materiale sicuramente imbibito.

Nelle Figg. 10 e 11 sono riportate rispettivamente le curve spostamenti-carichi orizzontali e la retta di rottura ottenute in queste condizioni.

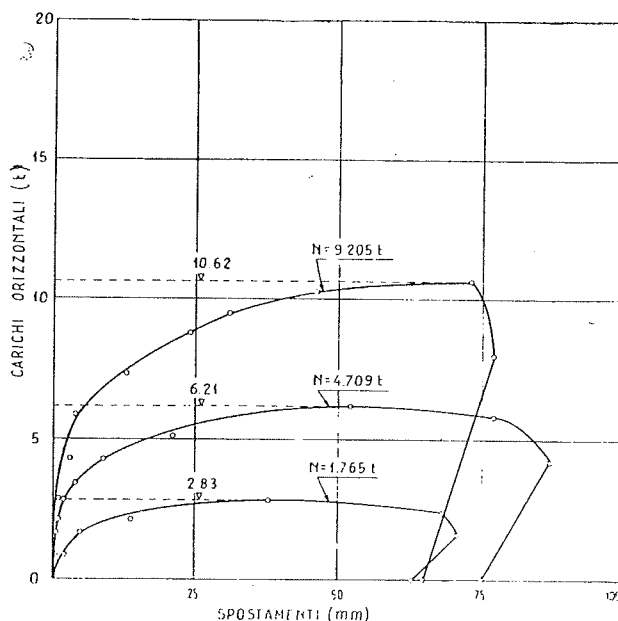


Fig. 10 - Diagrammi degli spostamenti orizzontali in funzione del carico al martinetto (materiale non vibrato bagnato).

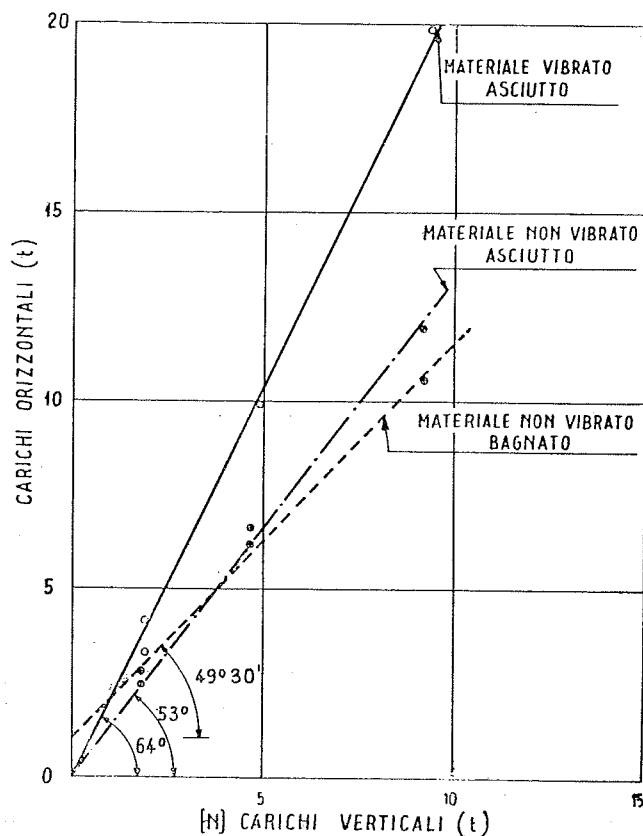


Fig. 11 - Linee di rottura.

4 - Conclusioni

Le prove eseguite, per quanto in numero limitato, consentono peraltro alcune considerazioni sulla resistenza meccanica del materiale adoperato per la costruzione della diga. Esse innanzitutto hanno confermato in maniera evidente quanto era facilmente prevedibile e cioè l'aumento del peso di volume (*costipamento*) ha una decisa influenza sul miglioramento delle caratteristiche meccaniche, mentre assai meno si risentono le variazioni di umidità derivanti da modalità costruttive o da eventi meteorologici.

Inoltre con riferimento alle curve di rottura di Fig. 11, si può rilevare come esse abbiano andamento perfettamente rettilineo per cui la resistenza del materiale può essere caratterizzata con i parametri c (valore dell'intercetta sull'asse delle ordinate delle curve di Fig. 11 diviso per l'area del campione) e φ (inclinazione sull'orizzontale delle stesse curve di Fig. 11) che risultano rispettivamente per le tre condizioni di stato esaminate:

- materiale vibrato asciutto ($\gamma = 1,774 \text{ t/m}^3$):
 $c = 0$; $\varphi = 64^\circ$
- materiale non vibrato asciutto ($\gamma = 1,622 \text{ t/m}^3$):
 $c = 0$; $\varphi = 53^\circ$
- materiale non vibrato bagnato ($\gamma = 1,622 \text{ t/m}^3$):
 $c = 0,4 \text{ t/m}^2$; $\varphi = 49^\circ 30'$

In analogia con le curve di rottura che si ottengono in laboratorio per una generica roccia sciolta, si

potrebbe anche qui essere indotti a parlare di *coesione* (c) e *angolo di attrito* (φ), caratterizzanti la resistenza al taglio del pietrame in opera sotto l'azione delle forze esterne. Il materiale sperimentato risulterebbe quindi praticamente privo di coesione ma dotato di resistenza di attrito assai elevata.

Non si è quindi avuto conferma a quanto riferito da alcuni autori [5] [6] circa l'esistenza di una non trascurabile « *coesione apparente* » in materiali a grana grossa e a spigoli vivi, coesione da essi attribuita all'« *ingranamento* » (interlocking) degli elementi lapidei fra di loro. In relazione agli elevati valori dell'angolo d'attrito misurati, si ritiene opportuno sottolineare come nelle prove effettuate, per i limiti stessi dell'apparecchiatura sperimentale, si siano raggiunti valori massimi delle sollecitazioni unitarie di $0,37$ e $0,77 \text{ kg/cm}^2$, rispettivamente per le pressioni verticali normali (σ) e per le tensioni tangenziali orizzontali (τ): il campo di valori esplorato risulta cioè sensibilmente al disotto delle massime sollecitazioni unitarie che effettivamente si verificano nel corpo della diga (ad es. la pressione verticale alla base del rilevato, in corrispondenza dell'altezza massima di 26 m , risulta: $26 \times 1,81 = 47 \text{ ton/m}^2 = 4,7 \text{ kg/cm}^2$).

Non è perciò da escludere che per valori più elevati di quelli sperimentati, la curva di rottura effettiva del materiale possa discostarsi dall'andamento rettilineo e presentare, ad esempio, una leggera concavità verso il basso (v. Fig. 12), con corrispondente diminuzione dell'angolo d'attrito; nulla peraltro risulta dalla letteratura a conferma di tale ipotesi.

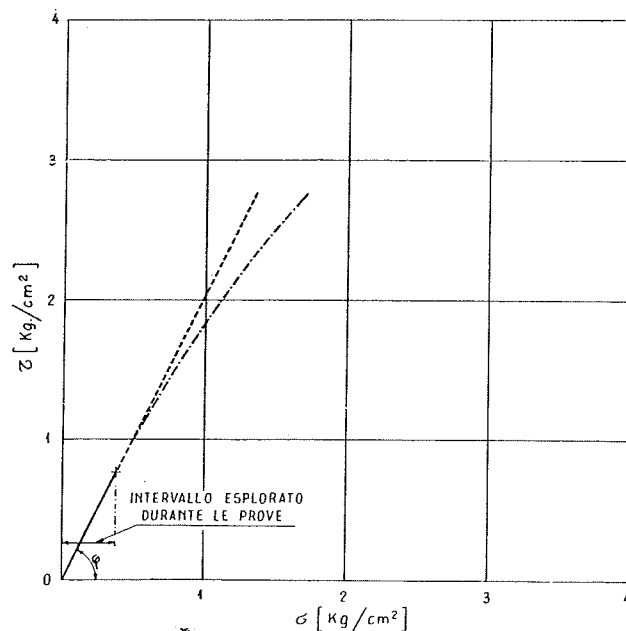


Fig. 12 - Andamenti possibili della linea di rottura, al di là del campo di sollecitazioni esplorato con le prove.

Alcuni Autori [2] [4] d'altro canto rilevano come per materiali a grana grossa prove eseguite con apparecchi di taglio diretto di grandi dimensioni forniscano valori della resistenza meccanica leggermente più elevati di quelli misurati per gli stessi

materiali all'apparecchio triassiale, attribuendone la causa alle modalità stesse della prova di taglio diretto in cui viene impedita la deformazione laterale del materiale.

Comunque, a parte tali considerazioni, interessa qui osservare come tutti i valori misurati per l'angolo d'attrito siano risultati sensibilmente maggiori dell'angolo di naturale declivio la cui tangente, come già detto, è 1 : 1,41. Ne conseguirebbe quindi, per la parte di rilevato costituente il fianco di valle della diga, un coefficiente di sicurezza allo scivolamento ⁽²⁾ variabile da un minimo di 1,65 per materiale non costipato e bagnato, ad un massimo di 2,90 circa per materiale asciutto e vibrato.

(2) Per un materiale dotato di solo attrito φ , il coefficiente di sicurezza di una scarpata formante con l'orizzontale l'angolo β è dato dal rapporto $\frac{tg \varphi}{tg \beta}$.

SUMMARY - Peculiarities and building details of rockfill dam on the Bussento river are shortly exposed. An apparatus designed to perform failure tests on the coarse-grained material used for the embankment is described.

Results of the tests carried out are related and discussed. A judgment on the safety of the downstream slope also is given.

- ### Bibliografia
- [1] A. W. BISHOP - *A large Shear Box for testing Sands and Gravels* - Proceedings of the II Internat. Confer. on Soil Mech. and Found Engin.
 - [2] R. G. HENNES - *The Strength of Gravel in Direct Shear* - A.S.T.M. Symposium on direct Shear Testing of Soils - 1952.
 - [3] G. K. LEONARD e O. H. RAINE - *Rockfill Dams: Performance of TVA Central Core Dams* - A.S.C.E. - Symposium on Rockfill Dams - Settembre 1958.
 - [4] M. FUKOUKA - *Testing of gravelly Soils with large scale Apparatus* - Proceed. IV Int. Confer. Soil Mechanics - Londra 1957.
 - [5] E. SCHULTZE - *Large Scale Shear Tests* - Proceed. IV Int. Confer. Soil Mechanics - Londra 1957.
 - [6] J. ZELLER e R. WULLIMAN - *The Shear Strength of the Shell Materials for the Göschenenalp Dam, Switzerland* - Proceed. IV Int. Confer. Soil Mechanics - Londra 1957.

SOMMAIRE - Après un bref résumé sur les détails de construction d'un barrage en enrochements, on illustre les caractéristiques d'un appareil pour essayer la résistance au cisaillement de matériaux à gros grain.

Les résultats des essais exécutés sur les pierres employées dans le corps du barrage sont exposés et discutés. On examine aussi la stabilité du parament aval.

DODICESIMO COLLOQUIO DI GEOMECCANICA

Salisburgo, ottobre 1961

Nei giorni 19 e 20 ottobre 1961 verrà tenuto in Salisburgo il XII Colloquio di Geomeccanica. Il Colloquio è organizzato dalla *Internationale Arbeitsgemeinschaft für Geomechanik* ed è dedicato in particolare al tema delle prove in sito.

Verranno presentate dodici comunicazioni, sulle quali verrà poi aperta la discussione. Tutte le comunicazioni, salvo una, saranno in lingua tedesca; è pre-

vista la traduzione simultanea in lingua inglese sia delle comunicazioni, sia delle discussioni. Saranno infine proiettati due documentari sulla diga di Kariba e sull'impianto di Kurobe IV.

Per ulteriori notizie e per l'iscrizione gli interessati potranno rivolgersi alla *Arbeitsgemeinschaft für Geomechanik*, Salzburg.