La diga in rockfill di Lewis Smith.

J. A. TYSON - *The Lewis Smith rockfill dam.* Journal Power Division, Proc. ASCE, vol. 92, PO1, jan. 1966.

La diga di Lewis Smith fa parte del sistema di impianti *multipurpose* che l'impresa elettrica nordamericana Alabama Power Company ha costruito e sta costruendo nel bacino idrografico del fiume Alabama.

Il serbatoio formato dalla diga ha una capacità di 2 miliardi di m³ ed una superficie al massimo invaso di 85 km². È stato creato allo scopo di ottenere una efficace regolazione delle piene ed assieme una cospicua capacità per scopi irrigui e potabili.

Il serbatoio è ubicato sul fiume Sipsey, ramo ovest del Warrior che è uno dei principali affluenti del fiume Alabama.

La diga, della quale nell'articolo che qui recensiamo vengono descritti particolari e modalità esecutive, è del tipo in rockfill con nucleo centrale inclinato, costituito da terre sabbio-argillose, e rifianchi di pietrame. L'altezza max del rilevato, sul punto più depresso delle fondazioni in alveo è di circa 96 m, la lunghezza al coronamento di 660 m. La inclinazione del paramento di valle è di 1,3/1 mentre per quello di monte i primi 18 m dal coronamento hanno scarpa 1,3/1 ed i rimanenti 2,2/1. Il rilevato ha una leggera convessità a monte ($R_c = 900$ m) ed una monta al centro del coronamento di 2,70 m.

Le figg. 1 e 2 mostrano planimetria e sezione tipo della diga.

Come può vedersi dalla fig. 2 il rinfianco di valle è costituito da due zone che si differenziano per la pezzatura del pietrame impiegato e per le modalità di posa in opera dello stesso: per la zona più esterna si è adottato pietrame versato mentre per quella interna il materiale è stato posto in opera a strati di modesto spessore e successivamente costipato.

Tra le terre del nucleo ed i rinfianchi sono interposti filtri di differente classe. Il nucleo è incassato nel terreno di base per una larghezza di circa 30 m e per una profondità dai 3 ai 6 m.

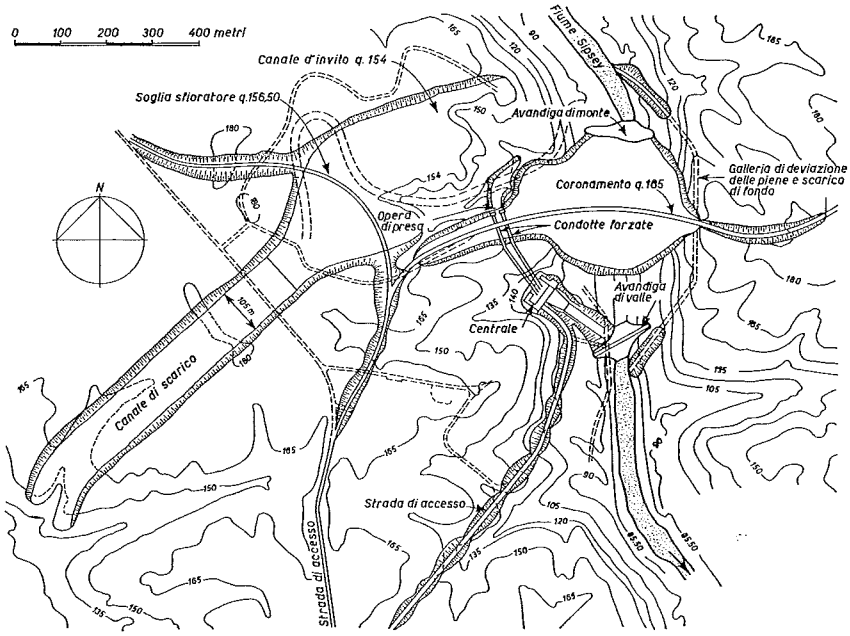

Fig. 1. - Planimetria della diga e delle opere annesse.

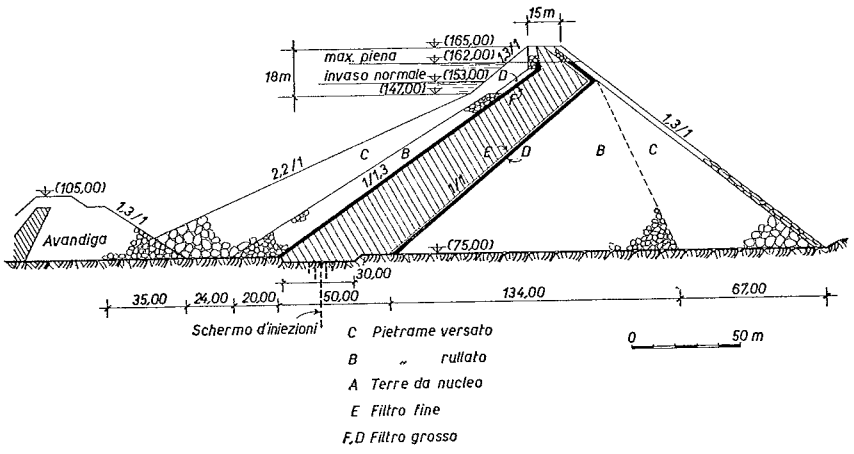

Fig. 2. - Sezione trasversale tipo della diga.

Al disotto di esso corre uno schermo di iniezioni, profondo dai 25 ai 45 m, al centro di una zona trattata con iniezioni superficiali.

Al piede del paramento di monte il rilevato è protetto da una unghia di rilevante altezza — circa 30 m — costituita dalla avandiga eretta durante la fase dei lavori per il contenimento e la diversione delle acque del fiume.

In sponda destra al piede della diga a valle è ubicata una centrale idroelettrica (157 MW) che sfrutta il salto d'invaso (circa 70 m). Sempre nella

stessa sponda è ubicato il canalone di allontanamento delle acque dello scaricatore di superficie posto in fregio al serbatoio.

Il volume totale di materiali impiegati per il rilevato principale e per l'avandiga di monte è di circa 4×10^6 m³ con un costo totale a consuntivo di circa 2,1 miliardi di lire.

I lavori sono iniziati nel dicembre 1957, con la galleria di deviazione delle piene ed hanno avuto termine nella primavera del 1961.

La zona d'imposta del rilevato è ubicata in una profonda gola incisa nei terreni carboniferi del periodo Pensilvaniano formanti altipiano a ridosso dei Monti Appalacchi. Come può vedersi dalla fig. 3 la stretta sede d'imposta della diga è caratterizzata da una alternanza di strati più o meno potenti di arenarie e di scisti di arenarie più o meno sabbiosi ed a giacitura pressocchè orizzontale. Nella parte alta delle sponde e lungo il letto del fiume la formazione di base è ricoperta da materiali alluvionali e da detriti di falda, costituiti da sabbie più o meno fini e limose frammiste a ciottoli e ad argille organiche ad elevata plasticità.

La possibilità di avere a disposizione sul posto terreni adatti all'impiego in una diga di tipo rockfill, fece orientare i progettisti verso questo tipo. Agli appaltatori vennero richieste offerte relative a due soluzioni: rockfill con nucleo centrale e rockfill con nucleo inclinato e dal confronto risultò più conveniente quella con nucleo inclinato. Il pietrame per i rinfianchi si sarebbe ricavato dagli scavi per lo scaricatore di superficie in sponda destra ed il materiale da nucleo dai terreni alluvionali di copertura.

Le indagini sulle caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione e dei materiali da adoperare per il rilevato, vennero condotte attraverso una estesa campagna di sondaggi, molti dei quali con prelievo di campioni intatti, trincee superficiali e cunicoli di esplorazione sia nella zona degli scavi in sponda destra sia lungo l'alveo a monte della stretta di imposta. Dati sul costipamento dei materiali vennero ricavati direttamente su rilevati sperimentali costruiti sia con le terre da nucleo che con il pietrame dei rinfianchi.

In quelli relativi alle terre da nucleo vennero posti in opera materiali prelevati dai terreni di copertura in sponda destra. Si aveva cura di riprodurre sul rilevato in prova le condizioni di umidità al prelievo. Il costipamento veniva effettuato con vari passaggi di due diversi tipi di rullo: a piede di pecora e gommato da 50 t. Dopo ogni serie di passaggi di un rullo venivano effettuati prelievi di campioni indisturbati per le usuali prove di lavoratorio. Venivano, inoltre, effettuate numerose prove di permeabilità in sito.

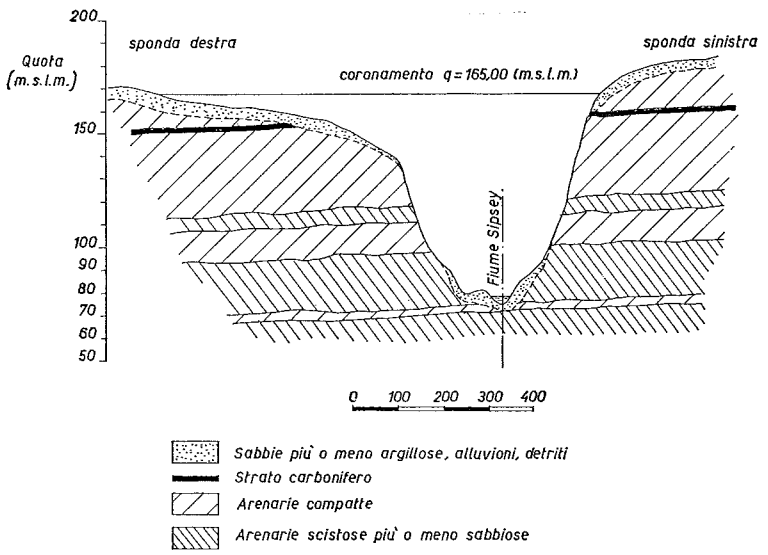

Fig. 3. - Sezione trasversale d'imposta dei terreni di fondazione della diga.

Il rilevato sperimentale di pietrame era costituito da materiale di pezzatura non superiore ai 300 mm e le prove di costipamento venivano effettuate sia su pietrame asciutto sia su pietrame innaffiato con monitors in due diverse proporzioni d'acqua di innaffiamento: 1/2 volume d'acqua per m³ e 2 volumi d'acqua per m³. Anche per il pietrame venivano impiegati rulli gommati da 50 t. Dopo costipamento il materiale veniva sottoposto a prove di taglio in sito, mediante la scatola di CASAGRANDE (1,50 m × 1,50 m) e ne veniva misurata la densità.

Le indagini di laboratorio e le prove effettuate sui rilevati sperimentali permisero di determinare alcune importanti modalità di posa in opera:

— per *i materiali da nucleo* il rullo gommato si dimostrava più efficace di quello a piede di montone e l'optimum del costipamento si raggiungeva al 92% SPM;

— per *il pietrame* l'optimum del costipamento si otteneva con 6 passaggi di rullo gommato su materiale innaffiato nella proporzione di 1/2 volume d'acqua per m³. Il minimo valore del peso secco dell'unità di volume è risultato di 2,08 t/m³.

Com'è indicato nella fig. 2 il rilevato è costituito da diverse zone che si differenziano per tipo di materiale e relativa modalità di posa in opera:

— zona A - terre da nucleo, costituite da argille più o meno sabbiose e frammiste a ghiaie, con pezzatura fino a 50 ÷ 60 mm;

— zona B - pietrame per il rinfianco di valle e di monte nelle zone interne a ridosso del nucleo, costituito da blocchi di arenarie con pezzatura fino a 300 mm;

— zona C - pietrame per il rinfianco di valle e di monte nelle zone esterne, costituito da blocchi di arenarie con pezzatura oltre i 300 mm;

— zona D - pietrame per filtro ottenuto da frantumazione e vagliatura delle arenarie di cava, con pezzatura da 1,5 mm a 80 mm;

— zona E - pietrame per filtro, con pezzatura da 0,1 mm a 1,5 mm;

— zona F - pietrame per filtro, con pezzatura fino a 150 mm.

Nella fig. 4 sono indicate le curve

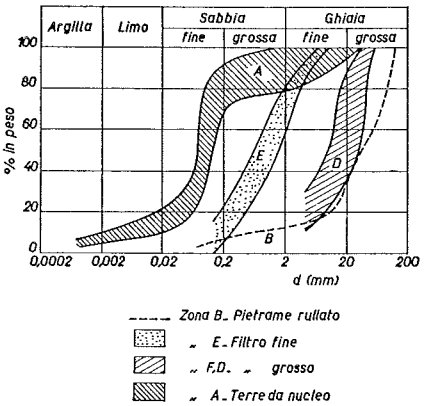

Fig. 4. - Curve granulometriche dei materiali del rilevato

TABELLA I

		Terre da nucleo (*)	Pietrame rullato (*)	Pietrame versato (**)
γ_d	(t/m³)	1,84	2,14	1,86
γ	»	2,13	2,28	2,00
γ_s	»	2.15	2,36	2,13
Ø	»	42°	45°	38°
c	(t/m²)	1.62	0	0

(*) ricavate da prove di laboratorio
(**) ricavate per confronto.

granulometriche dei materiali del rilevato.

Le caratteristiche dei materiali introdotte nei calcoli di verifica sono riportate nella tab. I.

I lavori di costruzione del rilevato iniziarono nel maggio 1958 con lo scavo dei depositi alluvionali di fondo alveo. Circa 600.000 m³ di questo materiale, adatto come terra da nucleo, vennero depositati a mucchi nelle vicinanze della zona d'imposta.

La formazione di base sottostante veniva ripulita con getti di aria compressa e successivamente lavata. La zona di appoggio del nucleo venne consolidata attraverso un trattamento superficiale di iniezioni, esteso a gran parte della zona d'impronta, a cui si aggiungeva uno schermo profondo.

Il risanamento superficiale da fessure, piccole faglie e discontinuità di vario genere è stato spinto fino ai 2 o 3 m di profondità, impegnando una zona di circa 30 m per ml di rilevato.

I fori d'iniezione (Ø 50 mm) sono stati disposti a maglia quadrata di lato 3 m e le miscele adoperate erano composte da acqua e cemento in diverse composizioni volumetriche che variano a seconda delle caratteristiche dei terreni incontrati, da una parte d'acqua per una parte di cemento a tre per una. La pressione d'iniezione non superava il valore di 1,75 Atm.

Lo schermo profondo è ubicato nella mezzeria della zona consolidata superficialmente e raggiunge una profondità max in alveo di circa 45 m mentre sulle sponde tale valore non supera i 25 m.

È costituito da fori primari distanziati 12 m l'uno dall'altro, con intercalati fori secondari e terziari in ordine di iniezione.

In definitiva la distanza fra un foro e l'altro dello schermo è di 3 m. Tali fori, data la natura dei terreni, sono stati eseguiti con sonde a rotazione a punte di diamante. La natura e la composizione delle miscele iniettate erano le stesse di quelle adoperate per il trattamento superficiale e la pressione di iniezione non venne spinta oltre le 7 Atm.

A termine dei lavori di consolidazione della base di appoggio del nucleo, risultarono eseguiti per il trattamento superficiale circa 2750 ml di fori con un impiego di circa 9 m³ di cemento e per lo schermo profondo 9000 ml di fori con impiego di 18 m³ di cemento.

Come già accennato tutto il materiariale di risulta dallo scavo del canalone di scarico in sponda destra è stato adoperato nel rilevato: i depositi alluvionali di copertura per il nucleo e le sottostanti arenarie per i rinfianchi. Per la rimozione delle terre superficiali vennero impiegati in totale 5 scrapers CAT DW 21 spinti durante il caricamento da due trattori CAT D9 dei quali uno era equipaggiato con aratro pesante che frantumava quelle parti di terreno duro e compatto che avrebbe potuto resistere allo scraper. L'impiego degli scrapers per la rimozione ed il caricamento di questo tipo di terre evitava una prima grossolana segregazione in posto dato che non era infrequente il ritrovamento di lenti di sabbie o di argilla. Una seconda miscelazione, comunque, se necessaria, era effettuata con erpici frangizolle dopo che il materiale era stato scaricato in diga e prima del successivo costipamento. Circa 900.000 m³ di terre da nucleo vennero ricavate dalla zona della sponda destra, con due turni giornalieri di 10 ore e con una media di 2500 m³ di materiale cavato per turno.

Nelle arenarie compatte la cavatura del pietrame per i rinfianchi presentò all'inizio alcuni problemi derivanti principalmente dalla scelta del tipo di volata capace di assicurare la maggior produzione possibile di pietrame di voluta pezzatura. Un tipo di volata allo inizio degli scavi — 7 fori da 3/8″ distanziati di 5 m — produsse in prevalenza blocchi di pietrame di dimensioni superiori ai 300 mm cioè materiale adatto solamente per la zona C. Venne quindi sperimentata con successo un diverso tipo di volata — 9 fori da 7/8″ — nella quale una distanza di 8 m fra i fori produceva pietrame di tipo C ed una distanza di 6 m pietrame di tipo B.

I fori erano predisposti da una perforatrice tipo JOY-BH 60 capace di produrre 40 cm di foro al minuto primo. La profondità di essi variava da 12 a 15 m e come esplosivo veniva adoperata una emulsione di polvere di nitrato d'ammonio ed olio minerale.

Il fronte della cava del pietrame nella zona del canalone in sponda destra è indicato nella foto di fig. 5.

Nella zona degli scavi, 14 pale escavatrici di capacità e tipo variabili, provvedevano a caricare il pietrame su 10 dumpers tipo Euclid i quali a loro volta lo trasportavano nella zona del rilevato.

Parte del materiale di cava veniva inoltre inviato alla centrale di produzione del pietrame da filtro.

Gli scavi comportarono la cavatura di circa $2{,}9 \times 10^6$ m³ di pietrame dei quali circa 1,9 di tipo B. con due turni giornalieri di 10 ore e con una produzione media di 5000 m³ di materiale al giorno.

Nel rilevato l'ordine di messa in opera dei materiali cavati era il seguente:

1 - pietrame della zona B del rinfianco di valle e filtri D e E;

2 - Terre da nucleo della zona A;

3 - pietrame della zona C del rinfianco di valle;

4 - filtro F e pietrame della zona B del rinfianco di monte;

5 - pietrame della zona C del rinfianco di monte.

La foto di fig. 6 mostra il panorama dei lavori alla quota 130 msm. Il pietrame della zona B è stato posto in opera a strati dello spessore di 45 cm ed eventuali blocchi di dimensioni superiori ai 300 mm erano rimossi, come indicato nella foto di fig. 7, e portati nella zona C. Durante lo scarico il pietrame era innaffiato da un getto di acqua che fuoriusciva da un monitor alla pressione di 7 Atm, in quantità corrispondente a 1/2 volume d'acqua per m³ di pietrame, e poi costipato con 4 passaggi di rullo gommato da 50 T.

Il materiale di tipo C era versato dalla zona B, in genere da una altezza

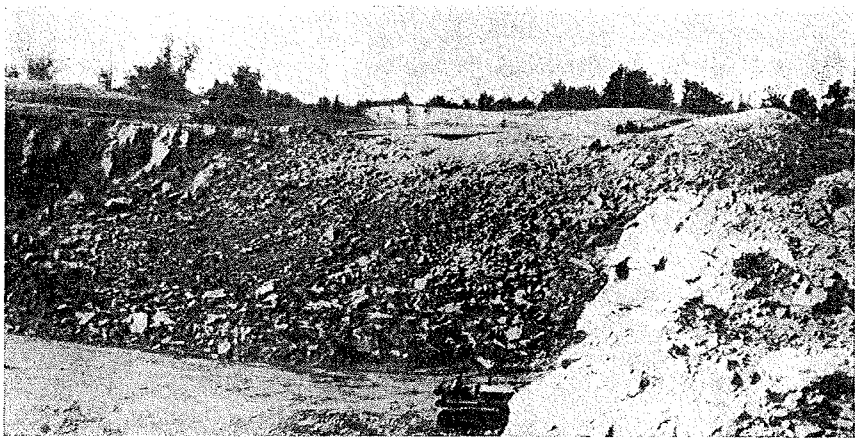

Fig. 5. - Vista del fronte della cava di pietrame in sponda destra.

non inferiore ai 9 m, altezza che si dimostrò sufficiente a far assumere naturalmente al materiale una scarpa di 1,3/1.

L'innaffiamento di questo materiale era effettuato a mezzo di 2 monitors a getti incrociati, come chiaramente indicato nella foto di fig. 8.

Il pietrame per i filtri D, E, F era ricavato per frantumazione e successiva vagliatura dal materiale di sfrido degli scavi. Detti filtri sono stati posti in opera a strati di 30 cm e poi costipati con 2 passaggi di rullo gommato da 50 T. La larghezza, in orizzontale, misura 2,40 m che è la dimensione minima atta a consentire il passaggio degli scrapers e dei rulli.

Le terre della zona A sono state poste in opera a strati di 30 cm e poi miscelate con erpici ad evitare segregazione di sabbie o limi e quindi la formazione di marcate disomogeneità nella zona del nucleo. Le terre marcatamente sabbiose erano sistemate nella parte più a valle della zona A mentre quelle marcatamente argillose nella zona di monte. Il costipamento veniva effettuato mediante 8 passaggi di rullo gommato da 50 T.

Particolare cura venne presa nel sistemare le terre da nucleo in corrispondenza della superficie di appoggio sulle imposte. Veniva selezionato il materiale a più alto contenuto di argilla ed adagiato a mano dopo aver effettuato una accurata pulizia della base d'appoggio.

Le caratteristiche del materiale da nucleo posto in opera venivano giornalmente controllate a mezzo di numerose prove per esaminarne la corrispondenza con quelle ammesse nei calcoli di verifica.

Per ogni strato di terra posto in opera venivano istituite in sito ed in laboratorio, mediante prelievo di adatti campioni, prove di densità, di permeabilità, analisi granulometriche e limiti

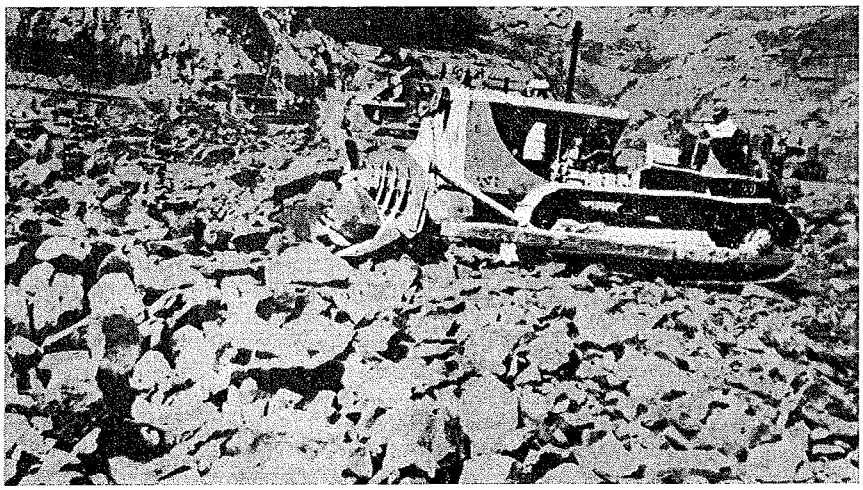

Fig. 7. - Rimozione del pietrame tipo C dalla zona B.

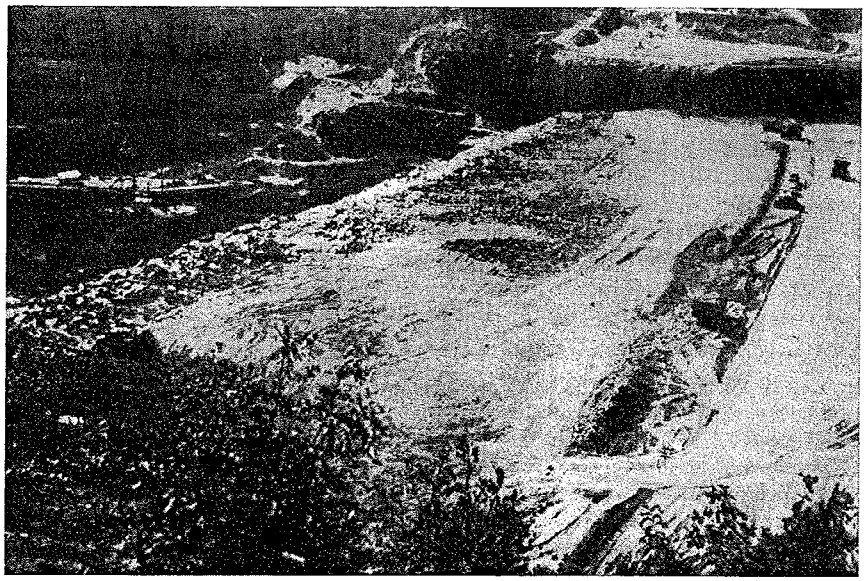

Fig. 6. - Panorama dei lavori in corso sul rilevato alla quota 130 msm.

di Atterberg.

Per la densità i valori trovati risultarono compresi fra un minimo di 82% ed un massimo di 102% della prova SPM con una media del 96,5%. La permeabilità risultò compresa fra 5×10^{-4} e 5×10^{-6} cm sec^{-1} con una media di $1,5 \times 10^{-6}$ cm sec^{-1}.

Circa i risultati globali delle prove istituite sul materiale da nucleo posto in opera, l'Autore fornisce i seguenti valori caratteristici valevoli per i 3/4 dei campioni o delle zone campione esaminate:

— peso secco γ_d (t/m^3)	1,84
— angolo d'attrito	23°
— coesione c (t/m^2)	4,5
— porosità	40%
— permeabilità k (cm sec^{-1})	10^{-6}

Nella tabella II sono riportati dati di costo a consuntivo del materiale in opera nel rilevato.

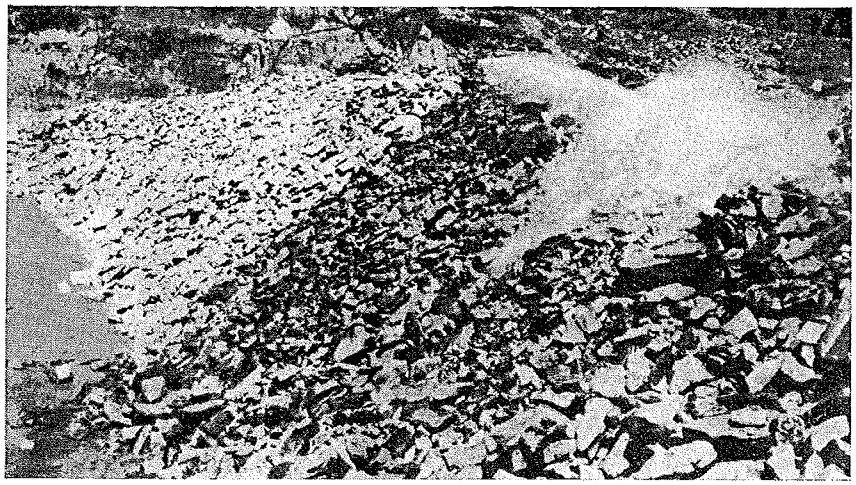

Fig. 8. - Innaffiatura del pietrame tipo C con monitors a getti incrociati.

TABELLA II

Materiale	Costi unitari a consuntivo del materiale in opera in Lire				
	Scavo e trasporto in opera	Frantumaz. e vagliat.	Innaff.	Costip.	Totale
Terre da nucleo (zona A) per m³	440	—	—	83	523
Pietrame rullato (zona B) per m³	470	—	15	27	513
Pietrame versato (zona C) per m³	470	—	67	—	537
Filtri (zone D,E,F) per m³	470	410	—	—	880

Il piano delle misure predisposto per il controllo della diga prevede osservazioni sugli assestamenti verticali ed orizzontali di essa, misurati in 12 caposaldi a mira mobile posti sul coronamento collegati a due basi fisse ubicate sulle sponde, e misure di portate di filtrazione raccolte in 4 punti caratteristici sistemati a valle della diga. Di essi due sono ubicati in sponda destra, uno al piede del rilevato ed un'altro in sponda sinistra.

Il massimo assestamento verticale finora misurato è stato di 13 cm e risulta pari allo 0,14% dell'altezza di rilevato nel punto di osservazione. La massima dislocazione verso valle nel piano orizzontale è stata di 9 cm quando il livello del serbatoio a monte si trovava al max invaso.

L'esame degli assestamenti finora osservati ha comunque messo in evidenza, per ciò che concerne gli spostamenti nel piano orizzontale, un comportamento di tipo elastico del rilevato le cui deformazioni seguono la legge di variazione dell'invaso a monte e non presentano o quasi componenti a carattere permanente.

Gli assestamenti verticali sono di gran lunga minori di quelli osservati in altre dighe dello stesso tipo, quando si pensi che, di norma, i cedimenti per dighe di tipo rockfill sono compresi attorno al 2% dell'altezza di rilevato nel punto di misura.

A tale proposito l'Autore raccomanda l'efficacia del costipamento meccanico del pietrame effettuato con rulli gommati e per strati di non rilevante spessore che deve risultare in altezza non molto diverso dalla massima pezzatura ammessa per i blocchi in opera.

Le filtrazioni del fianco destro della diga vengono raccolte e misurate in un cunicolo ubicato in corrispondenza delle condotte forzate a servizio della centrale al piede. Le eventuali filtrazioni del fianco vengono drenate attraverso 9 fori che dalla parete del cunicolo si addentrano nel fianco per circa 20 m. Il valore massimo finora misurato non ha oltrepassato i 2 litri/sec.

Le filtrazioni del rilevato vero e proprio vengono raccolte in un tubo sfinestrato del diametro di 90 mm ubicato al piede e sistemato nel senso trasversale dell'alveo a quota 82 msm. Da un lato del tubo-collettore, si trova uno stramazzo di misura delle eventuali portate affluenti dal tubo.

Da rilevare in proposito che l'andamento nel tempo dei valori finora misurati e messi a confronto con le locali vicissitudini metereologiche e dell'invaso a monte, sembra denotare una soddisfacente tenuta della diga. Il massimo valore misurato è stato di 27 litri/sec, e lo si è ritenuto assolutamente tollerabile.

(*Enrico Malquori*)

Le indagini sui terreni nella pratica tecnica.

E. Schultze, H. Muhs - *Bodenuntersuchungen fur Ingenieurbauten.* Springer Verlag, Berlin 1867.

Ha visto recentemente la luce la seconda edizione del noto trattato di Schultze e Muhs dedicato alle indagini sperimentali sui terreni in sito ed in laboratorio, la prima edizione del quale risaliva ormai ad oltre quindici anni fa. L'opera, pur conservando la sua originale impostazione, si presenta ora con un numero di pagine (722) e di figure (782) quasi doppio, ed è completamente rinnovata ed aggiornata per tener conto dei più recenti sviluppi della materia. Quest'ultima è divisa in due parti, relative rispettivamente alle indagini in fase di progetto ed a quelle in corso d'opera o su opere già costruite.

La prima parte si apre con una discussione dei programmi di indagine e della estensione che occorre dar loro in relazione alle caratteristiche dell'opera in progetto. Segue una sintetica descrizione dei principali tipi di terreni, e dei criteri in base ai quali i terreni devono essere descritti.

Ampio spazio è dedicato alle prove in sito, a partire dalle indagini geologiche e geofisiche e passando poi ai sondaggi, al campionamento, alle pro-