

# Recensioni

## Le dighe alte

A. CASAGRANDE - *Hohe Staudämme* - Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik - Technische Hochschule Wien, Heft 16 Vienna, 1965.

In una interessante conferenza, tenuta in occasione della laurea ad honorem conferitagli dall'Università di Vienna nel novembre dello scorso anno, il Prof. Arthur CASAGRANDE ha trattato i problemi, che si incontrano oggi nella progettazione e nella costruzione delle più alte dighe di sbarramento.

E' noto che, secondo l'indirizzo della tecnica moderna e per motivi prevalentemente economici, queste dighe vengono costruite sempre più spesso di materiali sciolti, anche quando le favorevoli caratteristiche dei terreni di fondazione consentirebbero l'imposta di strutture di calcestruzzo. Tuttavia, il crescente sviluppo di queste opere, che hanno ormai superato anche i 200 metri di altezza, pone sempre nuovi e difficili problemi geotecnici, come, in particolare, quelli della scelta e della posa in opera dei materiali per la costruzione delle varie parti del rilevato.

Nella conferenza, pubblicata nei quaderni dell'Istituto di Geotecnica di Vienna, il Prof. CASAGRANDE descrive le più importanti dighe di questo tipo realizzate negli ultimi anni o in corso di realizzazione nel continente americano ed alla cui progettazione e costruzione egli ha partecipato nella veste di consulente; ne trae quindi lo spunto per alcune osservazioni, che derivano dalla sua profonda esperienza personale sui criteri di progetto e di costruzione.

Nella fig. 1 sono rappresentate le sezioni tipo delle dighe illustrate nella memoria, che si recensisce. Tre di esse, di altezza compresa fra 125 e 150 metri, sono state già costruite; l'ultima, la diga di Mica, nel Canada, in fase di progetto, avrà un'altezza di ben 240 metri.

I terreni d'imposta di queste opere sono sempre costituiti da rocce lapidee di buone caratteristiche meccaniche; in particolare, si tratta di quarzite per la diga di Furnas e di basalto per quella di Round Butte.

La soluzione adottata per il rilevato è simile nei vari

casi e rispecchia le tendenze rivelatesi in America in questi ultimi anni.

Come risulta dalla fig. 1, in tutte le dighe la tenuta è affidata ad un nucleo, leggermente inclinato verso monte, costituito da materiale di ridotta permeabilità. I fianchi sono di materiale lapideo in pezzatura non superiore a circa  $200 \div 300$  mm. Ad eccezione delle zone più esterne dei fianchi delle dighe di Cougar e Round Butte, questi materiali sono stati sempre posti in opera in strati di piccolo spessore ed accuratamente costipati con mezzi meccanici. E' significativo, anzi, che per la diga di Mica sia previsto il costipamento anche nelle due zone prossime ai paramenti di monte e di valle.

La più importante osservazione, che si trae dall'esame delle soluzioni adottate per queste dighe, è l'abbandono del tipo « rockfill » in favore di una posa in opera del materiale dei fianchi in strati costipati con mezzi meccanici.

In secondo luogo, si rileva la tendenza ad impiegare nei fianchi materiali, i quali presentino una composizione granulometrica il più possibile completa anche delle frazioni più sottili, nonché la limitazione delle dimensioni massime dei grani a qualche decimetro.

In effetti, dalle recenti ricerche condotte negli Stati Uniti sulle proprietà dei materiali sciolti sottoposti a pressioni molto elevate, si deducono alcune interessanti conclusioni, che giustificano le soluzioni adottate.

Nella fig. 2 sono tracciate le curve granulometriche di campioni rappresentativi dei materiali dei fianchi delle dighe di Cougar e di Furnas, sottoposti a prove di compressione triassiale in apparecchi di grandi dimensioni sotto l'azione di pressioni  $\sigma_3$  fino a 36 Kg/cm<sup>2</sup> per la quarzite di Furnas e 25 Kg/cm<sup>2</sup> per il basalto di Cougar.

Dalla successione di curve rappresentate in figura risulta chiaramente una progressiva variazione della composizione granulometrica al crescere delle sollecitazioni agenti; questa variazione è determinata dalla rottura che si verifica nei frammenti della roccia sotto l'azione degli sforzi applicati nella fase di consolidazione e, forse ancora più accentuatamente, in quella della rottura.

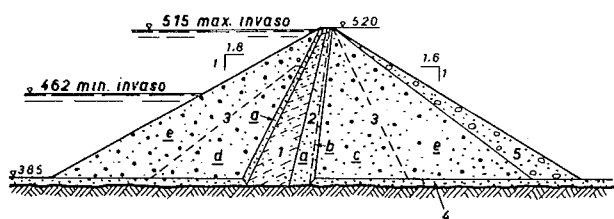
Analogo comportamento presentano i materiali studiati per la diga di Mica, le cui caratteristiche granulo-

metriche sono rappresentate in fig. 3. In particolare, per lo gneiss, sottoposto ad una pressione massima  $\sigma_3 = 25$  Kg/cm<sup>2</sup>, risulta chiaramente da questa figura, come il fenomeno della rottura dei grani si manifesti con maggiore intensità nel campione che presenta la pezzatura più uniforme. Per l'alluvione (ghiaia con sabbia) e per il materiale morenico, sottoposti a pressioni  $\sigma_3$  fino a 32 Kg/cm<sup>2</sup>, il fenomeno è molto più attenuato.

Altre interessanti considerazioni riguardano la resistenza al taglio del materiale e la sua deformabilità. Per quanto riguarda la resistenza, dalle esperienze con l'apparecchio di compressione triassiale, fino alle pressioni  $\sigma_3$  indicate, risulta che i valori dell'angolo d'attrito

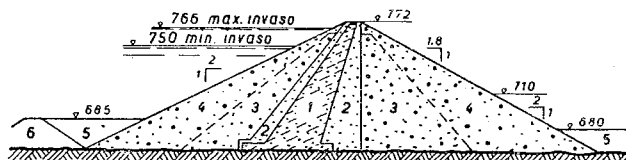
per  $\sigma_3$  elevata sono, in genere, ben più ridotti di quelli, che si otterrebbero, estrapolando la retta involucro dei cerchi di MOHR corrispondenti ai bassi valori della pressione.

Alcuni valori dell'angolo  $\phi_0$ , che la retta passante per l'origine degli assi  $\sigma, \tau$  e tangente al cerchio costruito sui valori più elevati della  $\sigma_3$  adottati nelle esperienze, forma con l'asse delle  $\sigma$ , sono riportati nella tabella 1 per i vari materiali esaminati. Risulta che in nessun caso si è superato il valore  $\phi_0 = 40^\circ$  e che i valori più elevati di quest'angolo si sono ottenuti sui materiali granulometricamente più completi. Il materiale che da questo punto di vista presenta le migliori caratteristiche tra



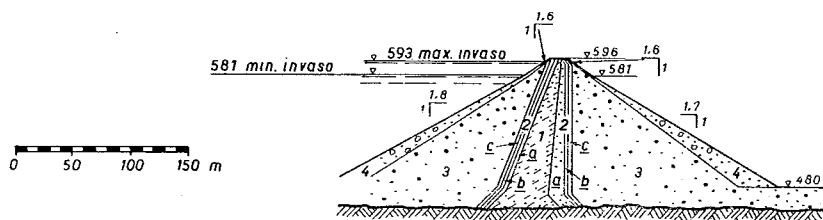
DIGA DI COUGAR, U.S.A.

H = m 148



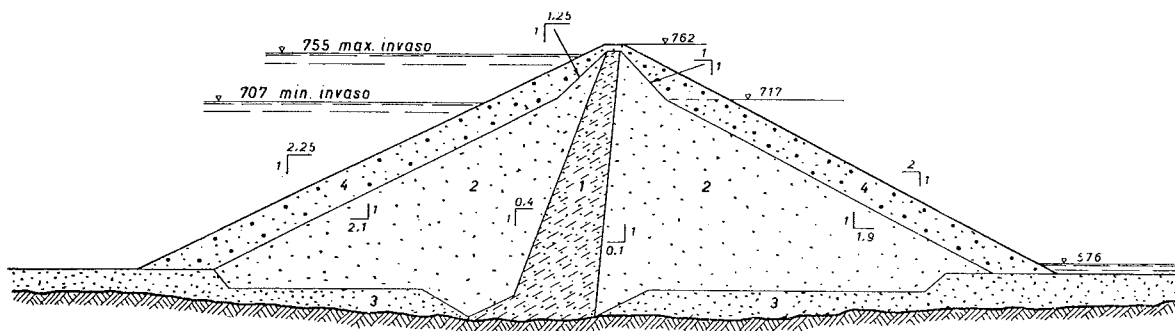
DIGA DI FURNAS, Brasile

H = m 125



DIGA DI ROUND BUTTE, U.S.A.

H = m 134



DIGA DI MICA, Canada (in progetto)

H = m 240

FIG. 1 - Sezioni tipo di alcune recenti dighe di materiali sciolti di grande altezza. I terreni d'imposta sono costituiti da quarzite per la diga di Furnas, basalto per la diga di Round Butte e da rocce lapidee non specificate per le altre due opere. Tutti i materiali del rilevato, ad esclusione delle zone indicate come « scogliera » sono costipati con mezzi meccanici.

Diga di COUGAR: 1) nucleo di sabbia con limo; 2) filtro: a = ghiaia, b = roccia in piccola pezzatura; 3) fianchi di basalto in grossa pezzatura posto in opera in strati di spessore: c = cm 45, d = cm 60, e = cm 90; 4) tappeto di ghiaia; 5) scogliera.

Diga di FURNAS: 1) nucleo di argilla; 2) filtro; 3) zona di transizione di materiale lapideo; 4) fianco di materiale lapideo in grossa pezzatura; 5) riempimento; 6) avandiga.

Diga di ROUND BUTTE: 1) nucleo di sabbia con limo; 2) filtro: a = sabbia, b = pietrisco di basalto, c = ghiaia grossa di frammenti lapidei selezionati; 3) fianchi di materiale lapideo in grossa pezzatura; 4) scogliera.

Diga di MICA: 1) nucleo di materiale morenico; 2) fianchi di ghiaia e sabbia; 3) tappeto di ghiaia e sabbia con blocchi; 4) materiale lapideo in grossa pezzatura

quelli esaminati è la ghiaia con sabbia, specie quando essa è posta in opera con un elevato grado di compattezza  $D_r$ .

Molto interessanti sono anche le considerazioni del Prof. CASAGRANDE sulla deformabilità dei vari materiali.

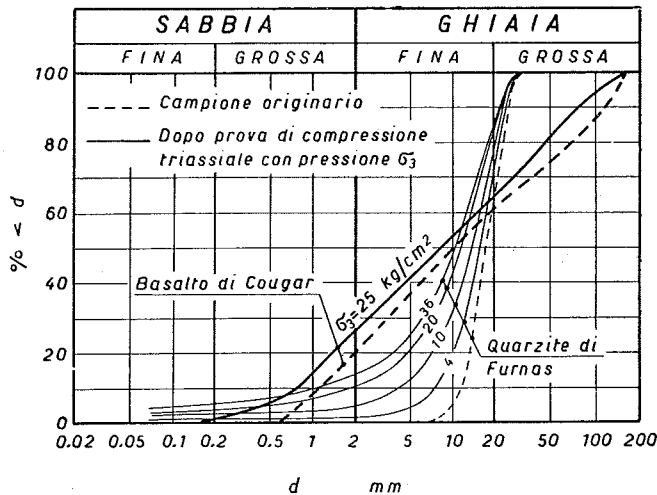


FIG. 2 - Composizione granulometrica dei materiali a grana grossa delle dighe di Furnas e Cougar

Nella citata tabella 1 sono indicati accanto a  $\varphi_0$  i valori  $\Delta L$  della deformazione unitaria — a rottura e della va-

$$\Delta V$$

riazione di volume — riscontrata al termine delle prove di compressione triassiale. Anche qui si osserva chiaramente un'influenza del grado di uniformità, nel senso che i materiali meno deformabili sono quelli più completi dal punto di vista granulometrico.

Anche per quanto riguarda la deformabilità, la ghiaia con sabbia presenta caratteristiche tra le più favorevoli per l'impiego. Per tale motivo questo materiale è stato in progetto preferito allo gneiss per la formazione dei fianchi della costruenda diga di Mica.

L'A. si sofferma anche ad illustrare il comportamento di alcune delle opere descritte. Apprendiamo così che nelle dighe di Cougar e Round Butte la differente deformabilità dei materiali del nucleo e dei fianchi ha provocato l'apertura di lesioni longitudinali lungo il coronamento.

Entro certi limiti, queste lesioni, che secondo l'A. sono quasi inevitabili quando le caratteristiche meccaniche dei materiali del nucleo e dei fianchi sono molto differenti, non comportano gravi preoccupazioni per la stabilità dell'opera. In ogni caso l'entità delle lesioni può essere attenuata adottando in progetto e durante la costruzione alcuni accorgimenti, tra i quali, oltre ad una scelta opportuna dei materiali, vi è quello di porre in opera la parte più alta del nucleo con un contenuto di acqua prossimo o superiore al limite di plasticità.

Altre lesioni si sono manifestate trasversalmente al rilevato in alcune dighe impostate su spalle profilate secondo una superficie molto ripida. Per opporsi a queste lesioni l'A. raccomanda di escludere i nuclei troppo sottili e di assegnare alla diga una forma a pianta leggermente arcuata con la convessità verso monte.

In ogni caso, l'A. insiste sull'opportunità di disporre tra il nucleo ed i fianchi zone di transizione molto ampie, costituite da materiali sabbio-ghiaiosi granulometricamente completi e ben costipati.

Nell'articolo vi sono anche dei cenni alla tecnica dello spandimento e del costipamento dei materiali a grana grossa, che, in generale, vengono posti in opera in strati di spessore medio di circa 60 cm e costipati con rulli vibranti molto pesanti. Il controllo della posa in opera viene effettuato, oltre che con la usuale tecnica di misura del peso dell'unità di volume su campioni, anche attra-

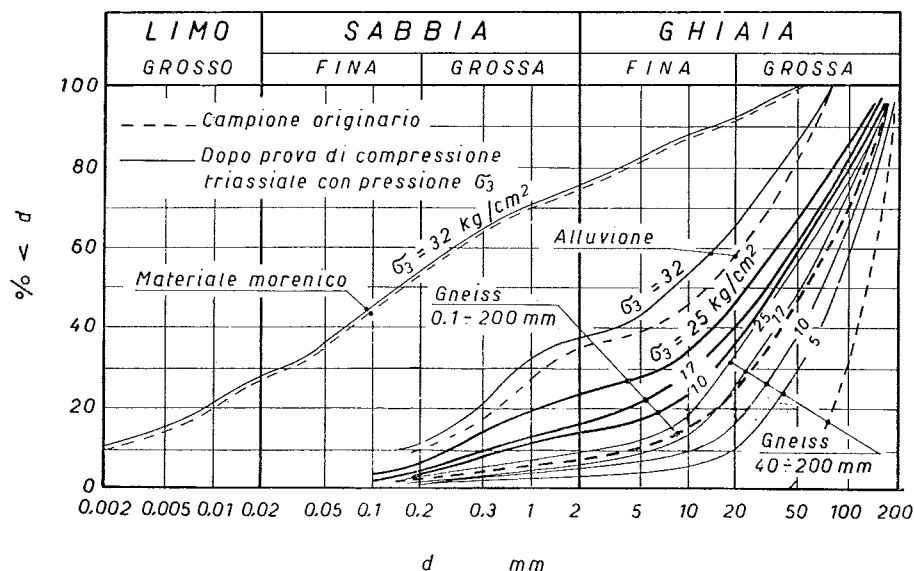


FIG. 3 - Composizione granulometrica dei materiali disponibili per la costruzione della diga di Mica

TABELLA 1 - Caratteristiche di resistenza e deformabilità di materiali studiati per la costruzione di dighe di grande altezza

diga	materiale	d mm	$\sigma_3$ Kg/cmq	$\varphi_0$	$\frac{\Delta L}{L_0}$ %	$\frac{\Delta V}{V_0}$ %
Furnas	quarzite	10 ÷ 25	36	34°	20	13
	»	0 ÷ 10	36	39°	11	2
Cougar e Round Butte	basalto	0,5 ÷ 170	25	39°	15	6
Mica	gneiss	40 ÷ 200	25	30°	20	10
	»	0,1 ÷ 200	25	32°	17	6
	ghiaia con sabbia $D_r = 0,50$	0,1 ÷ 80	32	37°	18	5
	ghiaia con sabbia $D_r = 0,87$	0,1 ÷ 80	32	39°5'	7	2
	materiale morenico	0 ÷ 50	32	35°	9	2

N. B. - Le curve granulometriche dei vari materiali elencati nella tabella sono rappresentate nelle figg. 2 e 3

verso misure degli spostamenti della superficie del rilevato prima e dopo il passaggio del rullo.

In definitiva, le moderne conoscenze sulle proprietà e sul comportamento dei materiali sciolti sotto l'azione di sollecitazioni molto elevate, inducono il prof. CASA-GRANDE ad escludere la tecnica di posa in opera tipo rockfill, cui corrisponderebbero cedimenti molto elevati ed a raccomandare nei fianchi delle dighe molto alte lo impiego di materiali a grana grossa con limitate dimensioni massime, granulometricamente ben assortiti e adeguatamente costipati con mezzi meccanici.

Nel concludere, l'A. ricorda le incertezze e quindi i ri-

schì, che malgrado i grandi progressi della tecnica, queste ardite costruzioni comportano e dei quali l'uomo, che si accinge a realizzazioni sempre più grandiose, deve essere ben consapevole. Si rammarica, a questo proposito, che in nessuna delle dighe citate nella presente memoria siano stati installati strumenti per tipo e numero a suo giudizio sufficienti a fornire quelle notizie, che sarebbero tanto preziose per perfezionare le nostre conoscenze scientifiche e tecniche e per poter dominare sempre meglio con il calcolo questo settore delle costruzioni in pieno sviluppo.

(Ruggiero Jappelli)