

# DEFORMABILITA' DI GHIAIE SABBIOSE DOPO COSTIPAMENTO (\*)

S. P. ALGRANATI - R. SOLLAZZO (\*\*)

**SOMMARIO** - Nel laboratorio terre della diga di Occhito sono state studiate le manifestazioni di deformabilità riscontrate nelle ghiaie sabbiose costipate in opera per la formazione dei fianchi della diga. Dopo avere confermato che tali manifestazioni dipendono dal contenuto d'acqua di costipamento e — indirettamente — dalla percentuale di frazione fina dei materiali, si è indagato sul comportamento di essi, in relazione alle condizioni di esercizio della opera, al variare del grado di saturazione dopo il costipamento.

La diga di Occhito, attualmente in costruzione sul fiume Fortore per la formazione di una capacità di invaso a scopo irriguo di trecento milioni di metri cubi di acqua, ha una altezza di sessanta metri con un volume complessivo di oltre tre milioni di metri cubi di terra. La diga è formata da un nucleo impermeabile di materiali limo-sabbiosi e da fianchi di materiali ghiaio-sabbiosi.

riali è frequentemente interrotta dalla presenza di strati, lenti o sacche di materiale limo-argilloso, caoticamente disposti, la cui origine può essere attribuita a frane delle sponde ovvero al riempimento di tratti abbandonati dall'alveo di magra il quale si presenta vagante con andamento a meandri. Ne consegue che, malgrado ogni attenzione esercitata durante la cavatura per aggirare o asportare i materiali limo-argillosi, le ghiaie sabbiose ammannite hanno in genere presentato una percentuale notevole di frazione fina, come è dimostrato dalla fascia granulometrica di Fig. 1: si può precisare che in media la percentuale passante al vaglio di mm 0,074 è stata del 4% e ha raggiunto molto frequentemente valori del 6÷7%.

Inoltre il tetto della coltre alluvionale è in genere di poco sopraelevato rispetto al livello fluviale, tanto che anche in tempi di acque basse, e pur facendo precedere la coltivazione da scavi di drenaggio, raramente si riesce ad ottenere un fronte di cava allo asciutto superiore ai tre metri di altezza. Per questo motivo gli scavi, che in genere vengono eseguiti con escavatori attrezzati a dragline, interessano sempre la frangia capillare e il più delle volte anche i materiali sottoposti alla falda con la conseguenza che il contenuto d'acqua all'atto della cavatura è in genere alto; esso peraltro si riduce, per drenaggio ed evaporazione durante il trasporto del materiale e la sua permanenza in diga prima del costipamento, a valori notevolmente minori la cui entità dipende, oltreché dal valore iniziale, dalle condizioni meteorologiche e dal contenuto di frazione fina del materiale.

I materiali sopra descritti possono essere costipati senza alcuna difficoltà e con soddisfacenti risultati sia per mezzo di rullo gommato pesante sia per mezzo di rullo vibrante, fintantoché le modalità della cavatura, le condizioni stagionali e la costituzione del materiale medesimo consentono di ammannirlo con valori bassi del contenuto di acqua (3÷5%); non appena peraltro il contenuto d'acqua passa a valori del 6÷7%, il materiale dopo il costipamento, pur dando luogo a elevati valori del peso secco dell'unità di volume (ciò che si spiega essendo per l'appunto del 6% il valore del contenuto d'acqua corrispondente all'optimum) presenta una notevole deformabilità, tan-

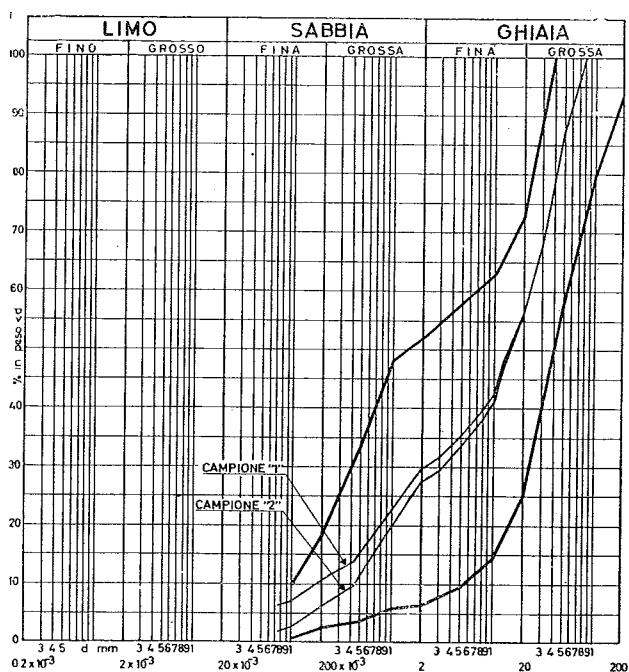


Fig. 1

Per la formazione dei fianchi della diga vengono utilizzate le ghiaie sabbiose costituenti la coltre alluvionale del fiume. La continuità in sito di questi mate-

(\*) Comunicazione presentata al VI Convegno di Geotecnica (Pisa, 9 aprile 1963).

(\*\*) Dott. Ing. Samuele Paolo ALGRANATI, Ingegnere Capo Direttore dei Lavori della diga di Occhito per conto del Consorzio Generale di Bonifica della Capitanata. Dott. Ing. Renato SOLLAZZO, Direttore del Laboratorio.

to più sensibile quanto più elevato è nel materiale il contenuto di frazione fina; la deformabilità del materiale è rilevabile sia al ripetuto calpestio (v. Fig. 2), sia al passaggio degli automezzi pesanti. Le deformazioni sono prevalentemente plastiche ma talvolta ap-

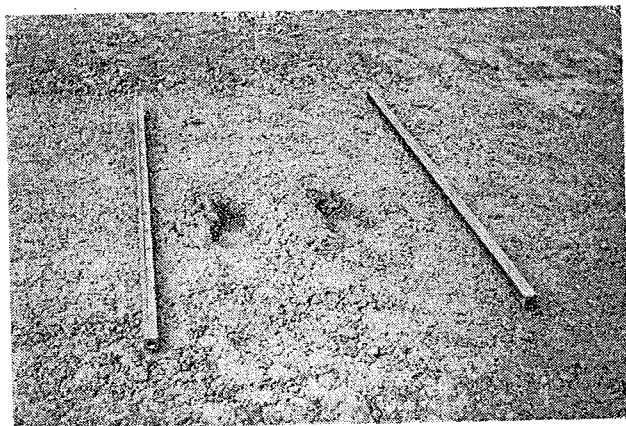
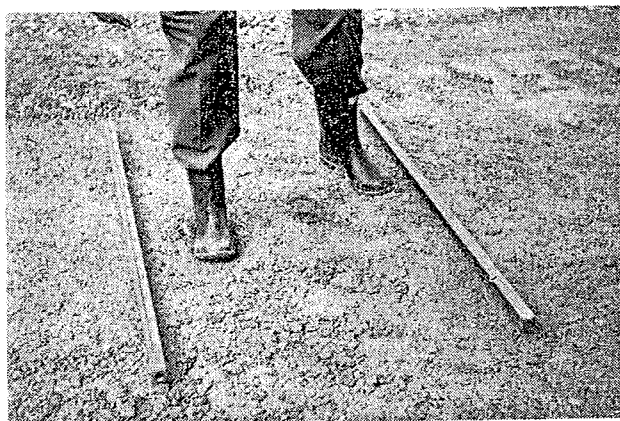
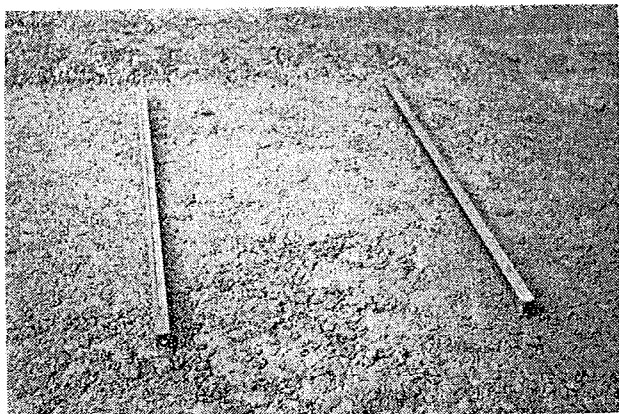


Fig. 2

paiono in parte elastiche, tendendo esse a diminuire una volta cessata l'azione esterna dalla quale sono state provocate. A vista la deformabilità del materiale appare non dissimile da quella di un calcestruzzo fresco dopo vibrazione.

E' stato osservato che il fenomeno diminuisce di intensità col tempo e che il materiale, consolidandosi, perde la sua deformabilità: in particolare ciò fu osservato alla prima ripresa primaverile dei lavori, allorché si poté constatare la perfetta rigidità dell'ultimo strato messo in opera nel precedente autunno: tale strato aveva infatti presentato subito dopo il costipamento una così elevata deformabilità da indurre a sospendere i lavori durante l'inverno. A tale constatazione faceva peraltro riscontro la grande lentezza con la quale il materiale si consolidava, lentezza tale da far temere che, con un sia pur modesto ritmo dei lavori, uno strato, sede del fenomeno descritto, non avrebbe potuto sopportare senza inconvenienti il sovraccarico costituito dagli strati superiori via via posti in opera.

Sulle cause dei descritti fenomeni di deformabilità e sul comportamento dei materiali sede di tali fenomeni alcuni quesiti si ponevano soprattutto in relazione alla destinazione dell'opera, e cioè:

a) Quali relazioni corrono tra la osservata deformabilità dei materiali costipati e le loro caratteristiche granulometriche e di umidità e il tipo di costipamento?

b) E' sufficiente, per l'accettazione di un materiale che dà luogo ai fenomeni in argomento quando viene costipato con contenuto d'acqua  $w_1$ , il provvedimento di ridurre questo a un minor valore  $w_2$  tale che i fenomeni predetti non si riscontrino più? Come si comporterà il materiale, così posto in opera, quando dopo la messa in carico della diga il suo contenuto d'acqua raggiungerà per imbibizione il valore  $w_1$ ?

c) Un materiale che, costipato con contenuto d'acqua  $w_1$ , ha dato luogo ai fenomeni in argomento e che, come si constatò in opera, perdendo successivamente acqua, ha acquistato rigidità, tornerà deformabile allorché dopo la messa in carico della diga il suo contenuto d'acqua tornerà per imbibizione al valore  $w_1$  di quello di costipamento?

Per rispondere a queste domande abbiamo eseguito nel laboratorio di cantiere alcune prove intese a riprodurre i fenomeni di deformabilità constatati in diga e a dar loro una valutazione quantitativa.

Poiché appariva chiaro che la deformabilità del materiale derivava da una caduta della sua resistenza alla penetrazione abbiamo adottato una prova penetrometrica di tipo dinamico consistente nella misura dell'affondamento  $H$  di un maglio del diametro di 100 mm e del peso di Kg 5,550 cadente per venti volte dall'altezza di 490 mm al centro di un cilindro del diametro di 380 mm nel quale viene preventivamente costipato il materiale in esame.

Abbiamo scelto questo tipo di prova avendo dovuto escludere l'impiego dell'ago di PROCTOR perché non compatibile con la massima pezzatura di 80 mm da noi adottata, valore questo al di sotto del quale non abbiamo voluto scendere per non discostarci troppo dalla situazione reale, e non avendo nemmeno potuto prendere in considerazione l'esecuzione di prove di carico (le quali, per materiali di bassa coesione come i nostri, avrebbero avuto il vantaggio di fornirci il valore dell'angolo di attrito e cioè di una grandezza fisica anziché di una grandezza convenzionale  $H$ ) a motivo delle eccessive dimensioni dell'apparecchiatura

necessaria in relazione al predetto valore del diametro della massima pezzatura e della conseguente proibitiva quantità di materiale occorrente. D'altronde, come si è detto più innanzi, i fenomeni di deformabilità constatati in diga ci sono apparsi rivelabili — e quindi quantitativamente apprezzabili — soprattutto da azioni dinamiche, quali il ripetuto calpestio ovvero il passaggio di automezzi pesanti, e pertanto ci è apparsa particolarmente idonea una prova basata su azioni di tale tipo.

La prova è stata eseguita su due campioni di materiale rispondenti a due diverse curve granulometriche (v. Fig. 1); di essi quello indicato con « 1 » riteniamo che rappresenti con sufficiente aderenza quel materiale che in diga viene brevemente definito « molto sporco » e quindi particolarmente soggetto ai fenomeni in argomento, mentre quello indicato con « 2 », derivato dal precedente mediante riduzione dal 6,32%

Kgm/dm<sup>3</sup> 56,25) e con vibrazione su tavolo (potenza 1,5 HP, frequenza 2400 colpi/minuto, durata della vibrazione 20 s). Per ogni curva granulometrica e per ogni tipo di costipamento la prova è stata ripetuta per vari contenuti d'acqua  $w$ , previa determinazione del peso secco dell'unità di volume  $\gamma_s$ , così da poter tracciare (v. Fig. 3) il diagramma di PROCTOR e, sempre in funzione di  $w$ , il diagramma dell'affondamento  $H$  del maglio. Le curve di Fig. 3 sono state tracciate in base ai risultati (indicati con cerchietti) dell'ultima serie di prove eseguita la quale ha confermato i risultati (indicati con crocette) precedentemente ottenuti in alcune altre prove.

Contemporaneamente alla misura dell'affondamento  $H$  abbiamo rilevato, misurando in ventiquattro punti la quota della superficie del materiale nel cilindro prima e dopo la prova, l'aumento di volume  $\Delta V$  provocato dai colpi e dall'affondamento del maglio. I

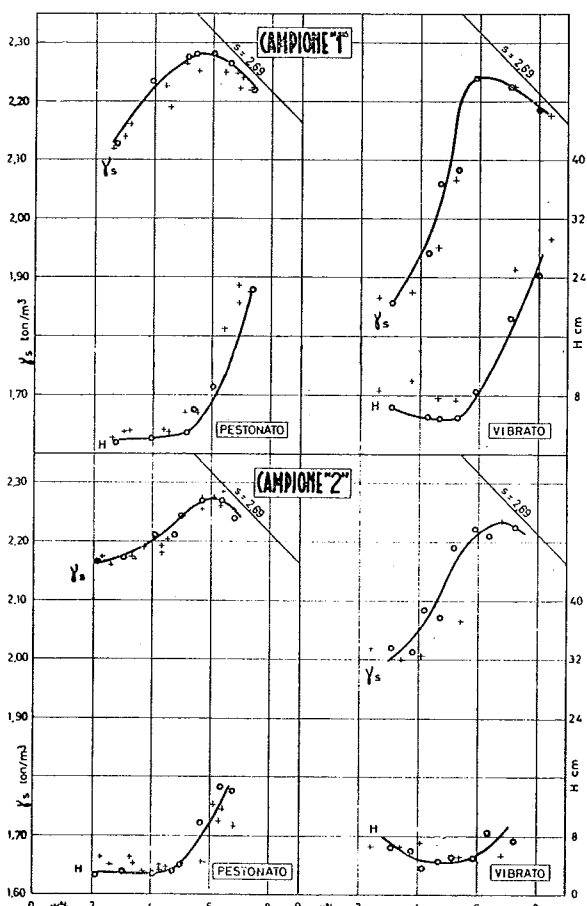


Fig. 3

all'1,30% del passante al vaglio da 0,074 mm, può essere considerato rappresentativo di un materiale « molto pulito » e quindi minimamente soggetto al fenomeno stesso. Le prove sono state eseguite sui due predetti campioni costituiti da materiali preparati in laboratorio mediante mescolamento nelle opportune proporzioni di quattordici classi granulometriche; per ciascuno dei due campioni con due diversi tipi di costipamento e cioè con pestonatura (energia « normale »

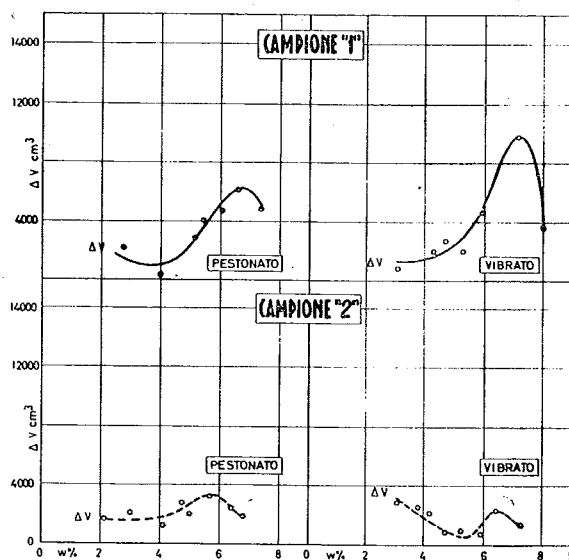


Fig. 4

valori di  $\Delta V$  sono riportati nella Fig. 4; il loro andamento, anche a causa del limitato numero di punti disponibili, è definibile per mezzo di una curva solo per il campione « 1 » per il quale i valori dell'affondamento  $H$  sono stati maggiori; tale andamento peraltro non è contraddetto dalla disposizione dei punti del campione « 2 » per il quale sarebbe possibile, sia pure con minore attendibilità, tracciare curve analoghe.

Per rispondere ai quesiti di cui in b) e in c) abbiamo poi cercato di determinare quali modificazioni subisce la deformabilità del materiale per effetto di variazioni indotte nel suo contenuto d'acqua dopo il costipamento. L'indagine è consistita nella determinazione dei valori degli affondamenti  $H$  rilevati con la descritta prova penetrometrica su alcuni provini del campione « 1 » pestonato il cui contenuto d'acqua veniva portato, per imbibizione o per prosciugamento, a valori diversi da quelli iniziali di costipamento.

Il materiale per le dette prove è stato costipato entro permeometri (di dimensioni uguali a quelle dei nor-

mali cilindri e cioè diametro 380 mm, altezza 350 mm) cosicché si è potuto agevolmente procedere, dopo il costipamento del materiale, sia all'imbibizione di esso mettendo i permeametri sotto carico, sia al prosciugamento lasciandolo per un certo periodo di tempo nella stanza dei forni del laboratorio di cantiere e cioè in un ambiente di elevata temperatura ( $\approx 25^\circ$ ) e di limitata umidità ( $\approx 60\%$  di umidità relativa).

Nell'eseguire questa indagine ci siamo, beninteso, resi conto che i risultati di essa dovranno essere impiegati con la dovuta cautela nel rispondere ai quesiti di cui in b) e in c): essi infatti sono rappresentati dai valori numerici di una grandezza — l'affondamento  $H$  del maglio — che, come più innanzi abbiamo osservato, non ha significato fisico ma è semplicemente convenzionale e pertanto essi potrebbero subire, nel passare dalle prove di laboratorio al reale comportamento dell'opera, delle variazioni anche sostanziali, in relazione alla diversa entità delle masse di materiale in gioco, alle differenti condizioni di drenaggio, in una parola alle diverse condizioni ai limiti. Ciò premesso noi riteniamo tuttavia che l'indagine sia utile per poter dare una prima risposta di orientamento ai quesiti che ci siamo posti.

Per quanto riguarda i risultati del nostro studio, notiamo che i diagrammi riportati nella Fig. 3 localizzano senza incertezza i fenomeni di deformabilità nel campo dei contenuti d'acqua situato alla destra di un valore che è alquanto minore dell'optimum; in corrispondenza di questo valore tutte le curve ( $H$ ,  $w$ ), salvo quella del campione « 2 » vibrato il cui andamento è incerto, presentano un gomito e un successivo rapido incremento delle ordinate; la posizione del gomito lungo l'ascissa e la limitata escursione del ramo discendente delle curve di PROCTOR spiegano la notevole frequenza delle manifestazioni di deformabilità osservate in diga e gli alti valori del peso secco dell'unità di volume che sempre le accompagnano.

Osservando le curve ( $H$ ,  $w$ ) dei campioni « 1 » e « 2 » pestonati si osserva che, salvo una minore intensità, il fenomeno di deformabilità si manifesta ugualmente nei due campioni, cosicché si potrebbe affermare che limitando opportunamente il contenuto di acqua dei materiali da porre in opera i fenomeni in argomento non si verificherebbero neppure in materiali aventi elevate percentuali di frazione fina. Si deve peraltro notare che la limitazione andrebbe operata sul contenuto di acqua di cavatura perché il drenaggio e la evaporazione che il materiale subisce durante il trasporto e la permanenza in diga prima del costipamento riducono facilmente al valore desiderato il contenuto d'acqua di un materiale simile al campione « 2 », mentre per un materiale simile al campione « 1 » ciò non avviene se non molto lentamente e in condizioni meteorologiche particolarmente favorevoli; e questo fatto pone in pratica limiti alquanto ristretti alla quantità di fino accettabile, se si vogliono evitare le manifestazioni di deformabilità in argomento.

Per quanto riguarda il tipo di costipamento non ci sembra di poter trarre importanti conclusioni in merito alla sua influenza sui fenomeni di deformabilità. Si può soltanto osservare che con il costipamento per vibrazione la deformabilità del campione « 1 » risulta maggiore e quella del campione « 2 » risulta minore

che non per pestonatura: ciò che conferma ulteriormente i ben noti criteri di scelta del tipo di costipamento in relazione alla granulometria delle terre da trattare.

L'esame dei diagrammi delle Figure 3 e 4 permette alcune considerazioni sulla natura dei fenomeni in argomento. Come è noto il crescere del contenuto di acqua con il quale il materiale viene costipato e poi sottoposto alla prova di affondamento produce due effetti tra loro contrastanti: da un lato aumenta la possibilità di movimenti relativi delle particelle per l'azione lubrificante esercitata dall'acqua, dall'altro aumenta l'entità delle forze di contatto tra le singole particelle (coesione apparente) le quali a tali movimenti relativi si oppongono. A partire dai bassi valori di  $w_{costip}$  i due effetti più o meno si compensano: né l'affondamento  $H$  (Fig. 3), né l'aumento di volume  $\Delta V$  (Fig. 4) subiscono infatti variazioni di qualche importanza. In tale campo è da rilevare la tendenza dell'affondamento  $H$  nei campioni vibrati a diminuire, sia pure lentamente, con il crescere di  $w_{costip}$ : questa tendenza e il fatto che i valori di  $H$  risultano sensibilmente maggiori ( $5 \div 8$  cm) nei campioni vibrati che nei campioni pestonati ( $2 \div 3$  cm) sono da mettere in relazione ai ridottissimi valori ottenuti per  $\gamma_s$  nei campioni vibrati in corrispondenza dei bassi valori di  $w_{costip}$ , ciò che era dovuto alla inadeguatezza, rilevabile a vista durante la prova, delle caratteristiche di vibrazione del tavolo impiegato nel caso di un materiale troppo asciutto e cioè privo di ogni coesione apparente. A partire da un valore di  $w_{costip}$  individuabile all'incirca in quello corrispondente ai gomiti delle curve  $H$ , l'aumento della mobilità relativa delle particelle per effetto dell'azione lubrificante dell'acqua prevale nettamente sull'aumento della coesione apparente e, in conseguenza, sia le curve  $H$  sia le curve  $\Delta V$  presentano in genere un tratto in rapida ascesa. Crescendo ulteriormente  $w_{costip}$ , la coesione apparente diminuisce e tende ad annullarsi poiché il materiale si avvicina alla saturazione, mentre la mobilità relativa delle particelle diventa massima:  $H$  seguita a crescere indefinitamente mentre invece l'aumento di volume  $\Delta V$  diminuisce rapidamente e tende ad annullarsi poiché, avvicinandosi il comportamento del materiale a quello di un liquido, il rigonfiamento della superficie del campione tende al suo minimo valore che è quello del volume spostato dal maglio.

\* \* \*

Per quanto riguarda il quesito di cui in b), l'indagine da noi condotta sulla variazione che un aumento di  $w$  successivo al costipamento induce nella deformabilità del materiale, ha ricalcato in sostanza quella effettuata da PROCTOR (1) sulla variazione che un analogo aumento di  $w$  induce nella resistenza alla penetrazione da lui definita. La diversità della grandezza di cui si sono studiate le variazioni e più ancora,

(1) R. R. PROCTOR - *Fundamental Principles of Soil Compaction*. Engineering News-Record, August 31, 1933.

R. R. PROCTOR - *Description of Fields and Laboratory Methods*. Engineering News-Record, September 7, 1933.

crediamo, la diversità dei terreni sui quali si è sperimentato (PROCTOR sperimentò su terreni aventi percentuali passanti al vaglio da mm 0,074 variabili tra 15 e 90, mentre noi abbiamo studiato il campione «1» avente per tale percentuale il valore di 6,32) ci hanno peraltro condotto a risultati del tutto diversi. Noi abbiamo infatti ripetutamente constatato che provini del campione «1», costipati con  $w_{costp}$  dell'ordine del 3÷4% e successivamente portati per imbibizione al 6,6÷7,2% danno luogo ad affondamenti  $H$  dell'ordine di 2÷4 cm, valori questi certamente corrispondenti, come mostra la Fig. 3, al contenuto d'acqua di costipamento e non al contenuto d'acqua all'atto della prova, al quale viceversa corrisponderebbero valori di 17÷22 cm. Questo risultato starebbe a indicare che costipando il materiale con  $w$  opportunamente minore di  $w_{opt}$ , e pertanto in assenza di fenomeni di deformabilità, i fenomeni stessi non potranno comparire neppure in seguito quando cioè, messa in carico la diga, il rilevato risulterà saturato.

Per quanto riguarda il quesito di cui in c) noi abbiamo innanzi tutto confermato in laboratorio ciò che avevamo a suo tempo osservato in diga e cioè la perdita da parte del materiale, costipato con elevato  $w_{costp}$ , delle caratteristiche di deformabilità man mano che il valore di  $w$  diminuisce per prosciugamento: provini del campione «1», costipati con  $w_{costp} = 6,5 \div 7,1\%$  e tenuti, senza sovraccarico, in ambiente caldo e non umido così da provocare un abbassamento di  $w$  fino al valore di 4,6÷4,8%, hanno infatti dato luogo ad affondamenti  $H$  di poco più di 3 cm e cioè corrispondenti (v. Fig. 3) al minor valore di  $w$  raggiunto con il prosciugamento.

Per quanto riguarda, sempre con riferimento al quesito c), il comportamento del materiale dopo prosciugamento e successiva reimpregnazione, abbiamo effettuato la determinazione dell'affondamento  $H$  su alcuni provini del campione «1», costipati con elevato valore di  $w_{costp}$  (circa il 7,0%), quindi prosciugati fino a portare  $w$  a valori di circa il 4%, e infine di nuovo portati per imbibizione a alti valori di  $w$  (6,2÷7%). Nella esecuzione di queste ultime prove abbiamo incontrato qualche difficoltà per la risatura-

zione dei provini prosciugati, per ottenere un soddisfacente grado della quale abbiamo dovuto ricorrere ad elevati carichi idraulici: abbiamo infatti rilevato qualche disuniformità nell'umidità finale da punto a punto dei singoli provini e qualche addensamento degli elementi fini verso la superficie. In queste prove abbiamo ottenuto per  $H$  un valore medio di poco inferiore a 5 cm.

Pur con qualche riserva, dovuta ai descritti difetti rilevati nei provini e alla non perfetta corrispondenza tra il valore ottenuto per  $H$  e quello corrispondente al valore minimo di  $w$  raggiunto col prosciugamento (4,0%), siamo indotti a concludere che la perdita delle caratteristiche di deformabilità a seguito di prosciugamento del materiale è da considerare irreversibile e quindi si può dire, ricordando le prove eseguite per rispondere al quesito b), che il materiale, costipato con alti valori di  $w_{costp}$  e quindi sottoposto a prosciugamento, si comporta in seguito come se fosse stato costipato con il minor valore di  $w$  raggiunto col prosciugamento stesso.

\* \* \*

Le caratteristiche geoidrologiche della coltre alluvionale del Fortore, dalle quali trae origine la deformabilità delle ghiaie sabbiose che abbiamo studiato, non sono da considerare particolari del bacino del Fortore: nell'Italia meridionale la costituzione geologica dei terreni conferisce in genere alle alluvioni fluviali granulometria caratterizzata da elevate percentuali di elementi fini, mentre nei recenti depositi ghiaio-sabbiosi di origine fluviale la quota media della falda è in genere non molto depressa rispetto alla quota del tetto del deposito.

Ci è parso pertanto che questo studio della deformabilità delle ghiaie sabbiose dopo costipamento, eseguito, come più sopra è detto, per rispondere ai quesiti che ci si sono presentati nel corso dei lavori di costruzione della diga di Occhito, possa presentare qualche interesse di carattere generale.

*Cantiere d'Occhito, aprile 1963.*

#### DEFORMABILITÉ DES GRAVIERS SABLEUX APRES LE COMPACTAGE.

*Sommaire* - Dans le laboratoire du chantier du barrage de Occhito on a étudié les manifestations de déformabilité qu'on a remarqué dans les graviers sableux compactés pour la construction des massifs perméables du barrage.

Après avoir vérifié que ces manifestations dépendent de la teneur en eau et — indirectement — du pourcentage des éléments fins des matériaux, on a cherché à connaître, par rapport aux conditions d'exploitation du barrage, leur comportement en relation à des variations de leur degré de saturation successives à le compactage.

#### DEFORMABILITY OF SANDY GRAVEL AFTER COMPACTION.

*Summary* - In the laboratory of Occhito Dam the deformability of compacted sandy gravel of the upstream and downstream fills of the dam has been studied. After having ascertained that the deformability depends on the water content and — indirectly — on the percentage of very fine soil fractions, some research has been made, in connection with the exploitation conditions of the dam, to determine the behavior of these soils when the degree of saturation varies after compaction.