

Prove di cantiere e di laboratorio su alcuni tufi dell'Italia Centrale *

A. MOTTA - O. ABBRUZZESE **

SOMMARIO: A cura del Servizio Costruzioni Idrauliche e Civili del Centro P.C.I.E.C. - ENEL - di Roma sono state svolte delle prove di compattazione su alcuni tufi vulcanici della zona Umbro-Laziale.

Sono stati presi in considerazione due tipi di tufo provenienti da due formazioni di caratteristiche ben differenti e su ciascuno di essi sono state condotte parallelamente prove di laboratorio e di cantiere, sui cui risultati si riferisce nell'articolo.

In laboratorio sono state eseguite delle prove di compattazione su quattro classi granulometriche prefissate, ottenute per frantumazione della roccia d'origine. Sono stati determinati i pesi di volume raggiunti con energie diverse di compattazione, crescenti secondo i valori 60 - 270 - 430 - 650 tm/m³, nonché le modifiche dell'assortimento granulometrico del materiale provocate dall'azione meccanica della compattazione.

In cantiere invece, l'andamento della compattazione è stato determinato eseguendo alcuni rilevati sperimentali nei quali si sono controllati i pesi di volume raggiunti in corrispondenza dei successivi passaggi del mezzo costipante.

1. Premessa.

Il Servizio Costruzioni Idrauliche e Civili del Centro P.C.I.E.C. di Roma ha attualmente in corso una ricerca rivolta ad evidenziare alcuni aspetti delle proprietà fisico-meccaniche dei tufi vulcanici della zona umbro-laziale; con la presente comunicazione si intende riferire sui risultati ottenuti a tutt'oggi, e puntualizzare alcune osservazioni preliminari.

La ricerca è in atto da circa 8 mesi nei Laboratori Geotecnici del Centro, siti ad Alviano e a Poggio Cancelli; le prove di laboratorio sono curate dal geom. Bernardino Giuseppoli; alcune delle prove di compattazione sono state eseguite presso il cantiere dell'Impianto Idroelettrico di Alviano, altre presso un cantiere per i lavori di raddoppio del Raccordo Anulare di Roma.

Le necessità della ricerca avrebbero consigliato di dar corso in un primo tempo a tutto il programma previsto per le prove di laboratorio e di procedere poi alle prove di cantiere. Ma non fu possibile realizzare una tale successione, in quanto in effetti il programma delle indagini dovette tener conto del normale impegno di lavoro dei laboratori (ar-

ginatura di Alviano, diga in terra di Poggio Cancelli) e d'altro canto fu necessario anticipare l'esecuzione delle prove di cantiere, in quanto il macchinario necessario alle prove stesse poteva essere disponibile solo per breve tempo.

2. Materiali esaminati.

I tufi che si incontrano nelle regioni umbra e laziale presentano spesso caratteristiche morfologiche e fisiche abbastanza differenti fra loro e pertanto si è deciso di effettuare in doppio le indagini su due tipi di tufo, che provengono da due formazioni vulcaniche di caratteristiche ben differenti. Sono stati prescelti:

a) Un tufo giallastro, di struttura spugnosa, con grossi noduli di pomice, proveniente dalle cave site nei pressi di Alviano (Orvieto) e che in prosieguo verrà denominato Tufo A. Per esigenze derivanti dalla coltivazione della cava stessa non è stato possibile ottenere un tout-venant e si è quindi dovuto operare su blocchetti dalle dimensioni di circa 15 × 30 × 60 (cm), così come provenienti dalle cave.

b) Un tufo rossastro, di struttura abbastanza compatta proveniente dalle cave site nei pressi del Raccordo Anulare di Roma, in sponda sinistra del Fiume Aniene, e che in prosieguo verrà denominato Tufo G. L'estratto di cava è un tout-venant, con dimensioni che vanno dal 2 mm al 500 mm.

Sui materiali di cui sopra sono state effettuate delle prove preliminari che sono servite essenzial-

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

** Dott. Ing. Alberto MOTTA, Capo del Servizio Costruzioni Idrauliche e Civili - E.N.E.L. Centro PCIEC - Roma.

Dott. Ing. Onofrio ABBRUZZESE - Servizio Costruzioni Idrauliche e Civili - E.N.E.L. Centro PCIEC - Roma.

TABELLA I

Sigla convenzionale del tufo esaminato		« A »	« G »
Ubicazione della cava		Alviano	Roma
Pezzatura del materiale fornito dalla cava		blocchetti 15 × 30 × 60 (cm)	Tout-venant 2 mm < d < 500 mm
Peso dell'unità di volume determinato su blocchetti squadrati	γ (g/cm ³)	1,2	1,5
Peso specifico determinato sul passante al vaglio n. 200 A.S.T.M.	γ_s (g/cm ³)	2,494	2,408
Porosità complessiva (pori esterni + pori interni)	n	1,08	0,605
Resistenza a compressione, determinata su cubetti ricavati dal materiale di partenza	σ_r (kg/cm ²)	14 - 16 - 16 - 16 18 - 20 - 22	70 - 70 - 72 - 76 80 - 92 - 100
Limiti di Atterberg, determinati sul passante al vaglio n. 200 A.S.T.M.	w _L (%)	non determinabili	58
	w _P (%)		41,2
	I _P (%)		16,8

mente ad evidenziarne alcune caratteristiche generali (v. Tabella I).

Tra dette caratteristiche conviene ricordare che si è inteso indicare con:

γ_s = il peso specifico dei granuli costituenti il passante al vaglio n. 200 A.S.T.M.;

γ = il peso dell'unità di volume di cubetti di circa 8 cm di spigolo ricavati alla sega: dunque detto peso di volume è riferito al contorno ideale esterno del cubetto nel quale sono racchiusi quindi i pori esterni, i pori interni e la sostanza solida [PENTA, CROCE, ESU, 1961].

3. Prove eseguite in cantiere.

Operando sui due tipi di tufo « A » e « G » sono stati eseguiti in cantiere alcuni rilevati sperimentali per la determinazione delle curve di compattazione. Per tali rilevati sono state adottate le seguenti sigle: A₁, A₂, A₃, A₄ per il tufo del tipo « A », e G₁, G₂, G₃, per il tufo del tipo « G ».

3.1. Rulli impiegati per la compattazione dei rilevati.

I mezzi usati per la compattazione sono stati quelli disponibili in cantiere e precisamente:

- Rullo liscio vibrante, marca A.B.G., tipo a W 25, del peso di 3,4 t, frequenza 1.660 ÷ 2.000 vibrazioni/min, effetto costipante da 11 t a 25 t. Tale rullo è stato usato nella compattazione dei rilevati A₁, A₂, A₃, A₄, G₁, G₂.

- Rullo statico trainato a piede di pecora, marca « Cicogna » tipo 11/120, peso con zavorra 3,35 t, numero dei piedi = 88. Tale rullo è stato usato nella compattazione dei rilevati A₃, A₄, G₁, G₂.

- Rullo liscio vibrante, marca « Vibro-Verken », tipo C H 30-32, del peso di 4t, frequenza 1.400 ÷ 1.600 vibrazioni/min. Tale rullo è stato usato nella compattazione del rilevato G₃.

- Rullo vibrante a piede di pecora, marca « Vibro-Verken », tipo C H 30, del peso di 3,9 t, frequenza 1.400 ÷ 1.600 vibrazioni/min, numero dei piedi = 98. Tale rullo è stato usato nella compattazione del rilevato G₃.

3.2. Spessore degli strati.

Lo spessore di ogni strato, misurato a compattazione avvenuta, è stato mantenuto generalmente intorno a 30 cm ad eccezione del rilevato A₃ per il quale si è operato su 50 cm circa.

3.3 Osservazioni durante l'esecuzione dei rilevati sperimentali.

Per ciascun rilevato sperimentale è stato controllato l'incremento del peso secco dell'unità di volume subito dal materiale in funzione dell'aumento dell'energia di compattazione, aumento ottenuto con successivi passaggi del mezzo costipante impiegato.

TABELLA II

Sigla del rilevato	Pezzatura materiale di partenza	γ	Compattazione	w	γ_{dmax}
		g/cm ³		%	g/cm ³
A ₁	tufo in blocchetti 15 × 30 × 60	1,2	10 passaggi rullo liscio vibrante	9 ÷ 10	1,177
A ₂	»	»	10 passaggi rullo liscio vibrante	23 ÷ 30	1,178
A ₄	»	»	8 passaggi rullo statico a piede di pecora + 8 passaggi rullo liscio vibrante	23 ÷ 30	1,293
G ₁	tout-venant	1,5	10 passaggi rullo statico a piede di pecora + 12 passaggi rullo liscio vibrante	22	1,43
G ₂	»	»	12 passaggi rullo liscio vibrante	24 ÷ 30	1,527
G ₃	»	»	16 passaggi rullo a piede di pecora + 10 passaggi rullo liscio vibrante	23 ÷ 30	1,535 ⁽¹⁾ 1,40 ⁽²⁾

⁽¹⁾ valore medio ricavato sui campioni presi in superficie.

⁽²⁾ valore medio ricavato sui campioni presi a q. - 20 cm.

Le determinazioni del peso secco dell'unità di volume sono state effettuate, con il metodo della sabbia calibrata, su campioni prelevati dopo ogni gruppo di passate del mezzo costipante, ed i valori ai quali si fa riferimento nel contesto sono stati ricavati dalla media dei risultati ottenuti.

Successivamente sono state determinate le curve granulometriche del materiale prelevato per l'esecuzione delle prove precedenti, allo scopo di controllare le variazioni granulometriche subite dal tufo per effetto della frantumazione.

Sembra opportuno notare però che i campioni prelevati, sui quali sono state eseguite le suddette analisi granulometriche, sono costituiti da materiale privo della pezzatura grossa: infatti per l'impossibilità pratica di estrarre i pezzi di tufo con dimensioni superiori ai 150 mm dalla buca scavata per la determinazione del peso secco di volume, si sono dovuti lasciare in sito i blocchi di maggiore consistenza che non erano stati frantumati.

Le curve granulometriche pertanto sono limitate a diametri dell'ordine di grandezza suesposto e non rispecchiano l'effettiva condizione del materiale in opera limitatamente per la parte più alta di esse; per il tratto più basso, dato che l'errore percentuale relativo alla frazione di diametro inferiore a 40 ÷ 50 mm può considerarsi trascura-

bile, dette curve possono comunque ritenersi accettabili.

I dati acquisiti per ogni rilevato sperimentale sono riepilogati nella tabella II; le curve di compattazione sono riportate nelle figure 1 e 2, rispettivamente per il tufo del tipo « A » e per quello del tipo « G ».

Divise in due gruppi, per il tufo del Tipo « A » e per quello del Tipo « G », le prove eseguite possono essere riassunte come segue:

3.4. Rilevati sperimentali con tufo del Tipo « A ».

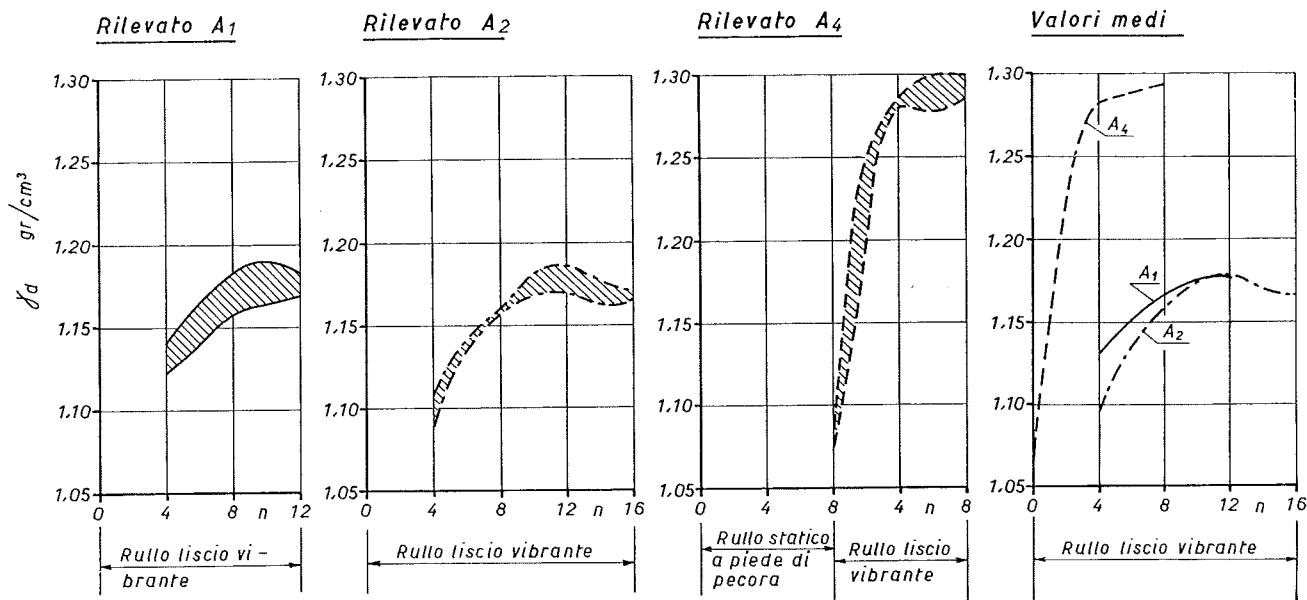
Rilevato A₁. Gli strati sono stati eseguiti riportando con una pala meccanica, il materiale fornito dalla cava « A », (in blocchetti) in modo da ottenere, a compattazione avvenuta, uno spessore di circa 30 cm.

Si è operato con W = 9-10 % (umidità propria del materiale).

La compattazione è stata eseguita con rullo vibrante A.B.G., per un totale di n. 12 passaggi.

Dopo il 4°, 6°, 8°, 10°, 12° passaggio di rullo sono state eseguite la determinazione del peso secco dell'unità di volume di alcuni campioni prelevati e la loro analisi granulometrica.

Il peso secco massimo raggiunto durante la compattazione è risultato di 1.177 g/cm³ (dopo 12



n = Numero di passaggi del rullo

Fig. 1. - Tufo tipo « A »; curve di compattazione.

passaggi del rullo vibrante) e si è mantenuto quindi inferiore al peso dell'unità di volume del materiale di partenza.

Con l'esecuzione di questo rilevato sperimentale si è potuto notare che il passaggio del rullo liscio vibrante determina la formazione di uno strato superficiale di materiale fino, per uno spessore di circa 5-6 cm; al disotto di tale strato il tufo si presenta, (vedi fig. 3), ancora con pezzatura piuttosto grossa, con considerevoli quantità di vuoti causati dalla mancata frantumazione della parte più bassa dello strato.

Le curve granulometriche dei campioni esaminati sono riportate nella fig. 4.

Rilevato A₂. Il materiale è stato steso in strati con le stesse modalità del rilevato A₁, mentre, durante la compattazione, si è provveduto a bagnare a saturazione lo strato a mezzo di getti d'acqua in pressione. Si voleva con questo provocare una migliore chiusura dei vuoti contando sull'azione di trascinarsi dell'acqua in pressione.

Il valore di w è risultato pari a circa $23 \div 30\%$.

Anche per questo rilevato è stato usato il rullo liscio vibrante A.B.G.

I prelievi per le determinazioni dei pesi secchi dell'unità di volume e delle analisi granulometriche sono stati effettuati dopo 4 - 6 - 8 - 10 - 12 - 14 - 16 passate del rullo vibrante.

Il peso più alto è stato raggiunto dal materiale

dopo 12 passaggi del mezzo compattante, ed è risultato pari a $1,178 \text{ gr/cm}^3$.

Si è potuto notare che i getti d'acqua in pressione non hanno dato i risultati sperati perché, dopo i primi passaggi di rullo, sulla superficie dello strato si veniva a formare una crosta che impediva all'acqua di raggiungere le parti più basse del rilevato.

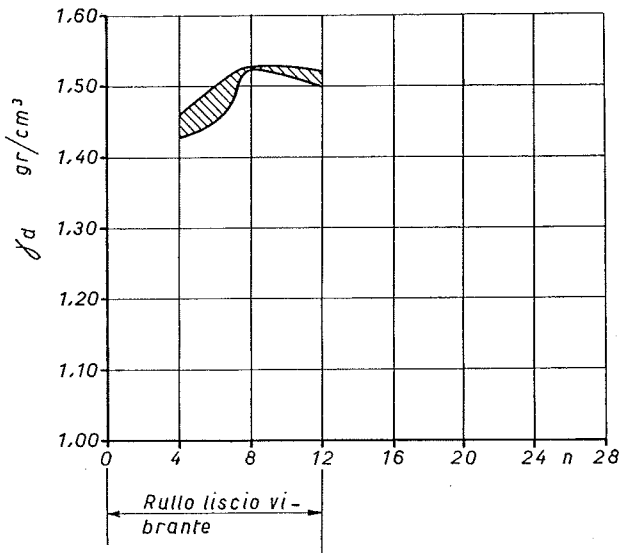
Dal confronto delle due curve di compattazione relative ai rilevati A₁ e A₂ si nota che in quest'ultimo, a causa dell'aumentato valore di W , pur essendo stati adoperati gli stessi mezzi di compattazione e lo stesso materiale già impiegato nell'altro, si sono ottenuti durante i primi passaggi di rullo valori del peso secco di volume inferiori a quelli che si erano riscontrati durante l'esecuzione del rilevato A₁.

Tale differenza, con l'aumentare dei passaggi del mezzo compattante, è andata via via diminuendo fino ad annullarsi in corrispondenza della 12^a rullatura.

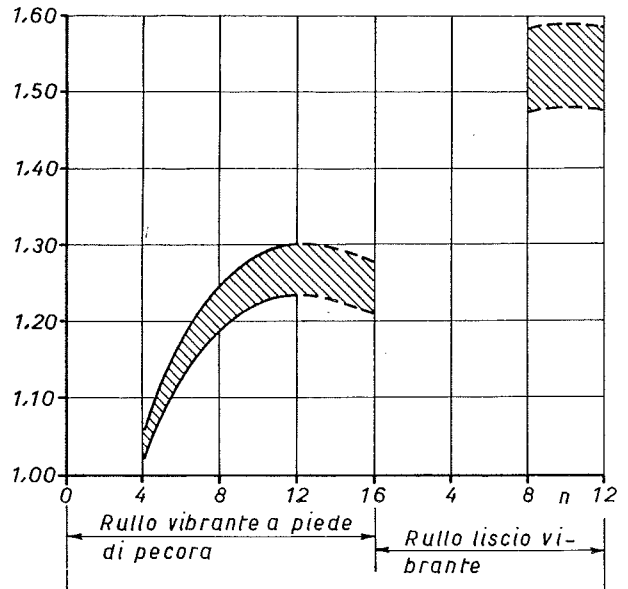
Con l'aumentare del numero dei passaggi del mezzo costipante si è verificato quanto già da altri riscontrato [CASTELLANO, 1963], e cioè che è possibile stabilire un valore dell'energia di compattazione oltre il quale si vengono a procurare nel rilevato degli slegamenti e delle crepe che influenzano negativamente il processo di compattazione.

Per il materiale preso in esame, tale limite corrisponde a 12 passaggi del rullo liscio vibrante Vi-

Rilevato G₂



Rilevato G₃ Campioni superficiali



n = Numero di passaggi del rullo

Valori medi

Rilevato G₃ Campioni prelevati a q. - 20 cm

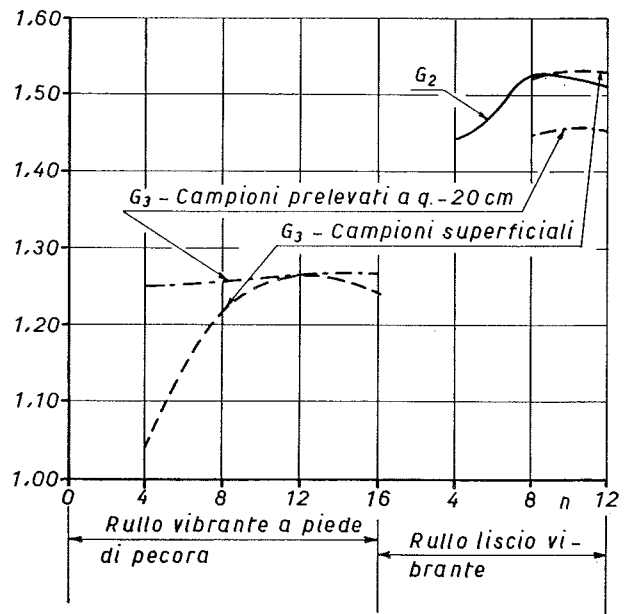
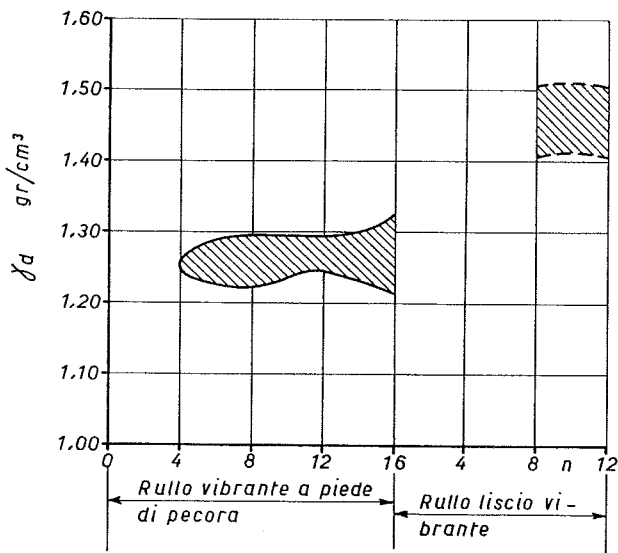


Fig. 2. - Tufo tipo « G »; curve di compattazione.

bro-Verken, come si è rilevato dai risultati della prova eseguita.

Le curve granulometriche dei campioni esaminati sono riportate sulla fig. 5.

Rilevato A₃. I rilevati A₁ e A₂ avevano evidenziato la necessità di frantumare preventivamente il materiale prima di compattarlo.

Come già detto infatti, impiegando un tufo di pezzatura piuttosto grossa come nel caso in questione, non si riusciva ad ottenere durante la compattazione una frantumazione che riducesse il materiale ad una granulometria tale da consentire un maggior addensamento.

Il rullo liscio vibrante esplicava una azione frantumatrice soltanto in superficie, lasciando pressoché inalterato il tufo sottostante.



Fig. 3. - Rilevati sperimentali: prelievo di un campione per la determinazione del γ_d .

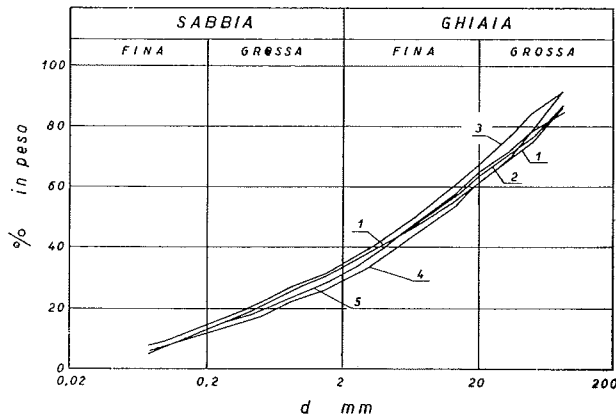


Fig. 4. - Tufo tipo « A »; granulometria dei campioni prelevati sul rilevato A_1 .

Curva 1:	dopo 4	passaggi	del	rullo	liscio	vibrante
» 2:	» 6	»	»	»	»	»
» 3:	» 8	»	»	»	»	»
» 4:	» 10	»	»	»	»	»
» 5:	» 12	»	»	»	»	»

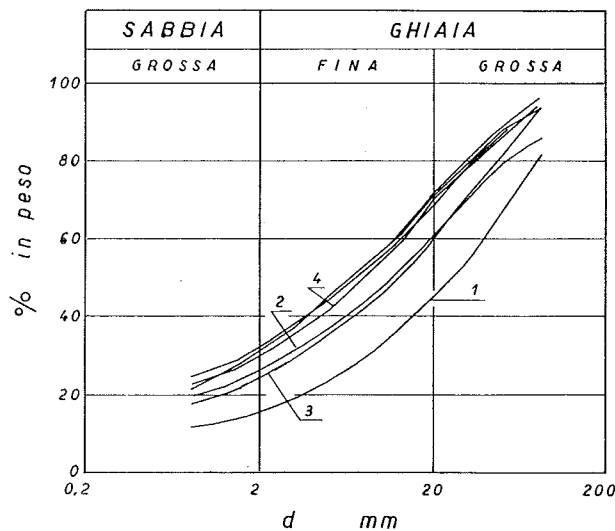


Fig. 5. - Tufo tipo « A »; granulometria dei campioni prelevati sul rilevato A_2 .

Curva 1:	dopo 4	passaggi	del	rullo	liscio	vibrante
» 2:	» 6	»	»	»	»	»
» 3:	» 8	»	»	»	»	»
» 4:	» 10	»	»	»	»	»

Si è pertanto ritenuto opportuno impiegare un rullo a piede di pecora prima di effettuare la compattazione con il rullo liscio vibrante.

Poiché si contava sull'azione frantumatrice di tale mezzo d'opera, il materiale è stato steso in uno strato di circa 50 cm di spessore e poi sottoposto all'azione del rullo tipo « Cicogna ».

Sebbene si sia spinto la rullatura fino ad un totale di 20 passaggi si è constatato che l'azione del rullo si poteva ritenere efficace solo per i primi 30 cm, mentre al disotto di tale quota si rivelava notevolmente ridotta.

Si può quindi dire che lo spessore degli strati non deve superare i 25-30 cm in quanto un maggiore spessore è da ritenersi eccessivo e tecnicamente sconsigliabile.

Non sono stati eseguiti prelievi di campioni.

Rilevato A_1 . Per questo rilevato lo spessore degli strati è stato di 30 cm circa.

Il materiale è stato sottoposto dapprima a 8 passaggi del rullo a piede di pecora « Cicogna » e quindi compattato con 8 passaggi del rullo liscio vibrante Vibro-Verken.

Il numero dei passaggi del rullo a piede di pecora è stato limitato ad 8 in quanto, dopo l'ottavo passaggio, il materiale si presentava già sufficientemente frantumato ed assortito.

I risultati forniti dalle prove effettuate su questo rilevato sperimentale sono stati migliori di quelli ottenuti con i rilevati A_1 e A_2 .

L'azione del rullo a piede di pecora e quindi la frantumazione da esso procurata nel materiale hanno confermato le previsioni precedentemente fatte sul mezzo da adottare per ovviare all'inconveniente causato dalla pezzatura del materiale fornito dalla cava, ottenendo con tale accorgimento risultati apprezzabili.

Si sono riscontrati infatti, per questo rilevato, dei pesi secchi dell'unità di volume superiori al peso dell'unità di volume del materiale di partenza, e questo dopo appena 4 passaggi del rullo liscio vibrante, mentre per i precedenti rilevati tale risultato non era stato ottenuto nemmeno con un numero più alto di passaggi dello stesso rullo vibrante.

Il valore massimo del peso secco dell'unità di volume è stato raggiunto dopo n. 8 passaggi del rullo costipante ed è risultato pari a 1.293 g/cm^3 , superiore a quello del materiale allo stato naturale di circa l'8 %.

Le curve granulometriche sono riportate in fig. 6.

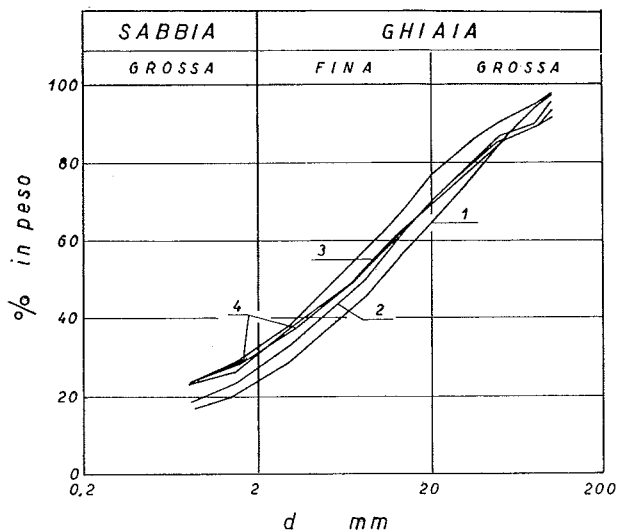


Fig. 6. - Tufo tipo « A »; granulometria dei campioni prelevati sul rilevato A_1 .

Curva 1: dopo 8 passaggi del rullo statico a piè di pecora.
 » 2: come 1, più 2 passaggi del rullo liscio vibrante.
 » 3: » » » 4 » » » » »
 » 4: » » » 6 » » » » »
 » 5: » » » 8 » » » » »

3.5. Rilevati sperimentali con tufo del Tipo « G ».

Le prove con tufo tipo « G » sono state eseguite immediatamente dopo di quelle con tufo del tipo « A ».

Rilevato G_1 . Come si è già detto, il tufo del tipo « G » è un tout-venant, con una notevole percentuale di materiale con $d > 100$ mm e si è pertanto ritenuto ancora opportuno procedere con lo stesso sistema che aveva già dato buoni risultati per il ricavato A_4 (compattazione con rullo liscio vibrante previa frantumazione del materiale a mezzo del rullo a piede di pecora).

Si sono quindi eseguiti dapprima n. 10 passaggi del rullo a piede di pecora « Cicogna » e poi n. 12 passaggi del rullo liscio vibrante Vibro-Verken.

Pur adoperando lo stesso rullo a piede di pecora già usato per il rilevato A_4 , non è stato però possibile ottenere in questo rilevato una sufficiente frantumazione, e ciò a causa della maggiore compattezza e resistenza del tufo impiegato, come risulta dalla tabella 1.

È stata prelevata una sola serie di campioni per la determinazione del peso secco dell'unità di volume, che è risultato pari a $1,43 \text{ g/cm}^3$, dopo aver completato la rullatura del rilevato giusto quanto detto sopra.

Anche se di poco, tale valore è risultato inferiore al peso specifico apparente e pertanto anche

per questo rilevato si sono ripetute le condizioni già verificatesi per i rilevati A_1 e A_2 .

Si è pensato comunque di sfruttare l'azione frantumatrice procurata almeno superficialmente dal rullo liscio vibrante per eseguire, con lo stesso materiale, opportunamente rimosso e mescolato, ulteriori prove di compattazione nel rilevato G_2 , di cui si parla qui di seguito.

Rilevato G_2 . Questo rilevato è stato realizzato con lo stesso materiale risultante dal Rilevato G_1 , come già detto, opportunamente rimosso e mescolato.

Sono stati eseguiti strati da 30 cm circa.

La compattazione è stata eseguita unicamente con rullo liscio vibrante Vibro-Verken, essendosi notato nel rilevato G_1 la inefficacia del rullo a piede di pecora disponibile in cantiere e non essendo stato possibile valersi di altro di potenza superiore.

I prelievi dei campioni per la determinazione dei pesi secchi dell'unità di volume e delle analisi granulometriche sono stati eseguiti dopo 4, 6, 8, 12 passaggi del mezzo costipante.

Il valore massimo del peso secco di volume è stato riscontrato dopo l'ottavo passaggio, ed è risultato di $1,527 \text{ g/cm}^3$.

Rilevato G_3 . Questo rilevato è stato eseguito presso un cantiere di terzi durante i lavori di raddoppio del Raccordo Anulare di Roma. È stato possibile usare un rullo a piede di pecora vibrante, di potenza maggiore di quello statico impiegato nell'esecuzione dei precedenti rilevati.

Il materiale è stato steso in strati di 30 cm circa di spessore.

La compattazione è stata effettuata con 16 passaggi del rullo a piede di pecora vibrante Vibro-Verken tipo C H 30 e da successivi 10 passaggi del rullo liscio vibrante Vibro-Verken tipo C H 32.

Sono state eseguite sul rilevato due serie di prove per la determinazione dei pesi secchi dell'unità di volume e delle curve granulometriche: la prima serie è relativa a campioni prelevati nella parte superficiale (i primi 15 cm), l'altra serie riguarda invece la parte sottostante (i secondi 15 cm.)

Per esigenze di cantiere, mentre è stato possibile seguire con le prove le varie fasi della rullatura con il rullo a piede di pecora vibrante, non si è potuto purtroppo effettuare il controllo sull'andamento della compattazione con il rullo liscio vibrante perché si sono dovuti eseguire i prelievi relativi a questa seconda fase della rullatura solo a compattazione ultimata.

Ciò non consente quindi di poter tracciare la parte finale della curva di compattazione.

Nella figura 2 pertanto è stato riportato, insieme al tratto riguardante la rullatura con il rullo a piede di pecora vibrante, solo l'andamento presunto della curva di compattazione relativa al rullo liscio vibrante.

Il valore massimo del peso secco dell'unità di volume, (media dei risultati ottenuti), è pari a $1,535 \text{ g/cm}^3$ per la parte superficiale dello strato, e $1,46 \text{ g/cm}^3$ per la parte inferiore.

Dall'esame delle curve granulometriche riportate nelle figg. 7-8, si può rilevare che l'azione del

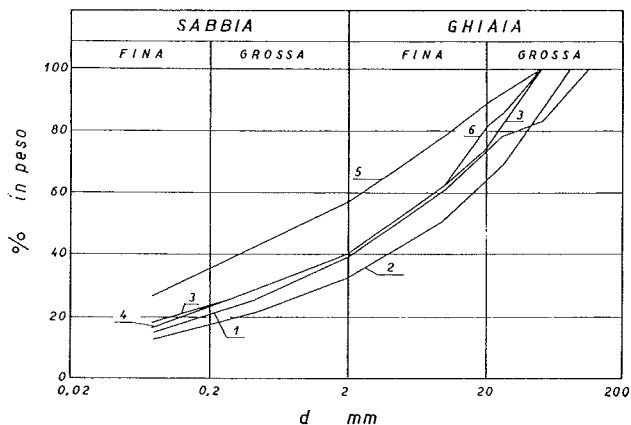


Fig. 7. - Tufo del tipo « G »; granulometria dei campioni superficiali del rilevato G_3 .

Curva 1: dopo 4 passaggi del rullo a piè di pecora vibrante
 » 2: » 8 » » » » » » » »
 » 3: » 13 » » » » » » » »
 » 4: » 16 » » » » » » » »
 » 5: » 16 » » » » » » » »
 più 10 passaggi del rullo liscio vibrante.

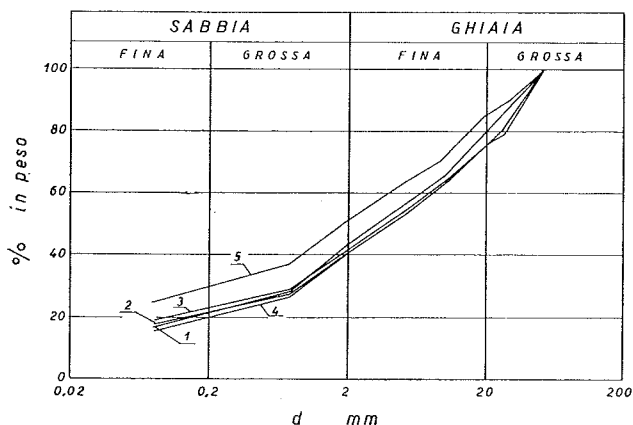


Fig. 8. - Tufo tipo « G »; granulometria dei campioni prelevati a 20 cm dalla superficie del rilevato G_3 .

Curva 1: dopo 4 passaggi del rullo a piè di pecora vibrante
 » 2: » 8 » » » » » » » »
 » 3: » 12 » » » » » » » »
 » 4: » 16 » » » » » » » »
 » 5: » 16 » » » » » » » »
 più 10 passaggi del rullo liscio vibrante.

rullo vibrante a piede di pecora ha determinato una certa frantumazione soltanto nella parte superficiale dello strato.

L'effetto di compattazione di tale rullo è stato scarsissimo in quanto, durante l'azione di esso, il peso secco dell'unità di volume del tufo si è stabilizzato, senza variazioni di rilievo, intorno al valore di $1,26 \text{ g/cm}^3$, anche se, per la parte superficiale si è avuto un lieve ritardo nel raggiungere tale valore (il materiale in superficie si presentava alquanto sciolto, caratteristica questa comune ai rilevati trattati con rulli di questo tipo).

Come si può constatare dalle curve di compattazione tracciate per le due serie di prove, nella fig. 2, dopo l'ottavo passaggio di rullo a piede di pecora vibrante non si sono riscontrati incrementi di γ_a fino a che non si è iniziata la compattazione con il rullo liscio vibrante.

3.6. Considerazioni sulle prove eseguite in cantiere.

a) I rulli a piede di pecora si rivelano efficaci per quanto riguarda la frantumazione del materiale mentre si dimostrano di scarso rendimento nel processo di compattazione.

I rulli lisci vibranti viceversa sono caratterizzati da una scarsa azione frantumatrice, mentre il loro effetto costipante può essere giudicato soddisfacente (vedasi rilevati A_4 e G_3).

b) Il migliore effetto di costipazione si ottiene facendo precedere l'azione di frantumazione ottenuta con rulli a piede di pecora, statici o vibranti, all'azione vera e propria di costipazione esplicata da rulli lisci vibranti, (vedasi rilevati A_4 , G_1 , G_2 , G_3).

c) La scelta dei mezzi d'opera da impiegare è strettamente legata alla resistenza a compressione del tufo da trattare. Ad esempio il rullo statico a piede di pecora è risultato del tutto inefficace per tufi con $\sigma_r > 60 \text{ kg/cm}^2$ (vedasi rilevato G_1).

d) I valori di γ_a riscontrati in opera a compattazione avvenuta, sono al massimo risultati superiori dell'8% al peso dell'unità di volume del materiale di partenza, e ciò pur avendo adottato tecniche di compattazione diverse ed accorgimenti vari nell'esecuzione dei rilevati sperimentali, al fine di ricercare i migliori risultati.

e) La pezzatura iniziale del materiale che viene impiegato per la formazione del rilevato ha una influenza notevole sull'energia di costipamento richiesta per raggiungere i γ_a massimi.

I risultati migliori si possono ottenere con pezzature del materiale di partenza abbastanza ridot-

te ed assortite. Ciò risulta dal confronto dei dati caratteristici dei rilevati A_1 , A_2 e A_4 . Nell' A_4 infatti si può considerare come materiale di partenza un tufo con pezzatura ridotta rispetto a quello impiegato per i rilevati A_1 , A_2 , in quanto frantumati, prima della compattazione, dal rullo a

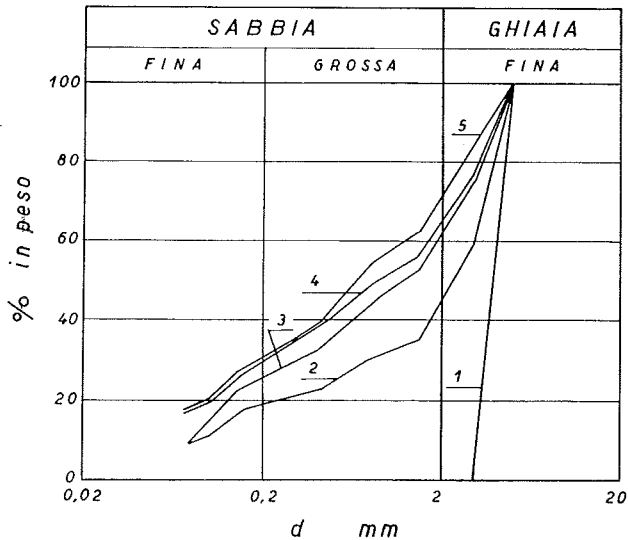


Fig. 9. - Tufo tipo « A »; granulometria dei campioni classe 3 ÷ 5 mm dopo le prove di compattazione in laboratorio.

Curva 1: campione di partenza

- » 2: dopo costipamento con $E = 60 \text{ tm/m}^3$
- » 3: » » » $E = 270$ »
- » 4: » » » $E = 430$ »
- » 5: » » » $E = 650$ »

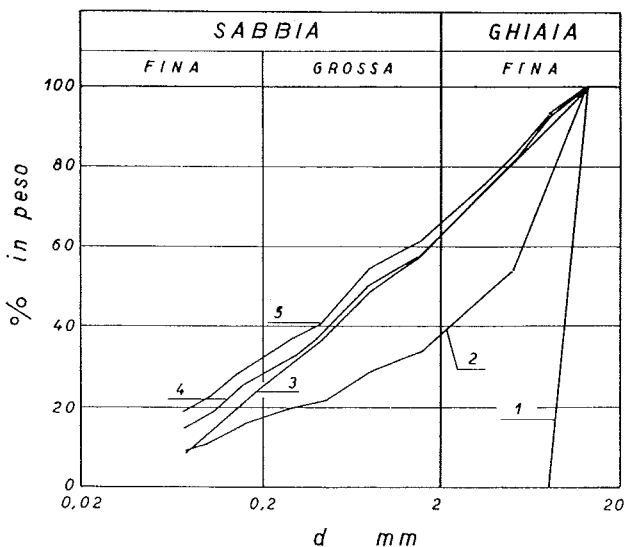


Fig. 10. - Tufo tipo « A »; granulometria dei campioni classe 8 ÷ 13 mm dopo le prove di compattazione in laboratorio.

Curva 1: campione di partenza

- » 2: dopo costipamento con $E = 60 \text{ tm/m}^3$
- » 3: » » » $E = 270$ »
- » 4: » » » $E = 430$ »
- » 5: » » » $E = 650$ »

pie di pecora, (come si è detto l'azione costipante di tale rullo può ritenersi trascurabile).

f) Lo spessore più conveniente degli strati, per assicurare l'uniformità di costipazione negli strati stessi, si può ritenere di circa $20 \div 25 \text{ cm}$; ciò si deduce del confronto dei valori finali di γ_a riscontrati sulle due serie di campioni prelevati in superficie ed in profondità nel rilevato G_3 .

4. Prove eseguite in laboratorio.

L'indagine di laboratorio si è iniziata con l'esecuzione di alcune prove di compattazione sui tufi di tipo « A » e « G », operando su campioni scelti in base a granulometrie prefissate.

È stata anche prevista l'esecuzione sugli stessi materiali di ulteriori prove collaterali quali ad esempio la determinazione del coefficiente K di permeabilità.

Attualmente si è solo in grado di riferire sui dati riguardanti le prove di compattazione del tufo « A », essendo ancora in corso di esecuzione quelle relative al tufo « G ». Su queste ultime prove, nonché su quelle di permeabilità, gli AA. riferiranno in altra sede.

4.1. Descrizione delle prove di compattazione.

I campioni esaminati sono stati ottenuti dalle classi ricavate con la vagliatura del prodotto di frantumazione del materiale originario.

Le granulometrie studiate sono le seguenti:

- a) Classe 3 ÷ 5 mm
- b) Classe 8 ÷ 13 mm
- c) Miscela granulometrica:
 $p = 100 \sqrt{d/D}$, con $D = 13 \text{ mm}$
- d) Miscela granulometrica:
 $I_{gd} = 1,813 P/100 + 1,30103$ ⁽¹⁾

Per ciascuna di essa è stata eseguita una serie di prove di compattazione con energia crescente secondo i valori: $E = 60 - 270 - 430 - 650 \text{ tm/m}^3$.

Per la classe d) si è anche eseguita una prova con $E = 36 \text{ tm/m}^3$.

Le prove con energia di costipamento $E = 60 \text{ tm/m}^3$ sono state eseguite secondo il metodo Proctor Standard e quelle con $E = 270 \text{ tm/m}^3$

⁽¹⁾ La miscela granulometrica di tale equazione corrisponde, nel piano $(p, \log d)$ generalmente usato per rappresentare curve granulometriche, ad una retta in cui per $p = 0\%$ si ha $d = 0.2 \text{ mm}$ e per $p = 100\%$ si ha $d = 13 \text{ mm}$.

secondo il metodo Proctor Modificato. Le prove ad energia di compattazione diversa dalle precedenti si sono eseguite variando unicamente il numero di colpi per strato, in modo da ottenere le energie richieste.

Per ogni serie di prove sono state determinate

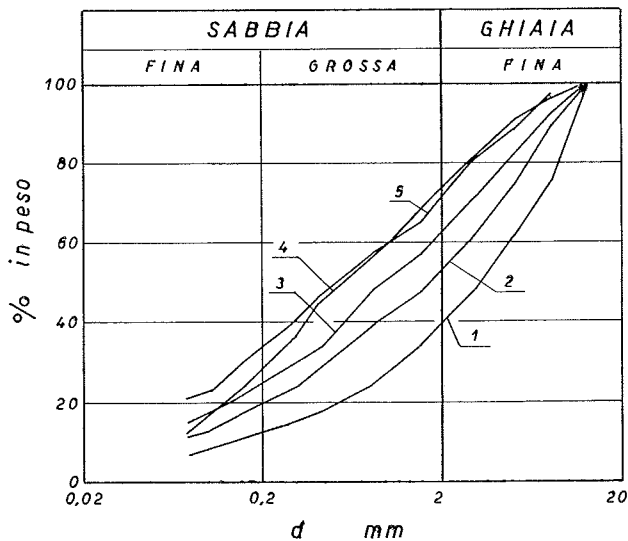


Fig. 11. - Tufo tipo « A »; granulometria dei campioni classe $p = 100 \sqrt{d/D}$ con $D = 13$ mm dopo le prove di compattazione in laboratorio.

Curva 1: campione di partenza

- » 2: dopo costipamento con $E = 60 \text{ tm/m}^3$
- » 3: » » » $E = 270$ »
- » 4: » » » $E = 430$ »
- » 5: » » » $E = 650$ »

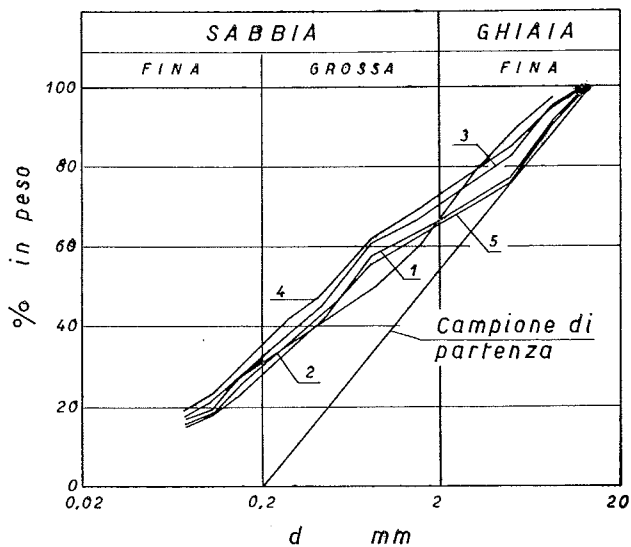


Fig. 12. - Tufo tipo « A »; granulometria dei campioni classe $\lg d = 1.813 p/100 + 1.3013$, dopo le prove di compattazione in laboratorio.

Curva 1: dopo costipamento con $E = 36 \text{ tm/m}^3$

- » 2: » » » $E = 60$ »
- » 3: » » » $E = 270$ »
- » 4: » » » $E = 430$ »
- » 5: » » » $E = 650$ »

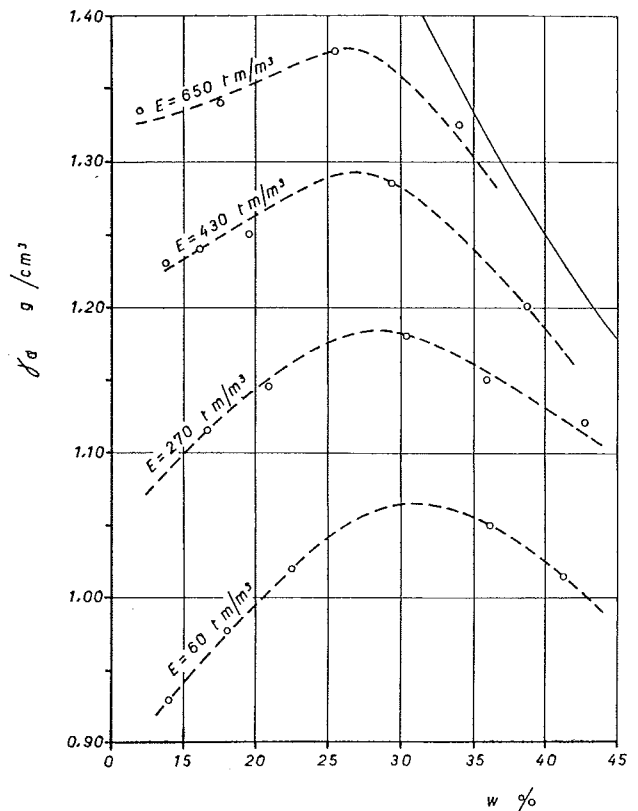


Fig. 13. - Tufo tipo « A », classe $3 \div 5$ mm; prove di compattazione in laboratorio.

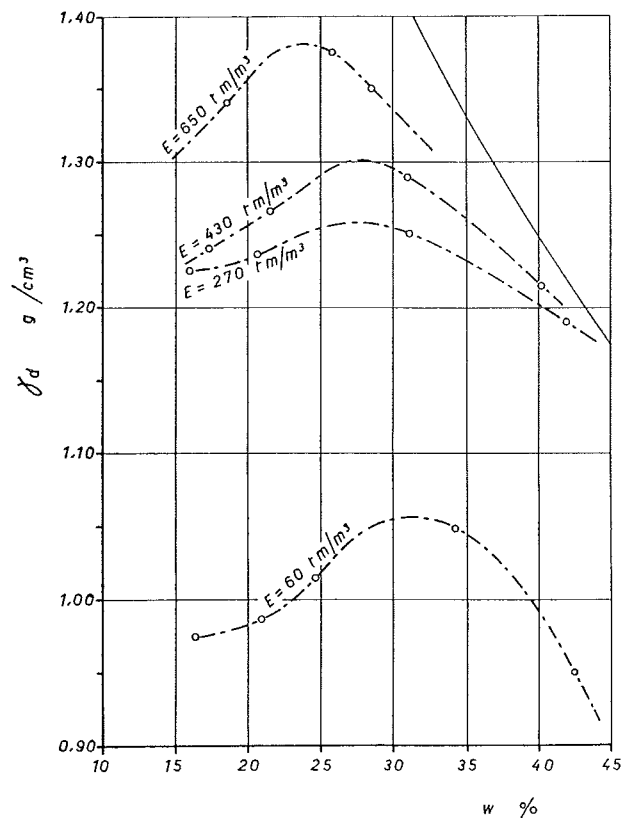


Fig. 14. - Tufo tipo « A », classe $8 \div 13$ mm; prove di compattazione in laboratorio.

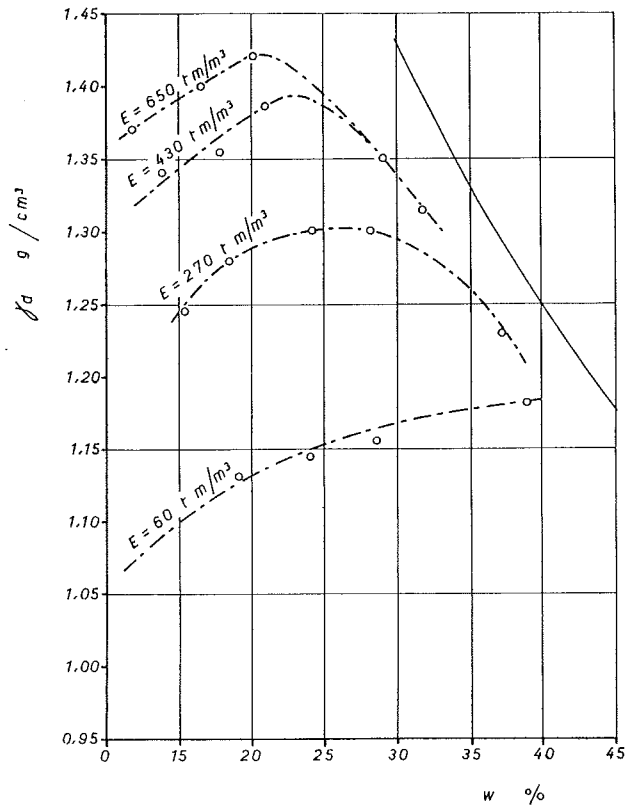


Fig. 15. - Tufo tipo «A», classe $p = 100 \sqrt{d/D}$ con $D = 13$ mm; prove di compattazione in laboratorio.

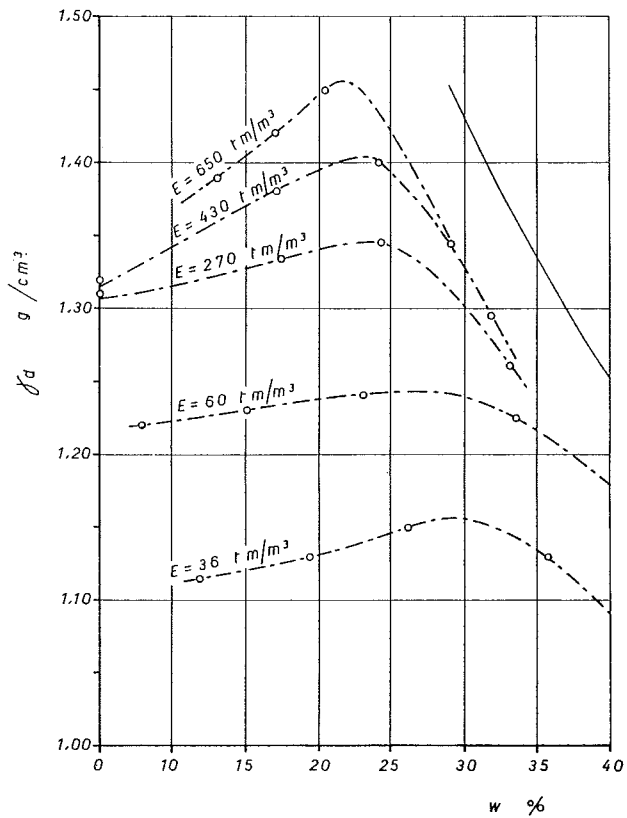


Fig. 16. - Tufo tipo «A», classe $\lg d = 1.813 \frac{p}{100} + 1.30103$; prove di compattazione in laboratorio.

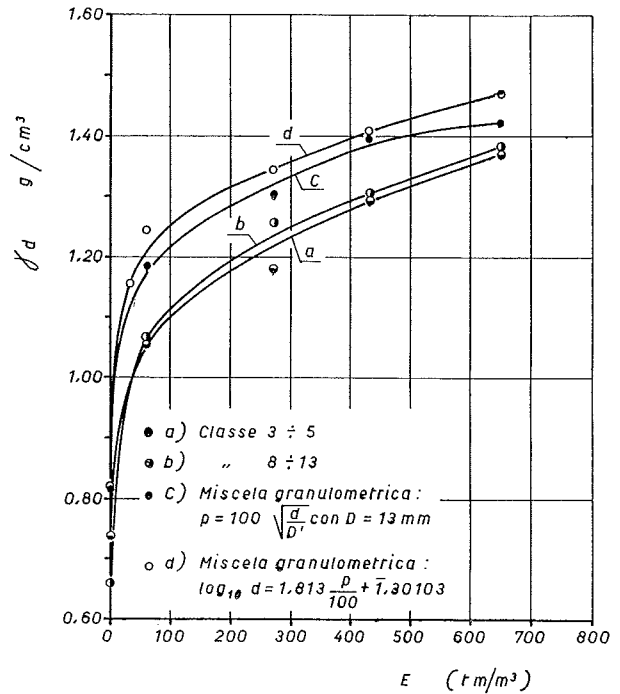


Fig. 17. - Tufo tipo «A»; curve di compattazione.

le curve granulometriche dei campioni prima e dopo la loro compattazione, allo scopo di evidenziare la frantumazione intervenuta durante il costipamento. Tali curve sono riportate nelle figg. 9, 10, 11, 12.

Si sono eseguite per prime due serie di prove sulle classi monogranulari a) e b), (passante al vaglio di diametro superiore e trattenuto a quello di diametro inferiore). Le curve di compattazione, ricavate in base ai valori riscontrati in laboratorio, sono disegnate nelle figg. 13 e 14 rispettivamente per le classi a) e b).

Si è quindi passato ad esaminare l'andamento della compattazione su miscele granulometriche, fra le quali è stata prima studiata la miscela c) e poi la d). Le curve di compattazione ottenute con queste prove sono riportate nelle figg. 15 e 16.

La scelta della miscela d), per la quale la percentuale di materiale passante ai diversi vagli varia secondo legge logaritmica, è stata determinata dalle seguenti considerazioni:

confrontando le granulometrie relative ai campioni che danno i massimi valori di γ_d a compattazione avvenuta, si ottiene, su un piano semilogaritmico, un insieme di curve con andamento quasi rettilineo e molto vicine fra loro: e ciò indipendentemente dalla granulometria del campione prima del costipamento.

Si è pertanto supposto che una miscela granulo-

TABELLA III

Granulometrie esaminate		a)	b)	c)	d)
E = 36 (tm/m ³)	W _{opt} (%)	—	—	—	29.0
	γ _{d opt} g/cm ³	—	—	—	1.156
E = 60 (tm/m ³)	W _{opt} (%)	30.9	31.2	38.9 (*)	26.9
	γ _{d opt} g/cm ³	1.065	1.056	1.183 (*)	1.243
E = 270 (tm/m ³)	W _{opt} (%)	28.0	27.3	26.7	23.3
	γ _{d opt} g/cm ³	1.184	1.258	1.303	1.346
E = 430 (tm/m ³)	W _{opt} (%)	26.6	27.7	22.9	23.0
	γ _{d opt} g/cm ³	1.293	1.301	1.394	1.405
E = 650 (tm/m ³)	W _{opt} (%)	26.3	24.0	20.5	21.3
	γ _{d opt} g/cm ³	1.377	1.380	1.432	1.455

(*) Tali valori corrispondono ai massimi trovati e non agli ottimi in quanto la curva di compattazione, il cui andamento è confermato dai risultati di varie prove ripetute con la stessa energia, non presenta punti di massimo pur avendo w raggiunto un valore pari al 40 %, oltre il quale il materiale non trattiene più l'acqua.

metrica che avesse una curva prossima a quella finale delle altre classi esaminate avrebbe richiesto una minore energia di costipamento per raggiungere lo stesso peso di volume che si era prima avuto impiegando però una maggiore energia.

Per controllare tale ipotesi si è sottoposto la miscela *d*) ad una prova di compattazione con energia E = 36 tm/m³. Si è così ottenuto un γ_d dello stesso ordine di grandezza dei valori ricavati con E = 60 tm/m³ sulle granulometrie *b*) e *c*) e con E = 270 tm/m³ sulla granulometria *a*).

I risultati di tutte le prove di costipamento eseguite sono riportati nella tabella III, mentre nella fig. 17 sono riportati in diagramma i valori del γ_d, relativi alle quattro classi esaminate, in funzione della energia di compattazione.

BIBLIOGRAFIA

- CASTELLANO L. (1963) - *Costruzioni di rilevati e sottofondi stradali con tufi calcarei*. Geotecnica, 5.
 PENTA F., CROCE A., ESU F. (1961) - *Caratteristiche geotecniche dei terreni vulcanici*. Geotecnica, 2.

SUMMARY

Laboratory and site investigations on compaction properties of some volcanic tufts from center Italy.

The Authors report the results so far obtained in a research under way at the Center P.C.I.E.C. - Enel of Rome on compaction properties of volcanic tufts of Umbria and Lazio.

Laboratory and full scale investigations have been performed on two types of tuff having different characteristics.

Tuff type «A» comes from a quarry near Alviano (Orvieto); yellowish in colour, it has a spongy texture and frequent pumiceous inclusions. Specific gravity equals 2,49 g/cm³; unit weight 1,2 g/cm³; void ratio 1,08; unconfined compression strength 17 kg/cm². Passing n. 200 mesh is non plastic.

Tuff type «G» comes from quarries near Rome, in the left bank of Aniene river; it is reddish in colour and rather compact. Specific gravity equals 2,41 g/cm³; unit weight 1,5

g/cm³; void ratio 0,61; unconfined compressive strength 80 kg/cm²; passing n. 200 mesh has $w_L = 58\%$, $w_p = 41\%$.

Both tuffs have been employed in experimental fills, compacted by different means (static and vibratory smooth and sheepfoot rollers, tired rollers). Relevant data are listed in Table I, and results obtained in Table II.

The investigations on experimental fills led to the following conclusions:

a) The unit weight of compacted material is of the same order of that of parent rock; the maximum increase in unit weight attained by shattering and compaction is only about 8 %;

b) the thickness of the layers to be compacted should never exceed 30 cm;

c) best compaction efficiency is attained by previously shattering the material with static or vibratory sheepfoot rollers, and then compacting by smooth vibratory rollers (fills A4, G1, G3).

Laboratory investigations included a series of compaction tests on both tuffs, starting on samples with a selected grain size distribution. Grain size studied were:

a) $3 \text{ mm} \leq d \leq 5 \text{ mm}$;

b) $8 \text{ mm} \leq d \leq 15 \text{ mm}$;

c) parabolic grain size distribution, with $d_{\max} = 13 \text{ mm}$;

d) logarithmic grain size distribution, with $0,2 \leq d \leq 13 \text{ mm}$.

Results so far obtained are reported in table III.

The research is still going on.