

RESISTENZA AL TAGLIO DI UNA SABBIA FINE UNIFORME (*)

P. COLOMBO (**)

SOMMARIO: Vengono presentati i risultati di una serie di prove di taglio diretto e di una serie di prove triassiali con drenaggio, eseguite su provini di sabbia fine uniforme con porosità variabile da 0,38 a 0,54, cioè passando da sabbia densa a sabbia molto sciolta.

Tra le varie osservazioni sul comportamento della sabbia in queste prove è da rilevare la variazione dell'angolo d'attrito interno da 45° con la minima porosità a 25° con la massima, ed in particolare da 33° a 25° con porosità comprese tra 0,51 e 0,54.

Premesse

In una prova triassiale la sabbia ad ogni stadio è in equilibrio con le forze esterne agenti; ad ogni stadio della prova nei punti di contatto tra i grani, le forze d'attrito variano da zero ad un valore massimo limite di scorrimento. Un aumento di intensità delle forze esterne evidentemente produce uno spostamento secondo la direzione di minor resistenza al taglio di quei grani, che sono al valore limite della forza d'attrito, in una nuova posizione che dà luogo ad una maggior resistenza e che più difficilmente permette un nuovo slittamento.

Lo spostamento dei grani può dar luogo, in funzione della porosità iniziale e delle pressioni esterne, sia ad un aumento che ad una diminuzione del volume iniziale totale.

D'altra parte quanto maggiore è lo spostamento richiesto ai grani per sviluppare la massima resisten-

za al taglio, tanto minore è la resistenza che può essere sviluppata a parità di condizioni di forze esterne.

La presente ricerca riguarda essenzialmente l'influenza della porosità sulla resistenza al taglio di una sabbia satura e quindi sull'angolo d'attrito in condizione di pressione di contenimento σ_3 costante.

È necessario premettere che nelle prove triassiali usuali la quantità di sabbia che costituisce il campione è sufficientemente grande perchè si possa dire che la disposizione strutturale dei grani è la stessa per la stessa porosità iniziale e che, essendovi simmetria di condizioni di sollecitazione, ogni singolo grano sceglie la direzione di minor resistenza che dovrebbe essere dipendente dalla posizione relativa dei grani adiacenti.

Caratteristiche della sabbia usata nelle prove

Il materiale usato nelle prove è una sabbia marina caratterizzata da una granulometria (fig. 1) molto uniforme ed avente la maggior parte dei grani con diametro compreso tra 0,25 e 0,15 mm.

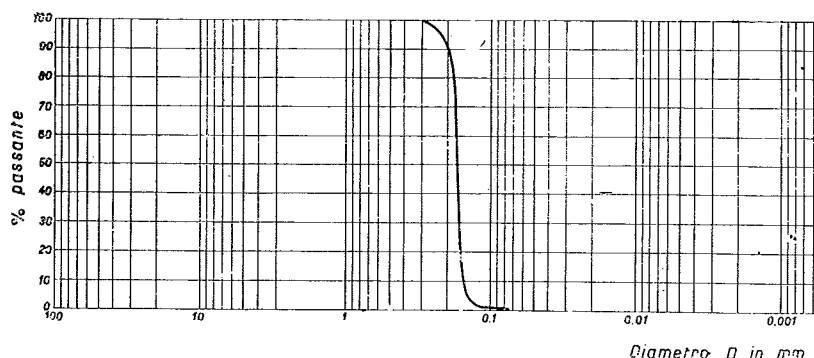


Fig. 1 - Curva granulometrica della sabbia.

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

(**) Prof. Ing. Pietro COLOMBO, Libero Docente di *Geotecnica* ed Incaricato di *Geotecnica* presso la *Facoltà di Ingegneria* dell'Università di Padova.

Il peso specifico è di 2,75 gr/cm³; il peso secco massimo dell'unità di volume con costipamento AASHO modificato è pari a 1,70 gr/cm³ e con costipamento AASHO standard è pari a 1,62 gr/cm³.

L'angolo di riposo della sabbia essiccata varia tra 31° e 33° e il peso secco medio dell'unità di volume corrispondente è di 1,50 gr/cm³ (porosità n = 45,5 per cento).

Prove di taglio diretto: risultati ed osservazioni

Prima di eseguire le prove triassiali con drenaggio è parso opportuno, per avere ulteriori dati di confronto, assoggettare la sabbia ad una serie di prove di taglio diretto. Queste prove sono state eseguite con apparecchio a velocità di deformazione controllata ed agendo su provini circolari di 64 mm. di diametro e di altezza variabile da 20 a 30 mm.

I provini con porosità media iniziale inferiore al 51 % (peso secco dell'unità di volume $\gamma_d = 1,35$ gr/cm³) sono stati ottenuti facendo depositare la sabbia in acqua e variando la porosità col porre la scatola con il provino su un piatto vibrante; i provini con porosità superiore al 51 % sono stati ottenuti setacciando la sabbia con contenuto d'acqua di circa il 10 % nella scatola di contenimento e successivamente procedendo molto lentamente alla imbibizione.

Le prove sono state eseguite con pressione verticale costante, pari a 1,025 kg/cm²; in tal modo si è cercato di eliminare un fattore di variabilità poichè, come è noto, l'angolo d'attrito delle sabbie, determinato con le prove di taglio diretto, aumenta in un certo grado al diminuire della pressione verticale.

La deformazione orizzontale è stata spinta fino a 6,5 mm.

In fig. 2 sono riportati i diagrammi del rapporto tra tensione tangenziale e tensione normale efficace (τ/σ) e della deformazione verticale in funzione della deformazione orizzontale per porosità dopo consolidamento (n_c) bassa, media ed alta.

La porosità bassa è caratterizzata da un valore massimo della resistenza ben accentuato e da un aumento di volume continuo e abbastanza rilevante, salvo che per un breve tratto di deformazione orizzontale iniziale.

La porosità media presenta un valore massimo della resistenza poco diverso dal valore finale ed una leggera diminuzione di volume per un primo tratto di deformazione orizzontale, seguito da un aumento di volume fino a valori superiori al valore iniziale.

La porosità alta presenta, invece, un continuo aumento di resistenza — nelle prove con porosità elevata si è fatto riferimento alla resistenza corrispondente alla deformazione di 6,5 mm — ed una continua diminuzione di volume che però va attenuandosi all'aumentare della deformazione orizzontale; alle elevate deformazioni il volume si mantiene praticamente costante.

La porosità critica, cioè quella per cui non si ha deformazione verticale del campione, risulta, interpolando tra i risultati delle prove, pari a circa $n = 49\%$ (peso di volume secco dopo consolidamento $\gamma_d = 1,40$ gr/cm³).

In fig. 3 sono riportati i diagrammi dell'angolo

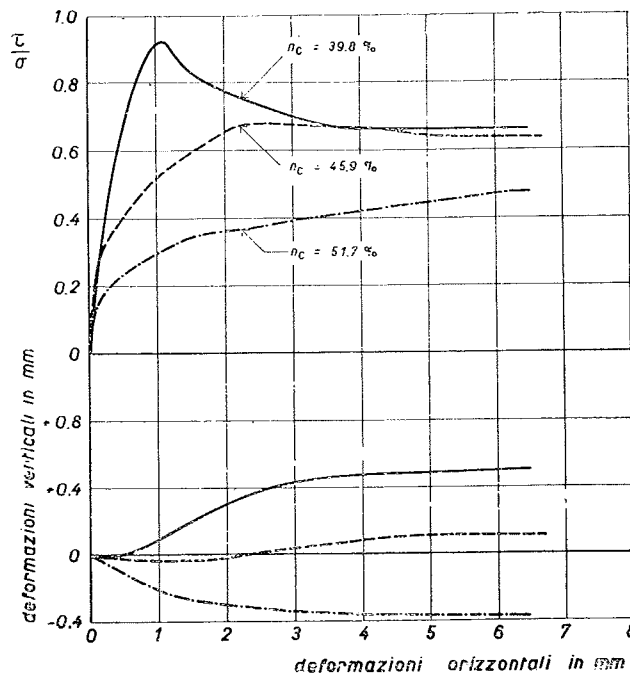


Fig. 2 - Prove di taglio diretto - curve del rapporto tra la tensione tangenziale (τ) e la tensione normale (σ) e della deformazione verticale in funzione della deformazione orizzontale.

d'attrito (ϕ), determinato nell'ipotesi di coesione nulla, in funzione della porosità iniziale (n_i), della porosità dopo consolidamento (n_c) e della porosità alla rottura (n_r). Si può così grosso modo osservare, con riferimento alla porosità dopo consolidamento (n_c), che, mentre con porosità inferiore alla critica si ha un aumento abbastanza regolare dell'angolo d'attrito da 32° a 43° al diminuire della porosità, con porosità superiore alla critica si ha una diminuzione di angolo d'attrito da 32° a 25° per una variazione della porosità del 3 %.

Questa notevole diminuzione è probabilmente legata ad una struttura molto più instabile di quella che si ha con porosità inferiore alla critica ed, in parte, anche alle modalità di prova ed ai criteri di interpretazione dei risultati delle prove.

Il tratto sensibilmente rettilineo della curva può essere espresso in funzione dell'indice dei pori (e)

$$0.61$$

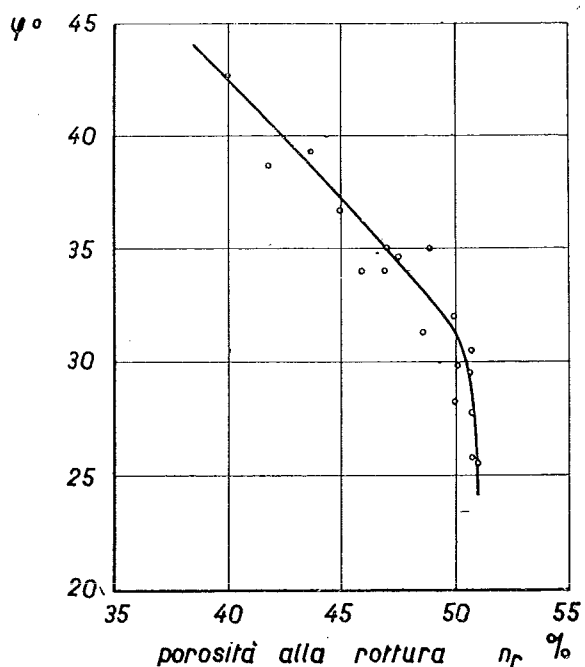
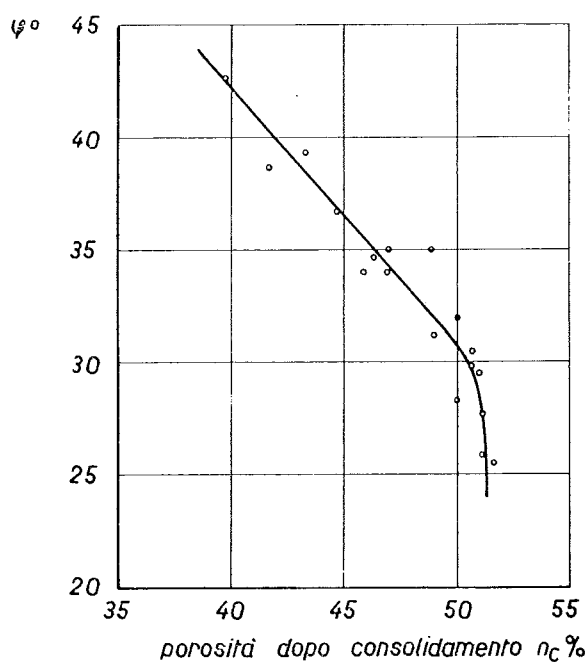
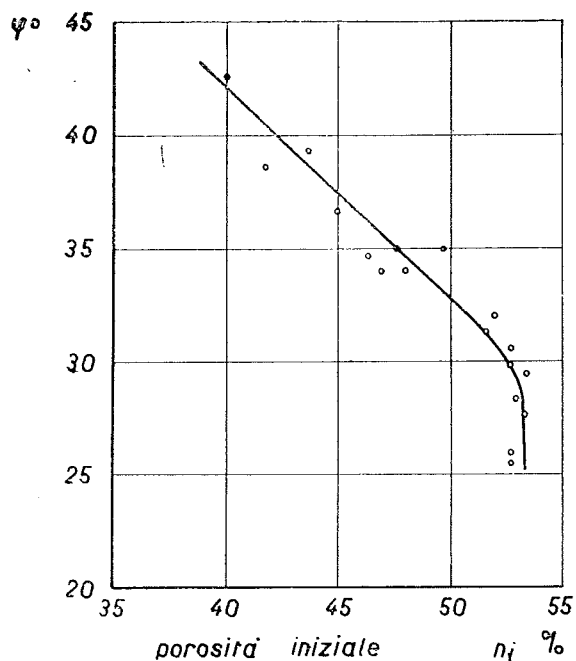
con la relazione $\text{tg}\phi = \frac{0.61}{e}$ che è abbastanza in ac-

cordo con i risultati di prove su materiali sabbiosi di altri sperimentatori.

L'angolo d'attrito corrispondente al minimo volume del campione durante la prova, nei provini con porosità dopo consolidamento inferiore al 49 %, è dell'ordine di 30° e in questo campo di porosità e per queste condizioni si mantiene sensibilmente costante e quindi indipendente dalla porosità.

L'angolo d'attrito finale nelle prove di taglio diretto per sabbia imbibita, sempre per sabbia con porosità dopo consolidamento inferiore al 49 %; varia tra 32° 40' e 34° 10' ma con valori più frequenti intorno a 33° e corrispondenti quindi all'angolo di riposo della sabbia asciutta.

Prove di taglio diretto eseguite su sabbia asciutta con porosità iniziale variabile tra il 40 % ed il 51 %



e sempre con pressione verticale pari a 1,025 kg/cm² hanno indicato un angolo d'attrito superiore di 1-2 gradi a quello della sabbia imbibita con la stessa densità, mentre l'angolo d'attrito finale è ancora risultato pari a 33°.

Prove triassiali con drenaggio: risultati ed osservazioni

Le prove triassiali con drenaggio sono state eseguite su provini con diametro variabile da 3,5 a 3,8 cm e altezza variabile da 7,9 e 8,2 cm.

Per i provini con porosità iniziale inferiore al 52 per cento la preparazione è avvenuta immergendo in acqua disaerata la sabbia fatta bollire precedentemente. In tal modo la saturazione del provino è assicurata. Le varie porosità sono state ottenute facendo vibrare leggermente la fustella contenente il provino.

Per i provini con porosità iniziale superiore al 52 % è stata adottata una particolare tecnica di preparazione. La sabbia con contenuto d'acqua dell'ordine del 10 % è stata lasciata cadere attraverso un setaccio nella fustella fino a formare il campione; è stata poi fatta filtrare l'acqua molto lentamente attraverso la sabbia dal basso verso l'alto ed infine il campione è stato sigillato superiormente. Abbassando poi il tubo di vetro collegato alla base del campione di sabbia, è stata provocata una leggera depressione che ha permesso la rimozione della fustella e la preparazione della cella triassiale per il consolidamento. In questo modo però non si è ottenuta una saturazione completa del provino, ma si sono realizzate porosità iniziali molto elevate ed una struttura piuttosto instabile.

Le prove sono state eseguite con velocità di deformazione assiale di 0,2 % al minuto e sono state spinte fino a deformazioni variabili tra 21 % e 30 %.

La variazione di volume del provino è stata controllata sia durante il consolidamento sia durante la prova di taglio. Con i provini con porosità iniziale inferiore al 52 % le variazioni di volume potevano essere controllate correttamente attraverso il livello del piezometro collegato con il provino, poiché quest'ultimo era saturo. Con i provini con porosità iniziale maggiore del 52 % e quindi mai completamente saturi il controllo è stato eseguito sia con il piezometro che con il volumetro collegato con la campana e si è fatto principalmente riferimento alle misure con il volumetro.

Tutte le prove sono state eseguite con pressione di consolidamento costante $\sigma_3 = 1$ kg/cm² potendo in tal modo più facilmente analizzare i risultati delle prove e studiare l'influenza della porosità specialmente per le porosità elevate.

Nell'elaborazione dei dati la pressione assiale ($\sigma_1 - \sigma_3$) è stata determinata facendo riferimento all'area del provino dedotta come rapporto tra il volume reale e l'altezza reale del campione ad ogni stadio della prova.

Fig. 3 - Prove di taglio diretto - angolo d'attrito (ϕ) in funzione della porosità iniziale (n_i), della porosità dopo consolidamento (n_c) e della porosità della rottura (n_r).

Da notare che indubbiamente nei campioni con porosità elevata influiscono in modo abbastanza rilevante le modalità di prova sia a causa della struttura più instabile del materiale sia perchè i dati che più interessano si hanno con le deformazioni elevate.

La serie di prove ha interessato un campo di porosità iniziale compresa tra 39,1 % e 59,2 %, un campo di porosità dopo consolidamento compreso tra 38 % e 53,5 % (peso secco dell'unità di volume dopo consolidamento variabile tra 1,705 gr/cm³ e 1,276 gr/cm³) ed un campo di porosità alla rottura compreso tra 38,9 % e 52,2 %.

In fig. 4 sono riportati alcuni diagrammi, tipici per le varie porosità, della pressione assiale ($\sigma_1 - \sigma_3$) e della variazione percentuale del volume iniziale $\frac{\Delta V}{V_0}$ in funzione della deformazione percentuale (ϵ).

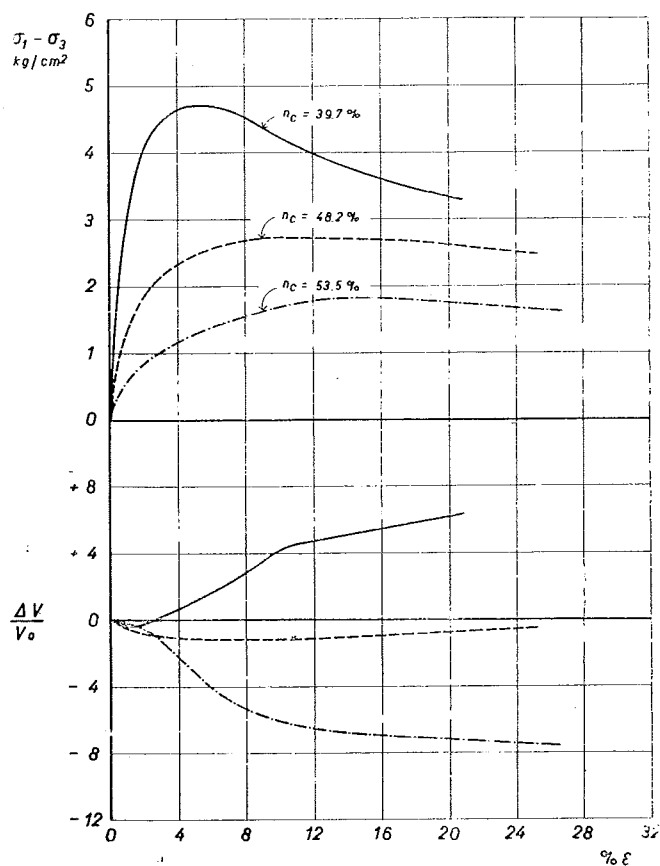


Fig. 4 - Prove triassiali con drenaggio - curve della pressione assiale ($\sigma_1 - \sigma_3$) e della variazione percentuale del volume iniziale $\frac{\Delta V}{V_0}$ in funzione della deformazione percentuale (ϵ).

Nei campioni con porosità dopo consolidamento inferiore a 47 % (peso secco dell'unità di volume dopo consolidamento superiore a 1,45 gr/cm³), l'applicazione della pressione assiale dà luogo ad un continuo aumento di volume del campione, salvo una leggera diminuzione iniziale, e la rottura viene rag-

giunta, come è già stato osservato da vari sperimentatori, in corrispondenza della massima velocità di aumento di volume.

Nei campioni con porosità dopo consolidamento superiore al 47 %, la rottura viene sempre raggiunta con diminuzione di volume. Però, mentre per quelli con porosità dopo consolidamento compresa tra il 51,5 % e il 47 % si raggiunge durante la prova un minimo di volume del campione per poi avere un leggero aumento alle grandi deformazioni, per quelli con porosità dopo consolidamento superiore al 51,5 per cento almeno fino a deformazioni dell'ordine del 30 %, si ha una diminuzione di volume che però diviene quasi trascurabile alle elevate deformazioni.

La porosità critica per queste condizioni di prova risulterebbe pari a circa $n = 48$ %. Si deve però osservare che la porosità critica determinata in questo modo corrisponde ad un comportamento medio dell'intero campione.

In realtà analizzando un campione di sabbia sottoposto alla prova triassiale generalmente si può osservare che le zone vicino alle estremità sono meno porose di quelle centrali, nelle quali principalmente si sviluppano i fenomeni di scorrimento. Ne consegue quindi che l'analisi dei risultati delle prove risente indubbiamente dell'approssimazione che si ha nella stima della porosità.

Nei diagrammi di fig. 5 è riportato l'angolo d'attrito (ϕ), determinato nell'ipotesi di coesione nulla

$$\text{con la relazione } \sin \phi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3) + 2\sigma_3}$$

in funzione della porosità iniziale (n_i), della porosità dopo consolidamento (n_c) e della porosità alla rottura (n_r).

Prendendo in considerazione il diagramma relativo (ϕ), determinato nell'ipotesi di coesione nulla vale che mentre con porosità variabile tra il 38 % e il 51 % si ha una diminuzione abbastanza graduale dell'angolo di attrito tra 46° e 33°, nel campo di porosità tra il 51 % e il 53 % l'angolo d'attrito può scendere fino a 26°.

Valori così bassi dell'angolo d'attrito, determinati con prove triassiali con drenaggio, dipendono dalla struttura instabile della sabbia, dalla non completa saturazione ed anche forse dalle modalità di prova; da notare che sono stati determinati su una sabbia fine molto uniforme e praticamente priva di particelle di dimensioni inferiori a 0,074 mm.

È quindi probabile che, eseguendo le prove su una sabbia fine avente almeno 3-5 % di particelle inferiori a 0,074 mm, si possa realizzare una struttura ancora più instabile e misurare angoli di attrito più bassi.

Il tratto sensibilmente rettilineo della curva tra il 40 % ed il 51 % di porosità può essere espresso in funzione dell'indice dei pori (e) con la relazione

$$\text{tg } \phi = \frac{0,68}{e}$$

Il valore 0,68 è superiore a 0,55 valore medio dei risultati di altri sperimentatori con prove su sabbie e ghiaia, indicato nel testo di Caquot e Kerisel.

Tale differenza può essere giustificata ricordando che la sabbia studiata è molto uniforme, che la pressione di contenimento usata nelle prove è piuttosto

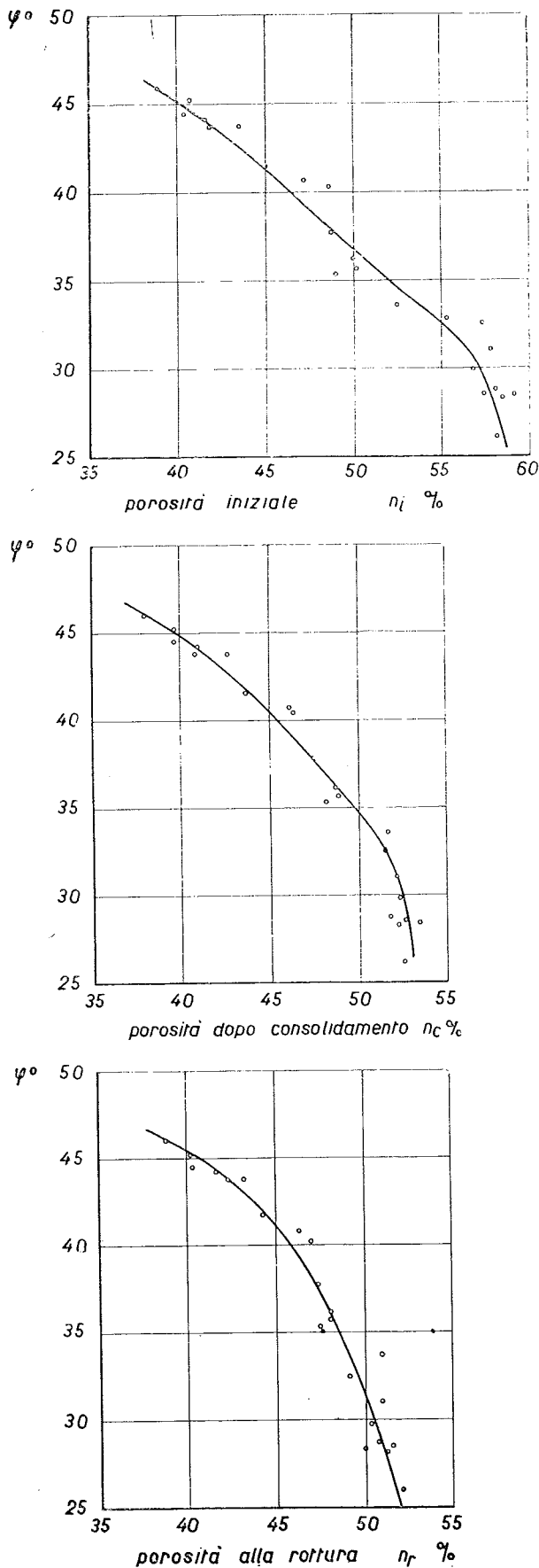


Fig. 5 - Prove triassiali con drenaggio - angolo d'attrito (φ) in funzione della porosità iniziale (n_i), della porosità dopo consolidamento (n_c) e della porosità alla rottura (n_r).

bassa e che il valore 0,55 si riferisce anche a risultati di prove di taglio diretto.

Nel diagramma relativo alla porosità alla rottura si ha un comportamento abbastanza simile, salvo una maggiore gradualità nella diminuzione dell'angolo d'attrito all'aumentare della porosità.

Nei diagrammi di fig. 6 è riportato l'angolo d'attrito calcolato con il valore della pressione assiale ($\sigma_1 - \sigma_3$) corrispondente alla deformazione del 20 %, con il valore di ($\sigma_1 - \sigma_3$) alla fine della prova cioè corrispondente a deformazione variabile tra il 21 % e il 30 % e con il valore di ($\sigma_1 - \sigma_3$) corrispondente al volume minimo del campione durante la prova, in funzione della porosità dopo consolidamento e della porosità reale corrispondente alla pressione assiale usata per dedurre l'angolo d'attrito.

Si può osservare che l'angolo d'attrito corrispondente al volume minimo si mantiene praticamente costante nel campo di porosità inferiore al 46 %.

Da notare che la determinazione della resistenza corrispondente al minimo volume comporta qualche incertezza legata sia alla difficoltà di localizzare esattamente la posizione del minimo volume che al rapidissimo aumento di resistenza nei campioni a bassa porosità.

In fig. 7 sono riportate le curve relative agli angoli d'attrito sopra indicati e quella relativa all'angolo d'attrito di rottura.

Si può così osservare che nel diagramma con la porosità dopo consolidamento le curve tendono a confondersi per porosità superiore al 51 % e per angolo d'attrito inferiore a 32°. Nel diagramma con la porosità reale le curve tendono a confondersi per porosità superiore al 48 % e angolo d'attrito inferiore a 36°. Con porosità reale superiore al 48 % la resistenza e quindi l'angolo d'attrito dipendono solamente dalla porosità, qualunque sia il modo con il quale essa viene raggiunta.

Si deve infine osservare che la differenza, misurata nelle prove, tra l'angolo d'attrito massimo e l'angolo d'attrito finale per porosità inferiore alla critica ha maggiore corrispondenza con una valutazione eseguita con relazioni che esprimono il lavoro per l'aumento di volume in funzione della pressione

$$\frac{1}{3} (\sigma_1 + 2\sigma_3)$$
 invece che della sola pressione di contenimento σ_3 .

Osservazioni conclusive

Dai risultati delle prove triassiali eseguite si possono trarre alcune osservazioni:

1 - Con pressione di contenimento costante ed eguale a 1 Kg/cm² il campo di variabilità dell'angolo di attrito in funzione della porosità dopo consolidamento è molto grande essendo, per la sabbia esaminata, compreso tra 26° e 46°.

2 - Con porosità dopo consolidamento inferiore al 51 % la variazione dell'angolo d'attrito in funzione dell'indice dei pori può essere espressa approssimati-

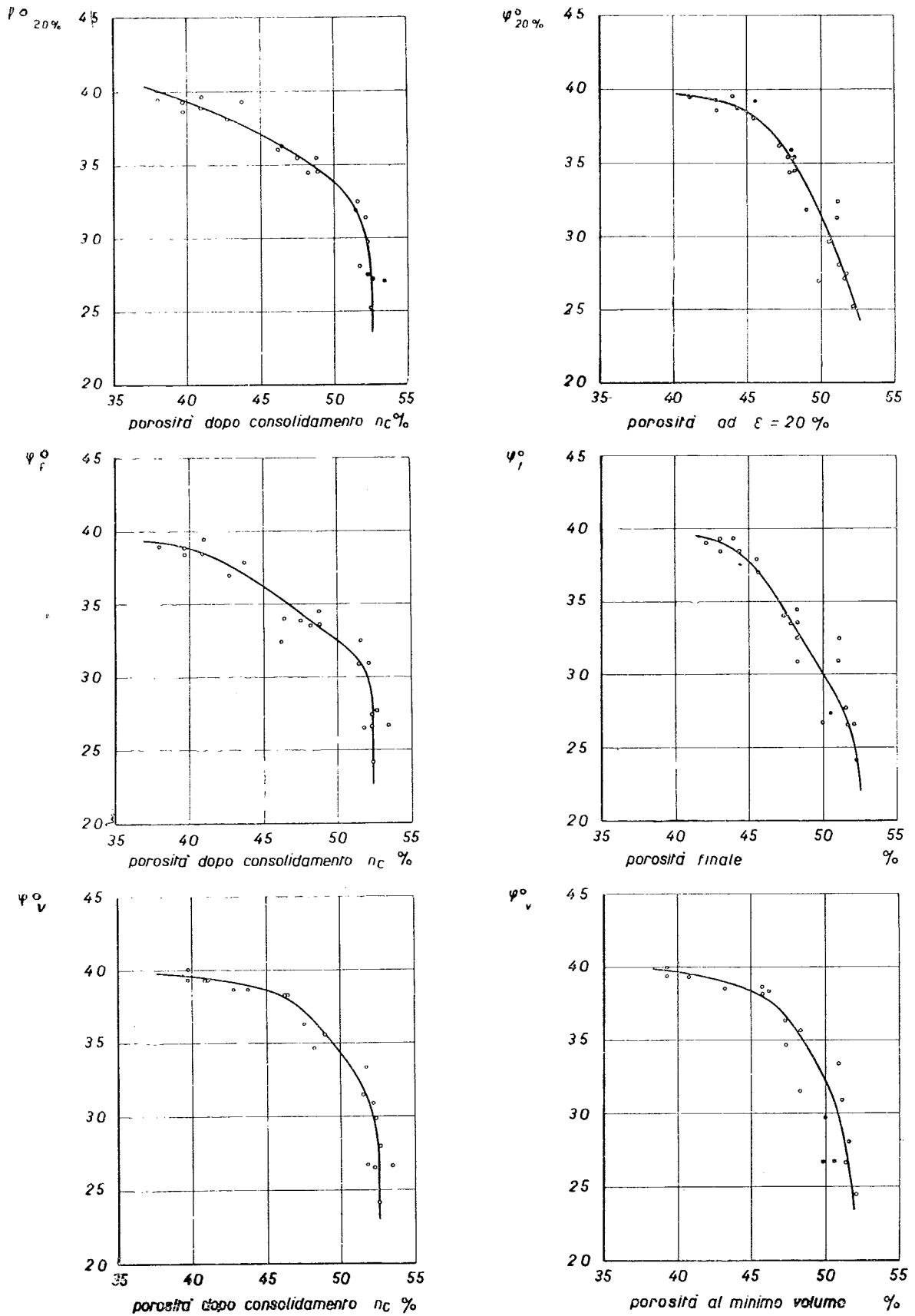


Fig. 6 - Prove triassiali con drenaggio - angolo d'attrito al 20% di deformazione assiale ($\varphi_{20\%}$), alla deformazione finale (φ_f) e al minimo volume (φ_v) in funzione della porosità dopo consolidamento (n_c) e della porosità reale (n_{20} , n_f e n_v).

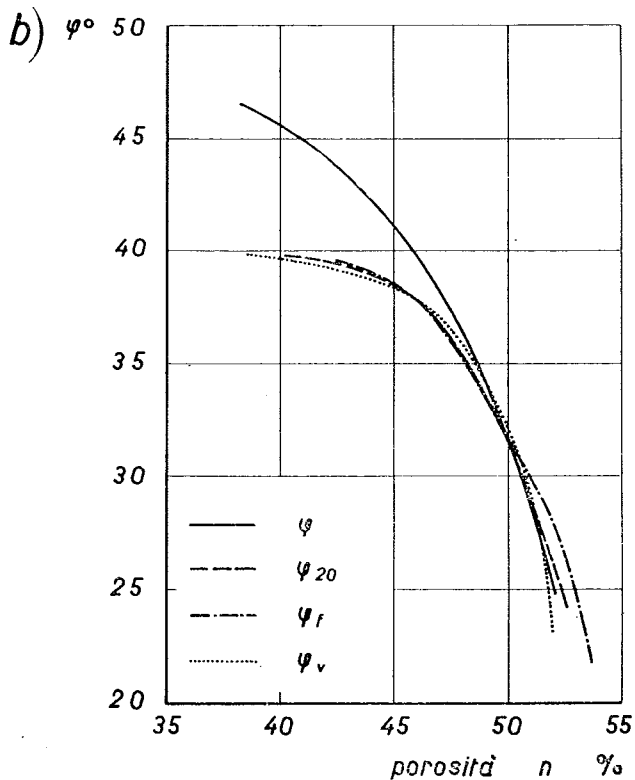
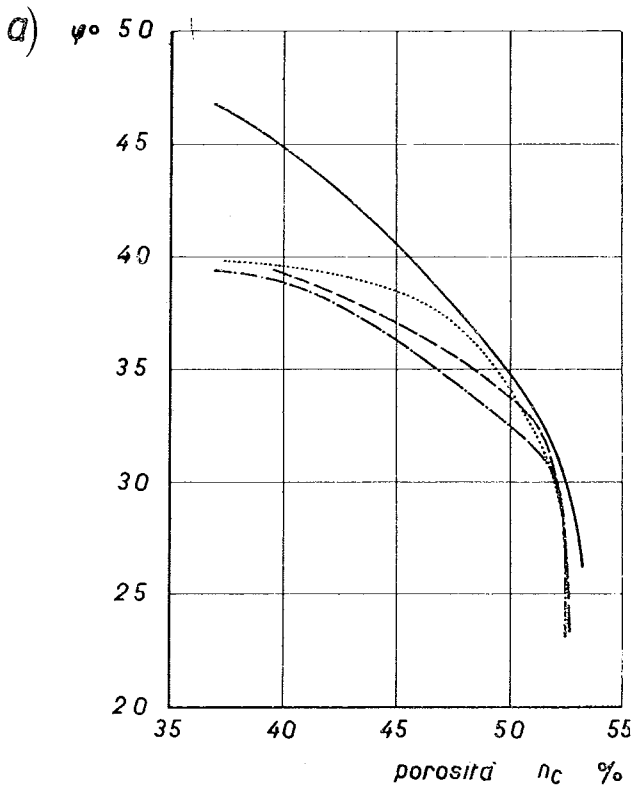


Fig. 7 - Prove triassiali con drenaggio - confronto delle curve di variazione degli angoli d'attrito (φ), (φ_{20}), (φ_f) e (φ_v) in funzione della porosità dopo consolidamento (n_c) e della porosità reale (n), (n_{20}), (n_f) e (n_v).

vamente dalla relazione $\text{tg}\varphi = \frac{0,68}{e}$.

3 - Con porosità dopo consolidamento compresa tra 51 % e 53 % si ha una rapida diminuzione di angolo d'attrito da 33° a 26°, comportamento dipendente dalla struttura piuttosto instabile del materiale ed in certo grado dalle modalità e difficoltà di prova.

4 - Per porosità dopo consolidamento superiore al 50 % il campione durante la prova, dopo aver raggiunto il massimo della resistenza assiale, mantiene quasi costante sia il volume che la resistenza unitaria assiale.

5 - Lo studio del comportamento e della resistenza di una sabbia attraverso la prova triassiale attualmente risente del fatto che vengono misurate le pressioni esterne e le variazioni di volume totale e non le variazioni di volume e le sollecitazioni nelle zone di rottura.

Bibliografia

- [1] BISHOP A. W., 1954. *Corrispondenza su un articolo di A. D.M. Penman*, Géotechnique, 4 : 1 : 43-45.
- [2] BISHOP A. W. e ELDIN A. K. G., 1953. *The effect of stress history on the relation between φ and porosity of sand*, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech., 1 : 100-105.
- [3] BJERRUM L., KRINGSTAD S. e KUMMENEJE O., 1961. *The shear strength of a fine sand*, Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech., 1 : 29-37.
- [4] CAQUOT A. e KERISEL S., 1956. *Traité de mécanique des sol*, 3° édition, Paris.
- [5] CORNFORTH D. H., 1964. *Some experiments on the influence of strain conditions on the strength of sand*, Géotechnique, 14 : 2 : 143-167.
- [6] GUIDUCCI M. F., 1963. *Considerazioni su alcune serie di prove di taglio su sabbia*, Geotecnica, 10 : 4 : 227-235.
- [7] JAPPPELLI R., 1963. *Proprietà geotecniche di tipiche rocce sciolte a grana media e grossa della Sicilia*, Geotecnica, 10 : 5 : 341-351.
- [8] LADANYI B., 1960. *Etudes des relations entre les contraintes et les déformations lors du cisaillement des sols pulvérulents*, Annales des Travaux Publics de Belgique, No. 3-1960.
- [9] NASH K. L., 1953. *The shearing resistance of a fine closely graded sand*, Proc. 3rd. Int. Conf. Soil Mech., 1 : 160-164.
- [10] NEWLAND P. L. e ALLELY B. H., 1957. *Volume changes in drained triaxial tests on granular material*, Géotechnique, 7 : 1 : 17-34.
- [11] PENMAN A. D. M., 1953. *Shear characteristics of a saturated silt measured in the triaxial test*, Géotechnique, 3 : 8 : 312-328.
- [12] POOROOSHAB H. e ROSCOE K. H., 1961. *The correlation of the results of shear tests with varying degrees of dilatation*, Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech., 1 : 297-304.
- [13] ROWE P. W., 1963. *Stress-dilatancy, earth pressures and slopes*, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs., Soil Mech. Div., May, pp. 37-61.
- [14] SHOCKLEY W. G. e AHLVIN R. G., 1960. *Nonuniform conditions in triaxial test specimens*, Res. Conf. Shear Strength Soils, Colorado, pp. 341-357.

LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT D'UN SABLE FIN UNIFORME

Sommaire: On donne les résultats d'une série d'essais de cisaillement direct et d'une série d'essais triaxiaux drainés sur des échantillons de sable fin uniforme ayant une porosité variable de 0,38 à 0,54 (matériaux qui se trouvent entre un sable compact et un sable très meuble).

Parmi les différentes remarques sur le comportement du sable examiné on doit mettre en évidence celle qui indique une variation de l'angle de frottement interne entre 45° avec le minimum de porosité et 25° avec le maximum, et en particulier entre 33° et 25° avec des porosités comprises entre 0,51 et 0,54.

THE SHEAR STRENGTH OF A UNIFORM FINE SAND

Summary: The author presents the results of a series of direct-shear tests and a series of drained triaxial tests, carried out on samples of uniform fine sand with a porosity ranging from 0,38 to 0,54, that is to say passing from dense to very loose sands.

Among the various remarks on the behaviour of the sand during such tests it is to be emphasized the variation of the angle of internal friction from 45° with the minimum porosity to 25° with the maximum porosity, and particularly from 33° to 25° with porosity ranging between 0,51° and 0,54.



Trivellazioni

TORINO - VIA BROVETTI 19 - TEL. 528.40.00
TELEGRAMMI TRISONDA - TORINO

Sondaggi S.p.A.
TRISONDA

518.195

POZZI NORMALI TRIVELLATI
POZZI DI GRANDE DIAMETRO
(FINO A 1500 mm.)
A DRENAGGIO ARTIFICIALE
FONDAZIONI CON PALI
DI GRANDE DIAMETRO

**POZZI A RAGGIERE ORIZZONTALI
SISTEMA FEHLMANN**

CONSULENZA TECNICA PER TUTTI I PROBLEMI
LEVAMENTO E DISTRIBUZIONE DI ACQUA POTABILE E INDUSTRIALE