

# PROPRIETA' MECCANICHE DELLE ROCCE SCIOLTE (\*)

P. COLOMBO (\*\*)

SOMMARIO: Vengono passati in rassegna gli argomenti trattati nelle comunicazioni, nella relazione generale e nelle discussioni presentate al IV Congresso Internazionale di Geotecnica, Londra 1957, nella sezione 1b.

## Premessa

La sezione 1b del IV Congresso Internazionale di Geotecnica tratta gli argomenti relativi alle proprietà meccaniche dei terreni cioè la resistenza al taglio, la compressibilità e le relazioni tra sforzi e deformazioni nei terreni.

Le memorie raggruppate nella sezione 1b ammontano a quindici; in questa breve rassegna vengono però richiamate anche memorie appartenenti ad altre sezioni ma che trattano sostanzialmente gli argomenti sopraindicati.

Il problema della resistenza al taglio dei terreni è stato in questo Congresso ampiamente trattato sotto i suoi vari aspetti sia nelle memorie che nelle discussioni e com'è ovvio principalmente nelle memorie e discussioni della sezione 1b.

Sembra quindi opportuno ricordare sia pure di sfuggita l'evoluzione delle nostre conoscenze sull'argomento e gli studiosi che maggiormente vi hanno contribuito.

Il COULOMB nel 1773 introdusse l'equazione

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

che ha servito di base per ogni ulteriore studio sull'argomento. Un notevole progresso verso la soluzione del problema si ebbe però solo dopo il 1920, cioè con la pubblicazione della « *Erdbaumechanik* » di TERZAGHI. Cominciarono ad essere costruiti gli apparecchi di taglio diretto e dopo il 1930 si cominciò a sperimentare anche con l'apparecchio triassiale.

Tra gli studiosi che prima della seconda guerra mondiale si occuparono dell'argomento si debbono tra gli altri ricordare CASAGRANDE, HVORSLEV, JÜRGENSON, RENDULIC, TIEDEMAN, HAEFELI.

Da segnalare la proposta di HVORSLEV di modificare l'equazione di COULOMB per i terreni coerenti con l'introduzione della pressione di consolidamento equivalente; tale modifica fu una conseguenza dell'osservazione che la coesione dipende dal contenuto in acqua. Si fecero allora i primi tentativi per misurare la pressione dell'acqua contenuta nei pori, per determinare le sollecitazioni effettive agenti sui campioni provati in laboratorio e per collegare le proprietà di deformazione alla resistenza al taglio. Durante e dopo la guerra il problema fu ulteriormente investigato

(\*) La presente nota è stata redatta per incarico dell'Associazione Geotecnica Italiana, che l'Autore sentitamente ringrazia.

(\*\*) Dott. Ing. Pietro COLOMBO, Assistente presso lo Istituto di Costruzioni Marittime e Centro Geotecnico Veneto dell'Università di Padova.

da studiosi di vari paesi fra i quali sono da citare TAYLOR, RUTLEDGE, SKEMPTON, BJERRUM, BISHOP, HENKEL e HABIB.

Le ricerche furono indirizzate su diverse vie e furono particolarmente studiati la tecnica di prova e i metodi di interpretazione dei risultati.

Nel periodo tra il III Congresso Internazionale di Geotecnica del 1953 di Zurigo ed il Congresso di Londra lo studio del problema è stato svolto con l'esaminare i fattori geologici e il riportare il resoconto di franamenti e di incidenti avvenuti, ponendoli in rapporto con le caratteristiche dei terreni.

In particolare si deve citare la « *Conference on stability of earth slopes* » (Stoccolma, 1954), le comunicazioni della quale sono state pubblicate nella rivista *Geotechnique*.

Da questa conferenza risultò la validità dell'espressione della resistenza al taglio in termini di pressione effettiva, mentre fu confermato il criterio di determinare la resistenza al taglio delle argille con prove senza drenaggio per i problemi di stabilità che comportano l'analisi delle condizioni immediatamente dopo una variazione di carico e solo allora.

Dalla maggior parte dei rapporti presentati al IV Congresso di Geotecnica di Londra si può rilevare il perfezionarsi degli apparecchi e dei metodi di determinazione della resistenza al taglio. Emerge però dalle relazioni e dalle discussioni il problema della correlazione tra prove di laboratorio e comportamento del terreno in posto. Si possono rilevare notevoli progressi da attribuire principalmente alla maggiore importanza data ai fattori geologici, alla notevole documentazione inerente a casi reali di franamenti e problemi del genere e quindi ai tentativi di correlazione tra misurazioni effettuate e comportamento constatato del terreno in posto, all'estendersi delle misurazioni della pressione dell'acqua dei pori sia in laboratorio che in posto e infine allo studio continuo anche teorico delle condizioni di rottura e dei procedimenti di interpretazione.

Passando ora alle memorie presentate nella sezione 1b si può rilevare che è stato particolarmente studiato il problema della resistenza al taglio dei materiali incoerenti giungendo però a risultati contraddittori ad esempio per quanto riguarda l'influenza dello sforzo principale intermedio. Un altro argomento trattato è quello della determinazione della resistenza al taglio di terreni con elementi di grandi dimensioni.

Le altre memorie esaminano problemi particolari come l'uso di modelli, il comportamento del terreno sottoposto a carichi istantanei, oppure riportano una

analisi teorica degli stati di sollecitazione del terreno nei diversi casi.

**Comunicazioni presentate al Congresso**

Lo JAKOBSON nella sua memoria (1b/8) <sup>(1)</sup> espone i risultati di prove eseguite su sabbia normale ed in particolare quelli riguardanti le relazioni tra sforzi e deformazioni. Le prove sono state condotte su due tipi di sabbia con granulometria molto simile e con una speciale attrezzatura in cui potevano essere variati i tre sforzi principali. E' stato così osservato che sia il coefficiente di POISSON che il modulo di elasticità, variano notevolmente con lo sforzo di taglio. Inoltre l'angolo d'attrito interno è molto diverso ( $\varphi = 34^\circ$ ;  $\varphi = 40,5^\circ$ ) per le due sabbie pur essendo

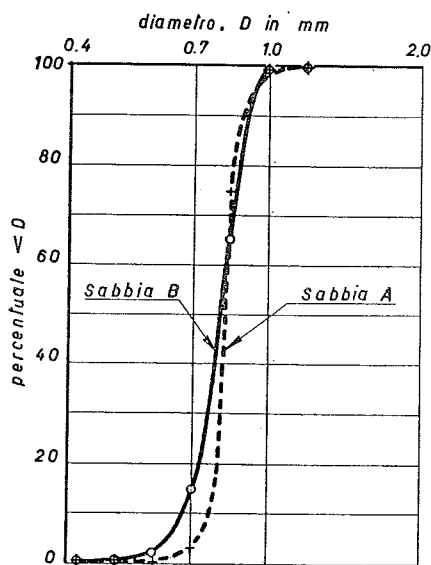


Fig. 1

esse simili (Fig. 1) e pur avendo condotto la prova triassiale nello stesso modo. E' stata pure considerata la grande influenza dello sforzo principale intermedio sull'angolo d'attrito interno con il fare variare il suo valore tra quello corrispondente allo sforzo principale minimo a quello corrispondente allo sforzo principale massimo.

Infine l'A. ha studiato il problema della compressibilità nel caso in cui il terreno sia sottoposto a tensioni principali uguali fra loro. A tale scopo ha lievemente modificato una relazione precedentemente dedotta da altri studiosi fra tensione e coefficiente di dilatazione ed ha dimostrato che essa si trova in buon accordo con prove da lui eseguite.

Il PELTIER (1b/10) riporta i risultati di ricerche che avevano lo scopo di spiegare certe anomalie osservate sperimentalmente, in particolare da HABIB [1], e riguardanti la curva intrinseca di rottura dei terreni incoerenti. Sono state così eseguite prove triassiali di compressione e strizione e prove con uno

(1) I numeri tra ( ) sono quelli con i quali le comunicazioni sono state pubblicate negli Atti del Congresso nella sezione qui in esame.

speciale apparecchio in cui poteva essere fatto variare lo sforzo principale intermedio.

Con le prove triassiali di compressione e strizione — nei due tipi di prova lo sforzo principale intermedio è uguale rispettivamente allo sforzo principale minore e allo sforzo principale maggiore — è stato constatato che l'angolo di attrito a compressione è maggiore di circa 7 gradi dell'angolo d'attrito a strizione. Nelle prove con la speciale apparecchiatura in cui poteva essere variato lo sforzo principale intermedio è stata osservata la sensibile influenza di tale sforzo sull'angolo d'attrito interno; la variazione di valore è uguale a quella osservata con le prove triassiali di compressione e strizione, ma si manifesta in senso inverso.

La misura delle variazioni di volume dei campioni durante le prove di compressione triassiale mostra che, nel terreno, poco prima della rottura si hanno delle modificazioni strutturali notevoli e che oltre un certo carico si produce un forte aumento di volume (Fig. 2). Tali modificazioni strutturali inducono nel terreno una anisotropia che può forse spiegare le anomalie osservate.

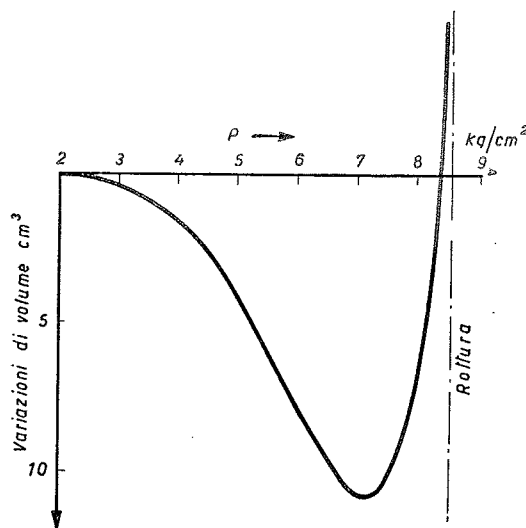


Fig. 2

KIRKPATRICK (1b/9) illustra i risultati di uno studio sulle condizioni di rottura della sabbia sottoposta a prove con drenaggio. Sono state eseguite prove triassiali di compressione e strizione e prove con uno speciale apparecchio in cui poteva essere fatto variare lo sforzo principale intermedio. Le prove triassiali hanno dato un angolo di attrito interno eguale sia per la compressione che per la strizione, contrariamente a quanto osservato da HABIB e da PELTIER.

Sia le prove triassiali che le prove con lo speciale apparecchio denominato « Thick cylinder apparatus » hanno confermato la validità della teoria di MOHR-COULOMB per il calcolo delle sollecitazioni alla rottura della sabbia in condizioni di drenaggio completo.

E' opportuno qui ricordare una memoria di WILLIAMS riportata in un'altra sezione (3a/42) in cui vengono dati i risultati di prove di taglio dirette e di prove triassiali con e senza drenaggio su sabbie fangose sciolte e parzialmente sature.

FUKUOKA (1b/5) espone i risultati di uno studio

sulle relazioni tra le caratteristiche fisiche e la curva granulometrica dei terreni, adottando l'equazione di

TALBOT  $p = \left(\frac{d}{D}\right)^n \times 100$  e facendo variare l'esponente  $n$  tra 0,15 e 0,55.

In questa ricerca oltre a prove di costipamento, di permeabilità, di compressione con espansione libera, sono state condotte prove triassiali su campioni di 28 cm di diametro e 65 cm di altezza e su campioni di 7 cm di diametro e 14 cm di altezza e con un apparecchio di taglio diretto con una scatola di 100 cm di diametro e di 60 cm di altezza. Da queste prove è emerso che non si possono usare campioni piccoli con elementi di grandi dimensioni in quanto la grande disuniformità del campione falsa i risultati e che è preferibile sostituire la ghiaia grossa con una parte eguale di ghiaia più fine.

SCHULTZE (1b/13) illustra i risultati di prove di taglio dirette eseguite su lignite con una superficie di taglio di 1 metro quadrato, di prove triassiali su campioni di 50 cm di diametro e 125 di altezza, di ghiaia, di ghiaia e sabbia fangosa e di terreno coesivo. L'A. dà i risultati di queste prove e dal confronto con quelli ottenuti con gli apparecchi normali arriva alle seguenti conclusioni:

- 1) perché l'apparecchiatura triassiale di grandi dimensioni sia semplice da fare e da manovrare, non si deve superare la pressione normale di 1,5 kg/cm<sup>2</sup>;
- 2) con terreni leggermente coerenti la pressione laterale deve essere determinata nel campione con celle di pressione;
- 3) la frazione grossa del terreno aumenta notevolmente la resistenza al taglio, quindi non ci si può riferire alle prove su apparecchi di piccole dimensioni;
- 4) la densità dei terreni esaminati influisce sulla coesione e sulla compressibilità e non sull'angolo di attrito interno;
- 5) non si è riusciti a determinare una relazione tra le dimensioni massime degli elementi del terreno e le dimensioni degli apparecchi.

Sull'argomento della resistenza al taglio di materiali con elementi a grandi dimensioni bisogna anche citare la memoria, presentata nella sezione riguardante le dighe in terra, di ZELLER e WULLIMANN (6/28) che passa in rassegna le considerazioni fatte ed i risultati ottenuti con 136 prove triassiali sul materiale incoerente della diga di Göschenenalp in Svizzera. Le prove sono state condotte con un apparecchio triassiale a vuoto con campioni di 2000 cm<sup>2</sup> di sezione e con un altro apparecchio triassiale con campioni di 500 cm<sup>2</sup> di sezione.

Dalle prove è risultato che tra le granulometrie e densità limiti esaminate l'angolo d'attrito varia tra 25° e 50° e le deformazioni alla rottura variano tra 13,5 e 2%; la curva inviluppo di MOHR indica una certa coesione; più gli elementi del materiale sono grossi più piccola è la variazione di porosità tra lo stato più sciolto e lo stato più compatto e maggiore è la variazione della resistenza al taglio in funzione della porosità.

Una interessante memoria (1b/6) riguardante la tecnica di prova è stata presentata da HILF e GIBBS ingegneri del *Bureau of Reclamation*.

In questo rapporto, dopo aver richiamato i consueti procedimenti di prova triassiale ed i criteri di rottura assunti per lo studio della resistenza al taglio dei terreni coerenti, si presenta un nuovo procedimento per la preparazione dei campioni di terreno ed un nuovo metodo di esecuzione delle prove triassiali rapide.

Tale procedimento discende dall'osservazione, già sottolineata nel *Congresso di Zurigo* in una sua relazione da A. CASAGRANDE [2], che nelle prove triassiali rapide il rapporto degli sforzi principali alla rottura è maggiore di quello che si ha nelle prove lente. Questo fatto può essere spiegato con l'osservare che in una prova rapida in realtà il campione è pre-compresso perché durante la prova gli sforzi effettivi diminuiscono continuamente.

Con il nuovo metodo di prova si misura la pressione dell'acqua dei pori durante l'applicazione degli sforzi di taglio e si varia corrispondentemente la pressione laterale applicata in modo da mantenere costante la pressione laterale effettiva. In tale maniera il fenomeno di falsa resistenza dovuto alla pre-compressione viene eliminato.

Per riprodurre nelle prove le condizioni di sollecitazione che si hanno nel rilevato, i campioni di terreno vengono preparati con lo stesso contenuto d'acqua ma con densità diverse e vengono poi compressi senza drenaggio fino ad un determinato indice dei vuoti prima di essere tagliati.

Con questo nuovo metodo di prova si sono ottenuti valori minori di  $tg\phi$  e maggiori differenze si potranno constatare sperimentando su terreni con alto contenuto d'acqua e che sviluppano una grande pressione dell'acqua dei pori.

Un particolare problema viene illustrato poi nella memoria di AITCHISON (1b/1) e precisamente viene trattato il problema della resistenza al taglio di terreni argillosi non saturi in cui si abbia una deficienza di pressione nei pori, caso questo frequente nei terreni dell'Australia. Questa deficienza di pressione nei pori provoca un notevole aumento della resistenza del terreno.

Numerose altre memorie facenti parti delle sezioni 1a, 3, 5 e 6 toccano e trattano l'argomento della resistenza al taglio dei terreni. Da queste memorie, che riportano casi reali di franamenti e calcoli di stabilità di opere eseguite, emerge l'uso ormai normale delle prove di compressione triassiale e della misura della pressione dell'acqua dei pori.

Prima di passare alle memorie teoriche sono da esaminare alcuni rapporti di carattere sperimentale che toccano problemi diversi.

ROCHA (1b/11) illustra le condizioni di similitudine a cui devono soddisfare i modelli nei vari problemi della meccanica dei terreni e dà anche indicazioni generali per la scelta dei materiali dei modelli.

A questo proposito è da ricordare la memoria (5/28) di SCHNEEBELI facente parte della sezione che tratta la spinta delle terre. L'A. si occupa di particolari modelli analogici che permettono lo studio di problemi a due dimensioni di opere interessanti i terreni incoerenti e particolarmente di problemi di spin-

ta delle terre ed illustra inoltre uno speciale apparecchio di compressione triassiale.

Una memoria originale è quella presentata da DAN-TU (1b/3) in cui viene affrontato teoricamente e sperimentalmente con la fotoelasticità il problema della trasmissione degli sforzi e della struttura geometrica statistica dei mezzi incoerenti.

L'A. ha realizzato alcuni modelli a due dimensioni, nei quali il materiale era costituito o da piccoli cilindri di vetro ovvero da « sabbia » di vetro. Applicando la fotoelasticità a questi modelli, è riuscito a visualizzare in maniera netta le linee di trasmissione degli sforzi all'interno del mezzo.

E' stato invece solo iniziato lo studio teorico e sperimentale della struttura geometrica dei mezzi incoerenti con l'eseguire prove su modelli a due dimensioni variando la forma degli elementi e i contorni.

La memoria di WHITMAN (1b/15) tratta il problema del comportamento del terreno sotto carichi istantanei. Le prove sono state condotte con uno speciale apparecchio triassiale in cui la rottura viene prodotta in un tempo dell'ordine di 0,001 secondi; si sono registrate le pressioni istantanee nei pori per sabbie sature e sono state determinate delle curve che mostrano la relazione tra la resistenza alla compressione e la velocità di deformazione per terreni coerenti, sabbie asciutte e sabbie sature.

Con altre apparecchiature è stato studiato il problema della trasmissione degli urti e quello della permeabilità delle sabbie sature con gradienti di pressione applicati istantaneamente.

Fra le ricerche presentate nella sezione 1b ricordiamo ancora come ricerca di carattere sperimentale quella di DHAWAN e BAHRI (1b/4) che tratta il problema della determinazione della densità da ottenere in un rilevato per non avere assestamenti quando siano assegnate le condizioni di carico ed il contenuto in acqua del terreno.

In questo studio, che viene a completare quello presentato al *Congresso di Zurigo* [3] sullo stesso argomento, si indica un metodo di determinazione della « densità stabile » che dà risultati di un'utilità pratica maggiore di quella delle curve di costipamento di PROCTOR.

Passando ora alle memorie di carattere teorico accenneremo allo studio di BALLA (1b/2) in cui vengono discussi ed esaminati gli stati di sollecitazione e di deformazione di campioni di terreno sottoposti alla prova di compressione triassiale introducendo, sulle basi della teoria della elasticità, una funzione di tensione valevole per la distribuzione delle tensioni assialmente simmetriche e con l'ipotesi di alcune condizioni limiti accettabili.

Lo studio di KOSHINO (1b/7) presenta una teoria generale della meccanica dei terreni basata sull'ipotesi che in un punto della massa sollecitata il valore

dell'energia regoli le condizioni di rottura e le deformazioni.

Vengono enunciate le relazioni tra i coefficienti di deformazione ed il valore dell'energia e viene fatta una applicazione della teoria ai problemi di compressione triassiale.

La memoria di ROWE (1b/12) riguarda invece la ipotesi  $C_e = 0$  per l'equilibrio di argille normalmente caricate e conseguentemente l'angolo d'attrito che si deve assumere nei vari casi ed in relazione alla stabilità di pendii di argilla e alla spinta delle terre.

Nella memoria di SUKLJE (1b/14) viene presentata una costruzione grafica della curva di consolidamento di uno strato saturo di spessore qualsiasi, tenendo conto di alcune ipotesi semplificative e viene anche fatta un'accurata analisi del processo di consolidamento.

## Conclusioni

Questa rapida rassegna di memorie pone in luce il grande numero di variabili da prendere in considerazione per la soluzione dei vari problemi geotecnici. Si possono però rilevare i notevoli progressi compiuti grazie a nuovi apparecchi, a nuove tecniche di prova ed a nuove interpretazioni del comportamento dei terreni nei vari stati di sollecitazione, pur non dimenticando anche i risultati contraddittori talora ottenuti.

Da rilevare poi l'importanza, sottolineata particolarmente nelle discussioni, delle analisi fisico-chimiche delle argille che dovrebbero permettere una migliore comprensione dei fenomeni ad esse legati.

Nelle relazioni e nelle discussioni della sezione 1b e delle altre sezioni, oltre a discutere ed ampliare i concetti esposti nei rapporti, è stato affrontato e discusso in particolare modo il problema del confronto tra le prove di laboratorio ed il comportamento del terreno in posto e della scelta dei metodi di calcolo e delle verifiche di stabilità da adottare nei vari casi. E' così emersa la grande importanza, accanto alle indagini sperimentali ed alle analisi teoriche, dell'esperienza personale degli studiosi e dei tecnici.

## Bibliografia

- [1] P. HABIB - *Influence de la variation de la contrainte principale moyenne sur la résistance au cisaillement des sols.* - Proc. III Int. Conf. Soil Mech. Found. Zürich 1953, Vol. I, pag. 131.
- [2] A. CASAGRANDE - *Prestress induced in consolidated-quick triaxial test.* - id. id. Vol. I, pag. 106.
- [3] DHAWAN, BAHRI, KHANNA, SHARMA e DHAND - *Stable density.* - id. id. Vol. I, pag. 114.

SUMMARY: The Author reviews the papers, the general report and the discussions, presented at the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London 1957, in the Division 1b (Soil Properties and their Measurement - Mechanical Properties).

SOMMAIRE: On examine les communications, le rapport général et les discussions présentées au Quatrième Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Londres 1957, dans la Section 1b (Mesure et Propriétés des Sols - Propriétés Mécaniques).