

Prototipo di cella triassiale con controllo delle deformazioni radiali del campione

P. SEMBENELLI*

SOMMARIO: Attrezzature per la misura ed il controllo delle deformazioni radiali del provino durante una prova triassiale sono state finora realizzate in numero limitato.

Viene qui descritto un apparecchio realizzato a questo scopo, modificando una normale cella triassiale e, per migliore documentazione, vengono aggiunti i risultati ottenuti in alcune prove preliminari.

1. Introduzione.

Questa nota tratta di una cella triassiale, modificata in modo da permettere il controllo e la misura delle deformazioni radiali del campione durante le varie fasi di una prova.

Lo spunto per la realizzazione della cella in questione fu dato dagli studi di T. W. LAMBE che precedettero la proposta di un nuovo metodo per il calcolo degli assestamenti in terreni compressibili. In particolare si volle realizzare un apparecchio che permettesse la misura delle deformazioni radiali del provino e del coefficiente di pressione laterale a deformazione nulla K_0 .

L'apparecchio, la cui costruzione fu portata a termine al *Mass. Institute of Technology*, si affianca a altri proposti, sia pure in un numero limitato di casi, per lo stesso scopo ma, basandosi su un diverso principio, permette una accresciuta sensibilità e risente meno di irregolarità locali del provino.

I risultati ottenuti con una prima serie di prove furono incoraggianti e lasciano intravedere la possibilità di usare una cella di questo tipo per approfondire lo studio delle caratteristiche di deformabilità dei materiali argillosi.

Il numero delle prove eseguite rimane ancora molto limitato. Questa nota si limiterà perciò ad illustrare le caratteristiche meccaniche e le modalità operative del prototipo.

Accanto a ciò è sembrato opportuno presentare senza commenti alcuni dei risultati sinora ottenuti in prove preliminari.

2. Descrizione dell'apparecchio.

Il principio sul quale l'apparecchio è basato è quello di ottenere la misura delle deformazioni del provino, anziché per mezzo di misure geometriche, indirettamente, misurando il volume di un liquido spostato dalle variazioni dimensionali del provino stesso.

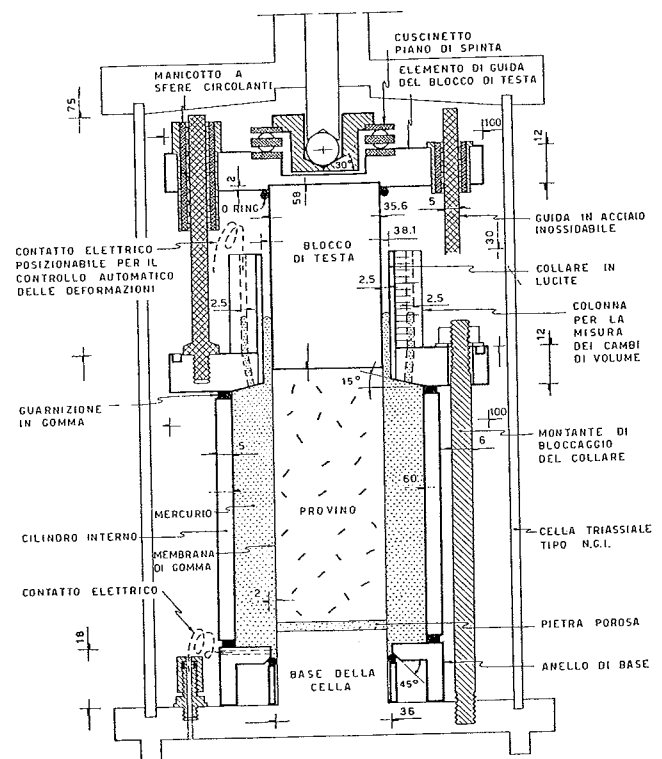


Fig. 1. - La cella modificata - Sezione.

Le misure di volume spostato sono state però trasferite ad un volume liquido interamente contenuto nella cella. La cella è stata perciò modificata, come appare in fig. 1, suddividendone lo

* Dott. ing. Piero SEMBENELLI, S. Master in Meccanica delle terre, ASCE-ELC Electroconsult, reparto geotecnico, Milano.

spazio interno in due cilindri intercomunicanti e contenenti liquidi non miscibili.

Il cilindro interno, per non essere sottoposto a differenze di pressione, mantiene invariate le proprie dimensioni ed il proprio volume. Esso contiene mercurio per mezzo del quale viene applicata la pressione di confinamento al provino e ne vengono misurati i cambi di volume. Il cilindro esterno è riempito dall'acqua del circuito che trasmette la pressione al mercurio ed impedisce la deformazione del cilindro interno.

Per ridurre le variazioni di volume dovute al movimento del pistone e per mettere in evidenza le sole deformazioni radiali del provino, il blocco di testa inserito tra provino e pistone, è stato allungato.

Il menisco tra acqua e mercurio si forma in un collare di sezione ridotta in modo da aumentare la sensibilità delle misure. Dato che una piccola eccentricità assunta dal blocco di testa durante la prova può condurre ad un menisco irregolare, per mantenere la precisione delle misure, sono predisposti due tubi di piccolo diametro nei quali il livello del mercurio varia solamente al variare del diametro del provino.

Altri dettagli costruttivi, sono stati introdotti

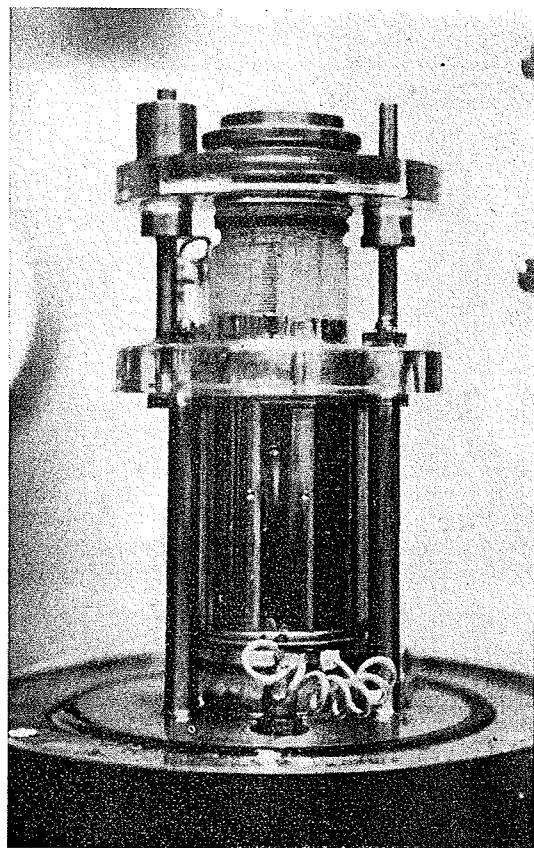


Fig. 2. - Parti interne della cella modificata prima di una prova.

principalmente per eliminare le bolle d'aria, facilitare sia il montaggio del provino che l'assemblaggio dell'apparecchio e guidare la discesa del blocco di testa.

La fig. 2 mostra il cilindro interno ed il dispositivo di guida del blocco di testa pronti per una prova.

La cella funziona dunque nel modo seguente: ogni accorciamento assiale del provino è accompagnato dalla discesa di una egual lunghezza del blocco di testa. Il blocco di testa ha diametro eguale al diametro iniziale del campione, quindi, se l'accorciamento assiale non è accompagnato da deformazioni radiali, il volume immerso nel mercurio non varia ed i menischi acqua-mercurio non si spostano.

Viceversa, se il provino si dilata radialmente i menischi si spostano verso l'alto, e verso il basso se si contrae.

Gli strumenti usati per la misura ed il controllo degli spostamenti del menisco sono stati, durante la prima serie di prove, un catetometro ed un relais.

Per una più accurata lettura delle variazioni di livello del mercurio che occupa uno dei due tubi è stato predisposto un catetometro con il quale sono facilmente apprezzabili spostamenti di 0,1 mm. Il menisco acqua-mercurio occupa un anello largo 2,5 mm ed un suo spostamento di 0,1 mm corrisponde, per un provino di diametro 35,6 mm e altezza 80 mm, ad un cambio di volume dell'ordine di 0,0004 V, equivalente ad una deformazione radiale massima di 0,005 mm cioè dell'ordine di 0,0003 r.

Per automatizzare la applicazione al provino di uno stato di sollecitazione anisotropica, rendendo possibile il progressivo e continuo riaggiustamento delle pressioni assiali e radiali, è stato inoltre predisposto un relais. Il relais è messo in funzione da un contatto posizionabile a filo di platino che si chiude sul mercurio che occupa il secondo tubo. Esso può comandare sia la pressione di cella sia il carico assiale. In pratica è più semplice controllare quest'ultimo, mettendo in moto in una direzione o nell'altra, a seconda delle necessità, il motore della pressa.

Durante l'esecuzione delle prove la cella è collegata ai normali dispositivi per l'applicazione della « backpressure » e la misura delle pressioni interstiziali.

Il dispositivo sperimentale è completato con una buretta per il drenaggio in pressione e con il dispositivo a leva del *Norwegian Geotechnical Institute* per l'applicazione di un carico assiale costante.

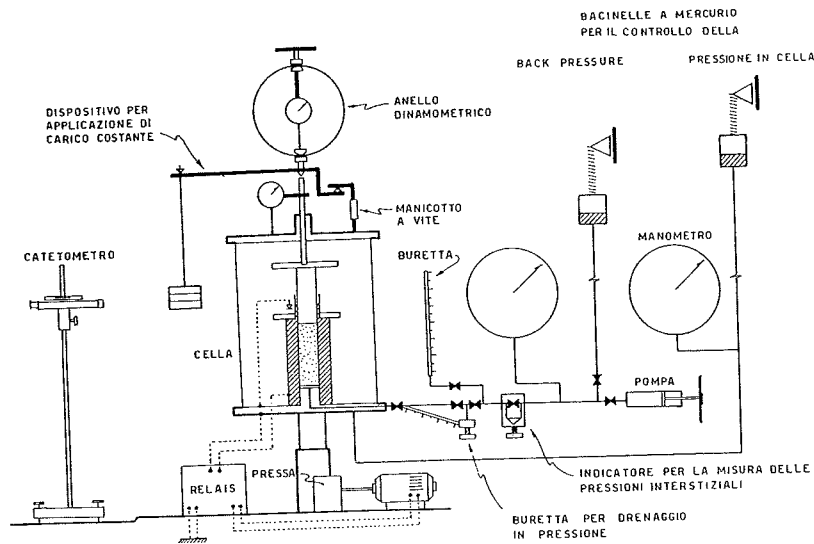


Fig. 3. - Dispositivo di prova - Schema.

Sul provino si usano dischi di Teflon per ridurre la frizione all'estremità superiore e carta da filtro per accelerare il drenaggio.

La fig. 3 riporta lo schema del dispositivo sperimentale.

3. Possibilità di sperimentazione.

Un dispositivo quale è quello illustrato, anche se più complesso di quanto suole normalmente usarsi, permette in compenso di eseguire sul provino una vasta gamma di esperienze.

Per quanto concerne la fase di consolidazione si può eseguire, oltre alla consolidazione con sforzo di taglio nullo e a quella con sforzo di taglio costante, anche una consolidazione ove si mantiene costante il rapporto tra sollecitazioni radiali e sollecitazioni assiali.

La consolidazione con sforzo di taglio costante si ottiene con la graduale riduzione della pressione interstiziale dopo aver applicato la « backpressure » e lo sforzo tagliante prescelto a mezzo della leva.

La consolidazione con rapporto costante tra sollecitazioni radiali e sollecitazioni assiali si ottiene aumentando progressivamente la pressione di cella ed applicando contemporaneamente un carico assiale crescente. In particolare, si può realizzare una consolidazione a deformazione laterale nulla, cioè di tipo edometrico.

La compressione e la consolidazione di uno strato esteso ed uniforme di materiali fini avvengono, in natura, circa in condizioni di deformazione laterale nulla.

Onde limitare le deformazioni elastiche del provino è opportuno aumentare lentamente la pressione di cella e lasciare che il relais aggiusti auto-

maticamente il carico assiale. Da questa prova si possono ottenere il valore del coefficiente di pressione laterale a deformazione nulla k , ed il parametro C_c come da una normale prova edometrica.

La consolidazione può anche venire gradualmente eliminata, mantenendo costante il rapporto tra sollecitazioni radiali e sollecitazioni assiali, riducendo la pressione di cella e contemporaneamente diminuendo il carico assiale.

Anche in questo caso si può realizzare un processo a deformazione laterale nulla variando automaticamente il carico assiale per mezzo del relais.

Un campione indisturbato di materiali fini subisce, durante il prelievo, un processo di questo tipo.

Per quanto concerne la fase di rottura, si possono eseguire sia rotture a carichi controllati sia rotture a deformazioni controllate ed eventualmente con entrambi i metodi combinati, qualora si voglia ottenere la massima definizione delle curve vettore.

Una volta eliminati alcuni aspetti poco soddisfacenti del prototipo, sostituendo al mercurio un liquido colorato non miscibile con l'acqua ed al contatto elettrico un circuito potenziometrico ad elementi fotosensibili capace di apprezzare piccoli spostamenti del menisco, un apparecchio di questo tipo potrebbe permettere una più vasta gamma operativa rispetto alle normali celle triassiali. Esso potrebbe infatti venire impiegato oltre che per prove triassiali normali e prove triassiali più complesse, anche in sostituzione del consolidometro.

Il provino triassiale rispetto a quello edometrico presenta il vantaggio di una maggiore lunghezza e quindi della possibilità di apprezzare accorciamenti unitari minimi. D'altro canto con l'impiego di car-

ta da filtro il tempo di consolidazione risulta circa pari a quello di un campione con spessore $H = R/2$, eliminandosi così le difficoltà di evidenziare la consolidazione primaria rispetto alla secondaria, come accade quando si usano provini di spessore eccessivo.

Nella seconda fase della prova lo sforzo tagliante è stato gradualmente ridotto da $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2 = 2,1$ kg/cm^2 a zero.

Il materiale si comporta inizialmente come sovraconsolidato ma poi rapidamente la curva vet-

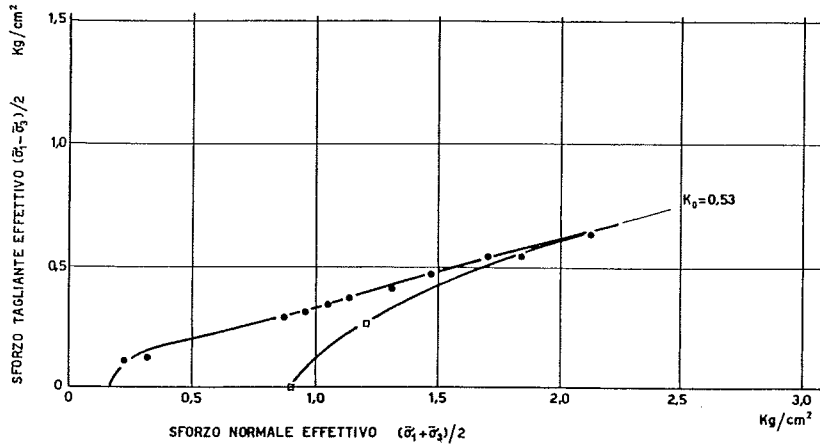


Fig. 4. - Prova di consolidazione a deformazione laterale nulla con cella triassiale.

4. Risultati preliminari.

Una serie di prove preliminari fu condotta su materiali indisturbati provenienti dalla zona di Lagunillas, sul lago di Maracaibo, Venezuela.

Il materiale è una argilla di colore bruno scuro, avente in media: peso specifico apparente $\gamma = 1.57$ g/cm^3 , indice dei vuoti $e = 1.75$, limite liquido $W_L = 73$, indice di plasticità $I_p = 50$, peso specifico assoluto $\gamma_s = 2.82$, angolo di attrito effettivo $\varphi' = 26^\circ$, contenuto d'acqua naturale $w_n = 60\%$. Profondità di prelievo dei campioni: tra 8.9 e 10.4 m.

I campioni a disposizione erano stratificati con variazioni apprezzabili dell'indice dei vuoti e della compressibilità. Ciò rende sfortunatamente difficile confrontare tra loro i risultati delle varie prove. Nelle figure da 4 a 9 sono presentati alcuni risultati significativi.

Le figure 4 e 5 si riferiscono ad una prova di consolidazione a deformazione laterale nulla.

Il provino è stato dapprima consolidato, partendo da una pressione idrostatica nominale $\sigma'_1 = \sigma'_3 = 0,14$ kg/cm^2 , fino ad una pressione assiale $\sigma'_1 = 2,73$ kg/cm^2 , cui corrisponde un valore medio delle pressioni effettive massima e minima $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2 = 2,1$ kg/cm^2 .

tore si adagia su una retta per l'origine. Il valore sperimentale di k_0 è risultato 0.53, molto prossimo quindi al valore ottenibile con l'espressione:

$$k_0 = 1 - \text{sen } \varphi'$$

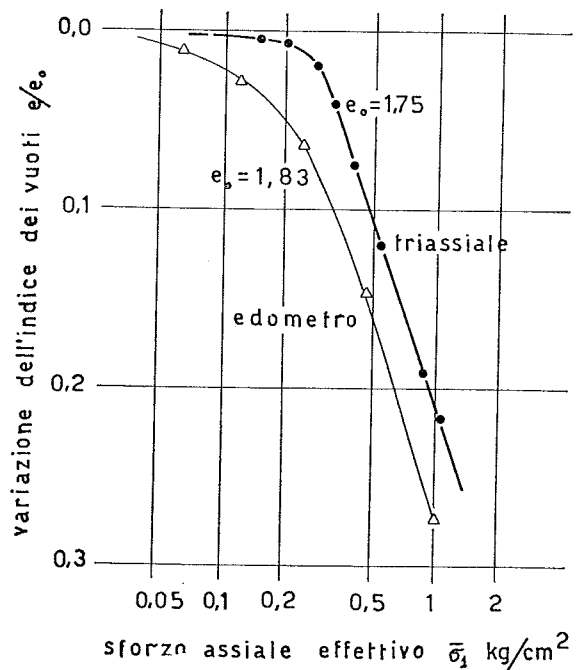


Fig. 5. - Prova di consolidazione con cella triassiale e con edometro.

La curva vettore per la fase di riduzione dello sforzo assiale è diversa da quella corrispondente alla fase di consolidazione e, per mantenere inalterate le dimensioni radiali del campione, una vol-

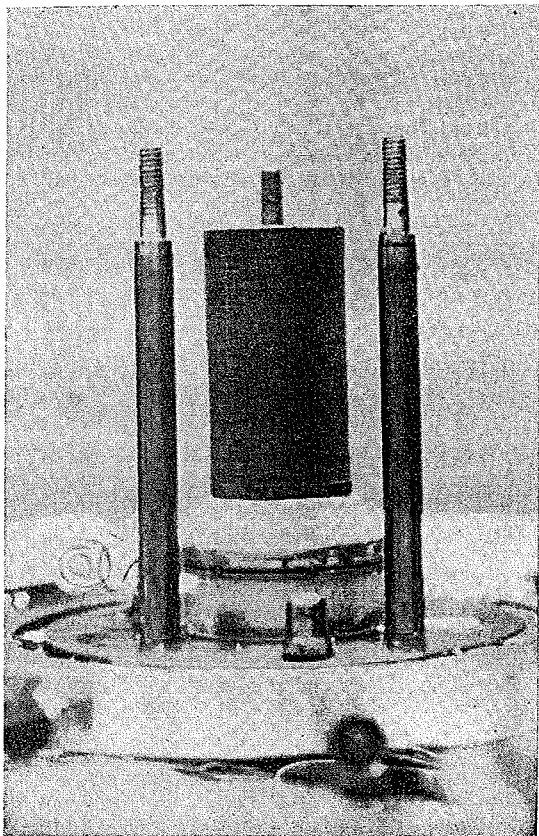


Fig. 6. - Provino triassiale dopo una prova di consolidazione a deformazione laterale nulla.

ta ridotto a zero lo sforzo tagliante, è necessario mantenere una pressione idrostatica dell'ordine di $0.3 \sigma_1 \text{ max}$.

Nella figura 5 sono confrontate le curve indice dei vuoti-pessione assiale effettiva ottenute con controllo delle deformazioni nella cella triassiale e con una normale prova edometrica. Nonostante il diverso indice dei vuoti iniziale, il ginocchio più pronunciato della curva ottenuta con l'apparecchio triassiale lascia pensare che il provino triassiale sia stato meno disturbato del provino edometrico.

In figura 6 è la fotografia del provino dopo la prova. Il provino ha subito durante la fase di consolidazione un accorciamento assiale superiore al 15%, ciononostante si è mantenuto quasi perfettamente cilindrico e di diametro pressoché invariato.

Le figure 7, 8 e 9 si riferiscono ad una prova in più fasi.

Il provino è stato dapprima consolidato a deformazione laterale nulla, come nel caso precedente, fino a $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2 = 2.3 \text{ kg/cm}^2$.

È quindi seguita una fase di taglio non drenato con misura delle pressioni interstiziali, previa applicazione di una « backpressure » di 2.1 kg/cm^2 .

Una volta portato il materiale a rottura incipiente, il provino è stato consolidato a sforzo di taglio costante riducendo progressivamente il valore della « backpressure ». La consolidazione è stata proseguita fino a ricondurre circa a zero la deformazione laterale.

Infine si è ripresa la consolidazione a deformazione laterale nulla fino a $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2 = 3.85 \text{ kg/cm}^2$.

Nella figura 7 è data la curva vettore per le varie fasi della prova. Il provino, che aveva un contenuto d'acqua iniziale inferiore a quello del provino usato per la prova precedente, tende a comportarsi come materiale sovraconsolidato più a lungo, ma durante la seconda fase di consolidazione questa tendenza

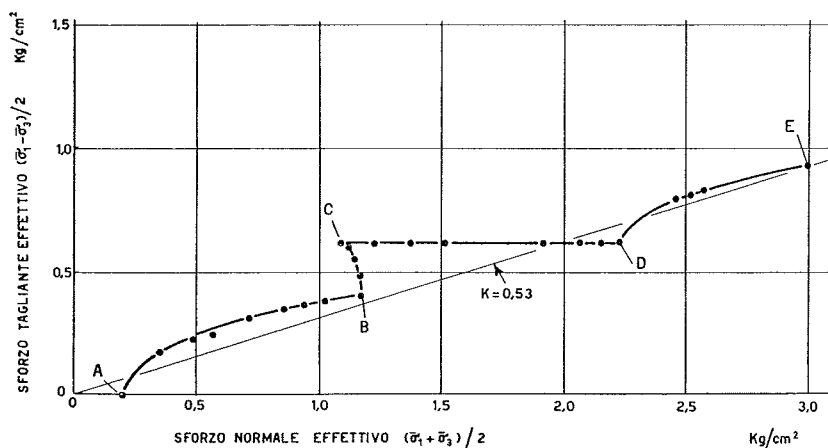


Fig. 7. - Prova multipla di consolidazione e taglio - Sforzi.

praticamente non si avverte e il valore di K_0 sembra invariato rispetto alla prova precedente.

Nella Fig. 8 sono rappresentate le deformazioni

in alto, le deformazioni assiali sono cioè superiori a quelle radiali.

La Fig. 9 ripete i dati della Fig. 8 trasferiti nel

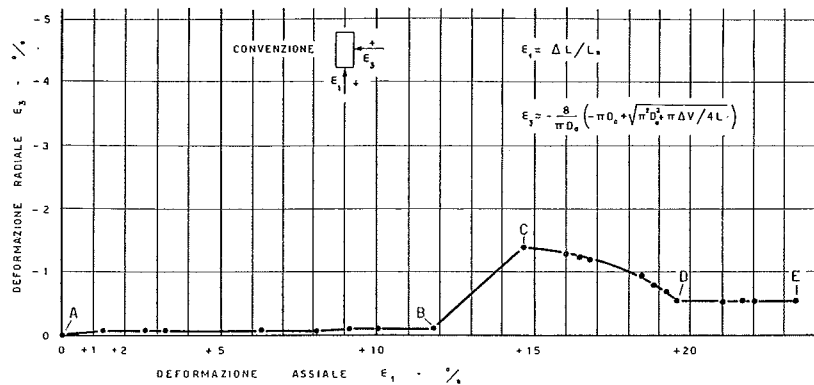


Fig. 8. - Prova multipla di consolidazione e taglio - Deformazioni.

assiali e radiali del provino. Particolare degno di essere messo in evidenza è la posizione del punto D rispetto al punto C. Durante questa fase il provino è sottoposto a una variazione idrostatica di pressioni ma le deformazioni che ne derivano sono tutt'altro che eguali in tutte le direzioni e il punto D anziché trovarsi sulla linea isotropica per C è più

diagramma indice dei vuoti-pessione assiale effettiva. È interessante notare che successivamente alla fase di taglio, sia durante la fase di consolidazione a sforzo di taglio costante, sia durante la fase di consolidazione a deformazione laterale nulla, l'indice di compressibilità sembra più basso di quello corrispondente alla prima consolidazione a deformazione laterale nulla.

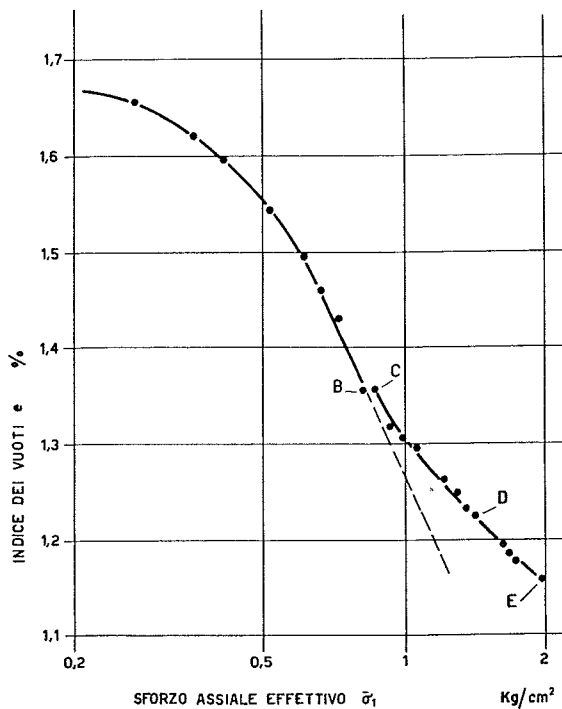


Fig. 9. - Prova multipla di consolidazione e taglio - Compressibilità.

Lo studio teorico e la realizzazione pratica di quanto illustrato sono state condotte nel laboratorio di meccanica delle terre del Massachusetts Institute of Technology di Cambridge, Stati Uniti.

Per tutto il periodo di questa ricerca l'appoggio e la collaborazione dei professori T. W. Lambe, D. Harkness e A. Wissa sono state di fondamentale importanza. Ad essi l'autore desidera esprimere viva gratitudine.

BIBLIOGRAFIA

- BISHOP A. W., HENKEL D. (1962) - *The measurement of soil properties in the triaxial test*. Arnold, Londra.
- CALABRESI G. (1967) - *Contributo alla determinazione sperimentale della pressione del terreno in condizioni di deformazione trasversale nulla*. Riv. Italiana di Geotecnica, n. 3.
- DE BEER (1951) - *The cell test*. Geotechnique, Vol. I.
- MARSAL R. (1960) - *Pore pressure and volumetric measurements in triaxial compression tests*. ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder.
- MARSAL R. et AL. (1965) - *Investigación sobre el comportamiento de suelos granulares y muestras de enrocamiento*. Comisión Federal de Electricidad, México.
- Vedasi CALABRESI G. *op. cit.* per una più vasta bibliografia in merito.

S U M M A R Y

Prototype triaxial cell with lateral strain control.

This note describes modifications made to a standard triaxial cell in order to control and measure radial deformations of a sample during testing and the earth pressure coefficient « at rest » of test specimens.

The principle on which the cell is based is to obtain the measure of specimen deformations through measurements of displaced liquid volumes. Such measurements have been transferred to a liquid entirely contained into the cell. The liquid used so far has been mercury.

Mercury displacement can not only be measured but also be prevented through a relais automatically adjusting the axial load on the specimen. A k_0 or oedometric compression or rebound, can so be imposed.

Some preliminary test results are being presented. Among them worth mentioning is the check obtained for the empirical value $1 - \sin \varphi'$ for k_0 and the observed change in compressibility characteristics of the particular soil tested after it was sheared.