

INDICE

1. Premesse	2
Obbiettivo delle prove triassiali.....	2
2. Tipi di prove triassiali	3
Prova UU.....	3
Prova CD e Prova CU	4
3. Misura della pressione interstiziale nei terreni saturi	5
4. Applicazione della back pressure nelle prove triassiali	6
5. Apparecchiatura di prova	6
Cella triassiale e accessori	6
Dischi porosi	10
Carta da filtro	10
Membrana di lattice.....	10
Tendi membrana	10
Pitone di carico assiale	10
5.1 Descrizione dell'attrezzatura.....	10
6. Preparazione dei provini	12
7. Prove triassiali UU (non consolidate non drenate)	13
7.1 Principio della prova	13
7.2 Descrizione delle fasi operative.....	13
7.3 Presentazione dei risultati	15
8. Prove triassiali con misura delle pressioni interstiziali CU e CD	15
8.1 Principio della prova	15
8.2 Sistemazione del provino	16
8.3 Chiusura della cella triassiale	18
8.4 Misura della pressione interstiziale	18
8.5 Saturazione.....	18
Applicazione di successivi incrementi di back pressure	19
Saturazione ottenuta mantenendo costante lo stato tensionale efficace iniziale.....	20
Saturazione ottenuta mantenendo costante il contenuto d'acqua	21
8.6 Consolidazione	21
8.7 Velocità di deformazione (norme BS)	23
Prove triassiali CD	23
8.8 Velocità di deformazione (norme DIN)	25
8.9 Fase di rottura	26
8.10 Procedura di calcolo	27
8.11 Presentazione dei risultati	28
8.12 Misura della permeabilità.....	29
9. Consolidazione anisotropa	31
9.1 Premessa	31
9.2 Attrezzatura per la consolidazione con $K_o < 1$	32
9.3 Attrezzatura per la consolidazione con $K_o > 1$	34
10. Prove triassiali a stress path controllato	36
Consolidazione K_o	38
Fase di rottura	39

PROVA TRIASSIALE

1. Premesse

- In un terreno saturo conoscendo le pressioni interstiziali e le tensioni totali si può sapere anche le pressioni efficaci
- Le caratteristiche meccaniche non dipendono dalle tensioni totali ma dalle efficaci
- Le caratteristiche fisiche sono influenzate dalla variazione delle tensioni efficaci

Adottando il metodo di **Coulomb-Terzaghi** si osserva che:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \cdot tg\varphi' \quad (1)$$

- La resistenza al taglio dipende dalle tensioni efficaci
- Un incremento di resistenza al taglio può essere ottenuto aumentando le tensioni totali e permettendo la dissipazione delle pressioni interstiziali create
- In caso di consolidazione parziale la resistenza al taglio dipende dalla frazione che è supportata dallo scheletro solido, e quindi dal grado di dissipazione delle pressioni interstiziali.

Obiettivo delle prove triassiali

L'obiettivo delle prove triassiali è quello di determinare l'evoluzione delle tensioni efficaci fino alle condizioni di rottura attraverso uno stato tensionale indotto sul provino e la relativa misurazione delle pressioni interstiziali.

La rottura per taglio può avvenire in diversi modi:

- **Scorrimento in condizioni di drenaggio totale** con annullamento delle sovrappressioni interstiziali (taglio drenato). Le variazioni di tensioni efficaci dipendono dall'incremento delle tensioni totali e sono accompagnate sia da deformazioni di volume che da deformazioni di taglio
- **Scorrimento per taglio senza variazione di volume** (taglio non drenato). Le deformazioni si manifestano in assenza di drenaggio. Le variazioni di tensioni efficaci dipendono dalle pressioni interstiziali generate e sono accompagnate solo da deformazioni da taglio

Nella realtà il terreno in sito si comporta come una via di mezzo delle due prove.

La valutazione dei parametri ottenuti dalle prove triassiali quindi riveste un'importanza rilevante per la soluzione della maggior parte dei problemi geotecnici, dov'è necessario conoscere la resistenza al taglio del terreno.

2. Tipi di prove triassiali

Conoscendo quindi la possibilità di riprodurre stati tensionali e di replicare le condizioni di drenaggio, le prove triassiali vengono così distinte:

- prove non consolidate-non drenate (prove UU)
- prove consolidate-non drenate (prove CU)
- prove consolidate-drenate (prove CD)

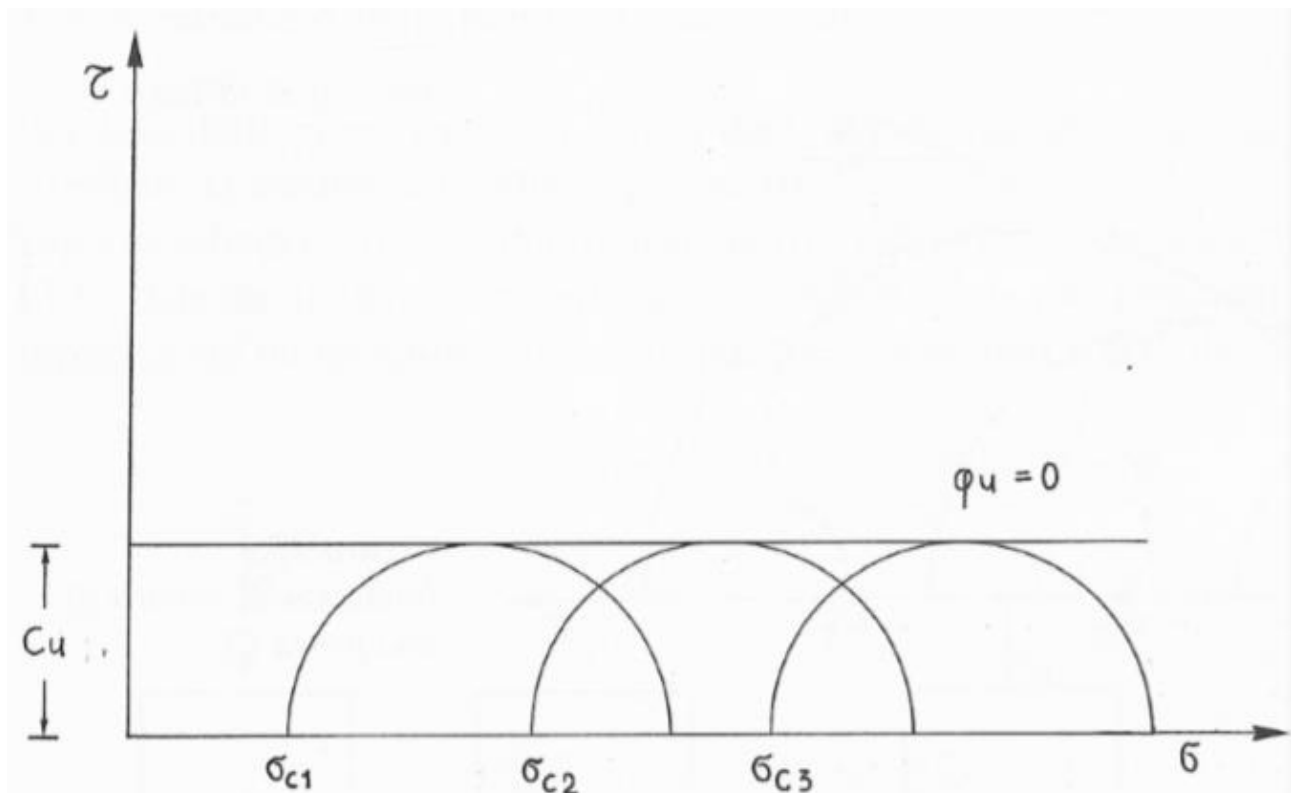
Analizziamo ora le differenze tra le tre

PROVA UU

Viene impedito il drenaggio sia nella fase di consolidazione che in quella di applicazione del carico assiale. In questo modo, nell'ipotesi che il provino sia saturo, il contenuto d'acqua, l'indice dei vuoti, e le tensioni efficaci rimangono costanti per tutta la durata della prova. Inoltre la resistenza al taglio misurata è indipendente dalla pressione isotropa applicata.

La resistenza al taglio in questo caso è espressa in termini di tensioni totali in quanto non si misurano le pressioni interstiziali (indicata come resistenza al taglio non drenato) e rappresenta la resistenza del terreno in sito, quando non vi sono ancora intervenute variazioni dell'indice dei vuoti e del contenuto d'acqua. I risultati sono buoni purché siano fatti su campioni indisturbati di buona qualità.

Nel caso di provino saturi l'involuppo di rottura espresso in termini di tensioni totali viene assunto orizzontale e l'intercetta con l'asse delle ordinate rappresenta la resistenza al taglio non drenata indicata con C_u



La prova UU però è affetta da limitazioni in quanto:

- la resistenza al taglio misurata è utile soltanto per l'analisi in termini di tensioni totali
- l'applicazione di una pressione isotropa nel corso della prova non permette di riprodurre in maniera appropriata le condizioni geostatiche. I valori di C_u ottenuti sono influenzati da questo limite.
- Il valore di C_u ottenuto dall'involuppo di rottura risulta corretto soltanto per i terreni completamente saturi.

Note sulla prova UU

Questa viene chiamata la prova veloce o Q (quick) in quanto non ha bisogno di aspettare che il terreno si consolidi e in oltre la velocità di esecuzione della stessa è maggiore rispetto alle altre.

Volendo si potrebbe fare una prova UU senza che vi sia una pressione nella camera isobara.

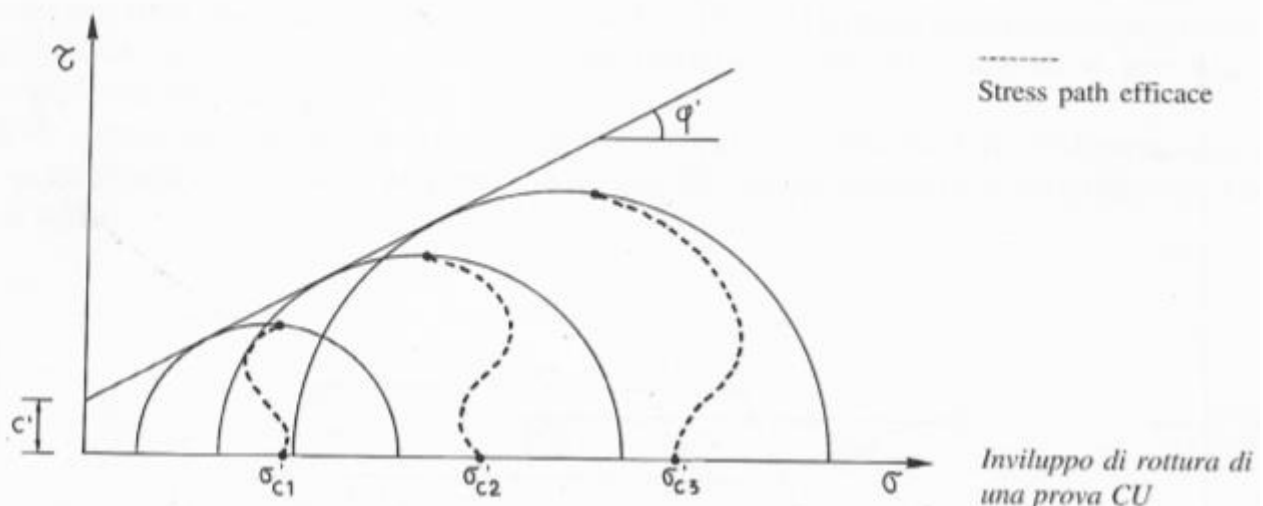
PROVA CD e PROVA CU

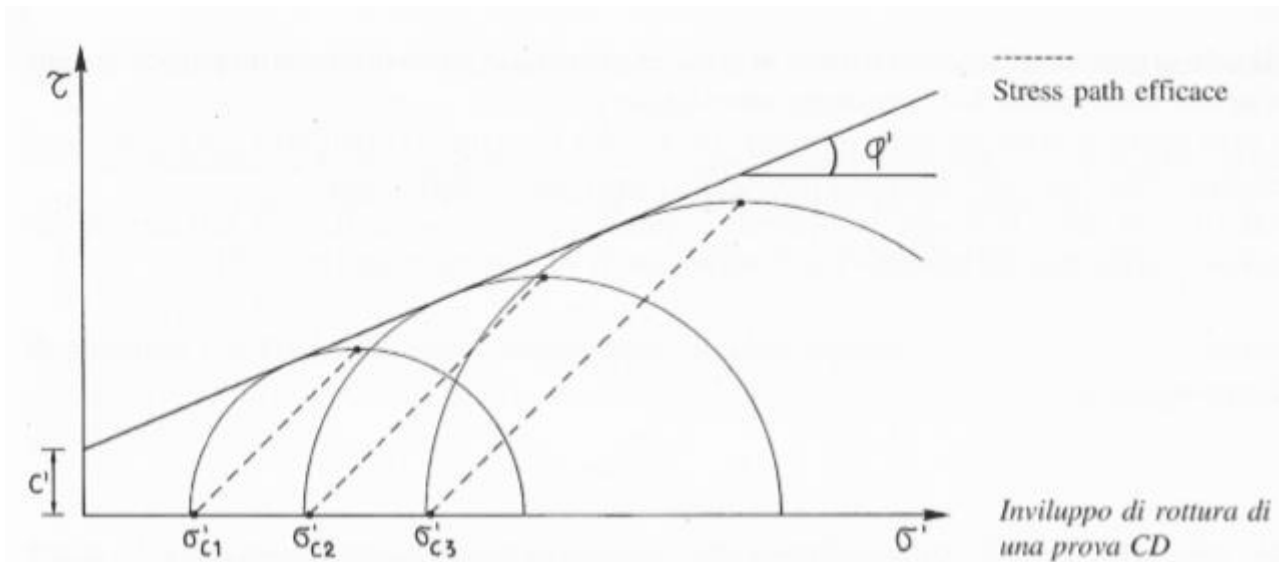
Queste per il momento le analizziamo insieme in quanto hanno bisogno di un ulteriore passaggio rispetto alla precedente, che consiste nella consolidazione del provino.

Successivamente nella **fase di rottura** si applica una tensione verticale crescente fino alla resistenza massima del provino

- Nel caso delle prove non drenate (**CU**) tale fase viene condotta con i drenaggi chiusi, quindi non si ha variazione di volume e vengono misurate le pressioni interstiziali generate.
- Nel caso delle prove drenate (**CD**) la fase di rottura viene condotta con i drenaggi aperti in maniera lenta di modo da permettere la dissipazione delle pressioni interstiziali, misurando la variazione di volume del provino.

Ripetendo le prove su diversi provini a differenti stati tensionali si può disegnare l'involuppo di rottura che permette di definire i parametri c' e φ' denominati rispettivamente angolo di resistenza al taglio e coesione efficace.





3. Misura della pressione interstiziale nei terreni saturi

La variazione della pressione interstiziale all' interno di un terreno è legata dalla relazione di Skempton (1954):

$$\delta U = B[\delta\sigma_3 + (\delta\sigma_1 - \delta\sigma_3)]$$

Con:

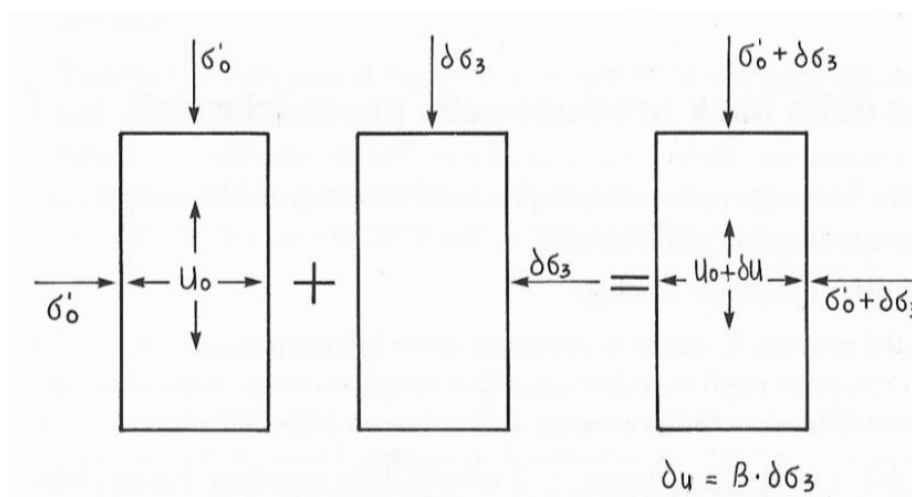
δU = variazione di pressione interstiziale causata dall'incremento di pressione totale di confinamento $\delta\sigma_3$ e dalla tensione deviatorica $(\delta\sigma_1 - \delta\sigma_3)$

A,B = parametri delle pressioni interstiziali

Per caso delle prove triassiali consolidate non drenate effettuate sui provini saturi è possibile effettuare la misura dei suddetti parametri.

Supponendo di partire da un provino saturo, caratterizzato dalla situazione di equilibrio data da una pressione efficace isotropa σ'_0 e da una pressione interstiziale U_0 e di applicare un incremento isotropo di tensione totale pari a $\delta\sigma_3$ si ottiene:

$$\delta\sigma_3 = \delta\sigma_1 \qquad \delta U = B \cdot \delta\sigma_3$$



Dalla misura delle pressioni interstiziali è quindi possibile calcolare la saturazione del provino, verificando ad esempio che il parametro B sia compreso tra 0,95 e 1.

Successivamente, incrementando la sola tensione assiale totale $\delta\sigma_3$ Skempton ci permette di determinare il parametro A:

$$\delta U = A \cdot \delta\sigma_1$$

4. Applicazione della back pressure nelle prove triassiali

Con il termine back pressure si intende parlare di una pressione idraulica che viene applicata all'interno del provino, contenuto nella cella triassiale.

L'utilizzo di tale pressione offre i seguenti vantaggi:

- Favorisce la saturazione del provino. L'acqua in pressione viene infatti spinta all'interno del provino in modo che l'aria presente negli spazi intergranulari venga assorbita. A questo scopo è necessario l'applicazione di una pressione minima dell'ordine di 150÷200 kPa.
- Permette la saturazione dei circuiti di drenaggio e di misura della pressione interstiziale per effetto del dissolvimento delle bolle d'aria nell'acqua in pressione
- Permette la misura delle pressioni interstiziali quando queste raggiungono valori inferiori alla pressione iniziale (che in assenza della back pressure risulterebbero negative)
- Consente di ottenere misure più affidabili dei coefficienti di permeabilità e di consolidazione (in assenza di bolle d'aria)

Questa back pressure deve essere controbilanciata dalla pressione nella camera di modo che non si crei disturbo al provino.

5. Apparecchiatura di prova

Cella triassiale e accessori

La funzione della cella è quella di contenere il provino, di poter applicare, tramite l'acqua al suo interno, una pressione isotropa ad esso, di realizzare la consolidazione e la saturazione attraverso appositi circuiti di drenaggio e di effettuare la fase di rottura mediante il pistone collegato alla testina di ripartizione.

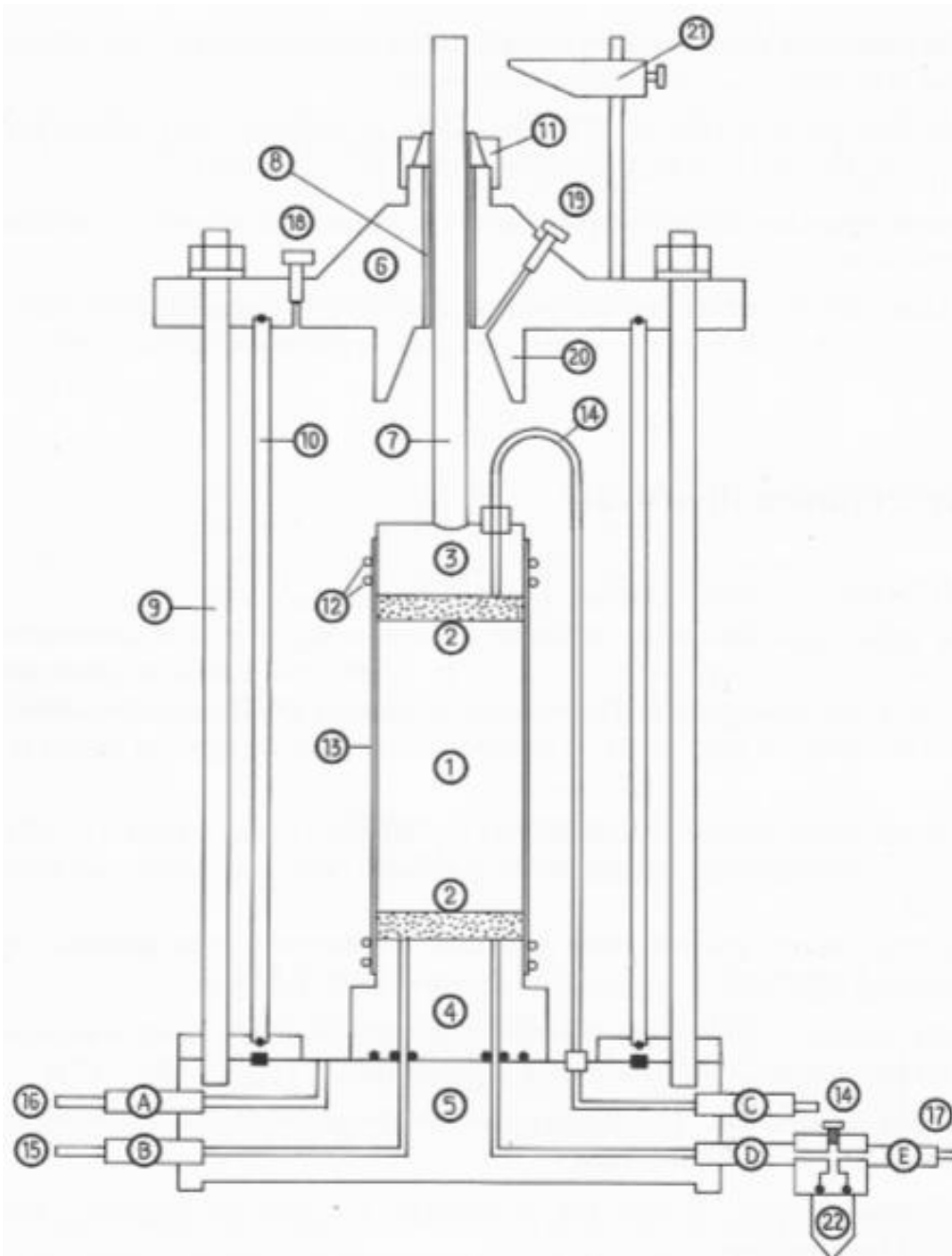
L'applicazione della pressione isotropa viene realizzata introducendo dell'acqua all'interno della camera contenente il provino e applicando successivamente una pressione, mantenuta costante per tutto il periodo di prova.

L'operazione di saturazione del provino viene realizzata introducendo dell'acqua in pressione (back pressure) attraverso il circuito di drenaggio.

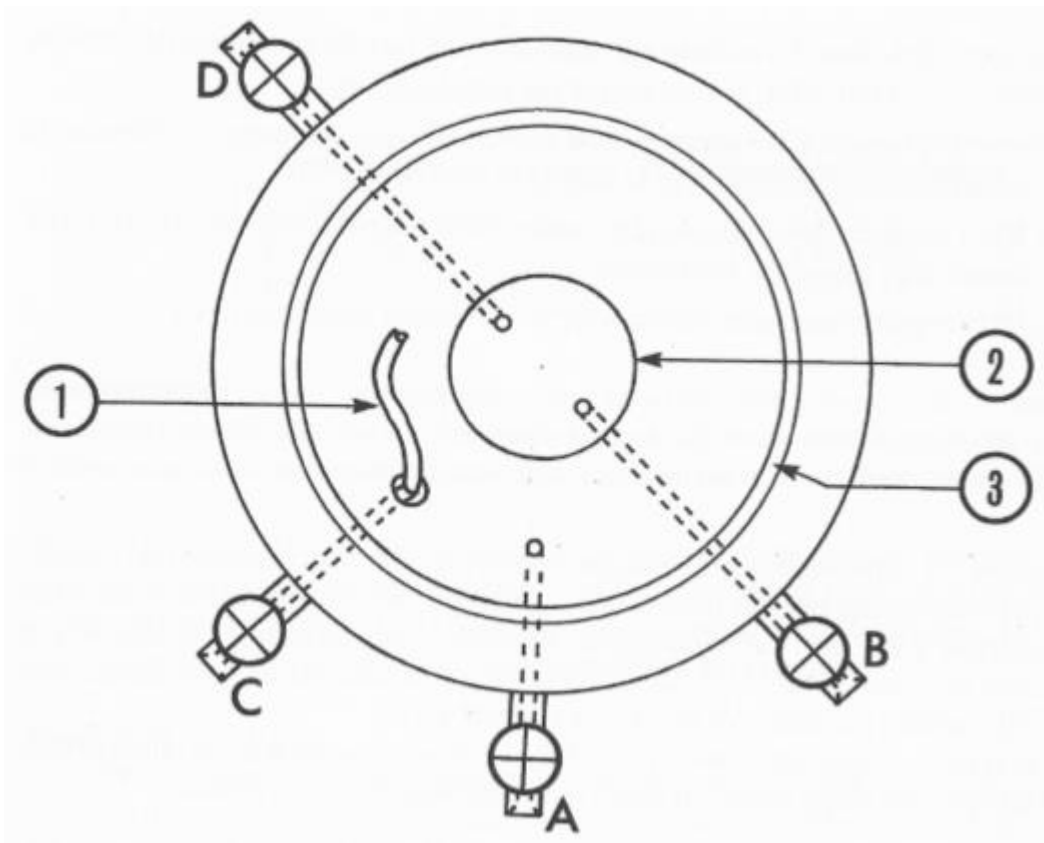
Alla base della cella triassiale, sono collegate le seguenti valvole che hanno un ruolo fondamentale per la prova.

- Valvola A collegata all'interno della camera triassiale, per il riempimento della cella stessa e per l'applicazione della pressione idraulica,

- Valvola B collegata al plinto di base, per il drenaggio inferiore del provino e per l'applicazione della back pressure,
 - Valvola C collegata alla testina superiore per il drenaggio superiore o per l'applicazione della back pressure,
 - Valvola D collegata al plinto di base, per la misura della pressione interstiziale mediante un null indicator o trasduttore elettronico.
- Alla stessa valvola, attraverso il blocchetto di sfiato del sistema di misura della pressione interstiziale, viene collegato il circuito di lavaggio, attivato nelle procedure di saturazione dei circuiti mediante la valvola E



1 Provino	12 Anelli di tenuta di gomma	A Valvola di pressione in cella
2 Dischi poroso	13 Membrana di lattice	B Valvola di drenaggio inferiore
3 Testina di drenaggio	14 Circuito di drenaggio superiore	C Valvola di drenaggio superiore
4 Plinto di base	15 Circuito di drenaggio inferiore	D Valvola di misura della pressione interstiziale
5 Flangia inferiore	16 Circuito di pressione di cella	E Valvola di lavaggio
6 Flangia superiore	17 Circuito di lavaggio	
7 Pistone di carico	18 Valvola di sfiato	
8 Boccola	19 Valvola di immissione olio	
9 Tiranti di serraggio	20 Campana di lubrificazione	
10 Cilindro di plexiglas	21 Incudine di appoggio stelo comparatore	
11 Ghiera di serraggio pistone	22 Blocchetto disaerante con trasduttore di pressione	



A Valvola di pressione in cella

1 Tubicino di drenaggio superiore

B Valvola di drenaggio inferiore

2 Plinto di base

C Valvola di drenaggio superiore

3 Sede o-ring

D valvola di misura della pressione interstiziale

In funzione della fase in cui ci troviamo e alla prova le valvole ci permettono di ottenere situazioni diverse:

- Nel caso di prove CU e CD l'apertura delle valvole B o C ci permette di effettuare la consolidazione rispettivamente attraverso la base o la testa del provino
- Nella prova CU l'apertura della valvola D, mantenendo chiuse le B, C, E permette la misura della pressione interstiziale
- Per le prove UU vengono mantenute chiuse tutte le valvole ad eccezione della A

Il plinto di base deve essere dello stesso diametro del provino.

La testina superiore deve essere sufficientemente rigida per ripartire il carico e di diametro pari a quello del provino, è perforata e collegata alla linea di drenaggio superiore con un tubicino di diametro interno inferiore di 2,5 mm. Per le prove UU la testina è piana, priva di fori per il drenaggio, mentre sul plinto di base viene inserito un apposito disco di metallo piano in sostituzione della pietra porosa.

Dischi porosi

Questi favoriscono la consolidazione e il drenaggio. Possono essere di carburo di silicio, bronzo sintetizzato, ceramica o altro materiale non attaccabile chimicamente dal fluido interstiziale del provino. Devono anche risultare indeformabili per pressioni fino a 5MPa e possedere una permeabilità maggiore di quella del provino. Questi devono essere conservati in acqua e prima di ogni prova devono essere lasciati a bollire per 10 minuti in modo da eliminare le eventuali bolle d'aria.

Carta da filtro

Tra i dischi e la superficie del provino si inseriscono dischi di carta da filtro per impedire l'intasamento.

Membrana di lattice

Realizzate in lattice di gomma naturale, esse vengono usate per contenere il provino e impedire il contatto diretto con il fluido di cella, devono avere un diametro non inferiore al 95% del diametro del provino, una lunghezza minima superiore di almeno 50 mm all'altezza del provino e uno spessore compreso tra 0,2 e l'1% del diametro. Lo spessore andrebbe definito di modo che questa non assorba più del 5% del carico a rottura.

Tendi membrana

Viene utilizzato per avvolgere la membrana al provino, questo ha un diametro superiore di 6 mm rispetto al provino stesso.

Pistone di carico assiale

Deve risultare perpendicolare alla base della cella, non deve avere diametro minore di 1/6 rispetto al diametro del provino. Il pistone deve avere un attrito con la boccia di modo che la variazione di tensione assiale tra quella impressa e quella misurata non sia più grande del 1%. Questo deve essere infatti lubrificato prima di ogni prova. Il contatto tra il pistone e la testina del provino avviene tramite superfici sferiche, in modo da evitare la trasmissione di momenti flettenti e torsioni.

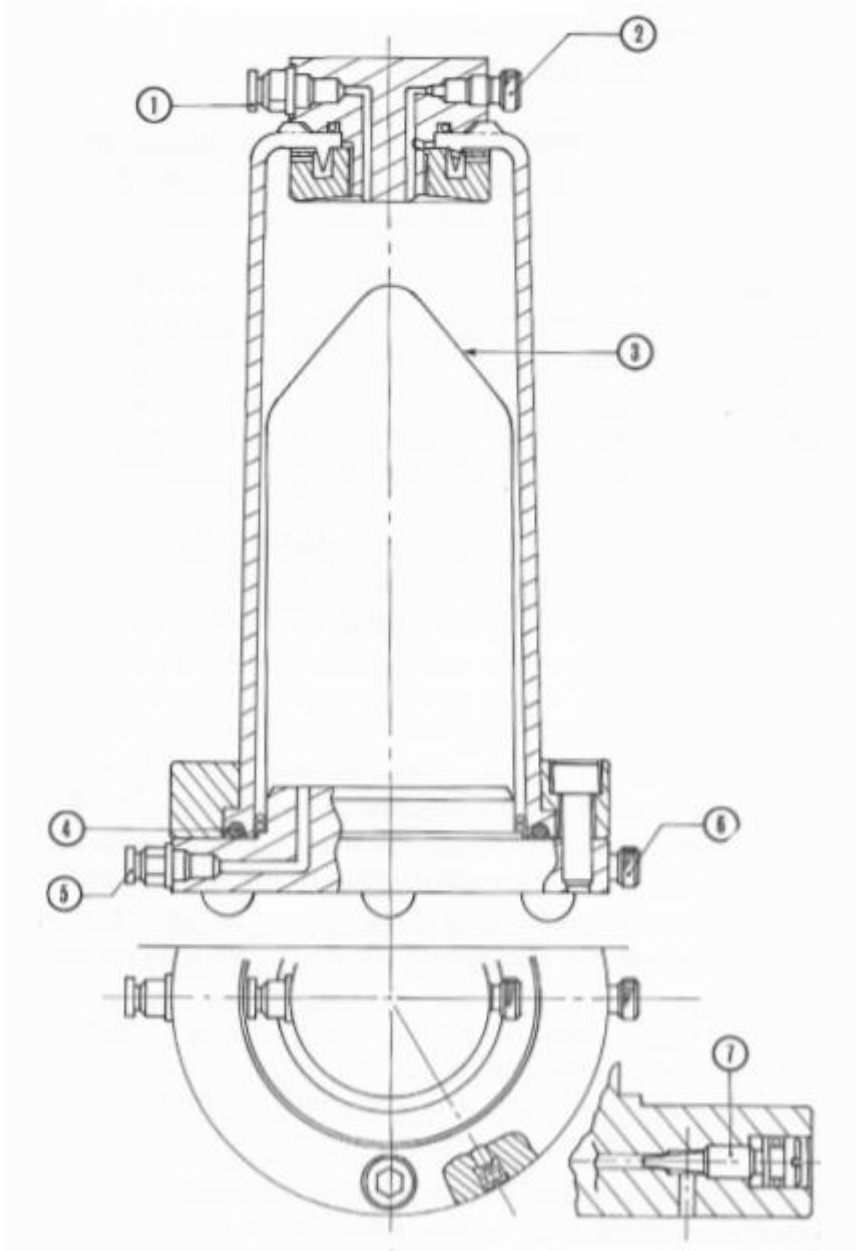
5.1 Descrizione dell'attrezzatura

L'elemento principale è costituito da un cilindro di plexiglass parzialmente riempito di acqua, all'interno del quale alloggia una membrana di gomma (il bladder), contenente aria compressa regolata da un apposito riduttore. La pressione viene mantenuta costante dalla membrana che variando di volume attenua le eventuali perdite a valle.

Lo schema generale del sistema è composto da un pannello che permette di controllare tre linee di pressione alimentato da una sola fonte di aria compressa. L'uscita del compressore è collegata alla valvola C di ingresso. Aprendo la valvola C1 la quantità d'aria può essere regolata dal riduttore E1 e mandata al bladder attraverso la B1. L'acqua contenuta nel cilindro quindi portata alla pressione desiderata, che può essere misurata al manometro aprendo la valvola A1.

Successivamente l'apertura della valvola D 1 permette di indirizzare la pressione costante impostata alla cella triassiale.

La valvola A è collegata al serbatoio di acqua che viene utilizzata per riempire la cella triassiale e il cilindro. La valvola di sfiato B1 viene aperta solo per scaricare la pressione dell'aria all'interno del bladder.



- 1 Ingresso acqua
- 2 Valvola di sfiato
- 3 Bladder
- 4 O-ring di tenuta
- 5 Ingresso aria
- 6 Valvola di sfiato aria
- 7 Valvola di regolazione sfiato

6. Preparazione dei provini

Questo paragrafo sarà dedicato appunto sulla preparazione del provino sulla base di quanto fatto con l'assistente di laboratorio.

Per una qualsiasi prova triassiale quello che andremo a definire sotto andrà ripetuto per tre volte, tante quanti i provini necessari per la suddetta.

Prima di descrivere le fasi operative conviene tenere a mente che nel laboratorio si hanno le possibilità di andare ad analizzare due tipi di campioni:

- rimaneggiati, che si presentano sotto forma di terreno non consistente che solitamente viene presentato all'interno di apposite sacche.
- indisturbati, questi sono caratterizzati, appunto, dal fatto che non subiscono delle alterazioni interne in modo da mantenere inalterate quelle che sono le caratteristiche dal terreno, come la densità e l'indice dei vuoti. Questo si presenta all'interno di un fustello cilindrico correttamente sigillato con della plastilina che ha il compito di mantenere inalterata la quantità di umidità del campione.

Andremo ad analizzare i passi da seguire per ottenere tre provini delle misure richieste da un campione indisturbato.

- Estrazione del campione di terreno prelevato dal fustello con l'ausilio dell'estrusore.
- Taglio del campione in modo da ottenere tre porzioni più grandi del provino che servirà per la prova.
- Sagomatura della porzione in eccesso per far sì che sia agevolata l'infissione del fustello che conterrà il provino.
- Infissione del fustello che ha il compito di tagliare il campione così da ottenere il provino delle giuste dimensioni.
- Estrazione del provino dal fustello.
- Misurazione del peso del provino.
- Con la parte eccedente di ciascuna sezione si procede con la valutazione dell'umidità del terreno andando quindi a misurare il peso iniziale ed il peso finale dopo 24 ore all'interno di un forno a temperatura di 105 °C.

7. Prove triassiali UU (non consolidate non drenate)

7.1 Principio della prova

Un provino cilindrico, protetto da una sottile membrana di lattice e sistemato tra le due basi rigide prive di dischi porosi, è sottoposto ad una pressione isotropa e successivamente ad un carico assiale che viene incrementato fino a determinare la rottura.

La compressione viene solitamente realizzata a velocità costante di deformazione, in modo tale che la prova risulta conclusa nel giro di 10/20 minuti.

Generalmente la prova viene ripetuta su tre provini appartenenti allo stesso campione, ciascuno con un diverso valore di pressione in cella. Per ciascuna prova viene quindi tracciato il cerchio di Mohr in termini di tensioni totali, in corrispondenza del carico massimo e l'involuppo di rottura, tangente ai tre cerchi.

Da un punto di vista teorico, nell'ipotesi che il terreno sia saturo, la variazione delle tensioni totali per effetto della variazione della pressione della cella non influenza le tensioni efficaci, che rimangono costanti per i tre provini. Il carico massimo è pertanto indipendente dalla pressione in cella, l'involuppo di rottura tracciato in termini di tensioni totali risulta orizzontale, l'angolo di resistenza al taglio, indicato con φ_u si assume pari a zero, la resistenza al taglio in condizioni non drenate risulta invece costante e pari a C_u

7.2 Descrizione delle fasi operative.

- Predisporre la cella triassiale in modo da escludere i circuiti di drenaggio, sostituendo la testina superiore e i dischi metallici.
- Terminata la preparazione pesare il provino. Immediatamente dopo sistemarlo sul disco piano inserito sul plinto di base, preventivamente ricoperto da un sottile strato di grasso al silicone, per ridurre gli attriti in fase di compressione e facilitare la rimozione del provino al termine della prova. Posizionata la testina di carico controllare che il provino sia correttamente allineato e centrato rispetto alla base della cella.
- Sulle estremità inferiori del tendi membrana sistemare quindi 2 o-ring, facendoli scorrere verso il centro. Introdurre una membrana in lattice all'interno del tendi membrana, distenderla lungo le pareti interne, rigirandone le estremità all'esterno ed evitando allo stesso tempo di farla corrugare o piegare.
- Aspirare leggermente attraverso il tubo di gomma, collegato al tendi membrana, in modo da fare aderire perfettamente la membrana alle pareti interne del tubo. Mantenendo il vuoto, abbassare accuratamente il tendi membrana intorno al provino evitando di toccarlo. Quando l'attrezzo risulta centrato, rilasciare il vuoto, per fare aderire la membrana.
- Fare quindi scivolare le estremità della membrana sul plinto e sulla testina, estendendo la leggermente verso l'alto, in modo da conferire una buona aderenza al provino e non

creare sacche d'aria. Mantenendo con una mano il tendi membrana con il bordo inferiore a livello del plinto, sistemare uno dei 2 o-ring. Sollevare successivamente il tendi membrana per sistemare il secondo anello intorno alla testina di carico.

- Tolto il tendi membrana, rivoltare l'estremità superiore della guaina intorno all'anello di tenuta.
- Passare successivamente alla sistemazione del cilindro in plexiglass della cella triassiale, controllando che il pistone di carico sia sufficientemente sollevato e che il bordo inferiore della cella sia perfettamente pulito, con l'anello di tenuta in posizione corretta e ricoperto con un sottile strato di grasso al silicone.
- Sistemare il corpo della cella, facendo attenzione a non urtare il provino. Lasciare quindi scendere il pistone liberamente sotto al proprio peso, fino al contatto con la sede emisferica della testina di carico. Avvitare gradualmente a mano i tiranti alla flangia di base, in modo che il serraggio del corpo della cella avvenga uniformemente assicurandone così la perfetta perpendicolarità al pistone.
- Sistemata la cella triassiale sul piatto della pressa, fare salire quest'ultimo manualmente fino a quando il pistone si trova a circa 3 cm dall'anello di carico.
- Procedere successivamente al riempimento della cella triassiale. Non appena l'acqua fuoriesce dalla valvola superiore di sfiato cella 18, chiudere immediatamente la valvola A di immissione dell'acqua e successivamente la valvola di sfiato stessa.
- Applicare la pressione isotropa prevista. Prestare attenzione affinché il pistone di carico, spinto verso l'alto dalla pressione applicata, si inserisca correttamente a contatto con l'anello di carico.
- Azionare il motore per innalzare la base della pressa e, non appena il pistone comincia ad abbassarsi all'interno della cella, azzerare il micrometro dell'anello di carico, in modo da eliminare dalla lettura gli effetti della pressione in cella e l'attrito del pistone.
- Spegnerne il motore e continuare a far salire manualmente il piatto della pressa. questa operazione deve essere effettuata con molta attenzione per evitare di comprimere inavvertitamente il provino prima dell'inizio della prova.
- La prova viene portata avanti fino a quando si raggiunge una delle condizioni seguenti:
 - la lettura del carico decresce sensibilmente
 - il carico rimane costante per 4 letture successive
 - la deformazione supera il 20%.
- In prossimità della rottura può essere necessario infittire il numero delle letture (ad es. ogni 2 mm di compressione) in modo da individuare con maggior precisione il carico massimo. Terminata la prova, fermare la pressa e invertirne il moto riducendo così il carico assiale. Chiudere la valvola (A) della cella, in modo che la pressione si abbassi gradatamente per effetto dell'innalzamento del pistone. Agire sul sistema di pressione per azzerare la pressione nei circuiti e procedere allo scarico dell'acqua dalla cella triassiale.
- Estrarre con attenzione il provino e farlo essiccare in forno per almeno 12 ore alla temperatura costante di 110°C per la misura del contenuto d'acqua.

Si consiglia di effettuare uno schizzo del provino per indicare la pendenza e la forma delle eventuali superfici di rottura. Questo dato può risultare importante per l'interpretazione della curva sforzi-deformazioni e per la determinazione della resistenza al taglio.

- Annotare altresì le eventuali anomalie riscontrate nel corso della prova: rottura fragile o plastica, rottura lungo piani preferenziali, disomogeneità del provino, presenza di lenti sabbiose, struttura scagliosa o fessurata, ecc. Verificate che le caratteristiche fisiche del campione siano omogenee, ricavare possibilmente altri due provini da sottoporre a prova con diverso valore della pressione in cella

7.3 Presentazione dei risultati

- Per ciascun provino diagrammare le curve sforzi-deformazioni e determinare la resistenza a rottura (in corrispondenza dello sforzo deviatorico massimo) o quella finale (in corrispondenza della deformazione del 20 %)
- Per le tre prove effettuate si tracciano in fine i cerchi di Mohr in termini di tensioni totali facendo riferimento alle seguenti espressioni

Centro del cerchio

$$c = \frac{\sigma_3 - [\sigma_1 - \sigma_3]}{2}$$

Reggio del cerchio

$$c = \frac{[\sigma_1 - \sigma_3]f}{2}$$

dove:

σ_3 è la pressione della cella

$[\sigma_1 - \sigma_3]f$ è la massima tensione deviatorica

- Per la determinazione di Cu in fine basta tracciare la retta orizzontale che più fedelmente risulti tangente ai cerchi.

8. Prove triassiali con misura delle pressioni interstiziali

CU (consolidate non drenate)

CD (consolidate drenate)

8.1 Principio della prova

La prova di compressione triassiale consolidata non-drenata con misura della pressione interstiziale (la prova CU) permette di determinare la resistenza al taglio non drenata di un provino sottoposto ad uno stato tensionale iniziale definito.

Se il materiale di prova è saturo, le variazioni di pressione interstiziale misurate nel corso della fase di rottura, condotta mantenendo chiuse le valvole di drenaggio della cella triassiale, permettono di determinare le tensioni efficaci e il parametro A di Skempton.

Nel caso delle prove consolidate-drenate (le prove CD) la fase di rottura viene condotta mantenendo aperte le valvole di drenaggio e in maniera sufficientemente lenta, in modo tale da evitare variazioni di pressione interstiziale; in questo modo le tensioni totali misurate coincidono con le tensioni efficaci.

La prova CD trova maggiore applicazione sui terreni coesivi di bassa plasticità (dove la permeabilità è relativamente elevata), sui materiali compattati e sui terreni parzialmente saturi.

Solitamente viene sottoposto a prova un numero minimo di tre provini appartenenti allo stesso campione, ciascuno consolidato ad un diverso stato tensionale iniziale. Tracciando i cerchi di Mohr in termini di tensioni efficaci in corrispondenza della massima resistenza al taglio oppure l'andamento dello stress path per i vari provini, è possibile ottenere l'involuppo di rottura e determinare i parametri di resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci c' e φ' .

Sia le prove CU che le prove CD vengono condotte in tre fasi:

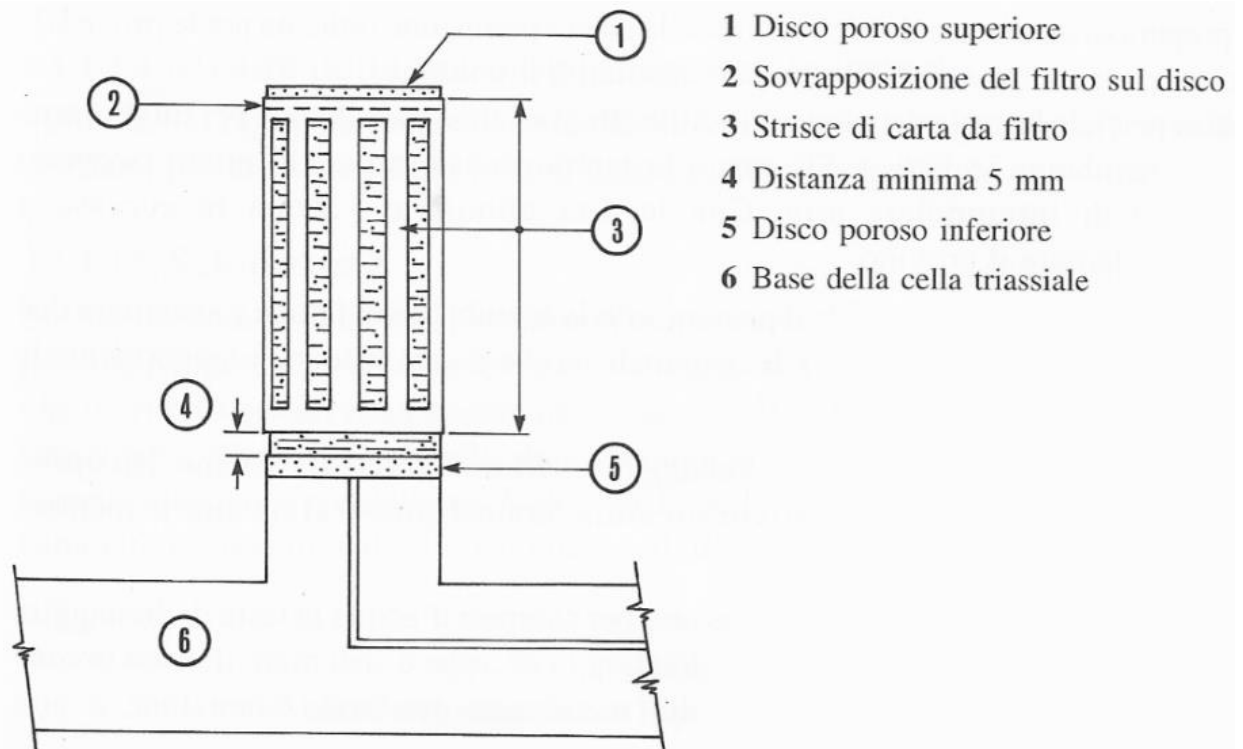
- Saturazione
- Consolidazione
- Compressione fino a rottura.

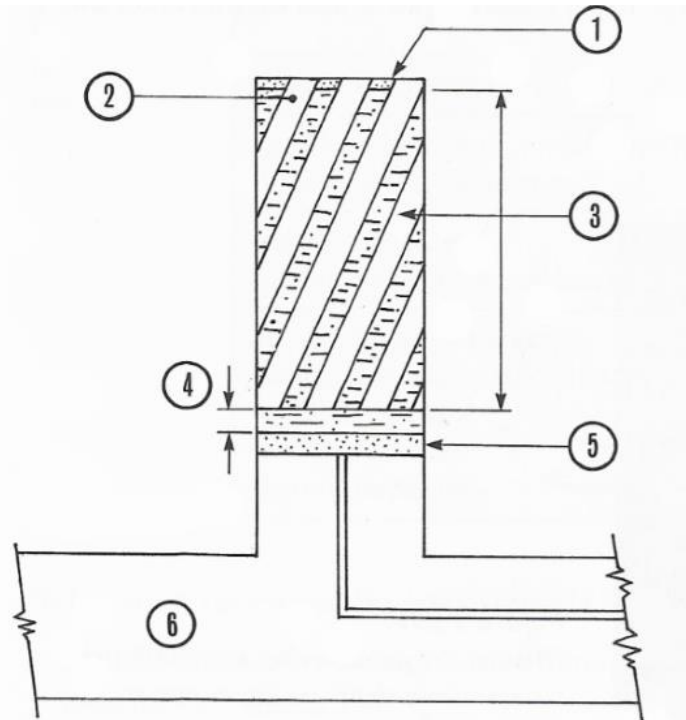
Le prime due fasi portano il provino, completamente saturo, allo stato di tensioni efficaci prestabilito per la fase di compressione.

Le prove vengono generalmente effettuate su campioni indisturbati di buona qualità. Talvolta si fa uso di campioni compatti o ricostruiti; in questi casi la fase di saturazione viene eseguita soltanto quando si prevede che tale condizione si verifichi in sito; in generale il contenuto d'acqua dato al provino deve essere rappresentativo del problema geotecnico investigato.

8.2 Sistemazione del provino

Se il provino è di bassa permeabilità, si consiglia di adottare dreni verticali per ridurre la lunghezza del percorso di drenaggio ad una distanza pari al raggio del provino.





In alcuni casi (provini teneri o prove di estensione) l'adozione di dreni verticali può influenzare la resistenza al taglio in fase di rottura, in quanto essi collaborano alla deformazione del provino.

Si preferisce pertanto adottare strisce di carta da filtro avvolte a spirale.

Prima dell'utilizzo, le strisce vengono immerse per alcuni minuti in acqua disaerata, e sistemate in modo che risultino sature senza acqua in eccesso.

Verificare che la cella triassiale sia predisposta per l'applicazione della back pressure, per la misura della pressione interstiziale e della variazione di volume e che siano state eseguite tutte le operazioni preliminari indicate precedentemente.

Controllare che i dischi porosi non siano intasati e che i circuiti di collegamento alla cella triassiale siano stati saturati.

Terminata la preparazione del provino e prendere nota del diametro e dell'altezza per calcolarne il volume.

Spalmare sulla superficie laterale del plinto un sottile strato di grasso al silicone per migliorarne la tenuta con la membrana in lattice. Sistemare la pietra porosa satura sul plinto ricoperto d'acqua, evitando di intrappolare aria, Con le dita eliminare l'acqua in eccesso e immediatamente sistemare il provino.

Per mezzo del tendi membrana avvolgere il provino con la membrana in lattice e sistemare due o-ring intorno al plinto di base. Eliminare le eventuali sacche d'aria tendendo leggermente la membrana verso l'alto.

Far passare due o-ring attraverso la testa di drenaggio superiore intorno al tubicino. Ricoprire la superficie laterale della testa di drenaggio con un sottile strato di grasso al silicone in maniera analoga al plinto di base.

Aprire temporaneamente la valvola di back pressure per saturare d'acqua la testa di drenaggio.

Chiudere la valvola di back pressure, eliminare l'acqua in eccesso e sistemare il disco poroso saturo e la testina sul provino all'interno della membrana prestando attenzione a non intrappolare aria.

8.3 Chiusura della cella triassiale

Controllare che il provino sia allineato verticalmente, sistemare il corpo della cella, prestando a non urtare il provino. Lasciare che il pistone scenda liberamente fino ad appoggiare nella sede emisferica della testina di drenaggio.

Riempire la cella triassiale con acqua disaerata, facendo uscire l'aria dallo sfiato superiore. Una volta riempita, attraverso la valvola superiore (19) introdurre una piccola quantità di olio al di sotto della boccola in modo da lubrificare il pistone e favorire la tenuta idraulica.

Per questa operazione si consiglia di chiudere la valvola (18), sollevare il pistone in modo da creare una debole depressione all'interno della cella, in grado di aspirare l'olio introdotto dalla valvola (19). Successivamente chiudere quest'ultima. aprire la valvola (18) e bloccare il pistone alla distanza di qualche millimetro dalla testina.

Mantenere lo sfiato (18) aperto fino a quando non si applica pressione in cella.

8.4 Misura della pressione interstiziale iniziale

Terminato il riempimento della cella triassiale, prima ancora di chiudere la valvola superiore di sfiato, prendere nota della misura della pressione interstiziale.

8.5 Saturazione

La fase di saturazione viene realizzata aumentando la pressione interstiziale all'interno del provino per portare in soluzione l'aria contenuta nei vuoti intergranulari. Conviene sottolineare che il criterio basato sulla misura del parametro B di Skempton come verifica di una corretta saturazione è applicabile con una certa immediatezza soltanto ai terreni coesivi teneri e di media consistenza. Valori di B dell'ordine di 0.97 indicano infatti un grado di saturazione superiore al 98% solo nel caso di provini normalmente consolidati. Nel caso di terreno molto consistenti la saturazione può essere verificata controllando che:

- Gradini successivi di saturazione diano valori presso che costanti di B.
- La variazione di volume misurata contemporaneamente all'interno e all'esterno del provino indichi che ad un aumento dell'acqua intergranulare corrisponda un aumento del volume del provino.

I metodi consigliati dalle Norme per realizzare la saturazione sono i seguenti:

- Saturazione mediante applicazione di gradini alternati di pressione in cella e di back pressure. Rappresenta il metodo più diffuso per i provini che presentano un elevato grado di saturazione iniziale (superiore all'85%).
- Saturazione ottenuta mantenendo costante lo stato tensionale iniziale (cioè la tensione geostatica efficace).

Questa procedura è indicata ad esempio nel caso di argille sovra consolidate: la differenza tra pressione in cella e back pressure, solitamente adottata seguendo il precedente metodo di saturazione, può risultare troppo bassa e provocare rigonfiamenti, disturbando la struttura del provino.

D'altra parte, per provini teneri, la tensione efficace applicata in fase di saturazione può determinare una parziale consolidazione del provino e deve pertanto essere attentamente impostata nel corso della saturazione.

- Saturazione ottenuta mantenendo costante il contenuto d'acqua. Questo metodo viene adottato quando il terreno, indipendentemente dalle tensioni geostatiche applicate, è particolarmente sensibile a fenomeni di rigonfiamento

Applicazione di successivi incrementi di back pressure

Vengono solitamente applicati incrementi iniziali dell'ordine di 50 kPa e successivamente di 50÷100 kPa. Incrementi di 100 kPa possono essere applicati quando il valore iniziale del parametro B risulta superiore a 0,8. Se il provino è lontano dalla saturazione, la chiusura del circuito di drenaggio, necessaria per la misura dell'incremento di pressione interstiziale, non impedisce comunque che la pressione in cella applicata determini una certa consolidazione del provino, difficilmente quantificabile.

Se è noto il grado di saturazione del provino iniziale S_0 , il livello di back pressure teorico U per ottenere la saturazione può essere desunto dalla tabella riportata di seguito, ottenuta dalla seguente espressione:

$$U_B = U_a \cdot \frac{1 - S_0}{0,02 \cdot S_0}$$

Dove U_a rappresenta la pressione iniziale dell'aria intergranulare (assunta generalmente pari a 100 kPa)

Operare per tanto nel seguente modo:

- Si suppone di iniziare la procedura con tutte le valvole di base della cella chiuse
- Chiudere lo sfiato superiore dalla cella triassiale e applicare una pressione in cella con superiore a 50 kPa o alla pressione di consolidazione prevista (se minore di 50 kPa). Successivamente aprire solo la valvola (A) della pressione in cella
- Aprire la valvola (D) e controllare la lettura del trasduttore di pressione interstiziale fino a quando raggiunge un valore massimo di equilibrio. Se necessario, diagrammare l'incremento di pressione interstiziale in funzione del tempo (espresso in scala aritmetica o radice quadrata), in modo da definire correttamente la situazione di equilibrio (generalmente ottenibile nel giro di 30 min per provini di piccolo diametro).
- Calcolare il parametro B di Skempton come rapporto tra l'incremento di pressione interstiziale e l'incremento di pressione in cella.
- Tenendo sempre chiusa la valvola C del drenaggio superiore, portare il valore della back pressure al valore della pressione in cella diminuito di 10÷20 kPa. La back pressure applicata non deve comunque risultare inferiore alla pressione interstiziale di equilibrio della fase precedente; se necessario si incrementa dunque la back pressure e in corrispondenza la pressione in cella.

- Prendere nota della lettura alla buretta di variazione di volume quando questa raggiunge un valore stabile, dopo l'espansione del circuito (dopo circa 5 min).
- Aprire la valvola (C) per far accedere la back pressure all'interno del provino.
- Quando la variazione di volume si è stabilizzata, prendere nota della lettura finale e calcolare la quantità di acqua assorbita dal provino. Chiudere quindi la valvola (C).
- Un altro sistema di controllo dell'avvenuta saturazione può essere rappresentato dalla misura della pressione interstiziale alla base del provino. Quando questa raggiunge il valore della back pressure applicata attraverso il circuito superiore. Tale sistema non è tuttavia indicativo se si adottano i filtri laterali.
- Incrementare nuovamente la pressione in cella di circa 50-100 kPa; controllando la variazione di pressione interstiziale.
- Calcolare ancora il parametro B di Skempton e ripetere le fasi precedentemente descritte, fino a quando il provino risulta saturo.

Back pressure teorica di saturazione

S_o %	U_B kPa
100	0
98	100
96	200
95	300
90	600

- Predisporre una tabella, dove per ogni gradino di saturazione viene indicato il volume d'acqua assorbito dal provino.
- Impostare infine un diagramma, dove per ogni gradino di saturazione viene indicata la variazione della pressione in cella e della pressione interstiziale ottenuta.
- Il provino è considerato saturo quando viene raggiunta una delle seguenti condizioni:
 - o Il valore di B risulta maggiore o uguale a 0,95
 - o Si ottiene un valore di B dell'ordine di 0,9 che rimane invariato dopo tre incrementi successivi di back pressure e di pressione in cella.
- Calcolare in fine il volume totale dell'acqua assorbita dal provino dalla somma delle misure effettuate alla buretta per ciascun gradino di saturazione applicato.

Saturazione ottenuta mantenendo costante lo stato tensionale efficace iniziale

- Portare la pressione in cella ad un valore minimo pari alla tensione geostatica totale del provino e controllare l'incremento della pressione interstiziale. Se necessario aumentare ulteriormente la pressione in cella in modo che la pressione interstiziale sia pari a 50 kPa. Attendere fino a quando la pressione interstiziale si sia stabilizzata.
- La differenza tra la pressione in cella e la pressione interstiziale finale rappresenta la tensione efficace iniziale, che dovrà essere mantenuta costante nel corso delle successive fasi di saturazione

- Calcolare ancora il parametro B come rapporto tra l'incremento della pressione interstiziale e la pressione in cella applicata.
- Passare ai gradini successivi di saturazione allo stato modo descritto al paragrafo precedente sempre mantenendo la differenza tra le pressioni in cella e la back pressure costante e pari alla tensione efficace iniziale.
- Per la conclusione della saturazione e la presentazione dei dati seguire le stesse indicazioni del metodo precedente.

Saturazione ottenuta mantenendo costante il contenuto d'acqua.

- Applicare il primo gradino di pressione in cella pari a $50 \div 100$ kPa e, mantenendo le valvole di drenaggio chiuse, controllare l'incremento di pressione interstiziale.
- Quando questa risulta stabilizzata, incrementare la pressione in cella di 100 kPa e sempre mantenendo chiuso il drenaggio registrare l'incremento di pressione interstiziale fino all'equilibrio.
- Proseguire per successivi gradini fino a quando la pressione interstiziale è superiore a $150 \div 200$ kPa e quando per tre successivi gradini il parametro B risulta costante. Tale procedura richiede tempi piuttosto lunghi e le pressioni finali ottenute sono compatibili con tensioni efficaci (al termine della consolidazione) piuttosto elevate.

Nella successiva fase di consolidazione la tensione efficace viene sempre realizzata dalla differenza tra pressione in cella e la back pressure, quest'ultima mantenuta ad un livello inferiore rispetto alla pressione interstiziale finale generatasi nella fase di saturazione, in modo da prevenire qualsiasi aumento del contenuto d'acqua iniziale del provino.

8.6 Consolidazione

lo scopo della fase di consolidazione è quello di portare il provino allo stato di tensioni efficaci richiesto per realizzare la fase di rottura.

La consolidazione può essere effettuata sia in condizioni isotrope che anisotrope; sebbene la consolidazione anisotropa riproduca in maniera più appropriata lo stato tensionale del terreno, la descrizione seguente si occupa della consolidazione isotropa, tuttora largamente adottata.

Le tensioni efficaci nel provino vengono portate al valore desiderato, aumentando la pressione in cella e lasciando dissipare l'eccesso di pressione interstiziale fino ad equilibrarsi al valore di back pressure applicata.

La back pressure non dovrebbe comunque essere portata al di sotto del valore risultante dall'ultimo gradino di saturazione o al di sotto di 300 kPa. In questo modo si evita che l'aria disciolta tenda nuovamente a separarsi dalla fase liquida.

Le pressioni di consolidazione vengono stabilite, volta per volta, in funzione del problema geotecnico per cui la prova viene eseguita.

Nel caso di provini sovra consolidati le norme consigliano di consolidare i tre provini ad una stessa pressione isotropa, superiore a quella massima di consolidazione, e di scaricarli successivamente alle singole pressioni previste, in modo da recuperare parzialmente il disturbo iniziale.

- Terminata dunque la fase di saturazione, tenera chiusa la valvola del drenaggio superiore, incrementare la pressione di cella σ_3 e regolare la back pressure, in modo che la differenza sia pari al valore richiesto della pressione efficace di consolidazione:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - P_B$$

- Attendere fino a quando la pressione dei pori si sia stabilizzata. Prendere nota del valore finale e calcolare l'incremento di pressioni interstiziale da dissipare in fase di consolidazione: $\delta U = U_0 - P_a$

Con U_0 = pressione interstiziale stabilizzata all'inizio della fase di consolidazione

P_B = back pressure applicata

- Prendere nota della lettura dalla buretta di variazione di volume (tale valore rappresenta la lettura iniziale della fase di consolidazione)
- Far partire il cronometro e allo stesso tempo aprire la valvola di drenaggio superiore (C). nel corso della fase di consolidazione registrare la dissipazione della pressione interstiziale e la variazione di volume adottando la seguente sezione dei tempi 15-30-60 sec; 2-4-8-15-30-60 min; 2-4 ore ecc.
- Interrompere le letture e quindi la consolidazione quando non si apprezzano più ulteriori variazioni di volume.
- Mettere in grafico le variazioni di volume misurate in funzione del tempo espresso in scala radice quadrata. Tracciare la retta che meglio descrive la prima parte del diagramma. Questo tratto generalmente giace all'interno del primo 50% della variazione di volume.
- Tracciare la retta che interseca i punti finali diagrammati. In corrispondenza dell'intersezione della due rette prendere nota del tempo t_{100} , necessario per il calcolo del coefficiente di consolidazione C_v .
- In funzione del tempo espresso in scala logaritmica mettere in diagramma la percentuale di dissipazione della pressione interstiziale, data dalla seguente espressione:

$$\Delta U = \frac{U_0 - U}{U_0 - P_B} \cdot 100$$

Dove U rappresenta la pressione interstiziale misurata alla base del provino. La fase di consolidazione si può ritenere conclusa quando la percentuale di dissipazione è superiore al 95%.

- Tale valutazione è rappresentativa del comportamento del provino soltanto se si è fatto uso delle strisce di drenaggio laterale senza che questi risultino a contatto con la pietra porosa di base; se infatti si crea un ponte di collegamento tra la testa e la base del provino, si determina in breve tempo un abbassamento della pressione interstiziale fino ad un valore pari al valore alla back pressure applicata, indipendentemente dal grado di consolidazione del provino.
- Un altro metodo per verificare l'avvenuta consolidazione del provino consiste nel chiudere la valvola di drenaggio superiore e osservare che la pressione interstiziale non presenti aumenti apprezzabili in funzione del tempo.

- Calcolare le dimensioni del provino al termine della consolidazione dalle seguenti espressioni:

Volume del provino

$$V_c = V_0 - \delta V$$

Altezza del provino

$$L_c = L_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{\delta V}{V_0}\right)$$

Sezione media

$$A_c = \frac{V_0 - \delta V}{L_c}$$

Dove:

V_0 =volume iniziale del provino

L_0 = altezza iniziale del provino

δV = variazione di volume misurata in fase di consolidazione

8.7 Velocità di deformazione (Norme BS)

Prove triassiali CD

L'obiettivo principale delle prove drenate è quello di misurare la resistenza al taglio in termini di tensioni efficaci attraverso la misura delle tensioni totali, realizzando cioè la fase di rottura in modo che tensioni totali ed efficaci coincidano; questo risultato può essere ottenuto permettendo una variazione di pressione interstiziale pressoché nulla all'interno del provino.

La fase di rottura deve pertanto essere condotta ad una velocità di deformazione sufficientemente bassa, in modo che la pressione interstiziale possa dissiparsi liberamente: la velocità di deformazione deve risultare proporzionale al flusso idraulico dell'acqua interstiziale e dipende pertanto dalle caratteristiche di consolidazione del provino in esame.

Nelle prove drenate, se la velocità di deformazione è elevata si ottengono valutazioni errate della resistenza al taglio. Nel caso ad esempio di argille normal consolidate si genera un incremento di pressione interstiziale facendo riferimento al piano $t'-s'$ lo stress path efficace non si sovrappone allo stress path totale ma risulta spostato sulla sinistra. Ne segue che la resistenza al taglio risulta più bassa, l'involuppo di rottura definisce un angolo di resistenza al taglio minore e una coesione maggiore.

Se al contrario il provino è fortemente sovra consolidato, una velocità elevata di deformazione genera pressioni interstiziali negative, lo stress path efficace risulta spostato a destra rispetto allo stress path totale, la resistenza al taglio misurata è più elevata, l'involuppo di rottura si presenta più ripido, con conseguente sovrastima dell'angolo di resistenza al taglio e riduzione della coesione.

In base alle ricerche sperimentali sulle argille rimaneggiate possiamo affermare che:

- nei terreni normal consolidati la resistenza al taglio aumenta con il tempo impiegato per raggiungere la rottura

- nei terreni sovra consolidati la resistenza al taglio diminuisce al crescere del tempo impiegato per raggiungere la rottura.

Nel corso di tali esperienze la misura della pressione interstiziale ha permesso di osservare che la resistenza al taglio tende a stabilizzarsi in corrispondenza di un grado di dissipazione dell'ordine del 95%. Il grado di dissipazione medio U (della pressione interstiziale nel corso della rottura di una prova CI) può essere descritto dalla seguente equazione:

$$U_r = 1 - \frac{h^2}{\eta \cdot c_v \cdot t_f}$$

Dove:

$2h$ = altezza del provino

C_v = coefficiente di consolidazione

t_f = tempo necessario per raggiungere la rottura

η = fattore adimensionale, dipendente dalle condizioni di drenaggio in fase di consolidazione

Introducendo $U_f=95\%$ nella relazione precedente, è possibile ricavare t_f

$$t_f = \frac{20 \cdot h^2}{\eta \cdot C_v}$$

Tenendo per tanto conto delle condizioni di drenaggio e sostituendo i rispettivi valori di η e C_v nell'espressione sopra, si ottiene un'espressione che mette direttamente in relazione i valori di t_f con il tempo di fine consolidazione t_{100} :

$$t_f = F \cdot t_{100}$$

I valori di F indicati nella tabella per $h/R=2$ ed è in funzione delle condizioni di drenaggio per provino.

Coefficienti per il calcolo di C_v e per la velocità di deformazione

Condizioni di drenaggio	λ		F (per $h/R = 2$)	
	$h/R = 2$	$h/R = r$	prove CD	prove CU
verticale da una base	1	$r^2/4$	8.488	0.509
verticale da entrambe le basi	4	r^2	8.488	0.509
solo radiale	64	64	12.732	1.426
radiale e verticale da una base	80	$3.2(1+2r)^2$	14.226	1.593
radiale e verticale da entrambe le basi	100	$4.0(1+2r)^2$	15.758	1.765

Nella maggioranza dei casi dove il provino è dotato di dreni laterali e la consolidazione avviene solo verso l'alto ($\lambda=80$):

$$C_v = \frac{(6,545 \cdot 10^{-6} \cdot D^2)}{t_{100}}$$

Nota pertanto il tempo necessario per raggiungere la rottura, la velocità di deformazione si ottiene dalla seguente espressione:

$$V = \frac{L_c \cdot \varepsilon_f}{100 \cdot F \cdot t_{100}}$$

Con:

L_c = altezza del provino dopo la consolidazione in mm

ε_f = deformazione assiale prevista a rottura espressa in % (tabellate)

F = fattore adimensionale delle condizioni di drenaggio

Deformazione prevista a rottura

Tipo di terreno	ε_r (%) per prove CD
argilla normalconsolidata	15 - 20
argilla sovraconsolidata	4 - 15
argilla fortemente sovraconsolidata	4 - 6
argilla rimaneggiata	20 - 25
limo sabbioso compattato	10 - 15
sabbia addensata (satura)	5 - 7
sabbia sciolta (satura)	15 - 20

8.8 Velocità di deformazione (Norme DIN)

Facendo infine riferimento alle indicazioni della norma DIN 18137, la massima velocità di deformazione ammessa per un provino standard di 10cm² di sezione sottoposto a prova in condizioni **drenate** può essere desunta dalla tabella riportata sotto

Velocità massima di deformazione per prove CD su provini da 35-38 mm di sezione (DIN 18137)

Tipo di terreno	Indice Plastico %	Velocità mm/min
Sabbia limosa, limo	0 - 10	0.010
Limo argil., arg.limosa	10 - 25	0.005
Argilla	25 - 50	0.002
Argilla	≥ 50	0.001

Viene anche proposta un'espressione analoga a quella precedente

$$V = \frac{L_c \cdot \varepsilon_f}{100 \cdot 15 \cdot t_{100}}$$

La massima velocità di rottura per prove triassiali in condizioni **non drenate** può essere ottenuta moltiplicando per 10 la velocità prevista per le prove drenate (5 volte secondo le raccomandazioni AGI).

8.9 Fase di rottura

La fase di rottura viene generalmente realizzata in condizioni di compressione per carico: la pressione in cella viene mantenuta costante, mentre il provino viene compresso assialmente a velocità di deformazione costante.

Nel caso delle prove CU le valvole di drenaggio vengono mantenute chiuse per tutto il corso della prova, in modo da impedire la variazione di volume e misurare la variazione di pressione interstiziale per il calcolo delle tensioni efficaci.

Per le prove CD viene mantenuta aperta la valvola del drenaggio superiore, per consentire la variazione di volume del provino e permetterne la misura.

Terminata dunque la fase di consolidazione, operare come segue:

- Sistemare la cella triassiale sulla pressa e regolarne la posizione verticale fino a portare il pistone di carico a contatto dell'anello dinamometrico.
Sbloccare il pistone e verificare un piccolo movimento del comparatore dell'anello, causato dalla pressione in cella.
- Operando manualmente portare il pistone a contatto con la testina di carico del provino e azzerare il comparatore dell'anello. Questo procedimento, descritto in precedenza per le prove UU, permette di eliminare allo stesso tempo gli effetti della pressione in cella e dell'attrito del pistone sulla misura del carico.
- Portare a zero il comparatore di deformazione e far partire la pressa alla velocità stabilita.
- Con il procedere della prova, ad intervalli dell'ordine dello 0,2÷0,3% di deformazione assiale, registrare le seguenti misure:
 - deformazione assiale
 - compressione dell'anello dinamometrico
 - pressione interstiziale (per le prove CU)
 - variazione di volume (per le prove CD).
- Calcolare i valori di tensione deviatorica (prove CU e CD) e del rapporto tra le tensioni principali efficaci (prove CU).
- Continuare la prova fino a quando una delle seguenti situazioni sia stata chiaramente definita:
 - si osserva un valore di picco sul diagramma sforzi-deformazioni
 - si osserva un valore di picco sul diagramma del rapporto delle tensioni efficaci (prove CU)
 - la pressione interstiziale rimane costante
 - la deformazione è al di sopra del 20%.
- Al termine della prova, fermare la pressa, chiudere la valvola della pressione in cella e della pressione interstiziale collegata al trasduttore; abbassare il piatto della pressa per eliminare il carico assiale.
- Portare a zero la pressione in cella e svuotare quest'ultima.
- Aprire la cella e con una certa cautela togliere la testina di drenaggio, la membrana, le pietre porose e le strisce di drenaggio laterale.

- Fare uno schizzo del provino per evidenziare la pendenza o la forma del piano di rottura.
- Pesare il provino per la determinazione della densità finale, farlo essiccare per 12 ore alla temperatura costante di 110 °C per la determinazione del contenuto d'acqua.

8.10 Procedura di calcolo

Dai dati registrati si richiedono i seguenti calcoli:

Deformazione assiale

$$\varepsilon = \frac{NY}{L_c} \cdot 100$$

Sezione media (prove CU)

$$A_m = \frac{A_c}{1 - \varepsilon/100}$$

Sezione media (prove CD)

$$A_m = \frac{(V_c - \delta V) \cdot 10}{L_c - \varepsilon/100}$$

Tensione deviatorica

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{k \cdot NL}{A_m} \cdot 10 - C_M$$

Dove:

NY = lettura al comparatore di deformazione (mm)

NL = lettura al comparatore dell'anello (μm)

K= costante di taratura dell'anello dinamometrico ($\text{N}/\mu\text{m}$)

A_c = sezione del provino al termine della consolidazione (cm^2)

L_c = altezza del provino al termine della consolidazione (mm)

V_c = volume del provino al termine della consolidazione (cm^3)

δV = variazione del volume misurata dalla prova CD (cm^3)

C_M = correzione che tiene conto della rigidità della membrana espressa in kPa

Variazione della pressione interstiziale (prove CU)

$$\delta U = U - U_0$$

Tensioni principali efficaci (prove CU)

$$\begin{aligned}\sigma'_1 &= (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma'_3 \\ \sigma'_3 &= \sigma_3 - \delta U\end{aligned}$$

Parametri dello stress path in termini di tensioni efficaci

$$\begin{aligned}s' &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 + \sigma'_3) \\ t' &= \frac{1}{2} \cdot (\sigma'_1 - \sigma'_3)\end{aligned}$$

Parametro di Skempton (prove CU)

$$A = \frac{\delta U}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

Dove:

U = lettura della pressione interstiziale (kPa)

U_0 = lettura iniziale della pressione interstiziale (kPa), corrispondente alla back pressure applicata durante la fase di consolidazione.

8.11 Presentazione dei risultati

I dati calcolati come indicato vengono plottati nel modo seguente:

- Curva degli sforzi- deformazioni con la deformazione assiale in ascissa e lo sforzo deviatorico in ordinata.
- Curva della pressione interstiziale in funzione della deformazione assiale (per le prove CU)
- Curva della percentuale di variazione di volume in funzione della deformazione assiale (per le prove CD)
- Rapporto delle tensioni efficaci in funzioni della deformazione assiale (per le prove CU)
- Andamento dello stress path in termini di tensioni efficaci con s' in ascissa e t' in ordinata.

Dallo stesso campione di terreno, purché le caratteristiche fisiche (contenuto acqua consistenza e plasticità) siano uguali, vengono ottenuti almeno altri due provini da sottoporre a saturazione, consolidazione e a rottura sotto diversi livelli di tensioni efficaci.

Per questo motivo, allo scopo di ridurre i tempi di prova, si adottano generalmente tre celle triassiali, complete di sistemi di misura di pressione, cosicché sia la saturazione che la consolidazione possono essere effettuate contemporaneamente sui tre provini.

Dai risultati finali vengono plottati tre diagrammi di stress path sul piano s' - t' per definire i parametri di resistenza al taglio c' e φ' in termini di tensioni efficaci.

Quando richiesto, si tracciano i cerchi di Mohr in termini di tensioni efficaci, per valutare allo stesso modo i parametri di resistenza al taglio.

Altre notizie relative a ciascun provino sono le seguenti:

- Altezza e diametro prima e dopo la consolidazione
- Peso di volume iniziale e finale
- Contenuto d'acqua iniziale e finale
- Velocità di prova
- Resistenza al taglio massima e deformazione corrispondente
- Parametro A di Skempton a rottura (per le prove CU)
- Parametro B di Skempton raggiunto a fine saturazione
- Peso specifico dei grani
- Indice dei vuoti e grado di saturazione iniziali e finali

8.12 Misura diretta della permeabilità

La misura della permeabilità nel corso delle prove triassiali offre i seguenti vantaggi:

- saturazione del provino mediante back pressure
- controllo delle condizioni al contorno (riproduzione di qualsiasi stato tensionale isotropo o anisotropo)
- effettuazione della prova su qualsiasi tipo di terreno (dalle argille alle ghiaie), in qualsiasi condizione (indisturbato, compattato, ricostruito)
- possibilità di variare in maniera pressoché infinitesima il gradiente idraulico applicato
- controllo delle condizioni di flusso (non c'è il rischio che si creino zone preferenziali di flusso lungo le pareti del provino)
- maggior controllo delle condizioni di prova e maggior precisione di misura.

Il metodo più largamente adottato consiste nell'utilizzare due linee di back pressure (assicurando così la saturazione del provino), per creare un gradiente idraulico ascendente o discendente a carico costante. La misura del flusso idraulico può essere realizzata con una o due burette di variazione di volume.

Nel primo caso conviene inserire la buretta a monte del flusso in modo che l'utilizzo di acqua disaerata permetta misure sicuramente non influenzate dall'insorgere di bolle d'aria (che potrebbero venire espulse dal provino e presentarsi quindi a valle).

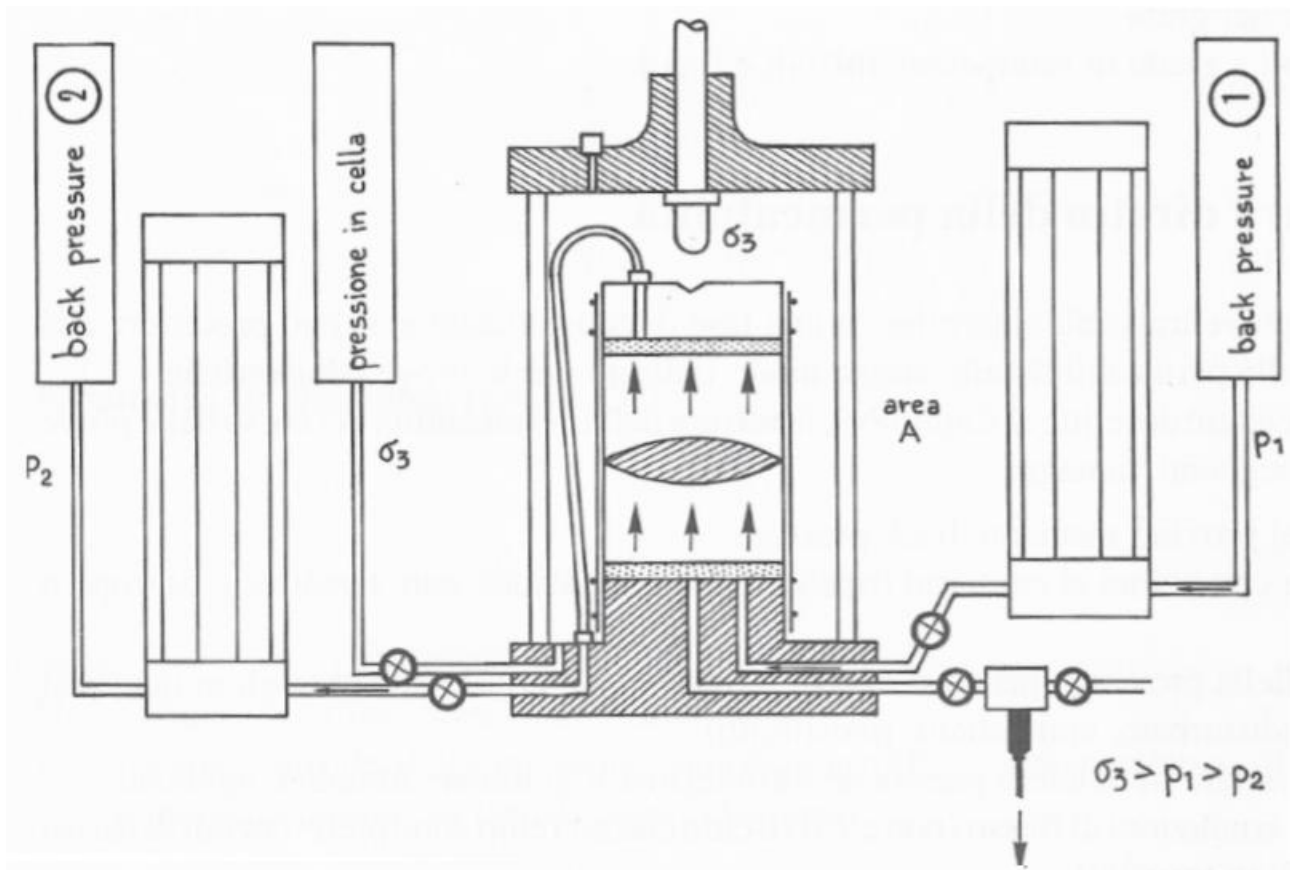
Nel secondo caso è possibile verificare le condizioni di flusso sia stazionario dall'uguaglianza delle letture del volume d'acqua in entrata e in uscita.

La preparazione del provino viene effettuata allo stesso modo descritto per la prova triassiale.

Conviene sottolineare che la mancanza delle strisce laterali di carta da filtro (che comporterebbero una errata valutazione della permeabilità) determina un incremento dei tempi di saturazione e di consolidazione del provino. A differenza pertanto delle procedure precedentemente illustrate, si consiglia di utilizzare entrambe le linee: di drenaggio (superiore e inferiore), applicando contemporanei gradienti di back pressure. Per evitare l'insorgere di gradienti idraulici non controllati all'interno del provino, le fasi di saturazione e di consolidazione dovrebbero essere realizzate con una sola fonte di back pressure fatta pervenire ad entrambe le linee di drenaggio attraverso un raccordo a T dotato di valvole.

Verificate pertanto il grado di saturazione del provino (con un valore di $B > 0.97$), si applicano le pressioni di consolidazione alle quali si intende determinare la permeabilità e si effettuano le misure della variazione di volume in funzione del tempo (date dalla somma delle letture effettuate alle due burette per la configurazione).

Per verificare l'avvenuta consolidazione si consiglia di chiudere entrambe le valvole di drenaggio superiore e inferiore e di controllare la misura della pressione interstiziale: un aumento di questa indica che la consolidazione non si è ancora esaurita.



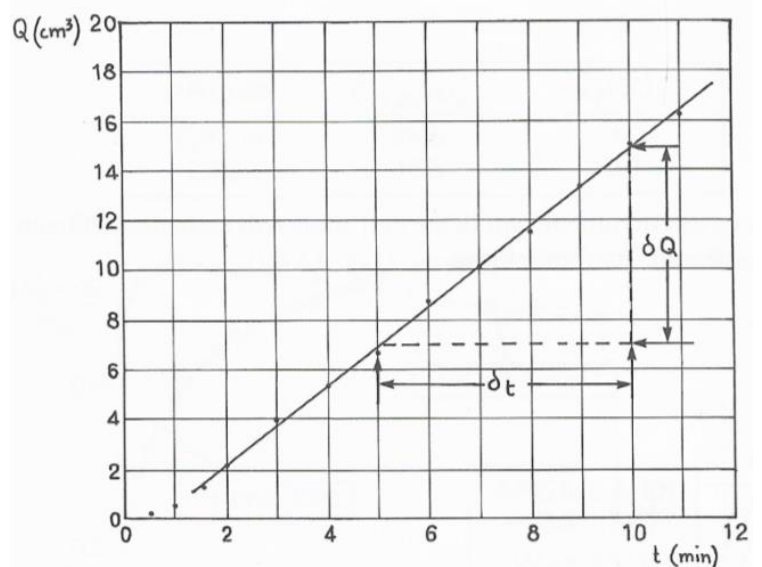
Successivamente si regolano i valori della back pressure, in modo da impostare in gradiente idraulico desiderato (la back pressure più bassa dovrà essere pari al valore adottato in fase di consolidazione) e si esclude la valvola del raccordo a T, in modo da creare il flusso (ascendente o discendente) all'interno del provino.

Ad istanti si prende note delle variazioni di volume all'ingresso e all'uscita del provino. Quando il flusso risulta costante, si fa partire il contasecondi. Si consiglia di iniziare le misure in modo da non dover

intervenire nel corso della prova invertendo il flusso all'interno delle burette di misura. Tale operazione potrebbe infatti modificare la distribuzione delle pressioni all'interno del provino, instaurando condizioni di flusso non stazionario.

Ad intervalli regolari (in funzione della velocità del flusso) si prende nota della variazione del volume in entrata e in uscita del provino.

Diagrammando la variazione di volume in funzione del tempo è possibile verificare un andamento rettilineo e calcolare la portate del flusso.



Calcolare il gradiente idraulico dalla seguente espressione:

$$i = \frac{\delta P}{9,81 \cdot 10^{-3} \cdot L}$$

e il coefficiente di permeabilità:

$$k = \frac{q}{6 \cdot 10^3 \cdot A \cdot i}$$

Essendo:

δP = differenza di pressione tra le due linee di back pressure (kPa)

L= altezza del provino (mm)

A= sezione del provino

q= velocità del flusso (cm³/min)

Riferire il valore della permeabilità ottenuto alla tensione efficace media di consolidazione

$$\sigma'_c = \sigma_3 - \frac{P_1 + P_2}{2}$$
$$\sigma'_c = \sigma_3 - \frac{P_2 + 2P_1}{3}$$

Con:

σ_3 =pressione in cella

P1= back pressure maggiore

P2= back pressure minore

La differenza delle due è che si riferiscono rispettivamente all'andamento lineare o parabolico della pressione idraulica all'interno del provino.

9. Consolidazione anisotropa

9.1 Premessa

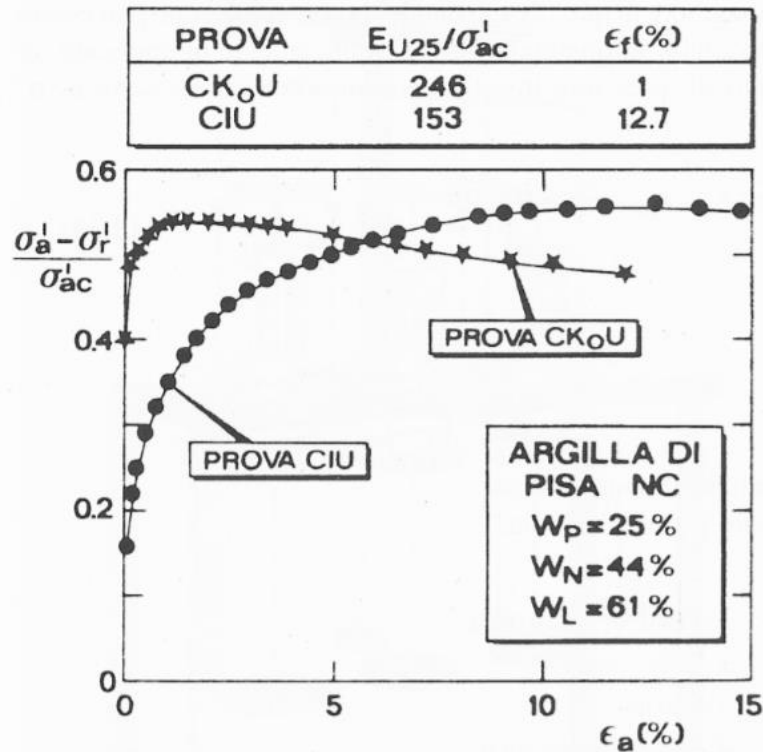
I risultati delle prove triassiali sono fortemente influenzati della modalità esecutive, in particolare dalle fasi che precedono la rottura.

Un fattore molto importante è rappresentato dallo stato tensionale applicato in fase di consolidazione. In effetti lo stato tensionale esistente in sito è generalmente anisotropo e governato dal coefficiente K_0 (coefficiente di spinta a riposo).

Le differenze riscontrate tra i risultati di prove in cui la consolidazione viene condotta isotropicamente rispetto a quelle in cui si rispettano le condizioni K_0 possono essere così riassunte:

- Andamento delle curve sforzi-deformazioni

La curva ottenuta dalla consolidazione isotropa si presenta generalmente parabolica (in particolare nel caso dei terreni normalmente consolidati), con deformazione a rottura dell'ordine del 5-10%, mentre nel caso di consolidazione K_0 essa presenta un punto di rottura più evidente (per valori di deformazione intorno allo 0,1-1%) e un andamento rammolente, tanto più elevato è il grado di sovra consolidazione.



- Moduli di deformazione
Sempre dall'andamento delle curve sforzi-deformazione si può osservare che il modulo di deformazione secante E_u risulta più elevato nel caso di prove consolidate K_0
 - Resistenza al taglio C_u
Come già accennato, i valori di resistenza al taglio non drenata C_u dovrebbero essere ottenuti rispettando le condizioni in sito: stesso stato anisotropo, stesso indice dei vuoti e contenuto d'acqua.
Lo stato tensionale geostatico può essere riprodotto conducendo una fase di consolidazione in condizioni K ed effettuando successivamente la fase di rottura in condizioni non drenata.
 - Parametro A di Skempton
Come accennato nell'introduzione il parametro A di Skempton dipende in larga misura dalla storia dello stato tensionale del provino:
 - o Grado di pre-consolidazione
 - o Tensioni geostatiche attuali
- Ne segue che, se la fase di rottura è successiva ad una consolidazione anisotropa di tipo K_0 , l'andamento delle pressioni interstiziali si avvicina maggiormente alla situazione reale.

9.2 Attrezzatura per la consolidazione con $K_o < 1$

Poiché la tensione verticale risulta maggiore di quella orizzontale, la consolidazione può essere eseguita con celle triassiali tradizionali, in quanto si tratta semplicemente di applicare un carico assiale al pistone che, aggiunto alla pressione di cella, determina la tensione verticale σ_v :

$$\sigma_v = \frac{\sigma_c(A_c - A_p) + P_p + P_T - P_A}{A_c}$$

Essendo:

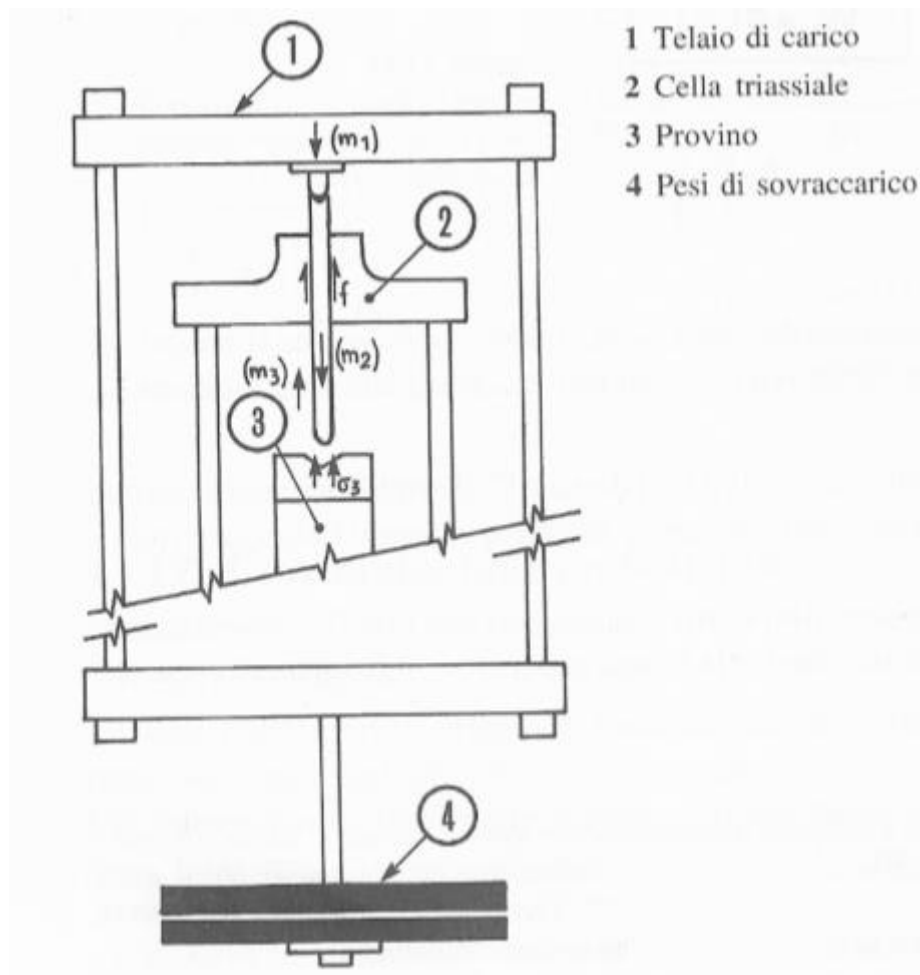
A_c = sezione del provino

A_p = sezione del pistone

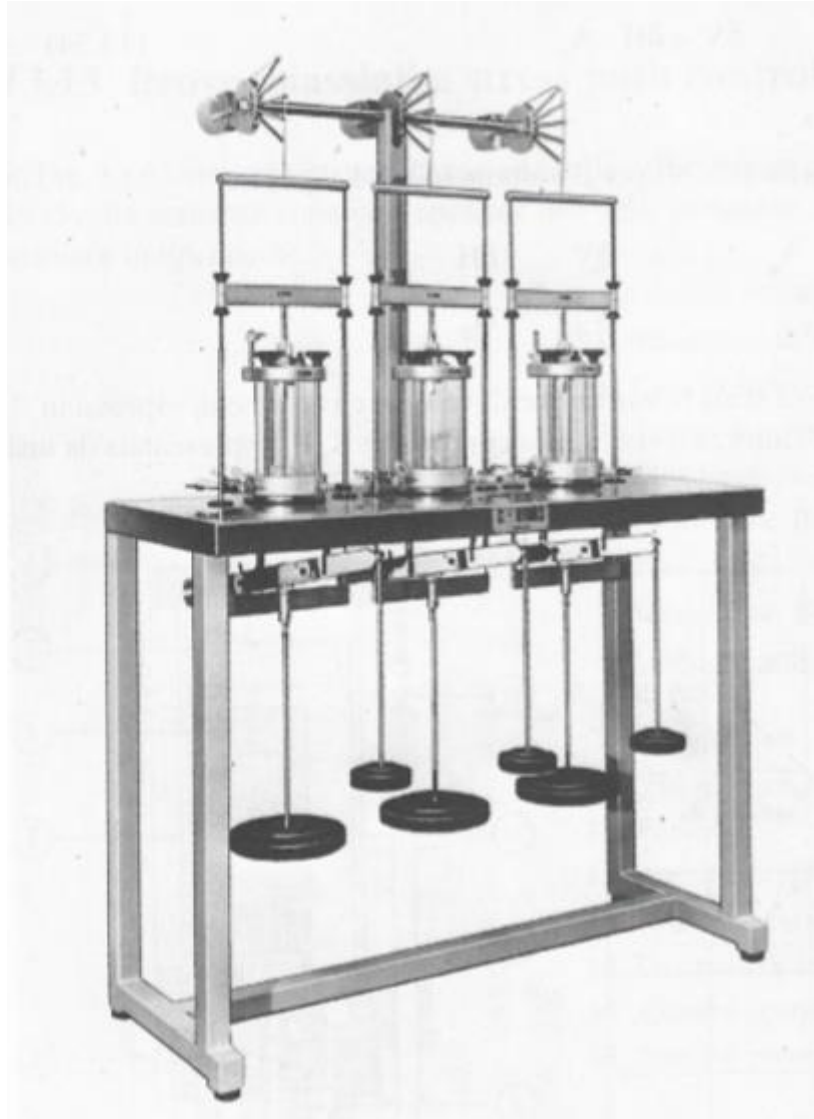
P_p = peso proprio del pistone

P_T = peso applicato al pistone mediante apposito telaio

P_A = attrito dato dall'accoppiamento pistone-boccola.



L'attrezzatura è composta da un apposito banco di consolidazione (generalmente per 3 celle triassiali) dove un telaio contrappesato, completo di sistema di leve, permette l'applicazione del carico assiale sul pistone mediante una serie di pesi. La cella triassiale viene sistemata mantenendo gli stessi collegamenti descritti per la consolidazione isotropa; al pistone viene altresì collegato il comparatore per la misura dei cedimenti del provino in fase di consolidazione.



9.3 Attrezzatura per la consolidazione con $K_o > 1$

In questo caso il carico assiale risulta minore di quello radiale; sulla tesina superiore deve pertanto agire una pressione inferiore a quella della cella.

Questo si può ottenere:

- Realizzando un pistone di diametro pari a quello del provino, in modo che la pressione in cella agisca sollo sulla parete laterale del provino
- Collegando il pistone tradizionale alla testina di drenaggio e applicando una trazione tale da scaricare parzialmente la testina e ridurre il carico assiale. Questo sistema viene realizzato agevolmente mediante una cella triassiale appositamente progettata nota con il nome di cella di Bishop.

La consolidazione in condizioni K_o consiste nel mantenere costante la sezione del provino. In assenza di un trasduttore che permetta il controllo diretto delle variazioni di diametro, la condizione K_o si esprime attraverso una relazione che lega la variazione di volume al cedimento.

Indicando con A_o e H_o rispettivamente la sezione e l'altezza iniziale del provino, all'interno di ogni gradino di consolidazione la variazione di volume dovrà risultare pari a:

$$\delta V = \delta H \cdot A_0$$

Essendo δH il cedimento misurato.

Dividendo entrambe le quantità per il volume iniziale V_0 , si ha:

$$\frac{\delta V}{V_0} = \frac{\delta H \cdot A_0}{V_0} \quad \text{e quindi} \quad \frac{\delta V}{V_0} = \frac{\delta H}{H_0}$$

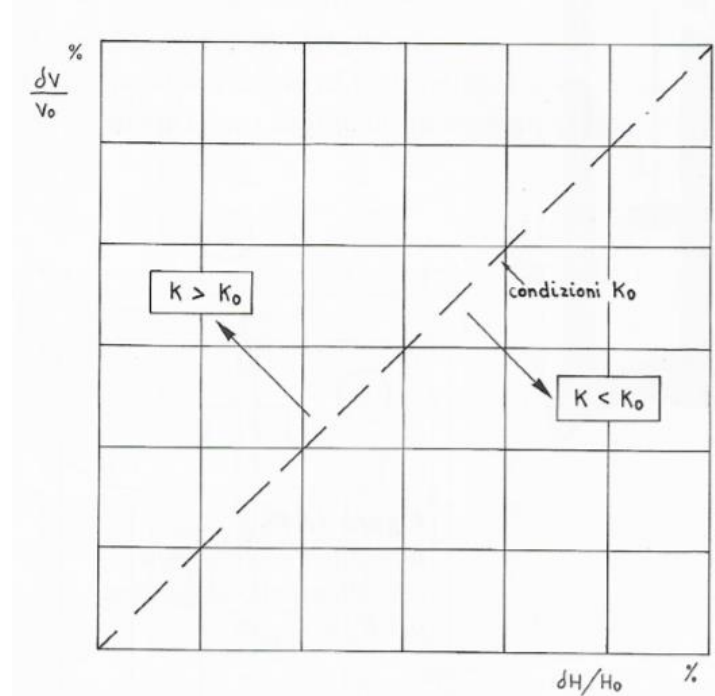
mettendo in digramma con la stessa scala la variazione di volume e i cedimenti espressi in % riferita ai rispettivi valori iniziali di altezza e volume, la condizione K_0 è rappresentata da una retta a 45°.

In fase di consolidazione si effettuano pertanto le misure dei cedimenti e delle variazioni di volume del provino in funzione del tempo e si controlla che i punti corrispondenti alla situazione finale di ciascun gradino giacciono sulla retta tracciata. In caso contrario si apportano le necessarie correzioni alla pressione verticale σ_v :

- Se $\delta H / H_0 > \delta V / V_0$ occorre ridurre $\delta \sigma_v$ per il gradino successivo
- Se $\delta H / H_0 < \delta V / V_0$ occorre aumentare $\delta \sigma_v$

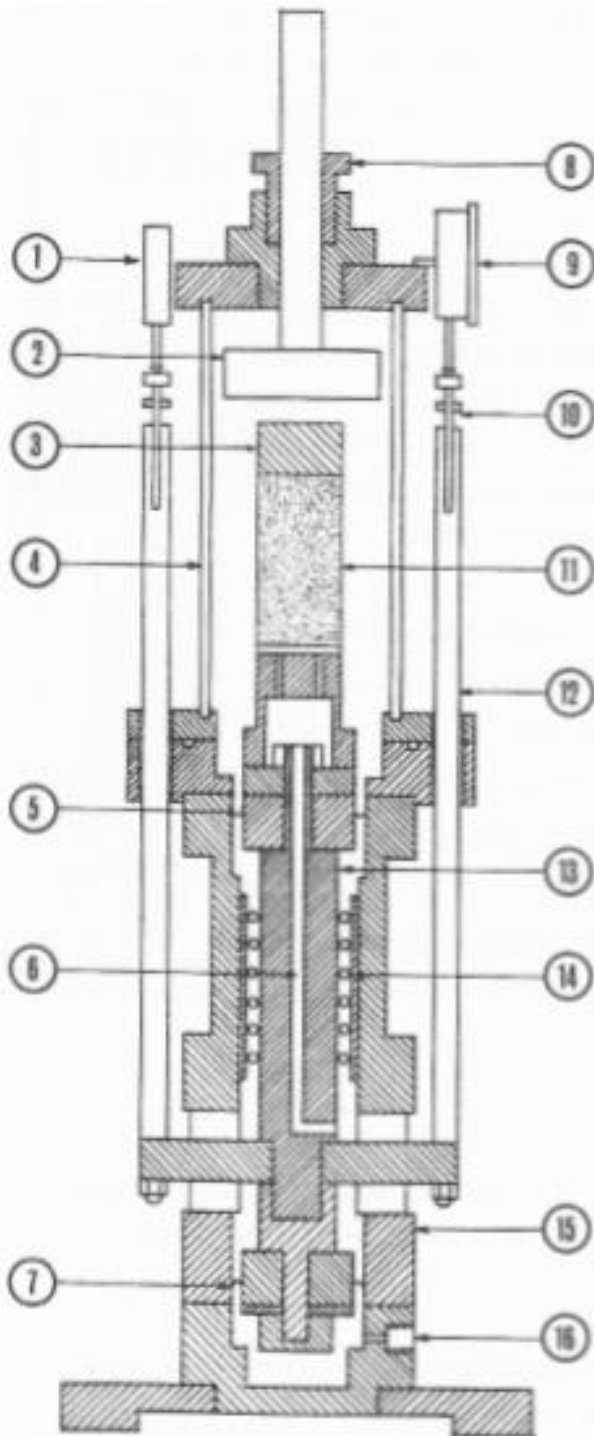
In effetti si potrebbero apportare le correzioni anche alla pressione di cella, ma operativamente conviene ridurre la consolidazione a piccoli gradini, ciascuno realizzato a $\delta \sigma_3$ costante.

Da notare che il valore di K_0 varia nel corso della prova in funzione della pressione applicata.



10 Prove triassiali a stress path controllato

Questo tipo di prove usano un altro tipo di cella triassiale che permette appunto l'applicazione della pressione orizzontale e di quella verticale in maniera indipendente.



- 1 Trasduttore di spostamento
- 2 Cella di carico
- 3 Testina superiore
- 4 Cilindro di plexiglas
- 5 Guarnizione Bellofram
- 6 Foro coassiale per i circuiti di drenaggio
- 7 Guarnizione Bellofram
- 8 Ghiera di serraggio e posizionamento della cella di carico
- 9 Comparatore
- 10 Vite di regolazione
- 11 Provino
- 12 Asta rigida per misure di deformazione provino
- 13 Pistone di carico
- 14 Cuscinetto lineare
- 15 Cilindro spaziatore
- 16 Ingresso pressione al pistone di carico

La parte superiore dell'attrezzatura ripercorre sostanzialmente il disegno delle celle triassiali tradizionali. All'interno della flangia superiore è inserito un albero verticale, mantenuto in posizione da una ghiera filettata che ne permette altresì l'avanzamento. Esso risulta solidale inferiormente con un trasduttore estensimetrico a tenuta stagna, che permette la misura del carico verticale effettivamente sopportato dal provino (prescindendo da eventuali attriti).

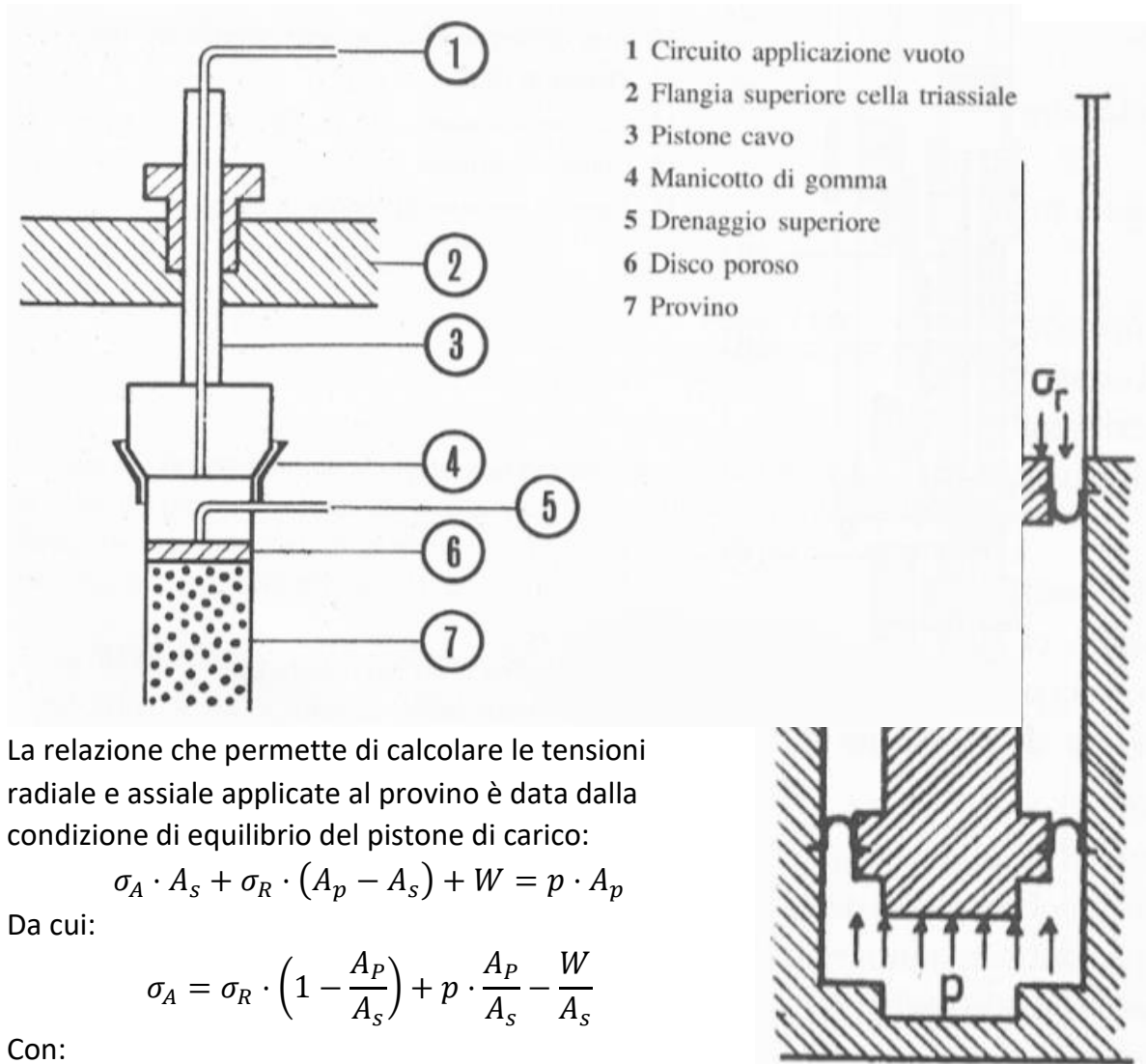
La parte inferiore della cella è costituita da un pistone di carico (13) che scorre su cuscinetti lineari e trasmette alla base del provino la pressione verticale, realizzata all'interno di una camera di pressione sistemata immediatamente al di sopra della flangia di base dello strumento. A tale pistone è rigidamente collegata una traversa orizzontale che sostiene due aste verticali (12), che a contatto con lo stelo di un comparatore o di un trasduttore di spostamento, permettono di rilevare la deformazione assiale del provino.

Apposite membrane rinforzate in tela gommata (Bellofram) permettono di separare la pressione in cella e la pressione della camera inferiore dall'ambiente esterno.

In questo modo è possibile applicare due pressioni indipendenti per realizzare rispettivamente la pressione orizzontale e la pressione verticale agenti sul provino. La parte superiore della cella è altresì dotata di connessioni e circuiti sia alla testa che alla base del provino per la realizzazione del drenaggio, l'applicazione della back pressure e la misura della pressione interstiziale.

Poiché la deformazione del provino viene ottenuta facendo variare le pressioni applicate, l'attrezzatura non richiede l'uso di una pressa meccanica per la realizzazione della fase di rottura.

Al fine di permettere l'esecuzione di prove in estensione e consolidazioni con $K_0 > 1$ occorre realizzare un collegamento fisso tra testina superiore di drenaggio e cella di carico in grado di assorbire forze di trazione e scaricare così parzialmente la pressione agente sulla testa del provino. Un sistema di collegamento realizzato da Menzies (1988) e costituito da una testina, solidale alla cella di carico, che viene collegata alla testina superiore di drenaggio mediante una fascia conica in gomma. La successiva applicazione di un leggero vuoto all'interno dell'accoppiamento permette di realizzare un collegamento rigido.



La relazione che permette di calcolare le tensioni radiale e assiale applicate al provino è data dalla condizione di equilibrio del pistone di carico:

$$\sigma_A \cdot A_S + \sigma_R \cdot (A_p - A_S) + W = p \cdot A_p$$

Da cui:

$$\sigma_A = \sigma_R \cdot \left(1 - \frac{A_p}{A_S}\right) + p \cdot \frac{A_p}{A_S} - \frac{W}{A_S}$$

Con:

σ_A σ_R = tensioni assiale e radiale al provino

A_S = sezione del provino

A_p = sezione del pistone di carico

p = pressione applicata al pistone

W = peso complessivo del pistone e del provino

Questa espressione è di validità generale ed è quindi applicabile a qualsiasi fase della prova triassiale.

All'inizio di una prova la situazione di equilibrio viene solitamente realizzata in condizioni isotrope, applicando al pistone una pressione p tale da bilanciare la pressione in cella, il peso del pistone e quello del provino.

Successivamente si applicano incrementi σ_R e δp tali da realizzare le condizioni di prova desiderate.

Consolidazione Ko

Lo stress path generalmente adottato prevede di variare σ'_A mantenendo costante σ'_R fino a raggiungere il valore stimato di Ko. Successivamente la consolidazione viene proseguita applicando ulteriori gradini $\delta\sigma_R$ e facendo variare δp in modo da rispettare le condizioni Ko.

Il controllo dell'invarianza della sezione viene effettuato allo stesso modo descritto nel Paragrafo 9.

Le relazioni che governano le due fasi della consolidazione sono definite nella tabella di sotto:

$\delta\sigma_R = 0$	$\delta p = \frac{A_S}{A_P} \cdot \delta\sigma_A$
$\delta\sigma_R \neq 0$	$\delta p = \delta\sigma_R \cdot \left[1 + \frac{A_S}{A_P} \cdot \left(\frac{1}{K_0} - 1 \right) \right]$

Tenendo conto che il coefficiente Ko controlla il rapporto tra le tensioni efficaci, è necessario far variare lentamente le pressioni totali applicate al provino per evitare l'insorgere di significative variazioni di pressione interstiziale.

Fase di rottura

Viene realizzata applicando piccoli gradini di carico $\delta\sigma_R$ oppure δp , secondo lo stress path che si intende seguire per la rottura del provino.

Per la determinazione della pressione da applicare al pistone nel corso della prova si può fare riferimento alle indicazioni successive (tabelle successive)

Stato tensionale applicato		Tipo di stress path
$\delta\sigma_R = 0$	$\delta\sigma_A > 0$	compressione - carico
$\delta\sigma_R = 0$	$\delta\sigma_A < 0$	estensione - scarico
		$\delta p = \frac{A_S}{A_P} \cdot \delta\sigma_A$

Stato tensionale applicato		Tipo di stress path
$\delta\sigma_A = 0$	$\delta\sigma_R > 0$	estensione - carico
$\delta\sigma_A = 0$	$\delta\sigma_R < 0$	compressione - scarico
$\delta p = \left(1 - \frac{A_S}{A_P} \right) \cdot \delta\sigma_R$		

La prova viene condotta a carico controllato, applicando piccoli gradini di carico $\delta\sigma_R$ oppure δp e attendendo successivamente lo stabilizzarsi della deformazione assiale. In generale si consiglia di applicare gradini più piccoli nelle prove consolidate drenate in quanto i risultati sperimentali dimostrano che gradini di pari entità determinano nelle prove CD un livello di deformazione maggiore rispetto alle prove CU.

Nell'ultima tabella si può osservare che, per mantenere costante la pressione assiale sul provino occorre variare la pressione sul pistone di una quantità pressoché costante, che dipende dal rapporto tra le sezioni del provino e del pistone. In realtà, poiché nel corso della prova il provino subisce variazioni di sezione, occorre calcolare volta per volta il gradino di pressione da applicare.

Dalla breve descrizione delle fasi operative si può osservare che l'utilizzo della cella triassiale di Bishop richiede una notevole manualità nella regolazione delle pressioni e nel controllo delle varie fasi delle prove. Allo stato attuale sono disponibili adeguati sistemi a controllo numerico che, noto l'insieme di condizioni al contorno della prova che si intendono realizzare permettono di variare automaticamente le pressioni in gioco in modo da:

- Mantenere costante un determinato rapporto tra σ_R e σ_A .
- Effettuare una consolidazione in condizioni K_0 attraverso il controllo dell'invarianza della sezione del provino
- Mantenere costante la velocità di carico o di deformazione nel corso della fase di rottura
- Realizzare un particolare stress path.

Bibliografia:

Manuale di ingegneria geotecnica vol. 1– Diego Carlo Lo Presti; University Press ISBN: 9788867411221

Manuale di ingegneria geotecnica vol. 2– Diego Carlo Lo Presti; University Press ISBN: 9788867415090

Geotecnica - Renato Lancellotta; Zanichelli ISBN:9788808059918

Appunti didattici a cura di Johann Facciorusso

http://people.dicea.unifi.it/johannf/index.php?page=support_geot