

Un'analisi delle prove di permeabilità a carico idraulico variabile

L. CASCINI *

SOMMARIO: Il processo di filtrazione in moto vario, che si realizza durante una prova di permeabilità a carico variabile, viene generalmente analizzato sulla base della classica teoria dei moti di filtrazione nell'ipotesi di mezzo poroso indeformabile. Tuttavia, poiché alla variazione delle caratteristiche del moto corrisponde una variazione delle pressioni effettive, il provino nel corso della prova subisce una variazione di porosità; per un'analisi più aderente alla realtà fisica è necessario pertanto adottare la teoria della consolidazione.

Nella presente nota questa è stata adoperata nella sua formulazione più elementare, dovuta a Terzaghi, e distinguendo tra le prove precedute da una fase di messa a regime (*delayed fall*) e quelle condotte con un improvviso impulso di sovrapposizione (*immediate fall*).

L'analisi teorica ha consentito di precisare il significato della formula convenzionale comunemente adottata per interpretare la prova, e di evidenziarne i limiti di validità; ha inoltre chiaramente indicato i vantaggi della tecnica « *delayed fall* ».

1. Introduzione

Lo studio dei moti di filtrazione gioca un ruolo di grande importanza in numerosi problemi di ingegneria civile.

Dal punto di vista delle applicazioni, una delle fasi più importanti e delicate di tale studio è la determinazione del coefficiente di permeabilità k , definito dalla ben nota relazione:

$$\vec{V} = k \text{ grad } (-h) \quad (1)$$

in cui \vec{V} rappresenta il vettore velocità di filtrazione, ed h la quota piezometrica rispetto ad un riferimento con asse verticale orientato verso l'alto.

I problemi connessi con la determinazione sperimentale di k sono molteplici [v., ad esempio, PELLEGRINO, 1973], e derivano essenzialmente dalla marcata eterogeneità ed anisotropia che, di norma, i depositi naturali presentano nei riguardi della permeabilità. Per questo motivo, molto spesso tale determinazione è perseguita a mezzo di indagini in sito in grande scala. Non mancano tuttavia esempi in cui la classica metodologia, basata su prove di laboratorio, ha trovato utile impiego; e ciò essenzialmente per i terreni a grana fina, per i quali è possibile il prelievo di campioni intatti.

Lo schema di una prova di permeabilità a carico costante è rappresentato in fig. 1a. Un campione del materiale da esaminare, di spessore l ed area A , è sottoposto ad una differenza di quota piezometrica H costante; ne deriva un moto di filtrazione stazionario, senza variazioni nel tempo della pressione totale, neutra ed ef-

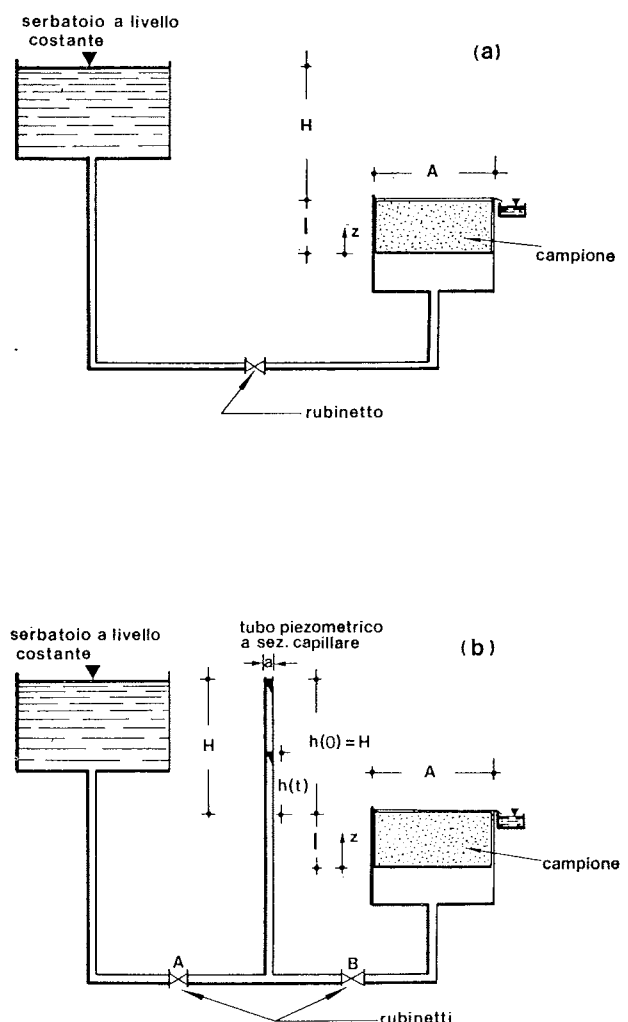


Fig. 1. - Schema di una prova di permeabilità: a) A carico costante; b) A carico variabile.

* dr. ing. LEONARDO CASCINI, assistente ordinario ed incaricato di *Geotecnica* presso il Dipartimento di Difesa del Suolo dell'Università della Calabria, Cosenza.

fettiva. In tali condizioni non si verificano deformazioni dello scheletro solido, e quindi il mezzo poroso si comporta come se fosse indeformabile.

Il moto è governato dalla ben nota equazione di Laplace:

$$\Delta_2 h = 0 \quad (2)$$

Nel caso in esame, di moto unidirezionale, la (2) si riduce a:

$$\frac{d^2 h}{dz^2} = 0$$

dalla quale si deduce che la quota piezometrica varia lungo il campione con legge lineare fra i valori noti alle due estremità.

La cadente piezometrica è allora costante e pari a H/l .

Applicando la (1) ed elaborando si ottiene:

$$k = \frac{l Q}{H A} \quad (3)$$

La misura di $Q = V A$, consente quindi la determinazione di k .

Il semplice schema di fig. 1a ha però delle notevoli limitazioni di carattere pratico. Per valori di $k \leq 10^{-4}$ cm/s, infatti, la portata filtrante è tanto piccola che la sua determinazione precisa richiede una tecnica sperimentale assai complessa. Quando poi il coefficiente di permeabilità scende a valori $\leq 10^{-6}$ cm/sec., la misura diviene praticamente impossibile. Tali valori sono tutt'altro che eccezionali; sono, anzi, proprio i valori caratteristici dei terreni a grana fina (sabbie fine più o meno limose, limi, argille) per i quali lo studio della permeabilità in laboratorio su campioni intatti è possibile.

Per tali motivi, le prove di permeabilità a carico costante sono sostituite, d'ordinanza, da prove « a carico variabile », condotte con una diversa tecnica.

2. Prova a carico variabile

Lo schema classico di una prova di permeabilità a carico variabile (fig. 1b) si realizza inserendo fra il serbatoio e la cella contenente il campione un tubo piezometrico a sezione capillare.

La prova può essere condotta secondo due diverse modalità, denominate rispettivamente « *Immediate Fall* » e « *Delayed Fall* ».

Nella prova svolta con la tecnica « *Immediate Fall* », inizialmente il rubinetto B è chiuso e quello A aperto; all'interno del provino si ha

una distribuzione idrostatica di pressione neutra e i livelli dell'acqua nel capillare e nel serbatoio raggiungono la stessa quota. La prova s'inizia chiudendo il rubinetto A e aprendo quello B.

Se si adotta, invece, la tecnica « *Delayed Fall* », i rubinetti A e B si mantengono aperti finché nel provino non si stabilisca un moto di filtrazione stazionario; la prova si inizia chiudendo il rubinetto A.

In entrambi i casi, essendo il serbatoio disinserito, il moto di filtrazione che si verifica durante la prova provoca un abbassamento del livello dell'acqua nel capillare ed il campione è in tal modo sottoposto ad una differenza di quota piezometrica variabile nel tempo. Come si vedrà, l'osservazione della legge con cui l'altezza d'acqua h nel capillare varia nel tempo consente la determinazione del coefficiente di permeabilità.

Il provino è in genere montato in un edometro, onde determinare k in corrispondenza di diversi valori della pressione di consolidazione e ricavare così la legge $k = k(e)$, ove con e si indica l'indice di porosità.

L'analisi convenzionale della prova, indipendente tra l'altro dalle modalità descritte [HVORSLEV, 1951], è basata sull'ipotesi che il mezzo poroso sia rigido; in altre parole che il moto di filtrazione avvenga con $\text{div } \vec{V} = 0$.

Con riferimento sempre alla fig. 1b, e poiché istante per istante continua ad essere valida la (1), la velocità di filtrazione al generico tempo t vale:

$$V(t) = k j(t) = k \frac{h(t)}{l} \quad (4)$$

Per la continuità la quantità d'acqua $Q dt$, che attraversa il provino in un generico intervallo di tempo dt , eguaglia il volume d'acqua che fuoriesce dal tubo capillare. Detta a la sezione del capillare, si ha dunque:

$$V A dt = A k \frac{h}{l} dt = - a dh \quad (5)$$

Separando le variabili, integrando fra due tempi successivi (t_1, t_2) ed elaborando si ottiene:

$$k = \frac{l a}{A} \frac{\ln(h_1/h_2)}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

Con la tecnica descritta è agevole eseguire prove su materiali aventi coefficienti di permeabilità $k \leq 10^{-6}$ cm/sec.

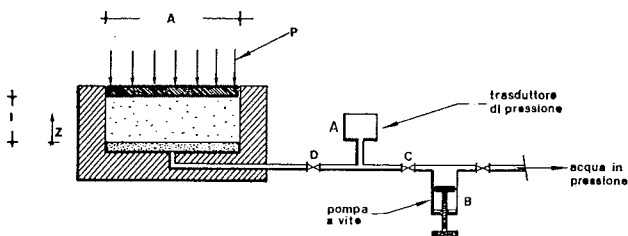


Fig. 2. - Schema di una prova di permeabilità con trasduttore di pressione in luogo del tubo piezometrico.

Per poter estendere ulteriormente il campo di applicabilità a materiali con permeabilità ancora più ridotta è stato proposto [REMY, 1973] di sostituire al capillare di fig. 1b un trasduttore di pressione, secondo lo schema di fig. 2. Il provino viene montato in un edometro speciale, che consenta il collegamento, attraverso la base ed un circuito saturato con acqua deaerata, ad un trasduttore di pressione. Con la pompa B e con i rubinetti C aperto e D chiuso si induce un incremento di pressione nel circuito con conseguente deformazione del trasduttore di pressione A, che immagazzina energia elastica analogamente a quanto accadeva nel tubo piezometrico che immagazzinava energia di posizione.

Con l'ausilio di un sistema in grado di fornire una pressione costante ed operando sui rubinetti C e D in modo analogo a quanto descritto in precedenza, si possono realizzare prove tipo « Immediate » e « Delayed ».

Se, come può ritenersi, la relazione fra incremento di pressione Δp e deformazione volumetrica ΔV del trasduttore è lineare

$$\Delta V = \lambda \Delta p \quad (7)$$

con λ [cm^5/kg] deformabilità volumetrica del trasduttore, si può agevolmente mostrare che quest'ultimo equivale ad un capillare di sezione

$$a = \lambda \gamma_w \quad (8)$$

Poiché λ assume valori dell'ordine di $10^{-3} \div 10^{-6} \text{ cm}^5/\text{kg}$ [VIGGIANI, 1965], l'ideale capillare equivalente al trasduttore avrebbe sezione:

$$a = 10^{-6} \div 10^{-9} \text{ cm}^2$$

Sembrerebbe dunque che con la tecnica di prova a carico variabile, integrata se necessario dall'uso di un trasduttore di pressione in luogo del capillare, ogni problema sperimentale sia risolto.

Nel seguito si mostrerà però che tale conclusione deve essere accolta solo con estrema cautela.

3. Approssimazione dell'analisi convenzionale

L'ipotesi su cui si basa l'analisi riportata nel precedente paragrafo, e cioè che il mezzo poroso di cui si intende determinare la permeabilità sia rigido, è verificata a rigore nelle sole prove a carico costante.

Nelle prove a carico variabile, infatti, il moto di filtrazione si svolge in regime vario; si verificano quindi, nel tempo, variazioni della pressione effettiva agente sul provino con conseguenti deformazioni dello scheletro solido.

Il verificarsi di questo fenomeno fu evidenziato sperimentalmente da HVORSLEV [1951]; in fig. 3, ad esempio, sono riportate misure di variazioni di spessore del provino registrate durante prove a carico variabile di tipo « Immediate » e « Delayed Fall ».

In pratica le variazioni delle pressioni effettive, dell'ordine massimo di 1 t/m^2 , sono assai modeste, rispetto alle pressioni di consolidazione alle quali è sottoposto il provino nelle normali prove di laboratorio. Dette variazioni, inoltre, danno luogo a deformazioni che avvengono secondo un ciclo di scarico e ricarica della curva tensioni effettive-deformazioni del provino.

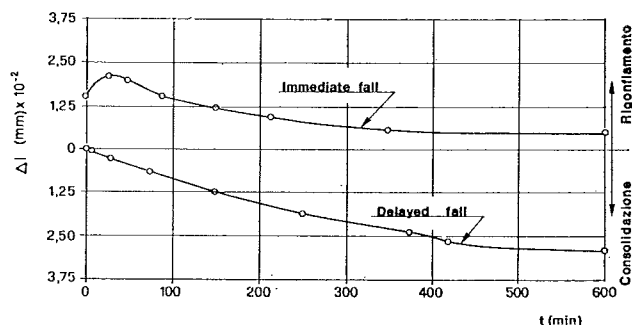


Fig. 3. - Misure di variazioni di altezza del campione, registrate durante prove a carico variabile (HVORSLEV, 1951).

Come è noto, in tali condizioni le variazioni di porosità sono assai più ridotte di quelle che, per le stesse variazioni di carico si avrebbero lungo la curva « vergine ». Per questi motivi, almeno intuitivamente, le assunzioni semplificate poste alla base dell'analisi convenzionale sembrerebbero giustificate.

Tuttavia, quando si fa ricorso a capillari molto sottili o addirittura a trasduttori di pressione, i volumi in gioco sono assai ridotti e quindi

sembra verosimile pensare che variazioni di porosità anche modeste possano alterare apprezzabilmente il fenomeno. Nel seguito della nota pertanto, si esamina l'influenza della deformabilità dello scheletro solido sul decorso della prova e sulla sua interpretazione, ricorrendo alla teoria della consolidazione unidimensionale [TERZAGHI, 1925, 1936].

Come è noto, tale teoria è a sua volta basata su ipotesi molto semplificative circa il comportamento del terreno; in particolare quella che, durante il processo di consolidazione, il coefficiente di permeabilità k ed il modulo di compressione edometrica E_{ed} si mantengono costanti.

Pure essendo possibili trattazioni basate su teorie più sofisticate si ritiene che, nell'ambito delle condizioni sperimentali di una prova di permeabilità a carico variabile, tali ipotesi siano largamente accettabili.

4. Analisi della prova sulla base della teoria della consolidazione

4.1. Immediate Fall

Nell'analizzare la prova di permeabilità a carico variabile sulla base della teoria della consolidazione occorre distinguere fra le due modalità di prova descritte come « Immediate Fall » e « Delayed Fall »; ad esse infatti corri-

spondono due diversi processi di consolidazione, essendo diversa la rispettiva condizione iniziale.

Eseguendo la prova secondo la tecnica « Immediate Fall » alla apertura del rubinetto B (fig. 1b) la pressione neutra alla base del provino passa istantaneamente dal valore $\gamma_w l$ al valore $\gamma_w (l + H)$. Ha quindi inizio un processo di filtrazione in regime vario e il provino tende a rigonfiare. Contemporaneamente però, con il passaggio di una certa quantità d'acqua attraverso il provino, il livello nel capillare inizia a diminuire; al processo predetto si sovrappone un fenomeno di consolidazione.

Si ha quindi un fenomeno combinato di consolidazione e rigonfiamento; verificandosi la consolidazione lungo un ciclo di ricarica, si può senz'altro ammettere che il coefficiente di consolidazione c_v , sia uguale a quello di rigonfiamento.

Assumendo un asse z verticale ed orientato verso l'alto con origine sulla superficie inferiore del provino, l'equazione differenziale che regge il fenomeno è la ben nota:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \equiv \frac{\partial u}{\partial t} \quad (9)$$

ove con u si è indicata la sovrappressione neutra.

Le condizioni ai limiti sono:

$$t = 0 \begin{cases} u = 0 & \text{per } 0 < z \leq l \\ u = \gamma_w H & \text{per } z = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$t > 0 \begin{cases} u = 0 & \text{per } z = l \\ \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{a}{Ak} \frac{\partial u^{(1)}}{\partial t} & \text{per } z = 0 \end{cases}$$

Questo problema di consolidazione trova riscontro in un analogo problema di diffusione del calore, di cui è nota la soluzione [CARSLAW e JAEGER, 1959]. Espressa nei simboli qui usati, essa risulta:

$$u_z = \gamma_w H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \eta e^{-\beta_n^2 T}}{\beta_n^2 + \eta + \eta^2} \frac{\text{sen } \beta_n \frac{1-z}{l}}{\text{sen } \beta_n} \quad (11)$$

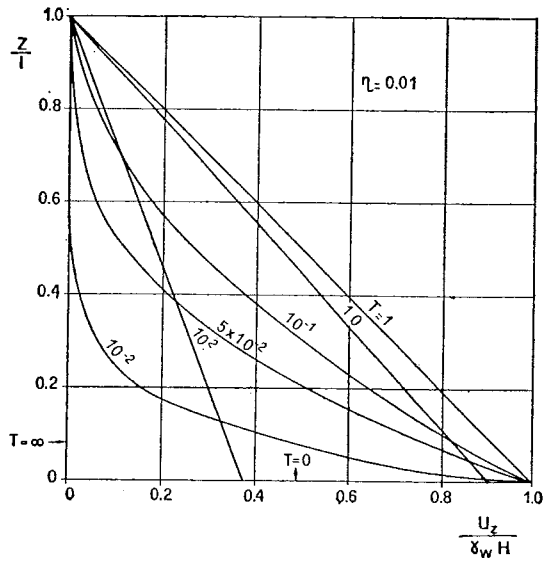
nella quale

β_n = radice ennesima dell'eq. trascendente $\beta \text{tg} \beta = \eta$

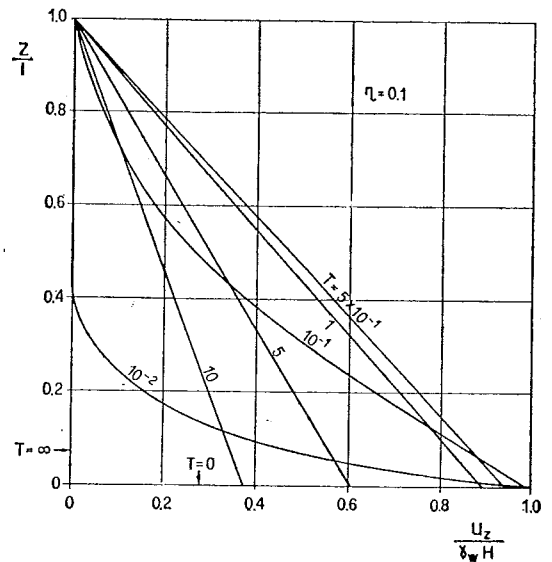
$$T = \frac{c_v t}{l^2} \text{ fattore tempo} \quad (12)$$

(1) Il volume di acqua $-\frac{Ak}{\gamma_w} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} dt$, che nel

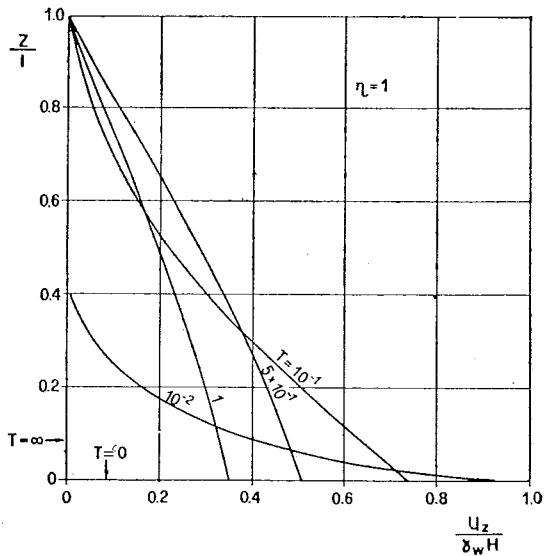
tempo dt entra nel campione, deve essere per la continuità uguale al volume $-a dh$ che nello stesso tempo fuoriesce dal tubo capillare.



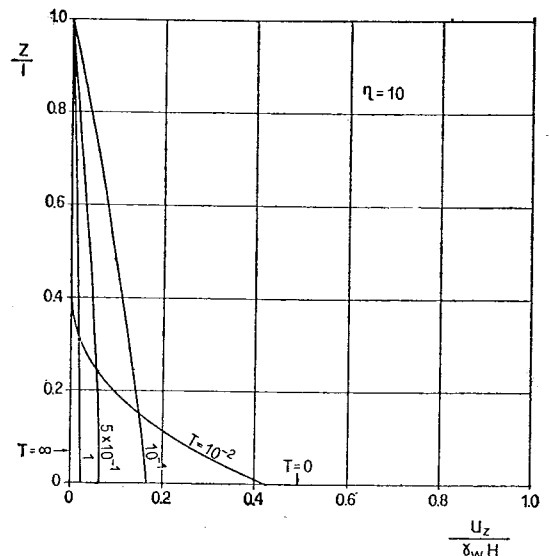
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4. - « Immediate Fall »: Isocrone del processo combinato di consolidazione e rigonfiamento per diversi valori di η .

$$\eta = \frac{A l}{a E_{ed}} \gamma_w = \frac{A k l}{a c_v}$$

La differenza di quota piezometrica h fra le estremità del campione vale:

$$h = u_{z=0} / \gamma_w.$$

Sostituendo nella precedente la (11) si ha:

$$h = H \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \eta e^{-\beta_n^2 T}}{\beta_n^2 + \eta + \eta^2} \quad (13)$$

Definendo il grado di consolidazione⁽²⁾ come:

$$U = 1 - \frac{\int_0^l u dz}{\gamma_w H l}$$

sostituendo nella precedente la (11) si ha:

$$U = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2 \eta e^{-\beta_n^2 T})(1 - \cos \beta_n)}{(\beta_n^2 + \eta + \eta^2) \beta_n \sin \beta_n} \quad (14)$$

(2) Per il caso in esame non è possibile definire il grado di consolidazione nella forma tradizionale. Il parametro introdotto e definito come tale si è ottenuto facendo riferimento ad una distribuzione di pressioni totali di tipo triangolare con valori alle estremità dati dalle (10).

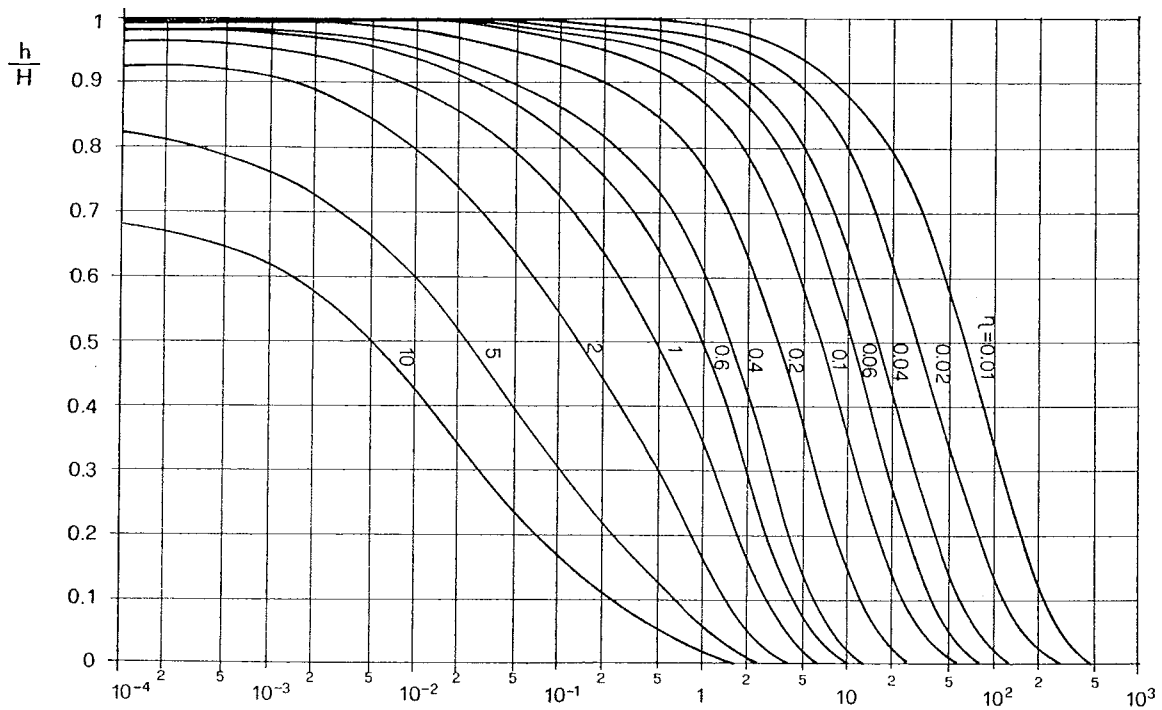


Fig. 5. - « Immediate Fall »: Differenza di quota piezometrica fra le estremità del campione in funzione del fattore tempo, per diversi valori di η .

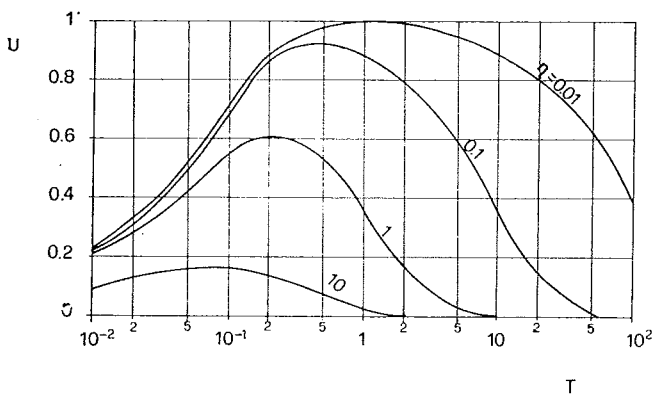


Fig. 6. - « Immediate Fall »: Grado di consolidazione in funzione del fattore tempo, per diversi valori di η .

Le equazioni (11) (13) e (14) sono diagramme rispettivamente nelle figg. 4, 5 e 6 per η compreso tra 0,01 e 10, e cioè in un campo che abbraccia gli usuali valori sperimentali. Dall'insieme dei diagrammi risulta che per i valori più ridotti di η (ad esempio $\eta = 0,01$) i due processi di rigonfiamento e di successiva consolidazione descritti in precedenza hanno luogo uno dopo l'altro, in maniera abbastanza chiaramente distinta; il processo è relativamente lento.

Per i valori più elevati di η (ad esempio

$\eta = 10$) i due processi di sovrappongono e si influenzano reciprocamente in modo assai marcato; il processo risultante è assai più rapido.

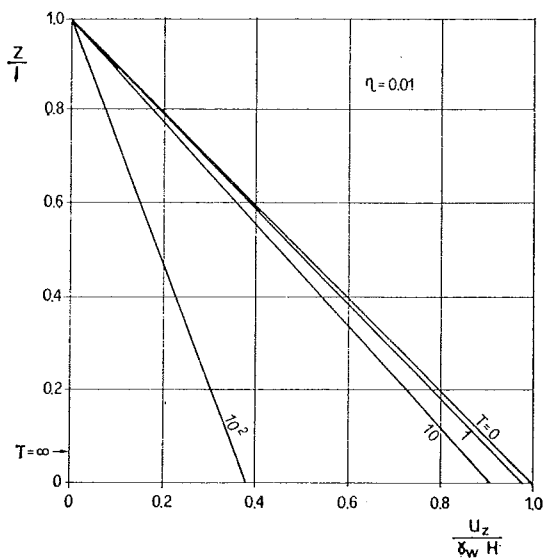
4.2. Delayed Fall

Se la prova di permeabilità a carico variabile viene condotta secondo la tecnica « Delayed Fall », i due processi di rigonfiamento e consolidazione vengono fatti avvenire separatamente.

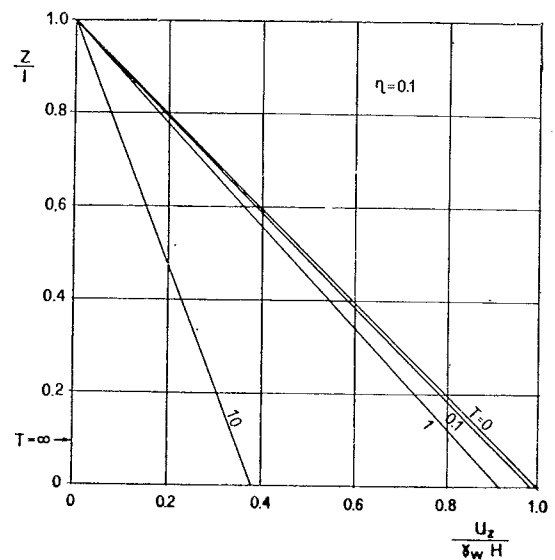
Il processo di rigonfiamento viene scontato prima dell'inizio della prova, avendo quest'ultima come condizione iniziale un flusso stazionario, mentre quello di consolidazione si innescava con la chiusura del rubinetto A (fig. 1b).

L'equazione che regge il fenomeno è sempre la (9), con le seguenti condizioni ai limiti:

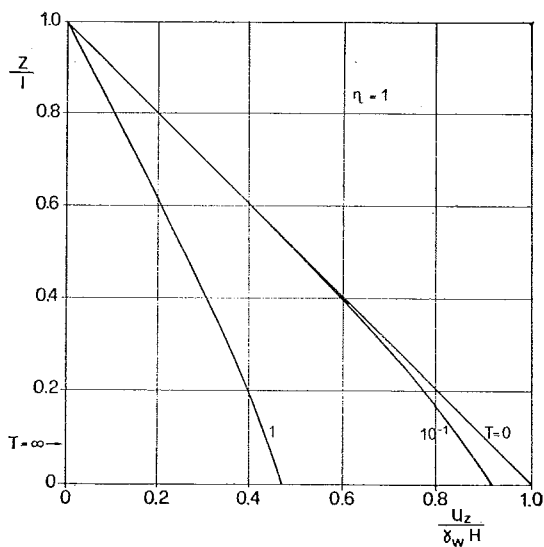
$$\begin{aligned}
 t = 0 \quad u &= \gamma_w H \frac{1-z}{l} \quad \text{per } 0 \leq z \leq l \\
 t > 0 \quad \begin{cases} u = 0 & \text{per } z = l \\ \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{a}{Ak} \frac{\partial u}{\partial t} & \text{per } z = 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{15}$$



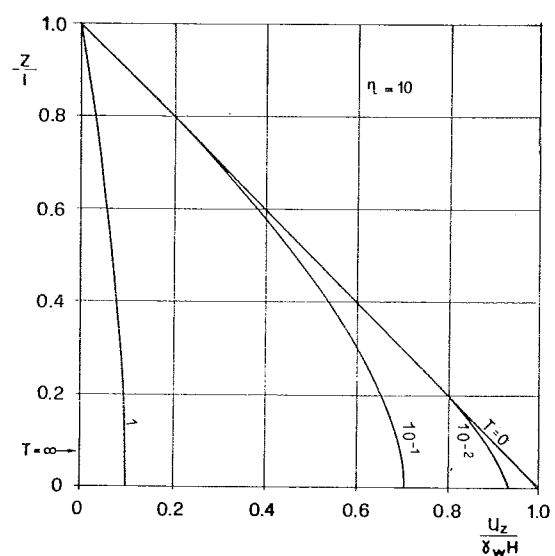
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7. - « Delayed Fall »: Isocrone del processo di consolidazione, per diversi valori di η .

La (9), con le condizioni ai limiti (15), non ha una soluzione analitica in forma chiusa; essa è stata pertanto risolta per via numerica, ricorrendo alla tecnica delle differenze finite nella semplice forma esplicita.

In forma grafica i risultati sono riportati nelle figure 7, 8 e 9.

Come per il precedente caso (*Immediate Fall*), sono stati considerati valori di η compresi fra 0,01 e 10.

Dall'insieme dei risultati emerge che per i valori di η più ridotti ($\eta < 1$) le isocrone sono molto prossimamente rettilinee (figg. 7a e 7b); in altre parole il processo è descritto fedel-

mente dall'analisi convenzionale e la compressibilità del mezzo ha una influenza molto scarsa.

Per i valori più elevati di η appare invece una sensibile curvatura delle isocrone (figg. 7c e 7d) ed il processo è sensibilmente più rapido (figg. 8 e 9).

5. Paragone fra l'analisi convenzionale e quella basata sulla teoria della consolidazione

L'influenza della deformabilità dello scheletro solido sul decorso delle prove di permeabilità si può valutare confrontando i risultati ot-

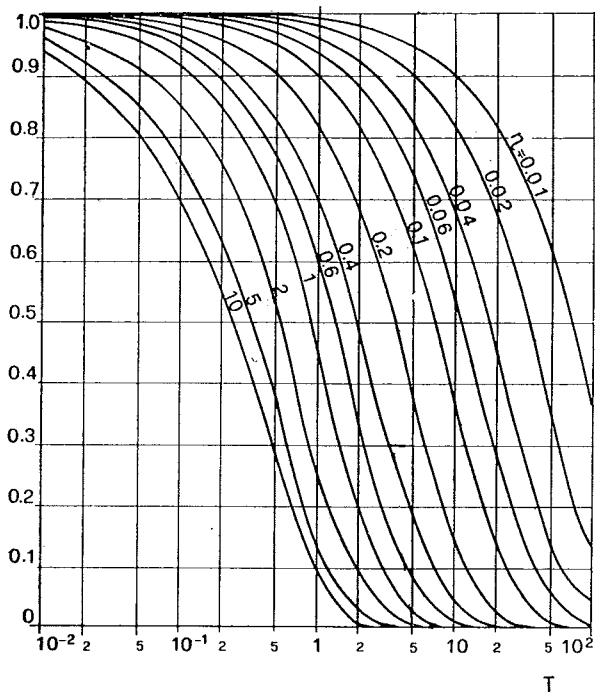


Fig. 8. - «Delayed Fall»: Differenza di quota piezometrica fra le estremità del campione in funzione del fattore tempo, per diversi valori di η .

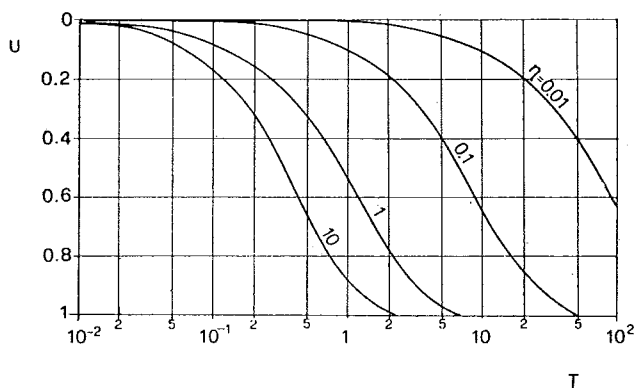


Fig. 9. - «Delayed Fall»: Grado di consolidazione in funzione del fattore tempo, per diversi valori di η .

tenuti nei precedenti paragrafi con quelli che si deducono in base all'analisi convenzionale.

Per quest'ultima ci si può avvalere dell'equazione (5) che, integrata fra $t_1 = 0$ e $t_2 = t$, risulta rispetto ad h ed elaborata fornisce, indipendentemente dalla tecnica di prova adottata:

$$h = H \exp \left\{ - \frac{k A}{l a} t \right\} = H \exp \{ - \eta t \} \quad (16)$$

In fig. 10 sono riportate con diversi simboli grafici la (16) e le analoghe curve ricavate, nei paragrafi precedenti, sulla base della teoria della consolidazione.

Dal confronto emerge che la deformabilità

del mezzo non gioca alcun ruolo apprezzabile per $\eta < 0.1$, indipendentemente dalle modalità adottate.

Per $\eta > 0.1$ al contrario l'influenza della deformabilità del mezzo è assai marcata, e ciò particolarmente se la prova è condotta con la tecnica « Immediate Fall ».

Volendo valutare le conseguenze delle ipotesi semplificative sulla stima del coefficiente di permeabilità, si possono confrontare i valori che si deducono per esso in base all'analisi convenzionale con quelli che si ricavano applicando la teoria della consolidazione.

Nel seguito i primi, ricavati dalla (6) sostituendo ad h i valori dedotti in base alla teoria della consolidazione, si indicheranno con k' , i secondi con k .

In base all'analisi convenzionale dalla (13) e dalla (6) per il caso « Immediate Fall » si ha:

$$k' = - \frac{l a}{A t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \eta e^{-\beta_n^2 T}}{\beta_n^2 + \eta + \eta^2} = - \frac{l a}{A T} \ln [f(T, \eta)] \quad (17)$$

In base alla teoria della consolidazione $k = \frac{C_v \gamma_w}{E_{ed}} = \frac{l^2 \gamma_w T}{E_{ed} t}$; dividendo ambo i membri della (17) per tale valore si ha:

$$\frac{k'}{k} = \frac{l a}{A t} \frac{E_{ed} t}{l^2 \gamma_w T} \ln [f(T, \eta)] = \frac{1}{\eta} \frac{[\ln f(T, \eta)]}{T} \quad (18)$$

Per il caso « Delayed Fall » valendo ancora la (18), è sufficiente sostituire ad $f(T, \eta)$ i valori ottenuti numericamente.

La (18) per entrambi i casi considerati è diagrammata nelle figg. 11 e 12.

Dall'esame di tali figure emergono alcune importanti conclusioni.

Qualora la prova venga eseguita con la tecnica « Immediate Fall » l'interpretazione con l'analisi convenzionale è accettabile soltanto per $\eta \leq 0.1$ e $T > 1$ conducendo viceversa a risultati grossolanamente errati per $\eta > 0.1$ e T qualsiasi.

Ricorrendo invece alla tecnica « Delayed Fall » ed interpretandola con l'analisi convenzionale si ottengono risultati attendibile per $\eta \leq 1$ e T qualsiasi.

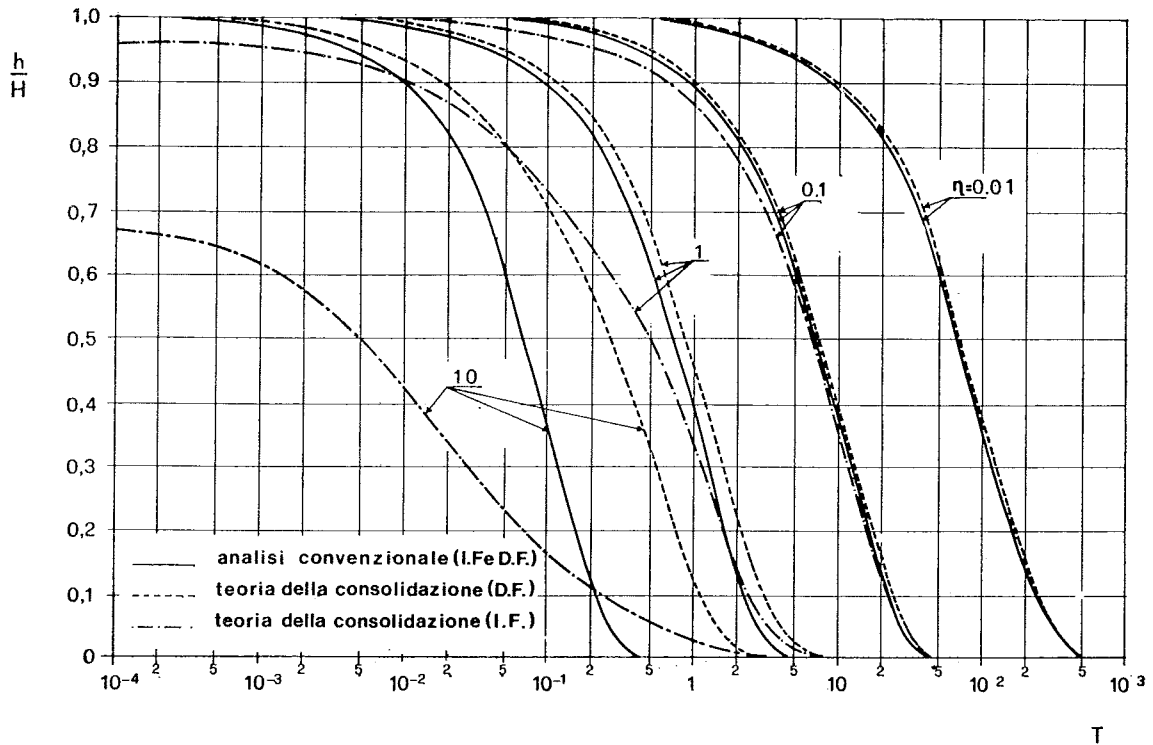


Fig. 10. - Andamento della differenza di quota piezometrica in base all'analisi convenzionale ed in base alla teoria della consolidazione.

Si ritiene interessante valutare le implicazioni di carattere pratico di tali conclusioni.

Nelle normali prove di permeabilità a carico variabile con edometri tipo Terzaghi le dimensioni del campione e del capillare sono rispet-

tivamente dell'ordine di $A = 25 \div 50 \text{ cm}^2$, $l = 2 \div 4 \text{ cm}$, $a = 0.01 \div 0.02 \text{ cm}^2$. In dipendenza del modulo di compressione edometrico E_{ed} del campione, delle sue dimensioni e di quelle del capillare si realizzano valori di η dell'ordine di:

$$\eta = \frac{2 \div 20}{E_{ed} \text{ (kg/cm}^2\text{)}}$$

A meno di non avere a che fare con campioni eccezionalmente compressibili, il valore di η è quindi sempre minore (ed a volte molto minore) dell'unità; se si cura di adottare la tecnica « *Delayed Fall* » l'analisi convenzionale può es-

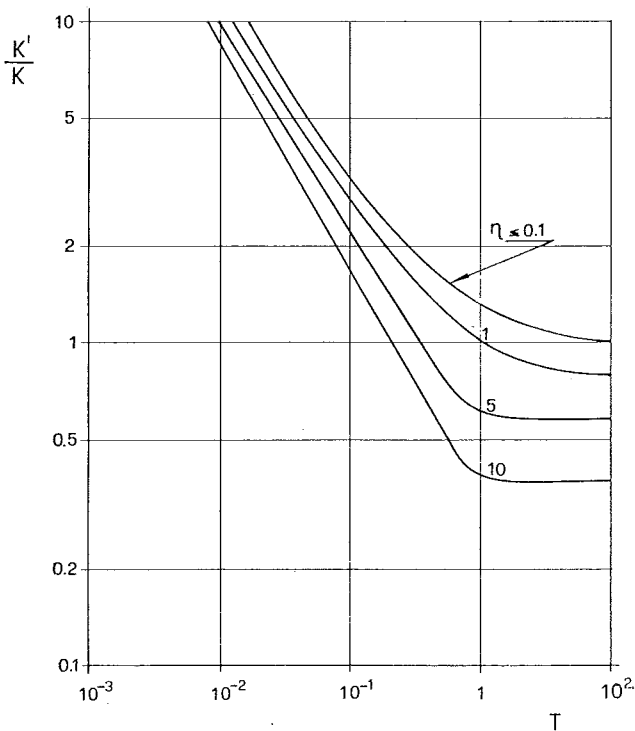


Fig. 11. - « *Immediate Fall* »: Confronto tra i coefficienti di permeabilità ricavati con l'analisi convenzionale e con la teoria della consolidazione.

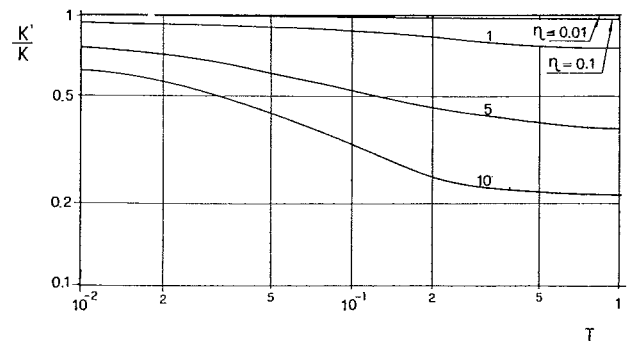


Fig. 12. - « *Delayed Fall* »: Confronto tra i coefficienti di permeabilità ricavati con l'analisi convenzionale e con la teoria della consolidazione.

sere utilizzata senza il rischio di errori apprezzabili.

Ciò rassicura sulla correttezza delle normali procedure di laboratorio.

La tecnica con trasduttore di pressione [REMY, 1973] si può applicare a provini montati in un edometro speciale tipo « Wissa » per il quale il prodotto η vale 125 cm^3 .

Il valore di a è di $10^{-6} \div 10^{-9} \text{ cm}^2$.

Si ha dunque:

$$\eta = \frac{125 \cdot 10^3 \div 125 \cdot 10^6}{E_{ed} \text{ (kg/cm}^2\text{)}}$$

I valori di η sono quindi sempre molto elevati, e le condizioni sperimentali che si realizzano sono tali che l'analisi convenzionale non è assolutamente applicabile.

I risultati devono quindi essere necessariamente interpretati sulla base della teoria della consolidazione.

6. Risultati sperimentali

Per controllare la rispondenza dei risultati teorici con l'effettivo andamento del fenomeno fisico sono state effettuate alcune esperienze su campioni di terreno preparati artificialmente in laboratorio. I campioni sono stati ottenuti essiccando e polverizzando un limo argilloso con sabbia fine di media plasticità (fig. 13), mescolandolo quindi con acqua fino a realizzare un contenuto d'acqua prossimo al limite di liquidità e successivamente lasciando stagionare per alcune settimane in recipiente ermeticamente chiuso.

Si sono in tal modo ricavati due provini che, montati in edometri tipo Terzaghi, sono stati sottoposti a prove alternate di compressione edometrica e di permeabilità a carico variabile di tipo « *Delayed Fall* ». In fig. 14 sono riportate le curve $e, \log P$ per le due prove; come si vede, le operazioni di preparazione e di stagionatura hanno avuto un effetto equivalente ad un carico di preconsolidazione dell'ordine di $0,45 \text{ kg/cm}^2$.

Per ciascuno incremento di carico sono stati calcolati il modulo di compressione edometrica E_{ed} , il coefficiente di consolidazione c_v ed il coefficiente di permeabilità k avvalendosi della

relazione $k = \frac{c_v \gamma_w}{E_{ed}}$. I valori di k così ottenuti sono posti in diagramma in fig. 15.

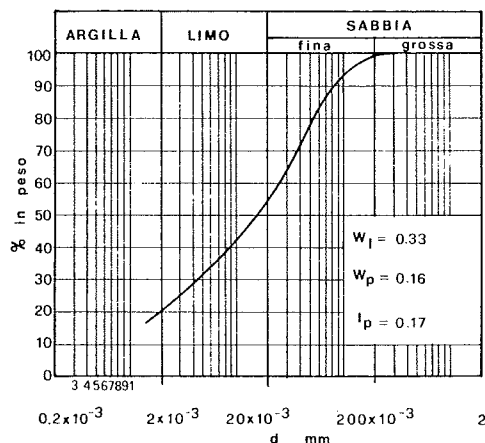


Fig. 13. - Proprietà indici dei campioni.

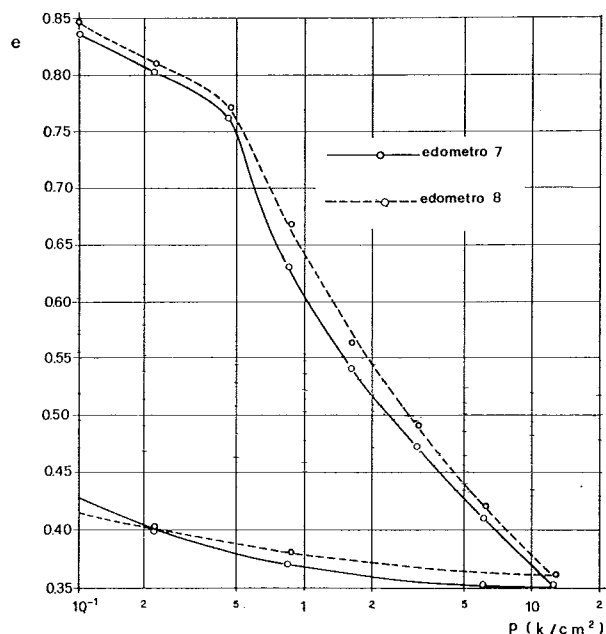


Fig. 14. - Curve edometriche.

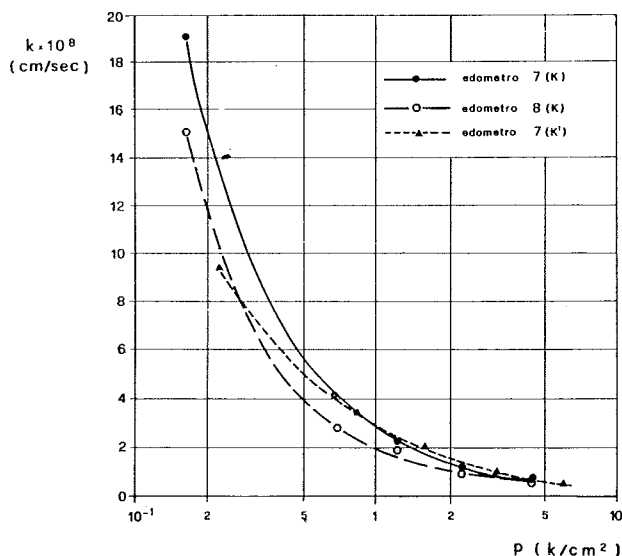


Fig. 15. - Coefficienti di permeabilità dedotti dalle curve cedimenti-tempo e dalle prove di permeabilità.

TABELLA I

P (Kg/cm ²)	a (cm ²)	l (cm)	E _{ed} (Kg/cm ²)	η	H (cm)	k' · 10 ⁸ (cm/sec)
0.10	0.068	1.9221	5.59	0.1	92.90	9.27
0.22			9.43			
0.46			6.94			
0.85	0.029	1.7677	12.46	0.2	100.30	3.34
1.58			32.43			
3.14	0.029	1.5757	69.23	0.04	95.80	0.94
6.26			0.02			

I dati riportati nelle figg. 14 e 15 confermano la sostanziale omogeneità dei due campioni.

Nella tabella I sono riportati i risultati ottenuti con le prove di permeabilità, limitatamente all'edometro n. 7 per il quale si disponeva di una serie di misure più completa. I valori della permeabilità valutati a mezzo della (6), sono anche riportati in fig. 15. Come era da attendersi, dati i valori di η realizzati, vi è ottimo accordo fra i valori della permeabilità dedotti dall'analisi del decorso nel tempo dei cedimenti e quelli ottenuti con le prove a carico variabile a mezzo dell'analisi convenzionale.

In fig. 16, infine, i valori di h/H rilevati nel

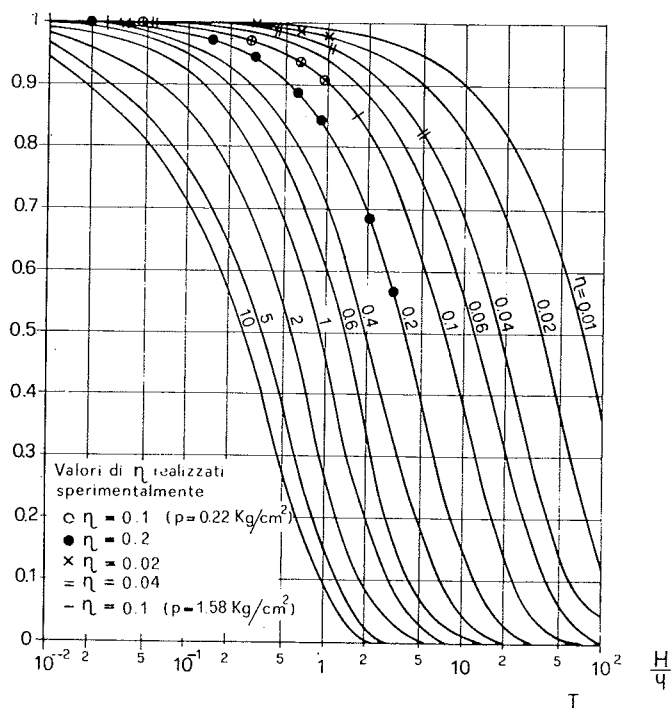


Fig. 16. - Confronto tra i dati sperimentali e curve teoriche.

corso delle varie prove di permeabilità sono paragonati alle curve teoriche di fig. 8; la corrispondenza è senz'altro soddisfacente.

7. Considerazioni conclusive

L'analisi svolta nella presente nota consente di precisare il significato ed i limiti della formula comunemente adottata per interpretare la prova di permeabilità a carico variabile.

È stato posto in luce il ruolo del parametro A 1

$$\eta = \frac{A 1}{a E_{ed}} \gamma_w, \text{ e delle modalità di prova.}$$

Per quest'ultimo fattore, la tecnica cosiddetta « *Delayed Fall* », nella quale la prova vera e propria è preceduta da una fase di messa a regime, appare preferibile a quella cosiddetta « *Immediate Fall* ».

Per quanto riguarda il parametro η, se la prova è condotta usando un tubo capillare, si realizzano valori tali che l'analisi convenzionale è senz'altro applicabile. Se invece, secondo il suggerimento di REMY [1973], si adotta un trasduttore di pressione con piccola deformabilità volumetrica per rendere più agevole la misura di permeabilità assai ridotte, è necessario analizzare la prova in termini di teoria della consolidazione.

Alcune esperienze preliminari, anche se limitate ad un ristretto campo di valori dei parametri, hanno confermato i risultati dell'analisi.

8. Ringraziamenti

La ricerca illustrata nella presente nota è stata svolta dall'A. durante un periodo di studio presso l'Istituto di Tecnica delle Fondazioni e Costruzioni in Terra (Geotecnica) dell'Università di Napoli, sotto la guida del prof. ing. Carlo Viggiani.

Alla sperimentazione ed ai calcoli numerici ha collaborato il dr. ing. Donato Ferro, nel quadro della preparazione della sua tesi di laurea.

BIBLIOGRAFIA

- CARSLAW H. S., JAEGER J. C. (1959) - *Conduction of heat in solids*. 2nd edition, Clarendon Press, Oxford.
- HVORSLEV J. (1951) - *Time-lag and soil permeability in ground water measurement*. Waterways Experiment Station, U.S. Corps of Engineers, Bull. n. 36.
- PELLEGRINO A. (1973) - *Effetti meccanici del moto dell'acqua nelle rocce sciolte e lapidee*. Rivista Italiana di Geotecnica n. 2-3.
- REMY J. P. (1973) - *The measurement of small permeabilities in the laboratory*. Technical note Geotechnique 23.
- VIGGIANI C. (1965) - *Interazione fra terreno e strumento nella misura delle pressioni neutre*. Geotecnica n. 2.

SUMMARY

An analysis of falling head permeability test

During a falling head permeability test the effective stress in the sample varies in the time, and hence the sample undergoes consolidation or consolidation and swelling, depending on the testing technique. The conventional analysis of the test [HVORSLEV, 1951], on the contrary, is based on the classical theory of seepage through an undeformable porous medium (eqs. 4, 5 and 6).

Being effective stress variations relatively small, and occurring deformations along a swell — recompression curve, volume changes are also small; at a first glance, the assumption of undeformable medium seems to be justified. To verify this point, the test is interpreted in terms of consolidation theory; for the reasons above, simple linear Terzaghi theory has been adopted, assuming the swelling coefficient c_s equal to the consolidation coefficient c_v .

In the case of « *Immediate Fall* » test, a solution in closed form is given (par. 4.1; eqs. 11, 13 and 14; figs. 4, 5 and 6).

In the case of « *Delayed Fall* » test, the solution is obtained by finite differences (par. 4.2; figs. 7, 8 and 9).

A comparison between the results obtained and those of conventional analysis (figs. 11 and 12) shows that, in the case of *Immediate Fall*, conventional analysis may be used without significant error only if $\eta \leq 0,1$ and $T > 1$. In the case of *Delayed Fall*, the range of validity of conventional analysis is wider: $\eta \leq 1$, at any value of T . From a practical viewpoint, it is concluded that the *Delayed Fall* technique is to be preferred; as it is well known, in this technique the test is preceded by a stage of steady state seepage.

With the usual dimensions and properties of soil samples, and if a capillary tube is used, the condition $\eta \leq 1$ is surely satisfied; accordingly, conventional analysis may be confidently used.

On the contrary, if a pressure transducer is employed instead of the capillary tube, following the suggestion of REMY (1973), values of $\eta \geq 10^3$ are obtained; in this case conventional analysis of the test is completely meaningless.