

# Insegnamento di **Progetto di Infrastrutture viarie**

## *Opere in terra*

*Caratteristiche di un terreno*

***Compressibilità e costipamento delle terre***

*Portanza sottofondi e fondazioni stradali*

*Instabilità del corpo stradale*

## **Soprastrutture**

*Materiali stradali*

*Soprastruttura flessibili*

*Cenni di calcolo delle soprastrutture*

## ***Intersezioni e Impianti stradali***

*Intersezioni a raso e a livelli sfalsati*

*Aree di sosta*

## **Compressibilità di una terra**

Ogni terra sottoposta a carichi riduce il suo volume e ciò significa che una terra è compressibile, sia per la sua stessa costituzione granulare, sia per la presenza dei vuoti e dell'acqua.

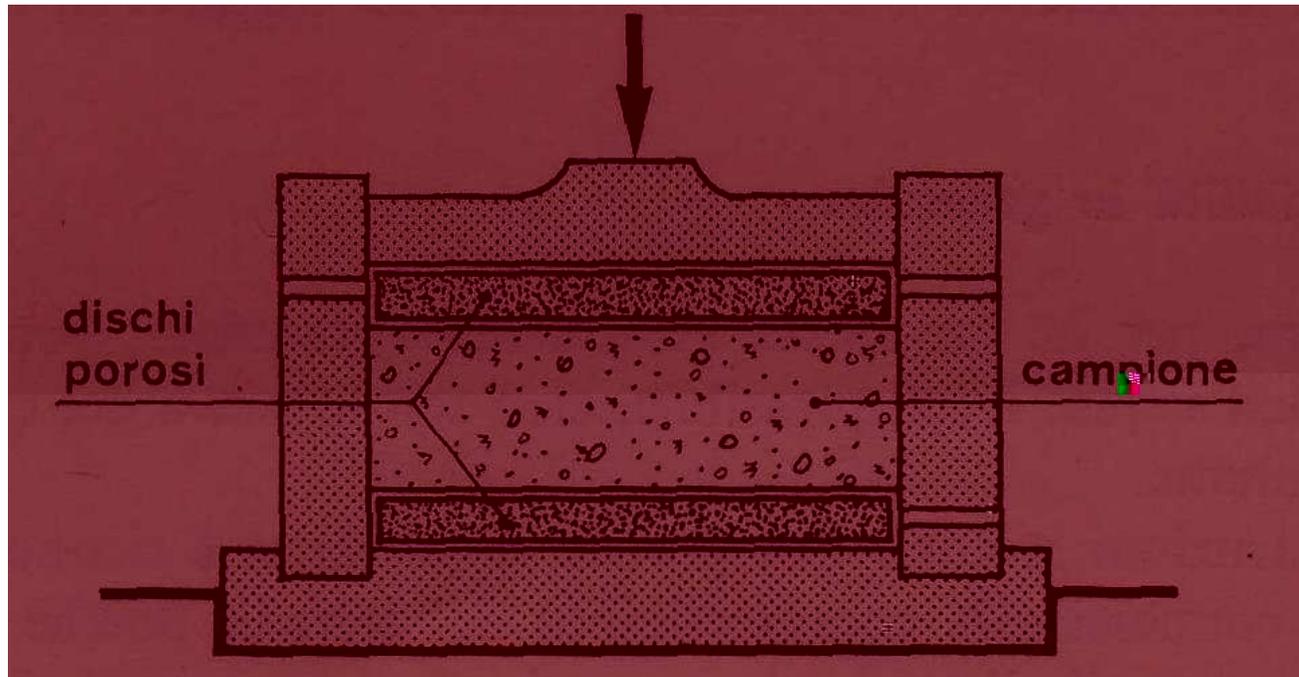
La compressibilità delle terre è di fondamentale importanza nelle costruzioni stradali: in particolare nella realizzazione di rilevati stradali o di muri di sostegno si è spesso in presenza di dissesti conseguenti ad assestamenti dell'ammasso e successivi alla costruzione dell'opera.

Per queste ragioni è necessario effettuare idonee indagini per accertarsi circa le caratteristiche dei terreni che, ad una prima valutazione, non si reputino idonei e su cui andranno ad insistere le opere stradali.

Le prove di compressibilità sono prove di compressione ad espansione laterale impedita; sono eseguite in laboratorio caricando assialmente un provino cilindrico che non può deformarsi lateralmente e misurandone i relativi cedimenti. La prova può essere effettuata con provini parzialmente o totalmente imbibiti d'acqua.

Gli apparecchi utilizzati in tali prove è l'*edometro* (vedi: figura 1) rappresentabile con un contenitore a base cilindrica (di diametro di circa 5,5 cm) entro il quale, tra due dischi porosi, è posto il campione di terra dello spessore di 2 cm.

## Edometro (Figura 1)



## **Prova di compressibilità**

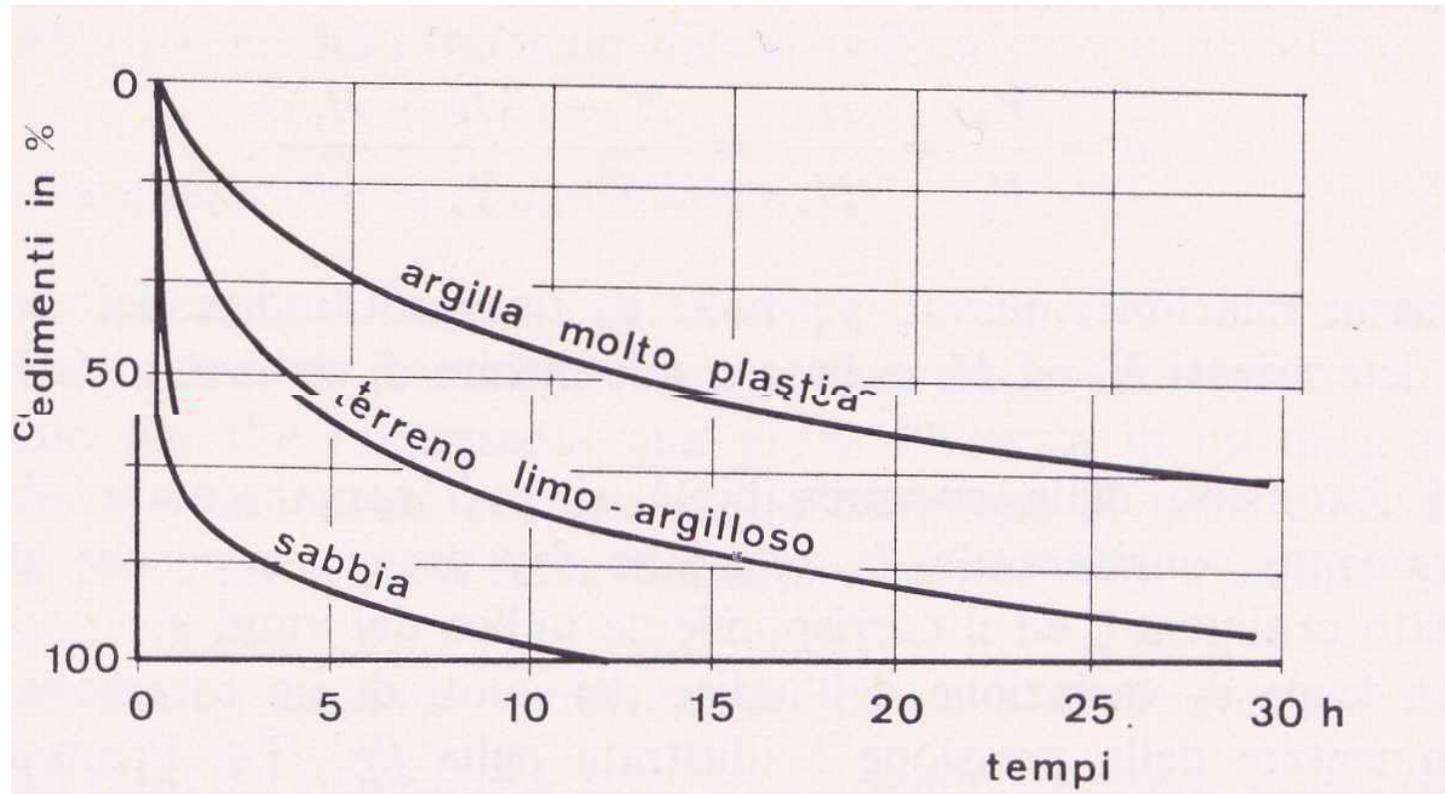
Le pressioni sono ottenute tramite pesi e leve che determinano il carico agente sul provino; i cedimenti sono misurati per mezzo di comparatori.

Siccome per dato carico i cedimenti variano con il tempo, prima di aumentare il carico occorrerà accertarsi che il comparatore non indichi, con il passare del tempo, apprezzabili incrementi.

Sottoponendo provini di terra a prova edometrica a carico costante, i relativi assestamenti variano in funzione del tempo con legge assimilabile ad un ramo d'iperbole come riportato in Figura 2. Nel caso di sabbie si può ritenere che l'assestamento, cioè si sia verificato il 100 % dei cedimenti, avvenga dopo qualche ora, per campioni d'argilla bisogna anche attendere dalle 120 alle 150 ore.

Le prove edometriche quindi forniscono dati utili per presumere gli effettivi assestamenti che potrà subire un terreno quando viene caricato da un manufatto stradale. I cedimenti ottenuti in laboratorio richiedono minor tempo di quelli che si hanno nell'ammasso e ciò dipende dai diversi spessori in gioco. Al fine di poter determinare un corretto assestamento dell'ammasso compressibile, vale la pena ricordare che, in provini di diversa altezza, i tempi di assestamento sono proporzionali al quadrato delle relative altezze.

## Assestamenti di provini (Figura 2)



## Compressibilità ed indice dei vuoti

Attraverso le prove edometriche effettuate, sia su campioni indisturbati (così come si trovano in natura), sia su campioni rimaneggiati (ricostruiti in laboratorio), è possibile costruire le *curve di compressibilità* che mettono in relazione la pressione  $p$  con l'indice dei vuoti  $I_v$ .

Si indicano con:

$A$  l'area della sezione trasversale del provino ( $\text{cm}^2$ ),

$H$  l'altezza iniziale del provino (cm),

$\Delta H$  il cedimento totale fornito dal comparatore (cm),

$H_v$  l'altezza corrispondente al volume dei vuoti (aria + acqua) dopo la prova (cm),

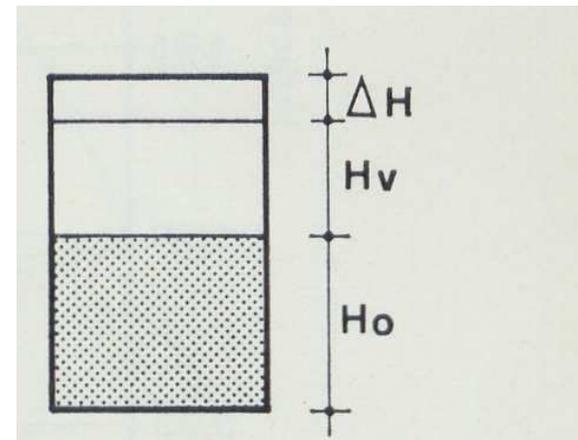
$G_s$  il peso secco dei granuli (g),

$\gamma_g$  il peso specifico dei granuli ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),

$H_0$  l'altezza corrispondente al volume dei soli granuli (cm)

Evidentemente:  $\gamma_g = G_s / H_0 A$  da cui:  $H_0 = G_s / \gamma_g A$  e  $H = \Delta H + H_v +$  .

L'espressione che ci permette di calcolare l'indice dei vuoti, noti  $H_0$  ed  $H$ , in base a sole misure di cedimento  $\Delta H$  è:  $I_v = V_v / V_g = H_v / H_0 = [H - (\Delta H + H_0)] / H_0$  .



*Progetto di Infrastrutture viarie*  
**Curve di compressibilità**

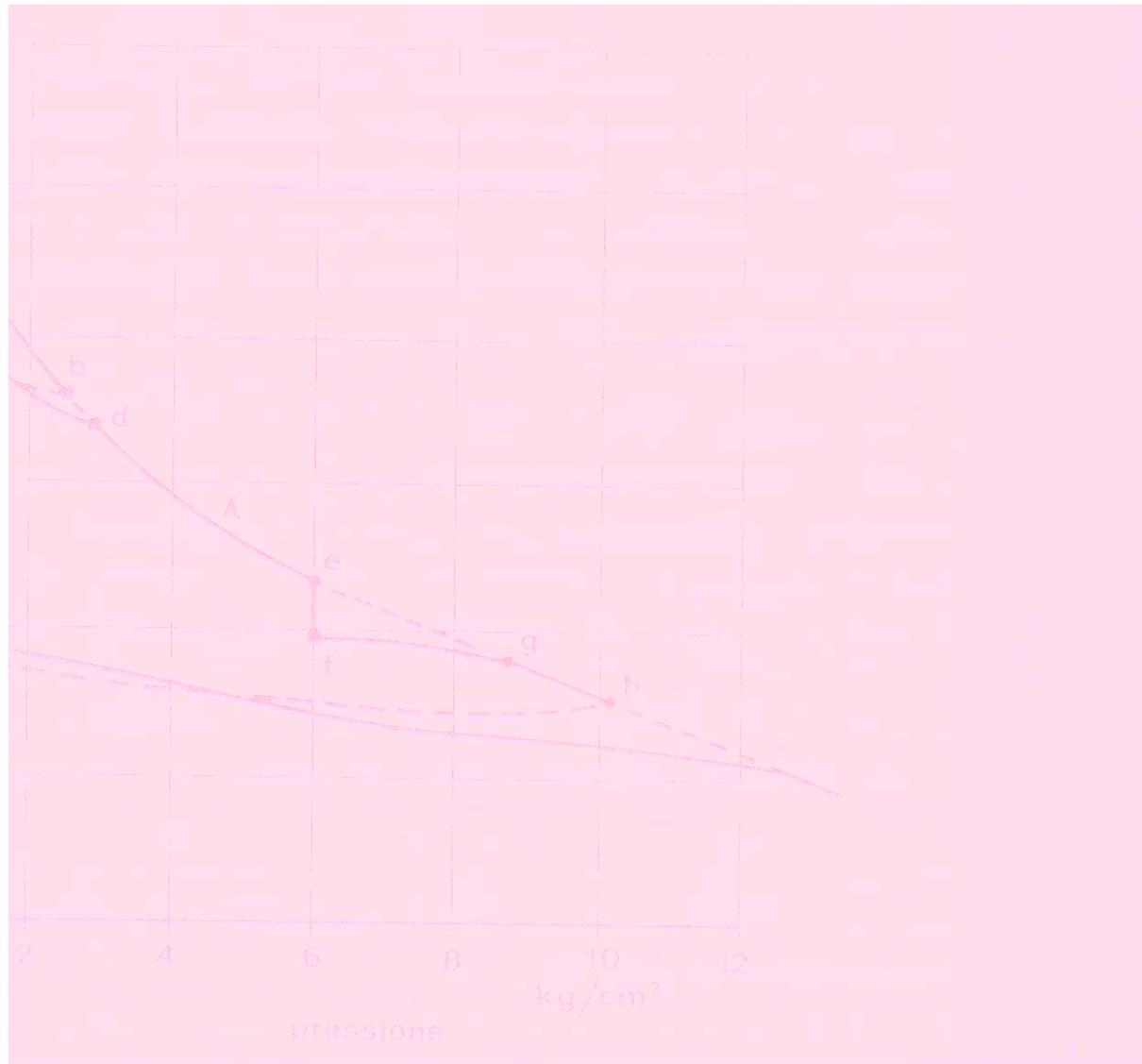
Nelle figura 3 e 4 sono mostrati gli andamenti dell'indice dei vuoti di un campione di terra poco compatta all'aumentare rapido della pressione rispettivamente in scale aritmetiche ed in scala semilogaritmica. Tale andamenti sono caratterizzati da tratti successivi: *ab - bc - cd - de - ef - fg*. La *curva di compressibilità* è la curva costituita dai tratti: *abde*, il tratto *bc* identifica il *rigonfiamento* e quello *cd* la *ricarica*. Lungo il tratto *ab* ad un aumento di pressione  $p$  da 0 a  $2,5 \text{ kg/cm}^2$  si ha una riduzione dell'indice dei vuoti da 1,18 a 1,08. Nel tratto di rigonfiamento *bc* il ritorno allo stato iniziale di pressione ( $p=0$ ) fa sì che in *c* l'indice dei vuoti valga 1,11 con una riduzione pari a 0,07 ( $1,18 - 1,11$ ). Lungo il tratto di ricarica *cd* non si sovrapposizione con la curva di compressibilità (tratto *ab*) sino al punto *d* in cui riprende l'andamento

Nelle figura 5 e 6 sono mostrati gli andamenti ( $e, p$ ) ed ( $e, \log p$ ) tipici di alcune differenti terre: curva a) terra sabbiosa con contenuto di mica compreso tra il 10 e il 15 %, curva b) sabbia e curva c) argilla plastica.

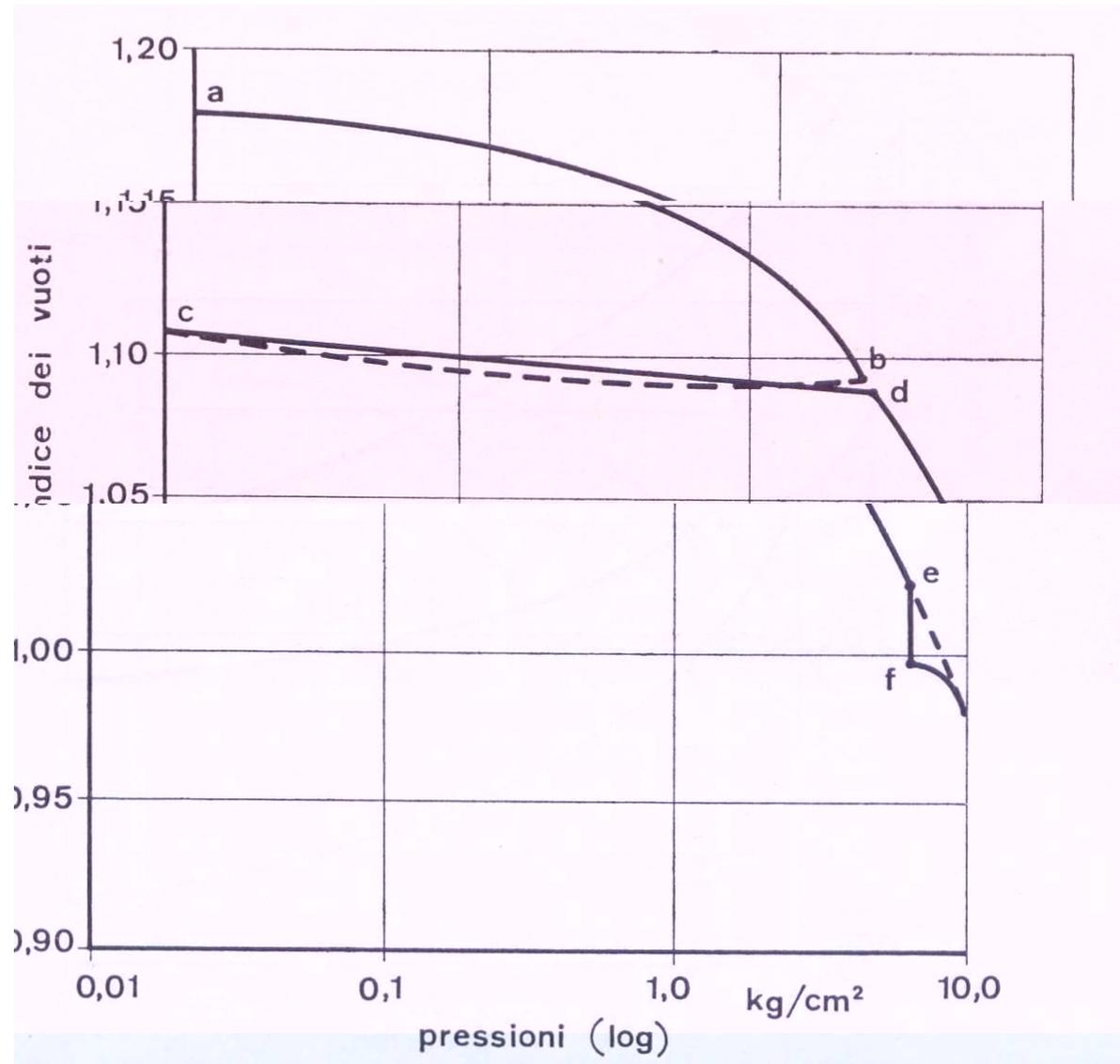
La presenza di una piccola quantità di mica in una terra sabbiosa determina un notevole aumento della percentuale dei vuoti anche per alti valori della pressione. L'argilla presenta una diminuzione dell'indice dei vuoti, all'aumentare della pressione, molto più rapida di una sabbia. Con riferimento alle curve di compressibilità di tali terre, nel diagramma semilogaritmico, il loro andamento presenta un primo tratto meno inclinato ed un secondo più inclinato assimilabile ad una retta. Il tratto meno inclinato indica uno stato di preesistente consolidamento.

*Progetto di Infrastrutture viarie*

**Andamento (e, p) per terra poco compatta (Figura 3)**

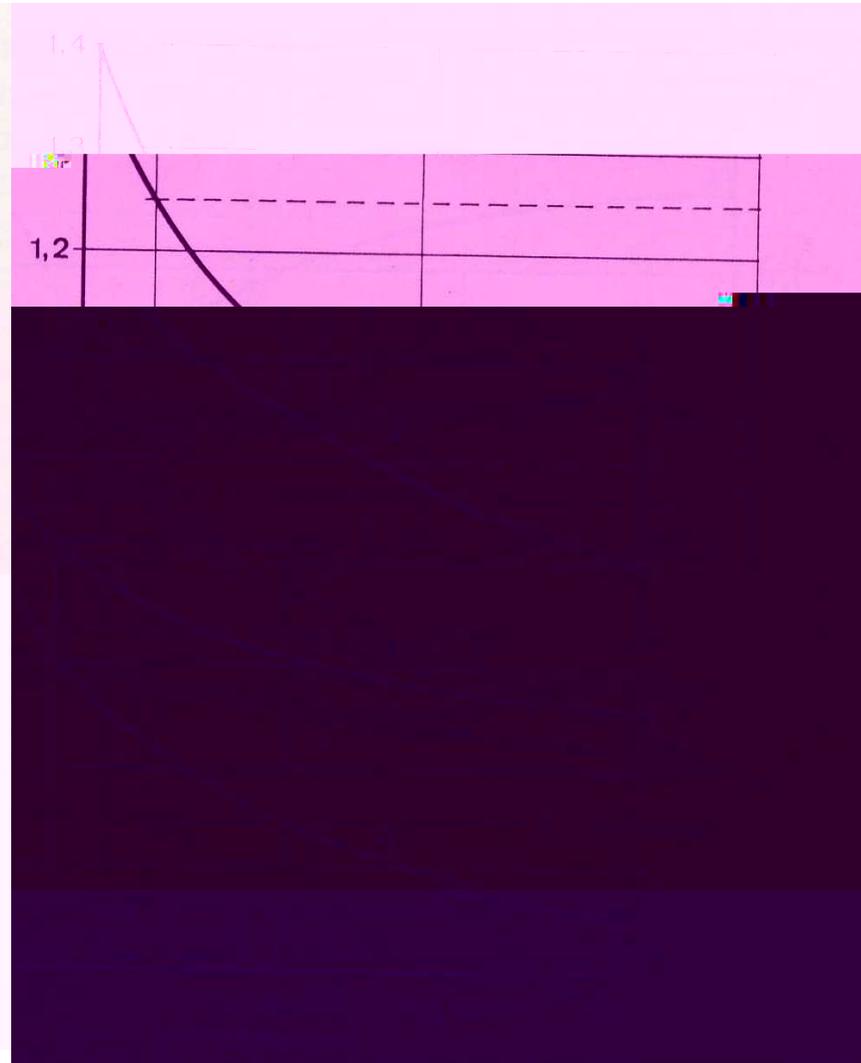
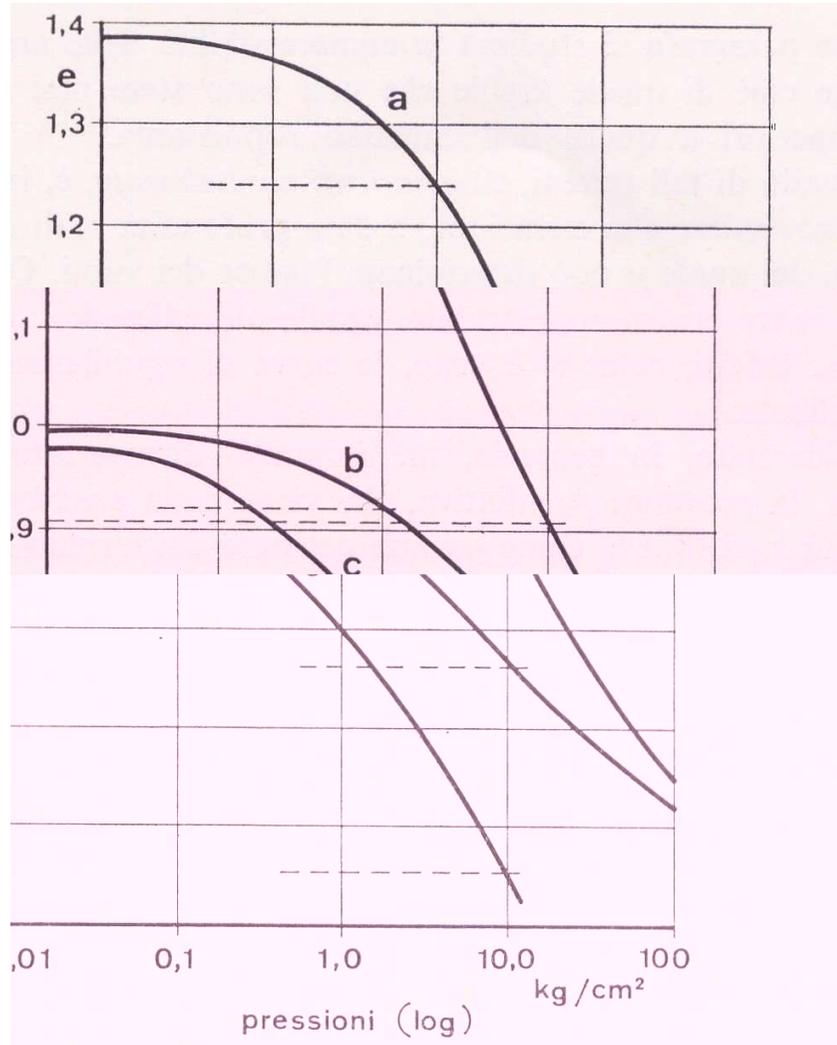


## Andamento ( $e$ , $\log p$ ) per terra poco compatta (Figura 4)



*Progetto di Infrastrutture viarie*

**Altri andamento (e, p) ed (e, log p) tipici (Figure: 5 e 6)**



## **Studio della compressibilità delle argille**

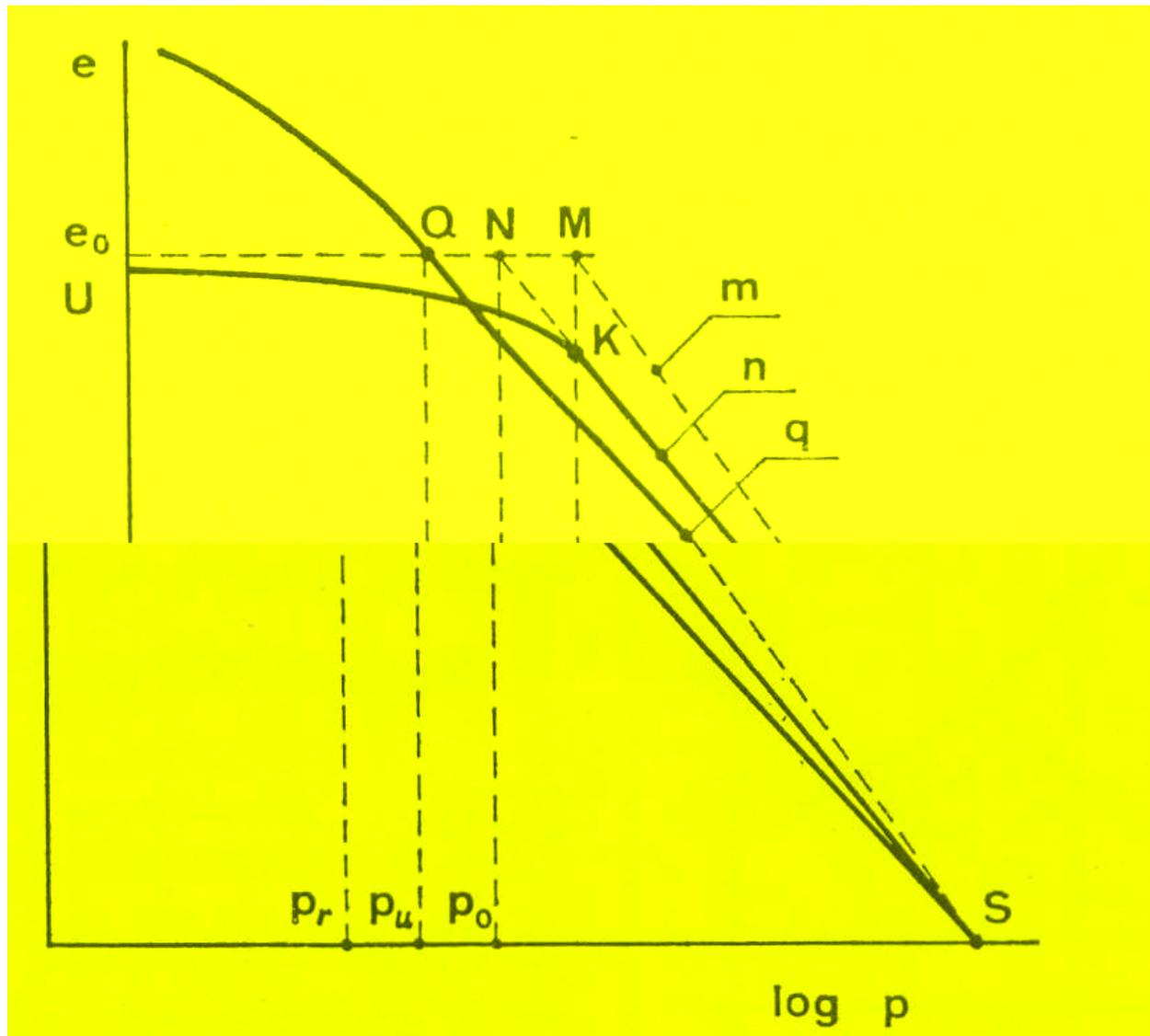
Si analizza il caso di strati argillosi caricati normalmente che non siano mai state sottoposte a pressioni superiori a quelle dell'ammasso sovrastante. Innanzitutto occorre provvedere all'estrazione, a profondità  $z$ , di un campione indisturbato per determinarne l'indice dei vuoti  $lv$  che si può ritenere, senza apprezzabile errore, pari all'indice dei vuoti del terreno in sito  $lv_0$ .

Si consideri un ammasso attraversato da una falda acquifera: la pressione  $p_0$  effettiva, detta *pressione normale*, alla profondità  $z$ , si ottiene come somma del peso del terreno immerso nel tratto compreso fra detta profondità ed il livello delle falda ed il peso del terreno, con la propria percentuale d'acqua, posto al di sopra della falda. In figura 7, i valori  $p_0$  (pressione normale) e  $lv_0$  (indice dei vuoti del terreno in sito) individuano il punto M.

Si consideri la *curva edometrica*  $n$  relativa ad un *campione indisturbato* che presenta in  $K$  una variazione di inclinazione (il tratto KU può essere assimilato ad una curva di ricarica, il tratto KS è quasi rettilineo). Se con lo stesso materiale si confeziona un *provino rimaneggiato*, si ottiene la *curva di compressibilità*  $q$  che presenta il ramo rettilineo meno inclinato della  $n$ , mentre il ramo inclinato risulta più in alto: entrambe le curve passano per il punto S di coordinate  $(p_S, 0)$ .

La *curva di consolidamento del terreno insito*  $m$  passa evidentemente, sia per M  $(p_0, lv_0)$ , sia per S  $(p_S, 0)$ . Cioè il tratto, ad andamento rettilineo, MS. Il prolungamento dei tratti rettilinei delle curve di compressibilità  $n$  e  $q$ , intersecano il segmento  $lv_0 M$  rispettivamente nei punti N e Q (sempre alla sinistra di M) a cui si associano le rispettive pressioni  $p_u$  e  $p_r$ . Il rapporto  $p_u / p_0$  indica il grado di rimaneggiamento del materiale (secondo il Terzaghi variabile tra 0,3 e 0,7).

## Curve di compressibilità (Figura 7)



## **Equazione della curva di compressibilità**

Nota l'andamento della curva di compressibilità in sito, è possibile risolvere il *problema* del *calcolo del cedimento per un dato sovraccarico in un ammasso caricato normalmente*.

Incrementando il carico normale  $p_0$  di  $\Delta p$  l'indice dei vuoti  $lv_0$  si riduce al valore  $lv$  tale che:  $\Delta lv = lv_0 - lv = \gamma_c \Delta p$ , con  $\gamma_c =$  coefficiente di compressibilità. Per contro una variazione dell'indice dei vuoti in un ammasso comprimibile di altezza  $H$ , conseguente ad un incremento del carico  $\Delta p$ , determina una variazione di porosità pari a:

$$\Delta_{\text{porosità}} \cong \Delta lv / (1 + lv_0) \quad (\text{dove la porosità} = lv / (1 + lv))$$

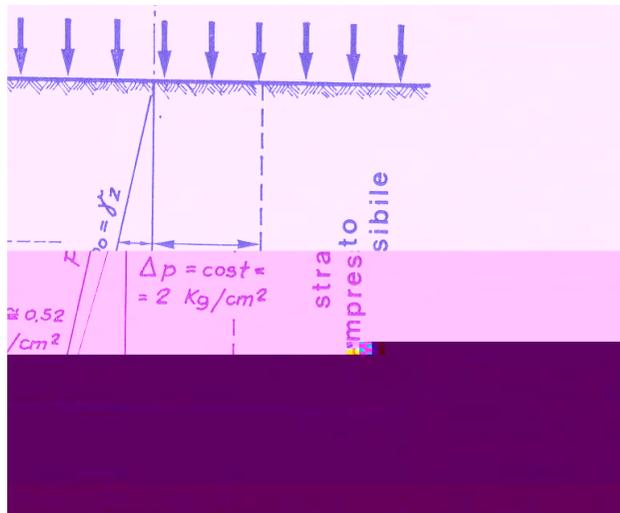
Ma la porosità è anche data dal rapporto fra volume dei vuoti ed il volume totale, pertanto la sua variazione è data da:  $\Delta_{\text{porosità}} = \Delta H / H \cong \gamma_{cv} \Delta p$ . Quindi si può ricavare il cedimento  $\Delta H$  dell'ammasso:  $\Delta H = H \Delta p \gamma_{cv}$  dove  $\gamma_{cv} = \gamma_c / (1 + lv_0)$  è il *coefficiente di compressibilità volumetrica* rappresenta il cedimento *dell'ammasso* conseguente ad un incremento di pressione  $\Delta p = 1$  quando la sua altezza  $H = 1$ . L'espressione di  $\Delta H$ , che assume anche la forma:  $\Delta H = H (lv_0 - lv) / (1 + lv_0)$ , può essere ricavata introducendo l'equazione della curva di consolidamento per la quale il Terzaghi propone un andamento logaritmico:  $lv = lv_0 - C_c \log [(p_0 + \Delta p) / p_0]$ , dove  $C_c$  è un parametro costante detto *coefficiente di compressione* che attraverso le esperienze di Skempton è facile quantificare:  $C_c = 0,009 (LL - 10)$ . In definitiva:

$$\Delta H = H [C_c / (1 + lv_0)] \log [(p_0 + \Delta p) / p_0]$$

## Progetto di Infrastrutture viarie

### Esempio di calcolo del cedimento

Si vuole conoscere il cedimento del piano di posa di un rilevato di altezza  $h = 10$  m (in asse alla superficie d'appoggio) che trasmette all'ammasso compressibile un carico unitario pari a  $\Delta p = 2$  kg/cm<sup>2</sup>. Il terreno costituente l'ammasso abbia:  $LL = 42$  e  $\gamma_a = 1720$  kg/m<sup>3</sup>. Si supponga che la distribuzione delle pressioni nell'interno dell'ammasso di altezza  $H = 6$  m sia costante lungo la verticale



Si vuole conoscere il cedimento del piano di posa di un rilevato di altezza  $h = 10$  m (in asse alla superficie d'appoggio) che trasmette all'ammasso compressibile un carico unitario pari a  $\Delta p = 2$  kg/cm<sup>2</sup>. Il terreno costituente l'ammasso abbia:  $LL = 42$  e  $\gamma_a = 1720$  kg/m<sup>3</sup>. Inoltre l'indice dei vuoti  $lv_0 = 1,05$ .

La pressione normale, in corrispondenza di  $H/2$ , risulta:  $p_0 = \gamma_a (H/2) \cong 0,52$  kg/cm<sup>2</sup>.

Dall'equazione della curva di consolidamento si ha che  $lv_0 - lv = C_c \log [(p_0 + \Delta p) / p_0]$ , per  $C_c = 0,009(42-10) = 0,288$  e  $\log [(p_0 + \Delta p) / p_0] = \log [(0,52+2)/0,52]$ , vale:  $lv_0 - lv = 0,288 \times 0,685 = 0,19373$ .

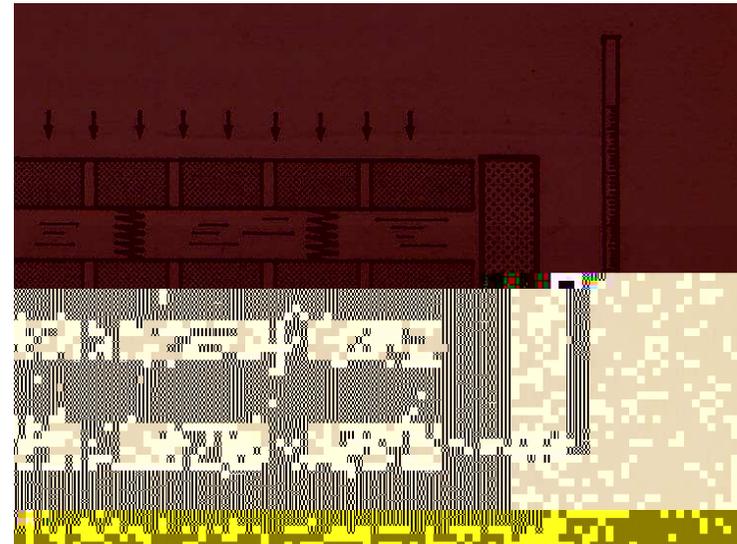
Pertanto il cedimento cercato vale:

$$\Delta H = (lv_0 - lv) H / (1 + lv_0) = 0,19373 \times 600 / (1 + 1,05) \cong 57,7 \text{ cm}$$

## **Consolidamento di ammassi argillosi**

Il Terzaghi, per spiegare il comportamento delle argille sotto l'azione dei carichi ed il meccanismo del naturale loro consolidamento, ha schematizzato il fenomeno utilizzando un cilindro pieno d'acqua in cui vengono adagiati dischi forati mantenuti tra loro distanziati da molle, come riportato in figura.

Se si applica un carico sul disco superiore in una prima fase la pressione è sopportata dall'acqua (innalzamento del livello nel tubo capillare). Successivamente il carico viene trasmesso alle molle (abbassamento del livello nel tubo capillare) e, vinta l'inerzia, l'acqua comincia a risalire attraverso i fori dei dischi che quindi si abbassano. Più piccola è la sezione dei fori e più forte risulterà l'inerzia incontrata dall'acqua e quindi, a parità di forza agente, più lenta la discesa dei dischi.



Nelle masse argillose i fori rappresentano i vuoti tra granuli: l'azione di costipamento quindi sarà tanto più lenta quanto più piccoli sono i vuoti.