

Richiami di geotecnica - 3

rev. 02.10.2018

I testi e le figure che seguono sono stati estratti, con alcune modifiche, da uno o più dei seguenti testi, a cui si rimanda per chiarimenti e approfondimenti:

- Bowles J. E., FONDAZIONI PROGETTO E ANALISI, McGraw-Hill, Milano, 1991
- Colombo P., Colleselli F., ELEMENTI DI GEOTECNICA, Zanichelli, Bologna, 2004
- Facciorusso J., Madaia C., Vannucchi G. – DISPENSE DI GEOTECNICA, Dipartimento di Ingegneria Civile – Sezione Geotecnica, Università degli Studi di Firenze, 2006 e relativo materiale le lezioni
- Lancellotta R., Costanzo D., Foti S., PROGETTAZIONE GEOTECNICA SECONDO L'EUROCODICE 7 (UNI EN 1997) E LE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI (NTC 2008), Hoepli Ed., Milano, 2011
- Lancellotta R., Calavera J., FONDAZIONI, McGraw-Hill, Milano, 2003

DEFORMAZIONI E CEDIMENTI NEI TERRENI

La **deformazione volumetrica**, ε_v , di un elemento di terreno di volume iniziale V_0 (e indice dei vuoti iniziale e_0) è data da:

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{(V_1 - V_0)}{V_0} = -\frac{(e_1 - e_0)}{1 + e_0}$$

Deriva dalla definizione di $e = V_v/V_s$

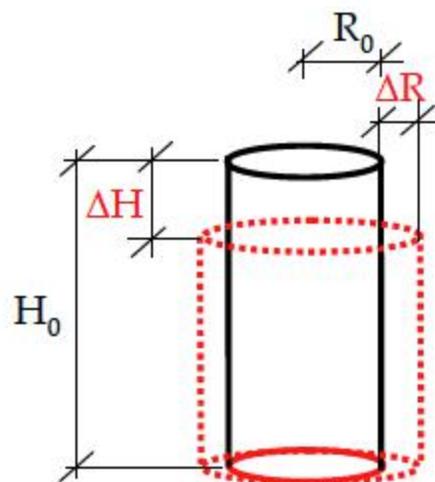
N.B. : convenzionalmente si assume:
 $\varepsilon_v > 0$ per riduzioni di volume
(COMPRESSIONE)
 $\varepsilon_v < 0$ per aumenti di volume
(ESPANSIONE)

Se ε_1 , ε_2 e ε_3 sono le deformazioni principali (ovvero le deformazioni lungo le 3 direzioni ortogonali, x, y e z, in cui è presente la sola deformazione longitudinale), allora vale la relazione:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_a + 2 \cdot \varepsilon_r = \varepsilon_z + 2 \cdot \varepsilon_h$$

elemento cilindrico e stato tensionale assial-simmetrico

dove: $\varepsilon_r = -\frac{\Delta R}{R_0}$ $\varepsilon_a = -\frac{\Delta H}{H_0}$



CONDIZIONI EDOMETRICHE

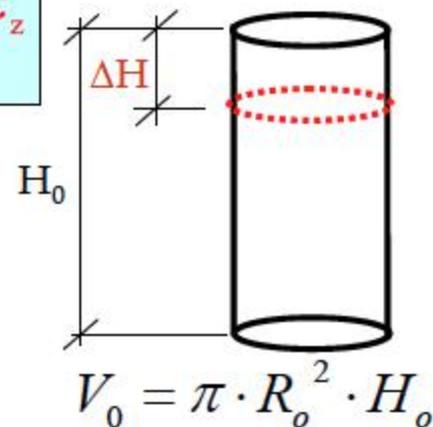
Stato tensionale assial-simmetrico e deformazioni laterali impedito

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + 2 \cdot \varepsilon_h = \varepsilon_z$$

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{\Delta e}{1+e_0} = -\frac{\Delta H}{H_0} = \varepsilon_z$$

Il *cedimento verticale*, s , si ottiene integrando la deformazione verticale ε_z :

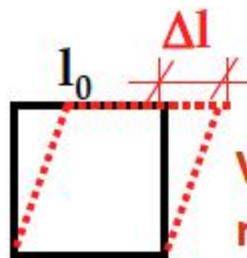
$$s(z) = \int_0^z \varepsilon_z(Z) \cdot dZ$$



N.B. In un terreno si possono avere:

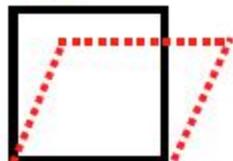


Variazione di volume ($\varepsilon_v \neq 0$) ma non di forma ($\gamma = 0$)



Variazione di forma ($\gamma \neq 0$), ma non di volume ($\varepsilon_v = 0$)

$$\gamma = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Deformazione di taglio}$$



Variazione di volume ($\varepsilon_v \neq 0$) e di forma ($\gamma \neq 0$)

In seguito ad una variazione dello stato tensionale (efficace, per il principio delle tensioni efficaci) nel terreno si hanno *deformazioni* (e quindi *cedimenti*) che possono essere attribuite alla:

✓ *fase solida:*

- a) prevalentemente elastiche (compressioni e inflessioni dovute all'incremento delle forze di contatto)
- b) prevalentemente plastiche (scorrimento dovuto alle forze di taglio intergranulari)
- c) plastiche (frantumazione in presenza di elevati livelli tensionali delle particelle solide)
- d) in parte elastiche e in parte plastiche (variazione di distanza tra particelle di minerali argillosi, dovuta a fenomeni di interazione elettrochimica)
- e) in gran parte plastica (deformazione dello strato di acqua adsorbita)

✓ *fase liquida e gassosa (vuoti):*

- f) compressione dell'aria e/o dell'acqua all'interno dei vuoti
- g) espulsione dell'aria dai vuoti nei terreni non saturi
- h) espulsione dell'acqua dai vuoti in terreni saturi

Nella pratica ingegneristica occorre conoscere l'entità e l'evoluzione nel tempo dei cedimenti di uno strato di terreno sotto l'azione di un carico applicato in superficie.

Trascurando la compressibilità delle singole particelle solide, compresa l'acqua adsorbita nel caso delle argille (a, c, d, e), e del fluido interstiziale (f), e trascurando, soprattutto nel caso dei terreni a grana fine, i cedimenti dovuti allo scorrimento delle particelle (b) i cedimenti possono manifestarsi in conseguenza di:

g) espulsione dell'aria dai vuoti nei terreni non saturi (*costipamento*)

h) espulsione dell'acqua dai vuoti nei terreni saturi (*consolidazione primaria*)

a cui possono aggiungersi:

i) deformazioni volumetriche a tensione efficace costante (*creep*) dovute a fenomeni viscosi (*consolidazione secondaria*)

j) deformazioni di taglio a volume costante (che si verificano a breve termine nei terreni saturi e poco permeabili in condizioni non edometriche)

Se il terreno è saturo, possono aversi solo deformazioni del tipo h), i), j):

- ❑ nel caso di terreni saturi molto permeabili, le deformazioni volumetriche e i cedimenti sono pressoché immediati e attribuibili interamente a fenomeni di **consolidazione primaria** e, in presenza di viscosità, secondaria (in tal caso avvengono nel tempo).
- ❑ nel caso di terreni saturi poco permeabili, occorre distinguere una:
 - ⇒ **condizione a breve termine** (immediatamente conseguente l'applicazione del carico), dove le deformazioni volumetriche sono all'inizio nulle e i cedimenti in condizioni edometriche sono nulli ($\varepsilon_v = \varepsilon_z$), mentre in condizioni non edometriche si verificano cedimenti dovuti a deformazioni di taglio (j).
 - ⇒ **condizione a lungo termine** dove le deformazioni volumetriche e i cedimenti sono diversi da zero e dovuti a fenomeni di consolidazione primaria (h) e, in presenza di viscosità, secondaria (i)

CONSOLIDAZIONE PRIMARIA

La **consolidazione primaria** è un fenomeno conseguente all'espulsione (o al richiamo) dell'acqua interstiziale dai pori di un terreno saturo sottoposto ad una variazione dello stato tensionale efficace:

- ⇒ nel caso di incremento del carico tensionale, le particelle di terreno si assestano in una configurazione più stabile e con meno vuoti, con conseguente diminuzione di volume (**consolidazione**)
- ⇒ nel caso di scarico tensionale si ha invece un richiamo dell'acqua all'interno dei vuoti con conseguente aumento di volume (**rigonfiamento**)

Il meccanismo di uscita/ingresso dell'acqua nei vuoti è un fenomeno dipendente dal tempo (ovvero dal coefficiente di permeabilità del terreno) ed è regolato dalla **teoria della consolidazione**.

L'entità della variazione di volume (e il cedimento) che si registra al termine del fenomeno è invece legata alla rigidità/deformabilità dello scheletro solido (compressibilità)

Compressibilità: è la risposta in termini di variazione di volume di un terreno sottoposto ad una variazione (incremento o riduzione) delle tensioni efficaci



- 1. serve a stimare l'entità delle deformazioni volumetriche (e dei cedimenti)*
- 2. è dipendente dalla rigidità/deformabilità del terreno*

Consolidazione: è la legge di variazione di volume del terreno nel tempo



- 1. serve a stimare il decorso delle deformazioni volumetriche nel tempo*
- 2. è dipendente dalla permeabilità del terreno.*

N.B.: sono problemi rilevanti soprattutto per i terreni a grana fine (argille) dove si manifestano in genere cedimenti maggiori e tempi di consolidazione molto più lunghi (anche se gli stessi concetti possono applicarsi anche ai terreni a grana grossa).

COMPRESSIBILITÀ EDOMETRICA

Def. Le **condizioni edometriche**, come già ricordato, sono caratterizzate da uno stato tensionale assial-simmetrico e condizioni di deformazioni laterali impedito

Tali condizioni possono realizzarsi nei terreni solo in condizioni di simmetria, ad esempio nel caso di un deposito:

- ✓ delimitato da piano di campagna orizzontale ed infinitamente esteso in direzione orizzontale
- ✓ con sovraccarico verticale applicato in superficie, uniformemente distribuito ed infinitamente esteso.

In tali condizioni valgono le seguenti relazioni:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z$$

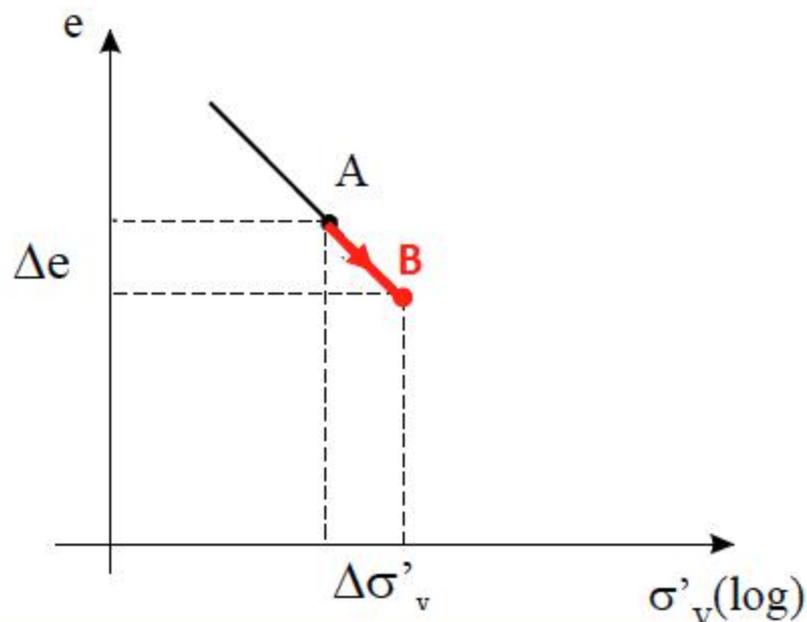
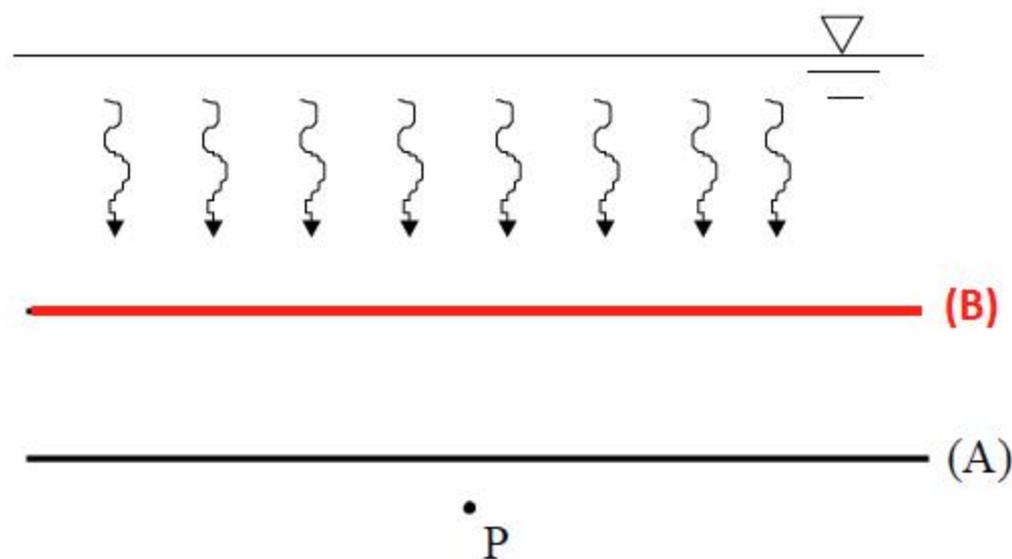


$$\frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{\Delta H}{H_0}$$

HYP. Si consideri il caso della formazione di un deposito di terreno per sedimentazione lacustre che realizza tutte le ipotesi di condizione edometrica.

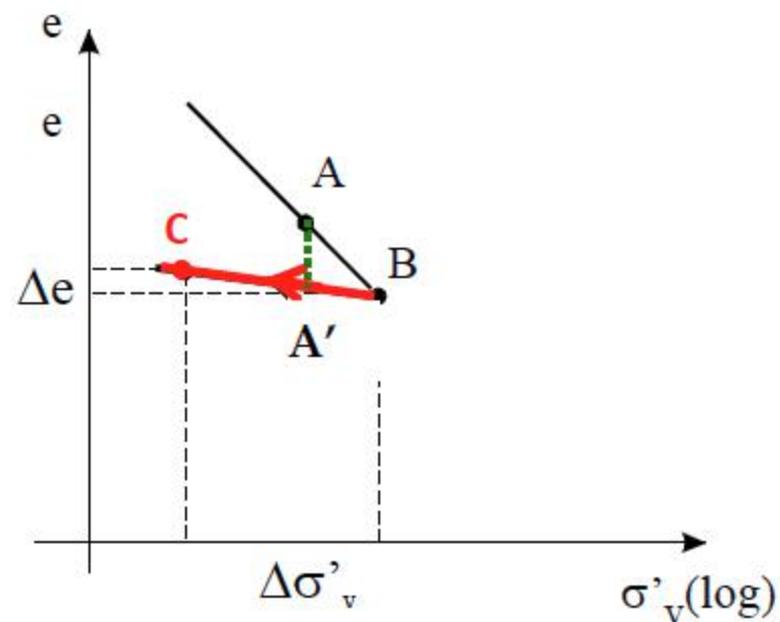
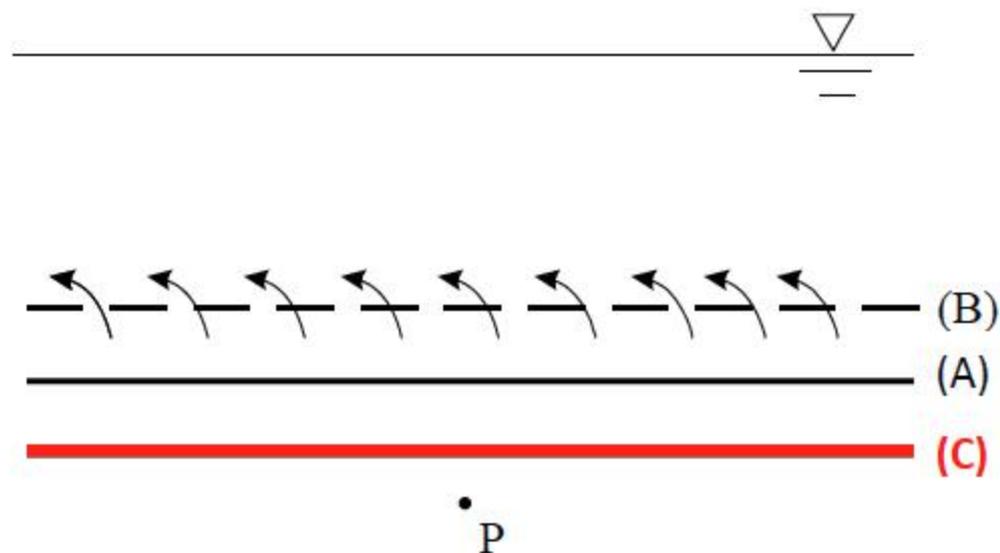
Si studi la compressibilità del terreno in relazione al carico applicato, ovvero l'evoluzione dell'indice dei vuoti (o dei cedimenti) con l'intensità del carico applicato ad una data profondità.

1) Sedimentazione (fase di primo carico)



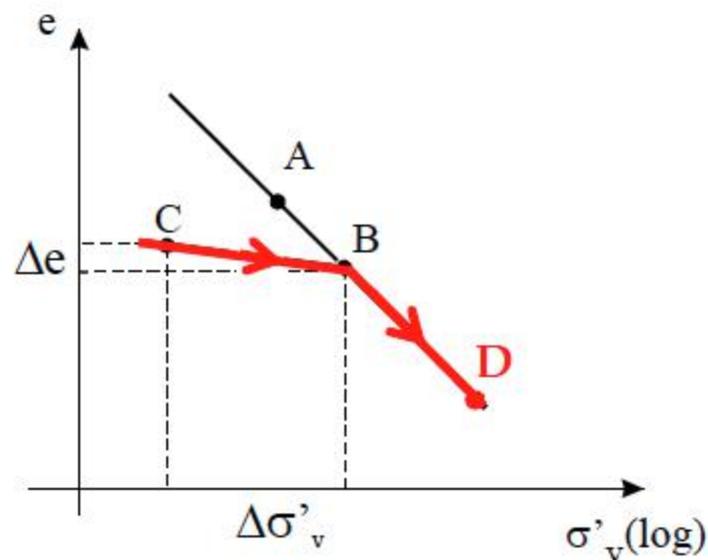
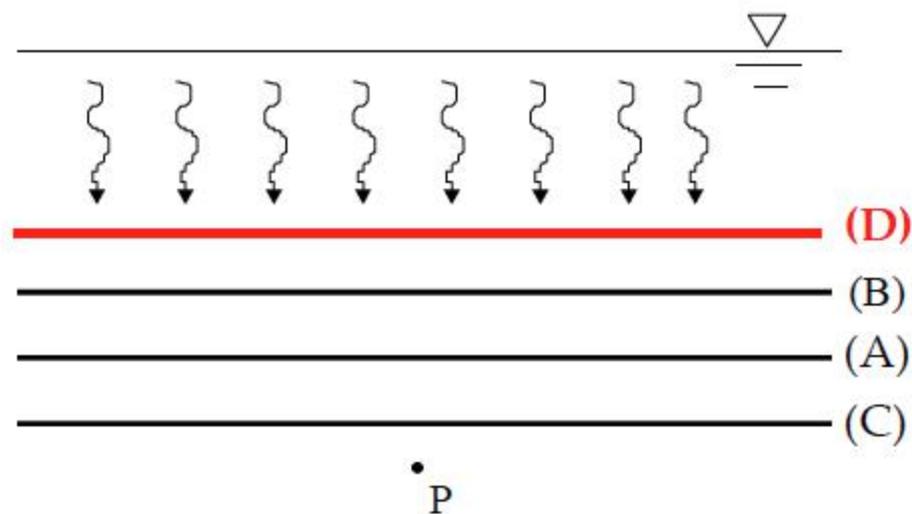
N.B. Il percorso tensioni – deformazioni è rappresentato (in scala logaritmica) da una retta, AB (*linea di compressione vergine o di primo carico*)

2) Erosione (fase scarico)



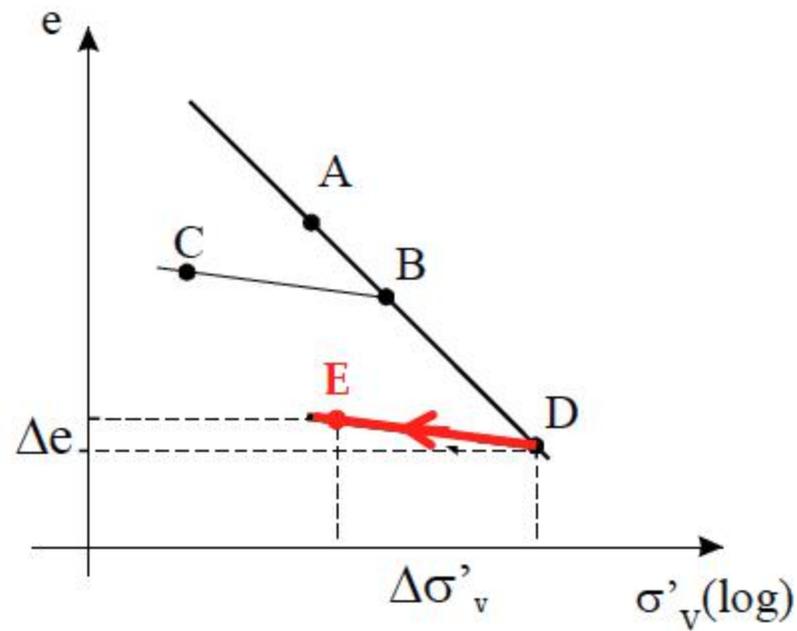
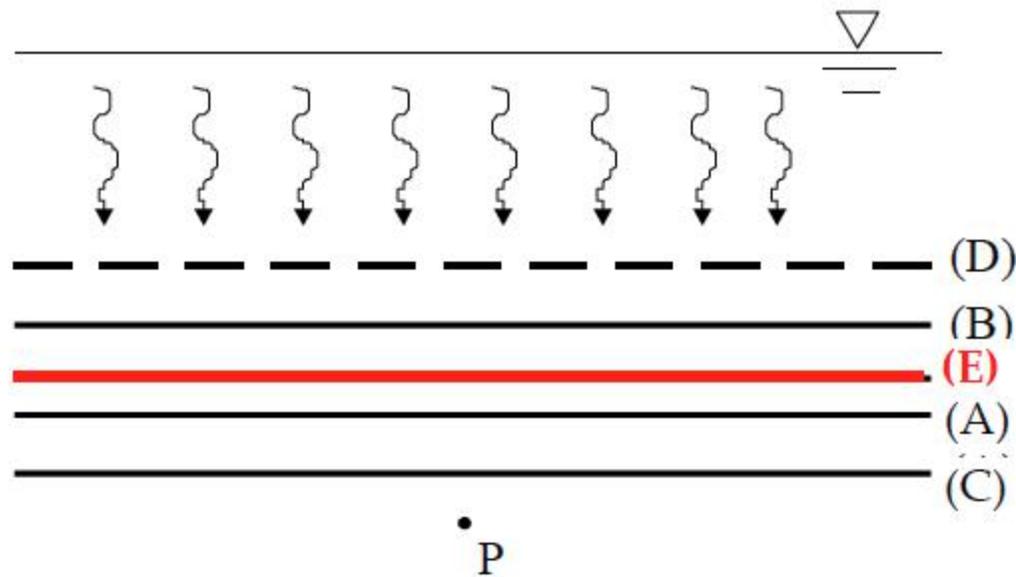
N.B. La fase di scarico avviene su una retta, BC, a pendenza inferiore (*linea di scarico*)
Quando si ritorna al livello tensionale iniziale (σ'_{vA}), una parte della deformazione (plastica) non viene recuperata (AA')

3) Risedimentazione (fase di ricarica)



N.B. La fase di ricarica avviene inizialmente sulla stessa retta BC (*fase elastica*), fino a raggiungere il valore massimo di tensione raggiunto nella sua storia (*pressione di preconsolidazione*), per poi muoversi nuovamente sulla linea di compressione vergine (*fase plastica*)

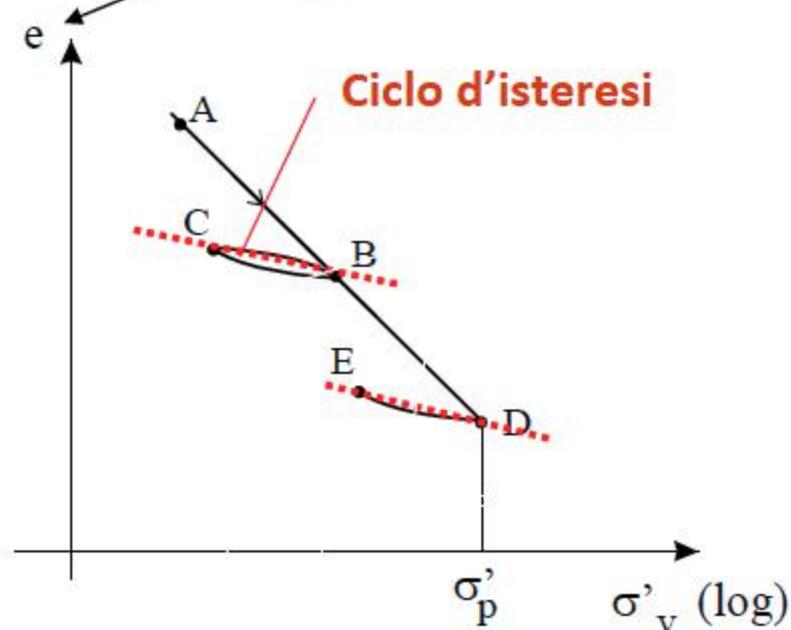
4) Nuova erosione (fase di scarico)



N.B. La fase di scarico avviene nuovamente su una retta a pendenza inferiore della linea di primo carico (la retta DE è parallela alla retta BC)

o ε_v per la relazione:

$$\varepsilon_v = -\frac{\Delta e}{1+e_0}$$

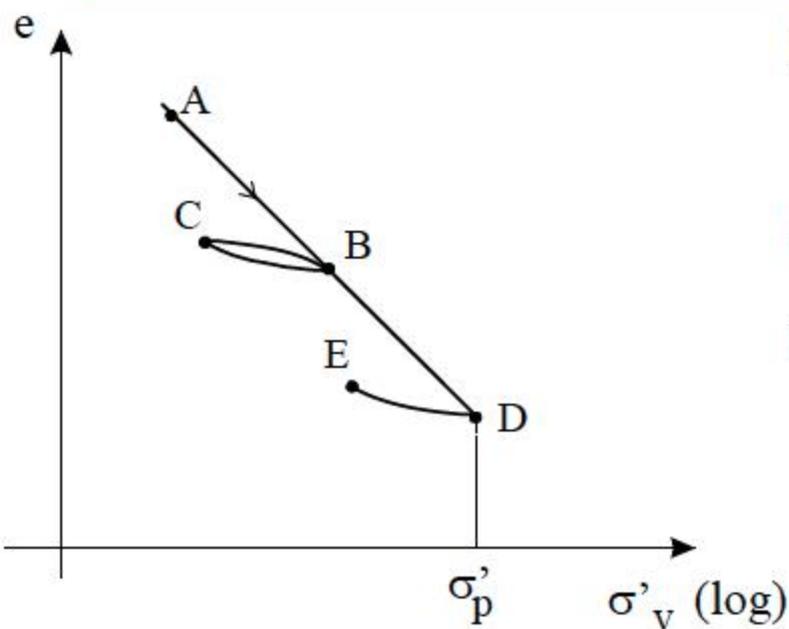


I. Nei **TRATTI AB e BD** il comportamento è *elasto-plastico con incrudimento positivo* (la maggior parte delle deformazioni prodotte durante la compressione vergine non viene recuperata nella successiva fase di scarico).

II. Nei **TRATTI BC, CB e DE** (approssimati con l'asse del ciclo d'isteresi) il comportamento è *elastico* (carico e scarico coincidono) *non lineare* (il legame tra tensioni e deformazioni è lineare in scala logaritmica, ovvero la rigidità cresce con la tensione efficace).

OSS. La pendenza dei tratti elastici di scarico-ricarico (BC, CB, DE) è la stessa e sono rappresentati da un ciclo a causa della dissipazione interna di energia del materiale

Def. La massima pressione verticale efficace sopportata dall'elemento di terreno durante la sua storia tensionale è detta pressione di consolidazione (o preconsolidazione), σ'_c .



I. Sulla linea di carico vergine (ABD) la pressione verticale efficace σ'_{v0} è pari alla pressione di preconsolidazione σ'_c :

⇒ terreno **NORMALCONSOLIDATO (NC)**

II. Nei tratti di scarico-ricarico BC, CB, DE la pressione verticale efficace σ'_{v0} è inferiore alla pressione di preconsolidazione σ'_c

⇒ terreno **SOVRACONSOLIDATO (OC)**

Si definisce rapporto di sovraconsolidazione (OCR):

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{v0}}$$

NOTE:

a) La pressione di consolidazione rappresenta la soglia elastica o di snervamento del materiale;

b) Il comportamento del terreno in condizioni edometriche è elastico non lineare-plastico a incrudimento positivo

DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA COMPRESSIBILITÀ EDOMETRICA

Determinare le *caratteristiche di compressibilità di un terreno* significa determinare, sul piano $e-\sigma'_v$ (o $\varepsilon_v-\sigma'_v$) l'andamento della linea di compressione vergine e dei rami di scarico e ricarico nelle *condizioni edometriche*, cioè nelle condizioni di carico e di vincolo presenti durante il processo di formazione di un deposito per sedimentazione:

- carico verticale infinitamente esteso
- strati orizzontali infinitamente estesi
- filtrazione e deformazioni solo verticali



Per studiare in laboratorio la compressibilità (e la consolidazione) nelle suddette condizioni viene eseguita una prova di compressione a espansione laterale impedita, detta *prova edometrica*

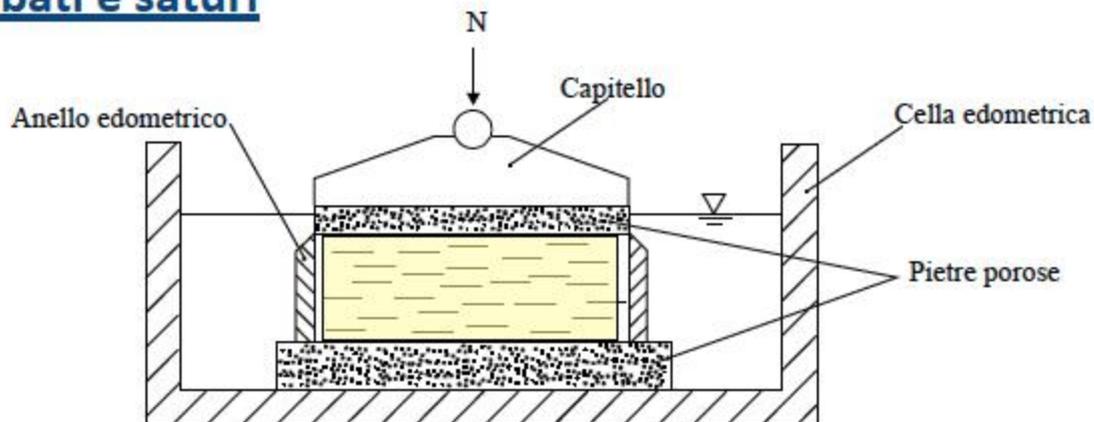
PROVA EDOMETRICA

La **prova edometrica** viene in genere eseguita su provini di terreno a grana fine (argille e limi) indisturbati e saturi

$$2.5 < \frac{D}{H_0} < 4$$

$$D = 6 \text{ cm}$$

$$H_0 = 2 \text{ cm}$$



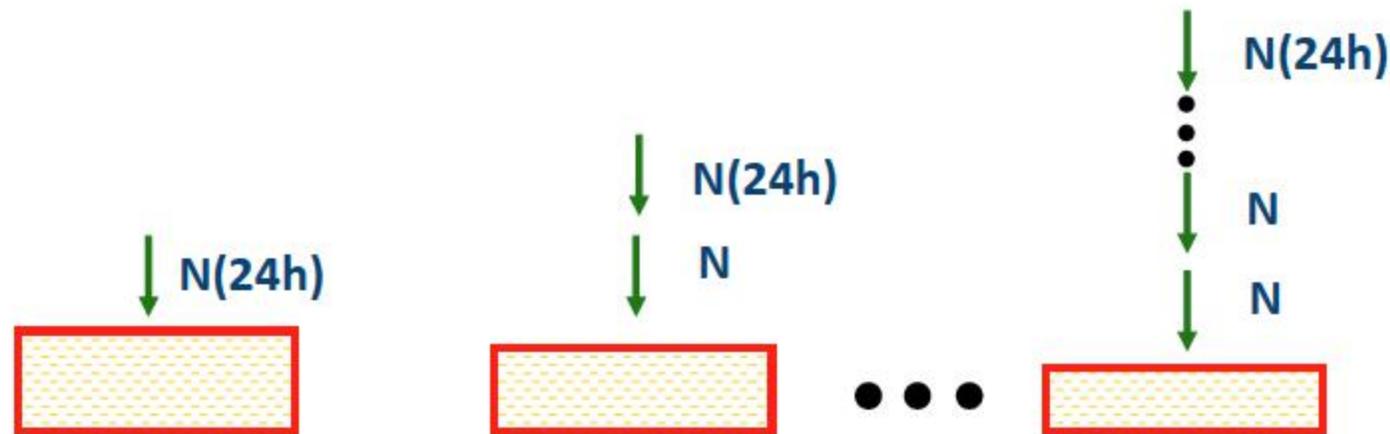
L'**anello edometrico** riproduce la condizione di assenza di deformazioni radiali

La **forma "schacciata"** del provino è motivata dalla necessità di:

- ridurre al minimo le tensioni tangenziali indesiderate di attrito e di aderenza con la parete dell'anello
- contenere i tempi di consolidazione (favorita anche dalla presenza di pietre porose e carta filtro alle estremità del provino)

Prova edometrica ad incrementi di carico (EdoLL)

- 1) Consiste nell'applicazione di un carico verticale N per successivi incrementi con progressione geometrica (di norma a partire da 25 kPa fino a $6 \div 8 s'_p$) ed eventuali decrementi (in fase di scarico), ciascuno mantenuto il tempo necessario ad esaurire il cedimento di consolidazione primaria (in genere 24h).



- 2) Durante l'applicazione di ciascun gradino di carico viene misurata l'altezza del provino, H , nel tempo $\longrightarrow H_1(t), H_2(t), \dots, H_n(t)$

Modalità di interpretazione:

- a) Esaurite le 24 h di carico, a partire dal diagramma $H_i(t)$, per ciascun gradino di carico, viene determinata sperimentalmente (*metodo di Casagrande o Taylor*) l'altezza iniziale, $H_{0,i}$, e finale, $H_{fin,i}$ corrispondenti alla fase di **consolidazione primaria** (ovvero calcolate trascurando gli effetti della viscosità)
- b) Quindi partendo dal valore dell'indice dei vuoti, e_0 , e dell'altezza del provino, H_0 , misurati prima dell'inizio della prova, è possibile determinare per ciascun gradino di carico:

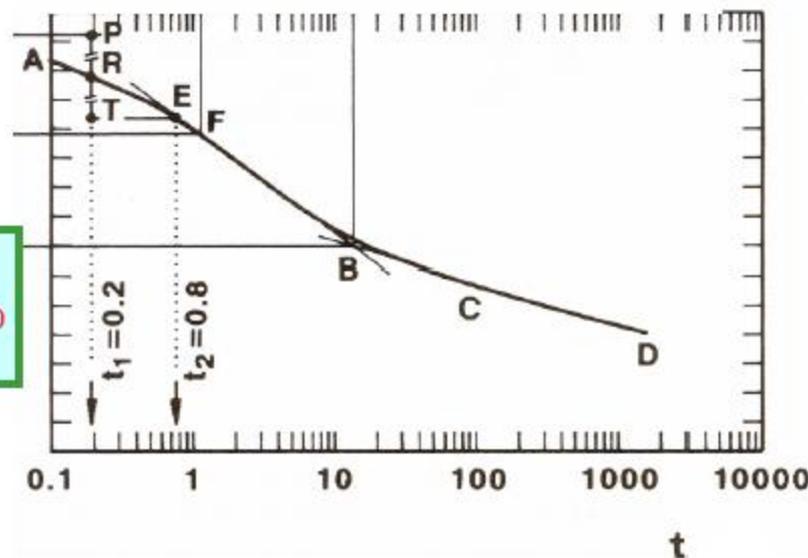
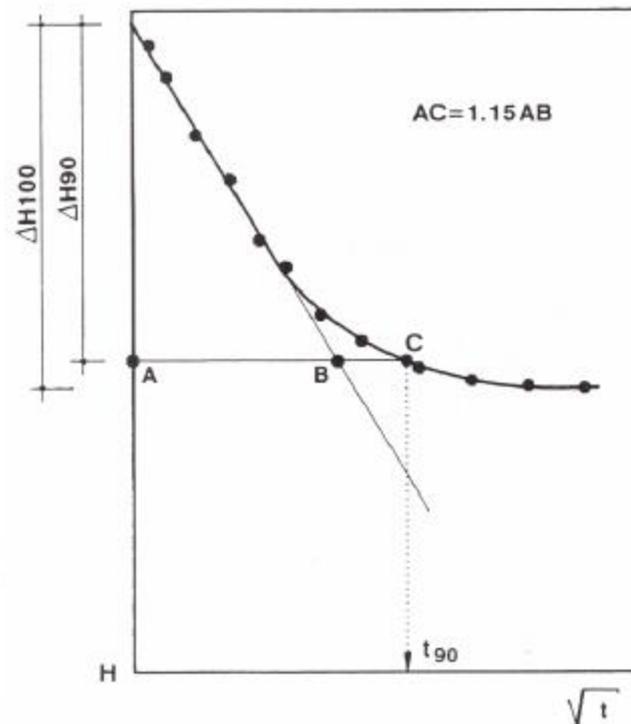
$$\varepsilon_{v,i} = \varepsilon_{a,i} = -\frac{\Delta H_i}{H_0} = -\frac{H_{fin,i} - H_0}{H_0}$$

$$\Delta e_i = e_{fin,i} - e_0 = \frac{\Delta H_i}{H_0} \cdot (1 + e_0)$$

$$e_{fin,i} = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot (1 + e_0) + e_0$$

$$\sigma'_{v,i} = \frac{N_i}{A} = \frac{4 \cdot N_i}{\pi \cdot D^2}$$

*pressione verticale
media efficace*



CURVA DI COMPRESSIBILITÀ EDOMETRICA

Riportando in grafico le coppie di valori $e_i (e_{vi})$, σ'_{vi} per i diversi gradini di carico e di scarico si ottiene la **curva di compressibilità edometrica**, nella quale si possono distinguere:

➤ un **tratto iniziale a debole pendenza** (punti 1-2)

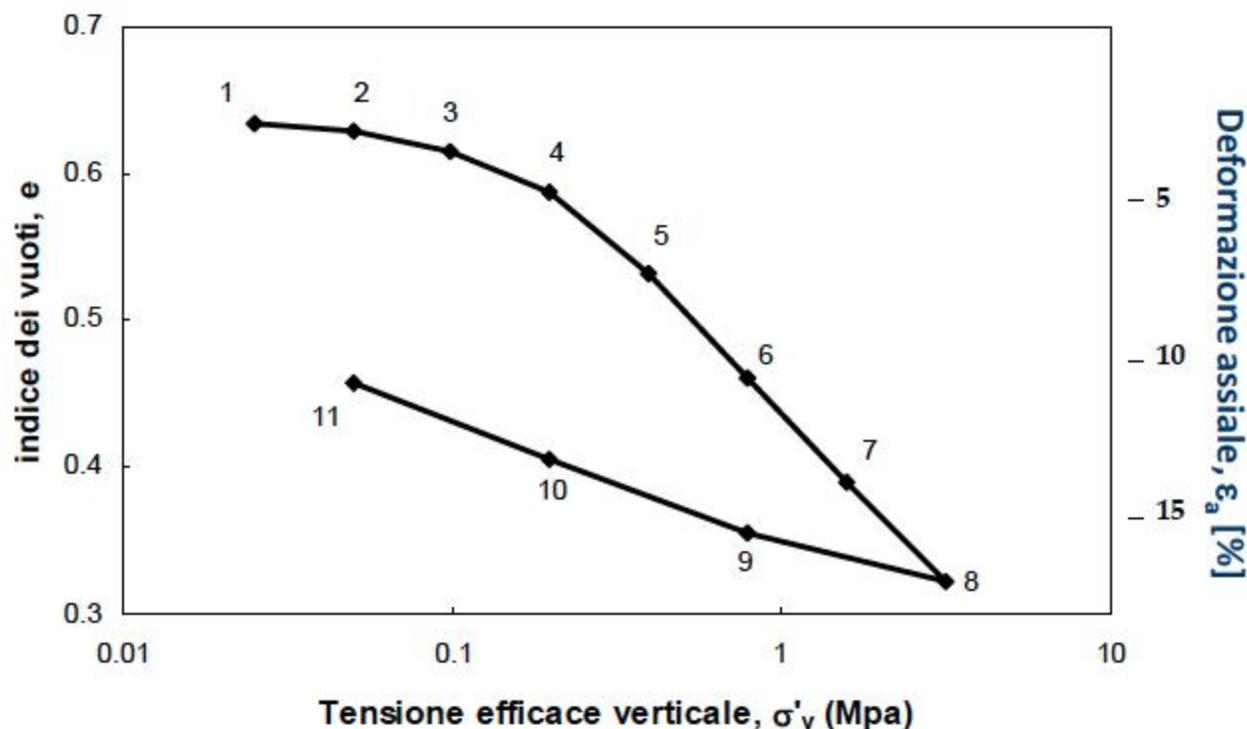
➤ un **tratto intermedio a pendenza crescente** (punti 2-5)

➤ un **tratto finale a pendenza maggiore e quasi costante** (punti 5-8)

➤ un **tratto di scarico** (punti 8-11) a pendenza minore e quasi costante (confrontabile con la pendenza del tratto iniziale 1-2)

N.B. La curva $\varepsilon_a(\varepsilon_v)-\sigma'_v$ ha lo stesso andamento di $e-\sigma'_v$ (e è proporzionale a ε_a)

$$e_{fin} = \varepsilon_a \cdot (1 + e_0) + e_0$$



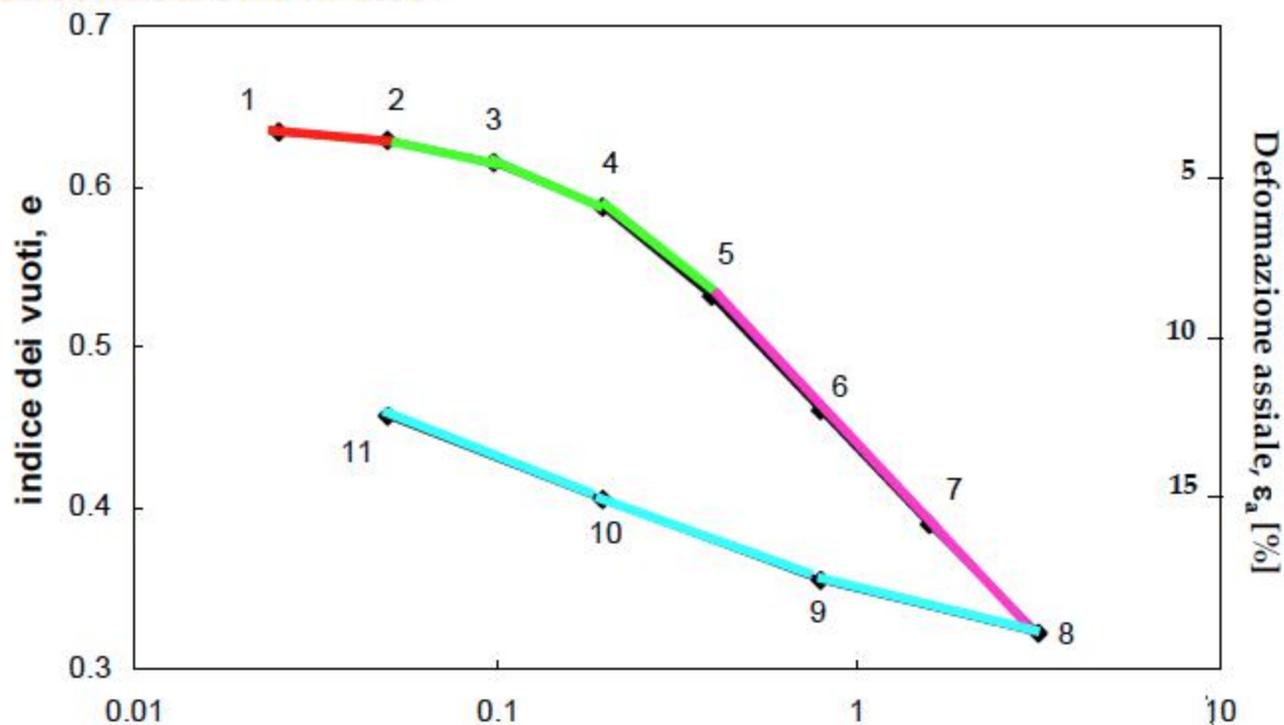
Interpretazione della curva di compressibilità edometrica:

Per l'interpretazione della curva edometrica è da tener presente la STORIA TENSIONALE DEL PROVINO:

1. Il provino, quando si trova in sito, è soggetto alla **pressione litostatica**, σ'_{v0}
2. Durante il campionamento, l'estrazione, il trasporto, l'estrusione dal campionatore, subisce una serie di disturbi e una decompressione fino a pressione atmosferica in condizioni di espansione libera
3. A causa della decompressione il provino si espande e, mantenendosi costante il contenuto d'acqua, si riduce il grado di saturazione e si generano pressioni interstiziali negative
4. Poi viene fustellato con l'anello metallico della prova edometrica e inserito nella cella riempita d'acqua, dove in parte rigonfia assorbendo acqua in condizioni di espansione laterale impedita ritornando saturo
5. Infine inizia la fase di carico

Con la *curva sperimentale di compressione edometrica e-log σ'_v* si determinano i principali *parametri di compressibilità* e la *pressione di consolidazione in sito*.

1. Il **tratto iniziale della curva** (punti 1-2) corrisponde ad una ricomprensione in condizioni edometriche che segue ad uno scarico (non riportato sul grafico) non edometrico. Perciò non è rettilineo, e comunque non ha pendenza eguale a quella del ramo di scarico.
2. Il **secondo tratto della curva** (punti 2-5) è marcatamente curvilineo e comprende il valore σ'_p della *pressione di consolidazione in sito*
3. Il **terzo tratto della curva** (punti 5-8) corrisponde ad una compressione edometrica vergine e ha pendenza quasi costante
4. Il **quarto tratto della curva** (punti 8-11) corrisponde ad un ramo di scarico edometrico e ha pendenza quasi costante.



PARAMETRI DI COMPRESSIBILITÀ

La curva viene approssimata con tratti rettilinei a differente pendenza; il tratto “ginocchio” (punti 2-5) è sostituito con un punto angolare (punto A), corrispondente alla **pressione di consolidazione**, σ'_p (in sito):

INDICE DI RICOMPRESSIONE

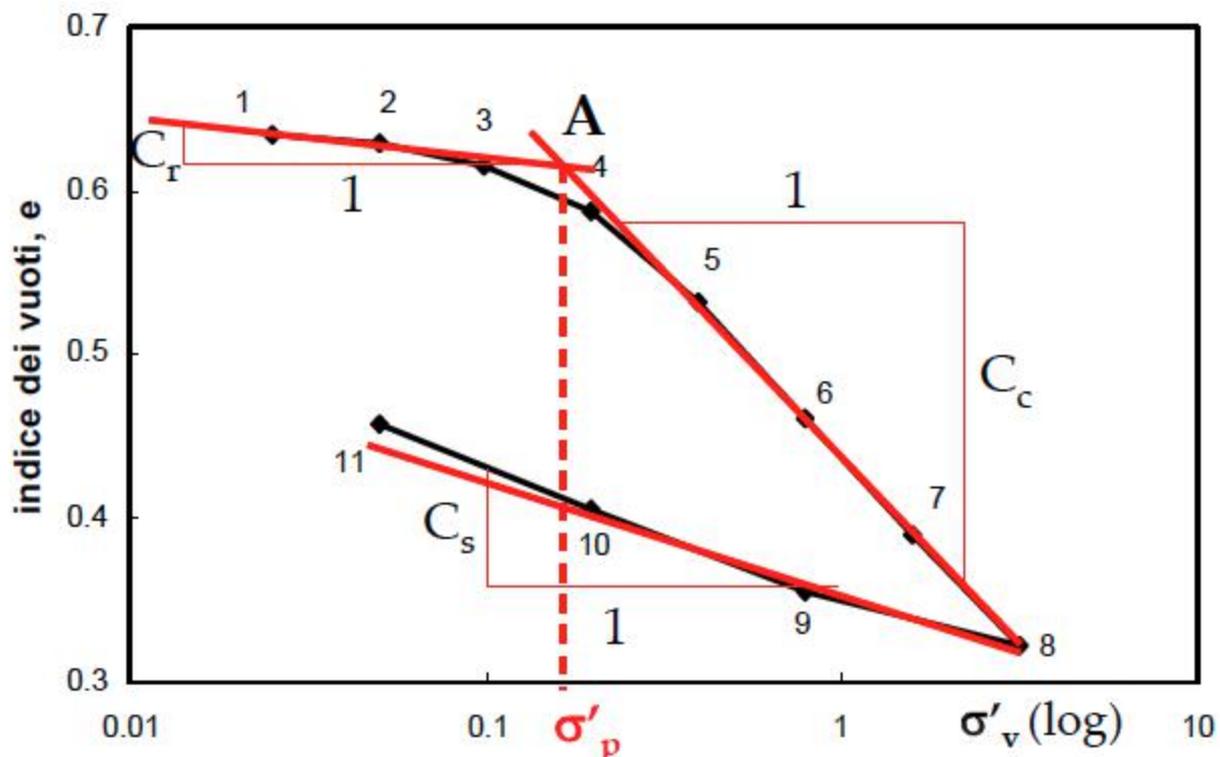
$$C_r = \frac{(e_1 - e_2)}{(\log_{10} \sigma'_{v2} - \log_{10} \sigma'_{v1})}$$

INDICE DI COMPRESSIONE

$$C_c = \frac{(e_7 - e_8)}{(\log_{10} \sigma'_{v8} - \log_{10} \sigma'_{v7})}$$

INDICE DI RIGONFIAMENTO

$$C_s = \frac{(e_9 - e_8)}{(\log_{10} \sigma'_{v8} - \log_{10} \sigma'_{v9})}$$

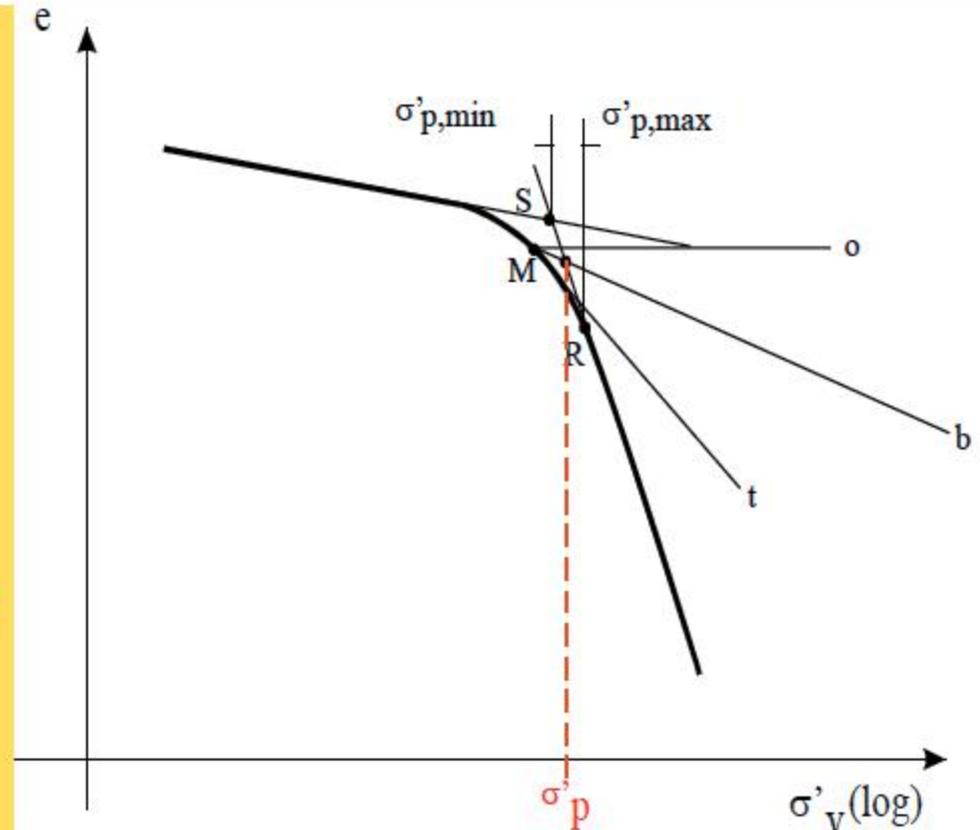


TIPICAMENTE: C_r poco significativo; $C_c = 0.009 \cdot (w_L - 10) \cong 0.1 \div 0.8$; $C_s = 1/5 \div 1/10 C_c$

PRESSIONE DI PRECONSOLIDAZIONE

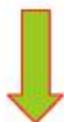
Per determinare con maggiore precisione la **pressione di preconsolidazione** sono state proposte varie procedure, tra cui la più comunemente utilizzata è quella di **Casagrande**, che prevede i seguenti passi:

1. si determina il punto di massima curvatura (M) del grafico $e-\log\sigma'_v$
2. si tracciano per M la retta tangente alla curva (t), la retta orizzontale (o), e la retta bisettrice (b) dell'angolo formato da t e o
3. l'intersezione di b con la retta corrispondente al tratto terminale della curva di primo carico individua la pressione di preconsolidazione.



Il disturbo tende a distruggere la struttura del terreno (e quindi la memoria dello stato tensionale), rendendo meno pronunciato il passaggio dal tratto di ricomprensione a quello di compressione:

- ⇒ la pressione di preconsolidazione è meno riconoscibile
- ⇒ le pendenze non sono rappresentative dei parametri di compressibilità in sito.



È più difficoltosa la determinazione di, C_c e σ'_p

Per stimare la curva di compressibilità in sito (e quindi la pressione di preconsolidazione in sito) si possono applicare delle procedure di correzione alla curva di compressibilità ottenuta in laboratorio (*Schmertmann, 1955*)

