

METODI DI CALCOLO
PER
STIMA DEI CEDIMENTI
PER
FONDAZIONI DIRETTE

PRINCIPIO DELLE TENSIONI EFFICACI

Provino saturo:

A_T : superficie complessiva del provino

A_i : superficie del singolo grano

$$A_T > \sum A_i = A_C$$

Equilibrio alla traslazione verticale

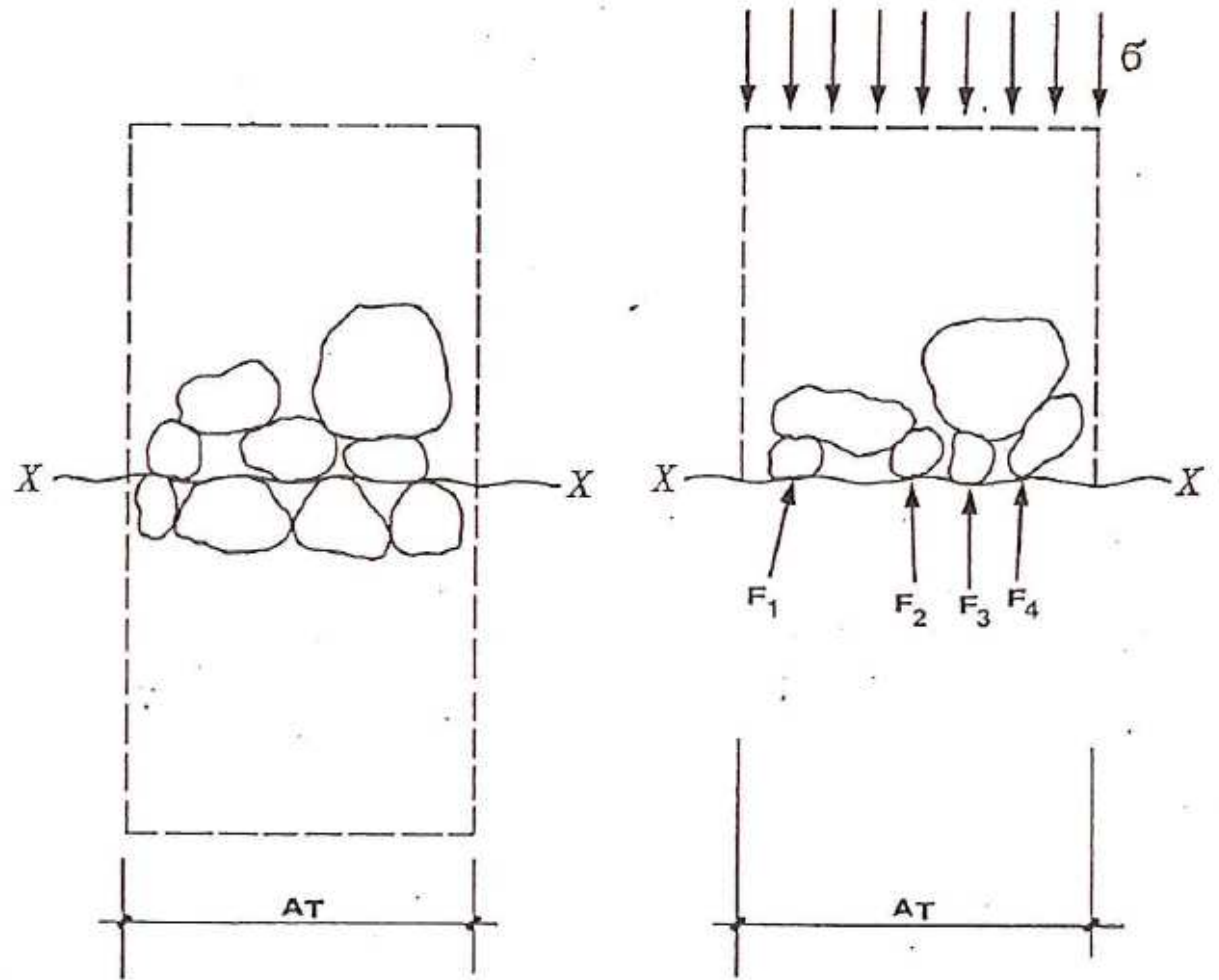
$$\sigma \cdot A_T = \sum F_i + u \cdot (A_T - A_C) \cong \sum F_i + u \cdot (A_T)$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{\sum F_i}{A_T} + u = \sigma' + u$$

Compressibilità

Resistenza al taglio

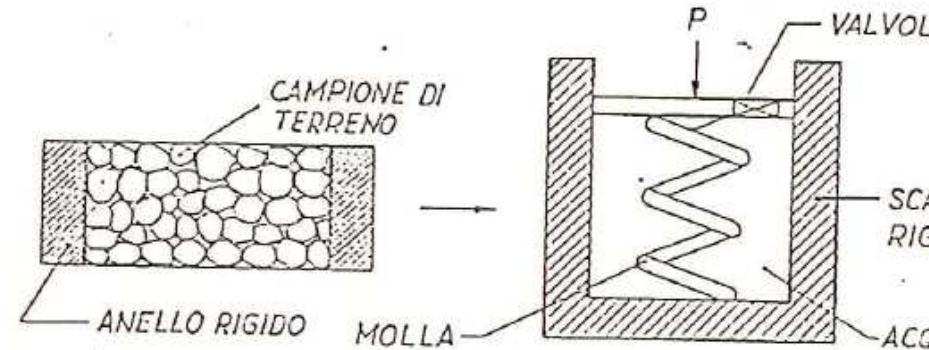
Pressione per presenza di acqua



TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE – TERZAGHI (1923)

La valvola simula la permeabilità del terreno

La molla simula lo scheletro solido del campione di terreno



Fase 1 – valvola chiusa:

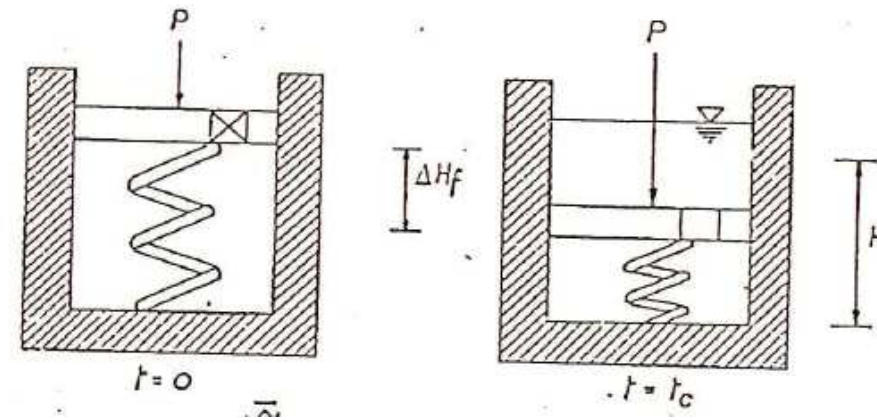
Il carico applicato è tutto a carico dell'acqua presente, la molla è scarica

Fase 2 – valvola aperta:

Il carico inizia a distribuirsi anche sulla molla con fuori uscita di acqua dalla valvola ed abbassamento del pistone

Fase 3 – termine prova:

Tutto il carico è affidato alla molla e l'abbassamento del pistone dipende dalla rigidezza di essa. Si raggiunge un equilibrio idrostatico



TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE – TERZAGHI (1923)

Fase 1: $t = 0; \Delta u = \frac{P}{A}; \Delta \sigma' = 0$

Fase 2: $0 < t < t_c; 0 < \Delta u < \frac{P}{A}; 0 < \Delta \sigma' < \frac{P}{A}$

Fase 3: $t = t_c; \Delta u = 0; \Delta \sigma' = \frac{P}{A}$

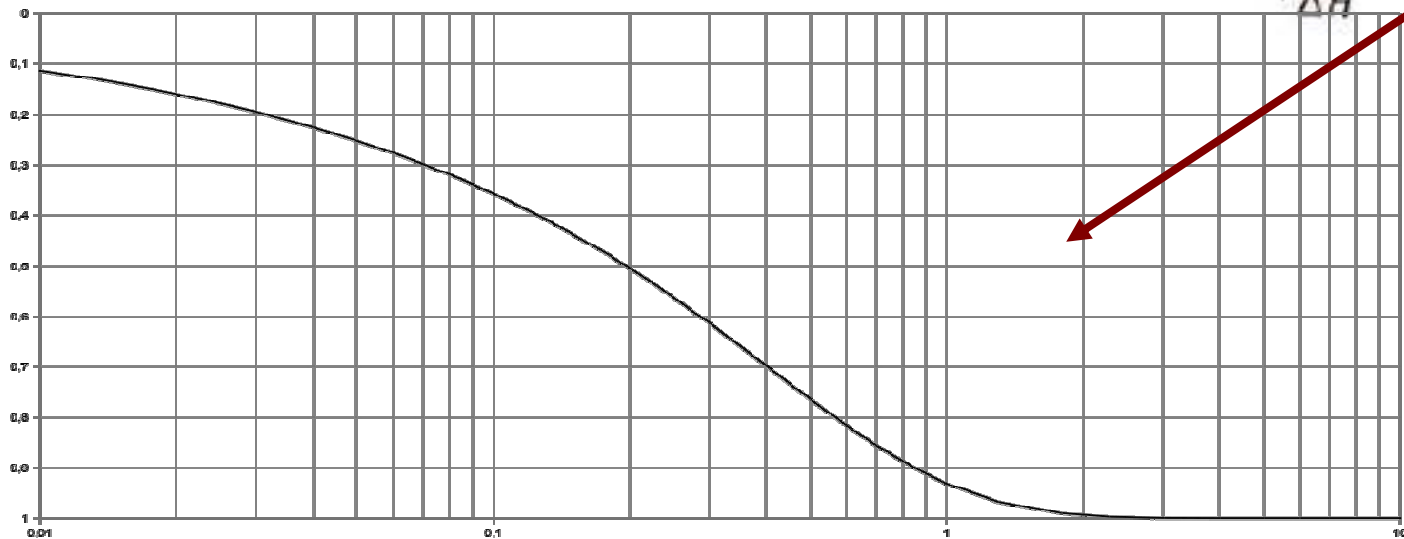
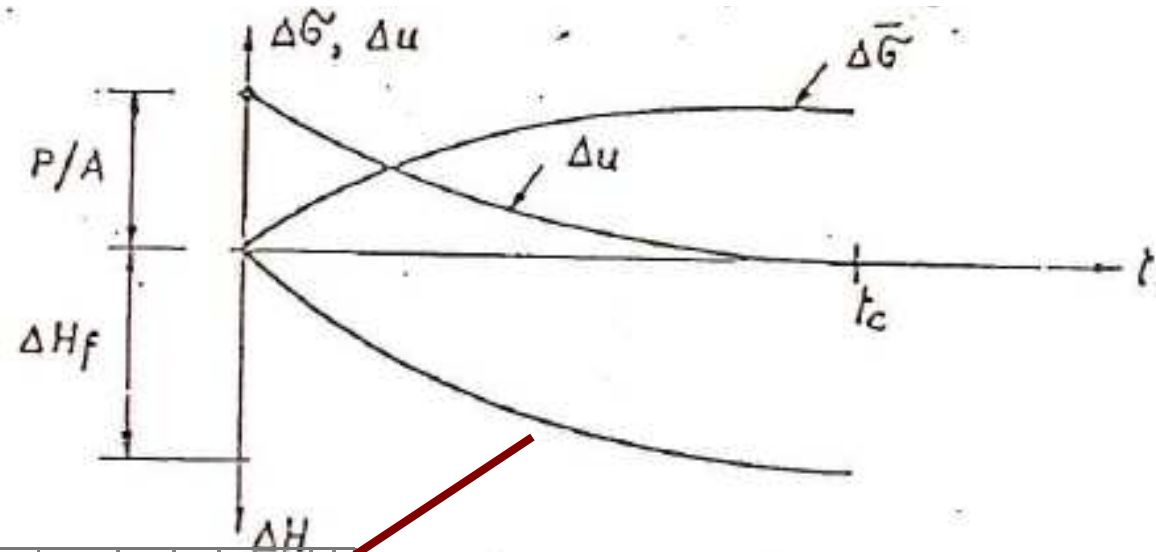
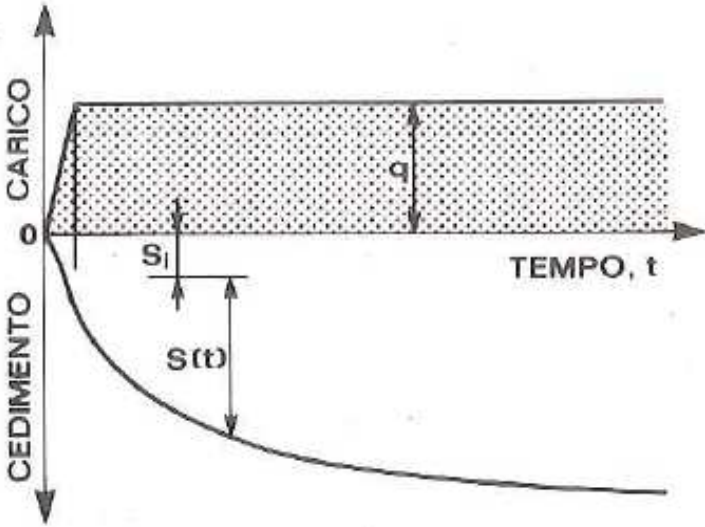
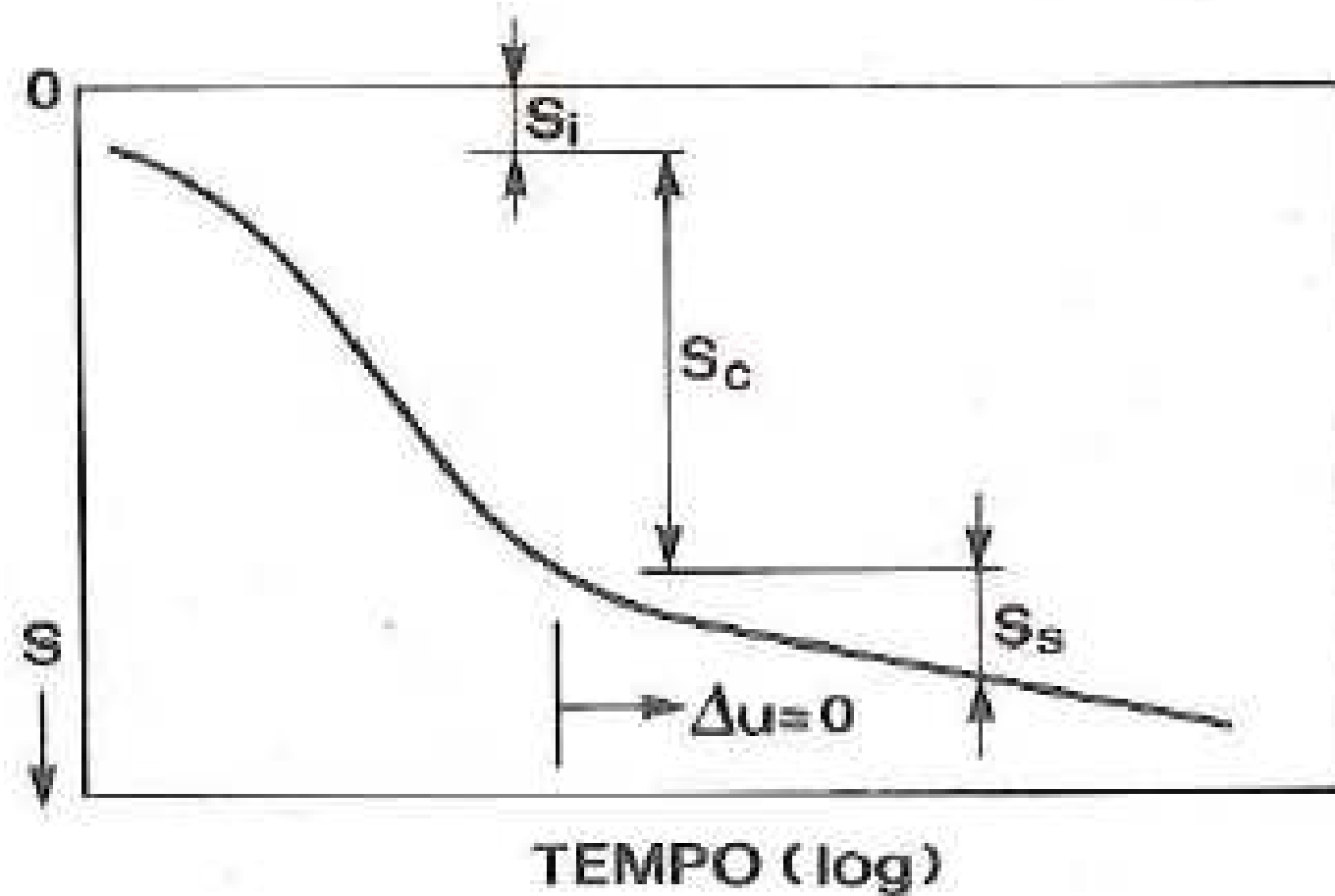


Diagramma $\Delta H - \lg(t)$

TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE – Ruolo della permeabilità del terreno



- Si: cedimento immediato
- Sc: cedimento per consolidamento primario
- Ss: cedimento per consolidamento secondario



TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE – Ruolo della permeabilità del terreno

Terreni grana fine → Permeabilità bassa → fasi di consolidazione distribuite nel tempo

$$S_{tot} = S_j + S_c + S_s$$

Terreni a grana grossa: → Permeabilità elevata → fasi di consolidazione pressochè immediate

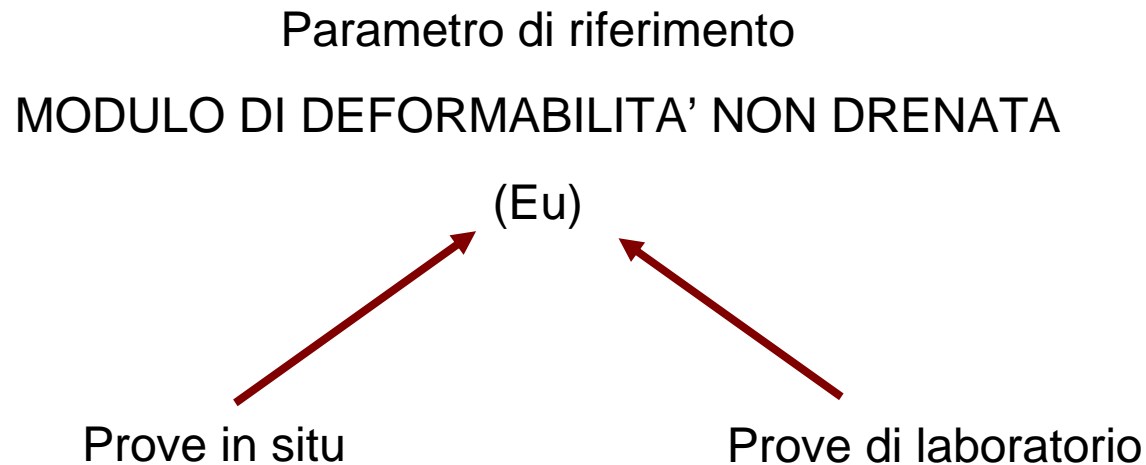
$$S_{tot} = S_j \cong S_c$$

$$S_s \cong 0$$

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' – Cedimento immediato

Il cedimento viene misurato convenzionalmente al termine della realizzazione di un'opera.

Si considera una compressione a volume costante (condizioni NON drenate)



PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' – Cedimento per consolidazione primaria

Progressiva dissipazione delle sovrappressioni interstiziali ed incremento carico sullo scheletro solido

• Prova edometrica:

Provino saturo

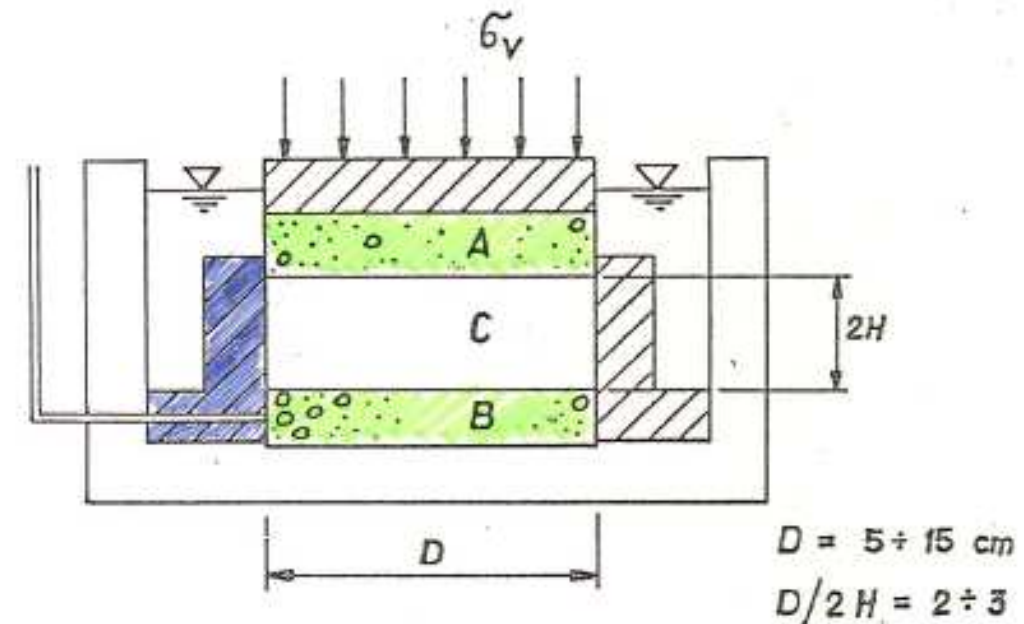
Espansione radiale impedita (anello cilindrico)

Step di carico crescenti ad intervalli costanti

Letture risultati:

Ad ogni step di carico si rileva l'abbassamento del provino

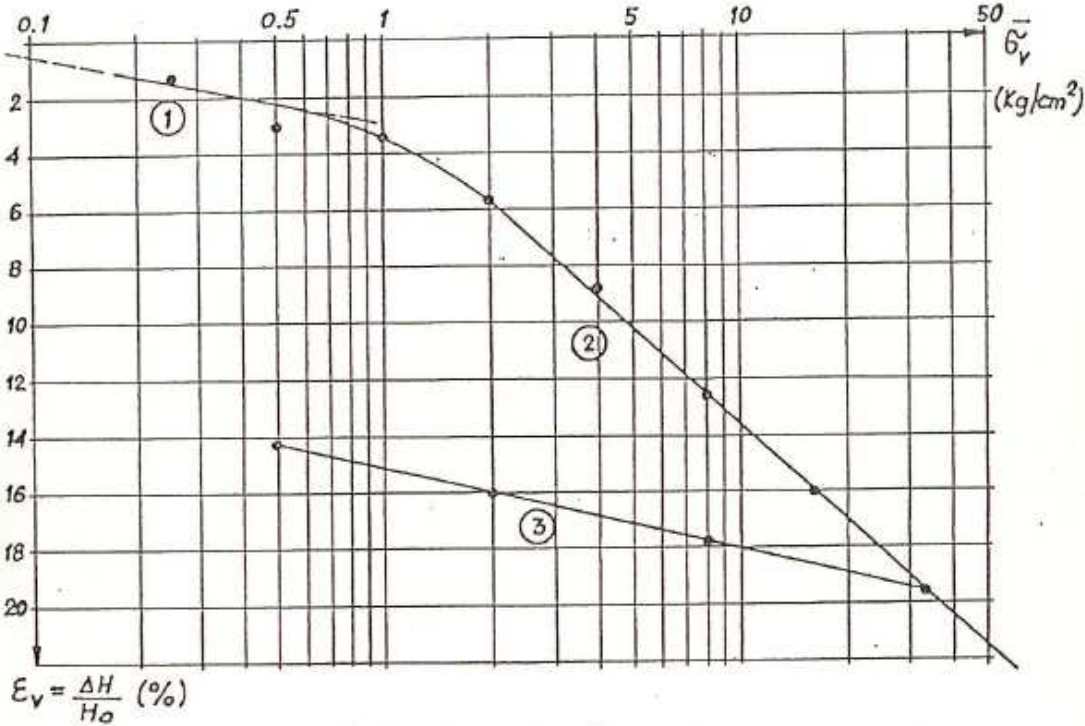
I risultati sono riportati in diagrammi



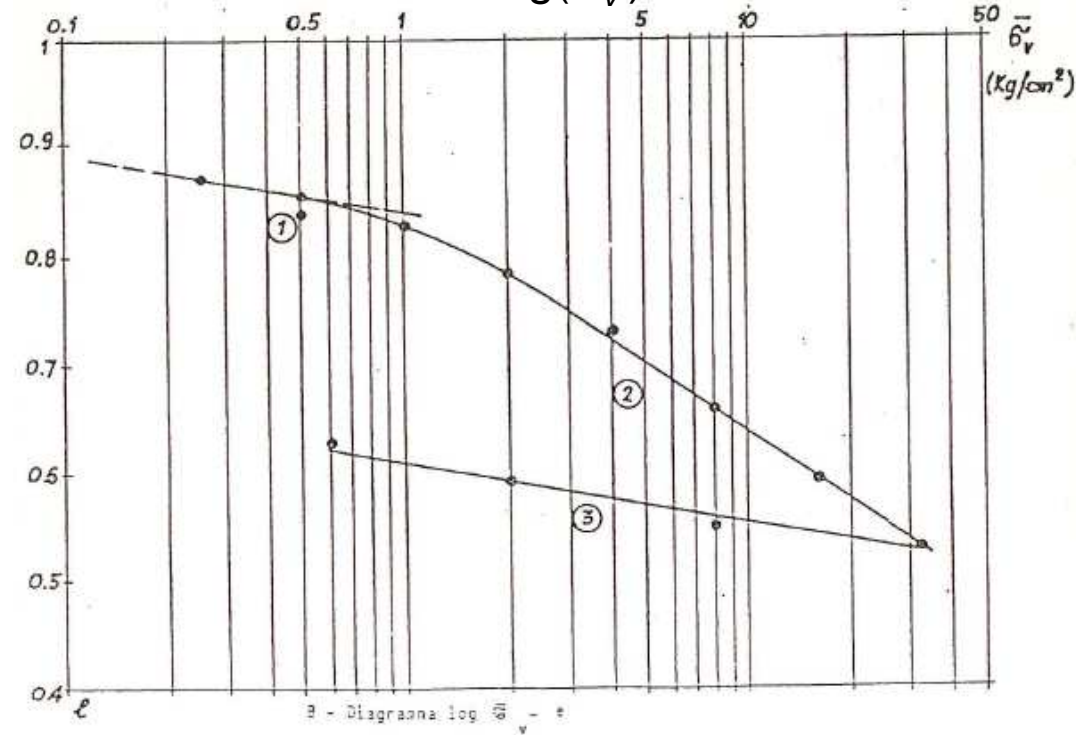
A, B = pietre porose
 C = campione di terreno

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' – Cedimento per consolidazione primaria

$\varepsilon - \log(\sigma'_v)$



$e - \log(\sigma'_v)$



Rapporto di compressione (CR)

Rapporto di ricomprensione (RR)

Rapporto di rigonfiamento (SR)

$$\Delta\varepsilon / \Delta\log(\sigma'_v)$$

Indice di compressione (Cc)

Indice di ricomprensione (Cr)

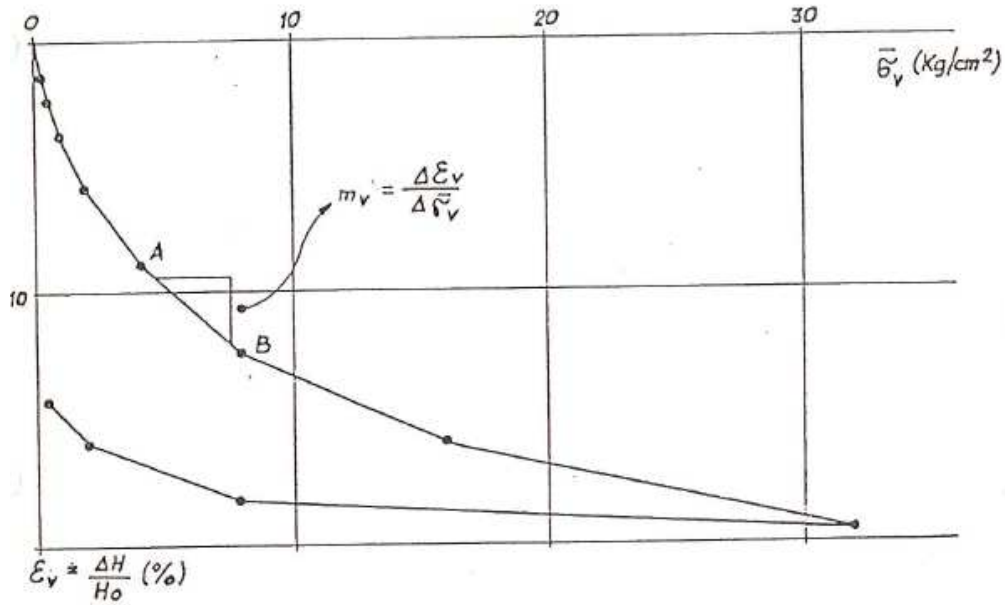
Indice di rigonfiamento (Cs)

$$\Delta e / \Delta\log(\sigma'_v)$$

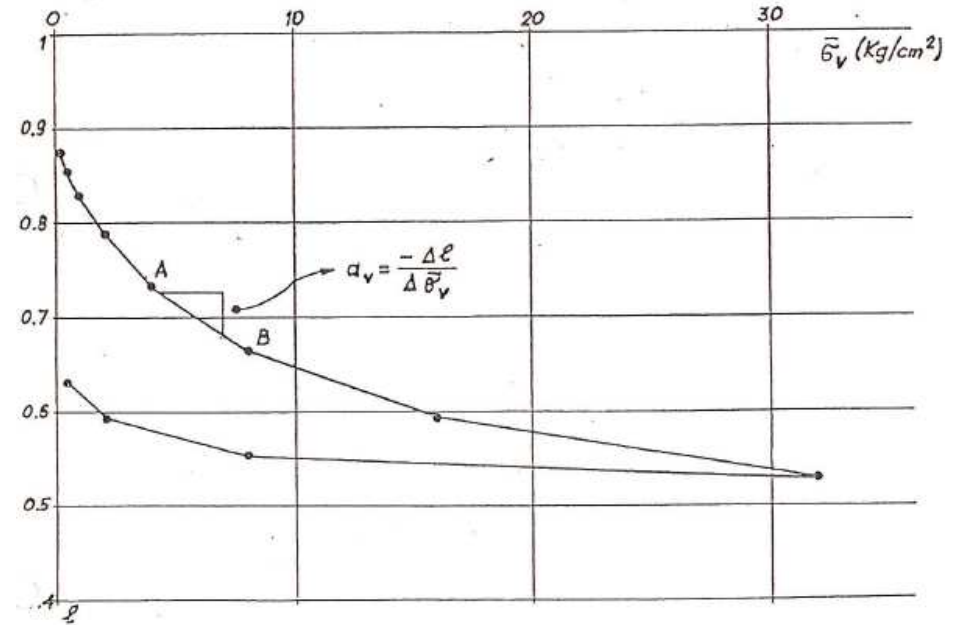
$$\Delta\varepsilon = \Delta e / (1 + e_0)$$

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' – Cedimento per consolidazione primaria

$$\varepsilon - \sigma'_v$$



$$e - \sigma'_v$$



Coefficiente di compressibilità

$$m_v = \Delta \varepsilon / \Delta(\sigma'_v)$$

Indice di compressibilità

$$a_v = \Delta e / \Delta(\sigma'_v)$$

Modulo Edometrico

$$E_{ed} = 1 / m_v$$

$$a_v = m_v \cdot (1 + e_0) = 0.435 \cdot (C_r / \sigma'_v)$$

DEFINIZIONE MODULO EDOMETRICO (Ed)

Formulazione empirica (Mitchell & Gardner 1975)

$$E_d = \alpha \cdot q_c$$

	$M = \frac{1}{m_v} = \frac{2,3 \cdot (1+e) \cdot \sigma'_v}{C_c} = \alpha \cdot q_c$	
Argille di bassa plasticità (CL)	$q_c < 0,7 \text{ MPa}$	$3 < \alpha < 8$
	$0,7 < q_c < 2,0 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 5$
Limi di bassa plasticità (ML)	$q_c > 2,0 \text{ MPa}$	$1 < \alpha < 2,5$
	$q_c < 2,0 \text{ MPa}$	$3 < \alpha < 6$
Argille e limi di elevata plasticità (CH, MH)	$q_c > 2,0 \text{ MPa}$	$1 < \alpha < 3$
	$q_c < 2,0 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 6$
Limi organici (OL)	$q_c < 1,2 \text{ MPa}$	$2 < \alpha < 8$
Torbe e argille organiche (Pt, OH)	$q_c < 0,7 \text{ MPa}$	$1,5 < \alpha < 4$
	$50 < w^* < 100$	$1 < \alpha < 1,5$
	$100 < w < 200$	$1 < \alpha < 1,5$
	$w > 200$	$0,4 < \alpha < 1$

*w = contenuto in acqua (%)

Formulazione empirica (Buisman - Sanglerat) – valido per sabbie argillose: $E_d = \alpha \cdot q_c$

Dove $\alpha = 1.5 \div 7$ aumentando al diminuire della granulometria e della Rp

DEFINIZIONE MODULO EDOMETRICO (Ed)

Trattazione per terreni grana grossa:

Formulazione empirica (Robertson & Campanella) da diagramma di Schmertmann (Ed espresso in kg/cmq)

$$E_d = 0.03 \cdot q_c + 11.7 \cdot \sigma'_{v0} + 0.79 \cdot D_r (\%)$$

<i>Trattazione Lunne-Christoffersen (1983)</i>		
Sabbie	$E_d = \alpha \cdot q_c$	Limite
Non cementate	Ed (MPa) = 4 qc	qc > 10 Mpa
	Ed (MPa) = 2 qc + 20	per 10 Mpa < qc < 50 Mpa
	Ed (MPa) = 120	qc > 50 Mpa
Sovra cementate	Ed (MPa) = 5 qc	qc < 50 Mpa
	Ed (MPa) = 250	per qc > 50 Mpa

PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' – Rapporto cedimento - tempo

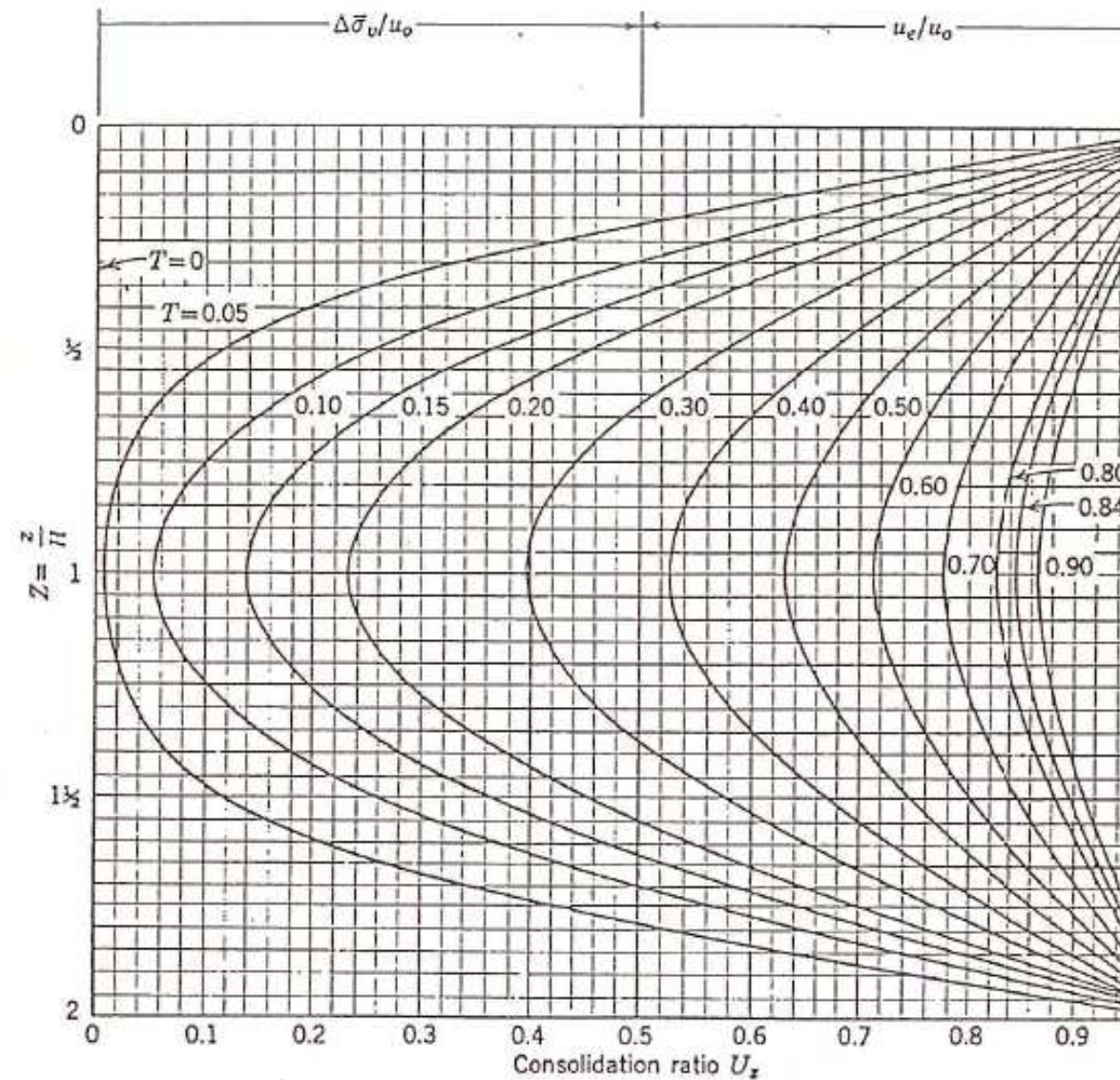
Parametri di riferimento:

U%: grado di consolidazione medio [%]

Tv: fattore di tempo [-]

Cv: coefficiente di consolidazione [m²/sec]

H: massimo percorso dell'acqua pari a metà provino nel caso di prova edometrica [m]

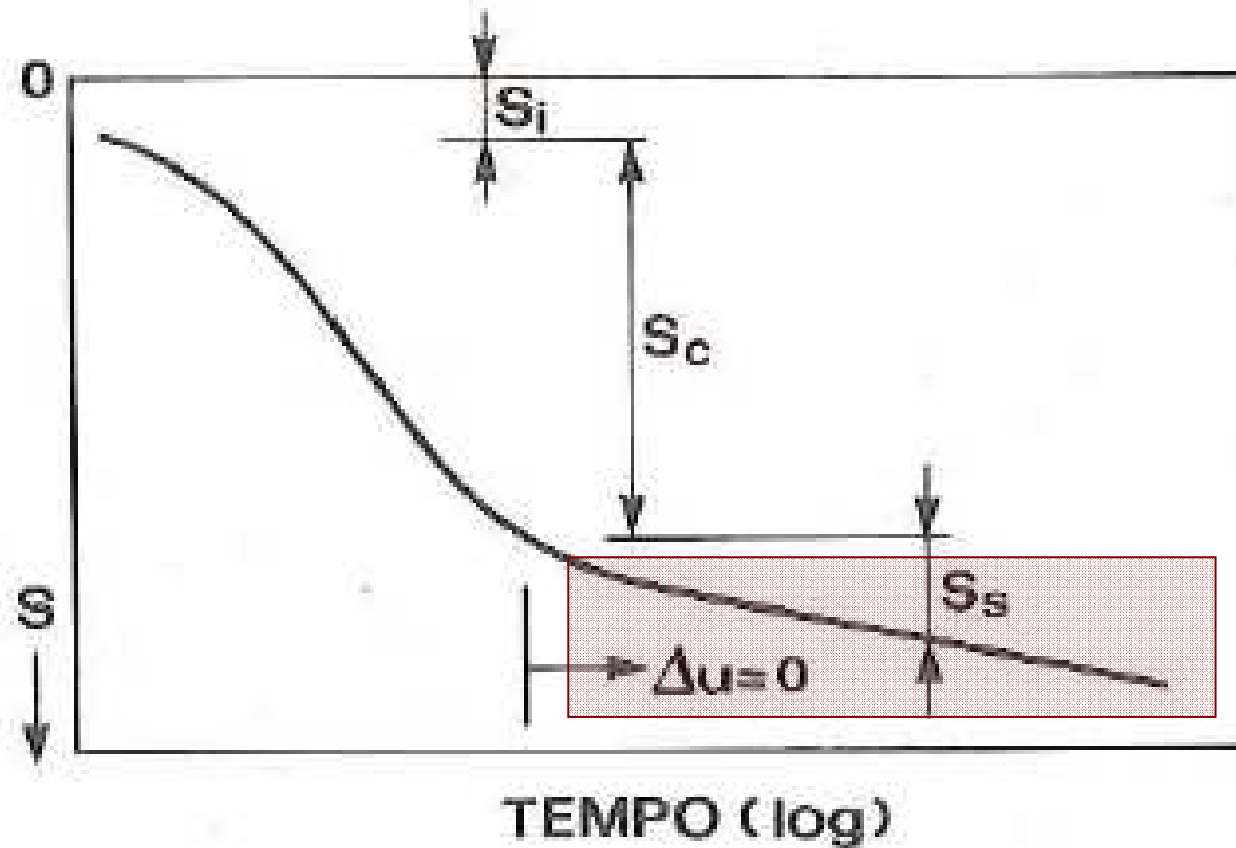
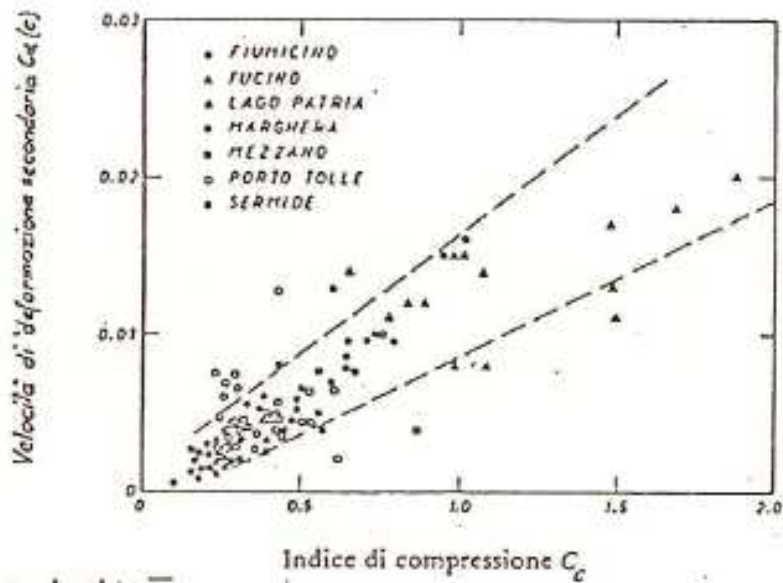


PARAMETRI DI COMPRESSIBILITA' – Cedimento per consolidazione secondaria

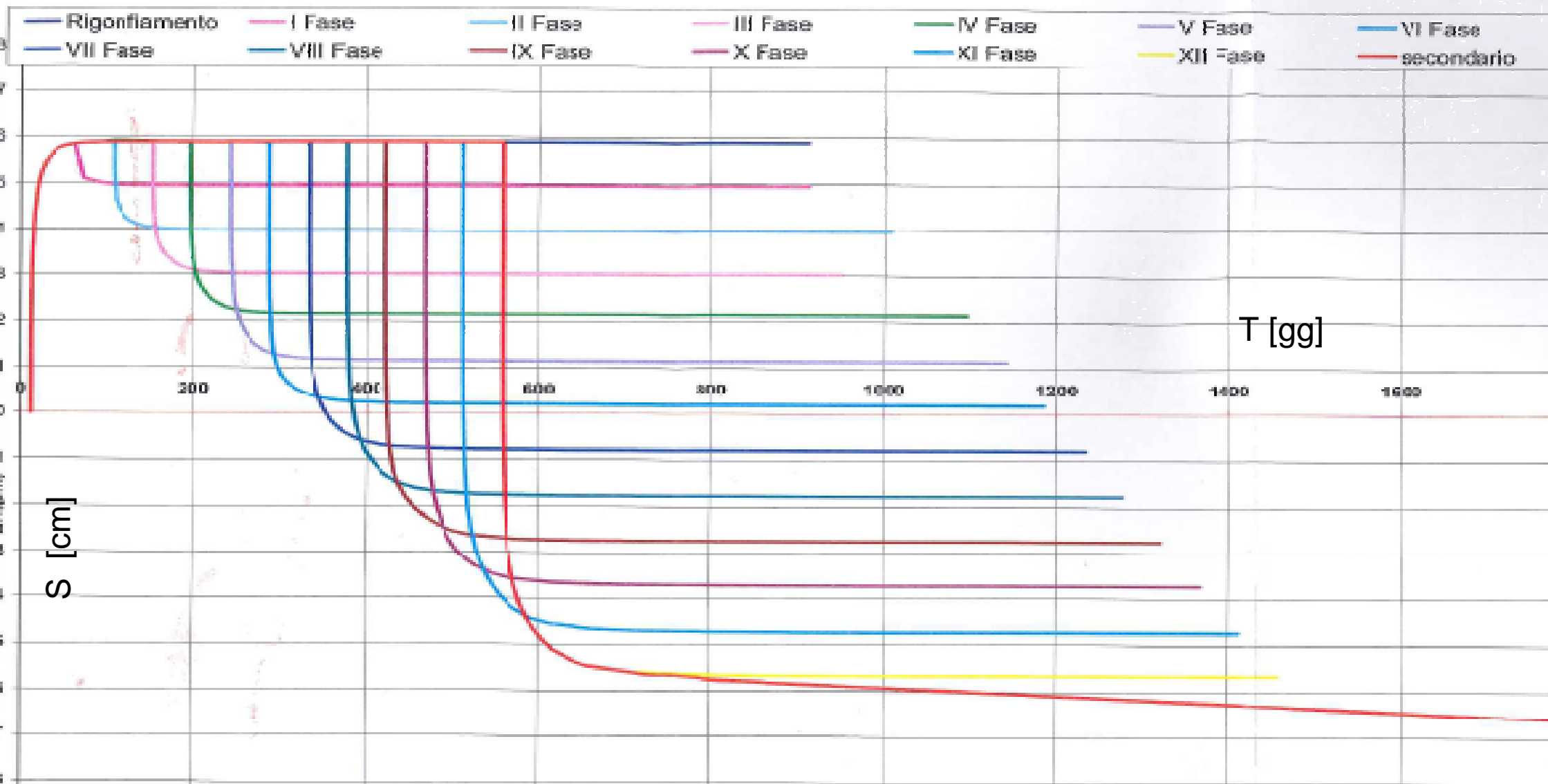
Coefficiente di consolidazione secondaria:

$$C_{\alpha} = \Delta \varepsilon / \Delta \log(t)$$

$$C_{\alpha} = (0.4\% - 0.5\%) \cdot C_c$$



ESEMPIO ANDAMENTO CEDIMENTI NEL TEMPO – CASO REALE



STIMA CEDIMENTI – TERRENI A GRANA GROSSA

Metodo Burland-Burbridge:
$$s = f_s \cdot f_h \cdot f_t \cdot \left(\sigma'_{v0} \cdot b^{0.7} \cdot I_c / 3 + (q' - \sigma'_{v0}) \cdot b^{0.7} \cdot I_c \right)$$

lc:	indice di compressibilità	$I_c = \frac{1.706}{N_{SPT,medio}^{1.4}}$	
fh:	fattore correttivo in funzione dello spessore dello strato		$f_h = \frac{H}{z_i} (2 - H/z_i)$
fs:	fattore correttivo in funzione della forma	$f_s = \left(\frac{1.25 \cdot l/b}{l/b + 0.25} \right)^2$	
ft:	fattore correttivo in funzione della componente viscosa		$f_t = (1 + R3 + R \cdot \log(t/3))$

STIMA CEDIMENTI – TERRENI A GRANA GROSSA

Metodo Schmertmann:
$$s = C_1 \cdot C_2 \cdot \Delta q'_t \cdot \sum \frac{I_z \cdot \Delta z}{E'}$$

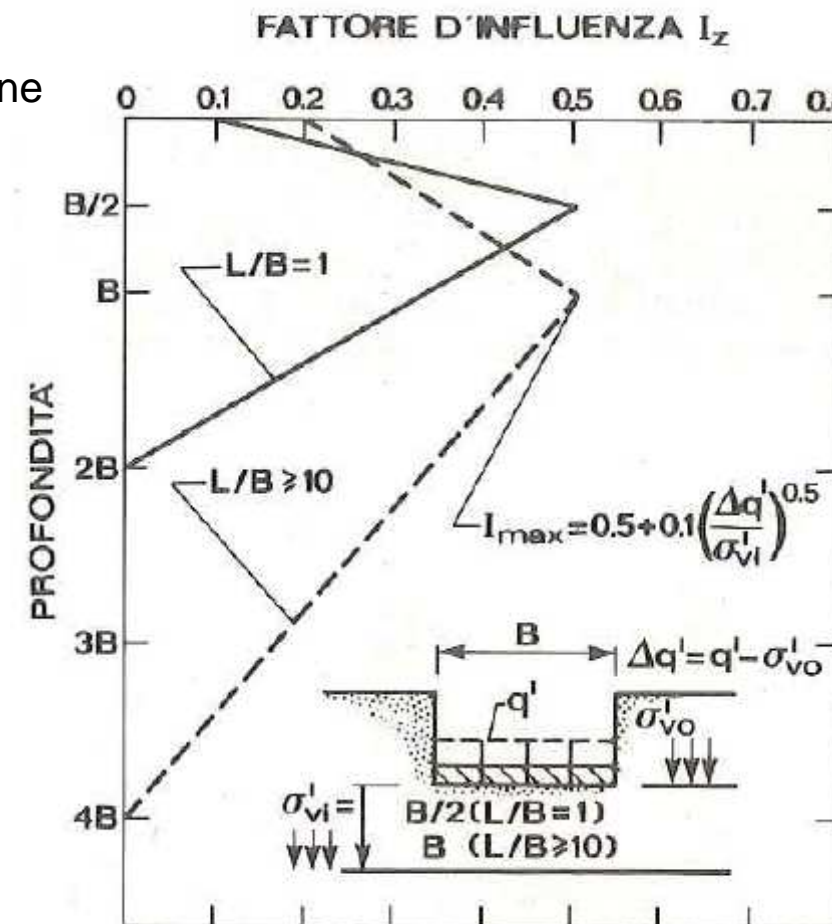
I_z : coefficiente di influenza

C_1 : fattore correttivo in funzione dell'approfondimento della fondazione

C_2 : fattore correttivo in funzione del cedimento secondario

$$C_1 = \left(1 - 0.5 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{\Delta q'} \right)^2$$

$$C_2 = (1 + 0.2 \cdot \log(t/0.1))$$



STIMA CEDIMENTI – TERRENI A GRANA FINE

Cedimento di tipo monodimensionale prodotto da tensioni indotte da un carico di limitate dimensioni.

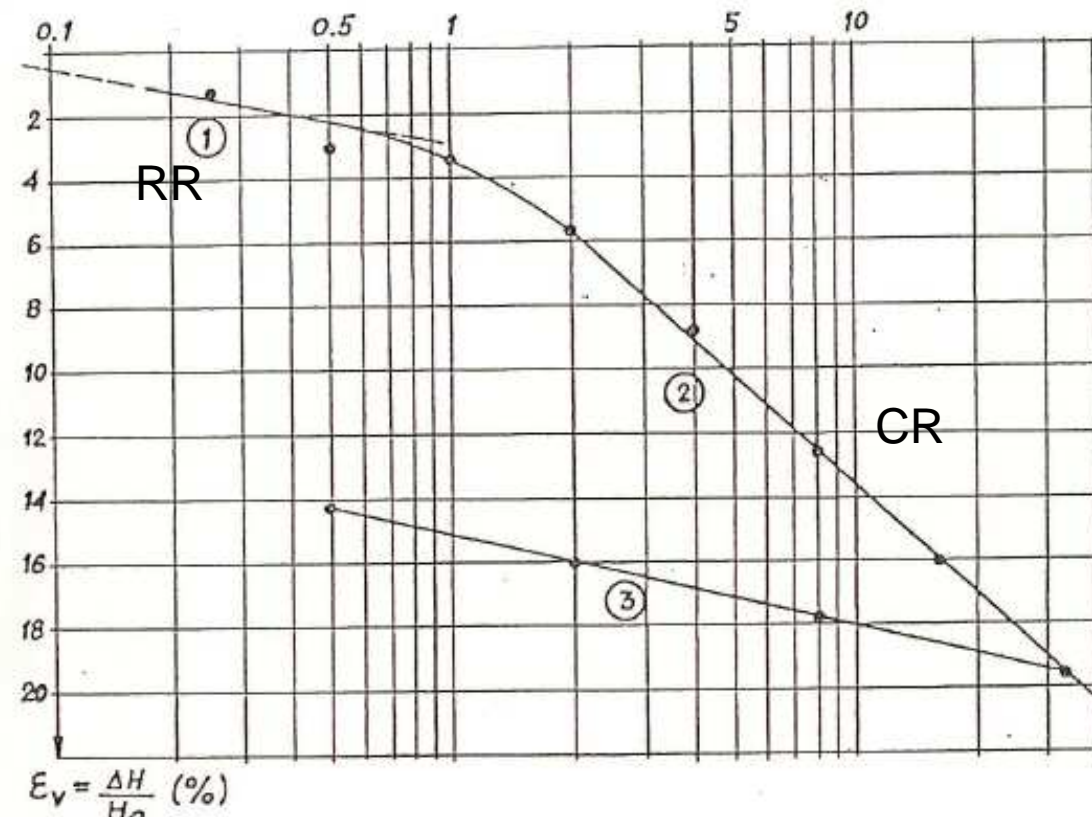
$$\frac{\Delta H}{H_0} = RR \cdot \log\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}\right) + CR \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_p}\right) = \frac{1}{1 + e_0} \cdot \left[C_r \cdot \log\left(\frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}\right) + C_c \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_p}\right) \right]$$

Se incremento di tensione non supera la preconsolidazione
le deformazioni avvengono nel tratto di ricomprensione

$$\frac{\Delta H}{H_0} = RR \cdot \log\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}$$

Se incremento di tensione supera la preconsolidazione
le deformazioni avvengono nel tratto di compressione

$$\frac{\Delta H}{H_0} = CR \cdot \log\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}}$$



STIMA CEDIMENTI – TERRENI A GRANA FINE

Aspetti da definire:

- determinazione dei profili di pressione litostatica e di preconsolidazione (storia tensionale)
- Suddivisione dello strato compressibile in strati di spessore ridotto
- Stima dell'incremento di pressione e parametri geotecnici di compressibilità
- Calcolo del cedimento come somma dei contributi dei singoli strati.

CORREZIONE DI SKEMPTON, BJERRUM E LEONARDS

La trattazione di Terzaghi non tiene in considerazione la natura dell'argilla, pertanto si possono avere casi di cedimenti diversi sebbene a parità di geometria, carico e parametri di compressibilità.

Ipotesi da assumere: materiale saturo

$$\Delta u = \Delta \sigma_v \rightarrow \Delta u = \Delta \sigma_3 + A \cdot (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$$

STIMA CEDIMENTI – TERRENI A GRANA FINE

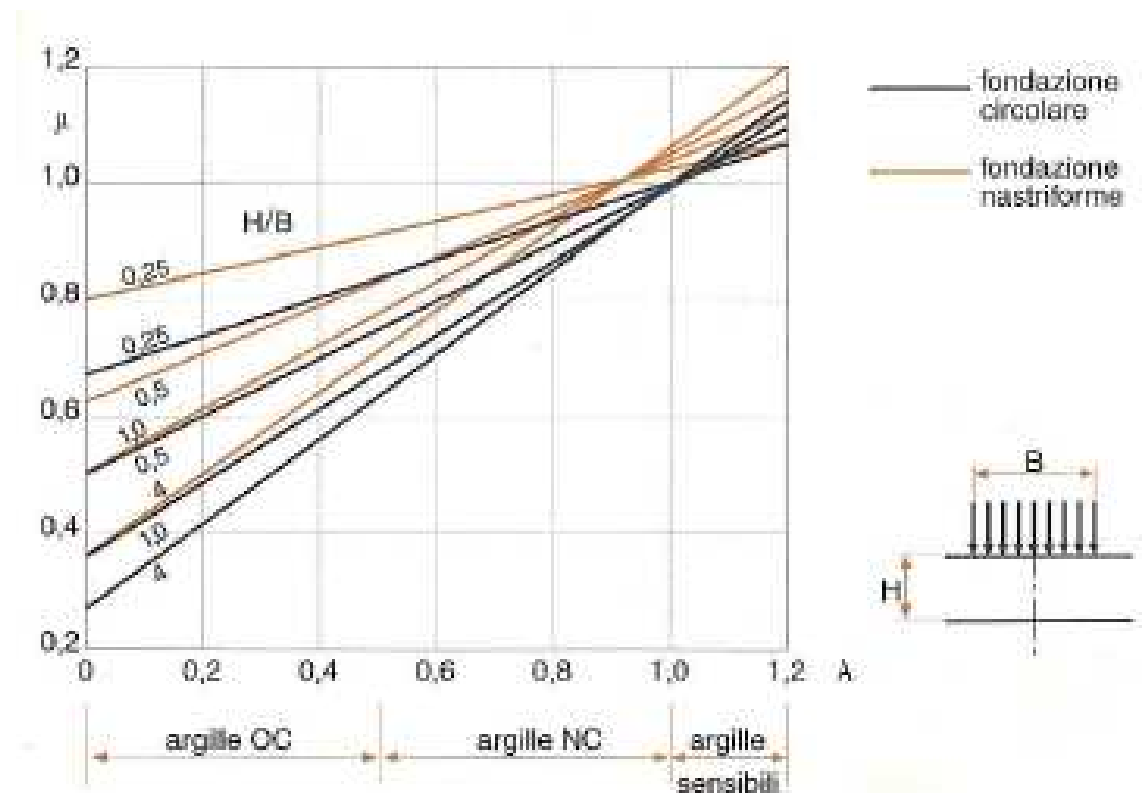
Il cedimento per consolidazione primaria pertanto viene incrementato secondo il parametro

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A \cdot (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \rightarrow A = \frac{(\Delta u - \Delta \sigma_3)}{(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)} = \frac{(\Delta u)}{(\Delta \sigma_1)} - \Delta \sigma_3$$

$$S_c = \mu \cdot S_{ed}$$

$$\mu = A + \alpha \cdot (1 - A)$$

$$S_{tot} = S_i + S_c = 1.1 \cdot S_c$$



STIMA CEDIMENTI SECONDARI – TERRENI A GRANA FINE

Adattamento plastico della struttura del terreno al nuovo regime di tensioni efficaci e agli spostamenti orizzontali del terreno.

Cedimento secondario aumenta di importanza all'aumentare dell'incremento di carico indotto dalla struttura ed alle tensioni litostatiche efficaci.

Aspetto particolarmente rilevante in presenza di argille con componente organica elevata.

$$s_s = \sum \left(C_\alpha \cdot \Delta H \cdot \log \frac{t}{t_c} \right)_i$$

tc: tempo corrispondente all'esaurimento delle sovrappressioni interstiziali