

Mecânica dos Solos e Fundações

PEF 522

Recalques
(elásticos, colapsividade e adensamento)

Teoria do Adensamento

**Recalques por adensamento e seu
desenvolvimento no tempo**

Recalques Elásticos

- Pressão uniformemente distribuída
- Material homogêneo
- Massa Isotrópica
- Relação tensão deformação linear
- A área carregada é flexível.

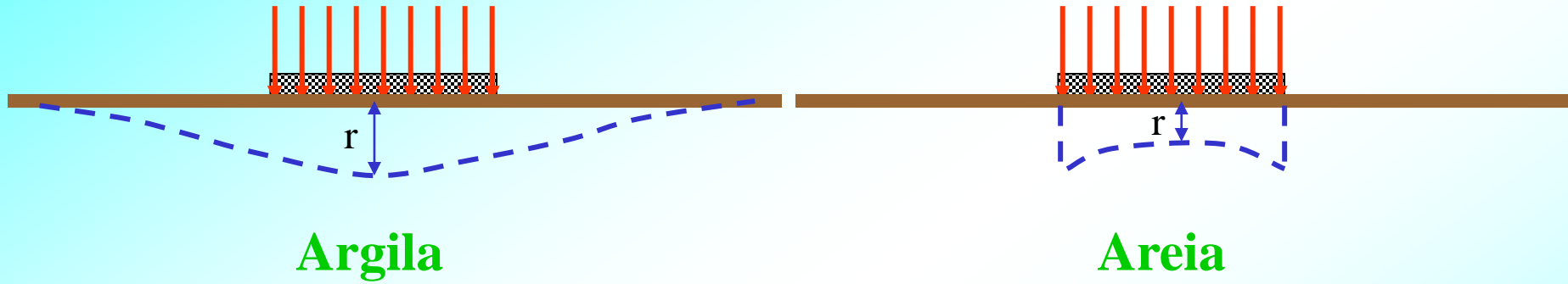
$$r = \frac{qB}{E} (1 - \nu^2) I_s$$

- r = recalque
- I_s = Fator de influência que depende da forma da área carregada
- B = para área retangular B é a menor dimensão e para área circular B é o diâmetro.

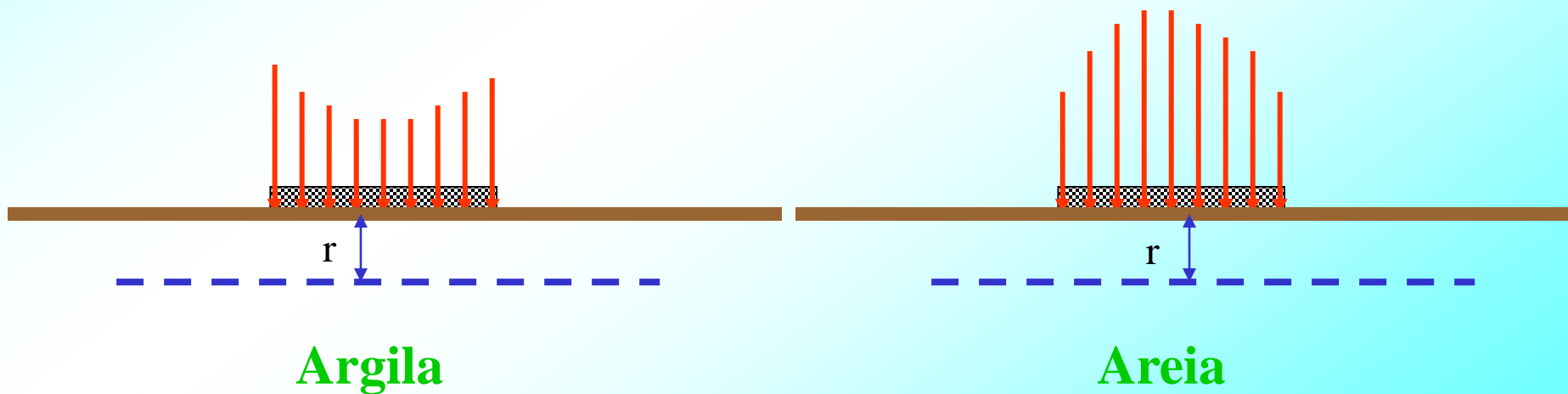
Forma da área	I_s		
	Centro	Canto	Média
Quadrado	1.12	0.56	0.95
Retângulo L/B=2	1.52	0.76	1.3
Retângulo L/B=5	2.1	1.05	1.83
Círculo	1	0.64	0.85

Tipo de Solo	E (kPa)
Argila muito mole	2500
Argila mole	2500 a 5000
Argila média	5000 a 10000
Argila rija	10000 a 20000
Argila muito rija	20000 a 40000
Argila dura	40000
Areia fofa	10000 a 50000
Areia compacta	40000 a 100000

Área Carregada Flexível

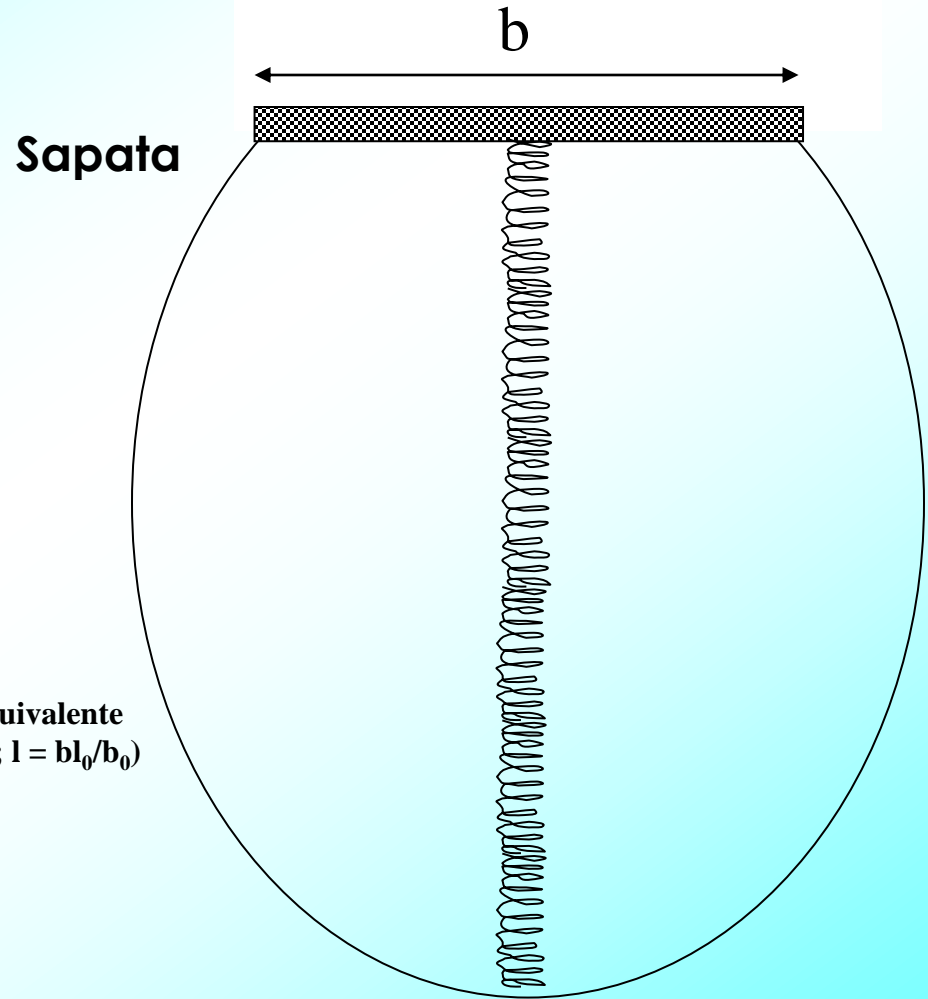
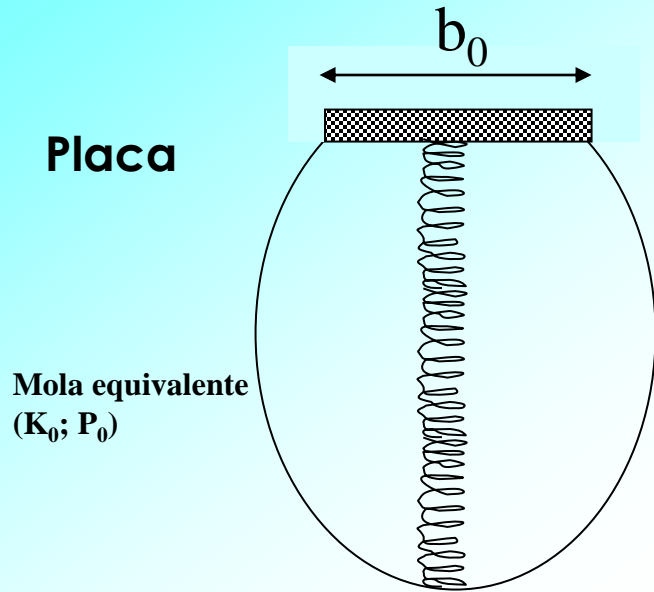


Área Carregada Rígida



Sapata em Argila

Estimativa de recalques

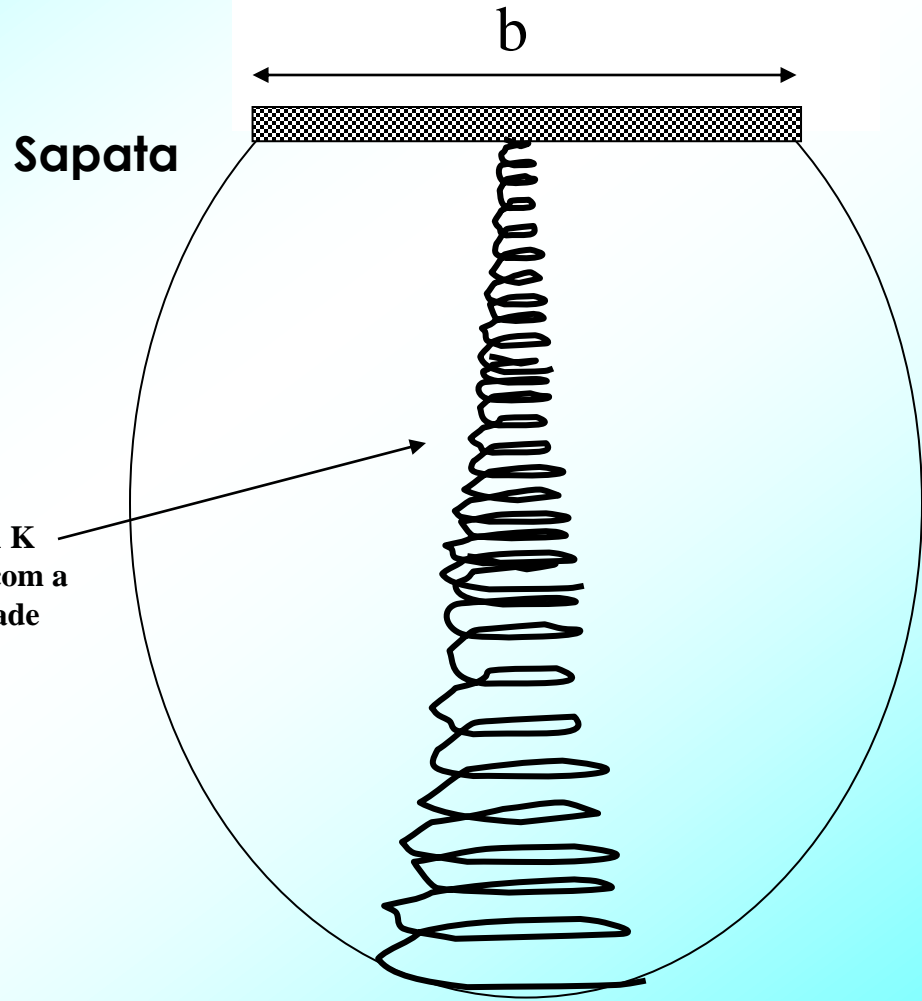
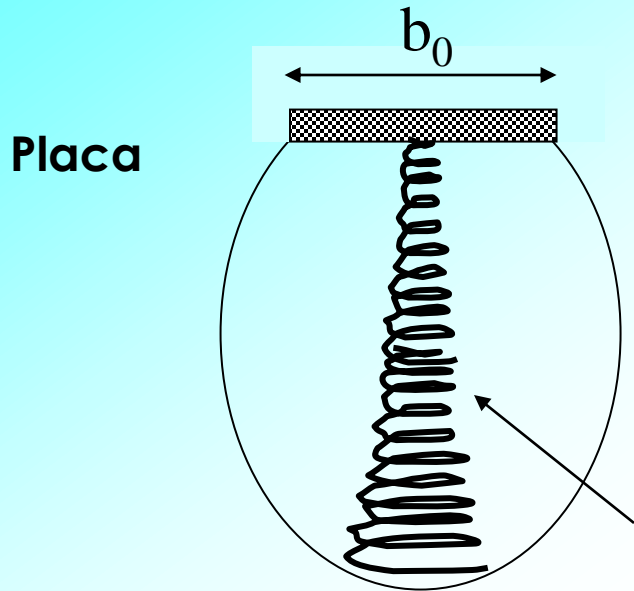


$$r = r_0 \frac{b}{b_0}$$

- r_0 = recalque na placa de ensaio
- b = diâmetro ou menor dimensão da fundação.
- b_0 = diâmetro da placa de ensaio

Sapata em Areia

Estimativa de recalques



$$r = r_0 * 1.90 * \frac{1}{\left(1 + \frac{0.3}{b}\right)^2}$$

- r_0 = recalque na placa, em metros, com diâmetro de 0.80m
- b = diâmetro ou menor dimensão da fundação.

Causas de falhas na fundação

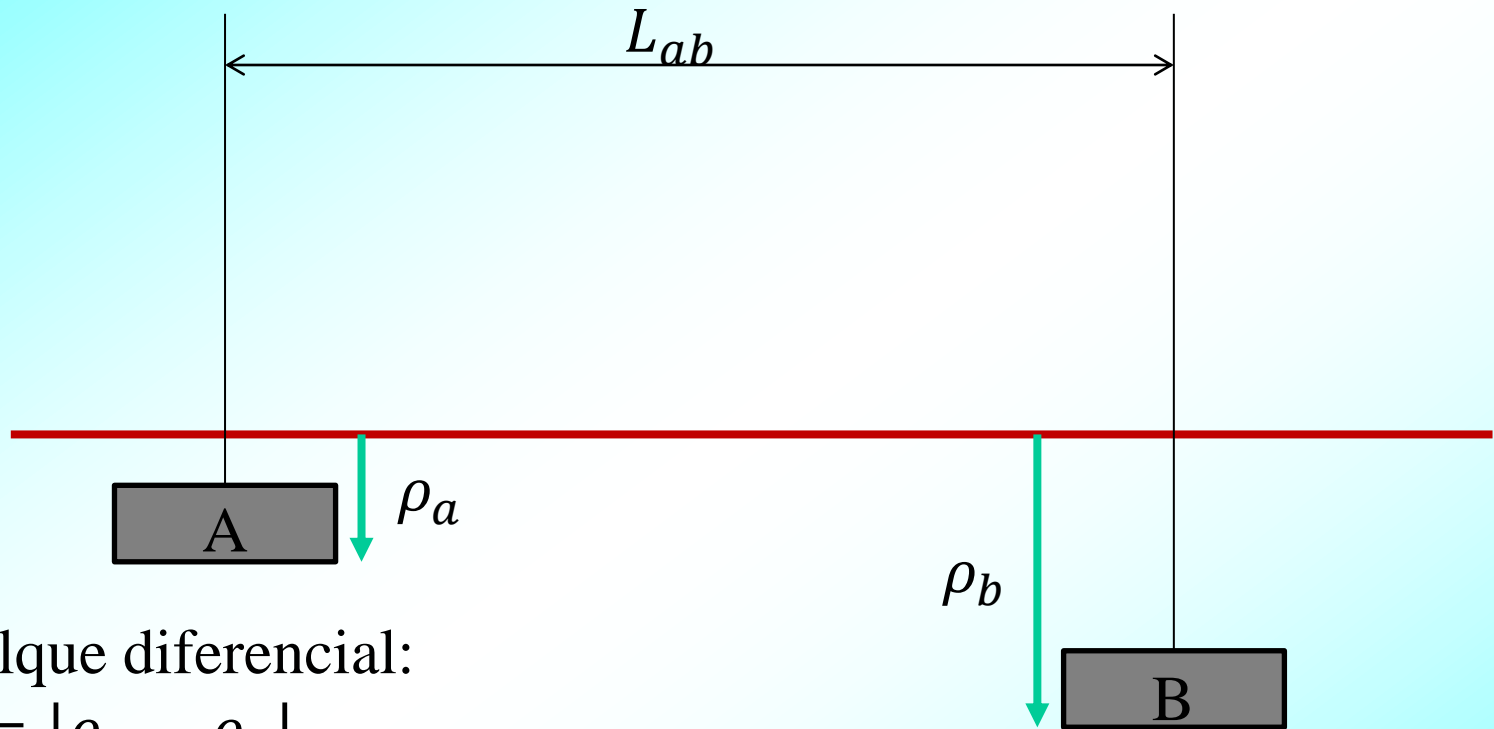


Sintomas falhas na fundação



Recalque diferencial e distorção angular

Limites de Bjerrum (1963)



Recalque diferencial:

$$\delta_{ab} = |\rho_a - \rho_b|$$

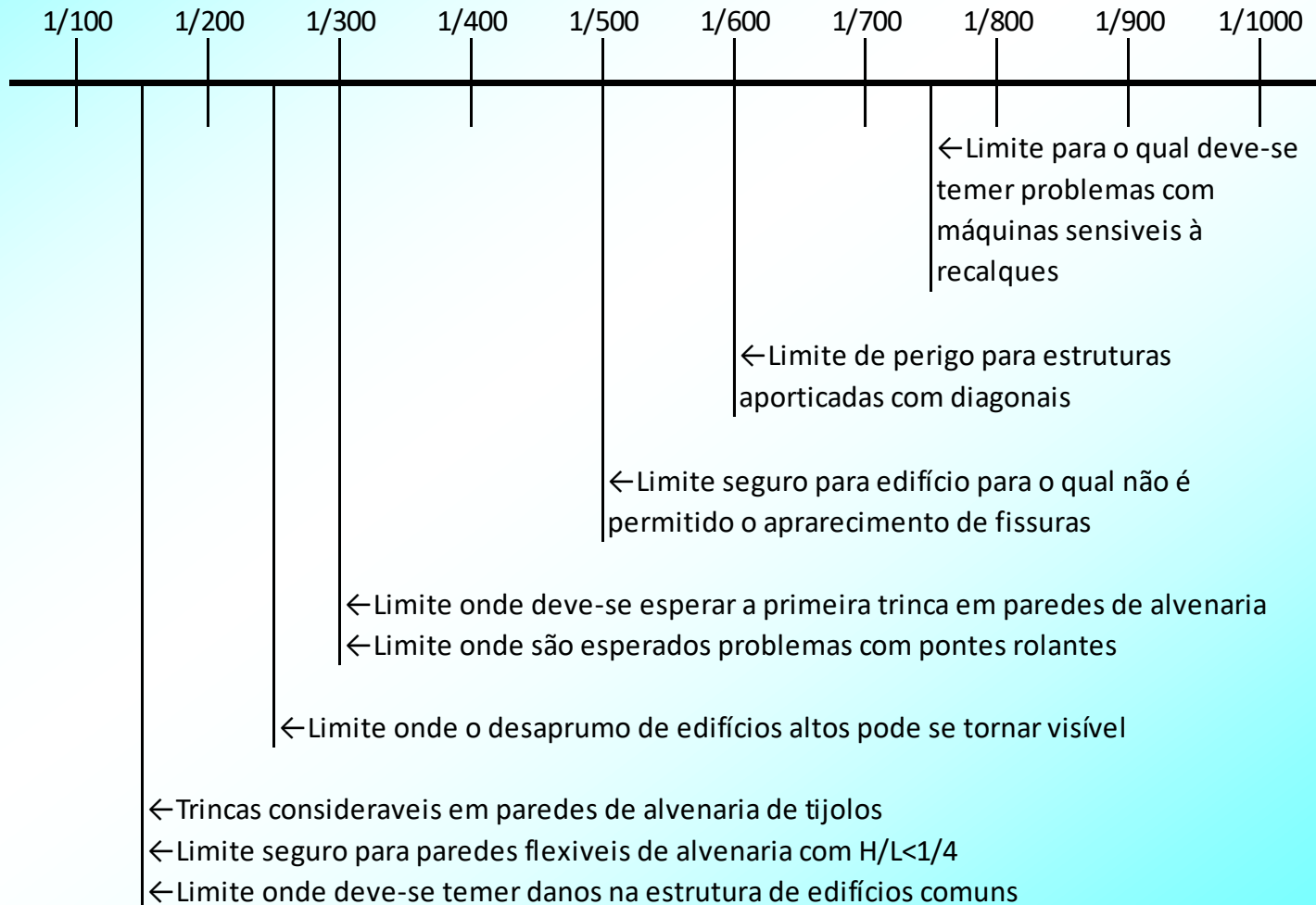
Distorção angular:

$$\beta_{ab} = \frac{\delta_{ab}}{L_{ab}}$$

Recalque diferencial e distorção angular

Limites de Bjerrum (1963)

Distorção Angular $\beta = \delta_{ab}/L$, $\delta_{ab} = \rho_a - \rho_b$



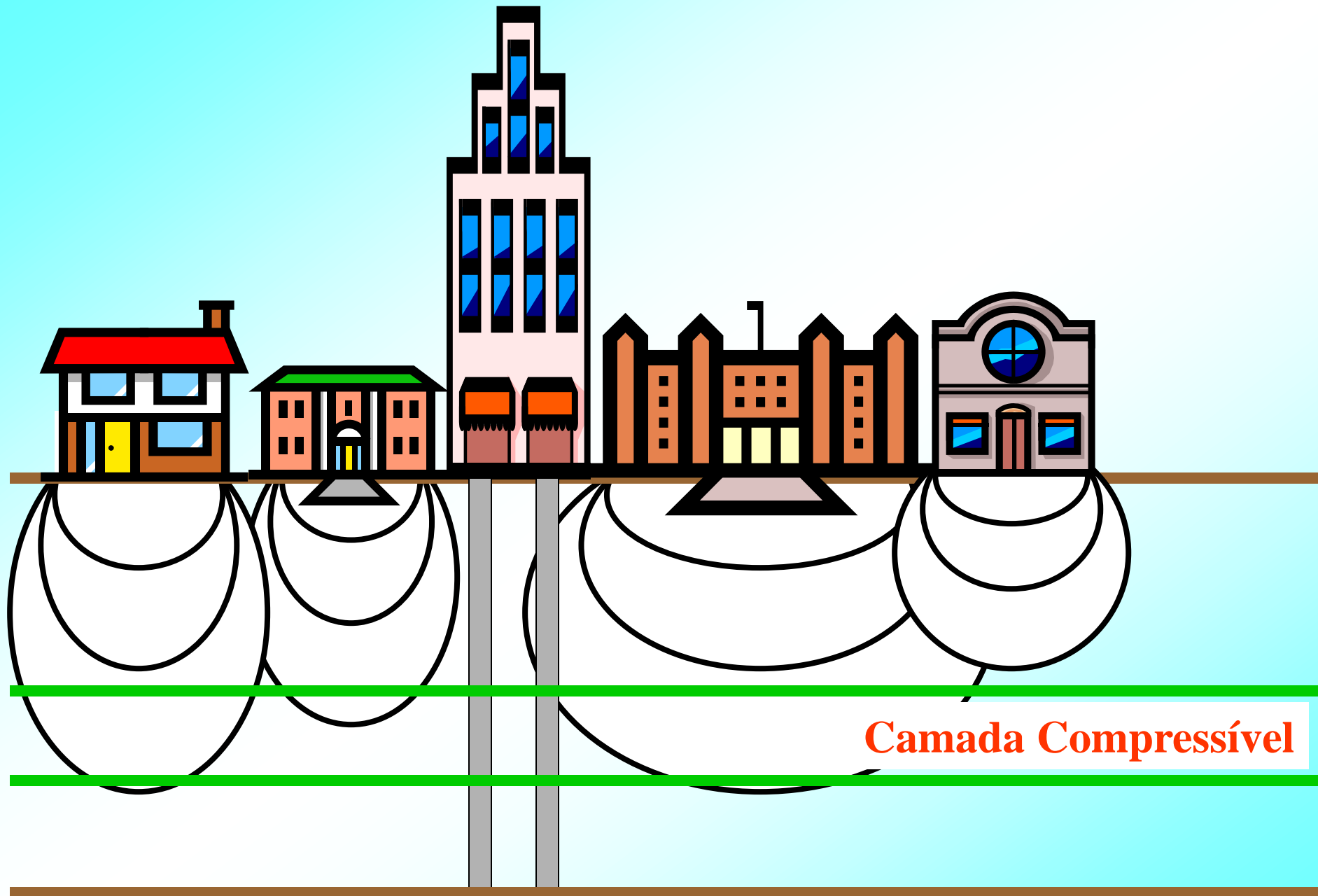


Edifício com 5 andares, que apresenta 2° de inclinação



Núncio Malzoni

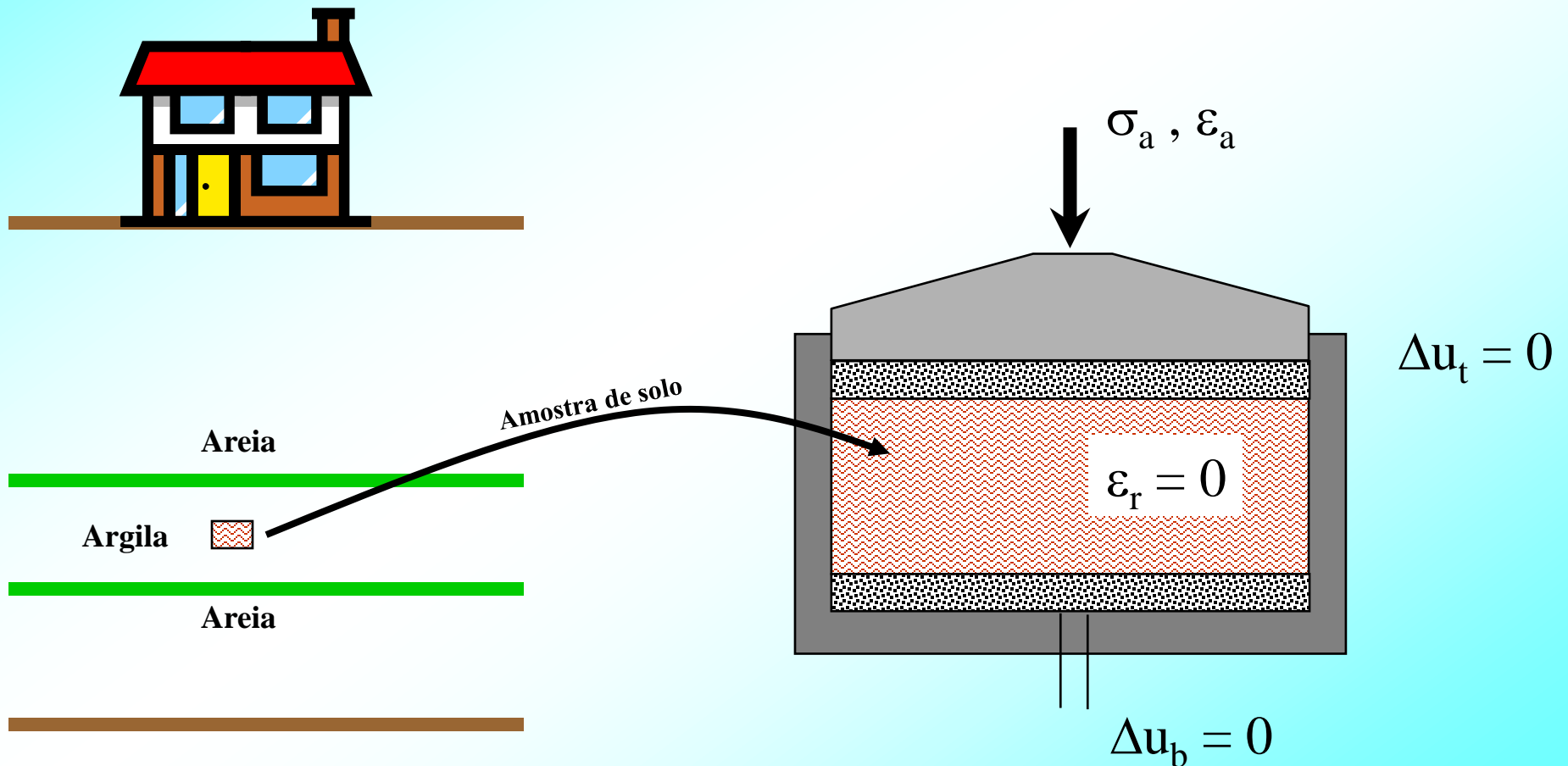


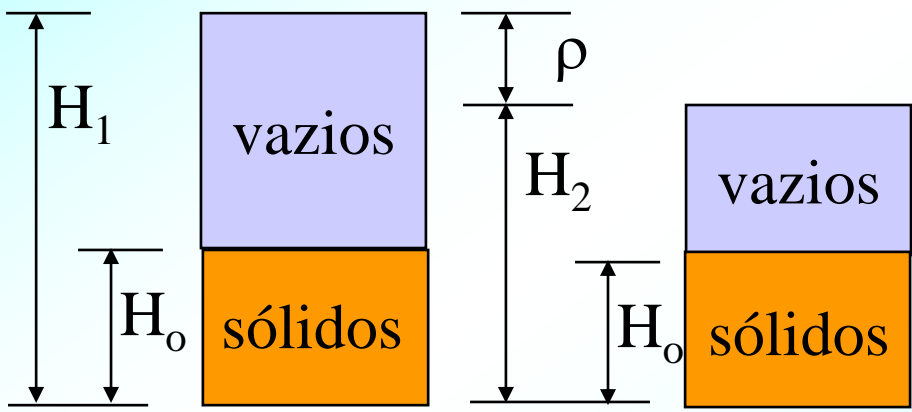


Camada Compressível

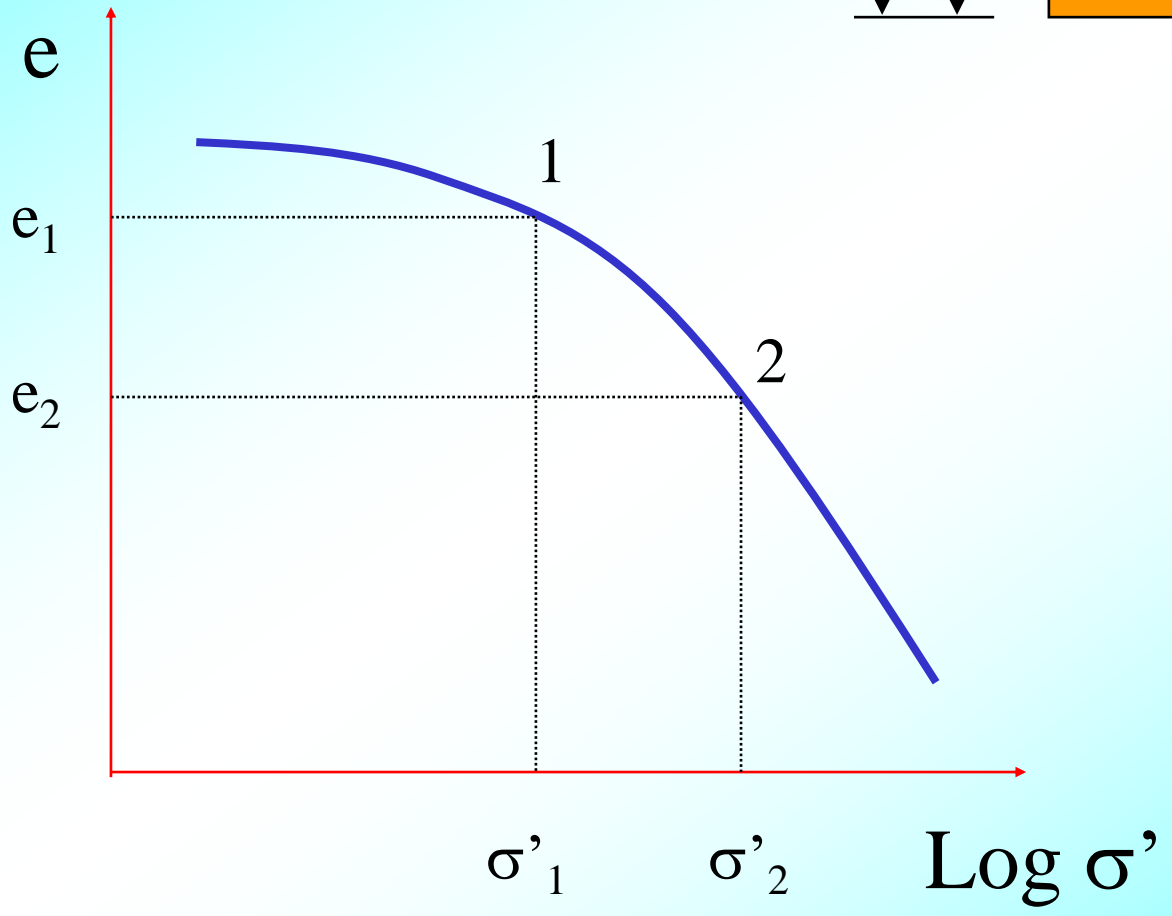
Compressão Uni-Dimensional - Ensaio de Adensamento

- **Condição K_0 - Deformação lateral nula.**
- **Fluxo de água - vertical (uni-dimensional)**

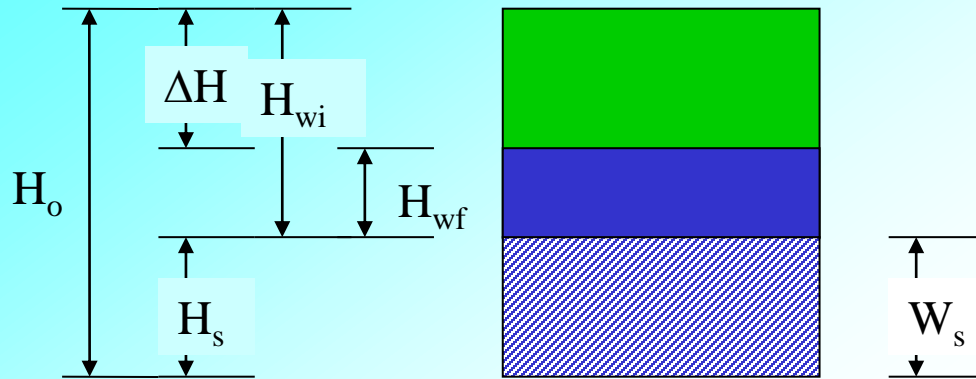




Após o recalque



Cálculos do ensaio



H_f - Altura final da amostra - (ensaio)

H_{wi} - Altura inicial de água = $w_i H_s G$

H_{wf} - Altura final de água = $w_f H_s G$

w - teor de umidade

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \Rightarrow V_s = \frac{M_s}{\rho_s}$$

$$H_s A = \frac{M_s}{\rho_s}$$

$$H_s = \frac{M_s}{A \rho_s}$$

$$\rho_w = \frac{M_w}{V_w} \Rightarrow V_w = \frac{M_w}{\rho_w}$$

$$H_w A = \frac{M_w}{\rho_w} \Rightarrow H_w = \frac{M_w}{A \rho_w}$$

$$H_w = \frac{M_w}{A \rho_w} \frac{M_s}{M_s} \Rightarrow H_w = w \frac{M_s}{A \rho_w}$$

$$H_w = w \frac{M_s}{A} \frac{G}{\rho_s} \Rightarrow H_w = w H_s G$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{HA - H_s A}{H_s A} = \frac{H - H_s}{H_s}$$

Cálculos do recalque

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad H_1 = H_o + H_v$$

$$H_v = V_v \quad H_v = eV_s$$

$$H_1 = H_o + e_1 H_o$$

$$H_1 = H_o (1 + e_1)$$

$$H_2 = H_o (1 + e_2)$$

$$\rho = H_1 - H_2$$

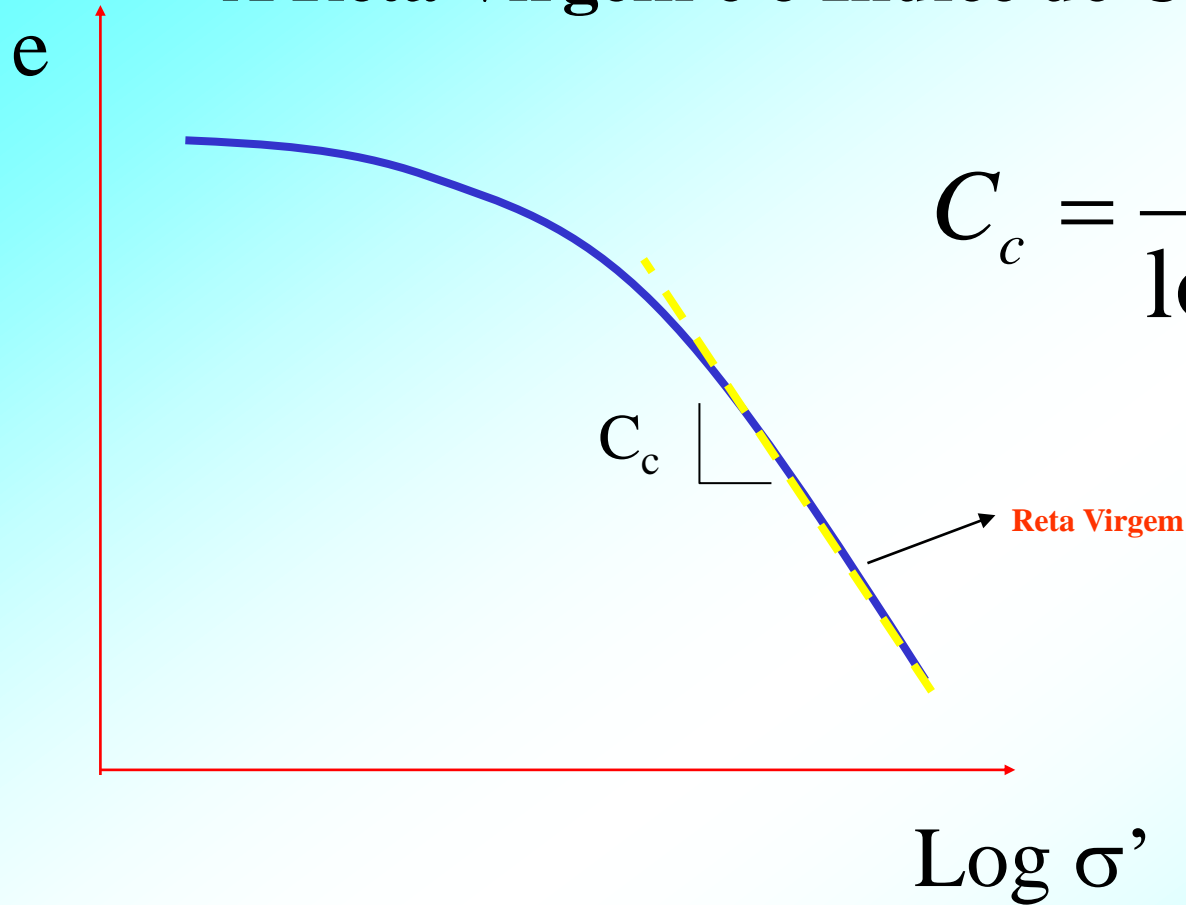
$$\rho = H_o (1 + e_1 - 1 - e_2)$$

$$\rho = H_o (e_1 - e_2)$$

$$H_o = \frac{H_1}{1 + e_1}$$

$$\rho = \frac{H_1}{1 + e_1} (\Delta e)$$

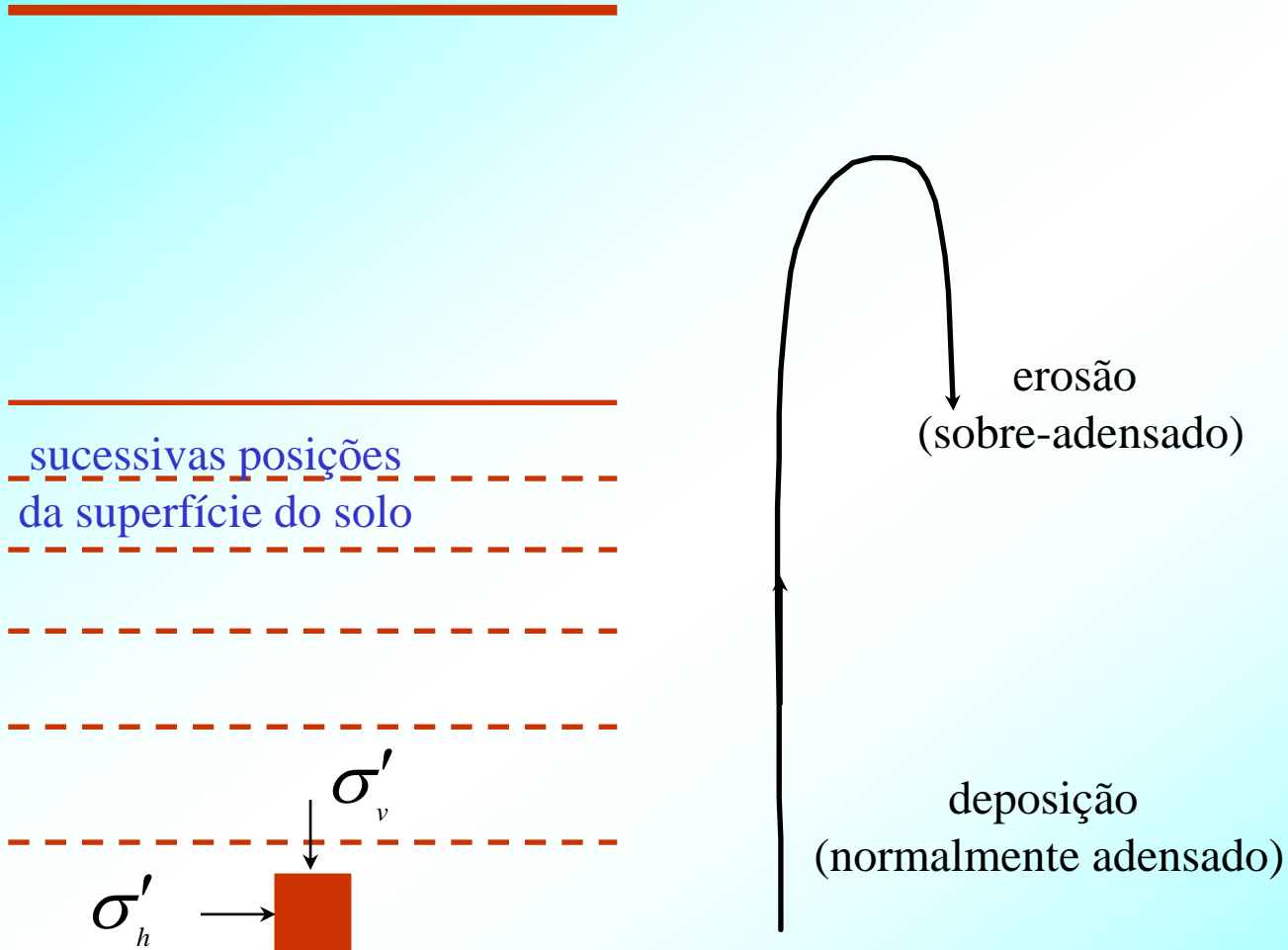
A Reta Virgem e o Índice de Compressão



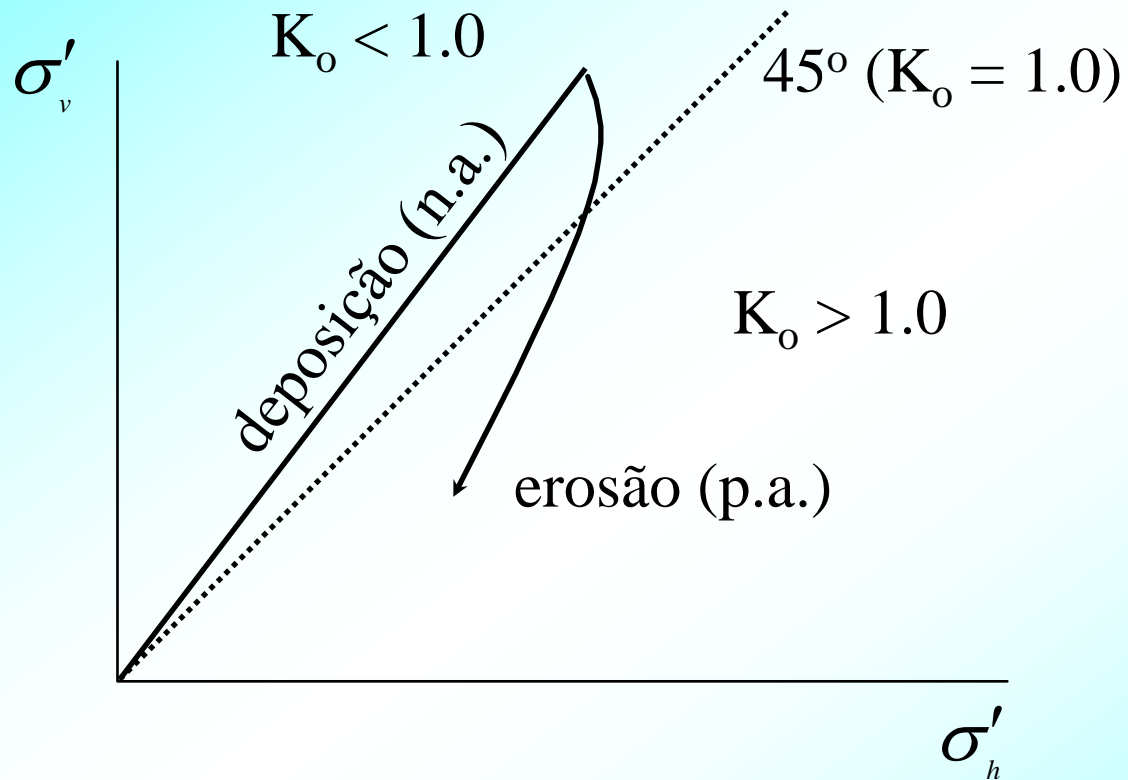
$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1}$$

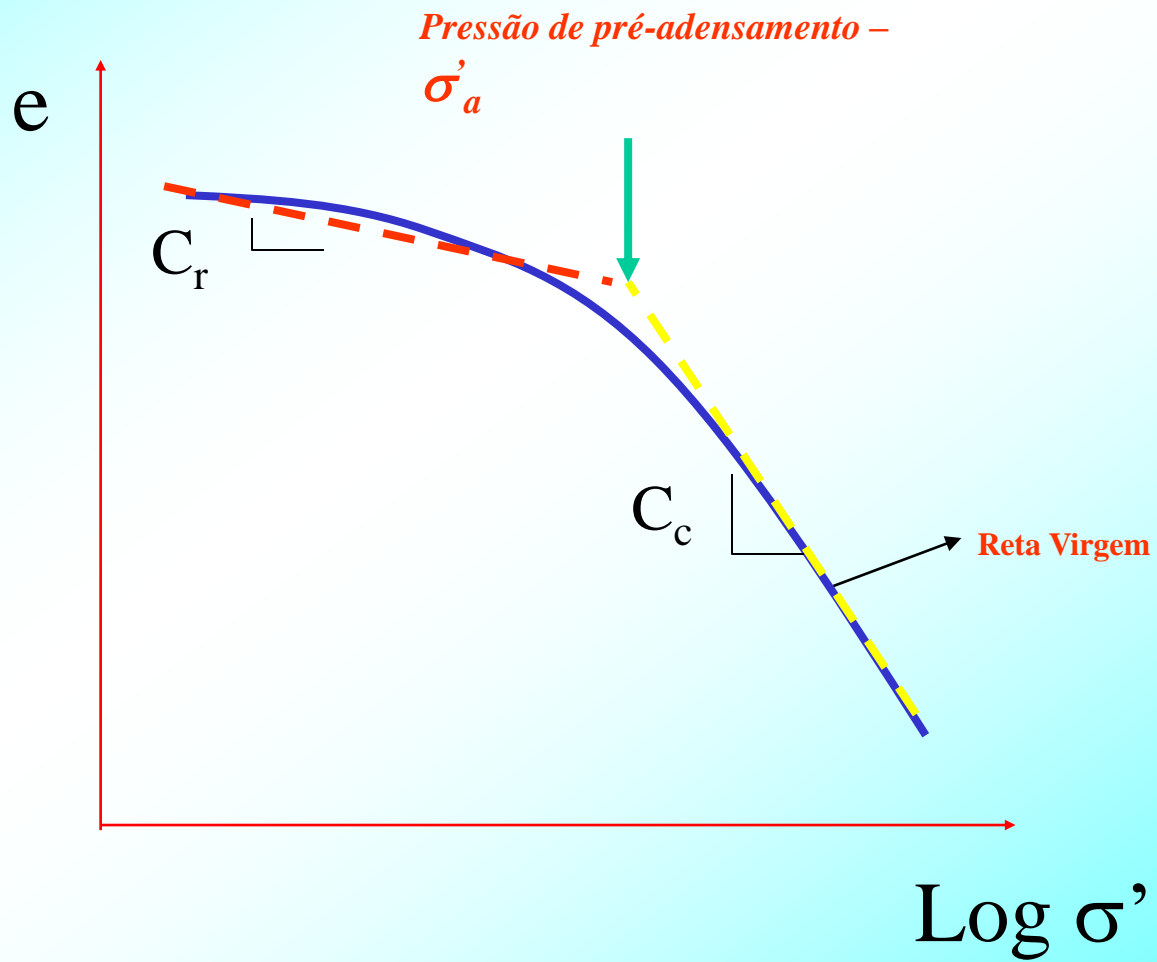
$$\rho = C_c \frac{H_1}{1 + e_1} \log\left(\frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right)$$

Trajetória de Tensões Deposição e Erosão



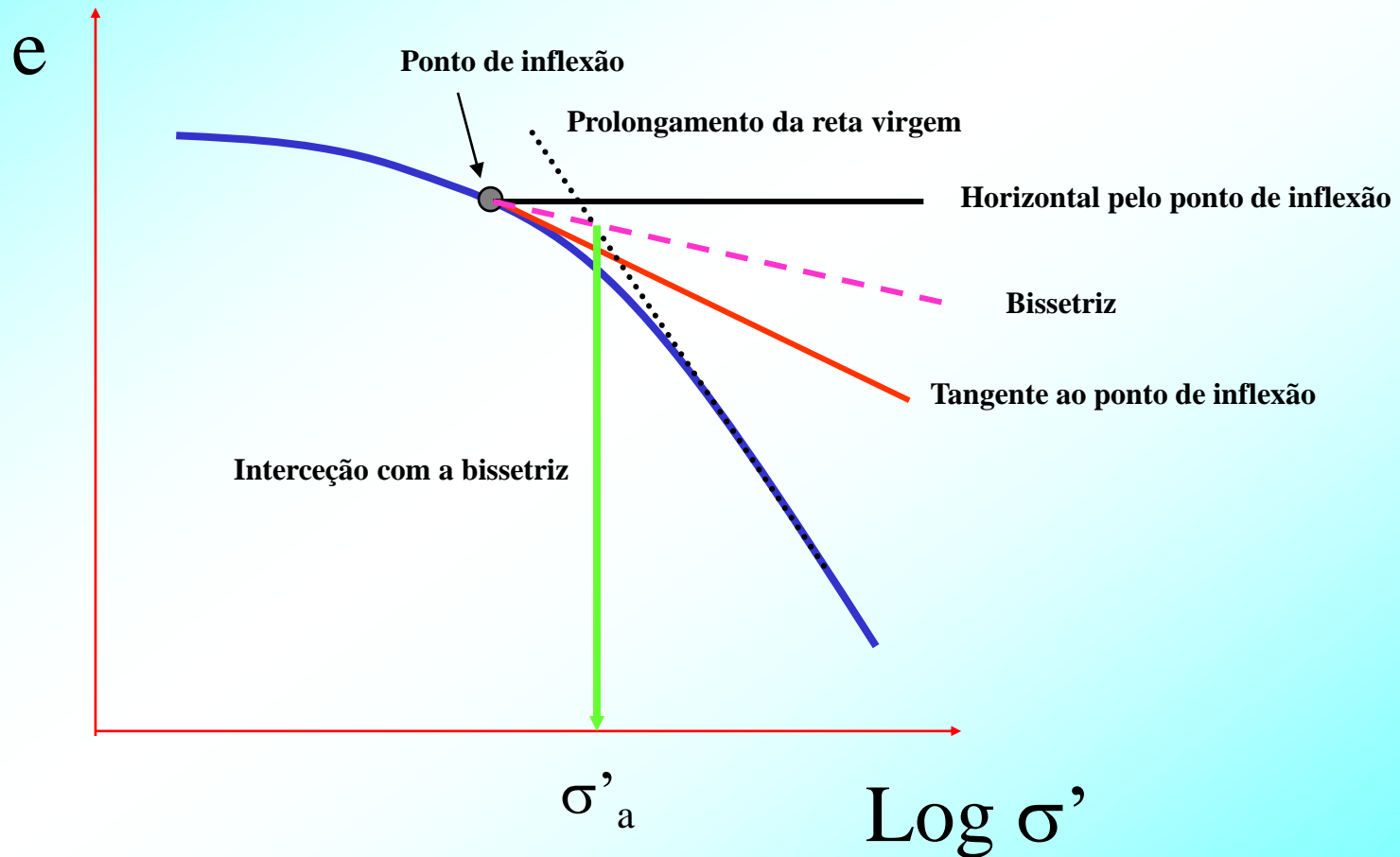
Trajetória de tensões





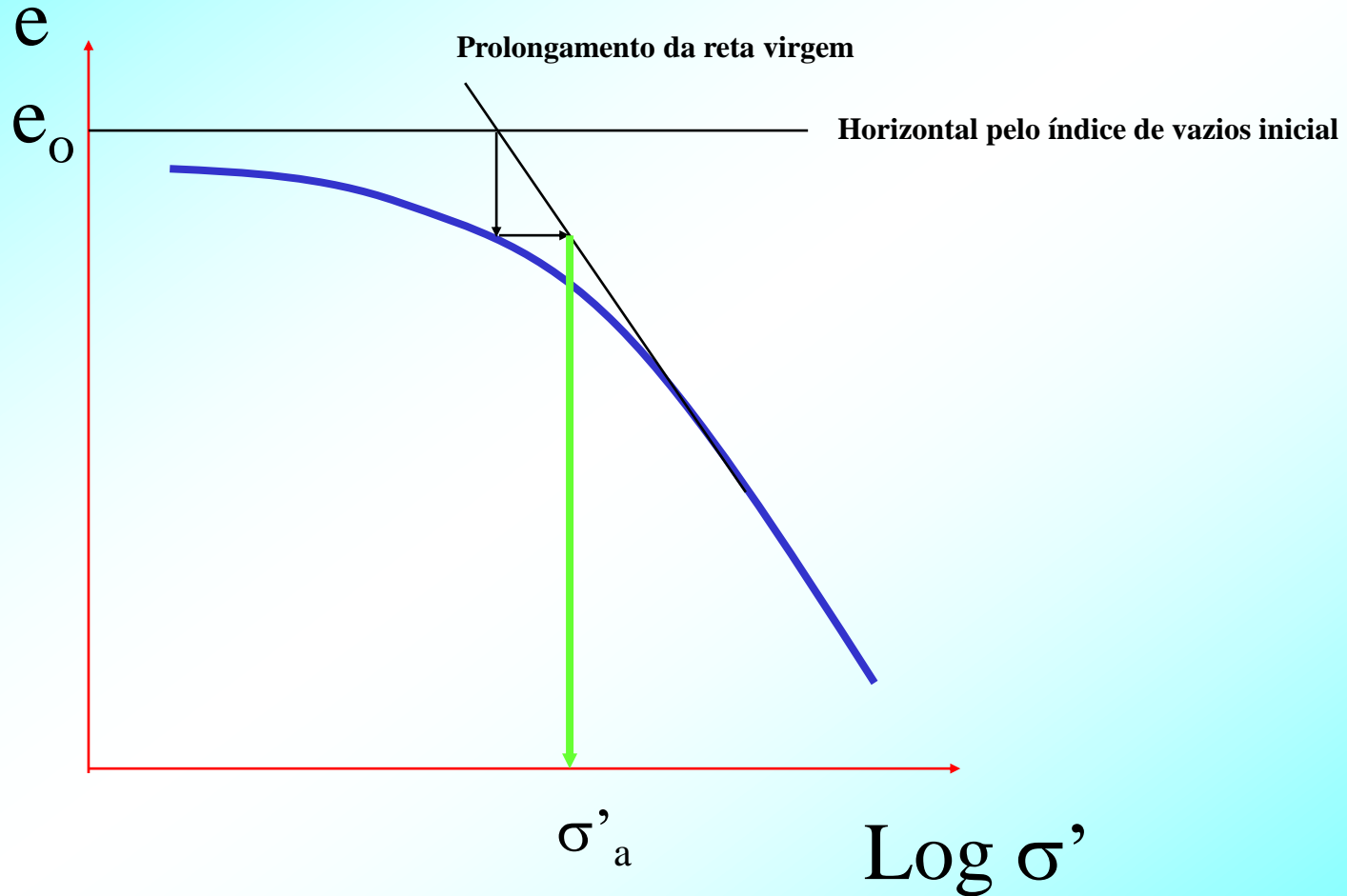
Determinação da Pressão de Pré-Adensamento

Método de Casagrande



Determinação da Pressão de Pré-Adensamento

Método de Pacheco Silva



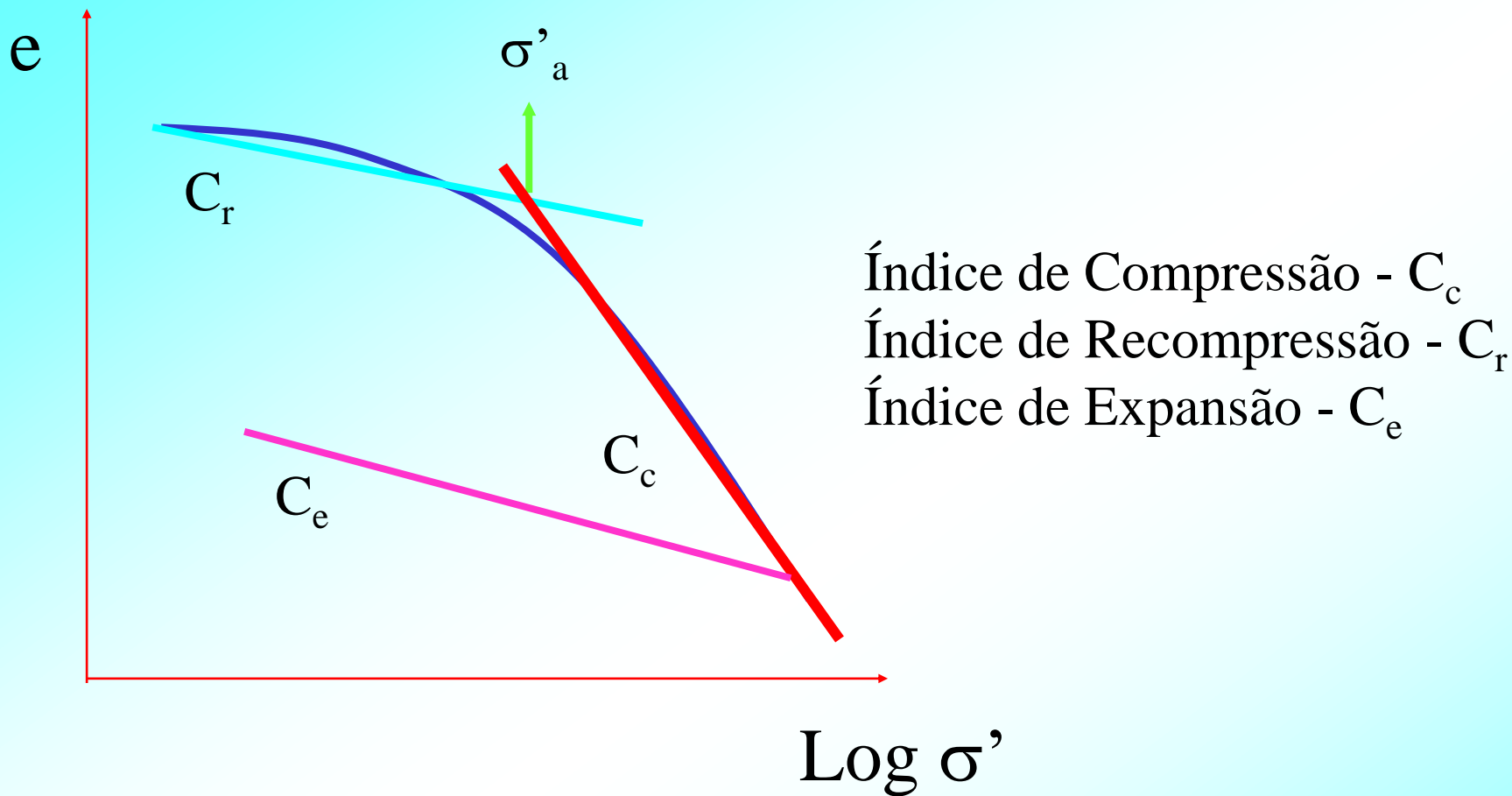
Solos Normalmente Adensados

A pressão de pré-adensamento é igual à pressão efetiva existente no solo por ocasião da amostragem

Solos Normalmente Sobre-Adensados

A pressão de pré-adensamento é muito superior à pressão efetiva existente no solo por ocasião da amostragem

$$(Razão de Sobre Adensamento) RSA = \frac{\sigma'_a}{\sigma'_v}$$

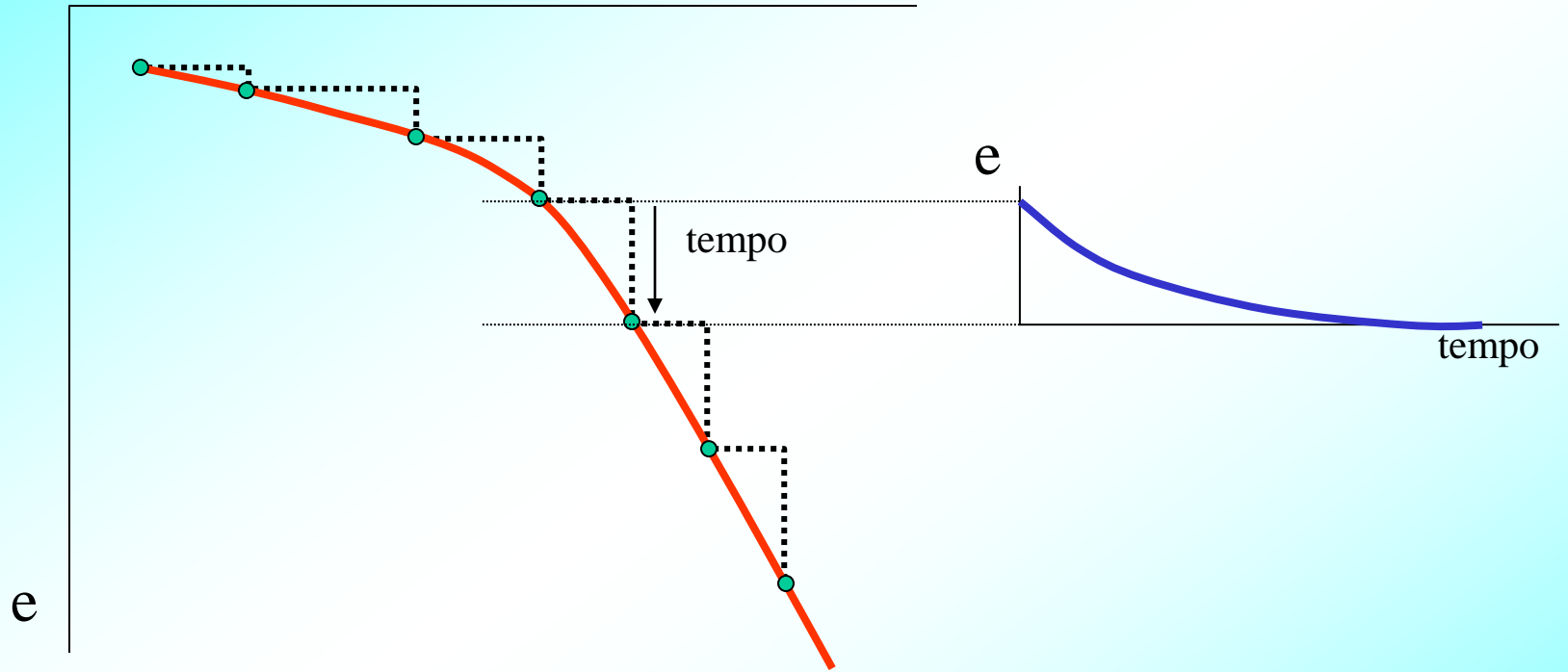


$$\rho = \frac{H_1}{1 + e_1} \left[C_r \log\left(\frac{\sigma'_a}{\sigma'_i}\right) + C_c \log\left(\frac{\sigma'_f}{\sigma'_a}\right) \right]$$

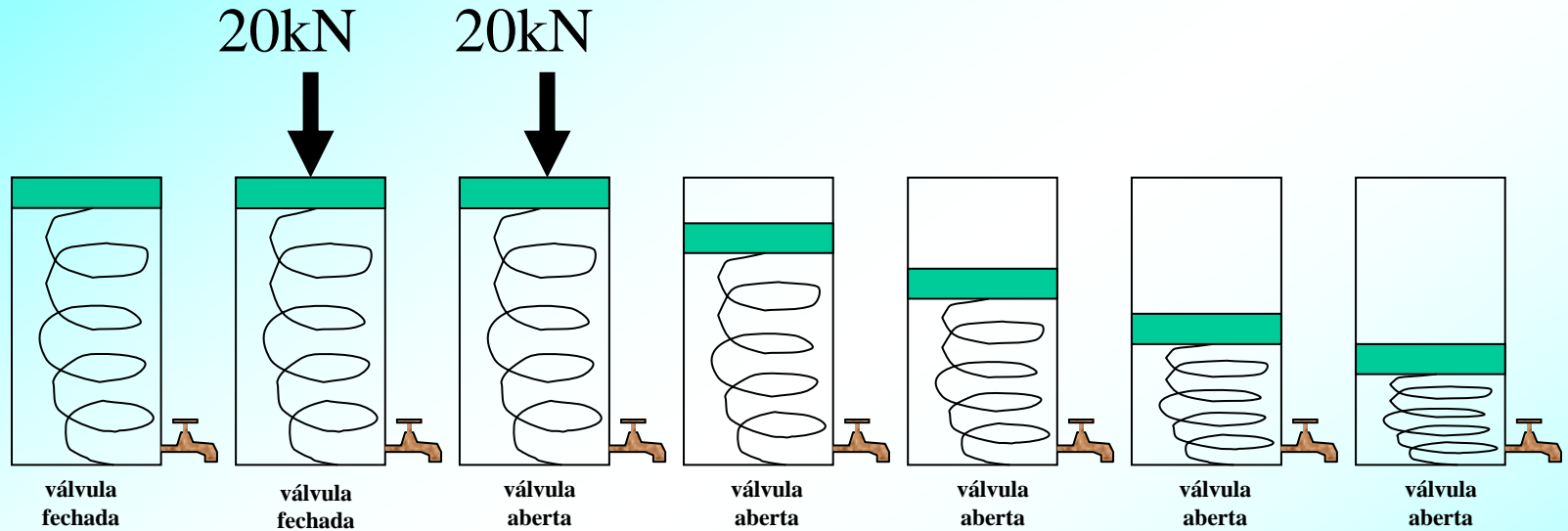
Hipóteses da Teoria do Adensamento

- O solo é homogêneo.
- O solo é saturado.
- As partículas sólidas e a água são praticamente incompressíveis, em relação a compressibilidade do solo.
- O solo pode ser estudado como elementos infinitesimais.
- A compressão é unidimensional.
- O fluxo é unidimensional.
- O fluxo é regido pela lei de Darcy.
- As propriedades do solo não variam no processo de adensamento.
- O índice de vazios varia linearmente com o aumento da pressão efetiva durante o processo de adensamento.

$\text{Log} (\sigma', \sigma)$

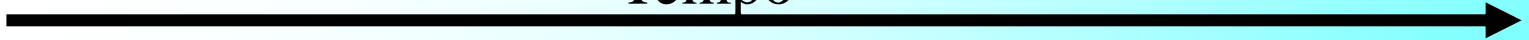


O Processo de Adensamento



Força suportada pela água	0	20	20	15	10	5	0
Força suportada pela mola	0	0	0	5	10	15	20
Porcentagem de adensamento		0	0	25	50	75	100

Tempo

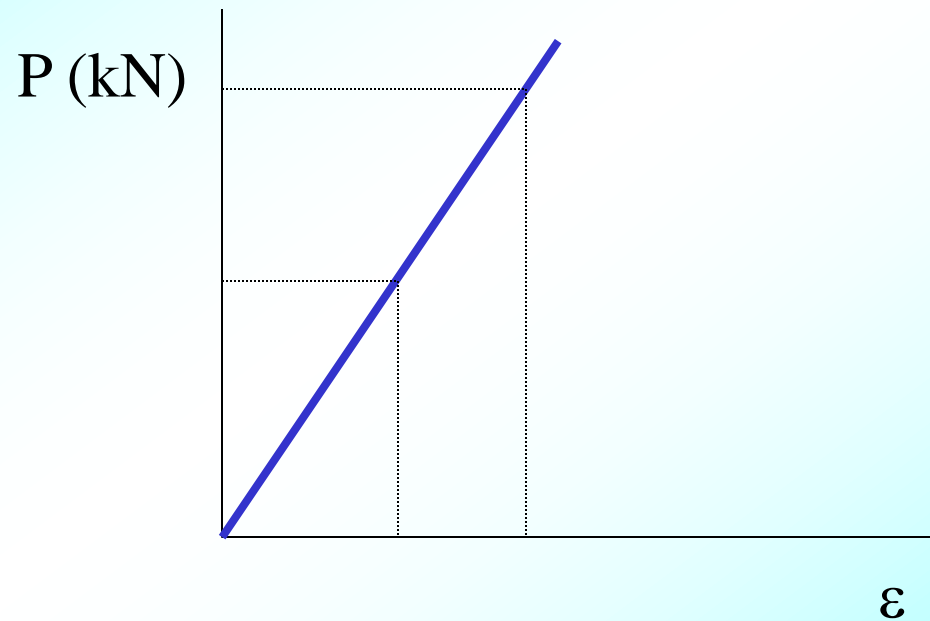


$$\Delta u = \Delta \sigma$$

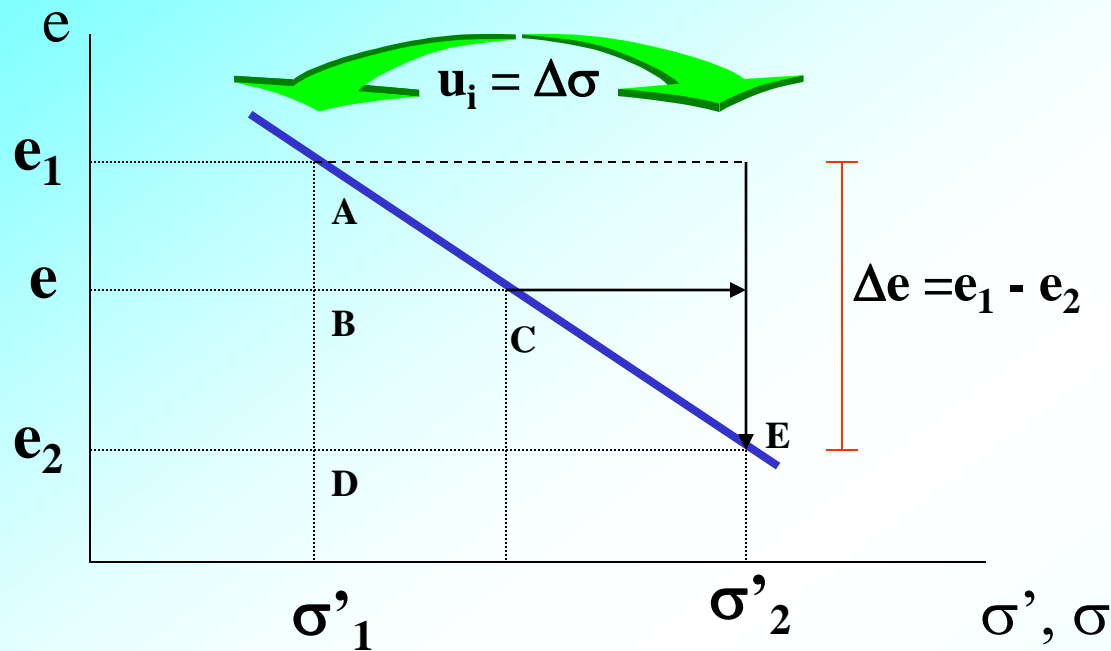
$t = 0^+$

$$\varepsilon = 0$$

$$\varepsilon = f(\sigma')$$



Porcentagem de Adensamento



$$\rho_T = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} H$$

Num instante t qualquer o recalque vale:

$$\rho = \frac{e_1 - e}{1 + e_1} H$$

Porcentagem de Adensamento

$$U = \frac{\rho}{\rho_T} = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2}$$

Variação linear entre e e σ' (hipotese 9)

$$U = \frac{\rho}{\rho_T} = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2} = \frac{AB}{AD} = \frac{BC}{DE} = \frac{\sigma' - \sigma'_1}{\sigma'_2 - \sigma'_1}$$

A porcentagem de recalque é a relação entre o acréscimo de pressão efetiva ocorrido até o instante t e o acréscimo total da pressão aplicada.

$$U = \frac{\rho}{\rho_T} = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2} = \frac{\sigma' - \sigma'_1}{\sigma'_2 - \sigma'_1} = \frac{u_1 - u}{u_1}$$

Coeficiente de compressibilidade, a_v

$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{\sigma'_2 - \sigma'_1} = - \frac{e_2 - e_1}{\sigma'_2 - \sigma'_1} = - \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} = \frac{\Delta e}{\Delta u}$$

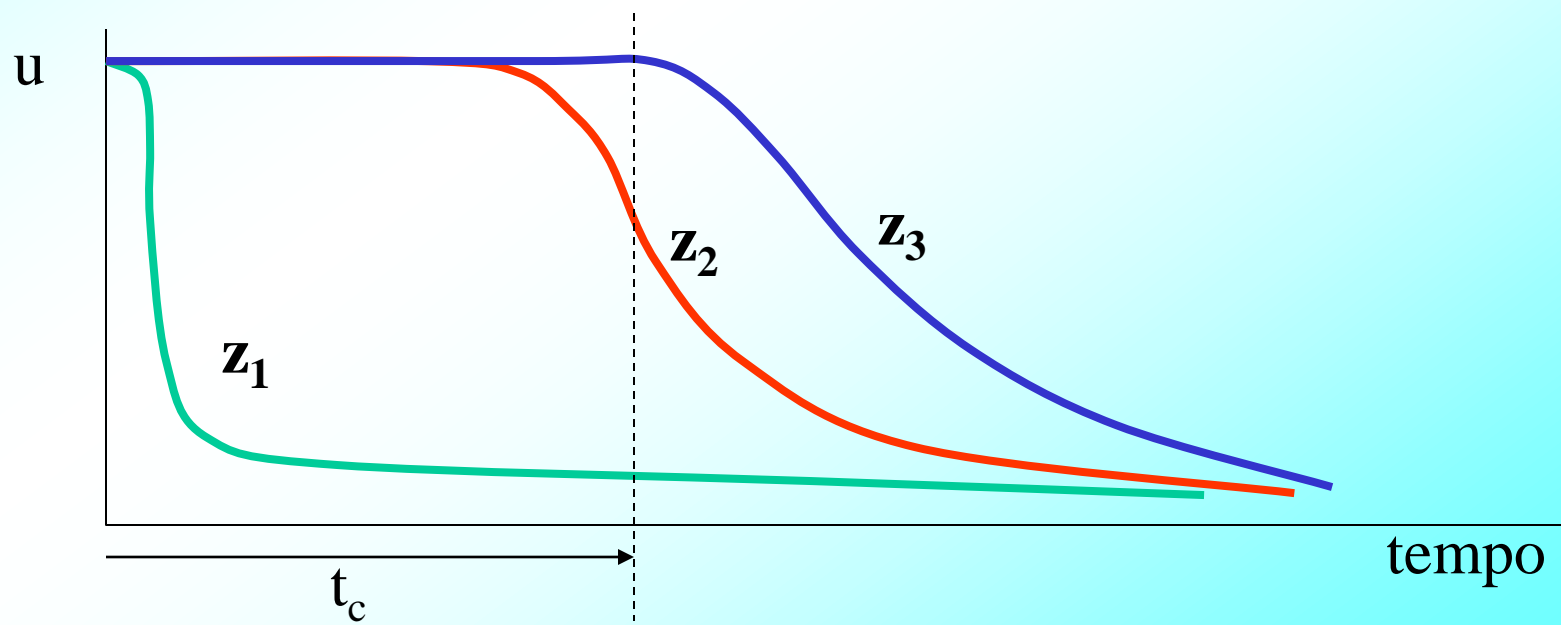
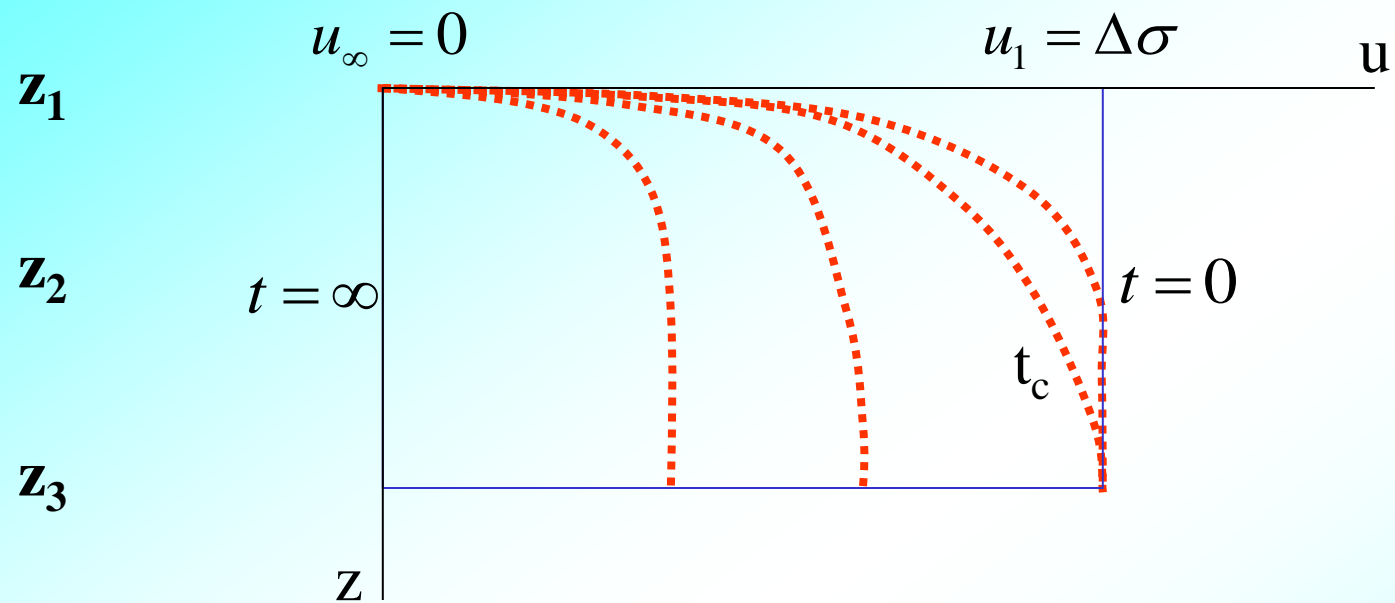
Coeficiente de adensamento, C_v

$$C_v = \frac{k(1+e)}{a_v * \gamma_w}$$

$$C_v \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} = \frac{\delta u}{\delta t}$$

Equação diferencial do adensamento

Varição do excesso de poro pressão com a profundidade e com o tempo



Condições de contorno para solução da equação:

- Existe completa drenagem nas duas extremidades, logo, para $t = 0$, a poro pressão nestas extremidades é nula. (numa extremidade $z = 0$ e na outra $z = 2H_d$).
- A poro pressão inicial, constante com a profundidade, é igual ao acréscimo de pressão aplicada.

Solução

$$T = \frac{C_v t}{H_d^2} \quad U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \left(\text{sen} \frac{Mz}{H} \right) e^{-M^2 T}$$
$$M = \frac{\pi}{2} (2m + 1)$$

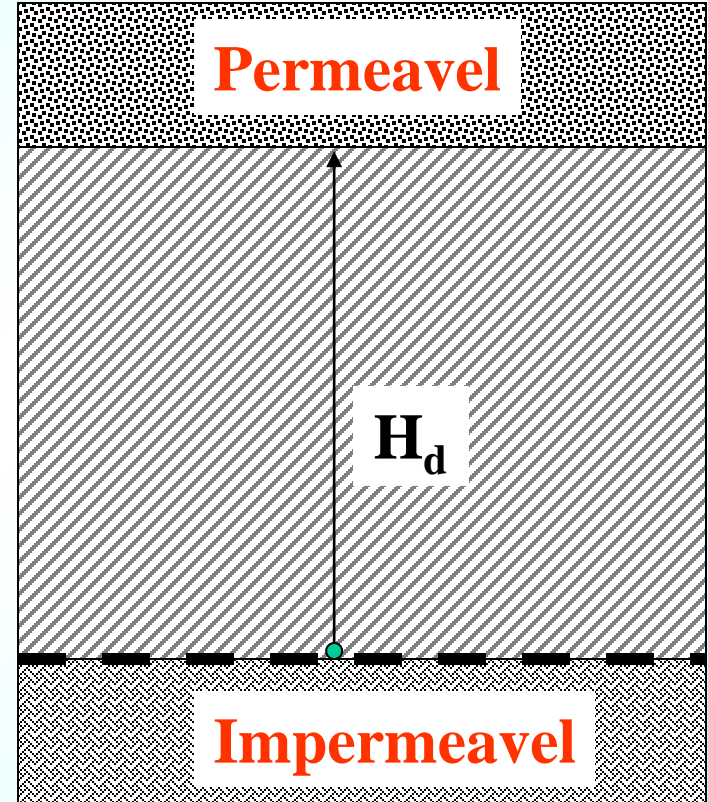
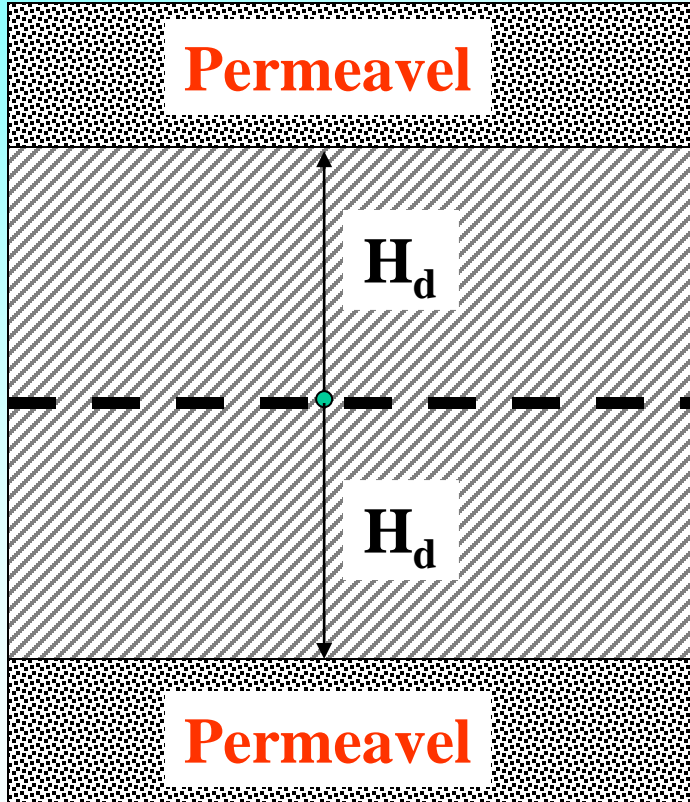
Recalque na Superfície

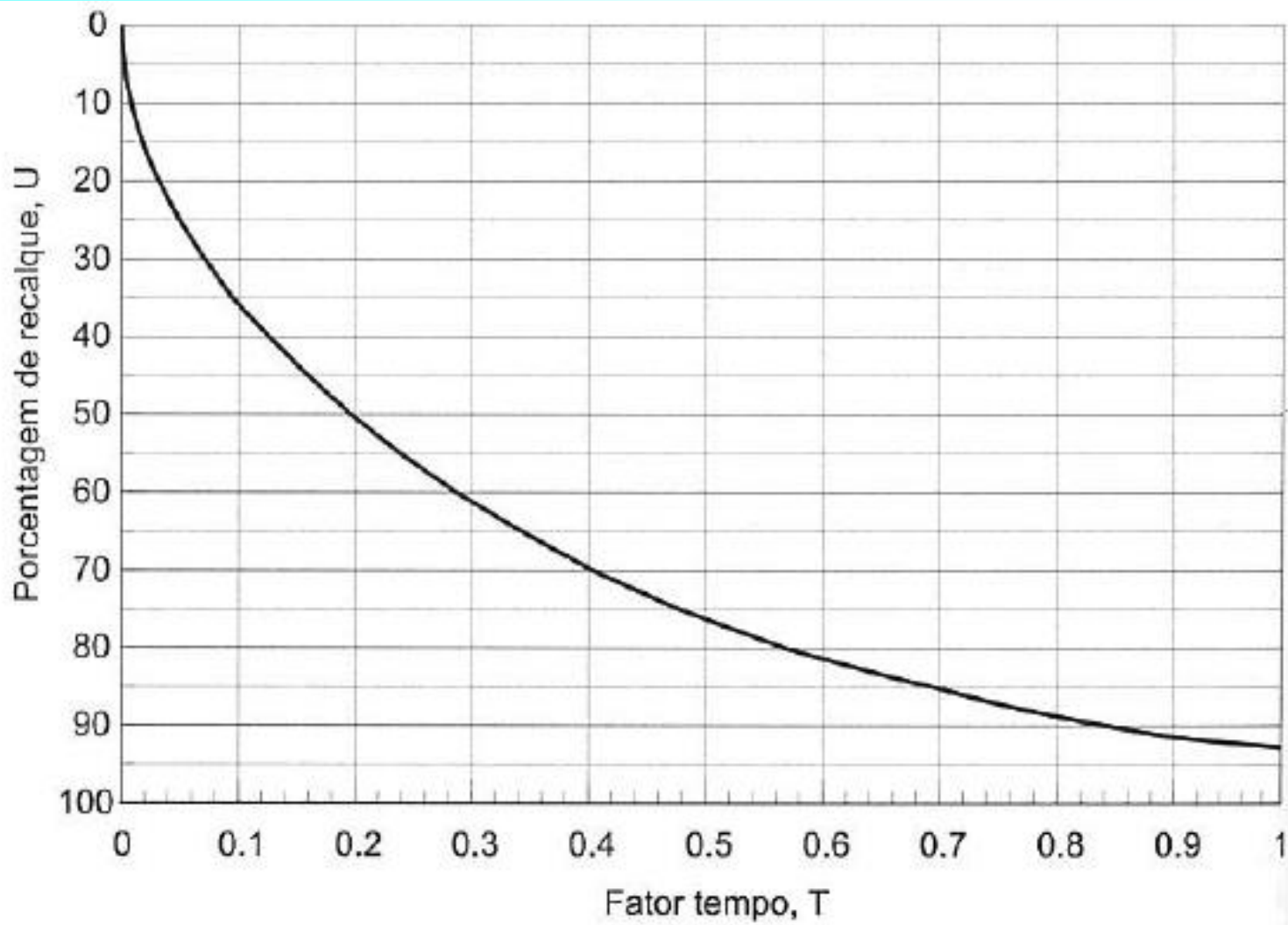
Somatória dos recalques dos diversos elementos ao longo da profundidade. A integração de todos estes recalques, dá origem ao recalque total.

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T}$$

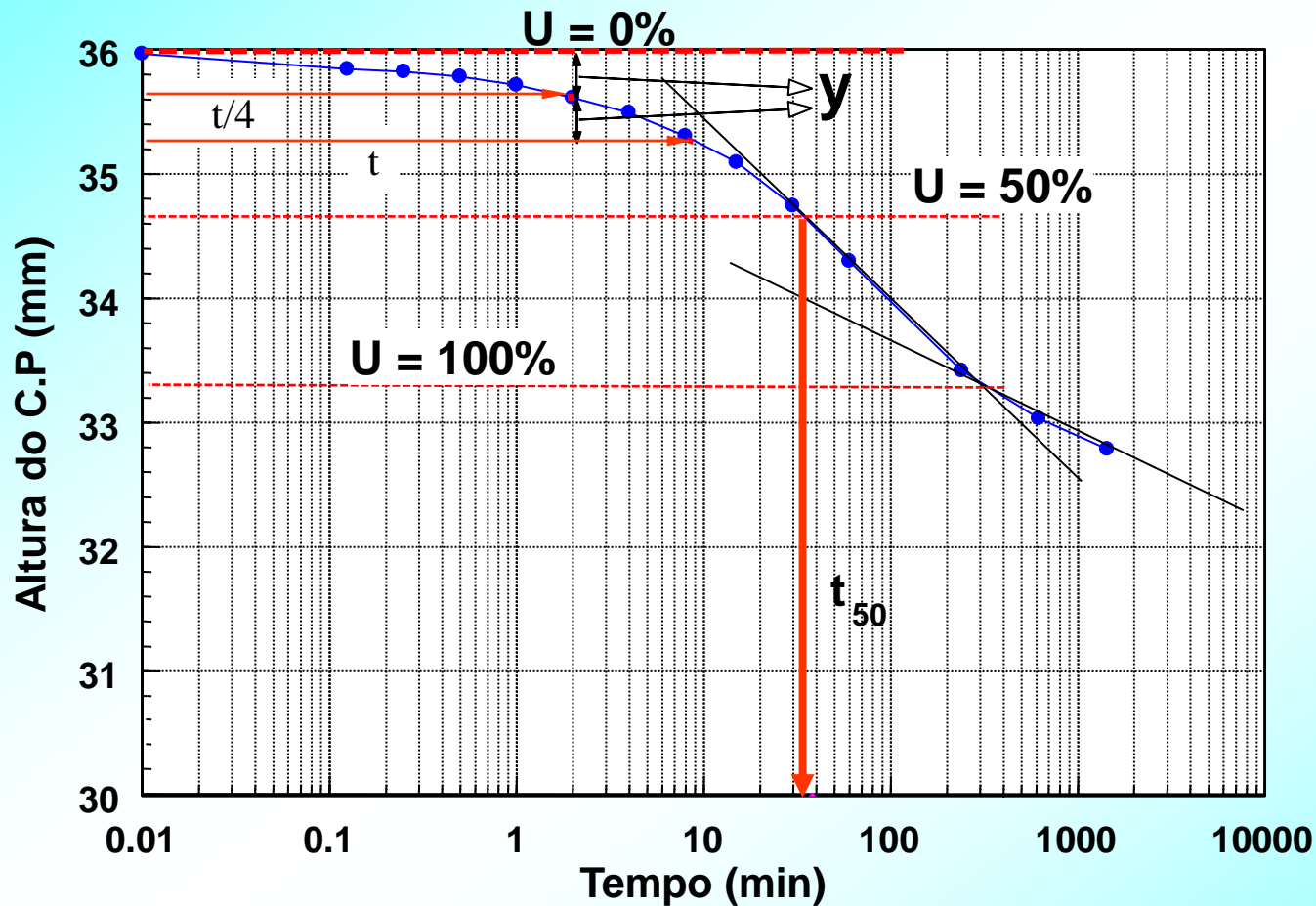
Para $U < 60\%$

$$U = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{T}$$





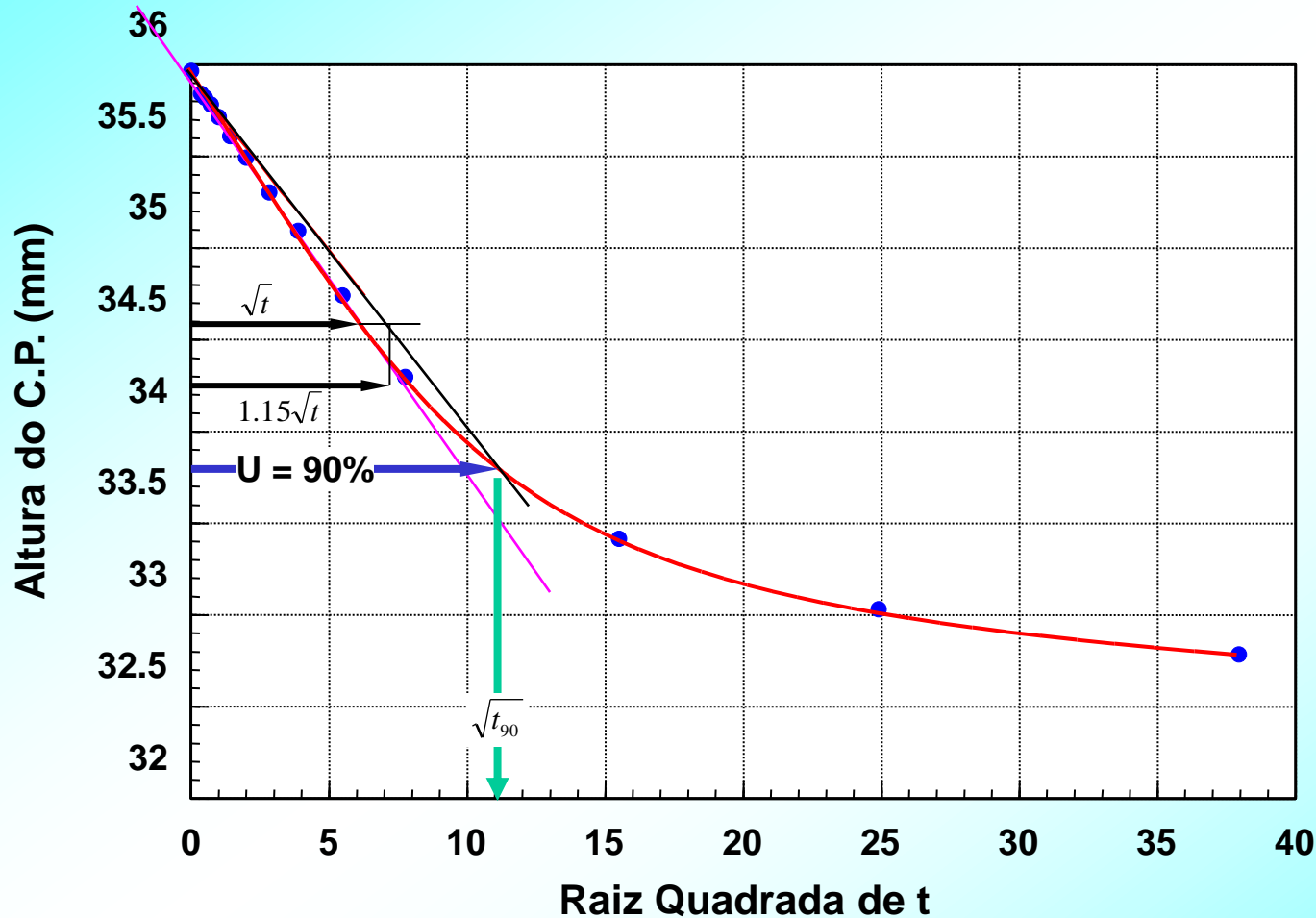
Determinação do Coeficiente de Adensamento, C_v Método de Casagrande



$$C_v = \frac{0.197H^2}{t_{50}}$$

**0.197 é o fator tempo
para $U = 50\%$**

Determinação do Coeficiente de Adensamento, C_v Método de Taylor

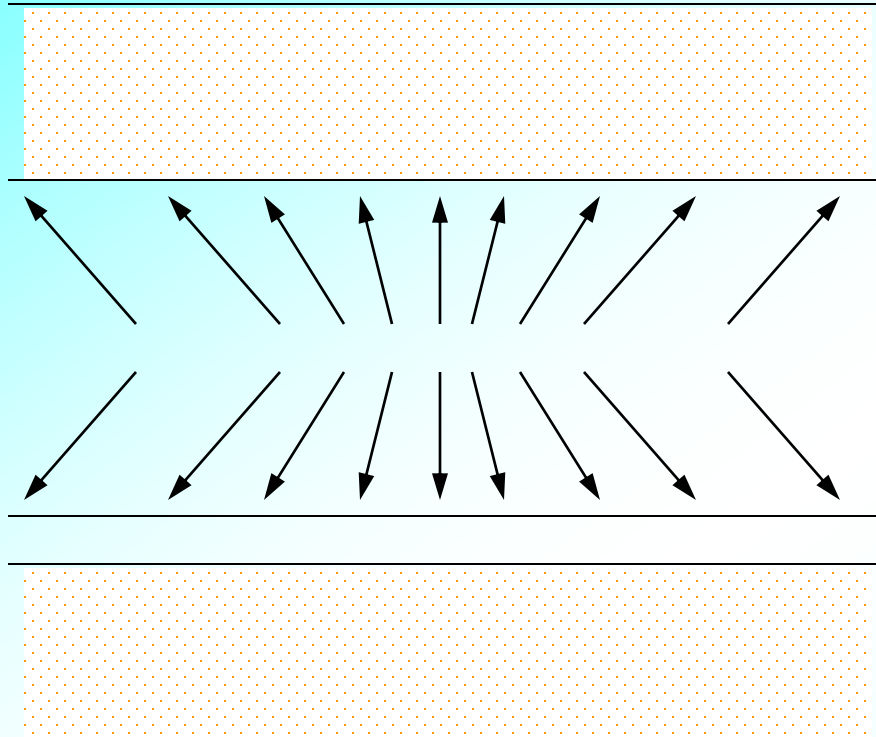


$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}}$$

0.848 é o fator tempo para $U = 90\%$

Fluxo Lateral no adensamento

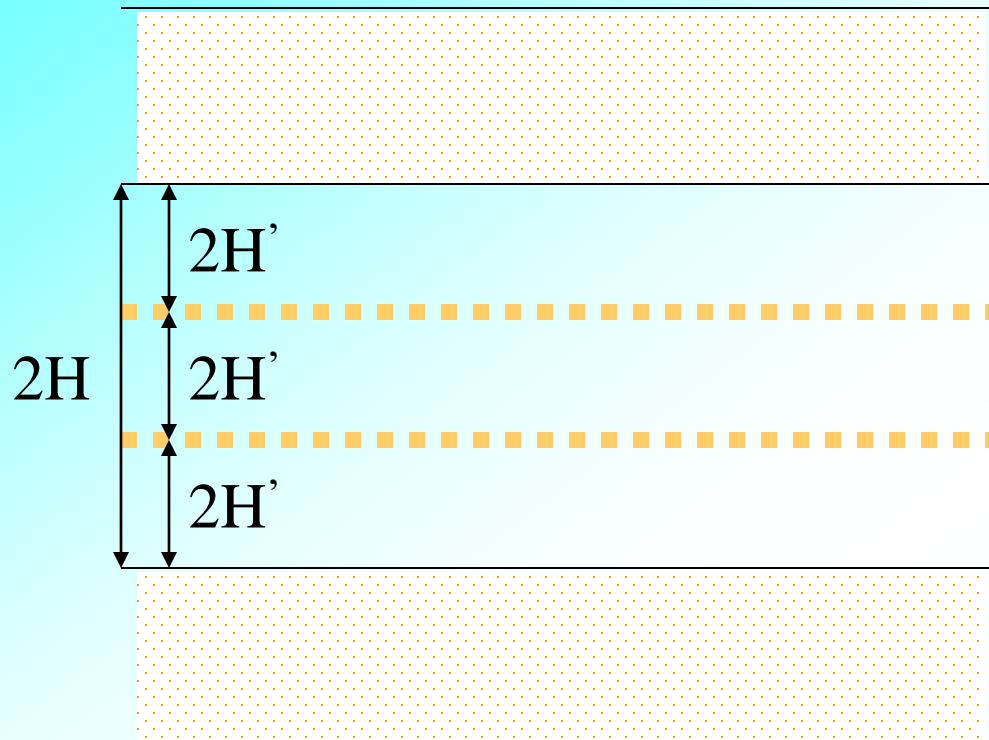
Hipotese da teoria - Fluxo unidimensional



Fatores que contribuem para o fluxo não uni-dimensional

- ✓ **Maior espessura da camada compressível.**
- ✓ **Menor largura da área carregada na superfície.**
- ✓ **Coefficiente de permeabilidade maior na direção horizontal**

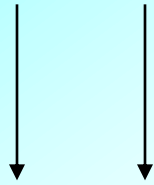
Influência de Lentes de Areia



- ✓ Reduz o tempo de recalque - reduzindo a distancia de petrcolação
- ✓ A presença de duas lentes de areia reduz H_d para $1/3$. Isto faz com que os recalques ocorramnum tempo 9 vezes menor.

Constância do C_v

$$C_v = f(k, e, a_v)$$

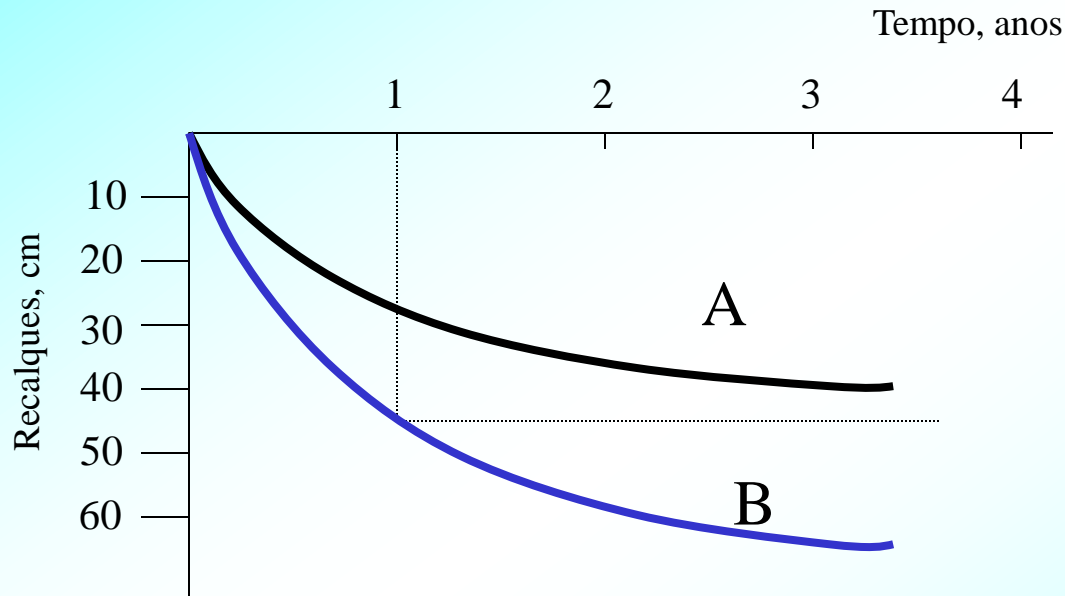


Variam com a redução do índice de vazios

$$C_v = \frac{k(1+e)}{a_v * \gamma_w}$$

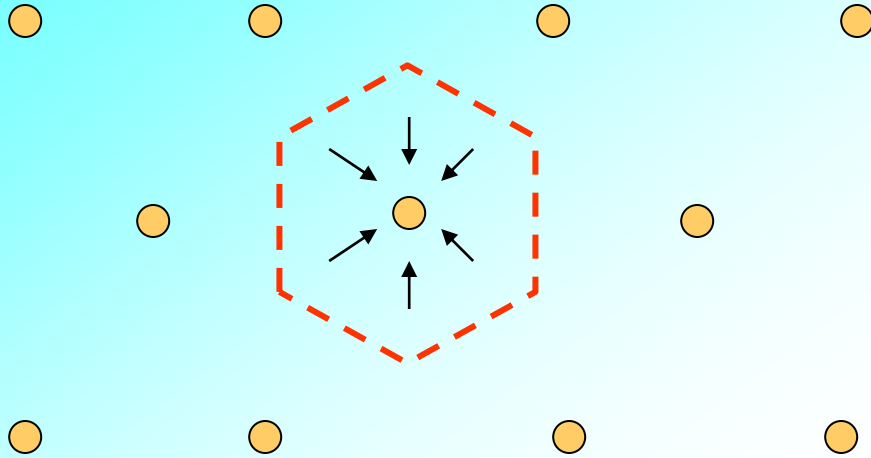
- Quando k e a_v variam o C_v não é muito afetado.
- A redução do índice de vazios segue a teoria de Terzaghi e a dissipação das pressões neutras é retardada devido a não constância do C_v .

Pré-Carregamento

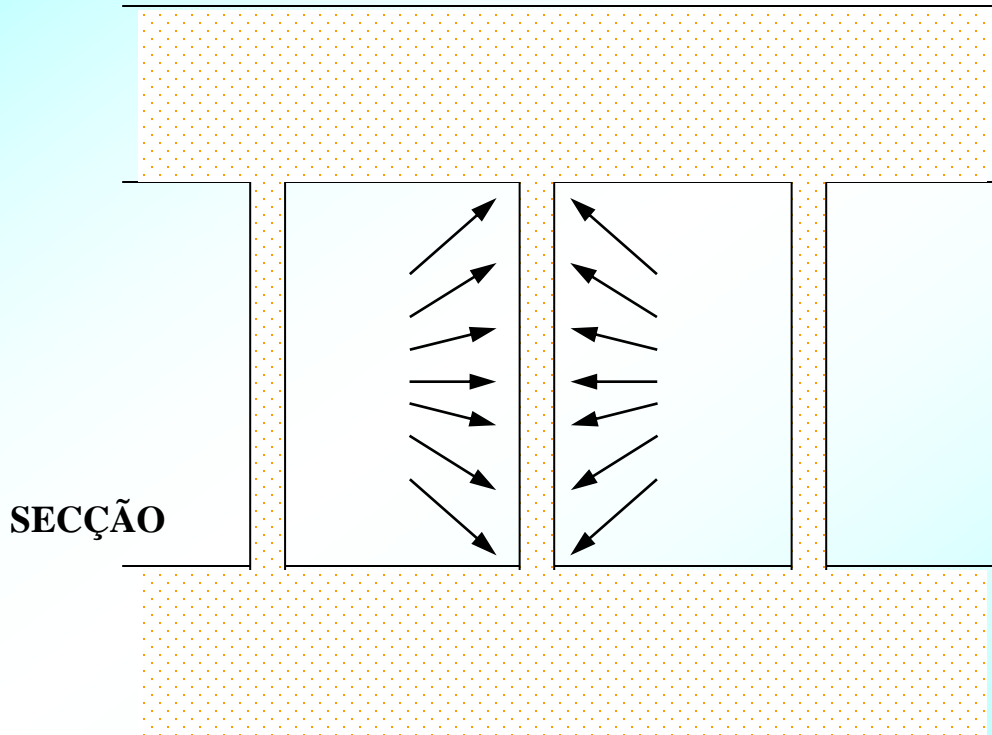


- ✓ Reduz os efeitos dos recalques futuros para um determinado carregamento.
- ✓ Reduz o adensamento secundário.

Drenos Verticais de Areia

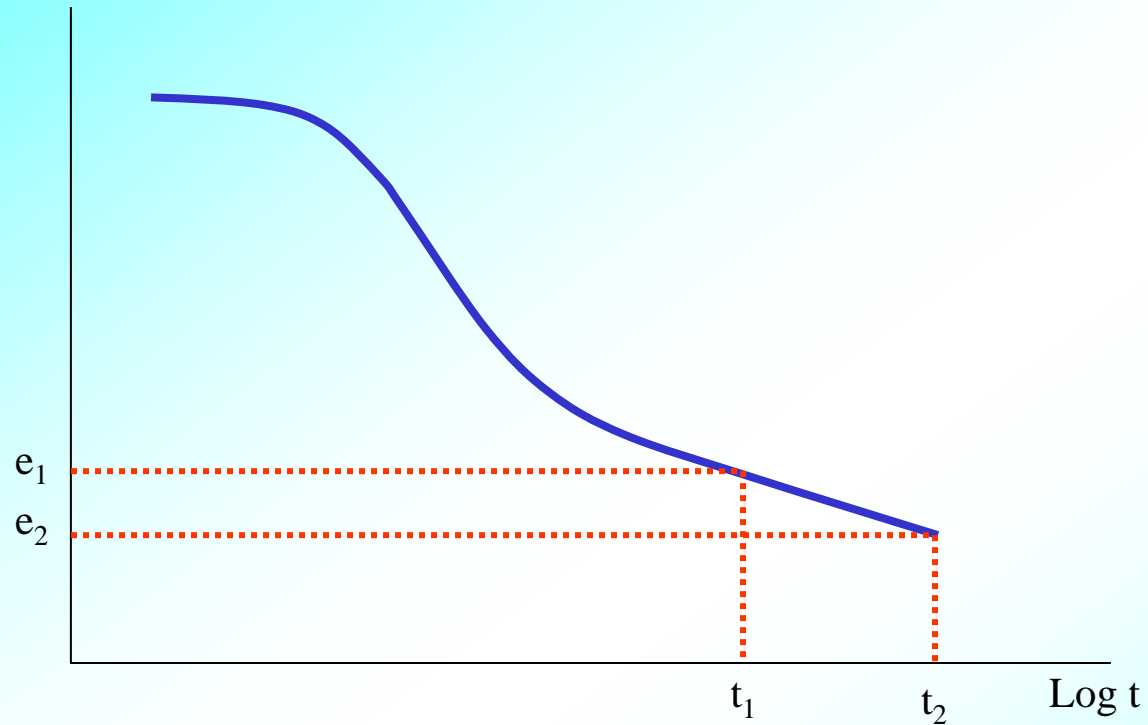


PLANTA



■ **Acelera os recalques pela redução do H_d .**

Adensamento Secundário



$$C_{\alpha} = \frac{\varepsilon}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}, \text{ sendo } \varepsilon = \frac{\Delta h}{h} = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1}$$

Adensamento Secundário

