



ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
PEF-2405 – Mecânica dos Solo

Aula 9

**Deformações devidas a
Carregamentos Verticais**

Consolidação



Consolidação



Consolidação



Consolidação



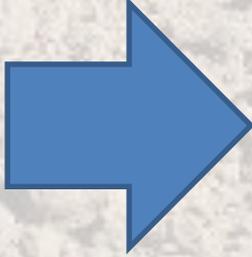
Consolidação



Recalques

- Aterros
- Fundações
- Edificações

Recalques

- Aterros
 - Fundações
 - Edificações
- 
- Rápidos (elástico)
 - Ao longo do tempo (Adensamento)

Cálculo dos Recalques Elásticos

- Teoria da elasticidade

$$\rho = I \cdot \frac{\sigma_o \cdot B}{E} \cdot (1 - \nu^2)$$

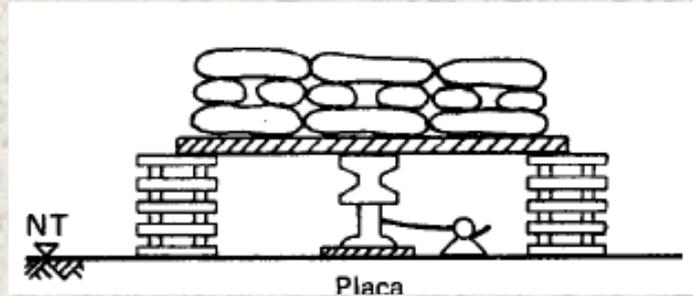
σ_o é a pressão uniformemente distribuída na superfície;

E e ν são os parâmetros do solo já definidos;

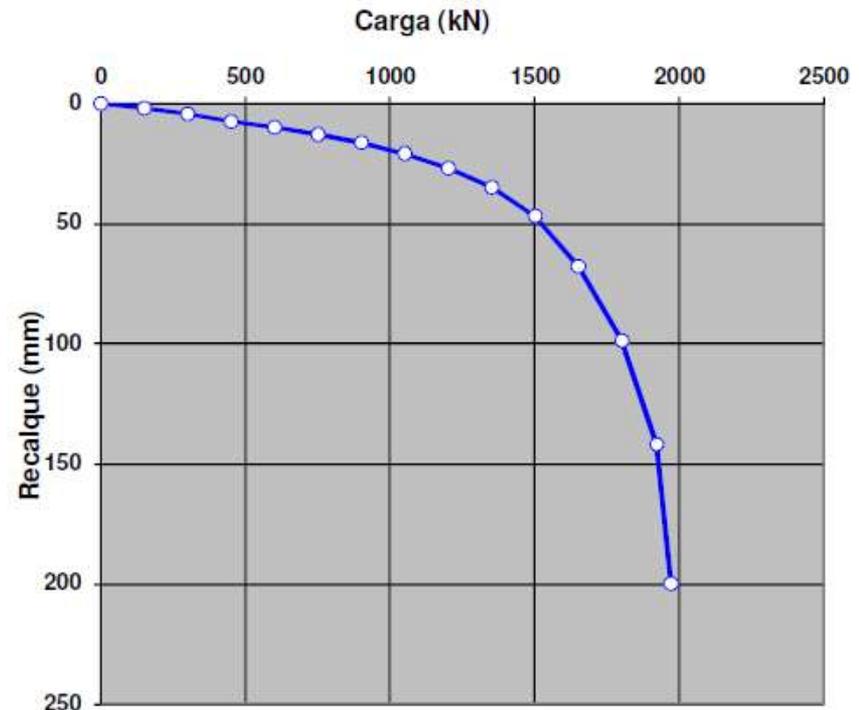
B é a largura (ou o diâmetro) da área carregada;

I é um coeficiente que leva em conta a forma da superfície carregada

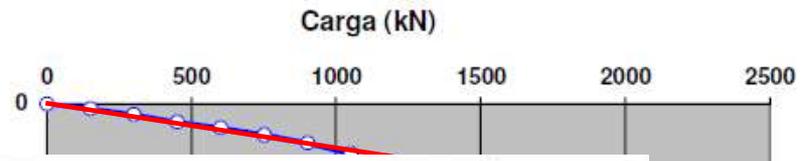
Cálculo dos Recalques Elásticos - EXEMPLO Col6 ex1.1



Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
150	2
300	4,5
450	7,5
600	10
750	13
900	16,5
1050	21
1200	27
1350	35
1500	47
1650	68
1800	99
1920	142
1970	200



Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
150	0
300	
450	
600	
750	
900	
1050	
1200	
1350	
1500	
1650	
1800	
1920	112



Tipo de Solo	Coeficiente de Poisson		
Argila Saturada	0,45	-	0,5
Argila Parcialmente Saturada	0,35	-	0,4
Areia Densa ou Pedregulho	0,40	-	0,50
Areia Medianamente Densa ou Pedregulho	0,30	-	0,40
Silte	0,30	-	0,40

Deslocamento vertical (recalque) de placa rígida: ρ E = módulo de Young, ν = coeficiente de Poisson A = área da placa, P = carga total aplicada na placa	$\rho = \frac{(1 - \nu^2)}{\beta} \left(\frac{P}{A} \right) \frac{\sqrt{A}}{E}$	
Placa circular (Schiffman e Aggarwala, 1961)	$\beta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \approx 1,13$	
Placa retangular (Whitman and Richart, 1967) L = comprimento da placa, B = largura da placa	$\beta \approx 1,07$	L/B = 1
	$\beta \approx 1,10$	L/B = 2
	$\beta \approx 1,20$	L/B = 3

$\Delta\sigma = 0$ a 900kN

$\Delta\rho = 0$ a 16,5mm

B = 800mm

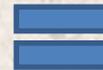
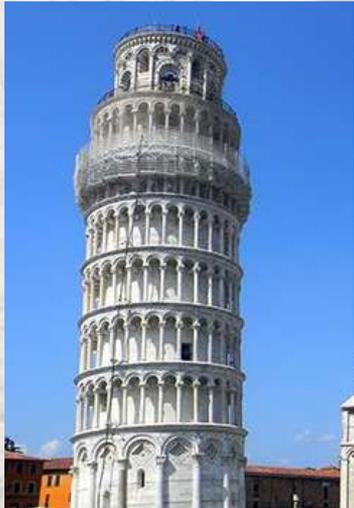
l = 1,13 (recalque no centro de uma placa circular rígida)

E e $\nu = ?$

$$E = (1 - 0,35^2) / 1,13 \times 900 / 0,5 \times \sqrt{0,5} / 0,0165 = 60 \text{ MPa}$$

Cálculo dos Recalques por Adensamento

- Teorias de adensamento



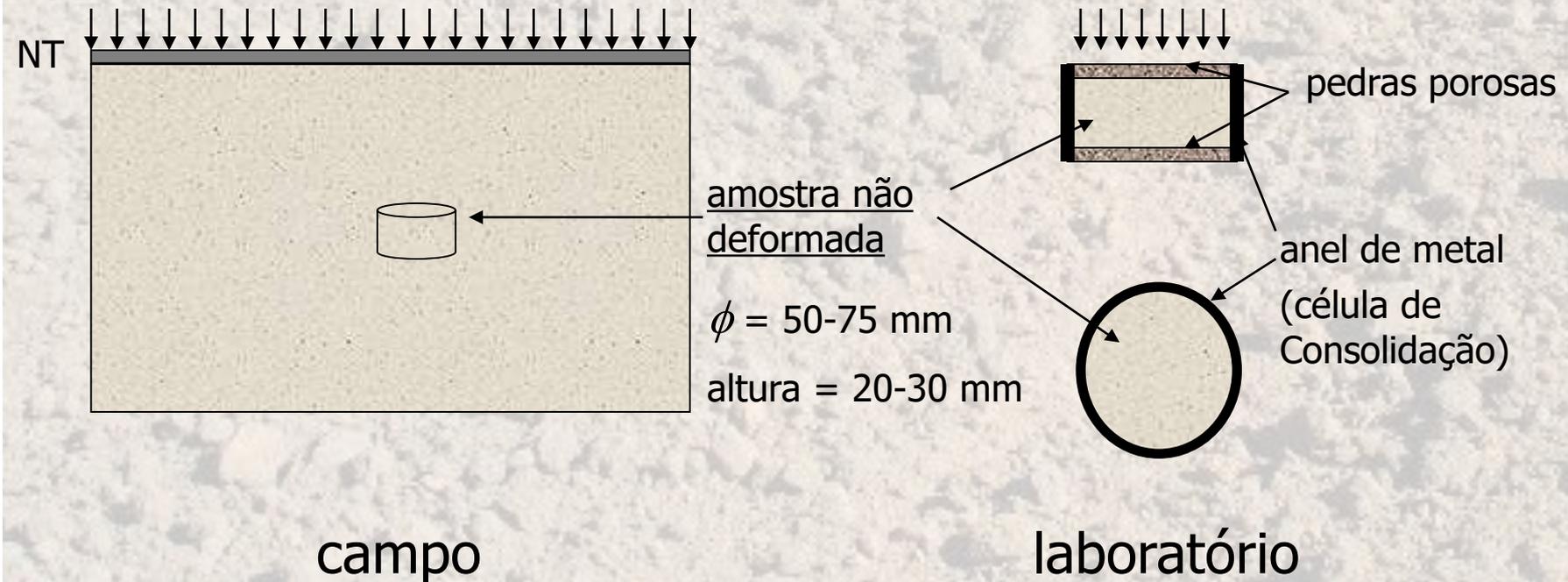
Ensaaios para determinação da deformabilidade

- Compressão axial
- Compressão edométrica (confinada) -
Ensaio de adensamento

Consolidação Unidimensional

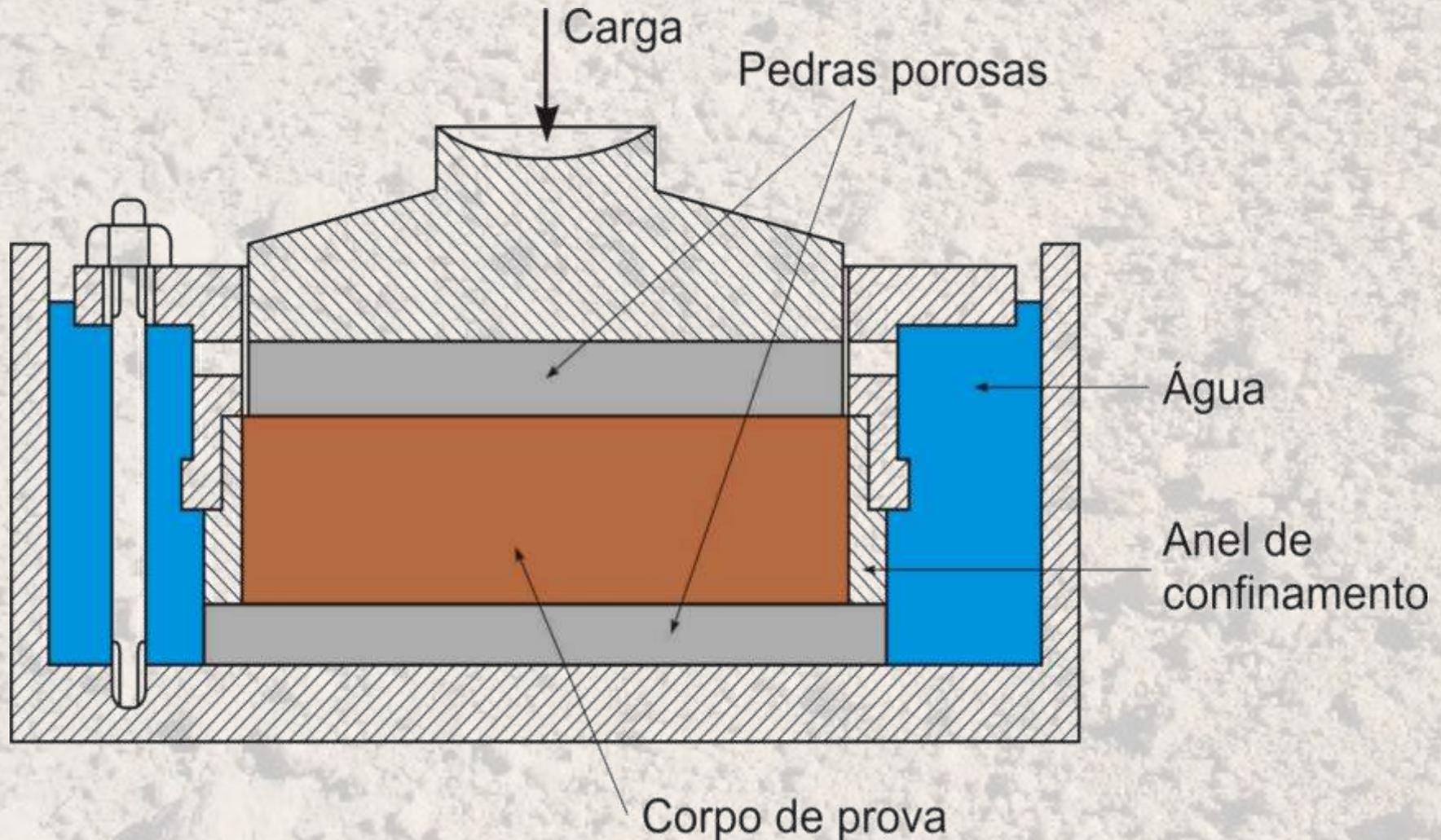
Ensaio Edométrico

- Simulação da consolidação unidimensional em laboratório



Consolidação Unidimensional

Ensaio Edométrico



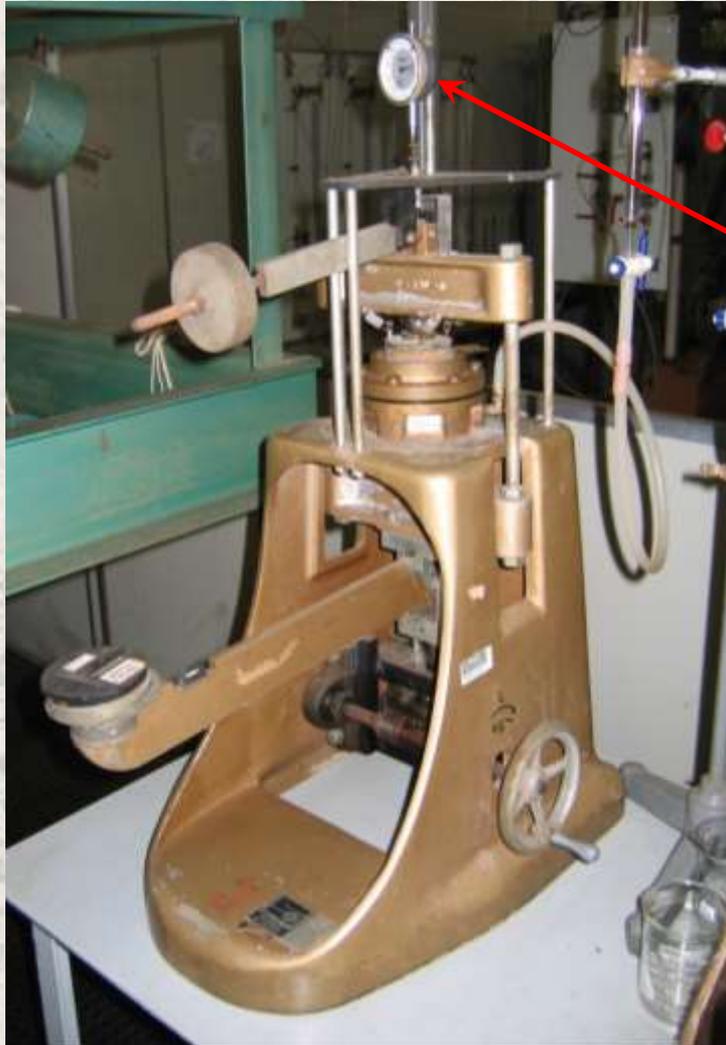
Consolidação Unidimensional

- Célula de Consolidação



Consolidação Unidimensional

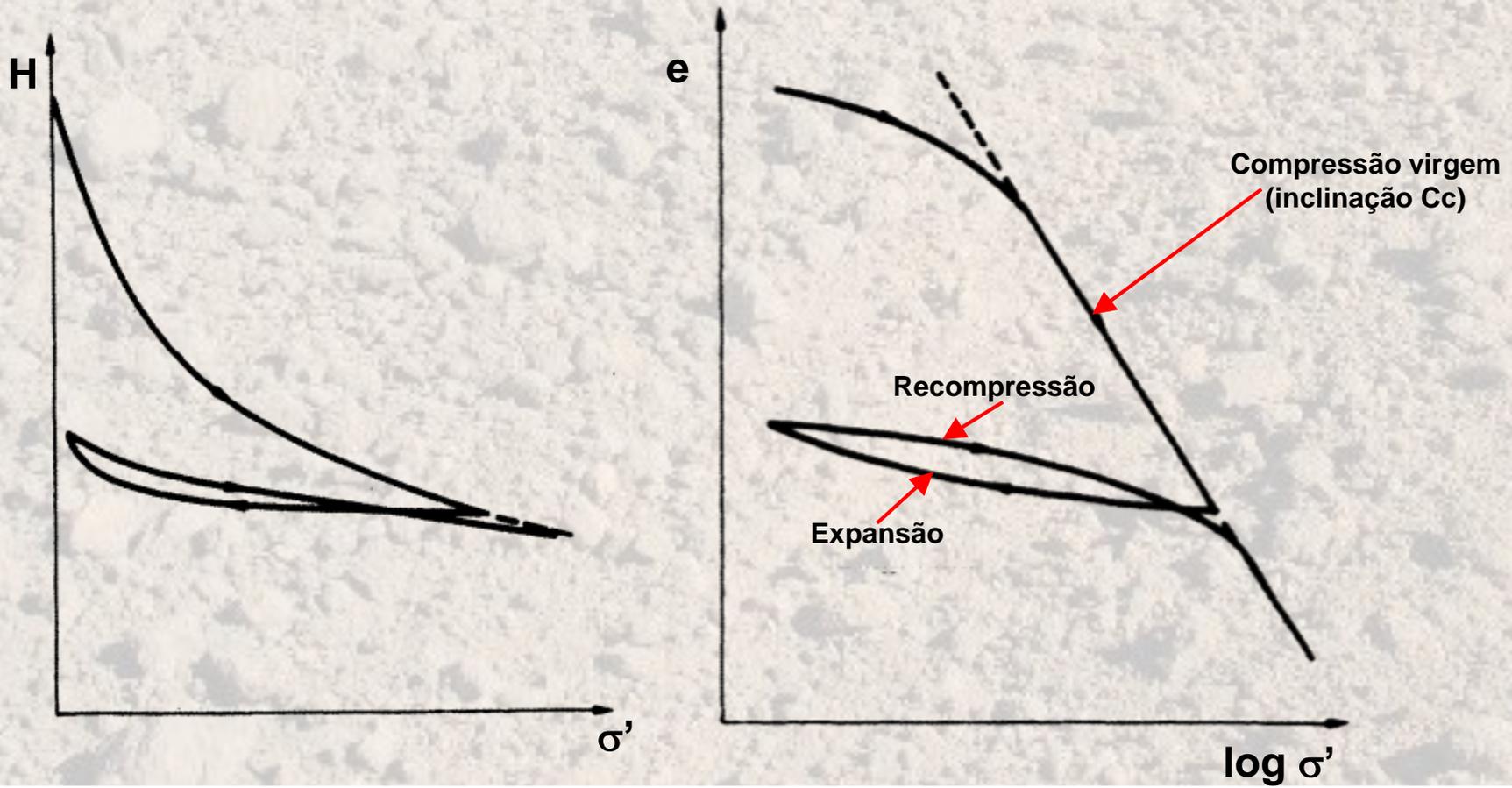
■ Prensa de Consolidação



Consolidação Unidimensional

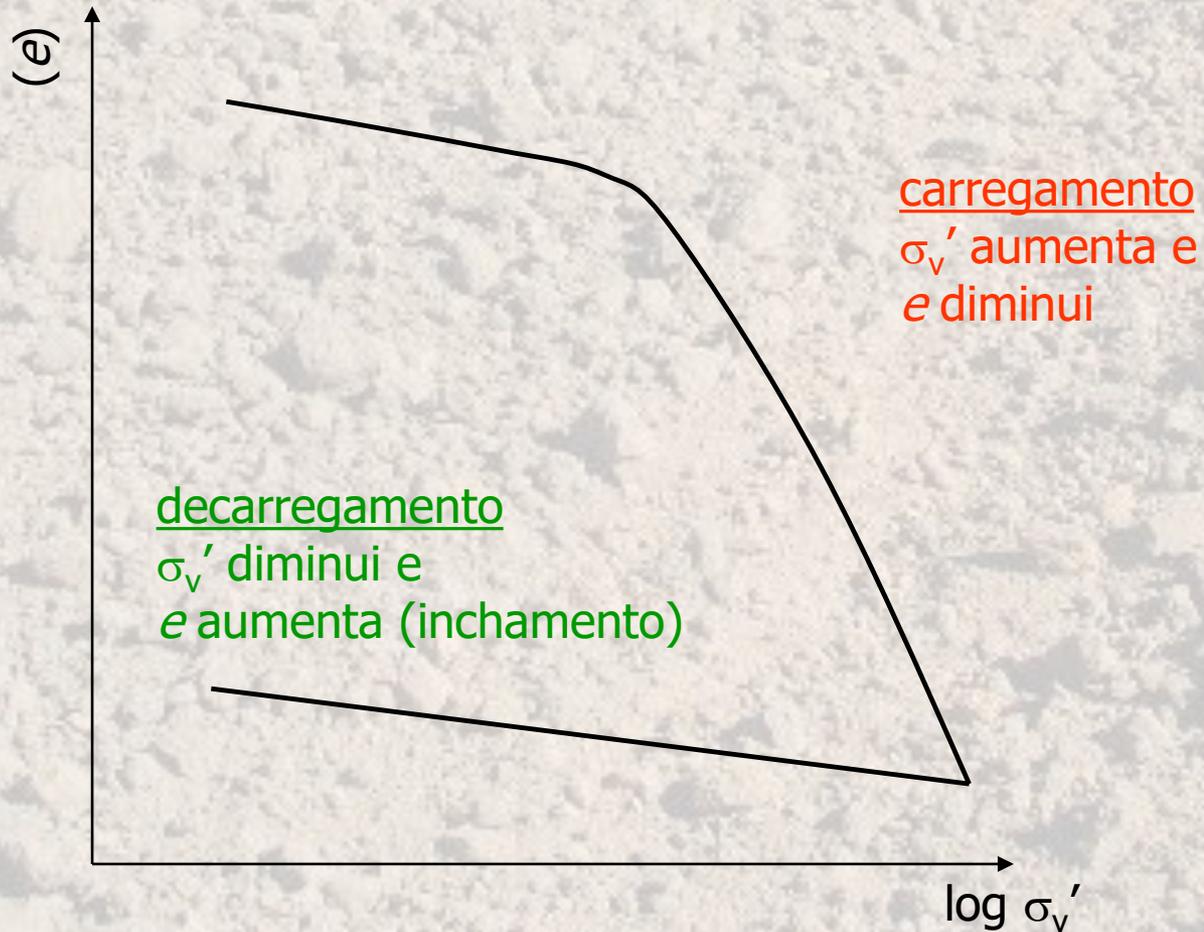
■ Ensaio Edométrico

- Ensaio: medida da variação da altura do CP em função da tensão aplicada
- Interpretação: gráfico da altura do CP (H) x tensão efetiva (σ')



Consolidação Unidimensional

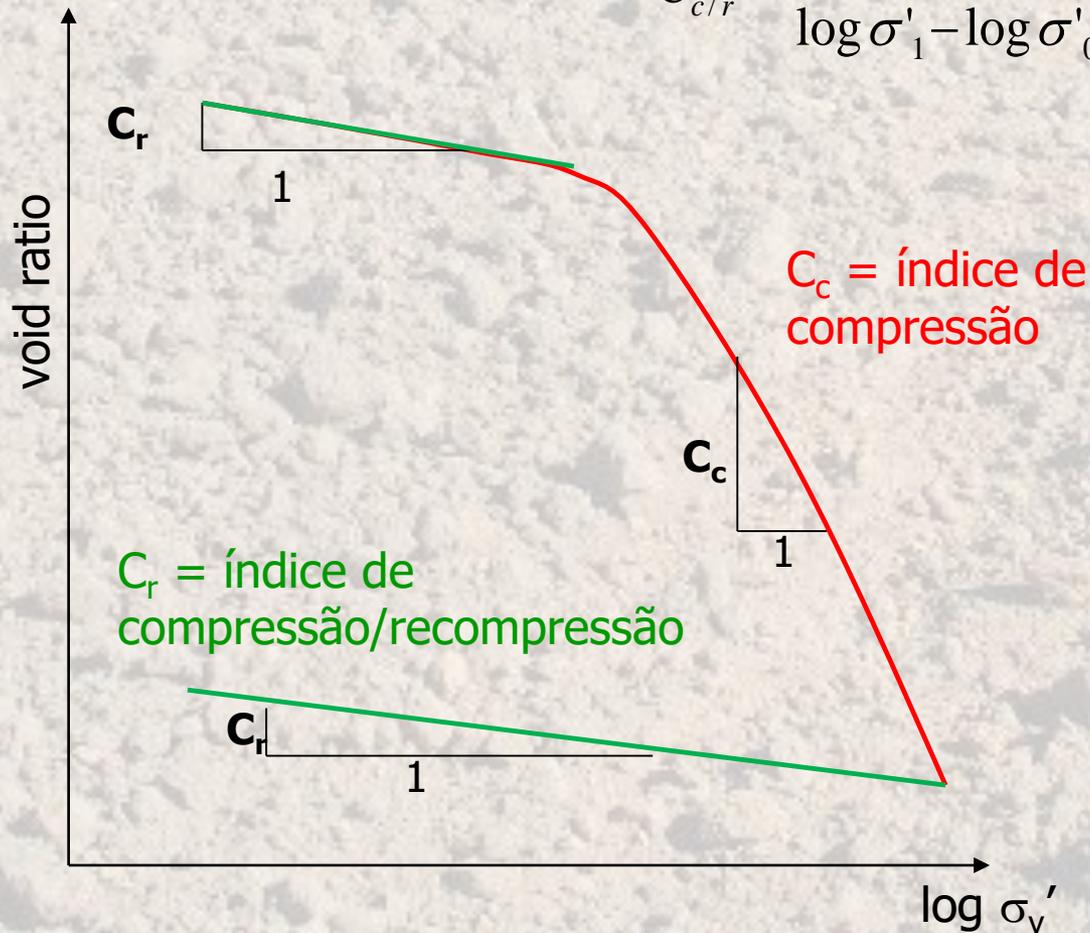
Ensaio Edométrico



Consolidação Unidimensional

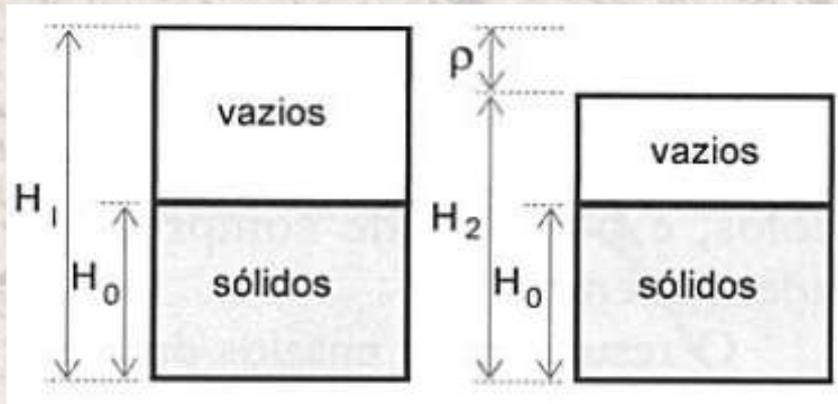
Ensaio Edométrico

$$C_{c/r} = \frac{e_0 - e_1}{\log \sigma'_1 - \log \sigma'_0} = \frac{e_0 - e_1}{\log(\sigma'_1 / \sigma'_0)}$$



Consolidação Unidimensional

- **Ensaio Edométrico: Determinação do Índice de vazios no final de cada estágio de carregamento**



$$H_1 = H_0 \cdot (1 + e_1)$$

$$\rho = H_1 \cdot \frac{(1 + e_1 - 1 - e_2)}{(1 + e_1)}$$

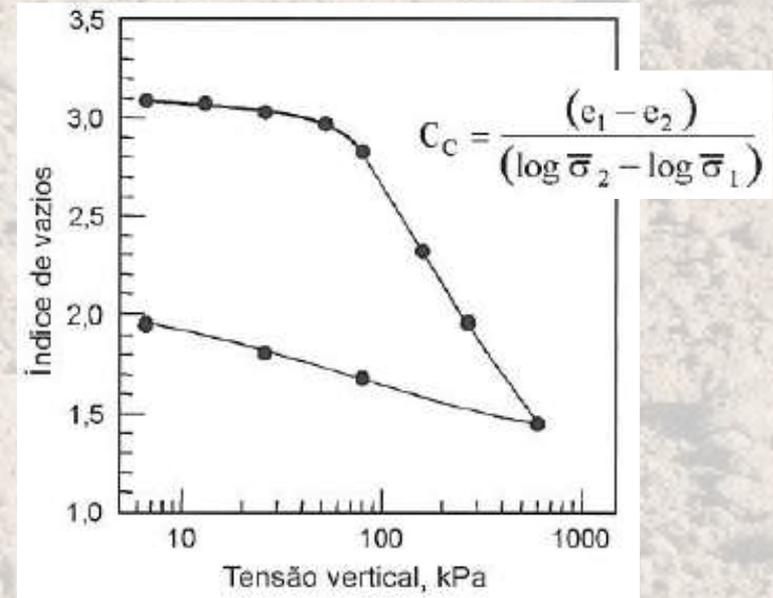
$$H_2 = H_0 \cdot (1 + e_2)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho}{H_1} = \frac{(e_1 - e_2)}{(1 + e_1)}$$

$$\rho = \frac{H_1}{(1 + e_1)} (e_1 - e_2)$$



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

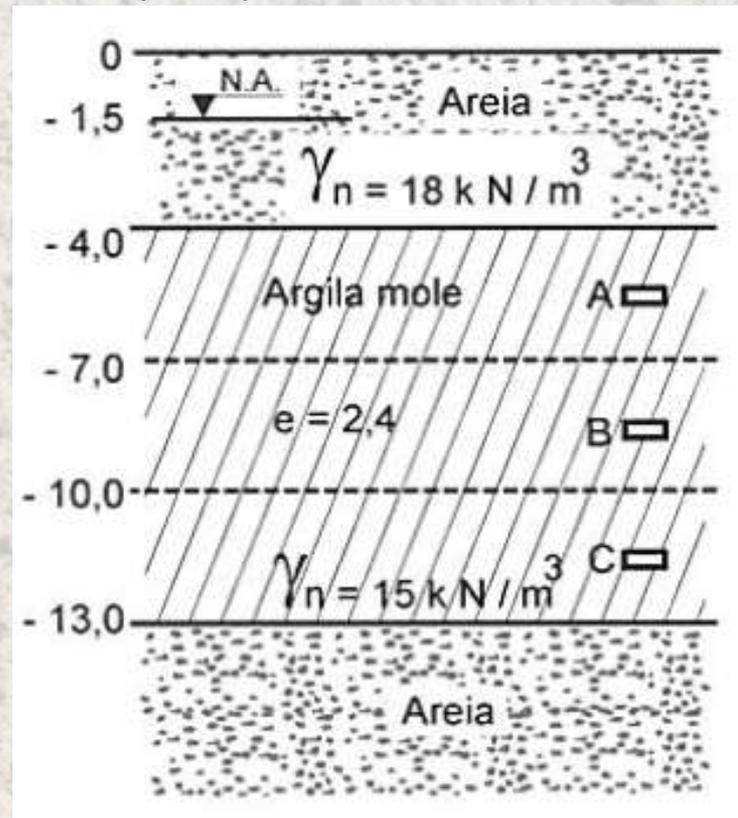


Consolidação

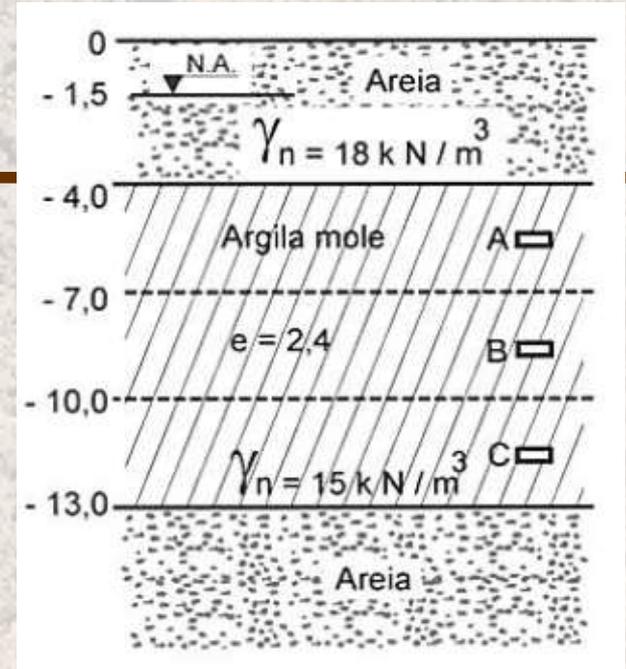
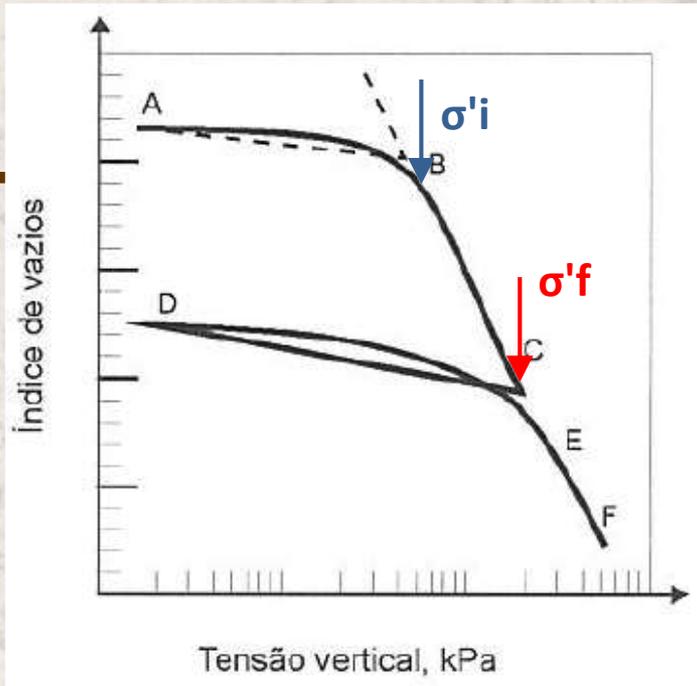
- Usa a proporcionalidade de deformabilidade do ensaio para o campo
- Proporção entre o recalque/espessura da camada = **CONSTANTE**
 - CP: $h = 2\text{cm} - \rho = 0,1\text{cm}$
 - Campo: $H = 2\text{m} - \rho = 10\text{cm}$

Exemplo

No terreno descrito pelo perfil de sondagem do lado será executado um aterro sanitário com uma altura de 6m. Sabendo que o peso específico do RSU aterrado e compactado é 12kN/m^3 e que o índice de compressão é igual a 2,2, calcule o recalque que a obra sofrerá.



Exemplo



$\underline{\sigma'_i}$

$$\sigma'_i = 4 \times 18 + 4,5 \times 15 - 7 \times 10 = 69,5 \text{ kPa}$$

$\underline{\sigma'_f}$

$$\sigma'_f = 69,5 + 6 \times 12 = 141,5 \text{ kPa}$$

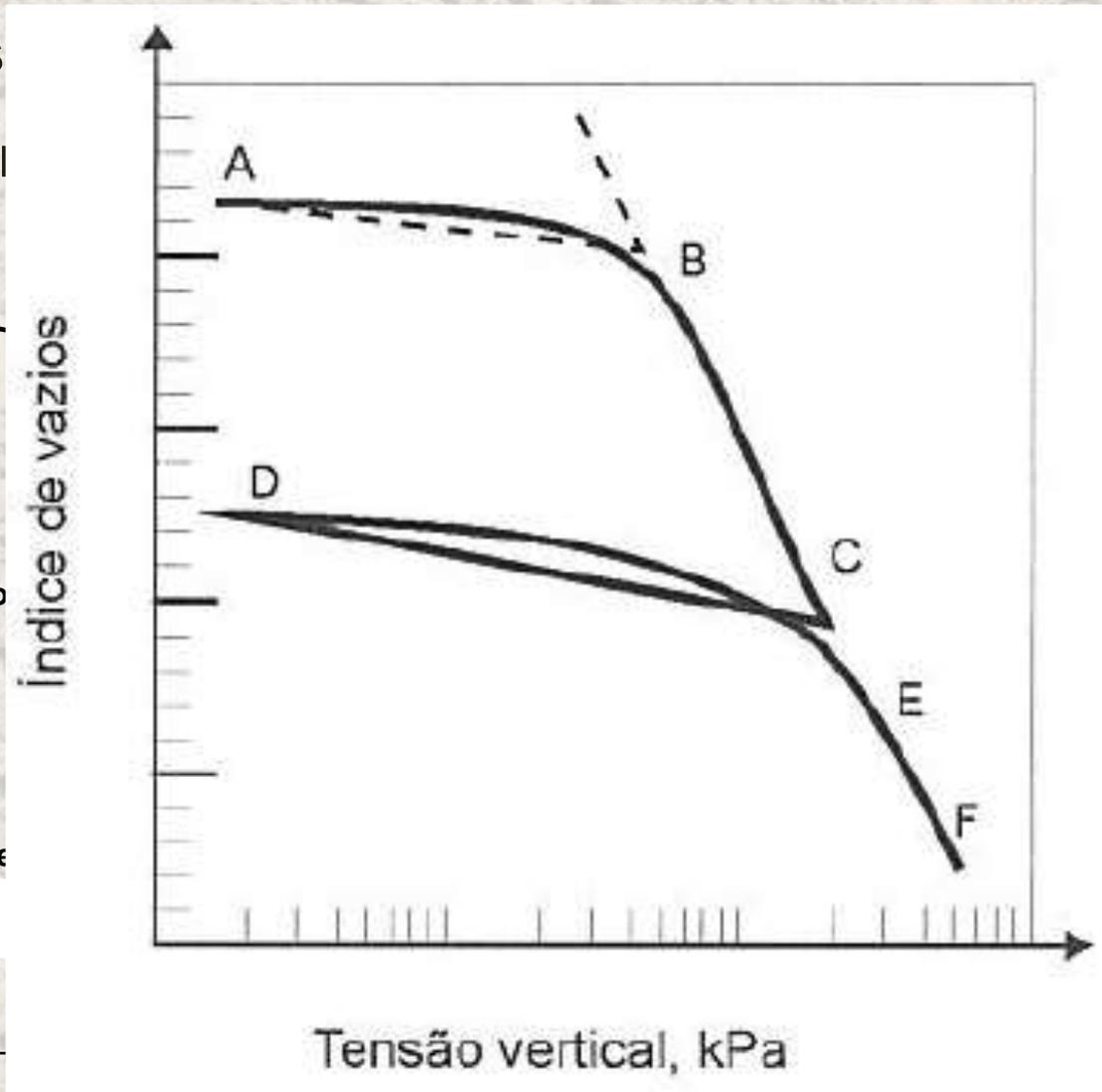
$\underline{\rho}$

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

$$\rho = 2,2 \times 9 / (1 + 2,4) \times \log(141,5 / 69,5) = 1,8 \text{ m}$$

Tensão de Pré-Adensamento

- Máxima tensão submetido e



ve

ensados

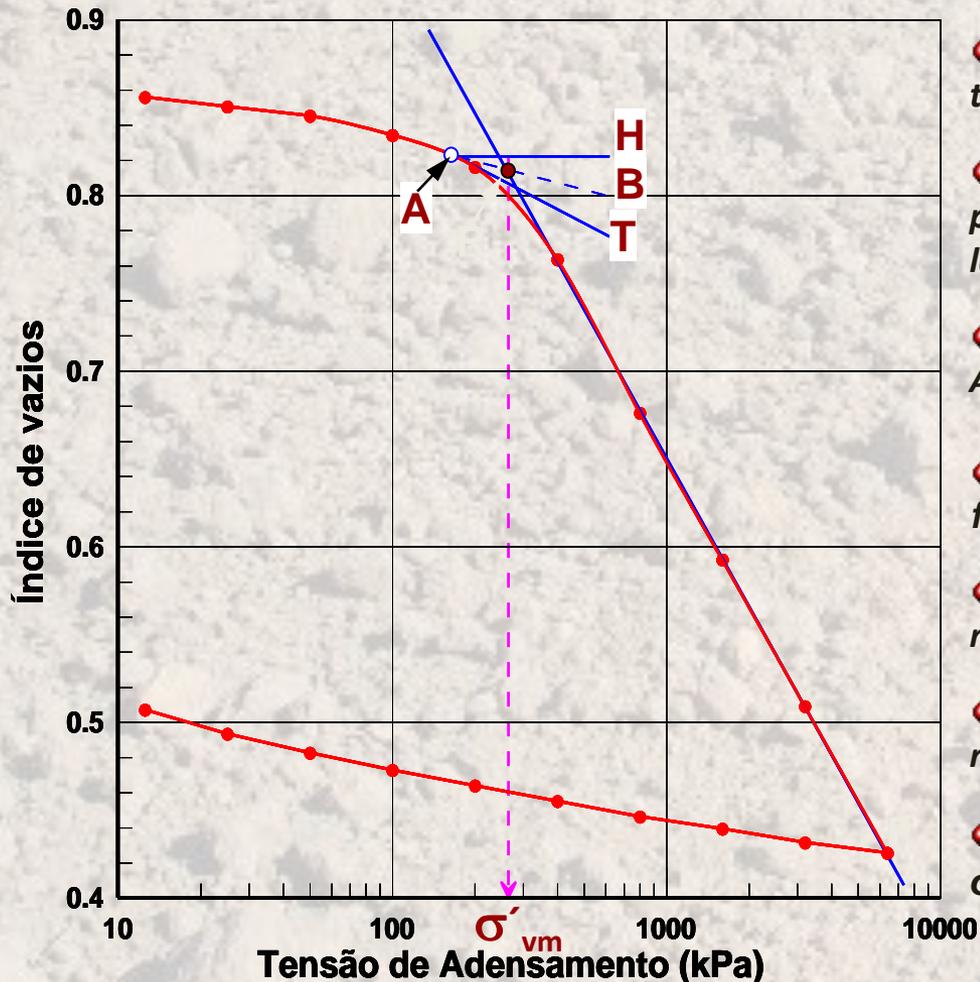
ensamento

densamento

m / σ_i

Tensão de Pré-Adensamento - σ'_{vm}

■ Método de Casagrande



● Traçar a curva de índice de vazios versus log da tensão.

● A partir do ponto de maior curvatura da curva, ponto A, traçar uma reta tangente à curva de laboratório, reta AT.

● Traçar uma reta horizontal pelo ponto A, reta AH.

● Determinar a bissetriz AB, do ângulo formado pelas retas AH e AT.

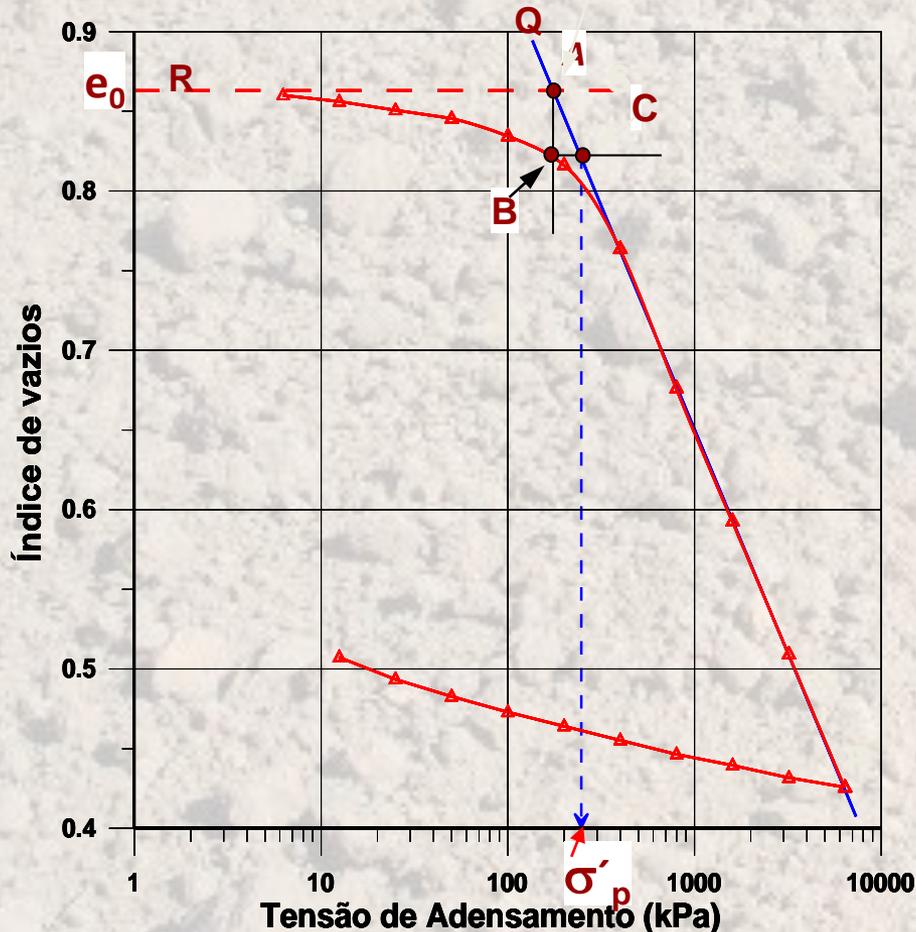
● Prolongar a reta virgem, PQ até encontrar a reta AB.

● Definir o ponto R como a interseção entre as retas PQ e AB.

● A partir de R traçar uma reta vertical obtendo σ'_{vm} .

Tensão de Pré-Adensamento - σ'_{vm}

■ Método de Pacheco e Silva



● Traçar a curva de índice de vazios versus log da tensão.

● Traçar uma reta horizontal a partir do ponto e_0 , reta RS.

● Prolongar a reta virgem até encontrar a reta RS.

● Definir o ponto A como a interseção entre as retas PQ e RS. Traçar a partir de A uma reta vertical até encontrar a curva de compressão, ponto B.

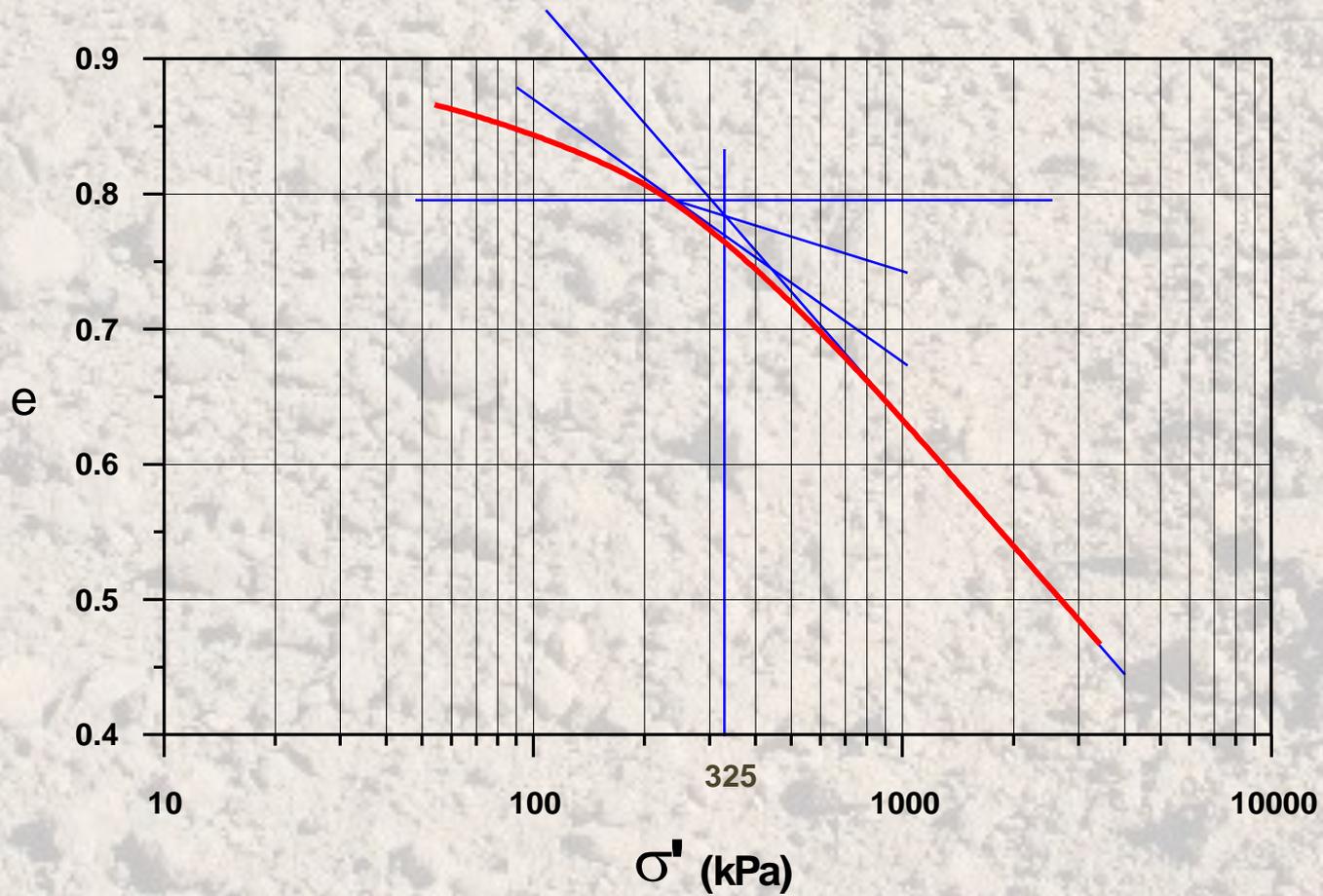
● A partir de B traçar uma reta horizontal até interceptar a reta PQ, ponto C.

● A partir de C traçar uma reta vertical obtendo σ'_{vm}

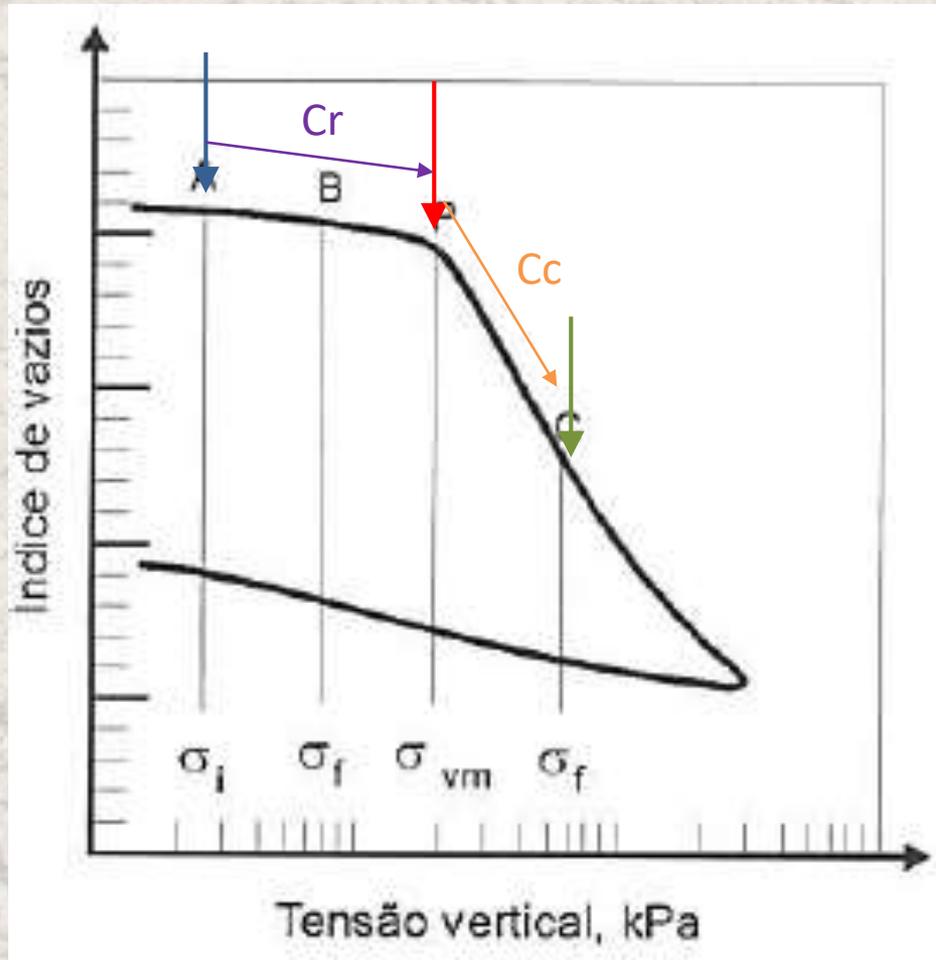
Tensão de Pré-Adensamento

- **Método de Pacheco e Silva**
 - **Independente do operador (menos subjetivo)**
- **Método de Casagrande**
 - **Mais difundido internacionalmente**

Tensão de Pré-Adensamento - Exemplo



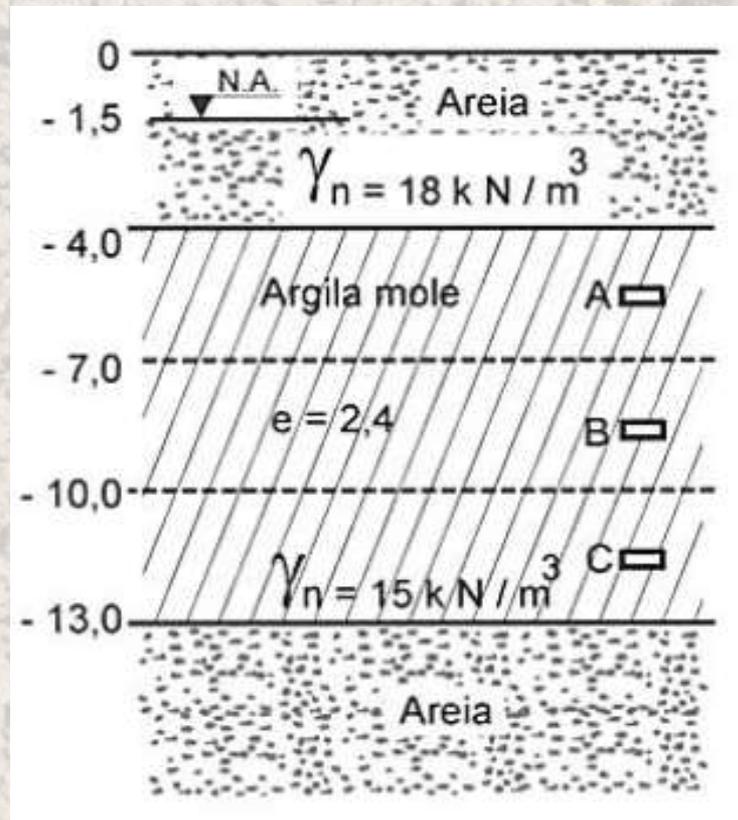
Recalque de Solos Sobreadensados



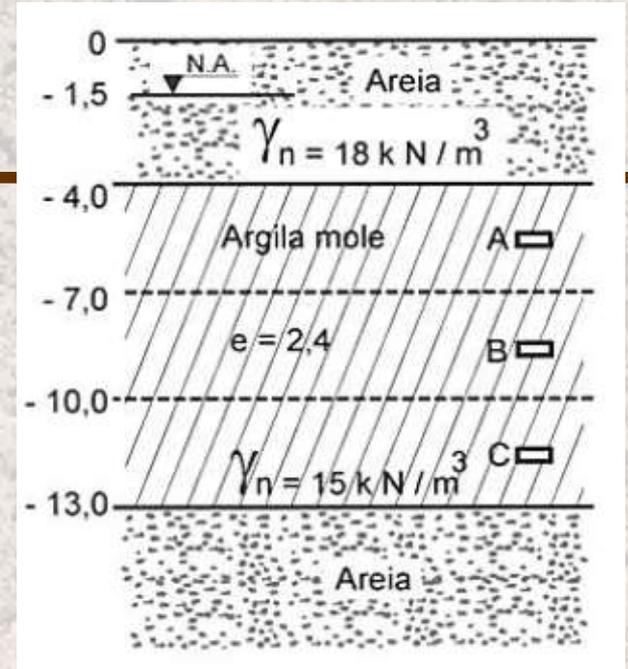
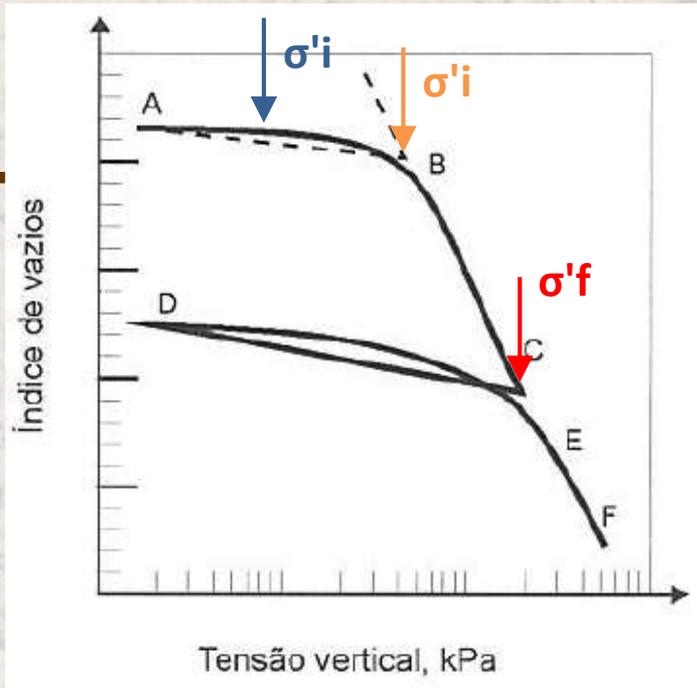
$$\rho = \frac{H}{1+e_1} \cdot \left(C_r \cdot \log \frac{\sigma_a}{\sigma_i} + C_c \cdot \log \frac{\sigma_a}{\sigma_a} \right)$$

Exemplo

No terreno descrito pelo perfil de sondagem do lado será executado um aterro sanitário com uma altura de 6m. Sabendo que o peso específico do RSU aterrado e compactado é 12kN/m^3 , que o índice de compressão é igual a 2,2, que o índice de recompressão é 0,2 e que a $RSA = 1,5$, calcule o recalque que a obra sofrerá.



Exemplo



$\sigma'i$

$$\sigma'i = 4 \times 18 + 4,5 \times 15 - 7 \times 10 = 69,5 \text{ kPa}$$

$\sigma'f$

$$\sigma'f = 69,5 + 6 \times 12 = 141,5 \text{ kPa}$$

$\sigma'vm$

$$\sigma'vm = 1,5 \times 69,5 = 104,3 \text{ kPa}$$

ρ

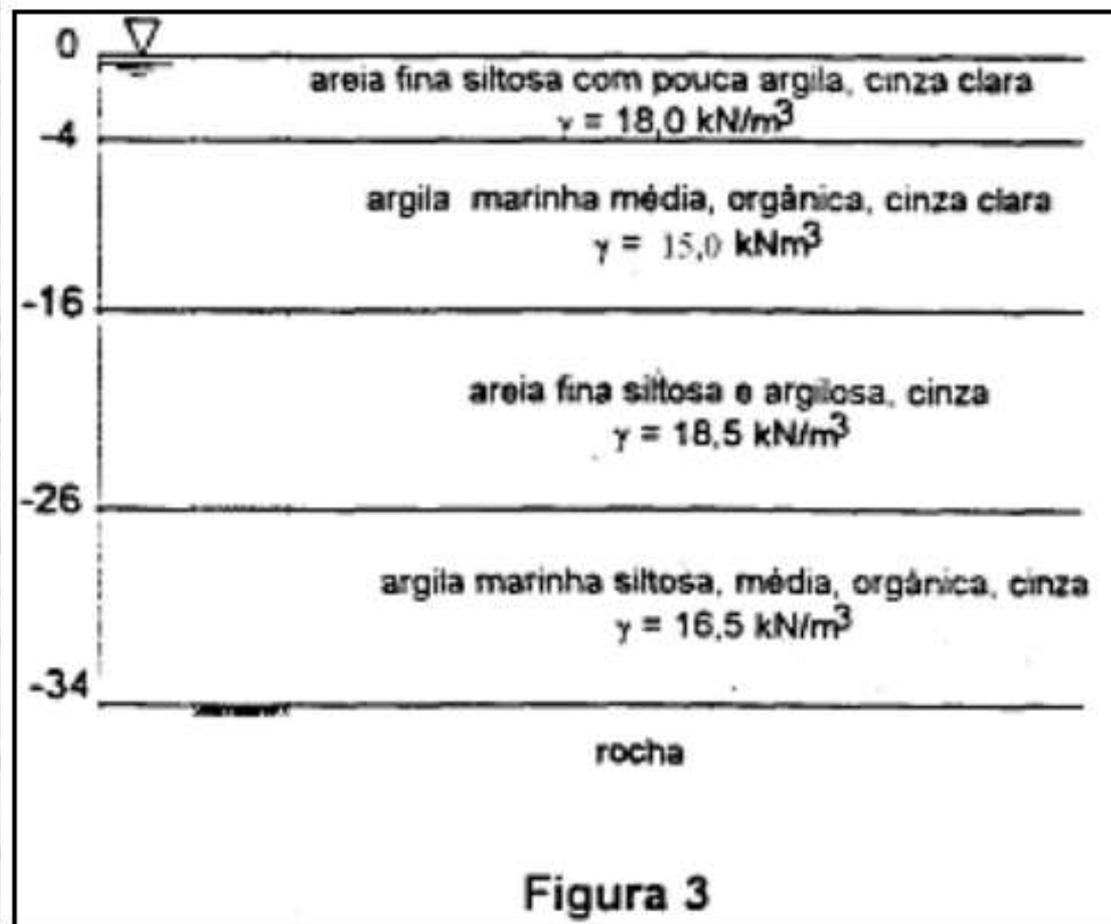
$$\rho = \frac{H}{1+e_1} \cdot \left(C_r \cdot \log \frac{\bar{\sigma}_a}{\bar{\sigma}_i} + C_c \cdot \log \frac{\bar{\sigma}_f}{\bar{\sigma}_a} \right)$$

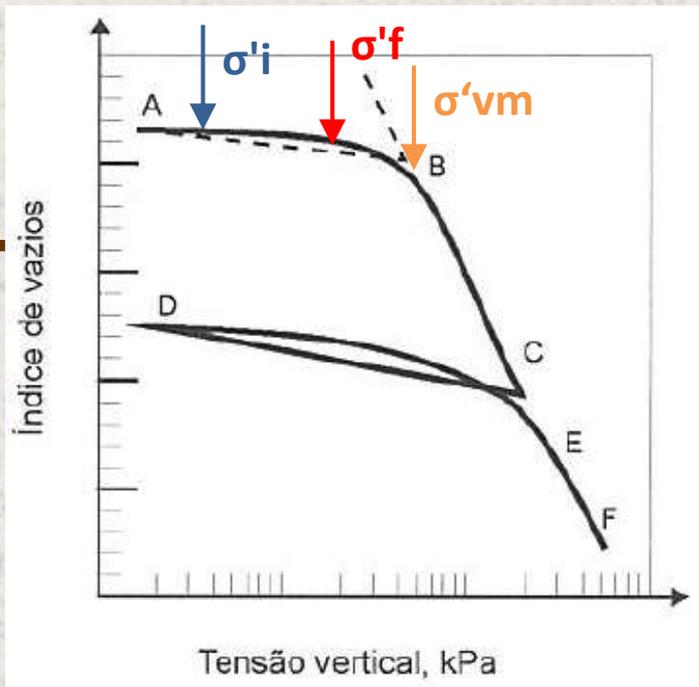
$$\rho = 9 / (1 + 2,4) \times [0,2 \times \log(104,3 / 69,5) + 2,2 \times \log(141,5 / 104,3)]$$

$$\rho = 86 \text{ cm } (\sim 0,9 \text{ m})$$

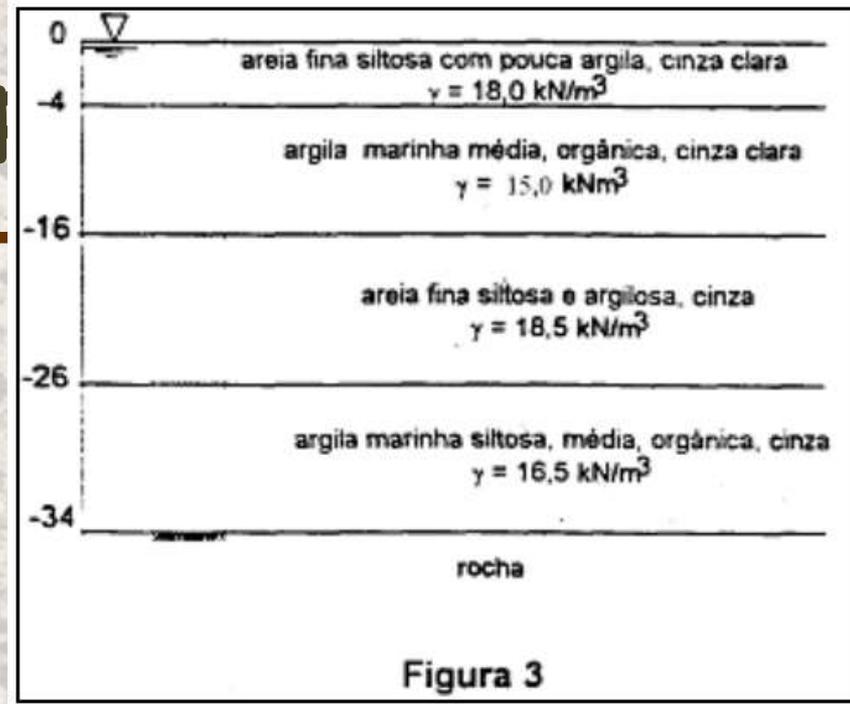
Exemplo

4) Qual será o recalque da superfície do terreno apresentado na figura 3, se o nível d'água for rebaixado até a cota -3 m? As duas camadas de argila marinha apresentam índice de recompressão $C_R=0,08$, índice de compressão $C_C=0,8$, razão de sobreadensamento $OCR=1,4$.





Exemp



$\sigma'i$

$$\sigma'i_1 = 4 \times 18 + 10 \times 15 - 10 \times 10 = 122 \text{ kPa}$$

$$\sigma'i_2 = 4 \times 18 + 12 \times 15 + 10 \times 18,5 + 4 \times 16,5 - 30 \times 10 = 203 \text{ kPa}$$

$\sigma'f$

$$\sigma'f_1 = 4 \times 18 + 10 \times 15 - 7 \times 10 = 152 \text{ kPa}$$

$$\sigma'f_2 = 4 \times 18 + 12 \times 15 + 10 \times 18,5 + 4 \times 16,5 - 27 \times 10 = 233 \text{ kPa}$$

$\sigma'vm$

$$\sigma'vm_1 = 1,4 \times 122 = 170,8 \text{ kPa}$$

$$\sigma'vm_2 = 1,4 \times 203 = 284,2 \text{ kPa}$$

ρ

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

$$\rho_1 = 12 / (1 + 2,4) \times 0,8 \times \log(152 / 122) = 0,27 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 8 / (1 + 2,4) \times 0,8 \times \log(233 / 203) = 0,11 \text{ m}$$

$$\rho = 38 \text{ cm}$$

Exercício pra entregar

Coleção 8, exercício 3