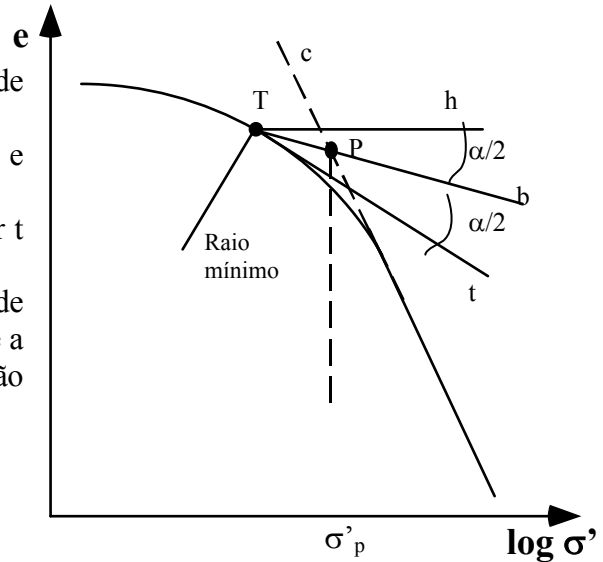


## 4 - CONSOLIDAÇÃO

### Cálculo da tensão de pré-consolidação, $\sigma'_p$ ,

Para estimar o valor da tensão de pré-consolidação, é usual utilizar o método proposto por Casagrande, esquematizado na figura:

- Localizar o ponto da curva  $e-\log\sigma'$  de mínimo raio de curvatura (T).
- Por este ponto traçar uma horizontal (h) e uma tangente (t) à curva.
- Traçar a bissetriz do ângulo formado por t e h (b).
- Prolongar a parte recta da curva de consolidação (c). A abcissa do ponto (P), onde a recta c intersecta a recta b, dá o valor da tensão de pré-consolidação.

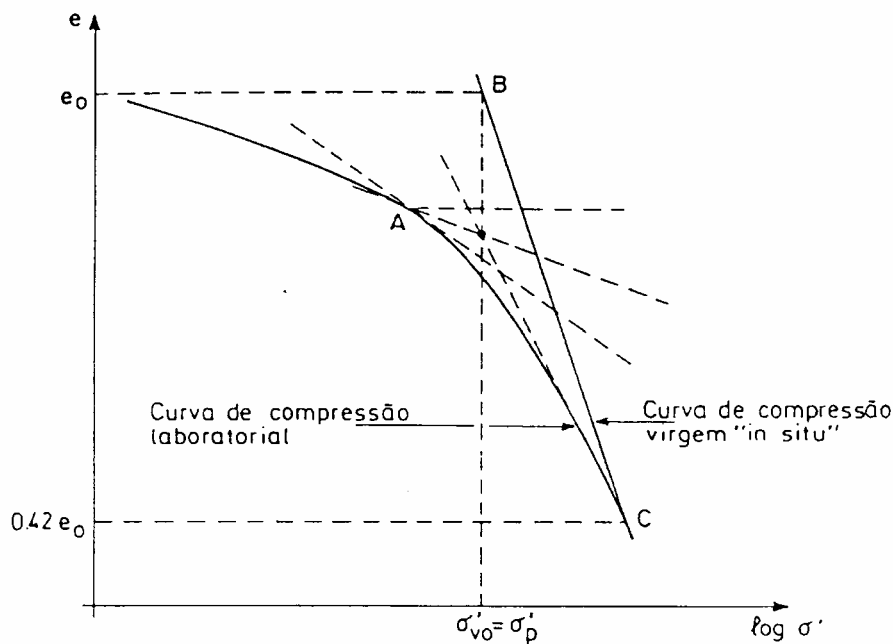


### Cálculo da tensão efectiva inicial, $\sigma'_o$

- $\sigma'_o = \sigma'_p$  - solo normalmente consolidado
- $\sigma'_o < \sigma'_p$  - solo sobreconsolidado
- $\sigma'_o > \sigma'_p$  - solo subconsolidado

### Reconstituição da curva “in situ”

#### a) Solos normalmente consolidados



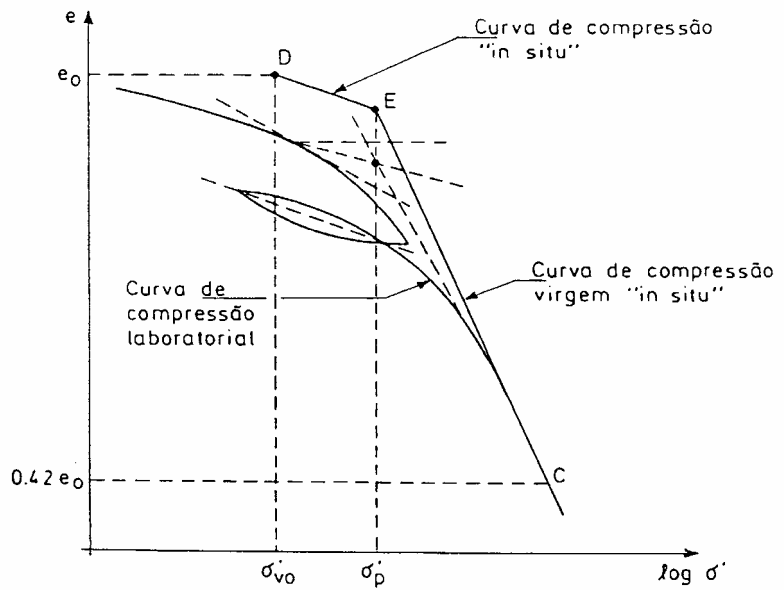
• marca-se o ponto B de coordenadas  $(e_0, \log \sigma'_p)$ ;

• determina-se o ponto C da curva laboratorial para um índice de vazios igual a  $0,42 e_0$ ;

• a recta BC é a curva de compressão virgem “in situ”.

b) Solos sobreconsolidados

- marca-se o ponto D de coordenadas  $(e_0, \log \sigma'_0)$ ;
- traça-se, a partir de D, uma paralela à recta definida pelos troços de descompressão e de recompressão, até interceptar o valor de  $\sigma'_p$ ;
- a recta DE é a curva de recompressão “in situ” com inclinação  $C_e$ ;
- determina-se o ponto C da curva laboratorial para um índice de vazios igual a **0,42**  $e_0$ ;
- a recta EC é a curva de compressão “in situ”.

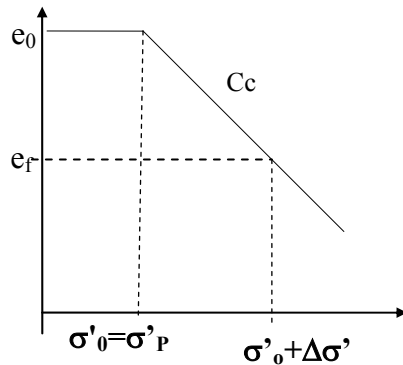


**Cálculo do assentamento**

$$\Delta h = - \frac{\Delta e}{1 + e_0} h_0$$

$e_0$  - índice de vazios inicial  
 $h_0$  - espessura inicial da camada

a) solos normalmente consolidados



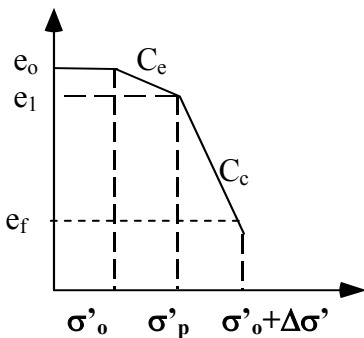
$$C_c = - \frac{\Delta e}{\log \sigma'_f - \log \sigma'_0}$$

$C_c$  - índice de compressibilidade

$$\Delta e = e_f - e_0$$

b) solos sobreconsolidados

b<sub>1</sub>)  $\sigma'_0 + \Delta \sigma' > \sigma'_p$



$$\Delta h_1 = - \frac{\Delta e_{cr}}{1 + e_0} h_0$$

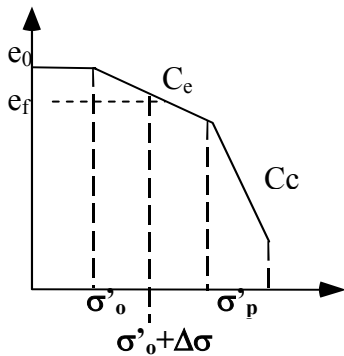
$$C_e = - \frac{e_1 - e_0}{\log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0}}$$

$$\Delta h_2 = - \frac{\Delta e_{cv}}{1 + e_0} h_0$$

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\log \sigma'_f - \log \sigma'_p}$$

$C_e$  - índice de expansibilidade

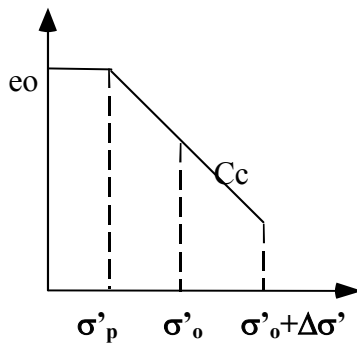
b<sub>2</sub>)  $\sigma'_o + \Delta\sigma' < \sigma'_p$



$$\Delta h = - \frac{\Delta e_{cr}}{1 + e_0} h_0$$

$$C_c = - \frac{\Delta e_{cr}}{\log \sigma'_f - \log \sigma'_0} = \frac{\Delta e_{cr}}{\log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_0}}$$

c) solos subconsolidados



$$\Delta h = - \frac{\Delta e}{1 + e_0} h_0$$

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\log \sigma'_f - \log \sigma'_p}$$

$$C_v = \frac{k_z}{\gamma_w \times m_v}$$

### Assentamentos no tempo

em que:

- $C_v$  - coeficiente de consolidação ( $cm^2/s$ )
- $a_v$  - coeficiente de compressibilidade
- $m_v$  - coeficiente de compressibilidade volumétrica
- $k$  - coeficiente de permeabilidade

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{d^2} = \frac{k_z \cdot t}{d^2 \cdot \gamma_w \cdot m_v}$$

em que:

- $T_v$  - factor tempo
- $d$  - altura total da camada de drenagem
- $\bar{U}$  - grau de consolidação

Relação entre  $\bar{U}$  e  $T_v$

$\bar{U}$	$T_v$	$\bar{U}$	$T_v$
0.10	0.008	0.55	0.238
0.15	0.019	0.60	0.287
0.20	0.031	0.65	0.342
0.25	0.050	0.70	0.403
0.30	0.071	0.75	0.490
0.35	0.097	0.80	0.567
0.40	0.126	0.85	0.700
0.45	0.160	0.90	0.848
0.50	0.196	0.95	1.125

$$U = \frac{\left(\frac{4T_v}{\pi}\right)^{0,5}}{\left[1 + \left(\frac{4T_v}{\pi}\right)^{2,8}\right]^{0,179}}$$

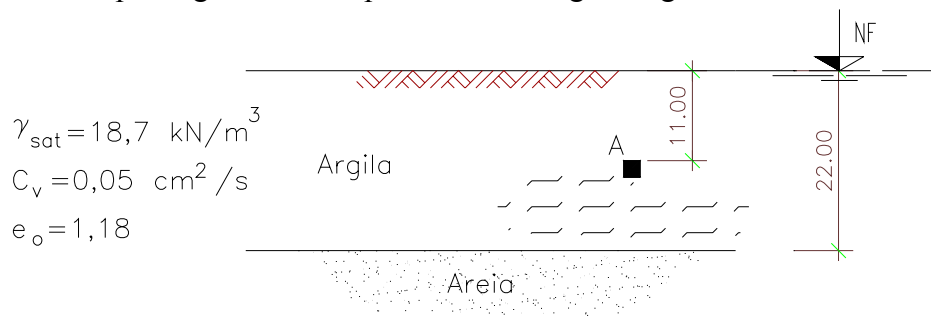
$$T_v = \frac{\pi / 4 \times U^2}{(1 - U^{5,6})^{0,357}}$$

**Problemas**

**4.1** - Sobre um estrato aluvionar argiloso NC, com espessura de 10 m e com nível freático à superfície, foi construído um aterro de grandes dimensões em planta, com 4 m de altura. Admita que o estrato argiloso se encontra sobre uma formação rochosa impermeável. Considere para o solo argiloso  $\gamma_{sat} = 17 \text{ kN/m}^3$ ;  $C_c = 0,6$ ;  $C_e = 0,08$ ;  $e_o = 1,3$ ,  $C_v = 1,4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ . Para o aterro tome  $\gamma_h = 18 \text{ kN/m}^3$ .

- Calcule o assentamento total;
- Calcule o assentamento ao fim de 14 meses;
- Considere agora que, após a total consolidação do estrato argiloso, o aterro foi retirado numa altura de 2 m. Calcule, para esta situação o empolamento esperado.

**4.2** - Considere o perfil geotécnico representado na figura seguinte:

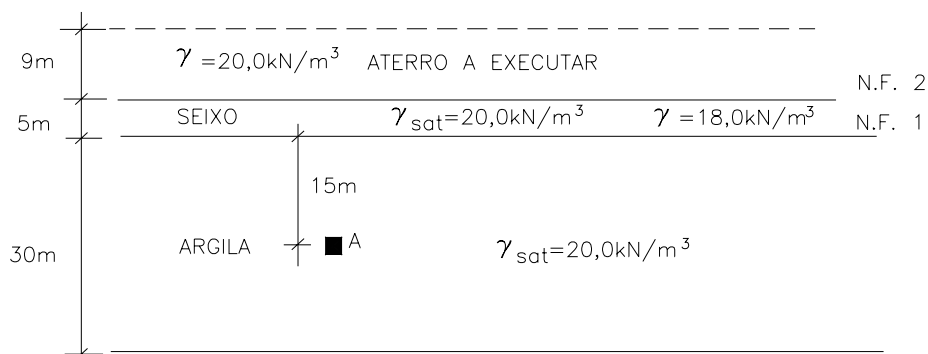


Foi retirada uma amostra da camada de argila aos 11 m de profundidade. Esta amostra foi submetida a um ensaios de consolidação em edômetro tendo-se obtido o resultado que se apresenta na figura em anexo.

- Caracterize o solo quanto à consolidação.
- Trace a curva de consolidação “in situ”.
- Pretende-se construir sobre o terreno um aterro com 5 m de altura ( $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ). Qual é o valor de assentamento por consolidação primária ?

**4.3** - Considere o perfil de terreno esquematizado na figura. Admita que a camada de seixo é incompressível. Suponha que as condições iniciais são as seguintes:

- nível do terreno à sua cota natural,
- nível freático na posição 1.



Na figura anexa apresenta-se o resultado de um ensaio edométrico realizado sobre uma amostra representativa colhida no ponto A.

- a) Caracterize o tipo de argila quanto à consolidação;
- b) Calcule o assentamento a longo prazo da camada de argila, após a execução do aterro previsto, com 9,0 m de altura.
- c) Calcule o empolamento da mesma camada a longo prazo, depois de retirar uma espessura de aterro de 4 m.
- d) Admita agora que, em vez de retirar parte do aterro, se tinha verificado uma subida do nível freático de 5,0 m (ou seja de NF1 para NF2). Calcule a deformação da camada de argila para uma situação a longo prazo.

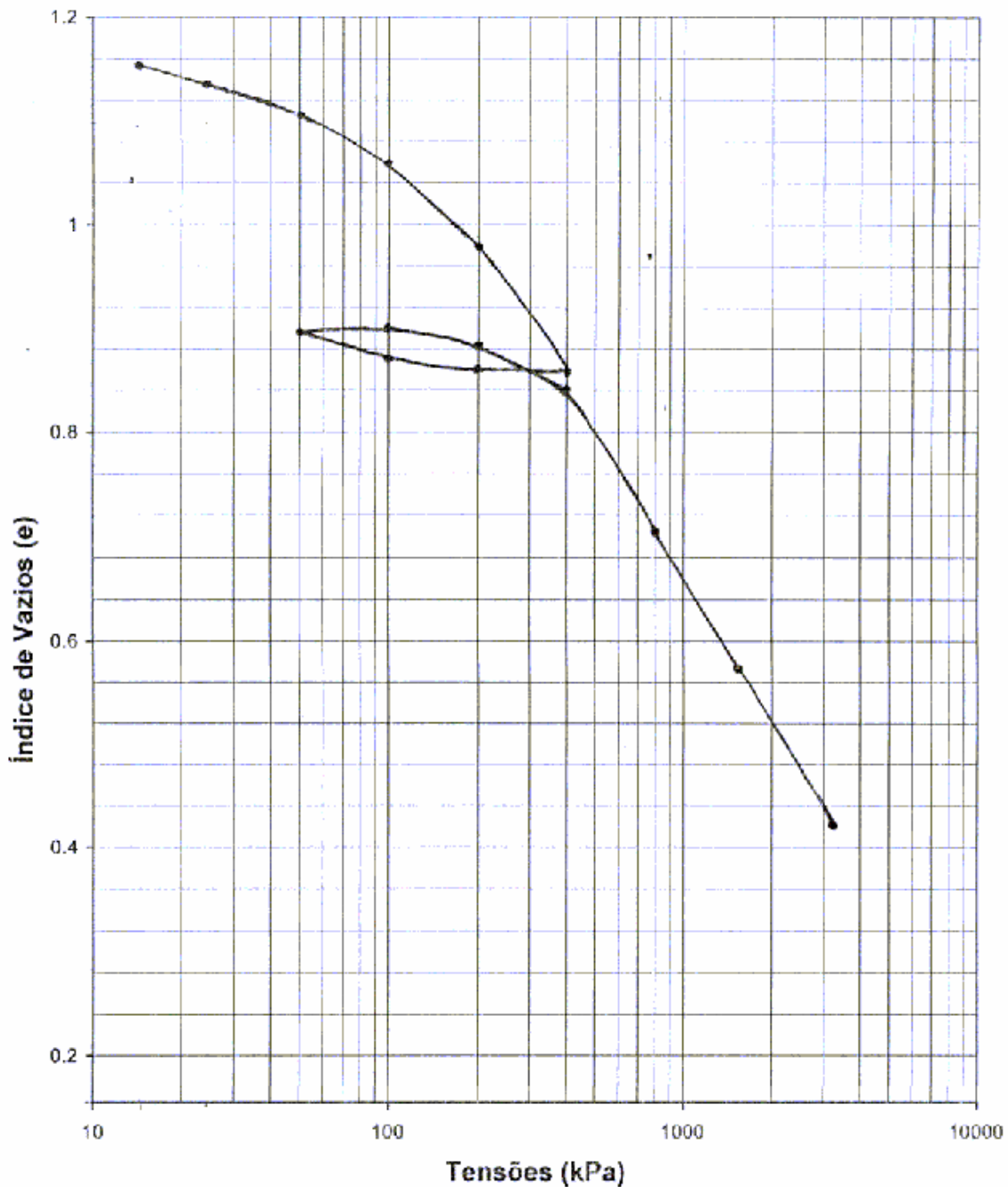


Figura do problema 4.2

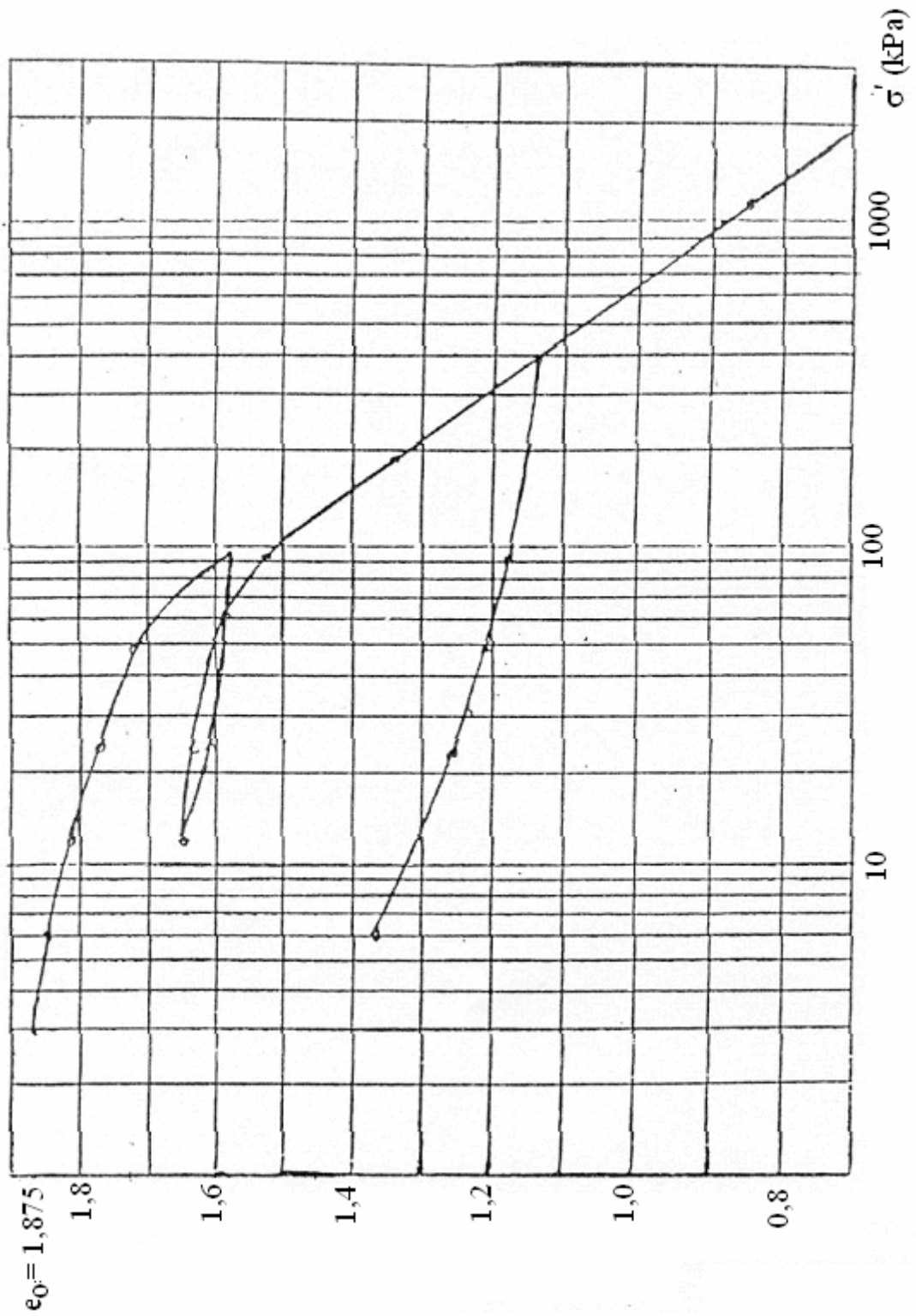


Figura do problema 4.3

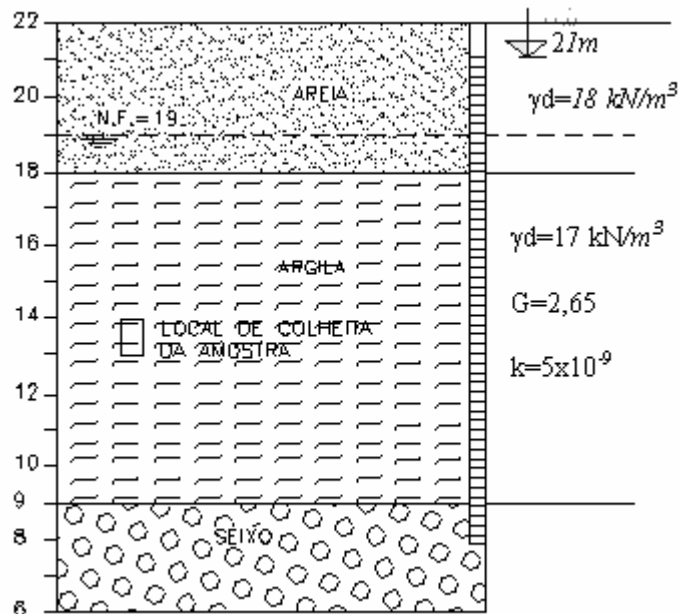
**4.4** - Sobre o terreno representado pelo perfil geotécnico da figura, pretende-se construir um edifício com uma área de  $20 \times 20 \text{ m}^2$ , com fundação por ensoleiramento geral a uma profundidade de  $2,0 \text{ m}$  e com um peso total de  $18900 \text{ kN}$ .

Um piezómetro instalado na camada de seixo inferior revelou a existência de um nível piezométrico a  $1,0 \text{ m}$  da superfície do terreno.

Considere que o aumento da tensão vertical no topo e na base da camada de argila pode ser tomado respectivamente, como  $0,95$  e  $0,25$  da tensão de contacto do ensoleiramento.

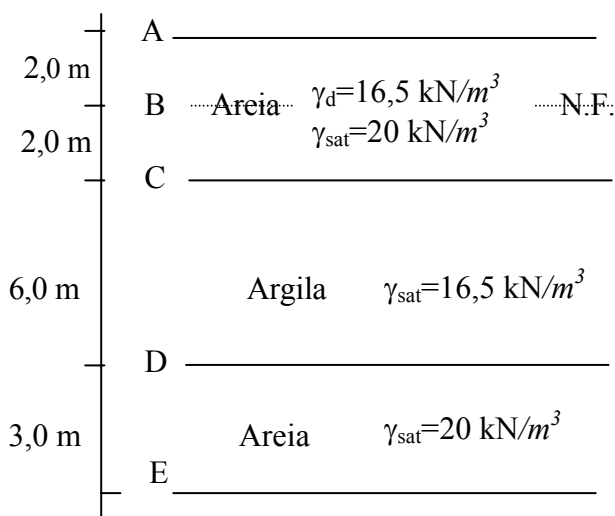
Calcule o assentamento na camada de argila sob o centro do edifício, considerando que o nível freático na camada de areia subiu  $2 \text{ m}$ , logo após o fim da construção do edifício, mantendo-se porém o nível piezométrico revelado pelo piezómetro instalado.

O resultado do ensaio edométrico, realizado sobre a amostra colhida é o indicado na página seguinte.



**4.5** – Sobre o maciço representado na figura vai ser construído um aterro ( $\gamma_{\text{sat}}=22 \text{ kN/m}^3$ ) com uma altura de  $6 \text{ m}$ . Trace os diagramas de variação com a profundidade das tensões verticais total e efectiva e das pressões intersticiais, após a construção do aterro, nas seguintes situações:

- a) a curto prazo;
- b) a longo prazo.



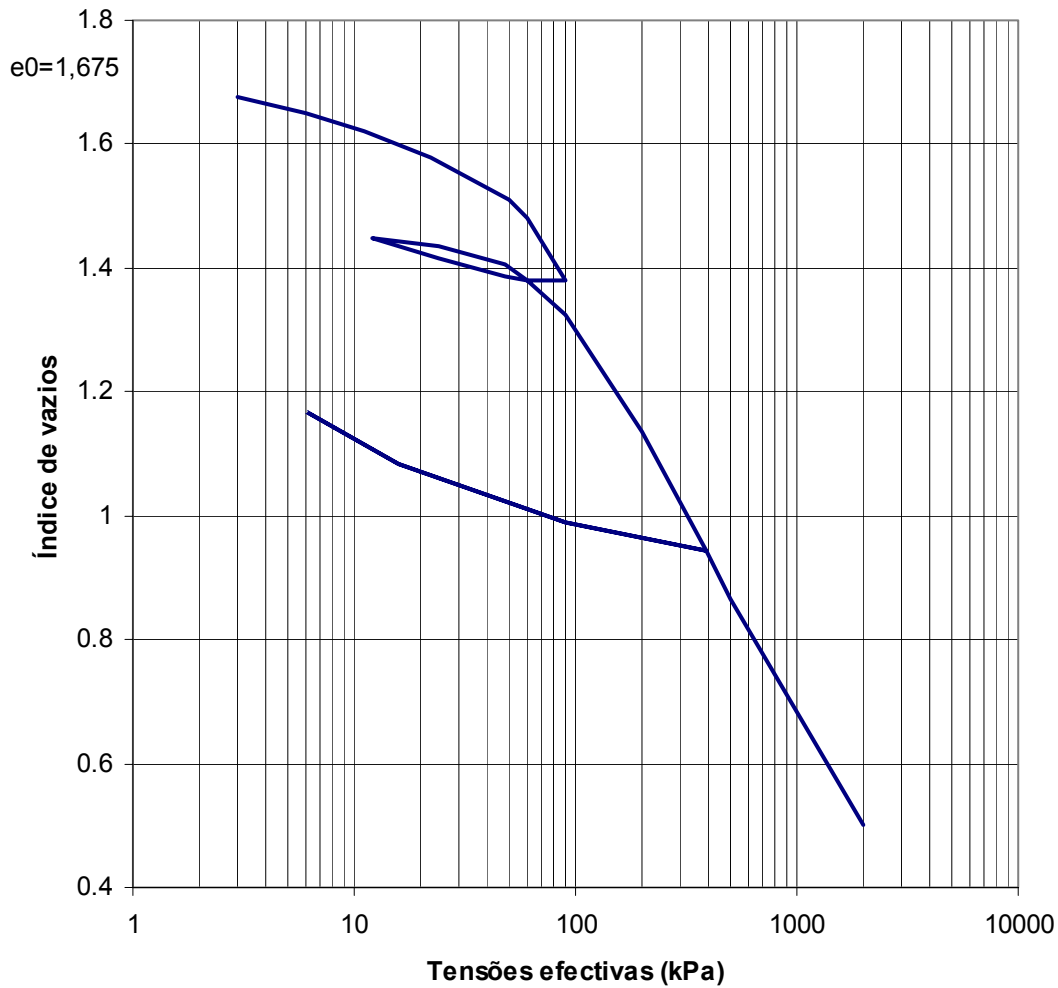


Figura do problema 4.4

4.6 – Pretende-se executar um aterro de 6 m de largura para criar uma extensa plataforma sobre um terreno com as condições geológicas indicadas na figura. Uma amostra representativa colhida a 5 m de profundidade foi ensaiada laboratorialmente em edómetro. A curva laboratorial de consolidação correspondente é a mesma do problema 4.3. Considerar os pesos volúmicos, quer das areias e argila saturadas, quer do aterro compactado de  $20 \text{ kN/m}^3$ .

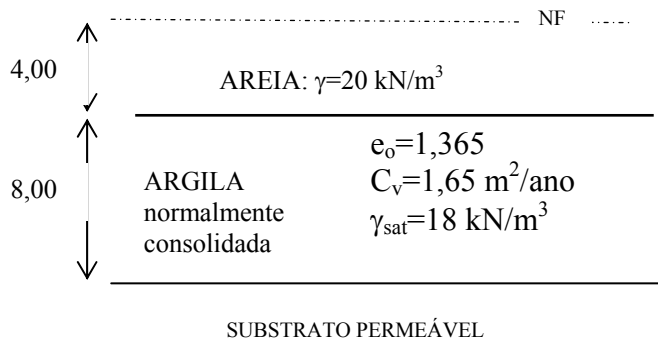




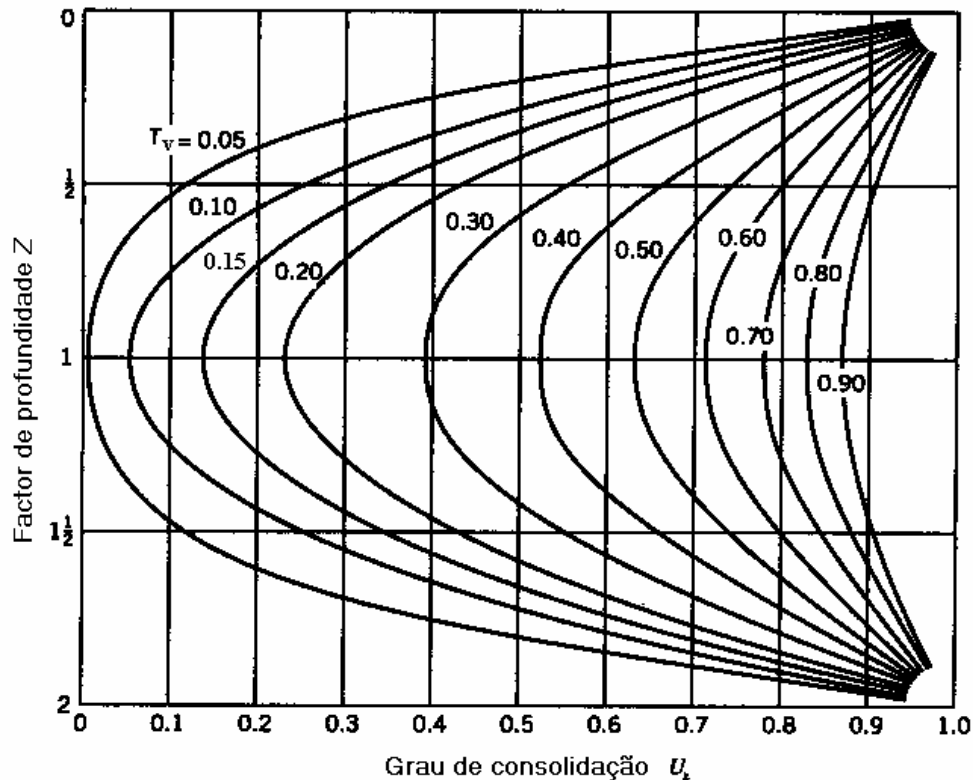
- Classificar a argila quanto ao grau de consolidação.
- Calcular o coeficiente de compressibilidade volumétrica “in situ” para a verificação da tensão efectiva a que vai ficar sujeita a argila em virtude da construção do aterro.
- Calcular o assentamento total que a sobrecarga, constituída pelos 6m de aterro, produzirá no terreno de fundação.
- Avaliar os assentamentos em função do tempo (aos 3, 6 e 9 meses, ao ano e após 1 ano e 3 meses) com  $C_v=4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ .

R: b)  $1,16 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN}$ ; c) 28 cm.

4.7 – Sobre o maciço representado na figura foi construído rapidamente um aterro de grandes dimensões que provocou um acréscimo uniforme da tensão vertical de 100 kPa.



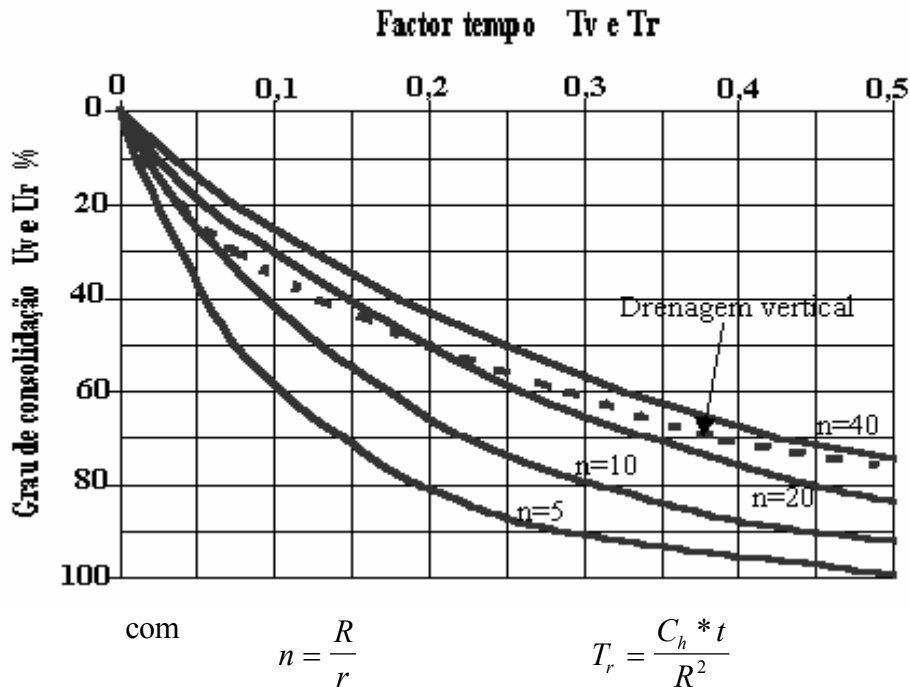
- Estime o tempo que demorou a processar-se o assentamento total.
- Sabendo que o assentamento total é de 56 cm, estime o valor do índice de compressibilidade.
- Mostre a evolução da tensão vertical efectiva ao longo da camada argilosa, 46 meses após a conclusão do aterro. Utilize o gráfico da figura.



## Consolidação forçada com furos drenantes

Disposição dos drenos em planta :

- em quadrado -  $R = 0,546 a$
- em triângulo -  $R = 0,525 a$ , sendo  $a$  o espaçamento dos drenos.



em que :

- $U_R$  é o grau de consolidação médio para a drenagem radial;
- $T_r$  é o factor tempo;
- $C_h$  é o coeficiente de consolidação horizontal;
- $R$  é o raio de influência efectiva de cada dreno vertical;
- $r$  é o raio do dreno.

O grau de consolidação resultante,  $U$ , devido à combinação das drenagens vertical e radial, vem :

$$100 - U = \frac{1}{100} (100 - U_v)(100 - U_R)$$

em que os valores de  $U$ ,  $U_v$  e  $U_R$  são expressos em percentagens.

**4.8** - Vai ser construído um aterro numa área em que existe um estrato compressível de argila sobre uma formação rochosa. O aterro vai ter a altura de  $7,20 \text{ m}$ . Isto dará origem a que a tensão efectiva média vertical na argila depois da consolidação aumente do valor de  $0,80 \text{ kg/cm}^2$  para  $1,90 \text{ kg/cm}^2$ . O estrato de argila tem a espessura de  $7,50 \text{ m}$ . O aterro, que se destina a uma estrada, vai ser executado em 4 meses, e é intenção executar o pavimento um ano depois do início dos trabalhos. Só é admissível o assentamento de  $2,50 \text{ cm}$  depois da execução do revestimento. Dimensione um sistema de drenos de areia de forma a satisfazer estes condicionamentos.

$$(C_v = C_h = 0,042 \text{ cm}^2/\text{min} \text{ e } m_v = 0,025 \text{ cm}^2/\text{kg}).$$