

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

Prof. Maristâni G. Spannenberg F.

1

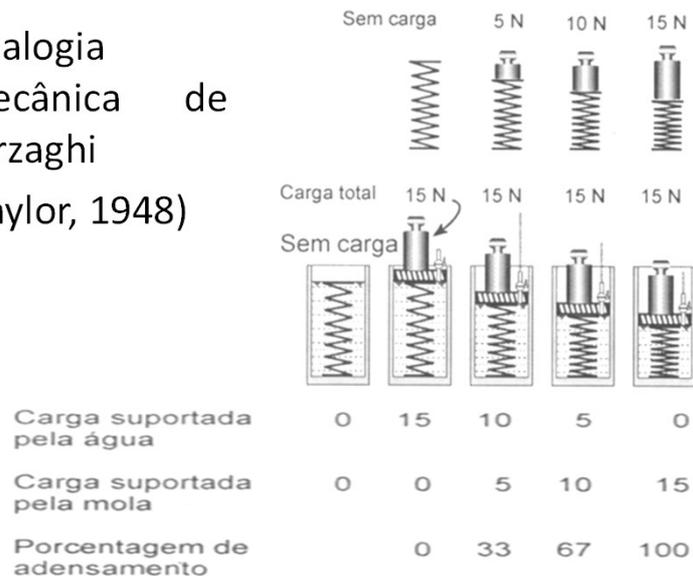
O PROCESSO DO ADENSAMENTO

- Fenômeno pelo qual deformações e recalques ocorrem com expulsão da água do interior dos vazios do solo no decorrer do tempo após o carregamento.
- O adensamento ocorre em função da variação das tensões no solo causada por uma solicitação externa.

2

O PROCESSO DO ADENSAMENTO

- Analogia Mecânica de Terzaghi (Taylor, 1948)



3

O PROCESSO DO ADENSAMENTO

- **Conclusões Importantes:**
 - Ao aumento da poro-pressão devido ao carregamento externo, medido em relação á pressão hidrostática pré-existente, dá-se o nome de **excesso de poro-pressão**.
 - Somente variações de tensões efetivas provocam deformações do solo.
 - O adensamento é um processo de transferência de carga entre as fases do solo acompanhado de percolação da água e redução do índice de vazios.

4

O PROCESSO DO ADENSAMENTO

- **Conclusões Importantes:**

- Em qualquer instante, a soma do acréscimo de tensão efetiva com o excesso de poro-pressão é igual ao acréscimo de pressão total aplicado.
- O adensamento continua até que toda a pressão total aplicada tenha se tornado efetiva e o excesso de poro-pressão tenha se dissipado integralmente.

5

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

- **Hipóteses Básicas da Teoria de Terzaghi:**

- O solo é totalmente saturado;
- A compressão é unidimensional;
- O fluxo d'água é unidimensional;
- O solo é homogêneo;
- As partículas sólidas e a água são praticamente incompressíveis perante a compressibilidade do solo;
- O solo pode ser estudado como elementos infinitesimais, apesar de ser constituído de partículas e vazios;
- O fluxo é governado pela Lei de Darcy;
- As propriedades do solo não variam durante o processo de adensamento (*);
- O índice de vazios varia linearmente com o aumento da tensão efetiva (*).

6

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

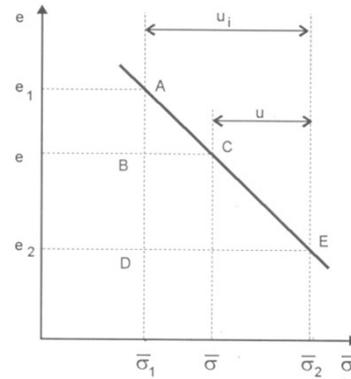
- **Grau de Adensamento (U_z)** é a relação entre a deformação ocorrida num elemento de solo numa profundidade z num determinado tempo (t) e a deformação deste mesmo elemento quando todo o processo de adensamento tiver ocorrido (t_f).

$$U_z = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}$$

$$\varepsilon = \frac{e_1 - e}{1 + e_1}$$

$$\varepsilon_f = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1}$$

$$U_z = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2} = \frac{AB}{AD} = \frac{BC}{DE} = \frac{\sigma' - \sigma'_1}{\sigma'_2 - \sigma'_1} = \frac{u_i - u}{u_i}$$



7

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

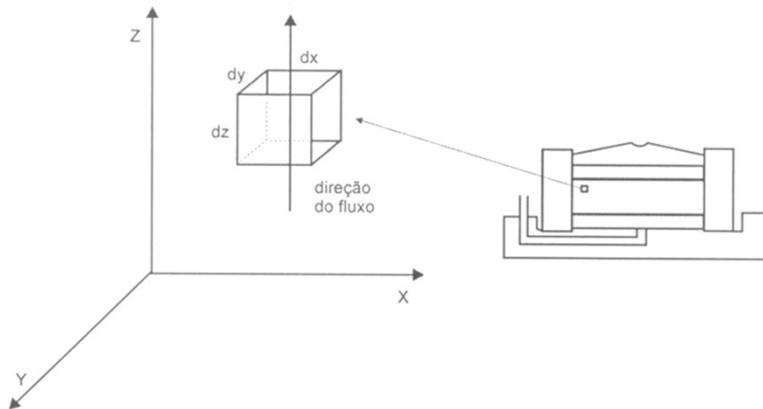
- **Coefficiente de Compressibilidade (a_v)** é a inclinação da reta que representa a variação entre as tensões efetivas e os índices de vazios.

$$a_v = \frac{e_1 - e_2}{\sigma_2 - \sigma_1} = - \frac{e_2 - e_1}{\sigma_2 - \sigma_1} = - \frac{de}{d\sigma} = \frac{de}{du}$$

8

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

- **Equação Diferencial do Adensamento**



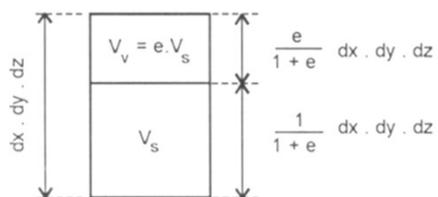
9

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

- **Equação Diferencial do Adensamento**

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \left(k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy dz = 0 \quad \text{Equação Diferencial do Fluxo Permanente Tridimensional}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \left(k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy dz \quad \text{Equação Diferencial do Fluxo Unidimensional com Variação de Volume}$$



$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{e}{1+e} dx dy dz \right) = \frac{\partial e}{\partial t} \cdot \frac{dx dy dz}{1+e}$$

10

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

- **Equação Diferencial do Adensamento**

$$\left(k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) dx dy dz = \frac{\partial e}{\partial t} \cdot \frac{dx dy dz}{1+e} \qquad k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t} \cdot \frac{1}{1+e}$$

$$h = \frac{u}{\gamma_w} \qquad de = a_v \cdot du$$

$$\frac{k(1+e)}{a_v \cdot \gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$c_v = \frac{k(1+e)}{a_v \cdot \gamma_w}$$

Equação Diferencial do Adensamento

Coefficiente de Adensamento

11

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

- **Equação Diferencial do Adensamento
(Condições de Contorno da Solução)**

- Existe drenagem livre no topo e na base da amostra:

- Para $t=0$ e $z=0$, $u=0$
- Para $t=0$ e $z=H$, $u=0$

- O excesso de poro-pressão inicial, constante ao longo da amostra, é igual ao acréscimo de tensão total aplicado.

12

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

- Equação Diferencial do Adensamento (Resultado da Integração)

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

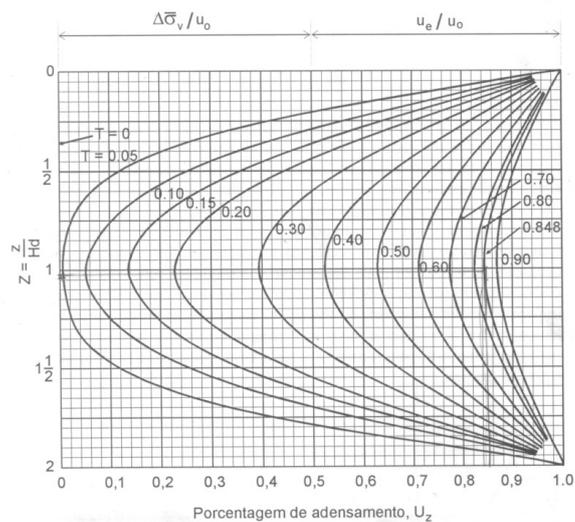
$$T = \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \quad \text{Fator Tempo} \quad H_d - \text{Altura de Drenagem}$$

13

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

- Grau de Adensamento em função da profundidade e do tempo (Isócronas)

$$U_z = f(Z, T)$$



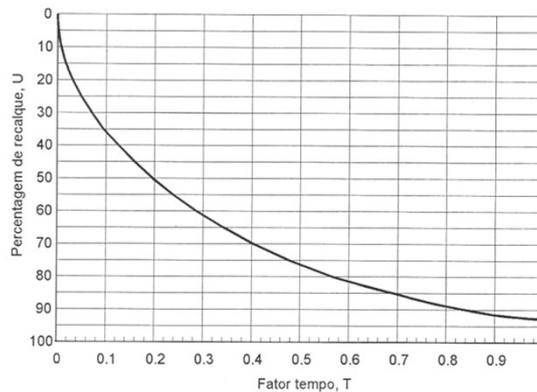
14

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

- Grau de Adensamento médio da amostra

$$U = \int_0^H U_z dz = f(T)$$

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



15

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

U (%)	T	U (%)	T	U (%)	T	U (%)	T	U (%)	T
1	0,0001	21	0,0346	41	0,132	61	0,297	81	0,588
2	0,0003	22	0,0380	42	0,138	62	0,307	82	0,610
3	0,0007	23	0,0415	43	0,145	63	0,318	83	0,633
4	0,0013	24	0,0452	44	0,152	64	0,329	84	0,658
5	0,0020	25	0,0491	45	0,159	65	0,340	85	0,684
6	0,0028	26	0,0531	46	0,166	66	0,351	86	0,712
7	0,0038	27	0,0572	47	0,173	67	0,364	87	0,742
8	0,0050	28	0,0616	48	0,181	68	0,377	88	0,774
9	0,0064	29	0,0660	49	0,189	69	0,389	89	0,809
10	0,0078	30	0,0707	50	0,197	70	0,403	90	0,848
11	0,0095	31	0,0755	51	0,204	71	0,416	91	0,891
12	0,0113	32	0,0804	52	0,212	72	0,431	92	0,938
13	0,0133	33	0,0855	53	0,221	73	0,445	93	0,992
14	0,0154	34	0,0908	54	0,230	74	0,461	94	1,054
15	0,0177	35	0,0962	55	0,239	75	0,477	95	1,126
16	0,0201	36	0,102	56	0,248	76	0,493	96	1,219
17	0,0227	37	0,108	57	0,257	77	0,510	97	1,335
18	0,0254	38	0,113	58	0,266	78	0,528	98	1,500
19	0,0283	39	0,119	59	0,276	79	0,547	99	1,781
20	0,0314	40	0,126	60	0,287	80	0,567	100	∞

16

TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL DE TERZAGHI

- **Drenagem por uma só face**
 - A solução para este caso é igual à da situação anterior;
 - É necessário simplesmente considerar a metade do gráfico que apresenta as curvas isócronas;
 - H_d passa a ser a espessura da camada;
 - A curva da porcentagem de adensamento é válida tanto para duas quanto para uma face de drenagem.
 - Comparando-se as duas condições de drenagem, para uma mesma espessura de camada, conclui-se que o valor total do recalque é o mesmo, mas o tempo para que ocorra um determinado recalque é quatro vezes maior quando a drenagem ocorre por uma só face.

17

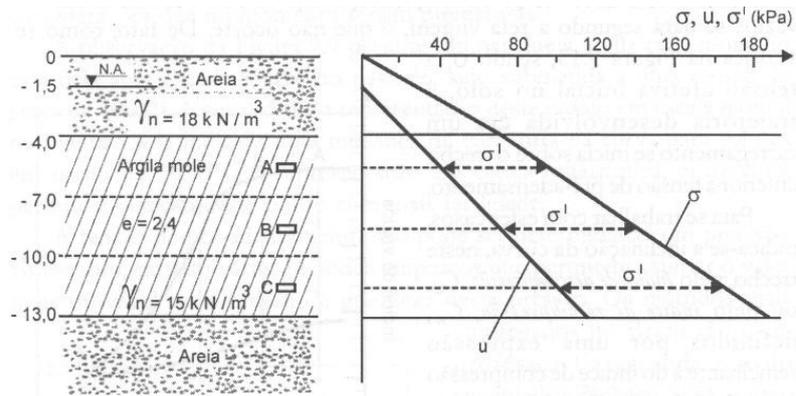
○ Exemplo de cálculo do recalque por adensamento:

- No terreno indicado será construído um aterro que transmitirá uma pressão uniforme de 40 kPa. De acordo com dados geológicos, o terreno foi sobre-adensado pelo efeito de uma camada de um metro de areia superficial, que teria sido erodida. Desta forma, sabe-se que a tensão de pré-adensamento é de 18 kPa superior à tensão efetiva existente em qualquer ponto.
- Calcular o recalque por adensamento que sofrerá a camada de argila.
- Índice de compressão da argila = 1,8
- Índice de recompressão da argila = 0,3.

18

O ADENSAMENTO DAS ARGILAS SATURADAS

- Exemplo de cálculo do recalque por adensamento:



19

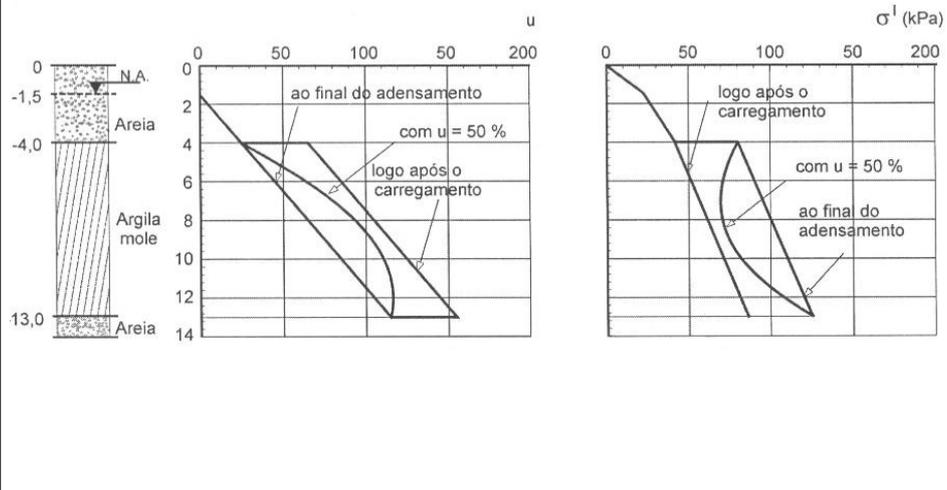
EXEMPLO DE APLICAÇÃO

- Para o exemplo anterior, considere para a argila mole $k = 10^{-6}$ cm/s.
- Cálculo do coeficiente de adensamento
- Cálculo das relações entre tempo e recalque
 - Que recalque terá ocorrido em 100 dias?
 - Em que tempo ocorrerá um recalque de 15 cm?
 - Quando o recalque for de 32,4 cm, qual a poro-pressão no centro da camada de argila mole?
 - Qual o diagrama de poro-pressões e de tensões efetivas ao longo da camada quando tiver ocorrido 50% do recalque por adensamento?
 - Como o problema se alteraria se a camada subjacente fosse impermeável?

20

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

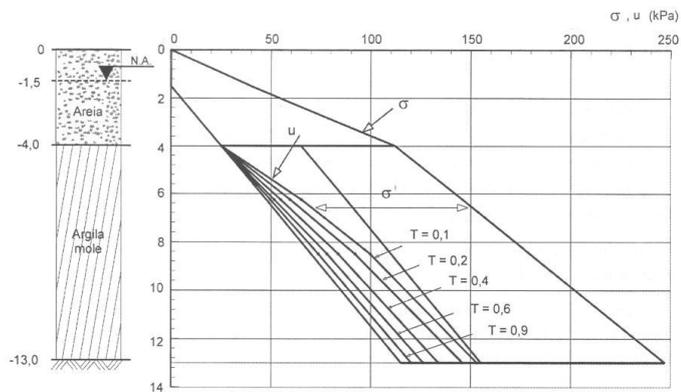
- Diagrama de poro-pressões e tensões efetivas para 50% de adensamento



21

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

- Diagrama de poro-pressões e tensões efetivas para uma face drenante



22

RELAÇÃO ENTRE PORCENTAGEM DE ADENSAMENTO E FATOR TEMPO: MÉTODOS APROXIMADOS

- A curva teórica UxT pode ser aproximada pelas seguintes expressões:

$$T = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot U^2, \quad U \leq 60\%$$

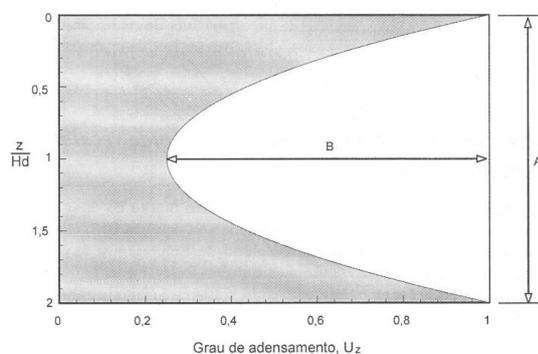
$$T = -0,933 \log(1-U) - 0,085, \quad U > 60\%$$

- Até 60% de adensamento, a relação é aproximada por uma parábola, cujas características podem ser utilizadas na previsão de recalques.

23

RELAÇÃO ENTRE PORCENTAGEM DE ADENSAMENTO E FATOR TEMPO: MÉTODOS APROXIMADOS

- As curvas isócronas podem também ser aproximadas por parábolas ($T > 0,1$):



$$U = \frac{\text{Área hachurada}}{\text{Área do retângulo}}$$

$$U = \frac{1 \cdot A - 2/3(A \cdot B)}{1 \cdot A} = 1 - 2/3(B)$$

24

OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE ADENSAMENTO EM ENSAIO EDOMÉTRICO

- O coeficiente de adensamento pode ser determinado diretamente do ensaio de adensamento;
- Em cada estágio de carregamento, obtém-se a curva recalques em função do tempo;
- Esta evolução obedece a teoria do adensamento e, portanto, a curva obtida é semelhante à curva teórica $U \times T$.

25

OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE ADENSAMENTO EM ENSAIO EDOMÉTRICO

- O ajuste da curva experimental à teórica permite determinar o coeficiente de adensamento, **suposto constante** durante o adensamento, através da expressão:

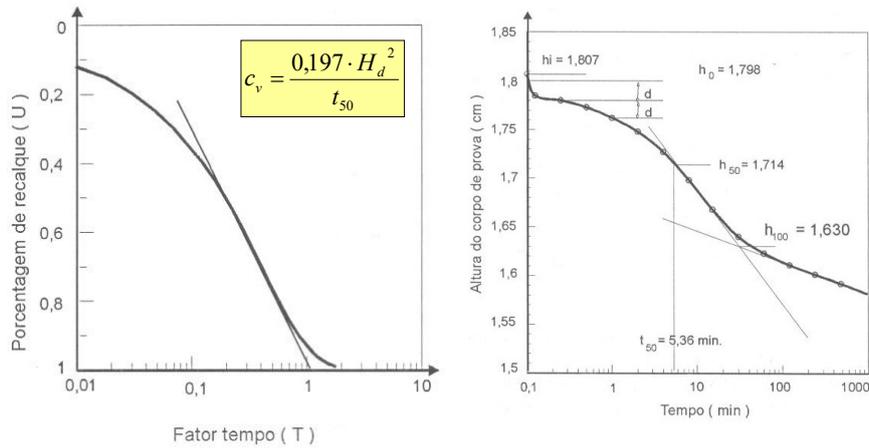
$$T = \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \Rightarrow c_v = \frac{T \cdot H_d^2}{t}$$

- No ajuste dos dados experimentais deve-se separar o trecho correspondente ao **adensamento primário**, dos trechos correspondentes à **compressão inicial** e a **compressão secundária**.

26

OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE ADENSAMENTO EM ENSAIO EDOMÉTRICO

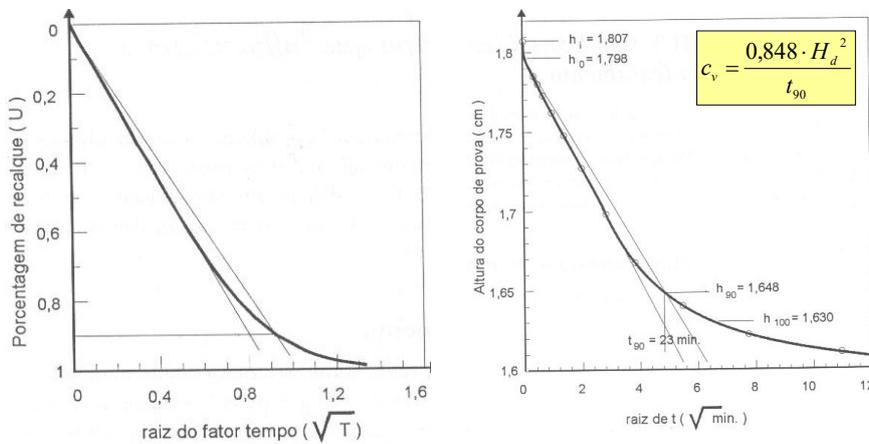
- Método de Casagrande (logaritmo do tempo)



27

OBTENÇÃO DO COEFICIENTE DE ADENSAMENTO EM ENSAIO EDOMÉTRICO

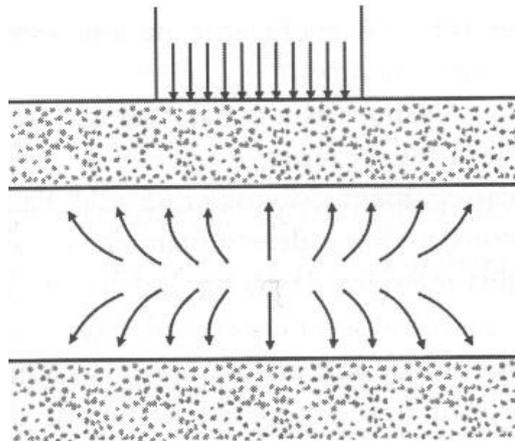
- Método de Taylor (raiz quadrada do tempo)



28

CONDIÇÕES DE CAMPO QUE INFLUENCIAM O ADENSAMENTO

- Fluxo lateral no adensamento

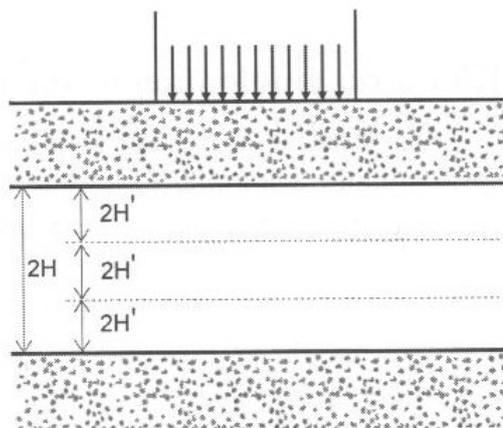


Influência da relação H/B .

29

CONDIÇÕES DE CAMPO QUE INFLUENCIAM O ADENSAMENTO

- Influência de lentes de areia

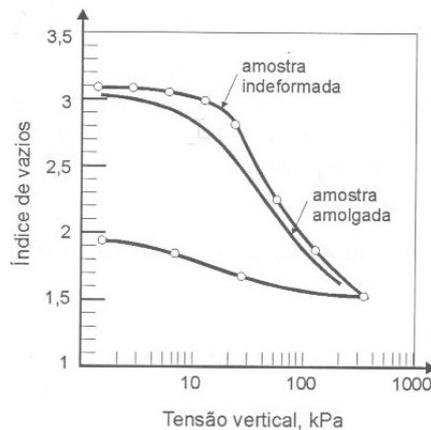


Redução da altura de drenagem da camada.

30

CONDIÇÕES DE CAMPO QUE INFLUENCIAM O ADENSAMENTO

- Efeito do Amolgamento do Solo



Elimina o efeito do sobre-adensamento do solo.

31

Obtenção do Coeficiente de Adensamento através da Retro-Análise de Casos Reais

- A melhor maneira de se estimar o coeficiente de adensamento é a retro-análise de carregamentos já feitos neste solo.
- Para tanto, medem-se os recalques de aterros construídos e determinam-se os valores de c_v utilizando-se os métodos de Casagrande ou Taylor.
- Nestas análises, é necessário levar em consideração o tempo de aplicação do carregamento que, ao contrário do que ocorre nos ensaios, não é instantâneo.

32

Análise das Hipóteses Consideradas na Teoria do Adensamento Unidimensional

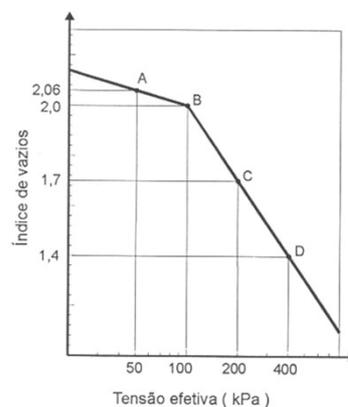
- **Propriedades dos solos constantes: constância de c_v**
 - Tanto o coeficiente de permeabilidade como o coeficiente de compressão volumétrica do solo diminuem com a redução do índice de vazios.

$$c_v = \frac{k \cdot (1 + e)}{a_v \cdot \gamma_w} = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$$

33

ANÁLISE DAS HIPÓTESES CONSIDERADAS NA TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

- **Variação linear do índice de vazios com a tensão efetiva: constância de a_v**
 - A dissipação da pressão neutra pode ocorrer mais rápida ou mais lentamente do que o desenvolvimento das deformações acarretando uma incorreção na estimativa da dissipação das pressões neutras e do desenvolvimento das tensões efetivas.



34

ANÁLISE DAS HIPÓTESES CONSIDERADAS NA TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

- **Acréscimo de tensão uniforme ao longo da camada de solo**
 - Se a área carregada for limitada, sabe-se que o acréscimo de tensão na face superior da camada é maior do que na face inferior.
 - Para outras hipóteses de diagrama de sobre-pressão estabelecidas pelo carregamento, soluções rigorosas são disponíveis.
 - A consideração destes detalhes, entretanto, não produz resultados muito mais representativos da realidade
 - A solução estudada até aqui é considerada uma representação adequada para os casos típicos de carregamentos em engenharia.

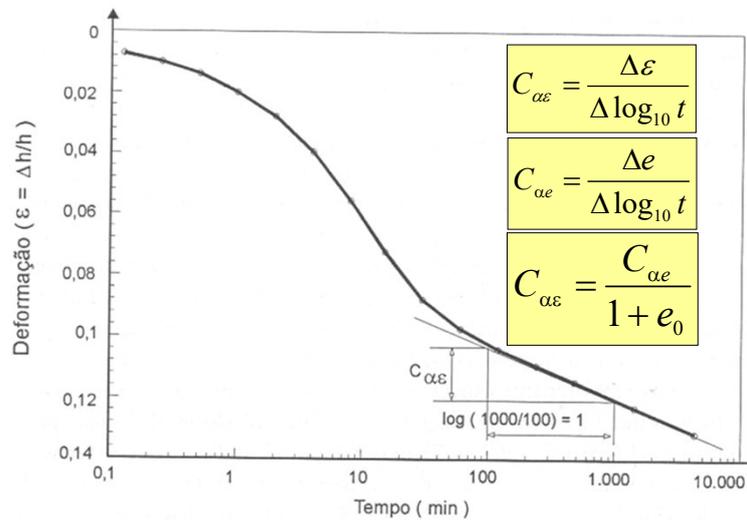
35

COMPRESSÃO OU ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

- Compressão lenta que continua a ocorrer após o desenvolvimento dos recalques previstos na teoria do adensamento;
- Teoricamente, as pressões neutras teriam praticamente se dissipado;
- Este fenômeno indica que pode ocorrer deformação do solo mesmo sendo constante a tensão efetiva;
- O adensamento secundário de um solo é expresso pelo denominado **coeficiente de adensamento secundário** C_{α} que indica a inclinação do trecho final da curva de variação da deformação ou do índice de vazios com o logaritmo do tempo.

36

COMPRESSÃO OU ADENSAMENTO SECUNDÁRIO



37

COMPRESSÃO OU ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

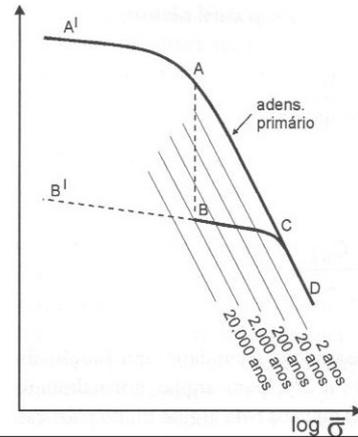
- Os valores de coeficientes de adensamento secundário, em função da deformação específica, variam de 0,5% a 2%, para argilas normalmente adensadas, podendo atingir valores de 3% ou mais para argilas muito plásticas e argilas orgânicas.
- Para argilas sobre-adensadas, o efeito do adensamento secundário é pequeno desde que a tensão de pré-adensamento não seja ultrapassada.

38

COMPRESSÃO OU ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

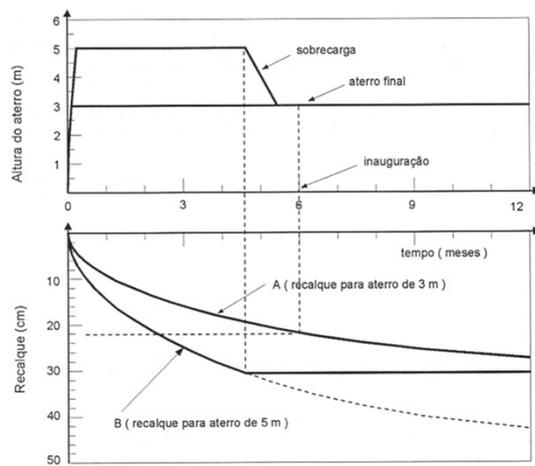
- **Influência do adensamento secundário na tensão de pré-adensamento**

- O adensamento secundário provoca uma redução do índice de vazios enquanto a tensão efetiva se mantém constante.

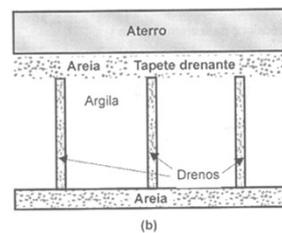
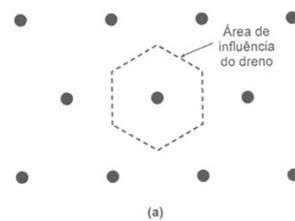


39

REDUÇÃO DE RECALQUES FUTUROS



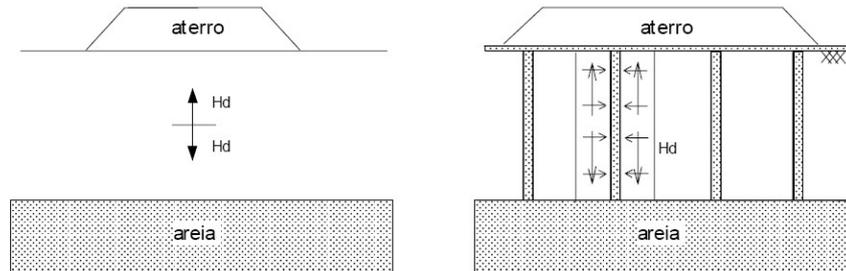
Pré-Carregamento



Drenos Verticais

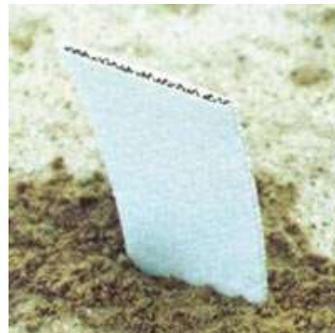
40

ACELERAÇÃO DE RECALQUES



41

ACELERAÇÃO DE RECALQUES



42