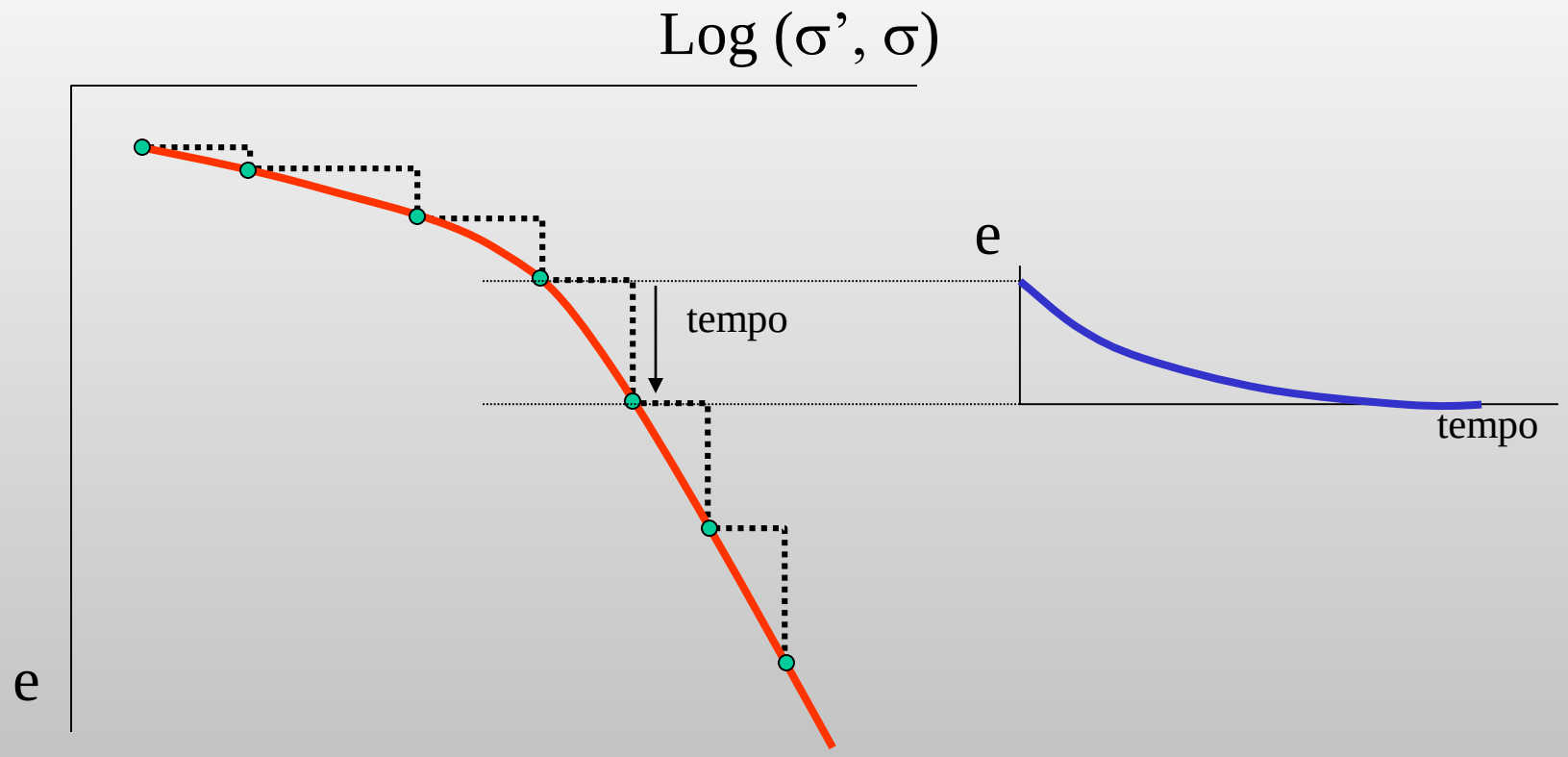
Recalques por adensamento e seu desenvolvimento no tempo

Prof. Fernando A. M. Marinho

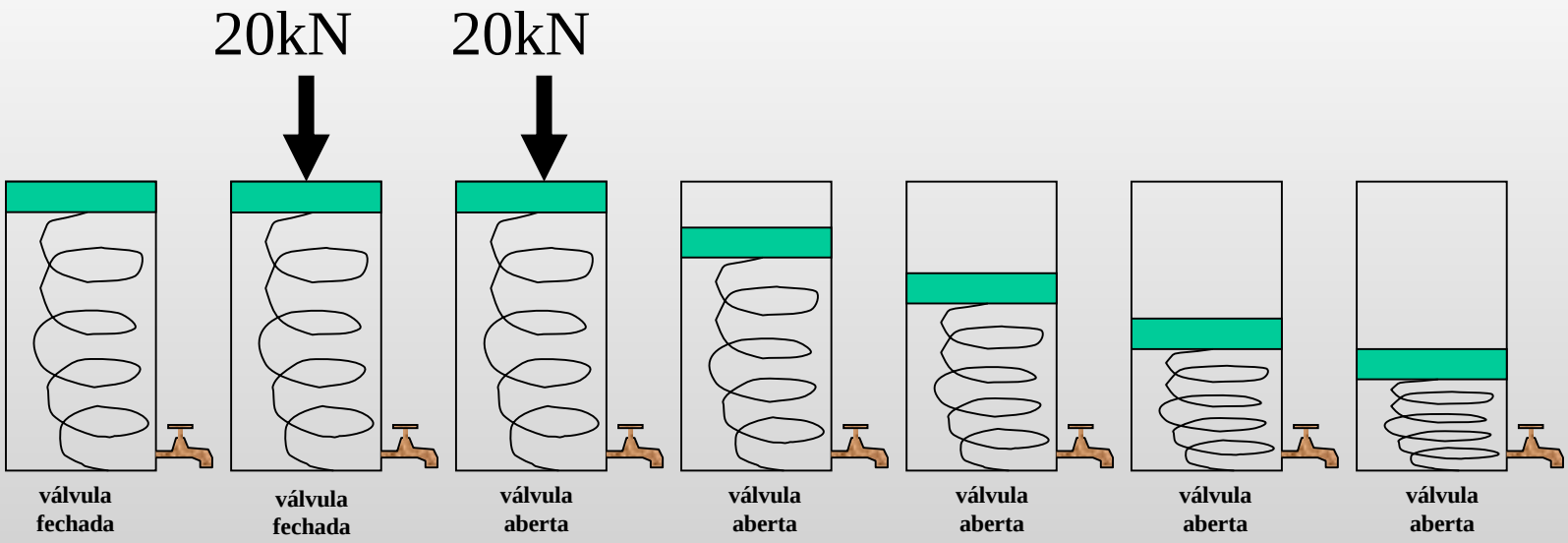
2019

Hipóteses da Teoria do Adensamento

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

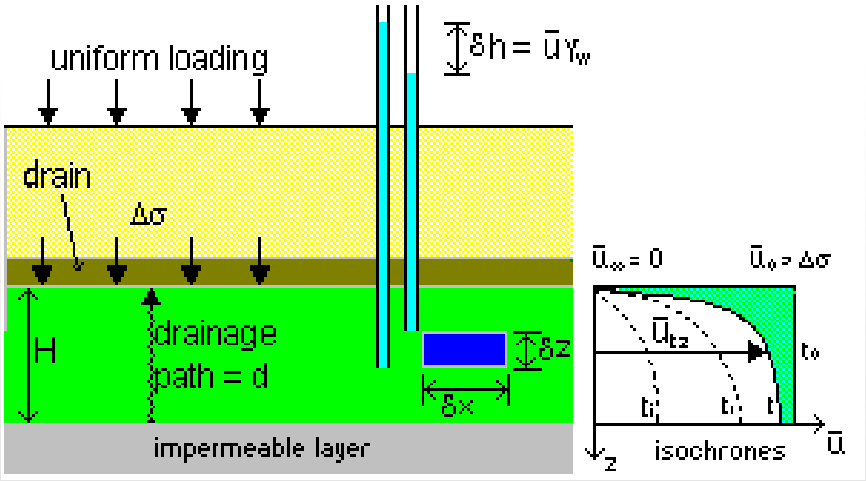

Log (σ', σ)
e
tempo
e
tempo

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



O modelo uni-dimensional de adensamento aplica-se a um elemento de solo submetido a cargas verticais. Neste elemento o fluxo é uni-dimensional apenas.

Existem três variáveis:

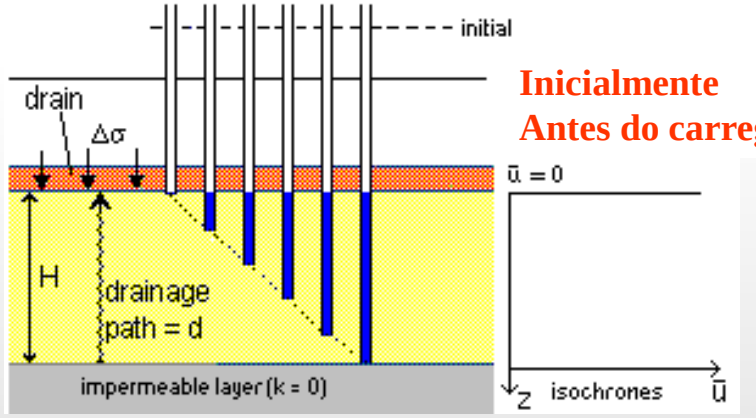
- **Excesso de pressão neutra**
- **Profundidade do elemento na camada (z)**
- **Tempo depois da aplicação da carga (t)**

A tensão total no elemento é admitida constante.

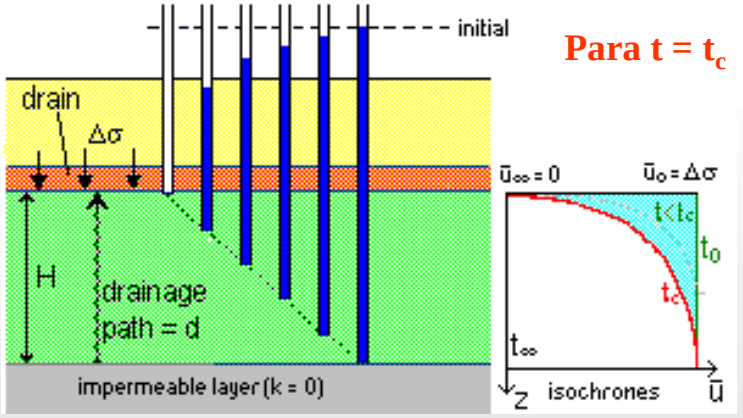
O coeficiente de compressibilidade (m_v) é admitido como constante.

O coeficiente de permeabilidade (k) para fluxo vertical é constante.

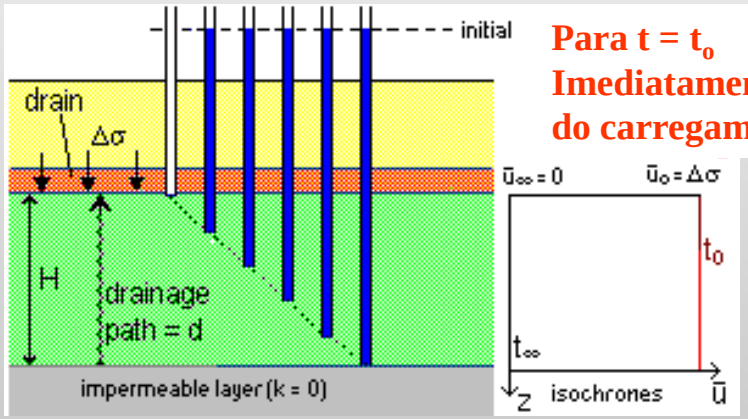
http://fbe.uwe.ac.uk/public/geocal/SoilMech/consol/soilcons.htm#CONSPROC



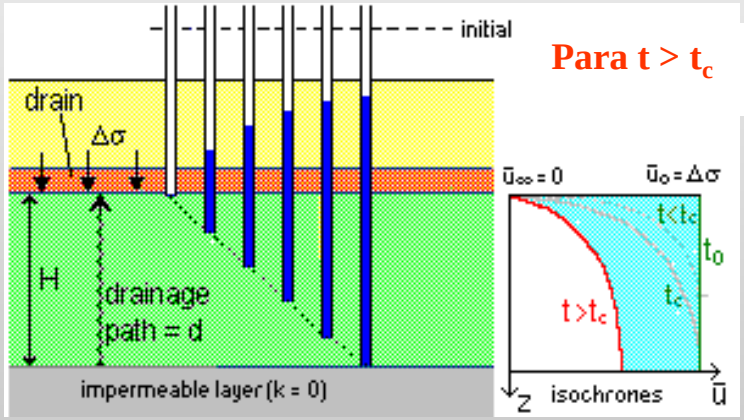
Inicialmente
Antes do carregamento



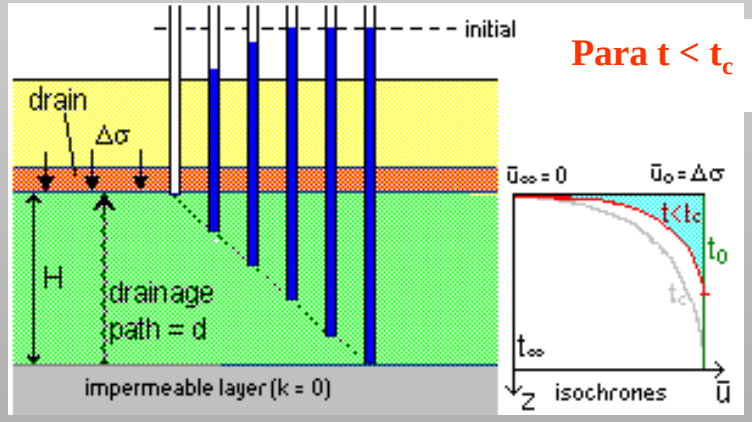
Para $t = t_c$



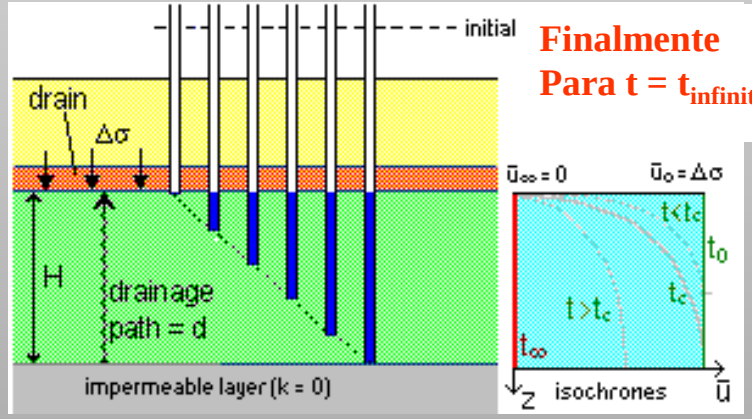
Para $t = t_0$
Imediatamente depois
do carregamento



Para $t > t_c$



Para $t < t_c$



Finalmente
Para $t = t_{infinito}$

http://fbe.uwe.ac.uk/public/geocal/SoilMech/consol/soilcons.htm#CONSPROC

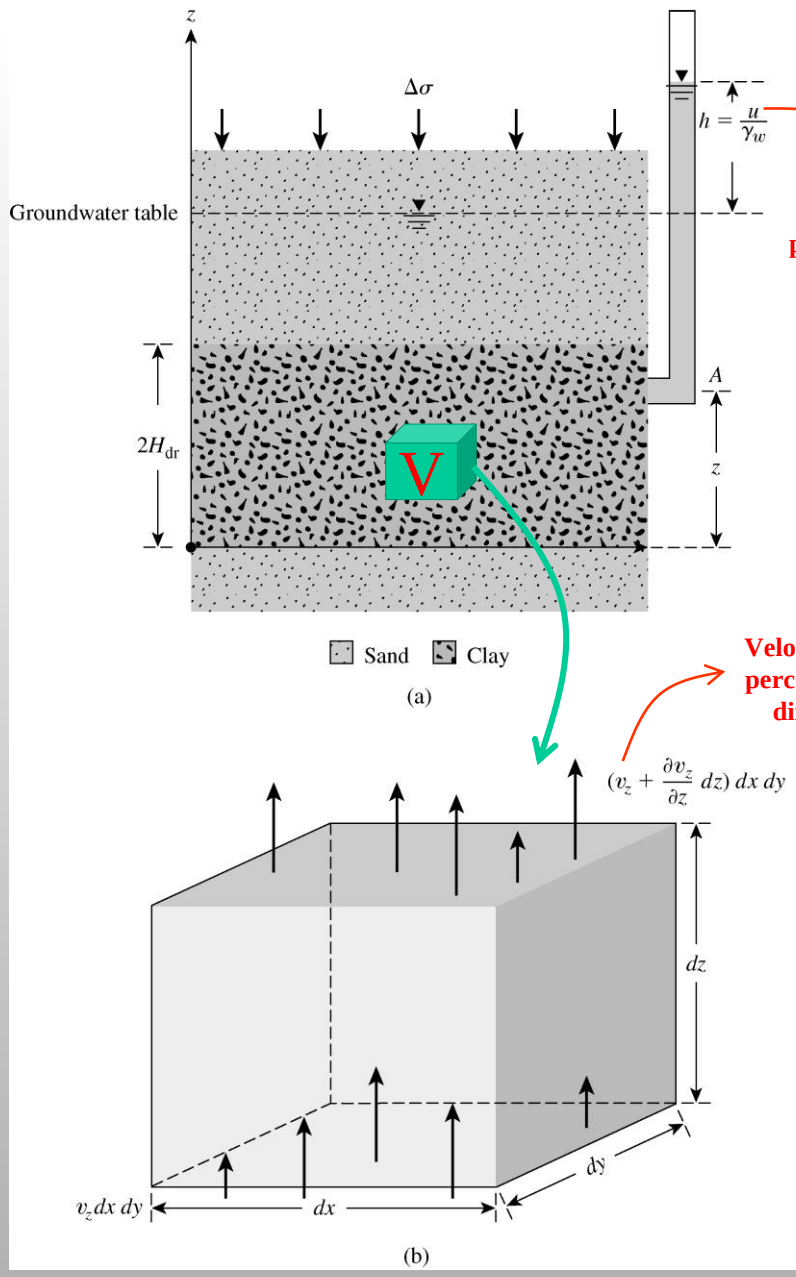


Figure 10.28 (a) Clay layer undergoing consolidation; (b) flow of water at *A* during consolidation

Razão de saída de água − **Razão de entrada de água** = **Razão de variação volume do solo**

$$(v_z + \frac{\delta v_z}{\delta z} dz)dxdy - v_z dxdy = \frac{\delta V}{\delta t}$$

ou $$\frac{\delta v_z}{\delta z} dzdxdy = \frac{\delta V}{\delta t}$$

Aplicando a lei de Darcy

$$v_z = ki = -k\frac{\delta h}{\delta z} = -\frac{k}{\gamma_w}\frac{\delta u}{\delta z}$$

$$\frac{k}{\gamma_w}\frac{\delta^2 u}{\delta z^2} = \frac{1}{dxdydz}\frac{\delta V}{\delta t}$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\frac{\delta V}{\delta t} = \frac{\delta V_v}{\delta t} = \frac{\delta(V_s + eV_s)}{\delta t} = \frac{\delta V_s}{\delta t} + V_s\frac{\delta e}{\delta t} + e\frac{\delta V_s}{\delta t}$$

$$\frac{\delta V_s}{\delta t} = 0 \qquad V_s = \frac{V}{1+e_o} = \frac{dxdydz}{1+e_o}$$

$$\frac{\delta V}{\delta t} = \frac{dxdydz}{1+e_o}\frac{\delta e}{\delta t}$$

A variação do índice de vazios é provocada pelo aumento da tensão efetiva.
(ou seja, pela redução do excesso de poropressão)

$$\delta e = a_v \delta(\Delta\sigma') = -a_v \delta u$$

a_v é o coeficiente de compressibilidade

$$\frac{k}{\gamma_w}\frac{\delta^2 u}{\delta z^2} = \frac{a_v}{1+e_o}\frac{\delta u}{\delta t} = -m_v \frac{\delta u}{\delta t}$$

m_v é o coeficiente de compressibilidade volumétrico

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_o}$$

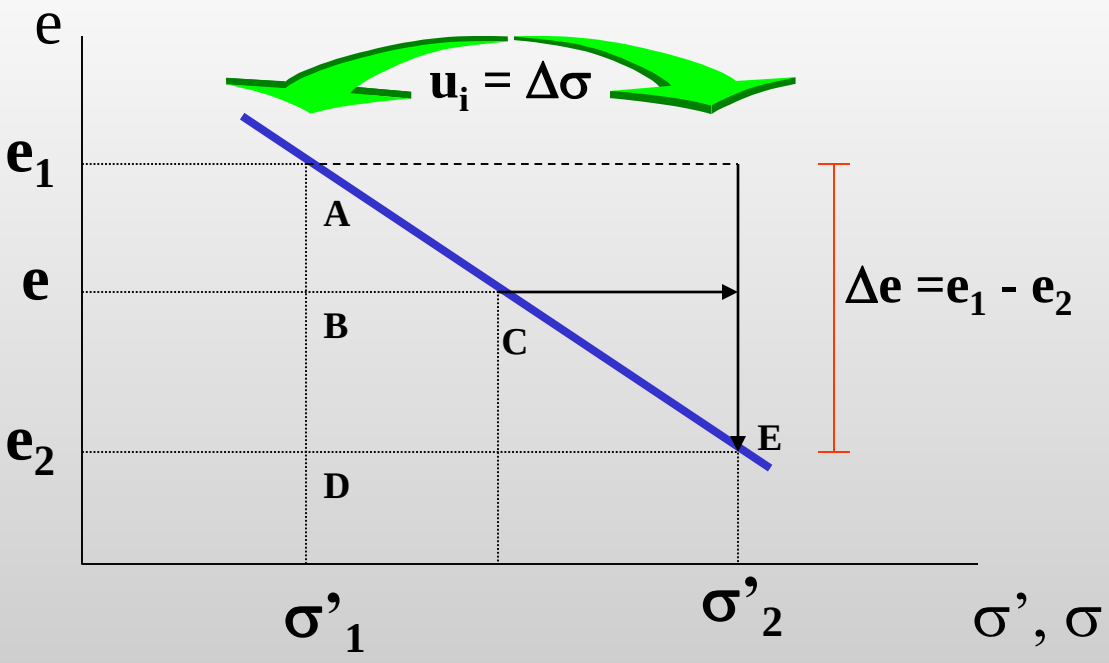
$$C_v = \frac{k(1+e)}{a_v * \gamma_w}$$

C_v é o coeficiente de adesnamento

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

Equação diferencial do adensamento

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’ (hipótese 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

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

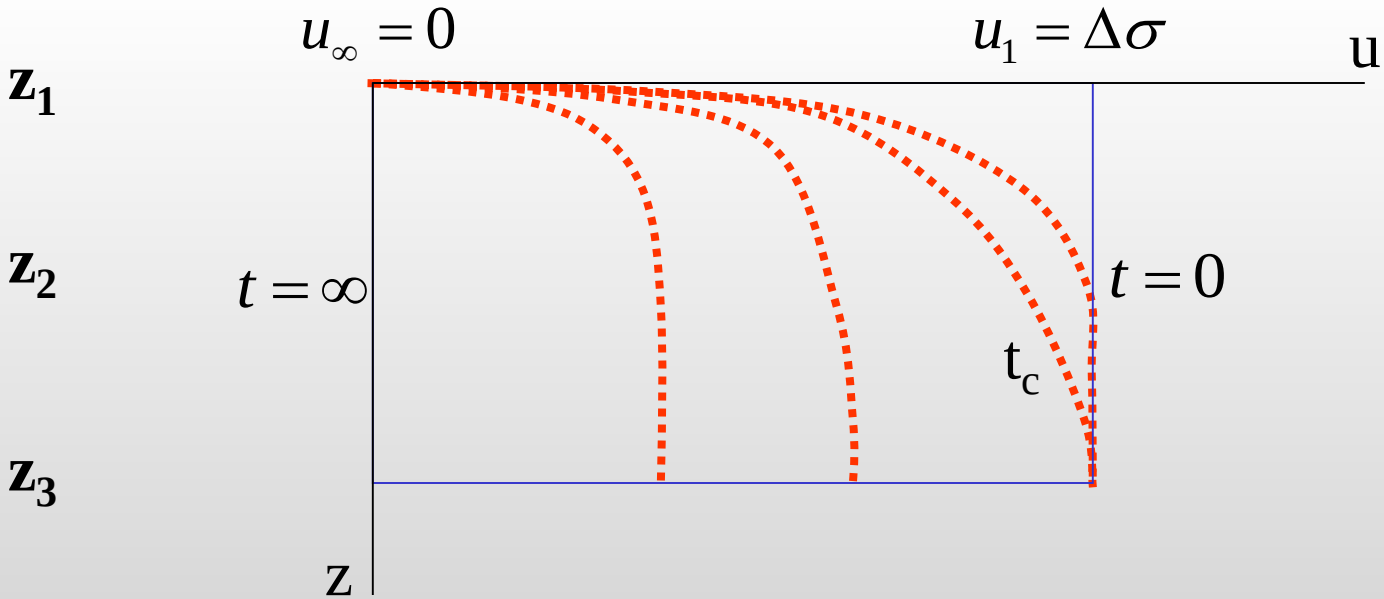
Condições de contorno para solução da equação:

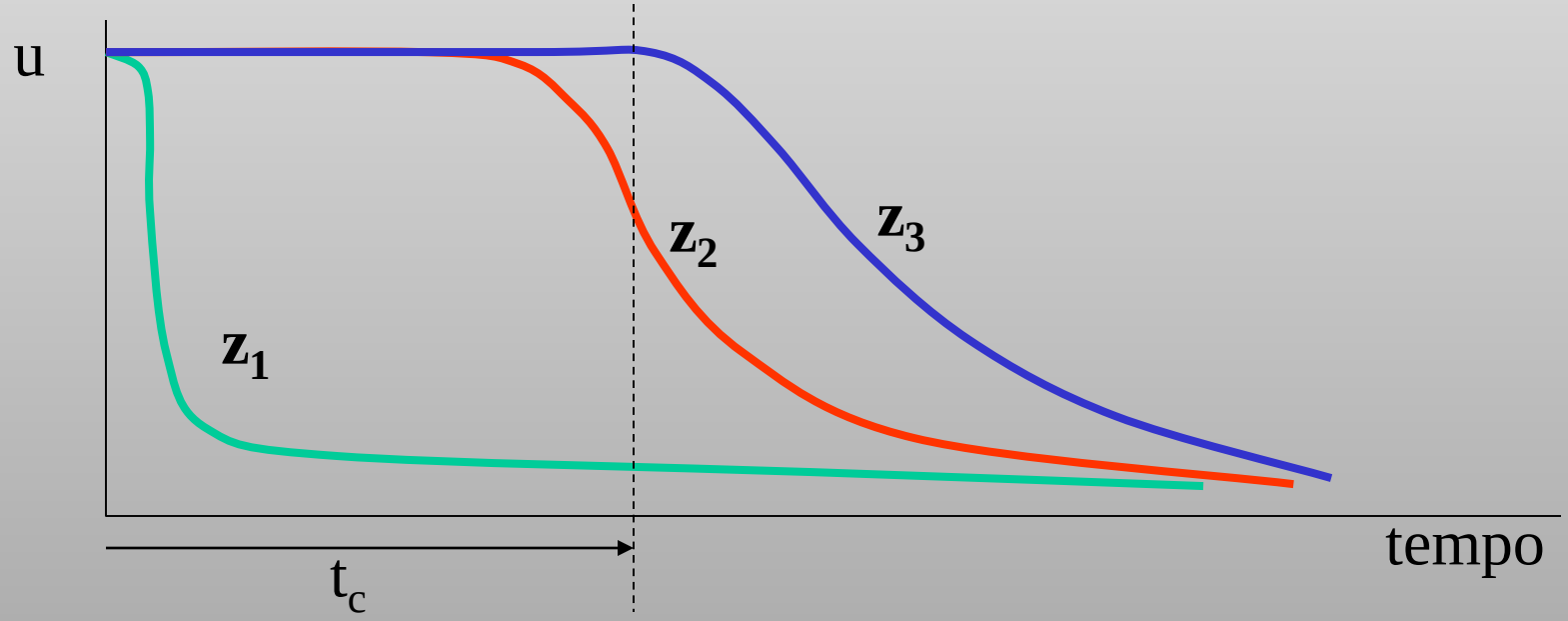
- Existe completa drenagem nas duas extremidades, logo, para t = 0, a poro pressão nestas extremidades é nula. (numa extremidade z = 0 e na outra z = $2H_d$).
- A poro pressão inicial, constante com a profundidade, é igual ao acréscimo de pressão aplicada.

Solução

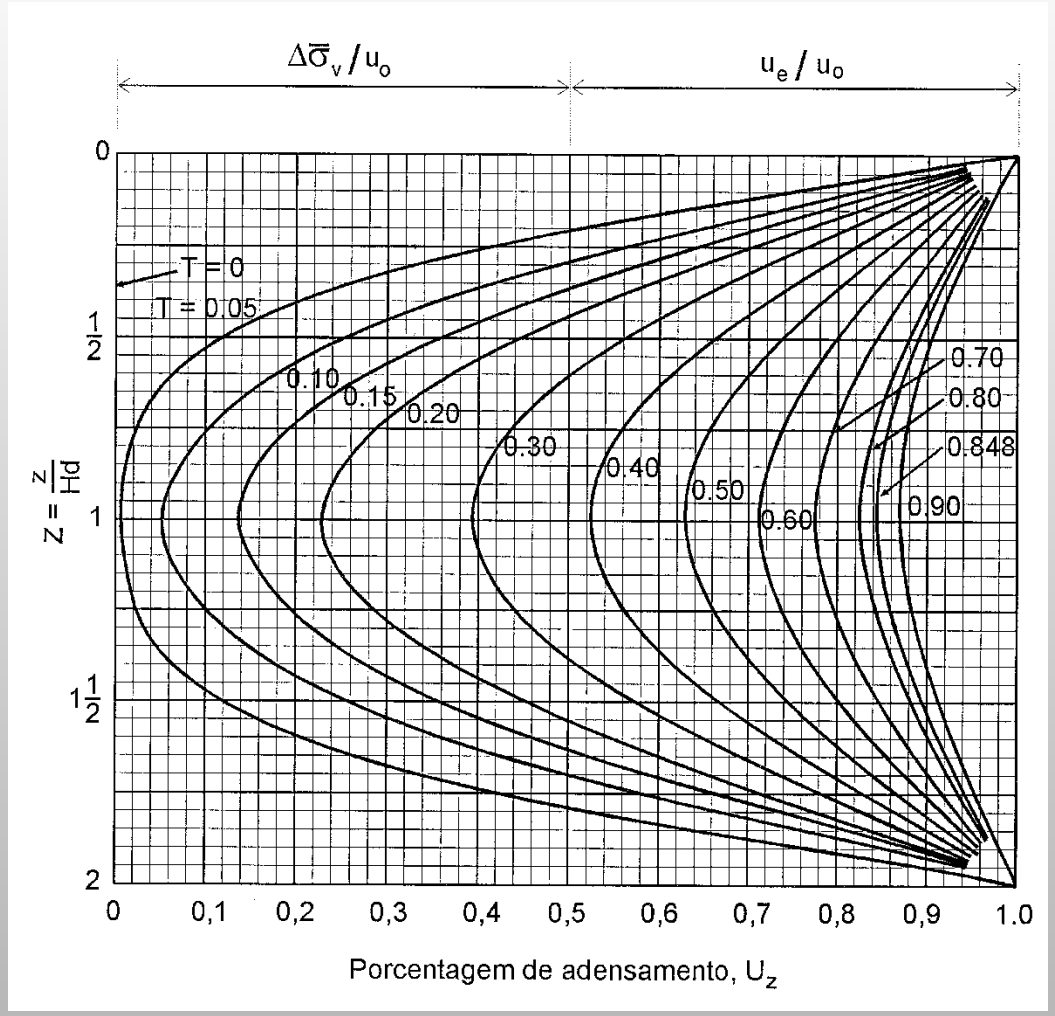
$$T = \frac{C_v t}{H_d^{\,2}} \qquad U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \left(\operatorname{sen} \frac{Mz}{H} \right) e^{-M^2 T}$$

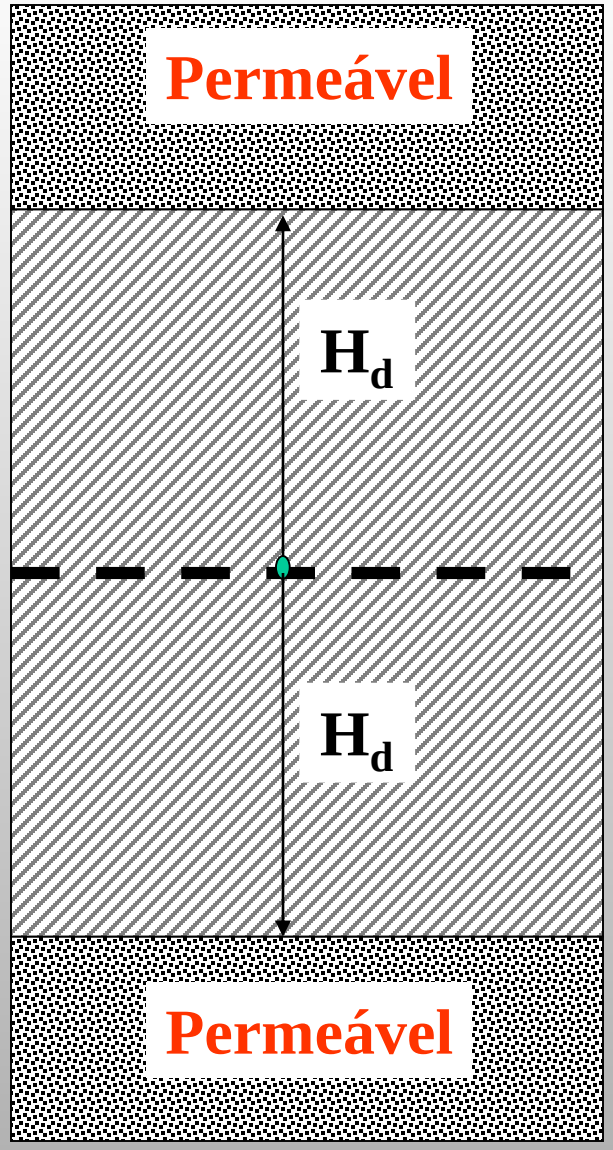
$$M = \frac{\pi}{2}(2m+1)$$

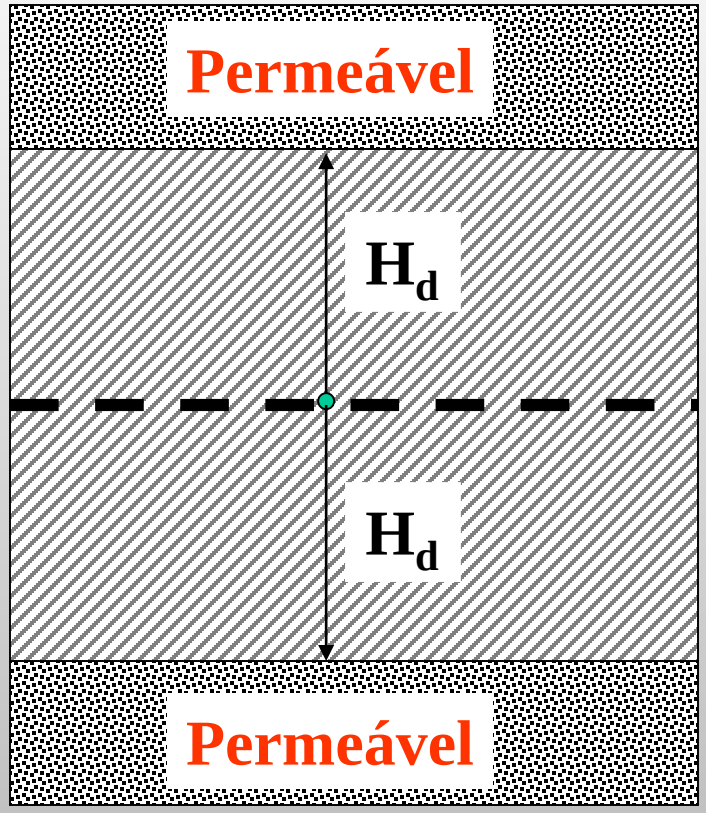

$u_\infty = 0$
$u_1 = \Delta\sigma$
u
z_1
z_2
z_3
$t = \infty$
$t = 0$
t_c
z

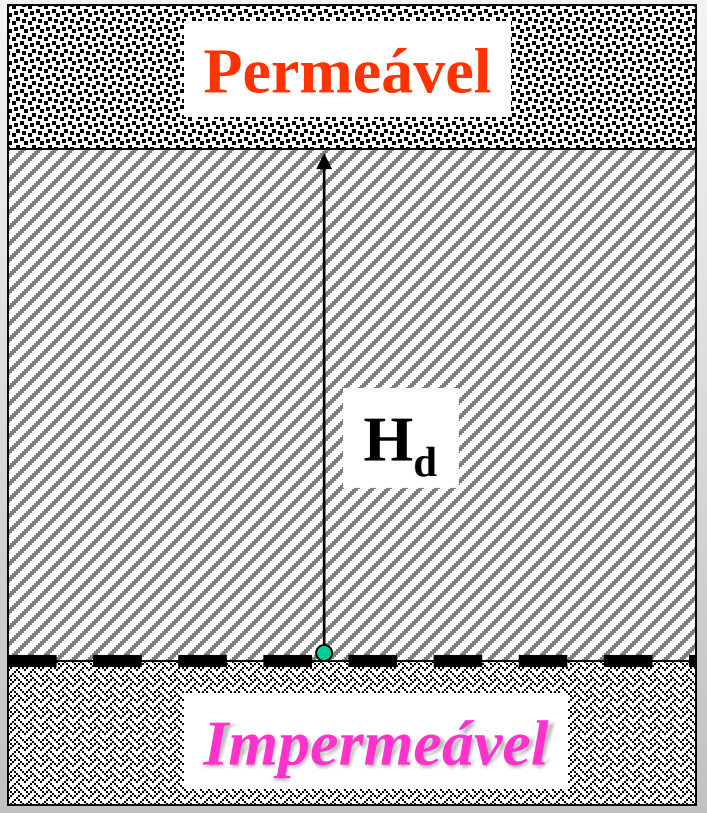

u
z_1
z_2
z_3
tempo
t_c

Informações em profundidade e no tempo






Permeável
H_d
H_d
Permeável


Permeável
H_d
Impermeável

Recalque na Superfície

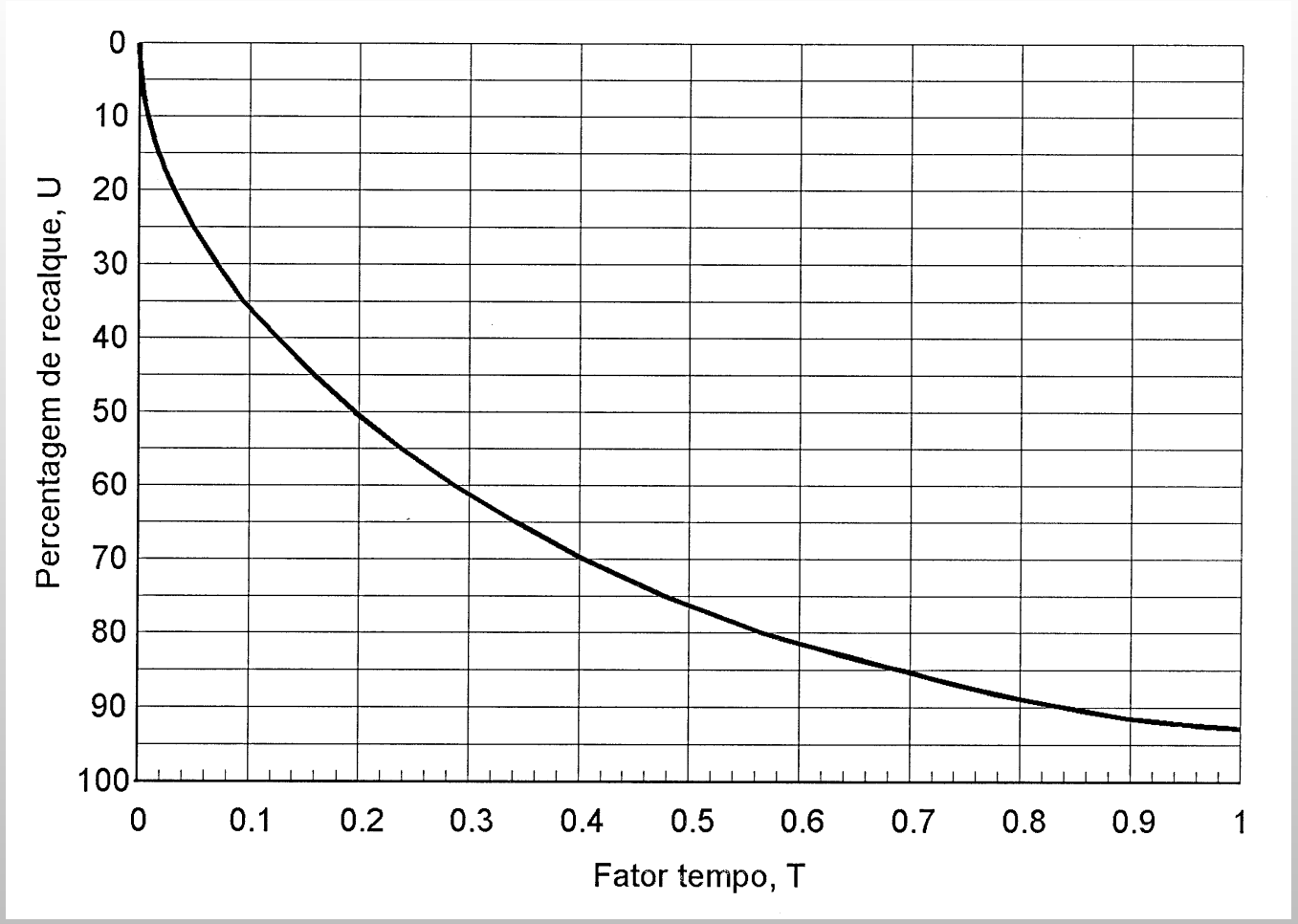
Somatória dos recalques dos diversos elementos ao longo da profundidade. A integração de todos estes recalques, dá origem ao recalque total.

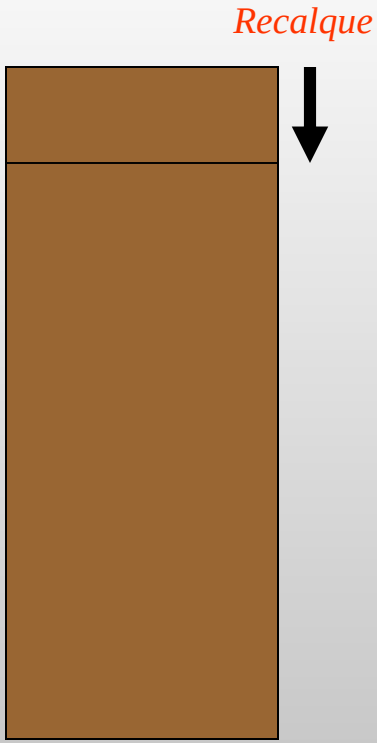
$$U = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T}$$

Para U < 60%

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

Recalque na superfície





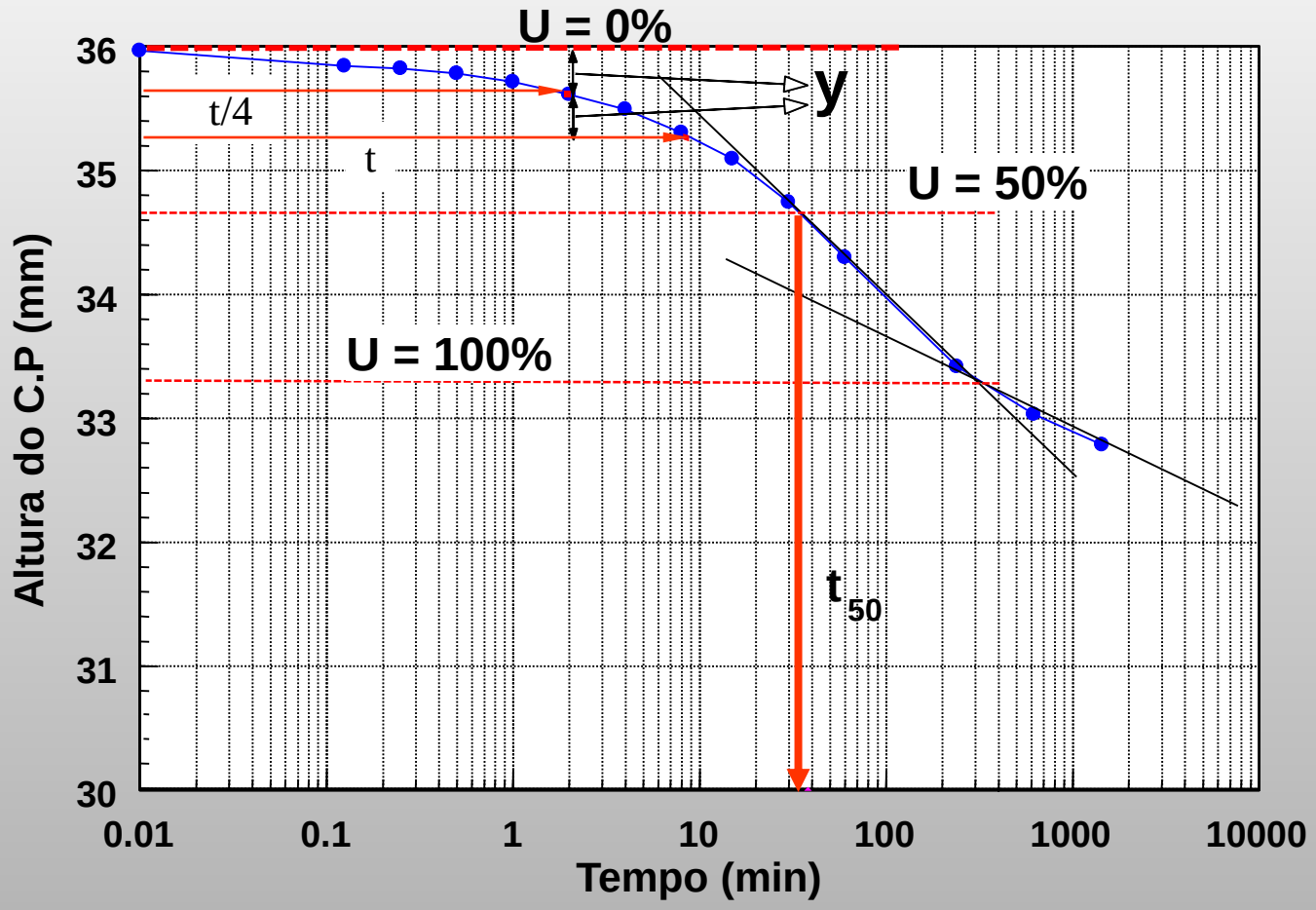
Fórmulas aproximadas para o recalque na superfície

$$T = \left(\frac{\pi}{4}\right) U^2 \qquad \text{para } U \leq 60\%$$

$$T = -0.933 \log(1 - U) - 0.085 \qquad \text{para } U > 60\%$$

Determinação do Coeficiente de Adensamento, C_v

Método de Casagrande

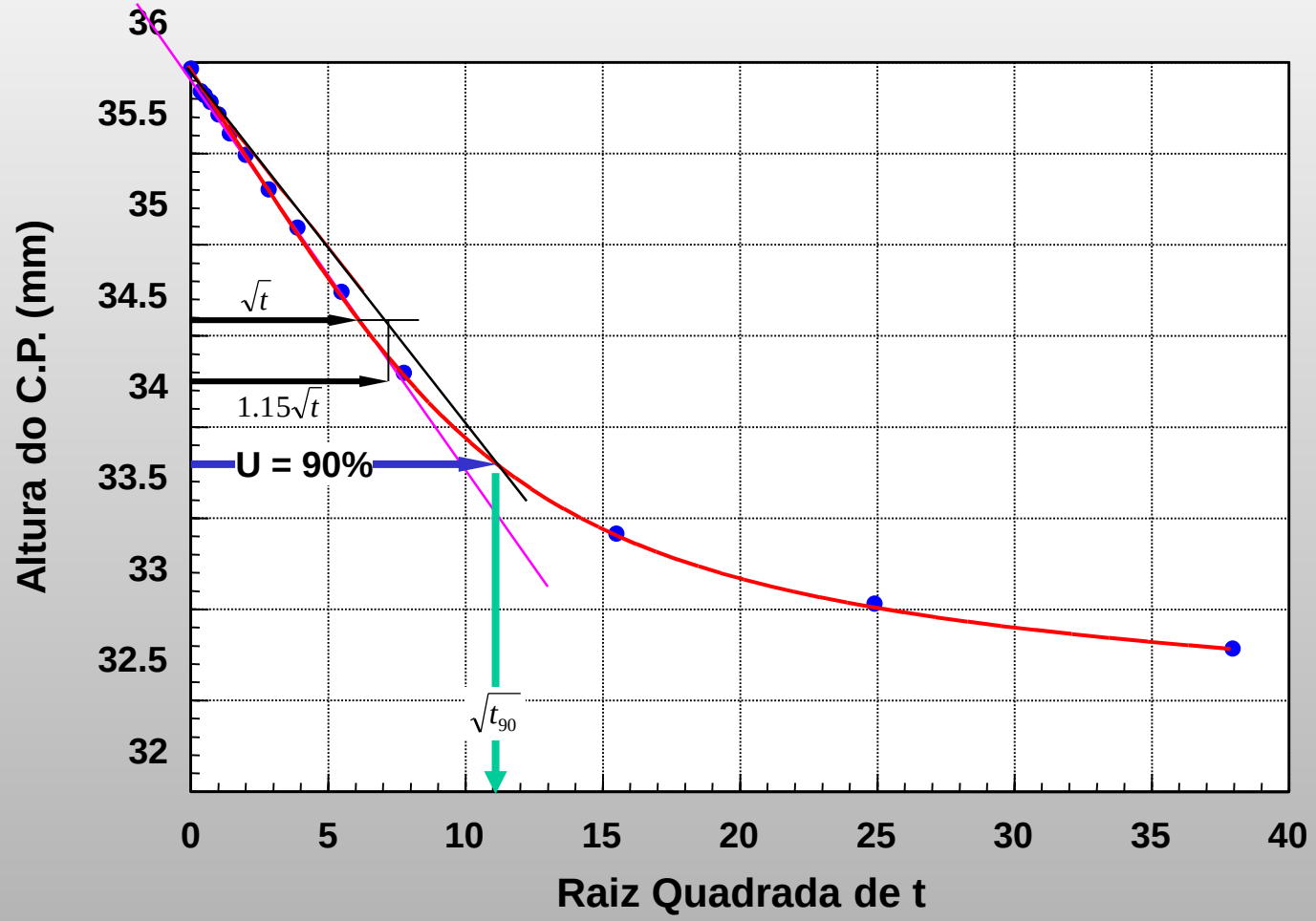


$$C_v = \frac{0.197H^2}{t_{50}}$$

0.197 é o fator tempo para U = 50%

Determinação do Coeficiente de Adensamento, C_v

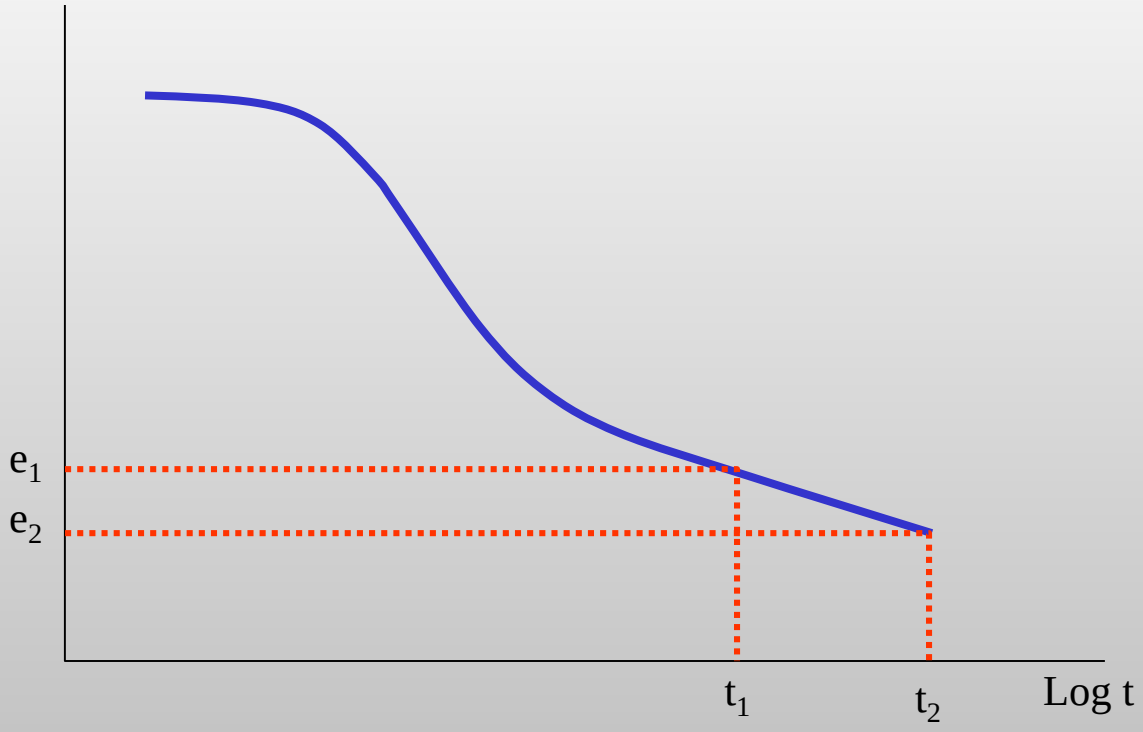
Método de Taylor

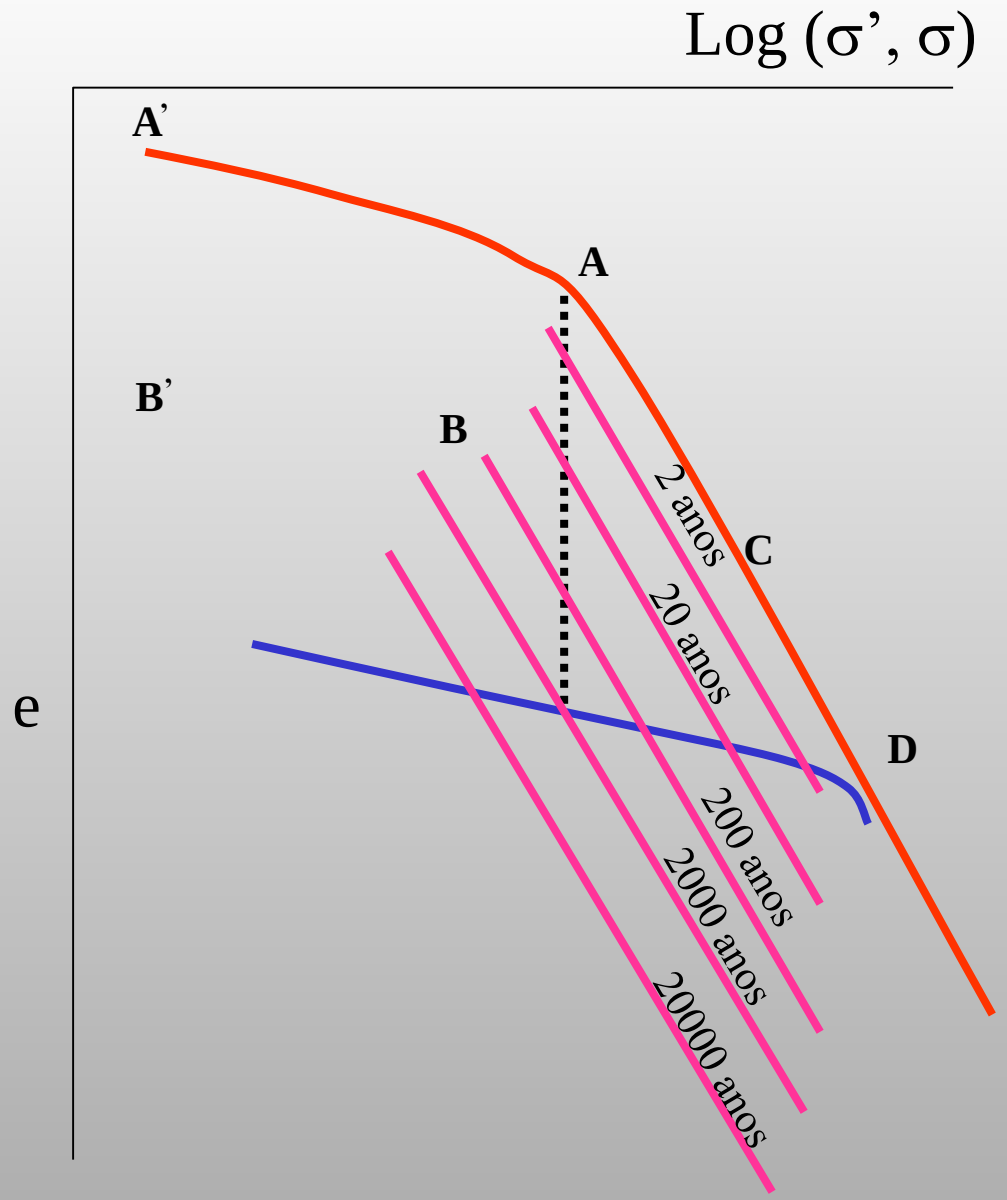


$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}}$$

0.848 é o fator tempo para U = 90%

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