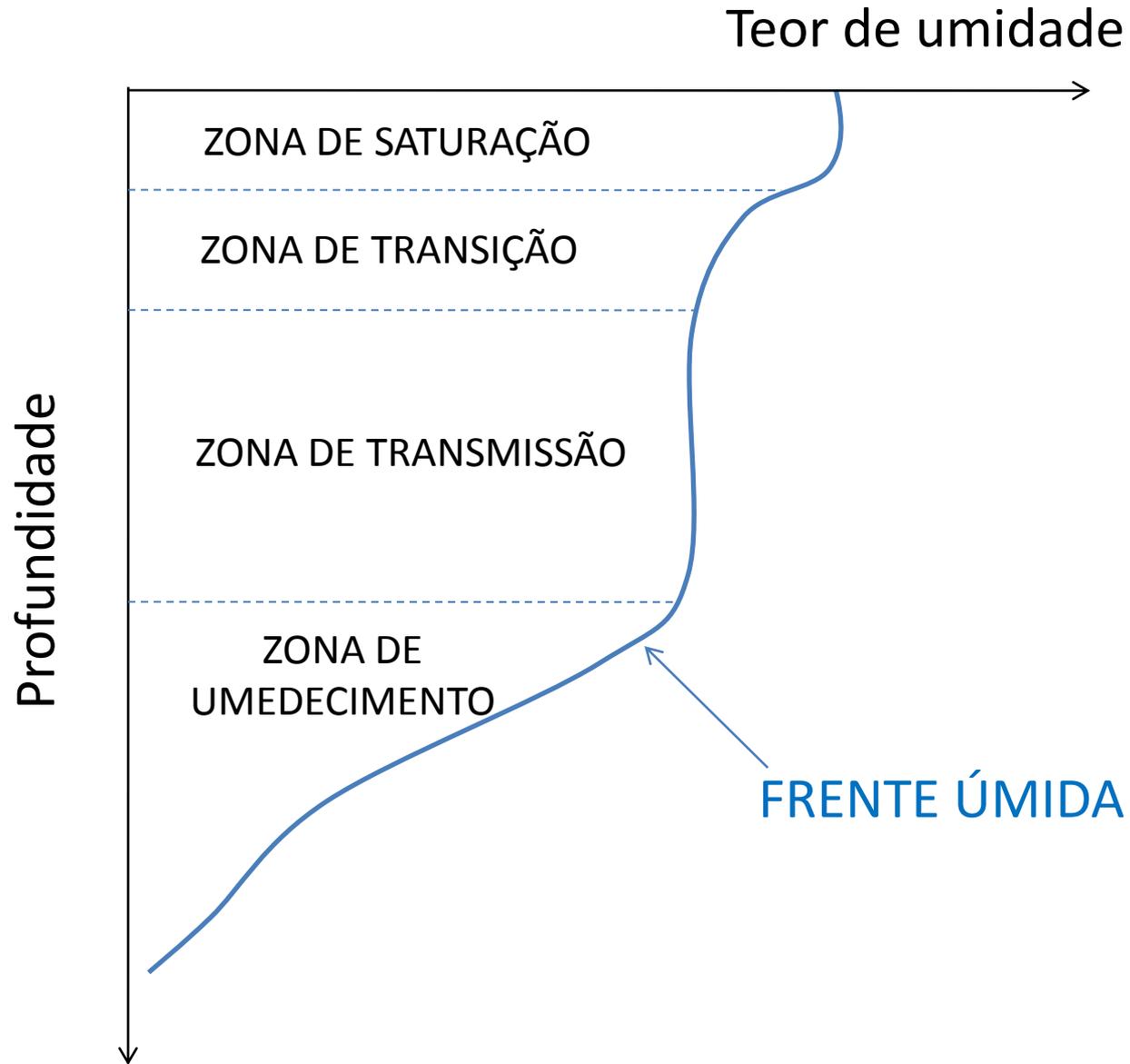


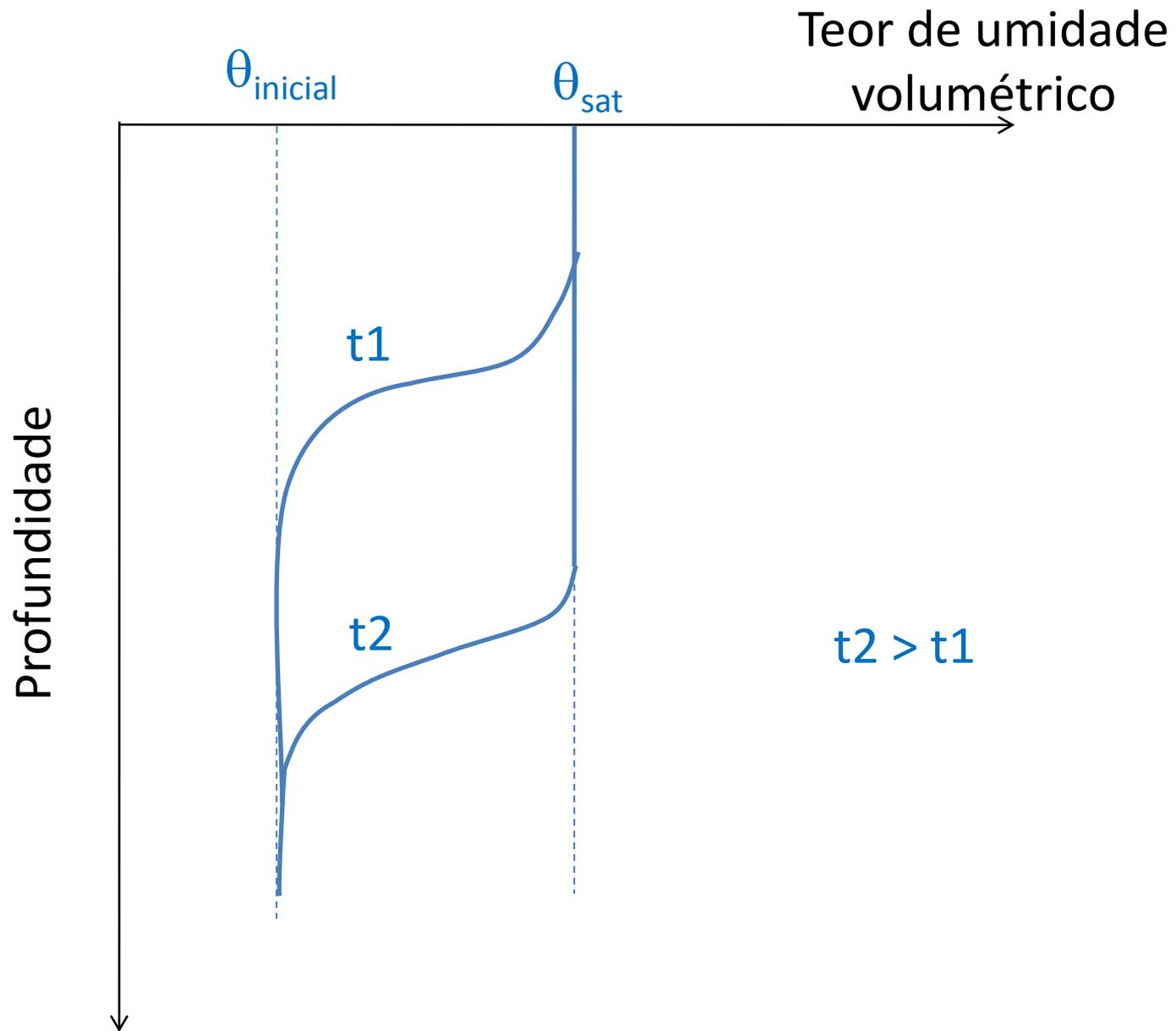
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Engenharia Ambiental

Infiltração de água em um perfil de solo

PEF3304 – Poluição do Solo

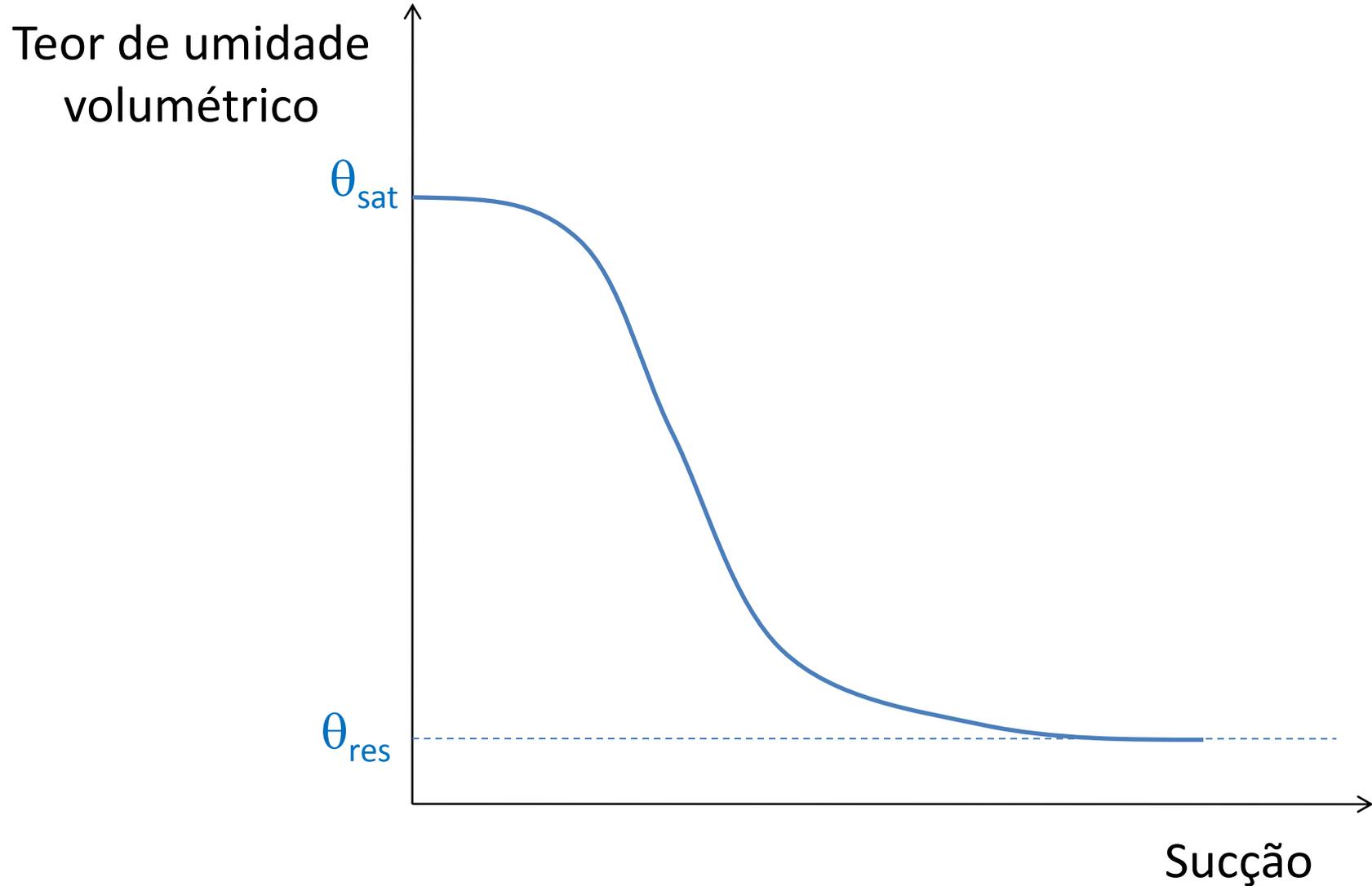


(Bodman & Colman, 1944)

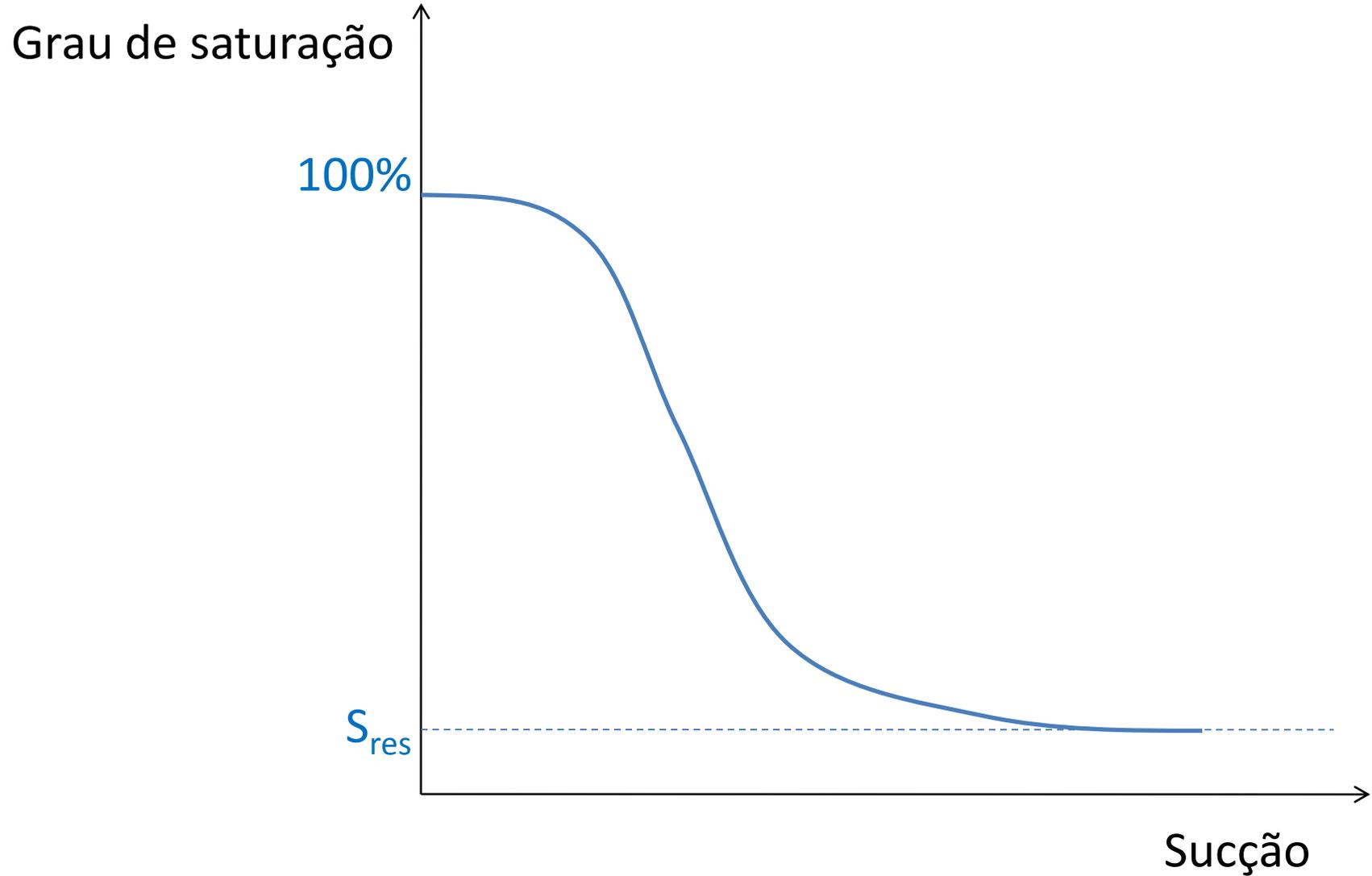


(Carvalho, 1989)

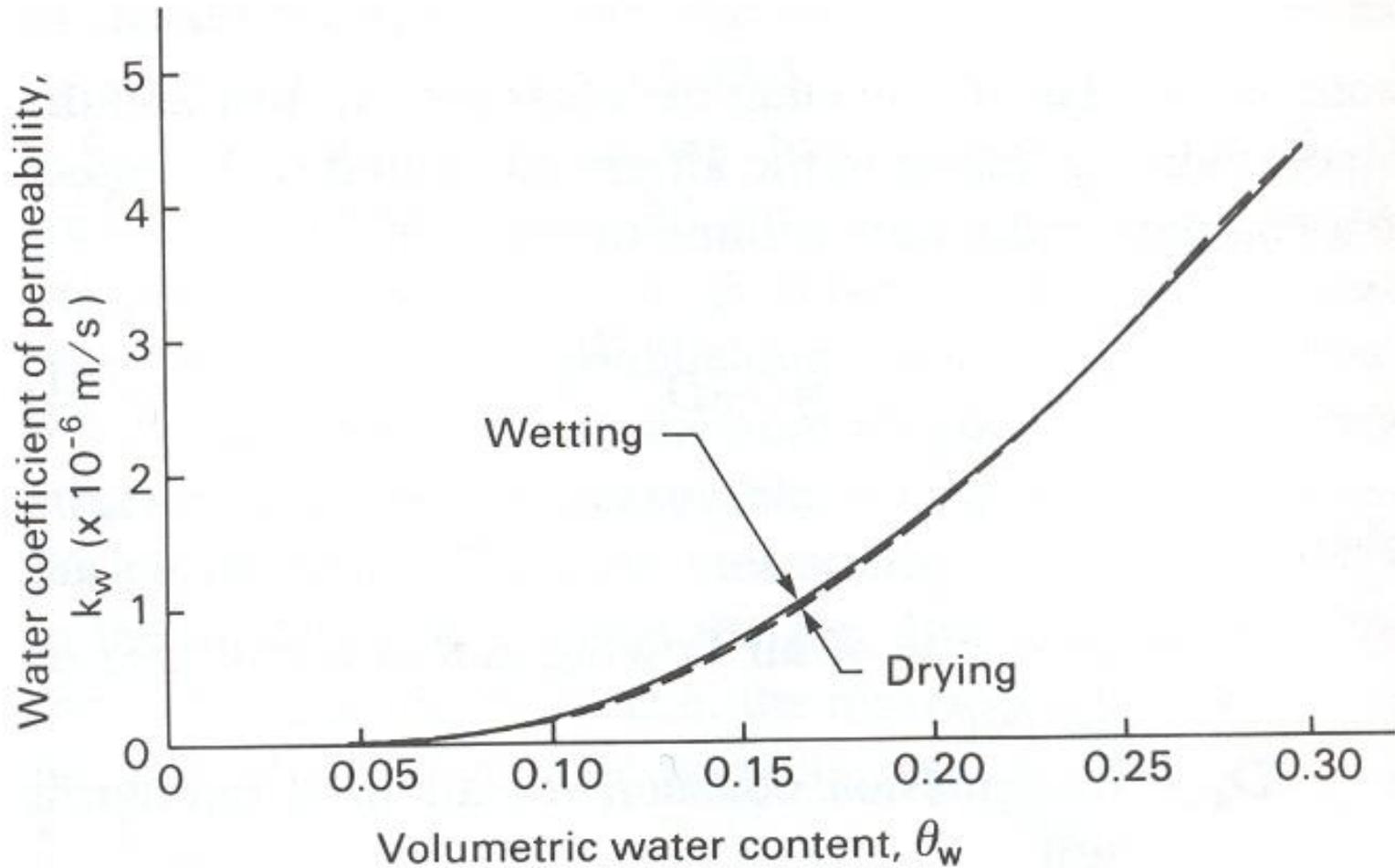
Curva de retenção de água do solo



Curva de retenção de água do solo

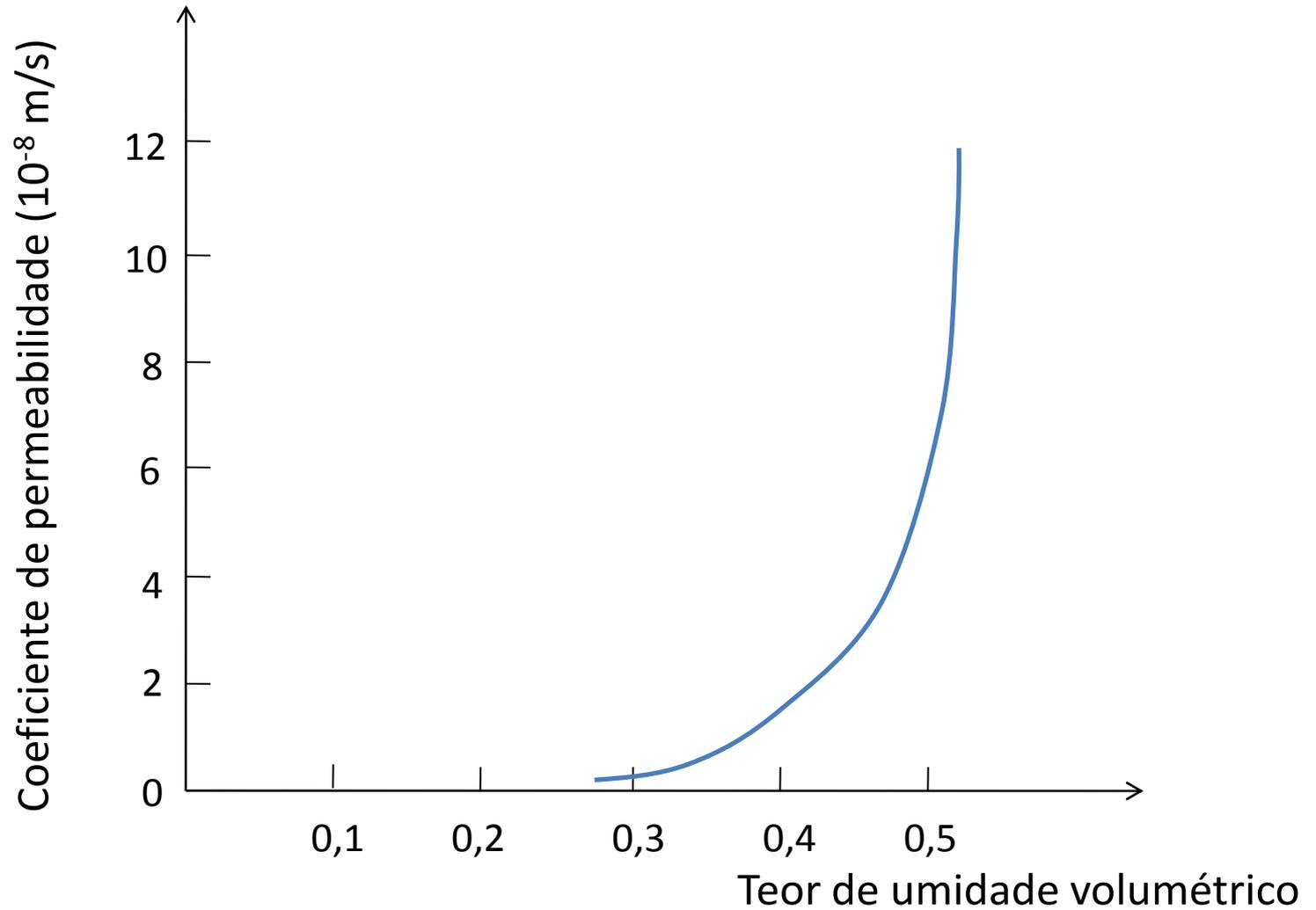


Função permeabilidade



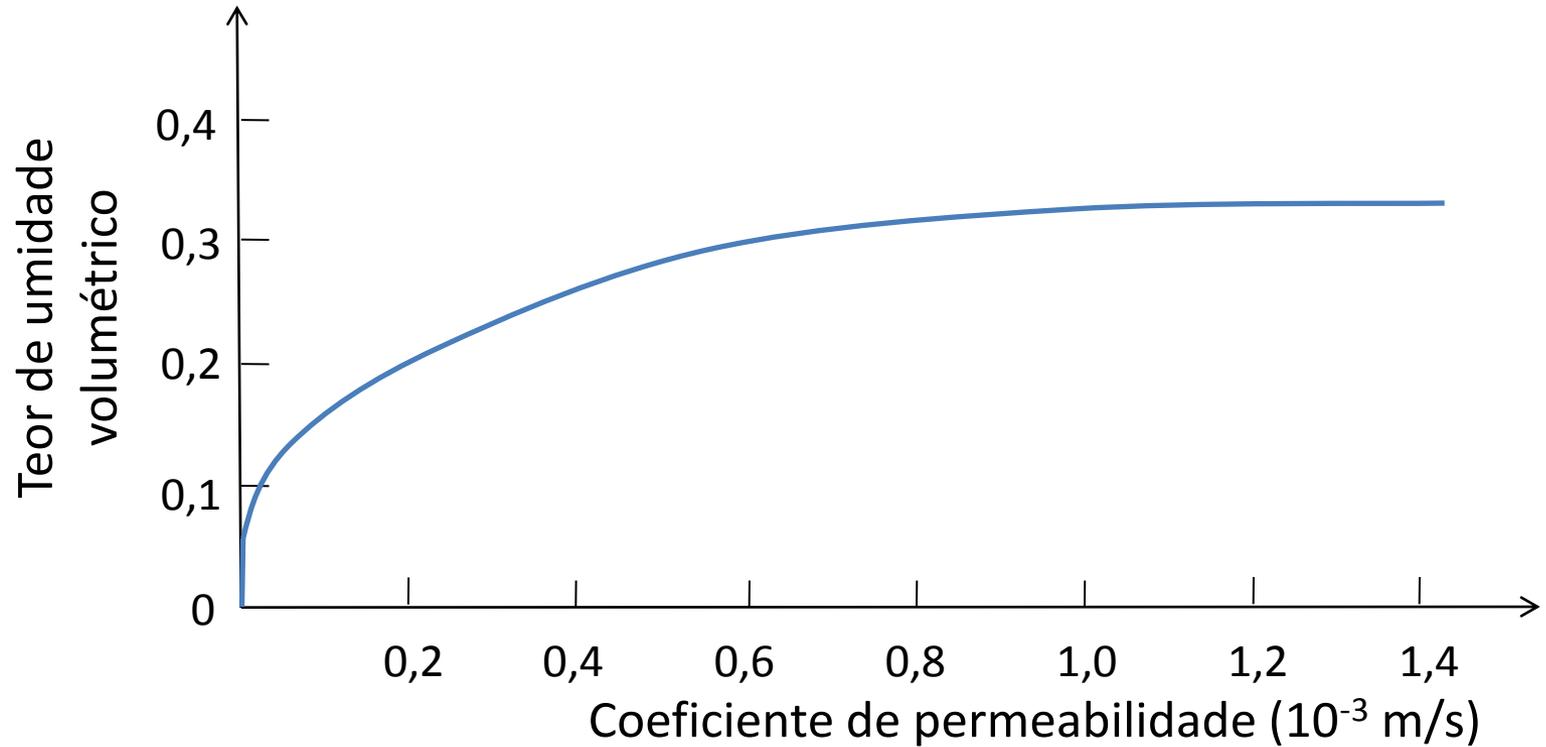
(Fredlund & Rahardjo, 1993)

Função permeabilidade



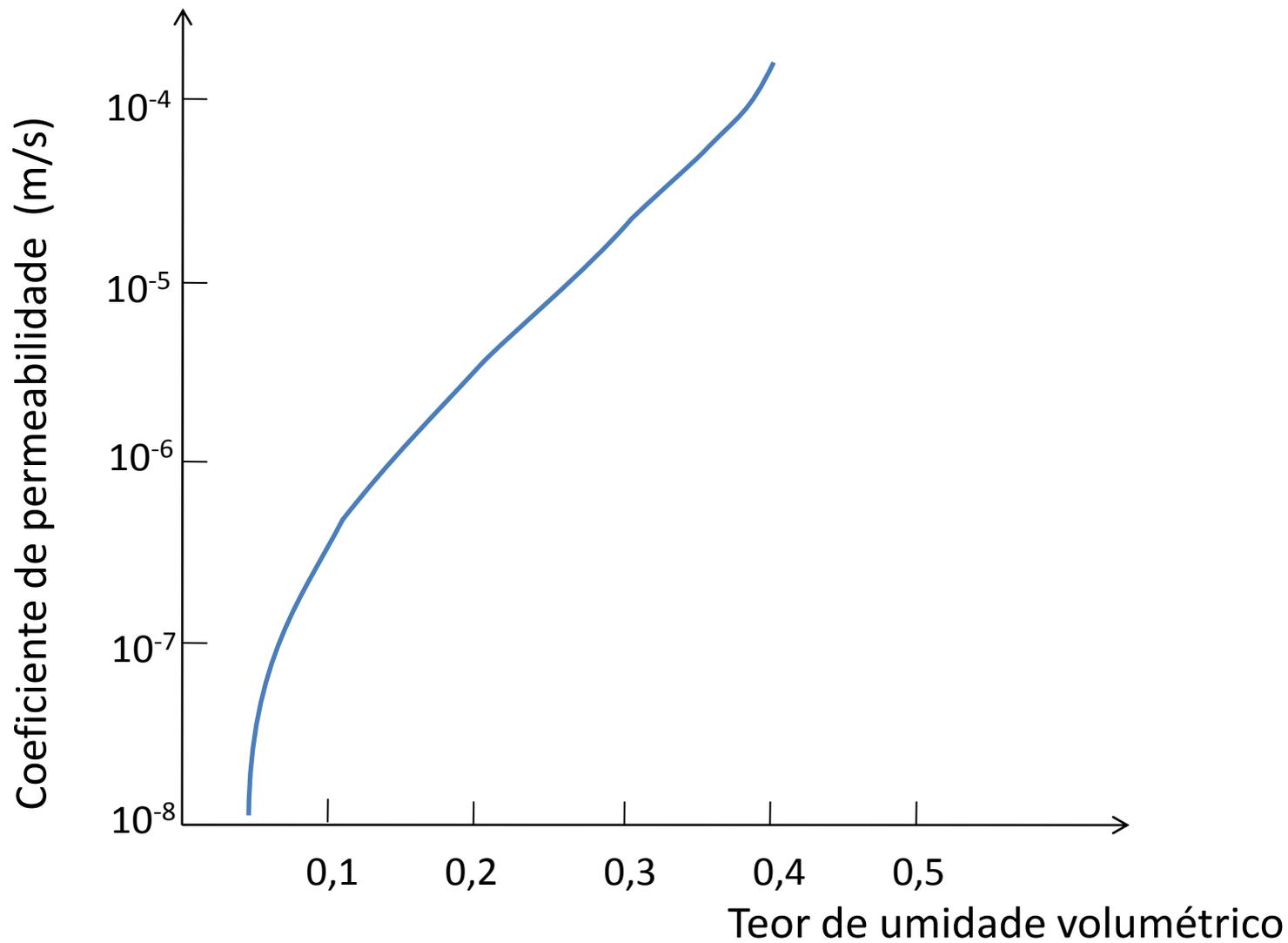
Yolo Light Clay (Philip, 1969 apud Carvalho, 1989)

Função permeabilidade

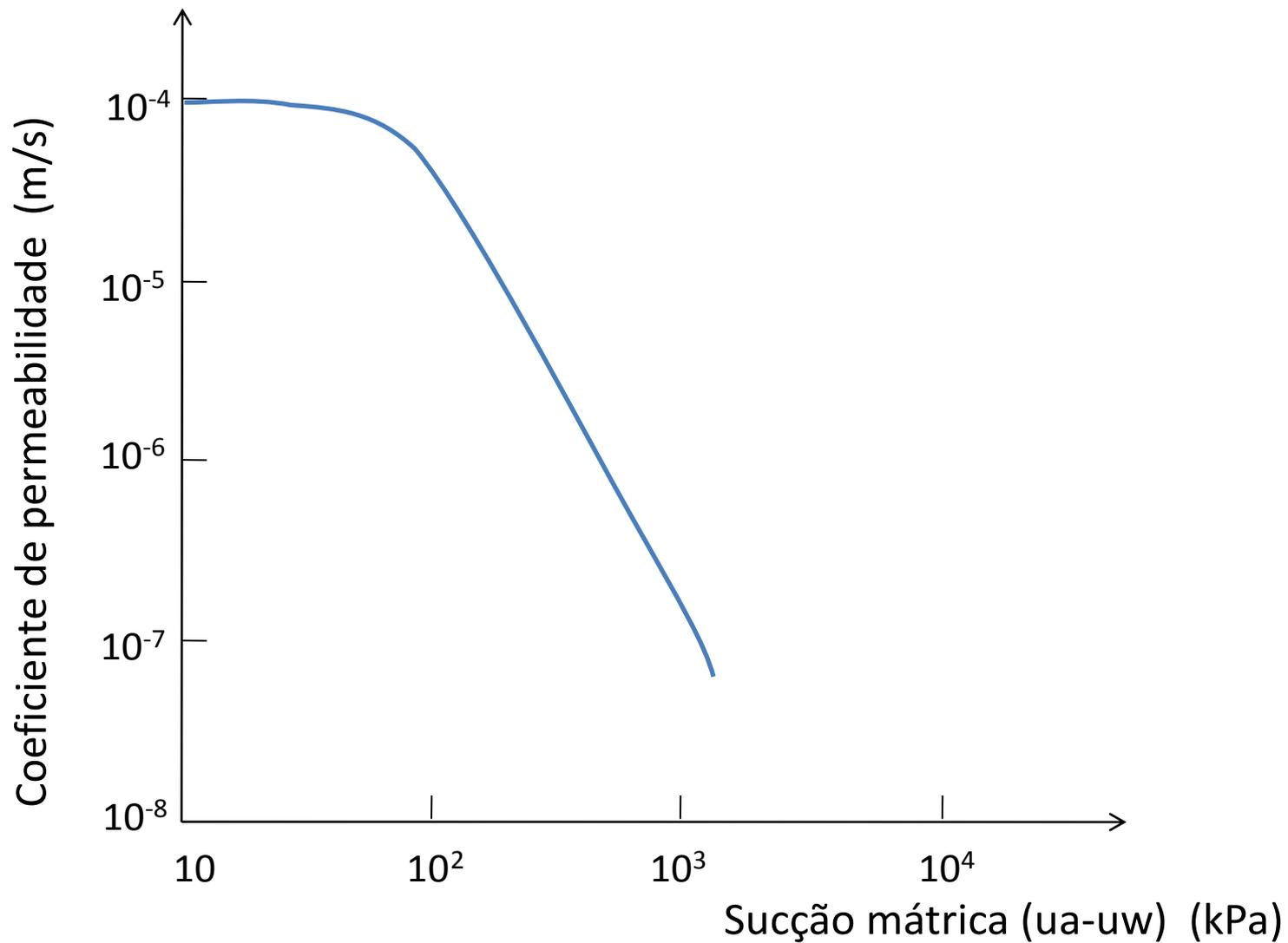


Areia (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Função permeabilidade



Função permeabilidade



Velocidade de percolação em solo não saturado

$$v = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}$$

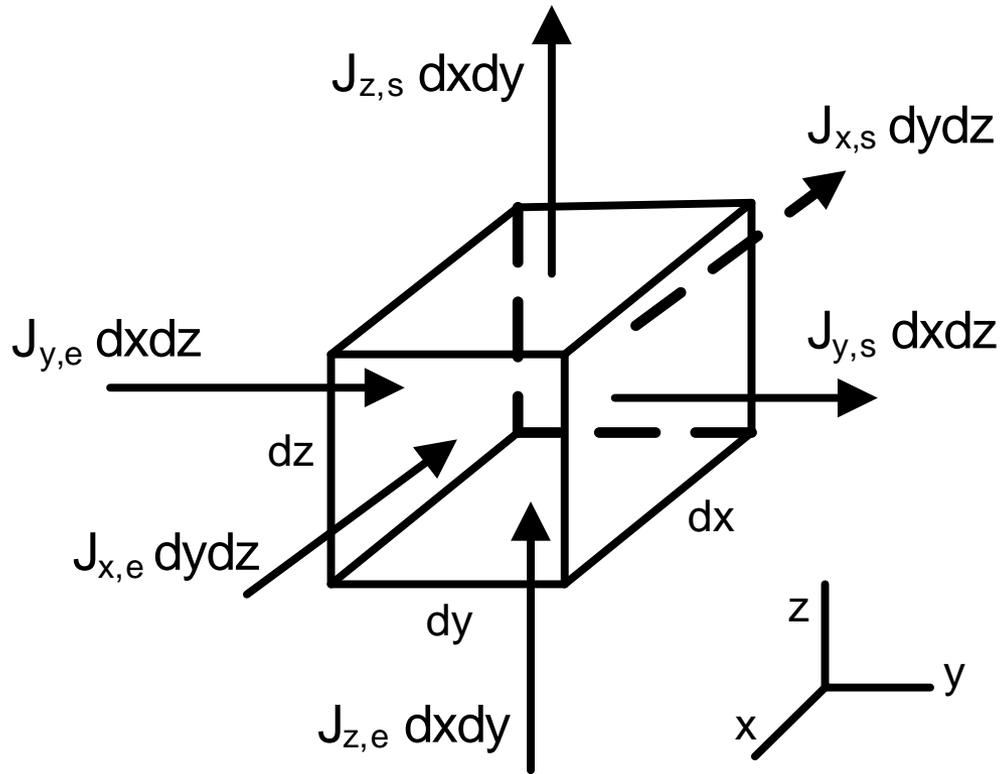
Lei de Darcy, considerando-se a permeabilidade como uma função do teor de umidade ou do grau de saturação

$$v = -k(\theta) \frac{\partial(h_c + z)}{\partial z} = -k(\theta) \left(\frac{\partial h_c}{\partial z} + 1 \right)$$

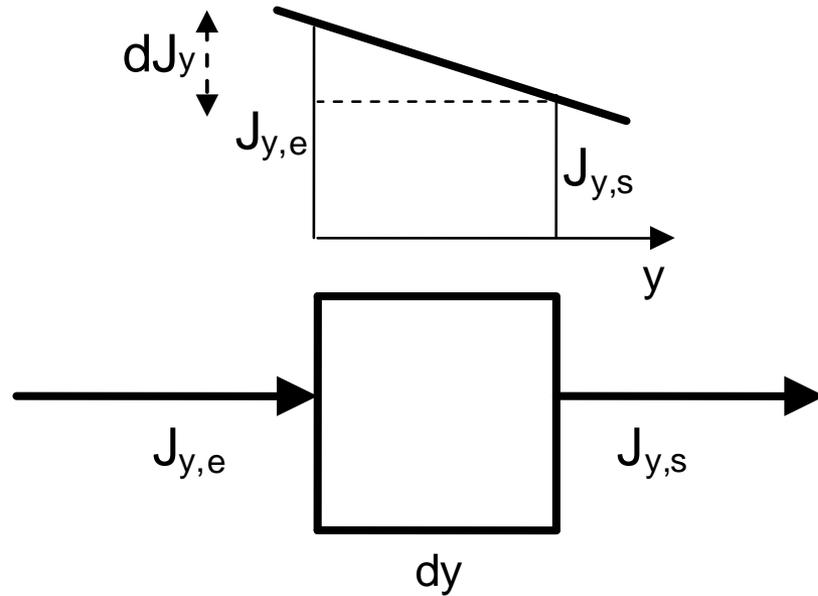
Substituição da carga hidráulica total pelas parcelas piezométrica e altimétrica

Fluxo de água em solo não saturado: Equação de Richards

- 1931
- Fluxo em solos não saturados
- Equação da continuidade e lei de Darcy



$$J_{x,e} dydz + J_{y,e} dxdz + J_{z,e} dxdy - J_{x,s} dydz + J_{y,s} dxdz + J_{z,s} dxdy = \frac{dM_{w,arm}}{dt}$$



$$J_{y,s} = J_{y,e} + \frac{\partial J_y}{\partial y} dy$$

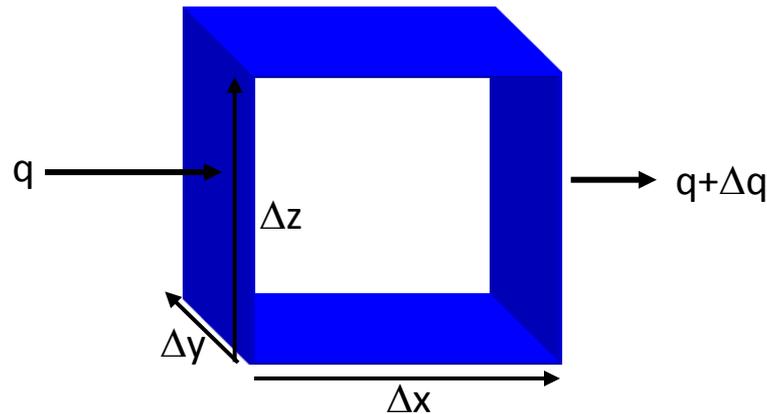
$$-\left(\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z}\right) dx dy dz = \frac{dM_{w,arm}}{dt}$$

$$-\left(\frac{\partial(q_x \rho_w)}{\partial x} + \frac{\partial(q_y \rho_w)}{\partial y} + \frac{\partial(q_z \rho_w)}{\partial z}\right) dx dy dz = \frac{d(V_{w,arm} \rho_w)}{dt}$$

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx dy dz = \frac{dV_{w,arm}}{dt}$$

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx dy dz = \frac{d(\theta V)}{dt}$$

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} = \frac{d\theta}{dt}$$



Em um intervalo de tempo Δt :

$$\Delta V_w = V_{w,\text{saída}} - V_{w,\text{entrada}}$$

$$\Delta V_w = (q + \Delta q) \Delta y \Delta z \Delta t - q \Delta y \Delta z \Delta t$$

$$\Delta V_w = \Delta \theta V = \Delta \theta \Delta x \Delta y \Delta z$$

Se Δq for positivo, $\Delta \theta$ será negativo, e vice-versa. Portanto:

$$\Delta \theta \Delta x \Delta y \Delta z = -\Delta q \Delta y \Delta z \Delta t$$

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = -\frac{\Delta q}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z}$$

← Lei da Continuidade

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right)$$

← Lei de Darcy

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right)$$

← Coeficiente de permeabilidade é função da umidade

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial K}{\partial z} \frac{\partial H}{\partial z} - K \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad \leftarrow \text{Lei da Continuidade}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad \leftarrow \text{Lei de Darcy}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad \leftarrow \text{Coeficiente de permeabilidade é função da umidade}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial (u_w + z)}{\partial z} \right) = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial u_w}{\partial z} + 1 \right) \quad \leftarrow \text{Carga hidráulica total é composta de duas parcelas, piezométrica e altimétrica}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h_c}{\partial z} + 1 \right) \quad \leftarrow \text{Pressão neutra negativa corresponde a uma altura capilar}$$

Capacidade de infiltração

- CI = máxima velocidade com que a água consegue percolar no interior do solo
- No interior da frente de saturação:

$$v = -k(\theta_{fs}) \left(\frac{\Delta h_{(sup,fs)}}{Z_{fs}} + 1 \right) = CI$$

v = velocidade de fluxo vertical

θ_{fs} = teor de umidade volumétrico na frente de saturação

$k(\theta_{fs})$ = permeabilidade na frente de saturação

$\Delta h_{(sup,fs)}$ = diferença de potencial matricial entre a superfície e a frente de saturação

Z_{fs} = espessura da camada úmida

