

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Engenharia Ambiental

# Fluxo não saturado de água no solo

PEF3304 – Poluição do Solo

# Velocidade de percolação em solo não saturado

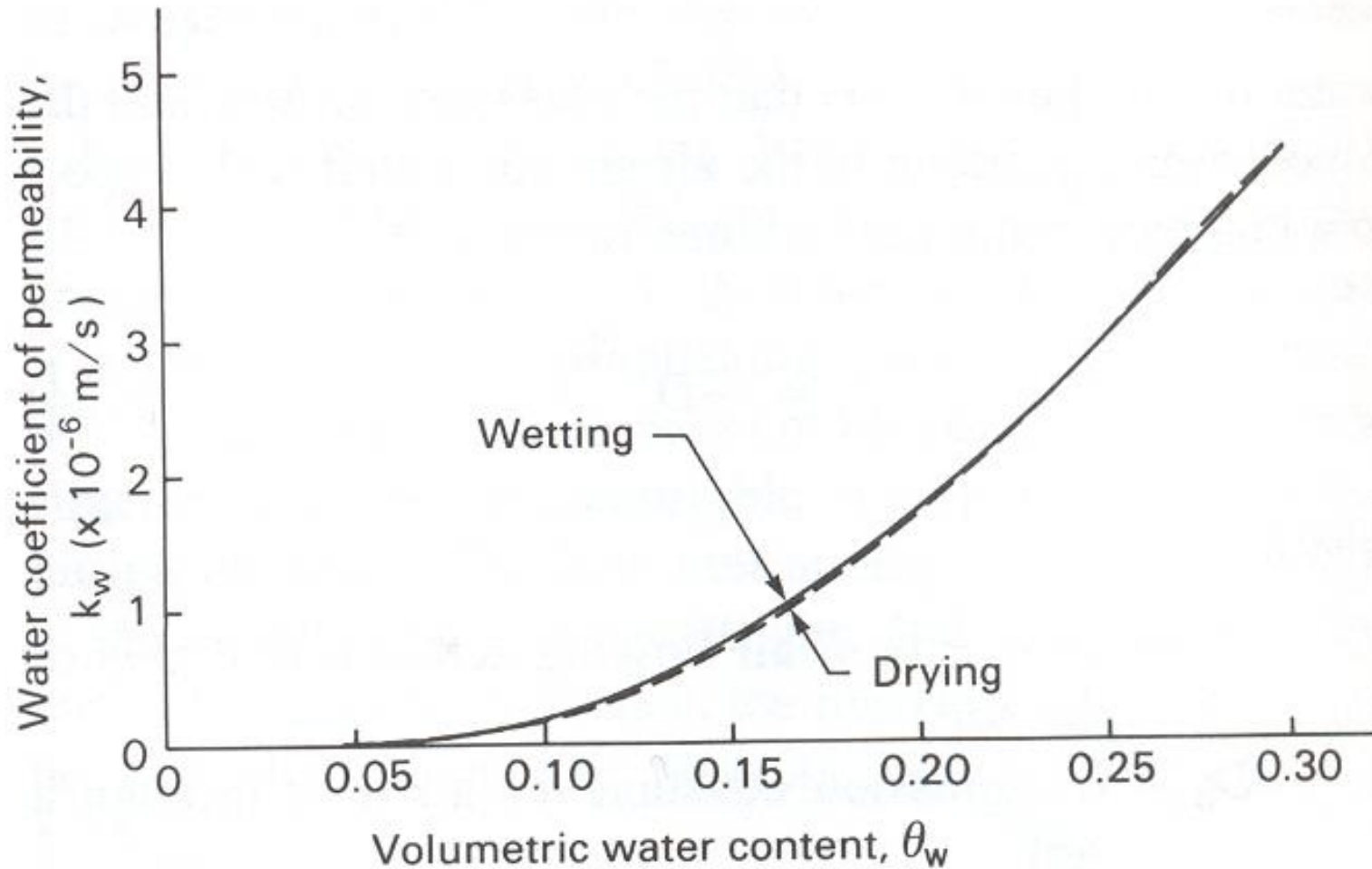
$$v = -k(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}$$

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

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

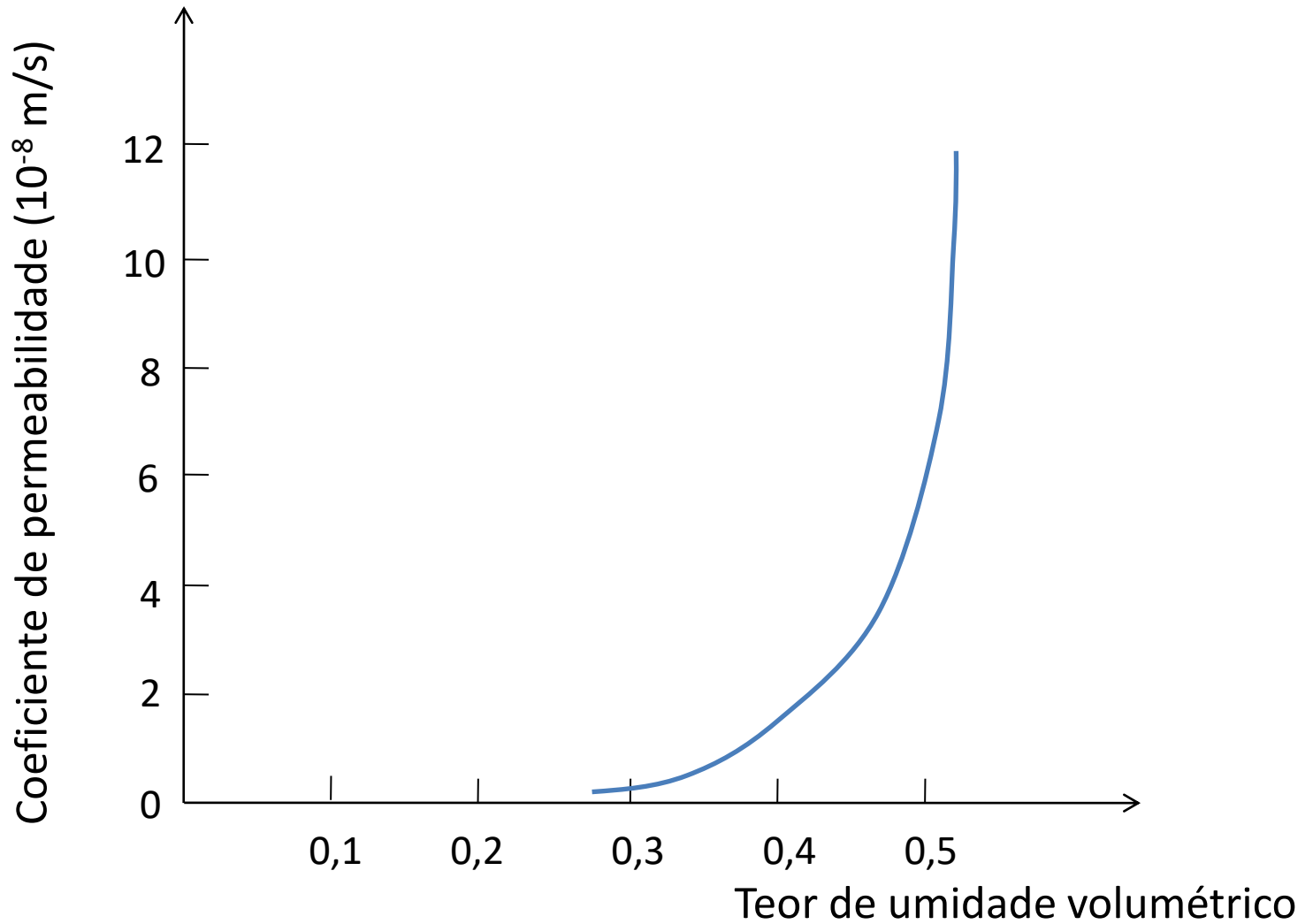
Substituição da carga hidráulica total pelas parcelas piezométrica e altimétrica

# Função permeabilidade



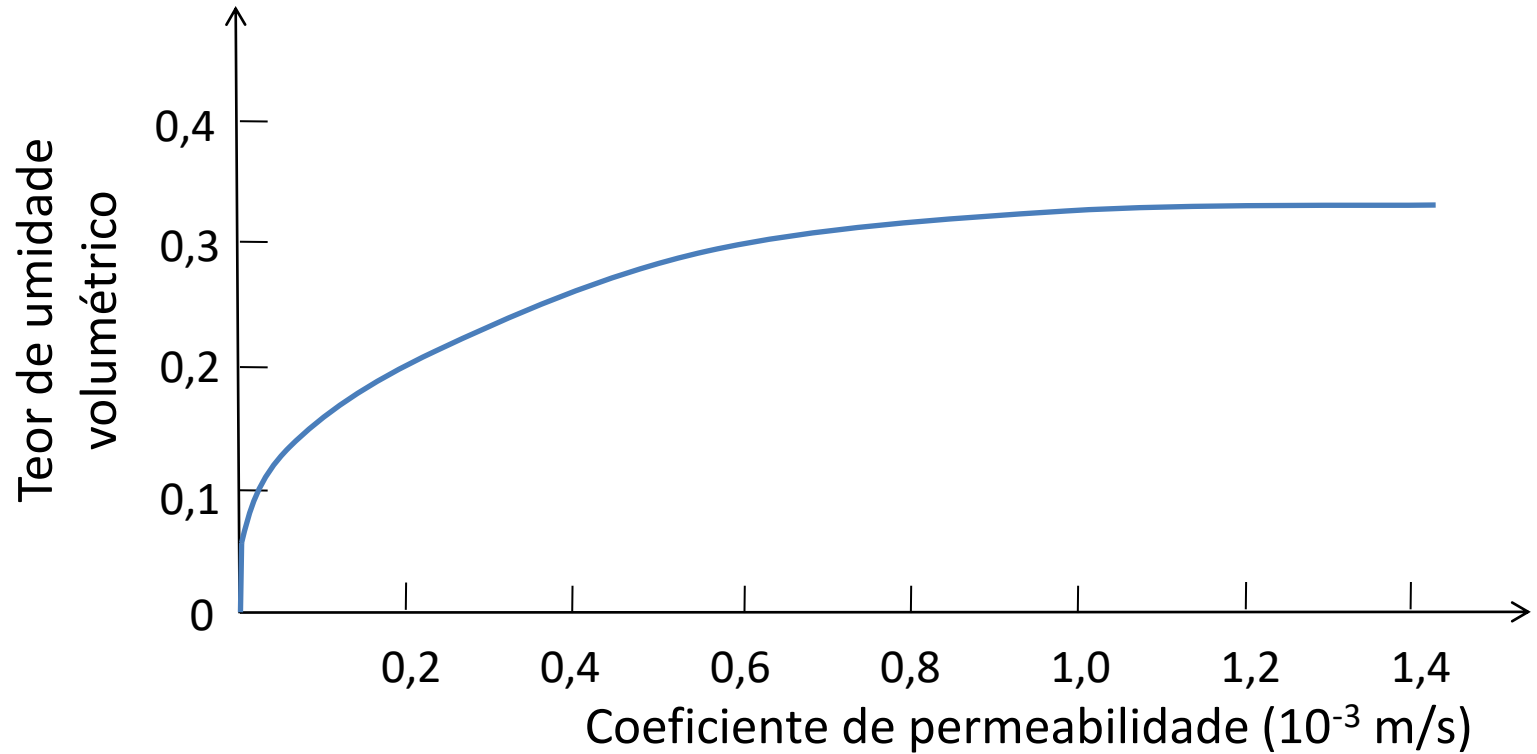
(Fredlund & Rahardjo, 1993)

# Função permeabilidade



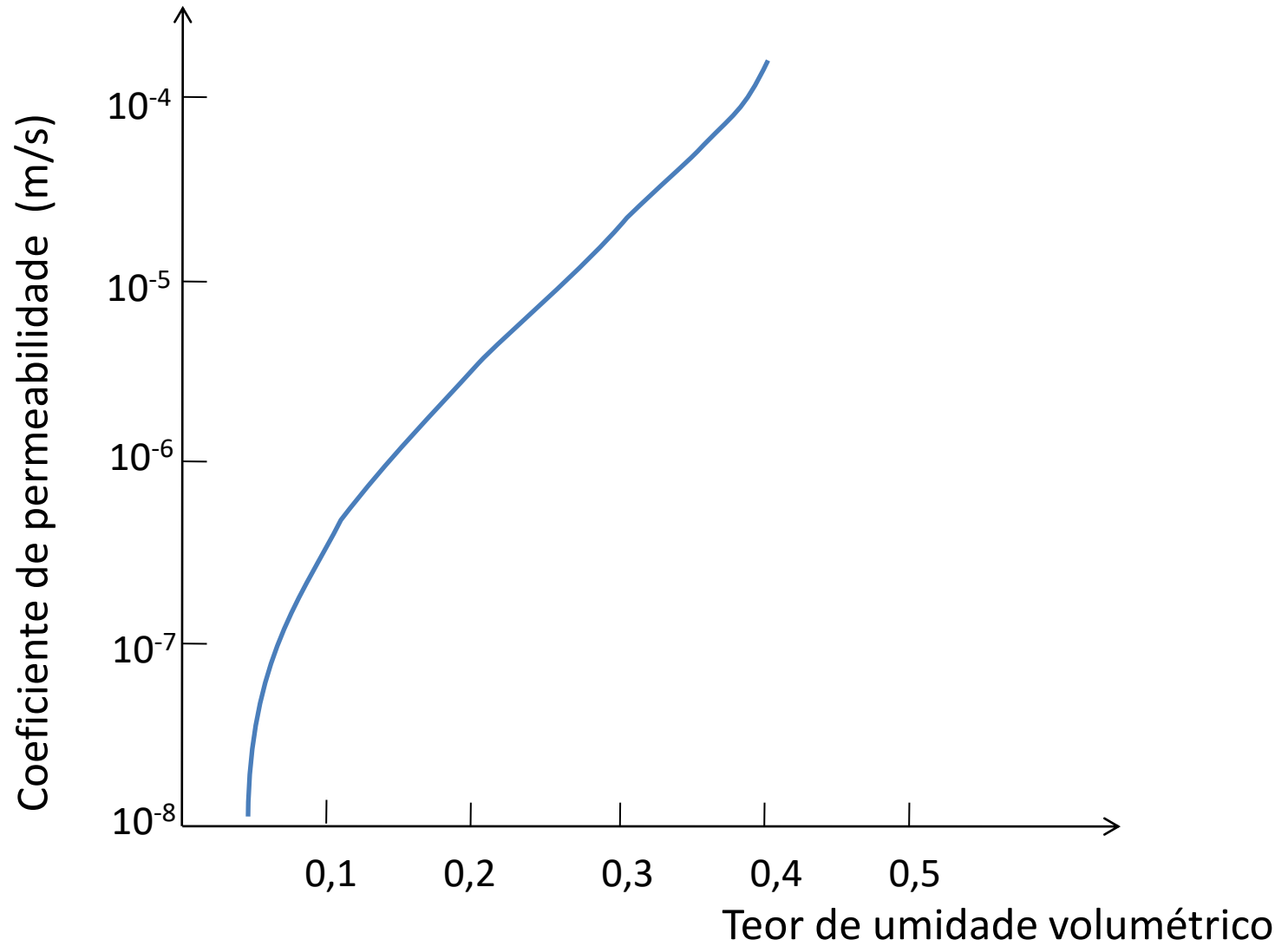
Yolo Light Clay (Philip, 1969 apud Carvalho, 1989)

# Função permeabilidade

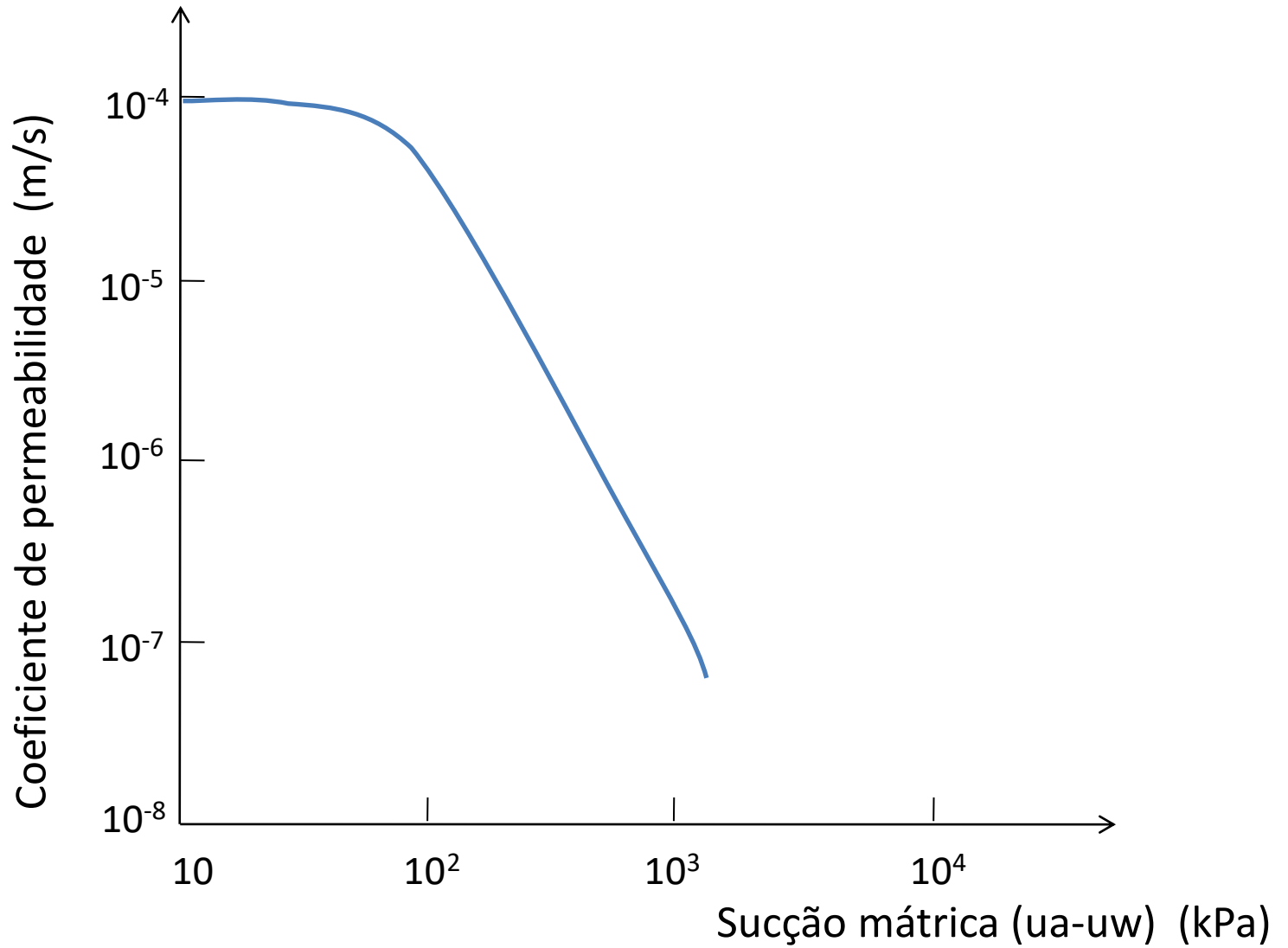


Areia (Fredlund & Rahardjo, 1993)

# Função permeabilidade



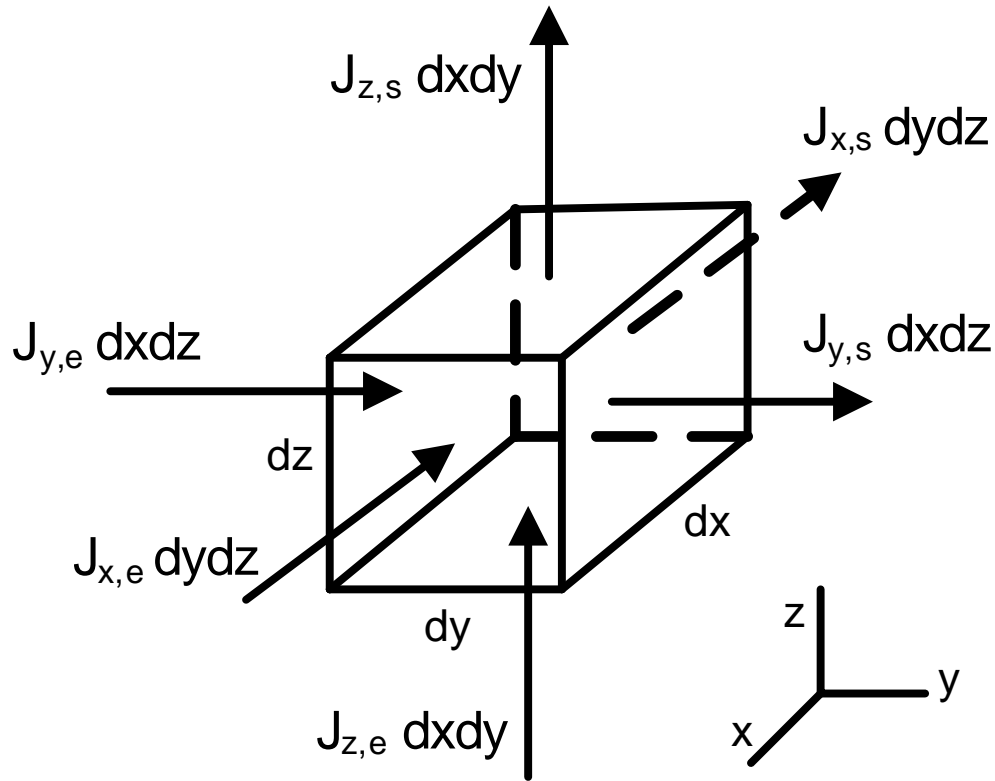
# Função permeabilidade



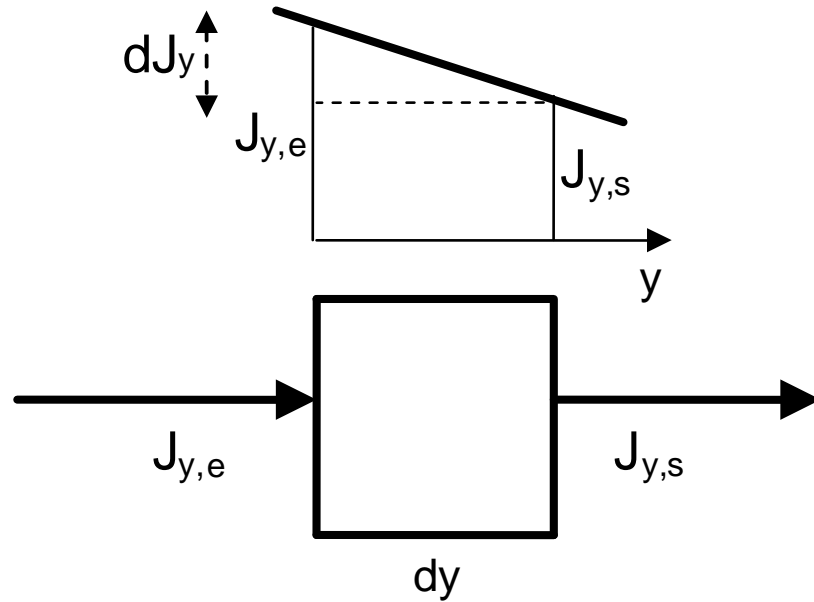
# Fluxo de água em solo não saturado: Equação de Richards

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





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



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

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

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

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

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

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{\partial \left( K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right)}{\partial z} = -\frac{d\theta}{dt}$$

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

$$-\frac{\partial q_z}{\partial z} = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{\partial \left( K_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right)}{\partial z} = -\frac{d\theta}{dt}$$

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + z$$

$$\frac{\partial \left( K_z(\theta) \frac{\partial \left( \frac{u_w + z}{\gamma_w} \right)}{\partial z} \right)}{\partial z} = -\frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( K_z(\theta) \left( \frac{\partial u_w}{\partial \gamma_w} + 1 \right) \right) = -\frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{u_w}{\gamma_w} + z \right) = -\frac{\partial h_c}{\partial z} + 1$$

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

← Lei da Continuidade

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

← Lei de Darcy

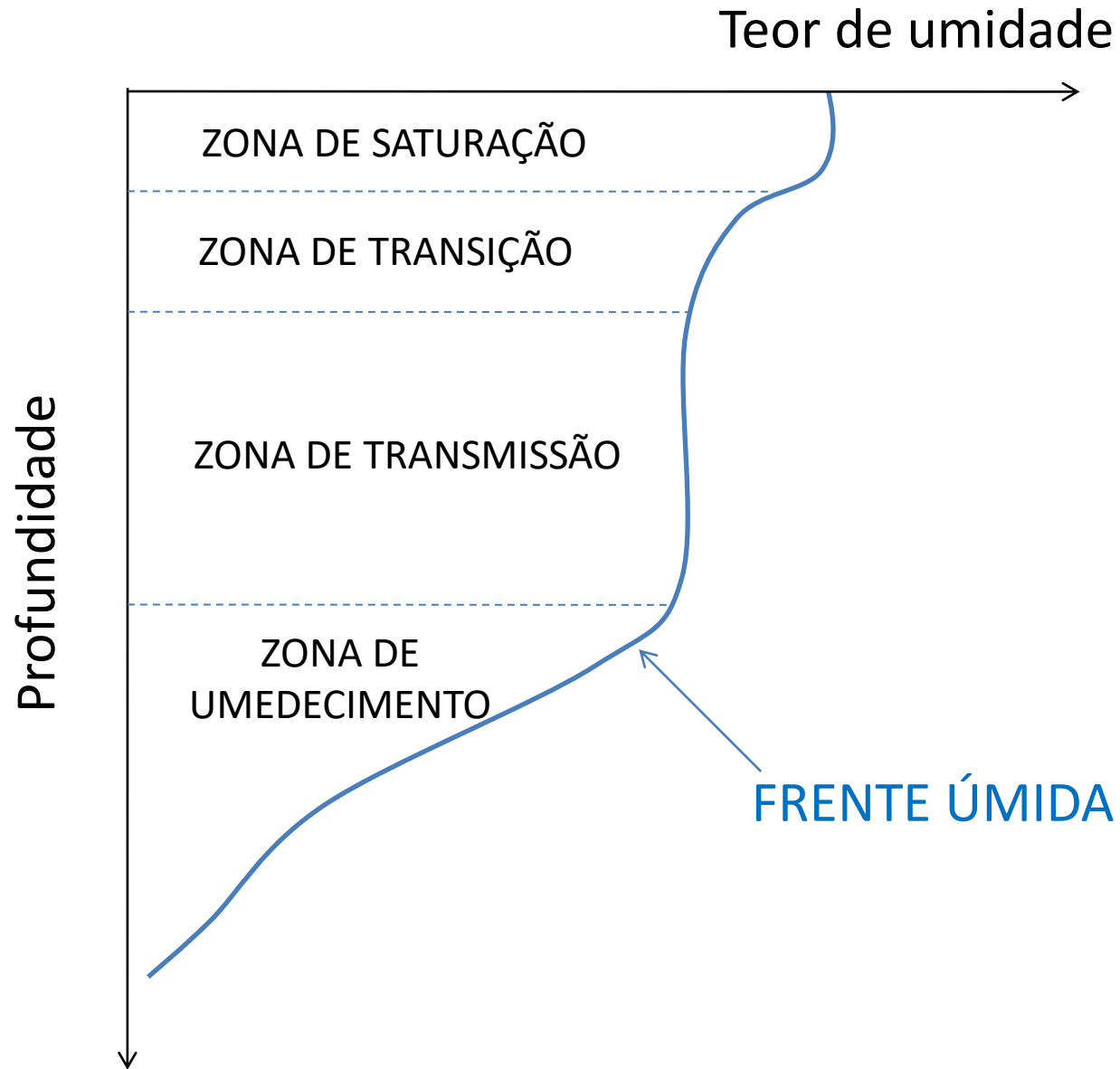
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right)$$

← Coeficiente de permeabilidade é função da umidade

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial K_z(\theta)}{\partial z} \frac{\partial H}{\partial z} - K_z(\theta) \frac{\partial^2 H}{\partial z^2}$$

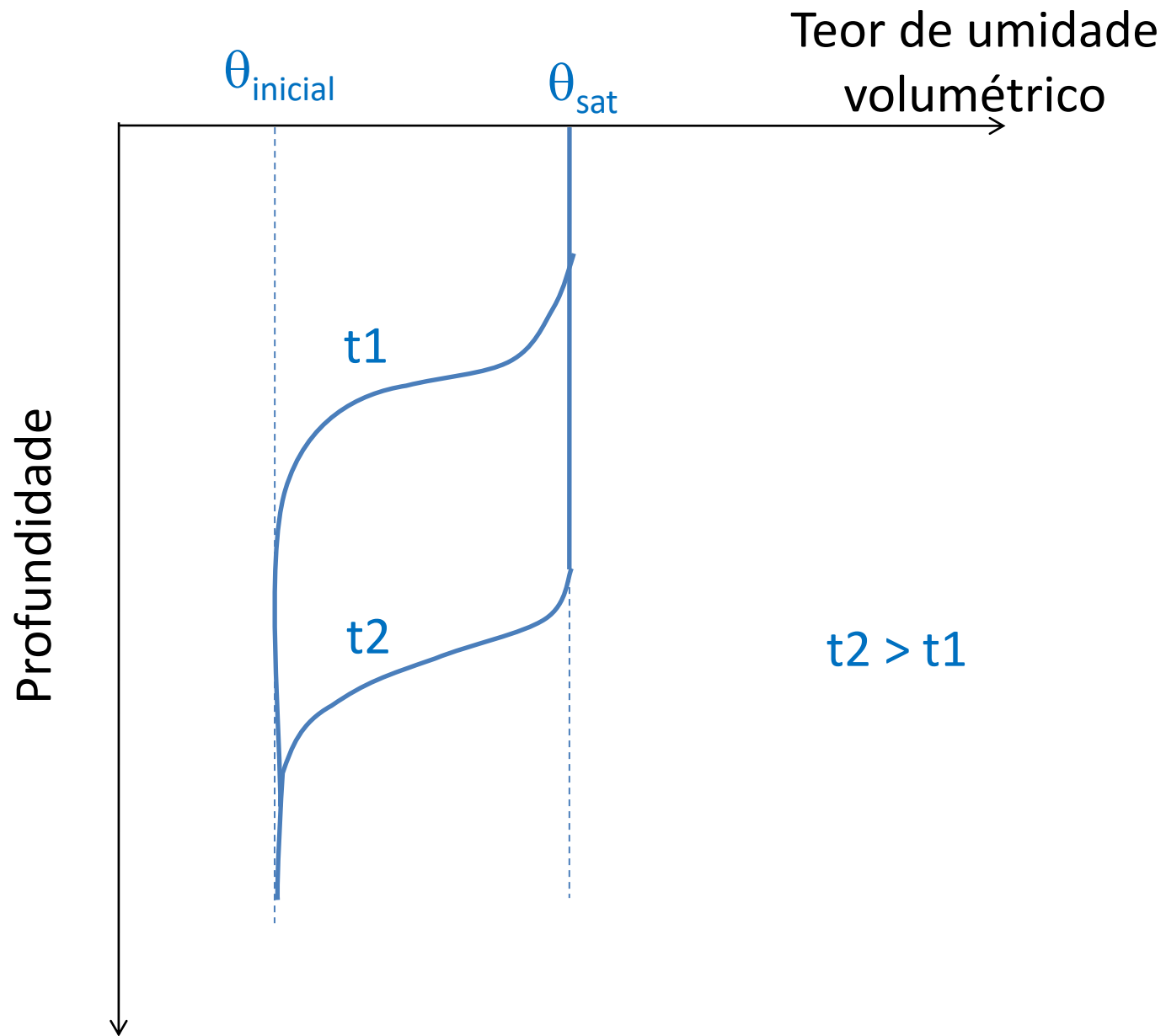
# Exemplo

- Infiltração de água no solo



(Bodman & Colman, 1944)





(Carvalho, 1989)

# Capacidade de infiltração

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

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

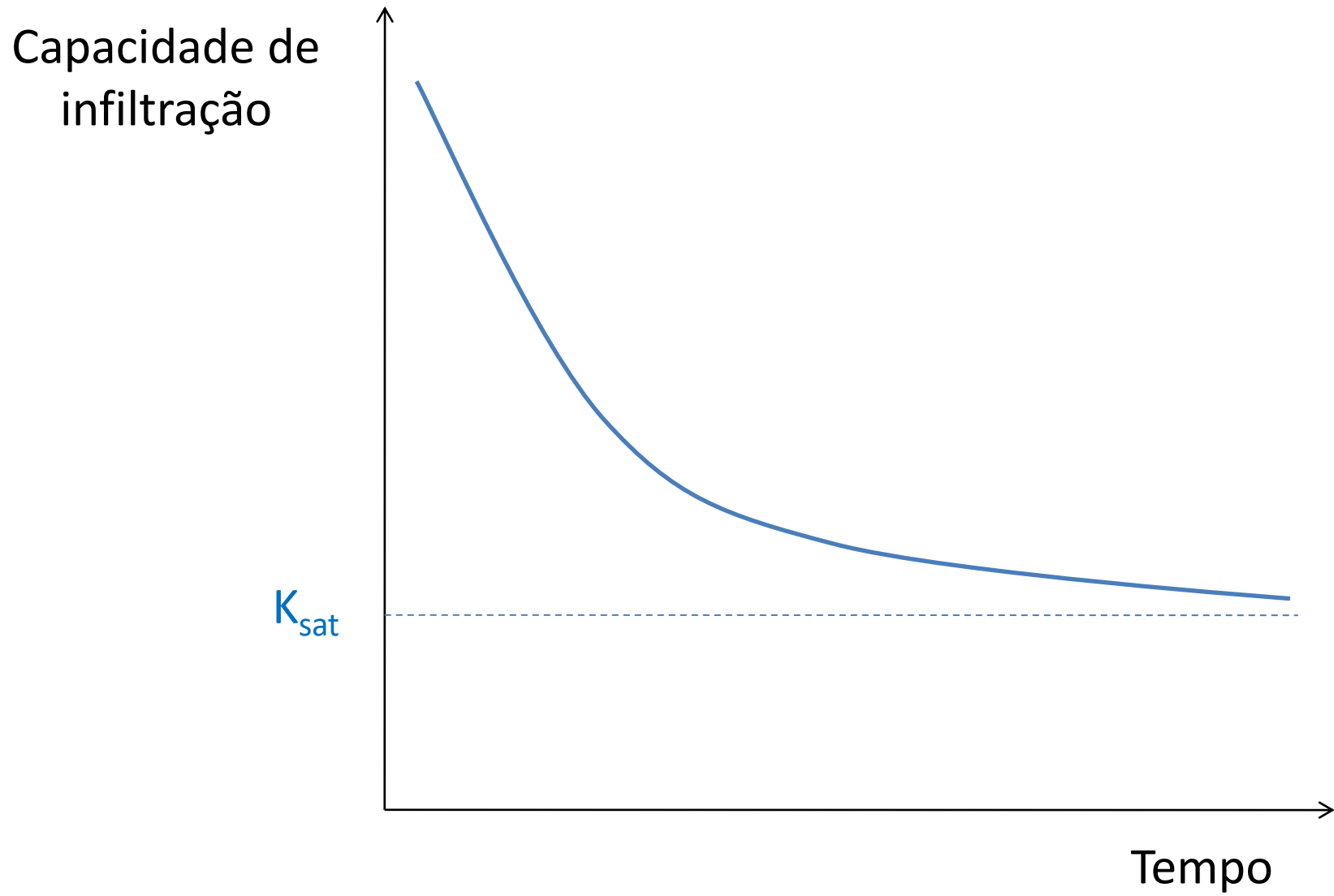
$v$  = velocidade de fluxo vertical

$\theta_{fs}$  = teor de umidade volumétrico na frente de saturação

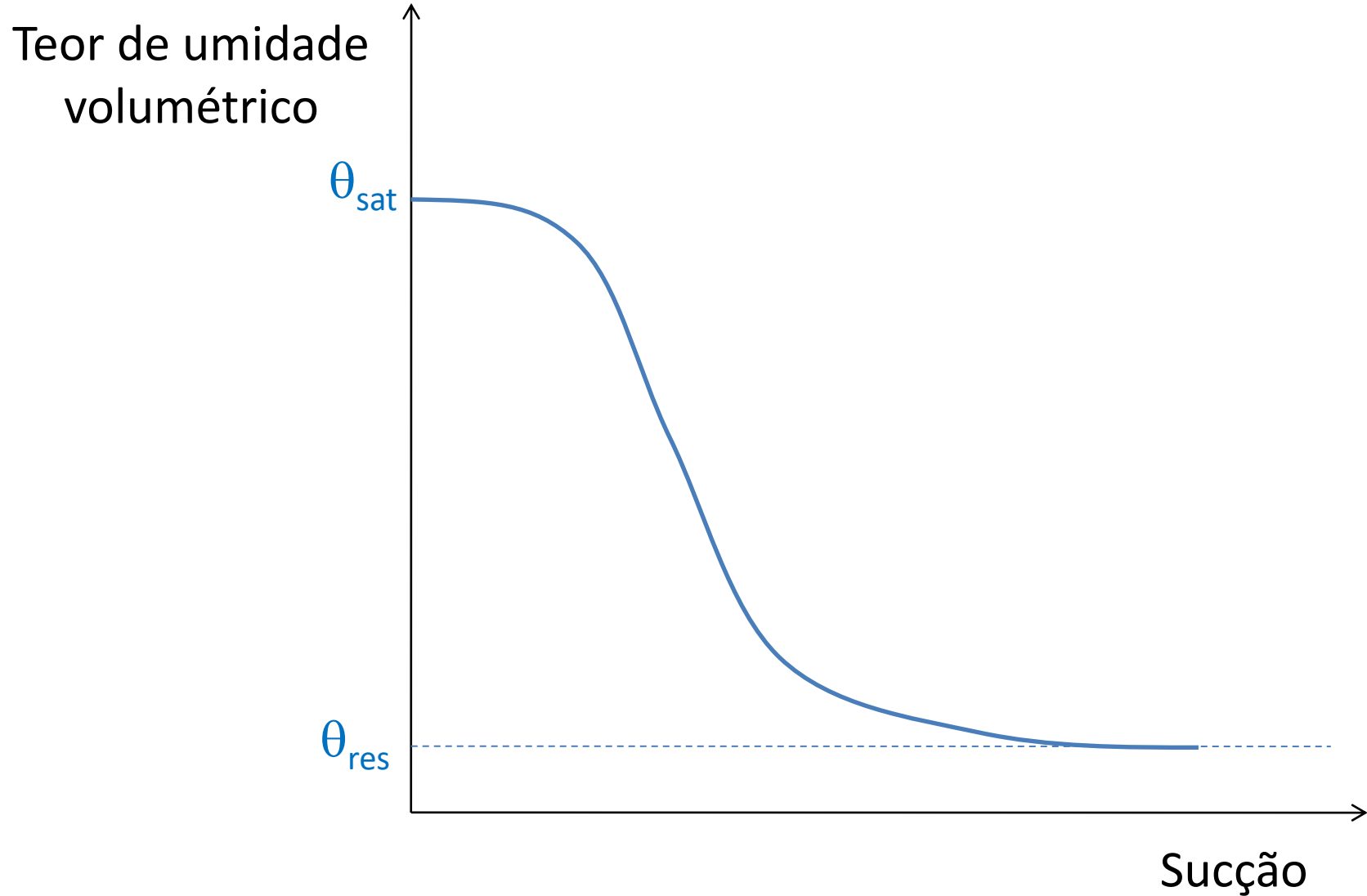
$K(\theta_{fs})$  = permeabilidade na frente de saturação

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

$Z_{fs}$  = espessura da camada úmida



# Curva de retenção de água do solo



# Curva de retenção de água do solo

