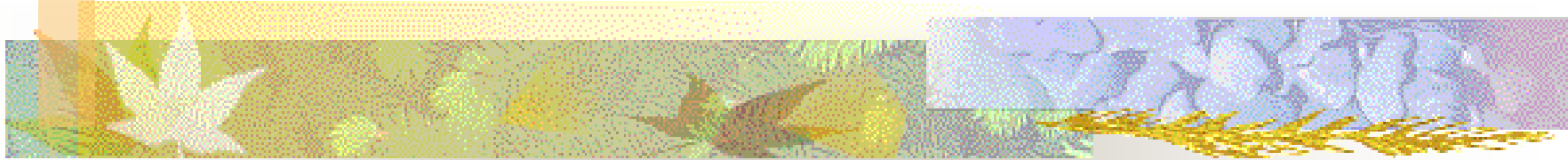


# TRANSPORTE DE POLUENTES NOS SOLOS





PEF3304 – Poluição do Solo

EPUSP

Engenharia Ambiental

Maria Eugenia Gimenez Boscov

- 
- Poluentes que dissolvem na água do solo
  - Poluentes imiscíveis

- 
- Transporte de massa (soluto) nos interstícios de um meio poroso saturado (solo).



# PRINCIPAIS MECANISMOS

- Advecção
- Dispersão mecânica
- Difusão
- Reações químicas

Dispersão mecânica + difusão = Dispersão hidrodinâmica



# Advecção

- Processo pelo qual o soluto é carregado pela água em movimento, com concentração constante, e velocidade média  $u = v/n$ .



# Lei de Darcy (1854)

$$v = -ki \quad \text{ou} \quad Q = vA = -kiA$$

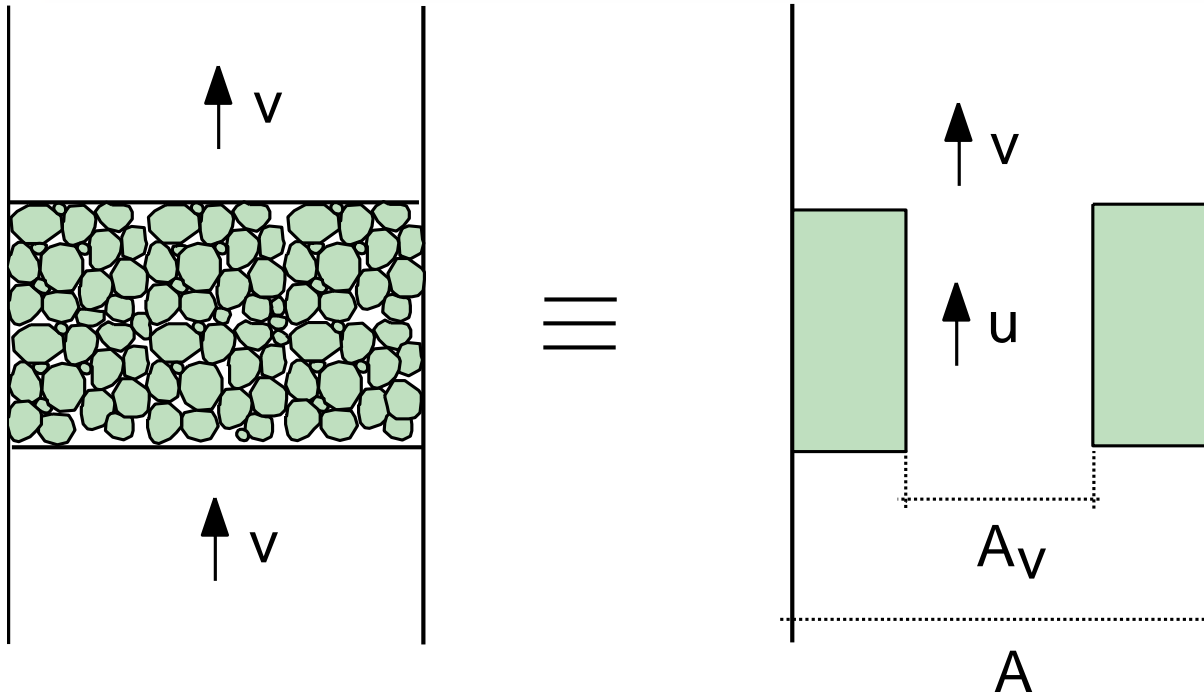
$v$  = velocidade de percolação

$k$  = coeficiente de permeabilidade ou  
condutividade hidráulica

$i$  = gradiente hidráulico

$A$  = área da seção transversal ao fluxo

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta z}$$

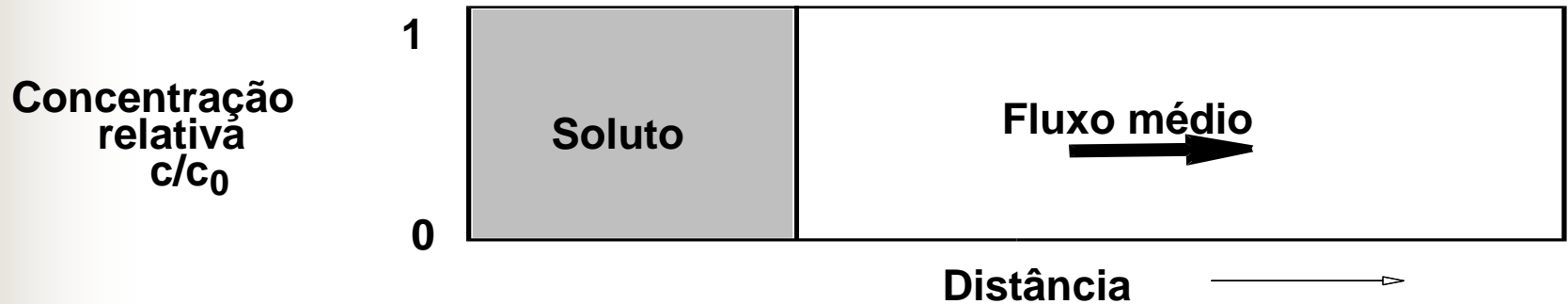


$$Q = v A = u A_v$$

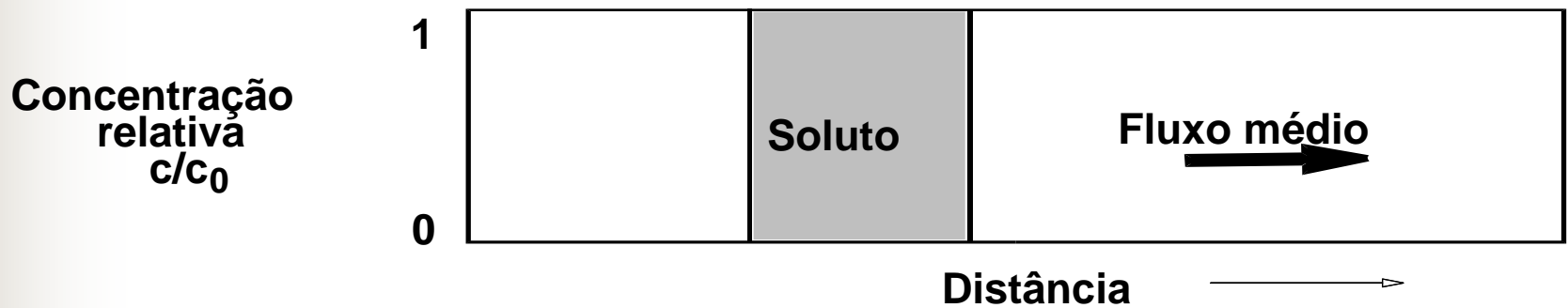
$$A_v = n A$$

$$u = v / n$$

## Injeção contínua de soluto



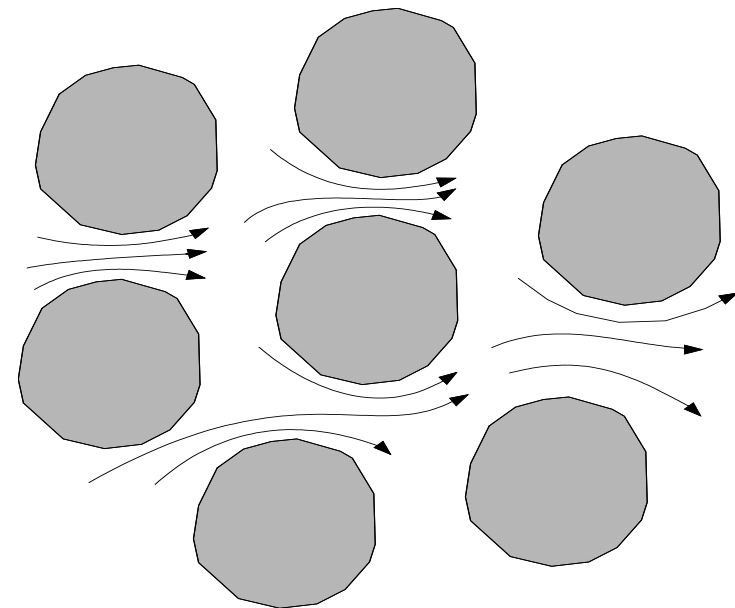
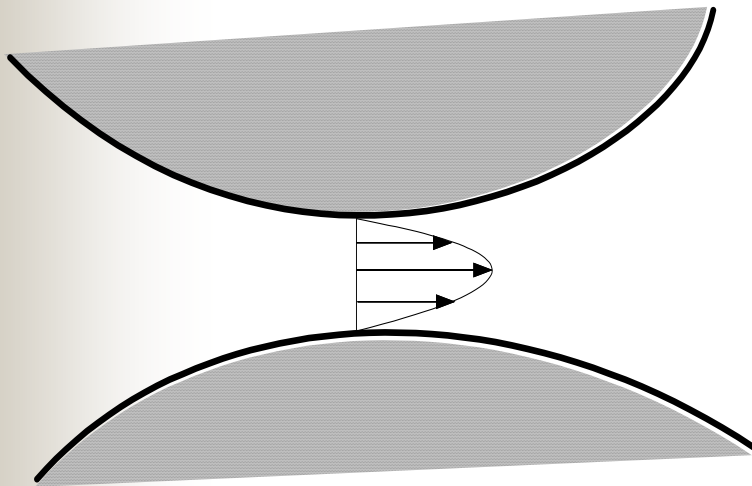
## Injeção instantânea de soluto





# Dispersão hidráulica ou mecânica

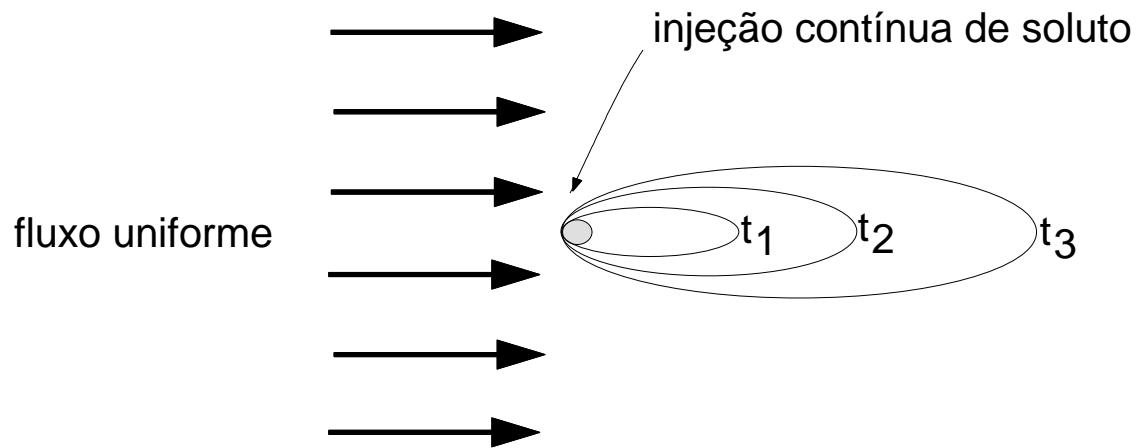
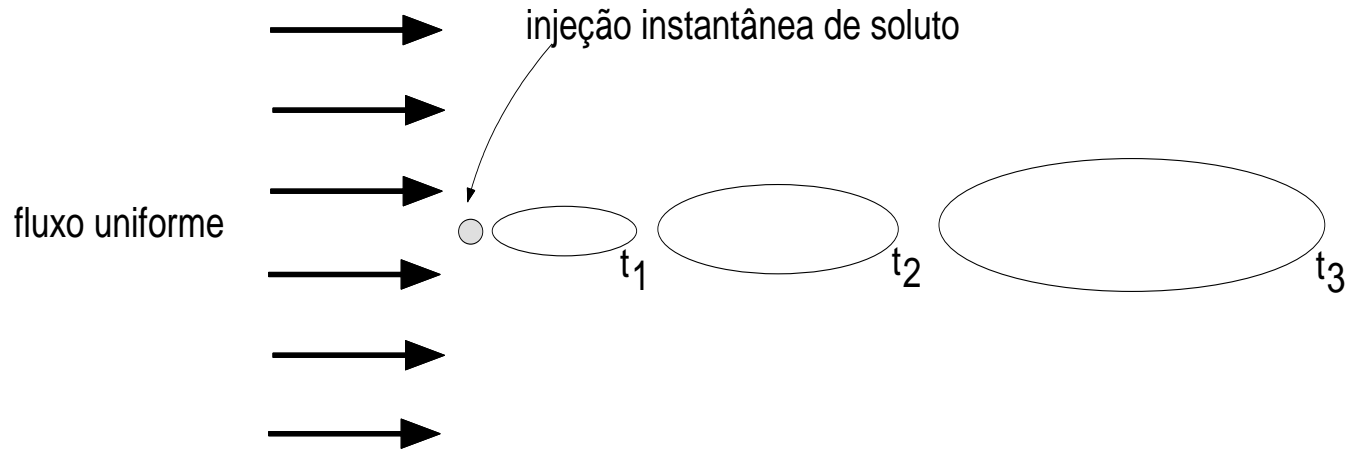
Mistura que ocorre durante a advecção



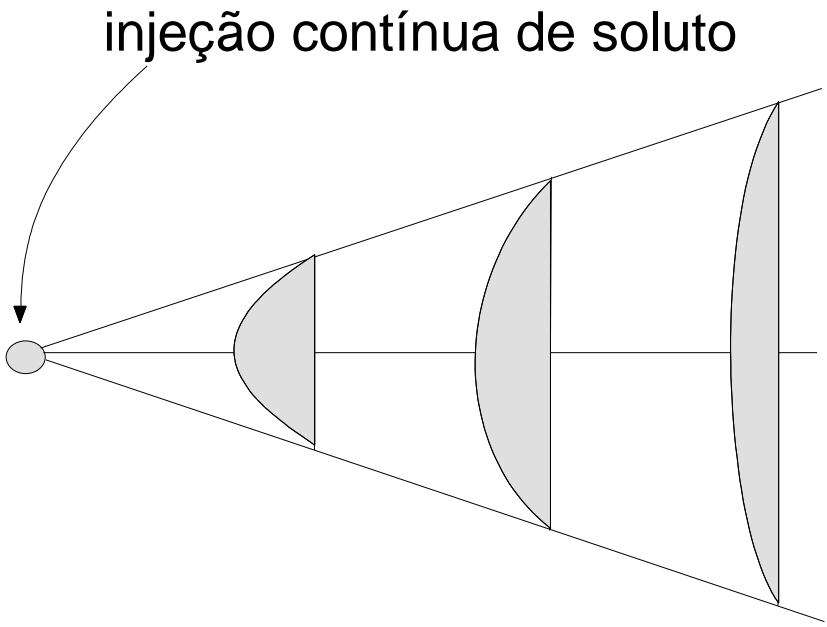
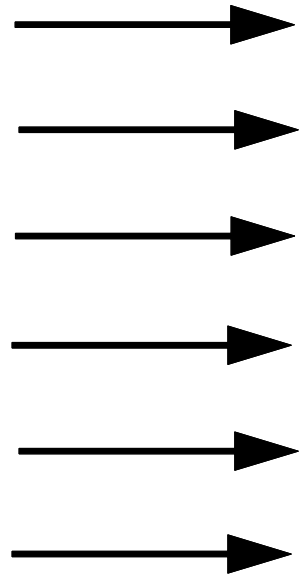


Escala microscópica, dentro do volume dos vazios:

- velocidade varia em magnitude e direção através de qualquer seção transversal de um vazio
- velocidades são diferentes em diferentes vazios (razão entre área superficial e rugosidade relativas ao volume de água no vazio)
- tortuosidade, ramificação e interpenetração de vazios: linhas de fluxo microscópicas variam espacialmente em relação à direção média de fluxo

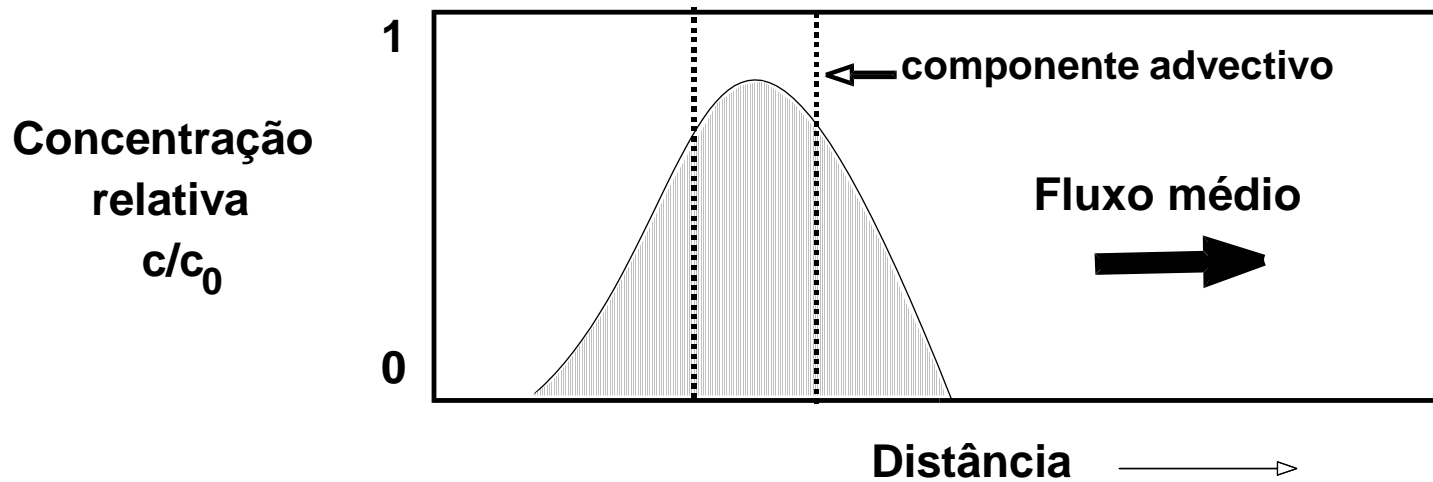


direção do  
fluxo médio



injeção contínua de soluto

Instante  $t_1$



Instante  $t_2$

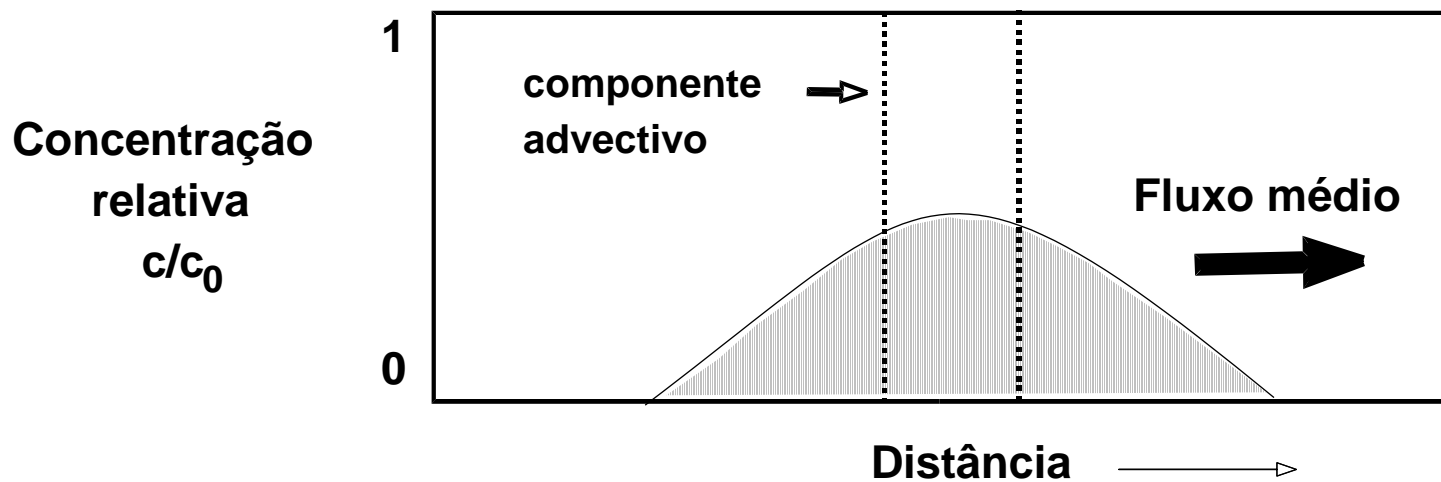
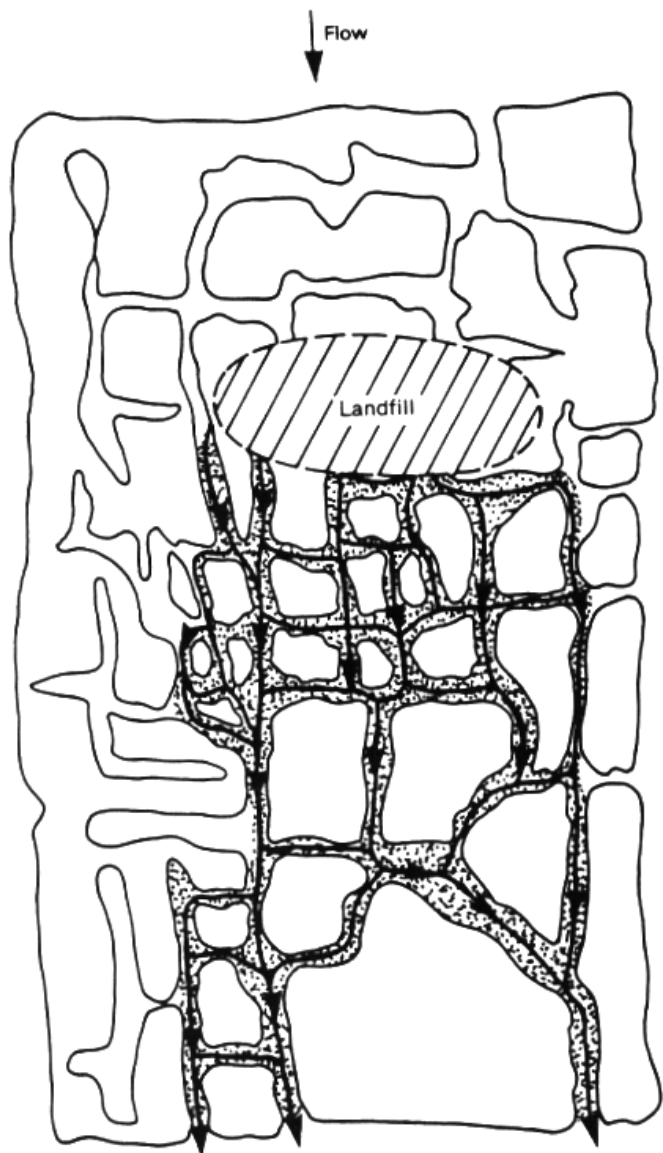



Figure 1-10 Flow of contaminated ground water in aquifer with solution porosity (from Geraghty and Miller, 1985).




→ Flow direction of leachate

 Leachate enriched ground water

(Barcelona et al., 1990)

- 
- partículas de soluto ocupam um volume cada vez maior
  - espalhamento nas direções longitudinal e perpendiculares à direção do fluxo médio
  - a concentração de soluto diminui à medida que o espalhamento envolve volumes crescentes, ou seja, **a dispersão causa a diluição do soluto**
  - algumas moléculas de água e soluto se movem mais rapidamente e outras mais devagar que a velocidade média do fluxo

- 
- Dispersão mecânica é um espalhamento em relação à direção média do fluxo devido à variação da velocidade em magnitude e direção no espaço dos vazios





# Difusão

- Fluxo de partículas de soluto (íons ou moléculas) das regiões de maior para as de menor concentração.
- Primeira lei de Fick (1855):


$$J_{\text{difusão}} = -D_{d,w} \frac{\partial c}{\partial z}$$

$J$  = fluxo de massa

$D_{d,w}$  = coeficiente de difusão

$c$  = concentração


$z$  = distância

- 
- $D_{d,w} = f(\text{massa e raio molecular; valência e raio iônico; composição química, viscosidade e constante dielétrica da solução; concentração; condições ambientais de pressão e temperatura})$
  - validade para argilas (1960): coeficientes de difusão menores (colisões com partículas sólidas, tortuosidade, adsorção)

$$J_{\text{difusão}} = -n D_d \frac{\partial c}{\partial z}$$

$$D_d = D_{d,w} T'$$

( $T'$  entre 0,01 e 0,5)

- 
- A difusão causa um espalhamento do soluto mesmo que não haja fluxo de água.
  - Pode ocorrer na mesma direção ou não que o fluxo de água.
  - Pode ocorrer na mesma direção e em sentido contrário ao do fluxo de água.



- Dispersão hidrodinâmica é um espalhamento em relação à direção média do fluxo devido a fenômenos hidráulicos e químicos.



# Reações químicas

- Adsorção-desadsorção (sorção-dessorção)
- Ácido-base
- Solubilização-precipitação
- Óxi-redução
- Complexação
- Biodegradação ou síntese microbiana
- Decaimento radioativo



# Adsorção

- Processo físico-químico pelo qual uma substância é acumulada entre fases
- Substâncias dissolvidas em um líquido se acumulam em uma interface sólido-líquido
- Superfícies das partículas de argilo-minerais são carregadas eletricamente com carga negativa
- Adsorção de cátions e moléculas polares na superfície das partículas de argila



# Isotermas de adsorção

Equilíbrio dinâmico entre a concentração do soluto remanescente na solução e a concentração do mesmo na superfície sólida.

S massa de soluto adsorvido por unidade de massa de adsorvente sólido

C concentração de soluto na solução (massa de soluto por volume de solução)

$$S = f(C)$$



■ Adsorção linear

$$S = K_d C$$

S quantidade de soluto adsorvido por unidade de adsorvente sólido

$K_d$  coeficiente de distribuição ou de adsorção

C concentração de equilíbrio no líquido



# Isotermas de adsorção

$$S = K_d \cdot C_e \quad \text{linear}$$

$$S = K_f \cdot C_e^\varepsilon \quad \text{Freundlich}$$

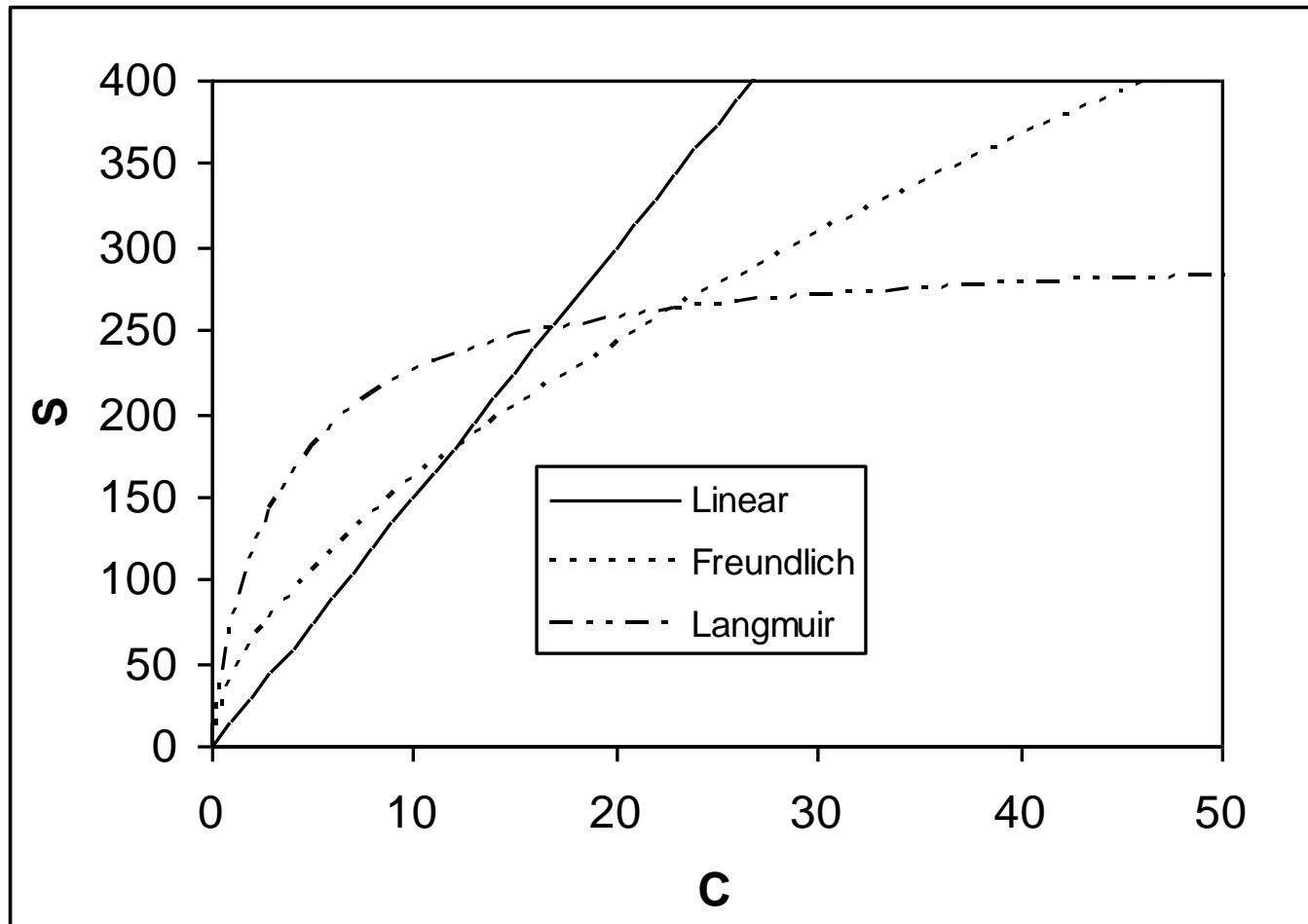
$$S = \frac{K_L M C_e}{1 + M C_e} \quad \text{Langmuir}$$

# Isotermas de adsorção

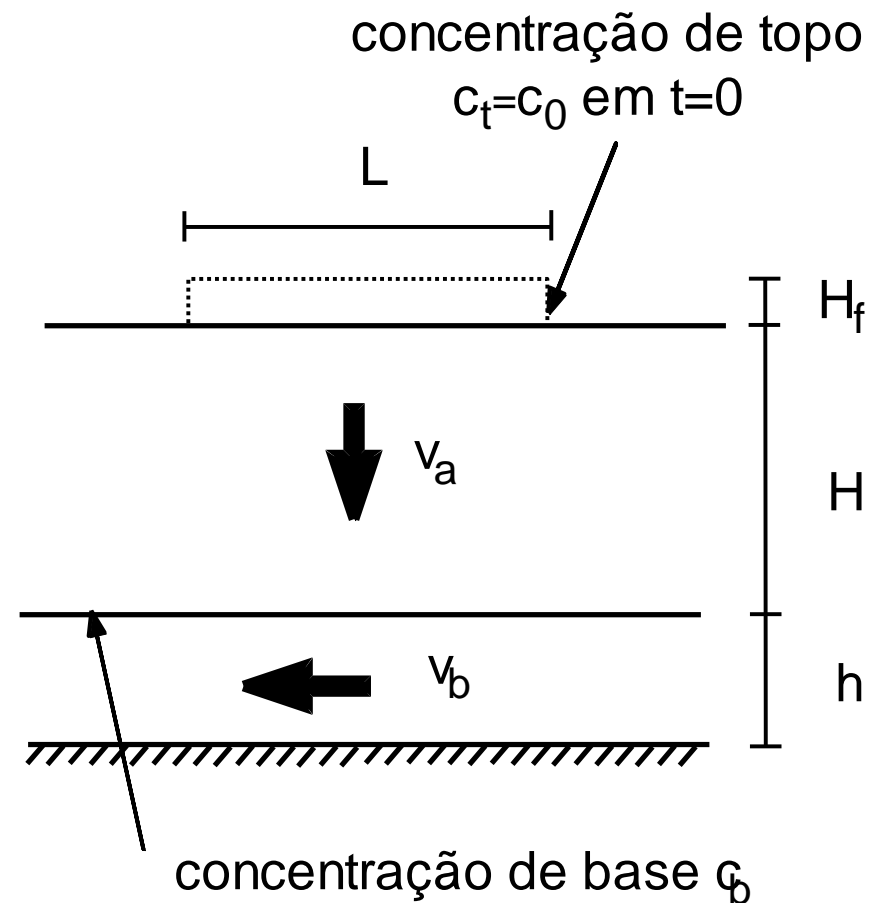
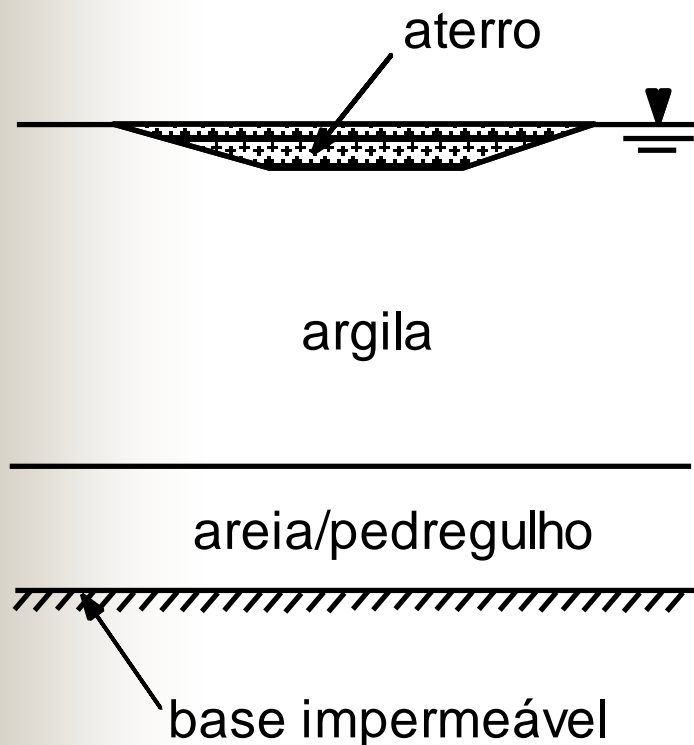
$$S = \frac{K_s C_e^\beta}{1 + \eta C_e^\beta}$$

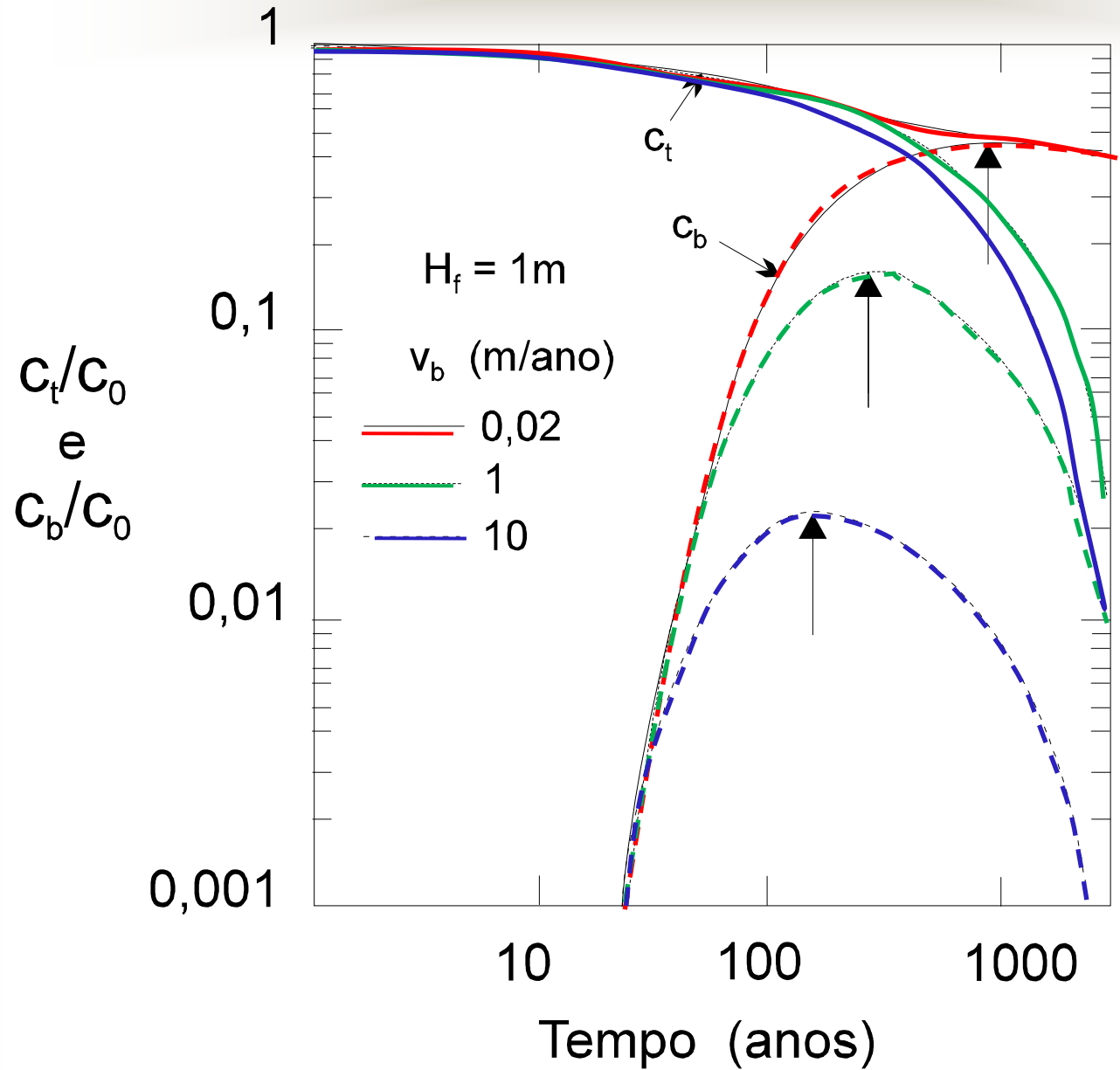
Não linear  
generalizada

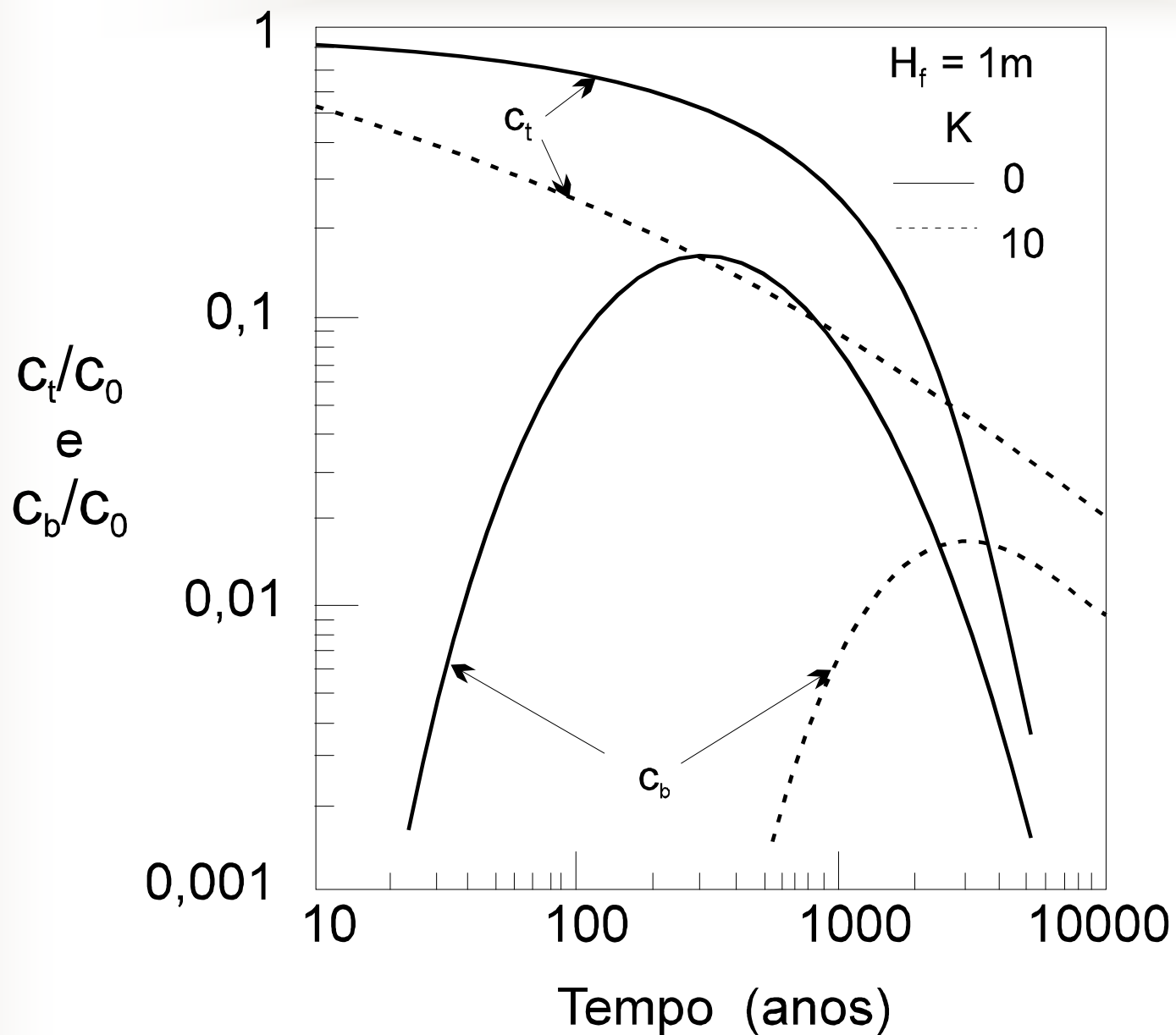
# Isotermas de adsorção



# Simulação de fluxo em revestimento de fundo de aterro de resíduos (Rowe e Booker, 1985)







Adsorção	Velocidade do aquífero	Espessura da camada	Concentração máxima na base $C_{bmax}/C_0$
$\rho K=0$	$v_b=1$ m/ano	H=0,5 m	0,4
		H=5,0 m	0,0045
	$v_b=10$ m/ano	H=0,5 m	0,1
		H=5,0 m	0,007
$\rho K=10$	$v_b=1$ m/ano	H=0,5 m	0,1
		H=5,0 m	0,004
	$v_b=10$ m/ano	H=0,5 m	0,03
		H=5,0 m	0,0005

(adaptado de Rowe & Booker, 1985)