

EXERCÍCIO: DISPERSÃO HIDRODINÂMICA – “Breakthrough Curve” – Ensaio de coluna

Ensaio de coluna

O ensaio de dispersão ou coluna é geralmente realizado para a determinação do coeficiente de dispersão hidrodinâmica D_{dh} e do fator de retardamento R_d .

O ensaio de coluna começa como um ensaio de permeabilidade a carga constante. Após a passagem de um volume de água suficiente para regularizar a vazão (geralmente igual a dois volumes de vazios do corpo-de-prova), substitui-se a alimentação de água pela de uma solução de composição conhecida, mantendo-se o gradiente hidráulico aplicado. Monitora-se a concentração efluente ao longo do tempo, até que esta atinja o valor da concentração da solução aplicada ao corpo-de-prova. Um esquema ilustrativo do ensaio de coluna está apresentado na Figura 1.

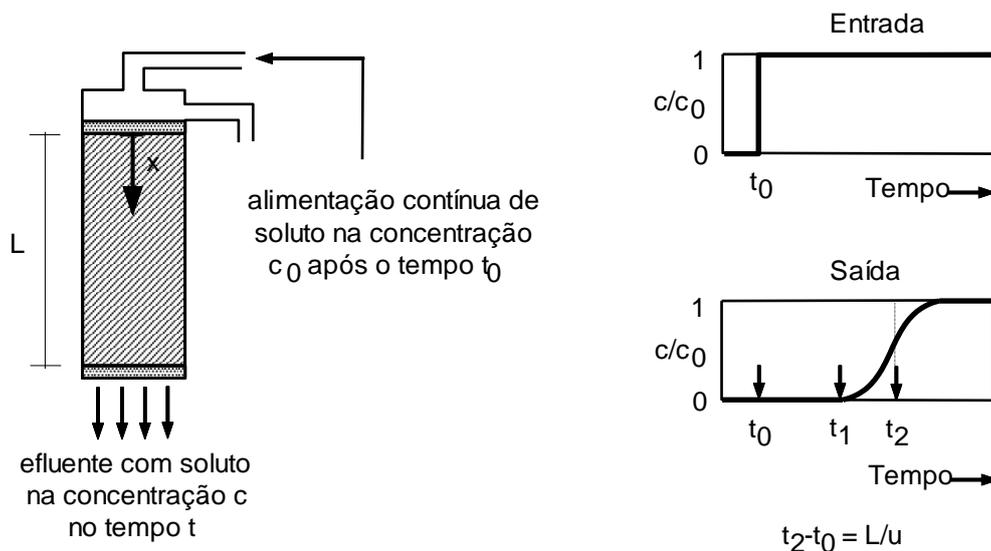


Figura 1 – Esquema ilustrativo do ensaio de coluna

Se houvesse apenas advecção, as partículas de soluto atingiriam a base da coluna após um intervalo de tempo igual a L/u ; observa-se, no entanto, que a concentração da solução na base da amostra de solo em função do tempo segue a curva indicada na Figura 1, denominada curva de eluição ou “breakthrough curve”. Algumas partículas caminham mais rapidamente e outras mais lentamente que a velocidade média de fluxo u , devido ao fenômeno da dispersão.

Não ocorrendo adsorção, a concentração relativa c/c_0 atingirá o valor 0,5 no tempo $t_2 = t_0 + L/u$ (sendo t_0 o instante de aplicação da solução de concentração c_0 no topo do corpo-de-prova); caso ocorra adsorção do poluente pelas partículas de solo, a “breakthrough curve” será retardada.

O ensaio de coluna também permite investigar a compatibilidade entre solo e solução, verificando-se se há variação na permeabilidade devido à interação entre solo e solução.

O transporte unidimensional de solutos em solos, para as hipóteses de solo homogêneo, isotrópico e saturado, fluxo de água uniforme, e adsorção linear, pode ser expresso por:

$$\left(1 + \frac{\rho K_d}{n}\right) \frac{\partial c}{\partial t} = D_{dh} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - u \frac{\partial c}{\partial z} \quad \text{ou} \quad R_d \frac{\partial c}{\partial t} = D_{dh} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - u \frac{\partial c}{\partial z} \quad (1)$$

Onde:

ρ	massa específica seca do solo
K_d	coeficiente de distribuição ou de adsorção
n	porosidade
c	concentração
t	tempo
z	posição (profundidade)
D_{dh}	coeficiente de dispersão hidrodinâmica (difusão + dispersão mecânica)
u	velocidade específica (= v/n)
v	velocidade de percolação ou de Darcy (= ki)
k	coeficiente de permeabilidade ou de condutividade hidráulica
i	gradiente hidráulico
R_d	fator de retardamento

Com a imposição de determinadas condições iniciais e de contorno, a equação (1) pode ser resolvida analiticamente. Por exemplo, em um ensaio de dispersão ou coluna, adotando-se as condições a seguir, obtém-se como solução a equação (2).

$$c(z,0) = 0 \text{ para } z \geq 0$$

$$c(0,t) = c_0 \text{ para } t \geq 0$$

$$c(\infty,t) = 0 \text{ para } t \geq 0$$

$$c = \frac{c_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{R_d z - ut}{2\sqrt{R_d D_{dh} t}} \right) + \exp \left(\frac{uz}{D_{dh}} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{R_d z + ut}{2\sqrt{R_d D_{dh} t}} \right) \right] \quad (2)$$

Onde

c_0 concentração da solução aplicada ao corpo-de-prova

erfc função erro complementar

Quando o comprimento da coluna, ou corpo-de-prova de solo, é suficientemente grande, o segundo termo da equação (2) é praticamente desprezível comparado ao primeiro, de modo que:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{R_d z - ut}{2\sqrt{R_d D_{dh} t}} \right) \quad (3)$$

A equação (3) pode ainda ser expressa na forma adimensionalizada, utilizando o número de Peclet P_L e o número de volume de poros T . Para a base de um corpo-de-prova de comprimento L , a expressão (3) se transforma em

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[(R_d - T) \sqrt{\frac{P_L}{4TR_d}} \right] \quad (4)$$

Onde:

$$P_L = \frac{uL}{D_{dh}} \quad e \quad T = \frac{ut}{L}$$

Exercício

Considere um ensaio de dispersão realizado com um corpo-de-prova de 10 cm de altura.

Pede-se determinar a curva $c/c_0 \times t$ para as seguintes situações:

1. $D_{dh} = 1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, $u = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, $R_d = 1$, para as posições $z = 0,01\text{m}$, $z = 0,05\text{m}$ e $z = 0,10\text{m}$.
2. $D_{dh} = 1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, $u = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, $z = 0,10\text{m}$, para $R_d = 1, 2, 5, 10$ e 50 .

Analisando as curvas, faça comentários sobre a influência de cada parâmetro na dispersão de um poluente no solo.

Determine agora a curva $c/c_0 \times t$ para um “clay liner” de 1 m de espessura.

3. $D_{dh} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $u = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $R_d = 5$, para as posições $z = 0,10\text{m}$, $0,50\text{m}$ e $1,00\text{m}$.

Observação:

A função $\text{erfc}(x)$ – erro complementar – no Excel é chamada FUNERROCOMPL. Nas versões mais antigas do Excel pode ser implementada na opção Ferramentas, Suplementos, Ferramentas de Análise, ou pela equação a seguir.

$$\text{erfc}(x) = 2 * \text{DIST.NORMP}(-X * \text{RAIZ}(2))$$

