

# FATOR DE RETARDAMENTO ( $R_d$ ) E DISPERSÃO HIDRODINÂMICA ( $D_h$ ) EM MISTURA DE SOLOS DAS FORMAÇÕES SERRA GERAL E BOTUCATU

Juliana Broggio Basso<sup>1</sup>; Wladimir Seixas<sup>2</sup>; Antenor Braga Paraguassu<sup>3</sup>; Chang Hung  
Kiang<sup>4</sup>

**RESUMO** – Neste trabalho, são comparados os valores de coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $D_h$ ) e de fator de retardamento ( $R_d$ ), obtidos por meio de ensaios de colunas em mistura (60% / 40%) de solos das formações Botucatu (arenoso) e Serra Geral (argiloso), percolada com soluções aquosas de cloreto de potássio e de cobre separadas, com valores calculados a partir de um algoritmo de ajuste simultâneo desenvolvido. Os novos parâmetros de transporte e retenção foram obtidos a partir das curvas de chegada dos íons cobre, potássio e cloreto, usando o modelo analítico de transporte de contaminantes. Esses valores indicam tendência de maior retenção para os íons  $Cu^{2+}$  e menor para  $K^+$ .

**PALAVRAS - CHAVE** – Ensaios de Coluna, Contaminação de Água Subterrânea, Barreiras Impermeáveis.

**ABSTRACT** – This work compares dispersion hydrodynamic coefficient ( $D_h$ ) and retardation factor results ( $R_d$ ) obtained by Basso [1] with new values calculated using simultaneous fit algorithm. Results obtained from column tests percolated with aqueous solution of potassium chloride and copper chloride separated in compacted and saturated soils mixture from Serra Geral (SG) and Botucatu (BOT) formations were used. New values of retention and transport parameters were obtained through breakthrough curves for  $K^+$ ,  $Cu^{2+}$  and  $Cl^-$  ions using contaminant transport analytic model. Values obtained using simultaneous fit showed higher retention with respect to  $Cu^{2+}$  and lower with respect to  $K^+$  when compared to the previous results.

**KEYWORDS** – Column Tests, Groundwater Contamination, Liners.

---

<sup>1</sup>UNESP - Universidade Estadual Paulista – LEBAC – Laboratório de Estudos de Bacias, Av. 24A, nº1515, Rio Claro, SP, cep: 13506-900, (19) 35325119, julibb@rc.unesp.br

<sup>2</sup>UFSCar - Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Matemática, Rod. João Leme dos Santos, km 110, Sorocaba, SP, cep: 18052-780, (15) 3229600, seixas@ufscar.br

<sup>3</sup>USP - EESC - Universidade de São Paulo – Departamento de Geotecnia, Av. Trabalhador São-Carlense, nº400, São Carlos, SP, cep: 13566-590, (16) 33739501, nonus@sc.usp.br

<sup>4</sup>UNESP - Universidade Estadual Paulista – LEBAC – Laboratório de Estudos de Bacias, Av. 24A, nº1515, Rio Claro, SP, cep: 13506-900, (19) 35325119, chang@rc.unesp.br

## 1 - INTRODUÇÃO

As barreiras selantes (*liners*) em aterros sanitários são fundamentais na contenção dos lixiviados produzidos no armazenamento dos resíduos domésticos e industriais. Associações de materiais naturais e geossintéticos promovem a impermeabilização dos aterros, evitando a contaminação de aquíferos, solos e bacias hidrográficas. Estas barreiras devem apresentar valores baixos de condutividade hidráulica e capacidade de reter íons e compostos.

Basso [1] obteve parâmetros hidráulicos e de transporte e retenção de contaminantes por meio de ensaios de colunas em mistura (60% / 40%) de solos das formações Botucatu (arenoso) e Serra Geral (argiloso), compactada e saturada, percolada com soluções de cloreto de potássio e de cobre separadas.

O objetivo deste trabalho é comparar os valores do fator de retardamento e da dispersão hidrodinâmica, obtidos por Basso [1], com novos valores calculados a partir de algoritmo desenvolvido, o qual considera o ajuste simultâneo de  $R_d$  e  $D_h$ .

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados por Basso [1] nos ensaios de coluna foram coletados em área do município de São Carlos, localizado na região nordeste do Estado de São Paulo (Brasil); são provenientes de coberturas de material intemperizado, friável, das formações Botucatu (areias finas a médias), e Serra Geral (essencialmente argiloso, resultante de decomposição de basaltos e diabásios).

Os ensaios de coluna utilizaram o equipamento construído por Leite et al. [2], com as modificações introduzidas por Basso [1]. O procedimento do ensaio consistiu na introdução de solução iônica aquosa, de concentração conhecida ( $C_0$ ), nos reservatórios (influyente), para percolação em colunas de solo (Mistura 60/40) compactadas e previamente saturadas com água deionizada. Amostras do reservatório de efluente foram recolhidas a cada número de volume de vazios percolados ( $T$ ), para determinação da concentração química dos íons ( $C$ ). A diferença entre a concentração de soluto de entrada ( $C_0$ ) e de saída ( $C$ ) é igual à massa de soluto retida. A finalização do ensaio ocorreu quando a concentração relativa ( $C/C_0$ ) foi igual a 1, ou seja, quando a solução efluente atingiu a concentração inicial (influyente), o que caracteriza o fluxo advectivo do soluto.

Foram utilizados os resultados de ensaios de percolação em 6 colunas de solo, com soluções aquosas de KCl e  $CuCl_2$ , nas concentrações de 125, 250, 500 mg/L em relação

aos íons  $K^+$  e  $Cu^{2+}$ . A carga hidráulica aplicada foi correspondente a 76 kPa. O fluxo hidráulico, a concentração da solução influente ( $C_0$ ) e a temperatura ambiente foram mantidos constantes. As concentrações dos íons  $K^+$ ,  $Cu^{2+}$  e  $Cl^-$  foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica, ICP e titulação potenciométrica, respectivamente.

A obtenção de  $R_d$  e  $D_h$ , por meio de ensaio de coluna em meios porosos, é fornecida pela curva de chegada construída a partir dos valores de concentração ( $C$ ) versus número de volume de vazios percolados ( $T$ ). A solução matemática comumente aplicada para o cálculo é apresentada por Ogata & Banks [3] e Ogata [4] e complementada com fator de retardamento por Freeze & Cherry [5]:

$$\frac{c(x,t)}{c_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{R_d x - v_s t}{2\sqrt{R_d D_h t}} \right) + \exp \left( \frac{v_s x}{D_h} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{R_d x + v_s t}{2\sqrt{R_d D_h t}} \right) \right] \quad (1)$$

onde  $C$  é a concentração do efluente,  $C_0$ , a concentração inicial,  $R_d$ , o fator de retardamento,  $D_h$ , o coeficiente de dispersão hidrodinâmica,  $t$ , o tempo,  $x$ , o comprimento da coluna, e  $\operatorname{erfc}$ , a função de erro complementar.

Em Basso [1], o fator de retardamento ( $R_d$ ) foi obtido pelo cálculo da área acima da curva de chegada (Shackelford, [6]), e o coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $D_h$ ) foi estimado com base em solução analítica, a partir do ajuste da curva teórica aos pontos experimentais. Todos os parâmetros da equação foram fixados, com exceção do  $D_h$ . O ajuste da curva foi feito visualmente, o que impôs certo grau de subjetividade à análise.

O programa computacional desenvolvido para o cálculo de  $R_d$  e  $D_h$  determina a curva teórica que apresenta menor distância (erro) em relação aos pontos experimentais, considerando o ajuste simultâneo de  $R_d$  e  $D_h$ . O cálculo do erro foi determinado a partir da menor distância euclidiana entre os valores teóricos e os valores experimentais, obtidos por Basso [1].

### 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados do fator de retardamento ( $R_d$ ) e do coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $D_h$ ) obtidos a partir do algoritmo desenvolvido e de Basso [1]. Verifica-se que o ajuste simultâneo dos parâmetros  $R_d$  e  $D_h$  apresentou menores erros, indicando um melhor ajuste do modelo analítico. Os valores calculados indicam uma tendência de retenção maior para os íons  $Cu^{2+}$  e menor para  $K^+$ .

Desta forma, o uso de algoritmos e procedimentos com ajustes simultâneos de  $R_d$  e  $D_h$  elimina a subjetividade e aumenta a confiabilidade nos valores determinados.

Tabela 2 – Valores do fator de retardamento e do coeficiente de dispersão hidrodinâmica.

coluna	íon	Rd*	Rd novo	Dh*	Dh novo	Erro*	Erro novo
KCl							
125	K	7.1	6.08	2.00E-04	1.37E-04	0.28	0.15
	Cl	5.82	5.54	3.00E-04	1.90E-04	1.64	1.63
250	K	7.23	5.74	4.00E-04	3.15E-04	0.33	0.1
	Cl	6.19	5.19	2.00E-04	2.36E-04	0.52	0.52
500	K	3.69	9.28	9.00E-05	1.56E-03	0.96	0.89
	Cl	3.4	3.61	8.00E-05	9.89E-05	0.38	0.38
CuCl							
125	Cu	19.52	24.09	6.00E-05	1.17E-05	1.07	0.38
	Cl	11.35	14.16	9.00E-05	7.68E-05	0.60	0.28
250	Cu	11.4	17.04	5.00E-04	7.80E-06	1.79	0.35
	Cl	9.07	14.79	9.00E-06	2.61E-05	1.37	0.20
500	Cu	8.79	8.50	4.00E-04	4.89E-04	0.27	0.24
	Cl	5.85	5.45	3.00E-04	3.38E-04	0.43	0.41

\* Basso(2003)

#### 4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BASSO, J.B. Transporte de retenção de  $K^+$ ,  $Cu^{2+}$ , e  $Cl^-$  em uma mistura compactada de solos lateríticos para uso em barreiras selantes :procedimentos de homogeneização e adaptações em equipamento de percolação. São Carlos. 168 pp. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2003.
- [2] LEITE, J. C.; PARAGUASSÚ, A. B.; ZUQUETTE, L. V. An equipment for percolation test in soil columns. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 4<sup>th</sup>, Lisboa, Portugal, Anais, vol. 1, p.211-215. 1998.
- [3] OGATA, A.; BANKS, R. B. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion on porous media. US Geol . Surv. Prof. Paper, 411-A, 7pp. 1961.
- [4] OGATA, A.. Theory of dispersion in a granular medium. US Geol . Surv. Prof. Paper, 411-11970.
- [5] FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A.; Groundwater. Englewood Cliff. Prentice-Hall. 1979.
- [6] SHACKELFORD, C.D. Column testing for geoenvironmental applications. In: Deo-Environmental Issues (Faing the Americas) ASCE, Sp. Publ.Nº47, pp.117-125. 1995.