

# ESTIMATIVA DO FATOR DE RETARDAMENTO ( $R_d$ ) E DA DISPERSÃO HIDRODINÂMICA ( $D_h$ ) EM SOLO ARENOSO DO SUBGRUPO ITARARÉ – SP: APLICAÇÃO DE TESTE DE COLUNA

Juliana Broggio Basso <sup>1</sup> & Chang Hung Kiang <sup>2</sup>

**RESUMO** – Este trabalho apresenta resultados de ensaio de coluna em solo arenoso do Subgrupo Itararé, compactado e saturado, percolado com solução aquosa de cloreto de potássio ( $K^+ = 500 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Neste solo arenoso foram avaliadas a composição mineralógica, as características físico-químicas e as propriedades físicas. Curvas de Chegada foram construídas para os íons potássio e cloreto e determinados o fator de retardamento ( $R_d$ ) e o coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $D_h$ ). Os resultados indicaram valores baixos de retenção para os íons  $K^+$  e  $Cl^-$ , compatíveis com características de solos arenosos.

**ABSTRACT** – Column Test was percolated with aqueous solution of potassium chloride ( $K^+ = 500 \text{ mg.L}^{-1}$ ) through compacted and saturated Itarare Subgroup sandy soil column. Mineralogical composition, physical-chemical analyses and physical characterization were carried out in sandy soil. Breakthrough curves were constructed for potassium and chloride ions and retardation factor ( $R_d$ ) and the dispersion hydrodynamic coefficient ( $D_h$ ) were calculated. Results showed lower values for  $K^+$  and  $Cl^-$  ions consistent with sandy soil characteristics.

**PALAVRAS-CHAVE** – Ensaios de Coluna, Contaminação de Água Subterrânea, Solos arenosos

**KEYWORDS** – Column Tests, Groundwater Contamination, Sandy Soils

---

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

<sup>2</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

Atualmente, no Brasil existe uma carência na aquisição de parâmetros de transporte e retenção de contaminantes, tanto orgânicos quanto inorgânicos. É sabido que os solos altamente intemperizados, tais como os solos tropicais do Brasil, apresentam características físicas e químicas que diferem dos solos de clima frio e temperado. As reações de sorção sofrem mudanças em função da variação das cargas elétricas na superfície (positivas, negativas ou neutras) dos colóides e das condições ambientais do meio.

O escasso conhecimento do comportamento dos solos tropicais frente a soluções contaminantes faz com que a aplicação de técnicas de remediação, a estimativa de risco ambiental e a modelagem matemática de plumas, fundamentadas em experiências e parâmetros de solos de clima temperado, sejam, por vezes, incorretas ou deficientes. Neste sentido, o trabalho proposto visa contribuir, com a obtenção de dados de transporte e retenção de espécies químicas inorgânicas, em solos de clima tropical úmido, especificamente, no material residual arenoso do Subgrupo Itararé presente na Bacia do Paraná, com área de abrangência no estado de São Paulo.

O Subgrupo Itararé, de idade permo-carbonífera, é constituído por uma associação litológica de arenitos, siltitos, argilitos, conglomerados, ritmitos e diamictitos, em geral de origem flúvio-glacial. Apresenta significativa extensão territorial e constitui importante aquífero, utilizado como fonte de abastecimento de água para consumo humano em toda sua faixa de exposição no Estado de São Paulo.

O material residual arenoso derivado do Subgrupo Itararé foi coletado no município de Mogi Mirim, estado de São Paulo, Brasil (Figura 1).

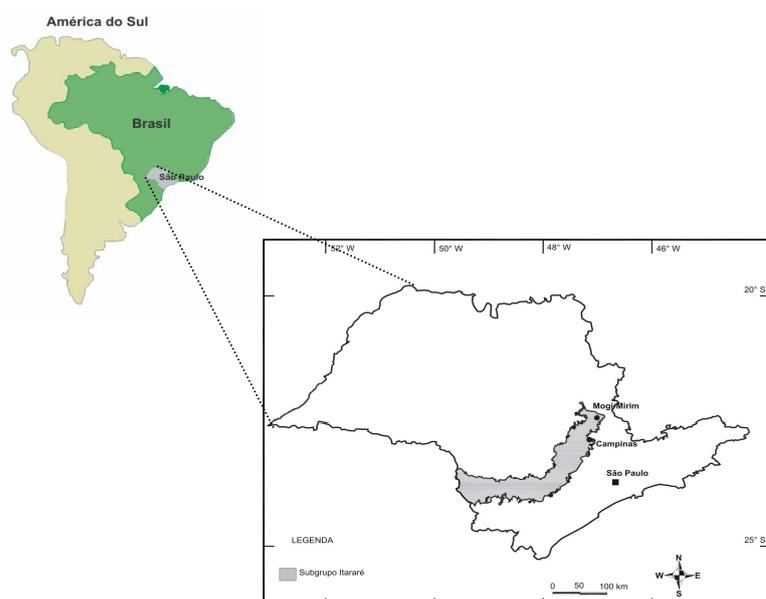


Figura 1. Localização da área de exposição do Subgrupo Itararé no Estado de São Paulo.

## 2 - TRABALHOS ANTERIORES

Pesquisas vêm sendo conduzidas utilizando ensaios de percolação em colunas de solos nas diferentes unidades litoestratigráficas, pertencentes à Bacia do Paraná, no estado de São Paulo. Estudos realizados por diversos pesquisadores, em particular, Zuquette et al. (1997), Boff (1999), Leite (2000), Paraguassú & Boff (2002), Basso & Paraguassú (2006), contemplam ensaios de coluna nas formações Botucatu, Serra Geral e misturas destes dois materiais. Valores de capacidade de troca catiônica (CTC), condutividade hidráulica (k), fator de retardamento ( $R_d$ ) e coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $D_h$ ) estão reportados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físico-químicas e hidráulicas de solos residuais obtidos em ensaios de coluna (parâmetros para solução de KCl).

Autor	Material	K <sup>+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	CTC meq.100g <sup>-1</sup>	k cm.s <sup>-1</sup>	R <sub>d</sub>		D <sub>h</sub> cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	
					K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>
Zuquette et al. (1997)	Botucatu	113	2,3	8 x 10 <sup>-3</sup>	7 e 5	1,44	nd	nd
Leite et al. (1998) e Leite (2000)	Mistura (75%BOT/25% SG)	500 - 550	2,69	2 x 10 <sup>-6</sup>	5,8 e 2,8	4,9 e 2,6	3 x 10 <sup>-5</sup>	nd
Boff (1999) e Paraguassú & Boff (2002)	Mistura (75%BOT/25% SG)	10 a 250	2,20	5 x 10 <sup>-7</sup>	9 a 5	13 a 6	5 - 8 x 10 <sup>-5</sup>	7 - 16 x 10 <sup>-5</sup>
Basso & Paraguassú (2006)	Mistura (60%BOT/40% SG)	500	2,0	3-6 x 10 <sup>-7</sup>	5	3,4	3 x 10 <sup>-4</sup>	8 x 10 <sup>-5</sup>

nd – não determinado

## 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

As propriedades físicas do material foram determinadas através de ensaios comumente usados em investigações geotécnicas. Os ensaios de granulométrica conjunta, limites de Atterberg (LL, LP e IP) e massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) foram conduzidos pelas seguintes normas brasileiras ABNT - NBR: 7181, 6459 e ASTM D854. A umidade natural (w) e a massa específica seca aparente ( $\rho_d$ ) foram obtidas em amostras indeformadas.

Características físico-químicas como pH do solo ( $\Delta$ pH) e a condutividade elétrica do extrato aquoso (CE) seguiram os procedimentos descritos por Camargo et al. (1986). A capacidade de troca catiônica (CTC) e superfície específica (SE) foram determinadas usando o método de azul de metileno proposto por Lan (1977) e modificado por Pejon (1992). A composição mineralógica foi identificada por Difractometria de Raio-X e análise térmica diferencial – ATD.

### 3.1 - Ensaio de Coluna

Atualmente, o ensaio de laboratório que melhor reflete as condições de transporte de contaminantes, juntamente com as propriedades de atenuação em materiais naturais, é o ensaio de coluna. Ele proporciona informações mais realistas, já que as condições em que o solo se encontra são mais próximas das ocorridas em campo (Shackelford, 1995).

O sistema de equipamentos construído é similar ao desenvolvido por Leite et al. (1998), com as modificações realizadas por Basso (2003) e Pereira (2006). O equipamento consiste em um sistema de percolação com injeção de ar comprimido em câmaras elásticas no interior de reservatórios (Figura 2-b) que impulsionam as soluções para as colunas de solo (Figura 2-c).



Figura 2. Sistema de percolação em colunas, composto de: a) Distribuidor de ar, b) pares de reservatório; c) colunas de percolação e d) frascos coletores

As etapas do ensaio de coluna foram: (I) compactação das colunas com o solo do Subgrupo Itararé, (II) saturação das colunas com água deionizada e (III) percolação com solução iônica contaminante.

A compactação foi realizada em cilindro de PVC usando um compactador estático. A umidade e a massa específica seca aparente ( $\rho_d$ ) de compactação das colunas foram baseadas nos valores obtidos em amostra indeformada. Foi realizado teste de percolação em coluna de solo arenoso aplicando carga hidráulica de  $16 \pm 2$  kPa e a temperatura local foi mantida entre  $21 \pm 2^\circ\text{C}$ . Foram monitoradas a condutividade hidráulica e as condições físico-químicas (pH e condutividade elétrica) a cada volume de efluente percolado próximo ao volume de vazios do corpo de prova (T).

Solução aquosa de cloreto de potássio foi percolada com concentração de 500 mg/L em relação ao íon  $K^+$ , a mesma estudada por Boff (1999), Leite (2000) e Basso (2003) em solos das formações Serra Geral e Botucatu e misturas. A escolha destes contaminantes reside no fato de conterem íons e compostos comumente encontrados em resíduos urbanos e industriais.

As concentrações da solução inicial de KCl e dos efluentes foram determinadas para os íons  $K^+$  através espectrofotometria de absorção atômica e o  $Cl^-$  por titulação com  $AgNO_3$  e cromatografia iônica (baixas concentrações).

O ensaio de coluna é finalizado quando a concentração relativa ( $C/C_0$ ) for igual a 1, ou seja, quando a concentração da solução efluente ( $C$ ) atingir a concentração inicial ( $C_0$  - influente), caracterizando o fluxo advectivo do soluto.

Com os valores de concentração relativa e o número de volume de vazios percolados ( $T$ ), foram elaboradas as curvas de chegada e obtidos o fator de retardamento ( $R_d$ ) e o coeficiente de dispersão hidrodinâmica ( $D_h$ ).

A solução matemática comumente aplicada para o cálculo da migração de contaminantes é apresentada por Ogata & Banks (1961) e Ogata (1970) e complementada com fator de retardamento por Freeze & Cherry (1979):

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

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

Esta formulação teórica baseia-se no princípio da conservação de massa, em uma única direção, através de meios porosos, considerando o meio homogêneo, isotrópico, não deformável e transporte condicionado por fluido incompressível em regime de fluxo constante.

O coeficiente de dispersão hidrodinâmica e o fator de retardamento foram calculados simultaneamente a partir da equação 1 através do ajuste de uma curva teórica aos dados experimentais.

#### 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características físicas, físico-químicas e mineralógicas do material arenoso do Subgrupo Itararé encontram-se na Tabela 2. A classificação granulométrica do material é denominada de areia média a fina siltosa e as propriedades de plasticidade (LL, LP e IP) estão relacionadas à maior quantidade de partículas silticas, não obtida em materiais da Formação Botucatu (Basso & Paraguassu, 2006).

Tabela 2: Propriedades físicas, físico-químicas e mineralógicas do material arenoso do Subgrupo Itararé.

Propriedades	Valores
Massa específica dos sólidos, $\rho_s(\text{g.cm}^{-3})$	2,665
Granulometria	
Argila (%) (<0,002mm)	10
Silte (%) (0,002-0,075mm)	15,7
Areia Fina (%) (0,075-0,42mm)	20,7
Areia média (%) (0,42-2mm)	48,4
Areia Grossa (%) (2-4,8mm)	5,2
Umidade natural – w (%)	7,13
Massa específica seca aparente, $\rho_d$ natural	1,812
Limites de Atterberg	
LL	27
LP	18
IP	10
CTC ( $\text{meq.}100\text{g}^{-1}$ ) - Azul de metileno	2,0
Superfície específica - SE ( $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ )	16,3
$\Delta\text{pH} = \text{pH do solo em KCl} - \text{pH do solo em H}_2\text{O}$	-1,29
Condutividade elétrica do extrato aquoso ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	20,27
Mineralogia da fração fina (<0,037mm) por difração de raios-X e análise térmica diferencial	Caulinita, illita, illita-esmectita

Físico-quimicamente o material apresenta baixa capacidade de retenção catiônica, pouca quantidade de sais dissolvidos, pH levemente ácido e predomínio de cargas negativas na superfície das partículas ( $\Delta\text{pH}$ ). Argilominerais predominantemente do tipo 1:1(caulinita), e em menor concentração os do tipo 2:1(mica-illita), corroboram com a baixa CTC. A presença dos argilominerais do tipo 2:1 está relacionada à baixa alteração do material amostrado.

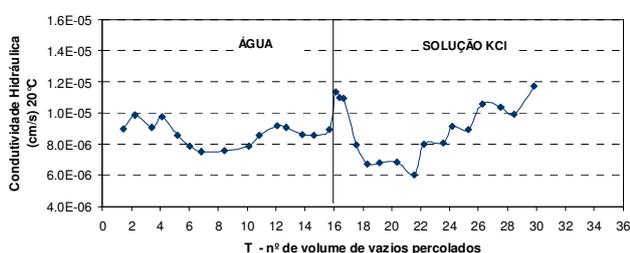
Os parâmetros de compactação e de percolação são apresentados na Tabela 3. Nas Figuras 3(a), 3(b) e 3(c) tem-se a variação da condutividade hidráulica (k), da condutividade elétrica (CE) e do pH em função do número de volume de vazios percolados (T) durante as fases de percolação com água deionizada e com solução de KCl. As curvas de chegada e os parâmetros de transporte dos íons  $\text{K}^+$  e  $\text{Cl}^-$  estão nas Figuras 4(a) e 4(b).

Ao longo do ensaio, a condutividade hidráulica não apresentou variação significativa, com valores entre  $6 \times 10^{-6}$  a  $1,2 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ . Estes valores estão relacionados à massa específica seca aparente ( $\rho_d$ ), decorrente da compactação da coluna.

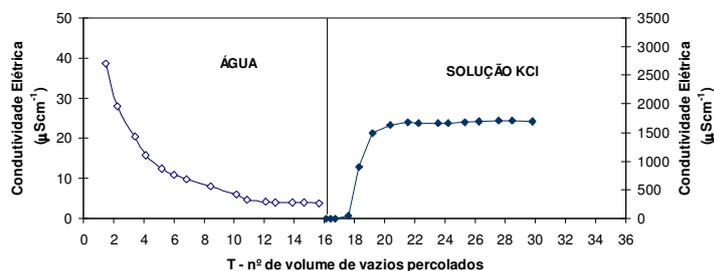
A lixiviação dos ensaios através da percolação com água foi determinada com a estabilização da condutividade elétrica e do pH em aproximadamente 11 T (volumes de vazios percolados).

Tabela 3: Dados de Compactação, percolação e concentração da solução contaminante.

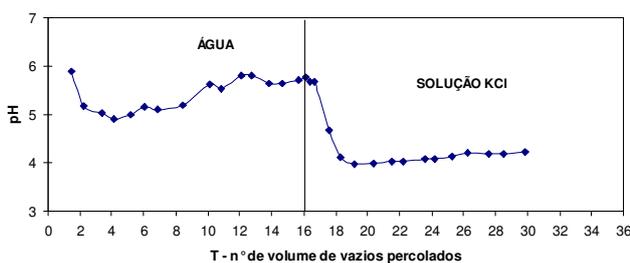
Propriedades	Coluna Itarare Arenoso KCl (500)	
w compactação (%)	7,43	
Massa específica de compactação ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	1,813	
Porosidade, n (%)	0,32	
Volume de vazios ( $\text{cm}^3$ )	352	
Concentração iônica	$\text{K}^+ = 490$	$\text{Cl}^- = 457$
pH	5,32	
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	1720	
k a $20^\circ\text{C}$ ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	$9 \times 10^{-6}$	
Velocidade linear média ( $\text{cm.s}^{-1}$ )	$3,2 \times 10^{-4}$	



(a)



(b)



(c)

Figura 3. Curvas de variação da condutividade hidráulica (a) da condutividade elétrica (b) e do pH (c) em função do nº de volume de vazios percolados durante as fases de saturação e de percolação com solução aquosa KCl.

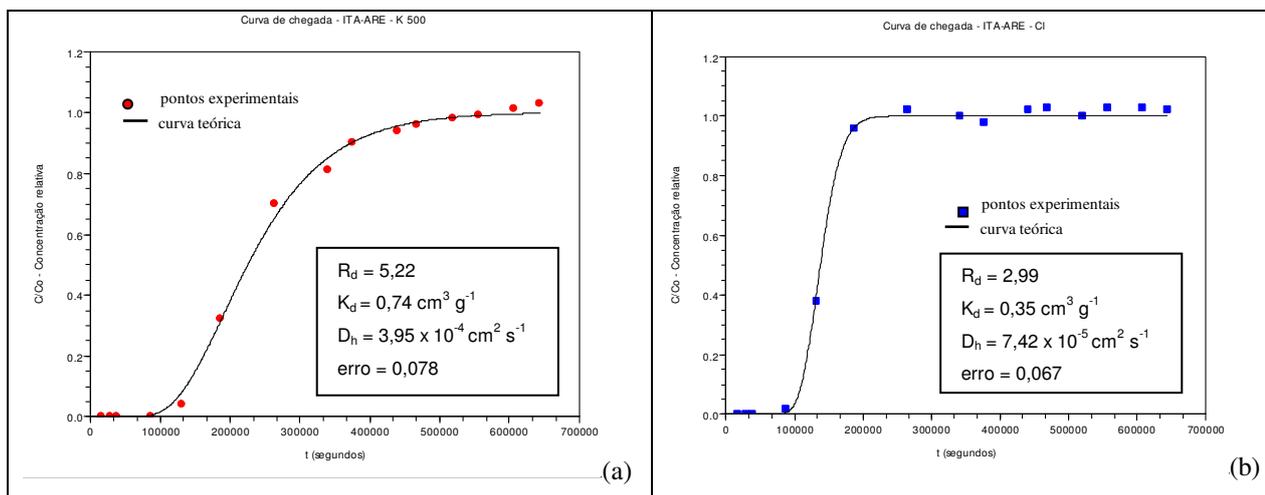


Figura 4. Curvas de Chegada dos íons  $K^+$  e  $Cl^-$  em colunas de solo Itararé arenoso (fluxo ascendente).

Durante a percolação com solução de KCl, a estabilização do pH e da condutividade elétrica ocorreu próximo a 4 T. Esse mesmo comportamento foi verificado na curva de chegada do cloreto (Figura 4-b). A estabilização do pH da solução de KCl efluente ( $pH = \pm 4$ ) ocorreu abaixo do pH da solução influente (5,32), sendo indicativo da liberação  $H^+$  na solução, em função, provavelmente, da troca iônica pelo  $K^+$ .

A modelagem resultou em bons ajustes do modelo teórico aos pontos experimentais, e as curvas de chegada indicam que o íon  $K^+$  apresenta um retardamento maior que íon  $Cl^-$ , sendo este não considerado um traçador.

## 5 - CONCLUSÃO

Os resultados dos parâmetros de transporte e retenção são semelhantes aos obtidos por Basso e Paraguassu (2006), em uma mistura (60BOT/40SG) de solos das formações Botucatu e Serra Geral.

Os resultados do ensaio de coluna indicam que apesar do material estudado ser predominantemente arenoso e com baixa CTC, ainda assim, possui capacidade de reter contaminantes.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP (processo nº05/56806-7R) e o CNPq (processo nº140625/2006-2) pelo auxílio financeiro.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Method for Specific Gravity of Soils; (D854), 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Análise Granulométrica MB 32 (NBR7181), Rio de Janeiro, 13p. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Determinação do Limite de Plasticidade. MB 31(NBR9180). Rio de Janeiro, 3p. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Determinação do Limite de Liquidez. MB 30 (NBR6459). Rio de Janeiro, 3p. 1984.

BASSO, J. B., PARAGUASSÚ, A. B. Column tests of a compacted mixture of tropical soils for use in liners in Brazil. In: 10th International Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment, Nottingham. 10th International Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment. London : IAEG, 2006. p. 1-10. 2006.

BASSO, J.B. Transporte e 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.

BOFF, F.E. Avaliação do Comportamento de uma mistura compactada de solos lateríticos frente a soluções de  $Cu^{2+}$ ,  $K^+$  e  $Cl^-$  em colunas de percolação. São Carlos. 180 pp. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1999.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A.S. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, Instituto Agrônomo, 94pp. 1986.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A.; Groundwater. Englewood Cliff. Prentice-Hall. 1979.

LAN, T.N. Um nouvel essai d'identification des sols: l'essai au bleu de méthylène. Bull. Liaison Lab.Ponts Chaussees 88, p.136-137. 1977.

LEITE J.C. Estudos Laboratoriais de Percolação em Colunas de Misturas de Solos Lateríticos Compactadas: Equipamentos e Ensaios. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos , Universidade de São Paulo. 223 pp. 2000.

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.

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.

OGATA, A.. Theory of dispersion in a granular medium. US Geol . Surv. Prof. Paper, 411-I1970.

PARAGUASSÚ, A.B.; BOFF, F.; ZUQUETTE, L.V. Estudos laboratoriais de solos lateríticos visando aplicação em liners. Geotecnia - Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Portugal, v. 94, p. 37-55. 2002.

PEJON, O. P. Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba – SP (escala 1:100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação de Atributos. Tese de Doutorado. São Carlos. pp.2v. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1992.

PEREIRA, E. M. Interação solo/solução aquosa através de ensaios de percolação em colunas. Relatório de Atividades CNPq – Pós Doutorado. Rio Claro. Campus Rio Claro. Universidade Estadual Paulista. 80pp. 2006.

SHACKELFORD, C.D. Column testing for geoenvironmental applications. In: Geo-Environmental Issues (Faing the Americas) ASCE, Sp. Publ.Nº47, pp.117-125. 1995.

ZUQUETTE, L. V.; PARAGUASSU, A. B.; GANDOLFI, N.; PEJON, O. J. Características básicas apresentadas pelos materiais inconsolidados residuais arenosos da Formação Botucatu quando percolados por soluções enriquecidas com as espécies químicas K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cu<sup>+</sup>, Zn<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>. Geociências, São Paulo/SP, v. 14, n. 2, p. 133-144. 1995.