XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/78

Comparação do Fator de Retardo Obtido por Ensaios de Sorção do Tipo *Batch* e Ensaio de Coluna

Yago Isaias da Silva Borges
Professor Assistente, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, Brasil, yagoborges@unifei.edu.br

Maria Eugênia Gimenez Boscov
Professora Titular, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil, meboscov@usp.br

RESUMO: Este estudo compara o fator de retardo (R_d) do íon brometo em um solo laterítico argiloso, obtido por dois métodos: ensaios de sorção do tipo *batch* e retroanálise de ensaios de coluna. Nos ensaios de sorção, foram utilizadas soluções de brometo de potássio (KBr) com concentrações de brometo entre 5 mg/L e 200 mg/L, razão sólido:líquido de 1:4 e tempo de contato de 48 horas. Os resultados foram ajustados aos modelos isotérmicos linear, de Freundlich e de Langmuir. Para o ensaio de coluna utilizou-se o mesmo solo compactado na condição ótima, com solução de KBr a 100 mg/L e gradiente hidráulico constante de 17. A curva de eluição foi analisada pelo software Hydrus-1D, considerando fluxo advectivo-dispersivo em meio poroso contínuo. Para uma porosidade igual à da coluna, o R_d calculado pelos parâmetros das isotermas foi de 1,6, enquanto o R_d obtido pela retroanálise dos dados de coluna foi de 1,0. A diferença é atribuída à menor disponibilidade de sítios de sorção e à menor razão sólido:líquido no ensaio de coluna em relação ao *batch*. Conclui-se que o R_d obtido por ensaios de sorção é superestimado, sendo preferível utilizar parâmetros de transporte derivados de ensaios de coluna nos estudos de contaminação de solos estruturados .

PALAVRAS-CHAVE: Transporte de Contaminantes, Fator de Retardo, Sorção.

ABSTRACT: This study compares the retardation factor (R_d) of the bromide ion in a clayey lateritic soil, determined using two methods: batch sorption tests and back-analysis of column tests. In the batch tests, potassium bromide (KBr) solutions with bromide concentrations ranging from 5 mg/L to 200 mg/L were used, applying a solid-to-liquid ratio of 1:4 and a contact time of 48 hours. The results were fitted to normal linear, Freundlich and Langmuir isotherm models. The same soil was used in the column test, compacted at optimum conditions, with a KBr solution at 100 mg/L and a constant hydraulic gradient of 17. The breakthrough curve was analyzed using Hydrus-1D software, assuming advective-dispersive flow in a continuous porous medium. For a porosity equal to that of the column, the R_d calculated from the isotherm parameters was 1.6, whereas the R_d obtained from the column data inverse analysis was 1.0. This discrepancy is attributed to a lower availability of sorption sites and a smaller solid-to-liquid ratio in the column test compared to the batch test. It is concluded that batch sorption tests tend to overestimate R_d, making column-derived transport parameters more reliable for studies of contamination of structured soils.

KEYWORDS: Contaminant Transport, Retardation Factor, Sorption.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório anual sobre a qualidade dos solos do mundo, divulgado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (Smith et al., 2024), cerca de um terço dos solos do planeta se encontram de moderada a altamente degradados, por processos como erosão, desertificação, compactação e contaminação. Entre as fontes de contaminação estão as geogênicas, causadas por contaminantes naturalmente presentes no ecossistema, e as antropogênicas, resultantes da atividade industrial, agricultura, mineração e da disposição inadequada de resíduos, dentre outras.

A modelagem matemática do avanço de plumas de contaminação em solos e rochas desempenha um papel importante nas estratégias de remediação e monitoramento de áreas contaminadas, bem como nos projetos de estruturas geotécnicas destinadas à retenção de poluentes. Estas estruturas são comumente

compostas por camadas de solo compactadas, quase sempre associadas a geomembranas. Nessas camadas, a concentração (C) de contaminante, ao longo do tempo (t), na direção x pode ser representada pela Eq. 1, que descreve um fluxo advectivo-dispersivo, onde v_x é a velocidade real de percolação, D_h é o coeficiente de dispersão hidrodinâmica e R_d é o fator de retardo:

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

O fator de retardo expressa a razão entre a velocidade do fluido e a velocidade do soluto transportado (Freeze & Cherry, 1979; Shackelford, 1993). Assim, em uma condição de transporte conservativo, em que o soluto não é sorvido pelo meio poroso, R_d é igual a 1, indicando que soluto e solvente se movem na mesma velocidade. Já um R_d igual a 2, por exemplo, indica que o fluido se move duas vezes mais rápido que o soluto em consideração. Esse parâmetro pode ser obtido de forma direta ou indireta, dependendo do método utilizado.

Na forma direta, R_d é calculado a partir da retroanálise de dados obtidos em ensaios realizados em colunas de solo. Neste caso, uma solução com concentração inicial (C_0) conhecida é injetada em uma extremidade de uma coluna de solo, medindo-se a concentração C na outra extremidade, ao longo do tempo, até que C/C_0 seja igual a 1 ou atinja outra razão de interesse. Aplicadas as devidas condições de contorno para o problema, e conhecidas a geometria do sistema e as características do solo, pode-se ajustar a curva experimental à solução da Eq. 1, tomando-se R_d como variável independente. Quando a amostra de solo é bem preparada e representativa, o R_d assim obtido é mais condizente com as interações solo-contaminante que ocorrem no meio poroso modelado, sendo estas interações influenciadas pelo arranjo de poros, pela disponibilidade de sítios de sorção e pela razão entre a solução contaminante e a massa de solo (Van Genuchten & Wierenga, 1976; Borges, 2024).

Ensaios de coluna, no entanto, nem sempre são de fácil execução, especialmente em amostras de solos argilosos compactados, uma vez que a baixa permeabilidade e a reatividade desses meios implicam em tempos longos de ensaio. Assim, é comum que o R_d seja calculado de forma indireta, a partir de coeficientes de partição obtidos em ensaios de sorção como os do tipo *batch*. Essa metodologia é relativamente simples, e consiste em colocar uma amostra de solo desagregada em contato com a solução contaminante de interesse, em diferentes concentrações, por tempo suficiente para que ocorra o equilíbrio de soluto entre a fase líquida e a sólida. A relação entre a concentração de soluto na fase líquida e o grau de sorção verificado (massa de soluto adsorvida por massa de solo seca) pode ser expressa matematicamente por meio de curvas (isotermas) como as descritas pelas equações 2, 3 e 4, a partir das quais se obtém os coeficientes de partição e os demais parâmetros usados nos cálculos de R_d, tal qual expresso pelas equações 5, 6 e 7.

Se a microestrutura exerce um papel na interação solo-contaminante, seria, então, coerente utilizar valores de R_d obtidos indiretamente, a partir de ensaios do tipo *batch*, na modelagem do transporte de contaminantes em meios porosos estruturados, como camadas indeformadas ou compactadas de solo? O objetivo deste artigo é responder à essa pergunta, comparando valores de R_d do íon brometo em um latossolo, obtidos segundo as duas metodologias citadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os ensaios foram realizados com um solo residual coletado em Campinas – SP, resultante do intemperismo de rochas diabásicas encontradas na formação geológica da Serra Geral. É composto, principalmente, por caulinita, quartzo, gibsita e óxidos de ferro (Hemsi, 2001; Gabas, 2005). Cerca de 49% de seus grãos são classificados como argila (< 0,002 mm), 30% como silte (0,002 mm – 0,06 mm) e 21% como areia (> 0,06 mm). A massa específica dos grãos é 2,87 g/cm³, o limite de liquidez é 45%, o limite de plasticidade é 30% e o índice de plasticidade é 15%, sendo classificado como um silte inorgânico de alta plasticidade (MH) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 2017) e como um

latossolo vermelho, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (IBGE, 2007). Os ensaios foram realizados com amostras passantes na peneira de abertura 2,0 mm.

Soluções aquosas de brometo de potássio (KBr), com concentrações do íon brometo (Br^-) variando entre 5 mg/L e 200 mg/L foram utilizadas no ensaios do tipo *batch*, e uma solução com concentração de 100 mg/L foi utilizada no ensaio em coluna.

2.2 Ensaios do tipo *batch*

Nesses ensaios, 20 g de solo (massa seca) foram colocados em contato com 80 mL de uma solução de KBr (razão sólido:líquido de 1:4), com concentração de Br^- igual a 215 mg/L, em um frasco de polipropileno, por 48h, tempo previamente definido por Borges (2024). Os ensaios foram realizados com amostras em triplicatas, acrescidas de um frasco para controle (branco), contendo apenas a solução de KBr. Durante o tempo de contato, os frascos foram mantidos sob agitação mecânica, em uma sala com temperatura controlada, a 20 ± 0,5 ° C. Após 48h, as suspensões foram filtradas em papel filtro quantitativo com porosidade de 2 µm, e o líquido filtrado foi armazenado sob refrigeração para determinação da concentração de Br^-. Esses mesmos procedimentos foram replicados para soluções de KBr contendo 100 mg/L, 50 mg/L, 25 mg/L e 5 mg/L de Br^-. A concentração de Br^- foi analisada por meio de cromatografia de íons.

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos matemáticos descritos pela isortema linear (Eq.3) e pelas isortemas não lineares de Langmuir (Eq. 3) e Freundlich (Eq. 4).

$$S = k_d C_e \tag{2}$$

$$S = \left(\frac{k_l C_e}{1+k_l C_e}\right) b \tag{3}$$

$$S = k_f C_e^{\,N} \tag{4}$$

Em que:
S é o grau de sorção (massa de soluto adsorvida por massa de solo seco);
C_e é a concentração de equilíbrio na fase líquida;
k_d, k_l e k_f são os coeficientes de partição Linear, de Langmuir e Freundlich, respectivamente;
b é a capacidade de adsorção máxima, da isoterma de Langmuir;
N é o expoente da equação de Freundlich.

A partir dos parâmetros fornecidos pelas equações 2, 3 e 4, R_d pôde ser calculado segundo as equações 5, 6 e 7, respectivamente, considerando-se a massa específica aparente seca (ρ_d) e a porosidade (n) da coluna de solo, conforme apresentado no item 2.3.

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{n} k_d \tag{5}$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{n} \frac{k_l b}{1+k_l C_e} \tag{6}$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho_d}{n} k_f (C_e)^{N-1} \tag{7}$$

2.3 Ensaio de coluna

A Tabela 1 apresenta as características do corpo de prova (CP) utilizado no ensaio de coluna. O CP foi compactado estaticamente, objetivando reproduzir as condições ótimas de compactação na energia Proctor normal descritas por Vega (2016).

Tabela 1. Características do corpo-de-prova utilizado no ensaio de coluna.

Altura (cm)	7,14
Diâmetro (cm)	7,00
Teor de umidade (%)	26,2
Massa específica seca, ρ_d (g/cm³)	1,56
Porosidade, n	0,46
Grau de saturação, s (%)	90

O ensaio de coluna foi realizado em um permeâmetro de parede flexível com carga constante, conforme apresentado na Figura 1. Uma tensão confinante de 50 kPa foi aplicada ao CP, em condição drenada, apenas para garantir a aderência da membrana. Todas as etapas do ensaio foram realizadas com gradiente hidráulico igual a 17.

Inicialmente, o CP foi saturado com água, por livre percolação, até que um regime de fluxo estacionário foi atingido, com um coeficiente de condutividade hidráulica igual a $2{,}2 \times 10^{-9}$ m/s. Após a fase de saturação, uma solução de KBr com concentração de Br^- igual a 100 mg/L foi injetada no topo da amostra, sendo o efluente periodicamente coletado na outra extremidade do CP, filtrado e armazenado para posterior análise da concentração de Br^- por meio de cromatografia de íons. O coeficiente de condutividade hidráulica durante o período de injeção da solução de KBr foi de $1{,}1 \times 10^{-9}$ m/s.



Figura 1. Sistema utilizado para realização do ensaio de coluna (Borges, 2024). Usado com permissão.

Aplicando-se as condições de contorno descritas pelas equações 8, 9 e 10 (Ogata & Banks, 1961) pode-se solucionar a Eq. 1 para o ensaio em consideração e, em seguida, ajustar os dados da curva de C/C_0 (x, t) a essa solução. Os ajustes foram feitos usando o módulo de modelagem inversa do *software* Hydrus-1D (Rassam *et al.,* 2018), que resolve numericamente a Eq. 1.

$$C(0,t) = C_0;\ t \geq 0 \quad (8)$$

$$C(x,0) = 0;\ x \geq 0 \quad (9)$$

$$C(\infty,t) = 0;\ t \geq 0 \quad (10)$$

As análises foram realizadas considerando-se o valor do coeficiente de difusão efetivo do Br^- no solo igual a $3{,}5x10^{-10}$ m^2/s. Esse valor foi obtido em ensaios de difusão pura realizados por Borges (2024). A sala em que o experimento foi realizado foi mantida sob temperatura controlada, a 20 ± 0,5 °C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta os resultados do ensaio de sorção do Br^- e as isotermas ajustadas à curva experimental.

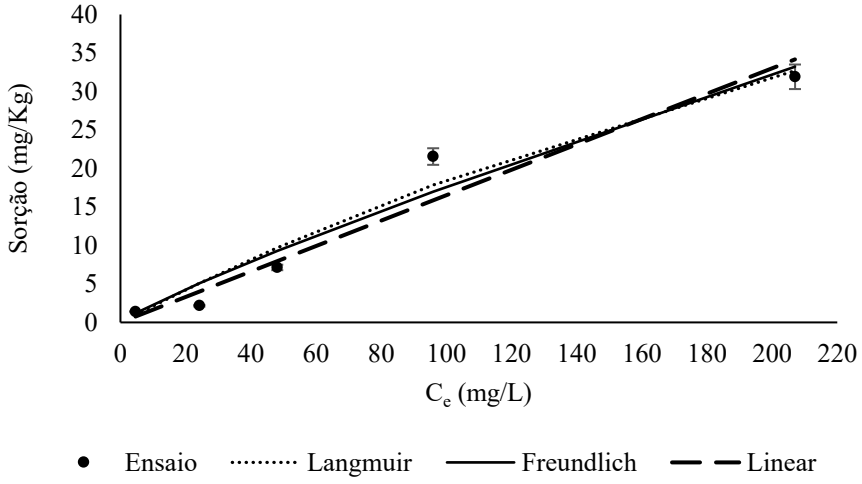


Figura 2. Isotermas de sorção do brometo

Os parâmetros das isotermans obtidos na retroanálise, os coeficientes de determinação (R^2) dos ajustes e os R_d calculados a partir desses parâmetros são apresentados na Tabela 2. Os cálculos de R_d a partir das isotermas de Langmuir e Freundlich foram efetuados considerando-se C_e igual a 95,6 mg/L, que é a concentração de equilíbrio na fase líquida para a solução de KBr com concentração de Br^- igual a 100 mg/L, a mesma usada no ensaio de coluna.

Tabela 2. Parâmetros das isotermas, R^2 e R_d.

Isoterma	R^2	Parâmetros da isoterma		R_d
Linear (Eq. 2)	0,94	k_d (L/Kg)		1,6
		0,165		
Langmuir (Eq. 3)	0,96	k_l (L/Kg)	b (mg/Kg)	1,6
		0,0019	115,75	
Freundlich (Eq. 4)	0,96	k_f (L/Kg)	*N*	1,6
		0,313	0,874	

Observa-se que o R_d obtido indiretamente, a partir dos parâmetros das três isotermas analisadas, foi igual a 1,6, demonstrando que o solo sorveu Br^-. Utilizando-se esse valor na retroanálise dos dados do ensaio de coluna, obtém-se o ajuste apresentado na Figura 3. Nesse caso, a única variável retroanalisada foi a dispersividade longitudinal (δ).

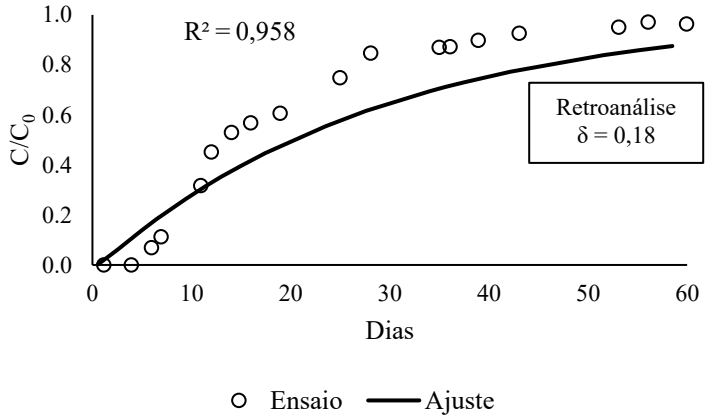


Figura 3. Dados do ensaio de coluna ajustado a Equação 1, para R_d = 1,6.

A Figura 4 apresenta os mesmos dados, porém com o ajuste otimizando os valores de R_d e δ. Neste cenário, em que o ajuste foi consideravelmente melhor (R^2 = 0,992) do que no apresentado na Figura 3 (R^2 = 0,958), o valor de R_d foi igual a 1,0, demonstrando uma situação de transporte conservativo, em que o solo não teria sorvido Br^-.

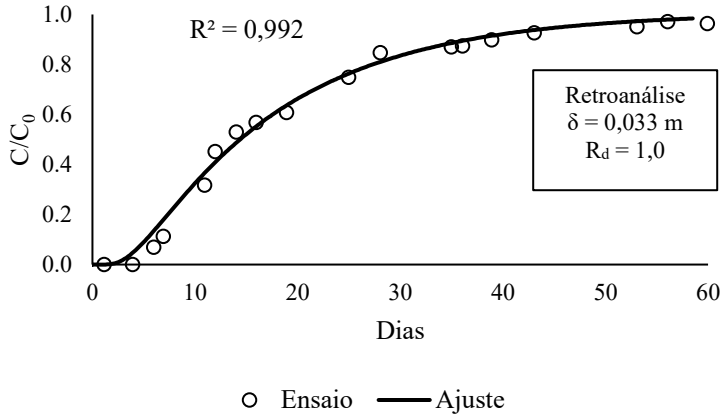


Figura 4. Dados do ensaio de coluna ajustados à Eq. 1, com R_d obtido por retroanálise.

Verifica-se, assim, que o valor de R_d obtido por meio dos ensaios de sorção (1,6) é maior do que o valor obtido por meio do ensaio de coluna (1,0). Borges (2024) chegou à mesma constatação com simulações para modelos matemáticos de dupla porosidade, em que apenas parte da rede de poros estava sujeita ao fluxo advectivo. Logo, uma modelagem do transporte de solutos em meios porosos que utilize valores de R_d calculados a partir de ensaios do tipo *batch* tenderá a ser irrealista, submestimando os tempos de chegada e de avanço das plumas de contaminação.

Van Genuchten e Wierenga (1976) afirmam que a sorção em solos estruturados é geralmente menor do que em solos não estruturados, pois apenas uma parcela dos sítios de sorção estaria disponível para sorver os íons da solução. Deve-se considerar ainda que, nos ensaios de sorção, o solo se encontra desagregado, e os grãos permanecem completamente imersos na solução e sob agitação mecânica. Há, portanto, muito mais área superficial de contato do que na amostra compactada utilizada na coluna.

Embora ensaios de coluna sejam mais demorados e exijam uma estrutura laboratorial mais complexa, eles são mais indicados para a obtenção de parâmetros a serem utilizados na modelagem do transporte de contaminantes em meios porosos estruturados, como camadas indeformadas ou compactadas de solos. Além disso, ensaios de sorção são suscetíveis a uma gama de variáveis, como temperatura, pH e força iônica da

solução, razão sólido:líquido, método de separação de fases e de agitação (Roy et al, 1992), além do tempo de contato (Vega, 2016; Borges, 2024).

4 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram que o fator de retardo calculado a partir de dados obtidos em ensaios de sorção do tipo *batch* é superestimado em relação a valores obtidos em ensaios de coluna. Assim, quando se deseja obter parâmetros para a modelagem do transporte de contaminantes em meios porosos estruturados é recomendável a realização de ensaios de coluna.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001 e do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) – processo 310978/2025-4. Os autores agradecem ao Grupo de Estudos em Química Atmosférica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo e do Laboratório de Reciclagem, tratamento de resíduos e extração (LAREX) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo apoio nas análises cromatográficas utilizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International (2017). ASTM D2487: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.

Borges, Y. I. S. (2024) *Microestrutura de um latossolo compactado e o transporte de solutos em não-equilíbrio físico*. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 107 p.

Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Gabas, S. G. (2005). *Avaliação da adsorção de cádmio e chumbo em solo laterítico compactado por meio de extração sequencial*. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

Hemsi, P. S. 2001. *Um estudo da adsorção de poluentes em um latossolo paulista considerando a carga variável e o ponto de carga*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2007). *Manual Técnico de Pedologia*. IBGE. Rio de Janeiro, 316 p.

Ogata, A.; Banks, R. B. (1961) A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. *Fluid movement in earth materials*, USGS: 13, 1961.

Roy, W. R., Krapac, I. G., Chou, S. F. J., Griffin, R. A. (1992). *Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals*. Technical Resource Document. EPA/530/SW-87/006-F. Champaign, Illinois, 116 p.

Shackelford, C. (1993) Contaminant transport. *In*: *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. Daniel, D. E (org.). Springer-Science + Business Media: 686.

Smith P., Poch, R. M., Lobb, D. A., Bhattacharyya, R., Alloush, G., Eudoxie, G. D., Anjos, L. H. C.; Castellano, M., Ndzana, G. M., Chenu, C., Naidu, R., Vijayanathan, J., Muscolo, A. M.,

Studdert, G. A.; Eugenio, N. R., Calzolari, M. C., Amuri, N., Hallett, P. (2024) *Status of the World's Soils*. Annu. Rev. Env. Resour. 49: 73-104.

Van Genuchten, M. T.; Wierenga, P. J. (1976). Mass-Transfer Studies In Sorbing Porous-Media .1. Analytical Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 40(4): 473-480, 1976.

Vega, B. J. J. *Cinética de adsorção de Pb e Cd em um solo laterítico* (2016). Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo