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/COBRAMSEG2026.6/90

ESTUDO COMPARATIVO DA MOBILIDADE DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS EM SOLOS LATERÍTICO E NÃO LATERÍTICO

Renata Conciani Nunes
Docente, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, reconciani@gmail.com

André Luís Brasil Cavalcante
Docente, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: A contaminação dos solos e das águas subterrâneas constitui tema de crescente relevância, em razão da ampliação da conscientização ambiental e de sua recorrente abordagem nos meios de comunicação. Diversas pesquisas internacionais determinaram parâmetros de transporte de contaminantes em solos típicos de climas temperados, geralmente associados a comportamento não laterítico. No Brasil, embora existam várias publicações sobre o tema, o enfoque predominante recai sobre solos lateríticos. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo comparar os parâmetros de transporte obtidos por meio de ensaios em coluna, para os mesmos contaminantes e em condições similares, em um solo de comportamento laterítico e em outro de comportamento não laterítico. Ambos os solos foram submetidos a ensaios em coluna de parede flexível. Nos ensaios, utilizaram-se nitratos de quatro metais: cromo, chumbo, cádmio e cobre. A comparação dos dados experimentais das curvas de chegada permitiu identificar diferenças relevantes entre os solos. Observou-se dessorção evidente do cádmio no solo laterítico, comportamento não verificado no solo não laterítico. O cobre atingiu $c_w/c_0 = 1$ aos 40 volumes de poros em ambos os solos, mesmo após sofrer dessorção no solo laterítico. O cromo apresentou mobilidade muito baixa, não atingindo $c_w/c_0 = 1$ em nenhum dos solos; contudo, sua mobilidade foi maior no solo laterítico. A análise das concentrações dos metais no solo após a percolação indicou que o cromo foi o metal mais sorvido. O chumbo apresentou comportamento distinto nos dois solos, com retardo significativamente maior no solo laterítico, o que se evidencia pelo fato de que, nos ensaios com esse solo, o metal não atingiu $c_w/c_0 = 1$. Com base nas concentrações dos metais nas amostras ensaiadas, constatou-se maior mobilidade de todos os metais no solo laterítico. Os metais de maior mobilidade foram o cádmio e o cobre, enquanto o cromo apresentou a menor mobilidade em ambos os solos, fenômeno atribuído à sua elevada sorção. Esses resultados indicam que o solo laterítico apresentou maior capacidade de transporte dos metais ensaiados em comparação ao solo não laterítico, uma vez que, para um mesmo intervalo de tempo, as concentrações associadas ao transporte e à retenção dos metais diferiram entre os materiais analisados.

PALAVRAS-CHAVE: Contaminação de solos, metais pesados, solos lateríticos, solos não-lateríticos, mobilidade de metais.

ABSTRACT: Soil and groundwater contamination has become an increasingly relevant topic due to growing environmental awareness and its frequent discussion in the media. Several international studies have determined contaminant transport parameters in soils typical of temperate climates, which generally exhibit non-lateritic behavior. In Brazil, although several studies have addressed this subject, most have focused on lateritic soils. In this context, the objective of this study is to compare transport parameters obtained from column tests, using the same contaminants and similar experimental conditions, in one soil with lateritic behavior and another with non-lateritic behavior. Both soils were subjected to flexible-wall column tests. Nitrates of four metals were used in the tests: chromium, lead, cadmium, and copper. The comparison of the experimental breakthrough curves revealed relevant differences between the two soils. Clear cadmium desorption was observed in the lateritic soil, whereas this behavior was not observed in the non-lateritic soil. Copper reached $c_w/c_0 = 1$ after 40 pore volumes in both soils, even after undergoing desorption in the lateritic soil. Chromium showed very low mobility and did not reach $c_w/c_0 = 1$ in either soil; however, its mobility was higher in the lateritic soil. The analysis of metal concentrations in the soil after percolation indicated that chromium was the most strongly sorbed metal. Lead exhibited distinct behavior in the two soils, with

significantly greater retardation in the lateritic soil, as evidenced by the fact that, in the tests with this soil, lead did not reach $c_w/c_0 = 1$. Based on the metal concentrations in the tested samples, all metals showed greater mobility in the lateritic soil. Cadmium and copper were the most mobile metals, whereas chromium showed the lowest mobility in both soils, a phenomenon attributed to its high sorption. These results indicate that the lateritic soil had a greater capacity to transport the tested metals than the non-lateritic soil, since, for the same time interval, the concentrations associated with metal transport and retention differed between the analyzed materials.

KEYWORDS: Soil contamination; heavy metals; lateritic soils; non-lateritic soils; metal mobility; contaminant transport.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Gusmão (2002), as principais formas de contaminação dos solos e das águas subterrâneas estão associadas a: locais projetados para a descarga de substâncias; locais destinados ao armazenamento, tratamento e/ou disposição de substâncias; áreas utilizadas para o transporte de substâncias; locais nos quais há descarga de substâncias como consequência de outras atividades; intervenções que induzem alterações no padrão de fluxo da água subterrânea, como poços de produção e escavações subterrâneas; e ocorrências naturais que podem ser influenciadas pela ação antrópica.

No Brasil, há diversas pesquisas publicadas sobre solos tropicais relacionadas à contaminação de solos e águas subterrâneas. Nesta pesquisa, o enfoque recai sobre estudos comparativos do transporte de contaminantes em solos lateríticos e não lateríticos. Até o momento, os ensaios de contaminação de solos ainda não se encontram normatizados por órgãos brasileiros. Embora existam numerosos trabalhos envolvendo ensaios em coluna com solos de regiões temperadas e também com solos tropicais, muitos deles realizados no Brasil, não foram encontrados estudos comparativos em coluna entre solos lateríticos e não lateríticos.
Portanto, considerando a relevância do meio ambiente para a sociedade, especialmente para as populações futuras, bem como as dificuldades técnicas ainda existentes quanto à compreensão do comportamento das plumas de contaminação, a presente pesquisa busca contribuir para o aprofundamento do entendimento do transporte de contaminantes em solos tropicais lateríticos e não lateríticos.

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar a mobilidade dos metais cádmio, cobre, chumbo e cromo, determinada por meio de ensaios em coluna de parede flexível, empregando solução multiespécie preparada com nitratos desses metais, em amostras de solos laterítico e não laterítico.

2 METODOLOGIA

Nesta pesquisa, foram definidos dois locais para a coleta dos materiais em estudo, correspondentes a um solo não laterítico e a um solo laterítico, contituindo duas amostras. O primeiro local escolhido foi a cidade de Brasília, Distrito Federal, onde se localiza a Universidade de Brasília, cuja rocha mãe é adósia. O segundo local foi a cidade de Rio Paranaíba, em Minas Gerais, onde se localiza um campus da Universidade Federal de Viçosa, cuja rocha mãe é formada pelo embasamento metamórfico da faixa de Dobramentos de Brasília.

No Distrito Federal, predominam latossolos vermelho-escuros e vermelho-amarelos, além de cambissolos em ocorrência secundária. Sondagens realizadas na região do Plano Piloto e em suas proximidades indicam a presença de um manto intemperizado sobre a rocha matriz, constituída por ardósia, situado a profundidades de aproximadamente 10 a 20 m na Asa Sul e de até 10 m na Asa Norte. Assim, pode-se afirmar que os solos predominantes no Distrito Federal são, em sua maioria, lateríticos. Apesar dessa predominância, não é incomum encontrar afloramentos rochosos e cortes nos quais ocorrem solos não lateríticos, como observado em um corte localizado no Setor Noroeste de Brasília. Nessa região, predominam rochas do Grupo Paranoá, com menor grau de metamorfismo, além de alternância de estratos de quartzitos de granulometria fina a média, metassiltitos argilosos, metarritmitos arenosos, metarritmitos argilosos e ardósias. Nesse talude, observou-se uma divisão bastante clara dos horizontes. Na camada superficial, identifica-se um aterro de solo arenoso, sotoposto por uma camada de latossolo vermelho. Na base do talude, encontra-se o solo não laterítico utilizado nesta pesquisa.

O município de Rio Paranaíba está situado no estado de Minas Gerais, a aproximadamente 350 km de Belo Horizonte, na região entre o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba. De acordo com o Mapa de Solos de Minas Gerais, o município está localizado em área de ocorrência de cambissolo háplico distrófico; contudo, há uma região circundante à sede municipal composta por latossolo vermelho distrófico. O solo utilizado foi coletado nas proximidades do laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Campus Rio Paranaíba.

2.1 Classificação dos Solos

A escolha das amostras submetidas aos ensaios em coluna foi realizada com base na metodologia MCT expedita, também conhecida como método das pastilhas para classificação dos solos. Foram coletadas amostras nos dois locais de estudo e, posteriormente, realizada a classificação MCT, a fim de identificar os materiais com comportamento laterítico e não laterítico, contituindo-se, dessa forma, duas amostras com fins comparativos.

Foram realizados ensaios de limite de liquidez, segundo a NBR 6459; limite de plasticidade, segundo a NBR 7180; análise granulométrica, segundo a NBR 7181; determinação da massa específica dos grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm, conforme a NBR 6508; e determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática, conforme a NBR 10838. A curva granulométrica foi determinada seguindo os procedimentos da NBR 7181. A determinação da massa específica dos sólidos (ρ_s) segui a NBR 6508. A massa específica natural do solo (ρ_n) foi obtida pela relação entre a massa total e o volume total, conforme o método da balança hidrostática, padronizado pela NBR 10838 (ABNT, 1988). Foram realizadas análises químicas em ambas as amostras, correspondentes ao solo laterítico e ao solo não laterítico, apenas em sua condição natural. Assim, não foram realizadas análises químicas nas amostras submetidas aos ensaios em coluna.

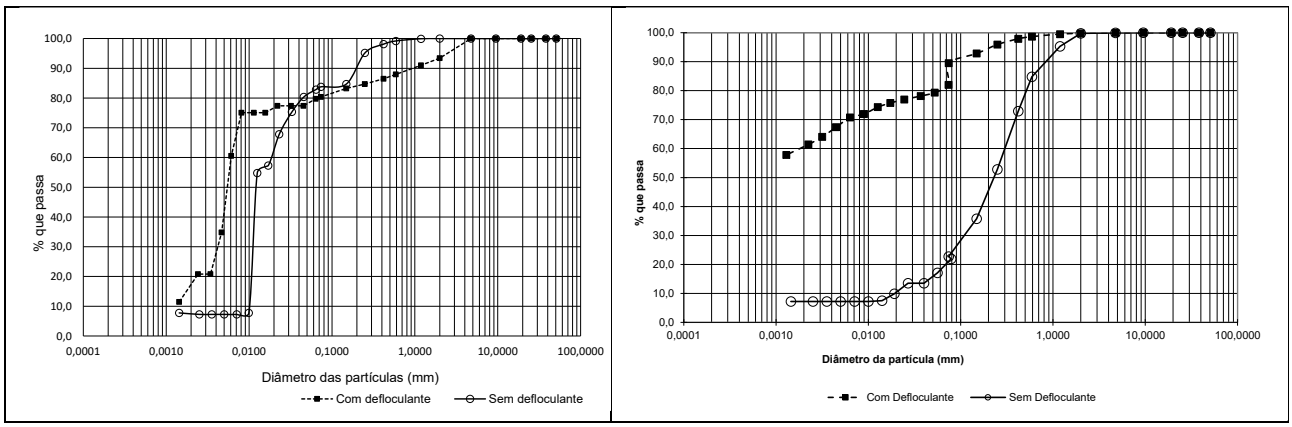


Figura 1 – Curvas granulométricas: solo não laterítico (MG) e solo laterítico (DF).

2.2 Ensaio em coluna

O equipamento utilizado no ensaio em coluna foi do tipo membrana flexível, com pressão de confinamento de 100 kPa. Esse valor de tensão foi estimado com base na profundidade em que a amostra se situava no perfil de solo e foi mantido constante até o final do ensaio.

A solução contaminante foi preparada com concentração de 10 mg/L para todos os metais, utilizando-se fluxo ascendente. O contaminante foi acondicionado em frascos de Mariotte, dos quais percolava para a entrada do corpo de prova (CP). Havia um frasco de Mariotte para cada corpo de prova. Em cada ensaio, todos os CPs foram submetidos ao mesmo gradiente hidráulico, de 10,3 para os corpos de prova de solo laterítico e de 23,2 para os de solo não laterítico. Esse foi o único parâmetro distinto entre os dois solos, sendo necessário em razão da baixa permeabilidade dos corpos de prova não lateríticos, uma vez que a velocidade do ensaio justificou a diferença entre os gradientes. Os corpos de prova foram moldados com 5,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura, a partir de amostras indeformadas, na umidade em que o material se encontrava no momento da coleta. O diâmetro foi limitado pelo equipamento utilizado, enquanto a altura foi definida com o objetivo de

otimizar o tempo de ensaio. A câmara comportava quatro corpos de prova simultaneamente. Cada corpo de prova foi moldado com aproximadamente 5,0 cm de altura e envolto por membrana impermeável de borracha. A câmara do ensaio era preenchida com água de abastecimento e, antes do início do ensaio, aplicava-se pressão de 100 kPa por meio de ar comprimido.

A solução contaminante foi preparada com nitratos de cromo, cádmio, chumbo e cobre, todos com concentração metálica de 10 mg/L, diluídos em água destilada e preparados pouco antes do início do ensaio. A determinação da concentração dos contaminantes no efluente foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica. A análise baseou-se nos resultados experimentais, nos quais a concentração relativa medida nos ensaios em coluna $(c_w/c_0)_m$ foi plotada em função do volume de poros percolado. A mobilidade foi avaliada por meio da análise das curvas de chegada.

Foi necessária uma caracterização adequada do domínio, especialmente quanto à determinação dos índices físicos do material, como porosidade (n), massa específica seca do solo (ρ_d) e grau de saturação (S_r), bem como de suas propriedades hidráulicas, incluindo a condutividade hidráulica do solo (k) e as velocidades médias de percolação (v_p). A ausência de caracterização adequada do material pode resultar em um modelo calibrado para um conjunto de condições não representativas das condições reais. O processo de calibração foi necessário para reduzir a variabilidade dos dados iniciais do modelo, permitindo a determinação dos parâmetros de transporte: fator de retardo (R) e coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D_h).

Bear & Cheng (2010) recomendam utilizar um procedimento de solução inversa com o qual se obtém a solução ótima, reduzindo ao mínimo a soma dos quadrados dos erros entre as concentrações relativas medidas e as calculadas teoricamente. Esta solução inversa é conhecida como Minimização por Mínimos Quadrados e a formulação é dada por:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left[\left(c_w/c_0\right)_m - \left(c_w/c_0\right)_c \right]^2 \tag{1}$$

em que E representa o erro acumulado, correspondente à soma dos quadrados das diferenças entre a concentração relativa calculada $(c_w/c_0)c$ e a concentração relativa medida $(c_w/c_0)m$, para n medições. O processo de calibração foi executado a partir da solução analítica unidimensional proposta por Ogata & Banks (1961):

$$c_w(x,t) = \frac{c_0}{2}\left[e^{\frac{v_{pluma}}{D_{pluma}}x} \operatorname{erfc}\left(\frac{x + v_{pluma}t}{2\sqrt{D_{pluma}t}} \right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{x - v_{pluma}t}{2\sqrt{D_{pluma}t}} \right) \right] \tag{2}$$

Onde

$$v_{pluma} = \frac{v_p}{R} \tag{3}$$

$$D_{pluma} = \frac{D_h}{R} \tag{4}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a análise granulométrica, observou-se que, no caso do solo não laterítico, o uso de defloculante pouco alterou o formato da curva, fato evidenciado pela proximidade entre as curvas. Esse comportamento indica que o solo continuou apresentando textura siltosa mesmo após a desagregação. Para o solo laterítico, por sua vez, o uso de defloculante alterou de forma evidente a textura do material, conforme indicado pelo afastamento entre as curvas granulométricas.

De acordo com a Classificação Rodoviária (TRB-HRB), o solo pertencente à classe A-4 é classificado como siltoso, não plástico ou moderadamente plástico. Já os solos da classe A-7, nessa metodologia, correspondem a misturas argilo-arenosas com alto limite de liquidez. Entretanto, observa-se que nenhum dos dois solos apresentou limite de liquidez elevado (> 50%), o que sugere baixa propensão a grandes variações volumétricas. Ambos apresentaram índice de atividade inferior a 0,75. Na classificação SUCS, os solos CL correspondem a argilas inorgânicas de baixa a média plasticidade, bem como a argilas arenosas, enquanto os solos ML são siltes inorgânicos de baixa plasticidade. Com base no método MCT de classificação dos solos, a amostra coletada em Rio Paranaíba apresentou comportamento laterítico, com valores de c' = 1,22 e

penetração = 0,0 mm, sendo classificada como LA', isto é, arenosa laterítica. A amostra coletada no Setor Noroeste de Brasília apresentou comportamento não laterítico, com valores de c' = 1,4 e penetração = 2,1 mm, sendo classificada como NA'/NG'-NS'.

A análise química indicou elevada quantidade de cátions, com exceção do magnésio no solo laterítico. O elemento que mais se destacou foi o potássio, presente em maior quantidade em ambos os solos quando comparado aos demais elementos. A capacidade de troca catiônica do solo não laterítico é baixa, enquanto a do solo laterítico é elevada. Quanto maior a capacidade de troca catiônica, maior a facilidade com que os cátions podem ser trocados ou substituídos, uma vez que as ligações são reversíveis e podem ocorrer tanto da superfície da partícula para a solução do solo quanto no sentido inverso. Assim, sob esse aspecto, o solo laterítico apresenta maior capacidade tanto de sorção quanto de dessorção. Outro fator relacionado à capacidade de troca catiônica é o teor de matéria orgânica, diretamente proporcional a essa propriedade. Esse comportamento é coerente com os resultados obtidos: baixa CTC e baixo teor de matéria orgânica no solo não laterítico, e elevados CTC e teor de matéria orgânica no solo laterítico. Quanto aos valores de pH, os resultados indicam características fracamente ácidas. O pH pode influenciar o tipo de reação entre o solo e o contaminante, sobretudo por afetar a solubilidade de elementos como ferro e alumínio. Contudo, na faixa de pH observada, não se espera alteração significativa na solubilidade desses elementos. A quantificação dos metais pesados (Cu, Mn, Fe, Zn, Cr, Ni, Cd e Pb) indica que ambos os solos não estão contaminados, uma vez que suas concentrações não restringem o uso do solo e permanecem abaixo dos critérios de qualidade estabelecidos pelo CONAMA.

3.1 Resultados dos Ensaios em coluna

Inicialmente, para o solo não laterítico, observa-se na Figura 2 que a permeabilidade medida dos corpos de prova variou entre 2×10^{-6} cm/s e 5×10^{-6} cm/s. Dessa forma, adotou-se, para fins de ajuste, o valor médio correspondente a cada corpo de prova. A estimativa foi realizada com base nas medições obtidas durante a fase de percolação do contaminante no ensaio em coluna. No lado direito da Figura 2, são apresentadas as curvas de chegada de cada metal estudado para o Corpo de Prova 4 (CP4). Nesse gráfico, o eixo das abscissas indica o volume de poros percolado, enquanto o eixo das ordenadas representa a concentração normalizada (c_w/c_0), isto é, a razão entre a concentração final, coletada após a percolação pelo corpo de prova (c_w), e a concentração inicial, antes da passagem pelo solo (c_0).

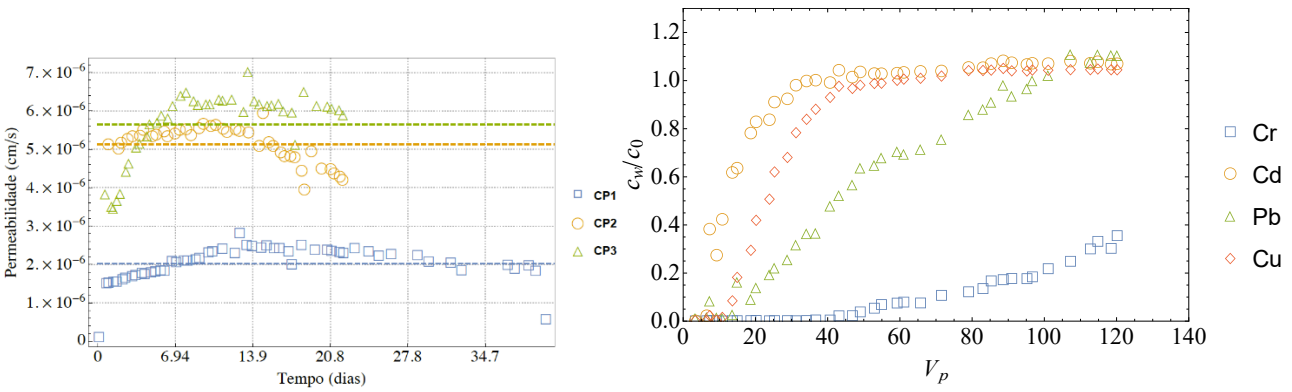


Figura 2 – Variação da permeabilidade com o tempo e curvas de chegada do CP4.

Nos três corpos de prova (CP2, CP3 e CP4), os metais apresentaram comportamentos semelhantes. As curvas do cádmio (Cd) e do cobre (Cu) mostraram formas próximas, indicando comportamentos análogos. Para esses metais, a concentração final igualou-se à concentração inicial após aproximadamente 40 volumes de poros percolados. Nos três corpos de prova, a curva de chegada do chumbo (Pb) indicou menor mobilidade em relação ao cádmio (Cd) e ao cobre (Cu), porém maior mobilidade que o cromo (Cr). Nesse caso, c_w/c_0 atingiu valor unitário somente após a percolação de 100 volumes de poros, evidenciando retardo mais elevado que o observado para cádmio e cobre. Considerou-se que os resultados obtidos nos três ensaios foram satisfatórios, uma vez que apresentaram comportamentos físico-químicos semelhantes entre os metais analisados.

Para a determinação dos parâmetros de transporte, isto é, do coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D_h) e do fator de retardo (R), utilizou-se o procedimento descrito na metodologia. As curvas de chegada obtidas experimentalmente foram ajustadas a partir do modelo proposto por Ogata & Banks (1961), considerando-se o método dos mínimos quadrados para a minimização dos erros. Com o conhecimento da velocidade média de percolação e da espessura percolada em cada ensaio, aplicou-se o modelo clássico de transporte de contaminantes para calcular a concentração relativa que mais se aproximava da concentração relativa experimental. Representando-se o erro pelo quadrado da diferença entre as concentrações relativas, iniciou-se um processo iterativo de tentativas até a obtenção do menor erro. Com o uso do software Wolfram Mathematica® (Wolfram Research, 2015), foi programado o algoritmo responsável por otimizar os parâmetros — coeficiente de dispersão hidrodinâmica e fator de retardo — e minimizar o erro. As soluções obtidas são apresentadas na Figura 3 para cada corpo de prova (CP2, CP3 e CP4) e para cada metal (cromo, cádmio, chumbo e cobre). Em seguida, realizou-se análise estatística dos parâmetros ajustados para o solo não laterítico, com o objetivo de comparar a mobilidade dos metais ensaiados por meio das curvas de chegada teóricas e dos parâmetros médios ajustados. A partir dos dados de velocidade de percolação e da espessura de solo ensaiada, calculou-se a média amostral entre os valores dos corpos de prova. Para o coeficiente de dispersão e o fator de retardo, a média amostral foi obtida para cada metal, considerando os três corpos de prova de cada tipo de solo. Apenas no caso específico do cromo, em razão do elevado desvio em relação aos demais resultados, o coeficiente de dispersão ajustado para o CP3 e os fatores de retardo ajustados dos CP2 e CP3 foram desconsiderados no cálculo da média amostral.

Para o solo laterítico, foram realizadas as mesmas análises aplicadas ao solo não laterítico. Os resultados das análises estatísticas de mobilidade, obtidos a partir das curvas de chegada teóricas de ambas as amostras, são apresentados na Figura 3.

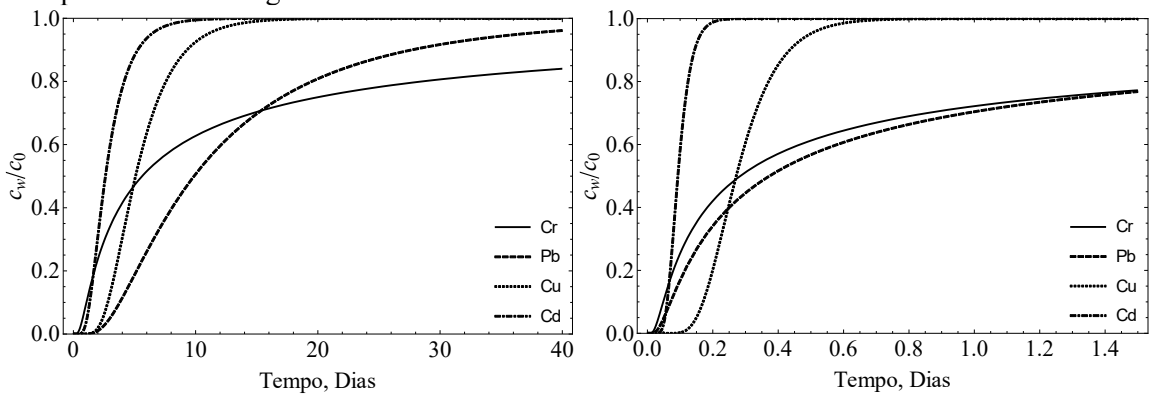


Figura 3 - Análise estatística de mobilidade das curvas de chegada teóricas com solo não-laterítico (lado esquerdo) e solo laterítico (lado direito).

4. CONCLUSÕES

A comparação dos dados experimentais das curvas de chegada dos solos laterítico e não laterítico permitiu identificar as seguintes diferenças principais:

- Observou-se maior dessorção do cádmio no solo laterítico, comportamento não verificado no solo não laterítico.
- O cromo apresentou mobilidade muito baixa, não atingindo $c_w/c_0 = 1$ em nenhum dos dois tipos de solo; contudo, sua mobilidade foi maior no solo laterítico. Posteriormente, observou-se que esse foi o metal mais sorvido pelo solo não laterítico, com base na análise da concentração do contaminante nesse material.
- O chumbo apresentou comportamento distinto em ambos os solos, com retardo significativamente maior no solo não laterítico. Essa conclusão decorre da observação de que, nos ensaios com solo laterítico, o chumbo não atingiu $c_w/c_0 = 1$.

A distribuição de poros varia entre os tipos de solo em função de seu processo de formação e do grau de laterização. Na formação dos solos lateríticos, ocorre intenso processo de eluviação, que gera canais preferenciais bem desenvolvidos, aumenta a porosidade e, consequentemente, a velocidade de fluxo, favorecendo a dispersão hidrodinâmica. A maior intemperização desses solos também resulta em maior complexidade na estrutura dos vazios, o que aumenta a dispersividade do transporte de contaminantes e

favorece o espalhamento do soluto. A dispersão hidrodinâmica é ainda influenciada por uma parcela difusiva, também condicionada pela tortuosidade do meio, o que pode acelerar o fenômeno dispersivo no solo laterítico.

Com base na análise estatística das curvas de chegada teóricas, obtidas com o uso da média amostral dos parâmetros ajustados para os solos laterítico e não laterítico, conclui-se que:

- O cádmio (Cd) foi o primeiro metal a alcançar, na saída, a concentração de entrada c_0, o que ocorreu em poucas horas no solo laterítico e em cerca de 10 dias no solo não laterítico.
- O cobre (Cu) foi o segundo metal a alcançar a concentração de entrada no efluente, tanto no solo laterítico quanto no não laterítico. Esse comportamento ocorreu em poucas horas no solo laterítico e em aproximadamente 15 dias no solo não laterítico.
- O cromo (Cr) e o chumbo (Pb) apresentaram menor mobilidade em ambos os tipos de solo. No solo laterítico, a diferença entre eles foi pequena, enquanto, no solo não laterítico, essa diferença foi mais evidente, com maior mobilidade do chumbo. Em nenhum dos dois solos esses metais alcançaram a concentração de entrada.

A comparação das curvas teóricas obtidas por meio do tratamento estatístico dos parâmetros ajustados para cada metal, nos solos laterítico e não laterítico, evidenciou que:

- Todos os metais apresentaram maior mobilidade no solo laterítico.
- Os metais com maior mobilidade foram o cádmio e o cobre, em ambos os solos.
- O cromo foi o metal de menor mobilidade nos dois tipos de solo, fenômeno explicado por sua elevada sorção.

Esses resultados podem ser atribuídos ao fato de que o solo não laterítico apresentou menor velocidade de transporte dos metais ensaiados em comparação ao solo laterítico. Para um mesmo intervalo de tempo, a concentração no efluente dos ensaios realizados com solo não laterítico foi inferior à observada nos ensaios com solo laterítico. Esse comportamento está relacionado à própria velocidade de percolação do líquido no meio, uma vez que o solo laterítico é mais permeável que o não laterítico, favorecendo maior advecção e dispersão mecânica das partículas no solo laterítico.

Com base na teoria de sorção apresentada na revisão bibliográfica, a ordem de preferência de sorção entre os metais estudados foi: Cr < Pb < Cu < Cd. O Cr foi o metal mais sorvido no solo, o que pode ser justificado por sua maior valência (+3) em relação aos demais metais (+2). A maior preferência de sorção do Pb em relação ao Cu pode ser explicada por sua maior eletronegatividade. O Pb também apresenta maior afinidade de sorção em relação ao Cu, e ambos os metais tendem a formar complexos de esfera interna. De acordo com a revisão bibliográfica, o Cd teria maior preferência de sorção em relação ao Cu com base na ligação eletrostática; entretanto, esse comportamento não foi observado nesta pesquisa.

Em suma, a principal dificuldade na comparação dos parâmetros de transporte de contaminantes em solos distintos reside nas diferenças entre suas propriedades. Nesta pesquisa, buscou-se manter as mesmas condições experimentais, incluindo solução contaminante, concentração inicial, dimensões da amostra e tensão de confinamento. Entretanto, as porosidades das amostras variaram conforme o tipo de material. Outro fator que dificulta a comparação é a mineralogia do solo, que exerce influência significativa sobre as interações químicas e, consequentemente, sobre a interação com o contaminante. Espera-se que esta pesquisa contribua para a compreensão de problemas ambientais envolvendo metais pesados como contaminantes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6502: Solos e rochas — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10838**:** Solo — Determinação de massa específica aparente de amostra indeformada **com** emprego da balança hidrostática. Rio de Janeiro: ABNT, 1988. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras** de **solo** — Preparação para **ensaios de compactação e ensaios** de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508**:** Grãos de solo que passam na **peneira** de 4,**8 mm — Determinação** da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BEAR, J.; CHENG, A. H.-D. **Modeling groundwater flow and contaminant transport**. New York: Springer, 2010.

CHOUDHURY, B. N.; GOSWAMI, D. Chemical characteristics of leachate contaminated lateritic soil. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, v. 2, n. 4, 2013.

GUSMÃO, A. **Águas subterrâneas: aspectos de contaminação e remediação**. Recife: EDUPE, 2002. 193 p.

IJIMDIYA, T. S. The effects of oil contamination on the consolidation properties of lateritic soil. Development and Applications of Oceanic Engineering, v. 2, n. 2, maio 2013.

NAYAK, S.; SUNIL, B. M.; SHRIHARI, S. Shear strength characteristics and chemical characteristics of leachate-contaminated lateritic soil. Engineering Geology, v. 106, n. 1–2, p. 20–25, 2009.

OGATA, A.; BANKS, R. B. Solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, n. 411-A, p. 1–7, 1961.

ONYELOWE, K. C. Pure crude oil contamination on Amaoba lateritic soil. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 20, 2015.