*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/COBRAMSEG2026.6/68**

# Avaliação da Permeabilidade de Solos Arenosos em Colunas de Percolação sob Diferentes Gradientes Hidráulicos

Letícia de Oliveira Demarques
Discente de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, demarques.leticia@estudante.ufjf.br

Marina Almeida Souza Nogueres
Discente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, nogueres.marina@estudante.ufjf.br

Júlia Righi de Almeida
Docente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, julia.righi@ufjf.br

Cátia de Paula Martins
Docente de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, catia.martins@ufjf.br

RESUMO: O crescimento populacional e a intensificação das atividades industriais e agrícolas têm ampliado os riscos de contaminação dos solos e das águas superficiais e subterrâneas, tornando essencial a compreensão dos mecanismos de transporte de solutos em meios porosos. Nesse contexto, o presente estudo avaliou experimentalmente o comportamento hidráulico de um solo arenoso por meio de ensaios laboratoriais em colunas de percolação, com ênfase na determinação do coeficiente de permeabilidade sob diferentes gradientes hidráulicos e na análise do uso do azul de metileno como traçador. A metodologia incluiu caracterização granulométrica do material, montagem de colunas de percolação em acrílico operando sob regime de carga constante e realização de ensaios utilizando água destilada e solução corante, permitindo a estimativa do coeficiente de permeabilidade e a interpretação dos processos de transporte predominantes. Os resultados indicaram predominância das frações areia média (50,3%) e areia grossa (41,5%), com massa específica aparente de 1,5 g/cm³, compatível com solos pouco a medianamente compactados. Os coeficientes de permeabilidade obtidos variaram entre 0,0133 cm/s e 0,0088 cm/s para água destilada e entre 0,0133 cm/s e 0,0114 cm/s para a solução de azul de metileno, situando-se na faixa típica de areias médias a grossas. A comparação entre os fluidos percolantes mostrou ausência de variações significativas na ordem de grandeza do parâmetro, confirmando a hipótese de predominância do controle estrutural do meio poroso no escoamento. Os resultados demonstram ainda a adequação do azul de metileno como traçador em ensaios de percolação e evidenciam o potencial da metodologia como ferramenta experimental e didática aplicada ao estudo do transporte de solutos em Geotecnia Ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Contaminação, Solo arenoso, Permeabilidade, Colunas de percolação, Transporte de contaminantes.

ABSTRACT: Population growth and the intensification of industrial and agricultural activities have increased the risks of soil and surface and groundwater contamination, making it essential to understand the mechanisms of solute transport in porous media. In this context, the present study experimentally evaluated the hydraulic behavior of a sandy soil through laboratory tests in percolation columns, with emphasis on determining the permeability coefficient under different hydraulic gradients and analyzing the use of methylene blue as a tracer. The methodology included granulometric characterization of the material, assembly of acrylic percolation columns operating under constant head conditions, and tests using distilled water and dye solution, allowing the estimation of the permeability coefficient and the interpretation of the predominant transport processes. The results indicated a predominance of medium sand (50.3%) and coarse sand (41.5%) fractions, with an apparent specific gravity of 1.5 g/cm³, consistent with slightly to moderately compacted soils. The permeability coefficients obtained ranged from 0.0133 cm/s to 0.0088 cm/s for distilled water and from 0.0133 cm/s to 0.0114 cm/s for the methylene blue solution, falling within the typical range for medium to coarse sands. The comparison between the percolating fluids showed no significant variations in the order of magnitude of the

parameter, confirming the hypothesis of the predominance of structural control of the porous medium in the flow. The results also demonstrate the suitability of methylene blue as a tracer in percolation tests and highlight the potential of the methodology as an experimental and didactic tool applied to the study of solute transport in Environmental Geotechnics.

KEYWORDS: Contamination, Sandy soil, Permeability, Percolation columns, Transport of contaminants.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional associado à expansão das atividades industriais, agrícolas e urbanas tem intensificado a geração de resíduos e a disposição inadequada de substâncias potencialmente contaminantes no ambiente natural, aumentando a vulnerabilidade dos solos e das águas subterrâneas. Boscov (2008) aponta que as fontes de poluição podem ocorrer de forma direta, por meio da aplicação de fertilizantes, pesticidas e lodos de estações de tratamento de esgoto, ou indireta, como resultado da deposição atmosférica de poluentes oriundos de atividades industriais e da disposição inadequada de resíduos sólidos. Nesse contexto, o solo desempenha papel fundamental na proteção ou na propagação da poluição ambiental, atuando simultaneamente como barreira natural e como meio transmissor de contaminantes, dependendo de suas características físicas, químicas e mineralógicas (Boscov, 2008; Silva et al., 2022; Shackelford, 2014).

Os solos constituem sistemas porosos cuja capacidade de retenção ou transmissão de contaminantes depende diretamente da estrutura do meio poroso, da granulometria, da porosidade e da permeabilidade, além das propriedades físico-químicas dos solutos transportados (Boscov, 2008; Chiossi, 2013). De acordo com Boscov (2008), entre os parâmetros hidráulicos do solo, o coeficiente de permeabilidade (k) exerce papel determinante na velocidade de deslocamento dos fluidos e das substâncias dissolvidas em subsuperfície. Em solos arenosos, caracterizados por elevada condutividade hidráulica e reduzida capacidade de adsorção, a migração de contaminantes tende a ocorrer de forma mais rápida quando comparada a solos mais finos, evidenciando a importância da caracterização hidráulica desses materiais na avaliação da vulnerabilidade ambiental (Mitchell; Soga, 2005; Fetter, 2001).

O transporte de contaminantes em meios porosos ocorre por diferentes mecanismos físicos e químicos, entre os quais se destacam a advecção, a dispersão hidrodinâmica, a difusão molecular e os processos de interação sólido-líquido, como adsorção e troca iônica (Boscov, 2008). Segundo Fetter (2001), em meios granulares, especialmente em solos arenosos com baixa superfície específica, a advecção constitui o principal mecanismo responsável pelo deslocamento de solutos ao longo do perfil do solo. Nessas condições, o escoamento da água em meios saturados pode ser descrito pela Lei de Darcy, segundo a qual a velocidade de fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico aplicado, desde que mantidas condições de regime laminar (Pinto, 2006; Mitchell; Soga, 2005).

Ensaios laboratoriais em colunas de percolação constituem metodologia amplamente utilizada na investigação experimental dos processos de fluxo e transporte em meios porosos, permitindo a simulação controlada de condições hidráulicas e a observação direta do deslocamento de solutos ao longo do perfil do solo (Boscov, 2008). Entre os traçadores empregados nesses estudos, o azul de metileno destaca-se por sua elevada solubilidade em água e facilidade de visualização da frente de percolação, apresentando interação limitada com solos arenosos devido à sua baixa adsorção nesses materiais (Silva et al., 2022). Embora esses ensaios sejam relevantes para a compreensão dos mecanismos de transporte de contaminantes, ainda se observa a necessidade de investigações experimentais que avaliem o comportamento da permeabilidade em solos arenosos sob diferentes gradientes hidráulicos utilizando estruturas laboratoriais acessíveis, capazes de integrar análise hidráulica e observação dos processos advectivos e dispersivos em meio poroso saturado (Mitchell; Soga, 2005; Fetter, 2001; Boscov, 2008).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar experimentalmente o comportamento da permeabilidade de solo arenoso sob diferentes gradientes hidráulicos por meio de ensaios em colunas de percolação, utilizando água destilada e solução de azul de metileno como fluido percolante, com vistas à verificação da validade da Lei de Darcy em regime de escoamento saturado e à interpretação dos mecanismos de transporte predominantes. Parte-se da hipótese de que o coeficiente de permeabilidade permanece aproximadamente constante sob diferentes gradientes hidráulicos enquanto o escoamento se mantém laminar. Além disso, o trabalho busca contribuir para a compreensão experimental dos processos de

transporte em meios porosos e para o desenvolvimento de estrutura experimental de baixo custo com potencial aplicação didática no ensino de Geotecnia Ambiental.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Pesquisa Bibliográfica

A etapa inicial do estudo consistiu na realização de pesquisa bibliográfica em livros didáticos, normas técnicas e trabalhos científicos previamente publicados, com o objetivo de fundamentar teoricamente os procedimentos experimentais adotados e orientar a interpretação dos resultados obtidos. Destacam-se como principais referências para a concepção, montagem e utilização das colunas de percolação os trabalhos desenvolvidos por Bernardes (2021) e Bernardes et al. (2022), que serviram como base metodológica para a execução dos ensaios apresentados neste estudo.

### 2.2 Coluna de Percolação

A coluna de percolação utilizada nos ensaios com água e solução de azul de metileno integra o conjunto experimental desenvolvido nos trabalhos de Bernardes (2021) e Bernardes et al. (2022). O equipamento é constituído por um corpo cilíndrico de acrílico transparente com 20 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro, acoplado a uma base e a uma tampa metálicas, além de mangueiras de conexão com o frasco de Mariotte e o recipiente coletor. Na Figura 1 é possível identificar a disposição da coluna e do frasco de Mariotte em prateleiras.

Ressalta-se que esse arranjo permite simular condições de ensaio em permeâmetro de carga constante, possibilitando a análise do comportamento de percolação de fluidos em meio poroso saturado. Embora amplamente empregadas em pesquisas experimentais, colunas de percolação ainda apresentam limitações relacionadas à padronização construtiva e à reprodutibilidade dos resultados.

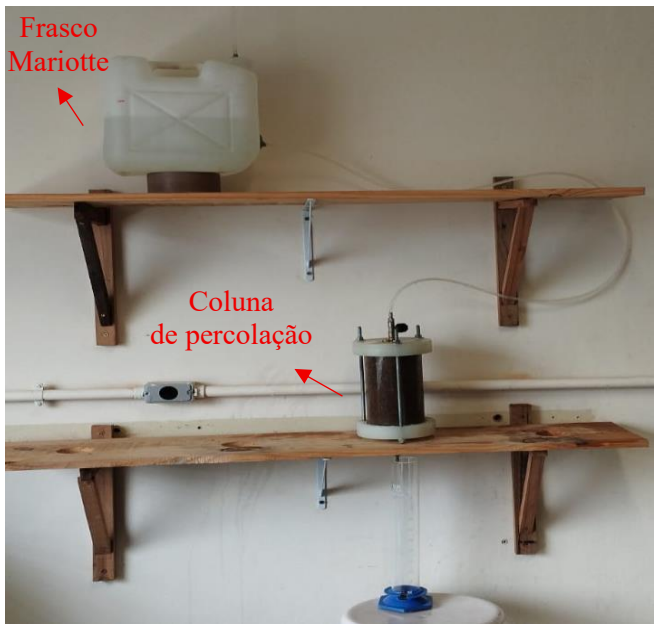



Figura 1. Disposição do frasco de Mariotte e da coluna de percolação utilizada nos testes experimentais
Fonte: Autor, 2026

### 2.3 Caracterização Física da Areia

A caracterização granulométrica da areia utilizada foi realizada por meio de ensaio de peneiramento conforme a ABNT NBR 7181, utilizando-se uma amostra de 1000 g previamente seca ao ar. Inicialmente, a

amostra foi submetida à peneira com abertura de 2,0 mm visando a separação de partículas com maior dimensão. Em seguida, o material passante foi submetido a um conjunto de peneiras com aberturas padronizadas, organizadas em ordem decrescente, sendo o conjunto submetido à agitação manual.

A massa específica aparente adotada para o preenchimento da coluna foi de 1,5 g/cm³, valor compatível com areias pouco a medianamente compactadas, indicando estrutura granular com índice de vazios relativamente elevado, conforme descrito por Pinto (2006). Essa condição é representativa de solos arenosos com maior potencial de permeabilidade.

### 2.4 Montagem Experimental da Coluna de Percolação

Inicialmente, foram realizados testes preliminares com as colunas disponíveis, sendo selecionada aquela que apresentou melhor desempenho quanto à estanqueidade e às conexões hidráulicas com o frasco de Mariotte e o recipiente coletor. Após a seleção, a coluna foi higienizada e preparada para montagem do ensaio.

Na sequência, foi inserido papel filtro na base da coluna, recortado conforme o diâmetro interno do tubo acrílico, com a finalidade de melhorar a distribuição do fluxo e evitar a mobilização de partículas. Posteriormente, a coluna foi preenchida manualmente com a areia previamente preparada, totalizando massa de 2,350 kg, para que tivesse a massa específica aparente de 1,5 g/cm². Após o preenchimento completo, foi posicionado novo papel filtro na parte superior do solo arenoso. Por fim, a coluna foi fechada e conectada ao sistema hidráulico para execução dos ensaios.

### 2.5 Testes

Com o sistema devidamente montado, foram realizados ensaios de percolação com água destilada e solução de azul de metileno, sob dois gradientes hidráulicos distintos. O gradiente hidráulico foi definido pela razão entre a carga hidráulica aplicada e o comprimento da coluna (20 cm). No primeiro ensaio com água, foi aplicado gradiente hidráulico de 2,075, correspondente à altura hidráulica constante de 41,5 cm. No segundo ensaio com água, o gradiente foi elevado para 3,350, correspondente à altura hidráulica de 67 cm.

Na sequência, foram realizados ensaios com solução de azul de metileno na concentração de 100 mg/L, preparada em laboratório com água destilada. O terceiro ensaio foi conduzido com gradiente hidráulico de 2,075 e o quarto com gradiente de 3,350, mantendo-se as mesmas condições experimentais anteriores. Todos os ensaios foram realizados com fluxo descendente e coluna saturada. Em razão do caráter exploratório do estudo, foi realizado apenas um ensaio por condição experimental, o que constitui uma limitação metodológica considerada na análise dos resultados.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos permitiram caracterizar fisicamente o meio poroso e a partir dos ensaios em colunas de percolação avaliar o comportamento hidráulico, com ênfase na determinação do coeficiente de permeabilidade à carga constante sob diferentes gradientes hidráulicos. Inicialmente, são apresentados os aspectos relacionados à caracterização do solo, seguidos pelos resultados hidráulicos.

O Gráfico 1 mostra a curva granulométrica obtida para o material utilizada no ensaio de percolação. A análise granulométrica indicou predominância de partículas de areia, com maior ocorrência da fração média (50,3%), seguida pela grossa (41,5%) e fina (8,2%). De acordo com a classificação granulométrica estabelecida pela ABNT NBR, trata-se de um solo predominantemente arenoso.

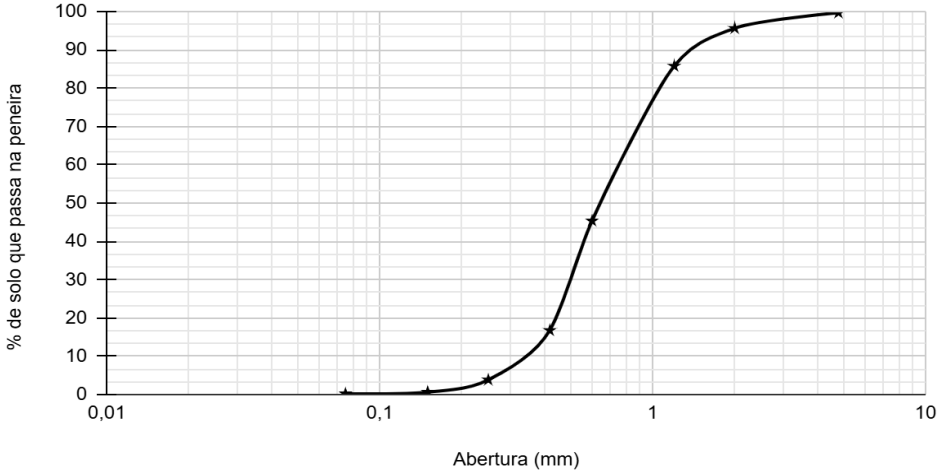



Gráfico 1. Análise Granulométrica.
Fonte: Elaborada pelas autoras.

No que confere ao comportamento do coeficiente de permeabilidade da areia sob diferentes gradientes hidráulicos, sendo os fluidos percolantes a água e a solução de azul de metileno, tem-se os resultados mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de coeficientes de permeabilidade, gradientes hidráulicos e vazão.

| Teste | Altura da carga hidráulica constante (h) | Gradiente hidráulico (i) | Permeabilidade ($k_{médio}$) | Vazão (Q) |
|---|---|---|---|---|
| | (cm) | - | (cm/s) | ($cm^3/s$) |
| Água | 41,5 | 2,075 | 0,0133 | 2,166 |
| | 67 | 3,350 | 0,0088 | 2,333 |
| Azul de metileno | 41,5 | 2,075 | 0,0133 | 2,166 |
| | 67 | 3,350 | 0,0114 | 3,000 |

Com base nos resultados apresentados na Tabela 1, os coeficientes de permeabilidade determinados para a areia à percolação de água sob os gradientes hidráulicos de 2,075 e 3,350 foram iguais a 0,0133 cm/s e 0,0088 cm/s, respectivamente. Os resultados obtidos situam-se na faixa típica de areias médias a grossas pouco compactadas ($10^{-1}$ e $10^{-4}$ cm/s), conforme valores clássicos apresentados pela literatura Geotécnica (Pinto, 2006, Craig, 2007). Além disso, esses resultados confirmam a elevada condutividade hidráulica característica de solos arenosos com baixo teor de finos, apontam que os gradientes hidráulicos adotados não influenciaram na ordem de grandeza do parâmetro obtido, e ainda mostram ser compatíveis com o comportamento esperado para ensaios em permeâmetro de carga constante sob regime de escoamento laminar, onde é válida a aplicação da Lei de Darcy.

É importante destacar que a massa específica aparente adotada para a areia com vistas à realização dos testes experimentais foi de 1,5 $g/cm^3$. O valor adotado é compatível com valores típicos de areias pouco a medianamente compactadas, indicando estrutura granular com índice de vazios relativamente elevado (Pinto, 2006). Sendo assim, o comportamento relatado é coerente com o coeficiente de permeabilidade determinado experimentalmente, característico de solos arenosos com baixa fração de finos e elevado índice de vazios, resultando numa elevada condutividade hidráulica.

Em relação ao fluido percolante intitulado ‘traçador’, solução de azul de metileno, os coeficientes de permeabilidade determinados sob os gradientes hidráulicos de 2,075 e 3,350 foram iguais a 0,0133 cm/s e 0,0114 cm/s, respectivamente. Observa-se que os valores obtidos mantiveram-se na mesma ordem de grandeza daqueles determinados com o uso de água destilada, indicando que a substituição do fluido percolante não provocou alterações significativas no comportamento hidráulico do solo arenoso estudado. Esse resultado é

compatível com o esperado para solos granulares com baixo teor de finos, nos quais o coeficiente de permeabilidade depende predominantemente da granulometria, da estrutura e do índice de vazios do meio poroso, sendo pouco influenciado por interações físico-químicas entre o fluido e as partículas sólidas (Pinto, 2006; Craig, 2007, Mitchell; Soga, 2005). Além disso, em solos arenosos, caracterizados por baixa superfície específica, a adsorção do azul de metileno tende a ser reduzida, o que limita efeitos de retenção do corante e de colmatação dos poros, favorecendo o predomínio do transporte por advecção (Mitchell; Soga, 2005).

Na Tabela 1 observa-se ainda uma pequena variação entre os coeficientes de permeabilidade determinados com água destilada (0,0088 cm/s) e com a solução de azul de metileno (0,114 cm/s) sob o maior gradiente hidráulico (3,350), o que pode ser atribuída a pequenas variações experimentais decorrentes da heterogeneidade natural do meio granular, bem como as diferenças nas propriedades físico-químicas do fluido percolante, especialmente viscosidade e densidade, que influenciam diretamente a mobilidade do escoamento em meios porosos saturados conforme previsto pela Lei de Darcy (Freeze; Cherry, 1979; Pinto, 2006). Ademais, em ensaios realizados em colunas de percolação laboratoriais, pequenas variações na acomodação das partículas e na eliminação de bolhas de ar aprisionadas na matriz podem influenciar a condutividade hidráulica aparente, sem representar alteração significativa do comportamento do solo em estudado.

Por fim, o aumento do gradiente hidráulico não resultou em alterações significativas na ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade, indicando que o regime de escoamento permaneceu predominantemente laminar nas condições experimentais analisadas. Dessa forma, os resultados obtidos confirmam a adequação do azul de metileno como traçador em ensaios laboratoriais de percolação em solos arenosos, permitindo a observação visual dos processos de transporte sem interferir de maneira relevante no comportamento hidráulico do meio poroso, além de reforçar o potencial de aplicação da metodologia experimental como ferramenta didática no ensino de Geotecnia Ambiental.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais são apresentadas tendo em vista o objetivo de avaliar experimentalmente o comportamento da permeabilidade de um solo arenoso sob diferentes gradientes hidráulicos em ensaios de colunas de percolação com água e azul de metileno, permitindo discutir a validade da Lei de Darcy e a influência do fluido percolante no comportamento hidráulico do meio poroso.

Os ensaios em colunas de percolação permitiram determinar o coeficiente de permeabilidade de um solo predominantemente arenoso sob diferentes gradientes hidráulicos, apresentando valores compatíveis com aqueles reportados na literatura para areias médias a grossas pouco compactadas. Os resultados obtidos indicaram comportamento hidráulico coerente com a estrutura granular do material e com a predominância do regime de escoamento laminar nas condições experimentais analisadas.

A comparação entre os ensaios realizados com água destilada e com solução de azul de metileno mostrou que a substituição do fluido percolante não resultou em alterações significativas na ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade, confirmando a hipótese inicialmente estabelecida e evidenciando que o comportamento hidráulico do solo foi controlado principalmente pelas características físicas do meio poroso.

Por fim, os resultados demonstraram a viabilidade do uso do azul de metileno como traçador em ensaios laboratoriais com solos arenosos, sem interferência relevante na condutividade hidráulica do material. Nesse sentido, a metodologia empregada apresenta potencial de aplicação em estudos experimentais de transporte de solutos em meios porosos, além de contribuir como recurso didático no ensino de processos de fluxo em Geotecnia Ambiental

Como continuidade desta investigação experimental, pretende-se realizar ensaios em colunas de percolação com solos contendo diferentes teores de fração fina e distintos índices de compactação, bem como com o uso de outras soluções traçadoras representativas de cenários ambientais reais, como soluções salinas e metais potencialmente tóxicos. Essas abordagens poderão ampliar a compreensão dos mecanismos de transporte de solutos em meios porosos saturados e fortalecer a aplicação das colunas de percolação como ferramenta experimental e didática no contexto da Geotecnia Ambiental.

**AGRADECIMENTOS**

Agradecimento à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pelo apoio institucional à realização desta pesquisa.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). NBR 6502: *Rochas e solos – Terminologia*. Rio de Janeiro:ABNT, 1995.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro:ABNT, 2025.

Bernardes, R. R. (2022) *Montagem e teste laboratorial de coluna para ensaio de transporte de contaminantes em solos*. In: COBRAMSEG, Campinas.

Boscov, M. E. G. (2008) *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos.

Craig, R. F. (2007) *Mecânica dos solos*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC.

Chiossi, N. (2013) Geologia de engenharia, 3ª ed., Oficina de Textos, São Paulo, p. 391–392.

Fetter, C. W. (2001) *Applied hydrogeology*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Freeze, R. A.; Cherry, J. A. (1979) Groundwater. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Mitchell, J. K.; Soga, K. (2005) Fundamentals of soil behavior. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons.

Pinto, C. S. (2006) Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

Shackelford, C. D. (2014) The geoenvironmental engineering: principles and applications. Boca Raton: CRC Press, 2014.

Silva, T. F.; Souza, A. C.; Oliveira, M. R.; et al. (2022) *Transporte de contaminantes em solos e implicações ambientais*. Engenharia Sanitária e Ambiental, 27(2).