



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM ENGENHARIA  
SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**DAIANE FERNANDES BARBOSA DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE DO FLUXO DE ÁGUA EM SOLO SILTE ARENOSO ATRAVÉS DA  
DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

**CAMPINA GRANDE - PB  
2024**

DAIANE FERNANDES BARBOSA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DO FLUXO DE ÁGUA EM SOLO SILTE ARENOSO ATRAVÉS DA  
DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

Trabalho de Conclusão de Curso (Artigo) apresentado a Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

**Orientador:** Prof. Dr. William de Paiva

**CAMPINA GRANDE - PB  
2024**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48a Oliveira, Daiane Fernandes Barbosa de.  
Análise do fluxo de água em solo silte arenoso através da  
dinâmica de fluidos computacional (cfd) [manuscrito] / Daiane  
Fernandes Barbosa de Oliveira. - 2024.  
29 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em  
Engenharia sanitária e ambiental) - Universidade Estadual da  
Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

"Orientação : Prof. Dr. William de Paiva, Departamento de  
Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT".

1. Permeabilidade do solo. 2. Método das Diferenças  
Finitas. 3. Modelagem Matemática. I. Título

21. ed. CDD 620.106 4

DAIANE FERNANDES BARBOSA DE OLIVEIRA

ANÁLISE DO FLUXO DE ÁGUA EM SOLO SILTE ARENOSO ATRAVÉS DA  
DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso  
de Engenharia Sanitária e Ambiental da  
Universidade Estadual da Paraíba,  
como requisito parcial à obtenção do  
título de Bacharela em Engenharia  
Sanitária e Ambiental

Aprovada em: 21/11/2024

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ruth Silveira do Nascimento** (\*\*\*.217.384-\*\*), em **29/11/2024 11:01:42** com chave **7634cbc6ae5a11efae981a7cc27eb1f9**.
- **Carlos Antonio Pereira de Lima** (\*\*\*.847.524-\*\*), em **29/11/2024 16:55:51** com chave **ef6db04eae8b11ef943306adb0a3afce**.
- **William de Paiva** (\*\*\*.897.104-\*\*), em **29/11/2024 14:58:41** com chave **916b885aae7b11efbfd72618257239a1**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse [https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar\\_documento/](https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/) e informe os dados a seguir.

**Tipo de Documento:** Termo de Aprovação de Projeto Final

**Data da Emissão:** 02/12/2024

**Código de Autenticação:** 2fbecc



Ao meu pai, Manoel Fernandes, e minha  
mãe, Jaci Barbosa, por serem minha  
eterna inspiração e fonte de orgulho.  
DEDICO.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Permeâmetro de carga constante.....	12
<b>Figura 2</b> - Viscosidade da água em função da temperatura .....	14
<b>Figura 3</b> - Fluxograma da metodologia aplicada .....	15
<b>Figura 4</b> - Pesagem do solo utilizado .....	17
<b>Figura 5</b> - Peneiramento do solo.....	17
<b>Figura 6</b> - Secagem das amostras .....	18
<b>Figura 7</b> - Preenchimento com brita 19.....	18
<b>Figura 8</b> - Preenchimento e compactação do solo. ....	19
<b>Figura 9</b> - Quantidade de água utilizada .....	19
<b>Figura 10</b> - Inserção da água .....	20
<b>Figura 11</b> - Terminologia das partes de uma malha .....	20
<b>Figura 12</b> - Teste de percolação da água em 1 min e 49 s, no compartimento 1.....	21
<b>Figura 13</b> - Teste de percolação da água em 2 min e 16 s, no compartimento 2.....	21
<b>Figura 14</b> - Teste de percolação da água em 1 min e 30 s, no compartimento 3.....	22
<b>Figura 15</b> - Código utilizado no Python .....	23
<b>Figura 16</b> - Vazão ao longo do tempo .....	24
<b>Figura 17</b> - Velocidade ao longo do tempo.....	24

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>Infiltração de água no solo</b> .....	<b>9</b>
<b>3.2</b>	<b>Aterro Sanitário</b> .....	<b>9</b>
<b>3.3</b>	<b>Percolação</b> .....	<b>10</b>
<b>3.4</b>	<b>Modelagem Matemática</b> .....	<b>10</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Método das diferenças finitas</b> .....	<b>11</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Lei de Darcy</b> .....	<b>11</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Desenvolvimento do Modelo</b> .....	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>15</b>
<b>4.1</b>	<b>Preparo do solo</b> .....	<b>16</b>
<b>4.2</b>	<b>Montagem do protótipo</b> .....	<b>18</b>
<b>4.3</b>	<b>Modelagem matemática no Python</b> .....	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1</b>	<b>Simulação física</b> .....	<b>21</b>
<b>5.2</b>	<b>Simulação Numérica</b> .....	<b>23</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>25</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>26</b>

## ANÁLISE DO FLUXO DE ÁGUA EM SOLO SILTE ARENOSO ATRAVÉS DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

### ANALYSIS OF WATER FLOW IN SANDY SILT SOIL USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Daiane Fernandes Barbosa de Oliveira <sup>\*1</sup>

#### RESUMO

Este artigo discute o estudo e desenvolvimento de pesquisa que possam entender o comportamento da percolação da água em um solo silte arenoso. O objetivo geral é analisar, por meio da modelagem matemática utilizando o Método das Diferenças Finitas (MDF), a percolação de água em uma camada de solo de base de aterro em uma região semiárida de Campina Grande. A metodologia incluiu a modelagem matemática no ambiente Spyder da linguagem Python utilizando o MDF, e experimentos práticos com solo sem controle de energia de compactação, envolvendo o preparo do solo, montagem do protótipo e modelagem matemática. Protótipos foram montados para visualizar o comportamento da água ao longo do tempo. Os resultados indicam boa permeabilidade do solo, confirmados pela modelagem. Esses resultados incluem observações visuais do protótipo, indicando um tempo de percolação de 1 min e 49 s no primeiro compartimento, 2 min e 16 s no segundo compartimento e 1 min e 30 s no terceiro compartimento, obtendo uma boa correlação entre o modelo numérico e os experimentos práticos, validando a metodologia proposta. No desenvolvimento do modelo matemático, foram utilizadas equações diferenciais para o Método das Diferenças Finitas, com foco na condução transiente unidimensional. A modelagem da percolação foi baseada no modelo da Lei de Darcy. A modelagem numérica no Spyder mostrou uma boa permeabilidade da camada de solo ao longo do tempo, com boa percolação em intervalos específicos. Em conclusão, a combinação entre abordagem experimental e modelagem numérica mostrou-se eficaz para compreender o comportamento da água. O uso do Spyder Python se mostrou uma ferramenta valiosa para desenvolver e avaliar o modelo.

**Palavras-Chave:** permeabilidade do solo; método das diferenças finitas; modelagem matemática.

#### ABSTRACT

This article discusses the study and development of research aimed at understanding the behavior of water percolation in a sandy silt soil. The main objective is to analyze water percolation in a base soil layer of an embankment in the semi-arid region of Campina Grande through mathematical modeling using the Finite Difference Method

---

<sup>1</sup> Graduanda do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). [daiane.oliveira@aluno.uepb.edu.br](mailto:daiane.oliveira@aluno.uepb.edu.br)

(FDM). The methodology included mathematical modeling in the Spyder environment of the Python programming language using the FDM, as well as practical experiments

---

with soil without compaction energy control, involving soil preparation, prototype assembly, and mathematical modeling. Prototypes were set up to visualize the behavior of water over time. The results indicate good soil permeability, confirmed by the modeling. These results include visual observations of the prototype, indicating percolation times of 1 minute and 49 seconds in the first compartment, 2 minutes and 16 seconds in the second compartment, and 1 minute and 30 seconds in the third compartment, achieving a good correlation between the numerical model and practical experiments, thereby validating the proposed methodology. In developing the mathematical model, differential equations for the Finite Difference Method were applied, focusing on transient one-dimensional conduction. The percolation modeling was based on Darcy's Law. The numerical modeling in Spyder demonstrated good soil layer permeability over time, with effective percolation at specific intervals. In conclusion, the combination of experimental and numerical modeling approaches proved effective for understanding water behavior. The use of Spyder Python emerged as a valuable tool for developing and evaluating the model. For future research, it is recommended to control compaction energy, use soils with less organic matter to better visualize percolation lines, and employ dyes to facilitate visualization of water flow paths.

**Keywords:** soil permeability; finite difference method; mathematical modeling.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento científico trouxe consigo promessa de solucionar os problemas vivenciados pelos seres humanos, deixando de lado, inicialmente, a preocupação com a finitude dos recursos naturais e o impacto no meio ambiente.

A questão ambiental aparece também no coração de novas teorias sociais. É o caso de Ulrich Beck, que analisa as relações entre sociedade e natureza, substituindo a ideia de ordem social pela de risco. Beck (1992, 1995) afirma que a principal característica das sociedades na “modernidade pós-industrial” é o risco sistêmico. No novo padrão “reflexivo” de modernização o “paradigma da escassez” (lógica de produção de riquezas da sociedade industrial) estaria sendo substituído pelo

“paradigma do risco”. Os resíduos do processo produtivo estariam crescendo, numa “expropriação ecológica” do estoque planetário de alimento, ar e água, gerando e difundindo novos riscos objetivos (químicos, nucleares, biogenéticos). Nesta “sociedade industrial de risco”, os problemas ambientais teriam escala global e consequências irreversíveis, atingindo os próprios produtores de risco.

O controle da percolação em meios porosos talvez seja o problema de maior relevância nos projetos diversos, e a análise do comportamento do fluxo é realizada predominantemente por leis simples, como a Lei de Darcy. No início até a metade do século XX foram realizados estudos buscando ampliar o estudo do fluxo a partir da Lei de Darcy, por autores como Kozeny (1927), Carman (1937, 1956), Ergun (1952), , incluindo variáveis de caracterização dos sólidos (ou poros) e que influenciam a

distribuição de carga e a velocidade do fluxo. Entre as variáveis estão a porosidade do solo, a tortuosidade dos microcanais, a esfericidade e distribuição das partículas. Contudo, esses avanços ainda podem ser considerados insuficientes devido às grandes simplificações geométricas nos meios porosos utilizadas para possibilitar a análise matemática e teórica do problema de fluxo. Observa-se que, mesmo após quase um século, a influência do fluxo no nível dos grãos sólidos ainda é muito pouco conhecida. Critérios puramente empíricos continuam sendo utilizados na grande maioria dos projetos geotécnicos que envolvem previsão de erosão potencial, dimensionamento de filtros, drenagem de maciços permeáveis etc.

A modelagem matemática está presente na vida do homem desde os tempos remotos, ao utilizar conhecimentos matemáticos para modelar e resolver situações problemáticas com as quais se deparava. Quando esses conhecimentos se mostravam insuficientes, a busca de novos objetos e/ou relações matemáticas fazia-se necessário (Costa e Ghedin, 2007). É uma ferramenta de suma importância na construção do conhecimento, os modelos são utilizados para a formulação de hipótese e para compreender novas ideias que podem ser analisadas. É uma estratégia utilizada para obter alguma explicação ou entendimento de situações reais.

Uma característica essencial no desenvolvimento de projetos que envolvem a presença de água é o reconhecimento da importância dos pequenos detalhes da natureza. Em algumas situações, o engenheiro pode se deparar com a necessidade de controlar o movimento da água no solo. O estudo do fluxo de água nos solos é crucial, pois, ao se deslocar dentro de um maciço, a água exerce forças sobre as partículas sólidas, alterando o estado de tensão do terreno.

Neste contexto, faz-se necessário o entendimento matemático do fluxo de água em um solo silte arenoso utilizando a fluido dinâmica computacional. Assim sendo, este trabalho propõe a modelagem numérica da percolação água, que foram executadas em *software* de dinâmica de fluidos computacional (CFD), assim validando os caminhos preferenciais no solo e possíveis plumas de contaminação, além de ser verificado em um protótipo.

## **2 OBJETIVO GERAL**

Avaliar por meio da modelagem matemática utilizando o Método das Diferenças Finitas, os possíveis caminhos preferenciais da água em um solo silte arenoso da camada de base de um aterro sanitário em uma região semiárida, utilizando a fluidodinâmica computacional.

### **2.1 Objetivos Específicos**

- Propor a aplicação da fluidodinâmica computacional para avaliar os caminhos preferenciais da água;
- Observar o comportamento através de um protótipo o modelo desenvolvido, avaliando a percepção visual da percolação;
- Avaliar os resultados por meio da resolução analítica e numérica da velocidade e vazão do fluido percolado;
- Propor a construção de um algoritmo na linguagem Python, e apresentar uma ideia do comportamento da vazão e velocidade do fluido percolado.

### 3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Infiltração de água no solo

As águas pluviais penetram na camada de cobertura pela ação da gravidade, ou seja, por infiltração. A infiltração de água no solo é um dos fenômenos físicos mais importantes em camadas de cobertura, pois a partir desta é possível estimar a capacidade de escoamento superficial que influencia diretamente na erosão do solo (Costa et al., 2018).

A capacidade de infiltração de água do solo depende de diversos fatores, tais como: umidade antecedente, condutividade hidráulica, compactação, teor orgânico, inclinação e deformação da superfície, presença de vegetação e duração e intensidade de precipitação (Morais et al., 2018). Com relação à umidade do solo, a velocidade de infiltração é maior para solos mais secos. À medida que vai umedecendo, a capacidade de infiltração diminui até alcançar a velocidade de equilíbrio, em que a capacidade de absorção de água é praticamente nula. Quando o solo já se encontra úmido, devido à chuva anterior, há uma maior possibilidade de escoamento (Molinari & Viera, 2004). As chuvas de maior intensidade fazem com que o solo atinja rapidamente sua capacidade de infiltração, gerando um excesso de chuva que escoará superficialmente.

A infiltração da água da chuva na cobertura do aterro e a umidade presente no resíduo geram um líquido chamado de percolado, chorume ou ainda lixiviado. O chorume é a principal fonte de poluição em aterros, que é gerado através da percolação da água da chuva que infiltra sobre o maciço, carregando os produtos da decomposição biológica e elementos minerais em degradação. Esse efluente traz um grave risco de contaminação para as águas superficiais e principalmente para as águas subterrâneas (SOUZA, 2005).

#### 3.2 Aterro Sanitário

A definição de aterro sanitário segundo a norma ABNT NBR 8419/1992 descreve-o como um espaço destinado à disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos, visando evitar impactos significativos no meio ambiente e na saúde pública. Essa definição é fundamentada em critérios de engenharia e normas operacionais, que classificam o aterro sanitário como uma modalidade segura para a disposição final de resíduos, conforme estabelecido pela CETESB em 1992 (Conde; Stachiw; Ferreira, 2014). Os aterros sanitários, embora sejam uma opção aceitável, geram um lixiviado complexo, destacando a necessidade de tratamento. Estudos como o de Morandini et al. (2023) buscaram quantificar as substâncias húmicas no lixiviado de aterros sanitários, revelando uma redução significativa após tratamento biológico, enfatizando a importância do tratamento adequado para mitigar riscos ambientais e de saúde pública.

Adicionalmente, o paradigma contemporâneo na disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos tem no Aterro Sanitário uma abordagem moderna e sustentável. Diferentemente dos antiquados lixões, os aterros sanitários são concebidos com a finalidade explícita de minimizar, quando bem operado, os impactos ambientais e salvaguardar a saúde pública (Conde; Stachiw; Ferreira, 2014). Essas estruturas

complexas, destinadas à deposição controlada dos resíduos, visam propiciar a decomposição gradual e segura dos materiais descartados

### 3.3 Percolação

Estudos atuais destacam a importância da percolação de fluidos em meios porosos, com foco nas camadas de revestimento de aterros sanitários. Essas pesquisas se concentram na compreensão da permeabilidade e do comportamento hidráulico desses materiais, investigando minuciosamente como essas camadas reagem quando expostas a diferentes fluidos, incluindo água e lixiviado (Lima et al., 2022).

Na análise do fluxo em meios porosos, adota-se frequentemente uma abordagem que se vale de modelos simplificados, nos quais o meio poroso é tratado como contínuo. Tais modelos fornecem informações acerca do comportamento macroscópico médio do escoamento. Contudo, é pertinente ressaltar que esses modelos podem não compreender de maneira abrangente as variáveis efetivas presentes nos vazios, as quais podem apresentar notáveis discrepâncias em relação aos valores médios obtidos nos modelos macroscópicos (De Farias et al., 2023).

O estudo da permeabilidade em meios porosos desempenha um papel vital em diversas aplicações da ciência e engenharia, como o projeto de colunas empacotadas, reatores de leito fixo, leitos de filtração e sistemas de permeação de água/óleo em matrizes porosas. A permeabilidade, representada por "k," é um parâmetro essencial que estabelece a relação entre o escoamento de fluidos, o gradiente de pressão e a viscosidade do fluido no contexto dessas análises (Barbosa, 2019).

Em um trabalho recente, foi conduzida uma investigação abordando a permeabilidade à água e ao lixiviado em misturas de solo e bentonita em aterros sanitários, o que está intimamente relacionado à percolação de fluidos em meios porosos. A pesquisa visou, compreender como esses materiais reagem quando sujeitos à percolação de fluidos (Lima et al., 2022).

Lima et al., (2022) demonstraram como a percolação de fluidos em meios porosos, em camadas de revestimento de aterros sanitários é de suma importância para a compreensão da permeabilidade e do comportamento hidráulico desses materiais, especialmente, quando submetidos a diversos fluidos, como água e lixiviado.

### 3.4 Modelagem Matemática

Em um paralelo intrigante, a modelagem matemática surge como uma ferramenta primordial na resolução de problemas complexos, possibilitando a representação matemática de fenômenos do mundo real (Bean, 2019). O Método das Diferenças Finitas, uma técnica consagrada na resolução numérica de equações diferenciais parciais, encontra aplicação eficaz na linguagem de programação Python. Esta abordagem permite não apenas uma compreensão mais profunda de fenômenos físicos complexos, mas também facilita a experimentação e a análise de diversos cenários.

A resolução computacional de Equações de Diferenças Parciais (EDP) em uma região contínua, que envolve a obtenção de valores para a variável dependente em cada ponto. Entretanto, ao utilizar técnicas numéricas, a região não pode ser tratada como contínua, pois o método numérico obtém soluções em pontos discretos da malha. Essa discretização, representada por uma malha de pontos, é crucial para lidar numericamente com as EDPs. As Equações de Diferenças Finitas (EDF) são escritas para cada ponto da região discretizada, proporcionando uma solução aproximada sujeita a erros inerentes ao processo de discretização e arredondamento nos cálculos (Fortuna, 2000).

### 3.4.1 Método das diferenças finitas

De acordo com Silva e Junior, (2023) os métodos numéricos são ferramentas matemáticas importantes para encontrar soluções de equações diferenciais. Tais métodos têm como característica aproximar a solução e costumam ser utilizados quando a solução exata de uma equação diferencial não é viável por meio de métodos analíticos.

O método das diferenças finitas pode ser utilizado para resolver problemas de valor de contorno ou valor inicial, envolvendo equações diferenciais ordinárias ou parciais. Assim, este método pode ser usado para solucionar as equações de modelos a parâmetros concentrados ou distribuídos (Pinto e Lage, 1997).

Os autores também dizem que o objetivo do método das diferenças finitas é transformar um problema composto por equações diferenciais em um problema formado por equações algébricas. O primeiro passo nesta direção é a chamada discretização do domínio da variável independente. A discretização consiste em dividir o domínio de cálculo em um certo número de subdomínios.

A utilização do Método das Diferenças Finitas em Python proporciona uma maneira eficiente de abordar uma variedade de problemas, desde a propagação de calor até a difusão de substâncias químicas em meios porosos (Miranda, 2018).

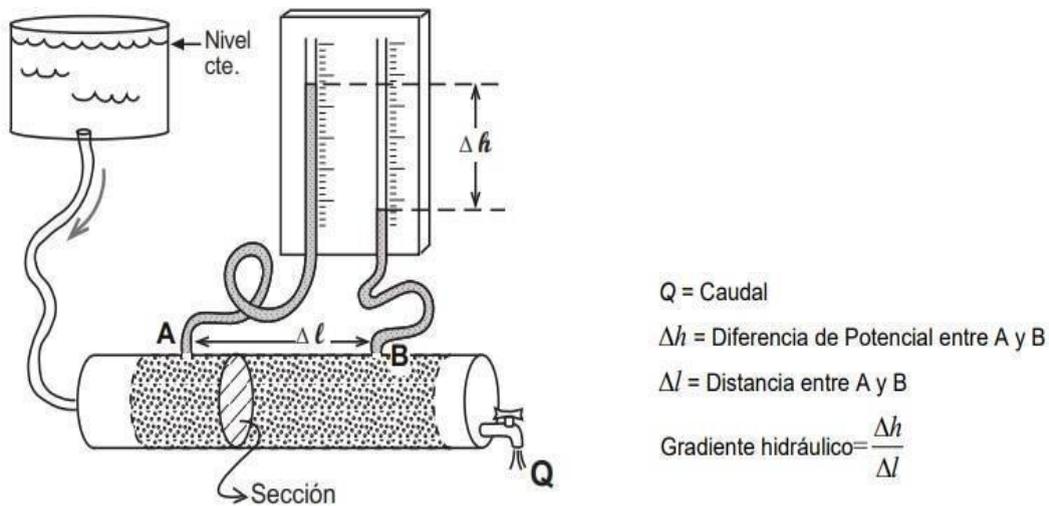
Bibliotecas poderosas, como NumPy e SciPy, dotam os pesquisadores e engenheiros de ferramentas especializadas para manipulação de *arrays* e resolução numérica de equações diferenciais (Bressert, 2012). Esta sinergia entre modelagem matemática e programação em Python emerge como uma valiosa ferramenta para cientistas que buscam compreender e resolver problemas complexos de forma precisa e eficiente, enquanto promove a colaboração e disseminação do conhecimento científico.

### 3.4.2 Lei de Darcy

Em 1856, Henry Darcy apresentou um extenso relatório sobre o fluxo de água através de meios porosos, que incluía um pequeno apêndice descrevendo seus experimentos e a formulação da lei. Esse pequeno anexo pode ser considerado o nascimento da hidrogeologia como ciência, sendo a base de todos os estudos físico-matemáticos posteriores sobre o fluxo de água subterrânea.

Nos laboratórios atuais dispomos de aparelhos muito semelhantes ao que Darcy utilizou, e que são chamados de permeâmetros de carga constante (Figura 1).

**Figura 1 - Permeâmetro de carga constante**



Fonte: SÁNCHEZ, (2022).

Permeâmetro, é um recipiente de seção constante por onde se faz circular água, conectando a um de seus extremos um reservatório elevado de nível constante. No outro extremo, regula-se o fluxo de saída por meio de uma torneira que, em cada experimento, mantém o fluxo também constante. Finalmente, mede-se a altura da coluna de água em vários pontos.

A partir de um experimento que Darcy realizou em um permeâmetro com vários materiais porosos e alterando as variáveis, ele deduziu que o fluxo que atravessava o permeâmetro era linearmente proporcional à seção e ao gradiente hidráulico. E que a constante de proporcionalidade era característica de cada areia ou material que preenchia o permeâmetro.

Ou seja: variando o fluxo com uma torneira e/ou movendo o reservatório elevado, os níveis da água nos tubos variam. Podemos também testar com permeâmetros de diâmetros diferentes e medir a altura da coluna de água em pontos mais ou menos próximos (diferentes  $\Delta l$ ). Pois bem: alterando todas as variáveis, sempre que utilizemos a mesma areia, é válido que:

$$Q = K \times \text{Sección} \times \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (\text{Eq 1})$$

E o valor de K permanece constante, desde que utilizemos a mesma areia. Darcy concluiu, portanto, que essa constante era própria e característica de cada tipo de areia. Essa constante foi chamada de permeabilidade (K), embora sua denominação correta atualmente seja condutividade hidráulica.

Como as unidades do fluxo Q são  $L^3/T$ , a seção é  $L^2$ , e  $\Delta h$  e  $\Delta l$  são comprimentos, verifica-se que as unidades da permeabilidade (K) são as de uma velocidade (L/T).

A expressão correta da Lei de Darcy é a seguinte:

$$q = -K \times (dh/dl) \quad (\text{Eq 2})$$

Onde:

q = Q/seção (ou seja: fluxo que circula por m<sup>2</sup> de seção);

K = Condutividade hidráulica

dh/dl = gradiente hidráulico

O sinal negativo deve-se ao fato de que o nível diminui no sentido do fluxo; ou seja, Δh ou dh são negativos, e o sinal negativo garante que o fluxo seja positivo SÁNCHEZ, (2022).

### 3.4.3 Desenvolvimento do Modelo

Segundo Silva (2016) o ponto inicial no desenvolvimento do modelo matemático é a obtenção das equações diferenciais que descrevem o transporte de poluentes em um meio poroso. Maliska (1995) relata que o primeiro passo para a obtenção das equações para o Método das Diferenças Finitas (MDF) aproximadas é discretizar o domínio de interesse, isto é, dividi-lo em células elementares.

A condutividade hidráulica saturada é uma das propriedades de maior relevância para estudos de movimento de água, substâncias químicas e solutos no solo. Este coeficiente representa uma das propriedades do solo de mais alta variabilidade e, segundo autores como Lumb (1966), Uzielli (2008) e Nagy et al. (2013), a variação pode ser tão elevada como 240%. Sua determinação depende de vários atributos do solo, principalmente da densidade (peso específico natural), densidade das partículas (peso específico real dos grãos), porosidade total, macro e microporosidade (Mesquita & Moraes, 2004). Além destas, a escolha do tipo de método de ensaio também pode influenciar os valores dos resultados obtidos.

Segundo Reichardt (1996) dentre as variáveis que influenciam o fluxo de água, a condutividade hidráulica se destaca, sendo um parâmetro que representa a facilidade com que o solo/rocha transmite água. Desta forma, o valor máximo de condutividade hidráulica é atingido quando o solo/rocha sedimentar se encontra saturado, e é definido como condutividade hidráulica saturada. A partir da condutividade hidráulica saturada e utilizando modelos matemáticos pode-se determinar a condutividade hidráulica não saturada.

A condutividade hidráulica é o coeficiente de proporcionalidade da lei de Henry Darcy de 1856, o qual pode ser escrito conforme apresentado na Equação 3.

$$q = k \cdot i \cdot A = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (\text{Eq 3})$$

Onde:

q = taxa de fluxo (m<sup>3</sup>/s); k =

condutividade hidráulica (m/s); i =

gradiente hidráulico

(adimensional =  $\Delta H/L$ );

$\Delta H$  = perda de carga (m) através da amostra do comprimento  $L$  (m);  $A$

= área da seção transversal perpendicular ao fluxo ( $m^2$ ).

A condutividade hidráulica da lei de Darcy depende não somente das propriedades do meio poroso, mas também das propriedades do líquido permeante. Daniel (1994) exemplifica o caso de areias, que podem ter baixa condutividade hidráulica se permeadas com óleo de motor quando comparadas a água (devido ao óleo ser mais viscoso que água). Uma forma alternativa para escrever a lei de Darcy está mostrada na Equação 4.

$$q = K \frac{\gamma \Delta H}{\mu} \frac{A}{L} \quad (\text{Eq 4})$$

Onde:

$K$  = permeabilidade intrínseca do solo (m/s);

$\gamma$  = peso específico do líquido permeante ( $g/m^2/s^2$ );  $\mu$

= viscosidade do líquido permeante (g/m/s).

Existe variação entre os solos no coeficiente de permeabilidade. O coeficiente depende essencialmente da *temperatura* e do *índice de vazios*.

Quanto maior for a temperatura, menor é a viscosidade da água e, portanto, ela consegue ter um melhor escoamento entre os vazios do solo e conseqüentemente aumenta o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ).

$K$ , portanto é inversamente proporcional a viscosidade da água, desta forma os valores de  $k$  são geralmente referidos à temperatura de 20°C.

$$K_{20} = K_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} = K_T \cdot C_V \quad (\text{Eq 5})$$

Onde:

$K_{20}$  = coeficiente de permeabilidade à temperatura de 20°C;

$K_T$  = coeficiente de permeabilidade à temperatura  $T$ ;

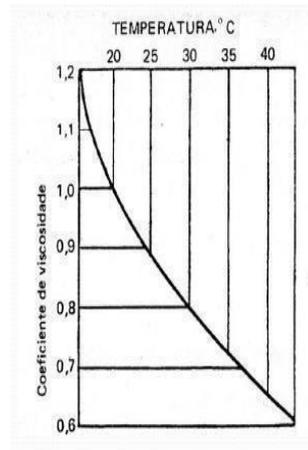
$\eta_{20}$  = viscosidade da água à temperatura de

20°C;  $\eta_T$  = viscosidade da água à temperatura  $T$ ;

$C_V$  = relação entre as viscosidades.

Os valores de  $C_V$  são fornecidos pelo gráfico da Figura 2.

**Figura 2** - Viscosidade da água em função da temperatura



Fonte: Caputo, 2000.

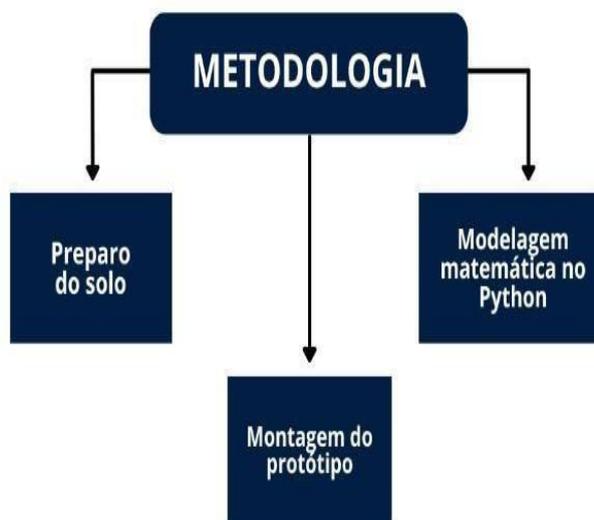
Segundo Helmholtz, a viscosidade da água em função da temperatura é dada pela fórmula empírica:

$$\eta = \frac{0,0178}{1+0,033T+0,00022T^2} \quad (\text{Eq 6})$$

#### 4 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento deste estudo foram divididos em duas partes, física (experimental) e numérica, com isso, foi dividida em três etapas, as quais foram cuidadosamente escolhidas para garantir a validade e confiabilidade dos resultados, sendo elas: Etapa 1 – Preparo do solo; Etapa 2 – Montagem do protótipo e Etapa 3 – Modelagem Matemática no Python. Como mostrado na (Figura 3).

**Figura 3** - Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

#### 4.1 Preparo do solo

Foram coletados solos da jazida de um aterro sanitário do semiárido paraibano, que, de acordo com Lima (2022), o solo foi caracterizado pela classificação do inglês The Unified Soil Classification System (USCS) - Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) através de ensaios laboratoriais, como areia siltosa. (Tabela 1).

**Tabela 1** - Granulometria e classificação das amostras.

Parâmetros	Amostras				
	SN	B	SB5	SB15	SB25
Granulometria *					
(%) Pedregulho	6,74	0,09	14,49	7,45	6,87
(%) Areia grossa	8,26	3,91	8,48	5,55	4,13
(%) Areia média	25,0	4,00	20,03	22,00	19,00
(%) Areia fina	31,89	35,00	30,79	35,00	36,50
(%) Silte	15,96	19,64	12,41	12,46	10,67
(%) Argila	12,15	37,36	13,80	17,54	37,36
Classificação (SUCS)	SM	CH	SM	SM	SC

**Legenda:** SB5 = Solo natural + 5% bentonita; SB15 = Solo natural + 15% bentonita e SB25 = Solo natural + 25% bentonita. \*Classificação segundo ABNT 6502 (ABNT, 1995) **Fonte:** Lima (2022).

Após a coleta e a caracterização do solo feita por Lima (2022), pesou-se uma amostra de 4.789 g de solo para o preenchimento de todo o protótipo (Figura 4).

**Figura 4** - Pesagem do solo utilizado.



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024.

Em seguida, todo o material foi peneirado, com o objetivo de eliminar os materiais indesejados, como pedras, galhos, resíduos e outros detritos que possam estar misturados ao solo como mostrado na Figura 5.

**Figura 5** - Peneiramento do solo.



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024.

Observando as recomendações da norma sobre a determinação da umidade hidrocópica e umidade de compactação é a NBR 6457 (ABNT, 2016). Pôde-se realizar a secagem dos materiais deixando as amostras por 24 horas em uma estufa com a temperatura 110 °C (Figura 6).

**Figura 6 -** Secagem das amostras.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

## 4.2 Montagem do protótipo

Inicialmente, foram preenchidos os compartimentos do protótipo com as dimensões (29 cm de comprimento x 12,5 cm de largura) e adicionada uma camada drenante antes da inserção do material. Para essa camada, foram utilizadas britas 19, com cerca de 2 cm de altura.

**Figura 7 -** Preenchimento com brita 19.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Na segunda etapa da montagem do protótipo, realizou-se o destorroamento de uma porção de solo previamente peneirado.

Em seguida, o material foi inserido nos compartimentos, formando uma camada de 3 cm de altura em cada compartimento, e foi realizada a compactação do

solo puro em todos os compartimentos, com o objetivo de separar as partículas menores das maiores, para assim, reduzir ao máximo os espaços vazios presentes no solo (Figura 8).

**Figura 8** - Preenchimento e compactação do solo.



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024.

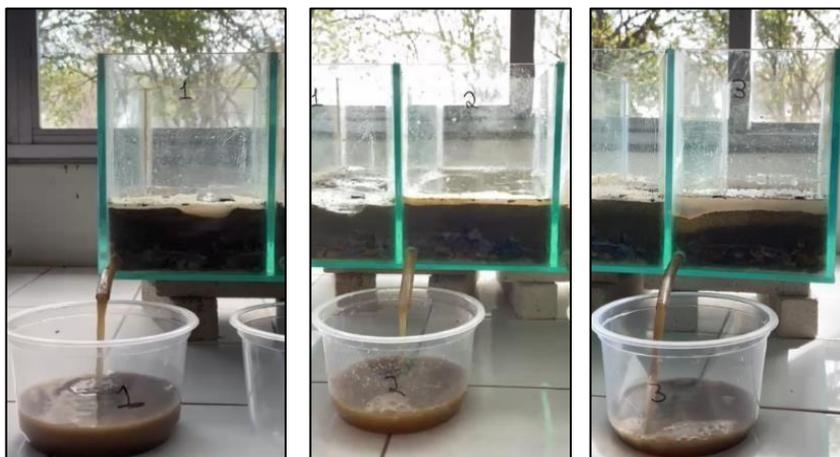
Posteriormente, foi coletado 1000 mL de água diretamente da torneira do laboratório, sendo utilizado um recipiente apropriado (Figura 9).

**Figura 9** - Quantidade de água utilizada.



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024.

Por fim, foi inserido 1000 mL de água *in natura* (Figura 10) no interior de cada compartimento para verificar-se, de forma visual seu comportamento com o solo, resultando uma lamina d'água de aproximadamente 2 cm em cada compartimento.

**Figura 10** - Inserção da água.

**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024.

Após a simulação realizada, uma única vez, nos três compartimentos, foi possível identificar que, o solo conseguiu reter aproximadamente 500 mL de toda água utilizada.

### 4.3 Modelagem matemática no Python

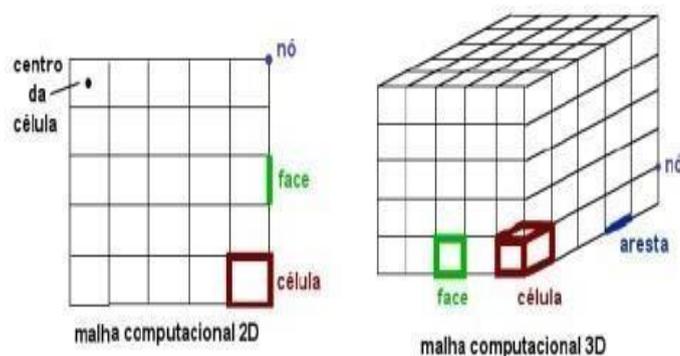
Para o desenvolvimento da modelagem matemática foi utilizado o *IDE* (Integrated Development Environment), ambiente *Spyder*, desenvolvendo métodos das diferenças finitas para analisar a percolação da água, faz-se necessário para a utilização de equações matemáticas, nelas descrever sobre os dados do fluido, como as forças que atuam sobre a água, temperatura, densidade e viscosidade.

Entretanto, para descrever nossas condições de contorno no *Spyder* utilizouse os dados de água *in natura*, ou seja, 100% de água, para analisar o comportamento, obtendo diferentes temperaturas, densidade e viscosidade no meio poroso.

Além disso, a equação utilizada no Python para desenvolver a dinâmica da percolação em meios porosos foi a do modelo proposto por Darcy em (1856).

O conjunto de células que aproximam a forma de um domínio é chamado de malha (Figura 11). A divisão do solo foi realizada em geometrias de vários cubos 0,1 em X e em Y e em Z 0,01, para domínios de geometrias bidimensionais e tridimensionais.

**Figura 11** - Terminologia das partes de uma malha



Fonte: Bakker 2002 adaptada por (Menezes 2019)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Simulação física

Observaram-se nos três compartimentos do protótipo, a percolação durante 1 min e 49 s (Figura 12), 2 min e 16 s (Figura 13) e após 1 min e 30 s (Figura 14) da adição da água. Pôde ser observado que já nos primeiros instantes obteve-se a percolação da água de forma gradual.

**Figura 12** - Teste de percolação da água em 1 min e 49 s, no compartimento 1.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

**Figura 13** - Teste de percolação da água em 2 min e 16 s, no compartimento 2.



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024.

**Figura 14** - Teste de percolação da água em 1 min e 30 s, no compartimento 3.



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024.

A variação na compactação do solo, associada à presença de pedras na matriz, influenciou significativamente o comportamento da percolação. Essas diferenças estruturais resultaram na formação de caminhos preferenciais para o fluxo de água, criando zonas de maior permeabilidade. As pedras atuaram como barreiras ou condutores que redirecionaram o fluxo, enquanto a menor compactação em determinadas áreas facilitou a infiltração localizada. Esse comportamento evidencia a importância de considerar as heterogeneidades do solo ao modelar processos de transporte hídrico.

Por fim, observação visual dos compartimentos do protótipo, em diferentes intervalos de tempo, revelou que houve uma ótima permeabilidade, retendo aproximadamente 500 mL da amostra de água utilizada.

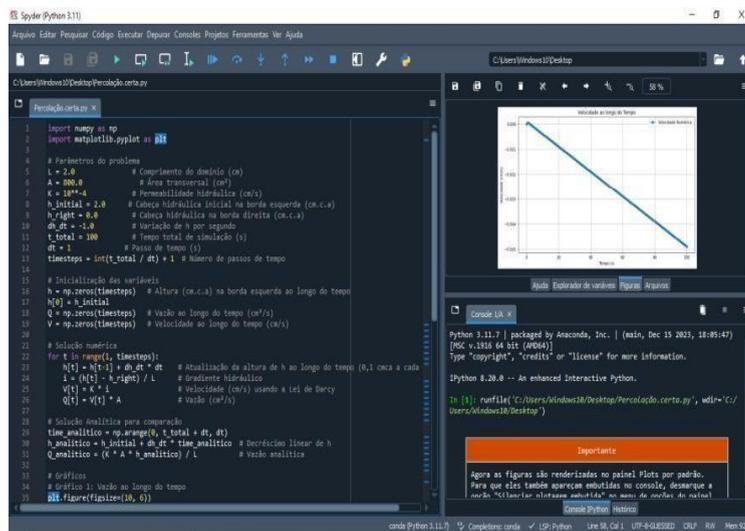
## 5.2 Simulação Numérica

O *Spyder* foi utilizado para a realização da formulação do método computacional, ele é um ambiente de desenvolvimento integrado de plataforma cruzada de código aberto para programação científica na linguagem *Python*. Com todo código descrito no software (Figura 15), a modelagem elaborada no programa resultou-se em dois gráficos (Figura 16 e Figura 17).

Contudo, a Figura 15 mostra-se a variação de vazão ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) em função do tempo (s) durante 100 segundos (tempo de modelagem). Sendo obtido duas comparações, a Vazão Numérica (curva contínua com marcadores) e Vazão Analítica (curva pontilhada), representam resultados obtidos por métodos diferentes para modelar e/ou calcular a vazão, obtendo o resultado de calibração do modelo.

Além disso, a vazão diminui de forma linear ao longo do tempo, indicando que o sistema segue um comportamento uniforme, com condições de fluxo constante.

Figura 15 - Código utilizado no Python.



Fonte: Elaborada pela autora, 2024.

Descrição dos parâmetros utilizados no software:

Parâmetros do problema:

$L = 2.0$  (Comprimento do domínio (cm));

$A = 800.0$  (Área transversal ( $\text{cm}^2$ );

$N = 50$  (Divisões do ambiente físico (cm/s)).

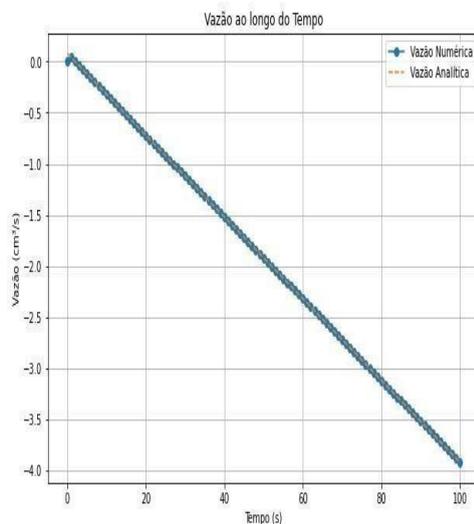
Condições de contorno do problema:

$h_{\text{inicial}} = 2.0$  (Carga hidráulica inicial na borda esquerda

(cm.c.a));  $h_{\text{certo}} = 0.0$  (Carga hidráulica na borda direita

(cm.c.a));  $dh_{\text{dt}} = -1.0$  (Variação de  $h$  por segundo);  $t_{\text{total}} = 100$

(Tempo total de simulação (s));  $dt = 1$  (Intervalo de tempo (s)).

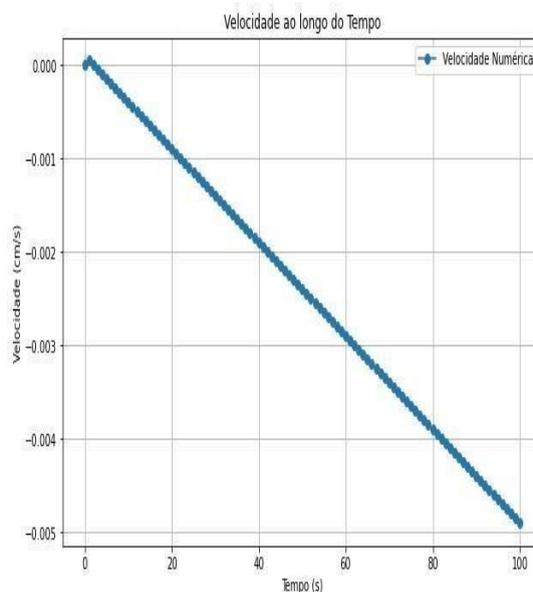
**Figura 16 - Vazão ao longo do tempo.**

**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024.

N segundo gráfico gerado (Figura 17) exibe a velocidade (cm/s), sendo o eixo das ordenadas, variando ao longo do tempo (s), eixo das abscissas, com base em dados numéricos (curva contínua com marcadores). A velocidade diminui de forma linear ao longo do tempo. Isso sugere que o sistema está submetido a uma força ou condição que provoca uma desaceleração constante.

A escala vertical mostra valores de velocidade negativa, esse comportamento é comum nesse ensaio, visto que, é um escoamento descendente.

**Figura 17 - Velocidade ao longo do tempo.**



**Fonte:** Elaborada pela autora, 2024.

## 6 CONCLUSÃO

A modelagem matemática revelou-se uma ferramenta fundamental e eficaz para identificar os possíveis caminhos preferenciais do fluxo de água, demonstrando que fatores como a compactação do solo e a presença de heterogeneidades, como pedras, influenciam diretamente o comportamento da percolação. Para isso, utilizouse o método de discretização pelo método das diferenças finitas e a equação de percolação proposta por Darcy.

A utilização da fluidodinâmica computacional mostrou-se uma abordagem promissora para avaliar o comportamento do fluxo em condições controladas. Os resultados obtidos foram consistentes e alinhados com os fenômenos esperados, validando a aplicação desse método em estudos de solo semiárido.

O protótipo construído permitiu observar de forma visual o comportamento do modelo desenvolvido. A percepção visual dos caminhos preferenciais de percolação corroborou os resultados teóricos e numéricos, confirmando a utilidade dessa abordagem experimental para validar modelos matemáticos.

A construção de um algoritmo na linguagem Python foi eficaz para simular e representar por meio de dois gráficos o comportamento da vazão e da velocidade do fluido ao longo do tempo. Os gráficos gerados demonstram que o modelo numérico acompanha bem as soluções analíticas, assim como a calibração desejada, reforçando a confiabilidade do método implementado.

Por fim, este estudo representa um ponto de partida, e algumas recomendações para pesquisas futuras incluindo a incorporação do controle de compactação no solo para avaliar diferentes graus de heterogeneidade, utilizar corantes no protótipo para facilitar a visualização dos caminhos preferenciais e

ampliar o uso de modelos computacionais para explorar a influência de variáveis como umidade inicial e composição do solo.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos - Procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

BARBOSA, Larissa de Souza Noel Simas. experimento didático em escoamentos de fluidos em meios porosos: uma proposta para o ensino prático de fenômenos de transporte. Revista de Ensino de Engenharia, v. 38, n. 1, 2019.

BECK, U. (1992), Risk Society: Towards a New Modernity. London, Sage.

BECK, U. (1995), Ecological Politics in an Age of Risk. Cambridge, Polity Press.

BEAN, Dale. O que é modelagem matemática?. Educação matemática em revista, v. 8, n. 9/10, p. 49-57, 2019.

CARMAN, P.C. (1937). Fluid flow through a granular bed. Trans. Instn. Chem. Engrs, 15: 150-156.

CARMAN, P.C. (1956). Flow of gases through porous media. Butterworths, London.

CONDE, Thassiane Telles; STACHIW, Rosalvo; FERREIA, Elvino. Aterro sanitário como alternativa para a preservação ambiental. Revista Brasileira de Ciências da Amazônia/Brazilian Journal of Science of the Amazon, v. 3, n. 1, p. 69-80, 2014.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos Solos e suas Aplicações. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000. 234 p.

Costa, D. M.; Mariano, M. O. H; Araújo, L. B; Jucá, J. F. T (2018). Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. Eng. Sanit. Ambient. vol.23 no.1 Rio de Janeiro.

Costa, H.R. e Ghedin, E. (2007). Epistemologia do Ensino de Matemática. Em: Universidade Luterana do Brasil (Org.), Anais, 4º Congresso Internacional de Ensino de Matemática (pp.01- 08), Rio Grande do Sul: Universidade Luterana do Brasil de Canoas (RS).

DANIEL, D.E. State-of-the-art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. In: HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND WASTE CONTAMINANT TRANSPORT IN SOIL.ASTM STP 1142, Proceedings...Philadelphia: David E. Daniel and Stephen J. Tratwein, Eds., ASTM, 1994, p. 30-78.

DE FARIAS, Márcio Muniz; NETO, Joaquim COSTA; FURNAS, PhD–Eletrobras. avanços no estudo de percolação em meios porosos na escala de grãos utilizando métodos numéricos híbridos. 2023.

ERGUN, S. (1952). Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress. 48:89–94.

FERREIRA, Walesca Emilia dos Santos. **Percolação de Lixiviado de Aterro Sanitário em Meio Poroso**. 2023. Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande.

FORTUNA, Armando de Oliveira. Técnicas computacionais para dinâmica dos fluídos: conceitos básicos e aplicações. . São Paulo: USP. . Acesso em: 20 out. 2023. , 2000.

KOZENY, J. (1927). Uber kapillare Leitung der Wasser in Boden, Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, 136, 271 – 306.

LIMA, Alisson do Nascimento. Permeabilidade à água e ao lixiviado de misturas solobentonita em aterro sanitário. 2022. 99f. (Dissertação de Mestrado), Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2022.

MIRANDA, Dayana da Silva. Solução da Equação de Schrodinger por diferenças finitas e pelo método variacional. 2018.

Molinari, D. C. & Vieira, A. F. G. (2004). Considerações Preliminares sobre a Capacidade de Infiltração de Água no Solo no Distrito Industrial II Manaus. V Simpósio Nacional de Geomorfologia I Encontro SulAmericano de Geomorfologia UFSM - RS, Rio Grande do Sul.

Morais, N.B.; Souza, C.C; Dias, E. O.; Bertolino, A V. F. A; Bertolino, L. C. (2018). Variabilidade da Condutividade Hidráulica e do Potencial Matricial em um Cambissolo com diferentes coberturas. XII SINAGEO - UGB - União da Geomorfologia Brasileira. Crato - Ceará.

MORANDINI, Luísa Peruchi et al. ISOLAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA FRAÇÃO DE CELULOSE OBTIDA A PARTIR DA BIOMASSA DE MILHETO PÉROLA (*Pennisetum glaucum*). JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 2023.

PINHEIRO, Rinaldo J. B.; NUMMER, Andréa Valli; RAUBER, Ana Carla. **Determinação da Condutividade Hidráulica das Principais Unidades Geológicas-Geotécnicas de Santa Maria – RS**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 36, n. 2, p. 347 – 363, 2017.

Pinto, J. C. C. S.; Lage, P. L. C. Programa de Engenharia Química, COPPE/UFRJ, apostila - escola piloto de engenharia química. Cap 3, 1997.

REICHARDT, K. Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas. 2 ed. Piracicaba: ESALQ. Depto de Física e Meteorologia, 160 p, 1996.

SÁNCHEZ, F. J. (2022). - Hidrología Superficial y Subterránea. 2ª ed. Kindle Direct Publishing., 440 pp.

SOUZA, G. DE. **Monitoramento de parâmetros qualitativos e quantitativos de líquidos percolados de aterros sanitários – estudo em piloto experimental.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

## AGRADECIMENTOS

A conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso representa o fim de uma etapa importante e significativa em minha vida acadêmica, marcada por aprendizado, crescimento e dedicação. Esse processo, no entanto, não foi trilhado sozinho, e eu gostaria de expressar minha gratidão a todos que me apoiaram ao longo dessa jornada.

Primeiramente, agradecer a Deus e a Nossa Senhora pela força, sabedoria, saúde e principalmente pela fé que me sustentaram durante cada momento de desafio.

Aos meus pais, Jaci Barbosa de Oliveira e Manoel Fernandes de Oliveira, por todo apoio e amor incondicional, pelos ensinamentos e valores que me guiaram até aqui e pelo incentivo em cada passo desta caminhada. Sou profundamente grata pelo amor e suporte que sempre recebi.

As minhas irmãs Lidiane e Edinéia que foram uma fonte constante de apoio e inspiração durante toda essa jornada. A força e o exemplo de cada uma de vocês me motivaram, a persistir e a acreditar em mim mesmo.

A minha sobrinha, Liz, cuja alegria e luz foram uma inspiração constante ao longo dessa jornada. Seu carinho e entusiasmo sempre me lembraram da importância de perseverar e de valorizar cada etapa do caminho. És meu ponto de força para conseguir seguir em frente.

Aos meus amigos, colegas de curso, que compartilharam das dificuldades, alegrias e conquistas de todos os períodos. Em especial aos meus amigos que entraram comigo no período 2020.1, Rafaela, Kelly, Ivan, Bruno e Lays, agradeço o companheirismo, pelas palavras de incentivo nos momentos de desânimo e por estarem ao meu lado em cada etapa.

De forma especial, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. William de Paiva, que foi um verdadeiro mentor neste processo. Suas orientações, paciência e incentivo foram fundamentais para a realização deste trabalho, e sua dedicação como educador foi uma inspiração para mim.

À Coordenação do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e aos professores, deixo meu sincero agradecimento pelo aprendizado e pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional que me proporcionaram.

Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia Ambiental – GPTecA, por fornecer apoio em minhas pesquisas e estar presente na construção deste trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro para a realização do projeto de pesquisa.

Por fim, obrigada a todos que estiveram comigo em todas as etapas de minha vida.