



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

WALESCA EMILIA DOS SANTOS FERREIRA

**PERCOLAÇÃO DE LIXIVIADO DE
ATERRO SANITÁRIO EM MEIO POROSO**

**CAMPINA GRANDE - PB
2023**

WALESCA EMILIA DOS SANTOS FERREIRA

**PERCOLAÇÃO DE LIXIVIADO DE
ATERRO SANITÁRIO EM MEIO POROSO**

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

Área de concentração: Resíduos sólidos

Orientador: Prof. Dr William de Paiva

**CAMPINA GRANDE - PB
2023**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma 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.

F383p Ferreira, Walesca Emilia dos Santos.
Percolação de lixiviado de aterro sanitário em meio poroso
[manuscrito] / Walesca Emilia dos Santos Ferreira. - 2023.
26 p. : il. colorido.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da
Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.
"Orientação : Prof. Dr. William de Paiva, Coordenação do
Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT. "

1. Layer. 2. Permeabilidade. 3. Resíduos sólidos. I. Título
21. ed. CDD 628

WALESCA EMILIA DOS SANTOS FERREIRA

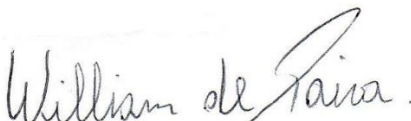
PERCOLAÇÃO DE LIXIVIADO DE
ATERRO SANITÁRIO EM MEIO POROSO

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

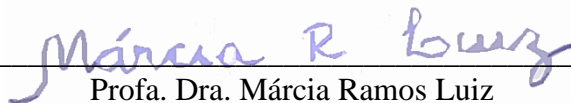
Área de concentração: resíduos sólidos

Aprovada em: 01/12/2023.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. William de Paiva (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Whelton Brito dos Santos
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 OBJETIVO GERAL	8
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	8
3.1 Resíduos Sólidos.....	8
3.1.1 Biodegradação dos RSU.....	8
3.1.2 Lixiviado.....	9
3.2 Aterro Sanitário	9
3.2.1 Solo de base	10
3.3 Percolação.....	10
3.4 Modelagem Matemática	11
3.4.1 Método das diferenças finitas	11
3.4.2 Desenvolvimento do Modelo.....	11
4 MATERIAL E MÉTODOS	13
4.1 Teste das bentonitas.....	13
4.2 Preparo do solo	14
4.3 Montagem do protótipo	16
4.4 Modelagem no <i>Python</i>	18
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
5.1 Simulação física.....	19
5.2 Simulação Numérica.....	20
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	22
REFERÊNCIAS	23

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Fluxograma das etapas metodológicas	13
Figura 2 –	Teste de expansividade das betonitas	14
Figura 3 –	Pesagem do solo	15
Figura 4 –	Peneira utilizada	15
Figura 5 –	Secagem das amostras.....	16
Figura 6 –	Compartimentos utilizados para montagem dos protótipos	16
Figura 7 –	Destorroamento do solo	17
Figura 8 –	Preenchimento do solo por cima da camada drenante	17
Figura 9 –	Compactação do solo	17
Figura 10 –	Inserção do lixiviado	18
Figura 11 –	Terminologia das partes de uma malha	19
Figura 12 –	Teste de percolação de lixiviado em diferentes tempos	19
Figura 13 –	Concentração de lixiviado	21
Figura 14 –	Quantidade de percolação de lixiviado ao longo do tempo	22

PERCOLAÇÃO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO EM MEIO POROSO

LEACHATE PERCOLATION FROM LANDFILL IN POROUS MEDIUM

Walesca Emilia dos Santos Ferreira*
William de Piva**

RESUMO

Este artigo aborda a gestão inadequada do lixiviado proveniente de resíduos sólidos urbanos, com ênfase na compreensão da percolação desse líquido em solos porosos. O objetivo geral é analisar, por meio de modelagem matemática utilizando o Método das Diferenças Finitas (MDF), a percolação de lixiviado em uma camada de solo de base de aterro em uma região semiárida. A metodologia incluiu a modelagem matemática no Spyder Python IDE, utilizando o MDF, e experimentos práticos com solo compactado e bentonita. Testes laboratoriais de diferentes bentonitas foram realizados, escolhendo a mais expansiva. Protótipos foram montados para visualizar o comportamento do lixiviado ao longo do tempo. Os resultados indicam boa permeabilidade do solo, confirmados pela modelagem. A adição de bentonita não trouxe vantagens significativas em termos de permeabilidade. Os objetivos específicos incluíram a construção de protótipos para avaliação visual da percolação, a verificação da influência da bentonita na redução da percolação e a análise de um algoritmo em Python para a percolação de lixiviado em meio poroso. 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 de ondas de Meakin. A metodologia envolveu testes de bentonitas, preparo do solo, montagem dos protótipos e modelagem matemática. Os resultados incluem observações visuais dos protótipos, destacando que a mistura solo-bentonita não demonstrou expansividade em contato com o lixiviado. A modelagem numérica no Spyder mostrou uma boa permeabilidade da camada de solo ao longo do tempo, com pequena percolação em intervalos específicos. Em conclusão, a combinação de abordagem experimental e modelagem numérica foi eficaz para compreender o comportamento do lixiviado. O uso do Spyder Python IDE se mostrou uma ferramenta valiosa para desenvolver e avaliar o modelo. Sugere-se para pesquisas futuras o uso de corantes para melhor visualização dos caminhos percorridos pelo lixiviado.

Palavras-Chave: Layer; Permeabilidade; Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

* Graduanda do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). walesca.ferrira@aluno.uepb.edu.br

** Prof. do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). w.paiva@servidor.uepb.edu.br

This article addresses the inadequate management of leachate from municipal solid waste, with an emphasis on understanding the percolation of this liquid in porous soils. The general objective is to analyze, by means of mathematical modeling using the Finite Difference Method (FDM), the percolation of leachate in a landfill base soil layer in a semi-arid region. The methodology included mathematical modeling in the Spyder Python IDE, using MDF, and practical experiments with compacted soil and bentonite. Laboratory tests of different bentonites were carried out, choosing the most expansive. Prototypes were set up to visualize the behaviour of the leachate over time. The results indicate good soil permeability, confirmed by modeling. The addition of bentonite did not bring any significant advantages in terms of permeability. The specific objectives included the construction of prototypes for visual assessment of percolation, verification of the influence of bentonite in reducing percolation and analysis of a Python algorithm for leachate percolation in porous media. Differential equations for the Finite Difference Method were used to develop the mathematical model, focusing on one-dimensional transient conduction. Percolation modeling was based on Meakin's wave model. The methodology involved testing bentonites, preparing the soil, assembling the prototypes and mathematical modeling. The results include visual observations of the prototypes, highlighting that the soil-bentonite mixture did not show expansiveness in contact with the leachate. Numerical modeling in Spyder showed good permeability of the soil layer over time, with little percolation at specific intervals. In conclusion, the combination of experimental approach and numerical modeling was effective in understanding the behavior of the leachate. The use of the Spyder Python IDE proved to be a valuable tool for developing and evaluating the model. Future research suggests the use of dyes to better visualize the paths taken by the leachate.

Keywords: Layer; Permeability; Solid Waste.

1 INTRODUÇÃO

Após as grandes revoluções industriais, a sociedade teve um rápido crescimento populacional, conseqüentemente, surgiu um aumento exponencial de impactos ambientais negativos. Dessa forma, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e a forma inadequada de disposição final desses é uma fonte poluidora do solo, das águas subterrâneas e superficiais.

O aterro sanitário de resíduos sólidos transforma-se em um sistema dinâmico e altamente complexo devido às diversas interações promovidas na massa de resíduos. Essa complexidade é predominantemente atribuída à composição química heterogênea dos materiais, os quais, ao serem dispostos em conjunto, têm propensão a se degradar ao longo do tempo, resultando na geração de subprodutos conhecidos como biogás e lixiviados. Caso não sejam adequadamente tratados, esses subprodutos têm o potencial de causar danos à saúde pública e ao meio ambiente. (Ribeiro *et al.*, 2021)

Nesse sentido, há a necessidade de estudo e desenvolvimento de pesquisas para compreender o comportamento do lixiviado em um meio poroso através da percolação de fluidos é um tema de suma importância na engenharia e na ciência aplicada. É essencial entender como os fluidos se movem através desses meios, especialmente, quando confrontados com diferentes cenários e condições, inclusive a análise da permeabilidade e do comportamento hidráulico desses materiais.

A gestão adequada do lixiviado se torna imperativa para evitar repercussões ambientais adversas, pois, se negligenciado, pode contaminar o solo e as águas subterrâneas, comprometendo a integridade dos recursos naturais. Neste contexto, a implementação de sistemas eficazes de coleta e tratamento do lixiviado em aterros sanitários, destinados ao descarte controlado dos RSU, assume um papel crucial.

O chorume é um líquido proveniente da decomposição da matéria orgânica. Os lixiviados e/ou percolados são a solução do chorume e água, de origem superficial (chuva ou escoamento) ou subterrânea (infiltração), carreando materiais dissolvidos ou suspensos, provenientes da digestão anaeróbia da matéria orgânica por ação das exoenzimas produzidas pelas bactérias (Sá *et al.*, 2012).

Os bolsões de lixiviado são áreas onde o lixiviado se acumula, representando um perigo potencial para a saúde humana, meio ambiente, bem como um perigo de acidentes de desabamento. Entretanto, a percolação de lixiviado é um problema sério que pode contaminar a água subterrânea, o solo e o ar. Por isto, é interessante a avaliação dos riscos associados à percolação de lixiviado utilizando técnicas de modelagem matemática.

Modelagem matemática é uma ferramenta de suma importância na construção do conhecimento, pois são utilizados para a formulação de hipótese e para compreender novas ideias que podem ser verificadas no sistema real. Além disso, a modelagem em si auxilia a prever o comportamento de um sistema submetido a dissemelhantes condições, possibilitando investigar um determinado comportamento de um sistema, nele pode-se minimizar os esforços compreendido com a realização de transportes experimentais.

Diante do exposto, se faz necessário o entendimento matemático dos caminhos percolados pelo lixiviado em aterro sanitário. Assim sendo, este trabalho tem por objetivo propor a modelagem matemática do lixiviado em camada de solo compactado e a comparação visual por meio testes experimentais com protótipos do solo natural adicionado de argilomineral bentonita.

2 OBJETIVO GERAL

Analisar por meio da modelagem matemática utilizando Método das Diferenças Finitas (MDF), a percolação de lixiviado em uma *layer* (camada) de solo da camada de base de um aterro em uma região semiárida.

2.1 Objetivos Específicos

- Construir protótipos para avaliar a percepção visual da percolação.
- Verificar a influência da argila bentonítica na redução da percolação do lixiviado no meio poroso.
- Analisar um algoritmo na linguagem de programação aberta Python para a percolação de um lixiviado em um meio poroso.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Resíduos Sólidos

Em síntese, a conformidade com a legislação, notadamente a lei nº 12.305/2010, impõe que a disposição final ambientalmente adequada de resíduos sólidos pressupõe a disposição ordenada de rejeitos em aterros, observando estritas normas operacionais com o intuito de prevenir riscos à saúde pública e atenuar impactos ambientais adversos (Baran, 2019). Este alicerce legal, com ênfase na observância de protocolos específicos, é de extrema importância para garantir a sustentabilidade e preservar o ambiente, tornando-se imperativo no âmbito de estudos relacionados à percolação de fluidos em meios porosos.

Conforme apontado por Baran (2019), o gerenciamento de resíduos sólidos é um processo abrangente que trata desde a coleta até a disposição final. A legislação, exemplificada pela lei nº 12.305/2010, estabelece diretrizes para a disposição ambientalmente adequada de resíduos sólidos, enfatizando a importância de evitar riscos à saúde pública e minimizando impactos ambientais prejudiciais.

Entretanto, mesmo com as regulamentações em vigor, uma parcela considerável dos resíduos sólidos urbanos no Brasil não é disposta de maneira adequada. De acordo com a Abrelpe (2017), as principais formas de disposição final na região Centro-oeste incluem aterros sanitários, aterros controlados e lixões. Essas variações na disposição final refletem diferenças na qualidade e nas práticas de gerenciamento de resíduos, com impactos diretos no meio ambiente.

A gestão de resíduos sólidos é uma das maiores questões ambientais no Brasil, altamente dependente do aterro sanitário como o método de descarte no controle deste aumento contínuo da geração de resíduo anualmente (Pasquali; Pâmela, 2020). O gerenciamento de RSU é uma questão crucial para a sustentabilidade ambiental das cidades. Os RSU são os resíduos produzidos pelas residências, como resíduos domésticos, comerciais e formulados e resíduos líquidos industriais.

3.1.1 Biodegradação dos RSU

A biodegradação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) constitui um processo intrincado e dinâmico que ocorre organicamente ao longo do tempo. Estes resíduos, uma amalgama heterogênea de materiais descartados pela população em ambientes urbanos, abrangem desde componentes orgânicos até plásticos, papel, vidro e metais (Firmo,

2013). A interação desses resíduos com microrganismos presentes no meio ambiente desencadeia o complexo processo de biodegradação.

Os microrganismos, notadamente bactérias e fungos, assumem um papel crucial na decomposição dos resíduos orgânicos nos RSU. Sua atividade metabólica inclui a secreção de enzimas capazes de desdobrar as moléculas complexas dos resíduos em substâncias mais simples, como água, dióxido de carbono e matéria orgânica mais estável (Souza, 2020). Esta intrincada rede de interações contribui para a redução do volume dos resíduos e para a geração de subprodutos, entre os quais se destaca o lixiviado.

Em uma perspectiva mais abrangente, a compreensão da biodegradação dos RSU e de seus subprodutos, notadamente o lixiviado, torna-se fundamental para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis na gestão de resíduos urbanos. Ao promover ações como a reciclagem, compostagem e outras práticas de tratamento, é possível mitigar os impactos negativos dos RSU no meio ambiente, contribuindo para a construção de comunidades mais sustentáveis (Fonscesca, 2013).

3.1.2 Lixiviado

O lixiviado, por sua vez, representa um líquido resultante da interação dos resíduos com a água da chuva ou outros fluidos presentes no ambiente. Ele carrega consigo substâncias químicas advindas da decomposição dos resíduos, incluindo compostos orgânicos, metais pesados e outros contaminantes (Souto, 2009).

A composição do lixiviado, conforme Lange *et al.* (2006), abrange uma diversidade de parâmetros, incluindo DQO, DBO5, COT, potencial redox, temperatura, pH, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos totais, cianeto total, fluoreto total, cloretos, potencial hidrogeniônico, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, sulfatos, sulfetos, gorduras, óleos e graxas, além de uma variedade de metais como alumínio, arsênio, bário, boro, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo hexavalente, cromo total, estanho, ferro solúvel, mercúrio, níquel, prata, vanádio, zinco entre outros. Essa diversidade de parâmetros destaca a complexidade e a potencial carga poluente do lixiviado de aterro sanitário.

O estudo de Kawahigashi *et al.* (2014) ressaltou de maneira significativa que o lixiviado é categorizado como um subproduto de extrema poluição, originado pelo complexo processo de degradação física, química e biológica da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos. Essa ênfase sublinha a importância do lixiviado como um elemento ambientalmente impactante e ressalta a necessidade de abordagens eficazes para lidar com suas consequências poluentes.

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 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.

3.2.1 Solo de base

O solo de base assume um papel preponderante na configuração de um aterro sanitário. Composto frequentemente por estratos de argila e material impermeabilizante, que desempenha uma função crucial na prevenção da contaminação do solo e das águas subterrâneas (Silva, 2017).

Este revestimento meticuloso forma uma barreira eficaz que impede que os resíduos, em especial o lixiviado, alcancem o solo natural. A preocupação meticulosa com o *design*, em particular no que tange ao solo de base e sistemas de gerenciamento é essencial para garantir a eficácia desses locais na minimização dos impactos ambientais associados ao descarte de resíduos sólidos.

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 abranger de maneira abrangente as variáveis efetivas presentes nos vazios, as quais podem apresentar notáveis discrepâncias em relação aos valores médios obtidos nos modelos macroscópicos. Essas disparidades podem resultar em fenômenos não previstos, como o fenômeno de "piping" (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 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.

Considerando a equação diferencial (Equação 1) do problema de condução transiente unidimensional.

$$\text{Equação 1} \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Onde T é a temperatura, t o tempo e α a difusividade térmica. A representação das derivadas espaciais e temporal por expressões algébricas. Usando sérios de Taylor em torno de P, os valores de temperatura em E e W podem ser calculados por:

$$\text{Equação 2} \\ T_E = T_P + \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_P \Delta x + \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_P \frac{\Delta x^2}{2!} + \left. \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right|_P \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots + \dots$$

$$\text{Equação 3} \\ T_W = T_P - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_P \Delta x + \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_P \frac{\Delta x^2}{2!} + \left. \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right|_P \frac{\Delta x^3}{3!} + \dots - \dots$$

Dessas equações pode-se realizar as aproximações numéricas das derivadas parciais. Usando as Equações (2) e (3), encontram-se, respectivamente, as Equações 4 e 5.

$$\text{Equação 4} \\ \frac{\partial T}{\partial x_P} = \frac{T_E + T_P}{\Delta x} + \mathcal{O}(\Delta x^2)$$

$$\text{Equação 5} \\ \frac{\partial T}{\partial x_P} = \frac{T_E - T_W}{\Delta x} + \mathcal{O}(\Delta x)$$

Estas são as aproximações numéricas, para a frente e para trás, da derivada de primeira ordem. Observa-se que os erros de truncamento são da ordem de Δx . Somando a Equação (3) com a Equação (4), obtém-se Equação (6).

$$\text{Equação 6} \\ \frac{\partial T}{\partial x_P} = \frac{T_E - T_W}{\Delta x} + \mathcal{O}(\Delta x^2)$$

Esta é a aproximação numérica para a derivada de segunda ordem em diferenças centrais. Neste caso, o erro de truncamento é da ordem de $(\Delta x)^2$. Com as expansões da função em série de Taylor, é possível, usando mais termos da série, representar derivadas de qualquer ordem. Logicamente, quanto maior for a ordem da derivada, e de acordo com a ordem desejada para o erro de truncamento, mais pontos serão necessários em torno de P.

A equação sobre percolação em meio poroso percolação tempo(t), que retorna P(t), a percolação no tempo t, é uma implementação do modelo de percolação de ondas. O modelo foi proposto por Meakin (1986) é baseado na ideia de que a percolação em um meio poroso pode ser modelada como a propagação de uma onda senoidal. O modelo de

Meakin é uma modelagem meramente matemática utilizada para percolação, Equação (7).

$$P(t) = P_0 + A * \sin(2 * \pi * t / t_{max})$$

onde:

- $P(t)$ é a percolação no tempo t .
- P_0 é o valor inicial da percolação.
- A é a amplitude da onda senoidal.
- t_{max} é o tempo máximo.

A amplitude da onda, A , representa a magnitude da variação da percolação. A frequência da onda, $2 * \pi * t / t_{max}$, determina a rapidez com que a percolação varia.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada para desenvolver esse trabalho foi dividida na em duas partes, física (experimental) e numérica, sendo assim, foi dividida em quatro etapas: Etapa 1 - Testes da bentonitas; Etapa 2 - Preparo do solo; Etapa 3 – Montagem dos protótipos e Etapa 4 – Modelagem Matemática.(Figura 1).

Figura 1- fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

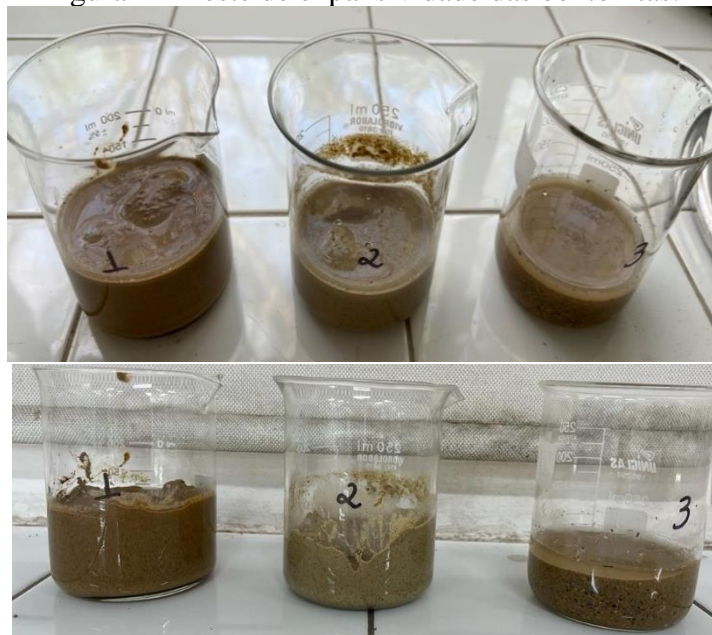
4.1 Teste das bentonitas

Toda a parte experimental foram realizadas no laboratório Leteq (Laboratório de ensino e tecnologia química), localizado na Universidade Estadual da Paraíba campus I, para determinar a capacidade de expansão de um determinado tipo de bentonita, adicionando água destilada para o ensaio, mantendo homogêneo com o argilomineral, as camadas de sílica se expandiram, formando um gel viscoso. Foram testados 3 tipos de bentonitas (Figura 2):

- Tipo 1: chocolate verde, possui uma cor marrom rica em quartzo.
- Tipo 2: chocolate verde, possui uma cor acinzentada rica em feldspato.
- Tipo 3: mista (mistura de várias bentonitas), possui uma cor marrom, textura mais granulada que as demais, muito quartzo, não absorve água.

Realizando testes preliminares foi verificado que o tipo 2 de bentonita denominada de chocolate verde, pois esta demonstrou melhor capacidade de expansão, por isso foi feita a escolha desta, devido seu alto índice de plasticidade, para utilizar-se na mistura do solo, assim, avaliar o comportamento de permeabilidade com o lixiviado.

Figura 2 – Teste de expansividade das bentonitas.



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

4.2 Preparo do solo

Inicialmente, foi coletado solo 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 2 kg de solo para o preenchimento dos protótipos (Figura 3).

Figura 3 – Pesagem do solo



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Todo o material foi peneirado, na peneira de abertura 2,00 mm e de malha 10 de acordo com NBR NM ISO 3310-1 (Figura 4).

Figura 4 – Peneira utilizada



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

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 5).

Figura 5 – Secagem das amostras



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Após a secagem dos materiais foram obtidas as umidades higroscópicas do solo natural e mistura solo mais argila bentonita, antes do processo de compactação dinâmica, como pode ser visualizada na Tabela 2.

Tabela 2 – Umidade dos materiais

Materiais	Umidade
Solo natural	10%
Solo + bentonita	15%

Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

4.3 Montagem do protótipo

Inicialmente foram montados dois protótipos com as mesmas dimensões: (11,7 cm comprimento x 11,7 cm de largura x 5,6 cm de altura), adicionado uma camada drenante, antes da inserção do material. Foram utilizadas britas de número 19 em torno de 1 cm de preenchimento (Figura 6).

Figura 6 – Compartimentos utilizados para montagem dos protótipos



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

A segunda etapa na montagem do protótipo foi realizada com o destorroamento de uma porção de solo já peneirado, sendo o solo puro compactado e outro de camada

drenante, solo + bentonita compactado (Figura 7), para desagregar partículas menores do solo das partículas maiores. Em seguida, colocou-se o material no protótipo (Figura 8) resultando numa camada de 2 cm do material em cada protótipo, realizou sua compactação visando diminuir o máximo dos espaços vazios existentes no solo (Figura 9).

Figura 7 – Destorroamento de solo



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Figura 8 – Preenchimento do solo por cima da camada drenante



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Figura 9 – Compactação do solo



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Por fim, inseriu-se aproximadamente 140 ml de lixiviado *in natura*, de um aterro sanitário (Figura 10), no interior do protótipo para verificar-se, de forma visual seu comportamento com o solo e do solo + bentonita, resultando um lamina d'água de 1 cm em cada protótipo.

Figura 10 – Inserção do lixiviado



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

4.4 Modelagem no Python

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

Essas características do lixiviado foram utilizadas, segundo Souza (2018), que descreveu características reológicas do lixiviado de aterro, a fim de determinar a variação da viscosidade e densidade frente a diferentes temperaturas e diluições (Tabela 2), o mesmo que ocorre com a variação do clima.

Tabela 2 – Valores de Temperatura, Densidade e Viscosidade do Lixiviado concentração a 100%.

	Temperatura °C	Densidade (g/cm ³)	Viscosidade (cSt)
100% de lixiviado	30	1,00098	0,842415
	35	0,99933	0,7554054
	40	0,99748	0,707945
	45	0,99544	0,652575

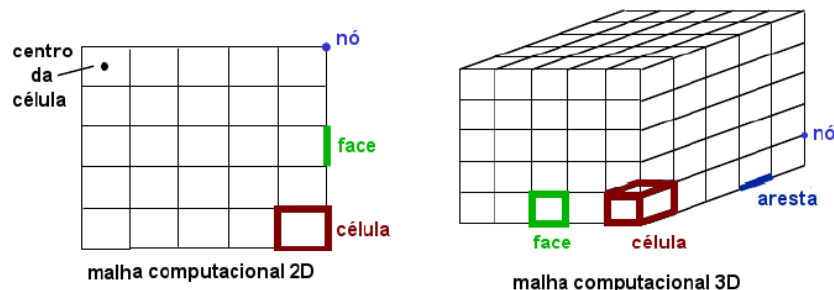
Fonte: Adaptada Souza (2018).

Entretanto, para descrever nossas condições de contorno no *spyder* utilizou-se os dados de lixiviado *in natura* (100% de lixiviado), para analisar o comportamento, tendo 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 utilizada do modelo proposto por Meakin em 1986 - *percolacao_tempo (t)*.

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



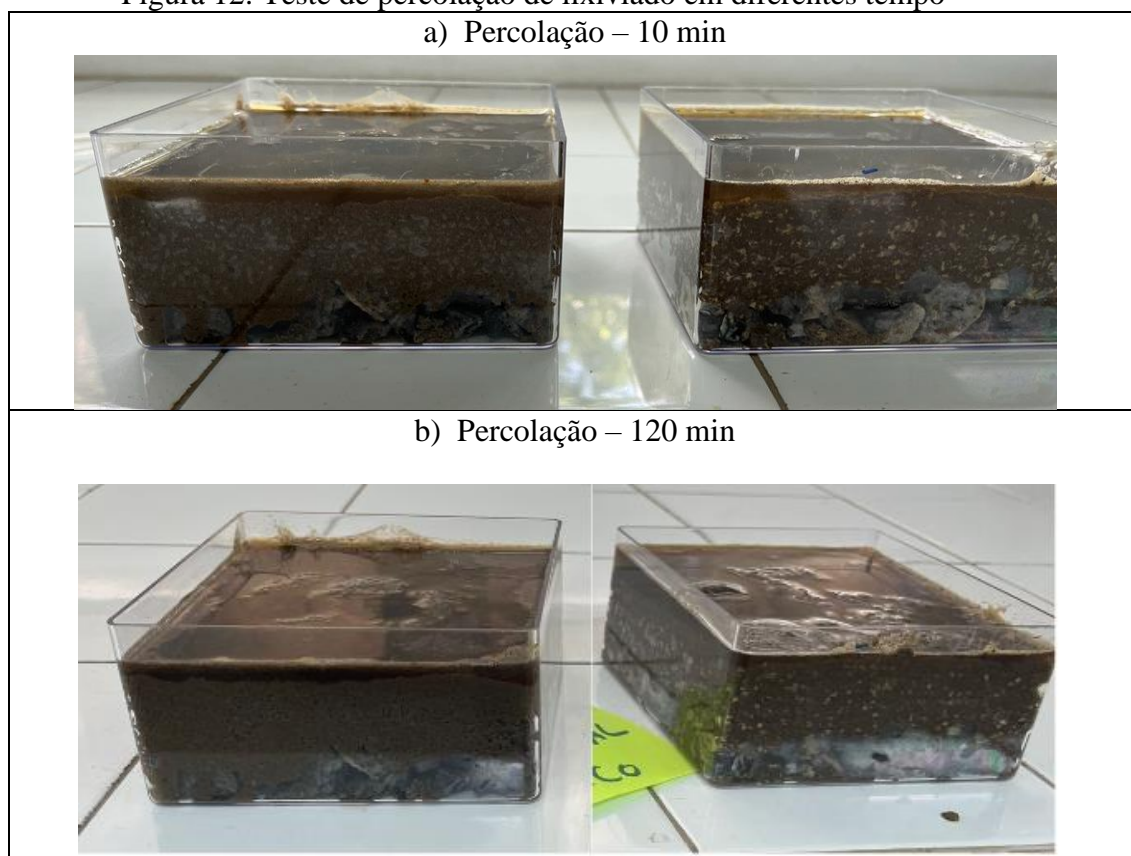
Fonte : Bakker 2002 adaptada por (Menezes 2019).

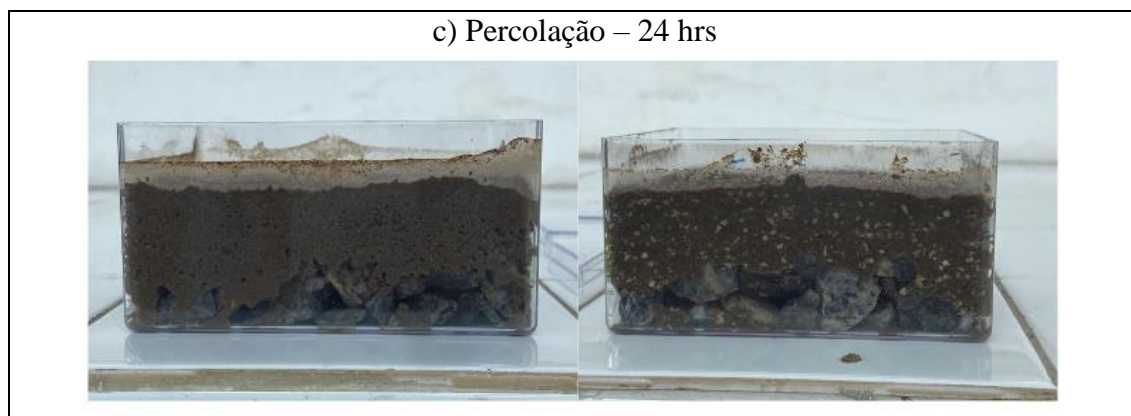
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Simulação física

Observaram-se dois protótipos, durante os primeiros 10 min (Figura 12a), 2 horas (Figura 12b) e após as 24 horas (Figura 12c) da inserção do lixiviado. Pôde-se observar que nos primeiros instantes o lixiviado não percolou de imediato, mantendo-se a altura da lâmina, com o passar do tempo o lixiviado começou a percolar gradativamente.

Figura 12: Teste de percolação de lixiviado em diferentes tempo





Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

Após a percepção visual dos dois protótipos, em diferentes intervalos de tempos, foi perceptível que a influência bentonita não resultou em permeabilidade diferentemente do solo natural compactado. A mistura de solo e bentonita não demonstrou expansividade em contato com o lixiviado, devido à viscosidade obtida, que difere da água. Fato este também observado em outros estudos como no de Lima, 2022 que a variação na permeabilidade em relação à água e ao lixiviado evidencia como a composição química dos fluidos influencia a percolação.

5.2 Simulação Numérica

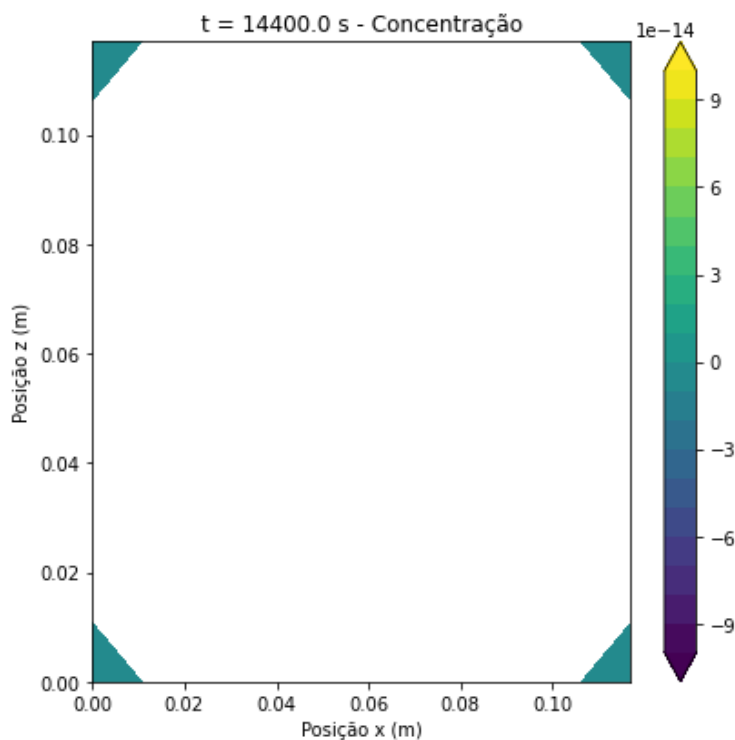
Na realização da formulação do método computacional foi utilizado o *Spyder*, que é um ambiente de desenvolvimento integrado de plataforma cruzada de código aberto para programação científica na linguagem *Python*. Com o código descrito no *software*, a modelagem elaborada no programa resultou-se em dois gráficos (Figura 13 e Figura 14). Entretanto, a Figura 13 mostra-se a variação de concentração de soluto durante os 14400 segundos (tempo de modelagem) que não teve em meio poroso, a concentração do lixiviado permanece a mesma. Todavia, apresentou-se um aumento de concentração nas bordas de contato entre o solo e o material.

Além disso, o primeiro gráfico gerado, mostrando a distribuição da concentração do soluto em função das coordenadas x e z . Concentração ao longo do tempo ($t = X$ s) (Figura 11).

- O eixo x representa a posição no domínio (em cm), variando de 0 a 10 cm.
- O eixo y representa a profundidade no solo (em cm), variando de 0 a 10 cm.

As cores representam os valores de concentração, com uma escala de cores à direita que indica os valores numéricos correspondentes.

Figura 13 – Concentração de lixiviado

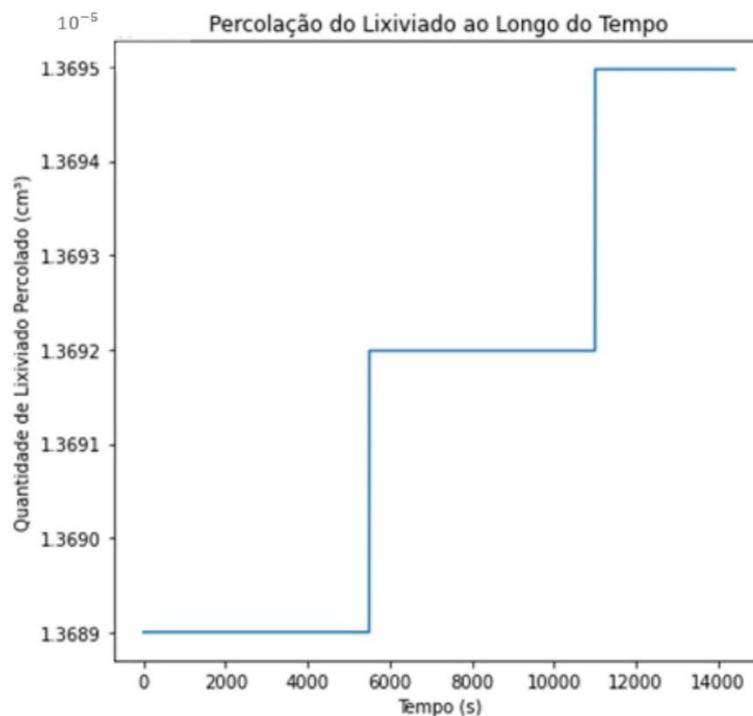


Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

O segundo gráfico gerado (Figura 14) ilustra a quantidade acumulada de líquido percolado ao longo do tempo. O eixo x representa o tempo em segundos e o eixo y representa a quantidade acumulada de líquido percolado em cm^3 , variando com o tempo durante a simulação.

A Figura 16 demonstra que houve percolação com valores muito baixos ($0,13 \text{ cm}^3$) contante em determinados intervalos de tempo, de 0 a 6000 segundos. O fluido manteve constante e percolou uma quantidade muito pequena e volta a ficar constante depois de mais 6000 segundos. Isto significa que a camada de solo consistiu em boa permeabilidade.

Figura 14 – Quantidade de percolação de líquido ao longo do tempo



Fonte: Elaborada pela autora, 2023.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a construção de protótipos foi perceptível visualizar o comportamento do fluido, mostrou que tanto o solo sem a bentonita como o com o argilomineral, foram capazes de reter o lixiviado por aproximadamente 2 horas. Sendo assim, a modelagem comprovou que não houve percolação nos primeiros 6000s.

Com tudo, foi admissível comparar o efeito da mistura do solo com o argilomineral na percolação do lixiviado, o solo 1 e no solo 2 os comportamentos foram semelhantes, entretanto é sugerindo que apenas o solo compactado seria suficiente, para obter uma boa permeabilidade. Devido a viscosidade obtida do lixiviado diferentemente da água, a mistura de solo e bentonita não demonstrou expansividade em contato com o lixiviado.

A modelagem matemática mostrou-se uma ferramenta essencial para a compreensão e previsão de sistema, permitindo que a construção de modelos matemáticos que descrevem com precisão o comportamento real do sistema de fluxo, utilizando o método para discretização por MDF e a equação da percolação dada por Meakin.

A utilização do software *Python* e o *IDE Spyder* demonstrou um papel importante para o desenvolvimento do método numérico, oferecendo uma variedade de recursos que facilitou a avaliação da simulação para entender o comportamento do fluido de acordo com as dimensões do protótipo. O programa conseguiu representar por meio de dois gráficos a concentração do fluido e a quantidade de percolação de lixiviado ao longo do tempo, de acordo com as instruções descrita.

Por fim, essa foi um início do estudo, assim uma alternativa sugerida, para observa-se melhor os caminhos percolados pelo lixiviado, seria a utilização de mistura com corantes para melhor visualização, devido a coloração escura do líquido ser próximo a cor do solo dificulta na visualização. Essa é uma alternativa para pesquisas futuras para dissertação de mestrado.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457:2016. Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio de ensaio – Requisitos técnicos e ensaios – Parte 1: Peneiras de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2007.

ABRELPE, EMPRESAS ASSOCIADAS. ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no**, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Representação de projetos de arquitetura. Rio de Janeiro, 1995.

BARAN, Camilla Turon. Avaliação da eficiência da camada de impermeabilização de aterros sanitários. 2019.

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.

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

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. BRESSERT, Eli. SciPy e NumPy: uma visão geral para desenvolvedores. 2012.

CONDE, Thassiane Telles; STACIWI, 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.

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.

FIRMO, Alessandra Lee Barbosa. Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos. 2013.

FONSECA, Lúcia Helena Araújo. Reciclagem: o primeiro passo para a preservação ambiental. Bacharel em Administração, Centro Universitário Barra Mansa, Barra Mansa, 2013.

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

KAWAHIGASHI, Flávia et al. Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 19, p. 235-244, 2014.

LANGE, Liséte Celina et al. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo oxidativo avançado empregando reagente de Fenton. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, p. 175-183, 2006.

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

MALISKA, Clovis R. Trânsferencia de calor e mecânica dos fluidos computacional ISBN 8521613962. 2ª edição-2004. LTC, 1995.

MEAKIN, P. Percolation and cluster growth in porous media. *Advances in Physics*, v. 35, n. 2, p. 117-159, 1986.

MENEZES, Júlia Barcelos, Resolução de equações diferenciais parciais em malhas não-estruturadas via método dos volumes finitos utilizando um método de alta ordem, Trabalho de Conclusão de Curso, universidade federal de uberlândia, 2019.

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

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.

PASQUALI, Pâmela Bia. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil : uma análise exploratória. 2020. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro Ambiental e Sanitarista). Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020.

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

RIBEIRO, Libânia da Silva et al. Análise da relação de indicadores físico-químicos do lixiviado gerado em um aterro sanitário no Semiárido Brasileiro, revista on-line Agropecuária Científica no Semiárido v. 17 n. 1, fevereiro (2021).

SÁ, L. F.; JUCÁ, J. F. T.; MOTTA SOBRINHO, M. A. Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar. *Ambi-Agua*, Taubaté, v. 7, n. 1, p. 204-217, 2012.

SILVA, André Luiz da. Modelagem e simulação numérica do transporte de poluentes em meios porosos com reações químicas. Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, 2016.

Silva, Luciano Cesario da e Junior, Paulo Cavalcante do Nascimento. Determinação dos coeficientes do Método das Diferenças Finitas. *Research, Society and Development*, v. 12, n. 2, e10712239946, 2023 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i2.39946>.

SILVA, Thiago Fernandes da et al. Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários. 2017.

SOUTO, Gabriel D. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros: estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de captura com ar (stripping)**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SOUZA, MARYANA *et al.* Análise do comportamento da densidade e viscosidade do lixiviado no solo. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018 21 a 24 de agosto de 2018–Maceió-AL, Brasil.

AGRADECIMENTOS

À Deus e a Nossa Senhora, por serem sempre verdadeiros escudos em minha vida. Em cada desafio, em cada conquista, senti Sua presença constante, guiando-me e fortalecendo-me. Agradeço pelas bênçãos recebidas, pela sabedoria concedida e pela força que me foi proporcionada.

Aos meus amados familiares, que foram a base sólida durante toda a jornada de graduação. Agradeço pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pela compreensão nos momentos em que precisei me dedicar intensamente aos estudos. Em especial minha avó Maria Emilia e minha mãe Eliane, por todo apoio financeiro e psicológico, saibam cada conquista minha é também de vocês, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando-me a persistir nos desafios acadêmicos. Vocês são minha fonte de inspiração, e este trabalho é dedicado a cada um de vocês com profundo carinho e gratidão.

Ao meu namorado, por ser minha companhia diária e meu maior incentivador, fazendo meus dias mais leves e divertidos. Por toda paciência, encorajamento constante e presença afetuosa foram a âncora que me sustentou nos momentos mais desafiadores. Agradeço por compartilhar este trajeto comigo, por acreditar no meu potencial e por ser uma fonte constante de incentivo. Assim, como à sua família, que me acolheu em Campina Grande, me dando todo suporte necessário.

Aos meus amigos, colegas de curso quem entraram no período 2019.1 em especial a minha “panelhinha” Beatriz, Claudiane, Mariarita e Gustavo, por todo apoio e por tornarem a graduação mais leve e prazerosa. A presença de vocês foi um pilar fundamental ao longo da graduação, e cada momento compartilhado foi enriquecedor,

Ao meu orientador Prof. Dr.: Willian de Paiva, pela sua inestimável orientação, apoio e confiança ao longo deste percurso acadêmico. Sua dedicação e apoio foram fundamentais para o meu crescimento e desenvolvimento neste trabalho. Agradeço por sua paciência e inspiração constante. Sou grato por ter tido a oportunidade de aprender e crescer sob sua orientação.

À Coordenação do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e aos professores, por todo conhecimento repassado nesse período de 5 anos, por todo aprendizado.

Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia Ambiental – GPTecA, por fornecer apoio em minhas pesquisas e estar presente na construção deste trabalho, além do Grupo de Geotecnia Ambiental - GGA, pela oportunidade de aprendizado, crescimento e amadurecimento acadêmico.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

Por fim, muito obrigada a todos quem passaram por essa trajetória acadêmica.