

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Ramon Felipe dos Santos

ENSAIOS DE FILTRAÇÃO *IN LOCO* EM GEOTÊXTEIS APLICADOS EM SISTEMAS
DE DRENAGEM DE BASE DE ATERROS SANITÁRIOS

São Carlos - SP

2025

Ramon Felipe dos Santos

ENSAIOS DE FILTRAÇÃO *IN LOCO* EM GEOTÊXTEIS APLICADOS EM SISTEMAS
DE DRENAGEM DE BASE DE ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

AC: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Fernando H. M. Portelinha

São Carlos - SP

2025

Santos, Ramon Felipe dos

Ensaio de filtração in loco em geotêxteis aplicados em sistemas de drenagem de base de aterros sanitários / Ramon Felipe dos Santos -- 2025. 119f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Prof. Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha

Banca Examinadora: Profa. Dra. Cali Laguna Achon, Prof. Dr. Paulo Cesar Lodi

Bibliografia

1. Ensaio de campo, 2. Sistemas de coleta de lixiviado, 3. Geossintéticos. I. Santos, Ramon Felipe dos. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Ramon Felipe dos Santos, realizada em 25/07/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Fernando Henrique Martins Portelinha (UFSCar)

Profa. Dra. Cali Laguna Achon (UFSCar)

Prof. Dr. Paulo Cesar Lodi (UNESP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Aos meus avós Terezinha (in memorian) e João Antunes (in memorian)

AGRADECIMENTOS

Esta foi, sem dúvida, uma das partes mais emocionantes de todo este trabalho — algo que, por muitas vezes, eu nem imaginava que seria realmente possível. Mas chegou... e aqui estou!

Ao longo de todo o trabalho de pesquisa e investigação, surgem inúmeros questionamentos — muitos dos quais, em vez de respostas, nos trazem ainda mais dúvidas. Os erros cometidos fazem parte natural de uma trajetória que, por sua vez, nunca deixa de ser um processo contínuo de aprendizado. Quanto mais nos aprofundamos em determinado conhecimento, mais portas se abrem. E, mesmo após nossa partida, aquilo que permanece são as memórias e as descobertas que construímos em vida. Talvez esse seja o verdadeiro significado da transmissão do conhecimento: um legado construído por pessoas e para pessoas, que atravessa gerações por meio do saber compartilhado.

Primeiramente, um agradecimento a Deus e a Nossa Senhora Aparecida aos quais me acompanham desde o início da minha vida!

Agradeço também ao meu maior exemplo de vida, minha mãe, Terezinha, que sem ela não estaria aqui!

Ao Professor Fernando Portelinha, por todo o encorajamento, pela orientação cuidadosa e pelas valiosas contribuições, sempre compartilhando ensinamentos e dicas de um excelente pesquisador ao longo de toda a trajetória desta pesquisa.

À Professora Natália Correia que sempre com respeito e educação, sempre fez reflexões extremamente importantes ao longo da minha trajetória.

À Professora Cali e ao Professor Paulo, meu sincero agradecimento pela serenidade, pelos excelentes ponderamentos e pelas contribuições valiosas durante o exame de qualificação. Com vocês, este trabalho foi lapidado e conduzido a um novo horizonte, ganhando ainda mais consistência e significado.

À Karol Maria, Débora Toledo e Ana Gianello, as primeiras pessoas que tive o prazer de conhecer na UFSCar e que, sem dúvida, trilharão um caminho iluminado e repleto de sucesso. A convivência com vocês tornou cada dia mais leve, mais agradável e especial.

Ao técnico, profissional, professor e amigo Matheus Cardoso — a pessoa mais empolgante e parceira que conheci nessa trajetória. Sua ajuda foi fundamental em inúmeros momentos, e, sinceramente, sem você, nada disso teria sido possível. Minha eterna gratidão!

À Andrea Maria e à Laura Cassini, que formam uma dupla incrível e que, ao longo do meu tempo aqui, sempre me acolheram com respeito, leveza e alegria. Sou muito grato por toda ajuda, parceria e generosidade de vocês. Vocês são, de fato, pessoas incríveis!

À Rayanne Silva, Zé Thiago e Carolina Nogueira, que tantas vezes estiveram ao meu lado, seja na pesquisa de campo ou fora dela, oferecendo apoio, força e acolhimento, inclusive nas minhas lamúrias e nos momentos difíceis. Com vocês, tudo se tornou mais leve e possível. Minha profunda gratidão!

À minha amiga Liza Bruna, que se tornou uma pessoa de extrema confiança, alguém que esteve ao meu lado muito além dos momentos difíceis que enfrentei ao longo da minha trajetória em São Carlos. Levo comigo a certeza da sua força, da sua amizade e da profunda admiração que construímos — sentimentos que me acompanharão onde quer que eu esteja.

Aos amigos e demais membros do Grupo de Estudos em Geotecnia e Geossintéticos (GeGeos/UFSCar), Fernando Névoa, Matheus Pena, Mayla Silva, Yan Ascoli, Samuel Santana, Isabella Machado e Fabrício Vieira. Muito obrigado!

Um agradecimento mais que especial ao melhor amigo — e ao mais implicante do grupo — Mauro Sousa. Mesmo assim (ou justamente por isso), você esteve presente nos momentos mais difíceis e desafiadores, não apenas me ajudando, mas também sendo apoio para todos ao seu redor. Engenheiro, professor, amigo... são tantas qualidades que é difícil listar. Acredito que, não só na minha percepção, você é a âncora de positividade que mantém a serenidade e o equilíbrio de cada um de nós. Sua presença foi essencial para que eu chegasse até aqui. Minha gratidão, de coração, por tudo!

Ao Grupo Solví, meu sincero agradecimento pelo apoio ao ceder a obra de campo para a realização da pesquisa, bem como pelos dados fornecidos, que foram essenciais para o aprimoramento técnico, científico e social deste trabalho. Ao Guilherme Lopes, colaborador do Grupo Solví e que me ajudou em todo o período de campo!

Às empresas Rafitec, GeoSoluções e Fabril Scavone, agradeço pelo fornecimento dos materiais necessários para a realização de todos os ensaios experimentais, tanto em campo quanto em laboratório, contribuindo diretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo fomento a pesquisa e aos pesquisadores e pesquisadoras em todo Brasil!

Ao Laboratório de Caracterização Estrutural da UFSCar e Laboratório de Microscopia Eletrônica e Fotografia Científica da UFSCar pelos ensaios experimentais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSCar por me permitir conduzir a pesquisa ao longo desses dois anos.

A todos e todas que me acompanharam e apoiaram de alguma forma ao longo destes dois anos de mestrado em São Carlos, meu sincero e profundo agradecimento. Muito obrigado por fazerem parte dessa jornada!

“... deixo essa

Mensagem para que nossas histórias

Sejam lembradas sempre, pois nessas

Memórias, seremos eternos!”

- Transformers – A Vingança dos Derrotados; 2009 –

RESUMO

SANTOS, R. F. Ensaio de filtração *in loco* em geotêxteis aplicados em sistemas de drenagem de base de aterros sanitários. 2025. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2025.

Os sistemas de coleta de lixiviado em aterros sanitários desempenham papel essencial na proteção da camada drenante contra obstruções, utilizando filtros granulares ou geotêxteis. Este último tem se destacado por sua praticidade, custo reduzido e controle de qualidade, embora apresentem vulnerabilidade à colmatção, especialmente devido à elevada carga orgânica do lixiviado gerado pela decomposição dos resíduos sólidos urbanos. Diante disso, esta pesquisa teve como principal objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia de ensaio de filtração mais próxima das condições reais de campo, utilizando líquido percolado gerado em operação de aterro. Além disso, buscou-se avaliar o desempenho de um geotêxtil com grande abertura de filtração (3,10 mm), novo na literatura, comparando-o com dois geotêxteis tradicionais, de aberturas de 0,15 mm e 0,40 mm. Foram construídas colunas de filtração e operadas em campo, em escala piloto com duas configurações: uma contendo parte da camada completa (RSU, geotêxtil e brita) e outra sem RSU, para isolar o efeito dos resíduos sobre o sistema filtrante. Os ensaios foram conduzidos entre maio de 2024 e maio de 2025, com análises físico-químicas, microbiológicas e microscópicas do lixiviado percolado e dos geotêxteis exumados, além do monitoramento da permeabilidade. Os resultados indicaram que os geotêxteis de menor abertura sofreram a atuação colmatção mais expressivamente, com perda significativa de permeabilidade ao longo do tempo. Observou-se que os mecanismos de colmatção atuaram de forma simultânea, porém com intensidades variadas ao longo do período de ensaio. Por outro lado, o geotêxtil com abertura de 3,10 mm apresentou desempenho hidráulico mais estável e menor obstrução dos poros, mesmo em contato direto com RSU. Conclui-se que esse geotêxtil de grande abertura representa uma alternativa viável e promissora para sistemas de drenagem em aterros sanitários.

Palavras-Chave: ensaios de campo; sistemas de coleta de lixiviado; geossintéticos; filtro-separador.

ABSTRACT

SANTOS, R. F. *In-situ* filtration tests on geotextiles applied in landfill base drainage systems. 2025. 119f. Dissertation (master's in civil engineering) - Federal University of São Carlos. São Carlos, 2025.

Leachate collection systems in sanitary landfills play a crucial role in protecting the drainage layer from clogging, typically employing granular filters or geotextiles. The latter have gained prominence due to their practicality, lower cost, and quality control. However, geotextiles are also susceptible to clogging, particularly because of the high organic load present in leachate generated by the decomposition of municipal solid waste (MSW). In this context, the main objective of this study was to develop and implement a filtration testing methodology that closely reflects real field conditions, using leachate produced under actual landfill operations. Additionally, the study aimed to assess the performance of a geotextile with a large filtration opening (3.10 mm)—a configuration not yet explored in the literature—compared to two conventional geotextiles with openings of 0.15 mm and 0.40 mm. Filtration columns were constructed and operated in the field under two setups: one including the party of the complete system (MSW, geotextile, and gravel), and another without MSW, in order to isolate the influence of the waste on the filtration behavior. The tests were conducted from May 2024 to May 2025, with physical-chemical, microbiological, and microscopic analyses of the percolated leachate and exhumed geotextiles, along with continuous permeability monitoring. The results showed that geotextiles with smaller openings experienced more pronounced clogging effects, with a significant decline in permeability over time. It was observed that clogging mechanisms acted simultaneously but with varying intensities throughout the testing period. In contrast, the geotextile with the 3.10 mm opening demonstrated more stable hydraulic performance and less pore blockage, even in direct contact with MSW. In conclusion, the large-opening geotextile presents itself as a viable and promising alternative for drainage systems in sanitary landfills.

Keywords: field tests; leachate collection systems; geosynthetics; filter-separator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geotêxteis: tecido e não tecido	23
Figura 2 - Idealização do processo de agulhagem do geotêxtil não tecido	25
Figura 3 - Disposição dos filamentos de geotêxtil não tecido do tipo termo ligado	25
Figura 4 - Ensaio de condutividade hidráulica dos geotêxteis	29
Figura 5 - Tipologia da colmatação física: a) cegamento; b) bloqueamento; c) obstrução interna.....	31
Figura 6 - Possíveis traçados de acúmulos de partículas.....	32
Figura 7 - Formação de biofilme em um filtro geotêxtil não tecido submetido ao fluxo de lixiviado..	36
Figura 8 - Curva típica do crescimento bacteriano.....	37
Figura 9 - Biofilme em amostra geotêxtil em diferentes vistas.....	38
Figura 10 - Precipitação e depósito de calcita desencadeada pela colmatação química	41
Figura 11 - Geotêxteis utilizados na pesquisa	46
Figura 12 - Aterro Sanitário de São Carlos	47
Figura 13 - Localização da caixa de passagem de lixiviado no aterro:	48
Figura 14 - Ilustração da vista frontal da caixa de passagem.....	49
Figura 15 - Identificação dos condutos e das colunas de filtração de lixiviado	50
Figura 16 - Registro de precipitação no aterro sanitário	52
Figura 17 - Ilustração da concepção das colunas de filtração	54
Figura 18 – Colunas de filtração	54
Figura 19 - Coluna com adição de resíduo sólido.....	55
Figura 20 - Esquema da captação das colunas para os testes de permeabilidade: a) Esquema da caixa de passagem; b) Aquisição da coluna de dentro da caixa de passagem; c) Posicionamento da coluna para os testes de filtração.	56
Figura 21 - Equipamento e manuseio das amostras do material retido pelos filtros: a) Amostra fixadas no suporte com leve recobrimento de metalização em ouro; b) Microscópio TESCAN - MIRA.....	59
Figura 22 - Evolução das características do lixiviado: pH, SDT, DBO, DQO e COT.....	62
Figura 23 - Monitoramento térmico in loco do bloco de ensaios 1.....	66
Figura 24 – Monitoramento térmico in loco do bloco de ensaio 2.....	66
Figura 25 - Monitoramento das vazões geradas do bloco de ensaios 1.....	68
Figura 26 - Monitoramento das vazões geradas do bloco de ensaios 2.....	69
Figura 27 - Vazão de percolação das colunas do bloco de ensaios 1	70
Figura 28 - Vazões de percolação das colunas do bloco de ensaios 2	70
Figura 29 - Evolução da permeabilidade do bloco de ensaios 1	72
Figura 30 - Evolução da permeabilidade do bloco de ensaios 2	73
Figura 31 – Índice pluviométrico do bloco de ensaios 1.....	74
Figura 32 – Índice pluviométrico do bloco de ensaios 2.....	74
Figura 33 - Evolução da permeabilidade das colunas com resíduos sólidos.....	75
Figura 34 - Evolução da permeabilidade das colunas desprovidas de resíduos sólidos.....	76
Figura 35 - Umidade de campo e sólidos totais das amostras do material retido das colunas	78
Figura 36 - Curva granulométrica do material retido das colunas GTT0400 e GTT0400RSU	81
Figura 37 - Curvas granulométricas do material retido das colunas GTT3100 e GTT3100RSU	82
Figura 38 - Curvas granulométricas do material retido das colunas GTNT0150 e GTNT0150RSU....	83
Figura 39 - Estruturas bacterianas da família cocos.....	84
Figura 40 – Estruturas bacterianas e fungos presentes nos sedimentos	85
Figura 41 – Protozoário encontrado na amostra de sedimentos	85
Figura 42 – Amostras do material retido das colunas	87

Figura 43 – Mapeamento químico do material retido nas colunas de filtração.....	89
Figura 44 - Difratoograma obtido do material retido do bloco de ensaios experimentais 1	91
Figura 45 - Difratoograma do bloco de ensaios experimentais 2.....	92
Figura 46 - Filamentos dos geotêxteis virgens utilizadas como filtros	94
Figura 47 – Regiões de análises de biofilmes e sedimentos das colunas GTT0400 e GTT0400RSU ..	95
Figura 48 – Visualização das estruturas biológicas, precipitado de sedimento e a superfície do geotêxtil.....	95
Figura 49 – Seleção da área para mapeamento químico dos filtros das colunas GTT0400 e GTT0400RSU	96
Figura 50 – Mapeamento químico das regiões.....	97
Figura 51 – Regiões de análises de biofilmes e sedimentos das colunas GTT3100 e GTT3100RSU ..	98
Figura 52 - Visualização das estruturas biológicas, precipitado de sedimento e a superfície dos geotêxteis.....	99
Figura 53 - Estruturas morfológicas bacterianas nos filamentos dos geotêxteis	99
Figura 54 - Seleção da área para o mapeamento químico	100
Figura 55 - Mapeamento químico da região	100
Figura 56 - Regiões de análises de biofilmes e sedimentos das colunas GTNT0150 e GTNT0150RSU	101
Figura 57 - Visualização das estruturas biológicas, precipitado de sedimento e a superfície dos geotêxteis.....	102
Figura 58 - Seleção da área para o mapeamento químico	103
Figura 59 - Mapeamento químico da região	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Método de fabricação, tipos de fibras e funcionalidade de geotêxteis tecidos.....	24
Tabela 2 - Estudos sobre filtros em ambientes altamente orgânicos.....	44
Tabela 3 - Propriedades dos geotêxteis.	46
Tabela 4 - Caracterização do Lixiviado	51
Tabela 5 - Distribuição das colunas de filtração no tempo	57
Tabela 6 - Classificação da biodegradabilidade do resíduo e do lixiviado	64
Tabela 7 - Massa retida pelos filtros nas colunas.....	78

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos geral e específicos	20
1.1.1 Objetivo Geral.....	20
1.1.2 Objetivos específicos	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Permeabilidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	21
2.2 Desempenho de filtros geotêxteis aplicados em aterros sanitários.....	23
2.3 Mecanismos de colmatação	30
2.3.1 Colmatação física.....	30
2.3.2 Colmatação biológica	35
2.3.3 Colmatação química.....	40
2.4 Ensaio de filtração com geotêxteis.....	42
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Materiais	45
3.1.1 Geotêxteis	45
3.1.2 Aterro Sanitário de São Carlos	47
3.1.3 Características do lixiviado.....	50
3.1.4 Concepção das colunas de filtração	53
3.2 Métodos	56
3.2.1 Ensaio de filtração utilizando colunas de filtração.....	56
3.2.2 Análise do material retido pelos filtros.....	57
3.2.2.1 Microscopia digital celular do material retido	58
3.2.2.2 Microscopia eletrônica de varredura do material retido	58
3.2.2.3 Difração de raios-x do material retido	59
3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura dos filtros geotêxteis exumados ...	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1. Monitoramento das propriedades físico-químicas do lixiviado	61
4.2 Análise e monitoramento da temperatura do lixiviado em campo	65
4.3 Monitoramento das vazões de jusante da tubulação e percoladas nas colunas	67
4.4 Evolução da permeabilidade dos sistemas filtrantes	72
4.5 Análise do material retido pelos filtros.....	78
4.5.1. Umidade e Sólidos Totais	78
4.5.2 Análises granulométricas	80

4.5.3	Análise bacteriana e parasitológica do material retido	84
4.5.4	Análises MEV e análises químicas do material retido.....	86
4.5.4.1	Amostras conjuntas dos materiais retidos.....	86
4.5.4.2	Mapeamento químico das amostras conjuntas dos materiais retidos	88
4.5.4.3	Análises de difração de raios-x do material retido	91
4.6	Avaliação dos geotêxteis exumados pós-ensaios	93
4.6.1	Microscopia eletrônica de varredura.....	93
4.6.1.1	Análise dos filtros das colunas GTT0400 e GTT0400RSU	94
4.6.1.2	Análise dos filtros das colunas GTT3100 e GTT3100RSU	98
4.6.1.3	Análise dos filtros das colunas GTNT0150 e GTNT0150RSU...	101
5.	CONCLUSÕES.....	105
6.	DELIMITAÇÕES DA PESQUISA E SUGESTÕES FUTURAS	106
	REFERÊNCIAS	109

1. INTRODUÇÃO

Os aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) constituem um sistema de disposição e contenção dos resíduos, visando garantir a segurança e controle da poluição ambiental, bem como a proteção à saúde, minimizando os impactos ambientais. A formação dos líquidos gerados no interior de aterros, os líquidos percolados (ou lixiviados), é composta por parcelas de umidade com que os resíduos são dispostos e pela água proveniente de índices pluviométricos. Os líquidos captados, são transportados para locais onde possa ser realizado o devido tratamento. Além disso, por meio de barreiras de fundo e cobertura, as quais são compostas por o sistema de drenagem de lixiviados e gases, cujos materiais podem ser compostos pedregulho ou brita, e por sistemas de impermeabilização, geralmente compostos por geomembranas e geocompostos bentoníticos (GCLs), ou camada de argila compactada, onde possa ser evitada a infiltração ao subsolo provocando contaminações.

Ao longo do processo de operação e pós-fechamento volumes relativamente grandes de lixiviado são produzidos pela decomposição da matéria orgânica sólida que compõe o RSU. A percolação de lixiviado advindos dos RSU, são captados pelo sistema de drenagem e transportado até uma estação de tratamento. A abordagem clássica para camadas filtrantes envolve o uso de material granulares e diferentes frações granulométricas, como areias e pedregulhos. A camada filtrante tem por função separar a porção sólida e filtrar o percolado dos resíduos antes de acessar a camada de rachão de drenagem. Embora eficaz, esses materiais nem sempre estão disponíveis e sua extração pode causar impactos ambientais, além de ocupar grandes volumes nas células de aterro, reduzindo a capacidade de armazenamento de resíduos.

Por isso, materiais geossintéticos, como geotêxteis, geotubos e geocompostos drenantes, têm ganhado destaque como alternativas em obras sanitárias devido à praticidade de instalação, baixa massa por unidade de área e grande eficiência. Amplamente utilizados devido à sua versatilidade e garantia de qualidade, os geossintéticos oferecem uma economia em comparação com os filtros granulares tradicionais, além de desempenhar uma dupla função ao separar os resíduos e permitir a passagem do percolado (Palmeira, 2020).

Geotêxteis são os mais empregados nesses tipos de aplicação, podem ser tecidos, não tecidos, tricotados ou termo ligados, são comumente fabricados a partir de poliéster (PET) ou polipropileno (PP). Dotados de uma estrutura bidimensional permeável, os geotêxteis possuem propriedades mecânicas e hidráulicas que possibilitam uma ampla gama de aplicações em obras geotécnicas. Sua fabricação envolve o uso de fibras de alta tenacidade e aditivos que garantem sua durabilidade em condições ambientais adversas. Entretanto, ao serem empregados como

filtros em aterros, estes estão suscetíveis a mecanismos de colmatção que incluem a impregnação dos poros por processos físicos, químicos e/ou biológicos como o desenvolvimento e proliferação de filmes bacterianos (Tang *et al.* 2018; Wu *et al.* 2018; Li *et al.* 2021; Wang *et al.* 2023).

A colmatção dos filtros geotêxteis é resultado da passagem do líquido percolado, que pode conter diversos componentes, físicos, químicos e biológicos (Ya *et al.* 2018). É fundamental drenar, captar e realizar o pré-tratamento do lixiviado para evitar a contaminação do solo e dos corpos d'água através do sistema de impermeabilização. E assegurar a estabilidade do aterro, além de reduzir os custos associados a disposição do lixiviado e dos resíduos. A combinação do aumento da carga hidráulica devido ao acúmulo de lixiviados gerado pela redução da condutividade dos elementos filtrantes provoca um aumento exponencial no risco de estabilidade e na estanqueidade das barreiras de fundo do aterro (Parameswari *et al.* 2021, He e Ouyang, 2023). Os geotêxteis devem apresentar capacidade de filtração eficiente, sem comprometer a condutividade hidráulica do sistema, assegurando o fluxo contínuo de água através de sua estrutura porosa (Koerner, 2020). Para tanto, é essencial que a abertura de filtração seja adequadamente dimensionada, minimizando o mecanismo de colmatção e a migração de finos e sedimentos grosseiros (Tanasa *et al.* 2022).

O desafio dos projetistas reside em encontrar um equilíbrio na capacidade de retenção de partículas, matéria orgânica, resíduo do filtro e manter a permissividade mínima do geotêxtil de modo que este cumpra sua função sem prejudicar a deformabilidade e estabilidade do aterro. A ausência de um filtro geotêxtil em sistemas de drenagem pode resultar na migração de partículas finas do solo e dos resíduos para a camada drenante, levando à obstrução e à redução da capacidade de fluxo hidráulico (Koerner, 2020). Por outro lado, a utilização de um geotêxtil com abertura de filtração baixa pode ocasionar a obstrução prematura, aumentando a pressão hidráulica no interior do aterro e reduzindo a vazão de percolação (Odabasi *et al.* 2022). Em contrapartida, um filtro com abertura de filtração alta permite a passagem de finos, podendo resultar na colmatção da camada drenante e na perda de desempenho ao longo do tempo (Palmeira e Gardoni, 2020). Portanto, o dimensionamento adequado do geotêxtil deve equilibrar a retenção de partículas e a manutenção da condutividade hidráulica, considerando as características granulométricas do solo e as condições de carregamento (Khan *et al.* 2022). Logo, este fenômeno demanda estratégias eficazes de projeto e manutenção para garantir o desempenho adequado de dupla função (filtração e drenagem) dos sistemas de filtração em

aterros sanitários. Portanto o emprego de geotêxteis como elemento filtrante deve ser investigado minuciosamente.

Poucos estudos abordam os desafios técnicos envolvidos na aplicação de geotêxteis como filtro na interface entre os resíduos sólidos e a camada drenante de base em aterros sanitários, e pesquisadores destacam a importância de avançar nessas investigações para garantir o desempenho e a durabilidade desses sistemas (Rowe, 2005; Koerner, 2020; Palmeira, 2020). Para essa configuração exige que o geotêxtil apresente alta resistência mecânica e química, uma vez que geotêxteis não tecidos são mais suscetíveis à colmatação quando em contato direto com resíduos sólidos e o líquido gerado, o lixiviado (Cancelli e Cazzuffi, 1987; Liu *et al.* 2018; Wang *et al.* 2023).

Contudo, embora já existam filtros de solo amplamente utilizados e técnicas consagradas para o dimensionamento de sistemas drenantes em aterros sanitários, diversos estudos carecem de especificações técnicas completas para o emprego de geotêxteis, como parâmetros críticos de abertura de filtração, massa por unidade de área, resistência mecânica e compatibilidade química com o lixiviado. Essa lacuna normativa gera incertezas quanto à eficácia dos geotêxteis como elementos filtro-drenantes em aplicações reais, evidenciando a necessidade de pesquisas adicionais para consolidar critérios específicos de projeto (Zhao e Karim, 2018). Adicionalmente, a maioria das pesquisas são conduzidas em condições laboratoriais “ideais”, que divergem significativamente das condições operacionais reais em três aspectos principais: (1) variabilidade na implementação dos sistemas, (2) heterogeneidade composicional dos resíduos sólidos - que apresenta variações regionais - e (3) flutuações ambientais nos regimes de precipitação, características do lixiviado e temperatura (Bouazza *et al.* 2022). Essa discrepância entre condições controladas e cenários reais pode comprometer a transposição direta dos resultados para projetos de engenharia.

No Brasil, a aplicação de geotêxteis nas áreas de engenharia geotécnica e ambiental tem experimentado um crescimento substancial, particularmente em iniciativas de infraestrutura que abrangem estradas, ferrovias, barragens, canais e sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos. Nas operações de aterro sanitário, os geotêxteis são amplamente empregados como elementos filtrantes em sistemas de drenagem, ajudando a camada de resíduos da camada de drenagem e mitigando a migração de partículas finas que poderiam impedir a funcionalidade da rede de drenagem (ABINT, 2010).

Portelinha, Zanon e Rocha (2024) discutem a aplicação de geotêxteis como elementos filtrantes em sistemas de filtração e drenagem, destacando inúmeros relatos no Brasil e no exterior que apontam preocupações quanto à obstrução desses materiais e à consequente

redução da condutividade hidráulica. Esta investigação, fundamentada em uma ampla revisão da literatura e em entrevistas qualitativas com profissionais do setor, conclui que, quando criteriosamente selecionados, os geotêxteis podem apresentar desempenho satisfatório. Os autores ressaltam a importância de considerar as propriedades do lixiviado, os agregados da camada drenante e a dinâmica operacional dos aterros sanitários. O estudo evidencia que o emprego de geotêxteis em sistemas de drenagem de aterros é viável e traz benefícios, desde que sejam rigorosamente atendidas as especificações técnicas relacionadas a seleção de materiais compatíveis e que atendam o projeto. Nesse sentido, aponta-se como uma linha promissora de investigação a análise do comportamento de geotêxteis com aberturas de filtração maiores, superiores a 0,50 mm, como aponta Giroud (1996), especialmente frente às características específicas do lixiviado e às condições operacionais dos aterros, buscando avaliar sua eficácia e durabilidade ao longo do tempo.

Assim, uma das finalidades desta investigação é conduzir ensaios de filtração em condições de campo em escala piloto, utilizando colunas de filtração para determinação da permeabilidade. Diante desse cenário, este estudo propõe-se a contribuir para o entendimento do desempenho de geotêxteis atuando como elementos filtro-separadores na camada drenante de base de aterros sanitários, considerando três diferentes faixas de abertura de filtração. Um deles, busca-se investigar a avaliação de um novo material geotêxtil tecido não convencional de grande abertura de filtração. Além disso, avaliar o papel dos filtros na retenção de partículas presentes no lixiviado de RSU e sua influência na permeabilidade do sistema envolvendo os mecanismos de colmatação. A investigação experimental foca na evolução da permeabilidade ao longo do tempo, agentes e fatores que possam contribuir com a redução da permeabilidade (mecanismos de colmatação), para a avaliação do funcionamento desses elementos na eficiência da drenagem em sistemas de aterros sanitários.

1.1 Objetivos geral e específicos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia de ensaio de filtração que pudesse estabelecer condições mais próximas das operacionais em escala piloto e, com isso, avaliar o comportamento de sistemas filtro drenantes em aterros sanitários que utilizaram três diferentes geotêxteis de polipropileno (dois tecidos e um não tecido), especificamente com diferentes aberturas de filtração, utilizados como elementos de filtração.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema de ensaios de filtração que reproduza, de forma mais próxima, as condições de operação da drenagem de base de campo de um aterro sanitário.
- Comparar o comportamento de filtração ao longo do tempo do geotêxtil de polipropileno de grande abertura com um geotêxtil tecido de polipropileno e um não tecido de polipropileno convencionais.
- Identificar e analisar os mecanismos físicos, químicos e biológicos envolvidos no desenvolvimento dos mecanismos de colmatação nos diferentes geotêxteis, com ênfase no desempenho de geotêxteis de grande abertura, visando correlacionar suas propriedades.
- Verificar quais as consequências dos mecanismos envolvidos no processo de colmatação dos geotêxteis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o repertório bibliográfico que fundamenta a pesquisa, servindo como pilar para sustentar e correlacionar os pontos centrais do estudo. Além de reunir dados da literatura que conferem maior solidez à leitura, busca-se proporcionar ao leitor uma compreensão mais aprofundada do tema, bem como estabelecer uma base para a análise comparativa dos resultados obtidos neste trabalho.

2.1 Permeabilidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Fungaroli e Steiner (1979), por meio de um relatório sobre o comportamento dos aterros sanitários, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), ressaltam a importância da permeabilidade dos resíduos sólidos como um determinante fundamental para a dinâmica de líquidos percolados (lixiviados) e emissões gasosas. A análise ressalta que a permeabilidade dos resíduos depende de vários fatores, incluindo tamanho de partícula, densidade, teor de umidade, padrões de precipitação e atributos de composição. Além disso, o relatório ilustra que a permeabilidade saturada de resíduos exibe uma faixa de 10^{-4} a 10^{-6} m/s (para partículas maiores com menor densidade) e de 10^{-6} a 10^{-8} m/s (para partículas menores com maior densidade).

Oweis e Khera (1990) investigaram uma questão recorrente em relação às dimensões da geração e caracterização geotécnicas de resíduos sólidos nos Estados Unidos. A permeabilidade dos resíduos constitui um determinante que impacta a eficácia hidráulica e ambiental dos sistemas de disposição final. Os resíduos sólidos, devido à sua inerente heterogeneidade e diversidade granulométrica, exibem coeficientes de permeabilidade variáveis. Os valores típicos de permeabilidade de resíduos sólidos urbanos compactados podem flutuar entre 10^{-6} e 10^{-8} m/s, dependendo de fatores como a evolução da decomposição, teor de umidade e grau de compactação. Essa acentuada variabilidade na permeabilidade pode facilitar o início do pré-tratamento do lixiviado, necessitando da implementação de sistemas de drenagem e barreiras hidráulicas para mitigar efetivamente a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

Carvalho (1999) reuniu e conduziu sistematicamente uma análise de uma gama diversificada de dados extraídos da literatura técnica e científica referentes às características hidráulicas dos resíduos sólidos urbanos. Em termos de permeabilidade, a autora ressalta a extensa faixa observada em investigações anteriores, com coeficientes de permeabilidade fluando de 10^{-8} a 10^{-3} m/s. Essa variação observada é atribuída à heterogeneidade intrínseca

do resíduo, seu grau de decomposição, o nível de compactação aplicado e a coexistência de materiais orgânicos e inertes. A citação desses valores ressalta a complexidade inerente associada ao comportamento hidráulico dos resíduos sólidos urbanos e ressalta a necessidade de avaliações personalizadas em cada local de descarte específico, particularmente no contexto do projeto de sistemas de drenagem e contenção em aterros sanitários.

Mahler e Aguiar (2001) conduziram uma investigação sobre a permeabilidade *in situ* em aterros sanitários de resíduos sólidos utilizando o permeâmetro de Guelph (técnica utilizada para aquisição de dados como a permeabilidade). Os pontos foram realizados em camadas de cobertura compostas por solos argilosos compactados. Os resultados demonstraram valores de condutividade hidráulica saturada que variaram de 10^{-8} a 10^{-9} m/s. No entanto, em certos locais, medidas anômalas foram registradas, incluindo valores negativos, que foram atribuídos à compactação insuficiente ou à existência de vazios resultantes de sistemas radiculares e heterogeneidades do solo.

Durmusoglu, Sanchez e Corapcioglu (2006) analisaram os atributos de permeabilidade e compressibilidade de amostras de resíduos sólidos urbanos por meio de análises empíricas utilizando consolidômetros. As amostras foram avaliadas sob duas condições distintas de umidade: o conteúdo original e a capacidade de campo. Os resultados revelaram que os coeficientes de permeabilidade dos resíduos flutuam entre 10^{-6} e 10^{-4} m/s, dependendo das condições de umidade e do grau de compactação imposto. Além disso, percebeu-se que o efeito de escala afeta marcadamente a dinâmica de compressão de resíduos, ressaltando assim a necessidade de contabilizar a heterogeneidade e as condições específicas dos RSU no projeto e gerenciamento de aterros sanitários.

Marques *et al.* (2021), conduziram um experimento em campo onde avaliaram os efeitos do descarte de resíduos sólidos urbanos no solo em três municípios de Minas Gerais. Quantificaram valores de condutividade hidráulica que revelam notáveis variabilidade entre os vários tipos de instalações de disposição. O aterro sanitário em Campo Belo (aterro sanitário) exibiu o maior nível de permeabilidade, com uma medição média de $2,62 \times 10^{-4}$ m/s, seguido pelo aterro Elói Mendes (vazadouro) a $1,82 \times 10^{-5}$ m/s e pelo aterro sanitário regulado Santo Antônio do Amparo (aterro controlado) a $1,43 \times 10^{-4}$ m/s. Essas descobertas sugerem que, apesar das diferentes estruturas de disposição, a condutividade hidráulica dos resíduos está dentro da faixa de valores observados na literatura.

Kim (2019) analisou as características físicas dos resíduos sólidos provenientes de São Carlos. Os resultados revelaram que o RSU consistia predominantemente em matéria orgânica (37,48%), seguido por plásticos rígidos (7,25%), filmes plásticos (6,51%), papel (5,13%) e

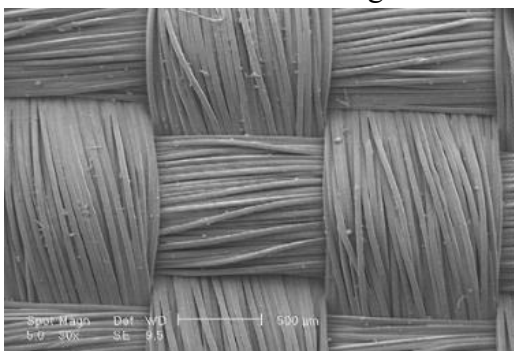
papelão (4,59%). Os materiais adicionais identificados abrangeram têxteis, couro e borracha (4,72%), vidro (3,10%), metais (1,73%), embalagens de longa duração (1,46%), lixo eletrônico (0,68%), embalagens farmacêuticas e de cosméticos (0,99%), bem como recipientes para tintas, unhas e inseticidas (0,47%). Os rejeitos representaram 25,89% da composição geral.

A granulometria, que se expõe o tamanho das partículas dos sedimentos de resíduos sólidos, pode influenciar diretamente o coeficiente de condutividade (ou permeabilidade) “k”. No que se diz aos resíduos sólidos, possuem uma extensa variabilidade sendo encontrados valores na literatura, uma vez que em sua composição existem uma variabilidade de matérias muito complexa atingindo no que tangencia os poros e os vazios dos resíduos sólidos urbanos. Tal variabilidade atingi valores variando entre 10^{-2} m/s à 10^{-9} m/s, e ainda sim muitos autores reiteram que é necessário se investigar para cada caso os valores de condutividade hidráulica, uma vez que se pode ter diferenças culturais e de consumismo nas regiões afetando a deposição dos resíduos sólidos urbanos.

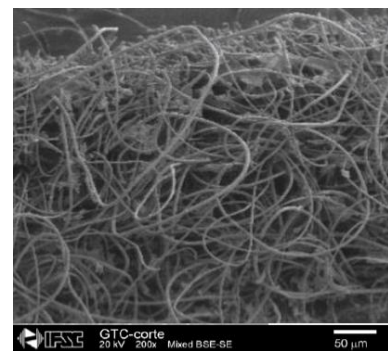
2.2 Desempenho de filtros geotêxteis aplicados em aterros sanitários

Para iniciar o entendimento propriamente dito do desempenho de filtro geotêxteis, devemos atentar para os tipos geotêxteis, sendo geotêxteis tecidos e geotêxteis não tecidos. A NBR ISO 10318:2021 enfatiza que os geotêxteis tecidos são aqueles produzidos entrelaçando suas fibras ou elementos, uma sobre outras como pode observar na Figura 1.

Figura 1 – Geotêxteis: tecido e não tecido



a) Geotêxtil tecido



b) Geotêxtil não tecido

Fonte: a) Afzali-Nejad; Lashkari; Shourijeh, (2017); b) Silva, (2013).

O processo de fabricação dos geotêxteis tecidos podem ser realizados por monofilamentos, multifilamentos ou laminetes e podem apresentar características de funcionamento distintas. Aplicados em uma vasta gama de obras com funcionalidade similar

(Mortara, 2011). A Tabela 1 resume o método de fabricação tipo tecido, o processo de fabricação e as características de funcionalidade.

Tabela 1 - Método de fabricação, tipos de fibras e funcionalidade de geotêxteis tecidos

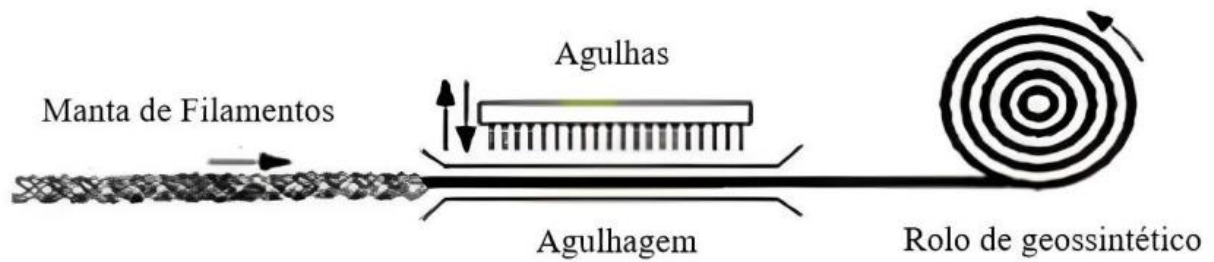
Fibras	Funcionalidade
Monofilamentos	Tamanho de abertura equivalente relativamente elevada;
	Alta permissividade;
Multifilamentos	Fibras podem se afastar mudando o tamanho de abertura no tempo.
	Maior resistência a perfuração;
Laminetes	Permissividade média;
	Tamanhos de aberturas equivalentes menores.
Laminetes	O tamanho de abertura equivalente pode ser controlado no processo de fabricação;
	A permissividade varia de média a alta;
Laminetes	Fibras podem se afastar mudando o tamanho de abertura no tempo.

Fonte: Adaptado de Trejos, (2016).

De acordo com Vertematti (2014), a construção de geotêxteis não tecidos envolve a distribuição desordenada de fibras, filamentos ou outros elementos, em contraste com o arranjo ordenado dos geotêxteis tecidos. Esses elementos são interconectados por meio de vários processos mecânicos, térmicos ou químicos.

Geotêxteis não tecidos podem ser produzidos usando filamentos contínuos ou fibras cortadas, com a distinção no comprimento do filamento. A ligação entre os elementos pode ser obtida por meio de calandragem, agulhamento ou resinagem. Calandragem é um processo térmico, agulhamento, é um processo mecânico, conforme mostrado na Figura 2, ou resinagem, que é um processo químico.

Figura 2 - Idealização do processo de agulhagem do geotêxtil não tecido

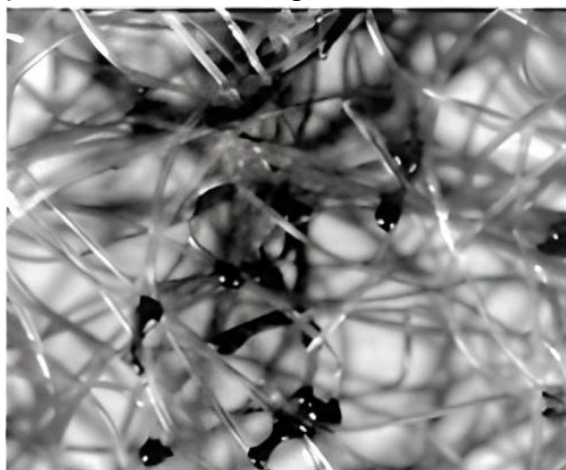


Fonte: Adaptado de Lima, (2014).

Em geotêxteis não tecidos costurados com agulha, as fibras são interconectadas mecanicamente por meio de um procedimento de agulhamento. Nesse procedimento específico, as fibras, que estão dispostas na correia transportadora, são passadas por baixo de uma placa que possui uma sequência de agulhas dentadas. A conexão é estabelecida por meio da penetração repetida das agulhas em várias profundidades dentro do material, induzindo assim o entrelaçamento dos filamentos (ABINT, 2010).

Nos geotêxteis não tecidos termo ligados, Figura 3, o entrelaçamento dos filamentos é obtido por meio de um processo de fusão parcial facilitado pela aplicação de calor. Conforme indicado pela ABINT (2010), essa conexão é estabelecida por meio de um mecanismo de fusão parcial envolvendo as calandras. Consequentemente, esse procedimento específico pode resultar na formação de conexões, tanto em pontos discretos quanto em seções mais amplas do geotêxtil.

Figura 3 - Disposição dos filamentos de geotêxtil não tecido do tipo termo ligado



Fonte: Adaptado de Mark *et al.* (1986).

O entrelaçamento de filamentos em geotêxteis resinados é obtido por meio do uso de produtos químicos, como a resina acrílica, que são aplicados por pulverização ou imersão. De

acordo com a pesquisa realizada por Cruz *et al.* (2011), geralmente é aconselhável evitar o uso de geotêxteis resinados em projetos focados em proteção e separação. Essa precaução é necessária porque qualquer interação entre a resina geotêxtil e outras substâncias químicas pode potencialmente levar a reações indesejáveis que podem comprometer a eficiência do filtro.

Logo, algumas grandezas são extremamente relevantes ao analisar o desempenho dos geotêxteis, como a espessura, a porosidade, a gramatura, o diâmetro das fibras. Juntas elas compõem as propriedades físicas dos geotêxteis.

Já as propriedades da filtração dos geotêxteis, estão ligadas as propriedades hidráulicas do material que irá compor o filtro. A análise se dá pela permeabilidade que se subdivide em permeabilidade normal ou permissividade (fluxo ocorre perpendicular ao plano de instalação do geotêxtil) e permeabilidade planar ou transmissividade (fluxo ocorre paralelo a instalação do geotêxtil). Ambas são relacionadas com a espessura do geotêxtil e o coeficiente de permeabilidade do material na direção analisada. Logo os aspectos, ligados as características hidráulicas dos materiais, devem ser levados em consideração; fatores como a granulometria, o índice de vazios e a porosidade, a estrutura, o tipo de fluido e a temperatura.

A eficácia dos filtros geotêxteis em obras de aterros sanitários está fundamentalmente associada ao desempenho hidráulico e às características mecânicas, ambos determinantes críticos da longevidade e eficiência operacional da rede de drenagem de lixiviado. Pesquisas indicam que os geotêxteis não tecidos, devido à sua configuração inerentemente porosa, exibem notável proficiência na retenção de material particulado fino (Palmeira *et al.* 2008; Rowe e Yu, 2010). No entanto, a ocorrência de colmatação biológica, física e química, instigada pela deposição de minerais como carbonatos e sulfetos, alta carga orgânica e sólidos presentes no lixiviado, tem o potencial de prejudicar substancialmente a condutividade hidráulica com o passar do tempo (Koerner e Koerner, 1995; McIsaac e Rowe, 2006). Além disso, a integridade mecânica desses materiais é essencial para suportar tensões estáticas e dinâmicas durante toda a vida do aterro (Giroud *et al.* 1990; Palmeira e Gardoni, 2000).

O índice de vazios é um aspecto que se relaciona com a permeabilidade, destacando a porosidade dos materiais que podem ser utilizados como caminhos preferenciais do escoamento. Logo, quanto mais poroso for um meio, maior será o índice de vazios e por consequência terá maior permeabilidade. A estrutura, que é o arranjo do meio, também tem um impacto no processo de avaliação da permeabilidade. Nos resíduos sólidos, a heterogeneidade,

faz com que o arranjo macroestrutural tenha um papel condicionante na condutividade hidráulica decorrente da formação do lixiviado.

O fluido percolante também é um fator importante, uma vez que os poros dos resíduos serão preenchidos com a decomposição dos resíduos (lixiviado) e processos de infiltração pluvial. Para medição de algumas propriedades é necessário realizar o balanceamento com as propriedades da água. A temperatura, possui um papel significativo, a exemplo, em água, quanto maior a temperatura, menor será sua viscosidade. No interior do aterro, a temperatura está ligada ao processo síntese microbológica, o que influencia diretamente na formação do lixiviado (Krause *et al.* 2023).

Um ensaio extremamente relevante para a determinação da permeabilidade do geotêxtil, é a abertura de filtração cujo parâmetro é o mais importante na medida do potencial de fluxo do material, sendo o mais utilizado em dimensionamento de filtro geotêxteis. Outros critérios também são cuidadosamente observados ao longo da concepção de projeto, como a flexibilidade, resistência a passagem de água, resistência a agressividade do meio ambiente, resistência a perfuração dinâmicas, e a energia de deformação absorvida. Melo (2018) aborda uma série de técnicas de teste que são empregadas para determinar a abertura de filtração de geotêxteis. Essas técnicas são categorizadas como avaliação indireta ou avaliação direta. O primeiro abrange métodos como triagem e análise de imagens, enquanto o último abrange testes de capilaridade (Palmeira, 2008).

Os ensaios de filtração e de compatibilidade são ensaios propriamente ligados juntos aos demais parâmetros do mecanismo da filtração, ensaios de desempenho. O primeiro é o ensaio de filtração da fração fina (f^3), normatizado pela ASTM D5141, onde na sua interpretação se destaca: as partículas de solo passam continuamente através da camada de geotêxtil (*piping*); as partículas de solo se acumulam sobre a camada de geotêxtil ou no seu interior, reduzindo a vazão, além de limites pré-estabelecidos para o adequado funcionamento; as partículas de solo formam uma camada estável sobre o geotêxtil, com vazão constante, que satisfaz as condições de operação requeridas no sistema. O segundo ensaio é o da condutividade hidráulica, normatizado pela norma ASTM D5567 que visa verificar a compatibilidade de solo ou qualquer outro material com os filtros geotêxteis. Similar ao ensaio triaxial realizado para verificar a resistência ao cisalhamento dos solos, uma membrana de borracha envolve o corpo de teste do solo para separá-lo da água empregada para a imposição da tensão de confinamento. Posicionado abaixo do corpo de teste do solo e sobre uma base de drenagem, o espécime geotêxtil é submetido ao fluxo de água para observar as alterações no fluxo e na permeabilidade geral do sistema solo-geotêxtil. O terceiro, é o ensaio da razão entre os gradientes que visa

identificar a compatibilidade entre os geotêxteis e os solos granulares ou qualquer outro material, sendo normatizado pela norma ASTM D5101.

De acordo com Vertematti (2014), o desempenho de um material como filtro geotêxtil é avaliado com base em quatro critérios fundamentais. O critério de retenção visa garantir que o geotêxtil seja eficaz na retenção das partículas do solo ou sedimento, prevenindo sua passagem substancial através do filtro e a formação de tubulação. O critério de permeabilidade deve manter um coeficiente de permeabilidade significativamente maior do que o solo ou camada adjacente, adequando-se às características do projeto e ao regime de fluxo previsto. O critério de sobrevivência e durabilidade possua propriedades mecânicas adequadas para resistir a danos durante manuseio, instalação e operação, com uma durabilidade compatível com a vida útil estimada do projeto. O critério anticolmatação deve ser projetado para evitar qualquer forma de obstrução que possa comprometer sua eficácia ao longo do tempo.

A eficácia dos filtros geotêxteis utilizados nos sistemas de drenagem de aterros sanitários está fundamentalmente ligada ao seu desempenho hidráulico e suas respostas à obstrução, deformação e interações com o lixiviado. O principal papel desses materiais geossintéticos é facilitar a passagem de fluidos e, ao mesmo tempo, reter partículas sólidas, evitando a obstrução das camadas de drenagem e garantindo o fluxo intermitente de lixiviado em direção a lagoa de coleta. O desempenho desses filtros é significativamente afetado por características como abertura de filtração, espessura, permeabilidade normal no plano e sua resistência química ao ambiente agressivo apresentado pelos resíduos e o lixiviado.

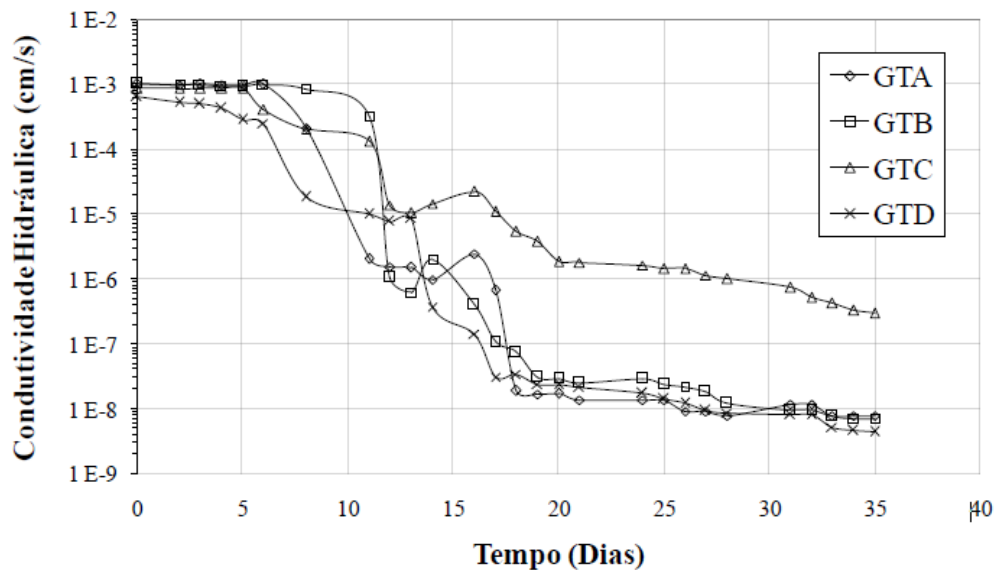
Rowe (2005) enfatiza que a durabilidade e a eficácia operacional dos geotêxteis podem ser afetadas mutuamente por mecanismos de colmatação física e biológica, particularmente em sistemas projetados inadequadamente ou submetidos a cargas orgânicas elevadas. Da mesma forma, a investigação de Koerner (2012) revela que a taxa de fluxo de filtração pode diminuir em até 90% ao longo do tempo devido ao bloqueio sucessivo, prejudicando gravemente a eficácia do sistema de drenagem nos casos em que há falta de compatibilidade entre o filtro e o meio granular subjacente.

Koerner (1993) indica que a condutividade hidráulica dos sistemas de filtração de geotêxteis pode diminuir de 10^{-3} para 10^{-7} m/s (4 ordens de magnitude) ao longo do tempo, ressaltando a necessidade de avaliações dos mecanismos de colmatação em laboratório e avaliações de compatibilidade hidráulica em grande escala. Além disso, a pesquisa conduzida por Rowe *et al.* (2006) fornece evidências que ressaltam a importância crítica de compatibilizar materiais geotêxteis com materiais granulares especificamente escolhidos para estabelecer

sistemas de filtração e drenagem composta mais estáveis e resilientes, mitigando assim o risco de falhas prematuras atribuíveis à obstrução ou deformação sob tensões.

Silva (2013) conduziu um estudo laboratorial sobre a permeabilidade de quatro geotêxteis (Figura 4) três não tecidos – GTA (abertura de filtração: 0,147 mm), GTB (abertura de filtração: 0,136 mm) e GTC (abertura de filtração: 0,120 mm) e um tecido GTD (abertura de filtração: 0,288 mm). Sendo GTA, GTB e GTD fabricados com poliéster e GTC polipropileno. Os geotêxteis empregados como filtros registraram uma diminuição de até cinco ordens de magnitude durante as fases de teste, ilustrando um padrão típico de obstrução gradual do meio por partículas finas e materiais orgânicos presentes no lixiviado. Essa variação substancial prejudica a eficácia hidráulica do sistema, o que pode impedir a coleta efetiva e o fluxo direcional adequado do efluente, reforçando assim a necessidade de testes de compatibilidade e dimensionamento detalhado dos filtros.

Figura 4 - Ensaio de condutividade hidráulica dos geotêxteis



Fonte: Silva (2013).

O estudo realizado por Wang *et al.* (2023) investigou a natureza evolutiva dos bloqueios em sistemas simulados de coleta de lixiviado (LCS) durante um período de 215 dias. Os resultados mostraram que os bloqueios se acumularam em todos os componentes dos LCS, abrangendo tanto obstruções químicas quanto biológicas. Foi identificada variação perceptível na distribuição espacial dos bloqueios ao longo do caminho do fluxo de lixiviado, com destaque para o bloqueio substancial observado no geotêxtil em função de fatores biológicos. Além disso, verificou-se a predominância de bloqueios químicos nas camadas superior e média do cascalho, enquanto os bloqueios biológicos exerceram maior impacto no geotêxtil. Com o tempo, a

proporção de bloqueios químicos diminuiu no estrato inferior do cascalho. Esses resultados ressaltam a importância de compreender as características espaciais e temporais dos bloqueios em LCS, de modo a aprimorar o projeto e desenvolver estratégias eficazes de gerenciamento.

Além da permeabilidade dos resíduos, dos geotêxteis, há pesquisas e normativas que indicam a condutividade hidráulica da camada drenante. No Brasil, embora não existam valores normativos específicos para a condutividade hidráulica mínima do sistema de coleta de lixiviado, alguns projetistas no Brasil adotam como referência o valor de 10^{-2} cm/s. Em outros países, contudo, há diretrizes mais definidas: Koerner e Koerner (1990) documentam que essa condutividade pode variar de 10^{-3} m/s na Alemanha a 10^{-4} m/s no Canadá, França e Estados Unidos. Na China, Liu *et al.* (2018) indicam valores entre 10^{-4} e 10^{-5} m/s, enquanto na Austrália a agência ambiental reguladora (EPA, 2016) estabelece um mínimo de 10^{-3} m/s.

Portanto, a eficácia dos filtros geotêxteis em aplicações em aterros sanitários depende de uma interação complexa entre as características do geotêxtil, os atributos físico-químicas dos resíduos e do lixiviado além das condições operacionais do sistema no dimensionamento. Uma avaliação abrangente do comportamento hidráulico, mecânico e químico desses materiais é fundamental para garantir a eficiência a longo prazo da drenagem do lixiviado e a integridade ambiental do projeto.

2.3 Mecanismos de colmatção

Os processos pelos quais os sistemas de drenagem de aterros sanitários são obstruídos, ocorrem por meio de três mecanismos de colmatção: física (acúmulo de partículas sólidas), biológica (desenvolvimento de biofilmes e movimentação microbiana) e química (deposição e formação de compostos inorgânicos e minerais). Esses processos inter-relacionados frequentemente funcionam em conjunto para diminuir a permeabilidade do sistema e obstruindo vazios.

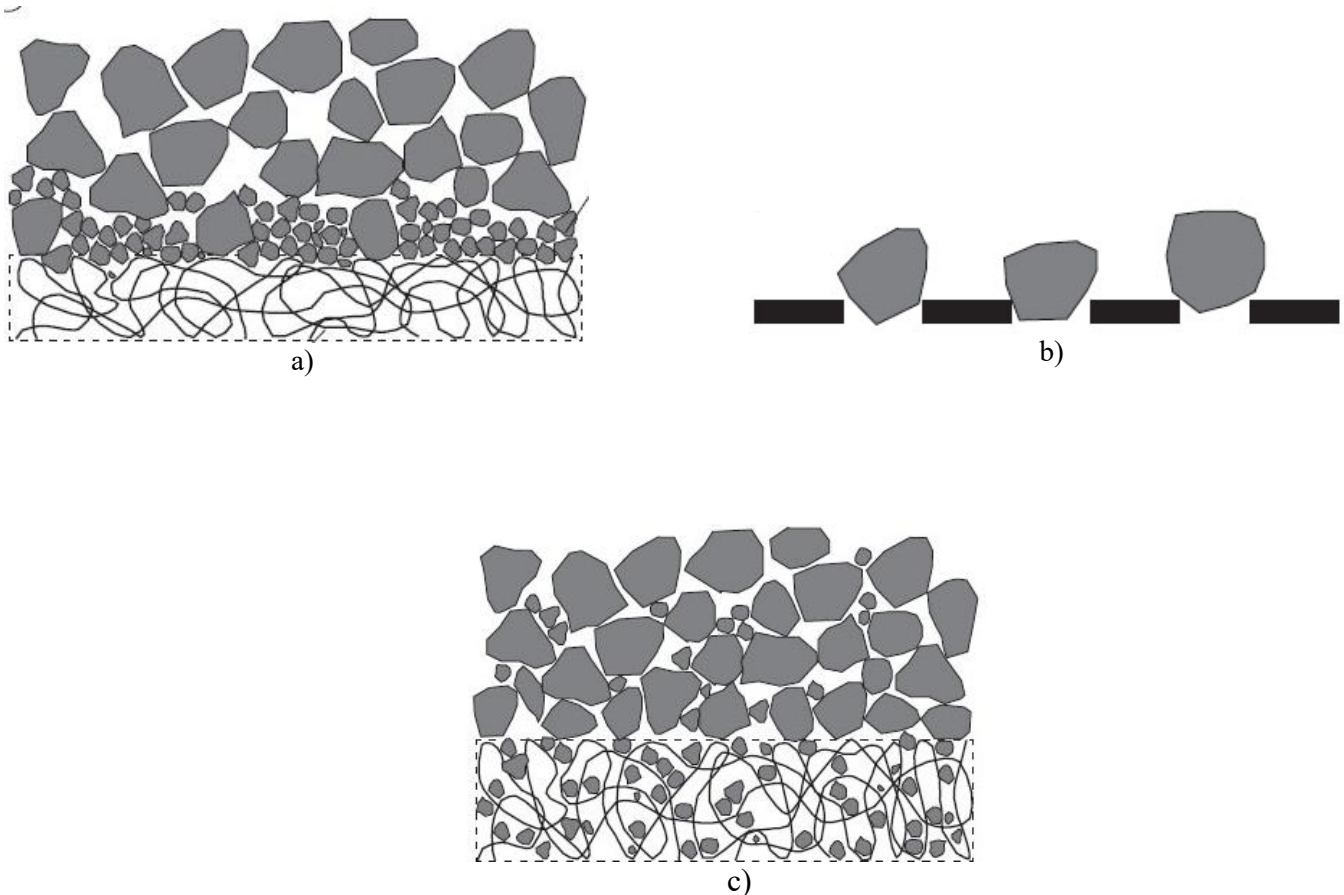
2.3.1 Colmatção física

O mecanismo de colmatção física observada nos sistemas de filtração é instigado principalmente pelo acúmulo gradual de sólidos que estão contidos no fluxo de percolado, que apresentam tendências de aderir à superfície e/ou à arquitetura porosa do meio filtrante. De acordo com a classificação apresentada por Palmeira (2008), Figura 5, esse fenômeno pode ser

categorizado em três mecanismos distintos, que são diferenciados pela localização específica e modalidade de deposição de partículas sólidas em todo o meio filtrante:

- a) Cegamento: consiste no acúmulo de partículas com dimensões menores que a aberturas do filtro sobre sua superfície, formando uma camada de baixa permeabilidade.
- b) Bloqueamento: ocorre quando as partículas se posicionam sobre as aberturas do geotêxtil, causando um fechamento, acarretando um mau funcionamento do filtro, é mais comum em geotêxteis tipo tecidos.
- c) Obstrução Interna: ocorre quando as partículas se acomodam no interior dos poros do filtro promovendo uma resistência e em certos casos, uma interrupção no fluxo no interior do filtro.

Figura 5 - Tipologia da colmatação física: a) cegamento; b) bloqueamento; c) obstrução interna



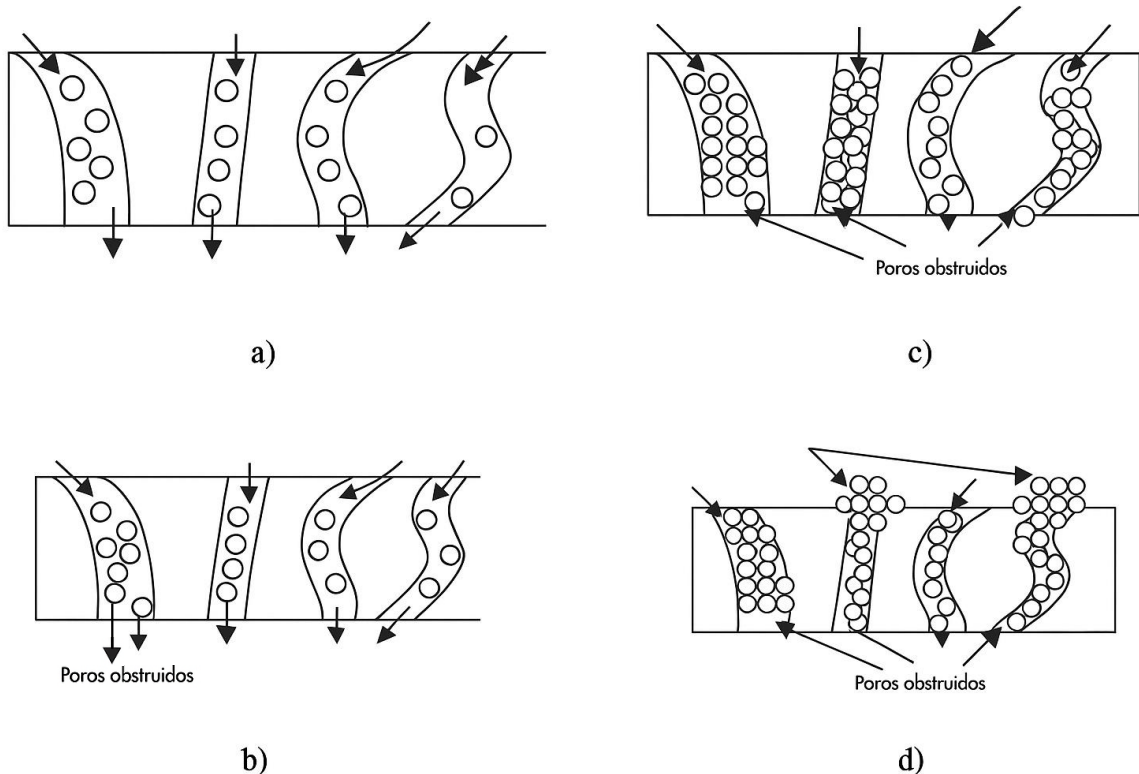
Fonte: Palmeira (2008).

Palmeira e Gardoni (2000) conduziram um estudo sobre as ramificações da obstrução parcial e da pressão nas propriedades hidráulicas e mecânicas dos geotêxteis não tecidos utilizados em sistemas de drenagem. Os autores enfatizaram que a impregnação de partículas

do solo diminui tanto a compressibilidade quanto a porosidade do geotêxtil, exercendo assim um impacto substancial em sua permeabilidade normal e longitudinal. Os parâmetros mecânicos e físicos analisados abrangem porosidade, permeabilidade, tensão normal, espessura do geotêxtil, juntamente com a correlação entre a massa do solo e a massa da fibra. Os resultados indicam que a permeabilidade do geotêxtil diminui à medida que a pressão normalmente aumenta; no entanto, a impregnação parcial não se mostra prejudicial à permeabilidade longitudinal, pois reduz efetivamente a compressibilidade do material.

Faure *et al.* (2006) propuseram a utilização de uma estrutura teórica de um filtro de solo, cujas descobertas foram justapostas com experimentos de filtração. Os autores relatam a importância da trajetória que as partículas sólidas percorrem dentro do geotêxtil, tanto na direção perpendicular quanto na direção paralela das fibras. Os autores também documentam a maneira pela qual o acúmulo de materiais ocorre no caminho percorrido pelas partículas sólidas, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Possíveis traçados de acúmulos de partículas



Fonte: adaptado de Faure *et al.* (2006).

Na Figura 6 (a), pode-se observar que todos os poros, estão abertos, permitindo a passagem de fluxo, enquanto, na Figura 6 (b) alguns poros já se encontram obstruídos. Já na Figura 6 (c), muitos poros encontram-se obstruídos dificultando a passagem de fluido. E na

situação extrema, Figura 6 (d), tem acúmulos na entrada dos poros causando um impedimento já na entrada dos poros. A influência temporal e as várias configurações da obstrução dos poros afetam significativamente o fluxo do lixiviado, indicando que, os mecanismos como a colmatação física (resultante da sedimentação de partículas finas), pode modificar dinamicamente a arquitetura porosa do geotêxtil. Essas alterações têm uma relação direta com a condutividade hidráulica, a retenção de contaminantes e a distribuição de caminhos preferenciais do fluxo.

Giroud (1982) estudou parâmetros teóricos e práticos para a seleção de geotêxteis utilizados como meio filtrante em contextos geotécnicos, enfatizando a inadequação de critérios de seleção simples baseados apenas na permeabilidade e na dimensão da abertura de filtração. O autor defende um critério de permeabilidade que exige que a condutividade hidráulica do geotêxtil seja no mínimo um décimo da do meio subjacente, em contrapondo a metodologia convencional de permeabilidade superior. Em relação à retenção, o critério incorpora a densidade do meio junto com a distribuição do tamanho das partículas, estipulando que as dimensões das aberturas de filtração devem ser ajustadas de acordo com a estabilidade da estrutura do meio, evitando problemas de colmatação e obstrução da tubulação. Conclui-se que os critérios propostos, embora divergentes dos padrões tradicionais para filtros granulares, são igualmente válidos, seguros e foram adotados como metodologia de projeto pelos engenheiros.

Junqueira *et al.* (2006) conduziram uma investigação sobre as características da colmatação física de sistemas experimentais de drenagem utilizados para resíduos sólidos urbanos. A pesquisa abrangeu uma análise comparativa de quatro sistemas distintos: areia, geocomposto, brita e pneus inteiros em conjunto com materiais geotêxteis não tecido. A avaliação da obstrução foi realizada por meio da análise do teor de sólidos no lixiviado e da análise das amostras recuperadas após um período de cinco anos. Os resultados indicaram que os sistemas que incorporam geotêxtil demonstraram um acúmulo reduzido de sólidos suspensos no lixiviado quando justapostos à pedra britada, implicando assim uma capacidade de filtração superior. Observou-se que a camada de areia desenvolveu um revestimento gelatinoso em sua superfície, indicando retenção de partículas e potencial desenvolvimento de colmatação biológica ao longo do tempo; no entanto, esse fenômeno não prejudicou significativamente sua eficácia operacional durante o período de investigação. O geotêxtil dentro do sistema exibiu níveis mínimos de obstrução física, refletindo uma durabilidade. Por outro lado, a implementação de pneus inteiros em combinação com geotêxtil foi eficaz na diminuição do acúmulo de sólidos, sem indícios de obstrução severa. Por fim, concluiu-se que, apesar do

desempenho adequado de todos os sistemas, a utilização de geotêxteis e materiais alternativos, como pneus, pode reduzir significativamente a colmatação física.

Yaman *et al.* (2006) conduziram um estudo sobre as implicações da filtração de efluentes domésticos nas características de permeabilidade dos geotêxteis. A pesquisa empregou experimentos baseados em laboratório utilizando colunas de filtração para avaliar o desempenho hidráulico de vários geotêxteis ao longo do tempo, particularmente em relação à sua exposição a águas residuárias. A principal contribuição deste estudo está na ênfase de que a colmatação física é induzida pelo acúmulo de partículas sólidas nos poros do geotêxtil, serve como um mecanismo predominantemente responsável pela diminuição da permeabilidade do material durante a filtração do efluente. Os autores observaram que, mesmo em períodos operacionais relativamente breves, houve um declínio acentuado nas taxas de fluxo através dos geotêxteis, que foi atribuído principalmente à obstrução física das aberturas de filtração do geotêxtil por sólidos suspensos.

Liu *et al.* (2018), investigaram a colmatação física nos sistemas de coleta de lixiviados (LCS) situados em aterros sanitários na China, ressaltando que a função fundamental das partículas suspensas nesse processo. As descobertas revelaram que o percolado não tratado exibiu uma concentração substancial de sólidos suspensos totais ao lado de partículas consideráveis (excedendo 30% com um diâmetro maior que 15 μm), o que contribuiu marcadamente para uma diminuição na permeabilidade do geotêxtil não tecido (correspondendo faixas de 10^{-8} a 10^{-9} m/s após um período de 1 a 2 anos). Embora o geotêxtil tenha se mostrado eficaz na retenção de partículas e na proteção da camada subjacente, ele acabou resultando no acúmulo de percolado acima de sua superfície (medindo 0,6 a 0,7 m), elevando os desafios relacionados à instabilidade do aterro. Os resultados ressaltam que a elevada produção de lixiviado, juntamente com a presença de partículas orgânicas substanciais, características dos resíduos sólidos urbanos, acelera o processo de colmatação. Reiteram que é aconselhável implementar a separação entre os resíduos e o início da camada drenante e reavaliar a aplicação de geotêxteis com outras propriedades para alcançar um equilíbrio entre a eficiência da drenagem e a função de proteção do LCS.

Silva e Lodi (2020) realizaram uma investigação sobre a colmatação em geotêxteis não tecidos e tecidos quando expostos ao fluxo de lixiviado de um aterro sanitário municipal. Os resultados demonstraram um declínio na condutividade hidráulica dos geotêxteis após um período de exposição de 35 dias. Através da utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV), observou-se que os poros dentro dos geotêxteis não tecidos permaneceram desobstruídos, embora com um notável acúmulo de material sedimentar na superfície. A

pesquisa sugere que o bloqueio majoritário ocorreu na superfície dos geotêxteis, em vez da obstrução dos poros internos. Os resultados revelaram que a obstrução da superfície foi notavelmente mais elevada em geotêxteis não tecidos de maior espessura, atribuído ao acúmulo de material particulado fino na superfície, enquanto a obstrução interna foi mais prevalente em geotêxteis caracterizados por uma menor massa por unidade de área, onde as partículas se infiltraram na matriz porosa com maior facilidade. Além disso, a investigação ilustrou que a carga hidráulica juntamente com a concentração de sólidos em suspensão no efluente exerceu uma influência direta na taxa de obstrução, com cargas e concentrações aumentadas facilitando a rápida progressão do processo de obstrução.

Wu *et al.* (2018), investigaram os mecanismos pelos quais os geotêxteis funcionam como sistemas de filtração em aterros que acomodam simultaneamente resíduos sólidos urbanos (RSU) ao lado de cinzas fundo geradas pela incineração de resíduos. Uma contribuição significativa desta pesquisa está na ênfase do preenchimento físico como o principal mecanismo de obstrução nos filtros geotêxteis durante os estágios operacionais iniciais, particularmente em configurações que envolvem a adição de cinzas de fundo. O acúmulo de partículas sólidas com dimensões maiores, provenientes de cinzas de fundo, foi identificado como um fator crítico que leva à obstrução substancial da porosidade dos geotêxteis, resultando em um declínio acentuado na condutividade hidráulica. Além disso, percebeu-se que esse fenômeno de colmatação física precede e pode acelerar a colmatação biológica, pois as partículas aprisionadas fornecem um substrato adequado e suporte para a proliferação microbiana subsequente.

Palmeira (2024) destaca que a dinâmica real da colmatação física é significativamente afetada por vários fatores de campo, incluindo a qualidade da instalação, o confinamento do material e as flutuações nas cargas hidráulicas aplicadas, que raramente são contabilizadas nas metodologias de projeto idealizadas. Diante disso, o autor enfatiza o desenvolvimento de técnicas para implementar critérios de projeto baseados em desempenho que levem em consideração a evolução temporal da obstrução e facilitem uma previsão mais precisa da longevidade e segurança dos filtros geotêxteis em aplicações geotécnicas.

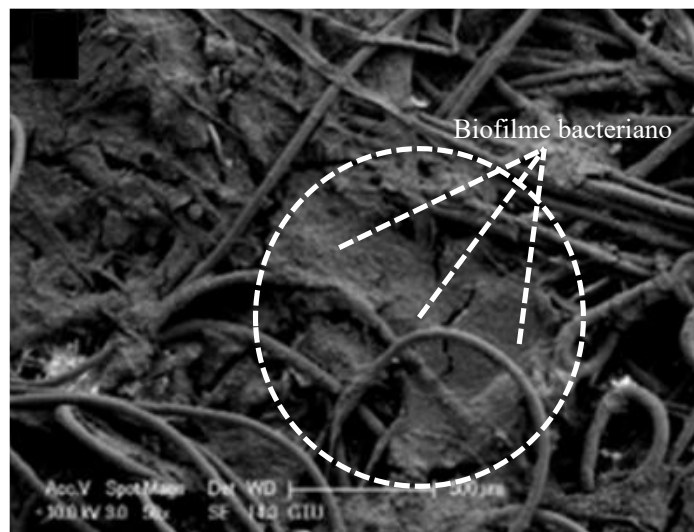
2.3.2 Colmatação biológica

Silva (2013) ressalta que a colmatação biológica surge como resultado da proliferação bacteriana dentro do filtro, que pode ocorrer tanto em filtros granulares quanto em filtros compostos por geotêxteis. Em vista da natureza heterogênea do lixiviado em cada estágio, pesquisas (Koerner e Koerner, 1990; Mackey e Koerner, 1999; Junqueira *et al.* 2006; Palmeira

et al. 2008) ressaltam a importância de compreender as propriedades do fluido para melhorar a compreensão dos mecanismos de colmatação que estão ocorrendo.

Yaman *et al.* (2021), conduziram um estudo sobre a dinâmica estrutural das comunidades microbianas associadas aos filtros geotêxteis utilizados em aterros anaeróbios que funcionam como biorreatores. A investigação ressaltou que os geotêxteis servem como pré-filtro, facilitando o desenvolvimento de biofilmes microbianos (Figura 7), com comunidades microbianas distintas observadas entre os vários tipos de geotêxteis. Os resultados indicaram que a composição do material geotêxtil (polipropileno versus poliéster) e seus atributos físicos (como abertura de filtração e espessura) exerceram um impacto significativo na diversidade e abundância microbiana. A pesquisa concluiu que os filtros geotêxteis funcionam não apenas como barreiras físicas, mas também como reatores biológicos que melhoram a estabilização do lodo gerado por meio da atividade microbiana, ressaltando assim seu potencial para aumentar a eficácia dos biorreatores de aterros sanitários.

Figura 7 - Formação de biofilme em um filtro geotêxtil não tecido submetido ao fluxo de lixiviado

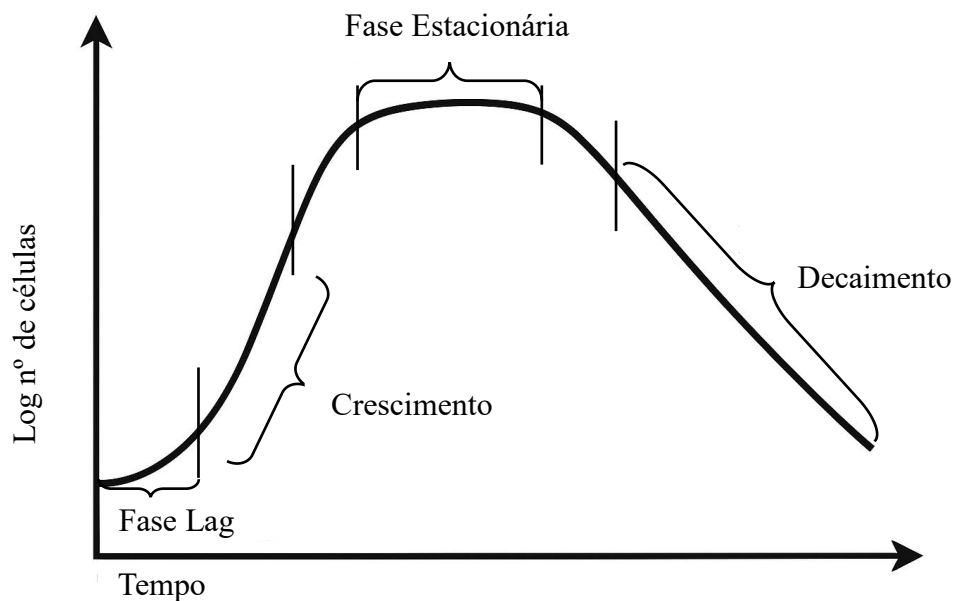


Fonte: adaptado de Yaman *et al.* (2021).

O crescimento bacteriano, segundo Remígio (2006), pode ser expresso em variáveis de organismos viáveis ou massa microbiana. Quando expresso em números, esse crescimento é composto por quatro fases distintas: A fase Lag, significa a duração necessária para que os organismos se adaptem ao ambiente e iniciem a divisão celular. A fase de crescimento logarítmico ocorre quando uma abundância de nutrientes está presente de forma consistente, e a taxa de crescimento bacteriano depende exclusivamente de sua capacidade de processar o substrato. A fase estacionária indica um período de crescimento estagnado. Isso pode ser

atribuído ao esgotamento do substrato ou dos nutrientes essenciais necessários para o crescimento bacteriano, bem como ao fato de que o crescimento de certas células é resultado da morte de outras. Durante a fase de decaimento logarítmico, a produção de novas células é superada pela morte de bactérias. Isso normalmente é influenciado pela viabilidade da população e pelas características ambientais. Em certos casos, essa fase pode servir como o oposto da fase de crescimento logarítmico. Essa composição em fases pode ser resumida através da Figura 8.

Figura 8 - Curva típica do crescimento bacteriano



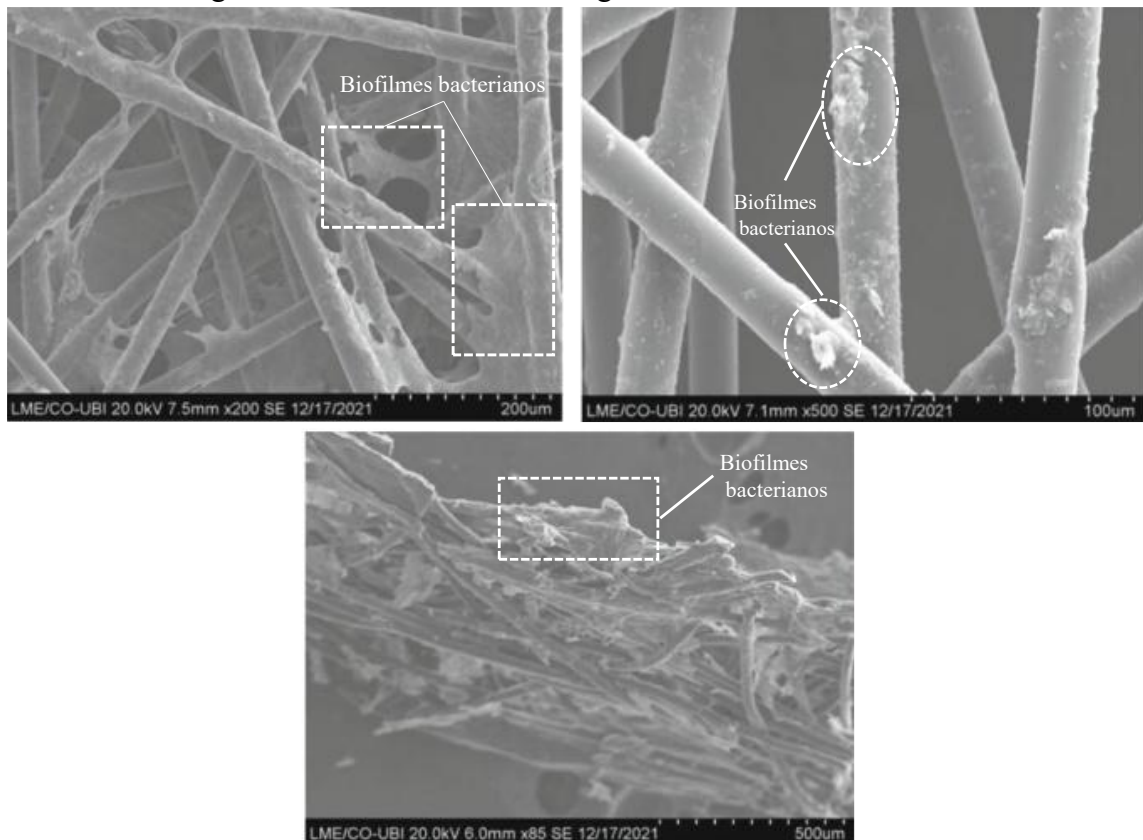
Fonte: Remígio, 2006 *apud* Metcalf e Eddy, 1990, adaptado pelo autor (2025).

Metcalf e Eddy (1990), analisaram em torno das várias classes de microrganismos pertinentes ao tratamento de águas residuárias e tem se centrado predominantemente em seus atributos metabólicos e na dinâmica de crescimento, enquanto a regulação dos parâmetros ambientais essenciais para sua proliferação. Além disso, para facilitar a replicação dos microrganismos, é imperativo que eles sejam retidos no sistema por um período adequado, o que depende diretamente da taxa na qual eles metabolizam os nutrientes disponíveis nos resíduos. Conseqüentemente, sob condições ambientais suficientemente reguladas, a estabilização efetiva pode ser assegurada pelo monitoramento vigilante da taxa de proliferação

desses microrganismos. Ainda destacam que o crescimento bacteriano é função da disponibilidade de matrizes e nutrientes energéticos do meio.

Remígio (2006) ainda destaca que os biofilmes são sistemas intrincados compostos por células microbianas entrincheiradas em uma matriz polimérica extracelular, conforme Figura 9. A estrutura, composição e características desses biofilmes dependem da idade do biofilme e das condições ambientais prevalentes. A autora também ressalta a importância de compreender as ramificações da agregação de biofilme em um sistema de transporte de fluido, pois isso induz maior atrito entre o biofilme e o fluido, resultando em perda de pressão em comparação com um sistema desprovido de biofilme. O crescimento de biofilmes pode ter efeitos deletérios em diversas atividades, como deterioração de equipamentos devido à biocorrosão, contaminação de alimentos e perdas de energia decorrentes de maior fricção (Jass & Walker 2000 apud Xavier 2003).

Figura 9 - Biofilme em amostra geotêxtil em diferentes vistas



Fonte: adaptado de Morais *et al.* (2023).

Characklis (1981), destaca que o desenvolvimento de biofilmes é resultado de processos biológicos. Esses processos envolvem a presença de células microbianas em uma superfície úmida, a aderência de moléculas orgânicas a essa superfície úmida, gerando assim uma superfície “condicionada” e a subsequente fixação de células microbianas à superfície

condicionada. As atividades metabólicas dos micróbios aderidos levam ao acúmulo de mais células aderidas e substâncias associadas.

Palmeira *et al.* (2008), conduziram um trabalho laboratorial sobre a colmatação biológica em geotêxteis não tecidos submetidos ao fluxo de percolado em condições anaeróbicas, enfatizando que uma elevada redução na permeabilidade foi atribuída principalmente ao desenvolvimento de biofilmes. Os resultados demonstraram que o processo de colmatação ocorreu em três fases distintas: (i) uma fase inicial caracterizada por uma redução substancial na permeabilidade (variando de 1 a 2 ordens de magnitude) nos dias iniciais, que foi atribuída à rápida proliferação bacteriana; (ii) uma fase intermediária (abrangendo de 1 a 60 dias) marcada por uma diminuição gradual na permeabilidade; e (iii) uma fase terminal (após 60 dias) caracterizada por um aumento na obstrução, que foi associado ao aumento da biomassa e ao fechamento de vazios por biofilmes. Os autores discutem que a colmatação biológica constitui um processo complexo, predominantemente influenciado pela disponibilidade de nutrientes e condições anaeróbicas, e afirmaram que a seleção de geotêxteis para sistemas de drenagem exige a consideração não apenas das propriedades físicas iniciais, mas também de sua vulnerabilidade à obstrução de longo prazo.

Wang *et al.* (2021) conduziram um estudo sobre a dinâmica da bio-obstrução em geotêxteis empregados em aterros sanitários, especificamente em conjunto com o co-disposição de cinzas de fundo. Os pesquisadores observaram que a incorporação de cinzas de fundo elevou o fenômeno da bio-obstrução, facilitando assim o desenvolvimento de biofilmes mais densos, caracterizados pelo aumento da atividade microbiana. O arranjo da co-disposição modificou substancialmente a estrutura da comunidade microbiana, promovendo um aumento na diversidade e na biomassa dos organismos vivos, o que posteriormente levou a um acúmulo elevado de substâncias poliméricas extracelulares. Além disso, a investigação concluiu que os geotêxteis utilizados em sistemas contendo cinzas de fundo exibiram um nível elevado de obstrução biológica, que foi atribuído ao impacto de constituintes químicos, como o cálcio, encontrados nas cinzas.

Goycochea *et al.* (2025) investigaram a colmatação biológica de geotêxteis empregados como mecanismos de filtração e drenagem em aterros sanitários, levando em consideração um paradigma de fermentação descontínua que emula condições operacionais mais autênticas observadas *in situ*. Vários geotêxteis tecidos e não tecidos, submetidos a contato prolongado com lixiviado natural e uma solução nutritiva, foram meticulosamente avaliados. Além disso, uma solução antibiótica e antifúngica foi administrada para elucidar a influência da atividade microbiana nos fenômenos de obstrução. Os resultados revelaram uma diminuição

acentuada na condutividade hidráulica concomitante com o acúmulo de biomassa nos geotêxteis, afirmando assim a importância da atividade biológica. Após a aplicação da solução antimicrobiana, a porosidade foi restaurada em mais de 90% e a condutividade hidráulica foi restabelecida na faixa de 78% a 83%, enfatizando que a obstrução era predominantemente de natureza biológica. A taxa de impregnação surgiu como uma métrica confiável para monitorar a obstrução, mesmo carecendo de poucas diretrizes e investigações, fornecendo assim uma contribuição pertinente para o gerenciamento eficaz dos sistemas de drenagem em aterros sanitários.

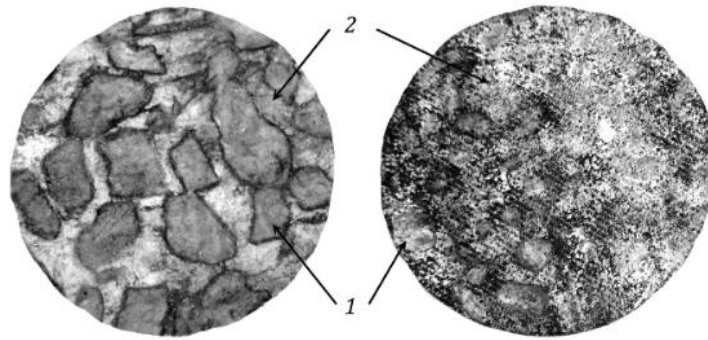
2.3.3 Colmatação química

A colmatação química é caracterizado pela deposição ou reação de elementos químicos no geotêxtil, o que também acaba afetando a redução de sua condutividade hidráulica. Palmeira (2008), enfatiza que ela deve ser avaliada de acordo com o material que estará em contato com o filtro e ainda ressalta que a precipitação de compostos químicos também pode obstruir os vazios dos poros do filtro e suas consequências podem levar anos para se manifestarem.

Veylon *et al.* (2016) conduziram uma avaliação do desempenho de longo prazo de geotêxteis tecidos e não tecidos, após um período de 18 anos de utilização em valas de drenagem situadas nos Alpes franceses. Enquanto os geotêxteis preservaram suas características mecânicas, o declínio observado na eficiência hidráulica das trincheiras foi atribuído predominantemente a colmatação química resultante da precipitação de calcita (Figura 10) nas superfícies inferiores dos geotêxteis, o que levou à formação de uma crosta porosa que diminuiu a permeabilidade (induzindo uma colmatação física). Testes laboratoriais comprovaram que a crosta de calcita, caracterizada por sua fragilidade e heterogeneidade, surgiu como o principal fator que contribuiu para a redução da permeabilidade. A saturação da água com carbonato de cálcio, juntamente com a perda concomitante de CO₂ no meio aeróbico da vala, facilitou o processo de precipitação. Foi enfatizado que, apesar do fato de os geotêxteis desempenharem adequadamente suas funções mecânicas e de filtração, a colmatação química representa uma preocupação significativa em ambientes que exibem condições geoquímicas análogas, ressaltando assim a necessidade de considerar esse mecanismo no projeto de sistemas de drenagem.

Figura 10 - Precipitação e depósito de calcita desencadeada pela colmatação química

1- Seixos; 2- Depósitos de calcita



Fonte: Veylon *et al.* (2016).

Baveye *et al.* (1998) descrevem os vários fatores que influenciam a colmatação química, como a concentração de eletrólitos, o componente orgânico dos compostos na fase aquosa, o nível de pH, a composição mineralógica da fase sólida, as características da superfície e as reações químicas (precipitação e dissolução) que desempenham um papel em todos os aspectos que afetam os poros e determinam a condutividade hidráulica saturada média.

Halse *et al.* (1987), conduziu uma série de testes de longo prazo com duração de aproximadamente 120 dias foi realizada. Esses testes envolveram a exposição de geotêxteis, compostos por três tipos diferentes de polímeros, cloreto de polivinil (PVC), poliéster (PET) e polipropileno (PP), a uma solução alcalina com pH variando de 10 a 12. Os geotêxteis neste estudo variaram em termos de sua estrutura, incluindo tecidos agulhados e termoligados, bem como materiais não tecidos. As descobertas desses testes destacam a suscetibilidade variável de diferentes polímeros ao bloqueio químico. Além disso, o nível de pH da solução foi considerado de extrema importância neste contexto, pois observou-se que sua flutuação tem um impacto significativo no processo geral.

Rollin e Lombard (1988) explicam o fenômeno da precipitação de sal na água, especificamente carbonatos e sulfatos, como substâncias que podem causar bloqueio químico. Isso ocorre quando esses sais se infiltram no geotêxtil e, posteriormente, evaporam em condições atmosféricas. Os cristais resultantes têm o potencial de aderir às fibras do geotêxtil e sofrer crescimento, levando ao bloqueio parcial ou total do material.

Fatema e Bathia (2018) conduziram um estudo sobre os fenômenos associados ao processo de colmatação química em geotêxteis utilizados para a desidratação de lodo caracterizado por um alto teor de água em conjunto com aditivos. Os resultados enfatizaram que a prevalência e a severidade da obstrução se correlacionam significativamente com as propriedades do material geotêxtil, bem como com as características do lodo tratado. Os geotêxteis não tecidos exibiram uma tendência acentuada de obstrução em comparação aos

tecidos, atribuível à sua distribuição desordenada dos filamentos, que facilita o aprisionamento de partículas sólidas. Essa característica específica aumenta sua eficácia na retenção de sedimentos; no entanto, ao mesmo tempo, os torna mais vulneráveis a um declínio na permeabilidade ao longo do tempo. A distribuição dos tamanhos dos poros no material geotêxtil surgiu como um fator crítico, com poros maiores exibindo uma probabilidade reduzida de obstrução. Um aspecto adicional pertinente foi a correlação entre a massa por unidade de área dos geotêxteis não tecidos e sua vulnerabilidade ao preenchimento, em que materiais mais densos tendem a possuir poros menores, aumentando assim a probabilidade de obstrução. Por outro lado, os geotêxteis tecidos não manifestaram essa correlação de forma distinta, devido à sua estrutura mais homogênea. O trabalho ressalta a necessidade de selecionar cuidadosamente o tipo de geotêxtil de acordo com os requisitos específicos da aplicação. Embora os não-tecidos sejam mais adequados para cenários que exigem retenção fina, os tecidos são preferíveis quando se busca maior durabilidade e manutenção da capacidade de fluxo. O estudo reforça as necessidades de alcançar um equilíbrio entre as considerações de filtração e permeabilidade no projeto de sistemas de drenagem de geotêxteis.

Liu *et al.* (2021) realizaram uma investigação sobre o processo de colmatação química em filtros geossintéticos colocados em reservatórios contendo rejeitos de minério de ferro. O estudo investigou o impacto dos níveis de saturação do filtro durante a configuração inicial, o gradiente hidráulico e a espessura da amostra de rejeito no fenômeno de colmatação química. Por meio da utilização de experimentos em coluna, uma análise foi conduzida para examinar a estrutura e a dispersão dos materiais de colmatação nos geotêxteis. Os pesquisadores chegaram a uma conclusão que enfatizou a importância do oxigênio no contexto do bloqueio químico, observando uma concentração de materiais obstrutivos nas regiões do filtro que foram expostas ao ar. A pesquisa discorreu sobre o desenvolvimento de uma camada de preenchimento em áreas específicas dos geotêxteis que interagiu com as perfurações em uma placa, levando à obstrução dessas perfurações. Essas descobertas desempenham um papel crucial no aprimoramento da compreensão das ocorrências da colmatação química em ambientes de rejeitos de mineração.

2.4 Ensaios de filtração com geotêxteis

Ao longo dos anos, diversos pesquisadores têm se dedicado ao desenvolvimento de ensaios e metodologias para investigar o desempenho de geotêxteis na filtração de lixiviados, um desafio técnico relevante devido às condições extremas desses fluidos, marcadas por alta

carga orgânica, presença de sólidos em suspensão e composição química agressiva. Projetar filtros eficientes nesse contexto não é trivial, mas os geotêxteis vêm ganhando destaque nas discussões técnicas e acadêmicas por oferecerem vantagens importantes, como facilidade de aplicação, boa eficiência hidráulica e, principalmente, menor custo em comparação com filtros granulares tradicionais. A Tabela 2, a seguir reúne alguns estudos que abordaram essa temática, com diferentes configurações experimentais, tipos de fluido e locais de aplicação.

Tabela 2 - Estudos sobre filtros em ambientes altamente orgânicos

Estudo	Dimensões da coluna	Geotêxtil (posição)	Tipo de lixiviado	Características do lixiviado	Local do estudo
Yaman <i>et al.</i> (2006)	Colunas (10 cm Ø, ≈ 60 cm altura)	Geotêxtil no topo (interface)	Esgoto primário	Alta carga orgânica; pH ~7; sólidos suspensos	Laboratório
Ko <i>et al.</i> (2019)	- Coluna RSU: Ø 15 cm × alt. 40 cm - Coluna BA: Ø 3 cm × alt 20 cm	Geotêxtil submerso em frascos com lixiviado	Simulado de RSU	DQO até 89.764 mg/L; DBO ₅ /DQO de 0,87	Campo e Laboratório
Koerner e Koerner (1992)	Colunas (10 cm Ø, 100 cm altura)	Geotêxtil com e sem areia acima	Lixiviado (6 aterros)	DQO até 45.000 mg/L; pH 5,5–8; sólidos 24.000 mg/L	Laboratório
Koerner, Koerner e Martin (1994)	144 colunas (100 mm de Ø; ≈ 200 mm de altura)	Geotêxteis e filtros de areia	Lixiviado (4 aterros exumados)	SST até 28.000 mg/L; BOD ₅ até 27.000 mg/L; pH 5,5–10	Campo (exumação) e Laboratório
Cazzuffi e Cossu (1993)	3 Colunas (284 mm Ø; 124 mm Ø; 51 mm Ø)	Geotêxtil na base	Lixiviado (Itália)	pH 6–8; DQO até 38 g/L; alta carga de sólidos	Laboratório
McIsaac e Rowe (2006)	Sistema experimental simulado - células (565 × 235 × 574 mm; 30 cm de brita)	Geotêxtil entre o resíduo e a brita ou dentro da brita	Lixiviado (aterro Keele Valley, Canadá)	DQO até 17.060 mg/L; BOD até 12.210 mg/L; pH entre 6,5 e 7,4; metais traço e alta condutividade	Laboratório
Ruiz <i>et al.</i> (2006)	Colunas (15 cm Ø, ≈ 200 cm altura)	Geotêxtil entre camadas drenantes	Lixiviado sintético	DQO ~17.000 mg/L; pH ~6; TDS ~15.100 mg/L	Laboratório
Corcoran e Bhatia (1996)	Sistema piloto (vala: ≈ 45,68 cm de altura e ≈ 91,4 cm de largura)	Geotêxtil na base do dreno	Lixiviado	Alta DQO, sólidos suspensos e metais pesados	Campo

Ø – diâmetro.

Ainda assim, cada localidade pode apresentar particularidades significativas, tais como a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos, o regime pluviométrico e a taxa de geração de lixiviado, que influenciam diretamente os parâmetros hidráulicos e operacionais do sistema de drenagem. Essas variações reforçam a necessidade de abordagens de projeto adaptadas às condições locais. Nesse contexto, a realização de ensaios *in situ* é de fundamental importância, pois permite avaliar o desempenho dos materiais e sistemas de filtração em condições representativas do campo, assegurando maior confiabilidade na definição das soluções de engenharia.

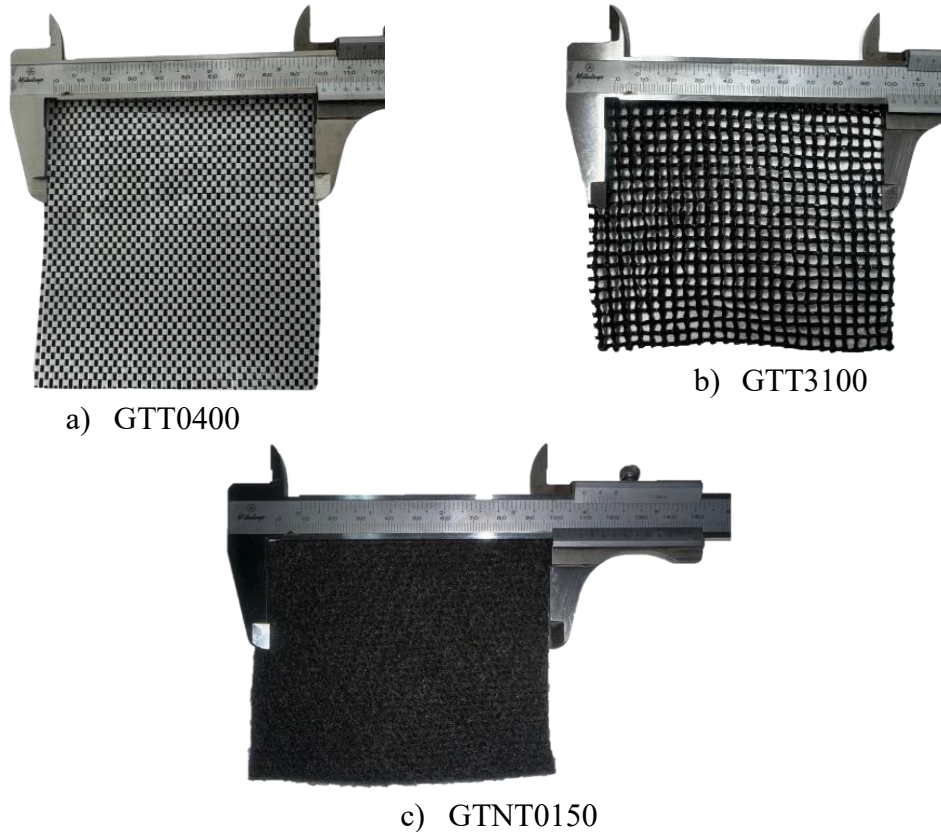
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Geotêxteis

Três diferentes geotêxteis de polipropileno foram utilizados com o objetivo de avaliar o desempenho desses materiais em aplicações relacionadas à drenagem e filtração em sistemas de coleta de lixiviado. Dentre os materiais selecionados, dois são classificados como geotêxteis do tipo tecido e o terceiro geotêxtil é do tipo não tecido. A escolha desses materiais deve-se às condições específicas a que foram submetidos, destacando-se a resistência química frente ao lixiviado agressivo e a constante especificação em projetos de aterros, especificamente, dois dos geotêxteis utilizados (GTT0400 e GTNT0150), desempenhando funções como filtragem e separação. A pesquisa também incluiu a avaliação de um novo geotêxtil (GTT3100), proposto como potencial candidato para aplicações em sistemas de filtração e drenagem (Figura 11), devida sua elevada abertura de filtração.

Figura 11 - Geotêxteis utilizados na pesquisa



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 3 apresenta as principais características físicas e hidráulicas dos geotêxteis avaliados como filtros nesta pesquisa. Essas informações são fundamentais para a análise comparativa entre os materiais, permitindo avaliar sua adequação às condições de campo simuladas, especialmente em relação à resistência química, permeabilidade e potencial de obstrução.

Tabela 3 - Propriedades dos geotêxteis.

Propriedade	Norma	GTT0400	GTT3100	GTNT0150
Massa por unidade de área (g/m ²)	ASTM D5261	140	135	150
Espessura Nominal (mm)	ASTM 5199	0,74	1,25	2,20
Abertura de Filtração (mm)	ASTM D4751	0,40	2,8	0,15
Permissividade (s ⁻¹)	ASTM D4491	0,13	2,13	2,10
Permeabilidade (m/s)	ASTM D4491	1,16 x 10 ⁻⁴	2,66 x 10 ⁻³	4,62 x 10 ⁻³
Resistência a Tração – faixa larga (kN/m)	ASTM D4595	L: 31,78 T: 16,67	L: 31,78 T: 16,67	L: 7,00 T: 8,00
Punção (N)	ASTM D6241	3146,20	2917,80	1300,00

L: Direção longitudinal; T: Direção transversal.

3.1.2 Aterro Sanitário de São Carlos

Os ensaios de filtração foram conduzidos nas instalações do aterro sanitário da cidade de São Carlos, no estado de São Paulo, Brasil (Figura 12), utilizando uma estrutura de caixa de passagem disponível no local (Figura 13). A caixa de passagem recebe o lixiviado do interior do aterro sanitário. Com uma área operacional de aproximadamente 106.000 m² (largura \approx 472,0; comprimento \approx 224,5m), o aterro atende uma população estimada em 255.000 habitantes (IBGE, 2022). Segundo dados fornecidos pela administração do empreendimento, o local recebe, em média, cerca de 200 toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos.

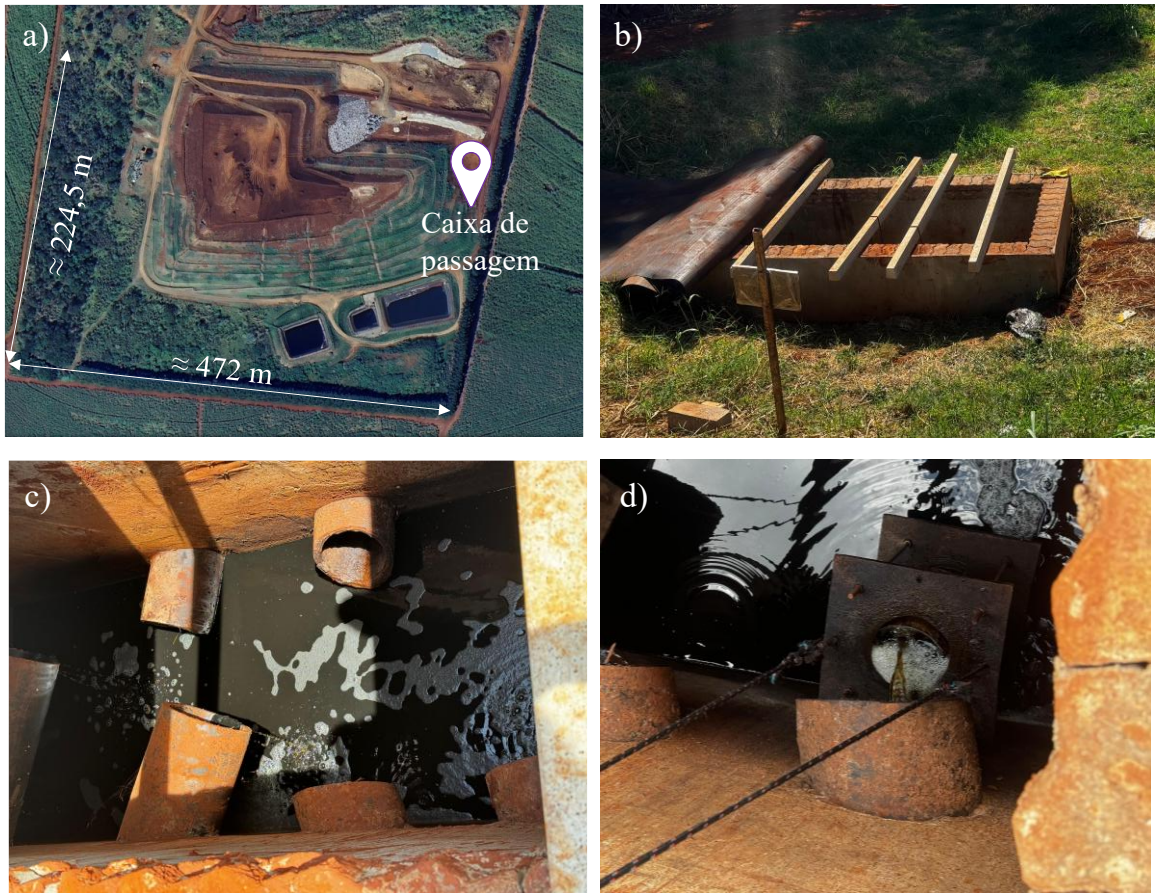
Figura 12 - Aterro Sanitário de São Carlos



Fonte: Cortesia local (2025).

Figura 13 - Localização da caixa de passagem de lixiviado no aterro:

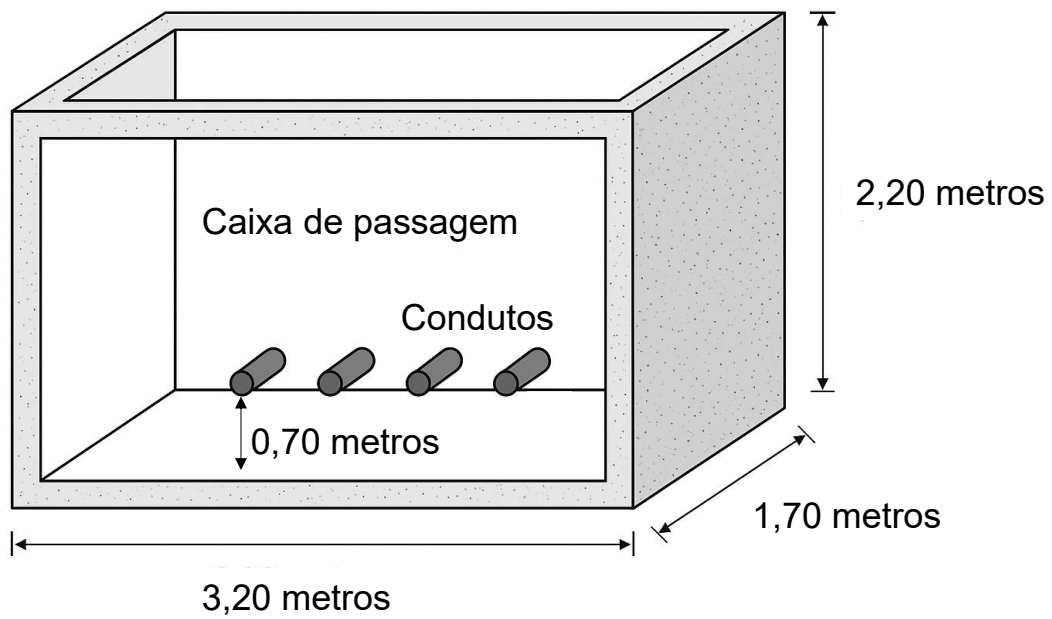
- a) Localização dos testes de filtração; (b) Caixa de passagem; (c) Conduitos de lixiviado; (d) Colocação das colunas abaixo do conduto de lixiviado.



Fonte: Autor (2025).

A caixa de passagem utilizada no experimento, localizada ala leste do aterro sanitário, apresenta dimensões internas de 3,20 metros de comprimento, 1,70 metros de largura e 2,20 metros de profundidade. Os conduitos foram instalados a uma cota de 0,70 metros em relação ao fundo da caixa, de forma a permitir o escoamento do lixiviado (Figura 14).

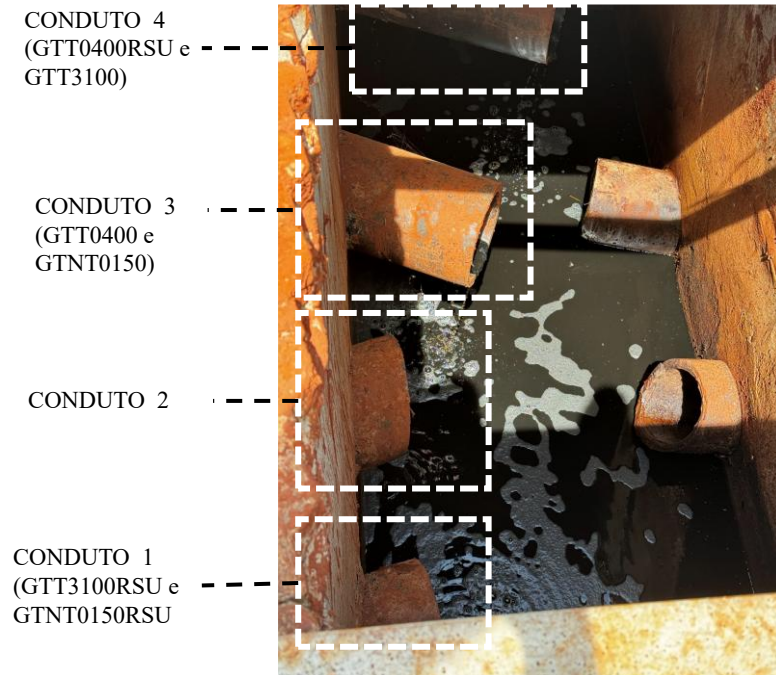
Figura 14 - Ilustração da vista frontal da caixa de passagem



Fonte: Autor (2025).

Na caixa de passagem, foram identificados quatro condutos destinados ao transporte de lixiviado (Figura 15), dispostos ao longo do seu comprimento. No entanto, observou-se que apenas três deles — especificamente os condutos 1, 3 e 4 — apresentavam escoamento do lixiviado. Em contrapartida, o conduto 2, não foi utilizado devido uma possível obstrução, desuso ou ausência de carga hidráulica suficiente. Logo para o programa de ensaios experimentais, o conduto 2, não foi utilizado.

Figura 15 - Identificação dos condutos e das colunas de filtração de lixiviado



Fonte: Autor (2025).

3.1.3 Características do lixiviado

No aterro sanitário de São Carlos, o lixiviado apresenta concentrações iniciais elevadas de matéria orgânica, medida pela Demanda Química de Oxigênio (DQO), além de nutrientes e compostos nitrogenados, conforme mostrado na Tabela 4. Os níveis de DQO no lixiviado de aterros sanitários em seus estágios iniciais são significativamente altos, conforme indicado por Navenn *et al.* (2017).

Tabela 4 - Caracterização do Lixiviado

Parâmetro	Valor médio			
	2022	2023	2024	UN
pH	8,4	8,7	8,0	-
Temperatura	22,4	30,6	28,6	°C
DBO (5 dias)	1826,3	1073,3	1057,5	mg/L
DQO	3737,5	2117,0	2282,3	mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais	7599,8	5437,3	6529,5	mg/L
Chumbo	<0,001	0,04	0,01	mg/L
Cloreto	2379,0	725,6	1214,1	mg/L
Cromo	0,2	0,38	0,23	mg/L
Ferro	5,5	1,79	10,87	mg/L
Coliformes Termotolerantes (Quantitativo)	2×10^4	2×10^6	14×10^3	UFC/100mL
Bactérias Heterotróficas	2×10^5	720,00	7×10^7	UFC/mL
Alumínio	2,0	0,57	2,64	mg/L
Coliformes Totais (Quantitativo)	1×10^6	4×10^6	3×10^4	UFC/100mL
Carbono Orgânico Dissolvido	2462,8	1310,57	514,87	mg/L
Carbono Orgânico Total	4118,5	552,57	998,10	mg/L
Sulfato	54,6	649,08	160,25	mg/L
Cianeto	-	<0,01	<0,01	µg/L
Nitrogênio Amoniacal	406,0	174,20	1238,25	mg/L

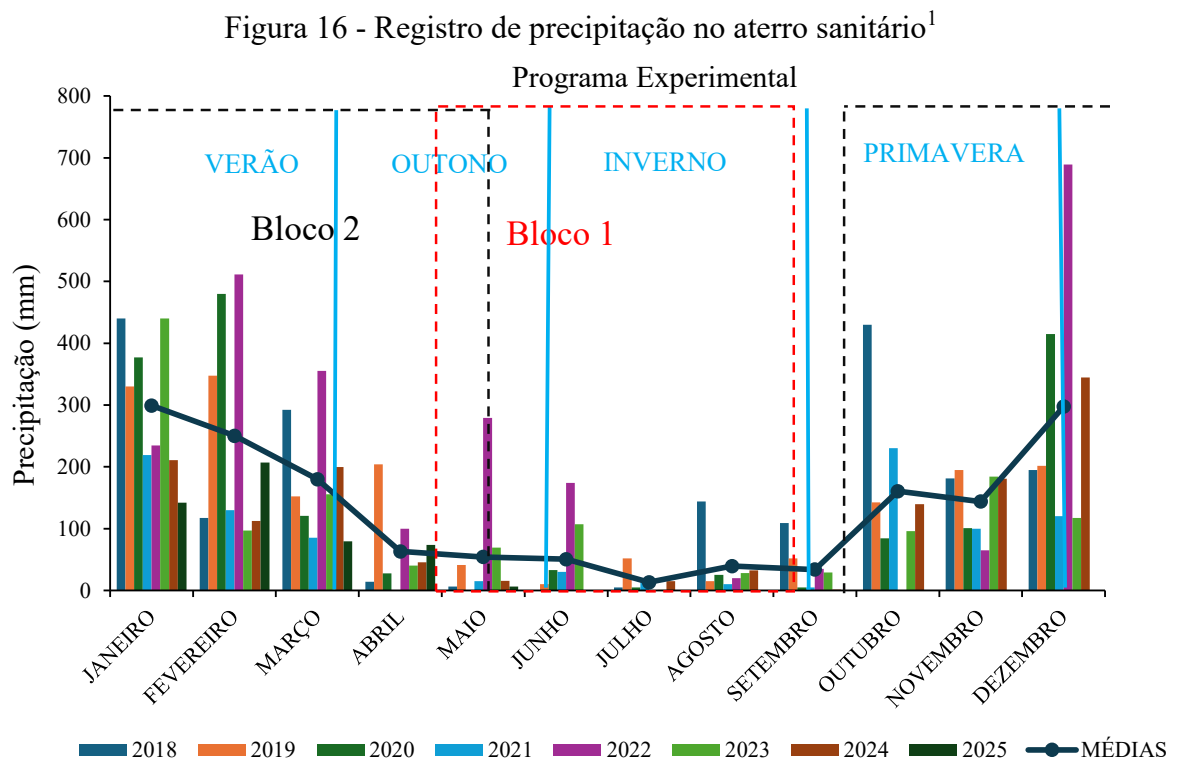
Fonte: Dados internos fornecidos para fins de pesquisa e adaptado pelo autor (2025).

Os constituintes metálicos presentes no lixiviado apresentado na Tabela 4, como ferro e cromo, são capazes de interagir com os geotêxteis por meio dos processos de adsorção e precipitação, afetando sua permeabilidade e durabilidade. Em particular, o ferro, quando existente em concentrações elevadas, tende a precipitar nas superfícies dos geotêxteis, levando à obstrução dos poros do material, especialmente em circunstâncias caracterizadas por variações no pH do ambiente adjacente (Koerner e Koerner, 1992; Koerner e Koerner, 2015;

Wang *et al.* 2021). Esse processo de precipitação é aumentado pelas concentrações elevadas de sólidos dissolvidos e pela presença de coliformes e bactérias heterotróficas, que facilitam a formação de biofilmes nas superfícies dos geotêxteis, dificultando a funcionalidade dos poros e diminuindo a permeabilidade geral do sistema (Manassero *et al.* 2000; Rowe, 2005; Naveen *et al.* 2017).

A análise do lixiviado, é uma maneira de se quantificar importantes aspectos que estão relacionados ao processo de colmatção, degradação e retenção, uma vez que tais parâmetros são essenciais para o entendimento da relação entre a iteração filtro-percolado por exemplo.

O aterro dispunha de uma estação de monitoramento pluviométrico instalada no local, equipada com sensores capazes de registrar as variações de precipitação ao longo do tempo. Essa estação permitiu o acompanhamento contínuo e sistemático dos índices pluviométricos dos últimos anos, fornecendo dados históricos para a avaliação das condições meteorológicas da região, com potencial influência sobre o comportamento hidráulico do sistema de drenagem e a geração de lixiviado. O registro de dados meteorológicos pode ser observado no Figura 16.



Fonte: Dados internos fornecidos para fins de pesquisa e adaptado pelo autor (2025).

Como parte da colaboração no desenvolvimento da pesquisa, a empresa local cedeu os dados de caracterização físico-química referentes aos anos de 2022, 2023 e 2024 e 2025

¹ Dados de 2025 primeiro trimestre – janeiro, fevereiro e março e parte do segundo – abril e maio.

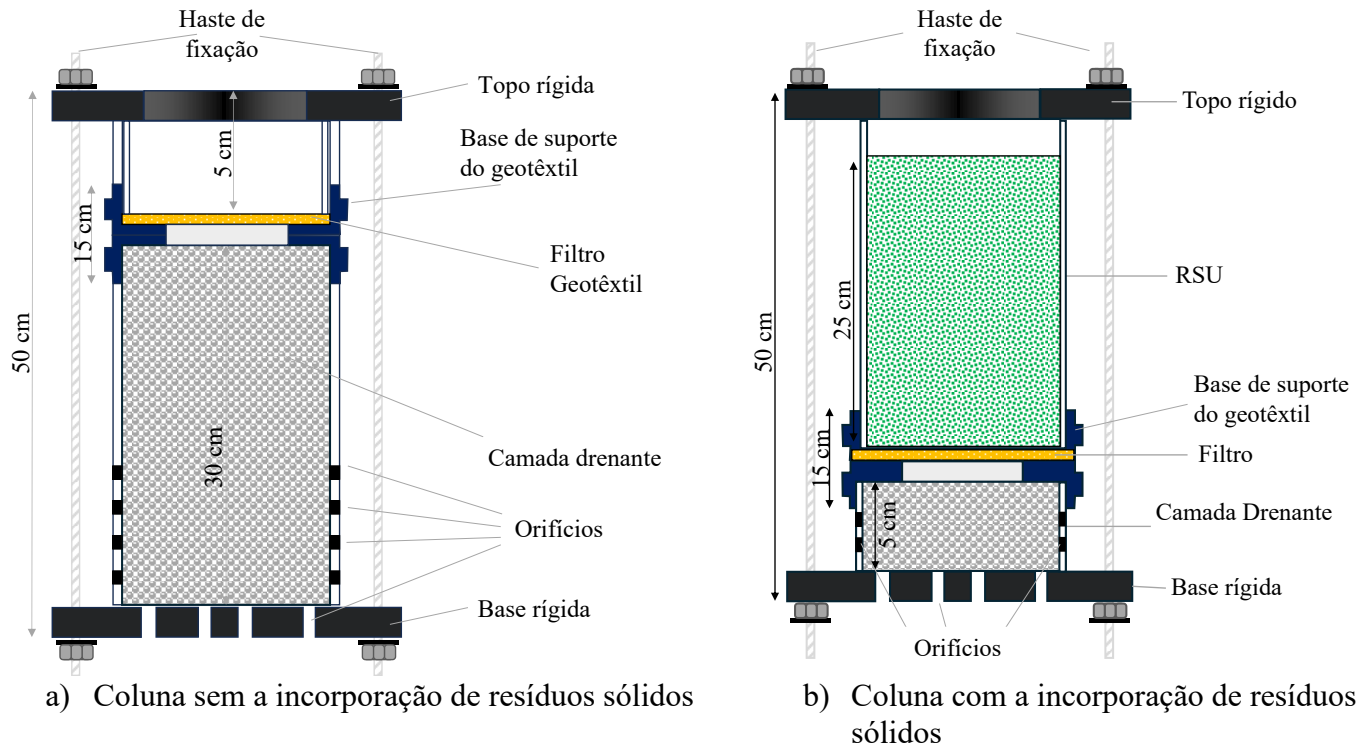
(primeiro trimestre) obtidos em laboratório. A coleta e análise desses dados são realizadas trimestralmente. Os valores apresentados correspondem à média dos resultados obtidos para cada composto, metal, coliforme bacteriano ou agente.

3.1.4 Concepção das colunas de filtração

A montagem das colunas de filtração foi realizada utilizando materiais específicos, incluindo tubos de policloreto de vinila (PVC) com diâmetro de 200 mm, tampas de inspeção para encaixe em tubulações, hastes metálicas de 8 mm, bases e topos rígidos, brita #2 e anéis de PVC para fixar o geotêxtil sobre a parte superior da tampa com um diâmetro de 170mm e o uso de resíduos sólidos urbanos. Foram concebidas seis colunas de filtração. Os conjuntos de tampas foram perfurados com um diâmetro de aproximadamente 18,5 cm e posteriormente unidos com massa plástica para garantir a conexão.

A parte inferior das colunas de filtração foram perfuradas de forma aleatória para permitir a passagem do lixiviado, ao mesmo tempo em que confina o material granular. A ilustração das colunas de filtração pode ser visualizada na Figura 17. O material granular foi introduzido com o objetivo de representar parte da camada drenante de base. Utilizou-se brita 2 (granulometria compreendida entre 12,5 mm – 25,0 mm, conforme NBR 7225), escolhida tanto pela sua disponibilidade local quanto pela adequação à incorporação ao tubo de PVC de 200 mm. Para a definição das dimensões das colunas, foram consideradas a norma ABNT NBR 13869:1997, a qual estabelece que a lâmina de percolado sobre a camada drenante de base não deva ultrapassar 30 cm. Além disso, essa camada deve ser composta por materiais quimicamente resistentes e projetada para não sofrer obstruções ao longo de toda a sua vida útil e após o fechamento.

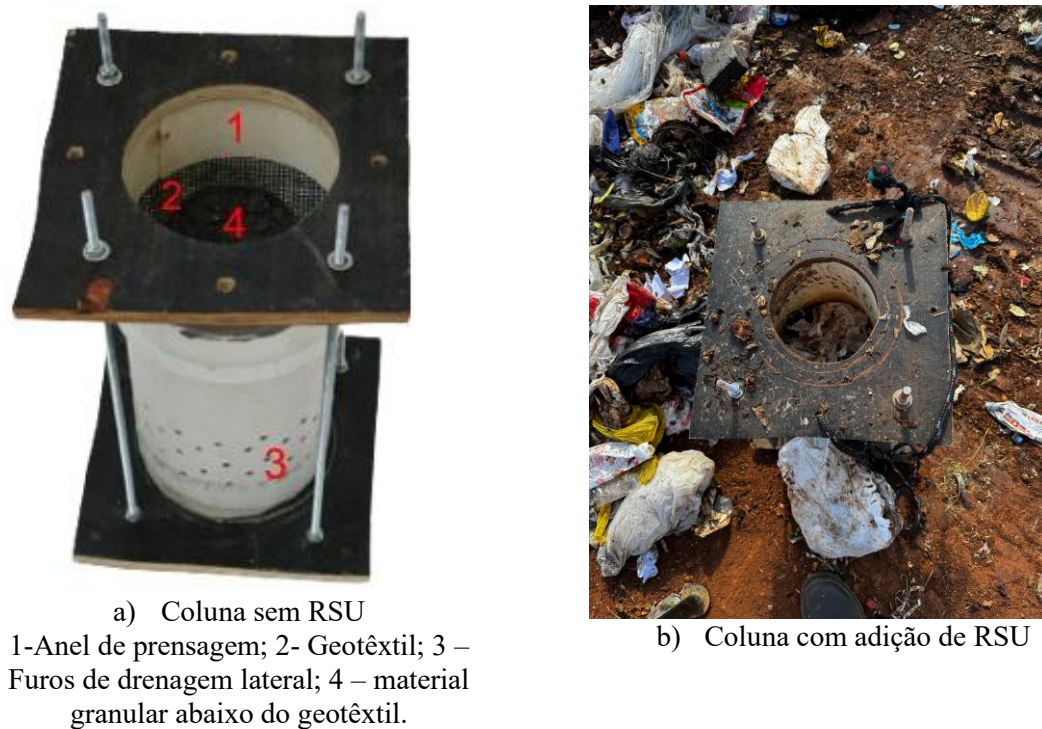
Figura 17 - Ilustração da concepção das colunas de filtração



Fonte: Autor (2025).

A inserção dos resíduos (Figura 18) na montagem experimental das colunas foi realizada para representar as condições reais de campo, atuando, adicionalmente, como um elemento de controle da vazão de entrada no sistema.

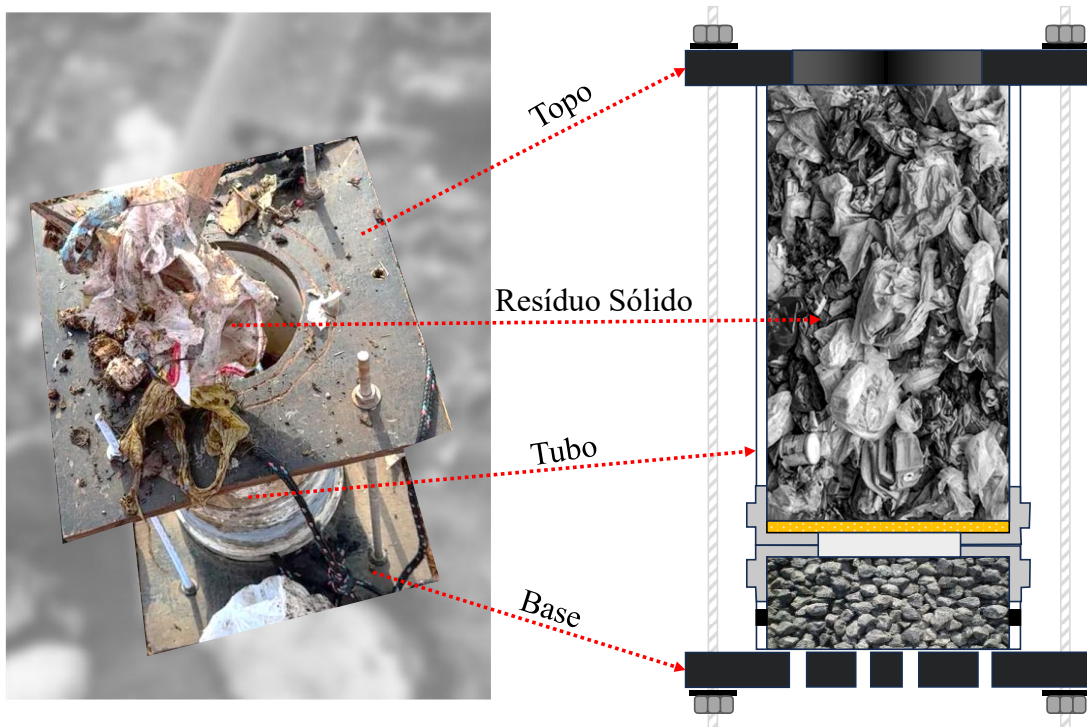
Figura 18 – Colunas de filtração



Fonte: Autor (2025).

A aquisição dos resíduos sólidos para a incorporação nas colunas (Figura 19) foi realizada *in loco*. Para a introdução do material, adotou-se um processo de compactação, semelhante ao utilizado em solos, mas com a diferença de que as camadas foram determinadas de forma específica (cerca de 8 camadas, com 8 golpes sendo controlados de uma mesma altura pelo autor), devido à alta heterogeneidade dos resíduos sólidos urbanos. Além disso, técnicos que atuam no aterro relataram que não há um padrão normativo específico para o processo de compactação, o qual depende das características físicas dos resíduos e pode variar de acordo com cada entidade responsável pela operação, entretanto utilizam amparos técnicos internos do grupo. Todas as colunas foram concebidas pelo mesmo padrão. Após finalizados, as colunas de filtração foram instaladas nas caixas de passagem do aterro.

Figura 19 - Coluna com adição de resíduo sólido



Fonte: Autor (2025).

A instalação das colunas foi realizada em duas distintas etapas experimentais, a fim de permitir o monitoramento temporal das variáveis hidrodinâmicas sob diferentes condições climáticas. A primeira etapa abrangeu o período de maio a setembro de 2024, enquanto a segunda compreendeu o intervalo de outubro de 2024 a maio de 2025. Cabe destacar que o intervalo de instalação dos blocos foi de aproximadamente um mês.

3.2 Métodos

3.2.1 Ensaios de filtração utilizando colunas de filtração

O monitoramento dos ensaios foi conduzido em intervalos regulares semanais, de modo a garantir a representatividade das condições ambientais e operacionais ao longo do tempo. Essa periodicidade foi escolhida com o intuito de representar as condições de operação, assegurando que os dados obtidos refletissem de forma que se aproxima das condições reais observadas *in situ*. Tal abordagem permite uma avaliação contínua do comportamento hidráulico do sistema em função das oscilações naturais de temperatura, precipitação e geração de lixiviado.

Inicialmente, retirou-se as colunas de filtração individualmente (Figura 20), para o monitoramento. A vazão de entrada das colunas de filtração (m^3/s) é medida a jusante do conduto, na caixa de passagem de cada coluna. O procedimento envolve a coleta de um volume de lixiviado, utilizando um recipiente de coleta, ao longo do tempo monitorado usando um cronômetro. Ao final da coleta, a temperatura do lixiviado foi medida. Posteriormente, a taxa de percolação do lixiviado na coluna de filtração (m/s) foi medida utilizando um volume conhecido que foi coletado. Em seguida, o volume foi introduzido na coluna e o tempo necessário para o escoamento de um certo volume foi cronometrado.

Figura 20 - Esquema da captação das colunas para os testes de permeabilidade: a) Esquema da caixa de passagem; b) Aquisição da coluna de dentro da caixa de passagem; c) Posicionamento da coluna para os testes de filtração.



Fonte: Autor (2025).

Devido à variação das lâminas de líquido ao longo do tempo, o ensaio apresentou comportamento característico de um sistema sob carga hidráulica variável. Essa condição permitiu a determinação dos gradientes hidráulicos correspondentes a cada intervalo de variação, viabilizando o cálculo da taxa de percolação sob fluxo dinâmico. A partir desses dados, foi determinada a permeabilidade média dos sistemas, a qual foi comparada aos limites mínimos normativos estabelecidos pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 1991) e pela autoridade ambiental da província de Quebec (MELCCFP), ambos com valor de referência de 10^{-4} m/s para a permeabilidade da camada drenante de base.

Na sequência, as colunas foram conectadas às saídas dos condutos na caixa de passagem, onde o processo de permeabilidade foi monitorado ao longo do tempo, com medições realizadas semanalmente. Cabe destacar que esse monitoramento foi realizado semanalmente. Esse procedimento teve como objetivo avaliar e acompanhar a evolução da permeabilidade dos sistemas de filtragem em campo no aterro sanitário. A distribuição temporal dos ensaios de filtração das colunas foi realizada de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Distribuição das colunas de filtração no tempo

BLOCO DE ENSAIOS	COLUNAS DE FILTRAÇÃO	PERÍODO	CONDIÇÃO CLIMÁTICA LOCAL
1	GTT0400; GTT0400RSU e GTT3100RSU	Maio de 2024 à setembro de 2024	Estiagem
2	GTT3100; GTNT0150 e GTNT0150RSU	Outubro de 2024 à maio de 2025	Estiagem – Aguaça

3.2.2 Análise do material retido pelos filtros

Ao final do ensaios, os sedimentos capturados pelos filtros foram submetidos a quatro procedimentos: determinação do teor de umidade (norma NBR 6457:2016), análise granulométrica (adaptação da norma NBR 7181:2018 e da norma DNER 051/94 (sedimentação com defloculante) e quantificação do teor de matéria orgânica (EMBRAPA, 2017), classificação granulométrica do material retido pela USDA, 2022 (*United States Department of Agriculture, 2022*) e análise de microscopia celular digital e microscopia eletrônica de varredura além de análises por difração de raios-x (sem referência normativa). As análises de microscopia foram empregadas para observar as estruturas microscópicas do material, incluindo morfologias, arranjos, aglomerações e aspectos da caracterização química. Por sua

vez, a análise de difração foi utilizada para identificar as composições mineralógicas presentes no material.

Para a realização dos ensaios de quantificação do teor de umidade, determinação do teor de matéria orgânica, foram utilizadas uma estufa com temperatura a 45 °C, uma estufa a 100 °C, ambas estufas com circulação de ar e uma balança para aferição das massas. Inicialmente, os sedimentos foram colocados em estufa a 45 °C e pesados periodicamente até que se atingisse uma massa constante, indicando a estabilização da perda de água e permitindo a determinação da umidade do material. Após essa etapa, a mesma amostra foi transferida para uma estufa a 100 °C, onde permaneceu por um período contínuo de seis dias, até atingir novamente uma massa constante. Esse segundo processo teve como objetivo a determinação do teor de matéria orgânica, com base na perda de massa adicional relacionada à degradação térmica dos compostos orgânicos voláteis.

3.2.2.1 Microscopia digital celular do material retido

Após a coleta, uma parte da amostra (unidas em apenas um recipiente) foi encaminhada ao Departamento de Biologia da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), ao setor de Parasitologia, onde foi realizada a análise microscópica para a identificação visual de possíveis microorganismos presentes no material retido. O procedimento consistiu na preparação da amostra em lâminas e posterior observação sob microscópio óptico, com o objetivo de detectar a presença de estruturas biológicas, como microorganismos, ovos de parasitas ou fragmentos orgânicos. Cabe ressaltar que, atualmente, não existe uma norma técnica específica que regulamente a realização de análises microscópicas em sedimentos provenientes de resíduos sólidos. Assim, o método adotado seguiu protocolos internos do laboratório, assegurando a condução dos procedimentos.

3.2.2.2 Microscopia eletrônica de varredura do material retido

A microscopia eletrônica de varredura foi empregada para avaliar a morfologia do material e, por meio da aplicação de mapeamento químico, verificar a distribuição e a composição elementar das partículas presentes. Para executar essa metodologia, as amostras foram previamente secas, fixadas em um suporte (Figura 21a) apropriado e posteriormente revestidos com uma fina camada de ouro utilizando aparato de metalização, com o objetivo de transmitir a condutividade elétrica necessária para a aquisição de imagens de alta resolução em um ambiente de vácuo. O processo de imagem foi conduzido empregando um microscópio

eletrônico de varredura modelo MIRA da TESCAN (Figura 21b) (ampliações podendo variar entre 0 a 200000 vezes, câmara de alto e baixo vácuo, além de detectores EBSD, SE, BSE, EDS e mapeamento e modo In Bean) que foi manipulado com ampliações e tensões de energia variadas, dependendo das características do material. Cabe destacar que, até o momento, não existe uma normativa designada que delinieie protocolos para a realização de microscopia eletrônica de varredura em materiais provenientes de filtros geotêxteis utilizados em sistemas de drenagem de resíduos sólidos urbanos. Logo, a metodologia adotada se alinhou a dados derivados da literatura científica, bem como aos protocolos técnicos estabelecidos pelo operador do equipamento do laboratório.

Figura 21 - Equipamento e manuseio das amostras do material retido pelos filtros: a) Amostra fixadas no suporte com leve recobrimento de metalização em ouro; b) Microscópio TESCAN - MIRA



a)



b)

Fonte: Autor (2025)

3.2.2.3 Difração de raios-x do material retido

A difração de raios X (XRD) foi empregada para determinar as fases cristalinas inerentes ao material retido, investigando assim a caracterização de seus constituintes mineralógicos. Para o ensaio de difração de raios-x do bloco de ensaios experimentais 1, fora utilizado dois equipamentos, o difratômetro da marca Anton Paar modelo XRDynamic 500 com radiação $K\alpha$ CMo operando a 50mA e 55kV, com diâmetro do goniômetro de 200 mm, operando na geometria Bragg-Brentano θ - θ (Reflexão). Para o bloco de ensaios experimentais 2, foi

utilizado o difratômetro da marca Bruker modelo D8 Advance Eco, com radiação $K\alpha Cu$ operando à 25 mA e 40 kV. O difratômetro opera em uma geometria Bragg-Brentano θ - θ , com diâmetro do goniômetro de 250 mm. Embora conduzidos em equipamentos distintos, a finalidade do processamento é o mesmo, o que muda é a posição dos picos de um em relação ao outro. Ambos os equipamentos estão localizados no departamento de engenharia de materiais, no Laboratório de Caracterização Estrutural (DEMA-LCE). O processamento de dados foi conduzido pelo autor no software Xpert High Score[©] que é um pacote de software para análise de dados de XRD, desenvolvido pela Malvern Panalytical.

3.2.3 Microscopia eletrônica de varredura dos filtros geotêxteis exumados

Para a visualização microscópica das amostras de geotêxteis, utilizou-se a análise por microscopia eletrônica de varredura, permitindo a observação de diferentes regiões das amostras, tanto na condição original quanto após o ensaio de campo. Esse procedimento teve como objetivo identificar fatores como matrizes coloniais de bactérias, indícios de colmatação e os sedimentos capturados pelos filtros durante o período de ensaio dos dois blocos. Para atingir tal fora utilizado o MEV-Mira (o mesmo utilizado para o material retido nos filtros) e MEV FEG XL30 (aumento de até 50000x – 500nm; câmara de alto vácuo) nas dependências do Laboratório de Caracterização Estruturas (LCE) da UFSCar, no departamento de engenharia de materiais. Cabe destacar que não existe normativas específicas para o procedimento do ensaio. Logo, foram parte de instruções da literatura, como definição de regiões a serem analisadas, escalas de visualização e caracterização química elementar.

Adicionalmente, foi realizada via Microscopia Eletrônica de Varredura em Condições Ambientais (MEV-ESEM) com o objetivo caracterizar morfologicamente as superfícies das amostras sob investigação, facilitando assim a interpretação de seus atributos estruturais e texturais. Os experimentos foram executados nas instalações do Departamento de Biologia da Universidade Federal de São Carlos, utilizando um microscópio eletrônico de varredura equipado com uma câmara ambiental, o que permitiu a análise dos materiais sem a necessidade de pré-tratamento, como metalização, mantendo assim as características de campo das amostras dos geotêxteis. As análises ocorreram sob pressão reduzida (modo ambiente), com variações de pressão controladas dentro da câmara variando de 30 a 200 Pa, uma tensão de aceleração ajustada entre 10 e 20 kV e uma distância de trabalho calibrada entre 10 e 15 mm, com esses parâmetros estabelecidos com base nas propriedades específicas do equipamento e do operador do laboratório, além disso o equipamento apresenta resolução de 1,5 nm, elevado desempenho em emissão por fonte de campo térmico (com corrente de feixe superior a 100 nA) e alta

sensibilidade, com distância de trabalho de 18 mm. A seleção do MEV-ESEM foi realizada pela capacidade da técnica de analisar amostras contendo seu estado natural após a parada dos ensaios de campo. Preservando sua umidade e sua integridade para a investigação de materiais orgânicos e inorgânicos heterogêneos, atributos inerentes aos sedimentos de deposição nos geotêxteis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

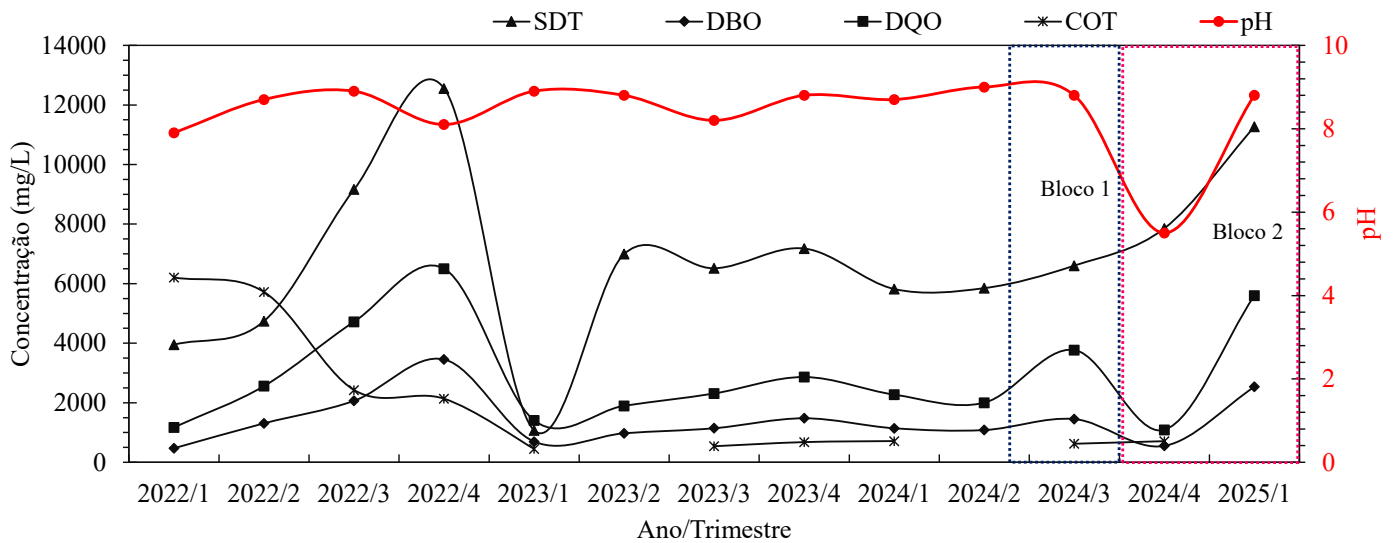
4.1. Monitoramento das propriedades físico-químicas do lixiviado

A avaliação das características físico-químicas e biológicas do lixiviado é fundamental para compreender como é a resposta da permeabilidade dos geotêxteis utilizados nos sistemas filtrantes de drenagem de bases de aterros sanitários, pois esses materiais são propensos aos mecanismos de colmatação. Variáveis como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), pH e Carbono Orgânico Total (COT) estão intrinsecamente ligadas aos mecanismos físicos, químicos e biológicos de acumulação e obstrução. A DBO e o COT são indicadores da presença de substâncias orgânicas biodegradáveis, que aumentam a proliferação microbiana e contribuem para o mecanismo da colmatação biológica por meio da formação de biofilmes e da integração da biomassa acumulada junto a superfície do geotêxtil (colmatação física). Por outro lado, a DQO quantifica a matéria orgânica total (biodegradável e não biodegradável) e está associada a processos biológicos e químicos, facilitados pela precipitação de compostos orgânicos e inorgânicos complexos. A SDT significa a concentração de partículas finas dissolvidas no lixiviado, que podem se depositar nos poros do geotêxtil, promovendo assim a colmatação física. O nível de pH influencia a solubilidade e a precipitação de compostos químicos, exercendo um efeito direto nos processos de colmatação química, além de afetar a atividade microbiológica resultando na colmatação biológica.

A Figura 22, apresenta a evolução da série de sólidos dissolvidos totais (SDT), DBO, DQO, pH e COT ao longo de doze trimestre, dados estes que foram cedidos pelo Grupo Solví, organizados e analisados pelo autor. A concentração média de sólidos dissolvidos totais (SDT) foi de 7.599,8 mg/L em 2022, 5.437,3 mg/L em 2023 e 6.529,5 mg/L em 2024, indicando um acúmulo considerável de partículas em suspensão, o que pode resultar em colmatação física e potencialmente comprometer a permeabilidade dos geotêxteis por um longo período (Booker *et al.* 2004). A detecção de vários constituintes e compostos químicos, incluindo cloreto, ferro

e cromo, indica sua propensão a aderir quimicamente a substâncias poliméricas, afetando assim a integridade estrutural e as propriedades mecânicas dos geotêxteis (Halse *et al.* 1987).

Figura 22 - Evolução das características do lixiviado: pH, SDT, DBO, DQO e COT²



Fonte: Dados internos fornecidos para fins de pesquisa e adaptado pelo autor (2025).

A concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT) no lixiviado do aterro sanitário é significativamente influenciada pelas variações sazonais, particularmente por meio de alterações nos padrões de precipitação. Durante intervalos de precipitação elevada, a infiltração aumentada de água na matriz de resíduos, promove uma maior dissolução de componentes particulados e sólidos, elevando assim as concentrações de SDT no lixiviado. Por outro lado, durante períodos de precipitação reduzida, o declínio na produção de lixiviado pode ocorrer; no entanto, pode resultar em um aumento da concentração de SDT devido à diminuição da capacidade dilutiva da água (Renou *et al.* 2008). Além disso, as características dos resíduos sólidos orgânicos estão fundamentalmente associadas aos atributos dos resíduos sólidos urbanos, à fase específica da decomposição dos resíduos e ao tempo de retenção hidráulica no aterro. Investigações empíricas indicam que aterros situados em áreas caracterizadas por uma variabilidade climática significativa exibem diferenças significativas nas cargas seriais de sólidos totais em várias estações ao longo do ano (Naveen *et al.* 2017).

Os níveis de pH, indicados pela curva em vermelho, exibiram uma faixa ligeiramente alcalina durante a maior parte do período analisado (para o bloco 1 de 8 a 9), característica dos lixiviados durante a fase metanogênica, em que ocorre degradação anaeróbica e a produção de ácidos é compensada por atividade microbológica (Kjeldsen *et al.* 2002). No entanto, um declínio repentino para aproximadamente 5,5 foi registrado no quarto trimestre de 2024 (época

² Não houve registro de COT no segundo trimestre de 2023 e 2024 e no primeiro de 2025.

de operação do bloco 2), sugerindo um potencial ácido atribuída ao acúmulo de ácidos orgânicos voláteis, o que pode significar instabilidade nos processos biológicos ou uma alteração abrupta na composição dos resíduos. Essa perturbação pode estar relacionada ao aumento do índice pluviométrico no período, o qual influencia a capacidade dilutiva do lixiviado e pode alterar o seu padrão de geração (conseqüentemente as características do lixiviado) no interior da massa de resíduos sólidos. No entanto, já no primeiro trimestre de 2025, os valores de pH retornaram aos níveis anteriormente observados (8,8) para o mesmo período em anos anteriores, indicando que, apesar da redução registrada previamente, as condições metanogênicas do sistema tendem a se restabelecer e estabilizar ao longo da estação chuvosa.

A DBO variou entre aproximadamente 1.083,00 e 1.452,00 mg/L no bloco de ensaios 1, enquanto no início do monitoramento do bloco 2 foi registrado o valor de 552,00 mg/L para o quarto trimestre de 2024 e 2.535,00 mg/L para o primeiro trimestre de 2025. Já a DQO apresentou flutuações entre 2.000,00 e 5.600,00,00 mg/L. Essas variações podem estar associadas ao índice pluviométrico, sugerindo que, durante períodos de precipitação constante, a geração e as características do lixiviado tendem a seguir um padrão mais estável. Por outro lado, aumentos substanciais na pluviometria podem provocar perturbações nessas características, que estão diretamente relacionadas à permeabilidade da camada drenante e dos seus constituintes. O COT acompanha de perto as variações no DQO, o que é de se esperar, já que ambos os valores representam a carga orgânica total, embora por meio de metodologias diferentes.

A Tabela 6 apresenta os valores trimestrais individuais de DBO e DQO obtidos nos relatórios dos anos de 2022, 2023, 2024 e 2025, além do cálculo da razão DQO/DBO, que indica o intervalo de biodegradabilidade dos componentes presentes no lixiviado.

Tabela 6 - Classificação da biodegradabilidade do resíduo e do lixiviado

Ano/Trimestre	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	DQO/DBO	Intervalos da biodegradabilidade por Von Sperling (2014) e Mangkoedihardjo (2023)
2022/1	473,0	1172,0	2,5	<p>DQO/DBO < 2 - Biodegradabilidade alta</p> <p>$2 \geq \text{DQO/DBO} \leq 4$ – biodegradabilidade moderada</p> <p>DQO/DBO > 4 – biodegradabilidade baixa</p>
2022/2	1310,0	2559,0	1,9	
2022/3	2066,0	4719,0	2,3	
2022/4	3456,0	6500,0	1,9	
2023/1	695,0	1403,0	2,0	
2023/2	975,0	1895,0	1,9	
2023/3	1144,0	2309,0	2,0	
2023/4	1479,0	2861,0	1,9	
2024/1	1143,0	2270,0	2,0	
2024/2	1083,0	2000,0	1,8	
2024/3	1452,0	3769,0	2,6	
2024/4	552,0	1090,0	2,0	
2025/1	2535,0	5600,0	2,2	

Fonte: Dados internos fornecidos para fins de pesquisa e adaptado pelo autor (2025)

De acordo com a classificação proposta por Mangkoedihardjo (2023), a relação DQO/DBO serve como um critério para avaliar a toxicidade e a biodegradabilidade dos efluentes. Valores de DQO/DBO variando de 1,8 a 2,6, conforme obtido nos dados em análise, significam que o efluente reside dentro do espectro biodegradável alta a moderada, indicando uma carga orgânica com potencial considerável para tratamento biológico. O autor ainda coloca que uma relação DQO/DBO mais baixa, maior será a fração da matéria orgânica que pode degradada por microrganismos. Valores de biodegradabilidade baixa requerem processos de tratamento mais sofisticados.

A correlação entre DQO e DBO que é utilizada como uma métrica para avaliar a biodegradabilidade do lixiviado. Em 2022 a relação média foi 2,1 e em 2023, a proporção média de DQO para DBO foi de aproximadamente 2,0 sugerindo uma proporção substancial de matéria orgânica biodegradável, uma característica frequentemente observada em lixiviados de aterros relativamente jovens ou aqueles que exibem atividade microbológica alta. No ano subsequente de 2024, essa proporção teve uma ligeira elevação para 2,2, o que continua a sugerir biodegradabilidade alta a moderada. Essa relação leva a sugestão do tipo de tratamento para o lixiviado o que pode demandar técnicas desde metodologias de tratamento biológico aeróbio e anaeróbico que são apropriadas para o lixiviado até técnicas mais sofisticadas para o tratamento. O registro de valores de DBO ao longo dos dois anos implica uma carga orgânica biodegradável estável; no entanto, o monitoramento contínuo é imperativo para avaliar as

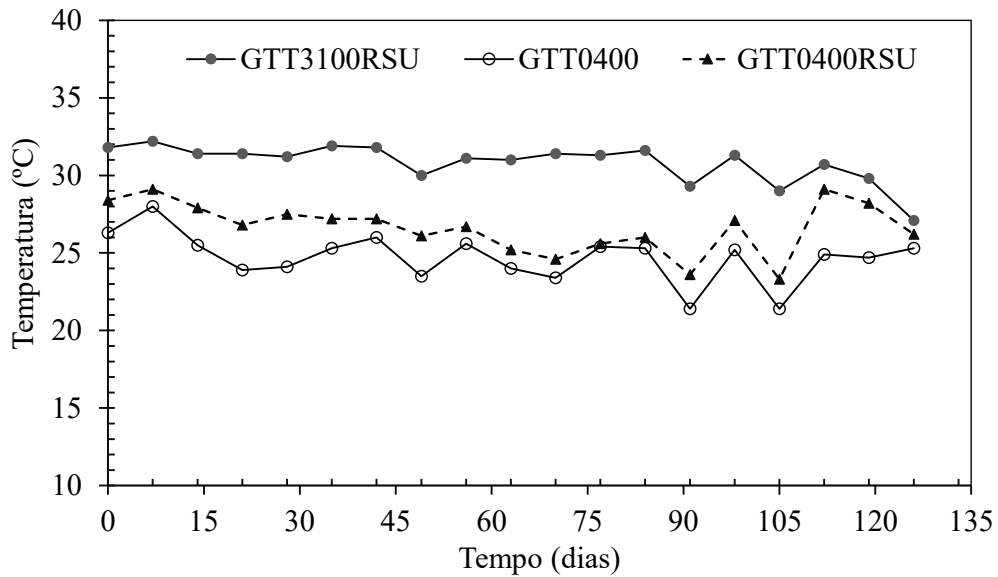
flutuações na composição do lixiviado ao longo do tempo e garantir a eficácia das estratégias de tratamento empregadas como destaca Gebert *et al.* (2022).

Análises comparativas da literatura (Cancelli e Cazzufii, 1987; Yaman, 2019 e Wang *et al.* 2023) sugerem que o lixiviado proveniente do aterro sanitário de São Carlos possui um perfil constitutivo semelhante ao observado em aterros sanitários de médio a grande porte, caracterizado por características tipicamente associadas a aterros situados em países em desenvolvimento, onde as práticas de gerenciamento de resíduos e a segregação de materiais recicláveis frequentemente ficam comprometidos (Tchobanoglous *et al.* 1993; Christensen *et al.* 1994; Silva *et al.* 2010). Embora as concentrações de poluentes permaneçam dentro dos padrões observados, é imperativo de tratar esse lixiviado é fundamental para mitigar o risco de contaminar os ecossistemas aquáticos e o solo circundantes, conforme relatado por Kurniawan *et al.* 2006 e Abdel-Shafy *et al.* 2024.

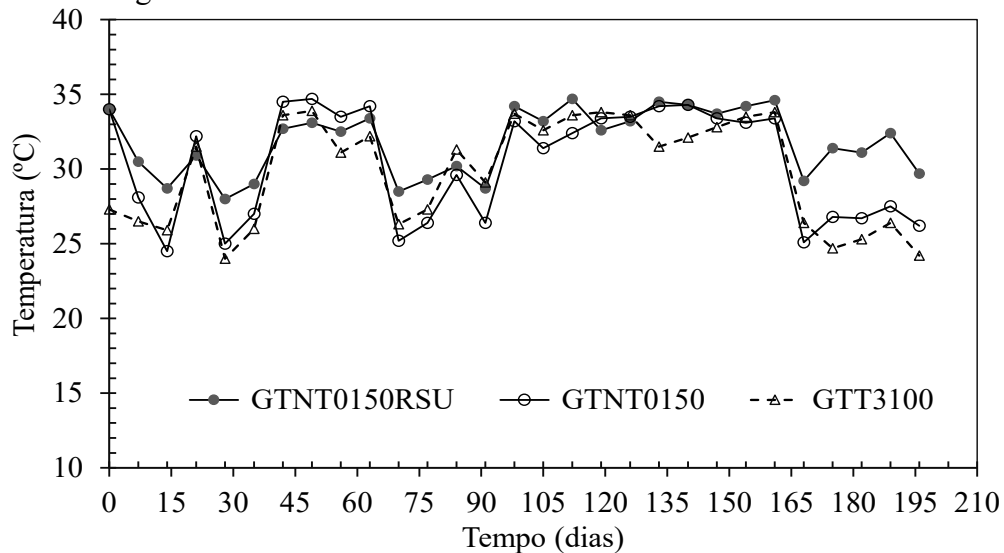
4.2 Análise e monitoramento da temperatura do lixiviado em campo

Segundo a Resolução CONAMA N° 375, de 29 de agosto de 2006, o lixiviado, precisa estar em temperatura mínima ou superior a 20 °C, para que o efluente possa ser encaminhado para tratamento como digestão aeróbia, digestão anaeróbia, compostagem, processo de remoção de patógenos.

A média da temperatura registrada de *in loco* para ambos os blocos foi aproximadamente 31,4 °C, o que sugere um ambiente favorável tanto para reações químicas quanto para processos biológicos. O monitoramento térmico dos blocos pode ser observado na Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 - Monitoramento térmico *in loco* do bloco de ensaios 1

Fonte: Autor (2025).

Figura 24 – Monitoramento térmico *in loco* do bloco de ensaio 2

Fonte: Autor (2025).

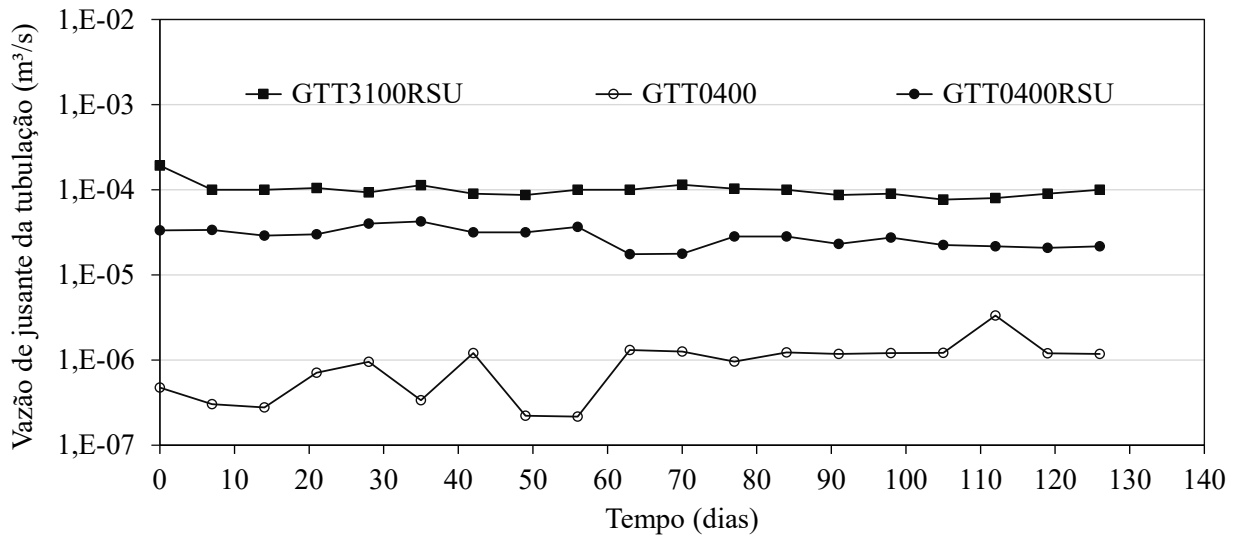
Com base nas medições realizadas, a temperatura do lixiviado encontra-se dentro dos limites aceitáveis estabelecidos pela Resolução CONAMA, atendendo ao padrão térmico necessário para o encaminhamento aos processos de tratamento. A manutenção dessa condição é essencial, uma vez que temperaturas elevadas ou muito baixas podem comprometer a eficiência de etapas biológicas e físico-químicas do tratamento, além de afetar a solubilidade de compostos e a atividade microbiana envolvida na depuração do efluente.

4.3 Monitoramento das vazões de jusante da tubulação e percoladas nas colunas

Ao longo dos períodos de ensaio, foram monitoradas as vazões geradas pelos condutos, as quais correspondem às vazões de jusante (vazão que sai do tubo) nos sistemas de filtração. Esses fluxos são responsáveis por transportar os sólidos presentes no lixiviado até as colunas de filtração, podendo influenciar diretamente os mecanismos de colmatação e o desempenho hidráulico das colunas de filtração.

A Figura 25 apresenta os resultados das vazões relativas ao bloco de ensaios experimentais 1. A coluna GTT3100RSU, operou no conduto que dispunha de uma vazão maior em relação aos demais (conduto 1). Esta escolha deve-se, pela incorporação dos resíduos sólidos que podem atuar como um pré-filtro e um controlador de vazão, além da reproduzir as condições de operação do aterro. Nessa situação, a vazão de jusante ficou limitada à permeabilidade do resíduo compactado dentro da coluna de filtração, sendo o excesso escoado para fora do sistema. Já a coluna GTT0400RSU foi posicionado em outro conduto cuja vazão se aproximava da vazão maior (conduto 4), uma vez que as condições de contorno foram pré-estabelecidas. Já a coluna GTT0400 fora posicionado no conduto onde a vazão é a menor (conduto 3), escolha essa devida a inexistência dos resíduos acima do geotêxtil. Os resultados das vazões, se assemelham aos resultados obtidos por Silva *et al.* 2022, onde o comportamento das curvas geradas de monitoramento é similar, embora a metodologia de captação dos dados foi desenvolvida por métodos associados a balanço hídrico do aterro, que depende de precipitação, evapotranspiração, umidade dos resíduos e compactação. Ainda cabe destacar que os condutos de transporte do lixiviado, pertencem a áreas distintas do aterro, sendo a coluna GTT3100RSU, de uma área onde a operação de disposição já consolidou, enquanto as colunas GTT0400 e GTT0400RSU foram acoplados em condutos que são provenientes de áreas que estão em operação.

Figura 25 - Monitoramento das vazões geradas do bloco de ensaios 1

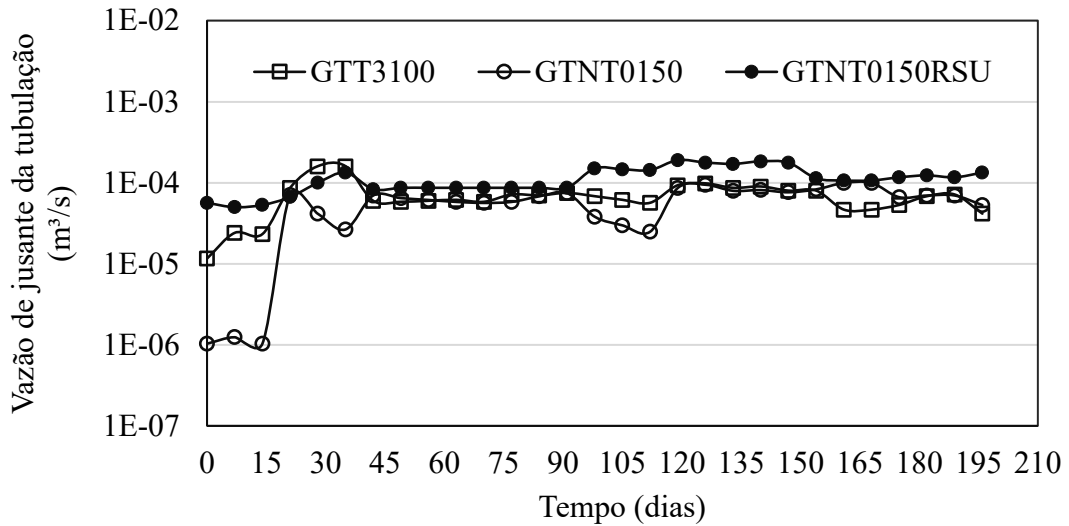


Fonte: Autor (2025).

Notoriamente a geração de lixiviado, depende de muitos fatores, entretanto a precipitação pode ser o fator que impacta mais diretamente sobre a geração, o que para o bloco de ensaios 1, que foi executado entre maio e setembro de 2024, o registro de precipitação seguiu os anos anteriores.

A Figura 26, relativa ao bloco de ensaios 2, apresenta um aumento significativo dos registros de precipitação a ponto das vazões dos condutos 3 (GTNT0150) e 4 (GTT3100) ficarem próximas (o que pode ser justificado por acúmulo de lixiviado em determinadas áreas no interior do maciço ou desobstrução do conduto), esse aumento é comum nas estações de primavera-verão. Nota-se que houve um aumento de três ordens de grandeza da média das vazões geradas ($3,76 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$), uma vez que a precipitação nessa época aumenta, os resíduos também atuam como armazenadores de umidade favorecendo o acúmulo de água no interior do maciço de resíduos.

Figura 26 - Monitoramento das vazões geradas do bloco de ensaios 2



Cabe ressaltar, contudo, que a geração de lixiviado apresenta comportamentos distintos em diferentes localidades, em função da variabilidade de fatores condicionantes, tais como as características construtivas do aterro, pluviosidade e presença de matéria orgânica. Esses fatores influenciam significativamente a intensidade (alta carga orgânica) e a velocidade do processo de formação do lixiviado. Como ambos os blocos de ensaios experimentais, foram conduzidos em diferentes épocas, as vazões de geração, apresentaram diferenças significativas. Um aspecto é a expressiva concentração de “espuma” observada no período de precipitações que está associada a fatores como uma atividade orgânica elevada, presença de surfactantes, atividade microbiológica e série de sólidos (Contrera, 2003; Vo *et al.* 2023).

A Figura 27 apresenta as vazões percoladas nas colunas de filtração ao longo do tempo das colunas que operaram no bloco de ensaios 1. Enquanto a Figura 28, apresenta as vazões de percolação das colunas que operaram no bloco de ensaios 2.

Figura 27 - Vazão de percolação das colunas do bloco de ensaios 1

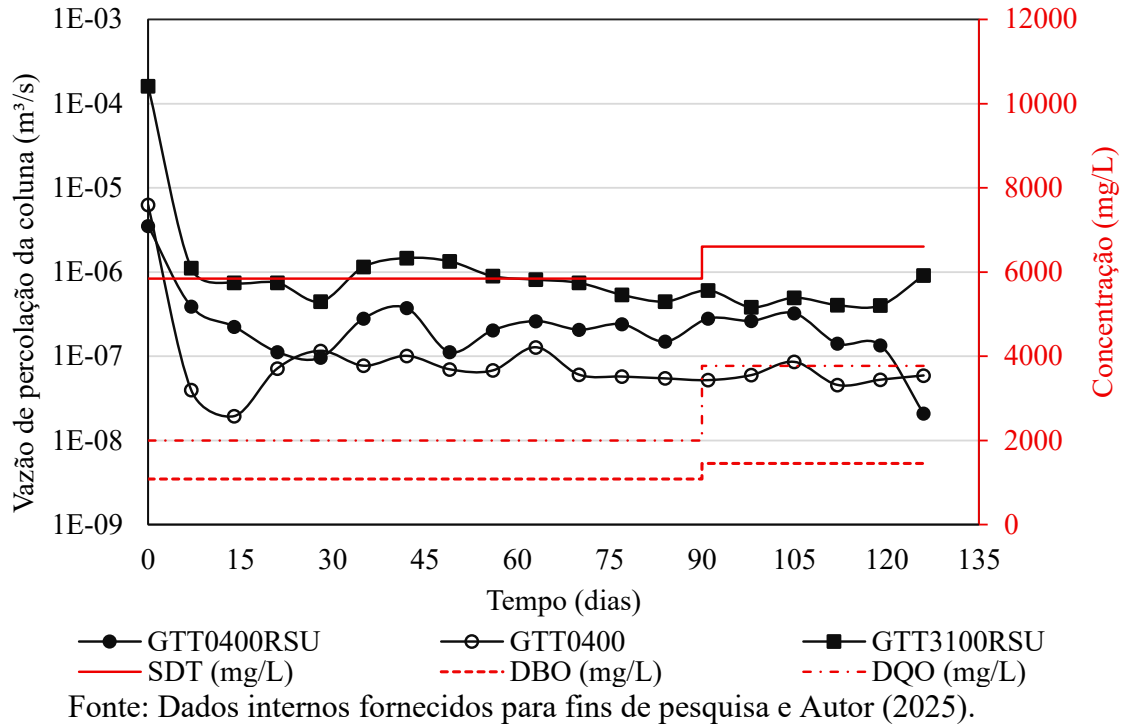
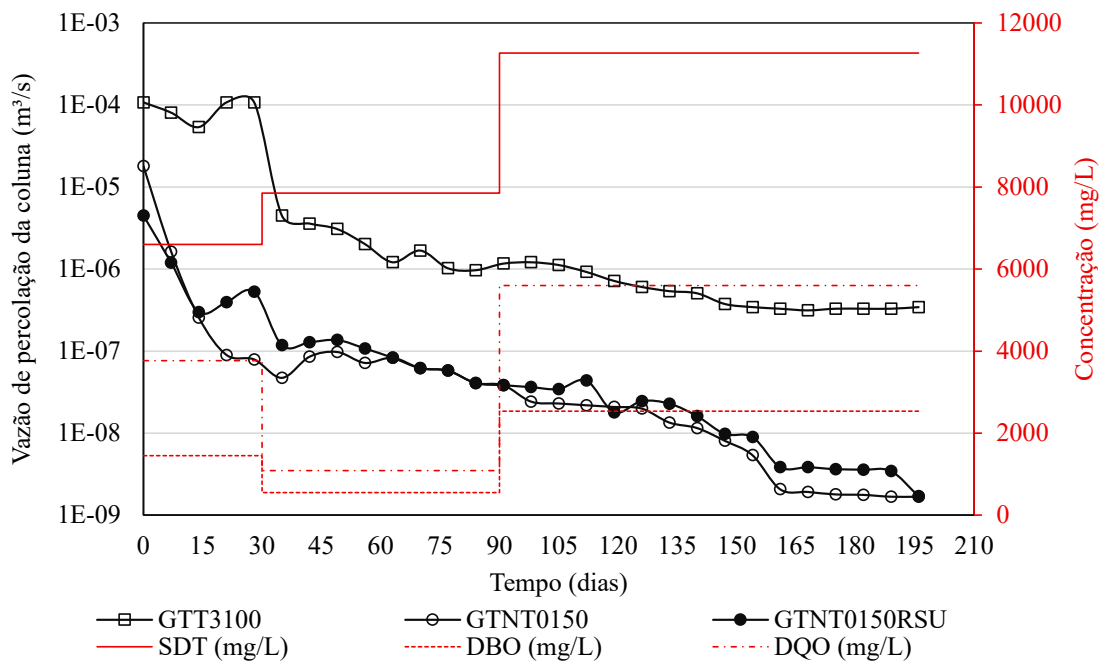


Figura 28 - Vazões de percolação das colunas do bloco de ensaios 2



O geotêxtil na coluna GTT0400, caracterizado por uma abertura de filtração intermediária de 0,4 mm, apresentou comportamentos distintos nos dois sistemas avaliados

(com e sem RSU). Na ausência de resíduos sólidos urbanos, a coluna manteve taxas de fluxo de aproximadamente 10^{-6} m³/s durante as semanas iniciais, demonstrando uma tendência de estabilização na faixa de 10^{-7} m³/s e indicando decaimento, indicativa de uma obstrução inicial seguida por um regime de percolação constante. Por outro lado, dentro da coluna integrada com resíduos sólidos (GTT0400RSU), uma redução significativamente mais estável na capacidade de fluxo foi registrada desde o início, com a vazão diminuindo e apresentando comportamento oscilatório ao longo do tempo, provavelmente atribuível à mobilização de partículas finas e substâncias coloidais geradas pela degradação dos resíduos. Apesar das concentrações de lixiviado serem mantidas em níveis fixos durante os trimestres que englobaram o ensaio, o impacto físico do resíduo e seu potencial de gerar sólidos suspensos dentro do próprio meio filtrante exerceram uma influência direta na obstrução do geotêxtil. No entanto, é importante destacar que variações nas concentrações, sejam elas aumentos ou reduções, podem influenciar diretamente a estabilização ou o decaimento do sistema, tornando-o sensível a essas perturbações.

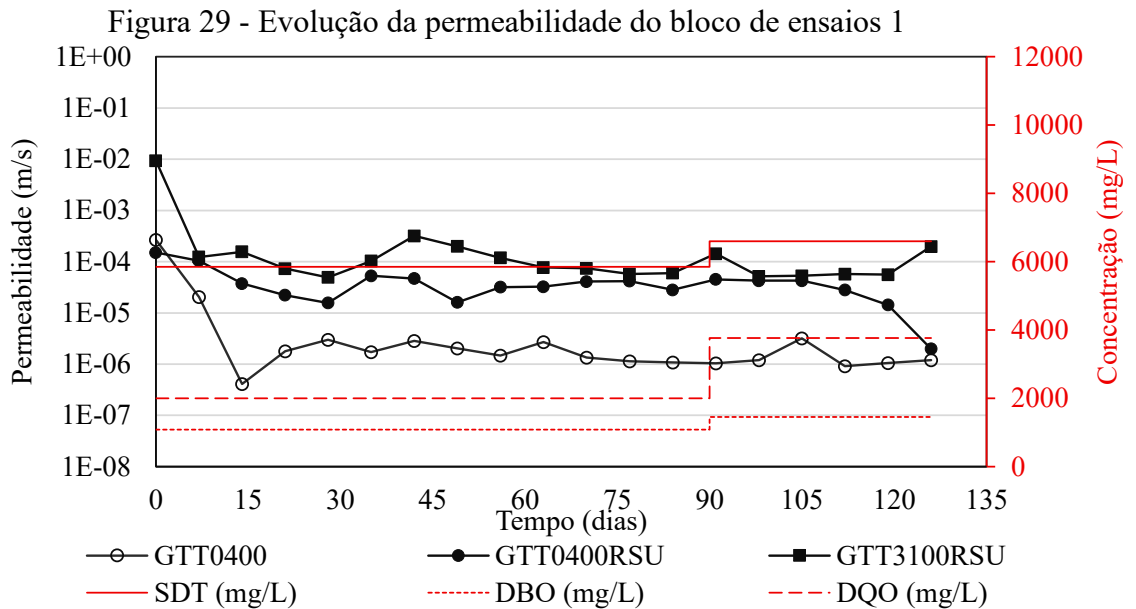
O geotêxtil GTT3100, que possui a maior abertura de filtração entre os materiais avaliados (3,1 mm), demonstrou um desempenho superior em termos de sustentação da condutividade hidráulica. No sistema desprovido de RSU, o fluxo inicial começou em aproximadamente 10^{-4} m³/s e apresentou um declínio gradual ao longo do tempo, estabilizando-se em torno de 10^{-6} m³/s. Essa redução gradual, ocorrendo mesmo sob condições altamente orgânico e inorgânico, sugere a operação de mecanismos secundários de obstrução, como precipitação química. Por outro lado, na coluna GTT3100RSU, a introdução de resíduos sólidos resultou em uma diminuição mais significativa no fluxo durante as semanas iniciais, estabilizando-se em níveis similares aqueles registrados no sistema sem RSU. Esse comportamento reforça a ideia que os resíduos atuam como fontes suplementares de partículas e compostos orgânicos e inorgânicos reativos, que, apesar da considerável abertura de poros do material, afetaram adversamente o desempenho hidráulico ao longo do tempo.

O geotêxtil GTNT0150, com a mais baixa abertura de filtração de 0,15 mm e estrutura mais desordenada dos filamentos, apresentou o comportamento adverso mais significativo em resposta à obstrução. Mesmo na ausência de RSU, a coluna apresentou um rápido declínio no fluxo, diminuindo da ordem de 10^{-5} m³/s para 10^{-7} m³/s nas semanas iniciais, e exibindo uma trajetória descendente estável. Quando resíduos sólidos estavam presentes (GTNT0150RSU), a obstrução se manteve, com a vazão caindo abaixo de 10^{-8} m³/s ao longo do tempo, mas ainda assim, acima do observado na coluna sem RSU, ilustrando que esse material é extremamente

vulnerável a obstrução quando submetido a cargas físicas, e sob condições químicas orgânicas e inorgânicas.

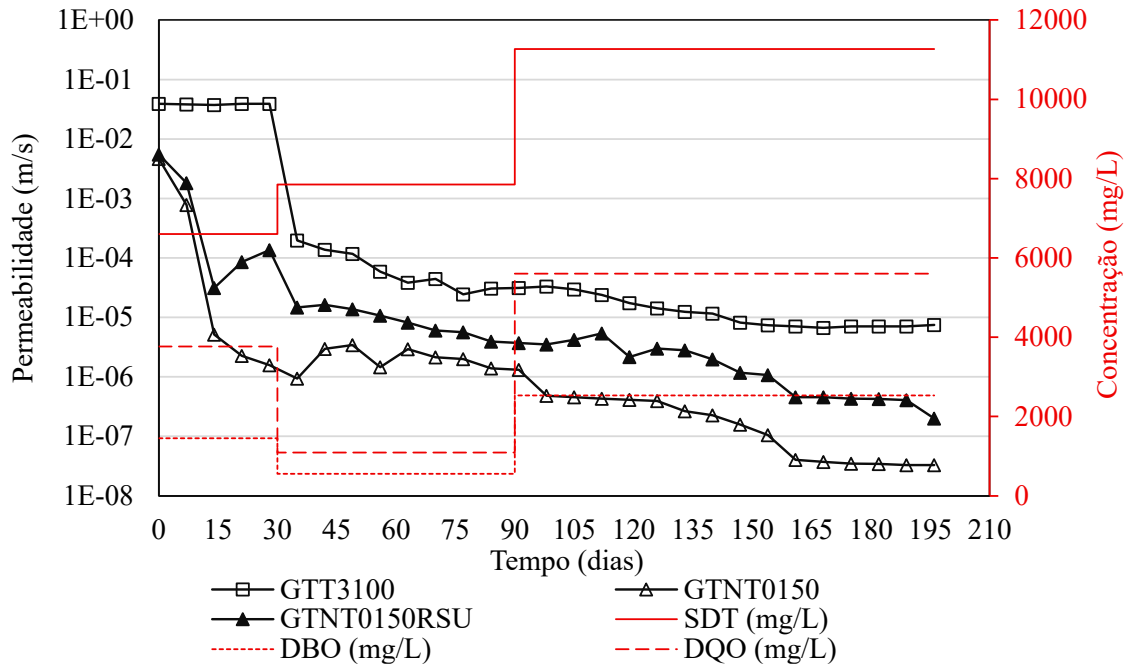
4.4 Evolução da permeabilidade dos sistemas filtrantes

Nesta seção, apresenta-se inicialmente a evolução da permeabilidade nas colunas de filtração ao longo do monitoramento experimental em campo, juntamente com os parâmetros de qualidade do lixiviado — Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), todos expressos em mg/L — os quais foram medidos e fornecidos pela empresa local. A Figura 29 apresenta a evolução da permeabilidade observada no bloco de ensaios experimentais 1, enquanto a Figura 30 mostra os resultados correspondentes ao bloco de ensaios experimentais 2.



Fonte: Dados internos fornecidos para fins de pesquisa e Autor (2025).

Figura 30 - Evolução da permeabilidade do bloco de ensaios 2

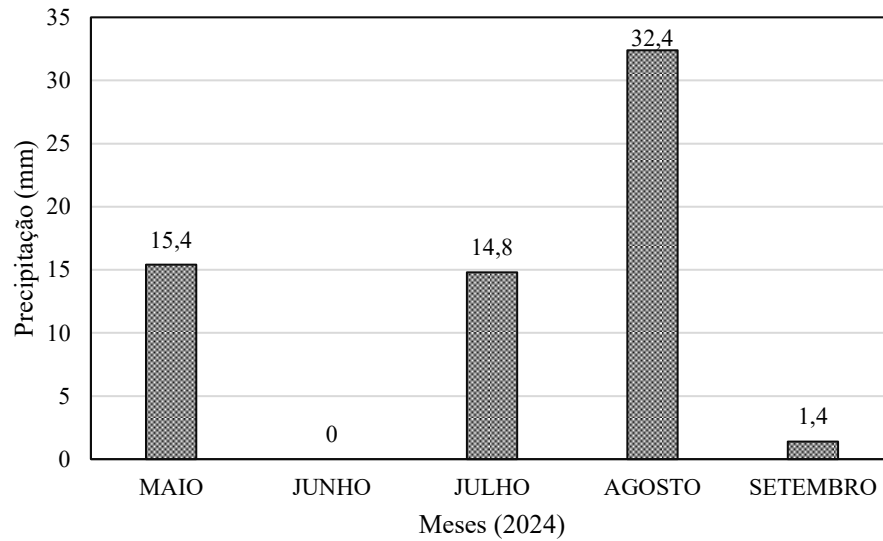


Fonte: Dados internos fornecidos para fins de pesquisa e Autor (2025).

Durante a operação do bloco de ensaios experimental 1 (Figura 30), observou-se um padrão de estabilidade e uma redução na permeabilidade dos sistemas de filtração, GTT0400 e GTT0400RSU. Os perfis de permeabilidade para as colunas GTT0400, GTT0400RSU variaram de 10⁻⁴ m/s a valores em torno de 10⁻⁵ m/s (GTT0400RSU) e 10⁻⁶ m/s (GTT0400). Já a coluna GTT3100RSU apresentou valores em torno na faixa de 10⁻⁴ m/s, o que pode sugerir uma estabilidade das colunas sob condições hidrodinâmicas.

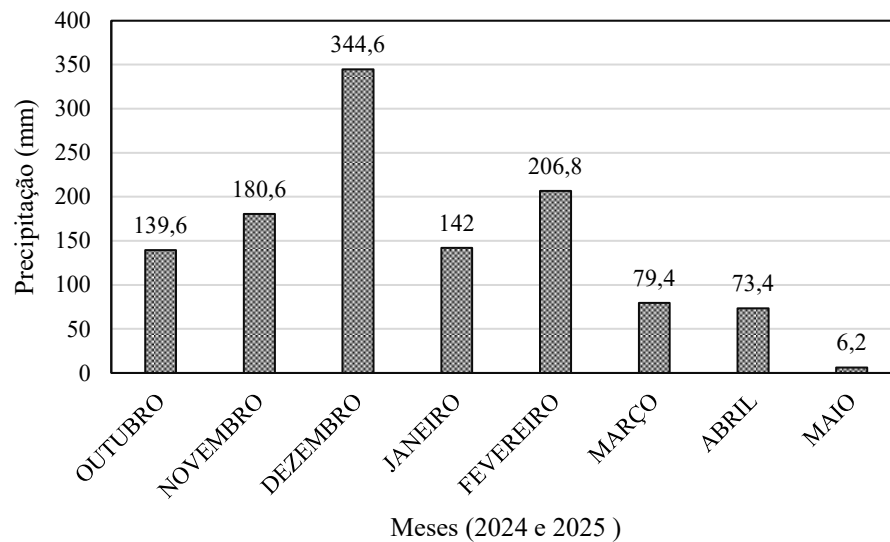
No mesmo intervalo, as concentrações de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), medidas no segundo trimestre e parte do terceiro trimestre de 2024, apresentaram médias em torno de 6.000 mg/L a 6.100 mg/L para SDT, entre 1.900 e 2.000 mg/L para DBO, e entre 2.100 e 4.000 mg/L para DQO. Quando observados no mesmo período (Figura 31), os dados climáticos mostram índices mínimos de precipitação, característicos da estação árida (outono-inverno), com valores médios mensais caindo abaixo de 15 mm de maio a setembro. Essa diminuição da precipitação leva à redução da geração de lixiviado e à diminuição da carga hidráulica nas colunas de filtração, além de influenciar os parâmetros de concentração, o que pode ter facilitado a preservação da estrutura porosa dos materiais e mitigado a incidência dos mecanismos de colmatação.

Figura 31 – Índice pluviométrico do bloco de ensaios 1



Fonte: Dados internos fornecidos para fins de pesquisa e adaptado pelo autor (2025).

Figura 32 – Índice pluviométrico do bloco de ensaios 2



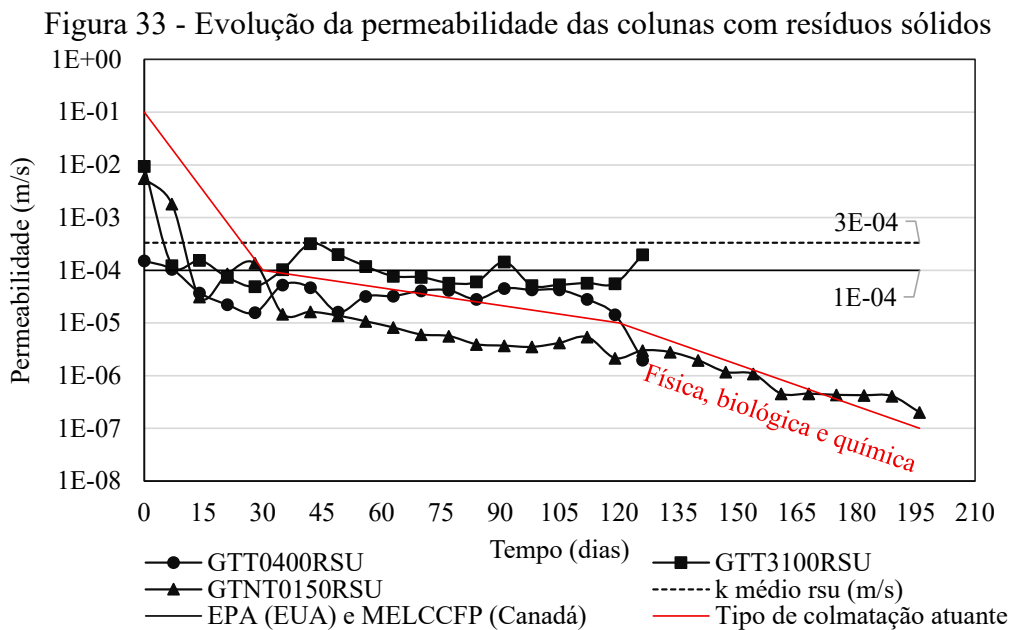
Fonte: Dados internos fornecidos para fins de pesquisa e adaptado pelo autor (2025)

Durante a operação do bloco de ensaios experimentais 2 (Figura 30), observou-se que, durante o período inicial de 30 dias, a permeabilidade das colunas (GTNT0150RSU e GTNT0150) apresentaram uma queda mais significativa, sugerindo um rápido bloqueio inicial dos poros dentro das colunas. Esse fenômeno pode ser atribuído à presença de cargas orgânicas elevadas e sólidos dissolvidos, conforme evidenciado pelas concentrações de DBO, DQO e SDT, que são elevadas em níveis partindo do final do bloco 1. No entanto, as cargas de DBO e DQO apresentam uma redução após a marca de 30 dias, enquanto a série de sólidos demonstra um aumento, o que pode indicar que o aumento na precipitação (Figura 32) está correlacionado

com a capacidade dilutiva do lixiviado e a atividade microbiológica, o que pode ter contribuído para a rápida diminuição na permeabilidade da coluna GTT3100.

Ao longo do tempo, especificamente entre após o 30º dia, uma tendência de perturbações em alguns dias nas colunas com o geotêxtil não tecido seguida por uma queda progressiva na permeabilidade é evidenciada, particularmente acentuada nas colunas compostas por geotêxtil não tecido. Essa redução está ligada à deposição contínua de matéria orgânica e sólidos nos vazios do geotêxtil, em conjunto com a potencial proliferação de biofilme. Simultaneamente, embora as concentrações de DBO e DQO mostrem um aumento além do ponto de 90 dias, elas significam um aumento potencial na carga e na atividade biológica do lixiviado que pode afetar as colunas com o desenvolvimento de biofilmes.

A Figura 33 apresenta dos dados de permeabilidade das colunas que incorporaram resíduos sólidos.



Fonte: Autor (2025).

Na quinzena inicial, uma queda significativa na permeabilidade foi observada em todas as colunas filtração, particularmente dentro da coluna GTNT0150RSU, sugerindo que a colmatação física surge como o mecanismo primário. Esse fenômeno está intrinsecamente ligado a concentrações elevadas de SDT e à considerável carga orgânica inicial (conforme apresentado pelo alto índice de DBO e DQO), o que facilita a rápida obstrução das estruturas mais porosas devido às condições orgânicas e inorgânicas contínuas que promovem a atividade. Além disso, os primeiros meses de testes (mesmo realizados em intervalos distintos), o bloco 2 coincidindo com a estação chuvosa (outubro de 2024 a maio de 2025), registraram altos níveis

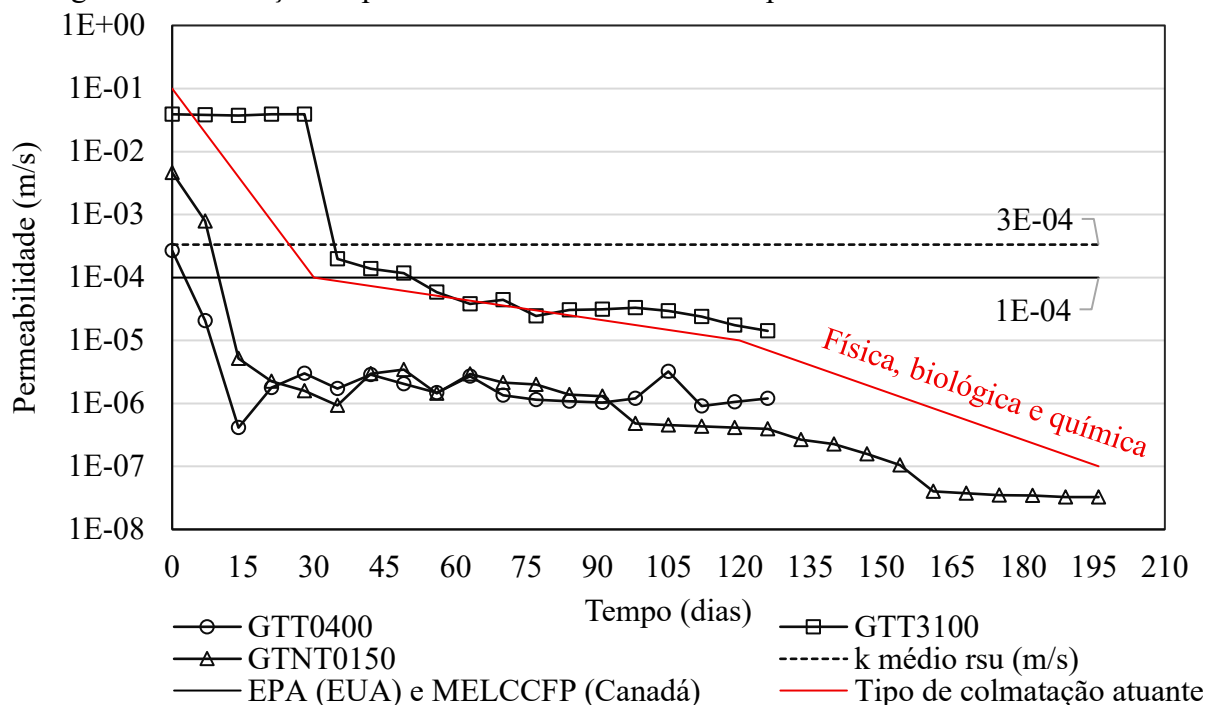
precipitação, particularmente em dezembro, onde os totais ultrapassaram 350 mm. Esse volume substancial de chuva aumenta a produção de lixiviado que percola a da matriz de resíduos, aumentando assim a carga hidráulica e promovendo o transporte de partículas para a coluna de filtração, o que posteriormente aumenta a colmatação física no início do experimento.

Do 15º dia até aproximadamente o 120º dia, uma queda mais gradual na permeabilidade é observada, indicando uma escalada nos mecanismos biológicos juntamente com a colmatação física. Nesse momento, o desenvolvimento e o acúmulo de biofilmes nas superfícies internas dos geotêxteis são atribuíveis à atividade microbiana, que é estimulada pela presença persistente de matéria orgânica (alto DBO e DQO), em conjunto com níveis elevados de precipitação, os meses de janeiro e fevereiro.

Na fase final do experimento (após o 120º), todas as três colunas experimentam uma perturbação na permeabilidade, queda na coluna GTT0400RSU e leve aumento na coluna GTT3100RSU indicando uma desobstrução da coluna, destacando a influência intensificada somadas a colmatação química em conjunto com os mecanismos físicos e biológicos. A precipitação durante os meses finais na coluna que operou no bloco 2, (GTNT0150RSU - março a maio) diminuiu drasticamente, o que, quando associado à estabilização das concentrações de DBO e DQO, resultou em uma diminuição na permeabilidade e facilita a precipitação de sais minerais e compostos inorgânicos (incluindo cálcio, ferro e magnésio), que se acumulam nas estruturas internas do geotêxtil, contribuindo assim para a colmatação química.

Já a Figura 34 apresenta os dados das colunas que não continham os resíduos sólidos.

Figura 34 - Evolução da permeabilidade das colunas desprovidas de resíduos sólidos



Fonte: Autor (2025).

As características de permeabilidade observadas em colunas que não continham resíduos sólidos, particularmente no GTT3100, estão essencialmente ligadas às condições de precipitação apresentados de outubro de 2024 a maio de 2025. No início da operação em campo, a coluna GTT3100 apresentou estabilidade na permeabilidade; no entanto, com o início da estação chuvosa — marcada por um aumento acentuado da precipitação entre outubro e novembro de 2024 — observou-se uma queda brusca na permeabilidade por volta do 30º dia. Esse comportamento está possivelmente associado ao aumento da concentração de sólidos em suspensão, intensificado pelas chuvas, que atingiram seu pico em dezembro, com mais de 350 mm registrados.

Apesar da falta de resíduos sólidos, a maior intensidade das chuvas durante os primeiros meses aumentou o fluxo que sai dos condutos, potencialmente facilitando a colmatação física preliminar dentro do GTT3100. No entanto, este sistema, caracterizado pelo geotêxtil de maior abertura, apresentou maior estabilidade hidráulica ao longo do tempo, mesmo caindo abaixo da normativa recomendada.

À medida que a estação chuvosa progrediu, a atividade microbiológica retornada pelos índices de DBO e DQO no bloco 2, ilustrando assim a mudança progressiva para atuação da colmatação física e biológica após o período inicial de 30 dias. Por outro lado, a queda na precipitação a partir de março pode ter levado a uma redução na taxa de vazão que sai do conduto, na qual, também pode-se sugerir a formação de precipitados minerais e exemplificando a atuação somada à influência da colmatação química durante as fases finais do experimento.

Apesar da atuação simultânea dos mecanismos de colmatação, em todas as fases, os dados sugerem uma atuação sequencial de cada processo (curva destacada em vermelho): os mecanismos atuam de forma simultânea, o que ao final do ensaio pode-se detectar cada traços e agentes pertencentes a cada uma delas. Essa dinâmica está intrinsecamente associada às características do lixiviado (SDT, DBO e DQO) e às condições hidrológicas de cada período analisado, com o impacto mais substancial das chuvas ocorrendo nos meses iniciais do bloco 2.

4.5 Análise do material retido pelos filtros

4.5.1. Umidade e Sólidos Totais

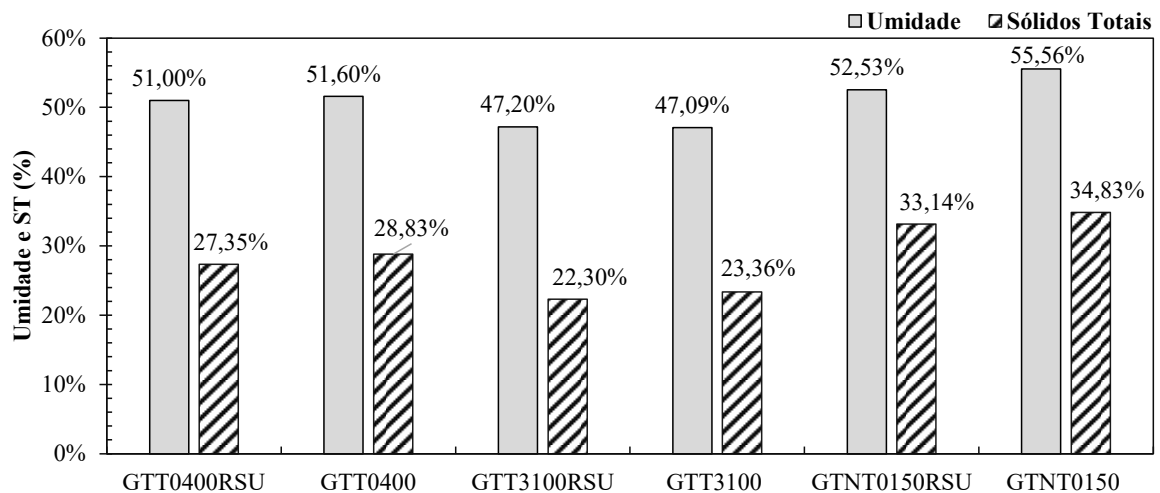
A Tabela 7 apresenta os valores de massa de material retido nos filtros, a tara dos recipientes utilizados e a massa do material após a secagem nas estufas de 45°C e 100°C respectivamente.

Tabela 7 - Massa retida pelos filtros nas colunas

Coluna de filtração	Tara do recipiente utilizado (g)	Massa de material retido (g)	Massa do material após secagem na estufa de 45°C (g)	Massa do material após a secagem na estufa de 100°C (g)
GTT0400RSU	378,70	617,80	537,00	493,70
GTT0400	410,30	637,00	559,80	516,10
GTT3100RSU	379,70	570,40	509,30	480,40
GTT3100	378,91	913,56	742,40	657,50
GTNT0150RSU	255,76	580,71	468,80	398,20
GTNT0150	409,90	945,80	754,40	634,40

Os resultados da umidade e dos sólidos totais são apresentados na Figura 35, onde é possível observar o material retido de cada uma das colunas.

Figura 35 - Umidade de campo e sólidos totais das amostras do material retido das colunas



Fonte: Autor (2025).

No par GTT0400RSU e GTT0400, ambos caracterizados pelo geotêxtil de abertura de filtração 0,40 mm, o teor de umidade do material retido foi similar (51,00% e 51,60%, respectivamente), o que sugere que a incorporação de resíduos afetou expressivamente a capacidade de retenção de umidade. No entanto, o conteúdo total de sólidos totais (ST) diminuiu ligeiramente na coluna contendo resíduos (27,35%) em comparação com a coluna desprovida de resíduos (28,83%). Essa observação sugere que, embora o lixiviado tenha transportado frações orgânicas em ambos os cenários, a presença de resíduos sólidos pode ter facilitado a decomposição da matéria orgânica ou impedido sua retenção.

O material retido das colunas GTT3100 e GTT3100RSU, resultaram nos menores valores de teor orgânico (23,36% e 22,30%, respectivamente) junto com os níveis de umidade (47,09% e 47,20%). Os resultados sugerem que a abertura elevada facilita a passagem de partículas finas e materiais orgânicos dissolvidos ou particulados, diminuindo assim a quantidade de sólidos retidos. O menor valor do ST pode estar associado presença dos resíduos sólidos urbanos pode ser atribuída à mobilização de partículas mais finas que não são capturadas pela abertura de filtração, bem como ao potencial deslocamento de substâncias orgânicas pelo percolado.

O par GTNT0150RSU e GTNT0150, com a mais baixa abertura de filtração 0,15 mm, apresentou a maior concentração de sólidos totais entre todos os casos analisados (33,14% e 34,83%, respectivamente), além dos níveis de umidade mais elevados (52,53% e 55,56%). A mais baixa abertura do geotêxtil não tecido conferiu um alto grau de retenção de sólidos e compostos orgânicos presentes no lixiviado, que tendem a se acumular no meio filtrante, elevando posteriormente o teor de umidade e os valores de ST. No entanto, a presença de RSU ainda estava correlacionada com uma diminuição nos valores de ST, potencialmente devido à sua facilitação do aumento da degradação biológica das frações orgânicas ou à sua influência na composição do lixiviado coletado.

Comparativamente, as colunas com resíduos sólidos, o sistema GTNT0150RSU, caracterizado pelo menor diâmetro de filtração de 0,15 mm, apresentou os maiores valores registrados de teor de umidade (52,53%) e sólidos totais (33,14%), significando uma capacidade superior na retenção de partículas finas e frações orgânicas encontradas no lixiviado, embora o processo de filtração consista em manter um equilíbrio entre a retenção e a capacidade de fluxo, indicando que o filtro é aplicável como retenção, mas falha na capacidade de fluxo. Já o sistema GTT0400RSU, possuindo um tamanho de abertura intermediária de 0,40 mm, demonstrou valores marginalmente reduzidos (teor de umidade de 51,00% e sólidos totais de 27,35%), indicando assim um nível moderado na eficiência de retenção. Por outro lado, o

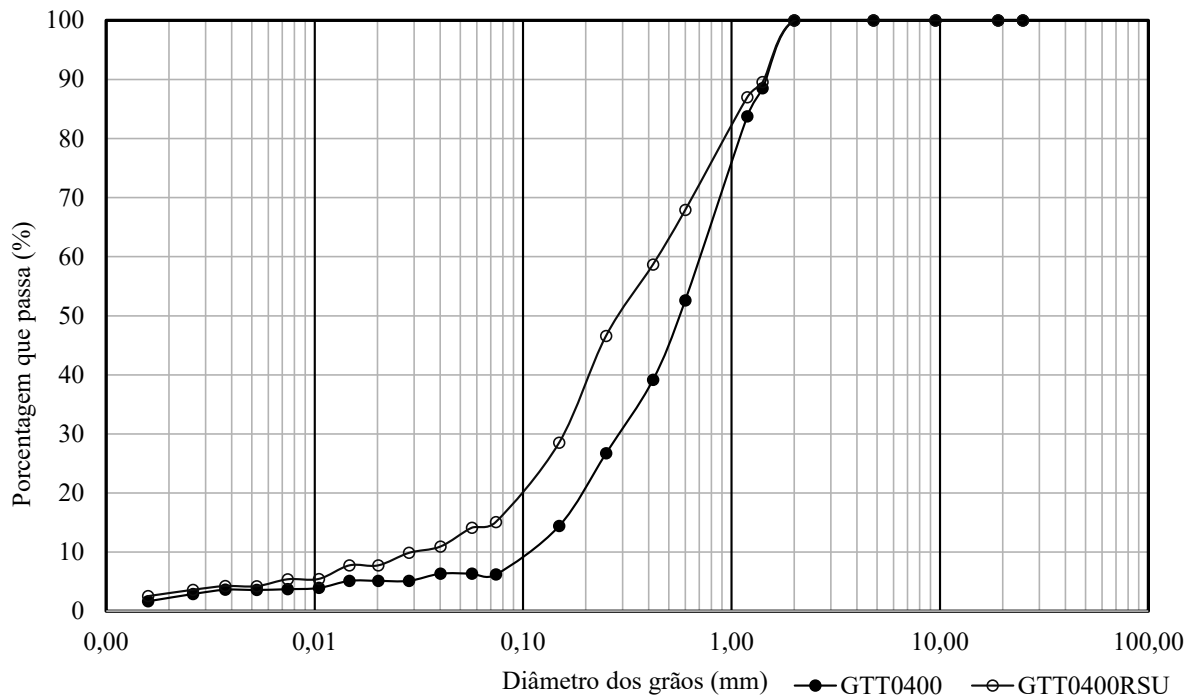
GTT3100RSU, que possui a maior abertura de filtração entre os geotêxteis analisados (3,10 mm), apresentou os menores valores de umidade (47,20%) e teor de sólidos totais (22,30%). Esses resultados indicam uma capacidade reduzida de retenção de partículas finas e menor que sua abertura, devido à sua estrutura mais aberta. Contudo, é importante destacar que essa coluna operou durante um período de estiagem dentro da programação dos blocos experimentais, o que pode ter contribuído para a menor carga de sólidos transportados pelo lixiviado.

No caso das colunas sem a incorporação de resíduos sólidos, a coluna GTNT0150 — projetada com o geotêxtil de menor abertura, apresentou o maior teor de umidade (55,56%) e o mais elevado conteúdo de sólidos totais (34,83%). Esses resultados indicam uma elevada eficiência na retenção de partículas finas e compostos orgânicos transportados pelo lixiviado. Contudo, essa elevada capacidade de retenção também sugere uma maior suscetibilidade à colmatação, o que compromete gradualmente a permeabilidade do sistema. A coluna GTT0400, com um geotêxtil de abertura intermediária, apresentou um teor de umidade de 51,60% e sólidos totais de 28,83%. Esses resultados indicam uma eficiência moderada na retenção de sólidos e compostos orgânicos presentes no lixiviado. No entanto, os níveis de acúmulo observados também sugerem a potencial atuação dos mecanismos de colmatação. Já a coluna GTT3100, que apresenta a maior abertura, demonstrou os menores valores de umidade (47,09%) e ST (23,36%), indicando assim uma capacidade reduzida de reter sólidos finos e menores que sua abertura. Cabe destacar que, esta coluna operou no período de chuvas o que pode ter contribuído exponencialmente para o rápido transporte e retenção de partículas iguais ou maiores que sua abertura o que favorece o mecanismo de colmatação física.

4.5.2 Análises granulométricas

A Figura 36 apresenta as curvas granulométricas correspondente à amostra proveniente das colunas GTT0400 e GTT0400RSU. A Figura 37 ilustra as curvas granulométricas obtida para a amostra oriunda das colunas GTT3100 e GTT3100RSU, enquanto a Figura 38 demonstra o resultado das curvas granulométricas relativa à amostra coletada nas colunas GTNT0150 e GTNT0150RSU.

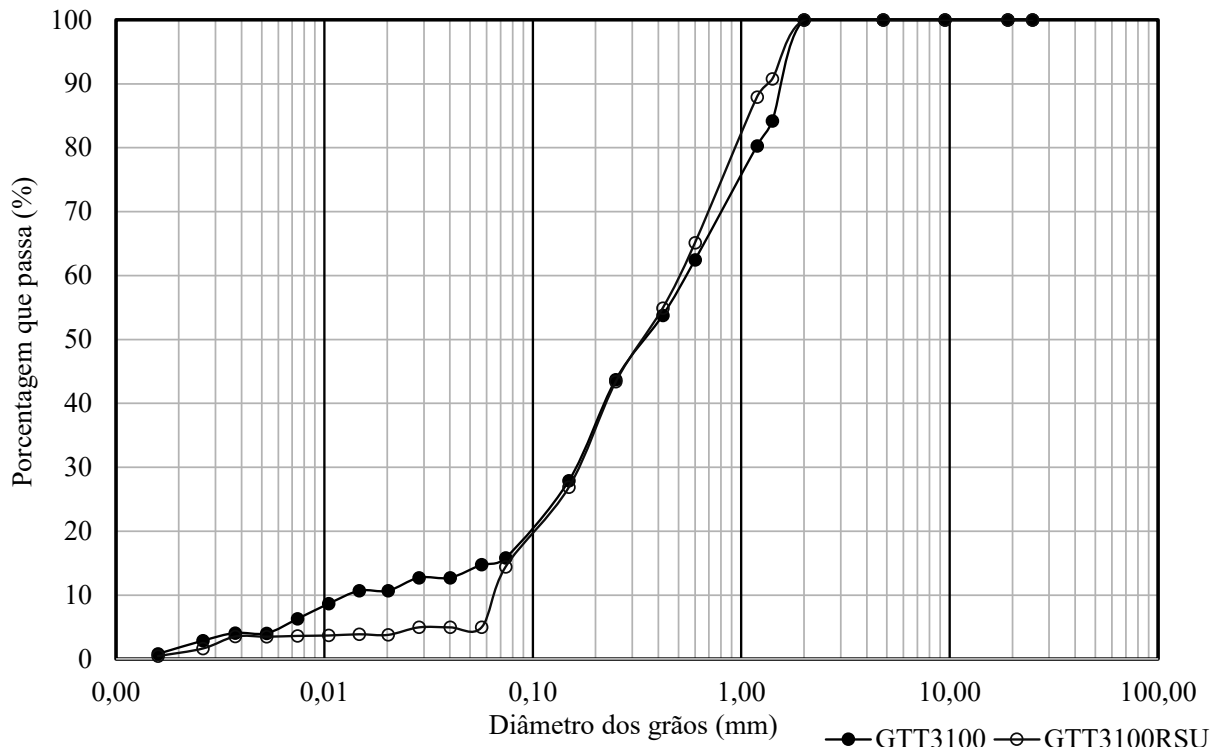
Figura 36 - Curva granulométrica do material retido das colunas GTT0400 e GTT0400RSU



Fonte: Autor (2025).

A curva granulométrica da coluna GTT0400, apresenta os valores obtidos graficamente com $D_{10} \approx 0,10$ mm, $D_{30} \approx 0,29$ mm, $D_{50} \approx 0,57$ mm e $D_{60} \approx 0,70$ mm. Com $D_{50} \approx 0,57$ mm, isso indica que 50% do material retido é composto por partículas com diâmetro inferior a 0,57 mm (finos). Já o material retido da coluna GTT0400RSU apresentou $D_{10} \approx 0,03$ mm, $D_{30} \approx 0,17$ mm, $D_{50} \approx 0,29$ mm e $D_{60} \approx 0,35$ mm. O diâmetro médio, D_{50} de 0,29 mm o material na faixa superior das areias médias, aproximando-se do limite inferior das areias grossas (que se iniciam em 0,6 mm, segundo a NBR 7181/2016). E como grande parte do material está acima do tamanho da abertura de filtração do geotêxtil, parte do material tende a obstruir mecanicamente as aberturas de filtração.

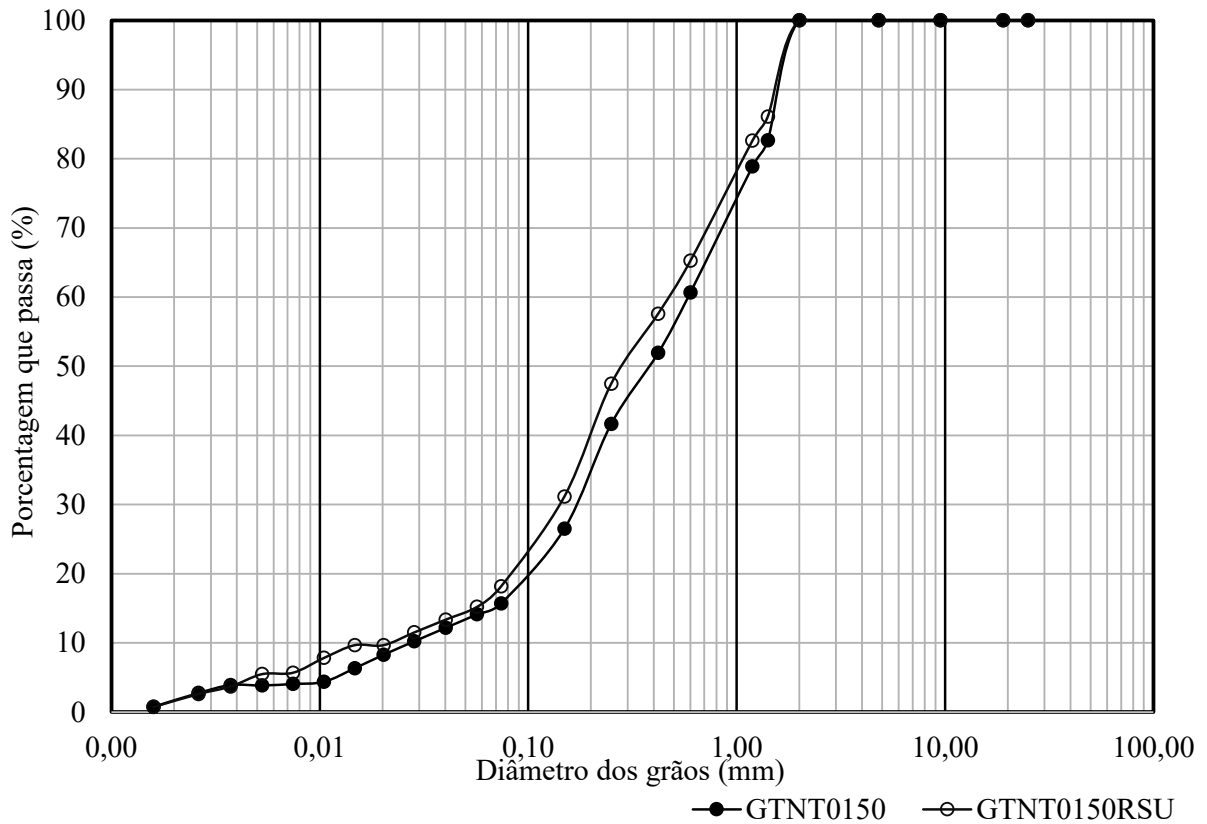
Figura 37 - Curvas granulométricas do material retido das colunas GTT3100 e GTT3100RSU



Fonte: Autor (2025).

O material retido na coluna GTT3100, apresentou $D_{10} \approx 0,011$ mm, $D_{30} \approx 0,17$ mm, $D_{50} \approx 0,31$ mm e $D_{60} \approx 0,45$ mm. O valor D_{50} de 0,31 mm implica que cinquenta por cento das partículas têm um diâmetro menor que essa medida, o que indica a inclusão de frações arenosas. Já o material retido da coluna GTT3100RSU, os valores extraídos da curva são: $D_{10} \approx 0,064$ mm, $D_{30} \approx 0,17$ mm, $D_{50} \approx 0,34$ mm e $D_{60} \approx 0,43$ mm. E com o diâmetro médio $D_{50} \approx 0,34$ mm, o que também indica frações arenosas.

Figura 38 - Curvas granulométricas do material retido das colunas GTNT0150 e GTNT0150RSU



Fonte: Autor (2025).

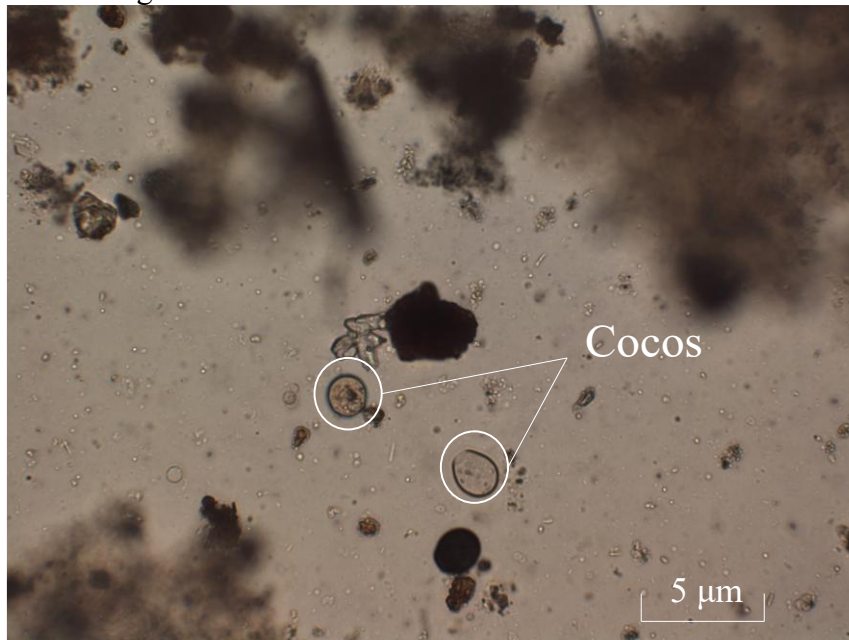
A curva granulométrica obtida do material retido da coluna GTNT0150, resultou nos seguintes parâmetros: $D_{10} \approx 0,020$ mm; $D_{30} \approx 0,15$ mm; $D_{50} \approx 0,29$ mm; $D_{60} \approx 0,49$ mm. O diâmetro médio ($D_{50} = 0,29$ mm) indica que 50% do solo contém partículas menores que essa medida, classificando-o também como arenoso. Por outro lado, a curva granulométrica obtida do material retido da coluna GTNT0150RSU apresentou em $D_{10} \approx 0,023$ mm; $D_{30} \approx 0,17$ mm; $D_{50} \approx 0,29$ mm; $D_{60} \approx 0,50$ mm. O valor D_{50} de 0,29 mm indica que 50% das partículas do solo são mais finas do que essa medida, o que também é indicativo de um tipo de solo arenoso.

Em todas as amostras, as frações correspondentes à areia (fina, média e grossa) totalizaram 93%, enquanto os 7% restantes enquadraram-se na faixa do silte. De acordo com o USDA (2022), esse perfil granulométrico indica um material predominantemente arenoso, tanto em comportamento quanto em sua faixa de distribuição.

4.5.3 Análise bacteriana e parasitológica do material retido

Parte dos materiais retidos pelos sistemas de filtração, inicialmente coletados separadamente e posteriormente reunidos em um único recipiente, foi analisada por meio de microscopia. Observou-se uma composição microbiana semelhante em todas as amostras, o que é uma característica comum em lixiviados provenientes de aterros sanitários (Silva, 2013; Palmeira *et al.* 2008; Carvalho, 2010; Naveen *et al.* 2017). Os microorganismos identificados abrangeram uma diversidade de formas, incluindo cocos (Figura 39), observados no recipiente referente ao bloco de ensaios 1 (colunas GTT0400, GTT0400RSU e GTT3100RSU), além de cocos, esporos de fungos (Figura 40) e protozoários (Figura 41), presentes no recipiente do bloco de ensaios 2 (colunas GTT3100, GTNT0150 e GTNT0150RSU).

Figura 39 - Estruturas bacterianas da família cocos

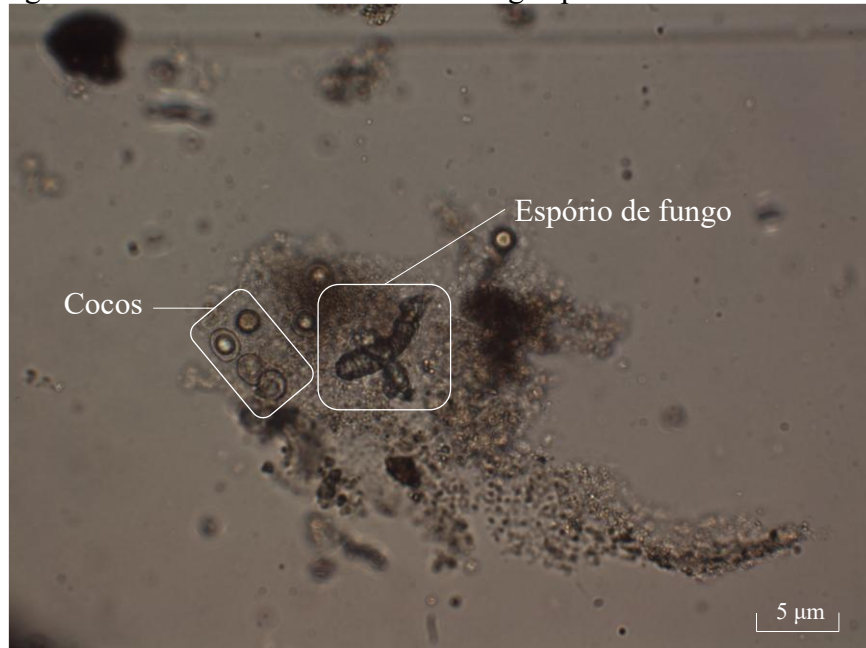


Fonte: Autor (2025).

Esses microrganismos assumem um papel fundamental na decomposição da matéria orgânica (o que favorece a produção de lixiviado), facilitando a degradação de compostos complexos em substâncias mais elementares (Koerner, 1993; Wang *et al.* 2023; Zou *et al.* 2024). A degradação biológica estimulada por esses organismos é fundamental para o ciclo dos nutrientes, pois transforma a matéria orgânica em subprodutos como dióxido de carbono, metano e compostos nitrogenados. As bactérias, por exemplo, são fundamentais na decomposição inicial da matéria orgânica, enquanto os fungos, por meio da síntese de enzimas

extracelulares, auxiliam na decomposição de materiais mais recalcitrantes, como celulose e lignina (Lee *et al.* 2013; Ko *et al.* 2019; Taha *et al.* 2024).

Figura 40 – Estruturas bacterianas e fungos presentes nos sedimentos



Fonte: Autor (2025)

Por outro lado, os protozoários desempenham um papel na manutenção do equilíbrio da comunidade microbiana, atacando bactérias e outros microrganismos, regulando assim suas populações e influenciando a eficácia do processo de decomposição. A existência dessa diversidade microbiana no lixiviado significa uma atividade biológica ativa que ocorre no aterro (Fatahi e Khabbaz, 2015; Wu *et al.* 2018; Wang *et al.* 2023).

Figura 41 – Protozoário encontrado na amostra de sedimentos



Fonte: Autor (2025)

Os microorganismos encontrados, sugerem ampla gama de agentes de decomposição (o que sugerem indícios para o favorecimento do processo de colmatação biológica (Remígio, 2006)) e matrizes energéticas de interação entre o lixiviado e os resíduos sólidos e a estrutura dos geotêxteis (Navenn *et al.* 2017), um aspecto natural em aterros em fases iniciais e intermediárias (Yaman, 2019; Fernandes *et al.* 2022).

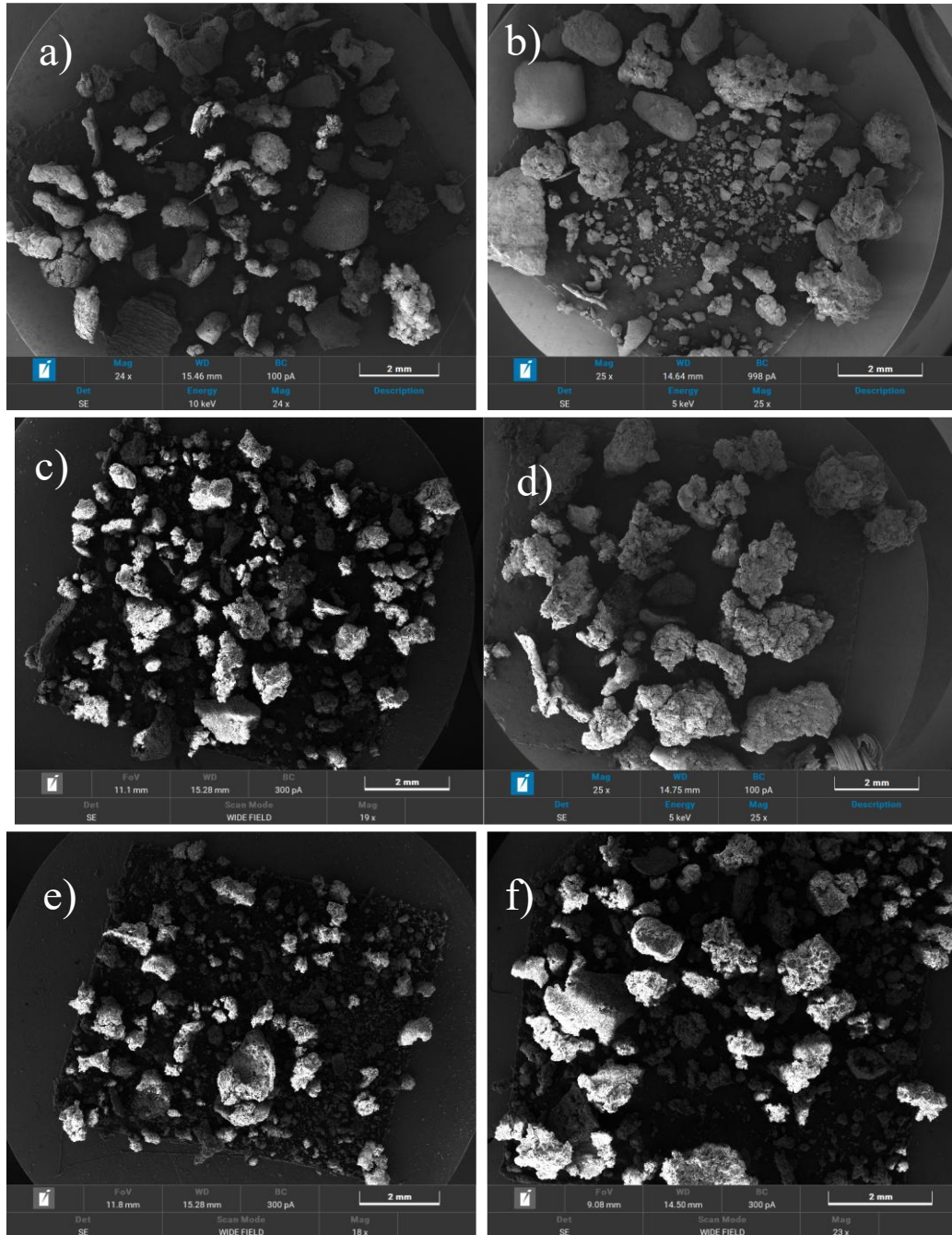
4.5.4 Análises MEV e análises químicas do material retido

Após a completa secagem do material retido, parte das amostras passaram pela análise de microscopia eletrônica de varredura e mapeamento químico das partículas.

4.5.4.1 Amostras conjuntas dos materiais retidos

A Figura 42 ilustra como é a configuração das partículas presentes na amostra do material retido das colunas de filtração. Essas distribuições retratam como são os conjuntos (partículas sólidas e homogêneas, aglomerações) que compõe as amostras. Em que: a) material retido da coluna GTT0400; b) material retido da coluna GTT0400RSU; c) material retido da coluna GTT3100; d) material retido da coluna GTT3100RSU; e) material retido da coluna GTNT0150; f) material retido da coluna GTNT0150RSU.

Figura 42 – Amostras do material retido das colunas



Fonte: Autor (2025).

Na imagem a), correspondente à coluna GTT0400 (sem RSU), observa-se um material relativamente uniforme, caracterizado por partículas que exibem morfologia irregular e aglomerações (partículas mais brancas). Por outro lado, a imagem b), que pertence ao GTT0400RSU, demonstra uma maior densidade de partículas, com aglomerações e maior heterogeneidade, sugerindo que há interação entre os sólidos suspensos no lixiviado e os

resíduos presentes na coluna, promovendo assim a um conjunto mais heterogêneo quanto a morfologia.

Na imagem c), a coluna GTT3100, que possui a maior abertura entre os tecidos, é possível observar a presença de partículas heterogêneas, aglomerados e partículas grandes e menores. A imagem d), correspondente ao GTT3100RSU, apresenta um aumento nas aglomerações. Essas aglomerações podem estar ligadas a presença do resíduo que atua como um agente fragmentador.

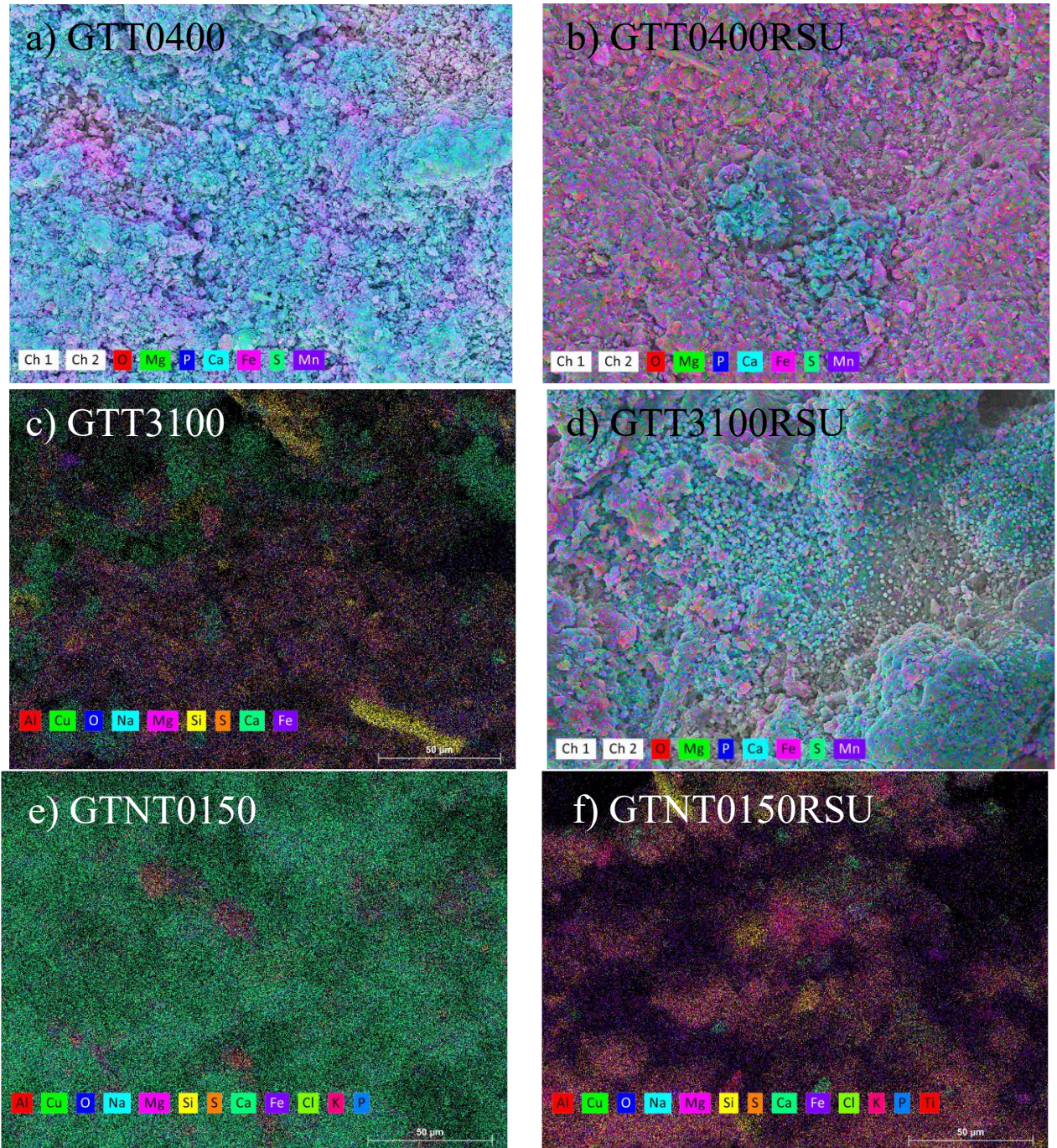
A imagem e), relacionada à coluna GTNT0150, mostra uma superfície mais povoada por partículas de tamanhos e morfologias variadas além de poucas aglomerações. Por fim, a imagem f), da coluna GTNT0150RSU, apresenta uma maior variabilidade de tamanhos de partículas o que também pode estar ligado a presença dos resíduos. Além disso, o material parece conter mais aglomerações, formando massas densas e heterogêneas.

Nas colunas sem resíduos sólidos urbanos, o material retido apresentou uma morfologia mais homogênea, caracterizada por partículas com contornos bem definidos, distribuição mais uniforme e aglomeração superficial reduzida. O que pode indicar que o contato direto com o lixiviado pode favorecer essa configuração. Por outro lado, nas colunas contendo RSU, há um aumento acentuado na variabilidade morfológica do material retido, que se manifesta como aglomerações mais compactas, uma arquitetura superficial e heterogênea e a presença de superfícies mais irregulares.

4.5.4.2 Mapeamento químico das amostras conjuntas dos materiais retidos

Como toda a amostra estava em contato direto ou com o lixiviado (colunas sem RSU) ou com os resíduos, foram definidos pelas micrografias anteriores, uma região plana de um grão para realizar o mapeamento químico. O mapeamento é apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Mapeamento químico do material retido nas colunas de filtração



Fonte: Autor (2025).

A análise comparativa da composição química da superfície de parte dos materiais retidos nas colunas GTT0400 (a) e GTT0400RSU (b). Ambos os materiais apresentaram uma presença de oxigênio, magnésio, fósforo, cálcio e ferro, elementos frequentemente associados a sais minerais, compostos orgânicos, sais de fosfato e precipitados metálicos derivados do lixiviado. Por outro lado, a amostra GTT0400RSU, que funcionou em conjunto com resíduos sólidos, demonstra maior heterogeneidade na distribuição e intensidade dos constituintes elementares, particularmente marcada por um aumento no enxofre e manganês, que pode ser

atribuída à degradação orgânica de materiais putrescíveis e reações redox características das condições anaeróbicas presentes em ambientes de aterros sanitários.

Na amostra do material da coluna GTT3100 (c), apresenta uma distribuição de elementos como alumínio, cobre, sódio, silício e oxigênio, indicando a ocorrência de minerais de silicato e sais derivados de lixiviados, caracterizados por uma baixa densidade de acumulação e morfologia superficial pouco coesa. Por outro lado, o material da coluna GTT3100RSU (d) apresenta concentrações de fósforo, cálcio, magnésio, enxofre, ferro e manganês. A presença simultânea desses elementos, acompanhada por um fluxo contínuo de lixiviado é complexo, pois apresentam simultaneamente constituintes de degradação orgânica e da precipitação de sais metálicos — fenômenos que são característicos da colmatação química e biológica em ambientes de aterros sanitários. Elementos químicos menos recorrentes podem estar associados ao período de operação das colunas, indicando que a infiltração de água proveniente das chuvas pode ter influenciado significativamente os processos físicos e químicos do sistema, promovendo alterações na composição do lixiviado e intensificando a atividade inorgânica no material retido.

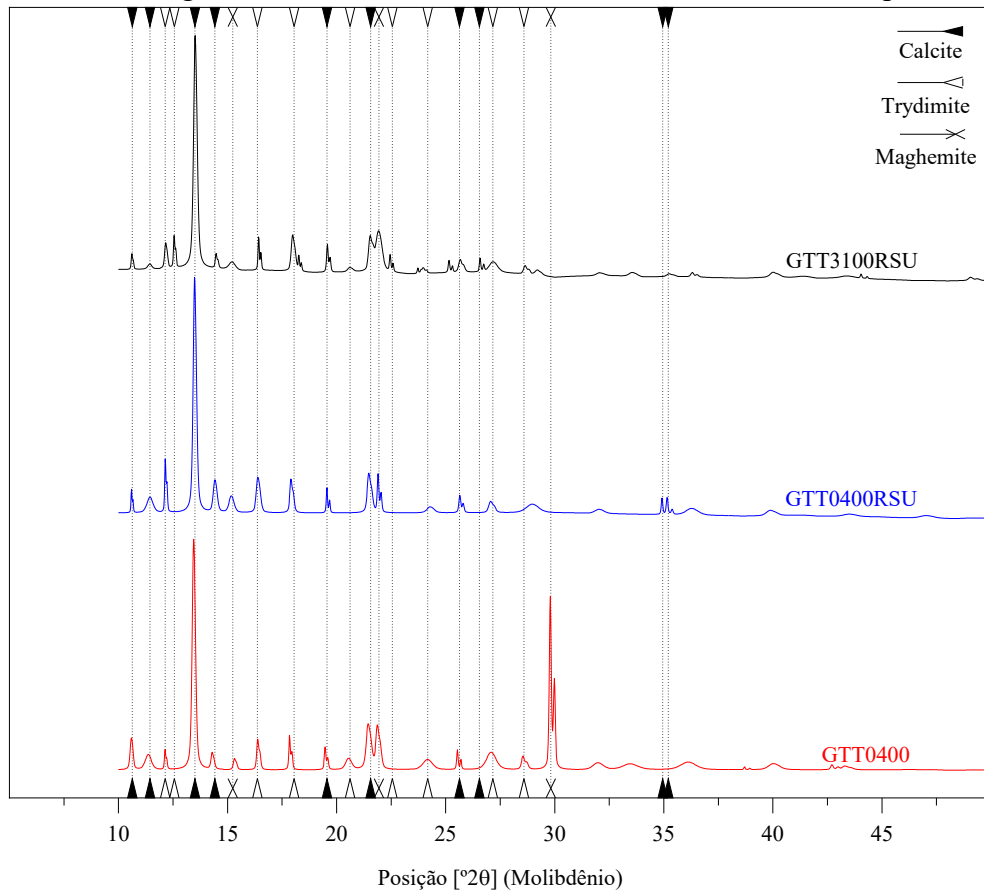
Na amostra GTNT0150 (e), que foi percolada diretamente com lixiviado, apresentou uma composição elementar com constituintes como oxigênio, magnésio, cálcio, ferro, cloro e fosforo. A uniformidade visual das imagens implica uma complexidade reduzida de interferência reduzida de atividade orgânica atribuível a diluição da água no meio pela alta das precipitações, sugerindo também alterações processos físico-químicos. Por outro lado, a amostra do material retido da coluna GTNT0150RSU (f), que foi submetida a tratamento com o mesmo lixiviado em conjunto com a presença de resíduos sólidos urbanos, também apresenta uma variabilidade elementar, acrescentando potássio, titânio e uma maior intensidade de silício e enxofre. A presença titânio, que está não foi captada na amostra sem resíduos, está potencialmente ligada à degradação de materiais plásticos, pigmentos ou aditivos encontrados nos resíduos. Os níveis de silício, enxofre e potássio podem surgir de atividade de compostos minerais, que surgem da interação entre o lixiviado e os constituintes sólidos.

Essas diferenças observadas sugerem que a inclusão de RSU facilitou processos de retenção de alguns constituintes, caracterizados pela adsorção de um espectro mais amplo de elementos, provavelmente resultante da liberação de compostos em meio à degradação de materiais orgânicos e inorgânicos, enriquecendo assim a variabilidade do material com uma variedade de constituintes minerais e metálicos.

4.5.4.3 Análises de difração de raios-x do material retido

O difratograma (Figura 44) ilustra uma atenuação significativa na intensidade e clareza dos picos cristalinos dentro da amostra GTT0400RSU (azul) em contraste com a amostra GTT0400 inicial (vermelha) e GTT3100RSU (preta). Nas amostras foram detectadas.

Figura 44 - Difratograma obtido do material retido do bloco de ensaios experimentais 1

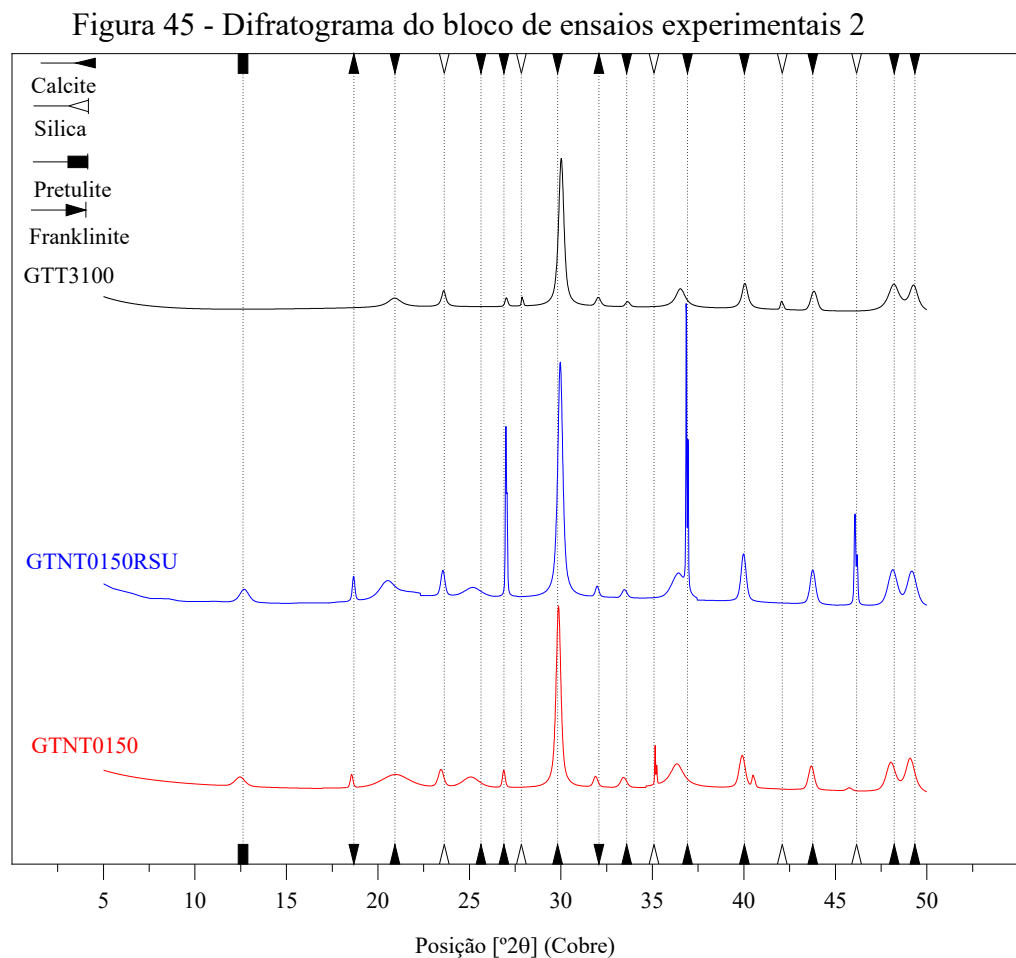


Fonte: Autor (2025).

O difratograma revela variações mineralógicas significativas entre as amostras retidas nas colunas que operaram no bloco 1. Em ambos os padrões, houve a detecção de tridimita, um polimorfo de sílica, que indica a existência de constituintes de silicato resilientes dentro do sistema. Também foram identificados calcita (CaCO_2) e maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}$). A formação de calcita é provavelmente atribuível a mecanismos de precipitação química envolvendo íons Ca^{2+} presentes no lixiviado, particularmente em ambientes de pH alcalino promovidos pela degradação orgânica dos resíduos sólidos urbanos. A presença de maghemita, uma fase de ferro

oxidado, implica considerável atividade redox, potencialmente ligada à presença de atividade matéria orgânica e à oxidação dos íons Fe^{2+} .

A Figura 45 apresenta o difratograma referente ao bloco de ensaios 2. Nele, foram igualmente identificadas fases de calcita e sílica, o que, apesar das amostras serem provenientes de períodos distintos, sugere uma composição mineralógica semelhante do material retido. Essa recorrência indica um padrão nos processos de interação entre o resíduo, o filtro e o lixiviado ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2025).

A análise do difratograma das amostras das colunas que operaram no bloco 2, demonstra uma composição mineralógica mais complexa, possivelmente motivada pelo alto índice pluviométrico. Ambas as amostras apresentam picos distintos correspondentes à sílica (SiO_2), que se alinha com a predominância prevista de minerais de silicato nos constituintes particulados. Por outro lado, as amostras também apresentam outros minerais, calcita (CaCO_2), pretulite (MnPO_2) e franklinita (ZnFe_2O_2). A presença de calcita implica mecanismos de

precipitação facilitados pela liberação de íons de cálcio em um meio alcalino, o que é ainda aumentado pela degradação de atividade orgânica associada aos resíduos. A pretulite, um fosfato de manganês, significa interações com compostos orgânicos enriquecidos com fósforo ligados ao aumento da atividade microbiana durante a percolação do lixiviado caracterizado por uma carga orgânica substancial. A franklinita, um espinélio de ferro e zinco, indica a presença de metais pesados e processos redox comumente associados a ambientes anaeróbios, como aqueles predominantes em aterros sanitários submetidos a processos biológicos ativos. Os efeitos combinados da umidade elevada (atribuível à estação chuvosa) e da carga contaminante introduzida pelos resíduos sólidos urbanos facilitaram a mobilização e posterior precipitação desses minerais secundários (amorfos). Essa diferenciação mineralógica ressalta a importância da composição do lixiviado e das condições hidrológicas na dinâmica geoquímica dos sistemas de coleta de lixiviado.

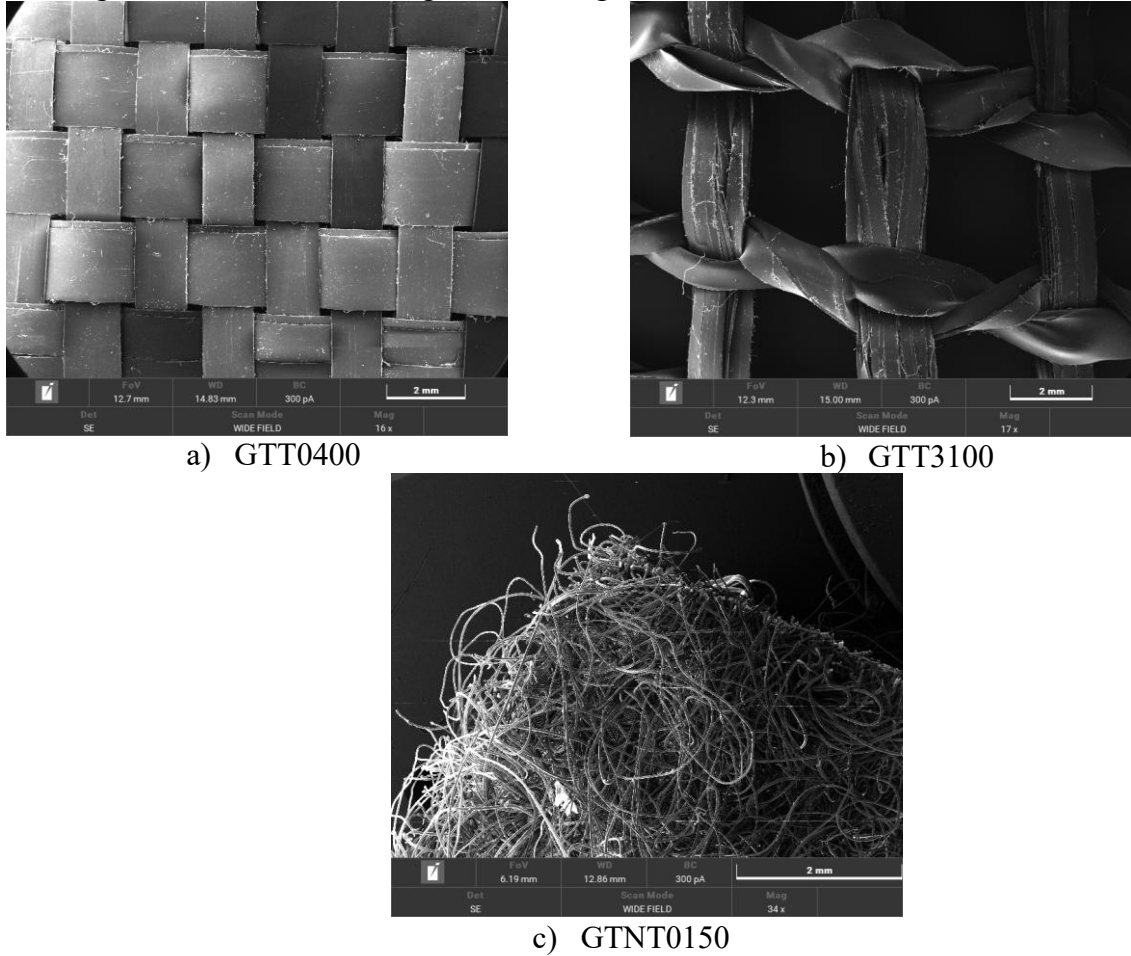
4.6 Avaliação dos geotêxteis exumados pós-ensaios

A microscopia analisada em duas etapas, relacionada a parte física dos materiais e a composição química elementar, com o intuito de identificar quais elementos químicos estava presente nas amostras dos ensaios.

4.6.1 Microscopia eletrônica de varredura

Para ilustrar os filamentos dos geotêxteis virgens, a Figura 46 nos mostra a disposição da configuração dos filamentos. A imagem evidencia a estrutura tridimensional do material, composta por filamentos entrelaçados (geotêxteis tecidos) ou dispostos aleatoriamente (geotêxtil não tecido).

Figura 46 - Filamentos dos geotêxteis virgens utilizadas como filtros



a) GTT0400

b) GTT3100

c) GTNT0150

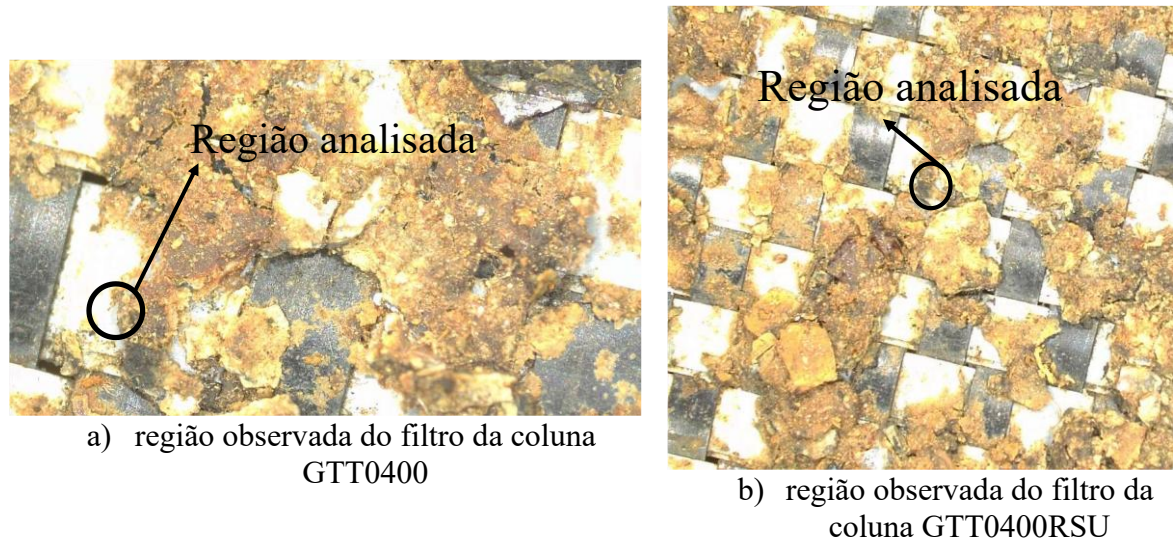
Fonte: Autor (2025).

A microscopia estabelece uma compreensão dos mecanismos de interação entre os resíduos e os filtros geotêxteis, especialmente no que diz respeito à formação inicial de biofilmes. Por meio de análises de microscopia eletrônica de varredura em condições ambientais e elementar, foi possível observar não apenas a presença de microrganismos aderidos às superfícies e a formação de biofilme, mas a identificação de elementos químicos e sua respectiva quantidade.

4.6.1.1 Análise dos filtros das colunas GTT0400 e GTT0400RSU

A Figura 47 apresenta a área delimitada para a realização das observações, com o objetivo de identificar a possível presença de unidades formadoras de colônias, bem como sinais de impregnação por resíduos ou deposição de precipitados provocados pelo lixiviado. Nota-se que as amostras apresentaram similaridades na superfície, sugerindo que possam-se identificar as mesmas estruturas, sedimentos dos resíduos ou precipitados do lixiviado.

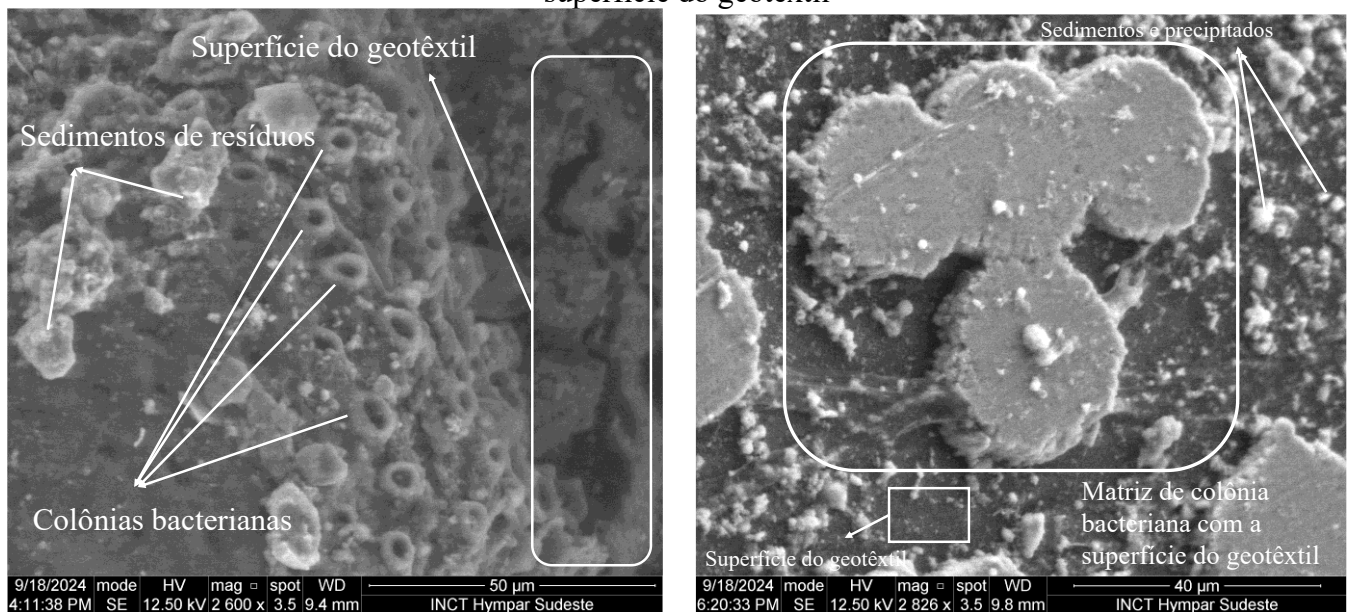
Figura 47 – Regiões de análises de biofilmes e sedimentos das colunas GTT0400 e GTT0400RSU



Fonte: Autor (2025).

A Figura 48 apresenta as regiões analisadas por microscopia eletrônica de varredura em condições ambientais (MEV-ESEM), nas quais é possível observar tanto a impregnação quanto a formação de colônias bacterianas. Embora o autoajuste do equipamento tenha resultado em pequenas variações de escala entre as imagens, ainda assim foi possível identificar claramente as estruturas observadas.

Figura 48 – Visualização das estruturas biológicas, precipitado de sedimento e a superfície do geotêxtil

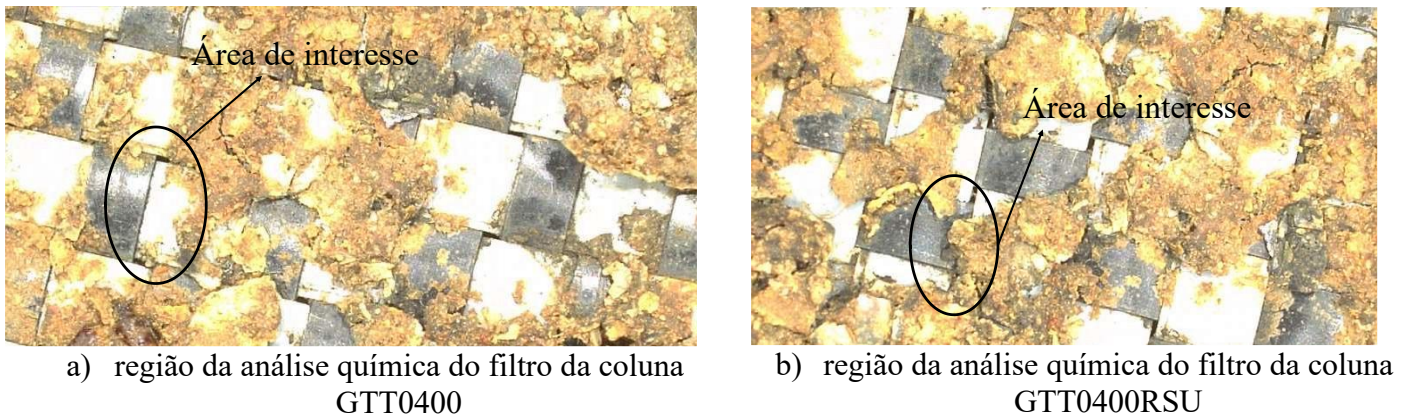


Fonte: Autor (2025).

Em ambos os casos, foram identificadas estruturas morfológicas semelhantes a colônias bacterianas, indicando uma elevada atividade biológica. Como o lixiviado se encontrava em fluxo contínuo, há constante renovação de minerais e de outros fatores que favorecem a atividade microbiana. Muitos desses elementos são constituintes do próprio lixiviado, o que, aliado às condições ambientais, cria um cenário altamente propício à proliferação microbiana, à formação de biofilmes e à deposição de sedimentos oriundos dos resíduos.

A Figura 49 apresenta a seleção das áreas específicas para o mapeamento químico nos filtros das colunas GTT0400 e GTT0400RSU, com o objetivo de identificar a distribuição de elementos e possíveis alterações químicas decorrentes da exposição ao lixiviado.

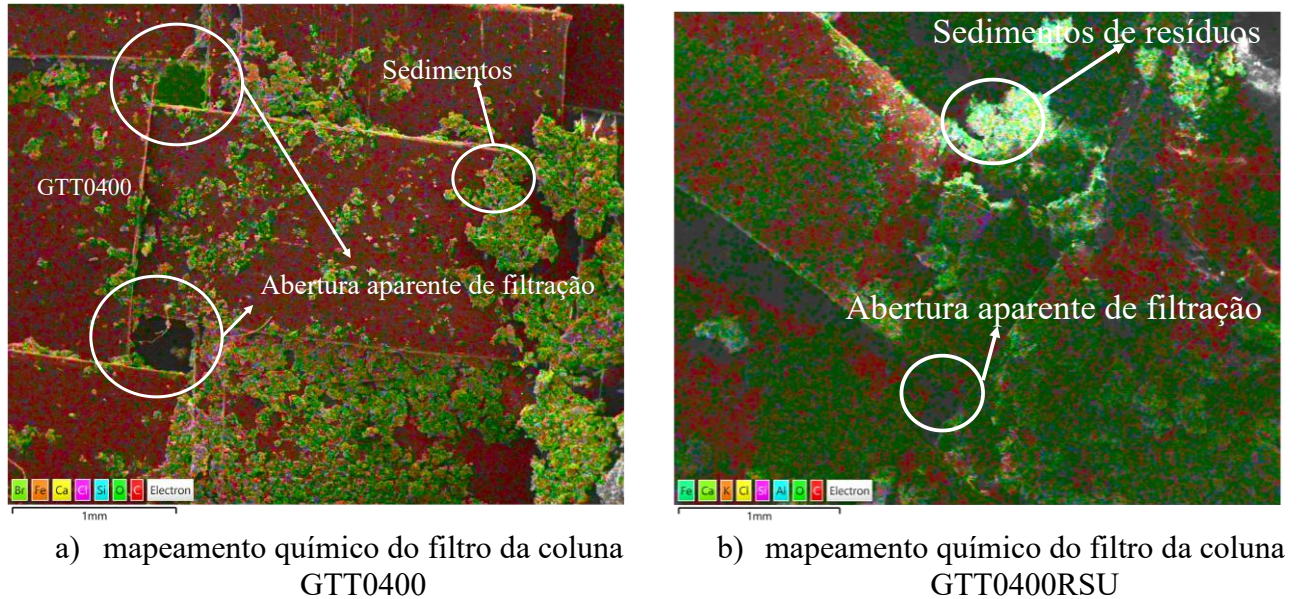
Figura 49 – Seleção da área para mapeamento químico dos filtros das colunas GTT0400 e GTT0400RSU



Fonte: Autor (2025).

A Figura 50 apresenta o mapeamento das regiões, com o intuito de observar a distribuição elementar química e identificação dos sedimentos e poros.

Figura 50 – Mapeamento químico das regiões



Fonte: Autor (2025).

No geotêxtil GTT0400, que foi submetido exclusivamente à percolação do lixiviado, foram verificados os elementos bromo, ferro, cálcio, cloro, silício, oxigênio e carbono, que estão ligados à interação entre o fluido e a arquitetura geotêxtil, bem como com os constituintes dissolvidos. A presença de sedimentos é identificada em áreas localizadas, juntamente com as aberturas de filtração que não foram obstruídas, indicando que uma parte de sua capacidade de filtração permanece. Por outro lado, o geotêxtil GTT0400RSU, que passou por condições de percolação idênticas, mas com RSU aplicado em sua superfície, exibiu considerável acúmulo de sedimentos, acompanhado pela identificação adicional de potássio e alumínio. Esses elementos significam que a contribuição dos resíduos para a liberação de compostos resultantes da decomposição e lixiviação de substâncias particuladas. A obstrução das aberturas de filtração nesta amostra ressalta um processo de colmatação física significativa. Consequentemente, a presença de resíduos sólidos no geotêxtil sugere a deposição de partículas e indica que sua composição superficial, afetou significativamente sua capacidade de filtração contínua em meio à percolação do lixiviado.

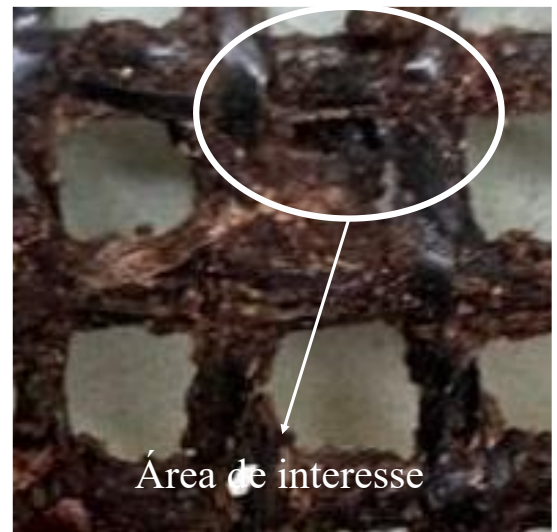
4.6.1.2 Análise dos filtros das colunas GTT3100 e GTT3100RSU

A Figura 51 apresenta a área delimitada pelo geotêxtil de maior abertura de filtração, que, pela primeira vez, foi aplicado nessas configurações: (resíduos sólidos – geotêxtil – material granular) e (geotêxtil – material granular), sendo percolado com lixiviado de aterro sanitário.

Figura 51 – Regiões de análises de biofilmes e sedimentos das colunas GTT3100 e GTT3100RSU



a) região observada do filtro da coluna GTT3100

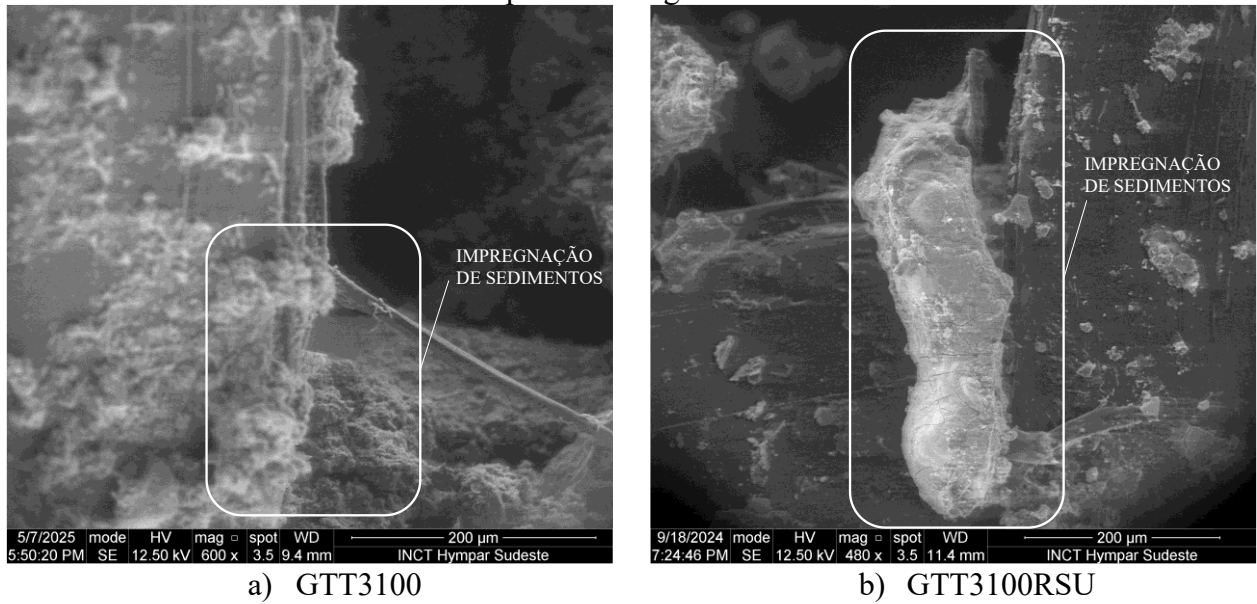


b) região observada do filtro da coluna GTT3100RSU

Fonte: Autor (2025).

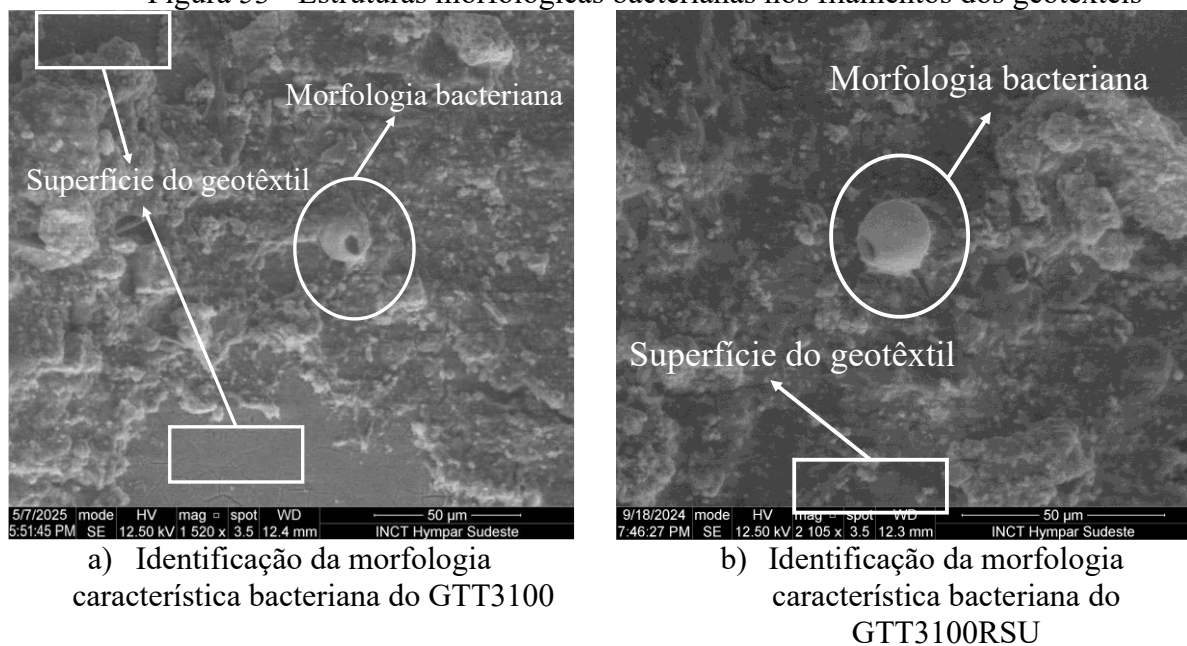
A Figura 52 apresenta a micrografia obtida nas áreas selecionadas, na qual é possível observar, majoritariamente, sedimentos impregnados nas quinas das aberturas dos poros, embora na superfície do filamento do geotêxteis apresentaram morfologias bacterianas (Figura 53). Esse aspecto sugere que o geotêxtil de maior abertura está mais suscetível a mecanismos de colmatação física na abertura e suscetível aos três mecanismos no filamento. No entanto, o tempo é um fator determinante para o desenvolvimento de biofilmes, indicando que, até o ponto analisado, quanto maior a abertura do poro, mais difícil é a proliferação de matrizes bacterianas no contorno da abertura, e maior é a contribuição dos mecanismos de colmatação física e química, especialmente por precipitados.

Figura 52 - Visualização das estruturas biológicas, precipitado de sedimento e a superfície dos geotêxteis



Fonte: Autor (2025).

Figura 53 - Estruturas morfológicas bacterianas nos filamentos dos geotêxteis



Fonte: Autor (2025).

A Figura 54 apresenta a nova seleção da área destinada ao mapeamento químico (Figura 55) das amostras, com o objetivo de identificar a distribuição elementar nos pontos de interesse. Essa etapa é fundamental para correlacionar a presença de determinados elementos com os mecanismos de colmatção observados anteriormente.

Figura 54 - Seleção da área para o mapeamento químico

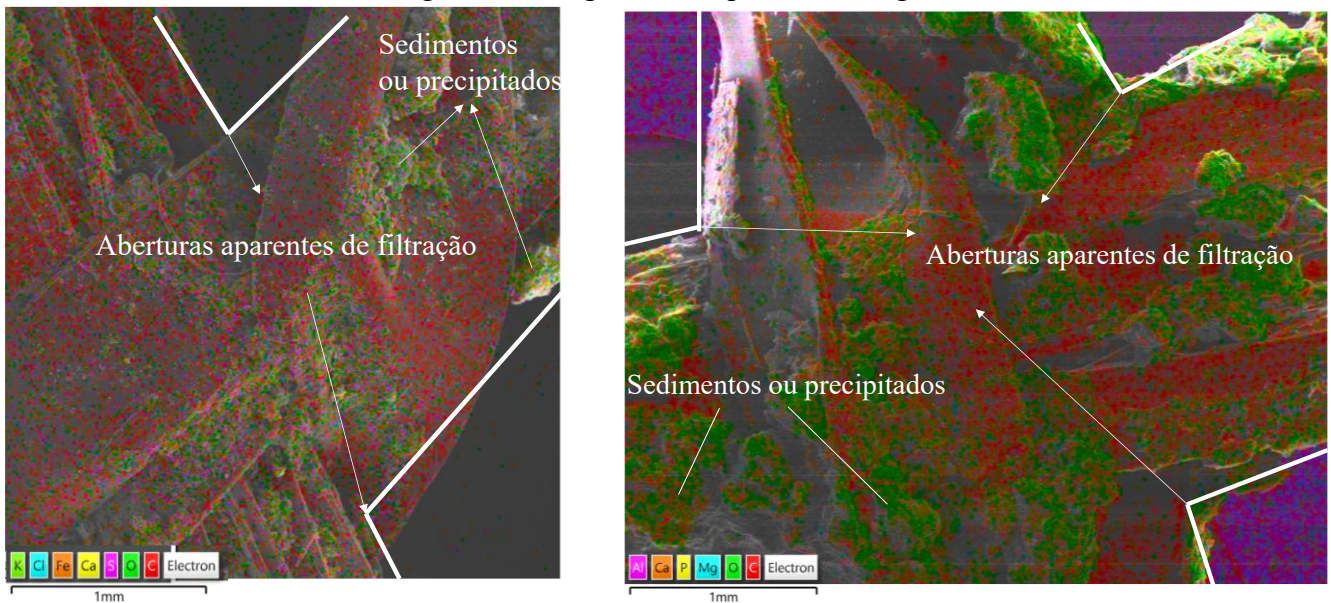


a) Seleção da área para o mapeamento químico do filtro da coluna GTT3100

b) Seleção da área para o mapeamento químico do filtro da coluna GTT3100RSU

Fonte: Autor (2025).

Figura 55 - Mapeamento químico da região



a) mapeamento químico na região do filtro da coluna GTT3100

b) mapeamento químico na região do filtro da coluna GTT3100RSU

Fonte: Autor (2025).

A Figura 55a, ilustra que o geotêxtil caracterizado por uma abertura maior em relação aos demais, aparentemente facilitou uma maior percolação do lixiviado, permitindo assim a migração de vários constituintes solúveis, incluindo potássio, cloro, ferro, cálcio, enxofre, oxigênio e carbono. O arranjo espacial da malha, sugere tanto a absorção quanto a potencial adsorção direta do lixiviado nas fibras do geotêxtil, indicando que as aberturas maiores

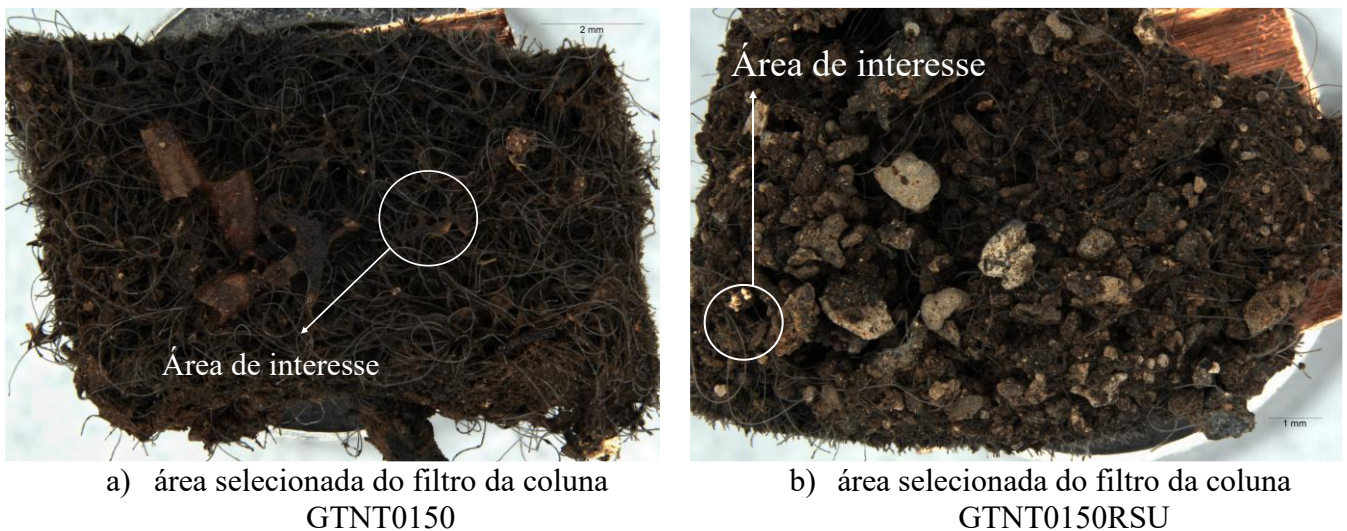
promoveram o fluxo, bem como a deposição direta de sais e partículas dissolvidas, sem considerável impedimento ou retenção superficial dos resíduos sólidos.

A Figura 55b, apesar do geotêxtil analisado ser composto pelo mesmo material, a presença de resíduos sólidos é perceptível na superfície, o que modifica significativamente o perfil químico detectado. Além dos constituintes previamente identificados anteriormente (como oxigênio, carbono e cálcio), há uma presença notável de alumínio, fósforo e magnésio. Esses elementos são normalmente associados a materiais particulados ou resíduos orgânicos/inorgânicos, sugerindo que, nesse caso, o geotêxtil também funcionou como uma barreira física, prendendo partículas maiores ou agregados coloidais presentes no lixiviado. O acúmulo desses resíduos na superfície do material provavelmente alterou a dinâmica das interações químicas, promovendo a adsorção de compostos insolúveis ou fracamente solúveis, ao mesmo tempo em que facilitou a formação de microambientes com composições químicas distintas.

4.6.1.3 Análise dos filtros das colunas GTNT0150 e GTNT0150RSU

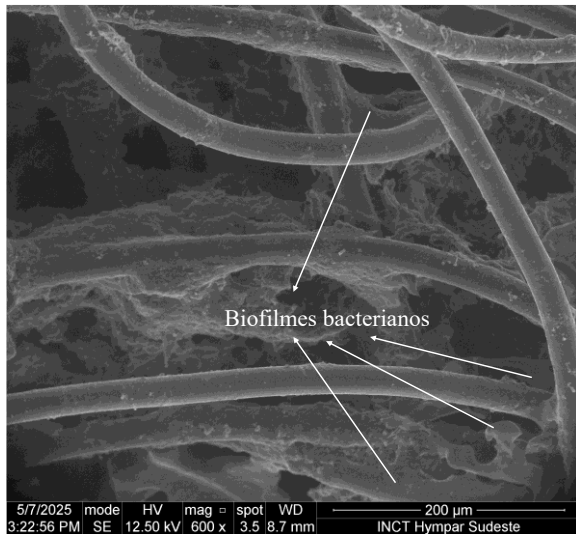
A Figura 56 apresenta as áreas selecionadas para a possível identificação de biofilmes ou precipitados de sedimentos ou do lixiviado para a aquisição da micrografia. Enquanto a Figura 57 apresenta visualizações dos precipitados e morfologias bacterianas.

Figura 56 - Regiões de análises de biofilmes e sedimentos das colunas GTNT0150 e GTNT0150RSU

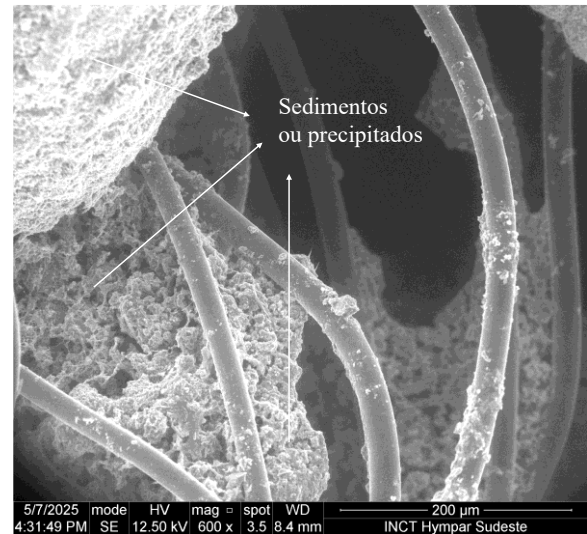


Fonte: Autor (2025).

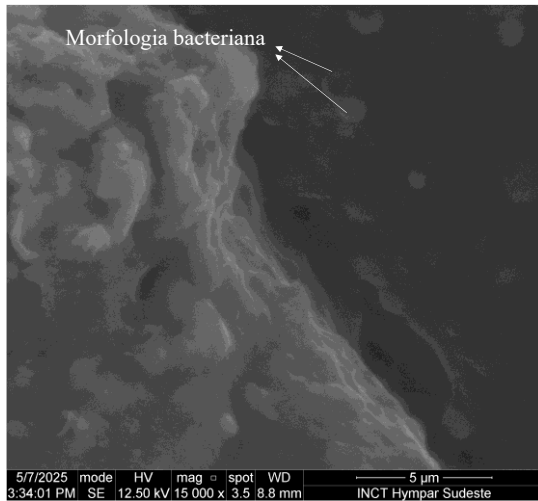
Figura 57 - Visualização das estruturas biológicas, precipitado de sedimento e a superfície dos geotêxteis



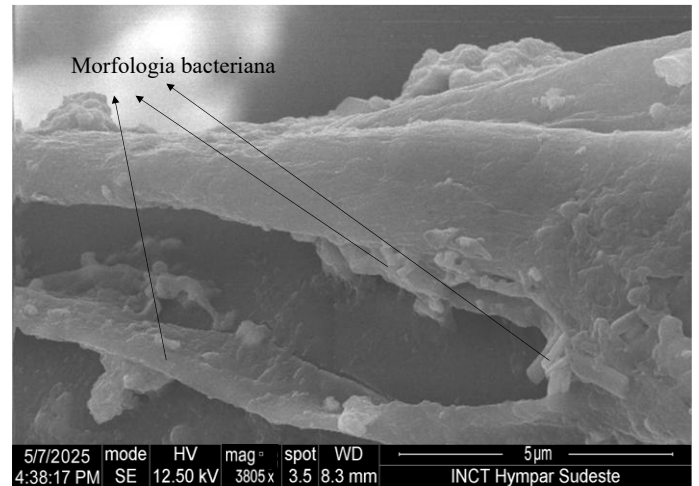
a) visualização dos biofilmes no GTNT0150



b) visualização de sedimentos ou precipitados no GTNT0150RSU



c) Morfologia bacteriana na superfície do filamento do GTNT0150



d) Morfologia bacteriana na superfície do filamento do GTNT0150RSU

Fonte: Autor (2025).

A micrografia 57a, ilustra o desenvolvimento de biofilmes bacterianos nas fibras geotêxteis da coluna GTNT0150. Essa observação significa que o ambiente úmido abundante em matéria orgânica, facilitado pelo lixiviado, promoveu a fixação e o crescimento microbiano, culminando no estabelecimento de uma matriz polimérica extracelular característica dos biofilmes. A falta de resíduos sólidos na superfície parece ter aumentado a interação direta entre os microrganismos presentes no lixiviado e as fibras do geotêxtil, incentivando a colonização microbiana e o surgimento de formações biológicas estruturadas.

Na micrografia 57b, a presença de sedimentos ou precipitados fixados nas fibras geotêxteis da coluna GTNT0150RSU é predominantemente evidente. Essa distinção está ligada

à presença de resíduos sólidos urbanos na superfície do material. Esses resíduos servem tanto como impedimento físico quanto como fontes suplementares de material particulado, resultando em uma dinâmica diferenciada de interação com o lixiviado. A percolação contínua através do lixiviado melhora os processos químicos de precipitação e sedimentação, potencialmente instigados por fatores como pH, pela presença de metais e fosfatos e pela elevação da carga sedimentada dentro do sistema. Esse fenômeno culmina no desenvolvimento de depósitos minerais ou complexos orgânico-inorgânicos, que envolvem as fibras de forma mais substancial e heterogênea.

Do ponto de vista científico, essa análise comparativa avalia a influência direta exercida pelo ambiente da superfície nos mecanismos de interações físico-químicas e biológicas em geotêxteis não tecidos. A presença de resíduos sólidos modifica significativamente a natureza do material retido; enquanto a ausência de RSU promove mecanismos biológicos, exemplificados pela formação de biofilmes, a presença de RSU favorece mecanismos abióticos (sem necessidade de organismos), incluindo precipitação e deposição de partículas.

A Figura 58, apresenta a seleção da área para o mapeamento químico das amostras dos filtros geotêxteis não tecidos das colunas. A Figura 59 apresenta o mapeamento químico.

Figura 58 - Seleção da área para o mapeamento químico

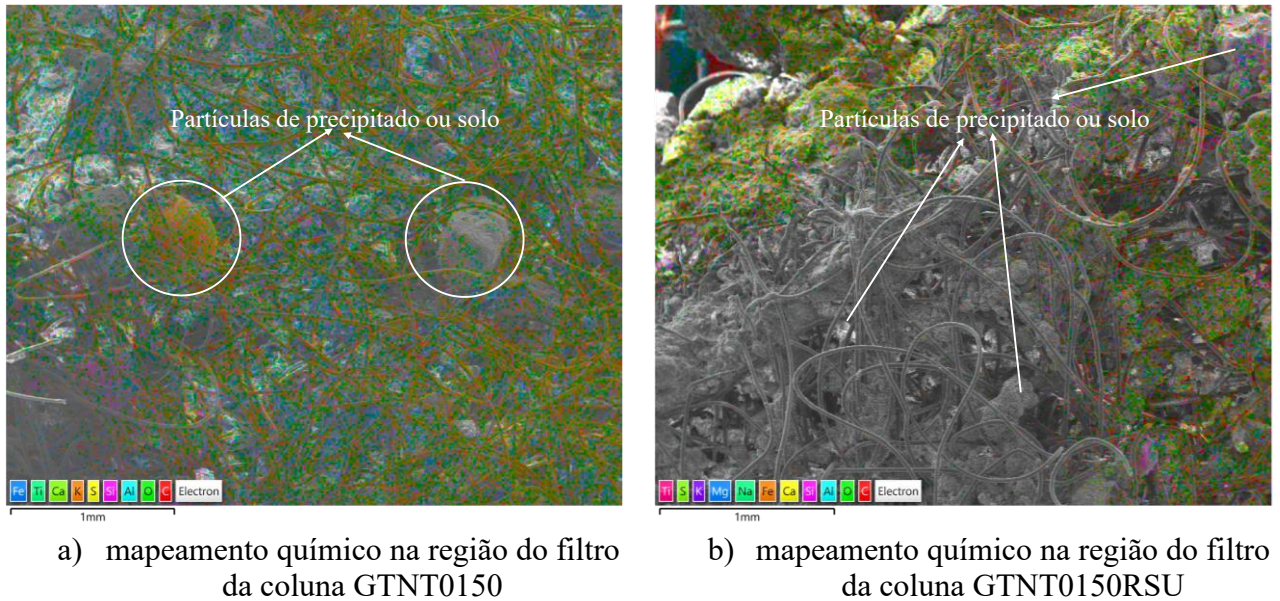


a) área selecionada para o mapeamento químico do filtro da coluna GTNT0150

b) área selecionada para o mapeamento químico do filtro da coluna GTNT0150RSU

Fonte: Autor (2025).

Figura 59 - Mapeamento químico da região



Fonte: Autor (2025).

No mapeamento (Figura 59a) ilustra a existência de elementos como ferro, titânio, cálcio, potássio, enxofre, silício, alumínio, oxigênio e carbono, sugerindo que, na ausência de resíduo sólido, o geotêxtil funcionou como agente de suporte amplo para a precipitação de compostos inorgânicos, incluindo óxidos, sulfatos e silicatos, que podem surgir da interação entre o lixiviado e o geotêxtil, bem como de reações abióticas que ocorrem dentro do lixiviado. A detecção de ferro e enxofre implica na ocorrência de potenciais reações de redução da oxidação ou precipitação de sulfeto, enquanto a presença de cálcio e potássio pode se correlacionar com os sais dissolvidos presentes no lixiviado.

No mapeamento (Figura 59b), em que resíduos sólidos estavam na superfície do geotêxtil, ao lado dos elementos anteriormente identificados, foi registrada a presença de magnésio e sódio. A identificação desses elementos adicionais significa que os resíduos sólidos funcionaram como fontes secundárias de contaminação ou interação química, liberando íons extras no sistema. Essa observação indica uma escalada na complexidade da composição química local atribuível à presença de matéria sólida, que pode abranger fragmentos de solo, materiais orgânicos e outros resíduos contendo constituintes minerais ou compostos solúveis.

Em uma análise comparativa, os sistemas revelam que o geotêxtil não tecido se envolve significativamente com o lixiviado, facilitando a retenção de contaminantes tanto por meio da formação de precipitados quanto por meio de mecanismos de adsorção. No entanto, a presença de resíduos sólidos amplifica esse efeito, resultando em uma composição elementar mais complexa e em um maior acúmulo de materiais sobre o geotêxtil. Esse fenômeno pode impactar

diretamente a eficácia da filtração, a retenção de poluentes e acelerar os mecanismos de colmatação do material, que são fatores críticos nos sistemas de drenagem.

5. CONCLUSÕES

Notoriamente, em todos os casos analisados, foi identificado os principais agentes responsáveis pela perda de permeabilidade ao longo do tempo. Considerando tratar-se de um ambiente altamente biológico e com grande complexidade composicional, os mecanismos de colmatação física, biológica e química foram evidenciados de forma expressiva por meio de análises visuais, microbiológicas, celulares e mineralógicas.

Quanto aos conjuntos das colunas GTT0400, GTT3100 e GTNT0150. Foi possível identificar mais facilmente os sedimentos e/ou precipitados e biofilmes. Embora as matrizes formadoras de colônias bacterianas foram mais visualizadas no GTNT0150. Isso se deve a estrutura não ordenada dos geotêxteis não tecido, que favorece a migração de bactérias de um ponto a outro formando os biofilmes. Se tratando do geotêxtil GTT3100, as condições de análises demonstraram que a operação com a presença de resíduos favoreceu a mitigação de sedimentos/precipitados e retardou os indícios de formação do biofilme.

Nos conjuntos de colunas GTT0400RSU, GTT3100RSU e GTNT0150RSU, a identificação dos agentes responsáveis pela colmatação mostrou-se mais complexa. Isso se deve ao fato de os resíduos sólidos atuarem como um pré-filtro, interferindo diretamente no comportamento do sistema. Em alguns casos, como no GTNT0150RSU, essa camada de resíduos potencializou a deposição de sedimentos, enquanto o próprio geotêxtil, por ser do tipo não tecido, contribuiu significativamente para a retenção de partículas, acelerando a obstrução interna.

Por outro lado, o geotêxtil GTT3100RSU demonstrou, inicialmente, um certo equilíbrio funcional, com desempenho estável nas primeiras etapas do ensaio. No entanto, com o avanço do tempo e a atuação conjunta dos múltiplos fatores que compõem os mecanismos de colmatação (física, química e biológica), também apresentou sinais de comprometimento, entretanto a permeabilidade se manteve acima dos padrões propostos. Ainda assim, com base nas análises microscópicas, observou-se uma possível atenuação dos processos de colmatação biológica e química, possivelmente relacionada não apenas à sua abertura de filtração, mas também às condições específicas de interrupção do ensaio, como a retirada dos sistemas em campo.

Quando comparados em pares — i) GTT0400 e GTT0400RSU, ii) GTT3100 e GTT3100RSU, iii) GTNT0150 e GTNT0150RSU — os mecanismos de colmatação apresentaram similaridades, tanto nas características do material retido quanto na composição química observada após os ensaios de campo. Apesar de os experimentos terem sido conduzidos em momentos distintos, os sistemas se comportaram de forma semelhante dentro de cada par. No caso específico do conjunto GTT3100 e GTT3100RSU, que abrangeu os dois períodos de ensaio, esperava-se uma diferença mais evidente nas análises microscópicas. No entanto, as variações observadas estiveram mais associadas às configurações do sistema e à presença de resíduos sólidos, do que propriamente ao tempo de exposição, indicando que o fator mais influente foi a condição física do meio filtrante e não necessariamente a duração e a exposição do experimento a diferentes épocas.

Ao se analisarem especificamente os aspectos relacionados aos mecanismos de colmatação física e biológica, observa-se que, devido à elevada carga orgânica presente no sistema, esses processos foram significativamente intensificados, sobretudo nos geotêxteis convencionais (GTT0400 e GTNT0150). Os resultados sugerem que tanto a estrutura física quanto a morfologia das fibras desses materiais podem favorecer a adesão e desenvolvimento de determinados agentes, como os biofilmes, impulsionados pela abundante presença de bactérias tanto no lixiviado quanto nos sedimentos, além dos próprios sólidos oriundos dos resíduos.

No caso do geotêxtil GTT3100, embora os mecanismos de colmatação física e biológica também tenham sido observados, eles apresentaram um comportamento distinto. Devido à sua maior abertura de filtração, os efeitos desses mecanismos ocorreram de forma mais gradual, sugerindo um comportamento retardatário frente à obstrução. Isso indica que a velocidade de atuação dos processos de colmatação pode variar significativamente em função das características construtivas do material geotêxtil, especialmente no que se refere à sua porosidade e permeabilidade.

6. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA E SUGESTÕES FUTURAS

O presente trabalho desenvolveu um sistema de ensaios de filtração adaptado para aplicação em campo através de colunas de filtração, com o objetivo de reproduzir, de forma representativa, parte da rede de drenagem da base de um aterro sanitário. A proposta incluiu configurações com e sem a presença de resíduos sólidos sobre o meio filtrante. Considerando a conhecida lacuna entre as etapas de projeto (teoria) e operação (prática) desses sistemas, os

testes piloto possibilitaram não apenas o aprimoramento contínuo do sistema experimental, como também o acompanhamento semanal do desempenho e da evolução dos dados de permeabilidade dos materiais avaliados.

Geotêxteis são amplamente empregados em sistemas de drenagem e filtração em diferentes tipos de estruturas. Em especial nos aterros sanitários, sua aplicação se destaca pela versatilidade, desempenhando funções essenciais como proteção, reforço, separação, filtração, controle de erosão e estabilização. Apesar da variedade de tipos e propriedades disponíveis, ainda existem divergências quanto ao uso de geotêxteis em obras voltadas especificamente para as funções de filtração e separação. Essas controvérsias tornam-se mais evidentes quando se propõe a utilização de materiais com aberturas de filtração que fogem dos padrões tradicionalmente adotados em sistemas de percolação de lixiviado, levantando questionamentos sobre sua eficácia e desempenho nessas condições específicas.

Neste trabalho, foi avaliado três geotêxteis fabricados de polipropileno, dois deles já aplicados (Filtro GTT0400 em que seu tamanho de abertura de filtração consiste em 0,40 mm e Filtro GTNT0150 com tamanho de abertura de filtração consiste em 0,15 mm) em diferentes estruturas e com funções definidas, foram observadas comportamento de filtração ao longo do tempo e com fortes indícios para a não aplicação como elemento filtro-separador. Já o novo geotêxtil (GTT3100 com abertura de filtração na maior direção de 3,10 mm) a ser aplicado nesta concepção apresentou uma tendência diferente dos demais. Seu comportamento de filtração, embora similar pela evolução das curvas de permeabilidade, a média manteve-se perto dos padrões de alguns materiais com permeabilidade estabelecida em norma (em torno de 10^{-4} m/s no caso com e sem RSU).

Embora os mecanismos de colmatação tenham sido detectados, algumas delimitações sobre a pesquisa precisam ser destacadas:

- I – Período temporal do ensaio (estiagem – aguada);
- II – Conduitos disponíveis para os ensaios de campo;
- III – Configurações dos ensaios (GTT3100 e GTT3100RSU sendo realizados em tempos distintos);
- IV – Variabilidade de campo (resíduos sólidos e precipitações pontuais intensas);
- V – Não foram utilizados filtros naturais como o de areia por exemplo.

Logo, como sugestões futuras, destacam-se:

- a) Realizar a distribuição alternada dos ensaios em diferentes épocas com colunas iguais (Seca – GTT3100 e GTT3100RSU);

- b) Replicar a metodologia em uma escala de campo superior;
- c) Realizar teste com duplo filtro na camada de resíduos sólidos;
- d) Realizar testes de adaptação de campo (utilizando maquinário de campo) dos geotêxteis na interface resíduos – camada drenante;
- e) Utilização de filtros naturais como areia nas comparações.

REFERÊNCIAS

ABINT, Associação Brasileira Das Indústrias de Não-tecidos e Tecidos Técnicos - Manual (2010). Curso Básico de Geotêxteis. 1ª Ed.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 10318-1: Geossintéticos Termos definições.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181:2018 – Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 4751: Standard Test Method for Pore Size Characteristics of Geotextiles by Capillary Flow Test. Pennsylvania, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 5141 - 11: Standard test method for determining filtering efficiency and flow rate of the filtration component of a sediment retention device. Pennsylvania, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 5567: Standard Test Method for Hydraulic Conductivity Ratio (HCR) Testing of Soil/Geotextile Systems. Pennsylvania, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 5101: Standard Test Method for Measuring the Filtration Compatibility of Soil-Geotextile Systems. Pennsylvania, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 5261: Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles. Pennsylvania, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 5199: Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics. Pennsylvania, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 4491: Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity. Pennsylvania, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 4595: Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method. Pennsylvania, 1990.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM D 6241: Standard Test Method for Measuring Static Puncture Strength of Geotextiles and Geosynthetic-Related Products Using a 50 mm Probe. Pennsylvania, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457:2016 — Amostragem e preparação de amostras de solo para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B. L.; DELEO, P.C.; LOZADA, D.S. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, pp 123- 191.

BOOKER, J.R., BRACHMAN, R., QUIGLEY, R. M., & ROWE, R. K. Barrier systems for waste disposal facilities. Crc Press, 2004.

BOUAZZA, A.; ZORNBERG, J. G.; ADAM, D.. Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. 2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Dispõe sobre critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 ago. 2006. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520>. Acesso em: 12 de dezembro de 2024.

CANCELLI, A., CAZZUFFI, D., 1987. Permittivity of geotextiles in presence of water and pollutant fluids. In: *Proceedings of Geosynthetics'87*, New Orleans, USA, vol. 2, pp. 471-481.

CARVALHO, M. F. Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. 1999. 300 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

CAZZUFFI, D.; COSSU, R. Experimental evaluation of filter performance for geotextiles in landfills. In: *Geotextiles in filtration and drainage: Proceedings of the conference Geofad'92: Geotextiles in filtration and drainage organised by the UK Chapter of the International Geotextile Society and held at Churchill College, Cambridge, UK on 23 September 1992*. Thomas Telford Publishing, 1993. p. 78-94.

CHARACKLIS, W.G., (198). *Fouling Biofilm Development: A Process Analysis*, Biotechnology and Bioengineering, v.XXII, pp. 1923-1960.

CHRISTENSEN, T. H. KJELDSSEN, P., ALBRECHTSEN, H. J. R., HERON, G., NIELSEN, P. H., BJERG, P. L., & HOLM, P. E. Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. *Critical reviews in environmental science and technology*, v. 24, n. 2, p. 119-202, 1994.

CONTRERA, Ronan Cleber. Tratamento biológico de líquidos percolados de aterros sanitários utilizando um reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF). 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. doi:10.11606/D.18.2016.tde-28092016-154251. Acesso em: 2024-02-02.

CORCORAN, B. W.; BHATIA, S. K. Evaluation of geotextile filter in a collection system at Fresh Kills landfill. *Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites*, v. 1281, p. 182, 1996.

CRUZ, M. F., SOUZA, C. R., TOMINAGA, E., JUNIOR, O. M. A., (2011). Potencialidade dos geotêxteis não-tecidos. XV INIC / XI EPG – UNIVAP 2011, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Solos – Análise granulométrica. DNER-ME 051/94. Rio de Janeiro, 1994.

DURMUSOGLU, E., SANCHEZ, I.M. & CORAPCIOGLU, M.Y. Permeability and compression characteristics of municipal solid waste samples. *Environ Geol* 50, 773–786 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0249-6>.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3. ed. rev. e ampl. Editores técnicos: Paulo César Teixeira, Guilherme Kangussu Donagemma, Ademir Fontana, Wenceslau Geraldes Teixeira. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

FATAHI, B; KHABBAZ, H. Influence of chemical stabilisation on permeability of municipal solid wastes. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 33, p. 455-466, 2015.

FATEMA, N.; BHATIA, S. K. Sediment retention and clogging of geotextile with high water content slurries. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, v. 4, p. 1-15, 2018.

FAURE, y. H.; BAUDOIN, A.; PIERSON, P.; PLE. O. (2006). A contribution for predicting geotextile clogging during filtration of suspend soils. *Geotextiles and Geomembranes*. Vol 24, pp. 11-20.

FLEMING, I. R.; ROWE, R. K. Laboratory studies of clogging of landfill leachate collection and drainage systems. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 41, n. 1, p. 134-153, 2004.

FUNGAROLI, A. & STEINER, R. Investigation of Sanitary Landfill Behavior - vol. 1. Final Report EPA-600-2-79-053a, Washington, D. C., 1979, USA.

GEBERT, J.; HUBER-HUMER, M.; CABRAL, A. R. Design of microbial methane oxidation systems for landfills. *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, p. 907562, 2022.

GIROUD, J. P. (1982). Filter criteria for geotextiles. In Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, NV, 1982, Vol. 1. Industrial Fabrics Association International, St Paul, MN, pp. 103-8.

GIROUD, J. P., BONAPARTE, R., BEECH, J. F., & GROSS, B. A. Design of soil layer-geosynthetic systems overlying voids. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 9, n. 1, p. 11-50, 1990.

HALSE, Y.; KOERNER R.M.; LORD Jr. A.E. (1987). Effects of high levels of alkalinity on geotextile. Part I: Ca(OH)₂ solutions. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 5, pp. 261-282.

HE, Xiangbai; OUYANG, Hao. Evaluating EIA implementation in China: An empirical study of 161 EIA judicial cases. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 100, p. 107075, 2023.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. População. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>. Acesso em: 17 jan. 2024.

JUNQUEIRA, F.F; SILVA, A. R.L; PALMEIRA, E.M. Performance of drainage systems incorporating geosynthetics and their effect on leachate properties. *Geotextiles and Geomembranes*. Vol 24, pp 311-324 (2006).

KHAN, M. W.; DAWSON, A. R.; MARSHALL, A. M. Filtration performance of non-woven geotextiles with internally-stable and-unstable soils under dynamic loading. *Geotextiles and geomembranes*, v. 50, n. 2, p. 293-311, 2022.

KIM, Viviane Jin Hee. Análise da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares de São Carlos (SP). 2019. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

KJELDSSEN, P. BARLAZ, M. A., ROOKER, A. P., BAUN, A., LEDIN, A., & CHRISTENSEN, T. H. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002.

KO, J. H., WANG, Q., YUAN, T., WU, H., & XU, Q. Geotextile clogging at different stages of municipal solid waste landfills co-disposed with bottom ash. *Science of the Total Environment*, v. 687, p. 161-167, 2019.

KOERNER, G.R., KOERNER, R.M., 1990. Biological activity and potential remediation involving geotextile landfill leachate filters. In: Koerner, R.M. (Ed.), ASTM STP 1081. Philadelphia, PA, USA.

KOERNER, G. R.; KOERNER, R. M. Leachate, flow rate behavior through geotextile and soil filters and possible remediation methods. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 11, p. 401–430, 1992.

KOERNER, George Robert. Performance evaluation of geotextile filters used in leachate collection systems of solid waste landfills. Drexel University, 1993.

KOERNER, G. R.; KOERNER, R. M.; MARTIN, J. P. Design of landfill leachate-collection filters. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 120, n. 10, p. 1792-1803, 1994.

KOERNER, R. M.; KOERNER, G. R. Lessons learned from geotextile filter failures under challenging field conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 43, n. 3, p. 272–281, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.01.004>.

KOERNER, Robert M. Design of Subtitle D and Subtitle C landfill containment systems. *Municipal Solid Wastes*, p. 247-264, 2020.

KOERNER, R. M.; SOONG, T.-Y. Use of geosynthetics in infrastructure remediation. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 1, n. 1, p. 66-75, 1995.

KOERNER, Robert M. *Designing with geosynthetics-Vol. 1*. Xlibris Corporation, 2012.

KRAUSE, M. J.; EADES, W.; DETWILER, N.; TOLAYMAT, T. Leachate indicators of an elevated temperature landfill. *Waste Management*, v. 171, p. 628–633, nov. 2023. DOI: 10.1016/j.wasman.2023.10.001.

KURNIAWAN, T. A., LO, W. H., & CHAN, G. Y. S. (2006). Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1-3), 80-100.

LAFLEUR, J. (1999). Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 17, pp. 299-312.

LEE, A. H.; NIKRAZ, H; HUNG, Yung-Tse. Liners for waste. In: HUNG, Yung-Tse; WANG, Lawrence K.; SHAMMAS, Nazih K. (eds.). *Handbook of environment and waste management: volume 2: land and groundwater pollution control*. Singapore: World Scientific, 2013. Cap. 5. Disponível em: https://doi.org/10.1142/9789814449175_0005. Acesso em: 2 dez. 2024.

LI, N., LU, X., HE, M., DUAN, X., YAN, B., CHEN, G., & WANG, S. Catalytic membrane-based oxidation-filtration systems for organic wastewater purification: A review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 414, p. 125478, 2021.

LIMA, M.J. (2014). Utilização de geotêxtil não tecido como elemento constituinte de barreiras capilares. Tese de Doutorado, Publicação GTD - 095/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.

LIU, Y. SUN, W., DU, B., & LIU, J. The physical clogging of the landfill leachate collection system in China: based on filtration test and numerical modelling. *International journal of environmental research and public health*, v. 15, n. 2, p. 318, 2018.

LIU, S.; WANG, Y.; FENG, D. Chemical clogging of synthetic filters in tailings ponds caused by ferrous iron ions. *Environmental Geotechnics*, v. 10, n. 8, p. 529-538, 2021.

MAHLER, C. F. & AGUIAR, A. B. Determinação da permeabilidade in situ em aterros de resíduos sólidos. In: 21^a Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa/Paraíba. Anais do 21^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa, 2001.

MANASSERO, M.; BENSON, C., H.; BOUAZZA, A.. Solid waste containment systems. In: ISRM International Symposium. ISRM, 2000. p. ISRM-IS-2000-012.

MANGKOEDIHARDJO, S. Insights on sequential changes to the ratios of Biochemical Oxygen Demand and Chemical Oxygen Demand. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, v. 11, n. 2, p. 1-20, 2023.

MARK, H. F.; BIKALES, N. M.; OVERBERGER, C. G.; MENGES, G. (1986). *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. Vol. 6 e Vol. 10.

MACKEY, R. KOERNER, GR (1999). Biological clogging of geotextile filters—a five-year study. In: *Geosynthetics '99 conference proceedings*, vol 2. Boston, pp 783–798.

MARQUES, R. F. P. V. et al. Impactos da disposição de resíduos sólidos urbanos no solo em municípios de Minas Gerais–Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 3, p. 1382-1392, 2021.

McISAAC, R. and ROWE, K.. 2006. Effect of filter–separators on the clogging of leachate collection systems. *Canadian Geotechnical Journal*. 43(7): 674-693. <https://doi.org/10.1139/t06-030>

MELO, D. L. A. (2018). Avaliação da abertura de filtração de Geotêxteis não tecidos sob diferentes esforços Solicitantes. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. 99 p.

METCALF & EDDY (1990). *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*. Metcalf & Eddy, Inc. 3. Ed., 1334pp.

MORAIS, M.V., MARCHIORI, L., ALBUQUERQUE, A., CAVALEIRO, V. (2023). Physical Methods and Scanning Electron Microscopy for Evaluation of Bioclogging in Geotextiles. In: et al. *Testing and Experimentation in Civil Engineering*. TEST&E 2022. RILEM Bookseries, vol 41. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29191-3_17.

MORTARA, F. C. (2011).: Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 241p.

NAVEEN, B. P., MAHAPATRA, D. M., SITHARAM, T. G., SIVAPULLAIAH, P. V., & RAMACHANDRA, T. V. Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. *Environmental Pollution*, v. 220, p. 1-12, 2017.

NEW SOUTH WALES. Environment Protection Authority (EPA). *Environmental Guidelines: Solid Waste Landfills*. 2nd ed. Sydney: NSW Environment Protection Authority, 2016.

ODABASI, E.; DAYIOGLU, A. Y., DEMIR YETIS, A., & AYDILEK, A. H. et al. Long-term hydraulic performance of geotextiles filtering recycled materials. *Geosynthetics International*, v. 30, n. 2, p. 137-153, 2023.

OWEIS, I.S.; KHERA, R.P. (1990). *Geotechnology of waste management*. Butterworths, London, England.

PALMEIRA, E. M.; GARDONI M. G. (2000). The influence of partial clogging and pressure on the behavior of geotextiles in drainage systems. *Geosynthetics International*, Vol 7, pp. 403-431.

PALMEIRA, E. M., REMIGIO, A. F., RAMOS, M. L., & BERNARDES, R. S. A study on biological clogging of nonwoven geotextiles under leachate flow. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 26, n. 3, p. 205-219, 2008.

PALMEIRA, Ennio Marques. *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 29 mar. 2023.

PALMEIRA, E. (2020). A review on some factors influencing the behaviour of nonwoven geotextile filters. *Soils and Rocks*. DOI: 10.28927/SR.433351.

PALMEIRA, E. M. Geotextile filters: from idealization to real behaviour. *Geosynthetics International*, v. 31, n. 1, p. 1–44, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1680/jgein.23.00029>. Palestra Giroud Lecture – 12th International Conference on Geosynthetics (12ICG), Roma, Itália, 2023.

PARAMESWARI, K. et al. Sustainable landfill design for effective municipal solid waste management for resource and energy recovery. *Materials Today: Proceedings*, v. 47, p. 2441-2449, 2021.

PORTELINHA, F. H. M.; ZANON, T. V. B.; ROCHA, P. E. O. Aspectos sobre o uso de geotêxteis em sistemas filtro-drenantes em aterros sanitários. In: XX Congresso Brasileiro de

Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2024, Balneário Camboriú/SC. Anais... Balneário Camboriú: COBRAMSEG, 2024.

QUEBEC. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). *Règlement sur l'enfouissement et l'incinération des matières résiduelles*. Q-2, r. 19, 2019. Disponível em: <https://www.environnement.gouv.qc.ca>. Acesso em: 10 mar. 2025.

REMIGIO, A. F. N., 2006. Estudo da Colmatação Biológica de Sistemas Filtro-Drenantes Sintéticos de Obras de Disposição de Resíduos Domésticos Urbanos sob Condições Anaeróbias. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-038/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 134 p.

RENOU, S. GIVAUDAN, J. G., POULAIN, S., DIRASSOUYAN, F., & MOULIN, P. J. J. O. H. M. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, v. 150, n. 3, p. 468-493, 2008.

ROCHA, Eliane Ferreira. Determination of hydraulic conductivity and field capacity on municipal solid waste. 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia; Saneamento ambiental) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ROLLIN, A. L.: LOMBARD, G. (1988). Mechanisms affecting long-term filtration behavior of geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 7, pp. 119-145.

ROWE, R. K. Long-term performance of contaminant barrier systems. *Geotechnique*, v. 55, n. 9, p. 631-678, 2005.

ROWE, R. Kerry; MUKUNOKI, Toshifumi; BATHURST, Richard J. Compatibility with Jet A-1 of a GCL subjected to freeze-thaw cycles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 132, n. 12, p. 1526-1537, 2006.

ROWE, R. Kerry. Long-term performance of leachate collection systems and geomembrane liners for MSW landfills. In: *GEOAFRICA 2009 – GIGSA Conference*, 2-5 set. 2009, Cape Town. Anais. Cape Town: GIGSA, 2009.

ROWE, R. Kerry; YU, Yan. Factors affecting the clogging of leachate collection systems in MSW landfills. In: *Proc. Of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics*, New Delhi. 2010. p. 3-23.

ROWE, R. K.; YAN, Y. Clogging of Finger Drain Systems in MSW Landfills. *Waste Management*, vol. 32, no. 12, Dec. 2012, pp. 2342–2352, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.018>. Accessed 13 Feb. 2024.

RYOO, S. C.; AYDILEK, A. H. Hydraulic compatibility of geotextile-compost systems in landfill covers. *Geosynthetics International*, v. 27, n. 1, p. 48-64, 2020.

RUIZ, E.; FLEMING, I. R.; PUTZ, G. J. Passive treatment of municipal landfill leachate in a granular drainage layer. *Journal of Environmental Engineering and Science*, v. 5, n. 5, p. 417-427, 2006.

SILVA, J. L. V. Colmatação biológica de geotêxteis. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. doi:10.11606/D.18.2013.tde-06032014-105106. Acesso em: 02 mai. 2023.

SILVA, J.L.V., LODI, P.C. Evaluating of Superficial and Internal Clogging of Geotextiles. *Int J Civ Eng* 18, 1125–1137 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00524-5>.

SILVA, G. R. A.; BRAGA, R. M. Q. L.; FERNANDES, L. L.; SILVEIRA, R. N. P. O.. Estimativas de vazões de lixiviados de um aterro sanitário na região metropolitana de Belém. *Revista DAE*, São Paulo, v. 70, n. 235, p. 77–89, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.021>.

SILVA, D. F., MATOS, A. T.; PEREIRA, O. G.; CECON, P. R.; MOREIRA, D. A. Disponibilidade de sódio em solo com capim tifton e aplicação de percolado de resíduo sólido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, n. 10, p. 1094-1100, out., 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010001000011>.

TAHA, R. S., ALKASSASBEH, J. Y., ALHARBI, O. M., BOUQELLAH, N. A., SWEITY, A., & AL-SHAWABKEH, J. D. Characterization of Landfill Leachate and their Toxic Effects on Germination and Seedling Growth of Various Plant Species-A Case Study. *Journal of Ecological Engineering*, v. 25, n. 11, 2024.

TANG, M. CHEN, S. C., CHANG, D. Q., XIE, X., SUN, J., & PUI, D. Y. Filtration efficiency and loading characteristics of PM_{2.5} through composite filter media consisting of commercial HVAC electret media and nanofiber layer. *Separation and Purification Technology*, v. 198, p. 137-145, 2018.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., & VIGIL, S. A. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill.

TREJOS, H. L. (2016). Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento parcialmente colmatados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-263/16. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Soil texture calculator. Washington, DC: USDA - Natural Resources Conservation Service, 2022. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/resources/education-and-teaching-materials/soil-texture-calculator>. Acesso em: 15 de maio 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Chapter 4 – Subpart D: Design Criteria. In: Municipal Solid Waste Landfill Criteria Technical Manual (40 CFR Part 258 Subpart D). EPA Archives. 1993 (companion to o regulamento promulgado em 9 de outubro de 1991), consultado via PDF no EPA Archive. Disponível em: Legislação EPA via Internet Archive. Acesso em: 07 fev. 2025

VERTEMATTI, José Carlos; ABINT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃO TECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS. Manual brasileiro de geossintéticos. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2004. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 31 abr. 2023.

VEYLON, G., STOLTZ, G., MÉRIAUX, P., FAURE, Y.-H., & TOUZE-FOLTZ, N. (2016). Performance of geotextile filters after 18 years' service in drainage trenches. *Geotextiles and Geomembranes*, 44, 515–533. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2016.02.002>.

VO, Phong HN et al. Foam fractionation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in landfill leachate using different cosurfactants. *Chemosphere*, v. 310, p. 136869, 2023.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2014.

WANG, Q., KO, J. H., WU, H., LIU, F., & XU, Q. Impact of bottom ash co-disposed with municipal solid waste on geotextile clogging in landfills. *Science of the Total Environment*, v. 774, p. 145744, 2021.

WANG, Z., MIAO, Q., HUANG, K., LIN, Y., WANG, T., BAI, X., & XU, Q. Learning to filter context for retrieval-augmented generation. arXiv preprint arXiv:2311.08377, 2023.

WANG, Qian et al. Spatial-temporal clogging development in leachate collection systems of landfills: Insight into chemical and biological clogging characteristics. *Waste Management*, v. 171, p. 163-172, 2023.

WU, H. WANG, Q., KO, J. H., & XU, Q. Characteristics of geotextile clogging in MSW landfills co-disposed with MSWI bottom ash. *Waste management*, v. 78, p. 164-172, 2018.

YA, X, GUANGYUAN, Y., YUQIANG, L., JINGCAI, L., RUI, X., & CAN, Q. Theory, framework, and methodology for physical lifespan prediction of hazardous waste landfills. *Science of The Total Environment*, v. 888, p. 163154, 2023.

YAMAN, Cevat. Improvement of leachate quality and waste stabilization in pilot-scale bioreactor landfills containing geotextile filters and sewage sludge. *Desalin. Water Treat*, v. 158, p. 41-58, 2019.

YAMAN, C. REHMAN, S., AHMAD, T., KUCUKAGA, Y., PALA, B., ALRUSHAID, N., ... & Yaman, A. B. Community structure of bacteria and archaea associated with geotextile filters in anaerobic bioreactor landfills. *Processes*, v. 9, n. 8, p. 1377, 2021.

YAMAN, C., MARTIN, J.P., & KORKUT, E.N. (2006). Effects of wastewater filtration on geotextile permeability. *Waste Management & Research*, 24(1), 2–10. <https://doi.org/10.1680/gein.2006.13.3.87>.

XAVIER, J. B.; PICIOREANU, C.; ALMEIDA, J. S.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. (2003). Monitorização e Modelação da Estrutura de Biofilmes. *Boletim de Biotecnologia*, N. 76, pp. 2-13

ZHAO, L.; KARIM, M. A. Use of Geosynthetic materials in solid waste landfill design: A review of geosynthetic related stability issues. *Annals of Civil and Environmental Engineering*, [S. l.], v. 2, p. 006-015, 22 jun. 2018. DOI: 10.29328/journal.acee.1001010. Acesso em: 05/06/2024.

ZOU, X., ZHANG, Y., GAO, M., YAO, Y., GUO, H., & LIU, Y. Enhancing biological dissolved organic nitrogen removal in landfill leachate wastewater: The role of sodium acetate co-metabolism. *Chemical Engineering Journal*, v. 479, p. 147714, 2024.