



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 11, nº 1 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID36183>



Influência da biodegradação no desenvolvimento de recalques em resíduos sólidos urbanos cobertos com uma cobertura intermediária de aterros sanitários

Influence of biodegradation on the development of settlements in municipal solid waste covered with an intermediate landfill cover

Eliana Dantas Ribeiro¹; Anderson Borghetti Soares²

¹ Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia/Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza/CE, Brasil.
Email: elianadr@alu.ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7582-597X>

² Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia/Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza/CE, Brasil.
Email: borghetti@ufc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0708-3702>

Resumo: Este trabalho teve como objetivo verificar o comportamento dos recalques de RSU e RSO, em função da biodegradação. Tendo em vista que a biodegradação é responsável por grande parte dos recalques que ocorrem em aterros de RSU, é imprescindível fazer um monitoramento das fases de biodegradação, em que se encontra a massa de resíduos. Nesta perspectiva, foram construídos 3 lisímetros, sendo 1 contendo RSU e 2 contendo RSO, todos cobertos por uma camada de solo de cobertura intermediária disposta em aterros sanitários do estado do Ceará. Os lisímetros foram projetados em condições de drenagem na superfície (com e sem recirculação de chorume). Nos lisímetros contendo apenas RSO, os recalques foram maiores que no lisímetro contendo RSU. No lisímetro sem recirculação, observou-se decréscimos na D₉₀, em relação ao lisímetro com chorume recirculado. A recirculação de chorume contribuiu para maiores recalques e para tornar o lixiviado mais concentrado, com sais como cloretos que influenciaram diretamente no aumento da condutividade elétrica. A compactação da camada de cobertura intermediária do aterro demonstrou-se adequada, já que o grau de compactação foi de 95% do Proctor Normal, com valores de peso específico seco de 18,2 kN/m³, em campo, e de 19,1 kN/m³ obtido em laboratório.

Palavras-chave: Biodegradação; Recalques; Resíduos sólidos urbanos.

Abstract: The objective of this study was to verify the behavior of MSW and RSO settlements as a function of biodegradation. Considering that biodegradation is responsible for a large part of the settlements that occur in MSW landfills, it is essential to monitor the biodegradation phases, in which the mass of waste is found. In this perspective, 3 lysimeters were constructed, 1 containing MSW and 2 containing RSO, all covered by an intermediate cover soil layer disposed of in landfills in the state of Ceará. The lysimeters were designed under surface drainage conditions (with and without leachate recirculation). In the lysimeters containing only RSO, the settlements were higher than in the lysimeter containing MSW. In the lysimeter without recirculation, decreases in COD were observed, in relation to the lysimeter with recirculated slurry. The recirculation of leachate contributed to greater settlements and to make the leachate more concentrated, with salts such as chlorides that directly influenced the increase in electrical conductivity. The compaction of the intermediate cover layer of the landfill proved to be adequate, since the degree of compaction was 95% of the Normal Proctor, with dry specific weight values of 18.2 kN/m³, in the field, and 19.1 kN/m³ obtained in the laboratory.

Keywords: Biodegradation; Settlements; Municipal solid waste.

Recebido: 02/05/2024; Aceito: 14/02/2025; Publicado: 06/03/2025.

1. Introdução

A degradação da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ocorre em fases diferentes, aeróbias e anaeróbias. Cada uma dessas fases envolve interações químicas, físicas e biológicas interdependentes. Os processos físico-químicos englobam alterações nos seguintes parâmetros: potencial de hidrogênio (pH), demanda química de oxigênio (Dqo); reações de nitrificação, dentre outros. A alteração desses fatores contribui para modificações na estrutura do RSU, impactando nas alterações de volume. Por consequência dessas alterações de volume, ocorrem fenômenos físicos denominados de recalques, ao longo do tempo, nos resíduos.

No que se refere à magnitude dos recalques, estes são maiores quando há uma maior porcentagem de resíduo sólido orgânico (RSO), pois o processo de remoção da matéria orgânica ocorrerá em maior volume. Seok e Soon (2022) explicam que boa parte dos recalques em RSU devem-se a fração da biodegradação da matéria orgânica. E é exatamente isso que fazem os recalques de RSU, em aterros sanitários, serem muito mais elevados, quando comparados aos solos. O comportamento dos recalques acontece em etapas: na primeira etapa eles dependem das solicitações mecânicas (sobreposição dos materiais), na segunda etapa eles dependem das alterações físico-químicas que acontecem na massa de resíduos devido à atividade microbiológica, com o decorrer do tempo (BOSCOV, 2008; SEOK; SOO, 2022).

A biodegradação desses materiais orgânicos, causada por microrganismos, transforma a matéria sólida em líquida e gasosa. O líquido proveniente da biodegradação, chamado de chorume, é formado na transição da fase aeróbia para a fase anaeróbia de decomposição do RSU de um aterro sanitário, podendo atingir valores elevados na Dqo de até 100.000 mg/L (BOSCOV, 2008; LINS, 2003; SOUTO; POLIVINELLI, 2007).

Na fase de transição aeróbia para anaeróbia, há bastante matéria orgânica a ser removida, e as análises físico-químicas do chorume gerado são importantes métodos de avaliação do grau de biodegradação da matéria orgânica do aterro. Quando há a biodegradação da matéria, geram-se vazios na massa de resíduo. O RSU não degradado possui elevado índice de vazios, sendo suscetível à compressibilidade intensa, pois muitas partículas são deformáveis ao ponto de sofrerem consolidação, que ocorre devido às cargas impostas no aterro (máquinas compactadoras, o peso próprio das camadas superiores, operários a trabalho, trânsito de caminhões de lixo, etc). Os recalques ocorrem devido a essa compressão imposta pelas cargas aplicadas, juntamente com os processos de degradação da matéria orgânica, que gera vazios e deixa a estrutura do RSU mais frágil e sujeita a novas deformações verticais (CATAPRETA, 2008; CARVALHO, 1999; DA SILVA, 2013).

Portanto, a ação de grupos microbianos na digestão, predominantemente anaeróbia, gera o chorume que é importante em investigações de recalques em aterros de RSU. Nesta perspectiva, os resultados das análises físico-químicas do chorume permitem saber em qual fase de biodegradação se encontra o aterro sanitário. A degradação é influenciada por fatores internos como a ação de agentes microbianos, temperatura, composição dos resíduos; e agentes externos como a precipitação, a evaporação e a recirculação de chorume, quando houver (CARVALHO, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Na fase aeróbia de digestão, os recalques em aterros acontecem como consequências de rearranjos das partículas juntamente com conversão da matéria carbonácea em gás carbônico e água, como está demonstrado na Equação geral 1. Segundo Sperling (1996), esta equação é genérica e representa a oxidação da matéria orgânica carbonácea. Nesta fase, o lixiviado gerado é proveniente da umidade dos resíduos e da água infiltrada, sendo esta última decorrente da precipitação.



Já na fase anaeróbia, não há a presença do oxigênio, como mostra a Equação geral 2. Nesta fase, os recalques acontecem no momento que a matéria carbonácea é convertida em gás carbônico e metano.



A conversão anaeróbia acontece em duas fases: acidogênica e metanogênica. Na fase acidogênica, os valores do pH do chorume apresentam-se inferiores a 5,0 (WORREL; VESILIND, 2012; O'LEARY; TCHOBANOGLOUS, 2002). Neste momento, ocorre a atividade de bactérias fermentativas que produzem enzimas responsáveis pela hidrólise de materiais complexos em carboidratos, proteínas e lipídios. Na fase metanogênica, os compostos orgânicos são transformados em metano e dióxido de carbono, apresentando pH de no mínimo 7,5 e de no máximo 9,0 (BOSCOV, 2008; SOUTO; POLIVINELLI, 2007).

As propriedades físico-químicas do chorume ao longo do tempo, na fase do monitoramento de recalques, permitem investigar a dinâmica das deformações que acontecem em aterros de RSU. Portanto, o uso de lisímetros, em campo, permite investigar a evolução dos recalques devido à ação da degradação da matéria orgânica. Nesta perspectiva, o presente artigo visa monitorar a evolução dos recalques em lisímetros preenchidos com RSU e correlacionar esses recalques com parâmetros físico-químicos como: pH, Dqo, condutividade elétrica e sais dissolvidos, como os cloretos. O estudo procurou reproduzir a ocorrência dos recalques, durante a fase construtiva, sendo utilizada uma cobertura de solo proveniente da camada intermediária de um aterro sanitário.

2. Metodologia

2.1 Delimitação da área da pesquisa

A instalação dos lisímetros experimentais foi realizada no interior do campus da Universidade Federal do Ceará (UFC), na cidade de Fortaleza, como pode ser visto na Figura 1. Os resíduos utilizados para o preenchimento dos lisímetros foram coletados na estação de transbordo do bairro Jangurussu, também localizado em Fortaleza. O solo foi coletado na camada de cobertura intermediária do Aterro Sanitário Metropolitano do Oeste de Caucaia – CE (ASMOC), localizado aproximadamente a 18 quilômetros de Fortaleza.

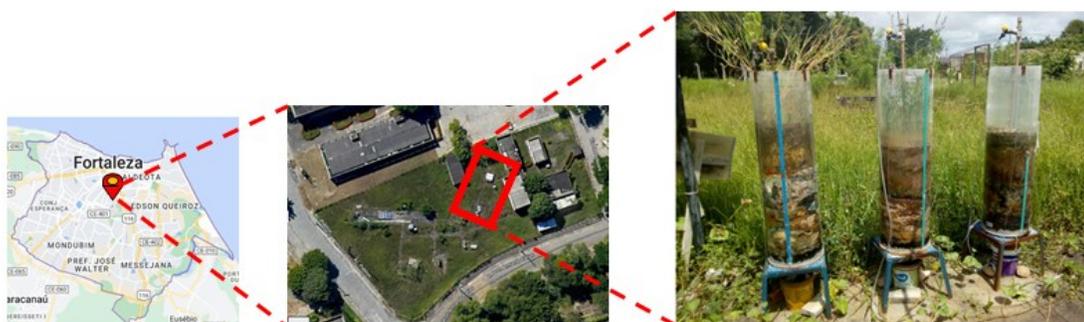


Figura 1 – Instalação dos lisímetros.

Fonte: Autores (2023).

2.2 Aspectos construtivos dos lisímetros

Foram construídos três lisímetros em material acrílico, conforme a Figura 2, com comprimento de 100 cm, espessura de 0,5 cm, diâmetro interno de 29 cm e externo de 30cm. Foi colocada uma camada de 3cm de impermeabilização na base, feita de manta butílica. Na parte interna da base, foi acoplada uma tampa de PVC (Policloreto de Vinila), com silicone. Foi instalado um dreno de PVC vertical, no centro dos lisímetros, para a medição dos gases oriundos da biodegradação. No centro da tampa instalada na base do lisímetro, foi feito um orifício para a instalação de um dreno de PVC, para as coletas periódicas do chorume. Na superfície externa dos lisímetros, foram fixadas três fitas métricas, para permitir a medição manual dos recalques. Para realizar a recirculação do chorume em um dos lisímetros, foi utilizado um aguador de plástico. A recirculação foi realizada semanalmente, no momento da coleta do lixiviado.

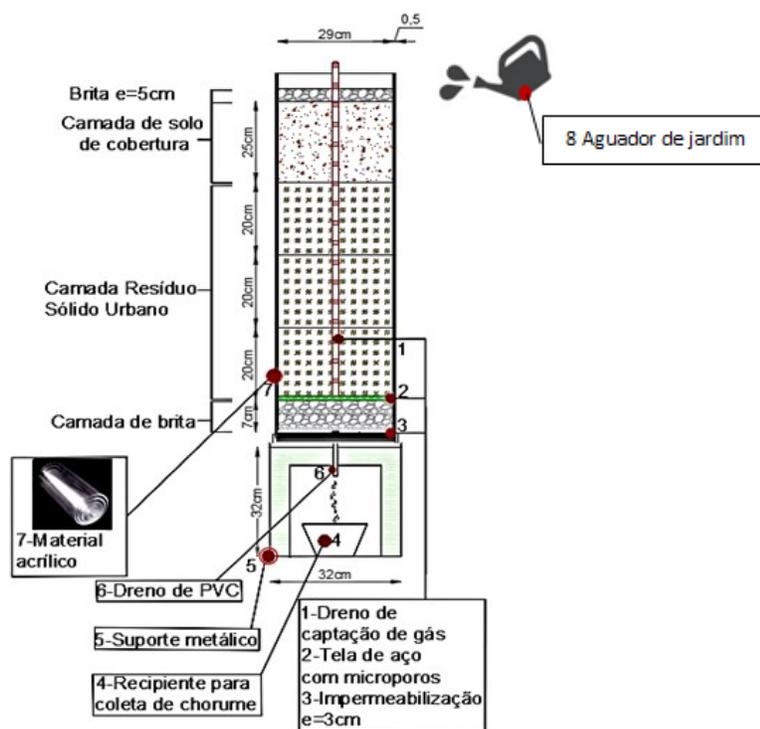


Figura 2 – Projeto do lisímetro experimental.
Fonte: Autores (2023).

É importante salientar que o dreno de captação de gases foi projetado para uma outra etapa da pesquisa, sendo que o volume de gases medido, dentre eles o metano (CH_4), foi baixo, indicando que os resíduos não haviam atingido a fase metanogênica.

2.3 Composição gravimétrica dos lisímetros

A composição gravimétrica do lisímetro (L1) foi de RSU, típica da cidade de Fortaleza, já as composições dos lisímetros L(2) e L(3) foram de RSO. A ação de recircular o chorume ocorreu apenas em L(2), com o objetivo de verificar a influência da recirculação no processo de biodegradação.

O material coletado foi dividido em 7 categorias de resíduos: orgânicos, rejeitos, plásticos, papéis, têxteis, vidros e metais. Os resíduos pertencentes a cada grupo foram devidamente pesados, a fim de se obter a porcentagem referente a cada fração do tipo de material, como está demonstrado na Figura 3. Os materiais orgânicos foram restos de alimentos domésticos (cascas de frutas, carnes, restos de plantas). Nas outras classes, foram encontrados plásticos, garrafas de vidros, alguns metais (alumínios, fragmentos de eletroeletrônicos), papéis e papelões. Na classe dos rejeitos, foram observados materiais como fraldas, papel higiênico, absorventes femininos e isopor.

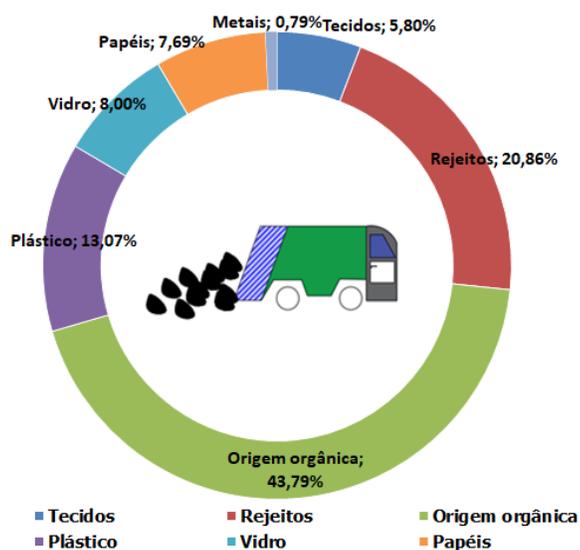


Figura 3 – Composição Gravimétrica - lisímetro 1.

Fonte: Autores (2023).

A separação dos resíduos sólidos urbanos foi realizada no pátio da estação de transbordo do bairro Jangurussu. Os resíduos foram segregados e classificados, conforme as ilustrações da Figura 4.



Figura 4 – Separação do RSU; a)RSU b)RSO c) Plásticos d) Papelões, papeis e) Tecidos f) Vidros g) Metais h) Balança.

Fonte: Autores (2023).

2.4 Preparação das amostras e preenchimento dos lisímetros

Foram realizados ensaios geotécnicos com as amostras de solo da Figura 5, conforme as normas listadas na Tabela 1.



Figura 5 – Ensaios geotécnicos; a)Granulometria b) Cilindro de cravação c) Limite de liquidez d) Limite de plasticidade e)Permeabilidade f)Compactação.

Fonte: Autores (2023).

Tabela 1 – Ensaios geotécnicos.

Denominações	Referências
Preparação de amostras	NBR 6457 (ABNT, 2016)
Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016)
Limite de liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2017)
Limite de plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Permeabilidade	NBR 13292 (ABNT, 2021)
Ensaio de compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016)
Massa específica, com cilindro de cravação.	NBR 9813 (ABNT, 2016)

Fonte: Autores (2023).

Terminados os ensaios geotécnicos, foi realizado o preenchimento dos lisímetros. Antes da compactação dos resíduos, foi colocada uma camada de 7 cm de brita 0 na base de cada lisímetro, como pode ser visto na Figura 6a. Acima da camada de brita foi colocada uma tela de aço inoxidável, com o objetivo de servir de filtro e evitar a passagem de materiais finos pelo dreno. Posteriormente, as amostras dos lisímetros foram compactadas em 3 camadas de 20 cm. Nessa etapa, foi necessário centralizar manualmente o dreno de captação de gases, enquanto ocorria a compactação por meio de um compactador de concreto, mostrado na Figura 5b, de 9 cm de diâmetro, 10 cm de altura e massa de 9,8 kg. Na etapa de compactação do solo de camada de cobertura intermediária, foi compactada uma amostra com espessura de 25 cm, como pode ser visualizado na Figura 5c. Acima da camada de solo, foi depositada uma camada de 5cm de brita, para atenuar o efeito da erosão, em decorrência do período chuvoso.

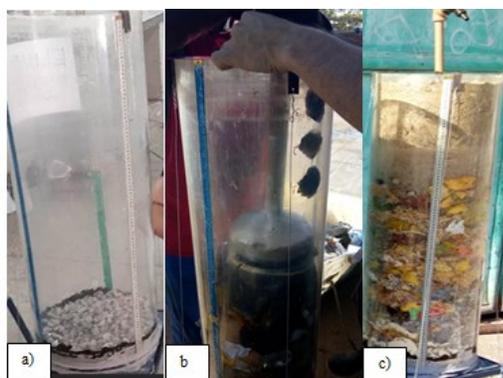


Figura 6 – Preenchimento dos lisímetros; a) Brita b) Compactação do RSU c) Compactação do solo.

Fonte: Autores (2023).

As quantidades de RSU e de solo, compactadas em cada lisímetro, estão apresentadas na Tabela 2. A massa específica dos resíduos foi calculada utilizando os dados obtidos da massa de RSU e de RSO, compactadas para um volume de forma geométrica cilíndrica (raio interno da base de 14,5 cm e espessura de 60 cm). Usualmente, em pesquisas com RSU de aterros sanitários, é importante realizar o cálculo do peso específico, tendo em vista que este parâmetro é influenciado pela espessura das camadas de cobertura final e intermediária, por ambas tratarem-se de aplicações de sobrecarga.

É importante ressaltar que houve diferença entre os valores de peso específico de L2 e de L3, visto que as amostras continham materiais orgânicos de difentes massas e formas.

Tabela 2 – Configuração dos 3 lisímetros.

Composição	Volume do lisímetro = 39.631,19 cm ³		
	RSU ¹	RSO	
	Lisímetro 1 ¹	Lisímetro 2 ²	Lisímetro 3 ³
Massa dos resíduos (kg)	39,00	29,84	30,00
Massa de solo (kg)	34,00	34,00	34,00
Massa específica dos resíduos (g/cm ³)	0,98	0,75	0,76

Peso específico (kN/m ³)	9,65	7,38	7,42
--------------------------------------	------	------	------

Fonte: Autores (2023).

1- Lisímetro de RSU com composição gravimétrica demonstrada na Figura 3;

2- Lisímetro com 100% de RSO e com recirculação de lixiviado;

3- Lisímetro com 100% de RSO.

A massa de solo dos 3 lisímetros foi obtida realizando-se o cálculo da massa específica, com os dados obtidos em campo, através do ensaio do cilindro de cravação, e com o dado do volume do lisímetro (raio interno da base de 14,5 cm e espessura de 25 cm), como estão demonstrados na Tabela 3. Os ensaios de compactação permitiram fazer uma comparação entre os valores obtidos em campo e em laboratório. O ensaio de Proctor foi realizado empregando-se energia normal, tendo em vista que as energias intermediária e modificada poderiam impactar na aproximação intensa dos grãos, podendo dificultar a permeabilidade do solo da camada de cobertura do aterro sanitário.

Tabela 3 – Propriedades geotécnicas do solo.

Volume do lisímetro = 16.512,99 cm³

Dados obtidos em laboratório		Dados obtidos em campo	
Densidade real	2,63	Massa específica – g/cm ³	2,06
Permeabilidade – cm/s	1,4x10 ⁻³	Peso específico natural- kN/m ³	20,2
Peso específico seco - kN/m ³	19,1	Peso específico seco – kN/m ³	18,2
Umidade ótima média (%)	11,3	Umidade (%)	10,5

Fonte: Autores (2023).

Por se tratar de um solo de camada de cobertura intermediária, o solo apresentou uma curva granulométrica bem graduada, classificando-se como areia NBR 7181 (ABNT, 2016), como mostra o gráfico da Figura 7.

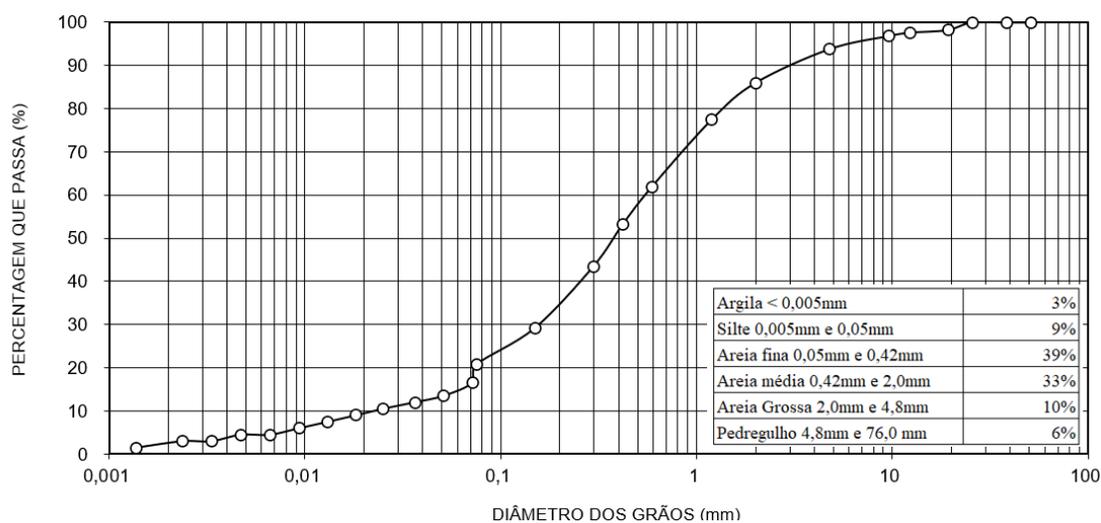


Figura 7 – Curva Granulométrica

Fonte: Autores (2023).

Terminada a etapa de preenchimento, os lisímetros foram instalados em campo, sendo expostos às condições meteorológicas locais.

2.5 Dados Monitorados

2.5.1 Volume de lixiviado

A coleta do lixiviado foi realizada quinzenalmente, conforme o cronograma da Tabela 4, entre os meses de setembro/2022 e fevereiro/2023, perfazendo um total de 180 dias de monitoramento. Os dados pluviométricos foram obtidos através da estação meteorológica da UFC, situada cerca de 500 metros do local de instalação dos lisímetros.

Tabela 4 – Cronograma das coletas.

Período	Quantidade de coletas
05/09 a 15/09/22	3
15/09 a 30/09/22	2
03/10 a 18/10/22	1
18/10 a 31/10/22	1
31/10 a 15/11/22	1
15/11 a 30/11/22	1
30/11 a 15/12/22	1
15/12 a 31/12/22	1
31/12 a 13/01/23	4
13/01 a 27/01/23	5
27/01 a 10/02/23	4
10/02 a 25/02/23	5

Fonte: Autores (2023).

2.5.2 Análises físico-químicas do lixiviado

As análises físico-químicas foram realizadas quinzenalmente no laboratório de Saneamento Ambiental da UFC. Na Tabela 5, estão descritos os parâmetros físico-químicos que foram analisados, juntamente com os métodos utilizados.

Tabela 5 – Parâmetros Físico-químicos.

Análise	Método	Referências
pH	4500-H+ B	APHA (2012)
Dqo (mg/L)	5220 D: Método Colorimétrico com digestão em refluxo fechado.	APHA (2012)
Condutividade elétrica uS/cm	Método potenciômetro	APHA (1998)
Cloretos	4110 B: Cromatografia de íons	APHA (2012)

Fonte: Autores (2023).

2.5.3 Medição dos recalques

Os recalques foram verificados quinzenalmente, através das diferenças de alturas observadas com o auxílio de fitas métricas fixadas na superfície dos lisímetros, como mostra a Figura 8.



Figura 8 – Medição manual de recalques.
Fonte: Autores (2023).

3. Resultados e discussão

3.1 Volumes de lixiviado

De acordo com o gráfico da Figura 9, a geração de lixiviado no lisímetro (L1) aconteceu só após 90 dias. A composição do L1 tinha diversos tipos de materiais não orgânicos, que interferiram na geração de pouco volume de chorume neste período, tais como: papéis, rejeitos, vidros, plásticos, etc. Guedes *et al.* (2021) explicam que os materiais plásticos servem como um empecilho à passagem do lixiviado, além disso materiais como papelões e têxteis absorvem a umidade no interior do lisímetro, contribuindo mais ainda para a pouca geração de lixiviado, quando se compara os lisímetros contendo apenas RSO.

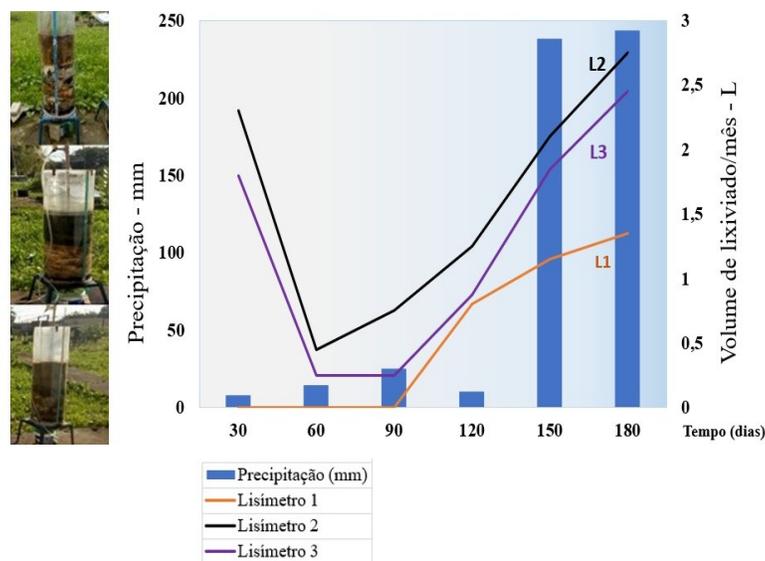


Figura 9 – Volume de lixiviado e precipitação x tempo.
Fonte: Autores (2023).

Foi observado pouco volume de lixiviado entre 30 e 120 dias da instalação, para todos os 3 lisímetros, justamente no período de menor precipitação, como pode ser visto no gráfico da Figura 9. Já entre 90 e 180 dias a geração de chorume foi crescente, intensificando-se principalmente entre o período de 150 e 180 dias, devido ao aumento da precipitação nos últimos meses de monitoramento. Em outros trabalhos realizados com lisímetros, como o de Alcântara (2007), Da Silva (2013), Bareither *et al.* (2012), Guedes *et al.* (2017), Santos e Matos (2017), os autores também observaram que a ocorrência de maiores precipitações impacta em maiores volumes de lixiviado.

3.2 Parâmetros físico-químicos

3.2.1 Dqo e pH

A Dqo é um parâmetro importante para avaliar a presença de material orgânico a ser degradado em uma amostra. A partir dos ensaios é possível averiguar o quanto de reagente de digestão foi utilizado para determinada amostra. Em outras palavras, quanto maior os valores de Dqo em uma amostra, maior será a demanda de oxigênio para degradá-la. Conforme a Figura 10, os lisímetros L2 e L3 apresentaram comportamentos distintos, no que compete aos resultados de Dqo ao longo dos meses, mesmo os dois possuindo iguais teores de matéria orgânica.

A existência da recirculação do lixiviado no L2, pode ter influenciado no aumento dos valores de Dqo, quando comparados aos valores desse mesmo parâmetro para o L3. Para L2, entre setembro/22 e janeiro/23, a Dqo teve aumentos, já a partir de janeiro/23 sofreu um leve decréscimo. Segundo Pinto (2000), a Dqo aumenta, quando há bastante ácidos dissolvidos no lixiviado. A recirculação no L2 pode ter contribuído para uma sobrecarga de nutrientes decorrentes da hidrólise, característica do começo da fase anaeróbia. Para o L3, que não teve recirculação de lixiviado, os valores de Dqo tiveram aumentos e decréscimos sucessivos entre setembro/22 e dezembro/22, já a partir de dezembro/22 ocorreu uma diminuição desse parâmetro, sugerindo estar migrando da fase de transição para a fase ácida, entre janeiro/23 e fevereiro/23, nota-se uma tendência de diminuição do pH para os últimos dois meses de monitoramento.

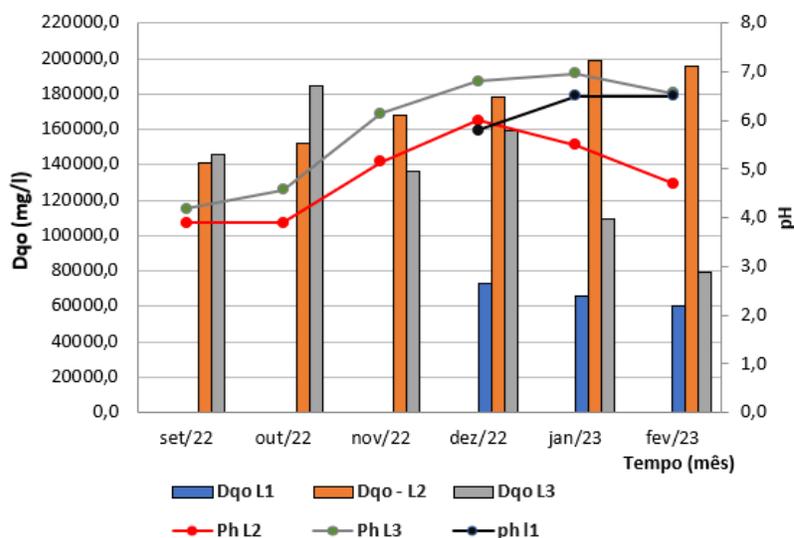


Figura 10 – Dqo e pH Lisímetro L1, L2 e L3.

Fonte: Autores (2023).

No L1, os valores de Dqo foram menores que os valores de L2 e L3, este resultado era esperado, tendo em vista que a porcentagem de matéria orgânica foi menor em L1, do que em L2 e L3.

No L1, só foi possível verificar os valores de pH a partir de 90 dias, devido à demora na geração de lixiviado. Para este mesmo lisímetro, houve um aumento do pH entre dezembro/22 e fevereiro/23, de 5,8 para 6,5 aproximadamente, sugerindo estar ainda na fase I, de ajustes iniciais, em que o oxigênio livre está sendo consumido por microrganismos aeróbicos. Segundo Zanetti (2008) e Pinto (2000), na fase inicial o pH pode chegar próximo de 7.

Entre os meses de setembro/22 e dezembro/22, observa-se uma tendência de aumento dos valores de pH nos lisímetros L2 e L3. Entre dezembro/22 e fevereiro/23, em L2, acontece uma diminuição nos valores de pH de 6 para 4,5, indicando que este lisímetro pode estar entrando na fase ácida. Segundo Pinto (2000), há uma queda do pH para valores menores que 6,0, e nesta fase ocorre a hidrólise de compostos complexos em compostos de fácil metabolização pelas bactérias. No L3, houve uma leve diminuição do pH entre janeiro/23 e fevereiro/23, aproximadamente de 7 para 6,5, sugerindo estar ainda na fase de transição aeróbia para anaeróbia. Conforme Worrel e Vesilind (2012), o pH da fase de transição aeróbia para anaeróbia é cerca de 6,7.

Na fase de transição, verificada no lisímetro L2, o oxigênio praticamente inexistente, e a matéria orgânica é convertida em ácidos voláteis, isso é possível devido às condições de oxi-redução. Nesta etapa, ainda não acontece a remoção total da matéria orgânica, há apenas a sua transformação da matéria carbonácea em ácidos, por isso o pH das amostras de lixiviado nesta fase tende à redução (LINS, 2003; SPERLING, 1996).

3.2.2 Íons e condutividade elétrica

As análises realizadas no chorume coletado indicaram presença de sais de cloreto (Cl^-), que foi medido durante o período de monitoramento, como pode ser verificada na Figura 11. Observa-se que as concentrações de cloreto foram maiores no L2, que teve recirculação. Segundo Alcântara (2003), os íons de sais presentes no lixiviado conduzem eletricidade, por isso há uma hipótese de que a condutividade elétrica apresentou-se maior no L2, devido à recirculação, quando comparado ao L3 sem recirculação, como pode ser visto na Figura 12. Como os parâmetros físico-químicos de lixiviado estão interligados, observa-se que os altos valores de condutividade elétrica foram influenciados pela presença de altos valores de cloreto presente nas amostras de L2.

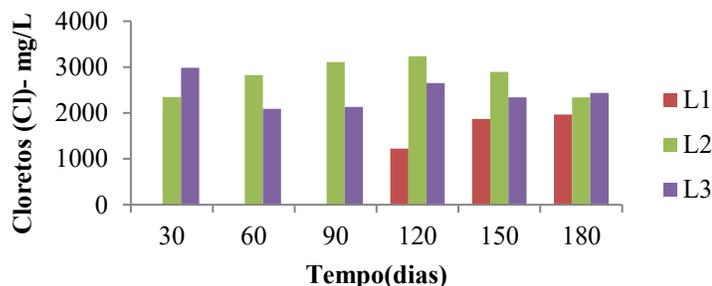


Figura 11 – Cloretos.
Fonte: Autores (2023).

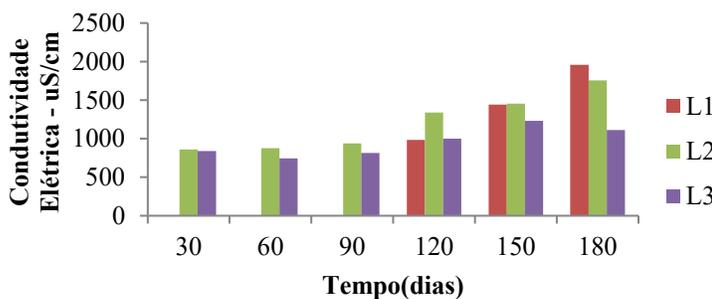


Figura 12 – Condutividade elétrica uS/cm.
Fonte: Autores (2023).

Para Catapreta (2008), altos valores de cloretos indicam a presença de sais minerais nos resíduos, e a concentração de sais dissolvidos no lixiviado pode contribuir para a inibição de alguns microrganismos que atuam na biodegradação da matéria carbonácea (DA SILVA, 2013). Como os microrganismos são importantes na redução de valores de Dqo, o

aumento de sais dissolvidos, em L2 (recirculado), não contribuiu para a redução da Dqo durante o período de monitoramento, quando se compara ao comportamento da Dqo para o L3.

Para o L2 (recirculado), a alta carga de nutrientes nas amostras de lixiviado, devido aos altos valores de Dqo, quando comparado ao L3 não recirculado, revelou que a recirculação contribuiu para tornar o lixiviado mais concentrado. Segundo Cintra (2003), a recirculação de chorume cru deve ser realizada com cautela, pois pode causar um efeito de inibição parcial nos processos de metanogênese, fase não atingida pelos lisímetros desta pesquisa. A autora também menciona que seria importante fazer um pré-tratamento do lixiviado antes de recirculá-lo.

3.3 Evolução dos recalques

No gráfico da Figura 13, observou-se que para os 3 lisímetros a velocidade dos recalques foi maior no início do experimento, sendo maior nos lisímetros L2 e L3, que tinham maiores teores de matéria orgânica. Segundo Sowers (1973) e Seok e Soo (2022), os recalques primários ocorrem antes dos processos de biodegração e duram alguns dias, o que explica a inclinação acentuada das curvas dos 3 lisímetros para os primeiros 30 dias de acomodação dos resíduos, que dependem da sobrecarga das camadas de resíduos.

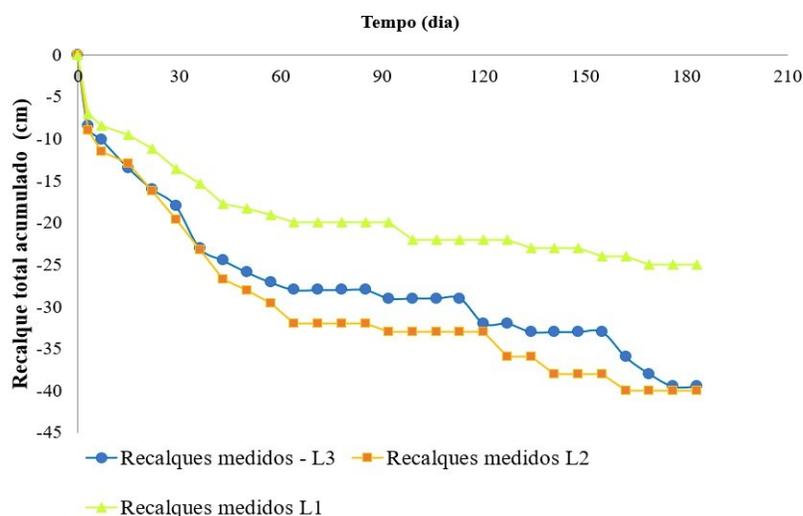


Figura 13 – Evolução dos recalques.
Fonte: Autores (2023).

No lisímetro L2 (recirculado), os recalques acumulados apresentaram-se maiores na maioria dos dias, entre 30 e 120 dias, e entre 120 e pouco antes de 180 dias. Em alguns pontos, os recalques acumulados de L2 e L3 foram bem similares como no primeiro mês do monitoramento, e em alguns dias, como no final do 4º mês e do 6º mês. A recirculação do lisímetro L2 pode ter influenciado na aceleração da biodegração, contribuindo para maiores deformações verticais, consequentemente as medições dos recalques apresentaram-se maiores em boa parte dos meses monitorados. Segundo Boscov (2008) e Carvalho (1999), é fato que a maior parcela dos recalques, em aterros sanitários, é influenciada pela biodegradação, mas segundo Melo *et al.* (2016), nem sempre altos teores de matéria orgânica propiciam recalques na mesma magnitude, pois nem todo RSO é biodegradável. Fatores como o tipo de RSO (presença ou não de materiais recalcitrantes) podem impactar na magnitude dos recalques, tendo em vista que nem todo tipo de material putrescível irá degradar no mesmo intervalo de tempo. A composição do RSO pode ter componentes diferentes, possibilitando graus de degradação diferentes.

Em experimentos com RSU realizados por Grisolia *et al.* (1992), os autores verificaram que existem fases de recalques dos resíduos ao longo dos anos, como pode ser visto no gráfico da Figura 14. Os autores explicam que a fase 1 corresponde aos recalques iniciais provocados pela redução dos vazios, no momento da primeira acomodação do material. Na fase 2, ocorrem os recalques, devido à compressão mecânica. Na fase 3, os recalques são ocasionados pela decomposição da matéria orgânica, e nas fases IV e V ocorrem os recalques residuais. Nesta pesquisa, em especial, o monitoramento ocorreu durante 180 dias, indicando que os lisímetros L1, L2 e L3 atingiram a fase 3 de do comportamento de recalques.

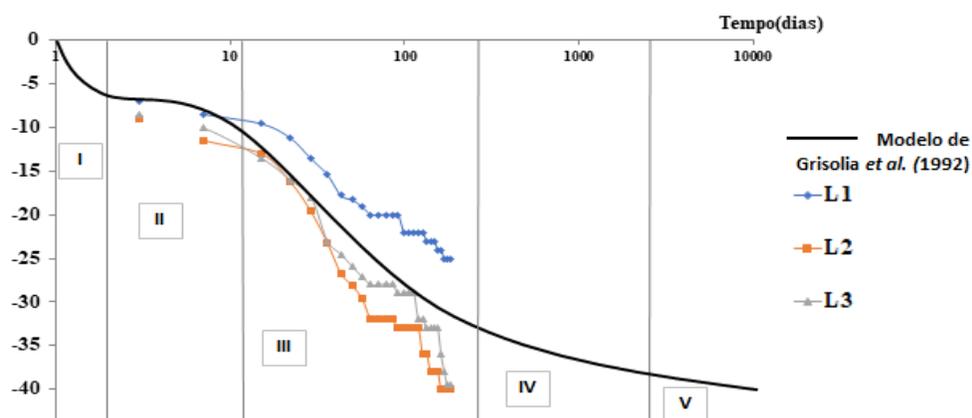


Figura 14 – Fases de recalques.
Fonte: Adaptado de Grisolia et al. (1992).

Conforme o gráfico da Figura 14, há um indicativo que para os 183 dias de monitoramento, a pesquisa chegou à fase 3 de comportamento de recalques influenciados pelos processos de biodegradação. O teor de material orgânico nos lisímetros L2 (recirculado) e L3 influenciaram em uma curva de recalques assintota, indicando valores mais acentuados em curtos intervalos de tempo. Segundo Melo (2003), esse teor de material orgânico, no momento da hidrólise, é transformado em compostos de menor peso molecular, que são lixiviados nos momentos de drenagem no aterro, contribuindo para reduções de volume.

O fato dos lisímetros L2 e L3 terem maior percentual de orgânicos, esse comportamento de redução da massa pode ter acontecido em uma maior intensidade. Para os recalques imediatos e iniciais, existe uma parcela em que pode ou não ocorrer o desenvolvimento da poropressão. Passados os recalques imediatos e iniciais nos primeiros meses, as compressões do maciço vão se intensificando devido à decomposição da parcela orgânica (SOWERS, 1973).

A fase 3 dos recalques, mostrada na Figura 14, correspondente à fase de biodegradação, em que a massa sólida começa a ser convertida em produtos líquidos. Nesta fase, enquanto os recalques acontecem, são gerados lixiviados que podem ser apenas do resíduo do lisímetro, ou podem conter uma parcela da água das chuvas locais. A degradação da matéria existente nos 3 lisímetros é muito influenciada por processos físico-químicos, que acontecem na massa de RSU. Por isso é tão importante o estudo dos parâmetros físico-químicos do percolado que é gerado, tendo em vista que os resultados são indicativos de aceleração ou inibição de remoção da matéria orgânica.

Os resultados dos parâmetros físico-químicos do lixiviado foram importantes, para fazer uma correlação com o comportamento dos recalques ao longo do tempo, tendo em vista que a massa de resíduos não permaneceu estável, devido à acomodação das partículas do RSU, e conseqüentemente do solo de cobertura intermediária. Essa acomodação é consequência das interações químicas e biológicas dos componentes que existem no lixiviado, da concentração e diluição de contaminantes, da influência da infiltração da água pela precipitação, da própria percolação do lixiviado no interior dos lisímetros, da formação de gases que se movimentam entre as partículas; tal qual como ocorre nos aterros (OLIVIER; GOURC, 2007; GRISOLIA; NAPOLEONI, 1996; ALCÂNTARA, 2007).

4. Considerações finais

Os recalques dos lisímetros preenchidos com RSO foram maiores, quando comparados aos recalques do lisímetro preenchido com RSU. O lisímetro L2 (recirculado) apresentou maiores valores de recalques que o L3, em alguns períodos, indicando que a recirculação contribuiu para manter um ambiente úmido e favorável à degradação pelos microrganismos. A recirculação, em L2, também contribuiu para uma alta carga de nutrientes nas amostras de lixiviado, isso foi observado nos altos valores de Dqo, em boa parte dos meses monitorados.

O solo de cobertura utilizado no preenchimentos dos lisímetros, por ter sido coletado de uma camada intermediária, representou uma situação da fase construtiva de um aterro sanitário. Além disso, a alta permeabilidade da camada de solo, em torno de 10^{-3} cm/s, que estava sobre os resíduos, conferiu maior dissolução dos sais em meio aquoso. Os resultados de sais de cloreto (Cl^{-1}) apresentaram acúmulos no lisímetro L2, que teve recirculação de lixiviado. Os valores de pH do

lisímetro L2 (recirculado) demonstram-se menores que os valores de pH dos lisímetros L1 e L3, evidenciando que a recirculação também provocou uma acidificação do meio.

Os lisímetros L1 e L3, ambos de composições diferentes, o primeiro de RSU e o segundo de RSO, apresentaram decréscimos de valores de Dqo, já para o lisímetro L2 (recirculado) os valores de Dqo mostravam-se sempre elevados. Há um indicativo, nesta pesquisa, que a recirculação não contribuiu para a diminuição de Dqo, mas contribuiu para deixar o ambiente mais concentrado com sais do tipo cloretos que influenciaram diretamente no aumento da condutividade elétrica do lixiviado no lisímetro L2 (recirculado).

A camada de solo de cobertura intermediária apresentou grau de compactação equivalente a 95% do Proctor Normal, com peso específico seco de 18,2 kN/m³ obtido em campo, e peso específico seco de 19,1 kN/m³ obtido em laboratório. Isso é um indicativo de que a camada de cobertura intermediária teve uma compactação eficiente em campo, mesmo sendo um fator que não é devidamente controlado na rotina de muitos aterros sanitários.

Agradecimentos

À Funcap, pelo apoio financeiro, ao ASMOC e à Associação de Catadores do Jangurussu, pela imensa contribuição nesta pesquisa.

Referências

- ALCÂNTARA, P.B. *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. 2007. 366 f. Tese (Doutorado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 Ed, Washington, DC, USA, 1998. 1220p.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22nd ed.), Amer Public Health Ass, Washington, DC, USA (2012).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6457: Amostras de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181: Solo: Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459: Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 13292: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante*. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 13p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9813: Determinação da massa específica aparente in situ, com o emprego do cilindro de cravação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7182: Solo: Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 9p.
- Bareither, C.A. *et al.* Deer Track Bioreactor Experiment Field-Scale: Evaluation of Municipal Solid Waste Bioreactor Performance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 138, n. 6, p. 658-670, 2012.
- Boskov, M. E. G. *Geotecnia Ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.
- CARVALHO, M. de F. *Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos*. 1999. 330 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), 1999.

- CARVALHO, A.L. de. *Efeitos da recirculação do percolado sobre a qualidade do efluente de lixo doméstico de diferentes idades*. 2005.176f. Tese (Doutorado em Ciências), Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- CATAPRETA, C. A. A. *Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação*. 2008. 316 f. Tese (Doutorado em Saneamento), Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte, 2008.
- CINTRA, I.S. *Estudo da influência da recirculação de chorume cru e chorume inoculado na aceleração do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos*. 2003. 352 f. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- DA SILVA, A. K. M. da. *Estudo do comportamento dos resíduos sólidos urbanos (rsu) em lisímetros preenchidos com resíduos de diferentes características*. 2013. 203 f. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental). Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- Grisolia, M. *et al.* Geotechnical behaviour of sanitary landfill based on laboratory and in situ test. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID WASTE MANAGEMENT AND SECONDARY MATERIALS, 7, 1992, Torino. *Proceedings...Italy*, 1992.
- Grisolia, M.; Napoleoni, Q. Geotechnical characterization of municipal solid waste: Choice of design parameters. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 2., 1996, Osaka. *Proceedings... Osaka*, 641-646, 1996.
- Guedes, D. A. S. *et al.* Estudo comparativo do balanço hídrico em lisímetro com o o método suíço. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. *Anais...Florianópolis*: ABRH, 2017.
- Guedes, M.J.F. *et al.* Evolução do processo biodegradativo em lisímetros com diferentes composições de resíduos sólidos urbanos. *Revista DAE*, São Paulo, v. 69, p. 105-118, 2021.
- LINS, E.A.M. *A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no Aterro da Muribeca*. 2003. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.
- MELO, M. C. de. Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro deresíduos sólidos da Muribeca. 2003. 127f. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.
- Melo, M.C de. *et al.* Deformação vertical dos resíduos sólidos urbanos emu ma célula experimental em função da composição gravimétrica e volumétrica dos materiais. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 21, n.12, p. 450-460, 2016.
- O'LEARY, P. R.; TCHOBANOGLIOUS, G. Landfilling. In: TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. (org.). *Solid Waste Management*. New York: McGraw Hill Education, 2002. p.669-761.
- Oliveira, E. C. *et al.* Estudo de recalques em lisímetro experimental. In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 3., 2016, Brasília- DF. *Anais... Brasília*, 2016, p. 19-26.
- Olivier, F.; Gourc, J. P. Hydro-mechanical behavior of municipal solid waste subject to leachate recirculation in a large-scale compression reactor cell. *Waste Management*. 2007, v. 1, p. 44–58.
- PINTO, D. M. L. *Avaliação da Biodegradabilidade da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Domésticos*. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2000.
- Sperling, M.V. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996. 211p.
- Santos, G.O.; Matos, B. de O. Estudo do processo de degradação de resíduos sólidos orgânicos (restos de alimentos) em lisímetros de pequeno porte. *Conexões Ciência e Tecnologia*, Fortaleza, v.11, n. 4, p. 26-36, 2017.

Seok, J.Y.; Soo, J.Y. Assessment of waste settlement models based on the long-term settlement data measured at a multi-stage MSW landfill in Korea. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 24, 2328-2340, 2022.

Souto, G.D.; Polivinelli, J. Características do lixiviado de aterros sanitários no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA, 24., 2007, Belo Horizonte. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES, p 1-22.

Sowers, G.F. Settlement of waste disposal fills. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8., 1973, Moscow. *Proceedings...* [S.1: s.n.], 1973, v.22, p. 207-210.

Worrel, W.A.; Vesilind, P.A. *Solid Waste Engineering*. 2 ed. Cengage Learning, Stamford, 2012.

Zanetti, M.C. Aerobic Bioestabilization of Old MSW landfills. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 1, n. 4, p. 393-398, 2008.